

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU
Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma
Lentokonetekniikka

OPINNÄYTETYÖ

Teemu Kivinen

**SIIVEN PRIMÄÄRIKOMPOSIITTIOSAN
VALMISTUSTOLERANSSITARKASTELU**

Työn ohjaaja
Työ teettäjä
Tampere 2010

DI Simo Marjamäki
Patria Aerostructures Oy, valvojana DI Juha Halme

Kivinen, Teemu
Opinnäytetyö
Työn ohjaaja
Työn teettäjä
Toukokuu 2010

Siiven primäärikomposiittiosan valmistustoleranssitarkastelu
82 sivua,
DI Simo Marjamäki
Patria Aerostructures Oy, valvojana DI Juha Halme

TIIVISTELMÄ

ALCAS-projekti (Advanced Low Cost Aircraft Structures) on tiettyjen Euroopan maiden yhteinen tuotekehitysprojekti matkustaja- ja liikesuihkukoneiden pääelementtien, kuten siiven ja rungon komposiittisten osien valmistukseen. Patria Aerostructures Oy on mukana kyseisessä tuotekehitysprojektissa valmistamalla kaksi siipikaarta ja niiden välisen moottorikannakkeen./3/

Opinnäytetyössä selvitetään valmistusprosessin eri vaiheissa syntyvien toleranssien vaikutus lopulliseen tuotetoleranssiin. Työssä selvitetään eri työvaiheissa vaikuttavia tekijöitä ja niiden vaikutusta tuotteeseen. Valmistettuun tuotteeseen suoritetaan mittaukset ja verrataan saatuja tuloksia määriteltyihin ohjearvoihin.

Tavoitteena on tutkia kussakin prosessissa aiheutuvia toleranssivirheitä ja niiden syitä. Syiden avulla voitaisiin kehittää tulevaisuudessa RTM-prosessisuunnittelua ja valmistusta.

Opinnäytetyössä havaittiin suurimpien virheiden aiheuttajiksi inhimilliset ja RTM-prosessin aiheuttamat virheet. Nämä virheet tiedostaen, voidaan tulevaisuudessa kehittää RTM-tekniikalla valmistettavia osia.

Kivinen, Teemu	Aircraft wing primary composite part tolerance review
Engineering Thesis	82 pages
Thesis Supervisor	Lecturer Simo Marjamäki (M.Sc)
Commission Company	Patria Aerostructures Inc, Supervisor Juha Halme (M.Sc)
May 2010	

ABSTRACT

ALCAS-project is the joint research and development project between certain countries of Europe to manufacture the main elements such as composite wing and air frames of commercial airliners and business jets. Patria is participating to the mentioned project by manufacturing two wing ribs and the engine pylon-rib. /3/

In this thesis, a study will be made to investigate the final effect of the tolerances occurring during the different phases of manufacturing. During the study, the different affecting factors and their effects to the tolerances will be determined. The finished products will be measured and the measurements will be compared to the pre-defined values.

The goal is to investigate occurring tolerance faults and their origins in order to develop the RTM process design and -manufacturing in the future.

In this thesis were found that most significant errors were occurred by human factor and RTM-process inaccuracy. In future RTM-produced parts can be developed by recognizing these errors.

ALKUSANAT

Patria Aerostructuresissa aloitin työni valmistussuunnittelija-harjoittelijana tammikuussa 2008. Pääosin toimin valmistussuunnittelijana eri projekteissa, ja ALCAS tuotekehitysprojektiin liityin mukaan keväällä 2008. Tutkintotyön tekemisen aloitin työn ohella, kun ALCAS projektin osien valmistus aloitettiin tammikuussa 2009.

Kiitokset kaikille Patria Aerostructuresissa työskenteleville, jotka ovat auttaneet opinnäytetyössäni. Erityiset kiitokset kuuluvat työni valvojalle Juha Halmeelle ja kyseisessä projektissa mukana olleille Veli-Matti Touruselle ja Arvid Van Daalen:lle. Kiitokset kuuluvat myös ohjaajalleni Simo Marjamäelle.

Tampereella kesäkuussa 2010

Teemu Kivinen

SISÄLLYSLUETTELO

1	Johdanto	7
2	Taustaa ALCAS:sta.....	8
3	Määritellyt kokonaistoleranssit.....	9
4	RTM-prosessin työvaiheet	13
5	Työvälineiden mittatarkkuus.....	17
1	Mittaus.....	18
2	Bestfit	19
6	Rib 7- työvälineiden tarkkuus	24
6.1	Yksittäiset työvälineet	24
6.2	Työvälineet suljettuina toisiaan vasten.....	29
7	Rib 8 työvälineiden tarkkuus	32
8	Rib 7 demonstraatio kaari	37
8.1	Rib 7 demo mittaustulokset.....	39
8.2	Koneistus ja koneistuskiinnittimet	47
8.3	Mittaustuloksia	53
9	Rib 7:n valmistus ja tulokset.....	55
9.1	Preformaus ja injektointi	55
9.2	Koneistus ja kokoonpano	60
9.3	Koneistusvirheet.....	61
9.4	Loppukokoonpano.....	65
9.5	Tulokset Rib 7:ssä	66
10	Rib 8:n valmistus	71
10.1	Preformaus ja injektointi	71
10.2	Koneistus ja kokoonpano	74
10.3	Tulokset Rib 8 siipikaarella.....	75
11	Johtopäätökset.....	80
	Lähteet.....	82

LYHENTEET

RTM = Resin Transfer Moulding = hartsi siirrolla tapahtuva komposiittiosan valmistusmenetelmä

NDT = Non destructive testing = ainetta rikkomaton testaus

AST = Patria Aerostructures

Demo= Demonstraatio siipikaari

Spring-back= takaisinjousto

Lay-up = kuitukerrosten asetteleminen paikoilleen

Prepreg = hartsia valmiiksi sisältävä lujite

C-Web = Siipikaaren päärakenneosaa

Foot = Siipikaaren irtolaippa

Prefromaus = RTM kappaleen lujitteiden muovaus lämmön avulla

1 Johdanto

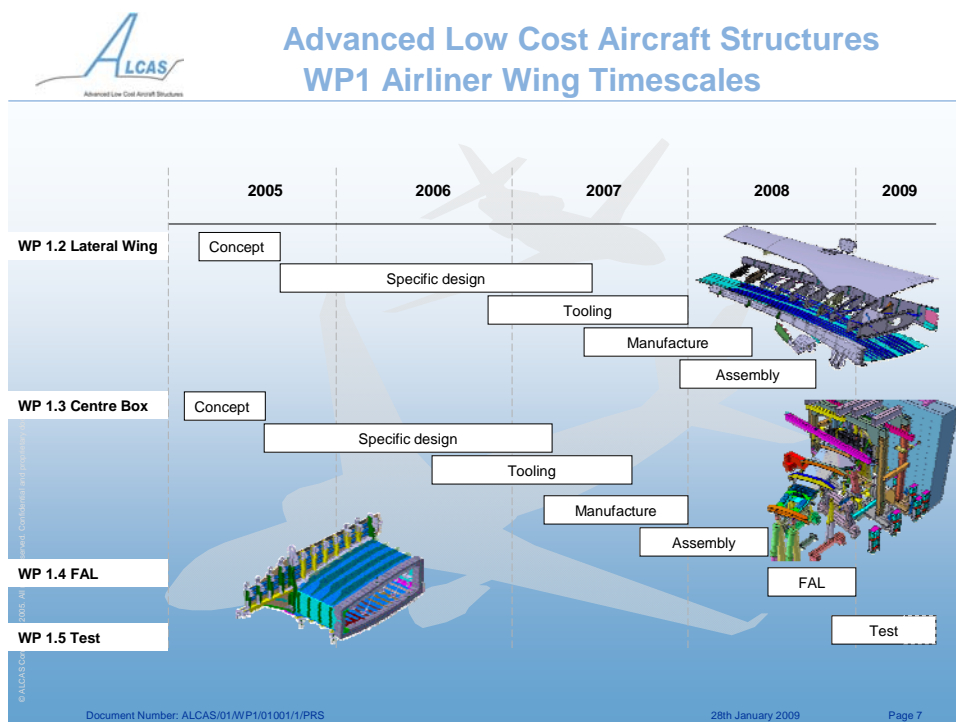
Tämä opinnäytetyö on tehty Patria Aerostructures Oy:lle (myöhemmin AST). AST suunnittelee ja valmistaa vaativia komposiittisia lentokone- ja avaruusrakenteita.

Työni tavoitteena on selvittää ja kerätä tietoa eri RTM-prosesseissa (Resin transfer moulding eli hartsisiirrolla tapahtuvakomposiittiosan valmistusmenetelmä) syntyvistä toleranssivirheistä ja tehdä tuloksista yhteenveto. Yhteenvedon on tarkoitus selventää, missä prosessin vaiheissa tuli ennalta odottamattomia toleranssivirheitä. Opinnäytetyössä selvitetään myös valmistusprosessin eri vaiheissa syntyvien toleranssien vaikutus lopulliseen tuotetoleranssiin. Tätä tietoa ja yhteenvetoa voitaisiin käyttää tulevaisuudessa arvioitaessa RTM prosessin toleransseja tulevilla projekteilla. Työn pohjana ovat ALCASista tehdyt Veli-Matti Tourusen ja Petri Mäkelän tutkintotyöt, joille tämä opinnäytetyö on jatkoa.

ALCAS projekti on tiettyjen Euroopan maiden yhteinen tuotekehitysprojekti matkustaja- ja liikesuihkukoneiden pääelementtien, kuten siiven ja rungon komposiittisten osien valmistukseen. Patria Aerostructures Oy on mukana kyseisessä tuotekehitysprojektissa valmistamalla kaksi siipikaarta ja niiden välisen moottorikannakkeen. /2/

2 Taustaa ALCAS:sta

ALCAS on vuonna 2005 aloitettu tuotekehitysprojekti, jossa työpaketissa WP1 suunnitellaan ja valmistellaan matkustajalentokoneen siiven sisäsiipi. Materiaaleina käytetään erilaisilla valmistusmenetelmillä valmistettuja komposiitti- ja metalliosia. ALCASin suunnittelu aloitettiin 2005 konseptisuunnitteluvaiheella A, jossa määritettiin ja tutkittiin peruslinjoja, uusia materiaaleja, valmistusmenetelmiä ja reunaehtoja suunnittelulle. Tämän jälkeen oli tarkempi suunnitteluvaihe B, jossa päätettiin materiaalit ja kaarten konsepti. Suunnitteluvaiheessa C luotiin lopulliset kaarimallit sisältäen yksityiskohtaisen suunnittelun. Tämän jälkeen seurasi työvälinemallien suunnittelu ja työvälaineiden valmistus, minkä jälkeen päästäisiin itse osien valmistukseen. Itse liityin mukaan projektiin Patrialla osien valmistusvaiheeseen toukokuussa 2008, jolloin osien valmistussuunnittelua oltiin määrittelemässä ja toteuttamassa. Projektin osien tulisi olla valmiita 2008 lopussa ja lähetettynä asiakkaalle (Airbus UK) siiven kokoonpanoa ja edelleen täysikokoisen siiven testausta varten./1/ /3/



Kuva 1. ALCAS aikataulu

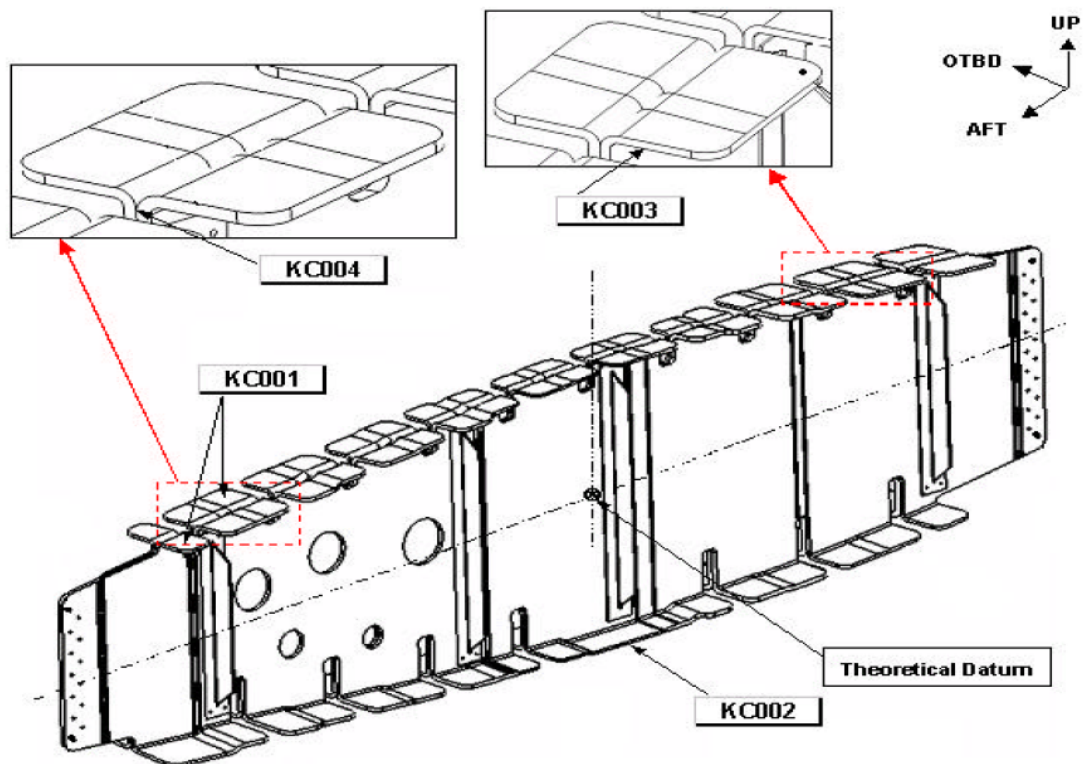
3 Määritellyt kokonaistoleranssit

Projektin suunnitteluvaiheessa määriteltiin toleranssirajat osalle, jotta valmistuksessa vaadittavat tarkkuudet saadaan määriteltyä ja kokoonpano voidaan suorittaa ilman ongelmia. Siipikaarien eri alueiden toleranssit jaoteltiin ja näille alueille määritettiin mittatoleranssit, joiden sisällä osan pitää pysyä. Nämä toleranssit antavat määritelmän jatkossa siipikaaren eri osien ja työvaiheiden toleransseille. Seuraavassa taulukossa ja kuvassa 2, 3 ja 4 on määritelty siipikaaren toleranssit kaaren eri alueilla. /6/

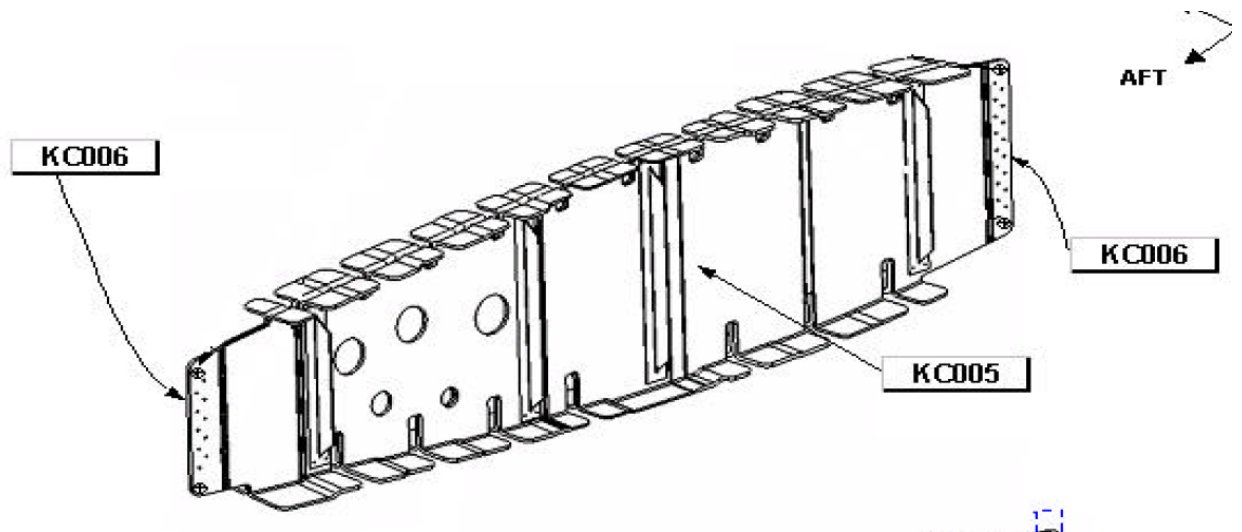
Siipikaari on jaettu kahdeksaan osaan, joille jokaiselle on määritelty toleranssivaatimus. Alue 1 (KC001) on irtolaipan (foot) yläpinnan 2 ensimmäisen taso-osion taka- ja etulaipan pinnanmuototarkkuus niin ylä- ja alairtolaipassa. Tämän tasomaisuusvaatimukseksi on määritelty $\pm 0,2$ mm (kuva 2). Alue 2 (KC002) on irtolaipan pinnan tasomaisuus $\pm 0,4$ mm vaatimus muualla kuin edellä mainituissa alueissa. Alue 3 (KC003) on irtolaippojen (foot) ja C-kaaren (C-Web) laippojen reunan pinnan toleranssileveysmitta $\pm 0,1$ mm (kuva 2). Alue 4 (KC004) on irtolaippojen tasomaisuusvaatimus $\pm 0,4$ mm C-kaaren (C-Web) ja irtolaippojen yhdyspinnassa (kuva 2). Alue 5 (KC005) on kokoonpannun siiven tasomaisuusvaatimus $\pm 1,0$ mm (kuva 3). Alue 6 (KC006) on siipikaaren päätyjen reunaprofiilin toleranssi vaatimus $\pm 0,1$ mm (kuva 3). Alue 7 on siipikaaren etu ja takasalon kiinnityspinnan tasomaisuus vaatimus $\pm 1,0$ mm (kuva 4). Alue 8 on siipikaarien ja moottorinkannakkeen (Pylon-rib) kiinnityspinnan tasomaisuusvaatimus $\pm 0,4$ mm (kuva 4).

Taulukko 1. Siipikaaren toleranssimäärittely. /6/

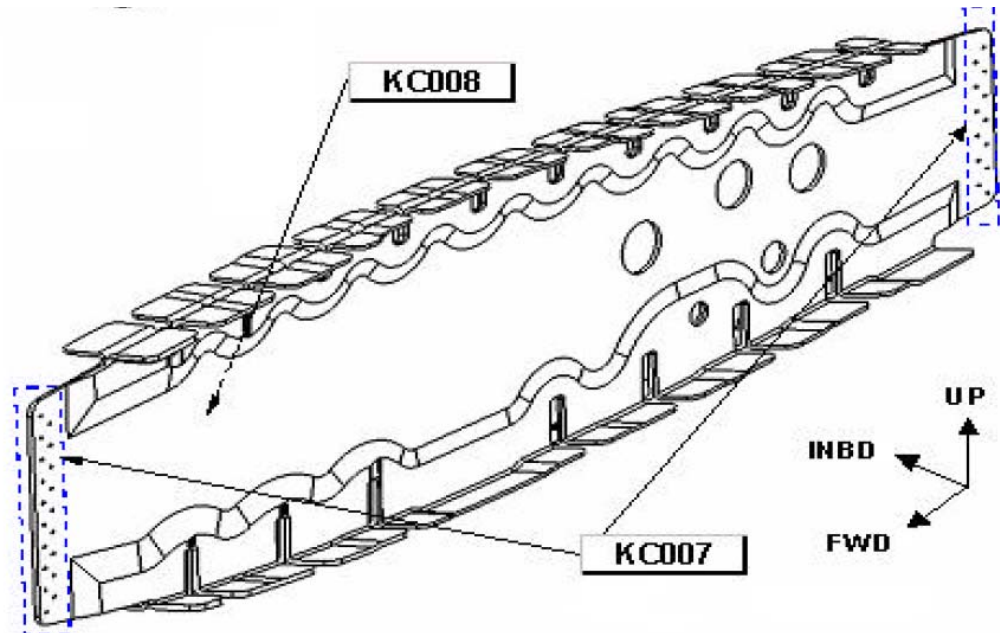
Key Characteristics			
Item	Description	Applied Tolerance	Comments
Inboard Panel			
KC001	Foot Surface Profile (8 places, first 2 feet at each corner)	SP 0.2 A B C	
KC002	Foot Surface Profile (All intermediate feet)	SP 0.4 A B C	
KC003	Rib foot edge surface profile	SP 1.0 A B C	
KC004	Rib web to rib foot interface surface flatness (4 places – moveable feet, Outbd side of rib web ONLY)	SPF 0.4 A B C	
KC005	Rib web flatness	SPF 1.0 A B C	
KC006	Rib edge profile	SP 1.0 A B C	
KC007	Front & rear spar rib post interface surface flatness zones	SPF 1.0 A B C	
KC008	Wing box rib to Pylon Rib interface surface flatness zone	SPF 0.4 A B C	



Kuva 2. Siipikaaren toleranssialueita määrittelevä kuva. /6/



Kuva 3. Siipikaaren toleranssialueita määrittelevä kuva. /6/

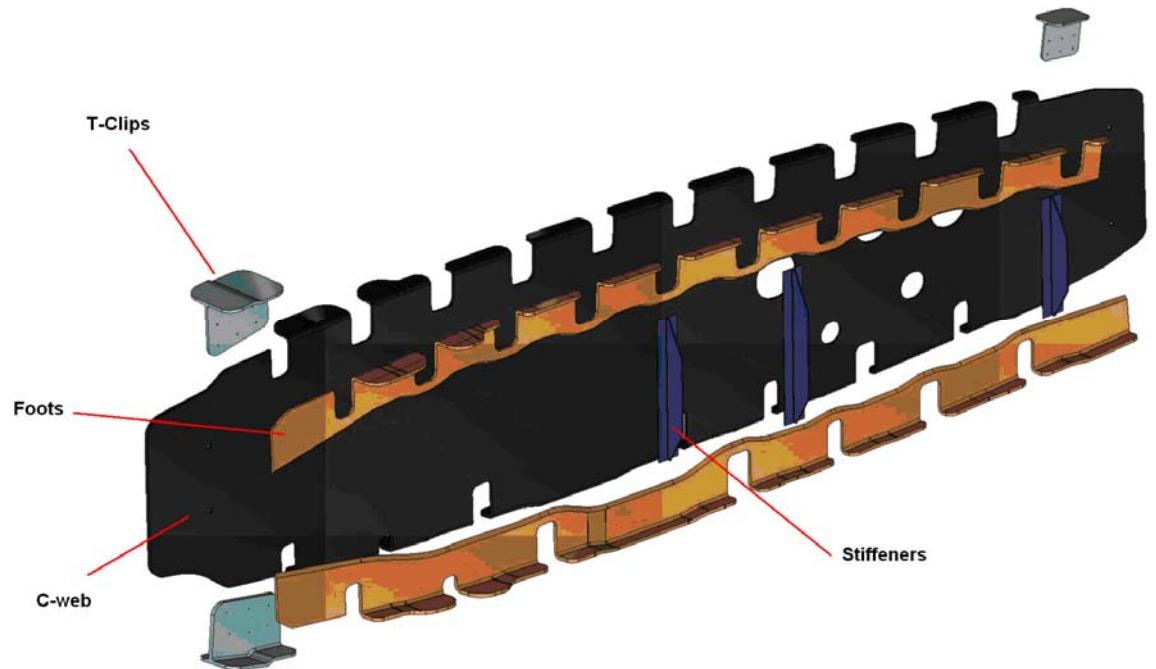


Kuva 4. Siipikaaren toleranssialueita määrittelevä kuva. /6/

Siipikaari koostuu seuraavista osista: Rib C-web, Rib foots, T-clips ja Striffeners.

Siipikaaren pääelementit ovat C-Web ja Foots. Kummatkin osat tehdään RTM-tekniikalla hiilikuidusta ja epoksi-hartsista. Osien kokoonpano toteutetaan liimaamalla sekä mekaanisena pulttiliitoksena. Tämä alikokoonpano muodostaa perusrakenteen siipikaarelle. Stiffenerit asennetaan liimaamalla, estämään kaaren lommahdus antamalla jäykkyyttä kaaren uumalle. T-Clipit asennetaan väliaikaisella pulttiliitoksella ja lopullisesti vasta Airbus UK:lla siiven loppukokoonpanossa.

C-Web ja Fools kovetetaan kumpikin omalla muotillaan. Kovetuksen jälkeen osat trimmataan siten, että C-kaareen koneistetaan työkalureiät ja reiät foottien asennusta varten sekä footit koneistetaan erilleen muodostaen siipikaaren ylä- ja alalaipan.



Kuva 5. Siipikaaren osat.

4 RTM-prosessin työvaiheet

RTM-prosessi eroaa prepreglaminoinnista ainoastaan vain preformauksen ja RTM-injektoinnin osalta, jossa hartsi injektoidaan tuotteeseen. Muuten valmistustapa on sama, sisältäen laminoinnin, kovetuksen, viimeistelyn, ainetta rikkomattoman tarkastuksen, koneistuksen ja lopputarkastuksen.

Laminointivaiheessa kuivat kuidut ensin leikataan halutun kuitusuunnan mukaan haluttuihin muotoihin yleensä automatisoidulla leikkurilla. Leikkausvaiheessa kuidut numeroidaan, jotta asennettaessa tiedetään laittaa oikea kuitukerros oikeassa järjestyksessä. Kuidut pinotaan oikeassa järjestyksessä käyttäen apuna laserprojektoria. Laserprojektorilla näyttää millimetrien tarkkuudella kuidun oikean paikan. ALCAS-projektissa käytettiin pinkan alustana pöytälevyä, johon oli asennettu tefloniset ohjaustapit. Nämä tapit toimivat kohdistinpisteinä, kun pinottu pinkka haluttiin asettaa muottiin. Näin kuitupinkka kohdistuu muottiin oikeaan paikkaan. Pinoamisen jälkeen pinkan kuidut kiinnitetään toisiinsa käyttäen hyväksi lämpöä ja painetta. Kuiduissa olevat muovikiteet ”Binder kiteet” kiinnittyvät toisiinsa ja muodostavat pitävän liitoksen toisiinsa, jolloin kuitusuunnat eivät pääse muuttumaan. Tähän työvaiheeseen voidaan käyttää erilaisia menetelmiä, meillä käytössä oli silitysraudat. Silitysrauta ja kuitupinkka oli suojattu teflonkankaalla, jolloin kuidut eivät tarttuisi toisiinsa kiinni.

RTM- prosessityövaiheessa pinottu kuitupinkka siirretään muottiin preformausta varten. Kohdistus tapahtuu edellä mainituissa teflonisilla kohdistintapeilla. Kuitujen muottiin siirron jälkeen poistetaan ylimääräiset kuidut reunoilta, mikäli sellaisia havaitaan. Tämän jälkeen muotti suljetaan ja lämmitetään preformauslämpöön 75°C . Preformauksen jälkeen voidaan suorittaa injektointi. Sulatettu hartsi siirretään injektointiastiaan ja lämmitetään injektointilämpöön noin 85°C .

Muotti tulee lämmittää ennen injektointia 135°C asteeseen. Kun lämpötila on saavutettu, voidaan aloittaa injektointi ja lisätä painetta injektointiastiaan. Paineen tulee injektoinnin aikana olla 2 - 3 bar. Injektointia suoritetaan, kunnes muotin

vuodatusrei'istä vuodatettu hartsi on ilmatonta. Kun hartsi on ilmatonta, suljetaan vuodatusreiät ja nostetaan injektointipaine 5 bariin. Samalla nostetaan muotin lämpö kovetuslämpöön. Kovetus suoritettiin kahdella pitovaiheella ensimmäisen ollessa 160 °C:ssa kaksi tuntia, minkä jälkeen lämpötila nostetaan 180 °C:een tunniksi, jolloin kaari jälkikovettuu. Tämän jälkeen suoritetaan jäähdytys, minkä jälkeen osa on kovettunut muotoonsa.

RTM-prosessityövaiheen jälkeen osalle suoritetaan NDT-tarkastus (ainetta rikkomaton tarkastus). Tarkastuksessa pyritään määrittämään RTM-prosessin onnistuminen. NDT-tarkastuksessa nähdään mahdolliset huokoiset kohdat, ylimääräiset aineet, joita prosessissa on voinut tulla osaan.

NDT-tarkastuksen jälkeen osa mittatarkastetaan. Tarkastus suoritetaan Laser tracker-mittalaitteella. Mittauksessa tarkastetaan osan muoto, jota verrataan kappaleen 3D-malliin.

Vnro	Työvaihe	Työvaiheen nimi
10	LAMINOINTI	LAMINOINTI
20	RTM	RTM-prosessityö
30	TRIMMAUS	VIIMEISTELY/TRIMMAUS
40	NDT-UT	NDT-UT-TARKASTUS
50	TARKASTUS	TARKASTUS
60	5D-KONEISTUS	5D-KONEISTUS
70	VIIMEISTELY	VIIMEISTELY
80	TARKASTUS	TARKASTUS

Kuva 6. C-web kaaren työvaiheet tuotannonohjausjärjestelmässä.

Työvaiheet, jotka vaikuttavat eniten osan toleransseihin, ovat RTM-prosessi koneistus- ja kokoonpanovaihe. RTM- prosessissa osa saa lopullisen pinnanmuotonsa, joten RTM-prosessiin vaikuttavat tekijät vaikuttavat myös lopullisen osan tarkkuuteen. Koneistus on toinen tarkkuuden määräävä työvaihe. Koneistuksessa osa saa halutut koneistettavat muotonsa, jolloin koneistus määrittelee lopullisen osan tarkkuuden. Kokoonpanossa kaksi edellä mainitut prosessit läpikäyneet osat liitetään toisiinsa, jolloin kahden osan tarkkuus yhdistetään ja saadaan lopullinen tarkkuus. Näitä prosessien aiheuttamia virheitä tullaan tutkimaan tässä lopputyössä.

Prosessin erinäiset tarkkuuteen vaikuttavat seikat on määritelty seuraavassa kuvassa (kuva 7). Niin C-kaaren muotille kuin laipan muotille on määritelty omat toleranssivaatimukset projektin alkuvaiheessa. Muottien toleranssiksi oli suunniteltu $\pm 0,1$ mm toleranssi, jotta kokoonpanon jälkeen vielä saavutettaisiin määritelty siipikaaren kokonaistoleranssi. Kyseessä ovat kumminkin suurikokoiset muotit, ja tätä toleranssia olisi hyvin vaikea saavuttaa, joten tämä toleranssi määriteltiin parhaaksi mahdolliseksi tavoitteeksi.

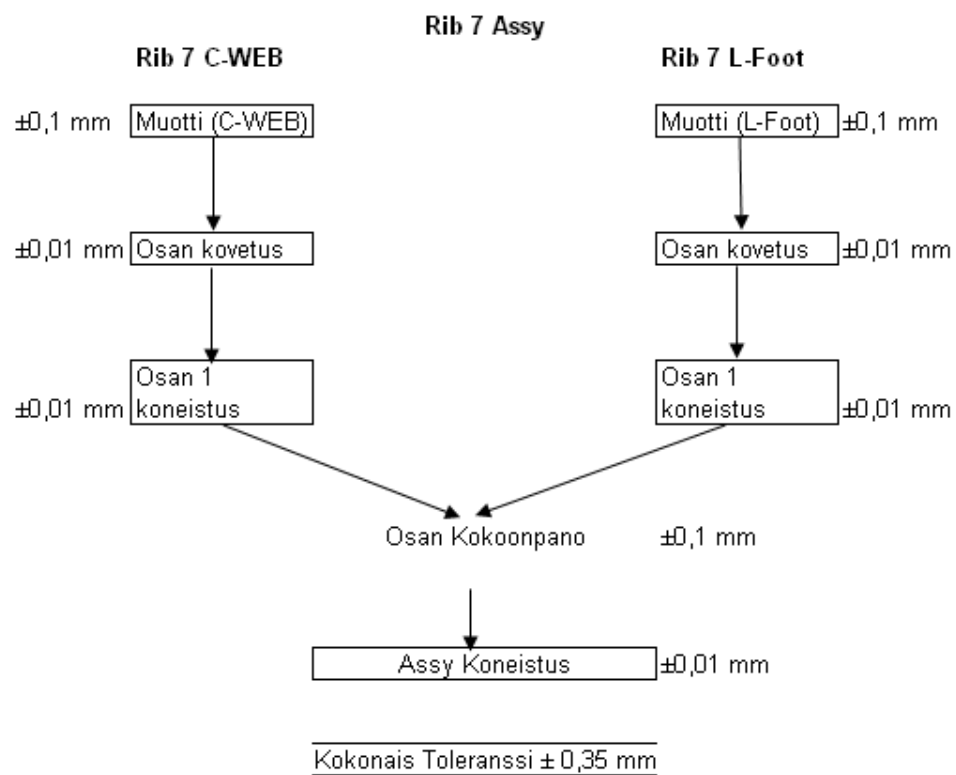
Osan kovetuksessa tapahtuvia muodonmuutoksia, jotka vaikuttaisivat toleranssiin, ei osattu odottaa. Alla olevaan kuvaa tämä toleranssi on kuitenkin lisätty, koska osan valmistuksen aikana huomattiin, että tässä vaiheessa tapahtuu muodon muutoksia jotka vaikuttavat osan toleranssitarkkuuteen. Tämän vuoksi kovetus on merkitty kuvaan vaikuttavaksi tekijäksi.

Osan ensimmäisessä koneistuksessa koneistetaan niin C-kaareen kuin Foot-kaariinkin kohdistusreiät. Näillä rei'illä osat kohdistetaan kokoonpanossa toisiinsa. Koneistuskeskuksen (Forestline) tarkkuuden AST:llä on todettu kokemus peräisesti olevan $\pm 0,01$ mm luokkaa. Tämän työvaiheen tarkkuus riippuu koneen tarkkuudesta, koneistajan nollapisteen asemoinnista ja koneistustyövälineestä. Oletetaan kuitenkin, että työväline ja koneistaja eivät vaikuta vaiheen tarkkuuteen, vaan se on sisällytetty koneen tarkkuuteen.

Kokoonpanossa kaarien liimauksessa tullaan käyttämään mahdollisimman yksinkertaista menetelmää kaarien liittämiseksi. Kaarien pituussuuntainen tarkkuus riippuu täysin ensimmäisen vaiheen koneistuksen tuottamista kohdistusrei'istä, joten koneistuksen tarkkuus on suoraan vaikuttamassa pituussuuntaiseen tarkkuuteen. Poikittaissuuntainen paikoitus eli laippojen pinnan tasomaisuus toisiinsa nähden (Foot ja C-web) kohdistetaan aputyövälineillä (Blokeilla), jotka näkyvät kuvassa 9. Tämä menetelmän tarkkuus riippuu ihan siitä miten tarkasti laipat saadaan kohdistettua aputyövälinettä vasten. Tämän vuoksi kokoonpanossa on vaikuttavia tekijöitä osien mittatarkkuuteen, ja tälle työvaiheelle on oletettu oma toleranssitarkkuutensa.

Toisessa koneistuksessa siipikaareen koneistetaan lopulliset muodot, läpiviennit ja pulttien reiät. Tämän työvaiheen tarkkuus riippuu samoista tekijöistä ensimmäisessä koneistustyövaiheessa.

Alla oleva kuva kuvaa osan tietyssä pisteessä määriteltyä kokonaistoleranssia. Tämän vuoksi tietyillä alueilla toleranssirajat voivat vaihdella, jolloin kustakin kohdasta tulee tehdä oma toleranssimääritelmänsä, eikä kyseistä kuvaa voida referoida jokaiseen paikkaan.



Kuva 7. Siipikaaren toleranssin muodostuminen tietyssä pisteessä.

5 Työvälineiden mittatarkkuus

ALCAS -projektin työvälineet on suunniteltu Patria AST:llä ja materiaalin tilaus, lämpökäsittelyt ja koneistus alihankittu Meteco Oy:ltä. ALCAS projektiin tarvittiin yhteensä neljä urostyövälinettä ja neljä naarastyövälinettä neljää RTM- osaa varten ja kaksi työvälinettä moottorin kannaketta varten.



Kuva 8. Rib 7 C-kaaren työvälineet (uros ja naaras).

Työvälineiden alkuperäiseksi toleranssiksi työvälineen muodolle määriteltiin aluksi $\pm 0,1$ mm johtuen tiukoista toleranssivaatimuksista lopulliselle osalle. Niiden tiedettiin olevan hyvin vaikeasti saavutettavissa tämän kokoluokan työvälineelle, joten lopulta tyydyttiin $\pm 0,2$ mm muototarkkuuteen ja pidettiin $\pm 0,1$ mm parhaana tavoitteena.. Muototoleranssi $\pm 0,2$ mm oli alun perin myös minimitoleranssivaatimus siipikaaren valmistuksen tasomaisuudessa. Vaatimus muuttui uuden Condition of supply-dokumentin päivityksen myötä /6/.

Kaikille työvälineille tehtiin vastaanottotarkastus, jossa työvälineille suoritettiin mittatarkastus. Mittatarkastus suoritettiin Laser trackerilla. Laser tracker mittalaitteen

toiminta ja tarkkuus on esitelty Veli- Matti Tourusen ALCASia koskevassa lopputyössä. Muoteista mitattiin ensin muoto, jakopintojen tasomaisuus ja muottien kohdistustappien paikat. Seuraavaksi mitattiin referenssipistetappien paikat, joita käytettiin referenssipisteinä mitattujen osien kohdistuksessa. /7/

Mittaustulokset ovat siirretty IGES -pistepilvenä Laser trackeriltä Exceliin ja sieltä edelleen pistepilvenä Catiaan, jossa mittaustulosta on verrattu suunnittelussa käytettyyn työkalun 3D-nominaalikoneistuspintaan manuaalisen best-fitin avulla. Raja-arvoiksi on laitettu muototoleranssille $\pm 0,2$ mm, nominaaliarvon ollessa 19,05 mm koska mittaus on suoritettu \varnothing 1.5 tuuman mittapallolla. Mittaustulokset on esitetty muodossa, kuinka moni mittauspiste on nominaali-arvossa prosentteina. Nominaalista poikkeavat arvot on kerätty mitta-arvotaulukkoon ja tämä tulos on pyritty havainnollistamaan vielä värejä hyväksikäyttäen muotissa. Mittausta käsitellään tarkemmin seuraavassa. /7/ /2/ /5/

5.1 Mittaus

Kaikki työvälineiden ja komposiittiosien mittaukset suoritettiin suurimmaksi osaksi Leica lasertracker mittauskoneella. Mittaus on suoritettu \varnothing 1.5 tuuman mittapallolla joka antaa osille nominaali mittausarvoksi 19,05 mm mitattavaan pintaan nähden. Mittaustulokset siirretään IGES-pistepilvenä Laser trackeriltä Excel:iin ja sieltä edelleen pistepilvenä Catia VR16-suunnitteluohjelmistoon. Kaikkien muottien ja osien 3D mallit on suunniteltu Catia VR16-ohjelmistolla. Mittaustuloksien käsittely on suoritettu Catiassa manuaalista bestfittiä käyttäen. /3/ /7/

Käsittelyssä mittaustulospilven muodostetaan X, Y, Z- akselisto samoin kuin osan 3D malliin on muodostettu. Tämän jälkeen tulospilven muodostetaan oma geometria, jota voidaan verrata 3D mallin geometriaan eli nominaaliarvoon.

5.2 Bestfit

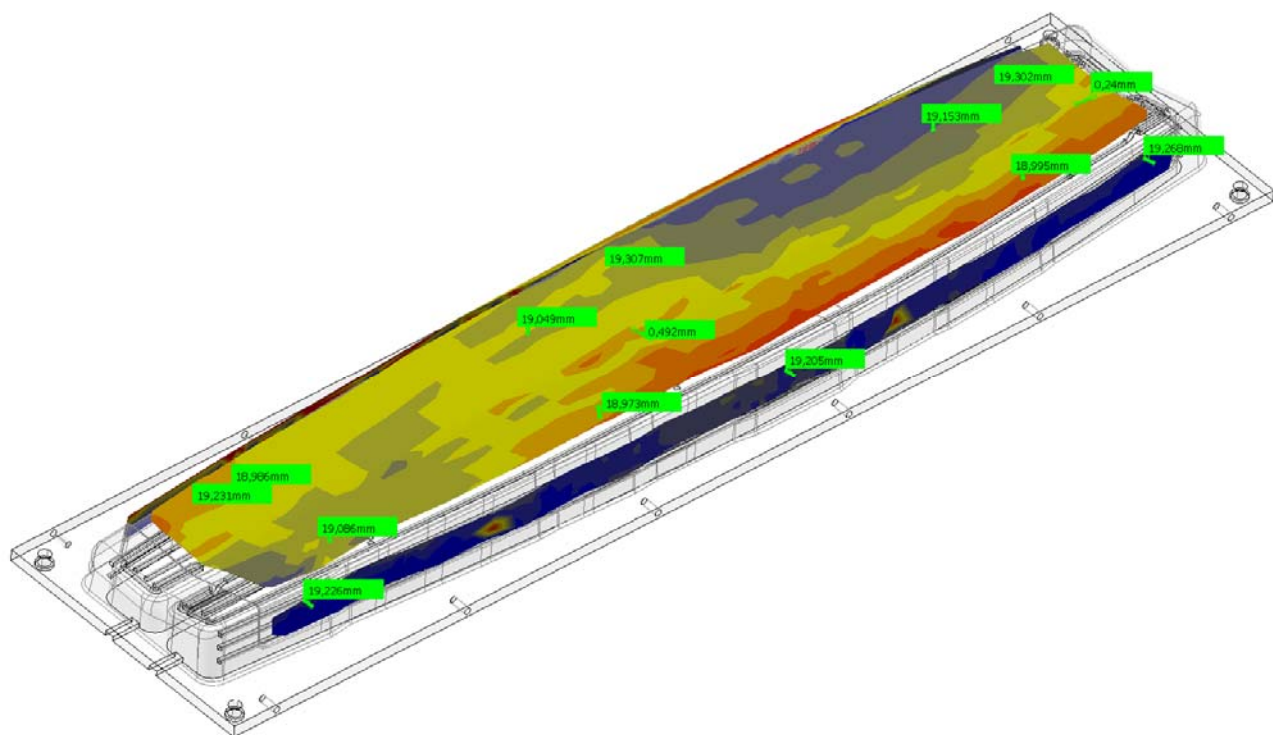
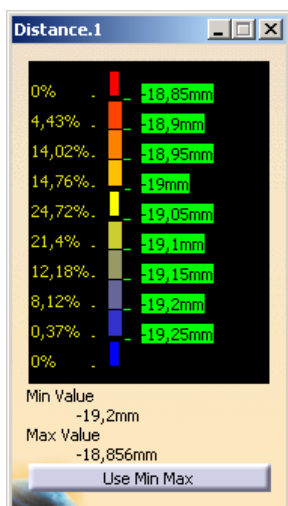
Bestfit eli mittausarvojen tarkastelussa käytettävä kohdistaminen suoritetaan manuaalisesti Catia ohjelmistossa. Siinä mittauksessa saatua mittapilvigeometriaa verrataan 3D-mallissa olevaan osan pintaan. Koska mittapilven pisteissä ei ole tarkkoja referenssipisteitä, joita voitaisiin suoraan verrata 3D-malliin, joudutaan mitattua geometriaa kohdistamaan manuaalisesti 3D-mallin suhteen. Tätä kohdistusta kutsutaan Bestfit:ksi. Mittatarkastelua tehdessä nominaaliarvo 3D-mallin suhteen on 19.05 mm. Tämä 19,05 mm on niin kutsuttu ”pinta”, johon mittaustulosta verrataan. Tämä 19,05 mm tulee 1,5 tuuman mittapallosta, jolla osat on mitattu (kuva alla). Mitatun osan pinnan ja 3D-mallin väliin siis jätetään tarkastelua varten kauttaaltaan 19,05 mm etäisyys, mikä johtuu mittapallon korkeudesta (kuva 9). /2/ /5/



Kuva 9. Kuva 1,5” mittapallosta.

Manuaalisesti tämän Bestfitin löytäminen tehtiin niin, että mittausgeometria tuotiin 3D-mallin päälle ja säädettiin manuaalisesti joka akselin suuntaan niin, että nominaaliarvon kummallakin puolella olisi yhtä paljon mittatuloksia (kuva 10). Toisin sanoen pyrittiin

löytämään mittatuloksen ja 3D-mallin keskiarvo. Tämän työn helpottamiseksi mittapisteiden poikkeama nominaalista korostettiin eri värein, jolloin visuaalisesti keskiarvon löytäminen olisi helpompaa.

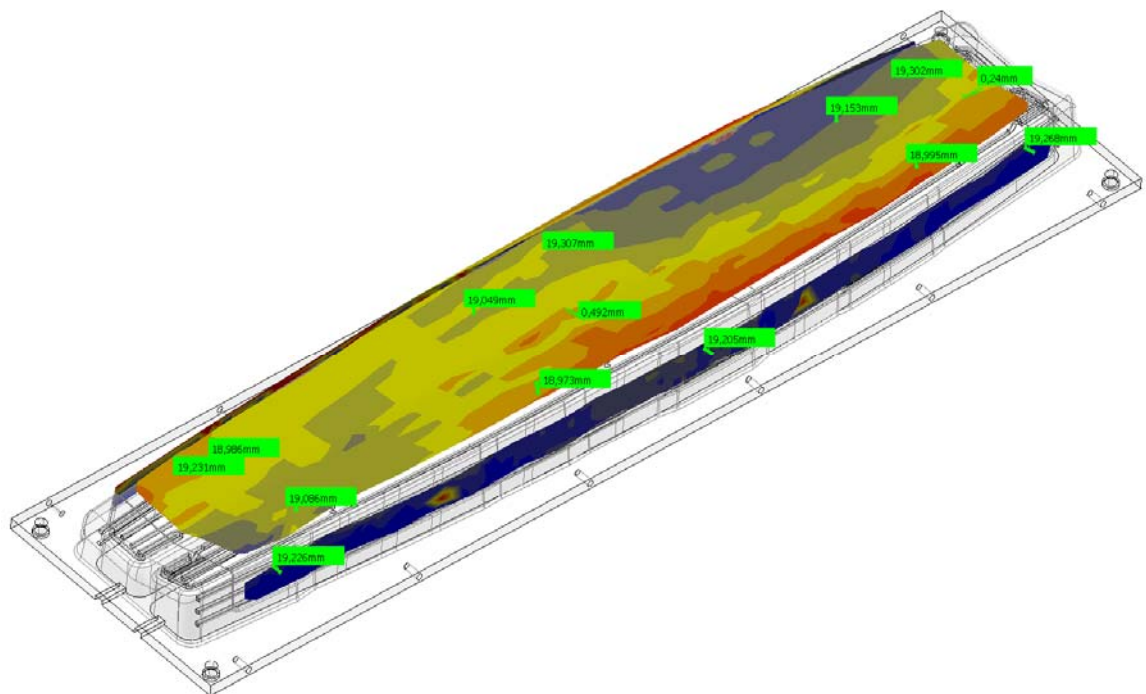
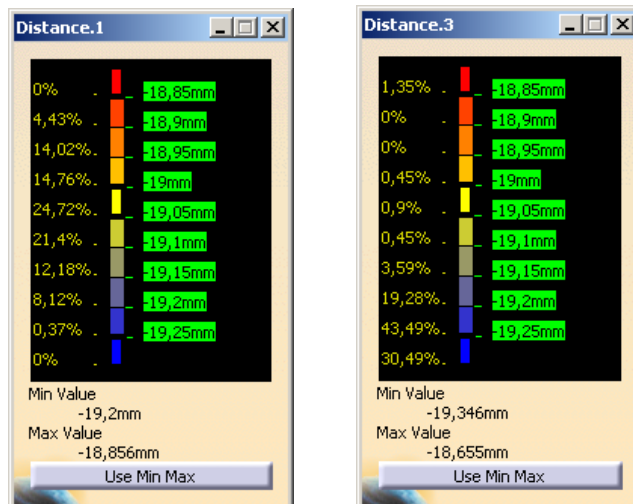


Kuva 10. Rib 7 foot (irtolaippa) -työvälineen mittaustulokset.

Esimerkkinä RIB 7-irtolaipan urosmuotti. Bestfitissä suurin osa mittapisteistä pyritään saamaan manuaalisesti säätämällä lähelle nominaaliarvo 19,05 mm:ä, jolloin geometriat

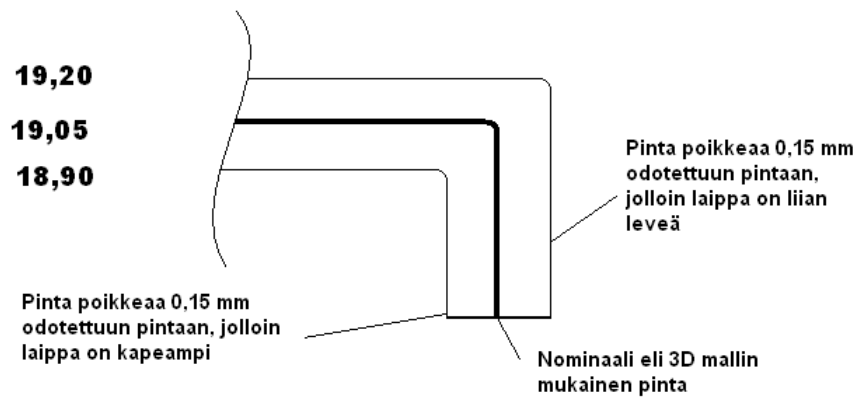
ovat kohdistettu akseleiden suhteen oikein. Kun tiedetään, että geometriatasot ovat samansuuntaiset, voidaan erotella mahdolliset pinnanmuotovirheet. Esimerkkinä seuraavassa kuvassa noin 25 % mittapisteistä on nominaalissa, jolloin tiedetään, että mittaustulos geometria on kohdistettu oikein 3D mallin suhteen. Nominaalin 19,05 värinä on keltainen, näin jo visuaalisesti voidaan huomata, että muotti on suurimmaksi osaksi nominaaliarvossa. Mikäli väri on sinistä, on muotin pinta hieman nominaaliarvosta poissa eli ”koholla”. Mikäli väri on oranssia tai punertavaa on muotin pinta nominaaliarvosta ”alempana”. Värejä käyttämällä saadaan referenssitaulukosta mittaheitot tietyillä alueilla. Kuvasta voidaan huomata, että tasoalue on hyvinkin lähellä nominaalia ja suuria heittoja ei esiinny. Laipan alueella voimme todeta väreistä ja mittataulukosta hieman suurempaa heittoa. Muotin laipat ovat pelkkää sinistä väriä, muutamaa kohtaa lukuun ottamatta. Sinisen värin kohdalla mittareferenssitaulukosta voidaan lukea mitta-arvoksi 19,20 mm. Näin voidaan päätellä, että jos mitattu piste sijaitsee 19,20 mm:ssä, on se silloin osan oletetun pinnan ulkopuolella. Kun taas mittapisteen ollessa 18,90 mm:ssä on se oletetun osan pinnan sisäpuolella (kuva11). Kun mittapiste on 19,05 mm, silloin se on 3D-mallissa oletetussa pinnassa. Toisin sanoen laipan reuna on liian leveä. Tämä johtaa osaa valmistettaessa siihen, että osan laipasta tulee oletettua ohuempi.

Muotin toleranssivaatimus oli $\pm 0,2$ mm, ja pyrkimys oli $\pm 0,1$ mm tarkkuuteen. Värejä ja taulukkoa tutkaillessa voimme huomata, että muotti on halutussa $\pm 0,2$ mm toleranssissa, ja noin 95 % mittapisteistä oli $\pm 0,1$ mm tarkkuudessa (kuva 11).



Kuva 11. Laipan reunan nominaaliarvon selvennys.

Laipan reuna



Kuva 12. Laipan reunan nominaaliarvon selvennys.

6 Rib 7- työvälineiden tarkkuus

6.1 Yksittäiset työvälineet

Rib 7 C-Web -naarastyöväline ei ole koneistuksessa Meteco Oy:ssä pysynyt halutussa $\pm 0,2$ mm toleranssissa, vaan ylitti hieman tämän arvon. Kuitenkin kaikki mittauspisteet olivat $\pm 0,22$ mm tarkkuudessa. Näistä 99% mittauspisteistä oli $\pm 0,20$ mm tarkkuudessa ja 80 % oli $\pm 0,1$ mm tarkkuudessa (kuva 13).

Urostyövälineen kaikki pisteet olivat vaaditun $\pm 0,2$ mm tarkkuudessa ja 95 % pisteistä oli $\pm 0,1$ mm tarkkuudessa (kuva 14).

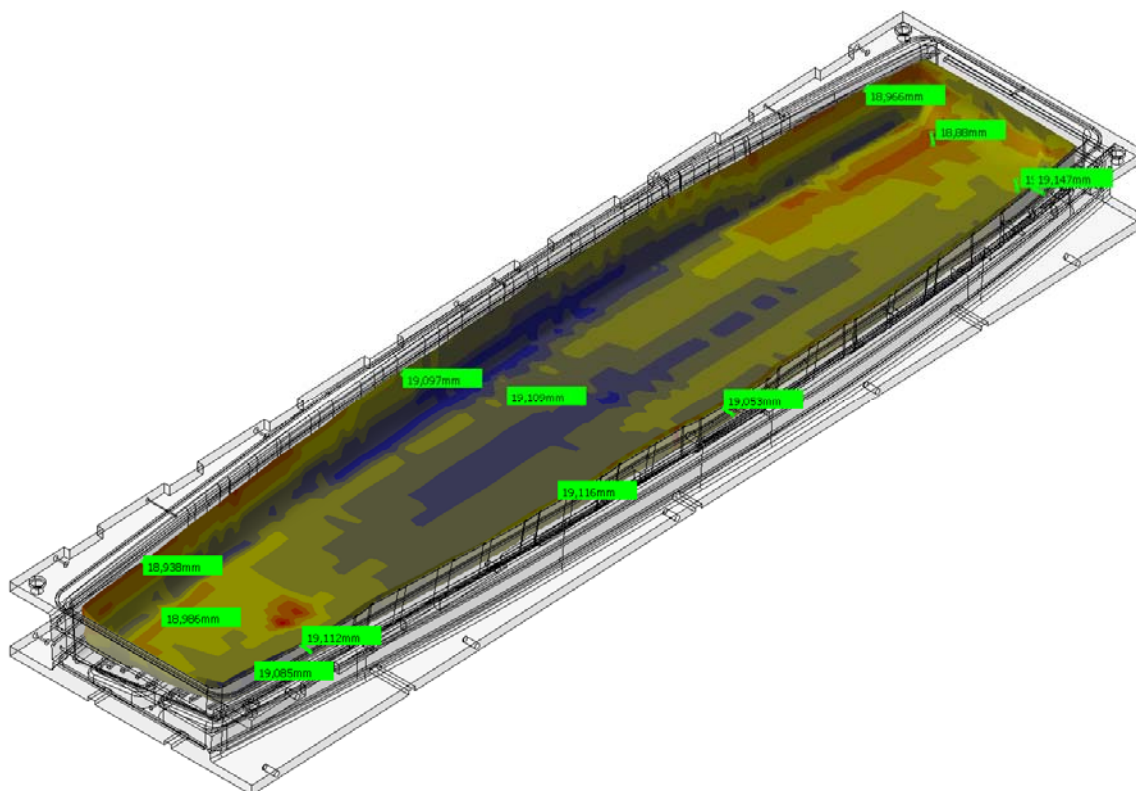
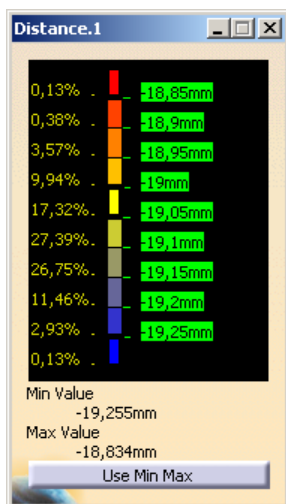
Rib 7 Foot -naarastyövälineen mittauspisteet olivat kaikki $-0,12$ mm ja $+0,68$ mm sisällä, ja kokonaisuudessaan 93 % mittauspisteistä oli tavoitellussa $\pm 0,1$ mm toleranssissa (kuva 15).

Suurimmat mittavirheet löytyivät Rib 7-irtolaippojen urosmuotista. Tasoalue on kaikkialta vaaditussa $\pm 0,2$ mm toleranssissa ja 70 % mittapisteistä on $\pm 0,1$ mm toleranssissa (kuva 16). Laipan alueella löytyi mittaheittoa $-0,39$ ja $+0,30$ väliltä, yhteensä $0,69$ mm. Tätä tutkittuamme huomasimme, että laipan alueet ovat pahimmillaan $-0,2$ mm pielessä, ja kokonaisuudessaan 93 prosentissa mittauspisteistä on yli $\pm 0,1$ mm heitto. Tämä tarkoittaa sitä, että laippa on noin $0,2 - 0,6$ mm liian leveä. Tämä aiheuttaa sen, että tuleva osa tulee olemaan $0,1 - 0,3$ mm kummaltakin laipalta odotettua ohuempi, mikäli naarastyöväline on halutuissa mitoissa.

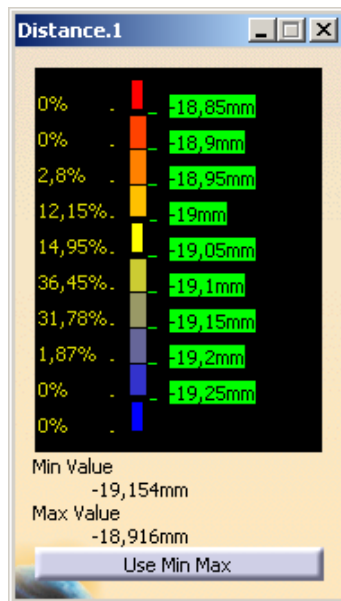
Valmistettavien osien kannalta naarasmuotin tarkkuus on tärkein, sillä se määrää siipikaaren ulkopintojen muodon. Tämä pinnanmuoto vaikuttaa irtolaipan liimauksen tarkkuuteen ja laippojen muotoon, ja sitä kautta osan tarkkuuteen. Naarastyövälineen pinnanmuoto kopioituu oikean osan ulkopuolen uumalle ja laipan ulkopinnalle. Liimauksessa uuman naarastyövälineen pinta tulee kaarien yhteiseksi pinnaksi. Samoin

naarastyövälineestä kopioitunut pinnan muoto kopioituu osan laipan ulkopinnaksi, ja näin tätä pintaa käytetään kohdistimena kun C-web ja Foot -kaaret liimataan toisiinsa.

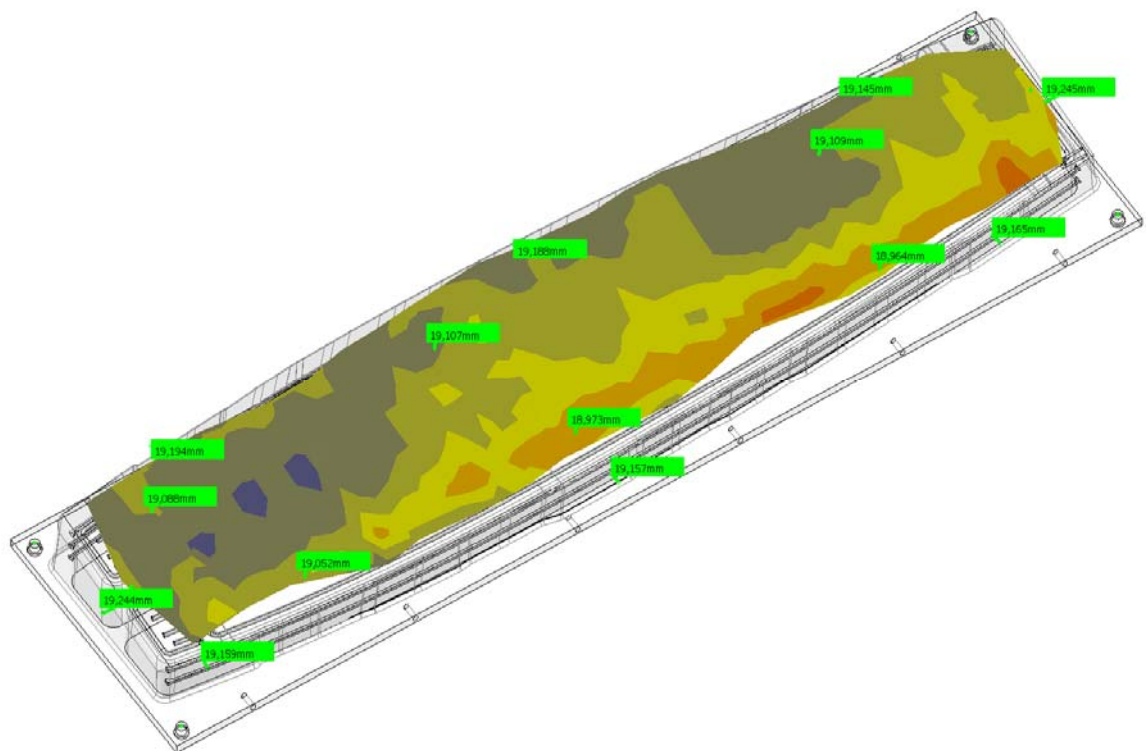
Pienistä virheistä huolimatta näin suurille muoteille kyseiset tarkkuudet olivat tarvittavan hyvät ($\pm 0,2$ mm), joten muotit hyväksyttiin käyttöön.



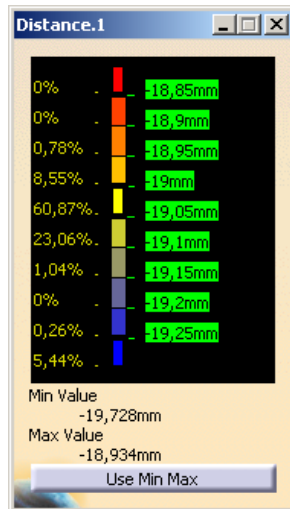
Kuva 13. Rib 7 C-Web -naarastyövälineen mittatulokset.



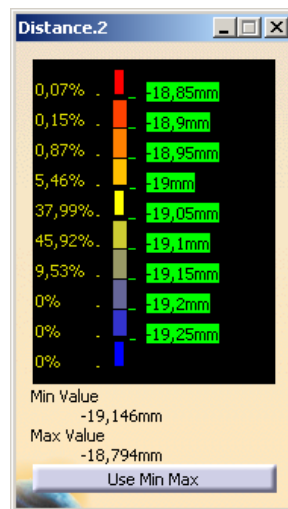
Web surface



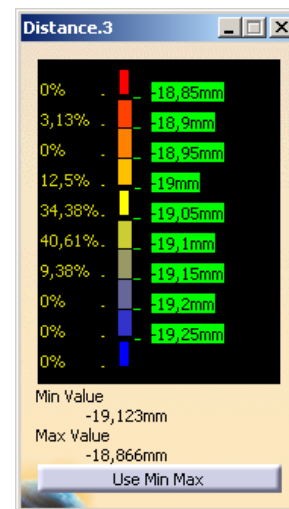
Kuva 14. Rib 7 C-web -urostyövälineen mittatulokset.



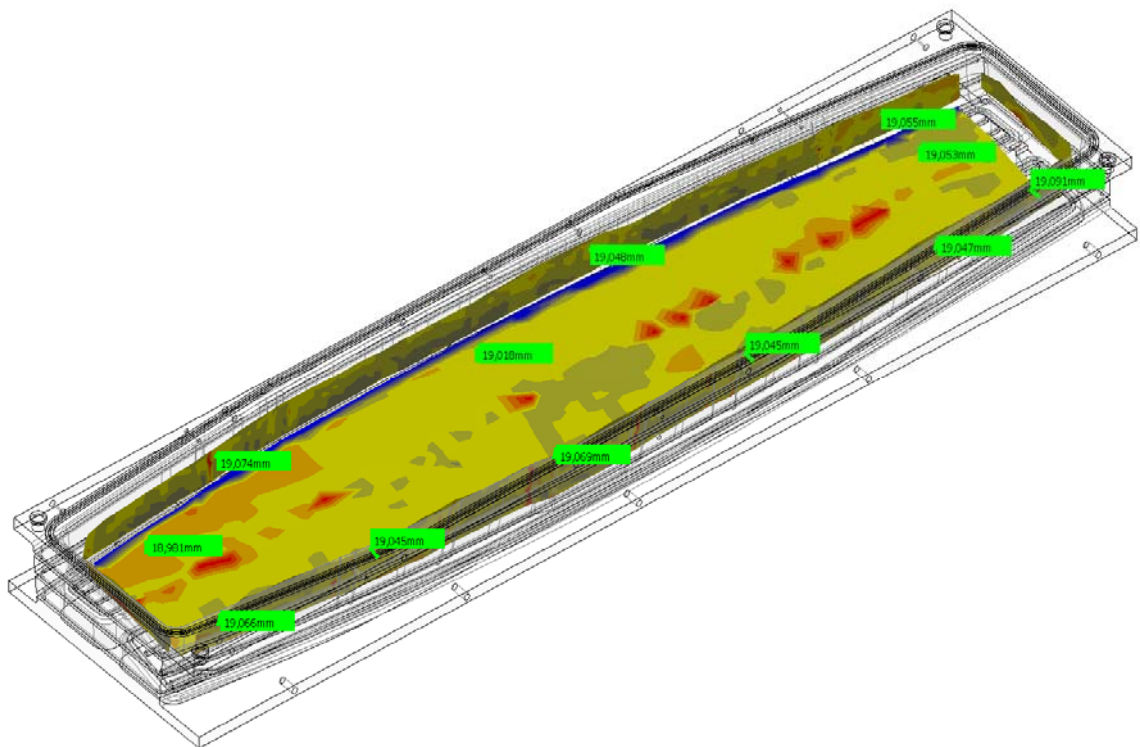
Web area



Flange area



Flange area



Kuva 15. Rib 7 Foot -naarastyövälineen mittatulokset.

6.2 Työvälineet suljettuina toisiaan vasten

Yksittäisten muottien analysoinnin jälkeen varmistettiin muottien toleranssissa pysyminen myös toisiinsa suljettuina. Muotit kohdistuvat toisiinsa neljän nurkissa olevien ohjaustappien avulla. Muottien ohjaustappien toleranssit olivat kaikki 0,03 – 0,305 mm tarkkuudessa. Naarastyövälineen ohjaintappien pienimmän heiton ollessa 0,129 mm ja suurimman heiton ollessa 0,305 mm, ja urostyövälineen pienimmän heiton ollessa 0,065 mm ja suurimman ollessa 0,196 mm kahden ja puolen metrin pituisen työvälineessä ei nähty toleranssiheittojen aiheuttavan haittaa kohdistuksessa tai muottien sulkeutumisessa. Työvälineiden toisiaan vasten tulevat tasopinnat mittatarkastettiin myös. Työvälineiden pintojen tasomaisuus naarastyövälineessä oli 0,03- 0,263 mm tarkkuudessa ja urostyövälineessä 0,039 - 0,123 mm. Tämän odotettiin riittävän meille sillä tasopintojen väliin oli koneistettu kaksi uraa silikonitiivistettä varten, jotka tulisivat tiivistämään viimeistään kohdistetut pinnat.

Todellisuudessa työvälineitä kokeiltaessa muotit istuivat hyvin toisiinsa ja tasopinnat istuivat toisiinsa täydellisesti. Injektointiprosessin aikana työvälineistä vain yksi vuoti prosessin aikana. Tähän syynä oli koneistettu ura, joka oli koneistettu noin 2 mm liian syväksi ja johti vuotoon.

Myös työvälineiden istuvuutta toisiinsa tarkasteltiin sijoittamalla työvälineiden mitatut geometriat toisiinsa, niin että vastinpinnat ja ohjaintapit loivat kohdistimena. Mittaustulokset voidaan todeta kuvasta 16. Kun kuvaa luetaan, voidaan tutkia vaalean keltaista aluetta, joka on kuvan 16 taulukon mukaan 33,612 mm paksu. Kun tämä mitta vähennetään kummankin muotin nominaalin (19,05 mm) yhteenlasketusta summasta (38,10 mm), jää jäljelle kyseisen alueen paksuus 4,488 mm.

Vaalen keltaisen alueen paksuus:

$$t = (19,05 \text{ mm} * 2) - 33,612 \text{ mm}$$

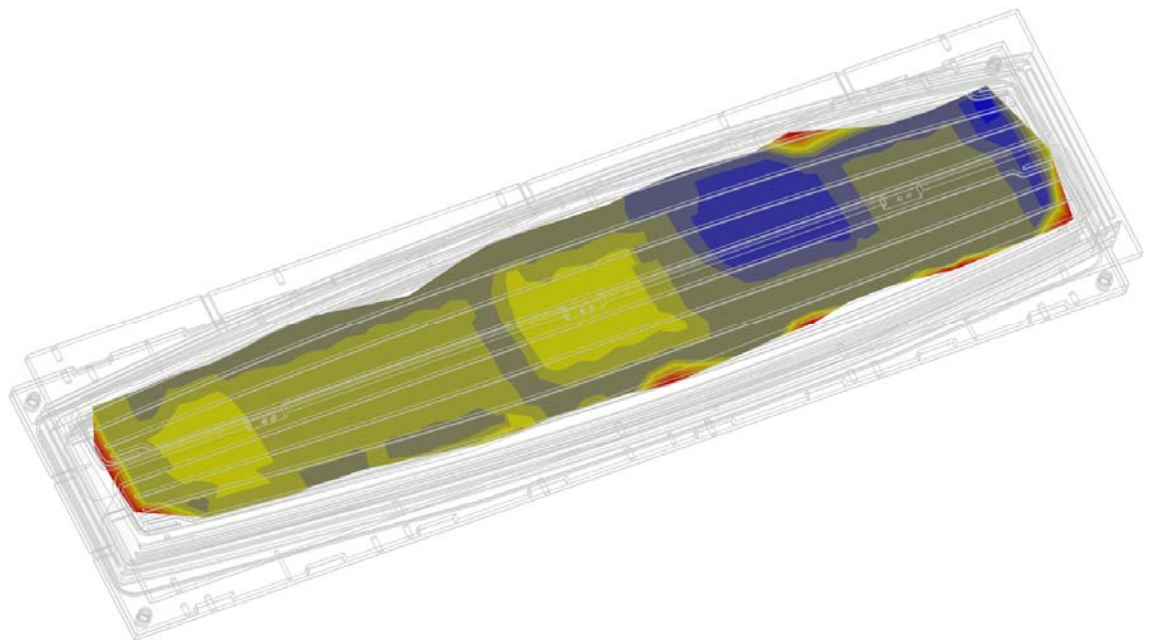
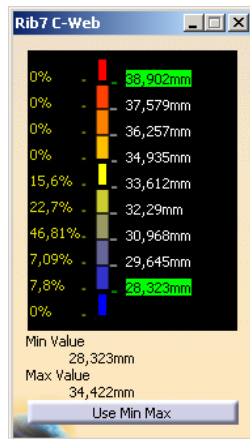
$$t = 4,488 \text{ mm}$$

Alueen laskennallisen paksuuden 3D-malleissa kyseisellä alueella odotettiin olevan 4,02 mm (kuva 17). Kyseinen alue tulisi siis olemaan 0,486 mm odotettua paksumpi mitä olisi haluttu 3D-mallissa.

Alla olevasta kuvasta (kuva 16) pystyy selvästi erottamaan myös siipikaarella eri paksuusalueet. Tutkittaessa eri paksuus alueita alla olevasta kuvasta todettiin, että muottien välinen alue on kauttaaltaan hieman odotettua suurempi, kuten edellä todettiin. Mittaustulosten perusteella osan paksuus tulisi vaihtelevaan +0,1 mm:stä +0,5 mm:iin. Tällä paksuuden kasvamisella ei kuitenkaan ajateltu olevan suurta merkitystä. Ainoa asia johon paksuuden kasvamisen tiedettiin vaikuttavan, olisi paino, joka lisääntyy hieman. Lopullisissa osissa myöhemmin huomattiin osien olevan muutama sata grammaa odotettua painavampia.

Tooling ball = 19.05 mm

Nominal value = 2×19.05 – nominal thickness.



Kuva 17. Muottien välisen paksuusalueen tarkastelu.

7 Rib 8 työvälineiden tarkkuus

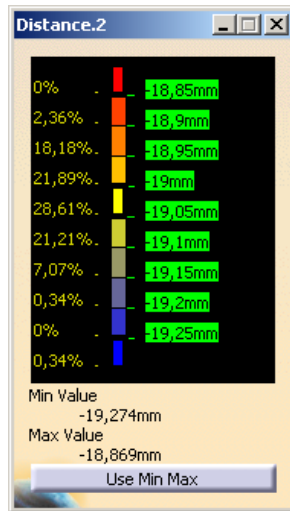
Rib 8 C-Webin naarastyövälineen mittapisteet olivat $\pm 0,4$ mm sisällä (kuva 18). Kumminkin 98 % mittapisteistä oli $\pm 0,2$ mm sisällä. Tasoalueen mittapisteistä 80 % ja laipanalueella 60 % mittapisteistä oli $\pm 0,1$ mm sisällä. Näin vain noin 2 prosenttia mittapisteistä oli vaaditun $\pm 0,2$ mm toleranssin ulkopuolella ja suurin osa näistä pisteistä oli koneistuksessa poistettavalla alueella, joten tämä ei vaikuta osan lopulliseen tarkkuuteen.

Rib 8 C-Web -urostyövälineen mittaustulokset näyttävät, että laipan alueet ovat hieman ulkona toleransseista (kuva19). Laippa on hieman nominaalista sisällä, eli laippa tulee jäämään hieman odotettua paksummaksi. Tämä mittavirhe vaikuttaa vain osan paksuuteen ja tärkeä ulkopinnanmuoto määräytyy naarastyövälineestä.

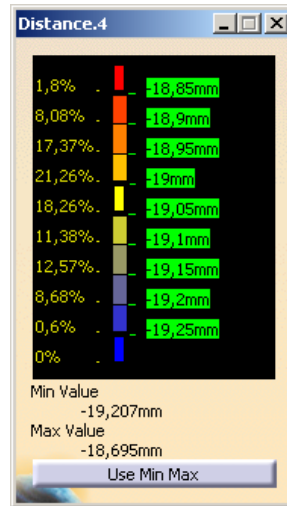
Rib 8 L-Foot:n naarastyövälineen tarkkuus tasoalueella oli halutussa $\pm 0,2$ mm toleranssissa ja 93 % pisteistä oli $\pm 0,1$ mm tarkkuudessa (kuva 20). Näin laippojen tärkeät liitospinnat ovat halutussa tarkkuudessa.

Rib 8 L-Footin urostyövälineen mittaustulokset osoittivat, että työväline oli laipanalueilta hieman ulkona vaaditun $\pm 0,2$ mm toleranssista (kuva 21). Mittatulokset vaihtelivat $-0,5$ mm ja $+0,2$ mm päässä nominaalista. Näin Rib 8 -irtolaippojen urostyöväline oli hieman kapeampi (noin $0,2$ mm) kuin oli tarkoitus. Kuitenkin 40 % mittapisteistä oli $\pm 0,1$ mm toleranssissa. Näin myös Rib 8 irtolaipat tulevat olemaan $0,1$ mm odotettua paksummat, joka olisi noin 1,5 % odotetusta paksuudesta.

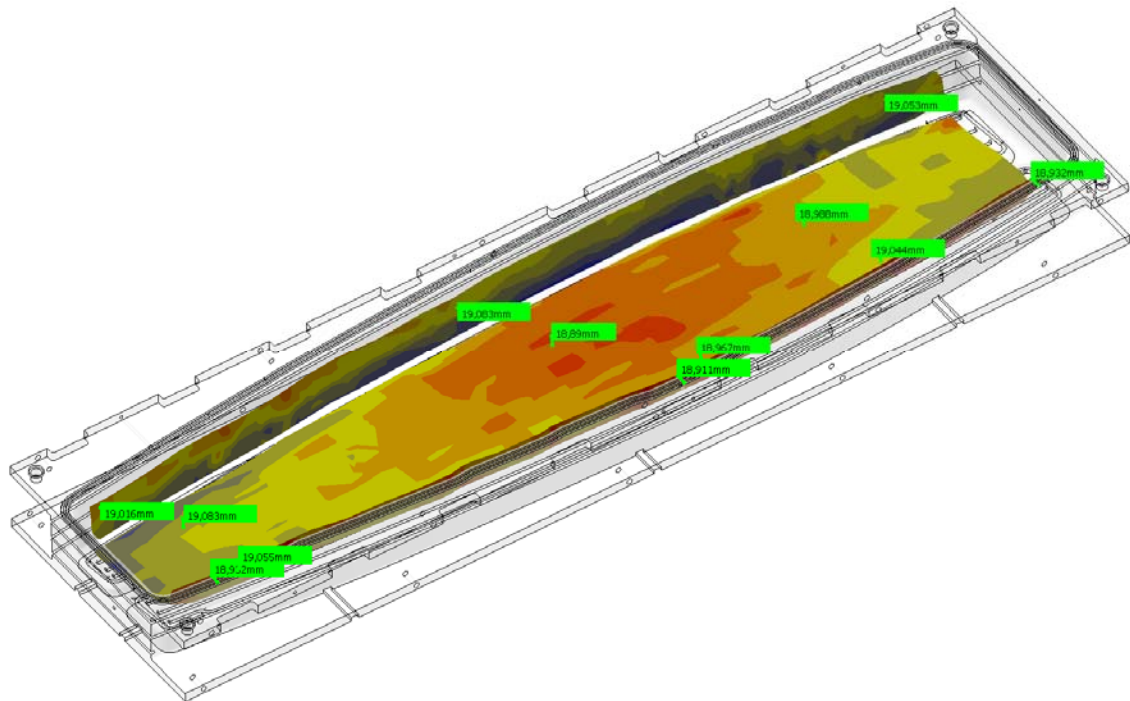
Kokonaisuudessaan eivät myöskään Rib 8 -työvälineissä havaitut mittavirheet haittaa osien valmistusta, sillä tavoite $\pm 0,2$ mm oli suuriltaosin saavutettu, ja kaikki pisteet olivat kokoonpannun siipikaaren $\pm 0,4$ mm toleranssin sisällä. Näin työvälineet hyväksyttiin osien valmistukseen.



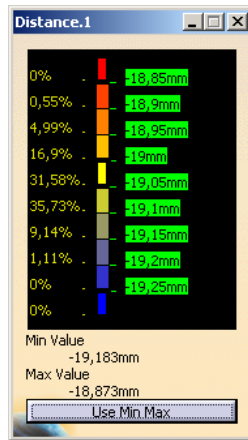
Web surface



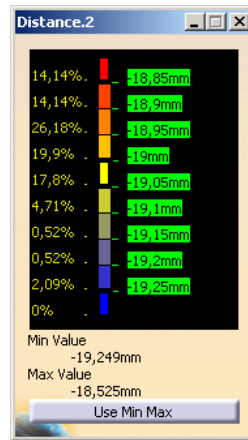
Flange surface



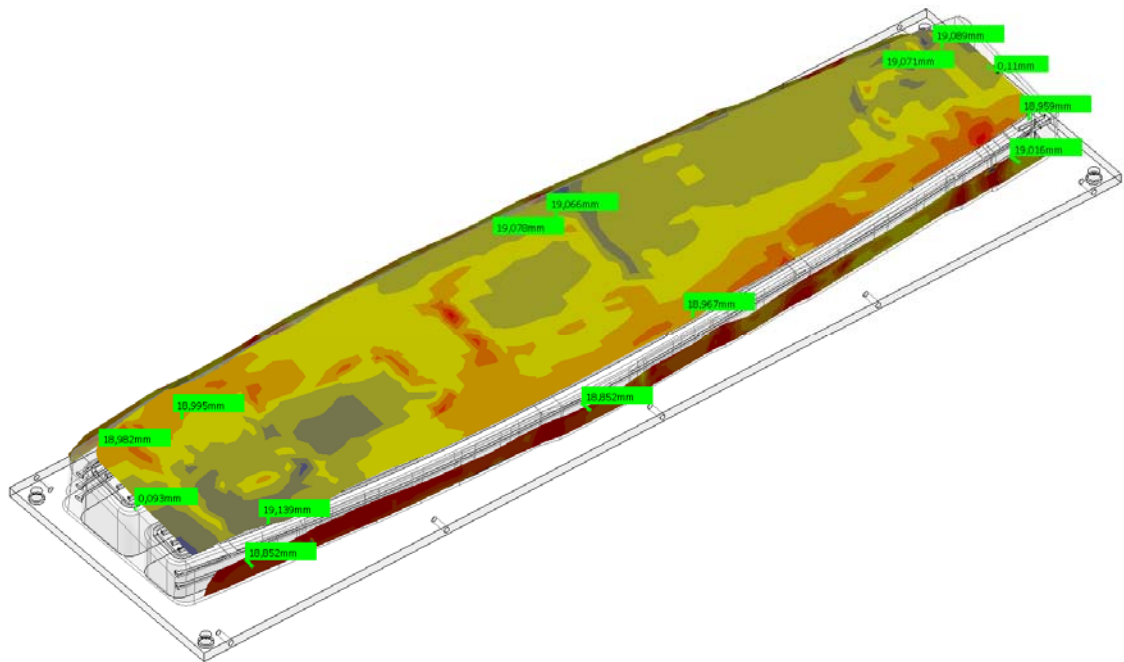
Kuva 18. Rib 8 C-Web -naarastyövälineen mittaustulokset.



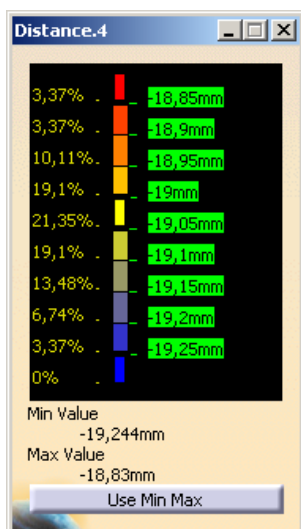
Web surface



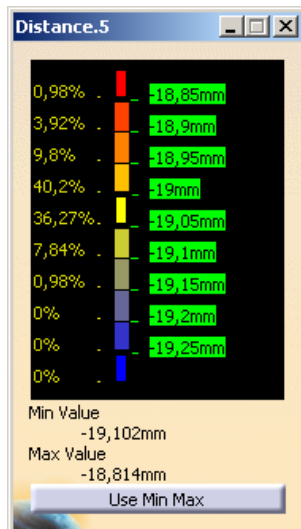
Flange surface



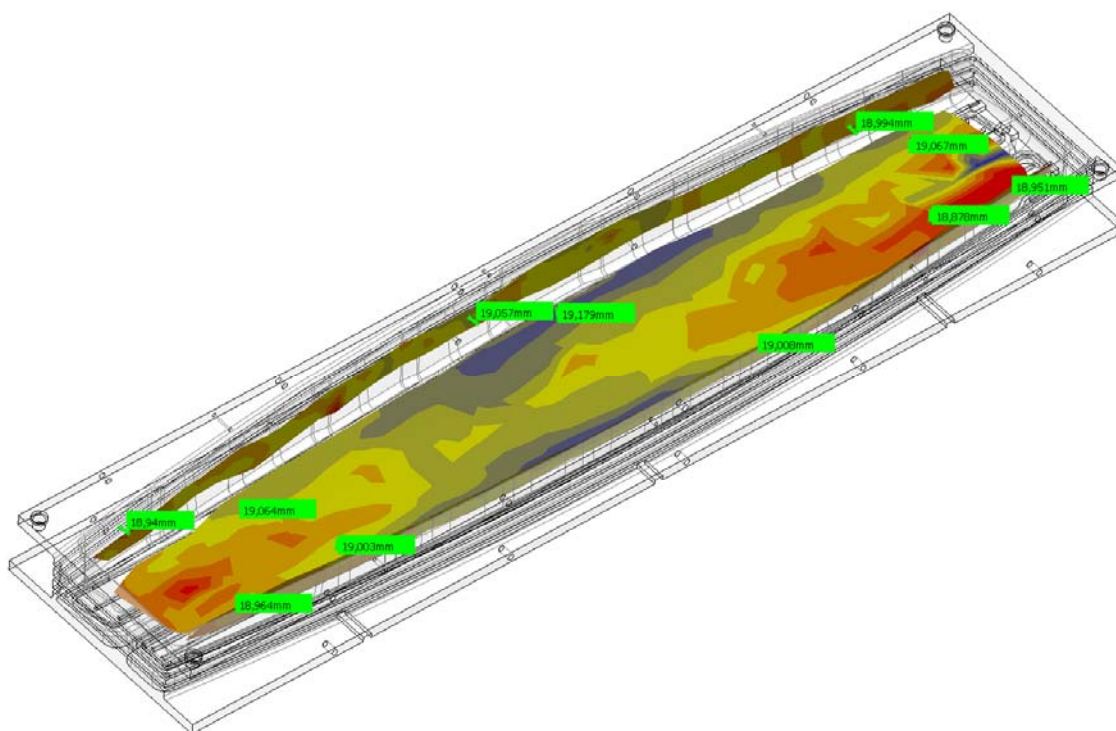
Kuva 19. Rib 8 C-web -urostyövälineen mittaustulokset.



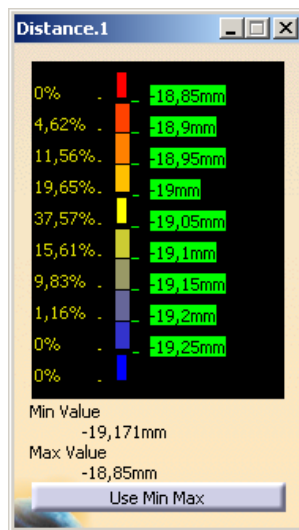
Web area



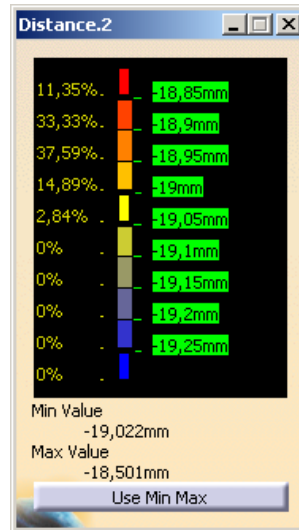
Flange area



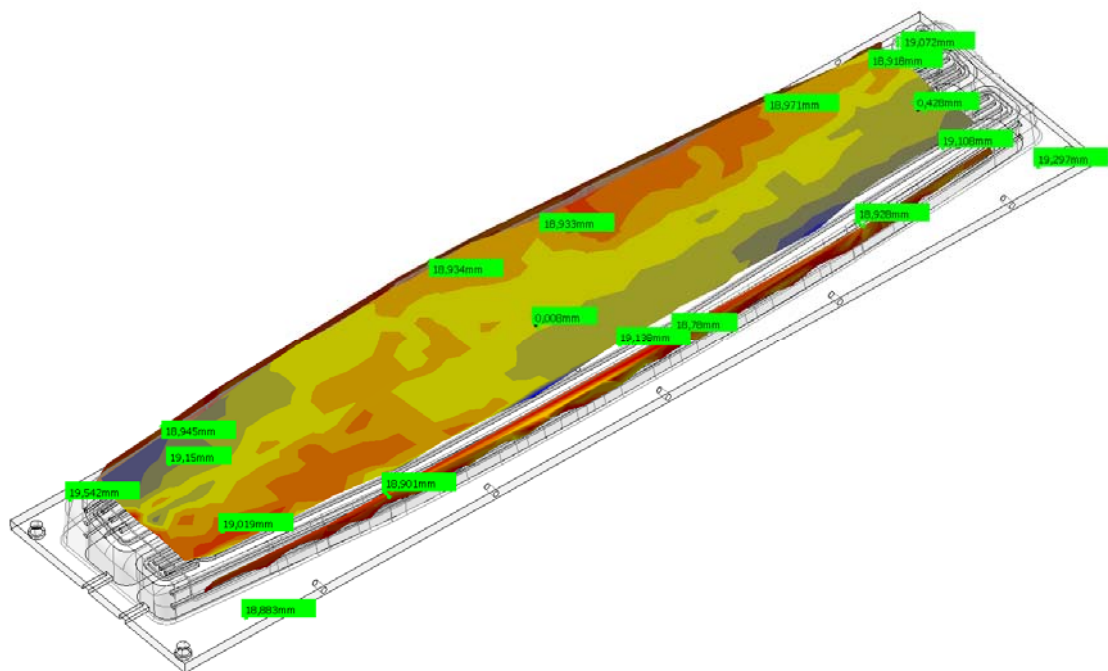
Kuva 20. Rib 8 Foot -naarastyövälineen mittaustulokset.



Web area



Flange area



Kuva 21. Rib 8 Foot -urostyöväliseen mittaustulokset.

8 Rib 7 demonstraatio kaari

Ensimmäisen siipikaaren valmistus alkoi marraskuussa 2008. Ensimmäisen siipikaaren valmistuksessa oli tarkoitus tutkia prosessin menetelmiä ja siinä syntyviä käytännön ongelmia, joita ei välttämättä ole otettu huomioon suunnittelussa, tai nämä ongelmat syntyvät vasta valmistusvaiheessa. Tämä ”demo” kappaleen valmistus oli tärkeää, sillä näin isoa RTM- menetelmällä valmistettua osaa ei ole koskaan tehty Patrialla. Kyseisen siipikaaren valmistusta oli kokeiltu erilaisilla pienemmillä demonstraatioilla, mutta nämäkin olivat jääneet vähäisiksi. Patria oli osallistunut aiemmin samanlaiseen EU:n rahoittamaan tuotekehitysprojektiin TANGO:on. Tässä projektissa valmistettiin myös siipikaaria, mutta mittasuhteiltaan se oli neljäsosa ALCAS-projektin siipikaariin verrattuna. /1/

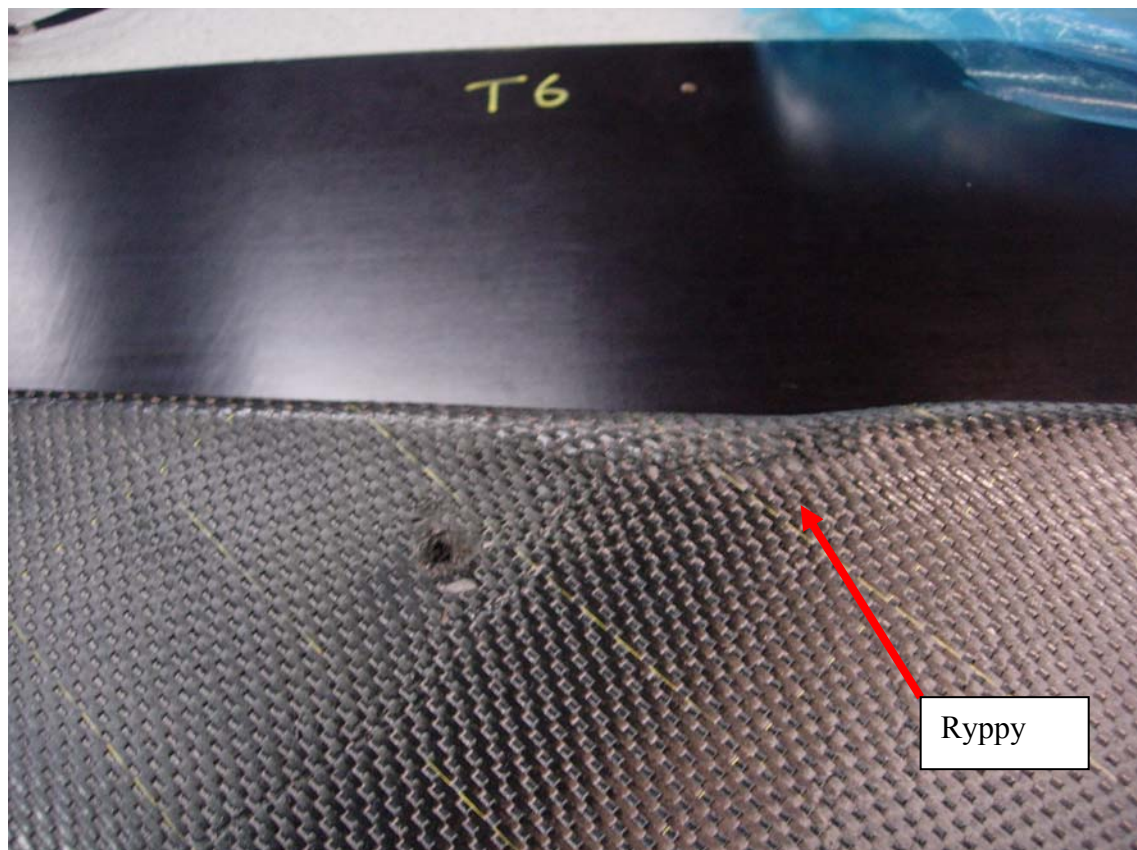
Ensimmäisen kappaleen teossa käytiin läpi kaikki valmistuksessa tarvittavat tiedot, ja jos teon yhteydessä tuli puutteita tai ongelmia, pyrittiin pohtimaan ja ratkaisemaan kyseiset ongelmat. Näin lopullisten osien valmistus pyrittiin tekemään nopeammin ja ongelmitta.

Ensimmäiset ongelmat, jotka havaittiin Rib7 C-webiä tehdessä, olivat ryppyjen muodostuminen preformauksessa laipan kulma-alueille (joggle). Kulma-alueille muodostuvat rypyt aiheuttavat kuitusuunnan muutoksia kulma-alueilla. Kovetuksen aiheuttama kulmanmuutos nurkassa johtuu eri suurista lämpölaajenemiskertoimista materiaalin pituus- ja paksuussuunnassa. Näin ryppyjen aiheuttama kuitusuuntien ja kuitupaksuuksien muutos vaikuttaa laipan kulmamuuтокseen eli spring backiin. Ryppykerrosten todettiin sijaitsevan suurimmaksi osaksi ensimmäisissä kuitukerroksissa, ja ryppyjen koko vaihteli sentistä muutamaan senttiin (kuva.22). Tällä todettiin olevan vain pieni vaikutus mahdolliseen spring-backiin. Vaikutus tulisi vaikuttamaan ennemmin osan lujuuteen kulma-alueilla, koska rypykohdissa kuitupitoisuus kasvaa odotettuun.

Toinen ongelma syntyi osia kovetettaessa. Ongelmana oli muotin lämpeneminen epätasaisesti. Muotti on suunniteltu niin, että sen omat vastukset lämmittävät työvälineen ja osan tasaisesti huoneen lämpötilasta kovetuslämpötilaan asti.

Työvälineiden suunnittelussa huomio keskittyi enimmäkseen siihen, että lämpötila varsinaisen osan alueella on riittävän tasainen (± 5 °C). Demo-osia kovetettaessa huomattiin, että muotit eivät lämpene yhtä tasaisesti laipoilta, kuin muulta. Lämpötilan tiedettiin olevan kymmeniä asteita pienempi päädyissä ja laipan reunalla, vaikka lämpötila oli kuumimmassa kohdassa saavuttanut tavoitelämpötilan ja ollut siinä 15 minuuttia. Tällä oli kuitenkin suurempi vaikutus työvälineen lämpölaajenemiseen kuin oli aluksi oletettu. Tämän ongelman todettuaamme aloimme tutkia ongelman syitä.

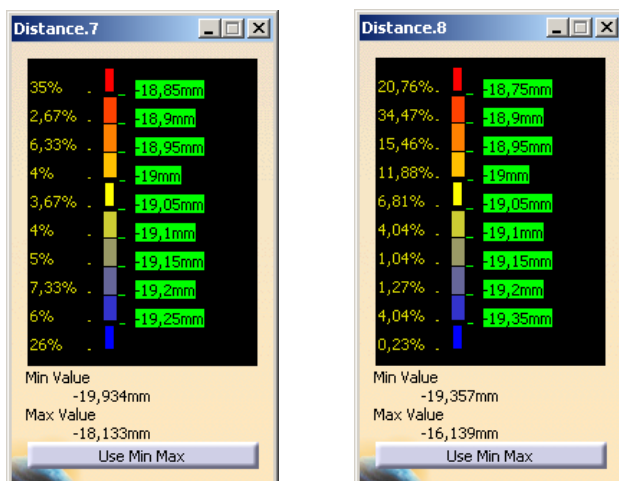
Ensimmäinen vaihe oli mitata kyseinen osa ja tutkia onko lämpötila-arvojen muutos vaikuttanut tuotteen mittatarkkuuteen.



Kuva 22. Ryppyjen muodostuminen kulma (joggle) alueille.

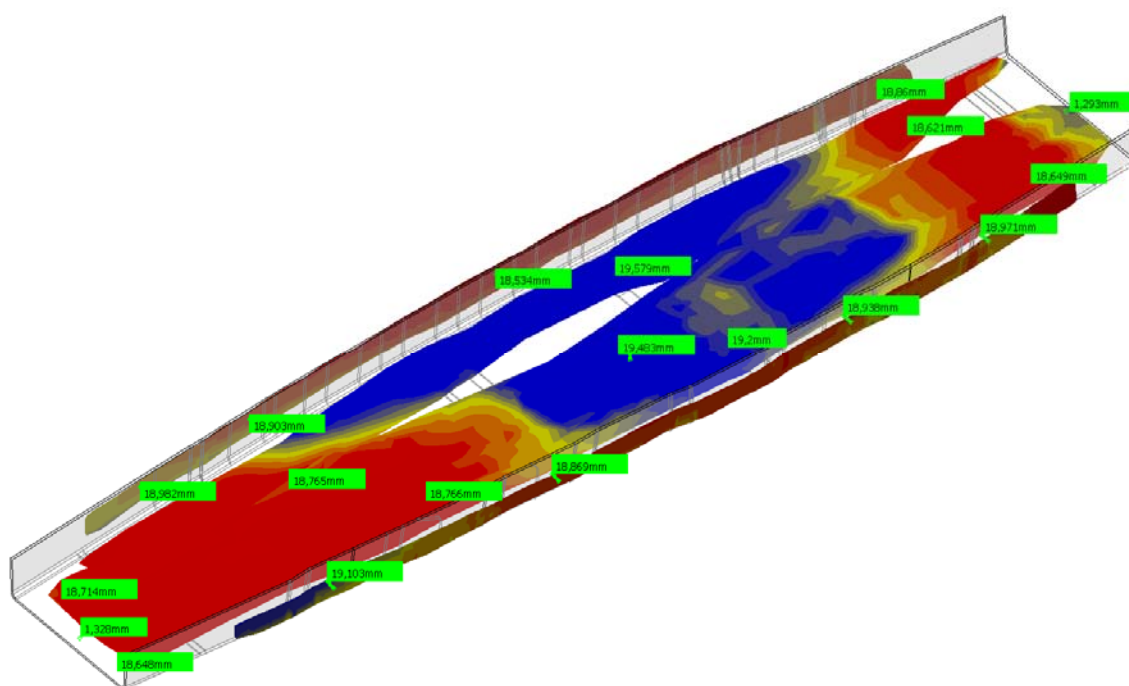
8.1 Rib 7 demo mittaustulokset

Rib 7 C-Web ”demo” -mittaustuloksista selvisi, että lämpötilan muutos oli vaikuttanut ainakin referenssipisteiden paikkaan. Myös muotin epätasaisen lämpenemisen myötä kappale oli ”kupera” eli kappaleen tasovaatimus $\pm 0,2$ mm ei toteutunut. Kuperuuden voi todeta alla olevasta kuvasta, jossa mittatulokset on havainnollistettu värein. Kuvasta 22 voidaan todeta, että osan molemmissa päissä esiintyy punaista väriä ja keskellä sinistä. Tämän värin avulla voidaan taulukosta todeta, että osa oli molemmista päistä noin 0,3 mm koholla nominaalista (nominaali 19,05 mm) ja keskeltä osaa noin 0,4 mm lommolla verrattaessa nominaaliin. Eli käytännössä korkeimman ja matalimman kohdan erotus siis olisi noin 0,7-0,8 mm. Näin yhden osan tavoiteltu tasomaisuus menee tavoitellun $\pm 0,2$ mm yli. Tämä virhe tulisi vaikuttamaan kokoonpanovaiheessa kun Foot-kaari ja Web-kaari liimattaisiin toisiinsa. Odotetut tasopinnat eivät olisikaan tasomaisia vaan liimauksessa Rib 7 Foot ja Rib 7 Web joudutaan pakottamaan toisiaan vasten ja tällöin liimauksen myötä kumpaankin osaan jää valmiiksi esijännityksiä. Myös laipan alueella voidaan todeta $\pm 0,3$ mm eroavaisuuksia. Tämä virhe olisi suurempi huolenaihe ajateltaessa loppukokoonpanoa Airbus:lla.



Inside (web area)

Outside (flange area)

**Kuva 23. Rib 7 C-web Demon mittaustulokset.**

Referenssipisteiden paikka oli suunniteltu niin, että muottiin asennetut teflontapit jättävät kovetusvaiheessa jäljet osan sellaiselle alueelle, joka poistetaan koneistuksessa. Näitä pisteitä voidaan käyttää mittauksessa referenssipisteinä. Näiden pisteiden paikka muuttuu lämpötilan muuttuessa muotissa lämpölaajenemisen myötä. Näiden pisteiden oletettu paikka on sijoitettu 3D-malleihin ja sitä kautta työvälineisiin. Referenssipisteiden paikka on laskettu käyttäen kovetuksessa käytettävää lämpötilaa ja pituudenmuutoskerrointa.

Teräksen lämpötilalaajenemiskerroin on $\alpha=12 \cdot 10^{-6} \text{ m/}^\circ\text{C}$ /3/. Työvälineiden referenssipisteiden välinen matka työvälineestä mitattiin 2502,08 mm. johon ei ole lisätty lämpölaajenemisen kerrointa. Kun tiedetään työvälineen materiaali (teräs) ja sen lämpötilakerroin ($12 \cdot 10^{-6} \text{ m/}^\circ\text{C}$) voidaan laskea lämpölaajeneminen kaavalla kun kovetus tapahtuu 20 asteesta kovetus lämpötilaan, eli 160°C . Referenssipisteiden alkuperäinen mitta työvälineessä oli 2502,08 mm. Näin pisteiden etäisyydeksi saadaan 160 asteen lämpötilassa:

$$\Delta l = \alpha l \cdot \Delta t.$$

$$\Delta l = 12 \cdot 10^{-6} \text{ m/}^\circ\text{C} \cdot 2502,08 \text{ mm} \cdot 140^\circ\text{C}$$

$$\Delta l = 4,20346 \text{ mm} + 2502,08 \text{ mm}$$

$$\Delta l = 2506,28 \text{ mm}$$

Tällöin myös tässä kovetuslämmössä jää osaan referenssipisteiden jäljet. Hiilikuidun tiedetään lämpölaajenevan huomommin kuin teräs. Näin työvälineen jäähtyessä osan referenssipisteiden paikka ei ole enää sama kuin muotissa. Näin hiilikuidun supistuminen lämpölaajenemisen mukaan voidaan laskea hiilikuidun lämpölaajenemiskertoimen mukaan ($2 \cdot 10^{-6} \text{ m/}^\circ\text{C}$) /3/. Näitä arvoja käyttäen oli määriteltä hiilikuituosan referenssipisteiden välinen etäisyys jonka tuli olla:

$$\Delta l = \alpha l \cdot \Delta t.$$

$$\Delta l = 2 \cdot 10^{-6} \text{ m/}^\circ\text{C} \cdot 2506,28 \text{ mm} \cdot 140^\circ\text{C}$$

$$\Delta l = 0,701758 \text{ mm}$$

Näin muotin jäähtyttyä pisteiden etäisyys on alkuperäinen työvälineessä mitattu tulos 2502,08 mm. Mutta kun lämpölaajenemiskerroin ei hiilikuidulla ole kuin $2 \cdot 10^{-6} \text{ m/}^\circ\text{C}$ niin osan pisteiden välinen etäisyys pienenee osassa vain 0,701758 mm /3/. Näin osaan tulisi jäädä seuraavan laskukaavan mukaan etäisyydeksi:

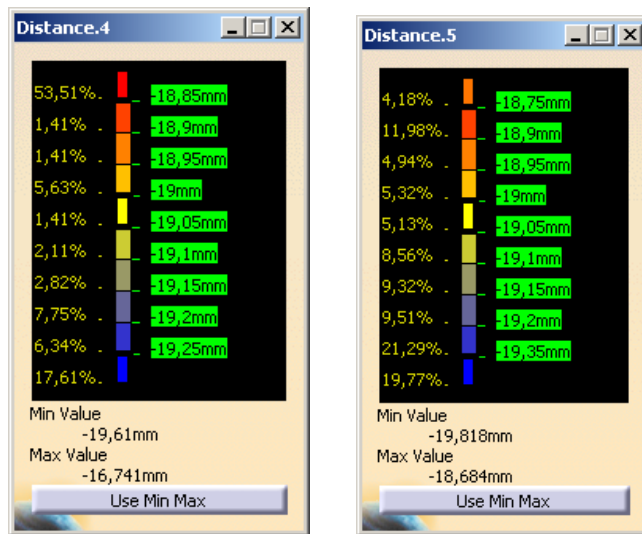
$$\Delta l = 2506,28 \text{ mm} - 0,701758 \text{ mm}$$

$$\Delta l = 2505,58 \text{ mm}$$

Osasta mitattiin kuitenkin 2502,42 mm välinen etäisyys. Eli osa oli -3,157 mm odotettua lyhyempi. Tämä tulos lisäsi oletusta, ettei muotti lämpene tasaisesti kaikkialta eikä lämpölaajeneminen ole tasaista ja odotettua, mikä johtaa siihen, että referenssipisteiden etäisyys ei ole odotetussa arvoissa.

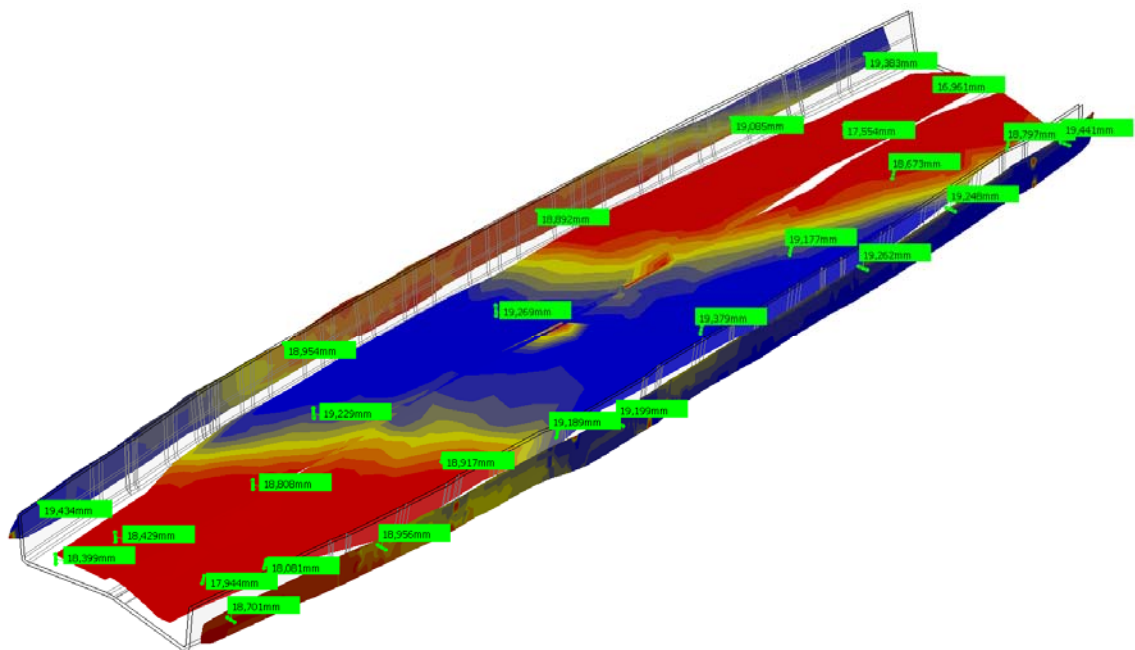
Näiden pisteiden avulla voitiin kuitenkin määrittää osan muodonmuutos muotin pituussuunnassa. Referenssipisteiden paikka tiedettäessä pystyttiin tekemään Bestfit laippojen suhteen ja näin määrittämään koneistusohjelma C-web:lle.

Rib 7 –Foot (irtolaipat) ”demon” mittaustulokset osoittivat samanlaisia mittavirheitä kuin C-Web:ssä. Myös tämä osa oli alla olevan kuvan perusteella ”kupera”. Molemmat päädyt olivat keskikohtaa korkeammalla. Pahimmillaan keskikohdan ja päädyn mittapisteiden erotus oli noin 2,2 mm. Tuloksista todettiin, että muotti ei saavuta kaikkialta tarvittavaa tasaista lämpöä kovetukseen, jolloin muotti vääntyilee eikä osista tule vaaditun tasomaisia. Tätä todistivat referenssipisteiden paikkojen muutos ja muotin rakoileminen kovetuksen aikana. Erillisissä lämpötilamittauksissa mitattiin urosmuotissa jopa 10 °C:n eron jo laipan eri kohdilla, ja jopa 15 °C:n ero muotin keskikohdan ja päädyn välillä.



Inside (web area)

Outside (flange area)



Kuva 24. Rib 7 foot Demo -mittaustulokset.

Ongelman ratkaisuksi päädyttiin suunnittelemaan ja valmistamaan lisälämmityslevyt muottien omien vastusten lisäksi muotin ylä- kuin alapuolelle (kuva 25).

Erikseen ohjattavia lisälämmityslevyjä tilattiin 6 kappaletta niin muotin ylä- ja alapuolelle. Näin pyrittiin pääsemään eroon työvälineen epätasaisesta lämpenemisestä ja sen vaikutuksesta lämpölaajenemiseen ja edelleen osan toleransseihin. Lisäksi muottien ja lämpölevyjen ohjaamiseen käytetty ohjelma vaihdettiin kokonaan uuteen, jossa ohjaus, anturit, tiedonkeruu ja päivitettävyys olivat ominaisuuksiltaan paremmat (kuva 26. alla). Näin saadaan tarkasti säädettyä niin muotteja kuin yksittäistä lämpölevyä tarvittaessa takaamaan tasaisen lämpenemisen koko työvälineessä.

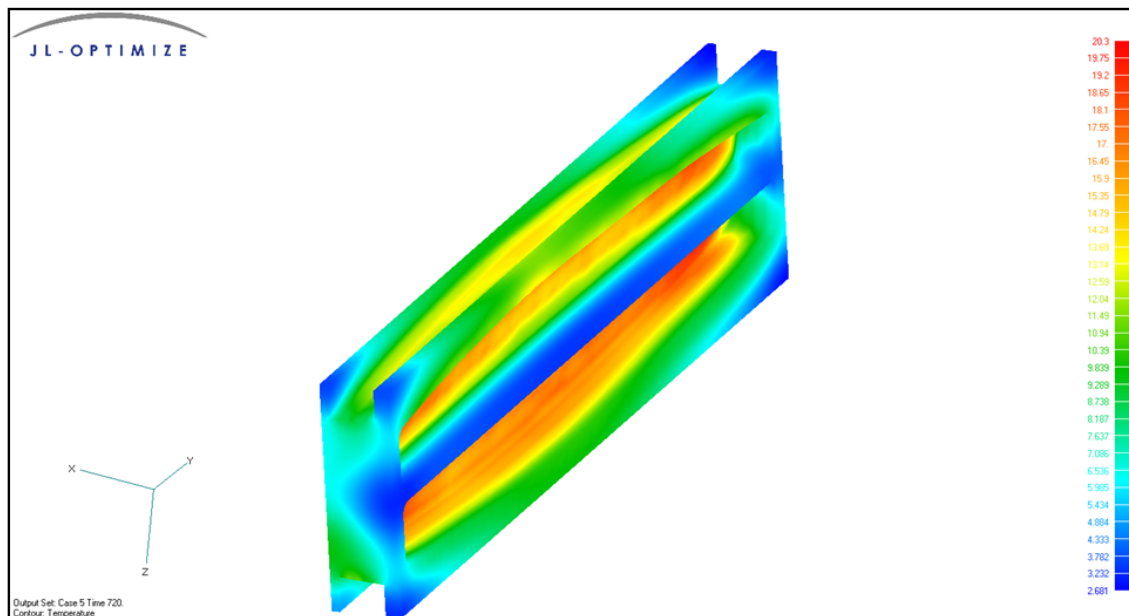


Kuva 25. Uudet lisälämmityslevyt ohjausyksikköineen prässissä.

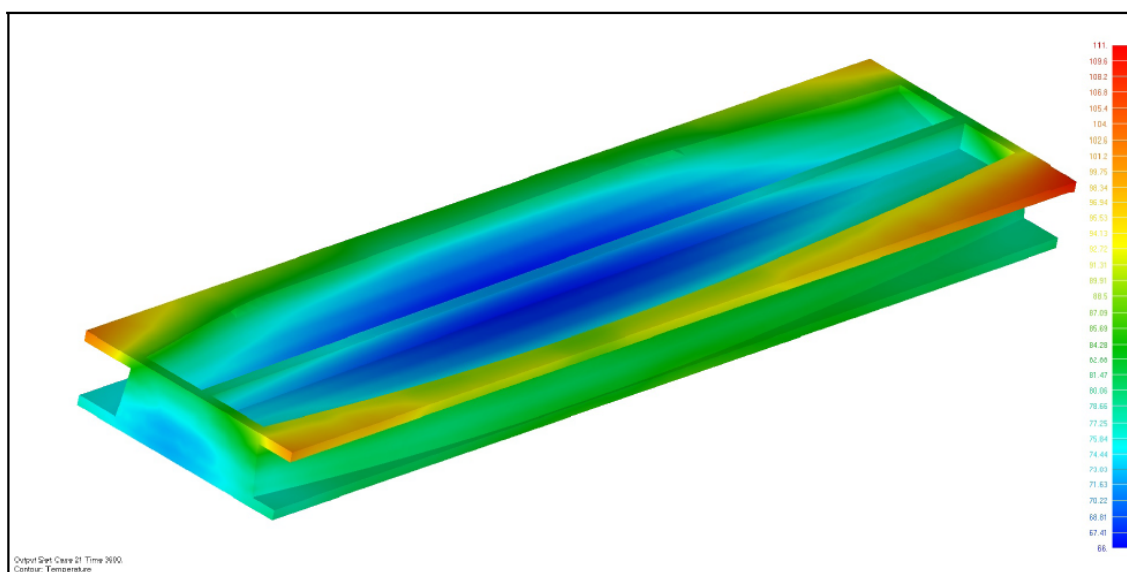


Kuva 26. Lisälämmityslevyjen uusi ohjausohjelmisto.

Asennuksen jälkeen tutkailtiin työvälineistä tehtyjä lämpömalleja eli sitä kuinka hyvin työvälineiden tulisi lämmitä tietyssä ajassa ja kuinka suuret erot työvälineissä voitiin havaita. Alla kuvasta 27 voidaan huomata, että alkuperäisen suunnitelman mukaan työvälineiden alkuperäiset vastukset lämmittivät vain valmistettavan osan alueelta riittävällä teholla. Tällöin ei ollut otettu huomioon kuinka paljon tämä epätasainen lämpiäminen vaikuttaisi muotin lämpölaajenemiseen ja sitä myöten osan lämpölaajenemiseen. Kun uudet lämpölevyt oli tilattu, tehtiin samanlaisen lämpöanalyysi työvälineistä, ja on huomattavissa (kuvasta 28) merkittävästi parempi ja tasainen lämpöjakauma koko työvälineeseen.



Kuva 27. Rib työväliseen lämpöanalyysi ennen lämpölevyjä.



Kuva 28. Rib 7 -työväliseen lämpöanalyysi lämpölevyjien kanssa.

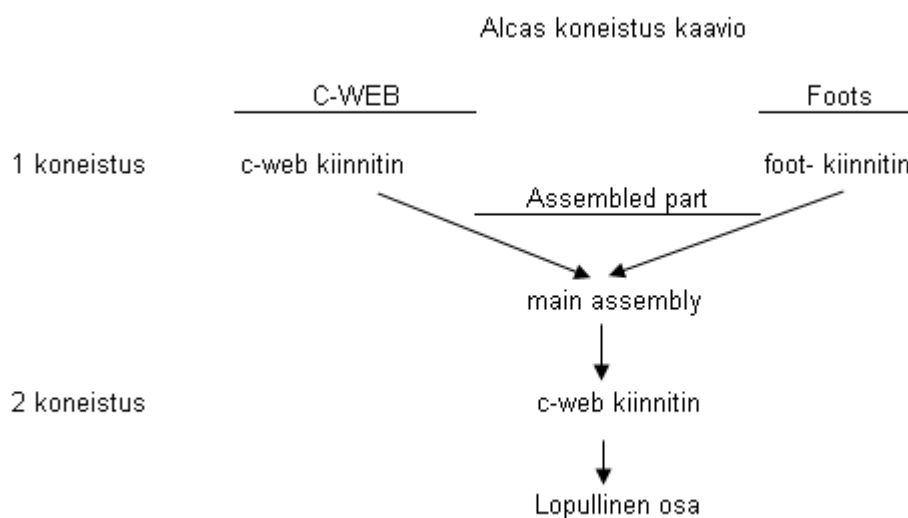
Asennusten jälkeisissä testauksissa lämpölevyt toimivat odotetulla tavalla, eikä edellisen suuruisia lämpötilaeroja havaittu manuaalimittauksissakaan, joten Airbus UK:lle lähetettävien osien valmistus pystyttiin aloittamaan prässin lämmityksen osalta.

Vaikka demo- siipikaari ei ollutkaan mittatuloksiltaan paras mahdollinen, päätettiin siipikaari tehdä loppuun. Näin kaikissa prosessivaiheissa syntyvät ongelmat saataisiin esille ennen kuin lopullisia osia valmistettaisiin. Varsinkin koneistus oli asia, jota

haluttiin tutkia: mitkä tulisi olemaan lopulliset koneistustoleranssit, pysyttäisiinko vaadutuissa arvoissa, vaikka osat eivät olisikaan RTM-prosessin jäljiltä halutussa tarkkuudessa (kuperuus). Haluttiin myös testata, toimisivatko suunnitellut koneistustyövälineet ja koneistustapa odotetulla tavalla.

8.2 Koneistus ja koneistuskiinnittimet

Koneistus suoritetaan kahdessa vaiheessa (kuva 29). Ensimmäisessä koneistuksessa tehdään kohdistusta ja liimausta varten 6 mm halkaisijalla olevat reiät. Nämä reiät sijoittuvat toisessa koneistuksessa poistuville alueille. Toiset 6 mm:n reiät toimivat paikoittimena siipikaaren pituussuunnassa, mutta ovat liikuteltavissa siipikaaren poikittaissuunnassa, jolloin Foot (irtolaipan) laipat saadaan kohdistettua C-web:n kanssa samalle korkeudelle. Toiset 6 mm:n reiät ovat liimausta varten. Tässä pultti-mutteri liitos kiristää osat toisiaan vasten, jolloin liimasauma saadaan mahdollisimman ohueksi. Koneistukset aloitetaan koneistamalla ensin C-web ja Foots omilla työvälineellään. Näissä koneistuksissa koneistetaan yllä mainitut reiät, jotta osat voidaan liimata toisiinsa. Toinen koneistus tehdään kokoonpanon jälkeen, jolloin liimatut osat koneistetaan C-Webin koneistuskiinnittimessä.



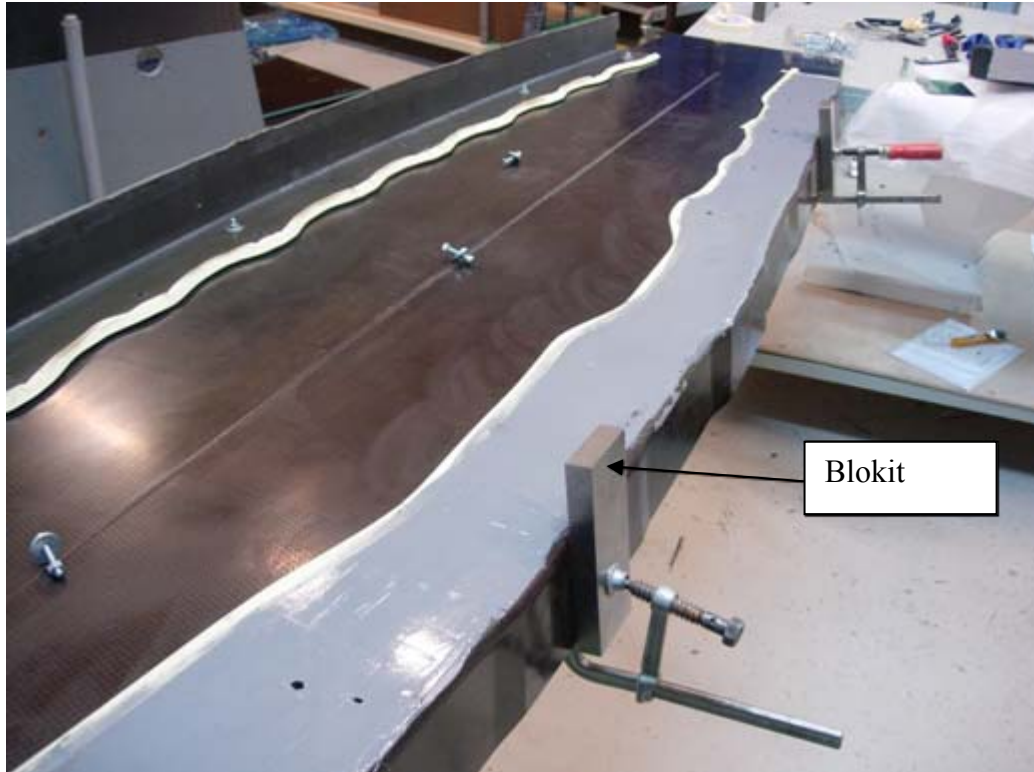
Kuva 29. Koneistuksen kaavio.



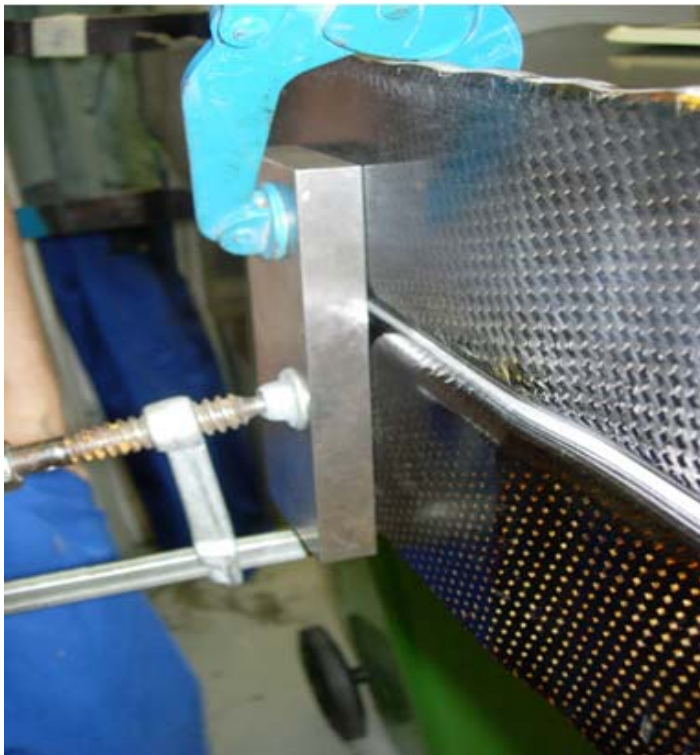
Kuva 30. Rib 7 C-web ja Foot koneistuskiinnittimet.

Ensimmäisen koneistuksen jälkeen tehdään Demo-kaarelle kokoonpano. Kokoonpanon liimauksessa pyritään käyttämään sellaista menetelmää, ettei liimauksen aikana syntyisi jännityksiä Web- ja Foot kaaren välille. Mitään suurta kokoonpanojigijä ei haluttu käyttää, koska tällöin osiin voisi jäädä jännityksiä, eikä tiedetä poistuisivatko nämä jännitykset edes lopullisessa koneistuksessa. Myös suuret metalliset jigit olisivat turhan kalliita tällaiseen kerran tehtävään tuotteeseen. Myös kyseiset jigit tulisi mittatarkastaa ja validoida kyseiselle liimaukselle. Joten pyrittiin käyttämään vain kohdistimia liimauksen yhteydessä. Näin päädyimme liimaamaan osat vapaasti. Liimaus suoritettiin niin, että Web- kaari tuettiin suoraksi. Näin kaaren muoto on kovetuksessa suoran C-webin muodon mukainen. Liimauksessa kappaleiden erot tasoittuvat liimalla, jolloin liima toimii samalla ”shimminä”. Foot-kaaret eli laipat liimattiin laippojen kohdistinta (bloki, kuva 31) vasten, joka oli kiinnitetty Web-kaaren laippaan. Tällöin laipat olivat samassa tasossa toisiaan nähden. Foot-kaaren paikka määräytyi kohdistinreikiin kiinnitettyjen tappien avulla, jolloin pituussuuntainen paikoitus määräytyy näistä ja

poikittainen paikoitus määräytyy laippoihin kiinnitetystä blokeista. Tiiviin ja sopivan paksuisen liimasauman aikaansaamiseksi kaaret kiristettiin pulteilla tosiinsa varovasti ja pyyhittiin ylimääräinen liima pois.

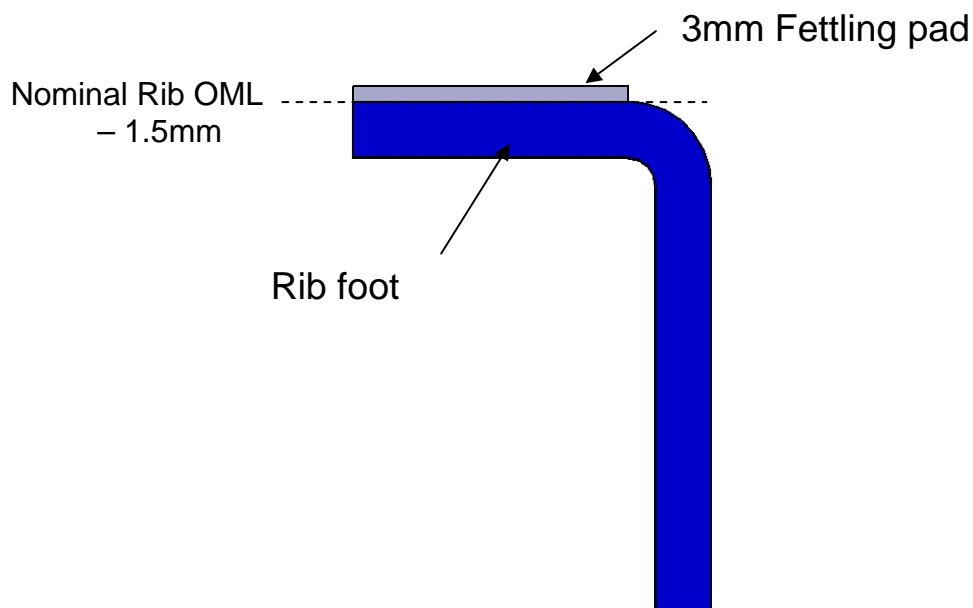


Kuva 31. Rib Foot (irtolaipan) liimaus.

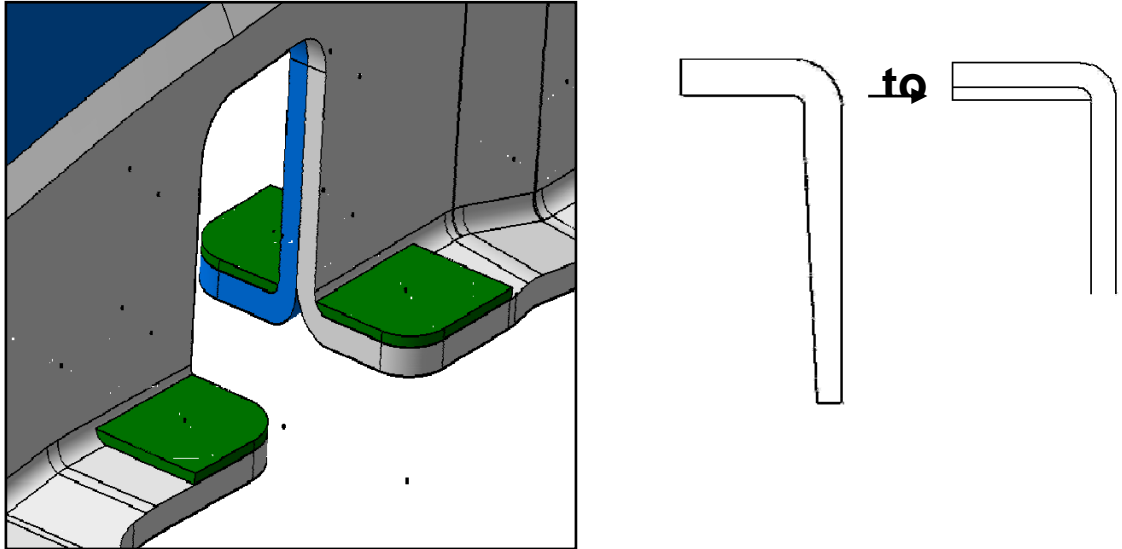


Kuva 32. Laippojen kohdistaminen samaa pintaa vasten.

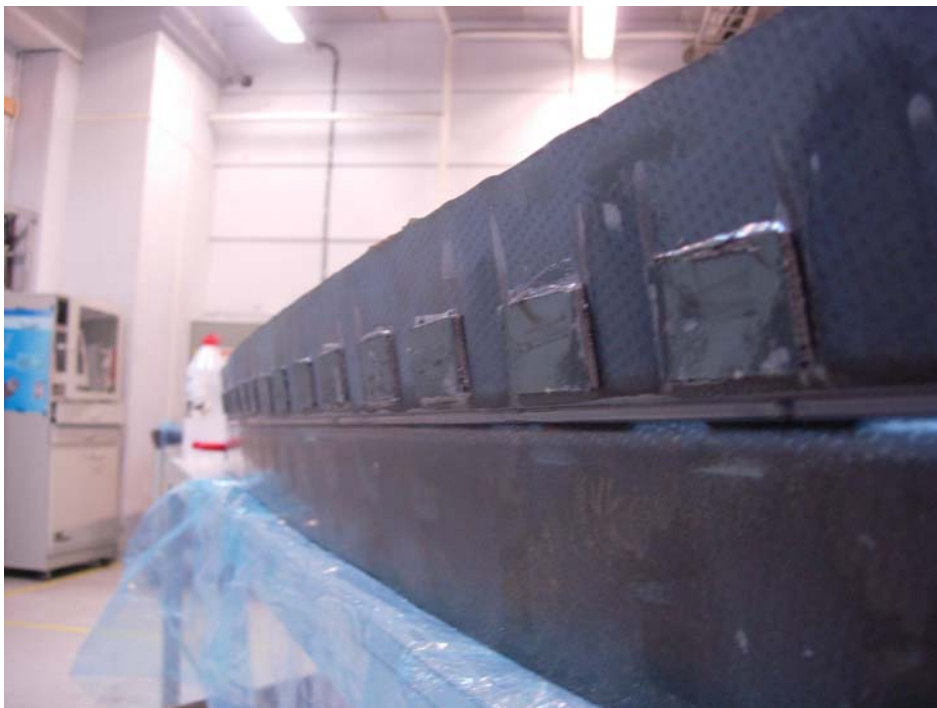
Tämän jälkeen siipikaareen liimattiin Fettlingpadit (kuva 33 ja 35) ja Supportplatet (34 ja 36). Fettlingpadit liimataan ylälaipalle, ja niiden tehtävänä on toimia Airbus UK:lla shimmilevyinä loppuasennuksessa. Airbus UK:lla, kun valmistetut siipikaaret on kiinnitetty Frontspariin (siiven etusalkoon) ja Rearspar:iin, (siiven takasalkoon) mitataan siipikaarien ylälaipan pinnat ja koneistetaan samaan tasoon, jotta siiven yläpintalevy voidaan asentaa ongelmitta siipikaarien päälle. Supportplatet ovat laippojen sisäreunalla olevia pulttiliitoksen vahvistuspaloja, joiden tehtävänä on antaa lisälujuutta paikallisesti siipikaarien pulttiliitokseen ilman, että siipikaaren paksuutta tarvitsee lisätä (kuva 33). Näiden liimauksien jälkeen siipikaari on valmis toiseen koneistukseen.



Kuva 33. Fettlig padin asennus laipalle. /3/



Kuva 34. Supportplaten asennus laipan sisäreunalle. /3/



Kuva 35. Fettling padit liimattuina.

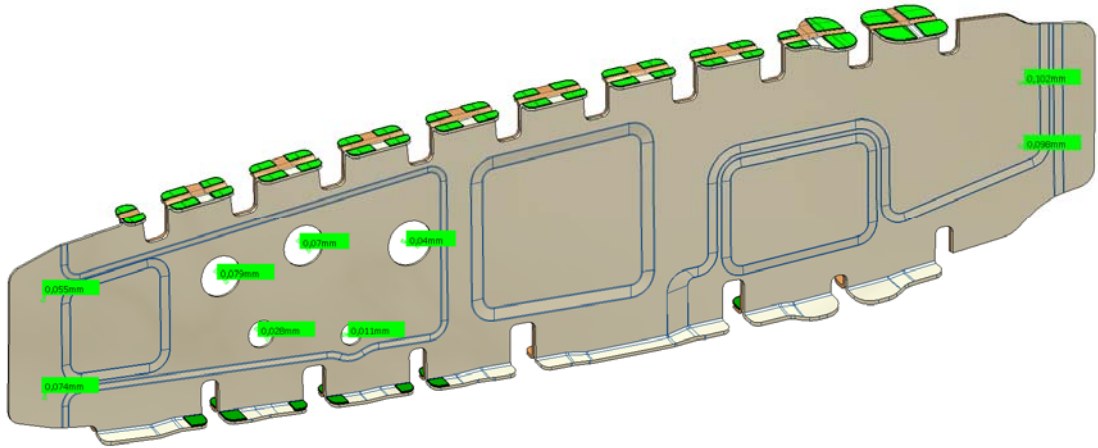


Kuva 36. Supportplatet liimattuina.

Liimauksien jälkeen suoritettiin toinen koneistus. Koneistuksessa tehdään lopulliset muodot ja kevennykset. Koneistuksen jälkeen osa vielä mitataan, jolloin tarkastetaan osan pinnanmuoto, tasomaisuus, trimmireunan muoto, tooling holesien paikka ja mahdolliset läpiviennit ja vetoniittien alkureikien paikat (alla olevat kuvat 37 ja 38).

Demo-kaarelle suoritettiin loppumittaus, jossa haluttiin todentaa koneistuksen onnistuminen. Näissä mittauksissa ei löytynyt suuria virheitä (kuvat 37 ja 38). Näin pystyimme toteamaan, että kokoonpano toimisi suunnitellulla tavalla tarpeeksi hyvin, jotta saavuttaisimme halutun tarkkuuden siipikaarissa. Näin pystyimme kokoonpanon ja koneistuksen puolesta aloittamaan kokoonpanon.

8.3 Mittaustuloksia



Kuva 37. Lävientien ja etu- takasalon paikoitusreikien paikoitukset.

Salkojen paikoitusreiät (Tooling hole) ja läpiviennit olivat suunnitelluissa toleransseissa. Suurin mittavirhe noin 0,1 mm.

9 Rib 7:n valmistus ja tulokset

Seuraavassa osiossa käydään läpi lopullisen Rib 7 siipikaaren työvaiheet, niissä havaitut virheet ja niiden vaikutus osien toleransseihin.

9.1 Preformaus ja injektointi

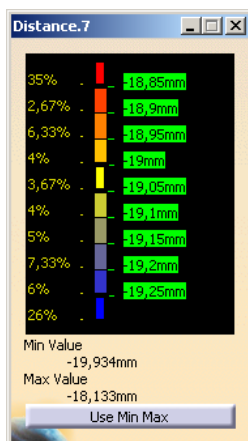
Rib 7:n valmistus alkoi Rib 7 C-kaaren valmistuksella. Ensimmäiset ongelmat esiintyivät taas preformauksessa. Ennen preformausta lujitteiden asettelun jälkeen kiinnitettiin lujitteet toisiinsa silitysraudalla pinkkaa lämmittämällä aina tietyiltä kohdilta. Lujitteet sisältävät lujitemuovikiteitä (binder), jotka lämmön avulla kiinnittävät lujitteet toisiinsa. Kiinnityksen jälkeen lujitepinkka siirrettiin muottiin, jossa se kohdistettiin oikealle paikalle teflontappien avulla. Preformaus suoritetaan niin, että muotti lämmitetään noin 30- 45 asteeseen, minkä jälkeen muotti suljetaan. Tämän jälkeen muotti lämmitetään noin 75 asteeseen, jotta pinkasta syntyisi tiivis ja kovettunut kaari, minkä jälkeen voitaisiin aloittaa RTM- injektointi. Ennen osan injektointia haluttiin avata muotti ja katsoa, miten preformaus onnistui. Avattuamme muotin huomasimme, että siipikaaren laipankulmissa oli jälleen kerran pieniä rypyjä. Rypyt olivat syntyneet, kun lujitekerrokset eivät olleet tarpeeksi tiiviisti kiinni toisissaan. Ne pääsivät näin liikkumaan muotin sulkemisen aikana ja muodostivat rypyjä. Nämä rypyt voisivat haitata injektointia. Rypykohdalla lujitteet pakkautuvat todella tiiviiseen pinkkaan epämääräisesti, jolloin hartsi ei virtaa odotetulla tavalla ja alue voi jäädä hartsiköyhäksi tai huokoiseksi. Rypyt olivat sen verran pieniä ja olivat ensimmäisessä lujitekerroksessa, että ne pystyttiin vielä korjaamaan.

Rypyjä oli havaittu myös ”Demo”-osaa tehdessä, jossa osa rypyistä oli suurempia. Tähän ongelmaan oli ratkaisuna se, että lujitepinkka tulisi saada lujitteiden asettelun jälkeen jo painettua pienempään paksuuteen, ennen muottiin asettelua. Pinkka jäi nyt noin 5 mm odotettua paksummaksi. Tähän ratkaisuna olisi ollut tilata lämmitettävät paininlevyt, joiden avulla pinkka olisi voitu puristaa oletettuun paksuuteen. Aikataulun puitteissa ei tähän kuitenkaan voitu ryhtyä, joten päätettiin yrittää toista ratkaisua.

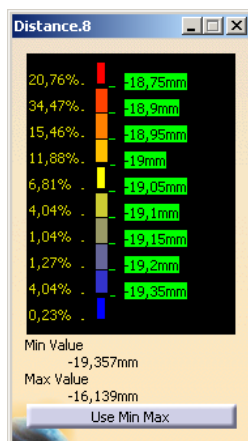
Päädettiin kokeilemaan silitysraudalla lämmittämistä eri tavalla kuin oli tehty. Ennen silitysraudalla kiinnitettiin jokainen kerros tietyistä kohdista, joka kerros erikseen. Päätettiin tehdä kuten ennen, mutta lisäksi pyrittiin kiinnittämään kerros tasomaiselta alueelta kauttaaltaan aina siipikaaren laipalle asti. Lämmitys tapahtui niin, että pinkan alimmankerroksen alle asennettiin lämpötila-anturi, ja kun mittari saavutti noin 70 astetta, lämmittäminen lopetettiin ja lisättiin lämmitetylle alueelle viileä metallilevy, joka puristettiin puristimilla haluttuun paksuuteen. Näin alue oli tiukasti kiinni toisissaan, ja lujitekerrokset eivät päässeet kulma-alueella liikkumaan ja muodostamaan ryppyjä. Näin preformaatio onnistui odotetulla tavalla.

Injektointi tehtiin seuraavana päivänä ja siinä ei ollut ongelmia. Uudet lämpölevyt toimivat odotetusti, eikä suuria lämpötilaheittoja havaittu. Kovetettu kaari tarkastettiin jälleen. Tässäkin kaareissa todettiin mittapoikkeamia.

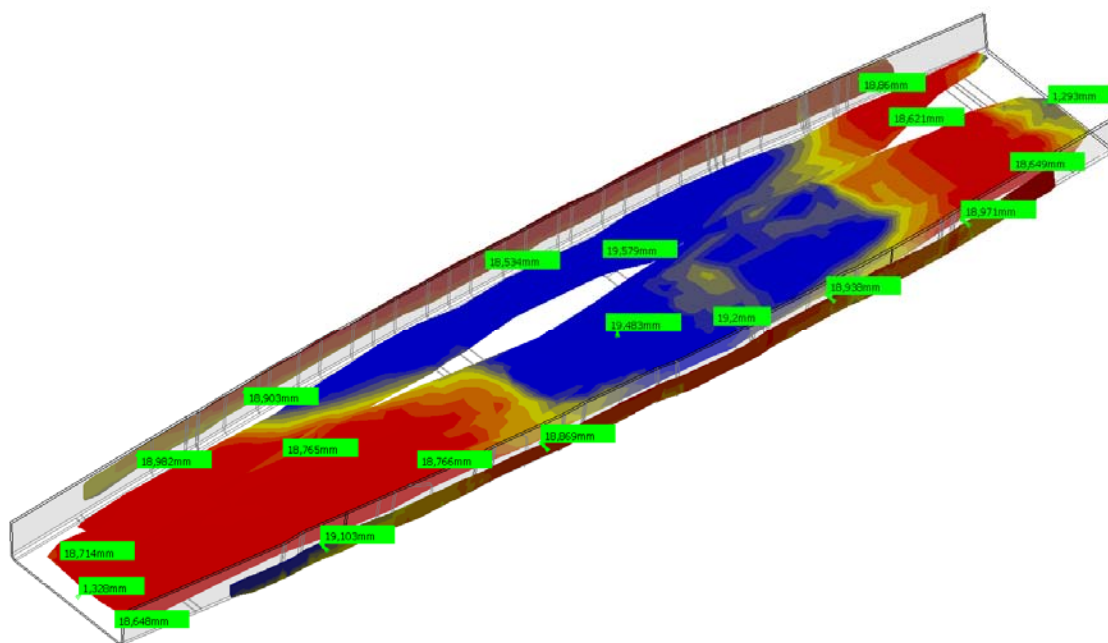
Lämpölevyillä haettiin tasaisempaa lämpiämistä muotissa. Uusista lämpölevyistä huolimatta mittatuloksissa havaittiin, ettei siipikaari silti ollut aivan halutussa mittatarkkuudessaan. Tasomaisuus C-kaareissa mitatuista pisteistä 98 % oli $\pm 0,8$ mm sisällä, ja vain 46 % mittapisteistä oli halutun $\pm 0,2$ mm sisällä ja vaatimuksen KC002 sisällä (kuva 39). Laipanalueella 98 % mittapisteistä oli $\pm 0,5$ mm sisällä, ja 95 % mittapisteistä oli halutun $\pm 0,3$ mm sisällä. Siipikaaren mittareferenssi pisteissä todettiin vieläkin suuria heittoja. Referenssipisteiden välin tuli olla 2506,567 mm, mutta mittauksissa huomattiin etäisyyden olevan -2,17 mm oletetusta. Tulos ei ollut vielä edes odotetunlainen, mutta selvästi parempi kuin Demo-kaareissa. Tämä todistaa edelleen sitä, että muotti ei aiemmin lämmennyt tarpeeksi tasaisesti.



Inside (web area)



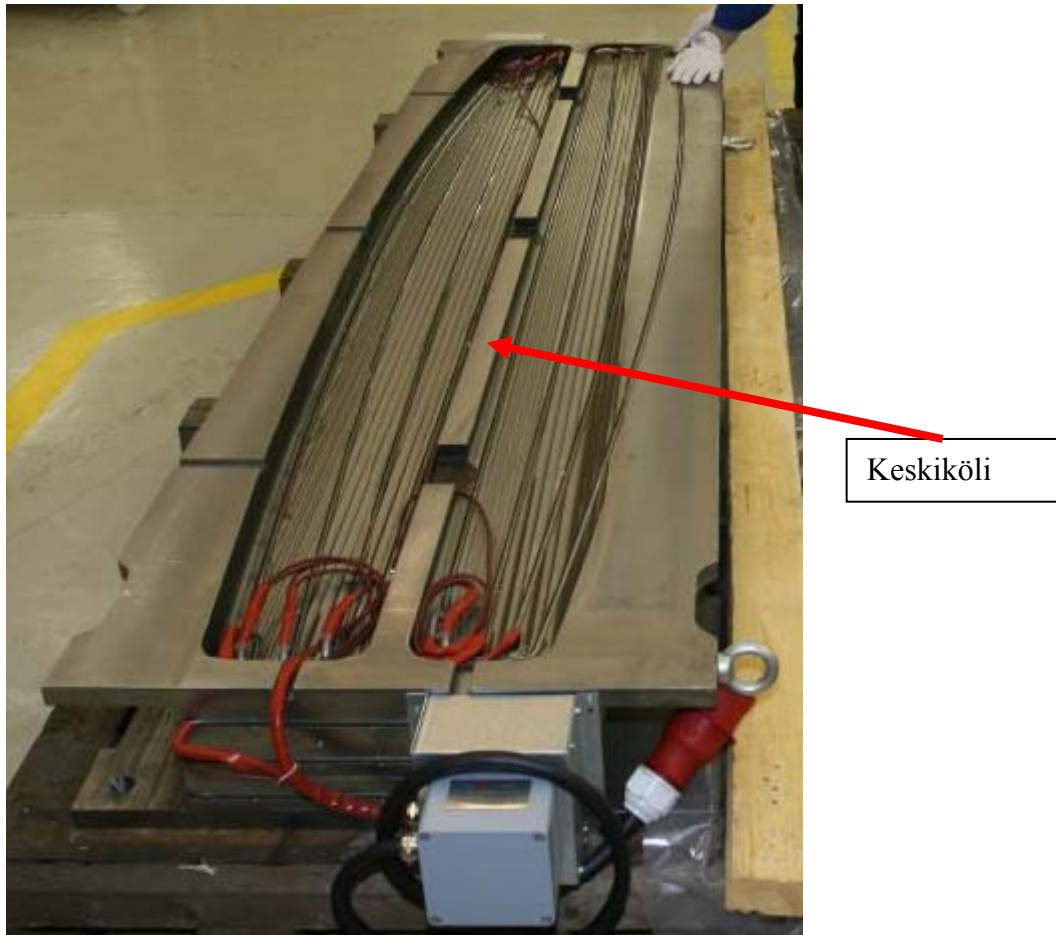
Outside (flange area)



Kuva 39. Mittaustulokset Rib 7 C-Web

Syytä referenssipisteiden väliseen etäisyyden heittoon (-2,17 mm) ei heti tiedetty, mutta uusien lämmityslevyjen oletettiin parantaneen muotin lämpenemistä. Kun asiaa oli tutkittu, huomattiin, että työvälineeseen kohdistuva paine prässistä johtaa eristelevyjen ja lopulta muotin taipumiseen ja osa lämmöstä karkaa työvälineestä eristelevyihin. Tämän todettiin johtavan osan muodonmuutoksiin. Myöskään lämpölevyt eivät ole kaikkialta suoraan kosketuksissa työvälineeseen, sillä työvälineen pintoihin oli tehty kevennyksiä, jotta ainevahvuus olisi sama kaikkialla ja lämpiäminen tasaisempaa. Tämä oletettavasti johtaa siihen, että avonaisiin kevennyksiin joihin lämmityslevy ei ole kosketuksissa, ei johdu lämpöä. Lämmityslevy taas johtaa kosketuspintoihin suoraan lämmön, ja nämä kohdat ovat muotin reunat ja keskiköli (kuva 38). Tämä voisi johtaa

osittain myös muotin taipumiseen, kun lisäksi vaikuttaa vielä kova puristusaine prässistä.



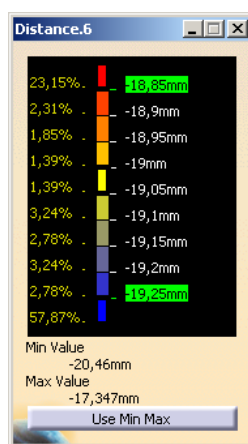
Kuva 40. Työvälineen yläpinta.

Kaaressa oli huomattavissa mittakuvista (kuva 38) ja visuaalisesti taas hieman kuperuutta, jolloin kaaren päät olivat keskikohtaa korkeammalla. Mittareferenssitappien paikat olivat nyt lähempänä oikeaa kuin Demo-kaaren C-kaaressa. Silti jokaiselle kaarelle räätälöitiin oma koneistusohjelma, jossa huomioidaan referenssipisteiden siirtymä. Näin varmistettiin koneistusohjelman tarkkuus kullekin kaarelle.

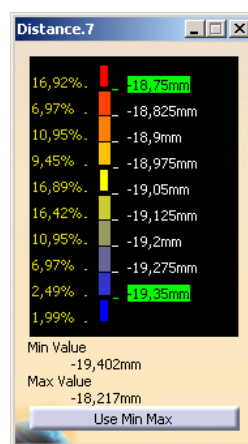
C-kaaren injektoinnin jälkeen valmistettiin heti perään Foot- kaari. Foot- kaari onnistui yhtä hyvin kuin C-kaarikin. Suurimmista ryppyongelmista, joita edellisen Demo-kaaren Foot- kaaressa havaittiin, päästiin uudella tekniikalla suurimmaksi osaksi eroon. Injektointi ja kovetus onnistuivat odotetusti, eikä poikkeamia havaittu. Kovetuksen jälkeen osa mitattiin. Mittaustuloksista pystyttiin toteamaan jälleen, että kaari poikkesi

odotetusta. Kaarenalueella tasomaisuuden mittapoikkeamat olivat -1,7 millimetristä + 1,4 millimetriin. Tällöin vain 19 % mittatuloksista oli $\pm 0,2$ mm sisällä (kuva 40). Laipanalueella mittapoikkeamat olivat väliltä -0,8 millimetristä + 0,4 millimetriin, jolloin 81 % mittapisteistä oli halutusti $\pm 0,2$ millimetrin sisällä.

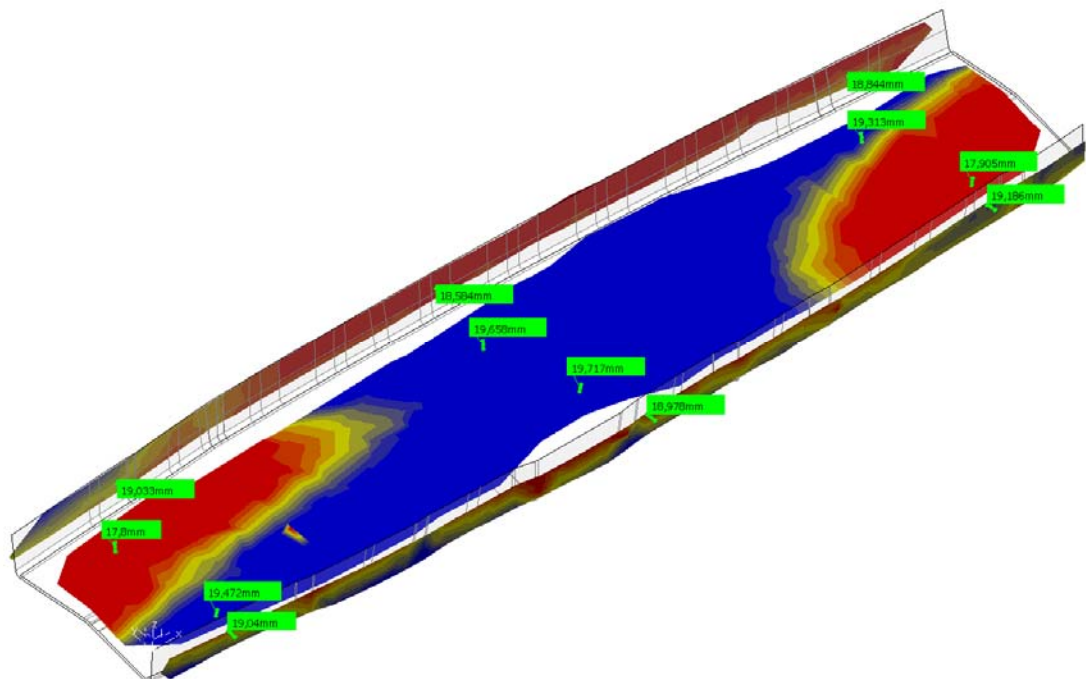
Kovetetut kaaret trimmattiin ja käytettiin NDT- testauksessa, jotta voitiin varmistua injektoinnin onnistumisesta. NDT- raporteissa ei havaittu mitään huokoisuusnäyttämää, joten kaaret voitiin koneistaa kokoonpanon suorittamista varten.



Inside (web area)



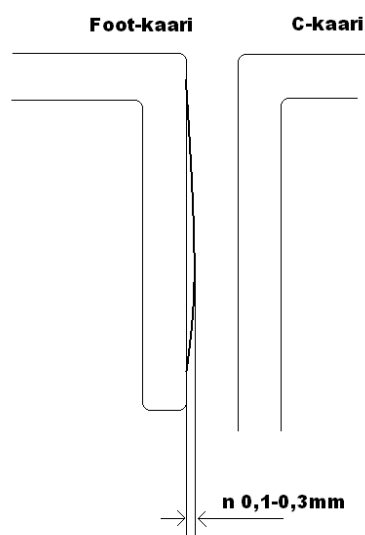
Outside (flange area)



Kuva 41. Rib 7 Foot -mittaustulokset.

9.1.1 Koneistus ja kokoonpano

Ensimmäisen koneistuksen kanssa ei havaittu ongelmia. Koneistuksessa koneistettiin vain kokoonpanon tarvitsemat reiät. Kokoonpanossa koneistuksesta tulleiden kaarien kuntoa tarkastellessa ja esisovituksessa huomattiin kaarien liitospinnan kohdalla paksumpi kohta. Tämä kohta oli noin 0,1-0,3 mm paksumpi. Tämä aiheuttaisi suurta vaivaa liimattaessa kaaria toisiinsa, sillä vastinpinnat eivät olisi tasaisia (kuva 41 alla). Tämä vaikeuttaa laipan pintojen tasomaisuuteen toisiinsa nähden ja suurentaa liimasauman paksuutta.



Kuva 42. Epätasaisuus kaaren liimapinnassa.

Kun selvitettiin asiaa, tarkastettiin työvälineen pinta ensimmäiseksi. Työvälineen tarkastuksessa ei havaittu mittaustuloksellisesti, eikä visuaalisesti merkkejä siitä, että tämä virhe olisi tullut muotista. Niinpä mietittiin ainoana vaihtoehtona muotin kovetuksen ja paineenaikaisen muodonmuutoksen mahdollisuutta. Huomattiin, että paksummat kohdat olivat muotin ns. ”tyhjällä” kohdalla, eli koneistuksessa poistetun kevennyksen kohdalla. Tällöin kovassa paineessa, lämmön vaikutuksesta ja lämpöeristelevyjien myötäessä työväline on myötännyt tältä laipan alueelta.

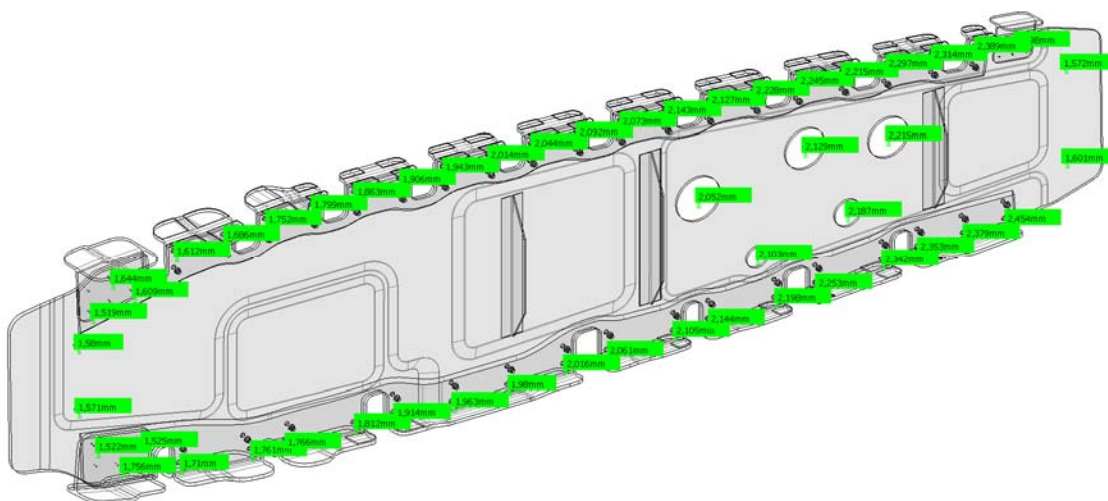
Kokoonpano oli saatava tehtyä, joten kaaret päätettiin liimata toisiinsa. Tässä vaiheessa tiedettiin, että tämä paksunnos liimattavalla alueella aiheuttaa liimauksessa päänvaivaa, sillä käytössä ei ollut liimausjigiä, vaan oli pyritty pitämään liimausvaihe mahdollisimman yksinkertaisena. Liimaus päätettiin suorittaa niin, että liima toimisi samalla shimmiaineena eli täyttäisi ei-toivotut pinnanmuodot. Liimauksessa oli tärkeää saada laipat samaan linjaan, joten liimauksessa päätettiin kiinnittää Foot-kaaret (laipat) ”blokeilla” ensin toisiinsa jolloin varmistamme niiden tasomaisuus toisiinsa nähden. Tämän jälkeen kiristetään vasta liimauksen kiinnityspultit kaarialueella, jolloin laippojen tasomaisuus säilyy ja liima täyttää epätasaisen alueen ja toimii shimmausaineena. Näin liimasaumasta ja liitoskohdasta tulee tietoisesti odotettua paksumpi, mutta vaadittu tasomaisuus laipoilla säilyy. Ylimääräinen liima tuo lisää painoa siipikaareen, mutta ei vaikuta lujuusominaisuuksiin, sillä kaaret on lujuusominaisuuksiltaan analysoitu vain pulttiliitoksena. Näin liima tuo vain liitokseen ylimääräistä lujuutta suunniteltuun.

Kun kaaret on liimattu toisiinsa, liimataan vielä fettlingpadit kaaren ylälaipalle siiven yläpintalevyn kiinnityksen shimmausta varten ja supportplatet laippojen sisäpuolelle kaaren kiinnityspulttien vahvikkeiksi. Tämän jälkeen kaari oli valmis toiseen koneistukseen.

9.1.2 Koneistusvirheet

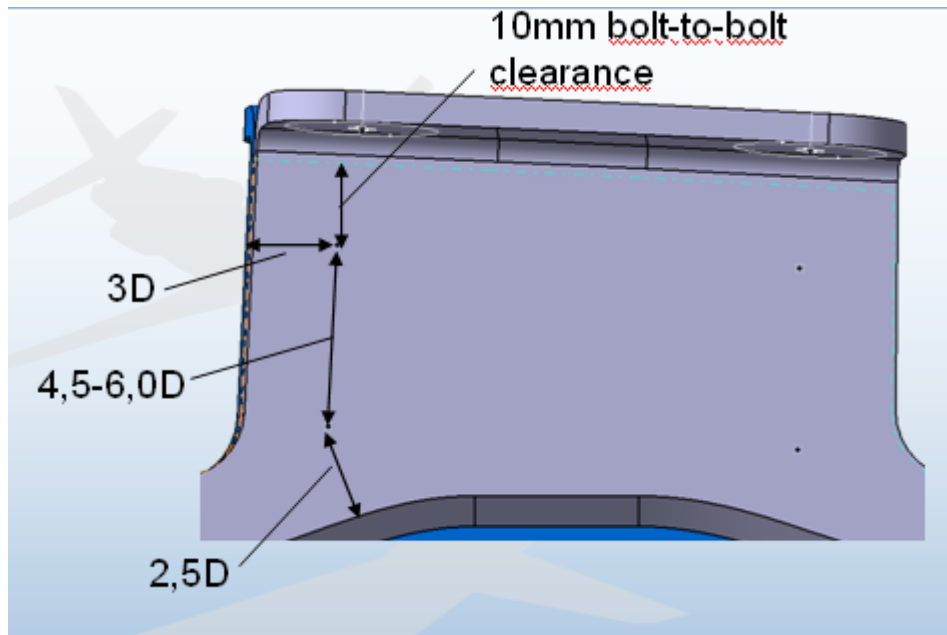
Koneistusohjelma määriteltiin jokaiselle osalle erikseen, koska kahta samanlaista osaa ei tehty samalla prosessilla. Prosessit erosivat työväliseen lämmityksen suhteen, koska käytettiin lisälämpölevyjä Demo-kaaren valmistuksen jälkeen. Niinpä koneistusohjelma määriteltiin jokaiselle osalle erikseen. Sarjavalmistusvaiheessa määriteltäisiin ensimmäisen osan valmistuksessa prosessi niin, että kaikki prosessivaiheet pystyttäisiin valmistamaan ilman, että jokaiselle osalle määritellään omat ohjelmat. Demo-kaaren koneistuksessa ei ollut tapahtunut mitään suuria virheitä, joten koneistuksen odotettiin onnistuvan odotetusti.

Koneistuksessa ilmeni kuitenkin pieniä ongelmia. Koneistuksen aloituskohdistuspiste oli tarkoitus määrittää osan referenssipisteestä. Tämä nollapisteen paikoitus oli kumminkin tehty koneistusjigiin erilliseen kohdistuspisteeseen. Vaikka jokaiseen osaan räätälöitiin oma koneistusohjelma, eivät osat olleet identtisiä ja näin paikoitus koneistuskiinnittimestä oli riski. Tämä tuli todistettua kokoonpannusta Rib 7 -kaassa. Koneistuksen nollapiste oli mennyt X-akselissa 0,5 mm ja Y- akselissa 1,5 mm sivuun oikeasta nollapisteestä. Tämä aiheutti kaikkien reikien ja mouseholen siirtymisen kaassa. Tämän lisäksi koneen kara oli törmännyt tuntemattomasta syystä koneistus jigiin ja siirtänyt jigiä 1,0 mm Y-akselin suunnassa. Mittaustulokset näkyvät alla kuvassa 43.



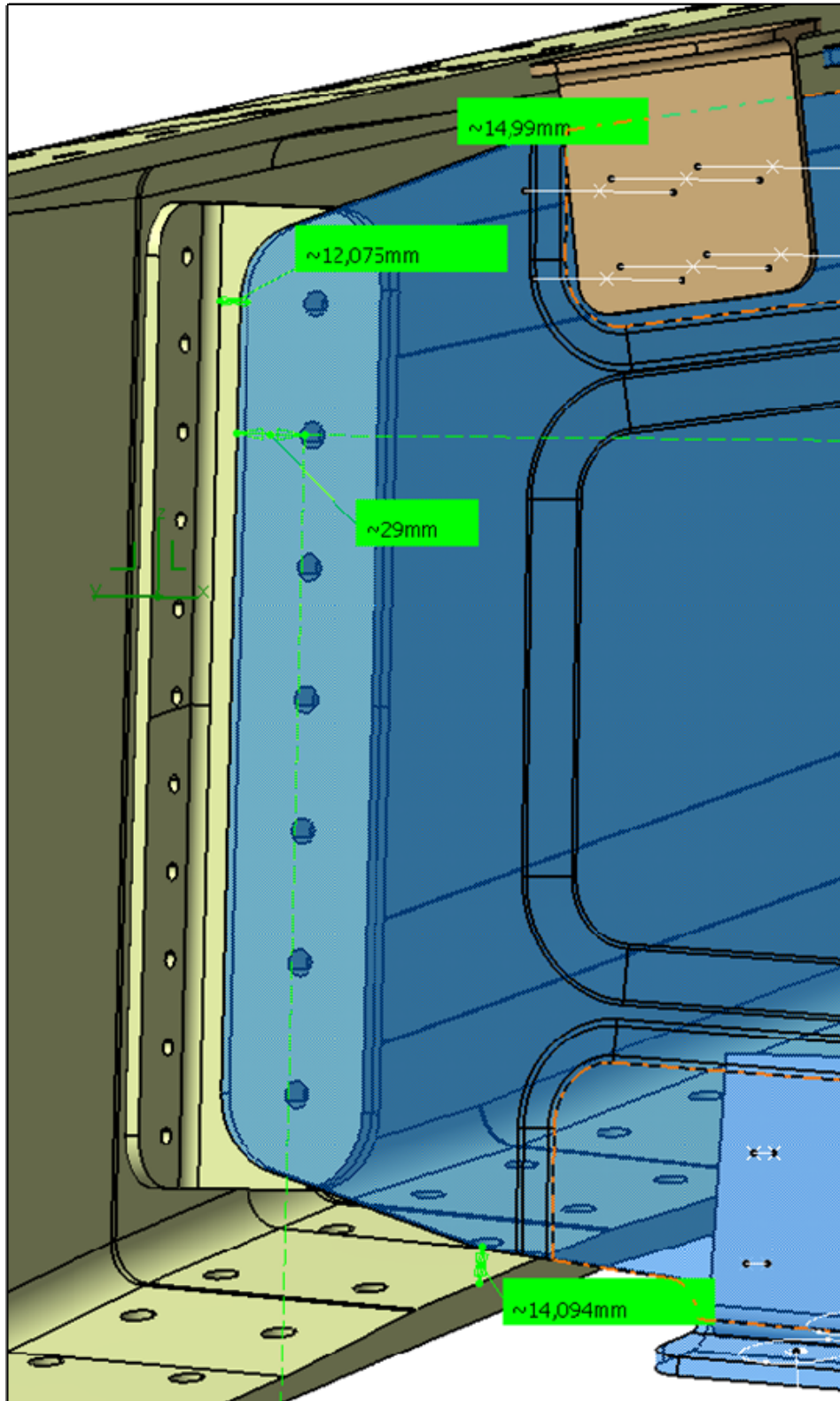
Kuva 43. koneistusvirheet Rib 7:ssä.

Suurin ongelma, jonka tämä aiheutti, oli laipan kiinnityspulttien reikien paikan siirtymisen lähemmäksi laippaa ja tooling holien siirtyminen. Myös kaikki läpivientireiät olivat koordinaattien muutoksen verran pielessä. Laipan pulttien etäisyydet alkoivat olla kaaren lujuuden puolesta riskirajoilla. Koneistusvirheen aiheuttamat pulttireikien siirtymiset lasketettiin lujuuslaskijoilla. Tuloksena oli, että paikkojen muutokset olivat hyväksyttävissä, koska koneistusvirheet kasvattivat kriittisten pulttien reunaetäisyyttä ja vastaavasti pienensivät ei-niin-kriittisten pulttien reunaetäisyyttä. Kuvassa 43 alla voidaan todeta pulttireikien etäisyyden määrittely.

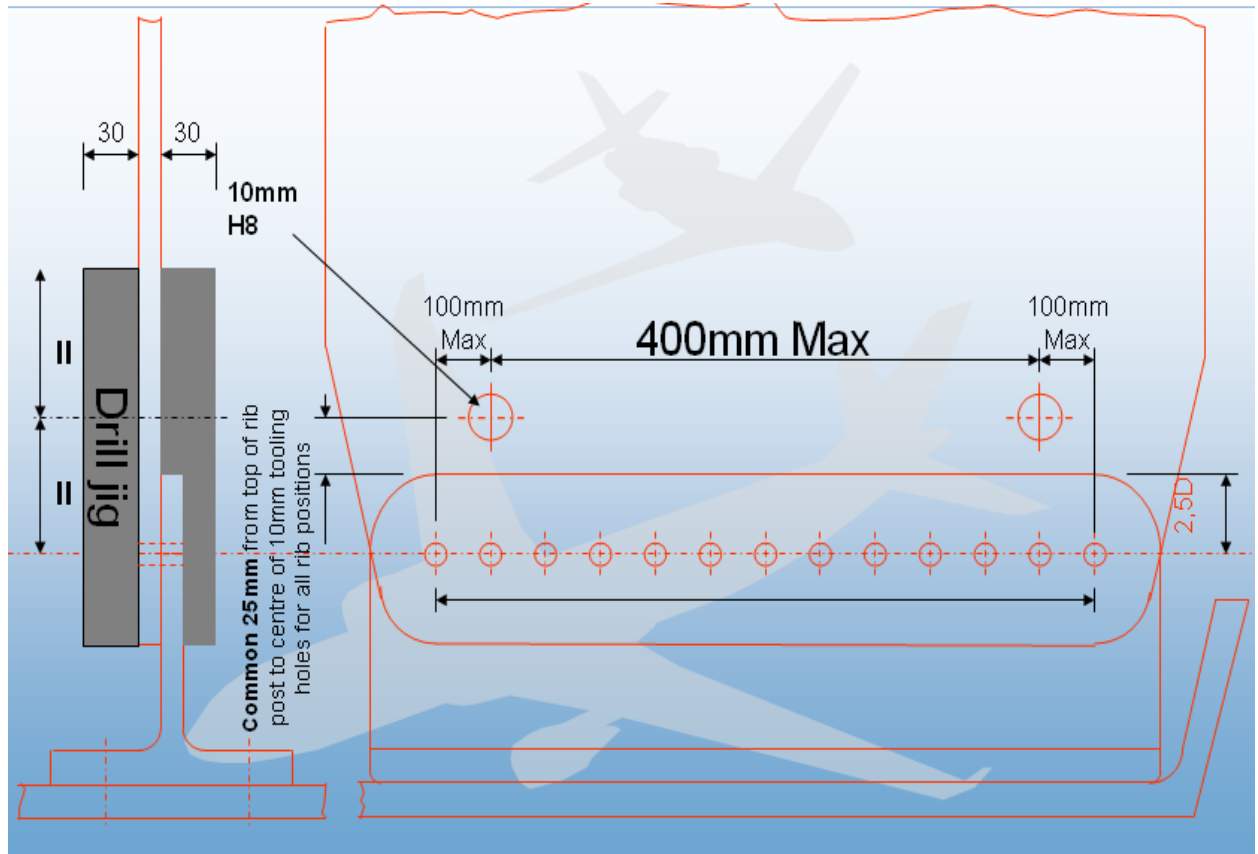


Kuva 44. Pulttireikien etäisyyden määrittely.

Toolingholen paikkojen siirtyminen vaikuttaisi Airbus UK:lla, kun siipikaarta asennettaisiin testattavaan siipeen. Siipikaaren poraustyöväline paikoitetaan toolingholeista etu- ja takasiipisalon kiinnitykseen. Näiden reikien paikan muuttuminen aiheuttaa poraustyövälineen uudelleen paikoituksen siipikaareen (kuvat 45 - 46 alla). Tämä on helposti toteutettavissa kun tiedetään toolingholejen heitto suunniteltuun. Nämä virheet olivat kuitenkin sen verran suuret, että näistä tuli raportoida Airbus UK:lle. Virheistä tehtiin Consessionin Airbus UK:lle, jossa kuvattiin tarkasti kaikki poikkeamien paikat ja se miten ne vaikuttavat esimerkiksi osaan ja sen asentamiseen. Tämän jälkeen Airbus UK päättäisi, ovatko virheet hyväksyttävissä heidän puolestansa. Tässä tapauksessa toolingholen paikka ei vaikuttanut lujuuteen, vaan ainoa merkitys oli loppuasennuksen vaikeutumisena.



Kuva 45. Siipikaaren paikoitus etusalkoon ja siiven yläpintalevyyn. /3/



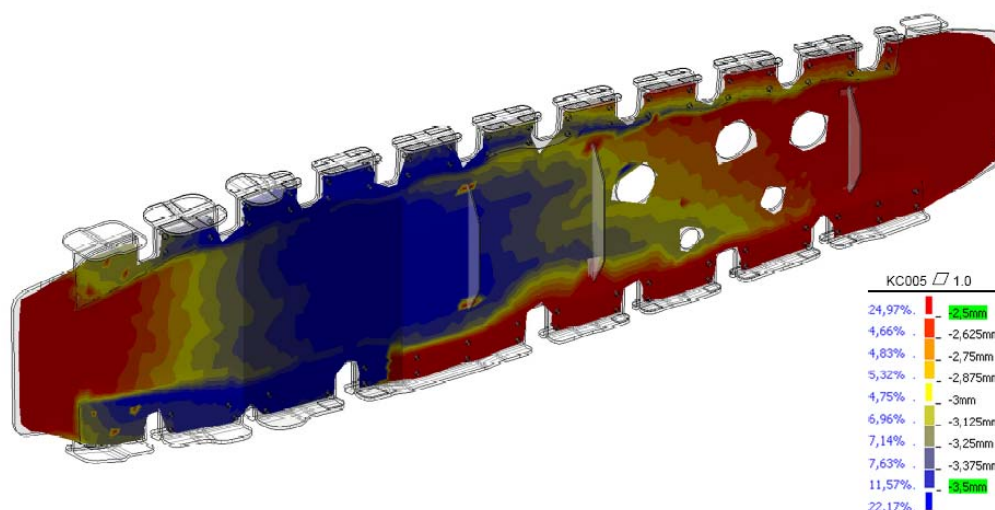
Kuva 46. Poraustyövälineen paikoitus toolingholesta /3/.

9.2 Loppukokoonpano

Loppukokoonpanossa suoritetaan Stiffenerien eli jäykisteiden asennus, laipanpulttien asennus, metalliosien esisovitus ja asennus ja lopulta viimeistellään kaaret. Jäykisteet asennetaan liimakalvolla ja pienillä pulteilla. Liima kovetetaan uunissa 120 asteessa noin 30 minuuttia. Pultit asennettiin pulttikartan mukaan. Kaikki pultit mitataan ja esisovitetään. Koska RTM-prosessissa (muotin taipuma + koneistusvirheet + kovetuskutistuma) syntyneet paksuusvaihtelut olivat vaikuttaneet liimasauman paksuuteen, jouduttiin odotetusti vaihtamaan osan pulteista pidempiin. Viimeistelyssä hiottiin suurimmat terävät särmät pyöreämmäksi ja osat puhdistettiin ja valmisteltiin pakkausta varten.

9.3 Tulokset Rib 7:ssä

Siipikaaren tasomaisuus (alue 4, KC005) vaihtelee lopulta ± 2.0 mm, mikä johtuu kaaren joustavuudesta ja paksuusvaihteluista eri alueilla. Näin siipikaari on ulkona vaaditusta $\pm 1,0$ mm:stä. Poikkeamat aiheutuvat muotin RTM-prosessin aikana syntyvistä muodonmuutoksista ja työvälineiden tarkkuudesta. Työvälineissä havaittiin noin 0,4 mm heitto kun mitattiin muottien sisään jäävän alueen paksuus, joten työvälineiden taipumisesta ja muodonmuutoksista RTM prosessin aikana oli syntynyt noin 0,6 mm lisää paksuutta siipikaareen. Tämä aiheutti sen, että siipikaari on noin 1 mm odotettua paksumpi kauttaaltaan siipikaaren alueelta.



Kuva 47. Rib 7 tasomaisuus KC005.

Mittausta varten siipikaari on kohdistettu niin, että siipikaaren Foot-kaaren ylä-laipan reunapinta on kohdistettu suoraan mittauksen helpottamiseksi (Kuva 48 alla). Tämä johtaa siihen, että Web-kaari taipuu. Foot-kaari ja Web-kaari eivät välttämättä ole aivan samansuuntaiset liimauksen jälkeen, koska liimauksessa käytettiin liimaa shimminä oikaisemaan liimauspintojen kuperuutta ja pinnanmuotoja. Näin mittauksissa voidaan todeta kaarevuutta siipikaaren pinnassa.

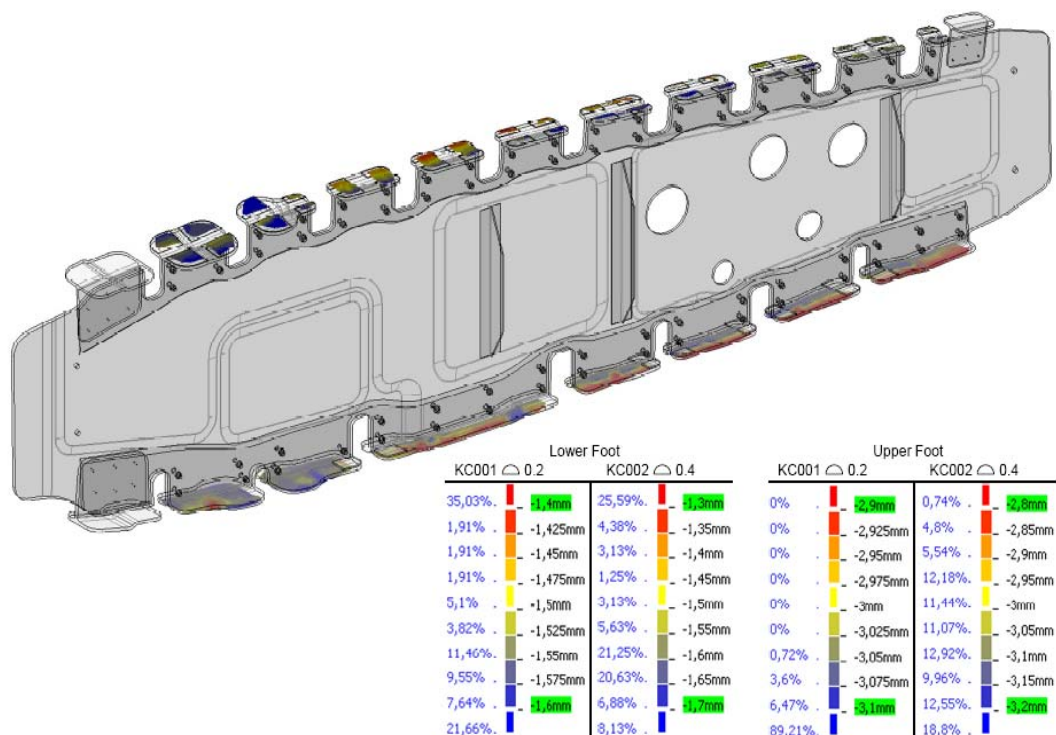


Kuva 48. Siipikaari lopullisissa mittauksissa.

Siipikaaren Web - Foot liima-alueen paksuus poikkeaa pahimmillaan $-0,5$ mm nominaalista, mikä johtuu liian paksusta liimasaumasta ja muodonmuutoksista kaarissa.

Alapuolen laipan pinnanmuodot ovat ulkona toleranssista KC001 ja KC002. Kaikki mittapistet ovat $\pm 0,5$ mm nominaalista, vaatimus $\pm 0,4$ mm yleisesti ja $\pm 0,2$ mm niin ylä- ja alalaipan kahdessa ensimmäisessä laippaosiossa (kts kuva 2 j 3). Ylälaippa on myös pois toleransseista (kuva 49 alla). Poikkeamat voivat johtua muoteista, liimauksesta tai RTM- prosessista. Liimauksessa käytettävien blokien tarkkuus ei välttämättä ole ollut riittävä, ja osien valmiit muodonmuutokset RTM prosessissa ovat myös vaikuttaneet laipan alueen pinnanmuotoihin. Yläpuolen laipalla sijaitsevat Fettling

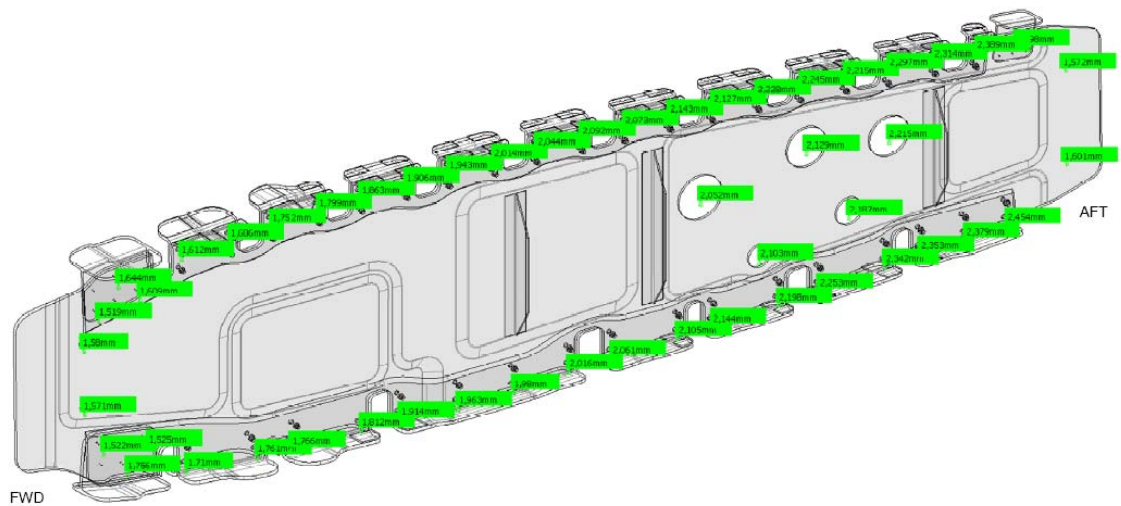
padit korjaavat osan mahdollisista mittapoikkeamista, mutta alalaipan muotovirheille ei voida tehdä mitään.



Kuva 49. Laippapinnan toleranssikuva.

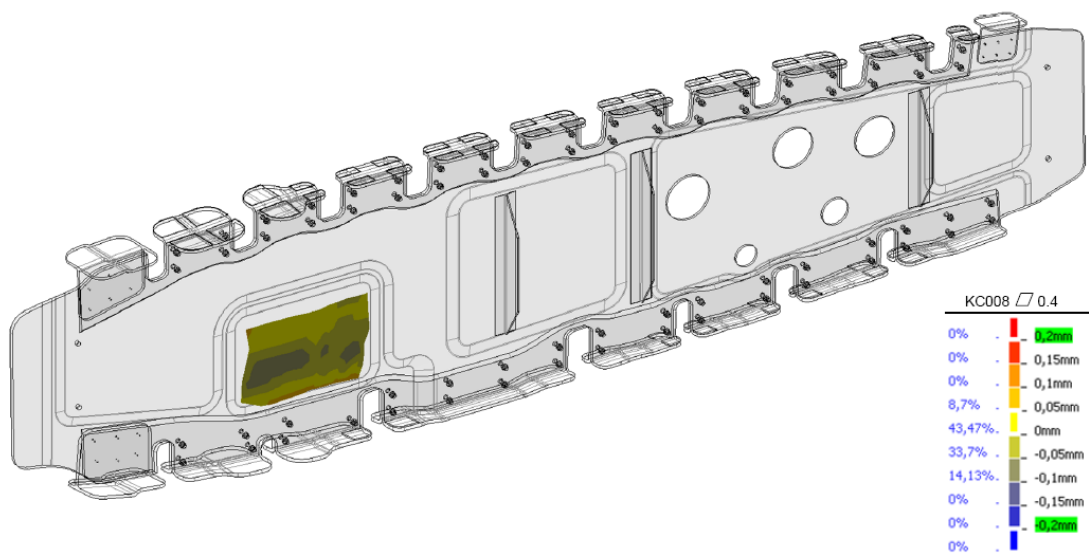
Rib 7 C-kaaren muoto ja mousehole:t poikkeavat -2,5 millimetristä + 3,5 millimetriin nominaalista. Tämä johtuu useasta koneistuksessa tapahtuneesta paikoitusvirheestä.

Kaikki reiät ovat poissa toleransseista. Tämä johtuu koneistusvirheestä. Neljä päädyssä sijaitsevaa tooling holea on siirtynyt 1,5 mm koordinaatiston Y- akseliin nähden (kappaleen korkeussuunnassa). Kaikissa rei'issä on poikkeamaa, johtuu koneistusjigin liikkumisesta koneistuksen aikana (kuva 50 alla).



Kuva 50. Rib 7:n koneistusvirheet.

Siipikaaren päissä sijaitsevat tasomaiset alueet ovat vaadittujen toleranssien sisällä $\pm 1,0\text{mm}$ (vaatimus KC007). Myös Pylon –Rib kiinnityskohdan tasomaisuusvaatimus $\pm 0,4\text{ mm}$ KC008 täyttyy.

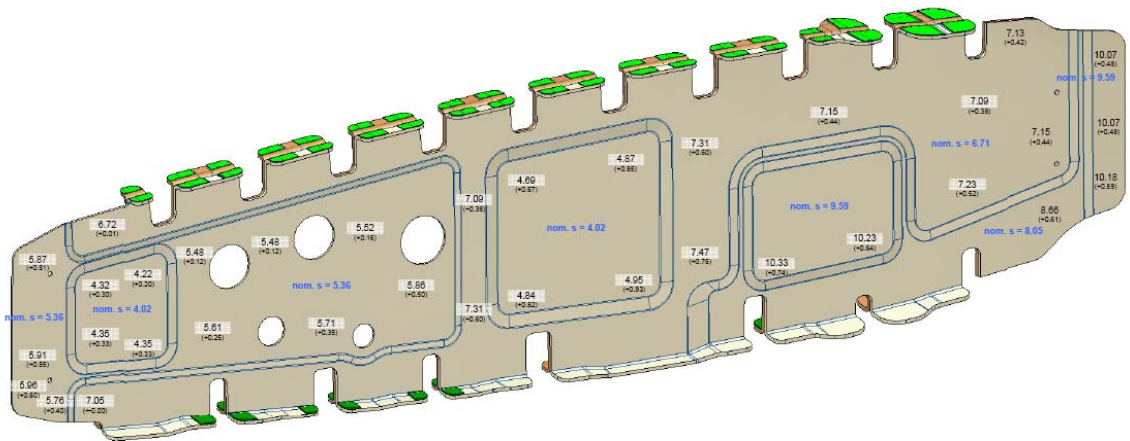


Kuva 51. Pylon-rib kiinnitysalueen tasomaisuus KC008.

Siipikaaren paksuus vaihtelee ja poikkeaa hieman vaaditusta. Päädyissä poikkeama on vain 0,5 mm ja keskialueella noin 1,0 mm verran (kuva 52 alla). Tämä viittaa siihen, että siipikaaren muotit ovat päässeet antamaan periksi RTM- prosessissa. Näin osista on

tullut hieman odotettua paksumpia. Myös muotit olivat osoittaneet mittatarkasteluissa olevan noin 0,2 mm avarammat, jolloin osan paksuuden kasvu oli jo odotettavissa.

Metalliosat, jotka hankittiin alihankinnan kautta, mitattiin ja verrattiin 3D-malliin. Kaikki metalliosat olivat halutussa toleransseissa.



Kuva 52. Rib 7:n paksuus.

10 Rib 8:n valmistus

Seuraavassa osiossa käydään läpi lopullisen Rib 8 siipikaaren työvaiheet, niissä havaitut virheet ja niiden vaikutus osien toleransseihin.

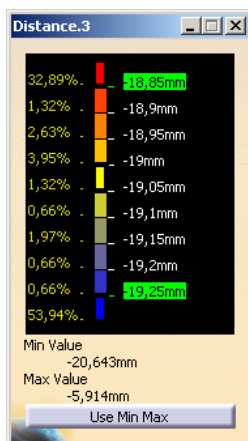
10.1 Preformaus ja injektointi

Rib 8:n valmistus alkoi C-web:n valmistuksella. Preformaus sujui ongelmitta, mutta laipan jogglen kohdille syntyi vielä hieman pieniä ryppyjä. Niiden todettiin olevan jälleen vain pintakerroksissa, jolloin niillä ei oletettu olevan merkitystä.

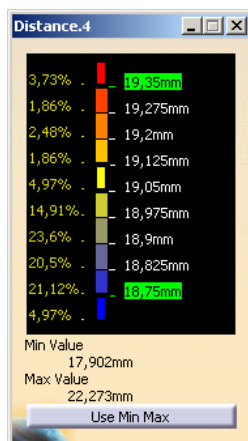
Injektointi suoritettiin jälleen seuraavana päivänä. Injektoinnissa ei ollut ongelmia, mutta jälkepäin huomattiin, että oli unohdettu nostaa kovetuslämpötila ennen injektointipaineen 5 bar:iin. Injektointi paineena käytimme 2 - 3 baria ja kovetuksen aloitettua paine olisi tullut nostaa 5 bariin kovetuksen ajaksi. Kyseinen paineen noston puuttumisen ei uskottu vaikuttaneen itse osaan.

Injektoinnin ja kovetuksen jälkeen tarkasteltiin osaa, jolloin huomattiin sen olevan silmämääräisestikin kupera. Mittaukset todensivat kupuruuden, kuten kuva 53 alla osoittaa. Ensimmäiset epäilyt kohdistuivat kovetuksen aikana unohtuneeseen paineen nostoon. Sillä todettiin olevan vähiten osuutta asiaan.

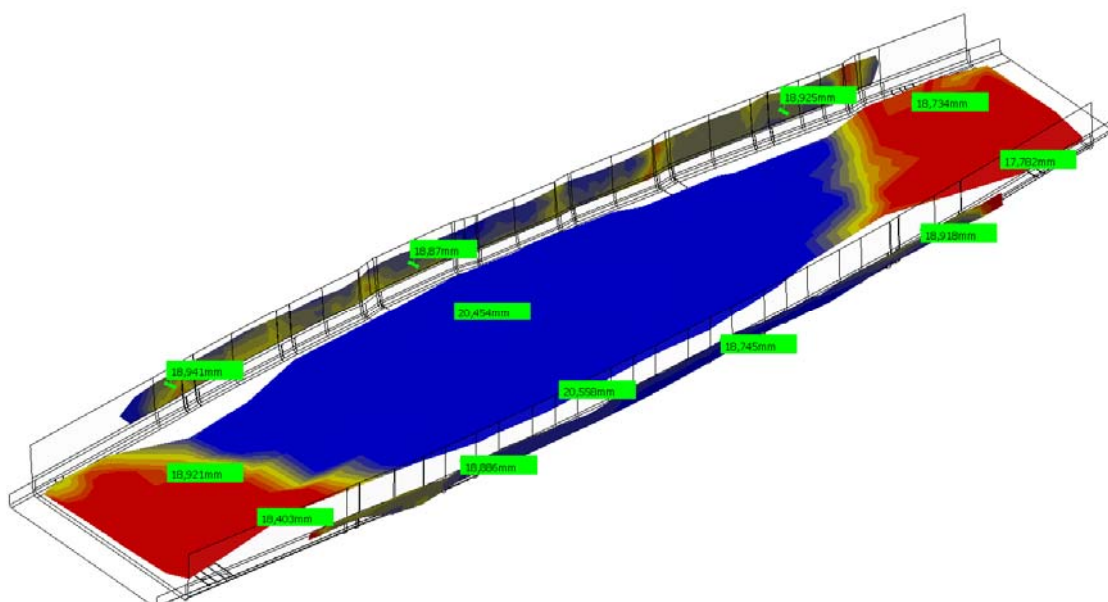
Mittauksessa todettiin C-Webin olevan 90 %:ti $\pm 1,5$ mm tarkkuudessa tasomaisuuden suhteen ja 13 % pisteistä olivat halutussa $\pm 0,2$ mm tarkkuudessa. C-Web-kaaren laipalla oli mittapoikkeamia $-1,2$ mm ja $+3,2$ mm väliltä nominaalista. Laipan alueelta mitatut pisteet olivat kumminkin 90 % vaaditun $\pm 0,2$ mm tarkkuudessa (kuva53). Mittareferenssipisteiden paikat olivat tässäkin osassa odotettua pienemmät. Mittapisteiden välisen etäisyyden tuli olla 2362,726 mm, mutta osasta mitattiin etäisyydeksi 2360,546 mm. Osan referenssipisteiden mukaan lämpölaajeneminen oli ollut $-2,18$ mm pienempi. Tämä viittaisi yhdessä kupuruuden kanssa vieläkin siihen, ettei muotti lämpiä tasaisesti.



Inside (web area)



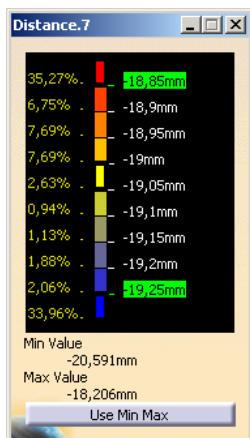
Outside (flange area)

**Kuva 53. Rib 8 C-Web mittaustulokset.**

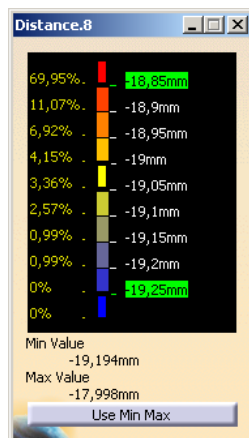
Heti C-Webin injektoinnin jälkeen suoritettiin Rib 8 footin injektointi, koska aikataulu oli kriittinen toimituksen suhteen. Preformauksessa huomattiin jälleen rypyjen muodostumista, mutta jälleen ne sijaitsivat vain pintakerroksissa. Preformauksen suhteen tulimme siihen tulokseen, mikäli kyseisiä osia tultaisiin valmistamaan tulevaisuudessa, hankkisimme preformausta varten lämmitettävät preformauslevyt, joilla pyrittäisiin ehkäisemään rypyjen muodostumista preformauksessa.

Injektointi sujui ongelmitta. Injektoinnin jälkeisessä mittauksessa todettiin jälleen osan olevan jälleen kupera. Kuva 54 alla osoittaa, kuinka molemmat päädyt ovat keskikohtaan nähden noin 1,0 – 1,2 mm koholla. Mittapisteiden poikkeamat olivat -0,85 mm ja +1,55 mm väliltä. Kaiken kaikkiaan 30 % mittapisteistä oli halutun $\pm 0,2$ mm

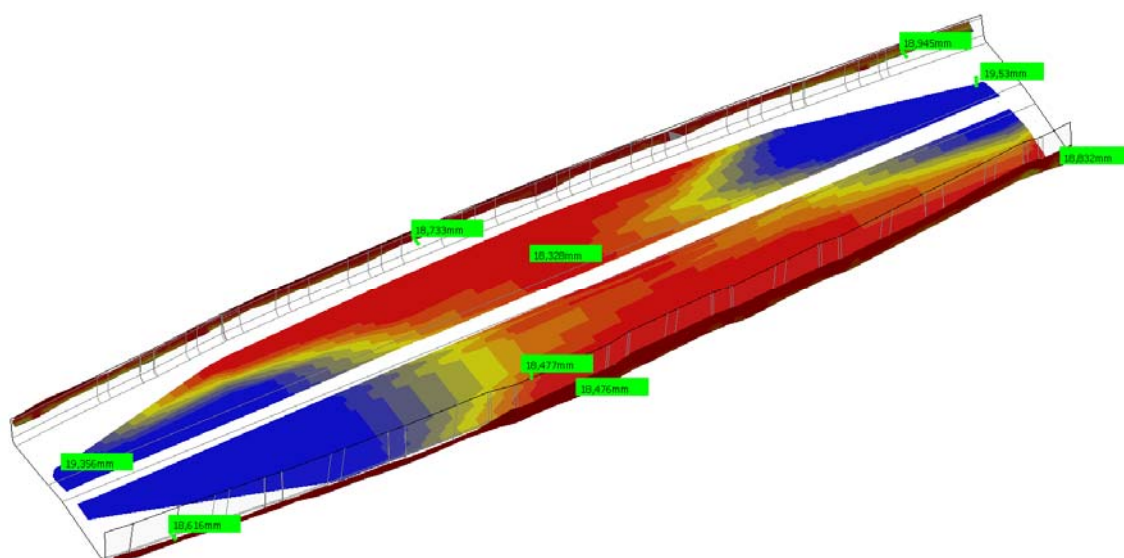
tasomaisuusvaatimuksen sisällä. Laipan alueella mittapisteiden poikkeamat olivat -1,05 mm ja +0,15 mm väliltä. Myös laipalla 30 % mitatuista pisteistä oli halutussa $\pm 0,2$ mm tarkkuudessa.



Outside (web area)



Outside (flange area)



Kuva 54. Rib 8 L-foot mittaustulokset.

Osat olivat tarpeeksi hyviä loppuprosesseja ajatellen, koska mittapoikkeamat tasomaisuudessa eivät haittaa, sillä toisen koneistuksen jälkeen osien muotojäykkyys heikkenee mouse holejen johdosta ja kaaresta tulee erittäin taipuisa. Myös Foot-kaaren ja C-webin laippojen tasomaisuus asetetaan vasta kokoonpanossa toisiaan nähden, joten Footin laipan tasomaisuus määräytyy vasta silloin. Näiden johdosta kyseisistä osista päätettiin valmistaa Rib 8 -siipikaari.

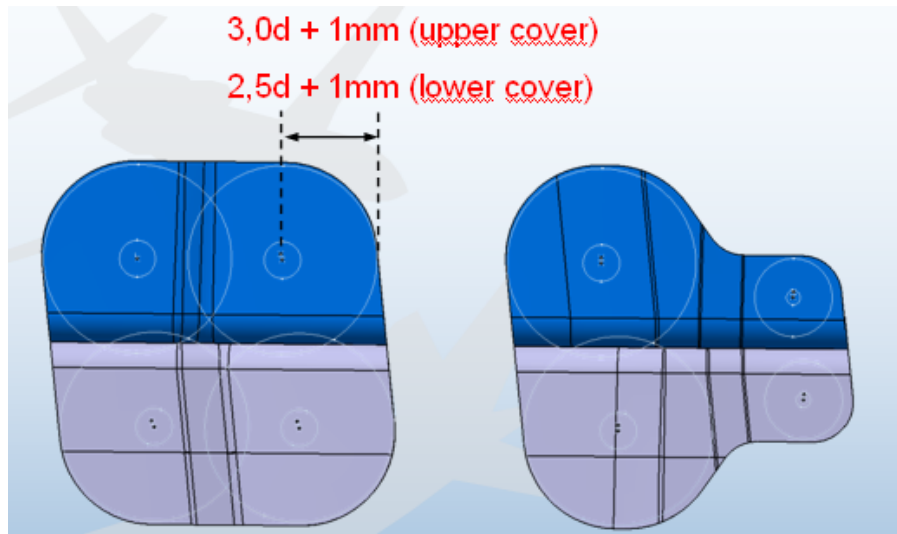
10.2 Koneistus ja kokoonpano

Ensimmäinen koneistuksen kanssa ei havaittu ongelmia kummassakaan osassa. Kokoonpano sujui myös ongelmitta, sillä osissa ei ollut samanlaista ongelmaa kuin Rib 7 -osissa, joissa muotti oli antanut kevennyksen kohdalta periksi. Näin liitospinnat olivat tasomaisia ja liimaa ei tarvinnut käyttää niin paljoa shimminä Rib 8 -kaaressa. Myös ongelmat oli jo suurimmaksi osaksi kohdattu Rib 7-kaaren ja demo kaaren valmistuksessa, joten Rib 8 kaari onnistui liimauksen suhteen hyvin.

Kokoonpanon liimausten jälkeen oli vuorossa toinen koneistus. Oletettiin, että Rib 7 kanssa kohdatut ongelmat olisivat ohitse ja koneistusprosessi olisi hiottu ns. sarjatuotantoa varten ja Demo-kaaren kanssa emme ongelmia löytäneet. Rib 8:n jälkimmäisessä koneistuksessa oli tapahtunut kuitenkin virhe otettaessa nollapistettä osasta. Nollapiste oli liikahtanut tai asetettu 1,5 mm oikeaa pintaa alemmaksi. Tämä johti siihen, että laipan reuna oli toisella puolella 1,5 mm liian lyhyt ja toisella puolella 1,5 mm liian pitkä. Koneistuksen jälkeen osa mittatarkastettiin, jotta saataisiin tarkempaa tietoa asiasta.

Mittauksissa todettiin, että mittapoikkeamat laipalla olivat -2,1 ja +1,8 mm nominaalista. Nominaaliarvo loppukokoonpanon mittauksissa oli 1,5 mm, koska mittaukset tehtiin Faro Arm:lla jossa käytettiin 3 mm pallomittapäätä. Laipan reunan siirtymä siipikaaren tasoon nähden oli yllämainittu 1,5 mm. Tämä laipan koneistusvirhe vaikuttaisi laipalle asennettävien pulttireikien lujuuteen.

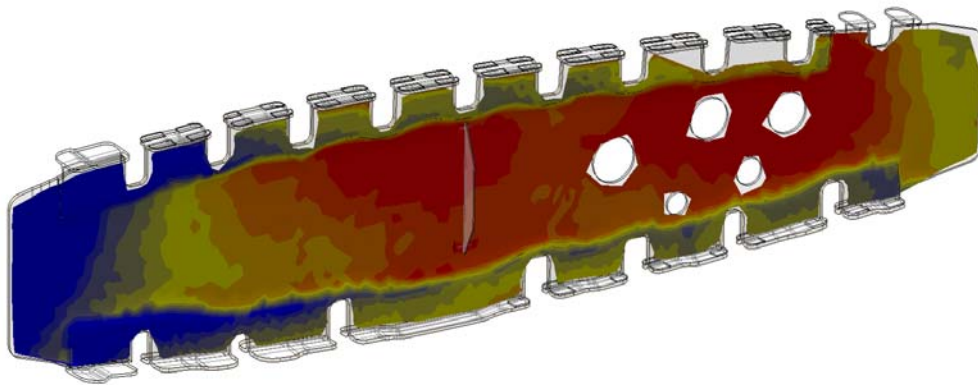
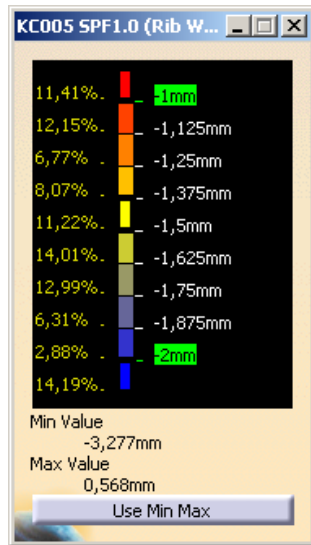
Suunnitteluarvoihin oli laitettu 1,0 mm toleranssivara, joka oli myös laipan reunan tarkkuuden toleranssi (KC0003), mutta tämäkin ylittyi hieman (Kuva 55 alla). Tämä koneistusvirhe vaikuttaisi koneistuksessa lyhyemmäksi koneistettuun laippaan, sillä siinä olisi nyt noin 0,5 mm liian pieni reunaetäisyys tulevaan pultinreikään.



Kuva 55. Pulttireikien etäisyystoleranssi laipoilla. /3/

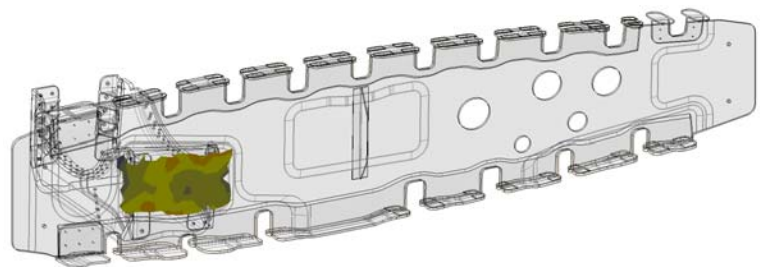
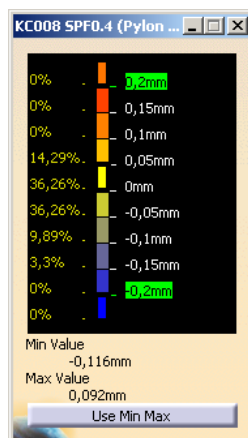
10.3 Tulokset Rib 8 siipikaarella

Siipikaaren lopullinen tasomaisuus näkyy kuvasta 56 alla. Tasomaisuus oli $\pm 1,9$ mm eikä näin täyttänyt vaadittua $\pm 1,0$ mm KC005 toleranssia. Poikkeamien suurin aiheuttaja on kaaren joustavuus poikittaissuunnassa, jolloin mittaus ilman tarkkaa mittausjigiä on vaikeaa. Mittausta varten kaari asetettiin samoin kuin Rib 7, jotta tuloksia voitaisiin verrata kaarille samalla tavalla. Kuvasta näkee myös Footien (irtolaippojen) ja C-webin välisen liimasauman. Liimasauman on 3D-mallissa oletettu olevan minimaalinen, eikä sitä ole otettu huomioon siinä.



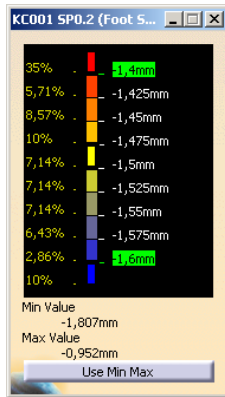
Kuva 56. Rib 8 tasomaisuusmittaus KC005.

Siipikaaren Rib-Pylon KC008 ja toolinghole-pintojen tasomaisuus KC0007 molemmissa päädissä oli vaaditussa $\pm 0,4$ mm toleranssissa (kuva 57 alla).

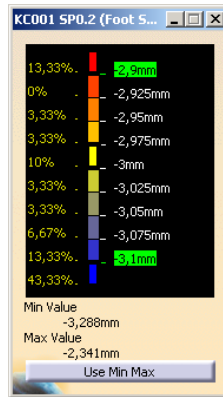


Kuva 57. Rib- Pylon kiinnityspinnan tasomaisuus KC008

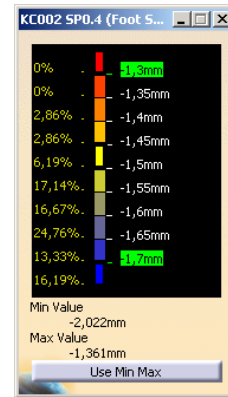
Kuva 58:ssä alla näkyy ylä- ja alalaippojen pinnan todellinen poikkeama. Molemmat laipan pinnat ovat pois toleranssista. Alalaipan vaadittu $\pm 0,2$ mm (KC001) toleranssi ensimmäisissä laipan osissa ei täyty, sillä taka-alalaippa on liikahtanut oletettavasti liimausjigissä, ja C-web ja Foot laippojen tasomaisuus toisiinsa nähden ei täyty. Keskeltä alalaipalta toleranssivaatimus $\pm 0,4$ mm (KC004) täyttyy. Ylälaipan toleranssivaatimukset etu- ja takapäässä $\pm 0,2$ mm (KC001) eivät täyty. Keskialueella ylälaipalla on huomattavissa myös C-web ja Foot-laipan tasossa eroa. Tämä voi johtua myös liimauksesta tai Fettling padien liimauksesta johtuvasta epätasaisuudesta. Mittavirheet laipalla aiheutuvat monesta eri tekijästä, kuten RTM työvälineiden tarkkuudesta, liimauksesta kokoonpanossa. Kokonaisuudessaan kaikki tämä huomioiden tulos oli hyvä.



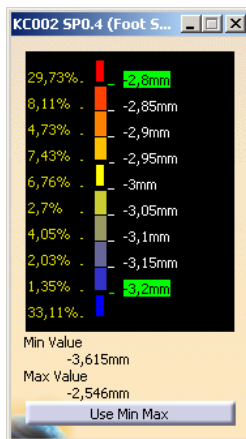
Lower FWD & Aft



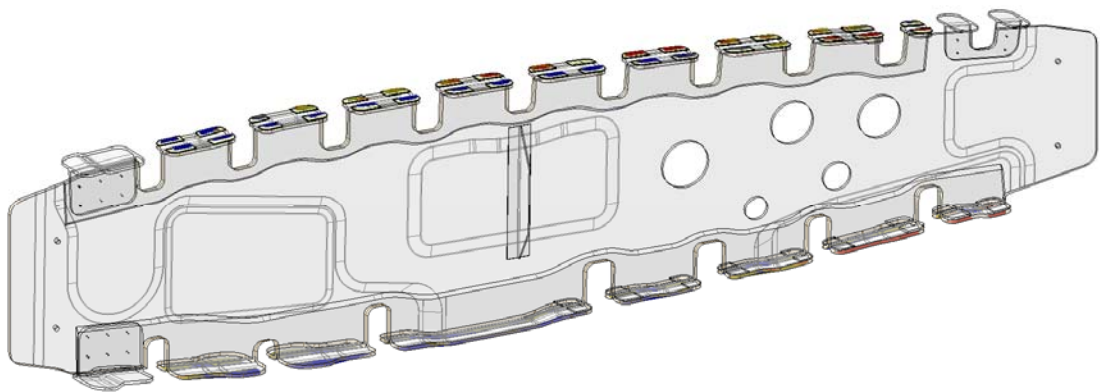
Upper FWD & Aft



Lower Intermediate

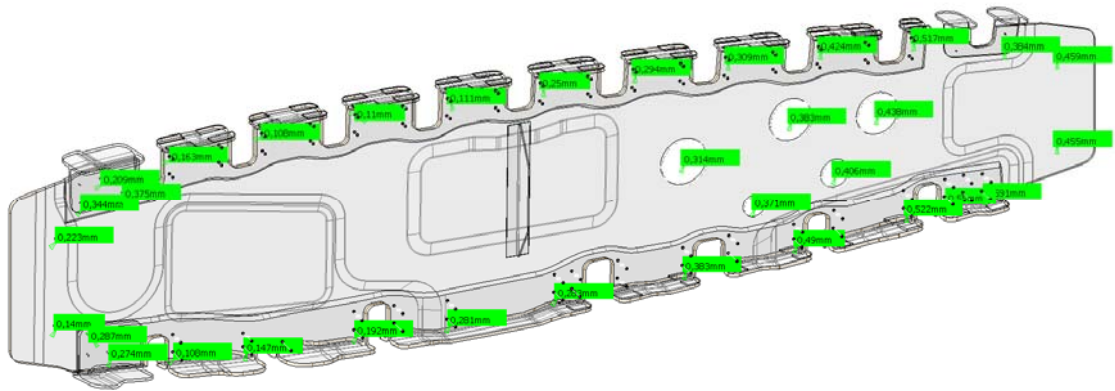


Upper Intermediate



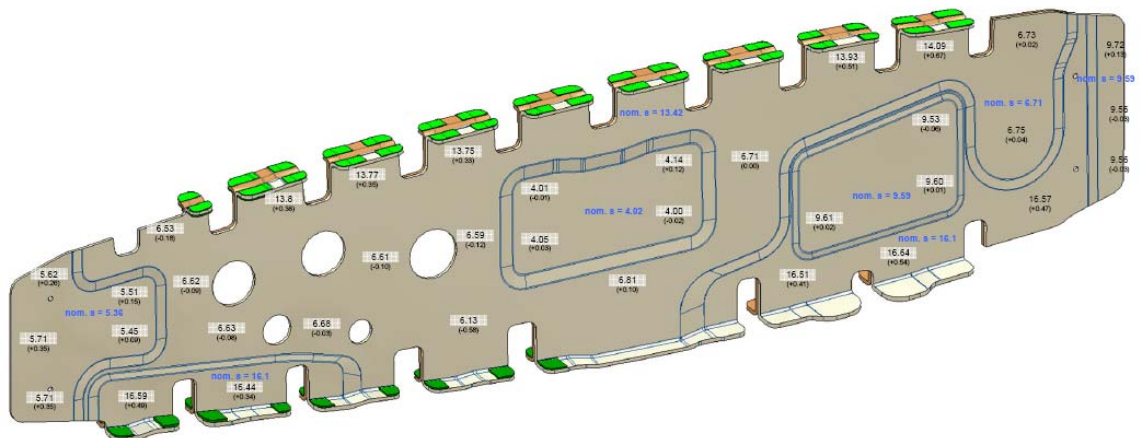
Kuva 58. Laippojen pinnan mittaustulokset.

Koneistuksessa tapahtunut korkeuspaikan asetusvirhe vaikutti laipan leveyteen ja sitä kautta pulttireikien reunaetäisyyksiin. Muuten kuten alta kuvasta 56 voidaan todeta, muut reiät ja mouse holet ovat vaadituissa tarkkuuksissa.



Kuva 59. Rib 8 Mouse hole ja läpivientien tarkkuus.

Rib 8:n Paksuudet olivat lähellä odotettua, kuten alla olevasta kuvasta voi todeta. Suurimmat paksuusvaihtelut löytyivät laipan liimasauman alueelta, jossa mittapoikkeama oli 0,5 mm. Tämä johtui jälleen liimasaumasta, jota ei ole otettu huomioon 3D-mallissa. Kaaren keskiosassa paksuus oli $\pm 0,1$ mm toleranssissa ja kaaren takaosissa paksuus oli hieman yli odotetun $+0,35$ mm pahimmillaan.



Kuva 60 Rib 8 paksuus.

Metalliosat, jotka hankittiin alihankinnan kautta, mitattiin ja niitä verrattiin 3D-malliin. Kaikki metalliosat olivat halutussa toleransseissa.

11 Johtopäätökset

Tehtävänäni oli tutkia RTM-prosessilla valmistetun siipikaaren suunniteltuja ja toteutuneita toleransseja kaikissa prosessivaiheissa. Verratessani saavutettuja toleransseja huomasin, että halutuissa toleransseissa emme täysin pysyneet. Käyn seuraavassa läpi prosessi prosessilta lävitse saavutetut toleranssit.

Lähtökohtaisesti näin suuriin osiin työvälineen toleranssivaatimus oli 0,1 mm, mutta siitä luovuttiin, koska tiedettiin, ettei kyseiseen toleranssiin päästäisi. Työväline-toleranssi $\pm 0,2$ mm oli realistisempi kuin 0,1 mm, jota voitiin pitää parhaana mahdollisena pyrkimyksenä toleransseissa. Kaikissa työvälineissä saavutettiin 90 %:sesti tavoiteltu $\pm 0,2$ mm tasomaisuus uumalla, mutta laipanalueilla oli hieman suurempia mittapoikkeamia.

RTM- prosessissa pyrittiin saavuttamaan työvälineissä saavutettu toleranssitarkkuus, eikä prosessissa odotettu olevan mitään sellaista, joka kasvattaisi osan epätarkkuutta. RTM-prosessin kovetuskäyttäytyminen yhdistettynä työvälineisiin ja prässistä kohdistuvaan paineeseen aiheutti kumminkin RTM-prosessivaiheessa ylimääräisiä epätarkkuuksia osiin. Juuri prosessin kovetuksen ja prässin yhteiskäyttäytyminen jäi vielä osaltaan epäselväksi. Mikäli tulevaisuudessa kyseisiä osia tultaisiin jossain muodossa valmistamaan RTM-tekniikalla, tulisi kyseistä prosessia ja sen käyttäytymistä vielä tutkia, jotta päästäisiin tavoiteltuun tarkkuuteen RTM-prosessissa.

Kokonaisuutenaan RTM-prosessissa syntyneet toleranssitarkkuuden heitot olivat suurimmat osan tasomaisuudessa. Haluttua $\pm 0,2$ mm ei saavutettu missään yksittäisessä osassa.

Laipan alueen toleranssivaatimus oli $\pm 0,2-0,4$ mm. Tämä tarkkuus saavutettiin kohtalaisesti yksittäisissä osissa, mutta kokoonpannussa osassa laipan pintojen tasomaisuus- ja reunatoleransseja ei saavutettu kaikkialla.

Laippojen kohdistustarkkuus oli kuitenkin kohtalaisen hyvä, ajatellen, ettemme käyttäneet suurta liimausjigiä, vaan hyödynsimme osien omaa työvälineestä ja RTM-prosessista saatua tarkkuutta ja kohdistimme laipan tasopinnot toisiinsa vain blokeja

käyttämällä. Kuten aiemminkin on mainittu, laippojen tarkkuudessa oli vielä hieman pelivaraa loppukokoonpanossa Airbus UK:lla, joten siipikaarien tarkkuus oli riittävä.

Koneistus onnistui melkein täydellisesti Demo kaassa, niin ensimmäisessä kuin toisessa koneistuksessa. Rib 7 C-webin ensimmäiset koneistukset onnistuivat hyvin, mutta toisessa koneistuksessa sattuneet inhimilliset virheet, X-, Y- koordinaattien väärin paikoitus ja koneistuskiinnittimen liikahtaminen, toivat huomattavia virheitä. Virheiden johdosta havaittiin kaassa mittapoikkeamia -2.5 mm +3.5 mm:iin niin pulttireikien paikoissa, mouseholeissa ja toolingholeissa. Onneksi nämä virheet eivät vaikuttaneet negatiivisesti kaaren lujuusominaisuuksiin, joten koneistusvirheet olivat hyväksyttävissä.

Rib 8:n ensimmäiset koneistukset onnistuivat myös odotetulla tavalla, mutta toisessa koneistuksessa tapahtui Z-akselin nolapisteen paikoituksessa jälleen inhimillinen virhe, joka oli noin 1,5 mm. Tämä johti laippojen reunojen epäsymmetriseen leveyteen kaaren tasopintaan nähden. Toinen laippa oli 2,1 mm odotettua kapeampi ja toinen laippa 1,8 mm leveämpi. Muuten Rib 8 -kaaren koneistus onnistui odotetulla tarkkuudella. Ilman näitä koneistus virheitä olisi kaarien kokonaistoleranssitarkkuus lähellä odotettua.

Kaiken kaikkiaan siipikaarien lopullinen tarkkuus hyväksyttiin FAI:ssa Airbus UK:n vieraillessa ja tarkastamassa osia.

Lähteet

- 1 Halme, Juha, Keskustelut 2009
- 2 Van Daalen, Arvid, Keskustelut 2009
- 3 ALCAS- documentit Patria Aerostructures
- 4 Van Daalen, Arvid, FAI- raportit (ALCAS)
- 5 Tourunen, Veli-Matti, Keskustelut 2009
- 6 Condition of supply Airbus UK
- 7 Tourunen, Veli-Matti, KOMPOSIITTIOSIEN
VALMISTUSTYÖVÄLINEIDEN MITTAUKSEN TUTKIMINEN.
Tutkintotyö.