



TAMPEREEN
AMMATTIKORKEAKOULU

KOMPOSIITTIOSAN KONEISTETTU PAK- SUUS JA PINNANKARHEUS

Pyry Turja

Opinnäytetyö
Kesäkuu 2018
Konetekniikan koulutusohjelma
Tuotantotekniikka



TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Konetekniikan koulutusohjelma
Tuotantotekniikka

TURJA, PYRY:

Komposiittiosan koneistettu paksuus ja pinnankarheus

Opinnäytetyö 140 sivua, joista liitteitä 16 sivua
Kesäkuu 2018

Työn tarkoitus oli tutkia hiilikuitukomposiitista valmistetun testiosan koneistusominaisuuksia, koneistettua paksuutta ja pinnankarheutta sekä aihetta käsittelevän tutkimustiedon että testiosan koneistamisen avulla. Paksuutta koneistamalla saatiin tietoa koneistusprosessissa syntyvistä epätarkkuuksista.

Työn tavoitteina oli saada käyttökelpoista mittausdataa koneistusprosessin lopputuloksesta, selvittää koneistetun hiilikuitukomposiitin pinnan mikrorakennetta ja selvittää toimenpiteitä ja apuvälineitä, joilla koneistusprosessia voisi helpottaa tai parantaa laadun kannalta. Työ toimi myös referenssiteoksena yritykselle hiilikuitukomposiitin koneistusominaisuuksista.

Testiosasta saatiin koneistettua sileä ja muototarkka pinta. Muotovaihtelu todennettiin kuulakärkisellä mikrometrillä. Tuloksista erottuivat selkeästi muotopoikkeamat. Koneistettua pintaa mitattiin optisesti Tampereen teknillisellä yliopistolla koneistetun palan pinnankarheuden ja mikrorakenteen selvittämiseksi, ja mittauksen tulokset kirjattiin työhön.

Työn tuloksena saavutettiin 0,12 mm:n vaihteluväli koneistetulle paksuudelle. Paksuus pysyi 0,07 mm:n vaihteluvälillä samanpaksuisena 1,4 m:n radalla. Koneistettu muoto oli 0,15–0,26 mm CAD-mallia syvemmillä, mikä voi johtua koneistuskiinnittimen ja imuurien aiheuttamasta epätarkkuudesta, kappaleen painumisesta koneistuskiinnittintä kohti tai lukuisien muiden syiden yhtälöstä. Tuloksen saavuttamiseksi vaadittiin kaksoiskaareva testiosa, vastakoneistettu kiinnitinjärjestelmä ja moniakselinen työstörata.

Työn johtopäätöksenä yrityksen koneistuskeskus ei ole välittömän uusimisen tarpeessa, mikäli asiakkailta ei tule sellaisia tilauksia, joiden koneistetun muodon toleranssit eivät ylitä tässä työssä mitattua tarkkuutta. Paksuutta koneistaessa on hyvä ottaa huomioon koneistuskiinnittimen mittatarkkuus ja asetuksista aiheutuvat epätarkkuudet. Tämän voi tehdä esimerkiksi koneistamalla paksuutta 0,26 mm:n etäisyydellä suunnitellusta pinnasta, mittaamalla kappaleen paksuus, tekemällä tulosten mukaan kompensaation pienentämisestä tai poistamisesta ja koneistamalla uudelleen. Lisäksi koneistuskeskuksen B- ja C-akseleissa voi olla jotain geometristä epätarkkuutta, ja työkalun kiinnityksessä karaan voi olla mittausongelmia, ja niiden tutkiminen tarkemmin voi olla hyödyllistä jatkotutkimusta. Tässä työssä tuotetun tiedon avulla osataan varautua virheisiin ja suunnitella paksuuden koneistusta vaativia komposiittiosia huolellisemmin.

Asiasanat: komposiitti, CFRP, koneistus, tarkkuus, pinnankarheus, suunnittelu

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Mechanical Engineering, B.Eng.
Production Technology

TURJA, PYYRÄ:

Machined Thickness and Surface Roughness of a Composite Part

Bachelor's thesis 140 pages, appendices 16 pages

June 2018

The purpose of this thesis was to research a company's carbon fiber composite test part's machining attributes, machined thickness and machined surface roughness by utilizing available research on the subject and by machining a test part. Information about the machining process' inaccuracy was made available by machining thickness.

The goal of this thesis was to obtain usable measurement data about the result of the machining process, to research the microstructure of a milled surface, and to investigate additional procedures and utilities to ease the machining process or to produce better quality. This work also acts as a reference for the commissioning company on the machining attributes of carbon fiber composites.

A smooth and dimensionally accurate surface was machined into the test part. The dimensional variation was verified with a micrometer. The measurement data clearly showed the dimensional variation. The machined surface was optically measured at Tampere University of Technology to map the microstructure of the surface, and the results were gathered into this thesis.

As a result of this thesis a dimensional variation of 0,12 mm was achieved for the machined thickness. The thickness variation stayed within 0,07 mm on a 1,4 m long path. The machined thickness was 0,15–0,26 mm deeper in comparison to the CAD model, which may be caused by inaccuracy of the machining fixtures and the vacuum attachment, the pressing of the test piece by the tool into the fixture or numerous other plausible factors. In order to achieve this result, a part with a non-developable surface, a freshly machined fixture and a multi-axis toolpath were required.

As a result of this study, the company's machining center is not in a need of immediate renewal for as long as clients do not place orders with tolerance requirements of machined dimensions exceeding those measured in this thesis. While machining thickness it is necessary to take note of the inaccuracies caused by the machining fixture's dimensional tolerances and settings. This may be achieved by offsetting the tool path 0,26 mm off the machinable surface, measuring thickness, modifying the toolpath according to the measurement data and remachining the part. Additionally, the machining center's B- and C-axes may have geometrical inaccuracy, and the on-machine measurement of the machining tool may also have inaccuracies, which calls for additional research into both areas. The information produced by this thesis helps in designing and machining thickness into carbon fiber composite parts more carefully.

Key words: composite, CFRP, machining, accuracy, surface roughness, designing

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	8
2	YRITYS.....	10
2.1	Patria oyj	10
2.2	Patria Aerostructures oy.....	11
2.3	Patria Aerostructures oy:n hankkeet	11
3	KUITULUJITETUT MUOVIT	15
3.1	Lujitekuidut ilmailuteollisuudessa	15
3.1.1	Hiilikuitu	16
3.1.2	Lasikuitu.....	17
3.1.3	Aramidikuitu	18
3.2	Kuituja sitovat matriisit	20
4	KUITULUJITTEISIEN LENTOKONEENOSIEN VALMISTUSPROSESSI YRITYKSESSÄ.....	21
4.1	Laminointi.....	21
4.2	Kovetus	22
4.3	Koneistus	23
4.4	Tarkastus	23
5	KOMPOSIITTIIEN MEKAANISET VAURIOT KONEISTUKSESSA	24
5.1	Komposiittimateriaalien ominaisuuksien vaikutus koneistukseen	24
5.2	Kuitujen rikkoutuminen ja kerrosten delaminoituminen koneistuksessa	24
6	MUOVIKOMPOSIITTIIEN OMINAISUUDET JA HAASTEET KONEISTUKSESSA, KONEISTUSTAVAT	30
6.1	CFRP:n poraus ja reikien jyrsintä.....	30
6.1.1	Tutkimustieto	30
6.1.2	Yrityksen kokemukset.....	31
6.2	CFRP:n muodon jyrsintä	33
6.2.1	Tutkimustieto	33
6.2.2	Yrityksen kokemukset.....	34
6.3	CFRP:n vesileikkaus	37
6.4	CFRP:n pintakoneistus	38
6.5	Komposiittien koneistuksessa käytetyt porat ja terät.....	43
6.5.1	Tutkimustieto ja komposiittitoimialoille suunnatut sovellukset ...	43
6.5.2	Yrityksen kokemukset.....	47
6.6	Hiilikuitupöly.....	48
7	KONEISTETTU PINNANKARHEUS KOMPOSIITEISSA	50
7.1	Pinnankarheuden teoria, Duboustin ym. (2016) tutkimusartikkeli.....	51

7.1.1	Artikkelin koetilanne.....	52
7.1.2	Kuitujen ja matriisien leikkautuminen ja käyttäytyminen laminaatin reunan koneistuksessa.....	53
7.1.3	Duboustin ym (2016) artikkelissa saavutetut testitulokset 0-, 45-, 90- ja 135-asteisista koekappaleista	55
7.1.4	Työkaluhavainnot.....	58
7.1.5	Optinen mittalaite InfiniteFocusSL.....	58
7.1.6	Artikkelin koneistusarvot verrattuna yrityksessä käytettyihin arvoihin.....	59
7.2	Yhteenvedo artikkelin informaation vaikutuksesta testityöhön.....	60
7.3	Leikkuu- ja työstönopeudet	60
8	FOREST-LINÉ MINUMAC II TH40	62
8.1	Perusominaisuudet	62
8.2	Tarkkuus	63
8.3	Vastaavien koneistuskeskusten toiminnallinen tarkkuus ja kompensointi muualla teollisuudessa	64
9	HAASTATTELU	66
10	PAKSUUDEN KONEISTUS CAD-MALLIN POHJALTA	67
10.1	Tarkkuuskuormitetun muodon kriteerit	67
10.2	Koneistettavan kappaleen valinta	67
10.3	Koneistetun kiinnittimen mittaus koneistuskeskuksessa	72
11	TYÖN TOTEUTUS	73
11.1	Koneistuksen suunnittelu	73
11.1.1	Testiosa	73
11.1.2	Koneistuskiinnitin	79
11.1.3	Terät	82
11.1.4	Postprosessointi.....	86
11.2	Koneistuskiinnittimen koneistus.....	87
11.3	Työkappaleen koneistus.....	93
11.4	Koneistuksen lopputulos.....	96
12	TULOKSET	99
12.1	Pinnankarheuden mittaustulokset	99
12.1.1	Pinnankarheuden profiili, 0–5 mm, 20x objektiivi	100
12.1.2	5x objektiivi, kartiokorjattu tekstuuri ja topografia	102
12.1.3	Ristikkäin koneistettu pinta.....	104
12.2	Koneistetun paksuuden mittaustulokset.....	105
13	TULOSTEN ANALYSOINTI JA JOHTOPÄÄTÖKSET	111
13.1	Koneistetun paksuuden jatkuvuus yksittäisellä alueella.....	111
13.2	Paksuus verrattuna CAD-malliin, virhearvot ja niiden syyt.....	112
13.3	Pinnankarheus	115

13.4 Forest-Linén uusiminen ja tarkkuutta parantavat mahdollisuudet.....	115
13.4.1 Lisämittaukset	116
13.4.2 Kontrolloitu tila.....	116
13.4.3 Ohjauksen uusiminen.....	116
13.4.4 Ilmastointi	117
13.4.5 Lasermittauslaitteet	117
14 POHDINTA.....	119
LÄHTEET.....	121
LIITTEET	125
Liite 1. Profilometriltä saadut kuvat ja mittausasiakirjat, pienen testikappaleen pinnankarheusmittaus, 20x objektiivi	125
Liite 2. Ristikkäinkoneistetun kappaleen pääty, risteävät koneistusradat	132
Liite 3. Mittauspöytäkirjat	139

ERITYISSANASTO

CAD-malli	Tietokoneavusteisella ohjelmalla suunniteltu kappaleen malli
CAM	Koneistusratojen ohjelmointiin ja simulointiin tarkoitettu ohjelmistotyyppi, työn puitteissa CATIA Advanced Manufacturing -CAM-työpöytä
CATIA	Suunnitteluohjelmisto
CFRP	Carbon fibre reinforced plastic/polymer, hiilikuitulujitettu muovikomposiitti
Kaksoiskaareva	Kaksoiskaarevuudella tarkoitetaan sellaista pintaa, jota ei voi levittää tasoon venyttämättä tai kutistamatta pintaa. Esimerkiksi suora ympyrälieriö ei ole kaksoiskaareva. Pallo on kaksoiskaareva. Lisätietoa löytyy parhaiten englanninkielisellä termillä non-developable surface.
Komposiitti	Kahdesta tai useammasta materiaalista valmistettu heterogeeninen seos, tämän opinnäytetyön puitteissa
Kudos	Kudottu monisuuntainen kuitukerros
Laminaatti	Ohuista prepregeistä tai kuivista kuitukerroksista ja liimavasta matriisista valmistettu komposiittipala.
Leikkuu/kehänopeus	Työkalun pyörimisnopeus, tapauskohtaisesti esitettynä joko karan pyörimisnopeutena rpm tai leikkuunopeutena, jossa työkalun leikkaava halkaisija on huomioitu, v_c
Prepreg	Kuitukerros, jossa matriisi on jo sidottuna kuituihin.
Syöttönopeus	Kuvaa työkalun liikkeen nopeutta työstöradalla, yleensä esitettynä mm/min.
Tapin/poran geometria	Jyrsintapin tai poran muoto, jolla on suuri vaikutus koneistuksen lopputulokseen. Erilaiset muodot leikkaavat materiaalia eri tavalla.
Työstö/Koneistus	Lastuava työstö, opinnäytetyön puitteissa lähinnä jyrsiminen ja poraus

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tarkoitus on CFRP:stä valmistetun ilmailuteknisen osan koneistusominaisuuksien, koneistetun paksuuden ja koneistetun pinnankarheuden tutkiminen. Tutkimus suoritettiin sekä aihetta käsittelevän tutkimustiedon että yhden testiosan koneistamisen avulla.

Työn tavoite oli selvittää yrityksen koneistuskeskuksen kyvykkyyttä CFRP:n koneistuksessa tuottamalla käytännön tietoa asiakasyritykselle mittaustuloksina. Mittaustuloksista voi olla hyötyä uusien asiakkaita hankkiessa, sillä ilmailu- ja avaruusliiketoiminnassa käytettävillä CFRP-osilla voi olla vaativat toleranssit koneistetulle paksuudelle, muodolle ja pinnankarheudelle (Sloan 2009). Työn tavoitteen toteuttamiseksi koottiin teoriaa CFRP:n ja lentokoneiden rakenteiden koneistuksesta, jonka jälkeen suunniteltiin, koneistettiin ja mitattiin testikappale. Työn sivutavoitteet olivat koneistetun CFRP:n pinnan mikrorakenteen selvitys, ja sekä alustavien että laajempien toimenpiteiden ja apuvälineiden selvitys, joilla koneistustoimintaa voi helpottaa.

Työn taustaan liittyi tiettyjen lentokonemallien osille asetetut vaativat tarkkuustoleranssit (Tyrrell 2016). Autoklaaviprosessin seurauksena prepreg-laminaateista valmistuu aihio, jonka muotin vastainen puoli on lähes täysin samaa pinnanlaatua ja muotoa kuin sen ala olevan muotin pinnanlaatu. Osan säkkipuolen pinta ei ole yhtä tasainen kuin sen muottipuolen pinta, sillä osan päällimmäisen kuitukerroksen mahdollinen kudonta ja siinä oleva matriisi aiheuttavat pienen epätasaisuuden. Myös erilaiset apumateriaalit vaikuttavat pinnankarheuteen eri tavoin. Normaalisti säkkipuoli kelpaa sellaisenaan asiakkaille, mutta mikäli asiakas vaatii hyvin sileää pintaa tai tietyn paksuista osaa, on sitä koneistettava.

Komposiittiosien pintaa on koneistettu jonkin verran yrityksessä, ja koneistustekniikka on kunnossa. Yrityksessä suoritetun tuotannon kehityksen avulla tiedetään, millaisilla teerillä tulisi koneistaa, millä arvoilla ja millaisissa asennoissa, mutta saavutetut tarkkuudet muodossa ja pinnanlaadussa ovat jääneet epäselviksi. Yrityksessä tiedettiin, mitkä tekijät vaikuttavat koneistuksessa muodon tarkkuuteen, mutta muodon tarkkuutta ei oltu koskaan käytännössä kokeiltu. Tarkimmat koneistustoleranssit vaativa sovellus on ollut eräs tarkkareikäinen paneeli, jossa oli 0,2 mm paikoitustoleranssi kolmen metrin etäisyydellä.

Tässä sovelluksessa lämpötilan vaikutus koneistustarkkuuteen oli otettava huomioon (Salmi 2018).

Työ oli myös akateemisesti mielenkiintoinen, sillä muovikomposiittien pintapuolen koneistusta oli tutkittu suhteellisen vähän, joka kävi ilmi saatavilla olevan tutkimustiedon vähäisyydestä. Muovikomposiittien lastuavasta työstöstä oli yrityksessä käytännön kokemusta hyvin paljon, mutta akateemisessa kirjallisuudessa asiaa ei kirjoittaessa käsitelty paljoa.

Yritykselle tärkeämpää kuin pinnan laatu oli koneistetun muodon tarkkuus ja tällä tavalla osalle saatu paksuus. Yrityksen toinen koneistuskeskus Forest-Liné Minumac II TH40 oli hankittu 2000-luvun alussa, ja sitä on käytetty lähes päivittäin oikeaoppisesti, mutta koneen geometria ei ollut enää täydellinen iästään johtuen (Salmi 2018). Koneen B- ja C-akseleissa oli myös havaittu jotain epätarkkuutta, joka johtui todennäköisesti aikaisemmista törmäyksistä koneistuksessa. Opinnäytetyön paksuuskoneistuksen tavoite oli tarkastaa, kuinka mittatarkkaa muotoa koneistuskeskus pystyy ns. tarkkuuskuormitettuna tuottamaan valitulle osalle. Muodon tarkkuuteen vaikuttaa kaikkien viiden akselin käyttö, koneistettavan kappaleen pinta-ala, konepajan lämpötila, akselien omat lämpötilat ja kappaleen ”eläminen” koneistuksen ja lämpötilan aiheuttamien voimien vaikutuksesta.

Koneistetun muodon tarkkuuden avulla saatiin myös lisätietoa Forest-Linén uusimisaikataulusta. Komposiittiosille tarkoitetut koneistuskeskukset ovat miljoonien arvoisia koostaan ja jäykkyydestään johtuen. Vanhalla koneistuskeskuksella tehdään osia, kunnes uuden koneistuskeskuksen hankkimisesta saadaan selvästi enemmän taloudellista hyötyä. Investointi-ideoita, jotka eivät liittyneet uuden koneen hankkimiseen, olivat mm. erilaiset mittauslaitteet, jotka lisätään koneen akseleiden pätyihin, ja joiden hankkimista selvitettiin työssä alustavasti.

Työssä oli oletettava, että CATIA:n luoma geometria, työstöradat ja postprosessoitu NC-koodi olivat mahdollisimman tarkkoja, sillä niiden tarkkuudesta ei ole dokumentaatiota. Postprossessorin tarkkuuden tutkiminen kuulostaa lähtökohtaisesti mielenkiintoiselta opinnäytetyöaiheelta itsessään.

2 YRITYS

2.1 Patria oyj

Patria oyj on kansainvälisesti toimiva puolustus-, turvallisuus- ja ilmailualan tuottaja, joka työllistää 2800 henkilöä. Patrian omistavat Suomen valtio 50,1 % osuudella ja norjalainen Konsberg Defence & Aerospace AS 49,9 % osuudella (Patria 2017). Kuviossa 1 on esitetty yhtiön organisaatorakenne.



KUVIO 1. Patria oyj:n konsernirakenne (Patria 2017a)

Yhtiön liiketoimintayksiköistä Aviation tuottaa sotilas- ja siviili-ilmailun elinkaaren tukipalveluita sekä lentokoulutusta. Land-liiketoiminta vastaa korkealuokkaisista panssaroituista pyöräajoneuvoista, kranaatinheittimistä sekä niiden koko elinkaaren kattavista tukipalveluista. Systems-liiketoiminta tarjoaa vaativia järjestelmä- ja laitetöitä sekä puolustusvoimille että turvallisuusviranomaisille.

Patrian tytäryhtiö (61,8 %) Millog toimii Puolustusvoimien strategisena kumppanina tuottaen Maavoimien ja Merivoimien materiaalin elinkaaren tukipalveluita sekä normaali- että poikkeusoloissa. Nammo-konsernin omistavat tasaosuuksin Patria ja Norjan valtio, ja sen keskeisiä tuotteita ovat ampumatarvikkeet ja ruudit, ohjusten rakettimootorit ja niiden polttoaineet sekä ympäristöystävälliset demilitarisointipalvelut. International Support Partnerships perustettiin 2017 uudeksi liiketoiminta-alueeksi, ja se toimii ilmai-

lun palveluliiketoiminnan hankkeissa, jotka suuntautuvat erityisesti helikopterihuoltotoiminnan kansainväliseen kasvattamiseen sekä siviililentokoulutuksen laajentamiseen (Patria 2017b).

2.2 Patria Aerostructures oy

Opinnäytetyön asiakasyritys Patria Aerostructures oy valmistaa Jämsän Hallissa komposiittirakenteita ilmailu- ja puolustusvälineteollisuuteen. Yritys työllistää n. 140 henkilöä. Yrityksen pääosaisia asiakkaita ovat mm. Saab ja Airbus. Yritys on 9001- ja 9100-sertifioitu, ja yrityksellä on myös muita sekä yrityksiensä että kolmansien osapuolien antamia sertifiointeja, esim. Nadcap. Sertifioinnit ovat osoitus tietyt vaatimukset täyttävästä toiminnasta, joilla varmistetaan toimitettavien osien toimivuus toimintaympäristössään (ThomasNet 2018).

2.3 Patria Aerostructures oy:n hankkeet

Patria AST:n tuotanto ja myynti perustuvat sovituille hankkeille, jotka toteutetaan yhdessä asiakkaan kanssa. Yrityksen hankkeita voi pitää omina tuoteperheinään. Hankkeiden sisältöön kuuluu pääsääntöisesti komposiittiosien laminointi, kovetus, koneistus, tarkastus, maalaus ja kokoonpano. Kuvissa (1–6) on esitetty yrityksen hankkeita.



KUVA 1. A380-lentokoneen siipi, jossa kiinnitettyä spoilerit (Kuva: Peters Aircraft 2018)



KUVA 2. A400M-lentokoneesta Patria Aerostructures oy valmistaa sivuvakaajan pään (Kuva: Defence Industry Daily 2009)



KUVA 3. A330-koneen sivuvakaajan osa (Kuva: Patria Aerostructures oy 2018)



KUVA 4. A320-koneen sivuvakaajan osa (Kuva: Mustakangas 2018)



KUVA 5. NH90-kuljetushelikopteri. Hankkeen sisältö on NH90-helikopterin perärungon valmistaminen (Kuva: Maavoimat 2018)



KUVA 6. Saab 2000 Erieye AEW&C -tutkarakenne kiinnitettynä lentokoneeseen. Patria Aerostructures oy valmistaa tutkan komposiittirakenteen (Kuva: Saab 2018)

3 KUITULUJITETUT MUOVIT

Tässä työssä komposiiteilla viitataan kuitulujitettuihin muoveihin, joissa hiili-, lasi- tai muu kuitu muodostaa yhdessä niitä yhteen liimaavan matriisin kanssa heterogeenisen materiaalin (Saarela ym. 2007, 17). Komposiiteille ominaisia ovat suuri lujuus ja jäykkyys suhteutettuna ominaispainoon, mahdollisuudet suunnata lujuusominaisuuksia, muotoiluvapaus, mahdollisuus valmistaa suuria rakenteita yhtenä kokonaisuutena, sekä muoveille tyypillinen kemiallinen kestävyys. Lisäksi muovikomposiiteilla on joukko ominaisuuksia, jotka sovelluksesta riippuen voidaan lukea eduksi tai haitaksi. Tällaisia ovat muun muassa sähkön- ja lämmönjohtavuus (Saarela ym. 2007, 13).

3.1 Lujitekuidut ilmailuteollisuudessa

Ilmailuteollisuudessa komposiittien käytölle on kaksi pääasiallista syytä: rakenteiden keventäminen ja niiden tuotantokustannusten alentaminen. Nykyteknologialla paino- ja kustannussäästöt voivat olla 15-20% verrattuna vastaavaan alumiinirakenteeseen. Komposiittisten lentokonerakenteiden lujitemateriaalina on pääsääntöisesti hiilikuitu. Lasi- ja aramidikuituja käytetään lähinnä erikoissovelluksissa, esimerkiksi tutkakuvuissa ja kevyesti kuormitetuissa muotosuojissa (Saarela ym. 2007, 433-434). Taulukkoon 1 on vertailtu hiili-, lasi- ja aramidikuidun ominaisuuksia suhteessa toisiinsa.

TAULUKKO 1. Lujitekuitujen mekaaniset ominaisuudet (Vuorinen, Mustakangas & An-nala 2016)

LUJITEKUITUJEN MEKAANISET OMINAISUUDET

	VETOLUJUUS	KIMMOMODUULI	MURTOVENYMÄ	TIHEYS
	[MPa]	[GPa]	[%]	[G/CM ³]
LASIKUITU	2400-3700	69-86	6-9	2,7
HIILIKUITU	2000-5000	160-800	0,5-2	1,8-2
ARAMIDIKUITU	3100-3600	60-180	3,5	1,4
PELLAVA	345-1050	27,6	2,7-3,2	1,5
HAMPPU	690	70	1,6	1,47
PUUVILLA	287-800	5,5-12,6	7-8	1,5-1,6

OMINAISSUUDET	ARAMIDIKUITU	HIILIKUITU	LASIKUITU
KORKEA VETOLUJUUS	●	●	●
KORKEA VETOMODULI	●	●	●
KORKEA PURISTUSLUJUUS	●	●	●
KORKEA PURISTUSMODULI	●	●	●
KORKEA JOUSTAVUUS	●	●	●
KORKEA KIMMOMODULI	●	●	●
KORKEA ISKULUJUUS	●	●	●
KORKEA KERROSTENVÄLINEN LEIKKAUSLUJUUS	●	●	●
KORKEA LEIKKAUSLUJUUS TASOSSA	●	●	●
MATALA TIHEYS	●	●	●
KORKEA VÄSYMISKESTÄVYYS	●	●	●
KORKEA PALON KESTÄVYYS	●	●	●
KORKEA LÄMMÖN ERISTE	●	●	●
KORKEA SÄHKÖN ERISTE	●	●	●
MATALA LÄMPÖLAAJENEMINEN	●	●	●
MATALAT KUSTANNUKSET	●	●	●

- ominaisuus voidaan liittää hyvin tähän kuituun
 - ominaisuus voidaan liittää melko hyvin tähän kuituun
 - ominaisuutta ei voida liittää kovin hyvin tähän kuituun
- lähde: (SP Systems Guide to Composites, 2002)

3.1.1 Hiilikuitu

Hiilikuidulla tarkoitetaan korkeahiilipitoista kuitua, tavallisesti >97 %. Hiilikuidulle on ominaista korkea kimmomoduuli ja suuri lujuus. Ilmailu- ja avaruusalan kehittyminen on vauhdittanut hiilikuitulujitteiden kehitystä, sillä CFRP on kevyttä ja lujaa (Saarela ym. 2007, 80-81).

Hiilikuiduille on ominaista suuri lujuus ja jäykkyys yhtyneenä keveyteen. Veto-, taivutus- ja puristuslujuudet ovat erinomaiset. Laminaatit ovat täysin kimmoisia murtorajaan asti eikä myötöä tai plastista muodonmuutosta ilmene. Laminaattina hiilikuitujen mekaaniset ominaisuudet ovat parhaita kuitusuunnassa, kun taas kuitusuuntaa vastaan poikittaiset ominaisuudet ovat heikommät ja suoraan riippuvaisia matriisin ominaisuuksista (Saarela ym. 2007, 87).

Hiilikuituja käytetään usein muiden lujitekuitujen kanssa muovien lujittamiseen. Syitä hybridilujittamiseen on mm. kustannuksien alentaminen, laminaatin ominaisuuksien parantaminen muilla kuitukerroksilla tai muiden kuitujen ominaisuuksien parantaminen hiilikuidulla. Laminaattina iskulujuutta ja -sitkeyttä lukuun ottamatta CFRP:n ominaisuudet ovat yleensä riittävät, ja niitä parannetaan yleensä aramidikuitulaminaatilla tarpeen mukaan. (Saarela ym. 2007, 88). Taulukkoon 2 on vertailtu eri hiilikuitutyyppjä keskenään.

TAULUKKO 2. Taulukko hiilikuidun tyypillisistä ominaisuuksista. Taulukkoon on korjattu taulukon tekijän yksikkövirhe tiheydessä, $\text{kg/cm}^3 \rightarrow \text{g/cm}^3$ (Taulukko: Kevra oy 2018, muokattu)

Lujite	Tiheys g/cm^3	Vetolujuus GPa	Kimmomoduuli GPa	Murtovenymä %	LT-kerroin $*10^6 \text{-1/K}$	Lämmönkesto
Hiilikuitu SM	1,8	4,5	230	1,8 – 2,1	-0,26	300 – 400
Hiilikuitu IM	1,8	5	290	1,5 – 1,7		300 – 400
Hiilikuitu HM	1,85	2,5 – 4	400 – 600	0,5 – 0,9	-1,3	300 – 400

3.1.2 Lasikuitu

Lasikuitujen ominaisuudet riippuvat valmistuksessa käytetystä raaka-aineesta. Lasikuitua on mahdollista valmistaa useasta erityyppisestä mineraalista, mutta kaupallista lasikuitua on saatavilla vain muutamia, sillä lasikuituja valmistetaan niiltä vaadittujen erityisominaisuuksien mukaan. E-lasi on yleisin käytössä oleva lasikuitu, jonka sähkö- ja lämpöominaisuudet ovat hyviä. C-lasi on valmistettu kestävämmän kemikaaleja. S-lasi on muita lasikuituja lujempaa, ja se on kehitetty lentokoneteollisuutta varten (Saarela ym. 2007, 74-75).

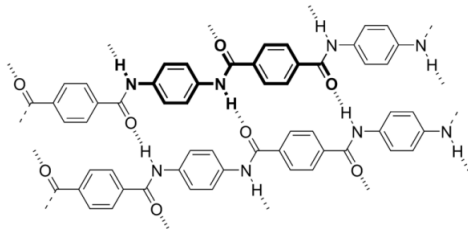
Yleisesti voidaan todeta lasikuidun olevan heikompaa kuin hiilikuitu. (Saarela ym. 2007, 370). Taulukkoon 3 on selvennetty erilaisten lasikuitujen ominaisuuksia.

TAULUKKO 3. Lasikuitujen ominaisuuksia (Taulukko: Saarela ym. 2007, 75, muokattu).

Ominaisuus	Yksikkö	A	C	E	S
SiO ₂	p%	72	64,5	55	65
Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	p%	2	4	4,5	25
CaO	p%	10	13	21	-
MgO	p%	2	3	0,5	10
Na ₂ O+K ₂ O	p%	14,5	10	< 1	-
B ₂ O ₃	p%	-	5	7,5	-
Ominaispaino	g / cm ³	2,45	2,45	2,54	2,48
Taitekerroin	nD	-	1,541	1,549	1,523
Vetolujuus (erilliskuitu)	GPa	3,1	3,3	3,6	4,6
Vetolujuus (370 °C)	GPa	-	-	2,6	4,4
Kimmokerroin	GPa	72	70	75	86
Pehmenemispiste	°C	700	690	850	990

3.1.3 Aramidikuitu

Aramidikuidut ovat yleisnimi aromaattisille polyamidikuiduille, joista tunnetuimpia lie-
nevät näiden kuitujen valmistajien tuotemerkit Kevlar® (kuva 7), Twaron®, Technora®
ja Nomex® (Saarela ym. 2007, 89).



KUVA 7. Kevlar® eli polyparafenyleenitereftaaliamidin molekyyli rakenne (Pinjanainen 2018)

Aramidikuiduilla on suurempi vetomurtolujuus, kimmomoduuli ja merkittävästi pie-
nempi murtovenymä verrattuna muihin orgaanisiin kuituihin, jos hiilikuitua ei lueta mu-
kaan. Ominaista aramidikuiduille on myös huono tarttuvuus matriisimuoviin ja alhainen
puristuslujuus, mitkä ovat käyttöä rajoittavia ominaisuuksia. Kuidut ovat luontaisesti pa-
lamattomia ja kestävät korkeita lämpötiloja, orgaanisia liuotteita, poltto- ja voiteluaineita.
Olellaiset erot lasi- ja hiilikuituihin ovat sitkeys, tekstiilikuitumainen luonne ja hygros-
koopisuus, eli kyky imeä ympäristöstä kosteutta itseensä (Saarela ym. 2007, 89).

Aramidikuitujen jäykät, lineaariset molekyyliketjut ovat voimakkaasti suuntautuneet kuituakselin suuntaan ja vahvat kovalenttiset sidokset yhdistävät polymeeriketjut poikittais-suunnassa. Tästä johtuu kuitujen suuri pitkittäis- ja pieni poikittaislujuus. Aromaattinen rengasrakenne on perustana kuidun korkealle kimmomoduulille, alhaiselle venymälle, erinomaiselle energian absorptiokyvyille, kemialliselle kestävyydelle ja mittapysyvyydelle korkeissa lämpötiloissa (Saarela ym. 2007, 89).

Aramidikuitujen käyttö on perustelluinta tuotteissa, joilta vaaditaan keveyttä ja samalla suurta vetolujuutta, jäykkyyttä, iskusitkeyttä ja -lujuutta. Lujittamiseen tarkoitettuista aramidikuiduista suurimman osan käyttävät lentokone-, avaruus- ja veneteollisuus sekä urheilu- ja vapaa-ajanvälineiden valmistajat. Lujittaessa muoveja aramidikuiduilla on huomioitava niiden huono kastumiskyky, joten matriisin valinta on suoritettava huolellisemmin (Saarela ym. 2007, 91). Taulukossa 4 on verrattu kahden aramidikuidun keskeisiä ominaisuuksia.

TAULUKKO 4. Aramidikuitujen keskeisiä ominaisuuksia (Taulukko: (Saarela ym. 2007, 93, muokattu)

Twaron® HT aramidikuitu	Yksikkö	Arvo	Huom
Syttyvyys	LOI-indeksi	0,29	
Lämpökutistuminen	%	0,1	15min 190 °C
Lämmönkestävyys	%	90	48 h 200 °C
Sulamispiste	°C	> 500	Hajoamislämpötila
Veden imeytyminen	%	3,5	20 °C 65% r.h.
Lämpölaajenemiskerroin	10 ⁻⁶ 1/K	-3,5	0° suunnassa
Ominaislämpö	J/kgK	1420	
Lämmönjohtavuus	W/mK	0,05	0° suunnassa
Lämmönjohtavuus	W/mK	0,04	90° suunnassa
Kevlar® 49 aramidikuitu	Yksikkö	Arvo	Huom
Poissonin vakio		0,34	
Lämpölaajenemiskerroin	10 ⁻⁶ 1/K	-4	0° suunnassa
Lämpölaajenemiskerroin	10 ⁻⁶ 1/K	57	90° suunnassa
Viruminen	%	0,05	1000h kuorm. 80% vetolujuudesta
Solmulujuus	%	35	%:a langan lujuudesta
Lenkkilujuus	%	60	%:a langan lujuudesta

3.2 Kuituja sitovat matriisit

Komposiittien matriisina voi toimia muovi, jolloin puhutaan muovikomposiiteista, polymeerikomposiiteista tai lujitemuoveista. Matriisina voi olla myös metalli ja keraami (Vuorinen, Mustakangas & Annala 2016). Patria Aerostructures oy käyttää vain muovia kaikissa hankkeissa matriisina.

Muovit eritellään kerta- ja kestumuoveihin. Kestumuoveja voidaan muovata uudelleen lämpötilan avulla, kun taas kertamuovit hajoavat tai palavat lämpötilan kasvun seurauksena. Kertamuovit muodostuvat kemiallisessa kovetusreaktiossa. Kertamuovien lujuusominaisuudet, lämmön- ja korroosionkesto ovat hyvät suhteessa kestumuoveihin (Saarela ym. 2007, 18-19; 35).

Yleisimmin komposiiteissa käytetään kertamuoveja. Kertamuovit myydään kahtena komponenttina, hartsina ja kovetteena. Hartsia ja kovete sekoitetaan, jolloin ne reagoivat keskenään muodostaen kiinteän kappaleen eli kertamuovin. Myös valmiita seoksia myydään, ja prepreg-kerroksissa kuituihin on jo sidottu hartsia. Kertamuoveja ei voi uudelleen muotoilla muutoin kuin ainetta poistavilla menetelmillä (Saarela ym. 2007, 35).

Tavallisimmin käytetyt kertamuovit ovat polyestereitä, vinyyliestereitä ja epokseja. Polyesteri on näistä hinnaltaan edullisin ja sitä käytetään, jos matriisilta ei vaadita erityisominaisuuksia. Polyesteriä käytetään tyypillisesti moottori- ja purjevereiden komposiittien matriisimateriaalina. Vinyyliesteri on polyesteriä parempaa veden ja kemikaalien kestoaltaan. Vinyyliesteriä käytetään esimerkiksi paperi- ja kemianteollisuuden putkistoissa ja säiliöissä (Saarela ym. 2007, 35).

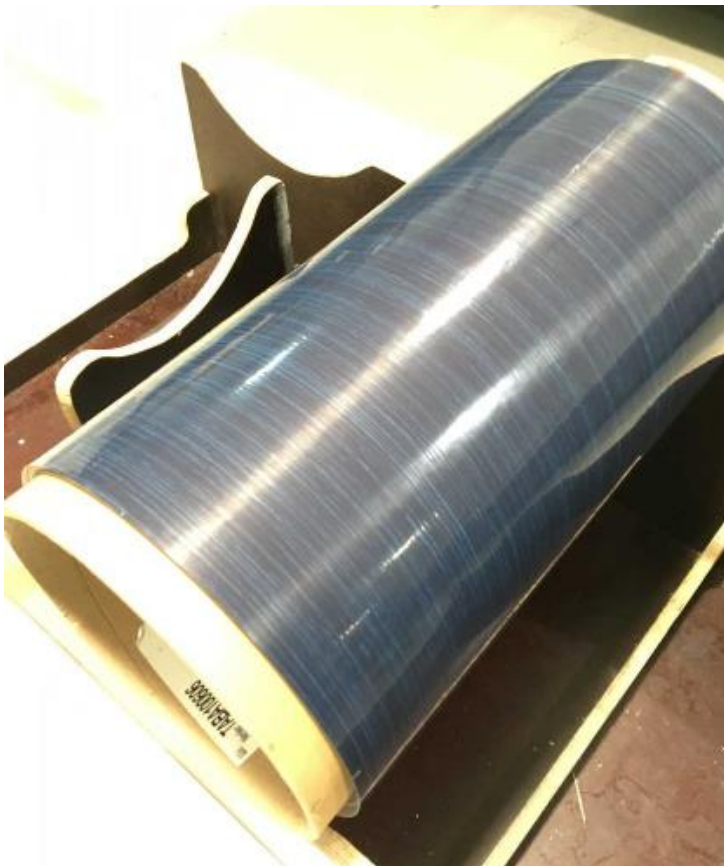
Epokseja käytetään muun muassa lentokone-, avaruus- ja urheiluvälineiteollisuuden komposiiteissa, koska niillä on yleisesti parhaat ominaisuudet. Epoksi on kallein vaihtoehto, korrodoiva ja terveydelle haitallinen käsiteltäessä kovettumattomana (Vuorinen, J., Mustakangas, M. & Annala, M. 2016). Yrityksen valmistamissa osissa käytetään yleensä epoksia sen mekaanisten ja termisten ominaisuuksien vuoksi.

4 KUITULUJITTEISIEN LENTOKONEENOSIEN VALMISTUSPROSESSI YRITYKSESSÄ

Alla lueteltujen valmistusvaiheiden lisäksi yrityksellä on vahva laadunvarmistusprosessi, jota jokainen asiakas ja muu itsenäinen sertifioija auditoivat kerran tai useammin vuodessa. Lentokoneiden osien laadunvarmistus on tärkeä prosessi, sillä komposiittiosat vaativat tarkat tiedot lujuuksista, mekaanisen rasituksen kestosta, jäljitettävyydestä, sisäisistä vioista ja tuotannon muutoksista.

4.1 Laminointi

Komposiittiosan valmistus alkaa aihion laminoinnista. Pääsääntöisesti laminoitavat kerrokset ovat prepregejä. Prepregeissä hartsia ja kovetea on valmiiksi sidottuna kuituun, jolloin ne voidaan laminoida päällekkäin ja kovetuttaa autoklaavissa. Raaka-aine on yleensä rullamuodossa (kuva 8), jota pakastetaan kovettumisreaktion hidastamiseksi.



KUVA 8. Prepreg-rulla

Laminointi suoritetaan joko käsin tai automaattisella laminointikoneella, joka leikkaa kerrokset ja laminoi ne päällekkäin. Muottiin laminoitessa käytetään apuna laserosoittimia. Laserit osoittavat leikatuille prepregeille oikeat paikat. Muotissa olevat prepreg kerrokset paineistetaan säkkiin, jolloin tuote on valmis kovetettavaksi (kuva 9).



KUVA 9. Säkitetty laminaatti

4.2 Kovetus

Prepregin kovetus suoritetaan autoklaavissa korotetussa paineessa ja lämpötilassa (kuva 10). Epoksimatriisin kovetus tapahtuu autoklaavissa lämmön ja paineen avustuksella hallitusti. Hartsin viskositeetti laskee autoklaavin lämmitessä, jolloin hartsi alkaa virrata täyttämään kaikki kuitukerrokset. Autoklaaviprosessin aikana matriisi polymerisoituu, joka tekee tuotteesta kovan. Säkin alipaineen ja ulkopuolisen ylipaineen ansiosta laminaatti puristuu tiiviiksi. Autoklaavi myös minimoi ilmahuokosten määrän laminaatissa (Saarela ym. 2007, 159-160). Autoklaavin kovetusprosessin paineet, lämpötilat ja kovetusajat ovat osakohtaisia, jotka riippuvat käytetyistä hartseista ja kuiduista.



KUVA 10. Autoklaavi

4.3 Koneistus

Kovetuksen jälkeen kovetettu aihio asetetaan sille ominaiseen koneistuskiinnittimeen. Koneistuskiinnittimet ovat n. 1-3 metrin mittaisia teräskiinnittimiä. Koneistuskiinnittimet toimivat yleisimmin imemällä aihiota kiinnittintä vasten alipaineeseen. Aihoiden ja kiinnittimien tarkka paikoitus suoritetaan yleensä sokilla, jolla myös varmistetaan aihoiden liikkumattomuus koneistuksessa.

Yrityksellä on kaksi 5-akselista portaalityyppistä koneistuskeskusta ja muutama manuaalikoneli. Laitteet ovat Belotti FLA 5526 TS ja Forest-Liné Minumac II TH40. Komposiitteja koneistetaan myös yrityksen vesileikkurilla Flow:lla.

4.4 Tarkastus

Yrityksellä on useita tarkastusmenetelmä valmiille tuotteille. Lentokoneenosien muotoja tarkastetaan tarvittaessa LaserTracker-mittalaitteella ja koneistuskeskuksen omalla mitatapäällä. Muotojen ollessa kunnossa kaikki osat NDT-tarkastetaan joko ultraääni- tai röntgenmittauksella. Tarkastuksen jälkeen osa on valmis kokoonpantavaksi ja maalattavaksi.

5 KOMPOSIITTIEEN MEKAANIEET VAURIEET KONEIEETUKIEESSA

5.1 Komposiittimateriaalien ominaisuuksien vaikutus koneistukseen

Kuitukomposiittien koneistus ei ole plastista työstöä. Plastisten materiaalien koneistuksessa työstävän terän iskeytyessä materiaaliin terä muodostaa lastua, joka johtuu näille materiaaleille ominaisesta plastisuudesta eli venyvyydestä. Plastisten materiaalien koneistuksessa kova terä muokkaa pehmeämpää materiaalia plastisen muodonmuutoksen avulla pitkiksi ja jatkuviksi tai lyhyiksi lastuiksi. Kuitukomposiittien koneistuksessa plastista muodonmuutosta ei esiinny, vaan työstävä terä murtaa kuituja ja matriisia, terän geometriasta riippuen joko kuluttavalla tai riuhtovalla työstötavalla. Tämä aiheuttaa lastun esiintymisen pölynä jatkuvan materiaalin sijaan (Zelinski 2008, 72; Jimeno 2012, 17).

Hiilikuitu itsessään johtaa lämpöä hyvin, mutta laminaatissa matriisina toimiva epoksi on eriste. CFRP:n huonon lämmönjohtavuuden vuoksi sekä aihion että pölyn lämpötilamuutokset pysyvät vähäisinä, jolloin kaikki lämpö kerääntyy työkaluun (Zelinski 2008, 74).

Yksittäinen kuitu murtuu työstäessä helposti, mutta joukko kuituja kuluttavat työkaluja. Tämä johtuu kuitujen abrasiivisesta eli kuluttavasta tai hinkkaavasta luonteesta. Abrasiivisuus johtuu todennäköisesti yksittäisen kuidun hyvin suuresta kovuudesta, mutta tähän ei tutkivat artikkelit ota kantaa muutoin kuin toteamalla, että hiili- ja lasikuitujen leikkausprosessi on hyvin abrasiivinen (Rahman 2008, 21). Lastuamismenestettä ei voida käyttää työkalujen lämpötilakontrolliin, sillä ne sotkevat koneistuskeskuksen koneistusalueen, ja usein asiakkaan vaatimuksena on kuiva koneistus. CFRP ei muutenkaan kestä useimpia lastuamismenestettä (Turner, Scaife & El-Dessouky 2015, 60).

5.2 Kuitujen rikkoutuminen ja kerrosten delaminoituminen koneistuksessa

Komposiittilaminaatissa kuitukerrokset ovat kiinni toisissaan lujitematriisin avulla, ja niiden välisen jännityksen purkautuminen aiheuttaa komposiiteissa mekaanisia vaurioita. Delaminaatiolla viitataan kuitukerroksia liimaavan matriisin ja itse kuitujen rikkoutumi-

seen puristus- tai leikkausjännitysvoimien kasvaessa liian suuriksi. Delaminaatiota esiintyy sekä koneistuksessa että muussa rasituksessa yleisimmin päällimmäisellä ja pohjimmalla kerroksella, sillä ne ovat tuettuja vain yhdeltä puolelta (Uhlmann ym. 2014, 1).

Komposiittilaminaatti on varsinkin poratessa ja muotoa jyrsiessä herkkiä delaminaatiolle. Delaminaatio riippuu useasta geometrisestä parametrilla, materiaalien ominaisuuksista ja kuormittavista voimista. Delaminaation seurauksena komposiittiosien lujuus ja jäykkyys voivat heikentyä merkittävästi (Chermoshentseva, Pokrovskiy & Bokhoeva 2016, 1).

Ilmailuun soveltuvia komposiittiosia voidaan korjata tarvittaessa erilaisilla menetelmillä (CompositesWorld 2014). Asiakkaan komponentista riippuen delaminaatiolle on hyväksyntärajoja ja mahdollisesti korjaustapoja, mutta monesti jo lievä delaminaatio riittää hylkääväksi perusteeksi yrityksen hankkeissa, sillä osan kestävyyttä ja ominaisuuksia ei voi enää taata.

Delaminaation lisäksi komposiiteilla on lukuisia muita virhemuotoja, esim. reikien sylinterimäisyysvirheenä, jäysteenä, ”spalling”-muodossa eli ”pirstaloituneena”, ja matriisin murtumisena (Panchagnula & Palaniyandi 2017, 5).

Kuvissa (11–15) on selvennetty delaminaatiota ja kuitujen rikkoutumista visuaalisesti.

Polymers 2016, 8, 393

7 of 12

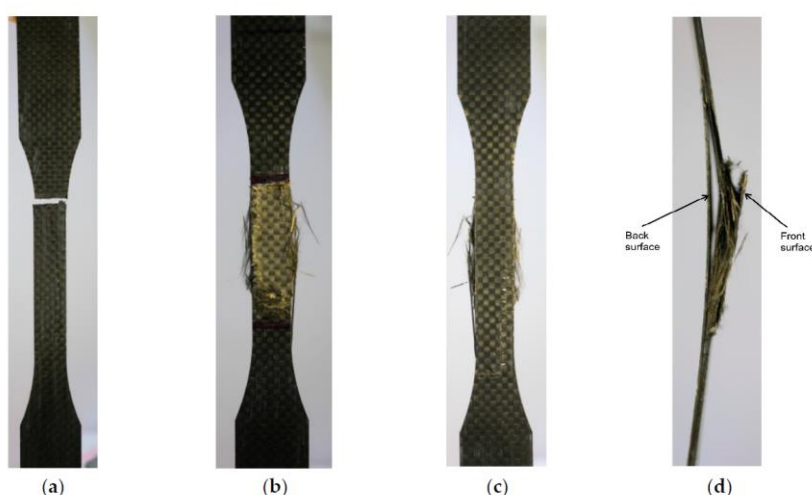


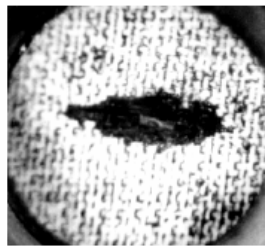
Figure 5. Results of two tensile-failure modes for CFRP specimens. (a) L (lateral) failure mode; (b) D (edge delamination) failure mode—front surface; (c) D failure mode—back surface; (d) D failure modes—side view.

KUVA 11. CFRP:stä tehtyjä vetokoepaloja, joissa esiintyy kuitujen murtumista ja delaminaatiota (Kuva: Zhu ym. 2016, 7)

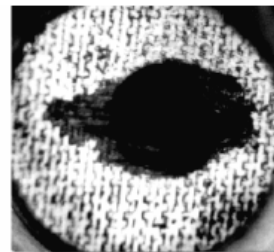


KUVA 12. Vesileikattu CFRP-osa, joka hylättiin. Kuvassa delaminoitumisen pituus erottuu hyvin haaleana viivana.

The chisel edge cuts the workpiece material with a big negative rake angle and generates over 50% of the thrust force. Thus the chisel edge plays a key role. The experiment shows that at the moment of the chisel edge penetration, the spalling already grows to a dimension of greater part of its final size. Figure 4(a) shows a spalling at the chisel edge penetration and Figure 4(b) shows the spalling after drilling. We can easily confirm the above observations.



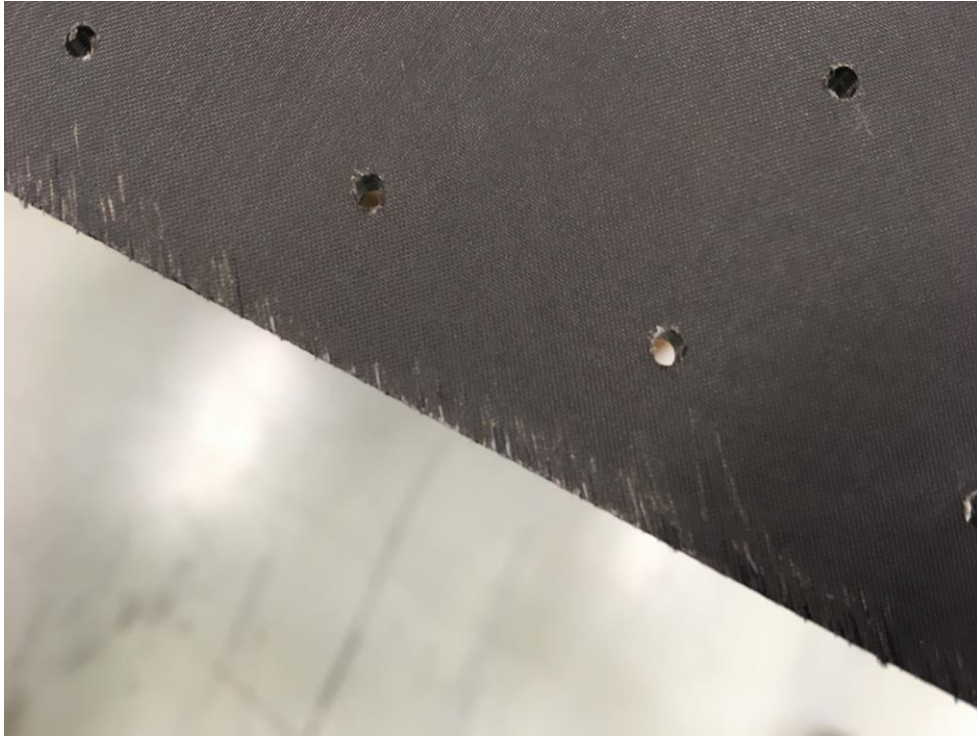
(a) spalling at the chisel edge penetration



(b) spalling after drilling operation

Fig. 4 Spalling at the exit surface generated by a $\phi 6$ carbide drill with the drilling speed of 3000rpm and the feed speed of 91.2mm/min. The workpiece was a multi-directional CFRP plate with the fibre orientation of 0° in its surface layer

KUVA 13. ”Spalling” eli ”pirstaloituminen” (Kuva: Zhang, Chen, Chen & Zhang 2001, 45)



KUVA 14. Porattujen reikien jäystettä ja muodossa lievää kuitujen ulosvetäytymistä.



KUVA 15. Suoraan poraamalla tehty reikä, josta on aiheutunut delaminoitumista terän sisäänmenopuolelle (Kuva: Patria Aerostructures oy 2016)

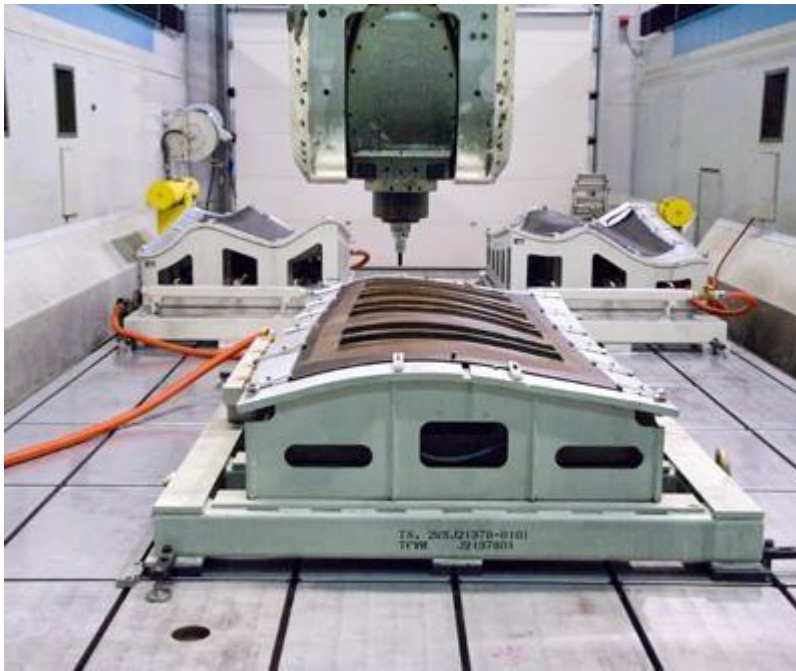
Pitkittäissuunnassa leikkuusuuntaan nähden kulkevat kuidut eivät delaminoidu ainakaan visuaalisesti. Kohtisuoraan kulkevat kuidut voivat delaminoidua kuitujen murtumisesta (kuva 16). Osa on leikattu vesileikkurilla, ja delaminaatiota on syntynyt hiekan puuttuessa leikkauksesta.



KUVA 16. Kuitukerrosta, josta erottuu selvästi kuitujen ulosvetäytyminen ja yksi jäämäkuitu.

Delaminaatiota syntyy koneistusprosessin ohella myös kolhuista ja muista komponentteihin kohdistuvista rasituksista. Myös NDT-tarkastuksissa voidaan löytää komponenttien sisäisiä delaminaatioita, jotka saattavat olla mm. laminaatin väliin jääneen ilman aiheuttamia.

Komposiittien kerrosmainen rakenne vaatii hyvän tuennan ja sopivan leikkuunopeuden lisäksi mahdollisesti alustamateriaalia delaminaation ehkäisemiseksi ja tarkkuuden varmistamiseksi. Delaminaation ehkäisy ja tarkkuus itsessään pyritään estämään tuotetyypille ominaisilla suurilla, imukytkennällä varustetuilla työpöydillä ja mahdollisilla alustamateriaalilla, esimerkiksi vanereilla, joihin on ajettu alipaineimu-urat. Komposiittiaihio asetetaan urien päälle ja alipaine kytketään päälle, jolloin aihio pysyy kiinni sen avulla. Aina tämä ei riitä, jolloin käytetään ruuveja ja lukkopihtejä. Olennaisinta on, että materiaali ei pääse ”elämään” koneistettaessa, jolloin komposiitti ei leikkaudu väärin tai delaminoidu. Samankaltaisiin tuloksiin on päästy Lockheed Martinin tehtaalla (Sloan 2009; kuva 17).



KUVA 17. F35-taisteluhävittäjän wingskinin koneistusta imukiinnittimessä (Kuva: Sloan 2009)

6 MUOVIKOMPOSIITTIIEN OMINAISUUDET JA HAASTEET KONEISTUKSESSA, KONEISTUSTAVAT

6.1 CFRP:n poraus ja reikien jyrsintä

Komposiittien poraustekniikkaa on tutkittu aktiivisesti, joka todennäköisesti johtuu sen olennaisuudesta ilmailualalla. Rakennneosien tulee olla mahdollisimman virheettömiä sekä muodoltaan että porauksien paikoituksilta, ja poraus voi aiheuttaa reikien delaminaatiota sisä- ja ulostulopuolella.

6.1.1 Tutkimustieto

Poran geometria ja koneistusarvot ovat tärkeitä delaminaation ehkäisemisen kannalta (Durão ym. 2014, 3803). Taulukkoon 5 on laadittu testituloksia delaminaatiolle työkalugeometrian mukaan.

TAULUKKO 5. Delaminaation kriteerit työkalun geometrialle ja työkalun materiaalille, tutkimustulokset (Taulukko: Durão ym. 2014, 3806)

Table 2. Results of the delamination criteria for tool geometry and tool material.

Tool geometry	Delamination Factor (F_d)		Adjusted Delamination Factor (F_{da})	
	Value	Standard deviation	Value	Standard deviation
WC Twist	1.655	0.07	1.858	0.08
HSS Twist	2.034	0.06	2.719	0.08
WC Brad	1.523	0.12	1.695	0.14
WC Step	1.553	0.06	1.670	0.08

Delaminaatiota muodostuu porauksessa silloin, kun poranterää painava voima ylittää tietyn kynnsarvon (Horppu 2010, 26). Horpun (2010) työssä ei kommentoida delaminaation numeerisia arvoja tarkemmin, mutta se on todennäköisesti kerrosten välisen kovetuneen hartsin vetolujuus. Delaminaatiota voi muodostua poratessa sekä komposiittiosan pinta- että pohjakerrokseen. Hallitut syöttönopeudet auttavat ehkäisemään delaminaatiota sekä pinta- että pohjakerroksissa (kuvio 2). Poraukseen soveltuvat geometriat ovat tarkemmin esiteltynä työn osiossa 6.5.

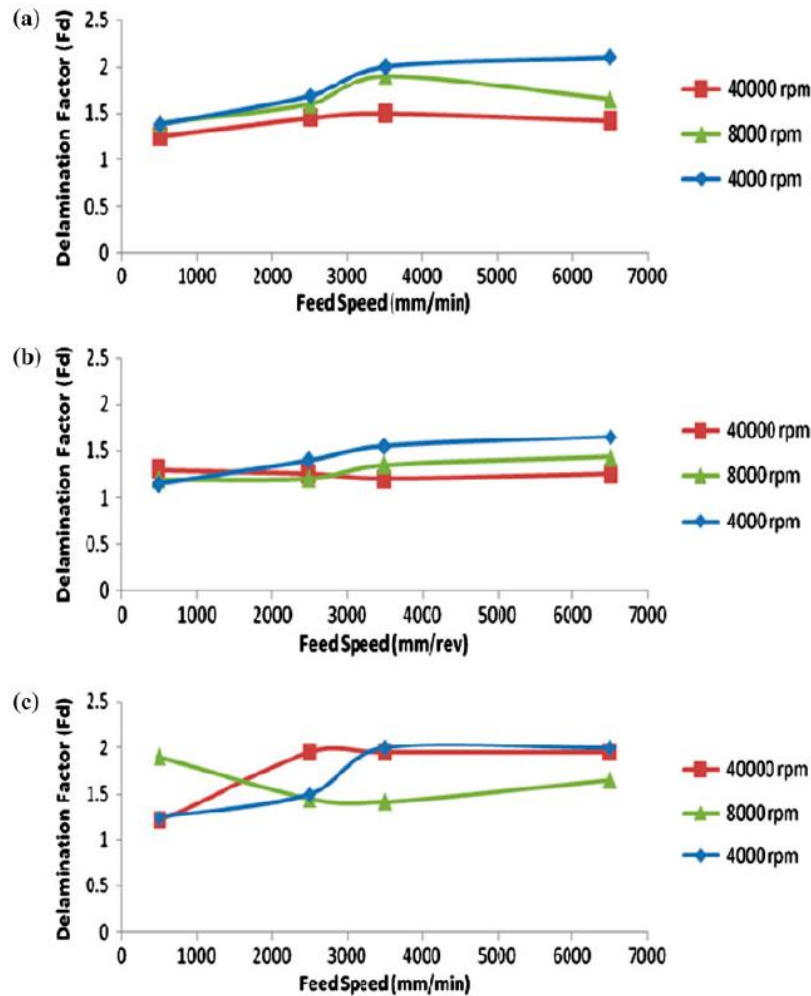


Figure 9. The effect of feed speed on the delamination factor (F_d) for different tool geometries: (a) 115° point angle, (b) 85° point angle, and (c) Brad & Spur drill.

KUVIO 2. Syöttönopeuden vaikutus komposiitin delaminaatioon kolmelle erilaiselle työkalugeometrialle. Työkalugeometria vaikuttaa olennaisesti poratun CFRP:n laatuun (Kuvio: Kumar & Singh 2014, 56)

6.1.2 Yrityksen kokemukset

Yrityksessä on kokeiltu reikien jyrsimistä porauksen sijaan. Yrityksen sisäisesti suoritetun tutkimuksen mukaan jyrsimällä reikä alusta loppuun spiraalimaisesti 12-hampaisen kärkigeometrian (kuva 18) omaavalla viilajyrsintapilla voidaan välttyä delaminaatiolta, jäystekuiduilta ja ulosvetäytyneiltä kuiduilta lähes täysin (kuva 19). Yrityksessä ei huomattu testitapauksia, joissa olisi sattunut delaminaatiota edellä mainitulla tavalla työste-tyissä rei'issä.



KUVA 18. Viilajyrsimen geometria (Patria Aerostructures oy 2016)



KUVA 19. Kuvan 18 viilajyrsimen päätygeometrialla aikaansaatu lähes virheetön reikä. Reiän ympärillä näkyy hyvin ohut, rengasmainen alue, joka on delaminaatiota tai jäystettä (Patria Aerostructures oy 2016)

Yrityksen kokemusten mukaan reikien delaminaatio ei ole merkittävä tekijä pieniä reikiä koneistaessa, mutta tietyissä tuoteperheissä 8 mm tai suuremmat reiät on päätetty jyrsiä delaminaation ehkäisemiseksi.

Yrityksessä on todettu reikien halkaisijoiden olevan ajoittain pienempiä kuin poraava terän halkaisija. Yrityksessä on todettu, että vaikka reikä porataan 8 mm poralla ja mikrometri näyttää reiän olevan oikean kokoinen, 8 mm tulkki ei mene reikään. Tämä ilmeisesti

johtuu mikrokokoisesta haivenesta, joka ympäröi reikää: mikrometrillä mitatessa reikää tämä haiven painuu kasaan, mutta tulkin mitatessa reikää tämä haiven tiivistyy reiän ympärille ja pienentää reikää. Myös suunniteltua nopeammin kulunut työkalu on saattanut olla ongelman aiheuttaja.

Ameurin ym. (2016) tutkimusartikkeli käsittelee asiaa jonkin verran sylinterimäisyysvirheen kannalta, muttei ota kantaa tähän porauksessa todettuun käytännön ongelmaan. Artikkelin taulukosta voi kuitenkin päätellä, että sylinterimäisyysvirhe voi pahimmillaan olla jopa 0,09 mm poran geometriasta, leikkuu- ja syöttönopeuksista riippuen (Ameur ym. 2016, 2560). Tämän virhearvon yhteys yrityksessä todettuun toleranssiongelmaan voi olla merkittävä, mutta sitä ei käsitellä opinnäytetyössä tätä tarkemmin. Tiettyjen yritysten CFRP:n koneistusta ja porausta käsittelevillä sivuilla mainitaan, että poranterissä kannattaa käyttää noin 0,05 mm ylimittäisiä poranteriä (Amalga Composites, Inc. 2018).

Yrityksessä ongelmaa on vähennetty käyttämällä GO/NOGO-tulkkeja. Tulkit eivät ratkaise suoraan porausongelmaa, mutta ne kertovat, ovatko reiät toleranssialueella. Tulkin GO-puoli menee reikään, mutta mikäli NOGO-tulkki menee reikään, se on liian iso.

6.2 CFRP:n muodon jyrshintä

Tämän työn puitteissa CFRP:n jyrsimisellä viitataan sellaiseen jyrshintäprosessiin, joka leikkaa levymäisestä CFRP-aihiosta tietynlaisen muodon irti. CFRP:hen voi myös koneistaa taskuja ja uria rikkomatta pohjaa, kuten muihinkin materiaaleihin, mutta se on harvoin haluttua yrityksen ilmailuteknisissä sovelluksissa – yleensä osat ovat rakennosia, jotka vaativat jatkuvan, häiriöttömän pinnan. Myöhemmin tässä luvussa tutkitaan pinnan koneistusta, jota voi periaatteessa soveltaa urien, laippojen ja vastaavien geometrioiden koneistukseen.

6.2.1 Tutkimustieto

Jyrsinässä kuidut leikkautuvat ns. määrittelemättömällä tavalla, eli kuidut vääntyvät ja riuhtoutuvat leikkuuterän mukaan. Plastisista materiaaleista poiketen tälle ilmiölle ei ole lastunmuodostuskaavaa. Leikkuutapahtuma mikrotasolla riippuu terän muodosta, joka

viilaterällä on erilainen verrattuna leikkaavaan terään. Uurretun työkalun aiheuttama leikkuujälki on jatkuva, joka ”riuhtaisee” palan kuitua ja matriisia osuessaan komposiittiin, kun taas viilan geometria kuluttaa leikkaamisen sijaan (Haddad, Zitoune, Eyma & Castanie 2014, 144).

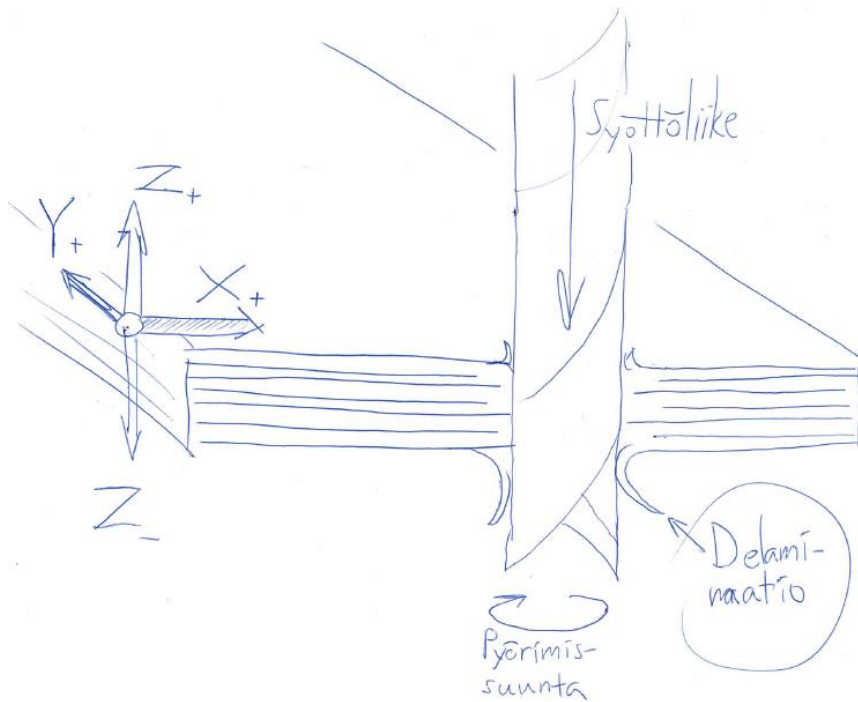
Jyrsittäessä komposiittilevyihin muotoa terän geometrialla, terän kulumisella ja syöttönopeudella on todettu olevan suurin vaikutus delaminaatioon. Työkalun geometriasta aiheutuvat leikkuuvoimat kasvavat suoraan verrannollisesti leikkaavan särmän säteen eli nirkonsäteen kasvaessa (Uhlmann ym. 2014, 19).

Aihetta käsitellään hieman eri tavalla Haddadin ym. (2014) tutkimusartikkelissa. Tutkimusartikkelissa kiinnitetään huomiota enemmän kahden leikkuutyökalun eroaviin geometrioihin, jotka ovat viila ja uurteinen jysintappi. Terävät uurteet luovat erilaisen leikkaustapahtuman. Viila luo abrasiivista kulumista, ja uurteet leikkaavat paloja. Tylsempi ura eli suuremman nirkon omaava tappi muokkasi leikkuutapahtumaa enemmän abrasiiviseksi, joka tekee koneistusjäljestä rouheampaa (Haddad ym. 2014, 144).

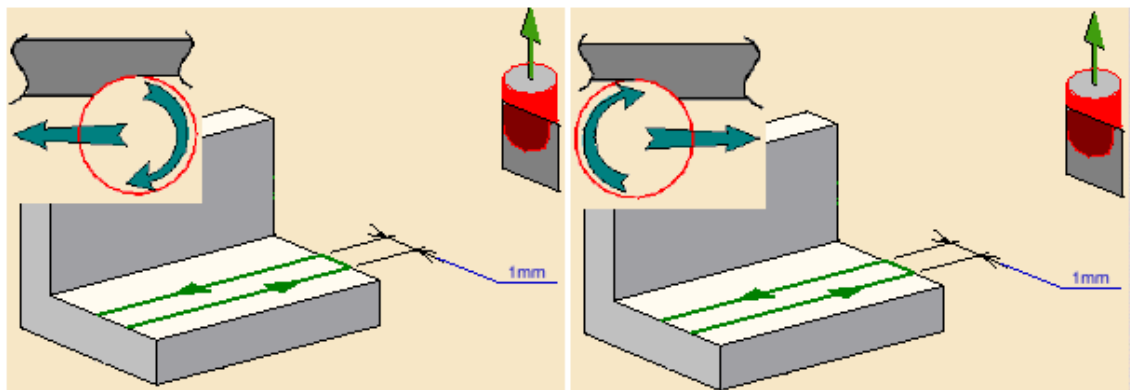
Haddad ym. (2014) artikkelissa todetaan, että leikkuunopeuden kasvaessa 285 m/min:iin työstön mekaniikka muuttuu ”mekaaniseksi riuhtomiseksi”. Kuluttavan eli abrasiivisen työstön sijaan jysintappi riuhtoo paloja komposiitista irti leikkusärmällä, jolloin ne leikkautuvat irti erilaisella prosessilla. Plastisien aineiden lastuamiseen tarkoitettut kaavat eivät käy CFRP:n koneistamiseen, sillä tuloksena ei ole jatkuvaa lastua, vaikka materiaali leikkautuisi puhtaammin irti verrattuna metalleihin (Haddad ym. 2014, 144).

6.2.2 Yrityksen kokemukset

CFRP:n jysinnässä on, kuten porauksessa, ongelmina työkalujen lämpeneminen, aihion delaminointuminen ja lopulta myös tuotteen palaminen, jos lämpöä ei saada johdettua pois. Delaminaatiota jysinnässä ei kuitenkaan esiinny merkittävästi silloin, kun laminaattia ei koneisteta kuitukerroksia vastaan kohtisuorilla liikkeillä, eli 3-akselisesti Z-suunnassa (kuva 20). 3-akselisesti jysittäessä tämä toteutetaan käyttämällä vain X- ja Y-suuntaisia liikkeitä. Koneistus toteutetaan aina vastajysintänä, sillä sen on todettu tuottavan parempaa laatua (kuva 21).



KUVA 20. Z-liikkeen aiheuttama delaminaatio havainnollistettuna

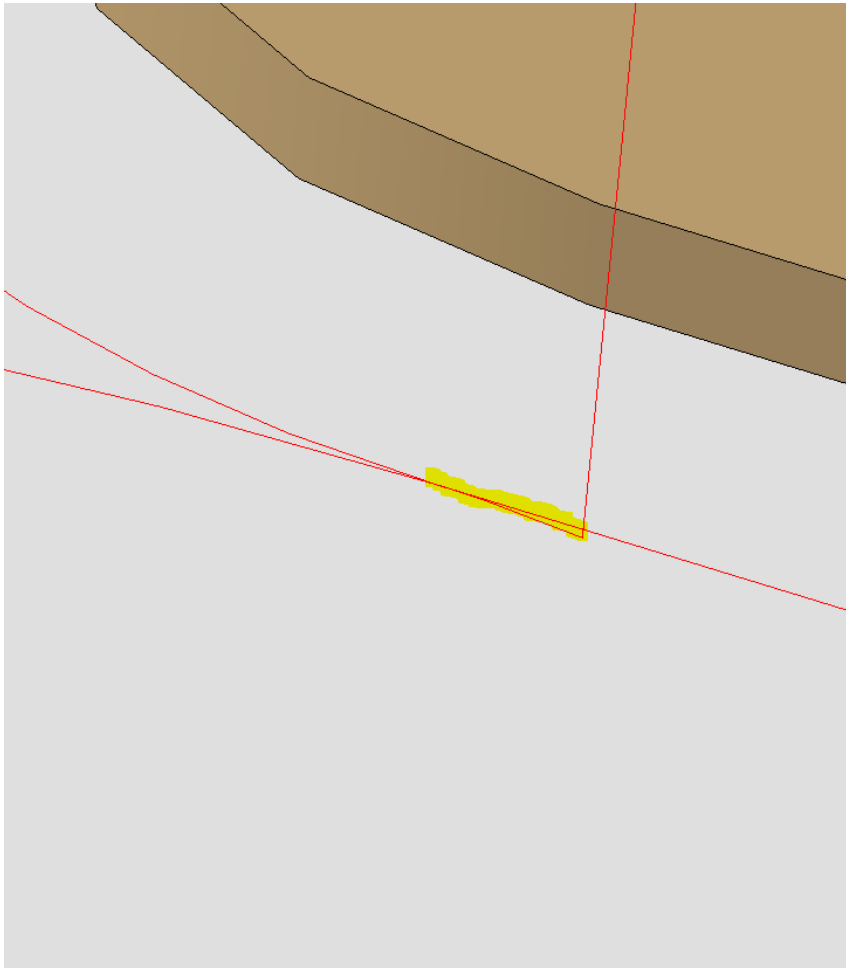


KUVA 21. Myötäjärsintä (vas.) ja vastajärsintä

Yrityksessä ei olla todettu CFRP:n muotokoneistamista haasteeksi laadun kannalta, koska parametrien, lähestymisien ja poistumisien ollessa kohdallaan koneistettu muoto vastaa asiakkaan tarpeisiin. Lähestyttäessä ja poistuttaessa työkalulla kappaleesta jouheasti ehkäistään mahdollinen delaminaatio (kuva 22; kuva 23). Yrityksessä on huomattu, että muotojen tekoa aloittaessa delaminaation riski on suuri. Delaminaatio saadaan näin siirrettyä tuotteen muodon ulkopuolelle.



KUVA 22. Kuvassa on erään hankkeen osan koneistusta CFRP-aihiosta CAM-ohjelmistossa. Kuvassa koneistusrata on punaisena.



KUVA 23. Lähikuva eräästä hankkeen osasta CAM-ohjelmistossa. Kappaleesta poistuminen tarvitsee olla vain sen verran pitkä, että terä ei vedä kappaletta mukanaan. Kuvassa koneistusrata on punaisena, ja pystysuora viiva kuvaa kappaleesta poistumista. Koneistusradan kohta, jossa poistutaan kappaleesta, on värjätty keltaisella.

6.3 CFRP:n vesileikkaus

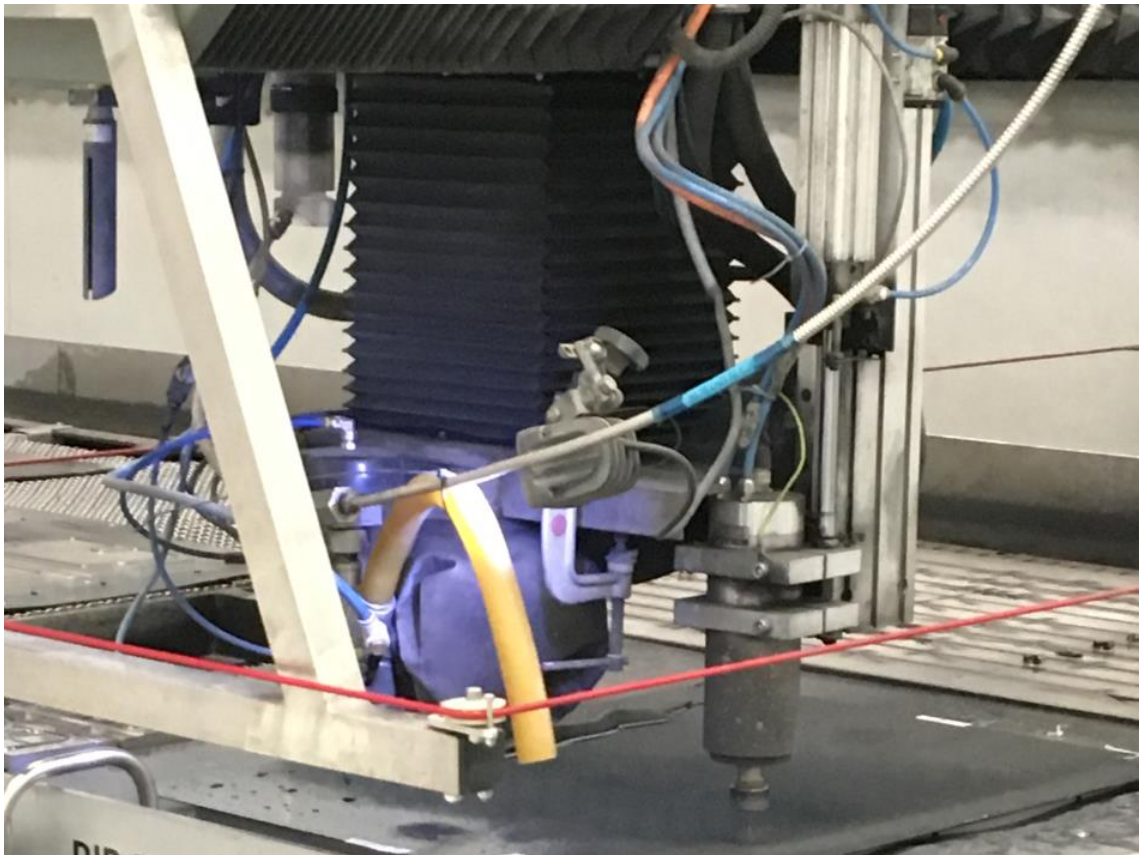
Vesileikkaus onnistuu tasomaisille CFRP-osille, kunhan vesileikkauksessa käytetään mukana abrasiivista hiekkaa. Pelkkä vesi aiheuttaa delaminaatiota (kuva 24).



KUVA 24. Vesileikattu CFRP-osa, joka hylättiin. Kuvassa delaminaation raja erottuu haaleana viivana.

Vesileikkauksen hyötyjä ovat muun muassa hyvä pinnanlaatu ohuissa osissa, pölyn muodostumisen puute ja lämpötilan hallinta. Liian paksuille materiaaleille vesileikkaus ei sovi, sillä paksujen materiaalien muotoja leikatessa vesisuihkun pää jakautuu leikkuusyvyuden kasvun johdosta laajemmalle alueelle kuin sisääntulossa pienentäen leikkuupainetta, joka aiheuttaa osaan delaminaatiota tai kartioimaisuutta muodossa. 4–7 mm on todettu olevan hyvä paksuus vesileikattavaksi.

Yrityksessä on myös todettu, että pienien reikien tekeminen ei onnistu tarkasti pelkällä vesileikkurilla. Vesileikkuri ei ole rakenteeltaan tarpeeksi jyrävä, joten rei'istä ei välttämättä tule pyöreitä. Vesisuihkun luontaisesta leviämisestä johtuen reiät eivät välttämättä ole edes sylinterimäisiä. Koska veden painetta täytyy vaihdella lävistäessä ja leikatessa, koneen osat kuluvat. Reiän tekoon menisi muutenkin suhteellisen kauan aikaa, noin 15–20 sekuntia. (van Daalen 2018). Tästä syystä yrityksen vesileikkuriin on integroitu porakara suuttimen läheisyyteen (kuva 25).



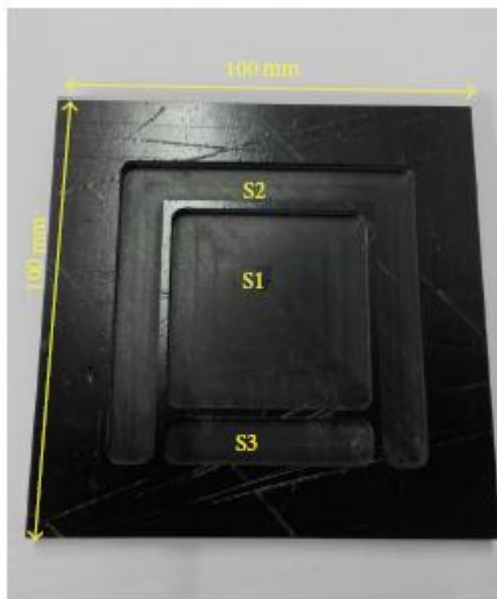
KUVA 25. Vesileikkurin pora

6.4 CFRP:n pintakoneistus

Ilmailuteollisuus vaatii tarkkoja paikoituksia ja toleransseja rei'ille, sillä komposiittiosat kiinnitetään yleensä ruuvein laitteiden runkoihin ja muihin osiin kiinni. Laminaattien paksuuden ollessa yleensä vakiomittainen laminaattien koneistusta tiettyyn paksuuteen ei ole yrityksessä aktiivisesti tehty. Tietyissä tapauksissa vaaditaan hyvin tarkkoja paksuus- ja muita mittatoleransseja, jolloin pintaa on pakko koneistaa.

Tutkimustietoa sekä kuitu- että hybridikomposiittien koneistuksesta löytyy merkittävästi vähemmän kuin porauksesta tai muodon jyrstinnästä. Pintakoneistusta tutkivissa artikkeleissa koneistetut aihiot ja koneistusmatkat ovat olleet pieniä verrattuna niihin lentokoneenosiin, joihin työstökierrot voisivat kohdistua (Kitajima, Horiuchi, Yui. & Ito 2016, 488). Yrityksessä on todettu, että pieniin kappaleisiin saadaan tarvittaessa sopivilla PCD-työkaluilla huomattavan hyvää pinnantarkkuutta, varsinkin kun työstörata on vaakatasossa eikä kara tee pinnalle kaksoiskaarevaa muotoa.

Ajatuksena aihe on mielenkiintoinen, sillä kudottu hiilikuitukangas ikään kuin höyläytyy kahtia: hiilikuitukudos ja epoksihartsin muodostavat tasaisen pinnan, mutta sen mikroskooppisesta koostumuksesta koneistuksen jälkeen ei ole saatavilla tietoa. Tutkimusartikkelista *Analyzing the Effect of Machining Parameters Setting to the Surface Roughness during End Milling of CFRP-Aluminium Composite Laminates* löytyi CFRP-alumiinihybridikomposiitin uran koneistuksen mikroskooppista pinnanlaatua eri koneistusnopeuksilta, joka kuvaa hyvin hybridiosien pinnanlaatua (kuva 26; kuva 27) (Nurhaniza, Ariffin, Mustapha & Babarudin 2015, 1-9).



(b)

KUVA 26. Koneistettu hybridiosa (Kuva: Nurhaniza ym. 2015, 4)

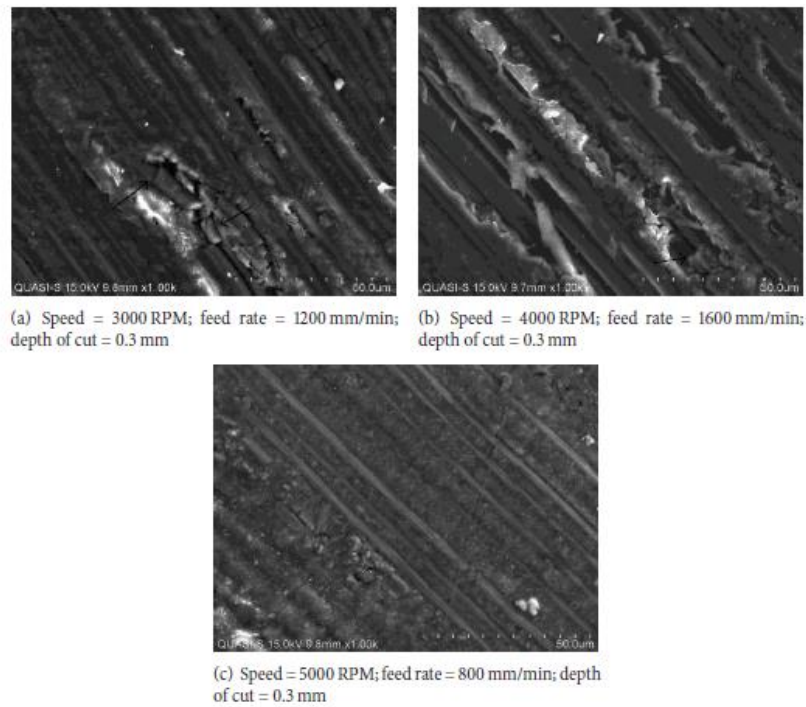
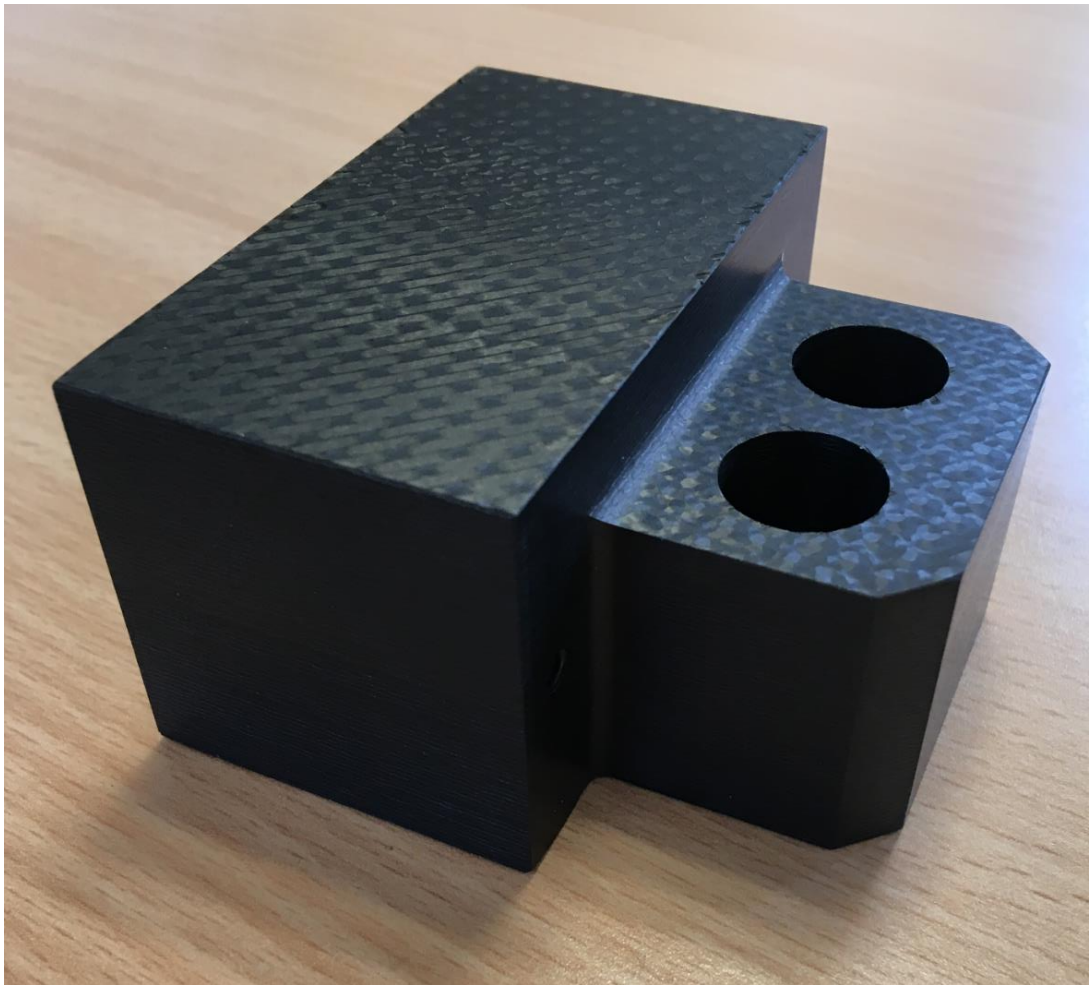


FIGURE 9: Scanning electron micrographs of the machined surface.

TABLE 3: (a) Response table for average S/N ratio for S1. (b) Response table for average S/N ratio for S2. (c) Response table for average S/N ratio for S3.

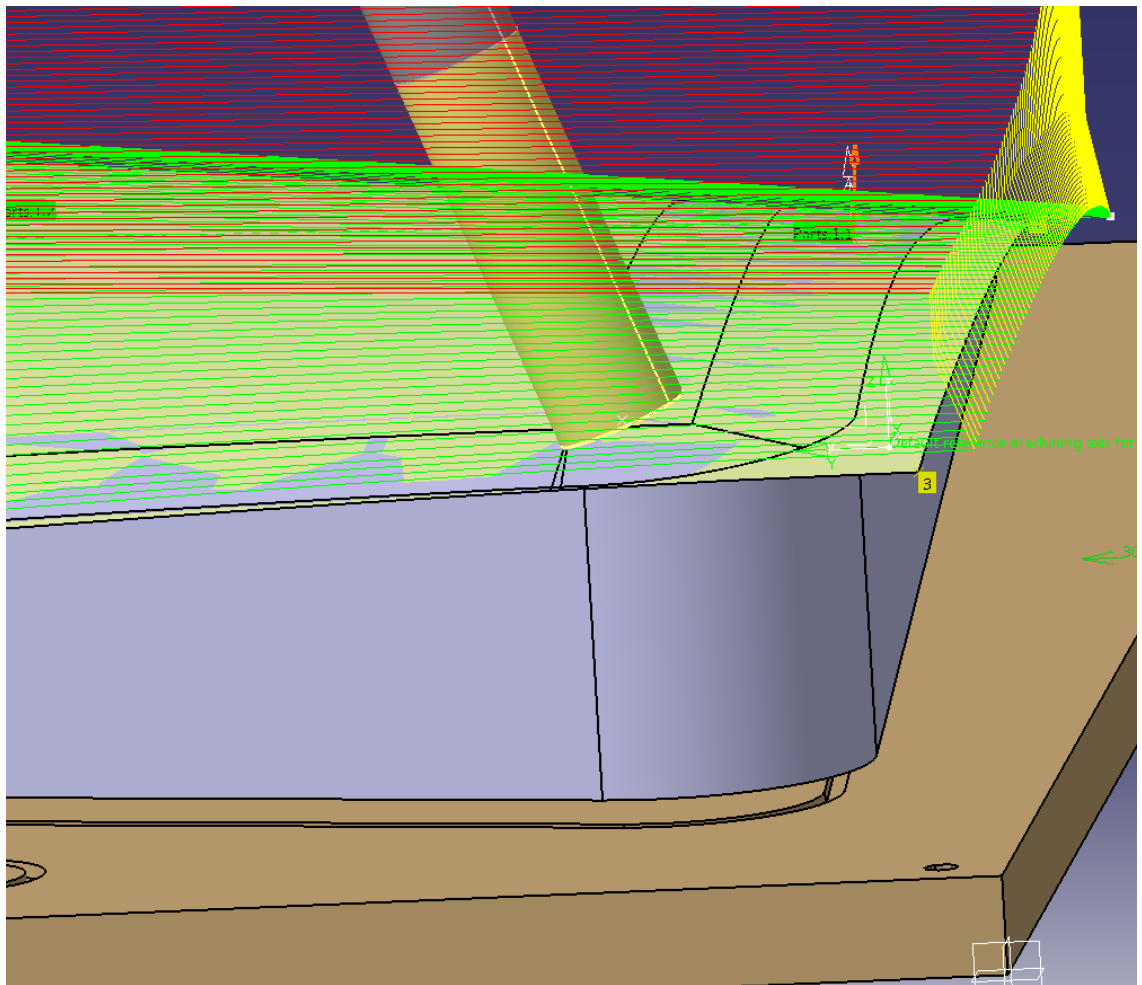
KUVA 27. Hybridiosien koneistettu pinnanlaatu, SEM-kuva (Kuva: Nurhaniza ym. 2015, 4)

Yrityksessä käytännön kokeilun avulla koneistetuista pinnoista on saatu erittäin hyvälaatuisia osia, joista osa on tallella (kuva 28). Pinnankarheusmittauksia näille osille ei ole tehty, ja mahdollisien kolhiintumisien vuoksi tämän osan pinnanlaadun mittaamista ei koettu luotettavana lähteenä tälle opinnäytetyölle.

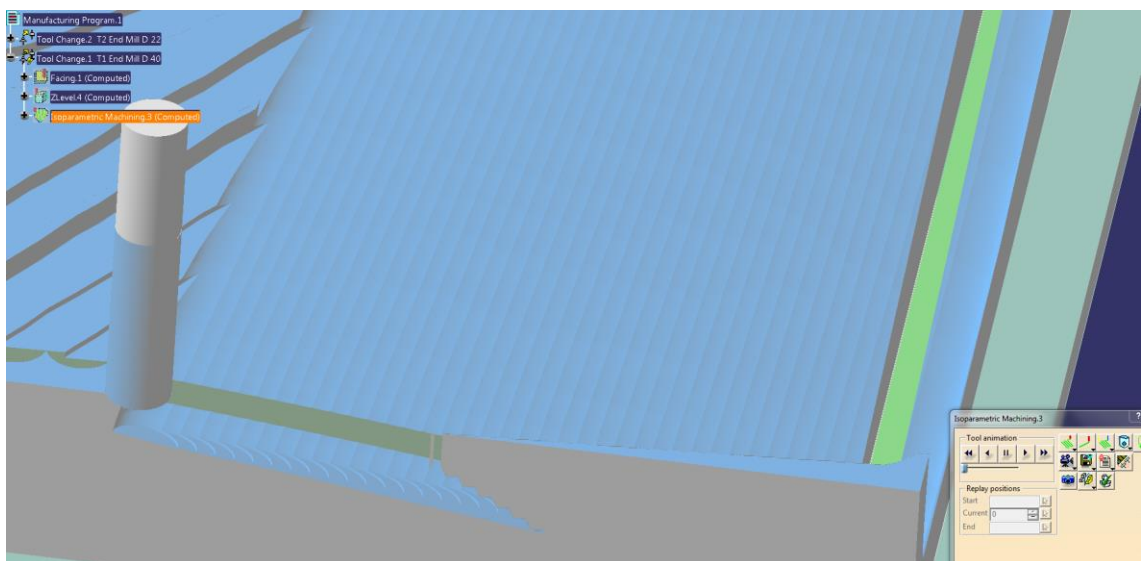


KUVA 28. Eräs osa, jota vaadittiin tiettyyn sovellukseen. Osaa on pintakoneistettu vastajyrsimellä

CFRP:n pintakoneistus on yrityksessä saatu onnistumaan kallistamalla terää työstösuuntaan nähden 3-6 astetta ja vastajyrsimällä pintaa yksisuuntaisesti. Pinnan koneistusta ei tehdä kovin usein, ja pintakoneistettavat osat ovat tähän asti olleet pieniä. Ideana on, että terän kallistuessa vain terän toinen leikkaava reuna osuu koneistettavaan pintaan, jolloin terän toinen puoli ei ”laahaa” perässä (kuva 29; kuva 30). Tällä tavalla on saatu kontrolloitua lämpötilaa ja terän kulumista.



KUVA 29. Kärjistetty esimerkki työkalun kallistamisesta. Työkalua on kuvassa kallistettu työstösuuntaan nähden 18 astetta, jota kuvan tapauksessa ei normaalisti tehtäisi. Normaali kallistus olisi kuvan tapauksessa 3 astetta, mutta kallistuma ei näyttänyt esimerkiksi varten tarpeeksi selkeältä.



KUVA 30. Poimumuodon eli scallopin esiintyminen simuloinnissa visuaalisesti. Simuloinnissa esitetyt visualisoinnit eivät kuvaa lopullista pintaa täysin.

Terän asento samalla määrää ”kamman” eli poimun säteen, joka on CATIA-suunniteluohjelmistossa scallop-arvo. Scallop on poimujälki, joka syntyy terän leikatessa pintaa terätojen välille. Tätä poimua säätelemällä voidaan hallita pinnantarkkuutta tiettyyn rajaan asti. CATIA:n CAM:ssa scallop määritellään yrityksessä perinteisesti 0,013 mm, mutta sen saa tarkemmaksi. Kaksoiskaarevien lentokoneenosien pinnankarheuden numeerisen tarkkuuden simuloinnissa määrää juuri scallop, mutta käytännössä varsinkin komposiiteissa siihen saattaa vaikuttaa myös komposiittien kerrosten purkautuminen, kun materiaalia poistetaan kerros kerrokselta.

6.5 Komposiittien koneistuksessa käytetyt porat ja terät

Terien geometriasta ja materiaalista löytyy paljon erilaisia komposiiteille soveltuvaa tietoa. Yleisellä tasolla pikateräksiset työkalut kuluvat liian nopeasti, sillä kuitulaminaatti on abrasiivista. PCD-teräpalat kestävät kuitulaminaatteja parhaiten, kunhan aihio on tuettu jyrkästi. Kovametalliteriä käytetään esimerkiksi vähemmän jyrkävissä koneistuskeskuksissa tai liikaa värähtelevissä aihioissa, sillä PCD-teräpalat vahingoittuvat värinästä.

6.5.1 Tutkimustieto ja komposiittitoimialoille suunnatut sovellukset

Pikateräs ei sovellu komposiittien koneistukseen, sillä pikateräs ei ole tarpeeksi kovaa kestääkseen kuitujen aiheuttamaa jatkuvaa kulumista. Kuituja poratessa pikateräksiset porat voivat kulua käyttökelvottomiksi jo kymmenen reiän jälkeen (Rahman 2008, 21). Työssä aiemmin siteeratut artikkelit ovat käyttäneet kuvien (31; 32) mukaisia teriä hiili- ja lasikuitulaminaattien koneistukseen.



Figure 7. Brad Spur drill bit.



Figure 8. Durapoint drill bit.



Figure 9. Conventional drill bit.



Figure 10. Double Margin drill bit.



Figure 11. Sizing drill bit.

KUVA 31. Komposiittien poraukseen soveltuvia työkalugeometrioita (Kuva: Rahman 2008, 23)

CDTooling Solid Carbide Polycrystalline Diamond
(PCD) Tipped 8 Facet Drill for Composites



PCD (Poly-Crystalline Diamond) drill bits are the right type of drills to use when drilling composite and other abrasive, non-ferrous materials. PCD Diamond drill bits have been proven to dramatically increase tool life and part production time while reducing machine down time. Our PCD diamond drill bits have been known to last up to 50 times longer than carbide and other standard drill bit types.

PCD Diamond Tipped Carbide drills bits 8 facet point

KUVA 32. 8-Facet -geometrinen pora (CDTooling 2018)

Rahmanin päättötyön (2008) lopputuloksina oli saatu seuraavat suositukset poranteriksi, joka vastaa usean toimittajan tarjoamia vaihtoehtoja yritykselle. Taulukkoon 6 on vertailtu porageometrioiden ominaisuuksia. Työssä ei ollut saatavilla materiaalien A, B ja C tietoja.

TAULUKKO 6. Artikkelin lopputulos teräsuosituksista (Taulukko: Rahman 2008, 166)

TABLE 9

SUMMARY OF RESULTS

	Recommended Drill Bits		
	Material A	Material B	Material C
Low thrust force	Precision Dormer	Precision Dormer	Precision Dormer
Low torque	Precision Dormer	Precision Dormer	Precision Dormer
Best surface roughness	8-Facet	Brad Spur	Brad Spur
Least roundness error	Brad Spur	8-Facet	8-Facet
Least Hole oversize (best dimensional accuracy)	Precision Dormer	Precision Dormer	Precision Dormer
Low temperature	Precision Dormer	Precision Dormer	Precision Dormer
Least damage area	Brad Spur (entry side) Brad Spur (exit side)	Brad Spur (entry side) Precision Dormer (exit side)	Entry side – N/A 8-Facet (exit side)

Useat katalogit suosittavat PCD- ja kovametalliteriä CFRP:n koneistukseen. PCD ei johda lämpöä, ja se kestää kuitujen kovuuden aiheuttamat abrasiiviset ominaisuudet. PCD-terillä saa tarkkaa jälkeä, mutta ne silti kuluvat ja ovat kalliita. PCD-teriä voi teroitaa, tosin teroituksessa häviää myös osa terän halkaisijasta (GDP Guhdo 2012).

Kovametallien eli wolframikarbidista sintrattujen terien vahvuusalue on hankintahinnassa. Tietyt terävalmistajat suosittavat kovametallien käyttöä CFRP:n ja muiden komposiittien koneistamisessa esimerkiksi liikaa värähtelevissä aihioissa, jotka huonon tuennan vuoksi aiheuttavat PCD-paloja vahingoittavia värähtelyjä.

Hankintahinnan välimuoto on timanttipäällystetyt (Diamond Coated tai PVD) kovametallityökalut, joita ei voi kulumisen jälkeen päällystää uudestaan (RobbJack Corporation 2018)

Viilageometrian omaavat jyrsimet ovat soveltuneet sekä hiili- että lasikuituosien koneistukseen. Joskus laminaatit ovat aramidikuitua sisältävää hybridilaminaattia, joka on luonteeltaan iskunkestävää. Viilajyrsin ei riko aramidikuituja tarpeeksi hyvin. Aramidikuidulle on huomattu kelvolliseksi sovellukseksi spiraaligeometria (kuva 33), joka iskee aramidikuitua ylös ja alas aihion keskilinjaa kohti rikkoen aramidikuidun kokonaan pölyksi. Valmistajasta riippuen spiraaligeometria voi olla myös nimeltään double helix tai compression (Kyocera Precision Tools, Inc. 2018).



KUVA 33. Tapin pää nostaa ja laskee laminaatin kuitukerroksia kohti keskilinjaa ehkäisten delaminaatiota, joka parantaa lopputulosta varsinkin aramidikuiduilla (Kyocera Precision Tools, Inc. 2018)

6.5.2 Yrityksen kokemukset

Yrityksessä on todettu, että terien hiomisen sijaan on kustannustehokkaampaa käyttää uutta terää vanhan kuluessa liian tylsäksi. Ohuita kappaleita koneistaessa viilajyrsimistä voidaan leikata pääty pois, jos viilajyrsimellä koneistetaan vain muotoa.

Lähestymistä ja poistumista sovelletaan kaikkiin koneistettaviin kuitutyyppeihin. Teränä toimii kovametallinen viilajyrshintappi tai PCD-varsijyrsin. Vaikka kovametalli kuluu nopeasti, ne ovat halpoja suhteessa PCD-varsijyrsimiin. PCD-tapeilla saadaan laadukkaampi lopputulos ja suurempi käyttöikä, mutta hinnasta johtuen niitä käytetään vain vaativiin kappaleisiin, joita suunniteltaessa on todettu PCD-terien sopivan parhaiten työhön.

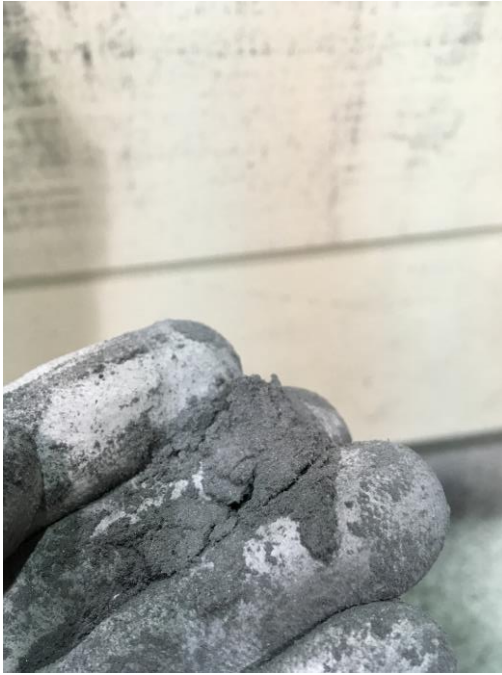
Terän geometria on yrityksen jyrä- ja yleiskoneistusprosesseissa hankkeista riippuen viila tai varsijyräimen normaali geometria, ja aramidikuitua koneistaessa kompressiogeometria. Kustannustehokkaan ja laadukkaan ratkaisun ovat tarjonneet kovametalliset viilajyräimet sekä muotojen että isojen reikien osalta, ja pienille rei'ille soveltuu kovametallipora. Työkalut mitataan aina työkalun vaihdon yhteydessä, jolloin vältytään työkalujen aiheuttamilta laatuvirheilta.

Yrityksellä on hyviä ja huonoja kokemuksia Brad Spur -teristä (kuva 27), jotka tunnetaan myös puu- tai vaneeriporina. Brad Spur -geometrialla saadaan hyvää jälkeä porauksiin, mutta leikatessaan CFRP:tä se jättää pienen kiekkomaisen palan terän keskelle hampaiden väliin. Mikäli kiekkoa ei saada ilmaa puhaltamalla pois, terä poraa seuraavaa reikää kiekko edelleen terässä kiinni, jolloin aihio ei leikkaudu, lämpötila nousee ja matriisi alkaa palaa. Forest-Linéssa ongelman ratkaisuna on puhaltaa ilmaa terään kiekon poistamiseksi ja terän viilentämiseksi. Brad Spur-terät myös kuluvat nopeasti.

6.6 Hiilikuitupöly

Komposiittien lastu syntyy hienojakoisena pölynä (kuva 34). CFRP:stä syntyvä pöly voi ärsyttää limakalvoja ja juuttua ihoon kiinni yksittäisistä kuiduista (Haddad ym. 2014, 153). Lisäksi hiilikuitupöly on sähköä johtavaa, joten se voi olla haitallista sähkölaitteille (Saarela ym. 2007, 88).

Parhain tapa poistaa koneistuksessa syntyvä hiilikuitupöly on imuroida sitä samalla, kun aihiota koneistetaan. Työstökeskuksen imurointiin tarkoitettu lisälaitteisto ja suodattimet ovat kalliita, ja nekään eivät poista kaikkea pölyä, joten koneistusaluetta on aina siivotava.

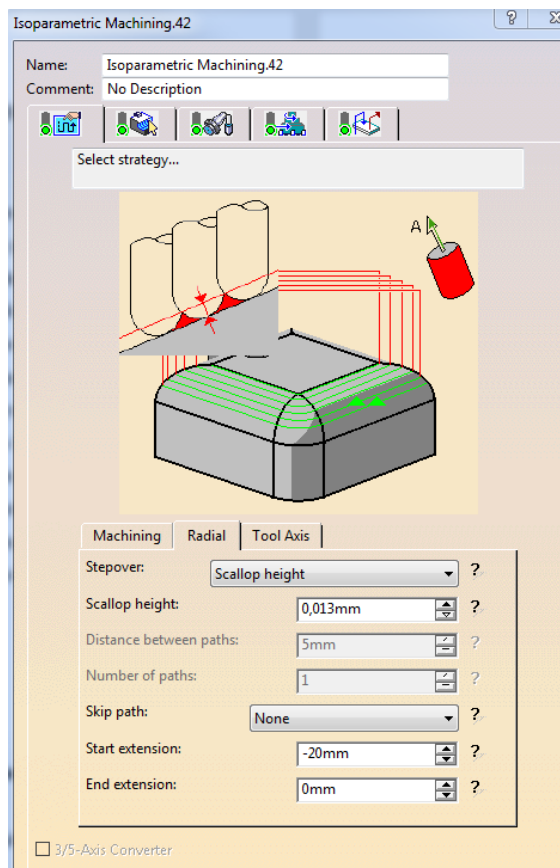


KUVA 34. CFRP:stä työstettyä pölyä, joka koostuu epoksista ja hiilikuidusta. Paljaalla silmällä yksittäisiä kuituja ei ole aina havaittavissa eikä erotettavissa epoksista.

Koneistettava pöly voi suurissa lämpötiloissa myös paakkuuntua epoksimatriisin sulamisesta johtuen. Yrityksessä on käytetty yksileikkuisia teriä koneistamaan tapauksissa, joissa syntyy leikkuuparametrien vaikutuksesta liian paljon pölyä, joka juuttuu työkalun uurteisiin. Yksileikkuiset terät eivät ilmeisesti geometriansa ansiosta paakkuunnuta itseensä yhtä paljon pölyä kuin muut terät. Aiheesta ei löytynyt tieteellistä lähdettä.

7 KONEISTETTU PINNANKARHEUS KOMPOSIITEISSA

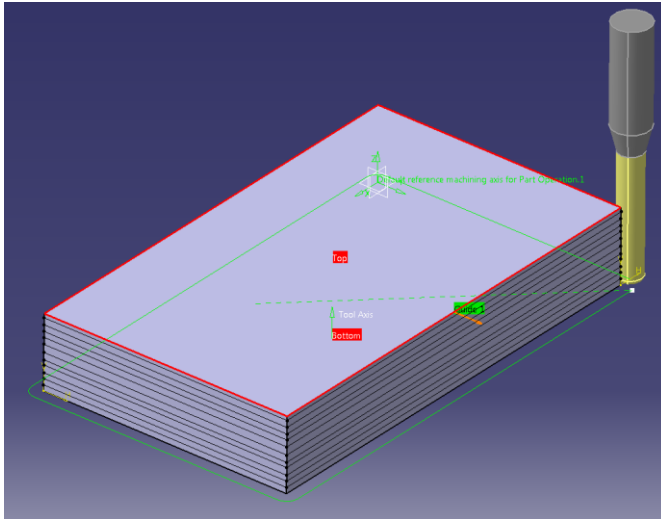
Tämä osio keskittyy koneistuksesta syntyvän pinnankarheuden ja sen todentamismenetelmien tutkimiseen Duboustin ym. (2014) tutkimusartikkelin pohjalta. Pinnankarheutta mitataan poikkeamina ideaalisen pinnan normaalivektorista. Nämä poikkeamat esiintyvät mikroskooppisina kuoppina ja kukkuloina. Työn aiheen tapauksessa koneistettu pinnankarheus syntyy CATIA:n CAM-työpöydän asetuksesta ”scallop height” eli poimun tai kamman korkeus (kuva 35), kun koneistetaan isoparametric machining –toiminnolla ja kallistetulla jyrsimellä. Tulokset ovat mikroskooppisesti kiinnostavia, sillä pinnan huippualkion etäisyys laakson pohjasta voidaan ohjelmistossa helposti säätää 13 mikrometristä 5 mikrometriin. Yhden hiilikuidun paksuuden ollessa 5-10 mikrometriä saattaa olla mahdollista päästä tilanteeseen, jossa yksi kokonainen huippu on samalla kokonainen poikittain oleva kuitu, taikka tämä kokonainen kuitu kiskoutuu kokonaan pois, tai jotain siltä väliltä. Näistä kolmesta tapauksesta ei ole kirjoitushetkellä saatavilla olevaa tutkimustietoa. Duboustin ym. (2014) koetilanne ei suoraan vastaa työssä käsiteltävää pinnankarheutta, mutta se oli paras saatavilla oleva kirjallinen lähde.



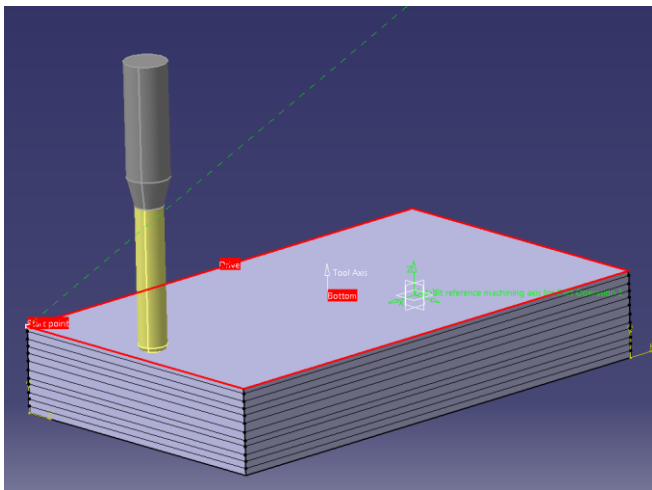
KUVA 36. Scallop height

7.1 Pinnankarheuden teoria, Duboustin ym. (2016) tutkimusartikkeli

Yleisimmin komposiitteja koneistaessa koneistetaan komposiittipaloille muotoa työstämällä tapin kaulalla (kuva 37). Mikäli vaaditaan, voidaan myös koneistaa uria, taskuja tai vastaavia muotoja komposiittipalojen pintaan tapin kärjellä (kuva 38).



KUVA 37. Muodon koneistaminen, havainnollistava kuva



KUVA 38. Tapin kärjellä koneistamista käytetään pääosin pintojen tasaamiseen ja urien koneistukseen

Tutkimustietoa ja kirjallisuutta löytyy tapin kaulan synnyttämästä pinnankarheudesta (Duboust ym. 2014), muttei tapin päällä koneistetusta karheudesta. Tapin kaulalla koneistettua pinnankarheutta ei käsitellä muutoin, sillä se ei ole opinnäytetyön varsinainen aihe.

Kuitujen koneistussuunnalla todettiin olevan merkittävää vaikutusta saavutettuun pinnanlaatuun, ja mittausmenetelmällä sen tarkkaan todentamiseen. Elektronimikroskoopilla otettujen kuvien perusteella sekä profilometrillä voitiin todeta, että 135° suuntaisesti laminoituiden kuitukerrokset leikkautuvat huonosti, ja antavat täten huonon pinnanlaadun hui-pukkuuden, vinouman ja pinnankarheuden keskiarvon R_a mukaan. Artikkelissa todettiin myös optisen mittausjärjestelmän olevan sopivampi komposiittien pinnan laadun mittamiseen perinteisen kosketusmittalaitteen sijaan, sillä optinen mittausjärjestelmä on riippumaton mittaussuunnasta. Mittaustuloksena on saatu myös selkeitä SEM-kuvia. Huomi-oitavaa oli myös se, että viilajyrsintyyppisillä työkaluilla koneistaessa syntyy enemmän karheutta kuin uurtisissa työkaluissa (Duboust ym. 2016). Tutkimusartikkelissa esitettyjen huomioiden avulla koneistettavan CFRP-osan kuitujen asentoa mietitään ennen koneistusradan ohjelmointia. Tutkimusartikkelissa käytetty mittalaite saatiin käyttöön Tampereen teknilliseltä yliopistolta.

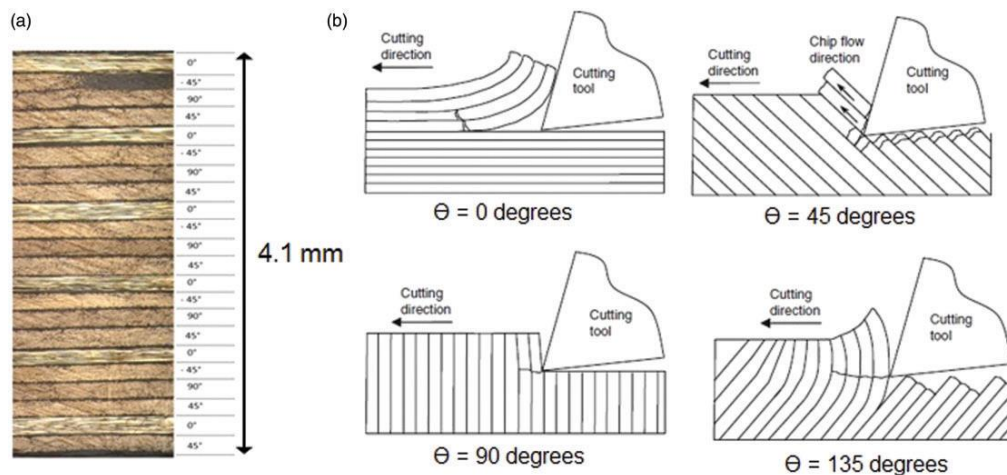
On huomautettava, että Duboustilla ym. (2016) on todennäköisesti mennyt paikoittain yksiköitä sekaisin, joista ainakin yksi esimerkki on todettu sähköpostilla olevan virheel-linen (Kerrigan 2018). Lisäksi Duboust ym. ovat käyttäneet kirjoittajan mielestä epäloo-gisissa paikoissa syöttönopeutta, syöttöä per teräpala ja syöttöä per kierros. Näihin ei puu-tuta työssä tarkemmin, mutta työn lukijan on muistettava lähdekriittisyys.

7.1.1 Artikkelin koetilanne

Monisuuntaisia eli kudottuja ja yksisuuntaisia prepreg-kerroksia asetettiin 22 kerrokseen 0,-45,90,45 -asteisesti kahdeksi eri kappaleeksi. Toisessa laminaatissa oli pelkkää UD-kerrosta ja toisessa oli pelkkää kudosta. Kappaleet kovetettiin autoklaavissa laminaa-teiksi. Kumpaankin laminaattiin koneistettiin 25 mm * 52 mm * 4,1 mm ura. Monisuun-taisien palojen laminaattiosaan työkaluna toimi 25 mm teränpidin neljällä PCD-teräpa-lalla, ja yksisuuntaisten palojen laminaattiosaan käytettiin kahta erilaista, timanttipinnoi-tettua työkalua: spiraalinmuotoista 9,5 mm nelihampaista tappijyrsintä, ja 12-hampaista 10 mm viilajyrsintä. Pinnankarheusmittaus toteutettiin vastajyrsityltä puolelta (Duboust ym. 2016, 3-5).

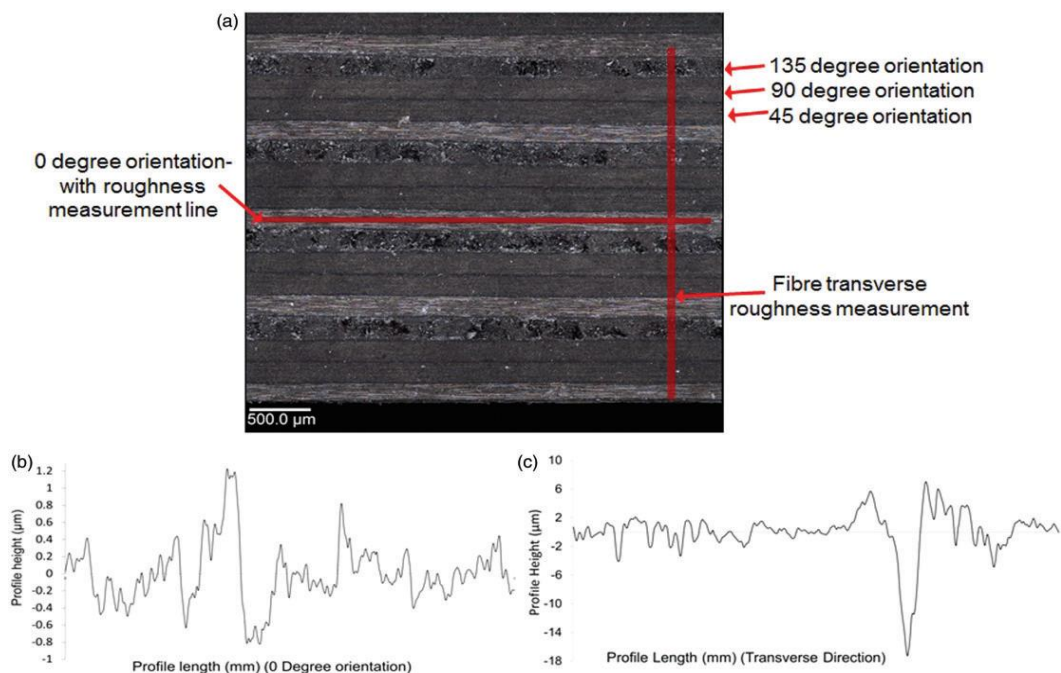
7.1.2 Kuitujen ja matriisien leikkautuminen ja käyttäytyminen laminaatin reunan koneistuksessa

Kuvassa 39 on esitetty, miten kuidut irtoavat matriisista ja katkeavat terän osuessa niihin. Sääntö pätee sekä yksisuuntaisille että kudoksetavalle, tosin lastun muodostumistavassa voi olla eroa.



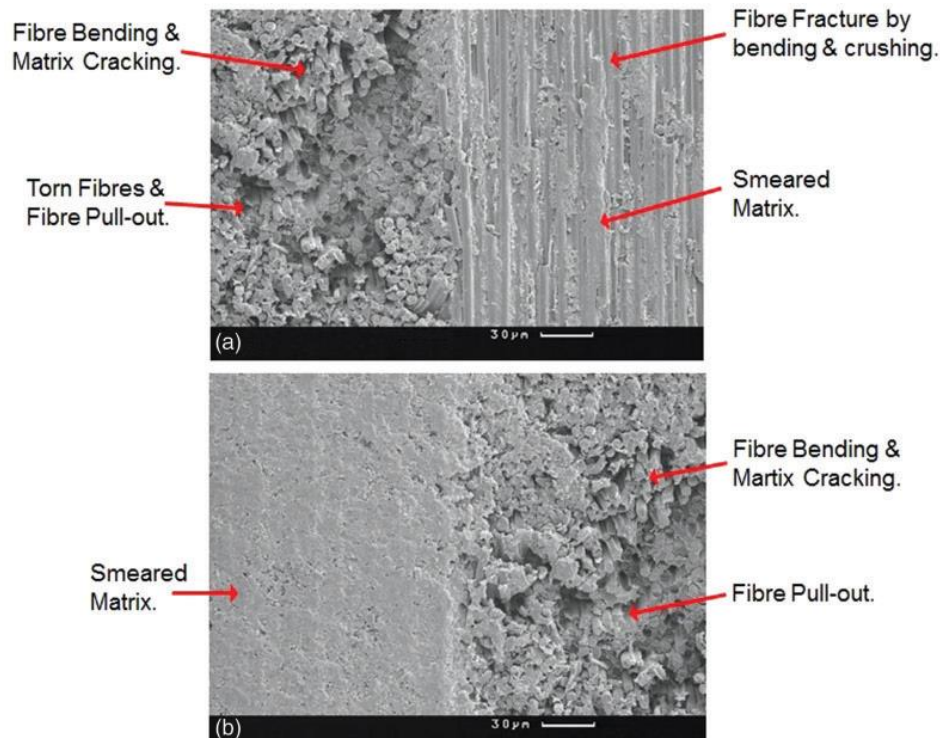
KUVA 39. Kuitujen leikkautuminen irti käytännössä. (Kuva: Duboust ym. 2016, 4)

Kuvassa 40 on esitetty, miltä koneistettu pinta näyttää eriasentoisten kerrosten koneistamisen jälkeen.

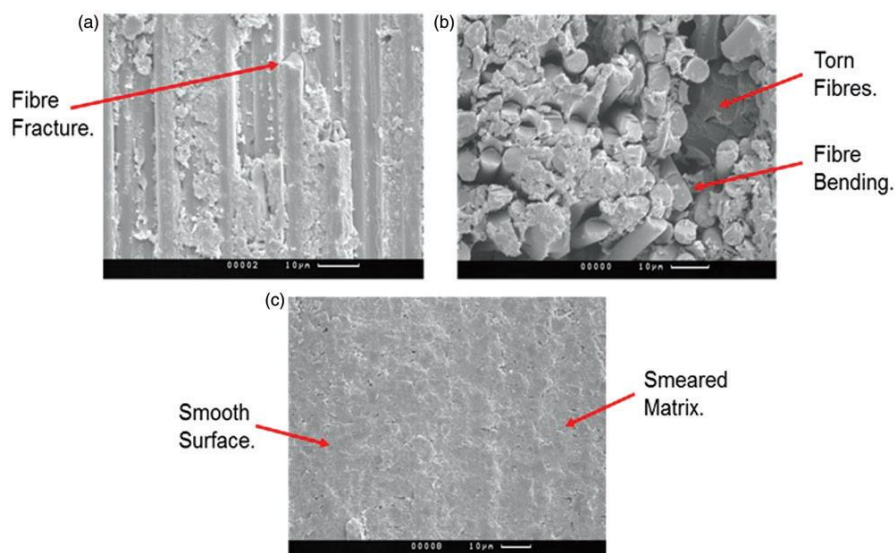


KUVA 40. Pinnanlaatujakauma ja tarkkuusmittaus normaalilla mittakoneella (Kuva: Duboust ym. 2016, 7)

Kuvissa 41 ja 42 on esitetty elektronimikroskoopilla kuvattuja kuiturepeämiä, matriisin halkeamaa ja tahraantumista.



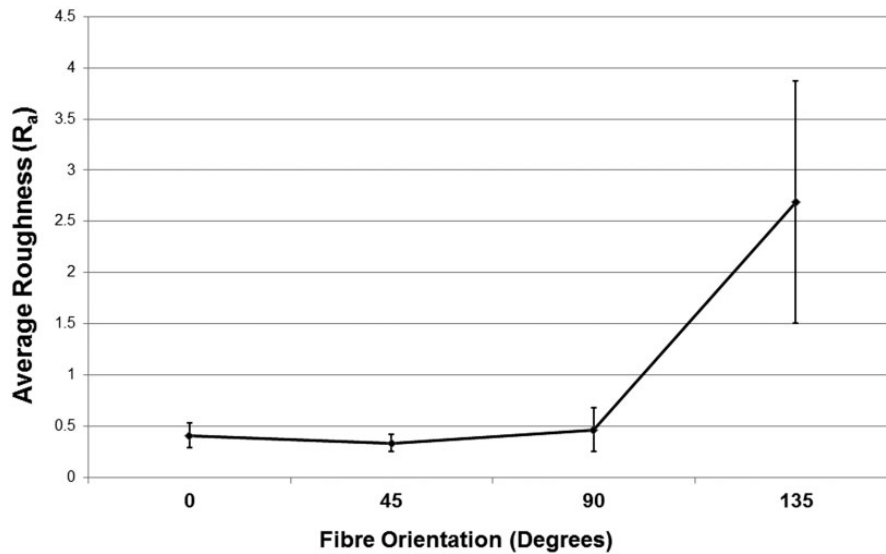
KUVA 41. Koneistettua pintaa kuvattuna elektronimikroskoopilla. Kuvassa ylhäällä vasemmalla 135-asteinen kerros ja oikealla 0-asteinen, ja alhaalla vasemmalla 90-asteinen ja oikealla 135-asteinen kerros (Kuva: Duboust ym. 2016, 12)



KUVA 42. Koneistettua pintaa kuvattuna lähempää elektronimikroskoopilla. Kuvassa a on 0-asteinen, kuvassa b on 135-asteinen ja kuvassa c on 45-asteinen kuitukerros (Kuva: Duboust ym. 2016, 13)

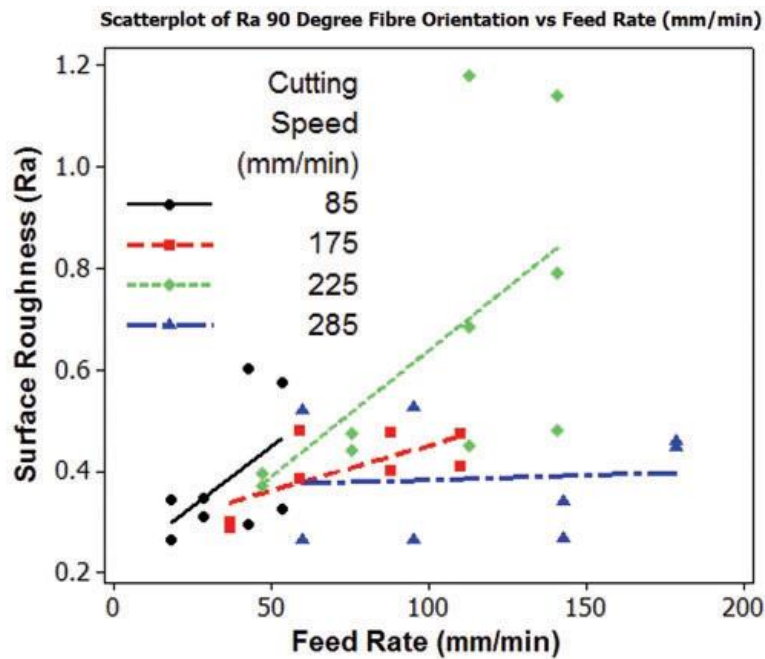
7.1.3 Duboustin ym (2016) artikkelissa saavutetut testitulokset 0-, 45-, 90- ja 135-asteisista koekappaleista

Duboustin ym. (2016) mukaan 135-asteisten kuitukerrosten koneistuksessa merkittävästi karheampaa pintaa kuin muun suuntaisten kuitujen leikkaus (kuvio 3), joka johtuu erilaisesta leikkausmekaniikasta. Mekaniikka aiheuttaa suuria kuoppia ja repii paloja irti laminaatista (Duboust ym. 2016, 13).

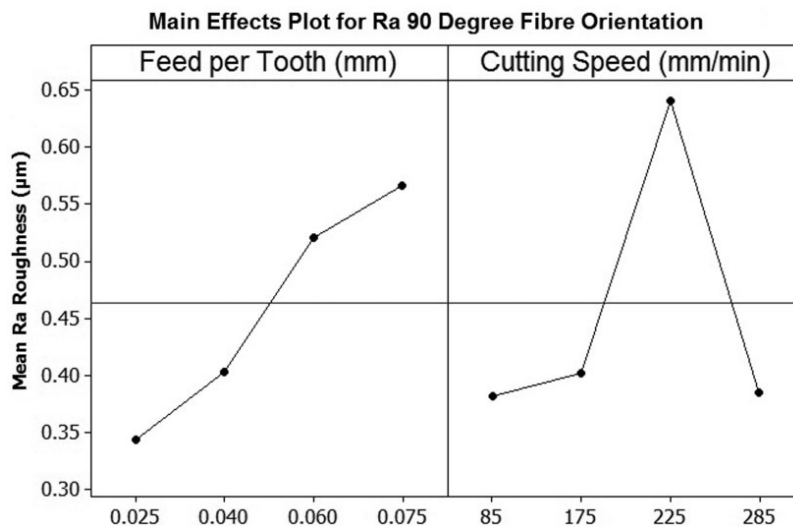


KUVIO 3. Kudoslaminaatin pinnantarkkuus koneistuksen jälkeen, mitattuna optisella mittausmenetelmällä (Kuva: Duboust ym. 2016, 8)

Kuvioista 4 ja 5 voidaan todeta, että syöttönopeuden nosto on aiheuttanut pinnankarheuden kasvamisen.



KUVIO 4. Artikkelin lasketut testitulokset pistekaaviona, pinnankarheus 90 asteen kuiduille verrattuna syöttönopeuteen eri nopeuksilla pyöriville terille (Kuva: Duboust ym. 2016, 8)



KUVIO 5. Pinnankarheus viivakaaviona 90-asteen kuiduille verrattuna syöttöön mitatuilla syöttönopeuksilla (Kuva: Duboust ym. 2016, 9)

Koska kuitukomposiittien koneistus ei tuota jatkuvaa lastua, lastun muotoa ei voi käyttää todisteena tietynlaisesta leikkausmekaniikasta. Lastun paksuus on kuitenkin laskettava, geometrinen funktio, joka syntyy terän geometriasta, syöttö- ja leikkuunopeuksista. Duboust ym. (2016, 9) totesivat, että teoreettinen pieni lastu synnyttäisi tasaisemman pinnan kuin teoreettinen iso lastu.

Havaintona oli, että koneistettu pinnanlaatu korreloi pienevällä lastun paksuudella, joka on syöttö- ja leikkuunopeuksien geometrinen funktio. Tällöin parhaan pinnanlaadun saavuttamiseksi on optimoitava sekä syöttö- että leikkuuarvoja (Duboust ym. 2016, 9).

Artikkelissa mitattiin myös vinouma (skewness) ja huipukkuus (kurtosis), joista vinouma todennettiin hyödyllisimmäksi karheuden indikaattoriksi, sillä se osasi erottaa murtumat ja kolot ulospäin suuntautuneista tai leikkautumattomista kuiduista. Vinoumalla tarkoitetaan pinnankarheuden tapauksessa profiilin huippujen ja kolojen välistä symmetriä keskiarvon välillä, ja huipukkuudella tarkoitetaan huippujen ja kolojen terävyyttä (Duboust ym. 2016, 3). Kuviossa 6 ja taulukossa 7 on havainnollistettu asiaa.

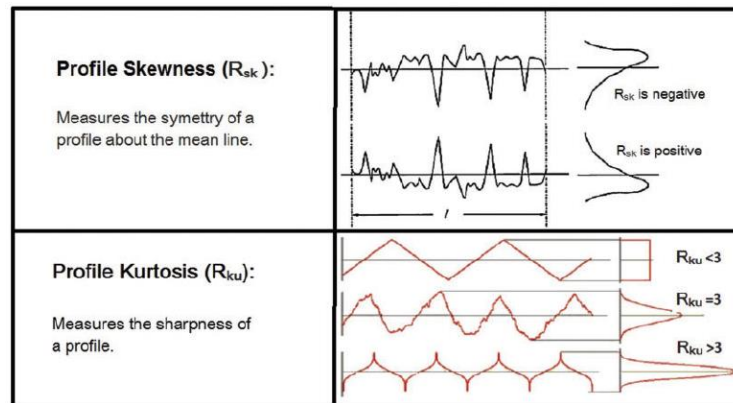


Figure 1. Explanation of Skewness and Kurtosis surface profile parameters. Adapted from Herring et al.¹⁴

KUVIO 6. Vinouma ja huipukkuus havainnollistettuna (Kuva: Duboust ym. 2016, 3)

TAULUKKO 7. Vinouma ja huipukkuus jokaisella koneistetulla kuidun asennolla (Taulukko: Duboust ym. 2016, 11)

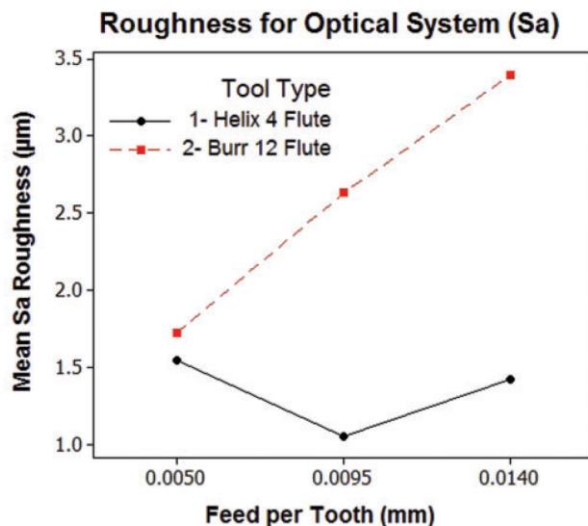
Table 5. Skewness and Kurtosis at each fibre orientation for the Multidirectional laminate.

Fibre orientation (°)	Average Skewness R_{sk}	Average Kurtosis R_{ku}	Multidirectional laminate – mean (R_a (µm))	Multidirectional laminate – mean (R_t (µm))
0	1.55	13.73	0.4	4.7
45	1.68	13.01	0.3	2.9
90	1.48	15	0.5	4.9
135	(-)1.25	9.25	2.7	38.4

Duboustin ym. (2016) tutkimusartikkelissa todettiin S_a -arvon antavan parempia tuloksia kuin R_a -arvo (Duboust ym. 2016, 11). R_a -arvo viittaa pinnankarheuteen yhdellä mitatulla linjalla, ja S_a -arvo mittaa pinnankarheutta tietyllä pinta-alalla.

7.1.4 Työkaluhavainnot

Regressiotarkastelun avulla voitiin todeta, että työkalun tyypillä oli suurin vaikutus pinnankarheuteen, jota seurasi syöttöarvon suuruus. 12-hampaisen viilajyrsimen todettiin jättävän karheampaa pintaa (S_a) verrattuna 4-hampaiseen viistetappiin – tosin 12-hampainen viilajyrsin poisti materiaalia nopeammalla tahdilla (Duboust ym. 2016). Samantapaisesti Haddadin ym. (2014) tutkimusartikkelissa huomattiin, että viilatyypinen jyrsin muodostaa karheamman pinnan verrattuna uurrettuun jyrsimeen, joka johtuu erilaisesta työstömekaniikasta – viilageometrian aiheuttama materiaalin poisto on enemmän hiovaa kuin leikkaavaa materiaalin poistoa. Kuvio 7 selvittää, että viilajyrsimen syöttöarvon noustessa pinnankarheus kasvaa, ja se liittyy lämpötilan nousuun.



KUVIO 7. Syöttöarvon noustessa pinnankarheus kasvaa (Kuva: Duboust ym. 2016, 9)

7.1.5 Optinen mittalaite InfiniteFocusSL

Artikkelissa käytetty Aliconan valmistama laite pystyy mittaamaan sekä profiilin muotoa että pinnankarheutta (kuva 43). Mittaus toimii valolla. Järjestelmä pystyy myös ottamaan kuvia. Valmistajan mukaan järeä rakenne ja valaistus antaa laitteelle puitteet toimia sekä laboratoriossa että tuotantotiloissa. Suurin mahdollinen mitta-alue on 2500 mm² (Alicona 2018). Tampereen teknillisessä yliopistossa on samankaltainen laite käytettävissä, jota käytettiin testikappaleisiin.



KUVA 43. InfiniteFocusSL (Alicona 2018)

Tutkimusartikkelin tuloksissa kerrotaan, että optisen mittausjärjestelmän etu on pinnan-
karheuden mittaaminen tietyltä suoralta, jonka avulla voidaan mitata kokonaista kuitu-
kerrosta. Tuloksista tulee tarkkoja verrattuna normaaliin timanttikärjellä toimivaan pin-
nankarheuden mittalaitteeseen, joka antaa mittaustuloksille liikaa kuitujen asennosta joh-
tuvaa variaatiota asentoa ja suuntaa muuttaessa (Duboust ym. 2016, 3; 6-13).

7.1.6 Artikkelin koneistusarvot verrattuna yrityksessä käytettyihin arvoihin

Yhdensuuntaisista kerroksista koostuvaa laminaattia ja monisuuntaisista kerroksista
koostuvaa laminaattia ja koneistettiin taulukon 8 ja 9 arvoilla. On todettava, että taulu-
kossa on käytetty virheellistä leikkuunopeusarvoa, sillä sen pitäisi olla arvoa m/min. Ar-
tikelista vastaava tutkija on vahvistanut asian sähköpostilla (Kerrigan 2018).

TAULUKKO 8. Koneistusarvot yhdensuuntaisista kerroksista tehdyille laminaattipalalle
(Taulukko: Duboust ym. 2016, 7)

Table 4. Cutting parameters in unidirectional test.

Feed per tooth (mm)	r/min	Fibre orientation	Feed speed (mm/min)		ap (mm)	ae (mm)
			Tool 1	Tool 2		
0.005	4775	0	95.5	286.5	7	Tool 1 – 9.5
0.0095	4775	45	181.4	544.3	7	Tool 2 – 10
0.014	4775	90	267.4	802.1	7	

TAULUKKO 9. Koneistusarvot kudoksetuksista tehdyille laminaattipalalle (Taulukko: Duboust ym. 2016, 5)

Table 2. Parameters used in multidirectional laminate test (32 tests).

Feed per tooth (mm)	Feed (mm/min)	Cutting speed (mm/min)	Axial depth of cut (ap), mm	Width of cut (ae), mm
0.025	17.75	85	4.1	25
0.04	28.41	175	4.1	25
0.06	42.61	225	4.1	25
0.075	53.26	285	4.1	25

Yrityksessä käytettyihin koneistusarvoihin verrattuna syöttönopeudet ovat artikkelissa melko hitaat – yrityksessä on käytetty 1,5 mm syöttönopeutta per teräpala, mutta leikkunopeudet ovat suurnopeustyöstökeskuksen ansiosta korkeammat. Kara on asetettu pyörimään yleensä 12 000 RPM muotoa koneistaessa.

7.2 Yhteenveto artikkelin informaation vaikutuksesta testityöhön

Duboustin ym. (2016) tutkimusartikkelista otettiin huomioon työkalun leikkuutapahtuman käyttäytyminen, uudenlainen mittaustapa, koneistusarvot pintakoneistukselle ja tieto sekä huipukkuuden että vinouman merkityksestä mittaustuloksia analysoitaessa. Kaikki arvot saadaan mitattua TTY:n laboratoriossa, mutta tätä varten vaaditaan pieni pala tarkasti pintakoneistettua CFRP:tä. Suunniteltaessa CFRP-kappaletta oli valittava pieni, noin 60 * 60 mm kokoinen alue, joka sopi elektronimikroskoopille ja InfiniteFocus SL:lle.

7.3 Leikkuu- ja työstönopeudet

Työstönopeudet otettiin uudelleen tarkasteluun ja laskettiin. Forest-Liné on suurnopeustyöstökeskus, jonka kara pyörii nopeimmillaan 24 000 RPM. Eräässä käytössä olevassa koneistusohjelmassa CFRP:n pinnan reunaan viistosti työstettiin muotoa 15 00 RPM:llä ja 2500 mm/min syöttönopeudella. Käyttämällä NS-Toolin jyrstyntöön kaavoja (NS-Tool 2018) saadaan

$$f_z = \frac{v_f}{n \cdot Z}, \quad (1)$$

jossa f_z on syöttö millimetreinä per teräpala, v_f on syöttönopeus millimetreinä minuutissa, n on kierrosnopeus ja Z on työstävien hampaiden lukumäärä. Käyttämällä kaavaa (1) saadaan

$$f_z = \frac{2500 \frac{\text{mm}}{\text{min}}}{15\,000 \text{ RPM} \cdot 2} = 0,0833 \dots \text{ mm}$$

Verratessa syöttöä per teräpala artikkelissa (Duboust ym. 2016, 5) käytettyihin syöttönopeuksiin voidaan todeta, että pienempi syöttö olisi parempi tasaisemman pinnan saavuttamiseksi. Teräpalan syötöstä laskettava syöttömatka saadaan kaavasta:

$$v_f = f_z \cdot n \cdot Z \quad (2)$$

Liian hidas syöttö saattaa kuluttaa PCD-teräpalaa liikaa, joten pienin syöttö 0,025 mm jätettiin käyttämättä, ja käytetään sen sijaan syöttöä 0,04 (kaava 2):

$$v_f = 0,04 \text{ mm} \cdot 15\,000 \cdot 2 = 1200 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$$

Kaavan perusteella päätettiin käyttää pinnankoneistukseen syöttöarvoa $1200 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$. Syöttönopeuden ei pitäisi opinnäytetyön tapauksessa vaikuttaa kovin paljoa, sillä suurin virhearvo tulisi todennäköisemmin käytetystä kamman korkeudesta. Leikkuunopeuksien vaikutusta samalla kamman korkeudella olisi myös hyvä tutkia, mutta se ei ollut tämän työn aikataulun puitteissa mahdollista.

8 FOREST-LINÉ MINUMAC II TH40

8.1 Perusominaisuudet

Forest-Liné (kuva 44; kuva 45) on toinen yrityksen portaalityyppisistä suurnopeustyöstökeskuksista, jonka karan huippunopeus on 24 000 RPM, ja jonka työalue on 6000 * 4000 * 1500 mm. Koneen ohjauksena toimii NUM. Se on alun perin tarkoitettu kevyiden materiaalien, kuten kuitukomposiittien, muovien ja alumiinin koneistukseen. Kone on viisiakselinen, ja siinä on automaattinen työkaluvaihtaja. (Salmi 2018).



KUVA 44. Forest-Liné. Kara oli kuvanottohetkellä X-akselin alkupäässä. Kara ja Z-akseli on sininen pylväsrakenne



KUVA 45. Forest-Liné toisesta kuvakulmasta

Forest-Linélle on ilmennyt tiettyjä ikääntymisongelmia, kuten esimerkiksi hydraulipumpun kulumista ja geonmetrisen tarkkuuden heikentymistä. Käyttötunteihinsa nähden Forest-Liné on kuitenkin toiminut hyvin, ja koneongelmia ei ole ollut paljoa (Salmi 2018).

8.2 Tarkkuus

Koneen volumetrinen tarkkuus on $\pm 0,25$ mm. Kone on rakenteeltaan perinteinen, eli koneessa on vielä kuularuuvikäyttö nykyaikaisien lineaarimoottorien sijaan. Tämä tekee koneesta nykyaikaisempiin verrattuna hitaamman, mutta volumetriseen tarkkuuteen se ei vaikuta. Koneen uusimista on harkittu, mutta kone on edelleen geometrisesti tarkka, ja uudemmilla sähköteknisillä komponenteilla ei todennäköisesti päästäisi parempiin tarkkuuksiin. (Salmi 2018). Kone on törmännyt muutaman kerran, ja tarkoissa kalibrointimitauksissa on huomattu tiettyjä akselivirheitä.

Suuria tapahtumia, joissa tarkkuus tippuisi äkisti jostain syystä, ei ole. Yleensä tämän tapahtuessa kone ei suostu edes toimimaan. Yksi tällainen tapahtuma kävi, kun paineilmalinjasta pääsi öljyä ylipaineistetuille mittasauvoille. Mittasauvoilta päätettiin poistaa ylipaineistus. Mittasauvat alun perin ylipaineistettiin pölyä vastaan, mutta poiston jälkeen pöly ei ole mittasauvoille löytänyt (Salmi 2018).

Lämpötilalla on suurin vaikutus työstökeskuksen koneistustarkkuuteen. Vaikka yrityksen tuotantotilat ovat ilmastoituja tietyille lämpötilan tavoitetasolle, kontrolli ei riitä takaamaan tasaista lämpötilaa teräksisille työstökeskuksen akseleille. Lämpötila voi heittää jo asteen per metri, kun nousee lattiatasolta ylöspäin. Tämän lisäksi lämpötila voi heittää myös saman korkeuden sivusuunnissa, eli X-akseleita ollessa kaksi ne voivat olla eri lämpötiloissa, jolloin ne muodostavat suorakulmion sijasta puolisuunnikkaan. Lämpötila voi vaikuttaa jopa $\pm 0,2$ mm työstötarkkuuteen. Lämpötilaa voi kompensoida tietyillä toiminoilla, jolloin mittatarkkuuden heitoista päästään pitkälti eroon, ja jolloin voidaan päästä jopa 0,1 mm tarkkuuteen (Salmi 2018).

Lämpötilaa on vaikea kompensoida koneistuskeskuksen komponenttien koon kannalta. Akselin ollessa kuusi metriä pitkä, ja eri lämpötilassa päiden välillä, kompensoinnista tulee vaikeaa. Kompensoinnin apuna on käytetty teräslaattaa, jonka mitat tiedetään tarkasti. Teräslaatan ollessa tarpeeksi massiivinen se antaa hyvän kuvan koneen senhetkistä toleransseista. Lattaa käytetään silloin, kun siihen on tarve, esimerkiksi sellaisissa töissä, joiden toleranssivaatimus on ollut yhden akselin suunnassa, kolmen metrin matkalla 0,2 mm (Salmi 2018).

8.3 Vastaavien koneistuskeskusten toiminnallinen tarkkuus ja kompensointi muualla teollisuudessa

Teollisuudessa ollaan tietoisia ilmailualan vaativista tarkkuuksista ja koneistuskeskusten mittatarkkuuksista. Tarkkuuden parantamista ei saavuteta CNC-komennoilla. Toistettavuus on tunnistettu isoimmaksi tarkkuusongelmaksi radoissa, ja sitä edistetään kompensoinnalla pistejakoa esim. lasermittauksilla (Schultz 2012). Toistettavuudella tarkoitetaan karan liikkumista ja akseleiden pyörimistä tasan niihin pisteisiin, missä aiemmin olivat.

Isoissa työstökoneissa ongelmana on myös erilaisten kompensatioiden kasautuminen suoruudessa, akseleiden riippumisissa ja muissa tekijöissä. Yhtenä vaihtoehtona on ollut mitata tarkasti jokin virhe, ja käyttää tätä kokonaiskompensaatina. Tämän kompensatioluvun ei kuitenkaan saa sisältää lämpötilan muutoksia, joka on oma kompensationsa. Tärkeintä olisi kuitenkin normalisoida koneistusalue ennen kuin aloitetaan kompensointien ja niiden kertoimien laskenta (Schultz 2012).

Toimiviksi kompensatiojärjestelmiksi on ilmoitettu API Active Target-järjestelmä, Etalon Trac.Cal-järjestelmä ja Fanuc 3DEC. Kehittyneitä kompensatiojärjestelmiä ei kuitenkaan saisi heti asentaa ja pitää itsestäänselvinä, sillä uudet koneet sisäänajautuvat, vanhat kuluvat ja jokainen törmäys voi muuttaa merkittävästi liikeratoja (Schultz 2012).

9 HAASTATTELU

Opinnäytetyön paksuuskoneistusta varten tuli ottaa huomioon Forest-Liné-koneistuskeskuksen käyttäytyminen koneistuksessa. Koneistuskeskuksen tiedetään olevan volumetrisesti 0,25 mm tarkka koko koneistusalueeltaan. Tällöin olisi hyvä päästä ainakin alle tämän tarkkuuden osan paksuutta koneistaessa.

Mika Salmea haastateltiin Forest-Linén tarkkuuteen vaikuttavien tekijöiden osalta. Mika Salmea haastateltiin, koska hänellä oli käytännön kokemusta Forest-Linén toiminnasta ja suurten työstökeskusten toiminnasta ja toimialan kehityksestä yleisesti.

Haastattelun johtopäätöksinä todettiin, että varmuuden vuoksi koneistettavaa osaa pyritään koneistamaan muulloin, kuin ensimmäisenä työnä aamuvuorossa viikonlopun jälkeen tai koneen ollessa käyttämättömänä liian kauaa, jotta mahdollinen lämpötiloista aiheutuva muotovirhe saatiin korjattua. Työntekijöiltä kysellyn lisäselvityksen mukaan koneistajat pystyvät asettamaan koneistettavan suorakulmaisen kappaleen, tässä tapauksessa koneistuskiinnittimen, alle 0,02 mm virheellä Forest-Linén akseleihin nähden suoraan kulmaan. Tämän pitäisi riittää kappaleen koneistamiselle. Koneistusratojen ollessa maksimissaan noin 1,4 metriä pitkiä suuria virheitä koneistetussa paksuudessa ei pitäisi tulla, mikäli akselien päiden välillä tarkkuus on alle volumetrisen tarkkuuden, 0,25 millimetriä.

10 PAKSUUDEN KONEISTUS CAD-MALLIN POHJALTA

Koneistettu paksuus ja muoto eivät riipu merkittävästi käytetystä terästä ja työstönopeuksista. Muotoa koneistaessa on otettava huomioon suunnitteluohjelmistojen tapa laskea pintoja ja koneistusratoja, työstökeskuksen oma toleranssialue, työstökeskuksen mittaama terän pituusvirhe ja koneistettavassa osassa vallitsevat sisäiset, mahdollisesti purkautuvat jännitykset.

10.1 Tarkkuuskuormitetun muodon kriteerit

Työssä haluttiin mahdollisimman suurta, koneen geometriasta johtuvaa virhettä koneistettuun muotoon, joka tarkoittaa kaikkien Forest-Linén akseleiden käyttöä samalla koneistusradalla mahdollisimman paljon. Koneistettu muoto paksuuden mittausta varten olisi hyvä silloin, kun se haastaa koneen liikkeitä. Kaksoiskaareva pinta kallistetulla terällä toteuttaisi tämän vaatimuksen. Vaatimus saataisiin myös kääntämällä koneistettavaa tasoa muutamalla asteella ja koneistamalla kallistetulla terällä. Oli hyvä miettiä myös mahdollisimman pitkiä koneistusetäisyyksiä, eri ajoille ositettua koneistusta ja useaa koneistusvaihetta. Koneistettavan aihion olisi kuitenkin olla sellaisen kokoinen ja mallinen, jollaisen voisi asentaa lentokoneen runkoon.

Paksuuskoneistuksen mittaustuloksia suunniteltiin verrata koneistuskeskuksen volumetriseen tarkkuuteen, joka on $\pm 0,25$ mm koko koneistusalueelta (x 4000, y 6000, z 1500). Hypoteesina oli, että mikäli paksuus poikkeaa liikaa toleranssista $\pm 0,25$ mm, olisi syytä tarkastella, oliko koneistustapahtuma asetettu tarpeeksi tarkasti vai onko itse kone epätarkka.

10.2 Koneistettavan kappaleen valinta

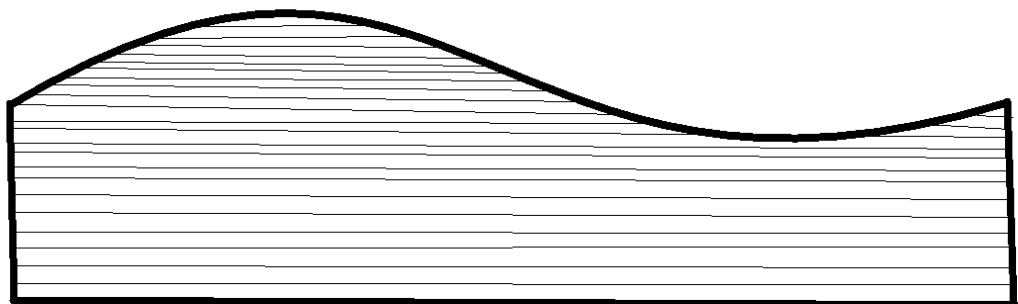
Paksuuden koneistukseen suunniteltiin neljä vaihtoehtoa. Ensimmäinen vaihtoehto olisi ollut kaarevan pinnan tekeminen yksisuuntaisesta laminaatista, jota koneistettaisiin (kuva 46). Tätä kuitupintaa olisi saatu kerros kerrokselta koneistettua, ja oltaisiin saatu kaikki koneistuskeskuksen viisi akselia käyttöön. Huonoja puolia ideassa olivat mm. se tosiasia,

että kappale ei kuvannut oikeaa lentokoneenosaa. Yrityksellä ei myöskään ollut vastaavanmuotoisille kappaleille käytössä olevia autoklaavimuotteja.



KUVA 46. Havainnollistava mallinnus koneistettavasta kappaleesta

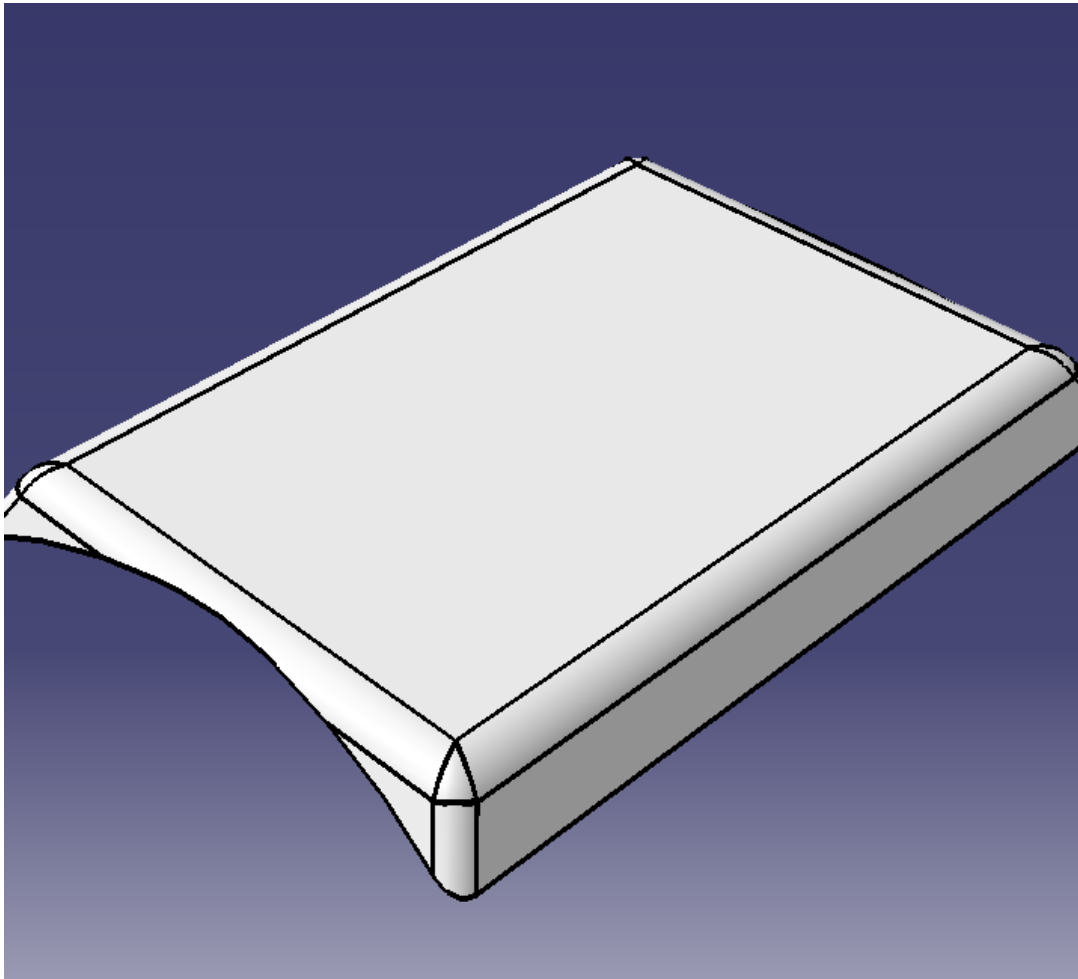
Toinen vaihtoehto olisi ollut laminoida kerroksia mielivaltaiselta määrältä neliömäiseen, laajaan muottiin, ja koneistaa tästä jotain muotoa (kuva 47). Koska koneistettaisiin muotoa kerrosten välille, tapa huonontaisi pinnanlaatua ja oli enemmän tehtävänannon vastainen, mutta vaihtoehtona se olisi ollut halvin ja työssä vähiten intensiivinen suunnitella.



KUVA 47. Kuvankäsittelyohjelmalla piirretty luonnos toisesta vaihtoehdosta

Toista vaihtoehtoa kehitettiin eteenpäin. Kehittäessä todettiin, että olisi voitu hyödyntää valmista työpöytä ja muottia, jota käytetään tietyn täytepalan valmistamiseen (kuva 48). Osassa on kaksoiskaarevia muotoja ja pinnan koneistusta. Kappale olisi ollut myös hyvin

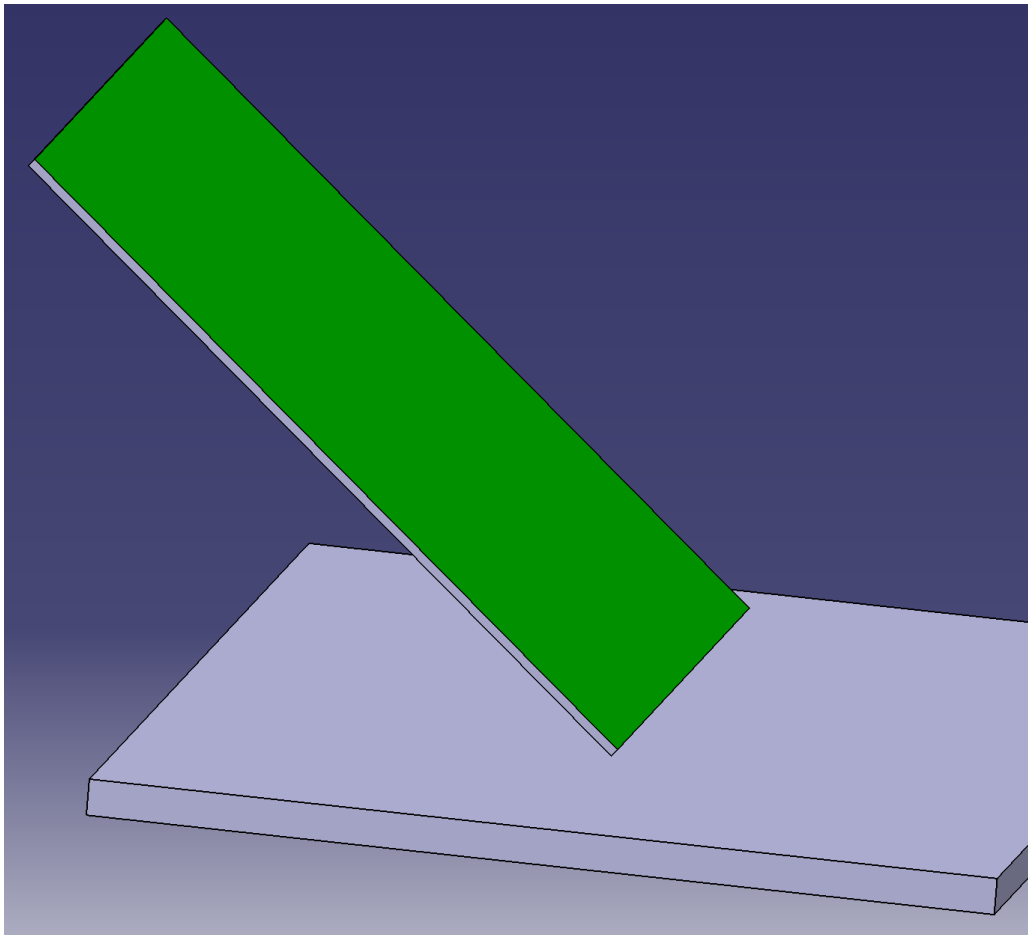
kompakti, jolloin sitä oli helppo kuljetuttaa mitattavaksi, mikäli yrityksen oma mittaus-
tekniikka ei olisi riittänyt. Huono puoli kappaleessa oli sen koko, joka ei kuormittanut X-
ja Y-akseleita tarpeeksi.



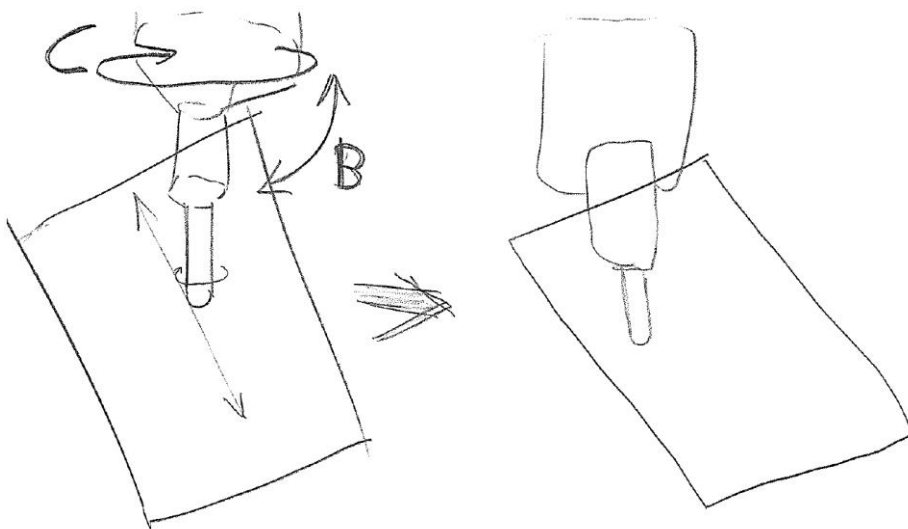
KUVA 48. Eteenpäin sovellettu vaihtoehto toisesta kappaleesta

Kolmas vaihtoehto olisi ollut osan muodon lainaaminen jostain asiakashankkeesta, johon on joskus ajateltu koneistaa tiettyjä muotoja, jotka kuitenkin alettiin toteuttaa toisella tavalla, esim. shimmialuetta. Hyvä esimerkki tähän olisi ollut Airbusin spoileri, jolle on yläpuolen rakenneosalle valmistettu muotti ja koneistuskiinnitin. Valitettavasti koneistuskiinnittimen ja muotin käyttö on tarkkaan sovittua ja ”roskakappaleita” ei ollut saatavilla.

Neljäs vaihtoehto olisi ollut tehdä suora levy kuten vaihtoehdossa 2, mutta tällä kertaa kääntää levyä (kuva 49). Kaikkia koneistuskeskuksen viittä akselia olisi saatu käytettyä ajamalla levyä kallistetulla jyrsimellä ja ajamalla kaarevia ratoja (kuva 50).



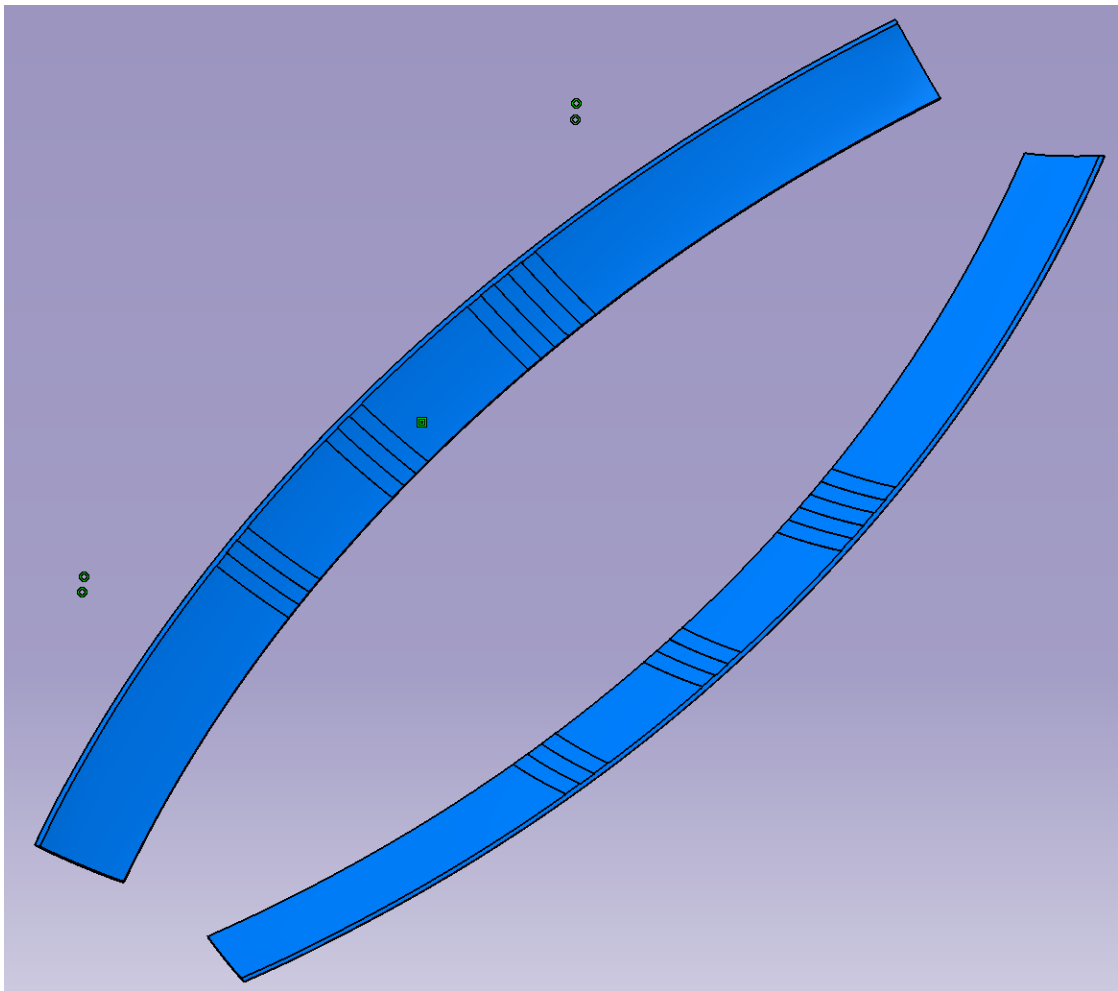
KUVA 49. Havainnollistava mallinnus koneistettavasta kappaleesta vaihtoehdon 4 tapauksessa



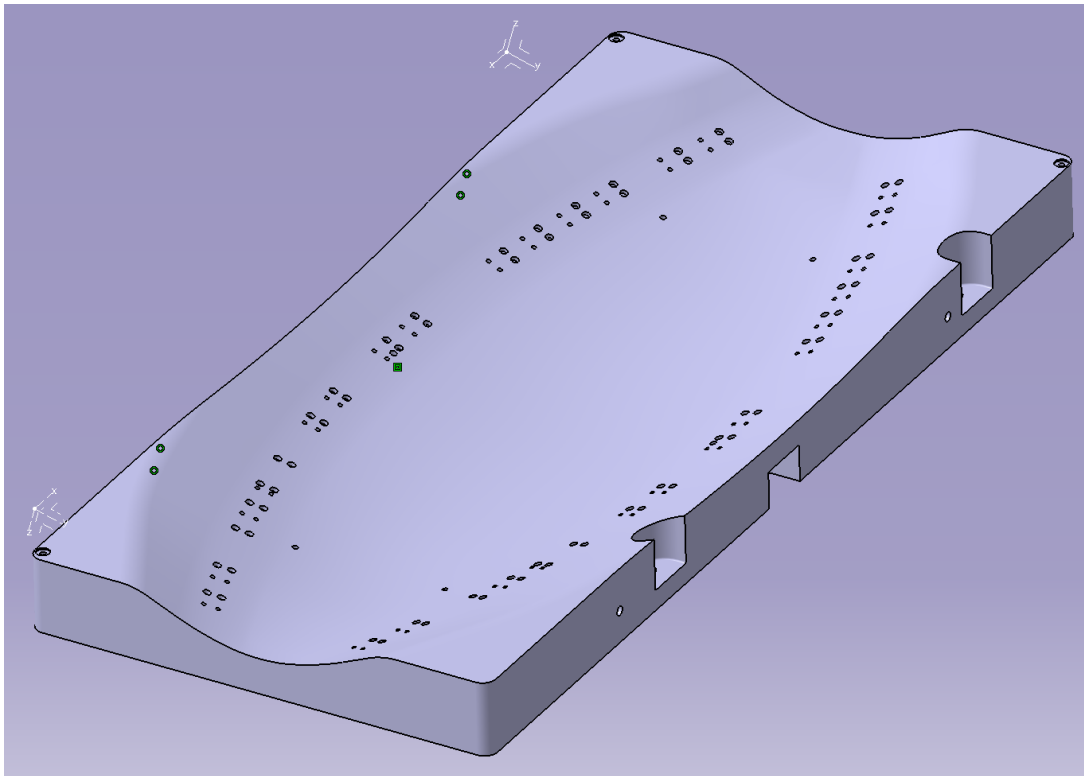
KUVA 50. Havainnollistava kuva viiden akselin samanaikaisesta käytöstä. Päästäkseen kallistettuun kulmaan koneen tarvitsee kääntää vain B-akselia, mutta mikäli terä kaartaisi vähääkään mihinkään suuntaan, on koneen muutettava kallistuskulman suuntaa, ja C-akselia täten käännettävä

Lopullinen vaihtoehto oli ottaa käyttöön erään hankkeen rakenneosaa (kuva 51). Osa oli pitkä ja kaksoiskaareva. Osa ei ollut kaarevuudeltaan liian syvä verrattuna esim. suoraan levyyn, joten sille saatiin koneistettua oma kiinnitin, ja hankkeeseen kuuluvaa koneistuskiinnintä ei tarvinnut käyttää (kuva 52). Osa vastaa myös hieman kolmannen vaihtoehdon perusideaa, vaikkei valitulle osalle kuuluisi tehdä paksuuskoneistusta.

Koneistuskiinnittimen päätettiin koneistaa 100 mm:n paksuisesta Necuron-polyuretaanista. Necumerin Necuron-merkkinen polyuretaani on todettu hyväksi yleisen koneistuskiinnittimen materiaaliksi lentokoneenosia ja niiden prototyyppejä valmistaessa. Osan alkuperäisen koneistuskiinnittimen CAD-mallista saatiin geometria, jota käytettiin Necuron-kiinnittimen mallintamisessa.



KUVA 51. Alkuperäinen osa (vas.) ja sen peilikuva



KUVA 52. Koneistuskiinnitin alkuperäiselle osalle, josta saatiin geometria.

Osan paksuuden ollessa 4 mm päätettiin olla mittaamatta tuotetta yrityksen LaserTrackerilla. Paksuutta päätettiin koneistaa tuotteen reunoihin pitkittäisillä ja poikittaisilla koneistusradoilla, ja koneistetun alueen paksuudet suhteessa pohjaan päätettiin mitata mikrometrillä.

10.3 Koneistetun kiinnittimen mittaus koneistuskeskuksessa

Laser Trackeria päätettiin käyttää mittaamaan koneistuskiinnittimen muotoa heti koneistuksen jälkeen, jos se oli mahdollista. Forest-Linella on myös muotoa mittaava mittapää, mutta muotoon koneistettua tuotetta ei periaatteessa koskaan saisi mitata koneistuskeskuksen omalla mittausohjelmalla. Virheliikkeet mittauksen aikana peittäisivät vastaavat koneistuksessa syntyneet virheet. Muodon mittauksen ja Laser Trackerin mittauksen eroja olisi voitu vertailla, mutta se olisi ollut työlästä työn aikatauluun nähden. Riskinä Laser Trackerin mittaukselle oli mahdollinen pöly ja aikataulupaineet, sillä mittaaminen ei tapahdu nopeasti.

11 TYÖN TOTEUTUS

Opinnäytetyötä tehdessä työstön ja mittauksen suunnitteluun kului aikaa noin kaksi kuukautta siitä hetkestä, jolloin tiedettiin koneistettava työkappale. Tämä osio avaa suunnitteluprosessia, jonka mukaan kappaleen koneistusta ja tuentaa mietittiin. Oli ilmeistä, että osasta ei tulisi juuri suunnitellun paksuista kappaletta, joka johtuisi erityisesti koneistuskiinnittimen aiheuttamasta virheestä. Täten oli olennaista verrata koneistettua kappaletta CAD-malliin ja paksuuden lisäksi tutkia, miten hyvin koneistettu paksuus seuraa muotoaan.

11.1 Koneistuksen suunnittelu

Koneistuksen suunnittelu sisälsi koneistettavan alueen päättämisen ja mallintamisen, koneistuskiinnittimen asetussuunnittelun, asetuksesta aiheutuvan virheen minimoinnin, työkalujen valinnan ja koneistusratojen ohjelmoinnin. Koneistusta oli haasteellista suunnitella, sillä valmista tuotetta ei ollut, ja suunnittelukriteerit piti päätellä itse.

11.1.1 Testiosa

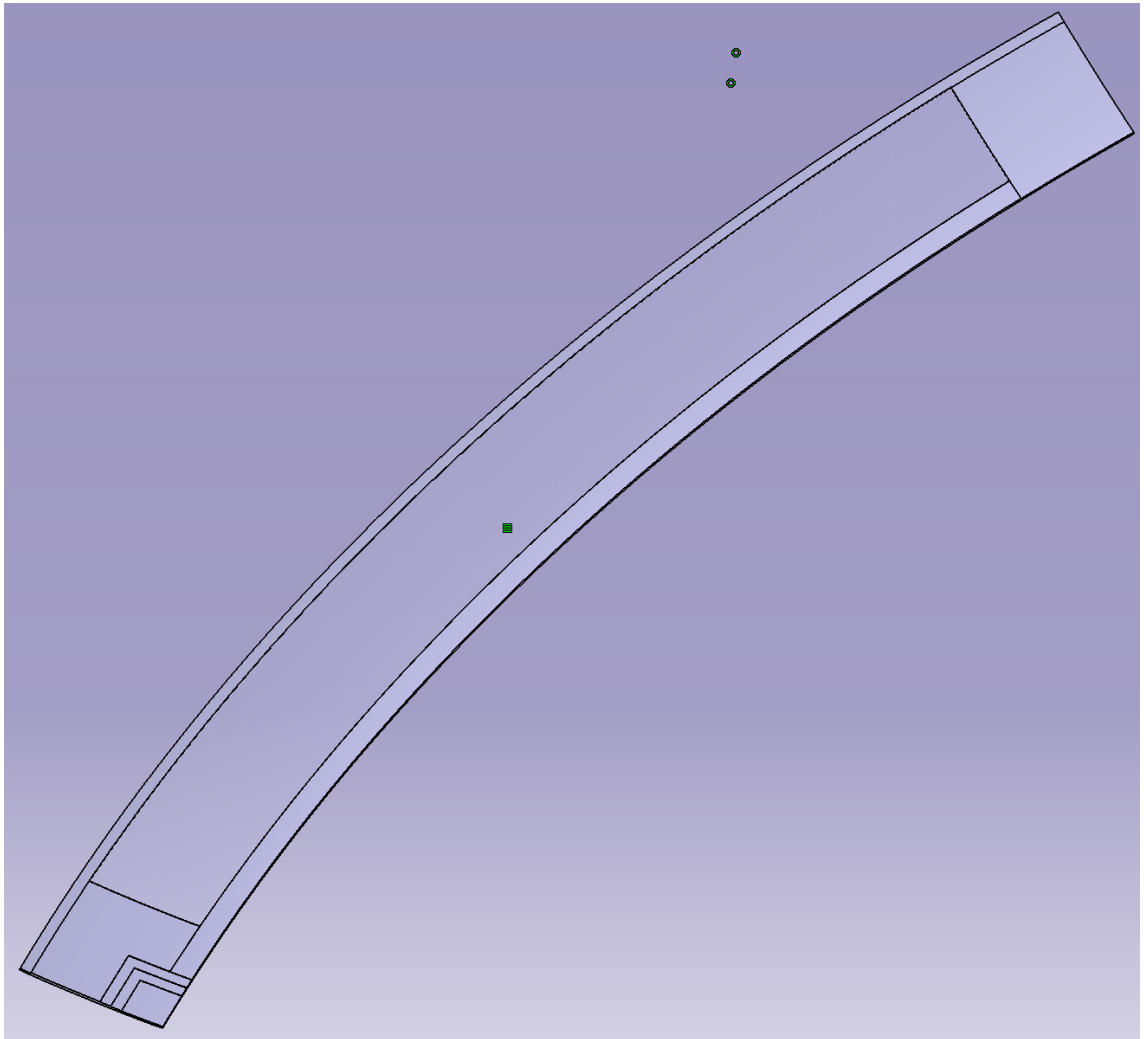
Testiosan malli muodostui suunnittelukriteerien avulla. Ensimmäinen näistä oli pienen näytepalan suunnittelu ja sijainti.

Palan tuli olla noin 60 * 60 mm -kokoinen, jotta sitä olisi helppo mitata. Näytepalasta haluttiin ainakin yhdeltä määrättyltä alueelta mahdollisimman sileä. Näytepalaan haluttiin myös vaihtelevaa pinnankarheutta, joka onnistui koneistettua poimukorkeutta vaihtelemalla CATIA:ssa. Lopputuloksena päätettiin mallintaa toiseen päätyyn alue, jossa oli erikorkuisia portaita. Alue suunniteltiin trimmattavaksi pois koneistuksen päätyttyä.

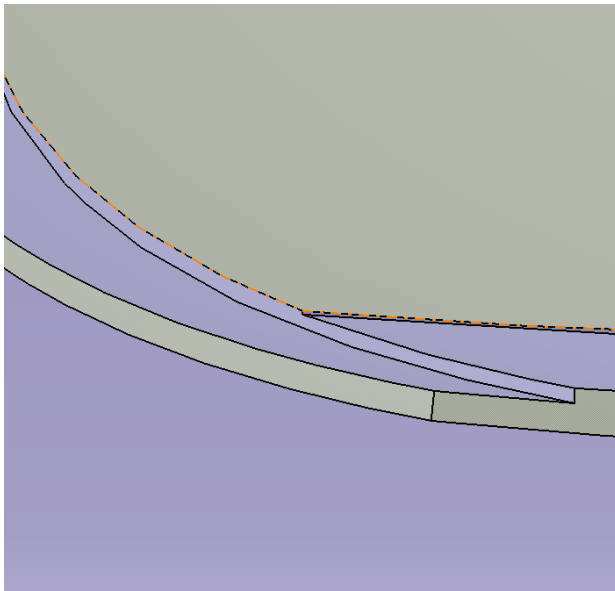
Toinen kriteeri oli koneistettavan paksuusmittausalueen mallintaminen ja koneistussuunnitteen päättäminen. Koska Forest-Linén tarkkuus $\pm 0,25$ mm käsitti koko koneistusalueen, paksuusvaihtelua yhdellä alueella ei pitäisi syntyä kovinkaan paljoa. Ensimmäinen arvaus oli paksuusvaihtelun osan alueella olevan alle 0,2 mm. Tämä syntyisi pääosin koneistuskiinnittimen, koneistetun imukanavan, imuasetuksen ja terän yli- tai alijäämäisen

pitäen vaikutuksesta. Mikäli suurempaa paksuusvaihtelua syntyy, voidaan mittaustulosten perusteella tehdä johtopäätöksiä Forest-Linén uusimisesta ja muista koneistusin-vestointien tarpeista.

Suunnittelun lopputuloksena päädyttiin kuvan (53) mukaiseen kappaleeseen. Kappaleeseen mallinnettiin offset-toiminnolla syvyyksiä reunoihin 0,3–1,3 mm vaihtelulla (kuva 54)



KUVA 53. Koneistettava työkappale. Vasemmalla alhaalla näkyvä porraste geometria trimmattaisiin irti ja lähetetään TTY:lle mitattavaksi



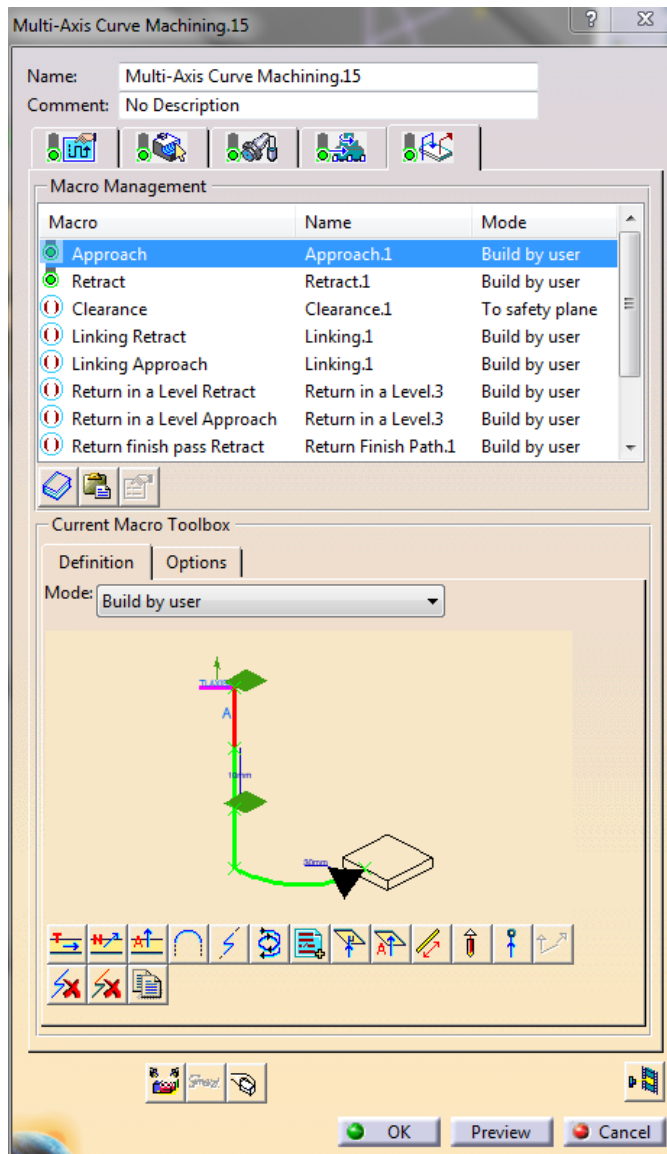
KUVA 54. Sivuprofiilista näkyvää syvennystä. Koneistusradat koneistavat syvennyksen pintaa

Osa ei ollut paras mahdollinen työkappale. Osa oli ohut, jolloin se oli alttiina jännityksien purkautumiselle, mikä olisi saattanut aiheuttaa ei-toivottuja muodonmuutoksia. Myös saatavilla ollut CAD-malli ei ollut todellisuudessa yhtä paksu. Oli myös epäselvää, miten tasaisesti 4 mm ohut osa kiinnittyisi imussa koneistuskiinnittimeen, vaikka osa olikin hyvin jäykkä.

Osan muoto oli silti prosessille juuri sopiva, ja kaarevuuden vähäisyyden ansiosta 100 mm paksu Necuron-levy sopi koneistuskiinnittimeksi. Akseleiden tarkkuutta suunniteltiin kuormitettavaksi työstämällä yksisuuntaisesti ja suoristamalla kara jokaisen työstöradan päätteeksi. Mallin paksuusvirheet minimoitiin mittaamalla koneistetun pinnan ja pohjan välistä etäisyyttä, jonka pitäisi myös olla muotin pohjan ja koneistetun pinnan välinen etäisyys. Oikean osan paksuus vaihtelee päiden välillä 3–4 mm. Osa koostuu sekä lyhyistä että kokomittaisista kuitukerroksista. Kerrosten ero saattaa näkyä koneistuksen jälkeen, ja se saattaa vaikuttaa pinnanlaadun mittaukseen.

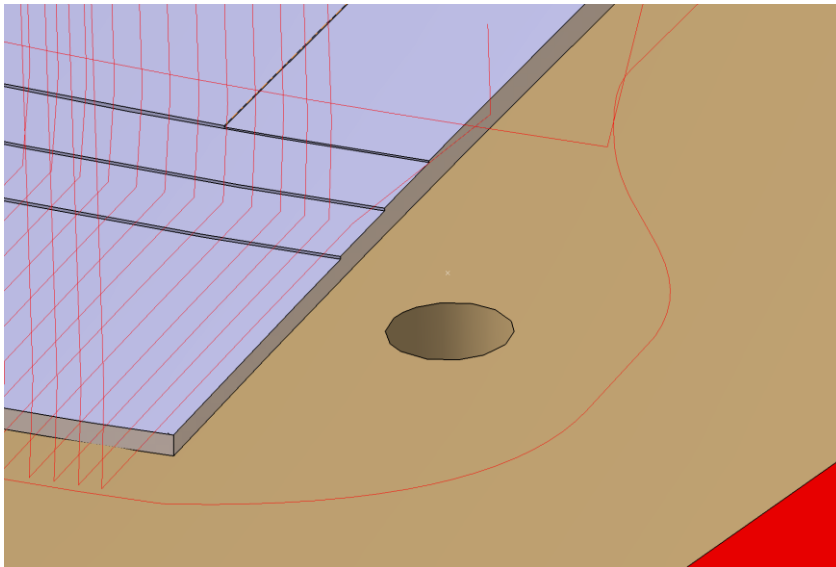
Ohjelmoitaessa osan koneistusta oli muistettava, että työkaluilla ei saanut käyttää poraavia liikkeitä, jolloin aihion mukaiset lähestymiset ja poistumiset täytyi toteuttaa erikseen macro-komentoina ohjelmistossa (kuva 55). Tämän lisäksi päätettiin toteuttaa koneistus yksisuuntaisina ratoina, jotta radan saapuessaan toisesta päästä toiseen koneen karan ak-

selisto voitiin pyöräyttää nolla-asentoon. Tämä tarkoitti pikaliikkeiden huolellista hallinnointia. Samalla piti varoa, että työkalu ei osuisi aihioon tai lattiatasoon karan B- ja C-akseleiden kääntyessä.



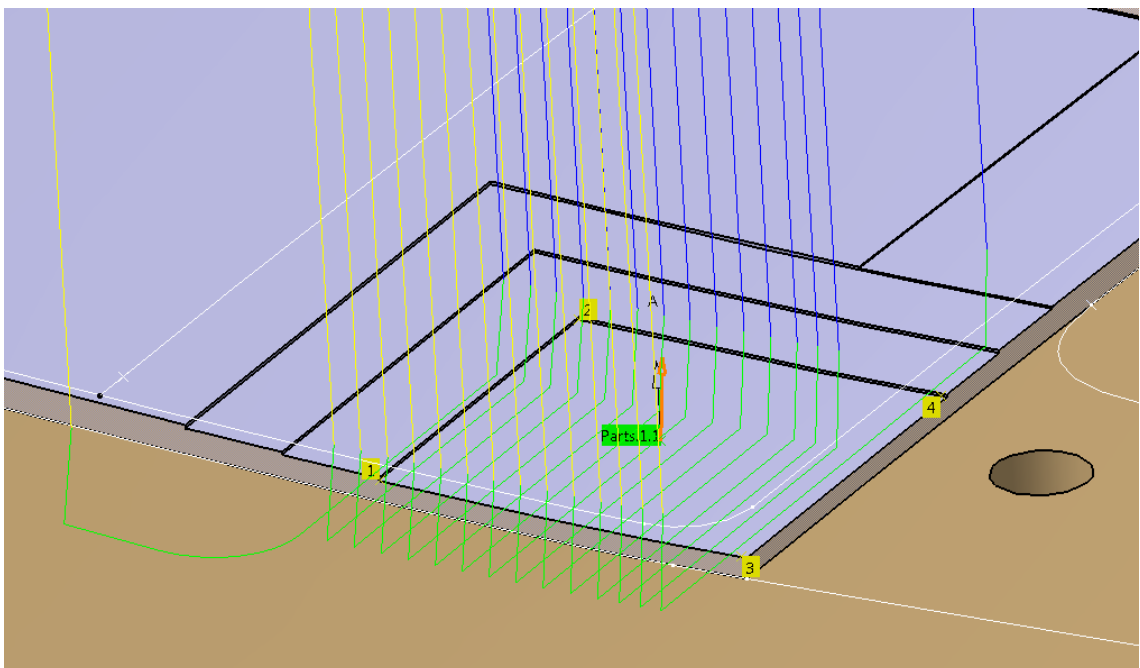
KUVA 55. Esimerkki käytetystä macro-komennosta

Koneistusradan jysintäosio ohjelmoitiin leikkaamaan aihiota paikoitusreikien ympäriltä (kuva 56), jotta paikoitusholkit antaisivat lisätukea työstettävälle kappaleelle. Tästä syntyvät pienet läpät trimmaataan käsin pois koneistuksen jälkeen.



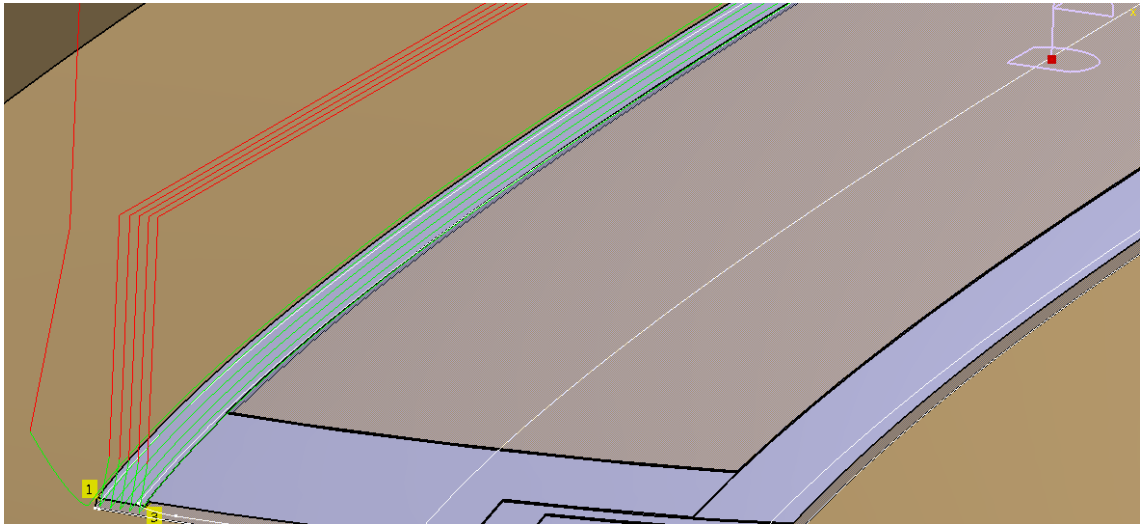
KUVA 56. Koneistettavan alueen työkalurataa, jossa näkyy lähestymisen rata. Työkalun keskipiste seuraa punaista viivaa.

Mitattavan porraspalan pinnan koneistus suunniteltiin mahdollisimman tarkaksi siten, että palaa koneistettaisiin kerros kerrokselta vaihtelevalla kamman korkeudella (kuva 57). Alimmalle kerrokselle asetettiin poimukorkeudeksi 0,005 mm. Pienemmän poimukorkeuden koneistus olisi kestänyt liian kauan.



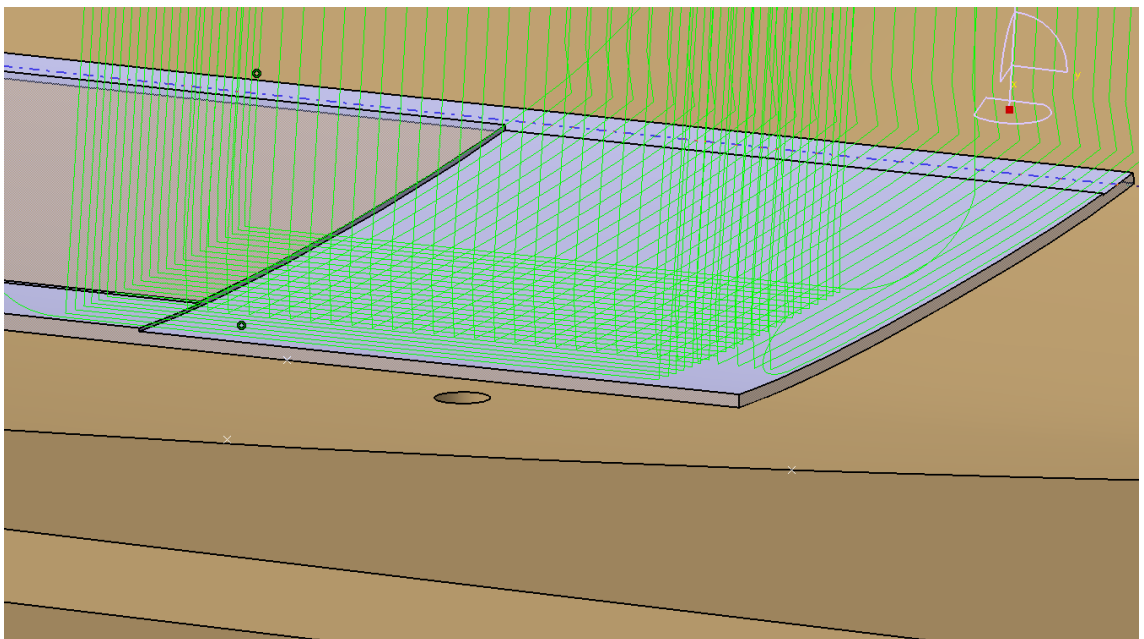
KUVA 57. Porrasmuodostelma, viimeinen koneistusrata

Pitkien sivujen koneistussuunnat suunniteltiin käytännön helppouden vuoksi pitkille sivuille pitkittäisiksi ja porraskorkeuden leveälle alueelle pitkittäiseksi (kuva 58).



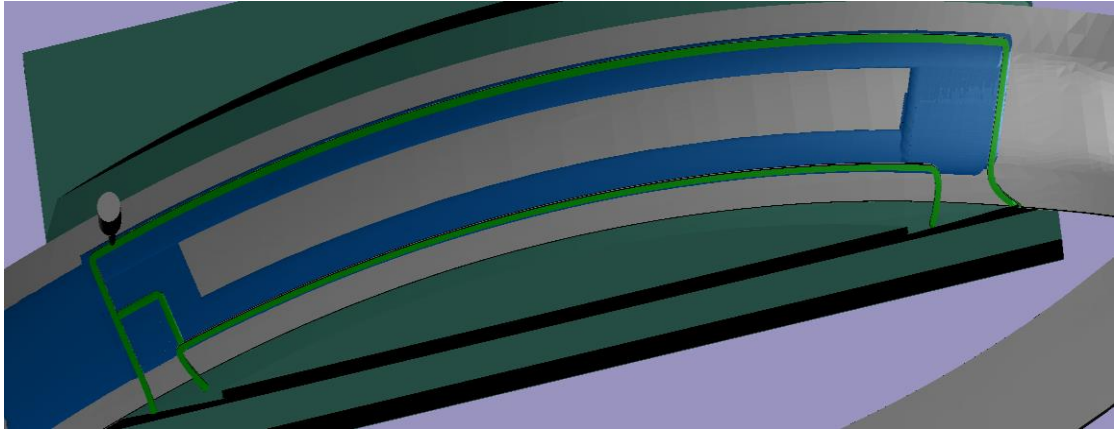
KUVA 58. Pitkän sivun koneistusrata. Punaiset radat ovat pikaliikkeitä

Osan porraskuolelta katsottuna päinvastaisen pään alueelle suunniteltiin poikittaisen työstöradan lisäksi päällekkäinen, pitkittäinen työstörata alueen puoleenväliin asti (kuva 59). Tarkoituksena oli nähdä ja mitata, miten viimeistelty pinta eroaa muusta pinnasta.



KUVA 59. Pitkittäinen ja poikittainen koneistusrata. Ratojen risteys toimii viimeistelypintana

Koneistus simuloitiin CATIAssa (kuva 60). Simulointi ei suoraan vastaa syntyvää kappaletta, mutta se antaa koneistuksen lopputuloksesta hyvän kuvan.

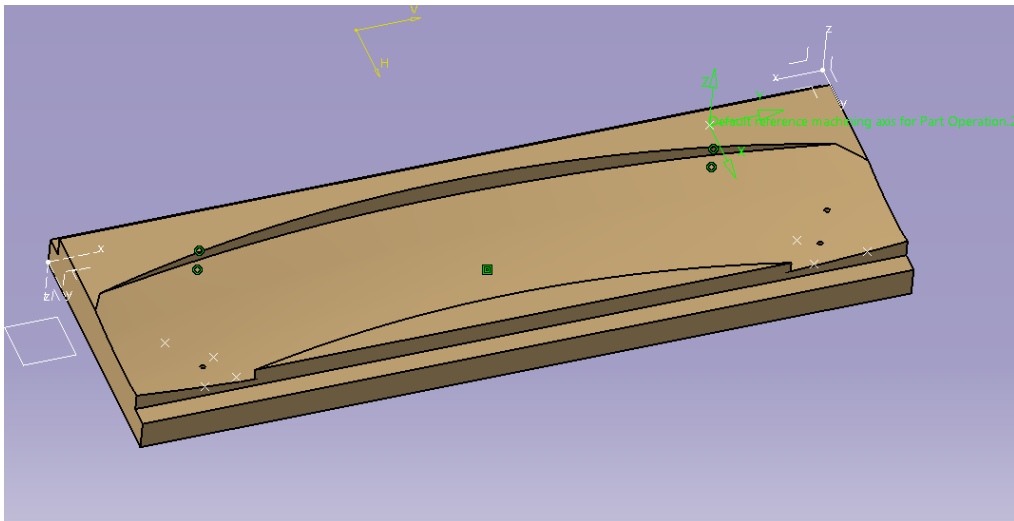


KUVA 60. Simuloinnin lopputulos. Sininen väri kuvaa koneistettua pintaa

11.1.2 Koneistuskiinnitin

Koneistuskiinnitintä päätettiin koneistaa kahdessa osassa, koska koneistuskiinnitin voitiin koneistettavilla paikoitusrei'illä asentaa tarkasti Forest-Linén lattialle.

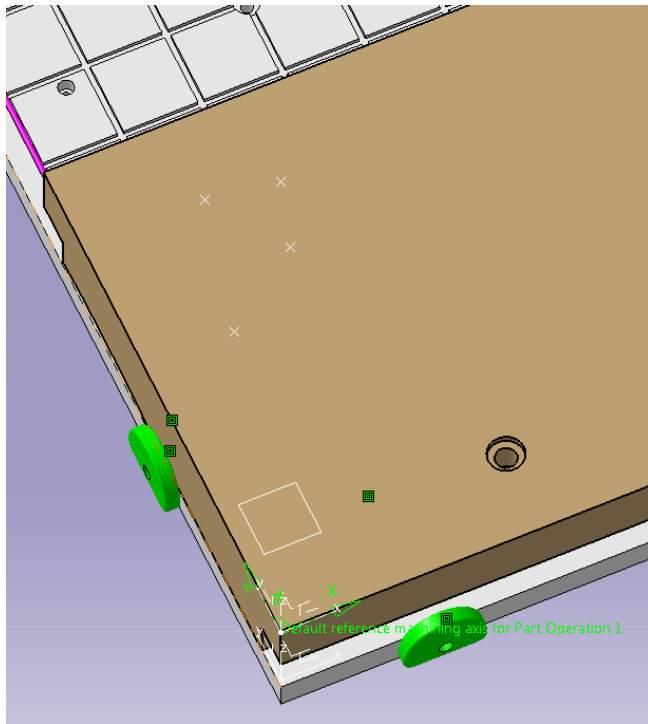
Ensimmäinen osa suunniteltiin tehtäväksi tasaisella imupöydällä, jossa Necuron-levyn pintaa koneistettaisiin 3 mm, ja jossa koneistetaan paikoitusreiät toista vaihetta varten. Necuroniin saatiin kiinnitinmalli oikean osan CAD-mallin geometriasta (kuva 61).



KUVA 61. Mallinnettu kiinnitin testiosalle

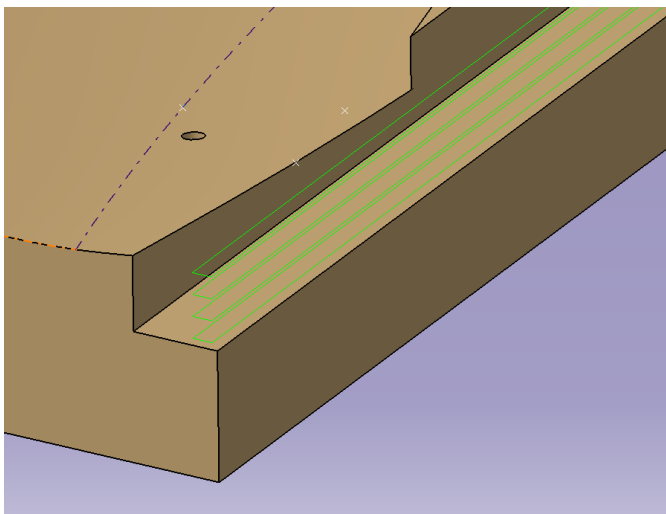
Necuron-aihiot suunniteltiin paikoitettavaksi tarkasti Forest-Linén lattiaan kiinni paikoitusreikien avulla (kuva 62). Aihion nollakoordinaateiksi ohjelmoitiin yksi tunnettu paikoitusreikä. Aihio saadaan mittakellon avulla suoraksi. Toisessa vaiheessa koneistetaan

Necuronin pitkille sivuille laipat, jolloin voidaan asentaa puristuskiinnittimet eli festit. Festit puristavat aihion paikoilleen rouhinnan ja viimeistelyn ajaksi.



KUVA 62. Sokalle paikoitusreikä mallinnettuna

Necuron-levyyn mallinnettiin kaksi paikoitusreikää, joilla saataisiin paikoitettua levy Forest-Linén lattiatasolle. Koneistuskeskuksen teräksinen lattia on sen geometrisesti tarkin työtaso. Koneistuskiinnitin kiinnitettäisiin ensin festeillä lattiaan lyhyiltä sivuilta, ja ajettaisiin olat koneistava ohjelma (kuva 63). Tämän jälkeen festit poistettaisiin sivuilta, ja asetettaisiin koneistetuille olakkeille.

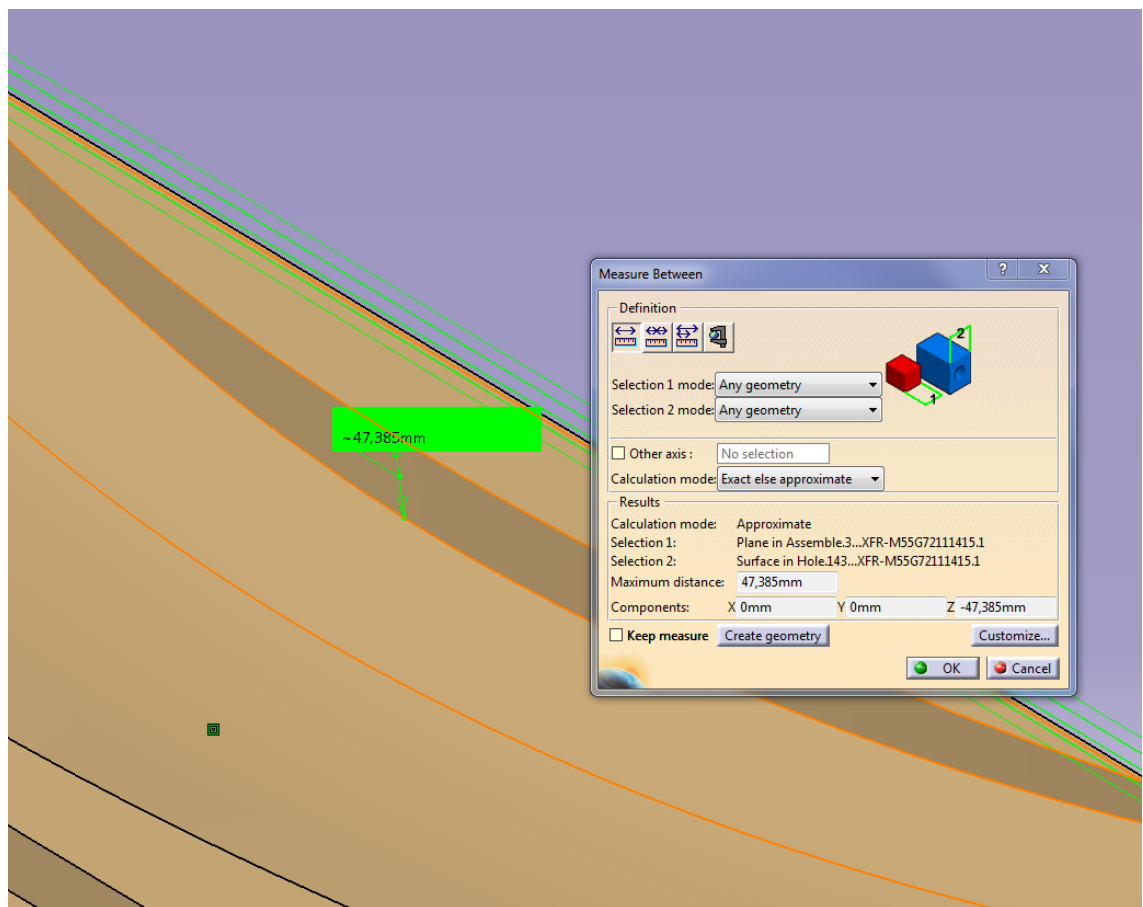


KUVA 63. Olakkeiden koneistusrataa ja olake

Toisessa osassa levyn ollessa kiinni koneistuskeskuksen lattialla levyyn rouhitaan muoto, ja tämän jälkeen levyyn koneistetaan 0,013 mm poimukorkeudella oikean koneistuskiinnittimen geometriaa, paikoitusreiät, imu-ura ja imureikä. Poimukorkeus valittiin sen suhteellisen koneistusnopeuden ja kokemuksen vuoksi.

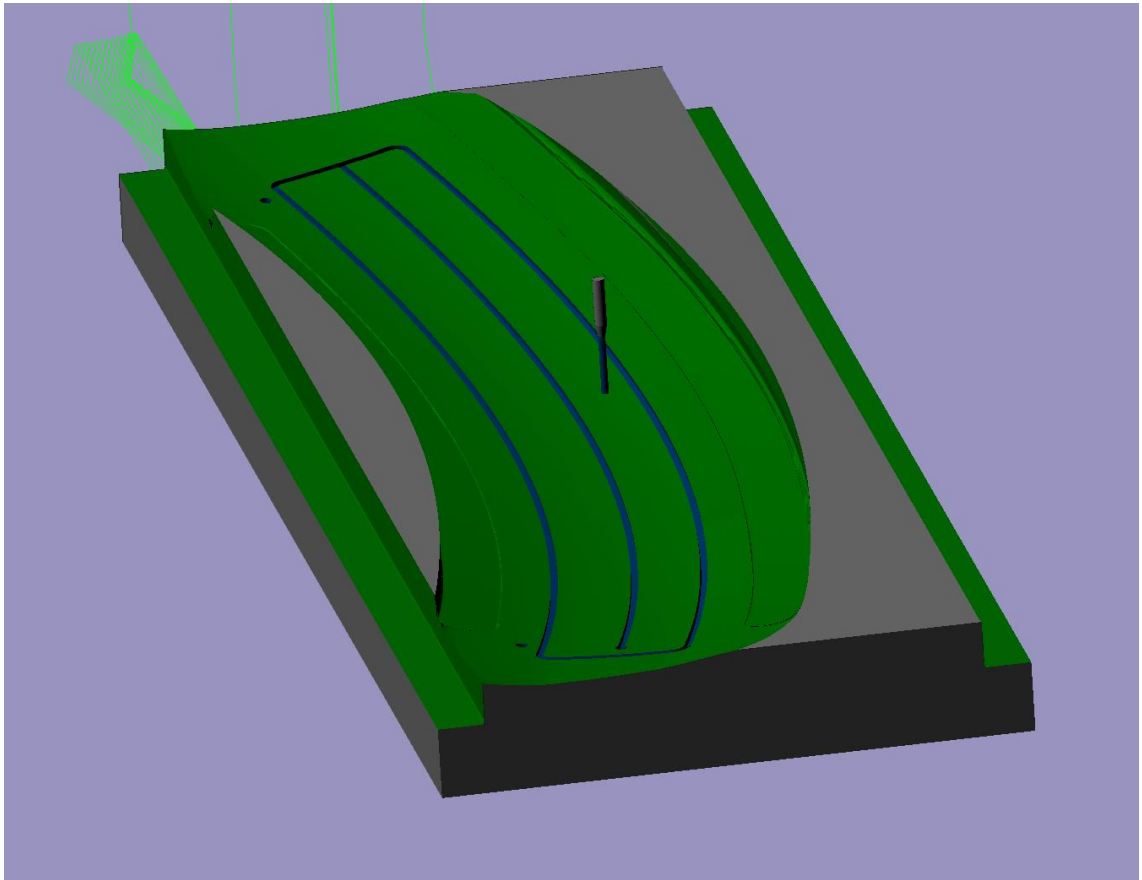
Kiinnittimen koneistuksen jälkeen reikiin kiinnitettäisiin tarvittavat ilmaliittimet, uriin asetettaisiin tiivistettä, osan aihio kiinnitettäisiin kiinnittimeen ja ajettaisiin työstöohjelma. Olisi tärkeää, että kaikki osat toteutettaisiin samalla koneistuskerralla irrottamatta koneistuskiinnittintä Forest-Linén lattiatasolta pois.

Kiinnittimen ratoja ohjelmoitaessa todettiin, että kallistuva terä ei pysty leikkaamaan kiinnittimen muodon korkeita reunoja (kuva 64), sillä terän leikkuupituus ei välttämättä olisi riittänyt. Aihio ei tullut reunoihin asti kiinni, joten kiinnittimeen koneistettiin kaksi uraa hieman ennen muodon alkua, ja kaksoiskaarevan muodon koneistusrataa pienennettiin.



KUVA 64. Reuna oli terälle liian korkea, joten työstörataa muovattiin varmuude vuoksi

Kiinnittimen pohjalle suunniteltiin imukanava (kuva 65), joka imee testiosaa kiinnitintä kohti tehden siitä jykevän.



KUVA 65. Simuloitu kiinnitin

11.1.3 Terät

Työstäviksi teriksi valittiin koneistuskiinnittimen osalta tasoajyrasin D75R6 (kuva 66), var-sijyrasimet D8 (kuva 67) ja D6 (kuva 68), ja teräpalajyrasin D50R2 (kuva 69). D75R6:ssa oli kovametalliset teräpalat, jotka soveltuivat hyvin tasoajyrasintään. D50R2:ssä oli kaksi kovametallipalaa, ja se valittiin rouhimaan ja viimeistelemään muoto. D8 ja D6 valittiin reikien ja urien ajyrasintään.



KUVA 66. Tasojyrsin D75R6



KUVA 67. D8-varsijyrsin



KUVA 68. D6-varsijyrsin



KUVA 69. D50R2-teräpalajyrsin

Testiosalle valittiin kaksihampainen teräpalajyrtsin D32R0.5 (kuva 62) ja kaksihampainen D10 PCD-varsijyrtsin (kuva 63).



KUVA 70. PCD-teräpalajyrtsin D32R0.5



KUVA 71. D10 PCD-varsijyrtsin

11.1.4 Postprosessointi

Koneistusohjelma postprosessoitii G-koodiksi IMS-postprossessoriohjelmistolla. Var-sinkin suuria kappaleita ohjelmoidessa moniakselisille koneille on syytä huomioida akselien kääntyminen. Akselien kääntyessä liikaa, esimerkiksi C-akselin kääntyessä 400 astetta, postprossessori korjaa liikkeitä. Esimerkki tällaisesta korjauksesta on B-akselien lukemien muuttuminen negatiiviseksi silloin, kun C-akseli kääntyy merkittävästi (kuva 72).

```

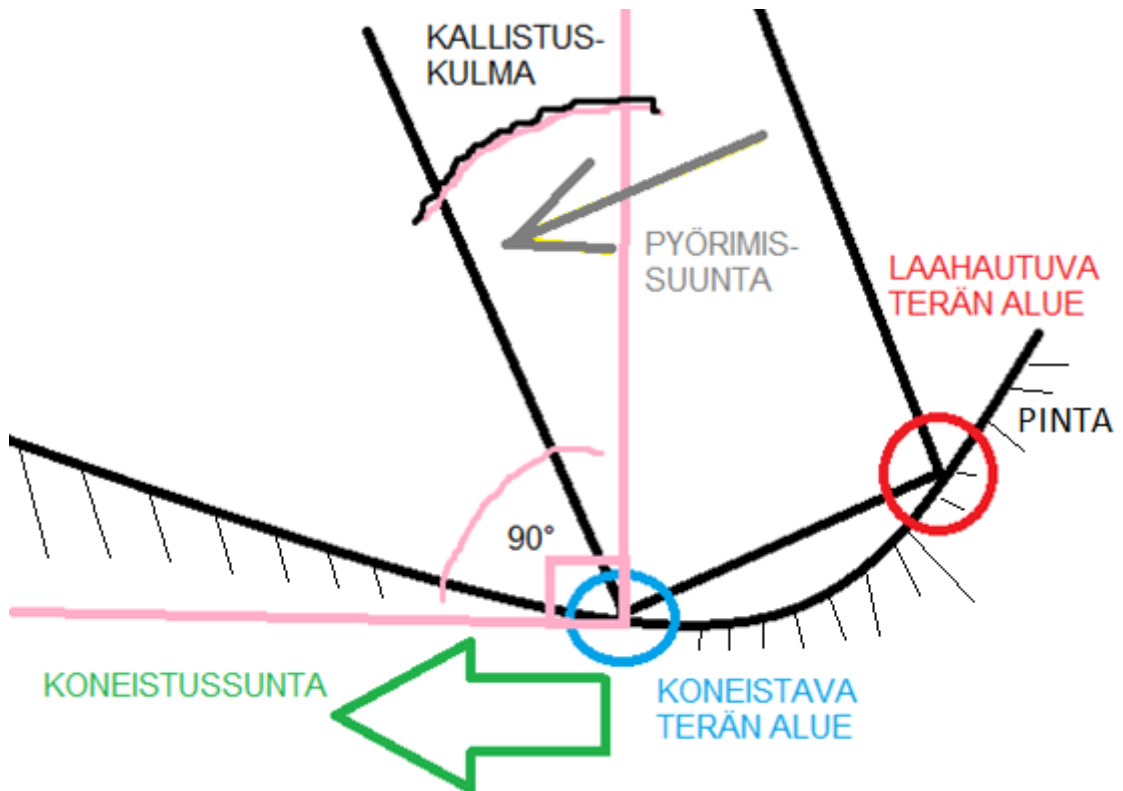
13854 N13854 X178.056 Y45.909 Z-29.04 B6.202 C-384.7
13855 N13855 X182.902 Y66.78 Z-27.111 B6.2087 C-386.8721
13856 N13856 X187.94 Y87.605 Z-25.113 B6.2324 C-388.9092
13857 N13857 X193.167 Y108.377 Z-23.051 B6.2737 C-390.7742
13858 N13858 X199.185 Y131.406 Z-20.687 B6.3394 C-392.6338
13859 N13859 X204.767 Y152.083 Z-18.502 B6.433 C-394.2315
13860 N13860 X209.889 Y170.419 Z-16.509 B6.5414 C-395.3649
13861 N13861 X215.829 Y190.995 Z-14.216 B6.6951 C-396.2115
13862 N13862 X221.928 Y211.525 Z-11.884 B6.9026 C-396.7171
13863 N13863 X227.474 Y229.736 Z-9.785 B7.1552 C-396.9351
13864 N13864 X232.439 Y245.635 Z-7.925 B7.444 C-396.8104
13865 N13865 X236.83 Y259.219 Z-6.313 B7.7356 C-396.1832
13866 N13866 X242.075 Y275.032 Z-4.432 B8.1473 C-394.9891
13867 N13867 X251.144 Y302.124 Z-1.348 B9.1684 C-395.9497
13868 N13868 X255.791 Y315.627 Z0.216 B9.7086 C-397.7093
13869 N13869 X262.168 Y333.56 Z2.426 B-10.3645 C-220.3591
13870 N13870 X267.068 Y346.959 Z4.214 B-10.7569 C-222.3843
13871 N13871 X267.757 Y346.33 Z9.126
13872 N13872 G0 X273.493 Y341.096 Z50.
13873 N13873 B0.
13874 N13874 X288.877 Y-1375.873
13875 N13875 B13.8572 C-281.4983
13876 N13876 X287.457 Y-1382.853 Z21.125

```

KUVA 72. Esimerkki ongelmallisesta koodista.

Postprossessori tuottaa ongelmallista koodia, koska postprossessorin ei anneta ohjelmoida aksleita niiden ääripisteiden yli, joka on esimerkiksi C-akselin tapauksessa 400. Postprossessori on asetettu laskemaan ratoja etukäteen valitakseen kulma-asetat B- ja C-akseleille, mutta postprossessori ei aina ”osaa” valita oikeaa kulmaa. Näissä tapauksessa ääri-asetuksen saavutettuaan postprossessori korjauttaa akselit siten, että se pyöryttää akselit toiseen geometriaan, joka toteuttaa karalle asetetun ehdon. Työn tapauksessa tämä ehto on neljän asteen kallistuma verrattuna muotoon.

On myös mahdollista, että CATIA:n CAMin tuottama aptsource-tiedosto sisältää tietoa koneistettavasta muodosta. Postprossessori saattaa lukea tätä muotoa. Jos kallistettu terä ”laahaa” koneistettavaa pintaa (kuva 73), postprossessori saattaa huomata tämän ja kääntää akselit oikeaksi geometriaksi.



KUVA 73. Havainnollistava kuva laahautuvasta terästä, 2-ulotteinen poikkileikkauskuva.

Ongelma korjattiin muuttamalla kallistuskulmia CAM-ohjelmistossa, ja postprosessoi-
 malla koodi uudelleen. Valmiissa koodissa jouduttiin kuitenkin seuraamaan akseleiden
 liikkeitä, sillä C-akseli kääntyi silti ainakin 380 astetta. Varmuuden vuoksi kaikki ohjel-
 mat ajettiin ”tyhjänä”, eli asetettiin aihio paikoilleen, mutta annettiin nollopisteen Z-koor-
 dinaatille +100 tai +200. Tällöin kara työstää ohjelmoitua muotoa kuitenkin kappalee-
 seen koskematta, ja ongelmalliset asennot huomataan karan pään käännöistä.

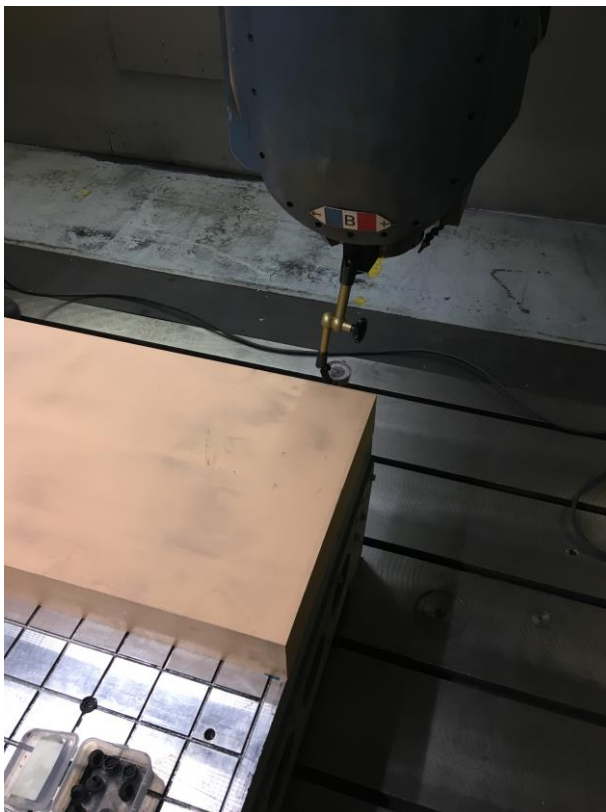
11.2 Koneistuskiinnittimen koneistus

Necuron-levy (kuva 74) laitettiin imujuurjestelmällä kiinni työpöytään, ja aloitettiin ko-
 neistus.

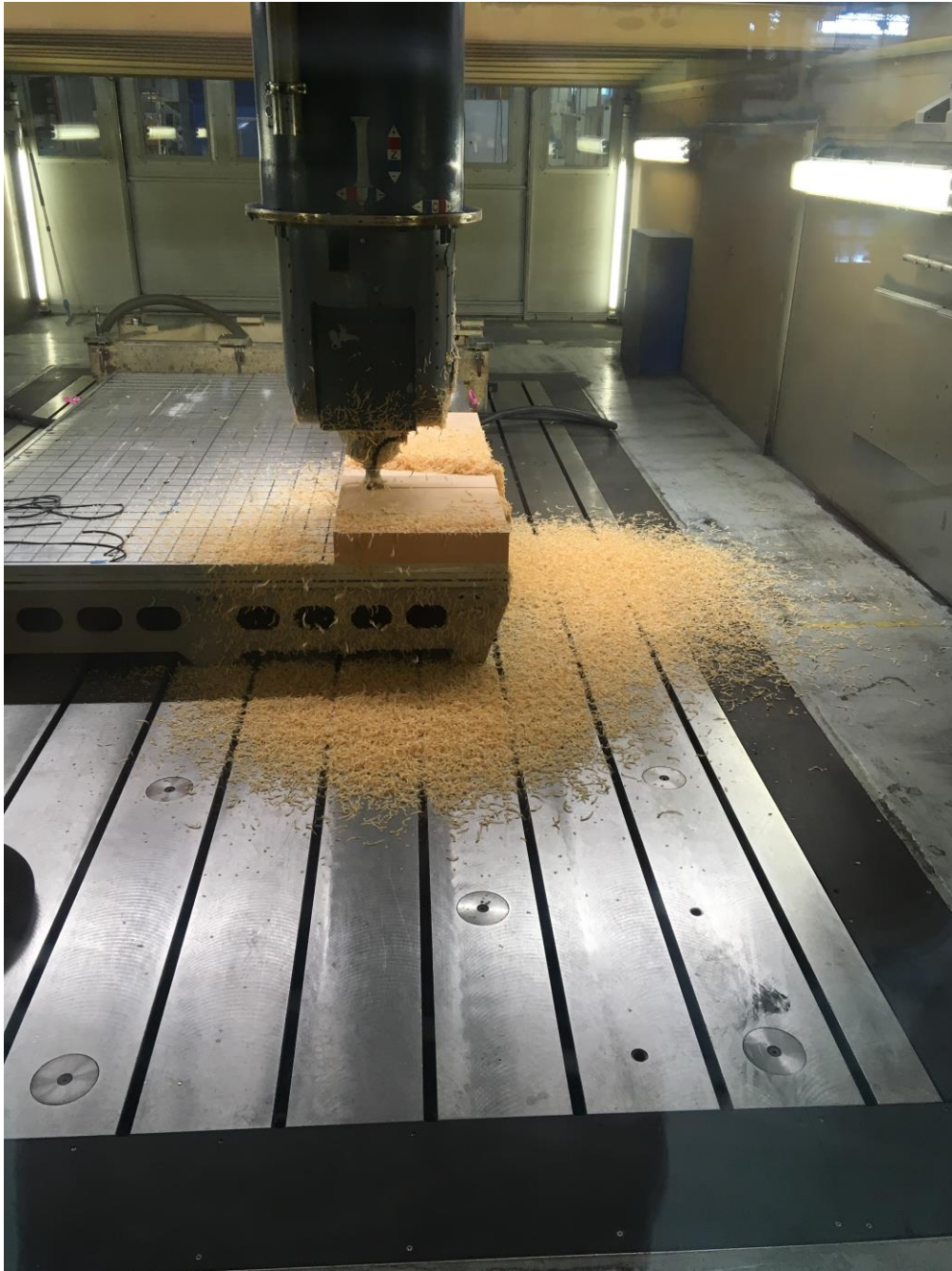


KUVA 74. Necuron-levy

Necuron-levyn suoruus saatiin mitattua karan mittakellolla (kuva 75). Necuronin pinta laanattiin tämän jälkeen D75 tasojiyrsimellä (kuva 76). Pinta saatiin hyvin tasaiseksi (kuva 77). Koneistuksessa kävi ilmi, että Necuron-aihio oli toimitettu hieman ylimittaisena, joten levyn reunaan syntyi pientä epätasaisuutta (kuva 78). Nämä hiottiin ja koneistettiin pois.



KUVA 75. Necuron-levyn suoruus mitattiin kellolla, joka oli kiinni karassa



KUVA 76. Necuronin laanaus

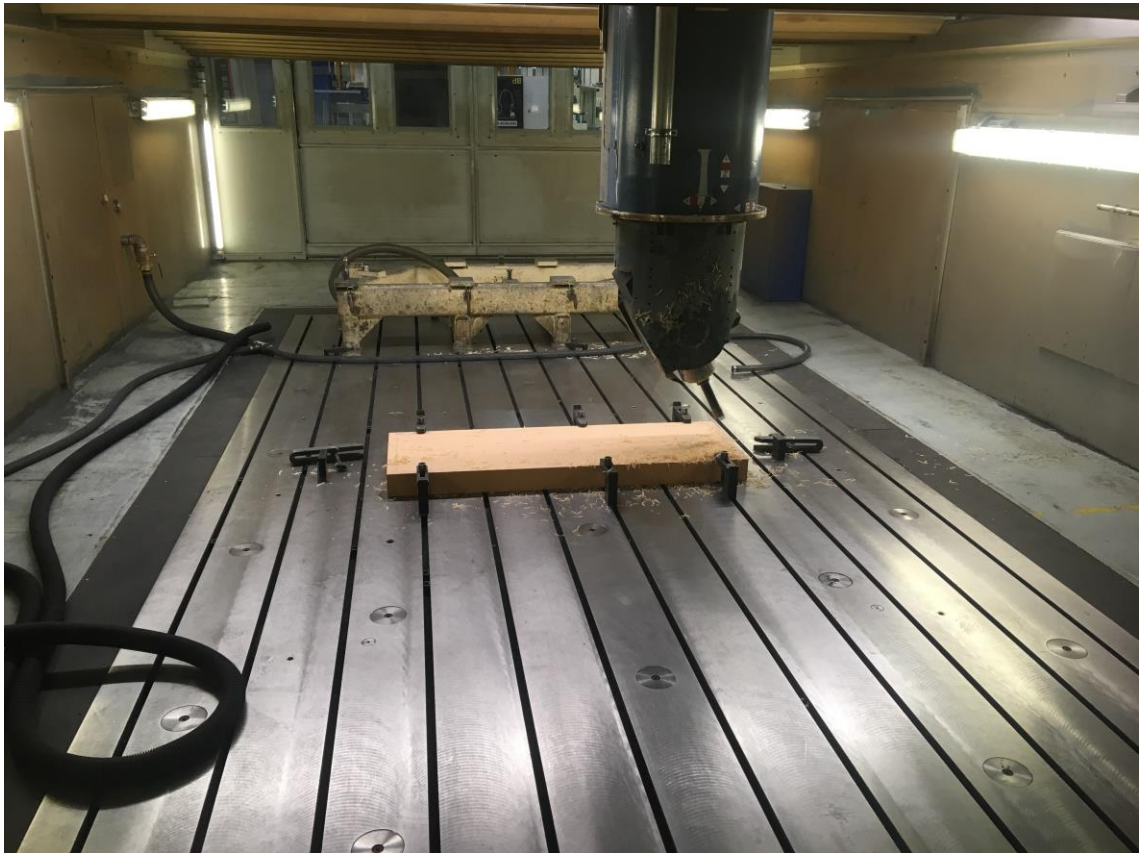


KUVA 77. Koneistettua pintaa ja koneistettu reikä paikoitussokkia varten



KUVA 78. Ylimääräistä koneistusjälkeä

Ensimmäisen vaiheen päätyttyä Necuron paikoitettiin rei'istään Forest-Linén lattialle. Pitkän sivun festit asetettiin paikoilleen, ja rata ajettiin varmuuden vuoksi ensin ”tyhjänä” siten, että Z-koordinaatteja paikoituksesta nostettiin +100 mm (kuva 79).



KUVA 79. Necuronin tyhjänä ajo

Necuronin koneistuksessa syntyi paljon pölyä (kuva 80). Tästä voi päätellä, että työstöarvot rouhinnassa ja viimeistelyssä olisivat voineet olla rohkeammat, sillä ensimmäisessä vaiheessa tuli siistiä jälkeä ja suurta lastua. Viimeistelyn jälkeen imutiivisteet asetettiin paikoilleen (kuva 81).



KUVA 80. Neuronin rouhintaa



KUVA 81. Valmis kiinnitin, kuva otettu varsinaisen osan koneistuksen jälkeen

Ongelmia Necuronin koneistuksessa tuli aihion koosta ja liian pieniksi koneistetuista rei'istä. Ongelmista selvittiin ajamalla Necuronia rata kerrallaan, kun virhe huomattiin, ja viilaamalla nurkkia käsin. Lisää ongelmia tuli D6-jyrsimen pituudesta, jota täytyi korjata toisilla työkaluilla, ja paikoitussokista, joita ei heti löytynyt oikean kokoisina. Aseustyö kulutti aikaa suunniteltua pidempään, ja suunnitelmista poiketen kiinnitintä ei voitu enää LaserTrackerilla mitata. Mittausta esti myös liian hienojakoinen lastu, joka pölytti aluetta liikaa, ja pölyn olisi pitänyt antaa laskeutua.

11.3 Työkappaleen koneistus

Työkappale tarkistettiin mahdollisten poikkeamien toteamiseksi. Ensimmäisenä oli huomioitava kappaleen yleinen paksuus, sillä tiedettiin, että CAD-malli ei vastaisi oikeaa kappaletta. Aihio oli mitatessa 3 mm paksu ohuimmasta päästä, joka oli koneistusta varten hyvä.

Työkappale koneistettiin yhdessä vaiheessa. Koneistuskiinnittimeen koneistettuihin uriin asetettiin tiivistettä. Tiivisteiden päälle asetettiin työstettävä CFRP-aihiot, paikoitettiin se kahden paikoitusreiän avulla ja alipaine kytkettiin päälle, jolla saatiin aihiolle vahva kiinnitys (kuva 82).



KUVA 82. CFRP-aihiot kiinnitettynä imulla ja sokkatapeilla kiinnittimeen. Imureikä porattiin paikkaan, jonka kuvassa paikantaa sininen paineilmajohto

Koneistusohjelma laitettiin päälle, ja koneistusta seurattiin tarkasti. Oli varottava, ettei terä osuisi paikoittaviin sokkiin. Imun todettiin olevan niin jyrkässä, että sokat otettiin pois kesken koneistuksen. Koneistusta jatkaessa todettiin, ettei terä liikuttanut aihiota ollenkaan. Koneistuksessa syntyi huomattavasti pölyä (kuva 83).



KUVA 83. Koneistusprosessi. Koneistuksessa syntyi paljon pölyä, joka erottuu himmeänä usvana kuvassa

Paksuuden koneistus sujui ongelmitta, ja ulkoapäin osa näytti tarkasti koneistetulta (kuva 84). Osan muodon jyrksinnän jälkeen todettiin, että osa on tiiviisti kiinni kiinnittimessä, joka osoittaa kiinnitinjärjestelyn jyvyyden (kuva 85).



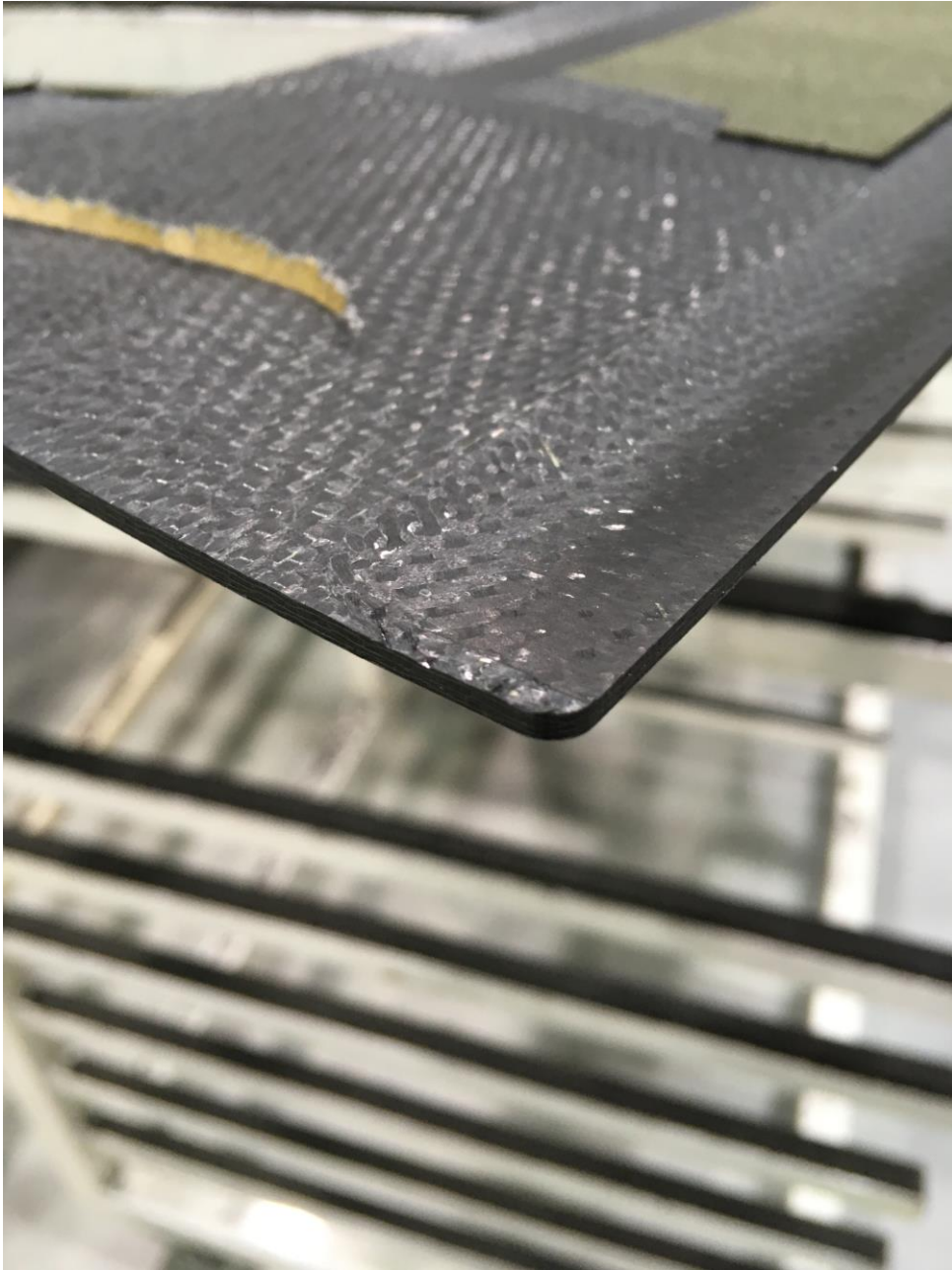
KUVA 84. Testiosa heti koneistuksen jälkeen



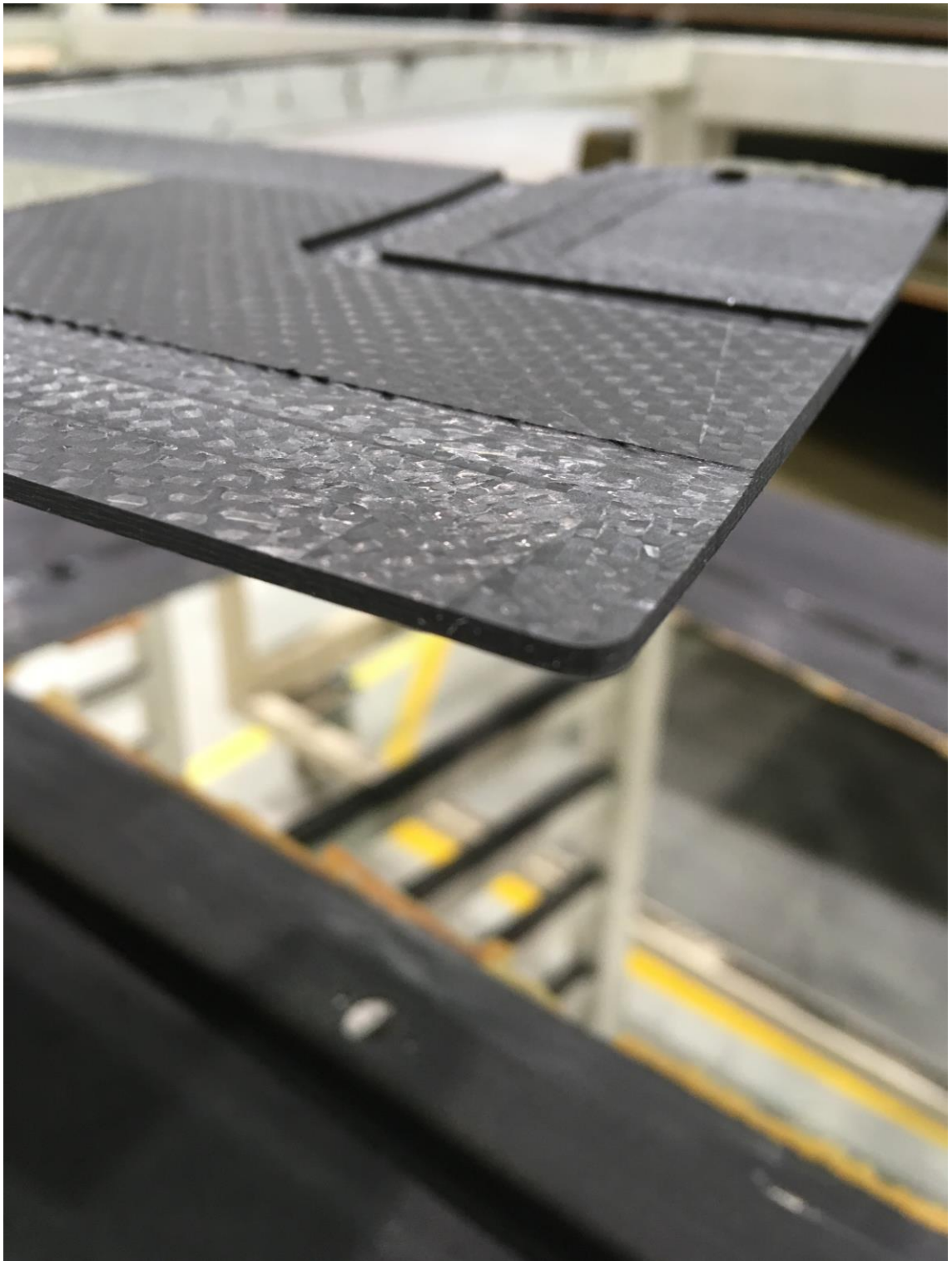
KUVA 85. Osan tiivis kiinnitys

11.4 Koneistuksen lopputulos

Koneistuksen seurauksena ei tapahtunut vakavia koneistusvirheitä (kuva 86; kuva 87). Koneistettua pintaa oli hankala sanoa visuaalisesti sileäksi, sillä eri tavoin leikkautuneet punokset ja epoksi taittoivat valoa eri tavalla. Sormituntumalla kaikki pinnat vaikuttivat erittäin sileiltä. Reunoissa ei havaittu minkäänlaista delaminaatiota, ja koneistettu ura vaikutti myös yllättävän laadukkaalta. Ennen mittausta aihion arveltiin olevan 0,2 mm mitatoleranssilla vakiomittainen.



KUVA 86. Koneistettua pintaa lähikuvana. Karhennuskankaan suikale ei leikkautunut täysin irti, mutta se ei vaikuttanut lopputulokseen



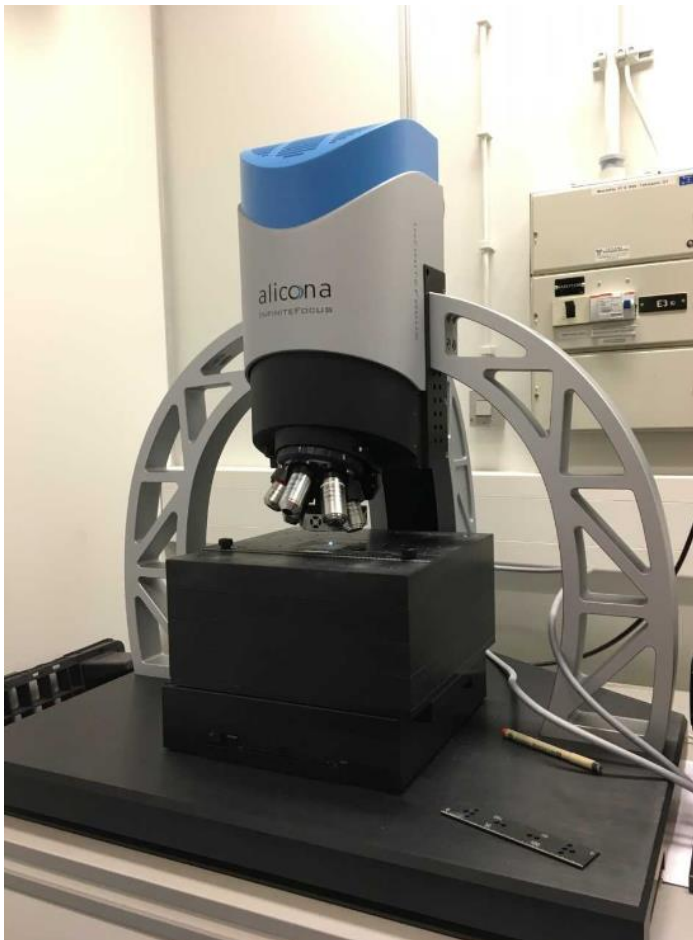
KUVA 87. Koneistettua pintaa, jossa näkyy hieman työkalun aiheuttamaa sädettä ennen nousevaa jäystejälkeä

12 TULOKSET

Visuaalisesti koneistettu testiosa oli erittäin sileä koneistetulta pinnaltaan. Alueella, jota ristikkäiskoneistettiin, oli havaittavissa selvä ero pinnan laadussa silmillä, mutta sormin eroa ei tuntunut. Pinnankarheus mitattiin InfiniteFocuksella.

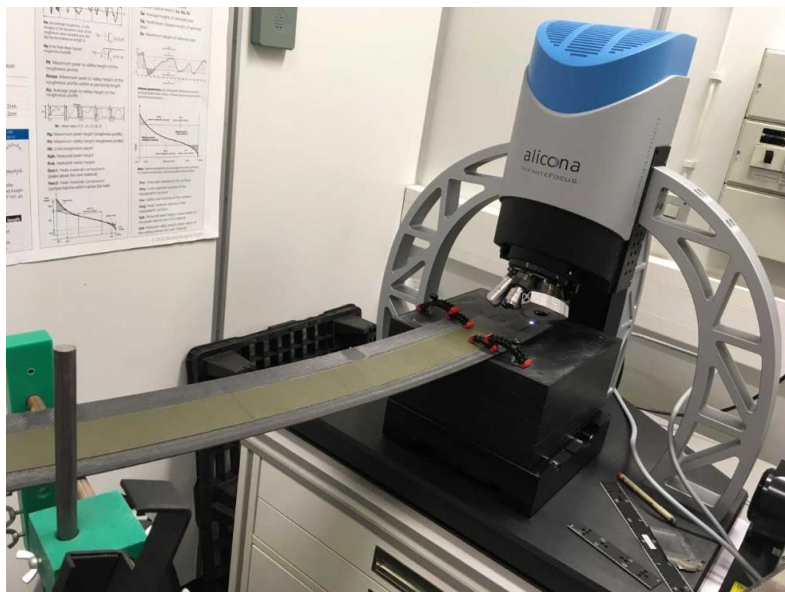
12.1 Pinnankarheuden mittaustulokset

Pinnankarheutta mitattiin Tampereen teknillisellä yliopistolla sijaitsevalla Aliconan InfiniteFocus-profilometrillä (kuva 88). Kävi ilmi, että Duboust ym (2014) käyttämä SL-versio oli hieman kevyempi teholtaan, ja InfiniteFocuksella saisi verrattaen tarkempia kuvia ja profiileja.



KUVA 88. InfiniteFocus

Laitteella sai myös mitattua testiosan päätyjä (kuva 89), tosin piti varoa, ettei mittauspöydän liikkeet siirtäneet kappaletta, sillä se teki pinnan profiilin mittauksesta epätarkan.



KUVA 89. Kuva mittaustilanteesta, jossa mitattiin risteävää rataa

Kuitujen tarkka lohkeamis- tai hioutumiskäyttäytyminen koneistuksessa olisi saatu mitattua elektronimikroskoopilla eli SEM:lla. SEM:a ajateltiin alun perin käyttää kuvien ottamiseen, mutta profilometrillä sai yllättävän hyviä, käytettäviä kuvatuloksia, joten SEM-mittaukset jätettiin välistä. Mittapalat päätettiin kuitenkin säästää, mikäli heräisi kiinnostusta tutkia pintoja lisää.

Mittauspöytäkirjat ovat liitteenä (liite 1; liite 2). Työn kannalta olennaiset mittaukset käsitellään, ja loput liitteistä löytyvät mittaukset on otettu puhtaasta mielenkiinnosta.

12.1.1 Pinnankarheuden profiili, 0–5 mm, 20x objektiivi

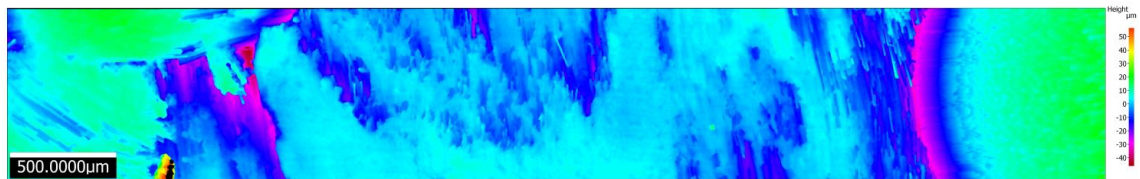
Mitattavasta palasta saatiin pinnankarheuden profiiliksi kuvien (90-91) ja kuvion (8) mukainen tulos. Kuvioista (8) ei ole huomattavissa selkeää kumpua, joka viittaisi terän kulkeutuneen kallellaan profiilin läpi. Kuvan oikealla puolella on kuitujoukko, joka kulkeutuu alaspäin laminaatin alle. Punainen alue tarkoittaa todennäköisesti aluetta, joista kuidut ovat repeytyneet irti. Tämä viittaa siihen, että kuidut eivät ole koneistuneet abrasiivisesti, vaan ovat riuhtoutuneet irti teräpalan voimasta. Yksittäiset kuidut erottuvat melko selkeästi kuvasta, ja laaja, tasainen alue voi olla hajonneen matriisin tahrinmaa aluetta (kuva

90). Kuvat (90; 91) ja kuvio (8) ovat täysin samoilta alueilta, lähes saman mittaisia leveysuunnassa ja tällöin vertailukelpoisia toisiinsa.

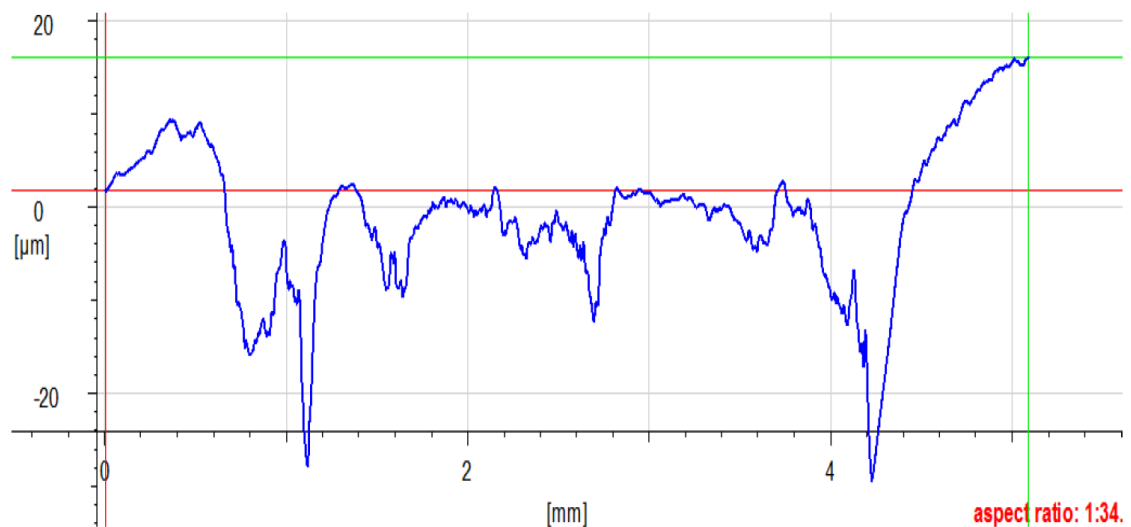


KUVA 90. Koneistetun pinnan profiilia

Metric size: 5.1498mm x 814.8453 μ m
 Size: 7950 x 1258 points
 2018-06-01T09:21:51



KUVA 91. Testipalan pinnan topografia noin 5mm * 800 μ m alueella



KUVIO 8. Testipalan pinnan profiili käyränä.

Taulukkoon (10) on laadittu pinnankarheusmittauksen tulokset. R_a :ksi saatiin 3,7 μ m, joka oli odotettavasti karheampi tulos verrattuna Duboust ym. (2014) artikkelin pinnanlaatutuloksiin 0-, 45- ja 90-asteisilla kuitukerroksilla. Kuitujen leikkaaminen ilman huonolaatuista leikkaustapahtumaa on hankalaa, koska yhdellä koneistuskerralla koneistuu monta kerrosta.

TAULUKKO 10. Pinnankarheuden ja pinnanlaadun parametrit

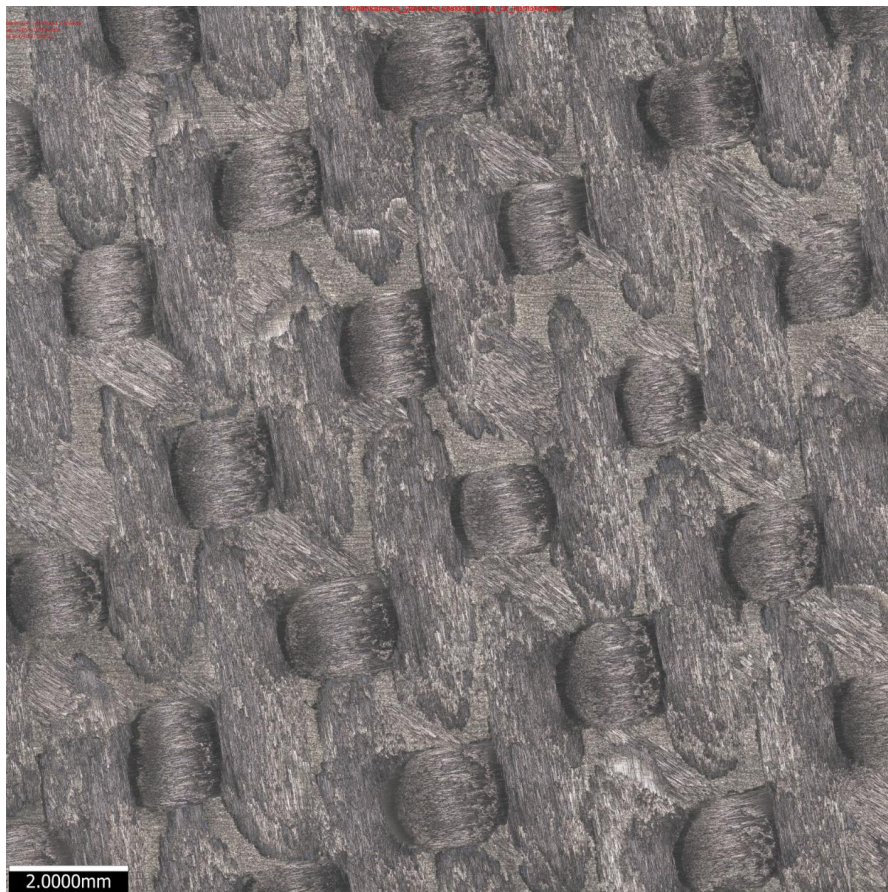
Parameters			
Name	Value	[u]	Description
Ra	3.7919	µm	Average roughness of profile
Rq	5.3125	µm	Root-Mean-Square roughness of profile
Rt	35.7594	µm	Maximum peak to valley height of roughness profile
Rz	22.4123	µm	Mean peak to valley height of roughness profile
Rmax	35.7594	µm	Maximum peak to valley height of roughness profile within a sampling length
Rp	14.0119	µm	Maximum peak height of roughness profile
Rv	21.7475	µm	Maximum valley height of roughness profile
Rc	19.0249	µm	Mean height of profile irregularities of roughness profile
Rsm	325.2855	µm	Mean spacing of profile irregularities of roughness profile
Rsk	-1.4089		Skewness of roughness profile
Rku	5.2050		Kurtosis of roughness profile
Rdq	0.6668		Root-Mean-Square slope of roughness profile
Rt/Rz	1.5955		Extreme Scratch/Peak value of roughness profile. (>=1), higher values represent larger scratches/peaks
l	5.1362	mm	Profile Length
Lc	800.0000	µm	LambdaC: cut off wavelength

Mitattaessa huipukkuutta päästiin kuitenkin huomattavasti parempiin tuloksiin, joka viittaa kaikkien kuitujen koneistuneen jättämättä minkäänlaista jäystettä, ja vähemmän syvältä repeytyneisiin kuituihin. Vinouma oli Duboustin ym (2014) tuloksien mukaan samaa luokkaa kuin 135-asteisesti koneistettu laminaatti. Negatiivinen vinouma viittaa pintaan, jossa on syviä railoja, joka selittyy revityillä kuitu- ja epoksipaloilla (Duboust ym. 2014, 11).

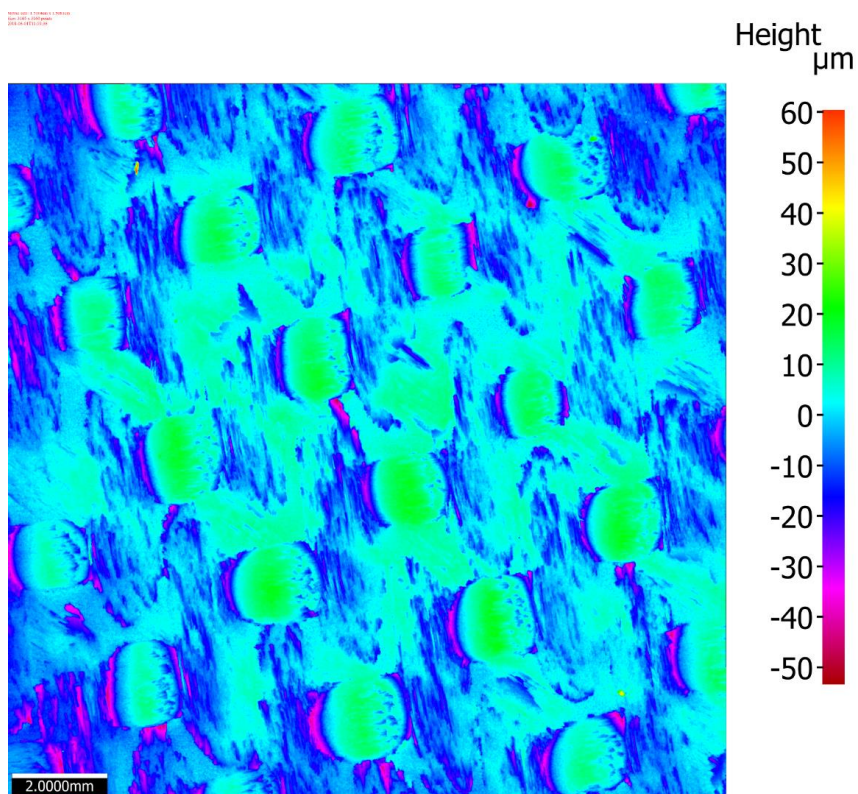
Vastaavia alueita mitattiin sekä pysty- että vaakasuoraan samankaltaisia ja osittain paremmilla tuloksilla, ja tulokset on koottu työn liitteisiin (liite 1). Yleisesti huipukkuus on saatu pidettyä numeerisesti alle Duboustin ym. (2014) artikkelin tuloksista.

12.1.2 5x objektiivinen, kartiokorjattu tekstuuri ja topografia

InfiniteFocuksella kuvattiin pienemmällä suurennoksella pinnan topografiaa seuraavilla tuloksilla (kuva 92; kuva 93). Topografian ollessa kaksoiskaareva sitä kartiokorjattiin, joten sen reunat näyttävät olevan matalammalla kuin oikeasti ovat. Topografiasta ei ole havaittavissa koneistusjälkiä. Lähikuvassa esiintyvät vaaleanharmaat kohdat ovat hioutunut matriisia. Tarkemman resoluution kuvaa ei saanut opinnäytetyöhön, sillä Microsoft Word supistaa kuvan resoluutiota. Oikean kuvan koko on 65 Mb.



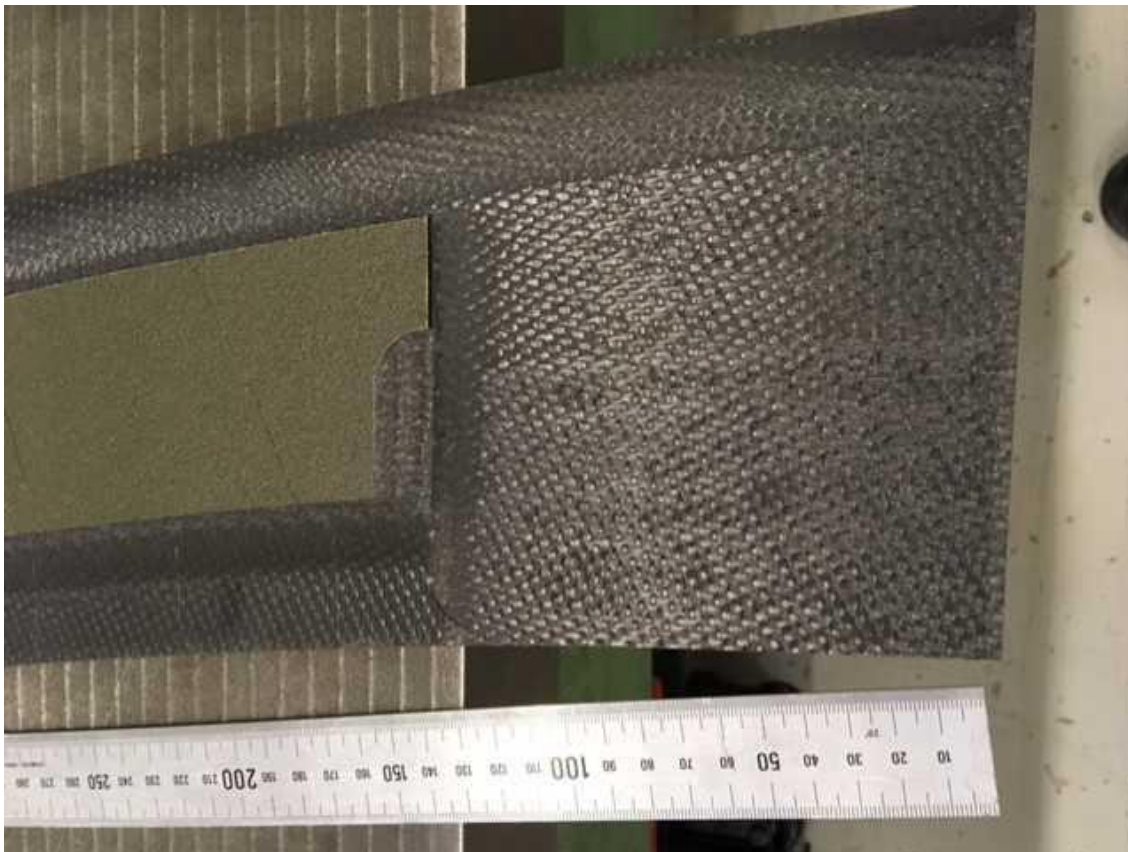
KUVA 92. CFRP:n pinnan tekstuuria, mitta oikealla alakulmassa.



KUVA 93. Pinnan topografia, josta kuitukimppujen viereiset railot (punainen) erottuvat hyvin. Topografia on vertailukelpoinen kuvan 92 kanssa.

12.1.3 Ristikkäin koneistettu pinta

Ristikkäinkoneistetusta pinnasta oli silmin nähtävissä laatuero (kuva 94). Käsituntumalla laatueroa ei tuntenut. Ristikkäistä pintaa mitattiin pinnanlaadun selvittämiseksi.



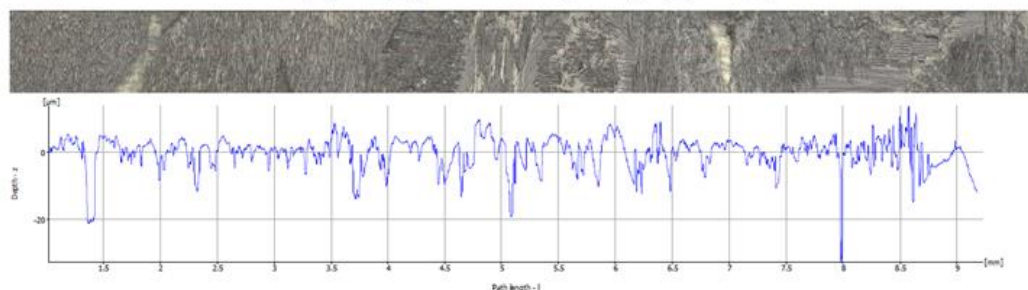
KUVA 94. Ristikkäin koneistettu pinta. Laatuero huomaa myös kamerassa. Ristikkäin koneistettu pinta (alempi puolisko) on himmeämpi, ja alueiden välinen raja on himmeä.

Pinnan profiili mitattiin noin 10mm pitkältä matkalta, joka sisälsi poikittain koneistetun alueen, ristikkäin koneistetun alueen ja näiden alueiden rajan (kuva 95). Yllättävää oli, että optisella mittalaitteella profiilista ei voinut tehdä johtopäätöksiä pintojen karheuksien eroista, vaikka visuaalisesti ero on havaittavissa. Pinnan topografiat ovat esitetty työn liitteissä (liite 2).

Measurement Report

Profile Measurement

Isokappale_yleiskuva pääty2_alue_20x



Ra: 3.4541µm
Rq: 4.8261µm
Rz: 29.3529µm

Filter: high pass - roughness profile
Lc:= 800.0000µm

KUVA 95. Pinnan profiili. Pintojen koneistusraja menee suurin piirtein 3 mm ja 7 mm välillä

12.2 Koneistetun paksuuden mittaustulokset

Koneistettua paksuutta mitattiin alueittain kuvan 96 mukaan. Mittaus suoritettiin alueen päästä päähän. A:n, B:n ja C:n mittaratojen (numeroitu 1, 2 ja 3) välillä eroa oli 30–40 mm. Pitkittäis- ja poikittaissuuntien etäisyysmittauksilla ei katsottu olevan suurta merkitystä.



KUVA 96. Mittausalue A keltaisella, B vihreällä, C vaaleanpunaisella, pitkä sivu punaisella ja lyhyt sivu oranssilla.

Koneistettua paksuutta mitattiin pihtimallisella pikamittakellolla ja kuulakärkisillä Mitutoyon mikrometreillä (kuva 97; kuva 98). Pihtimallisen pikamittakellon tarkkuus oli $\pm 0,04$ mm ja kuulakärkipäisellä mikrometrillä $\pm 0,003$ mm. Pikamittakellon lukemataarkkuus oli 0,02 mm, ja mikrometrillä 0,001 mm. Kuulakärkinen mikrometri on tarkin mahdollinen mittakärki mikrometreissä kaareville kappaleille, sillä muiden mikrometriä mitaleukojen suorat tasot eivät pääse muotoon asti täysin kiinni. Pihtimallia käytetään yleisesti tuotannossa paksuuksien vahvistamiseen, ja tarkempaa mikrometriä harvemmin. Työssä pihtimallia käytettiin leveihin A-, B- ja C-alueisiin, ja mikrometriä pitkälle ja lyhyelle sivulle, sillä mikrometriä ei saatu sopivasti mittaamaan leveitä alueita. Koneistettua aluetta puhdistettiin pölystä käsineellä ennen mittausta.

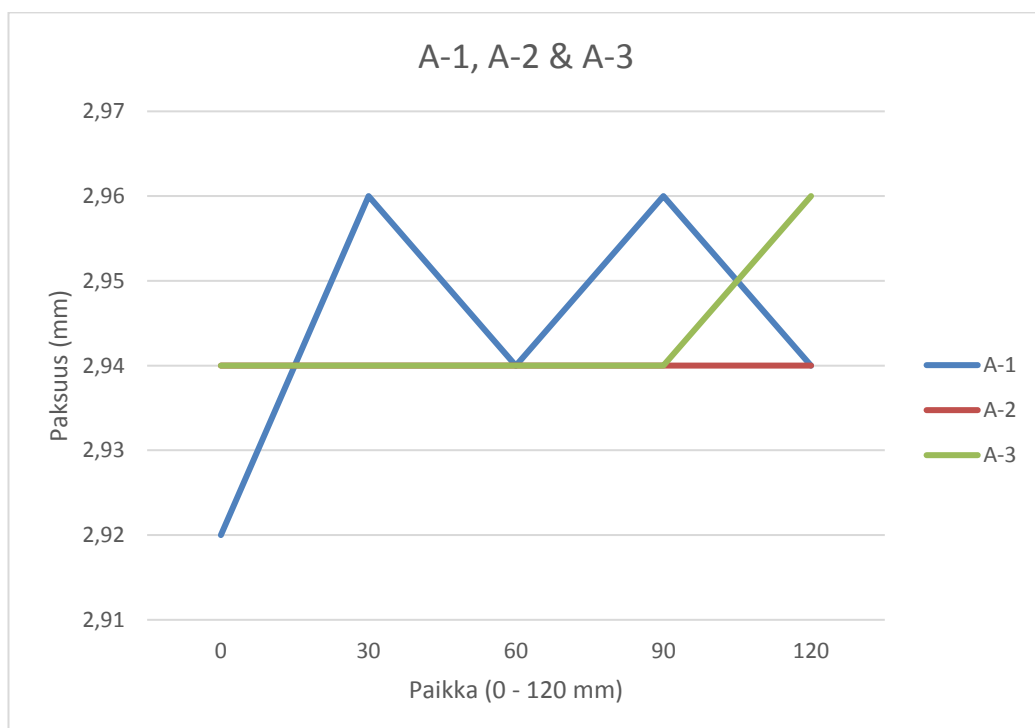


KUVA 97. Digitaalinen pihtimallinen kaarimikrometri, kuulakärkinen

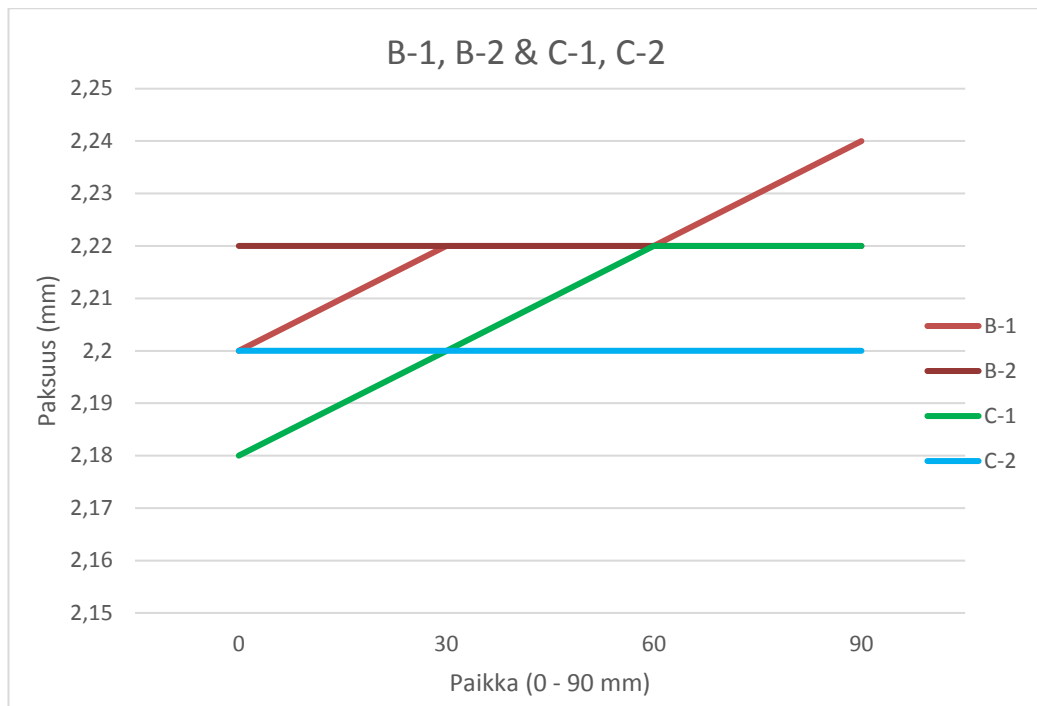


KUVA 98. Tarkempi kaarimikrometri, yhdellä kuulakärjellä

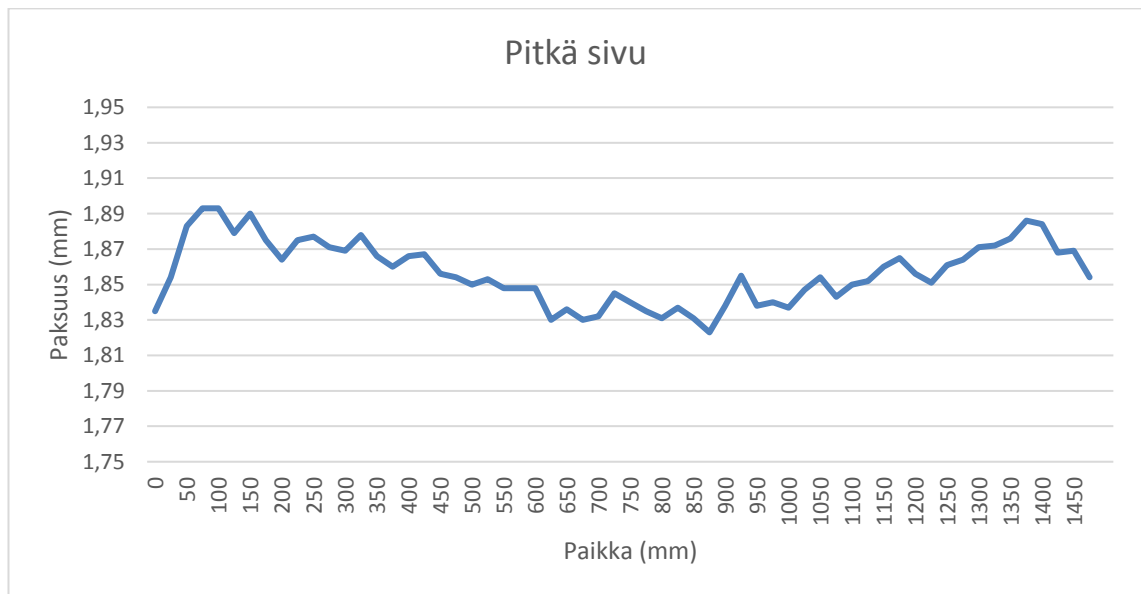
Mittauspöytäkirja on opinnäytetyön liitteenä (liite 3). Mittaustuloksien mukaan osaan koneistettu paksuus vaihteli 0,06 mm välillä alueella A (kuvio 9), 0,04 mm alueella B (kuvio 10), 0,04 mm alueella C (kuvio 10), 0,07 mm pitkällä sivulla (kuvio 11) ja 0,06 mm lyhyellä sivulla (kuvio 12).



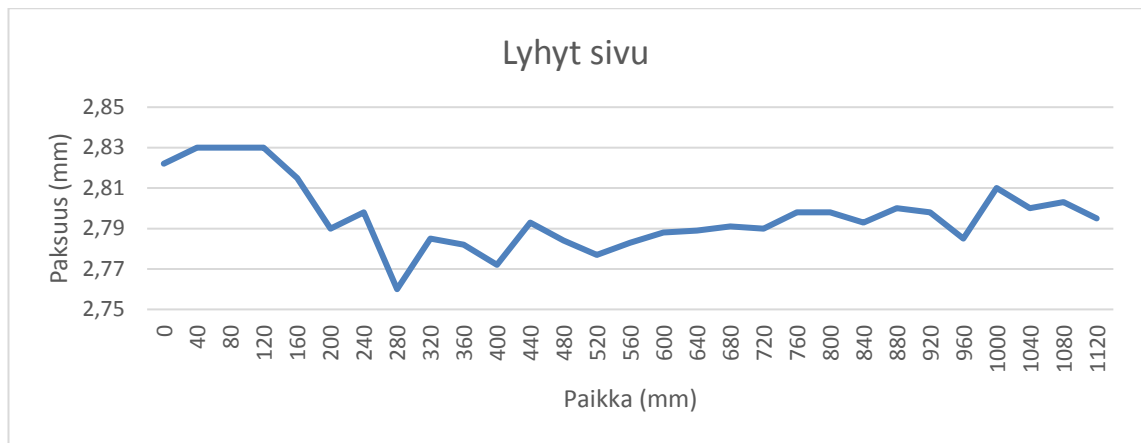
KUVIO 9. A-alueen tulokset



KUVIO 10. B- ja C-alueiden tulokset

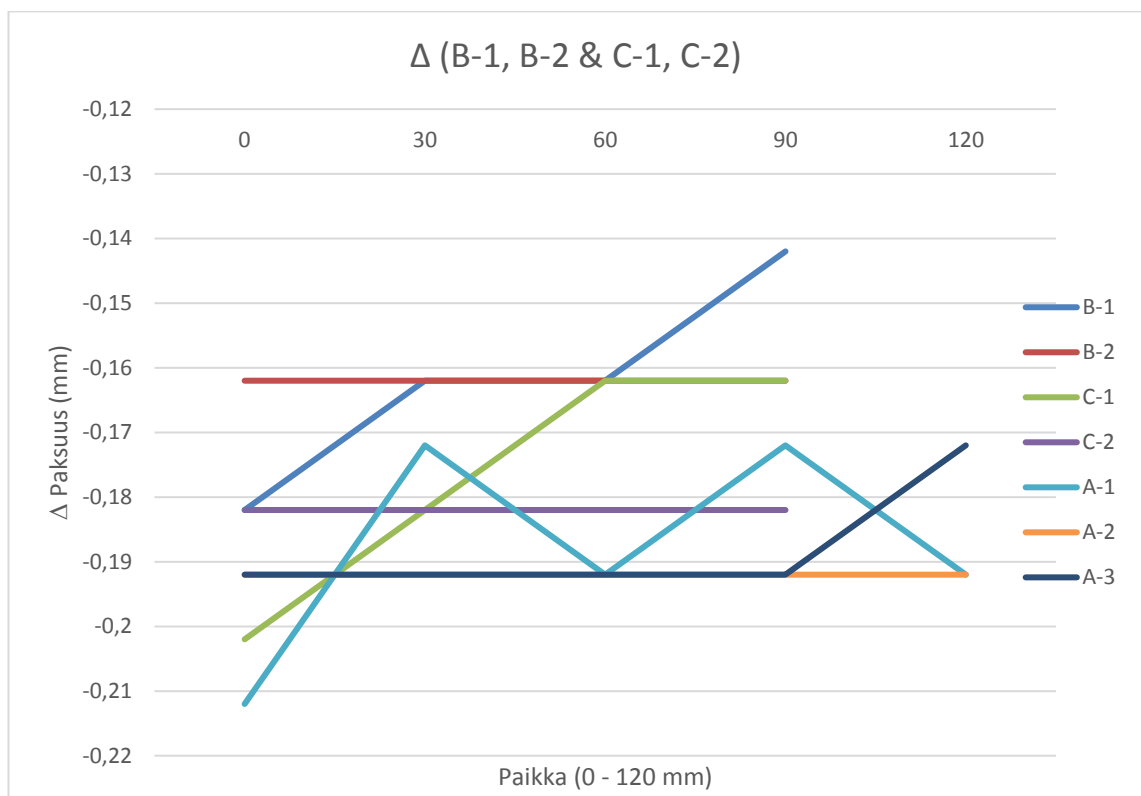


KUVIO 11. Pitkän sivun tulokset



KUVIO 12. Lyhyen sivun tulokset

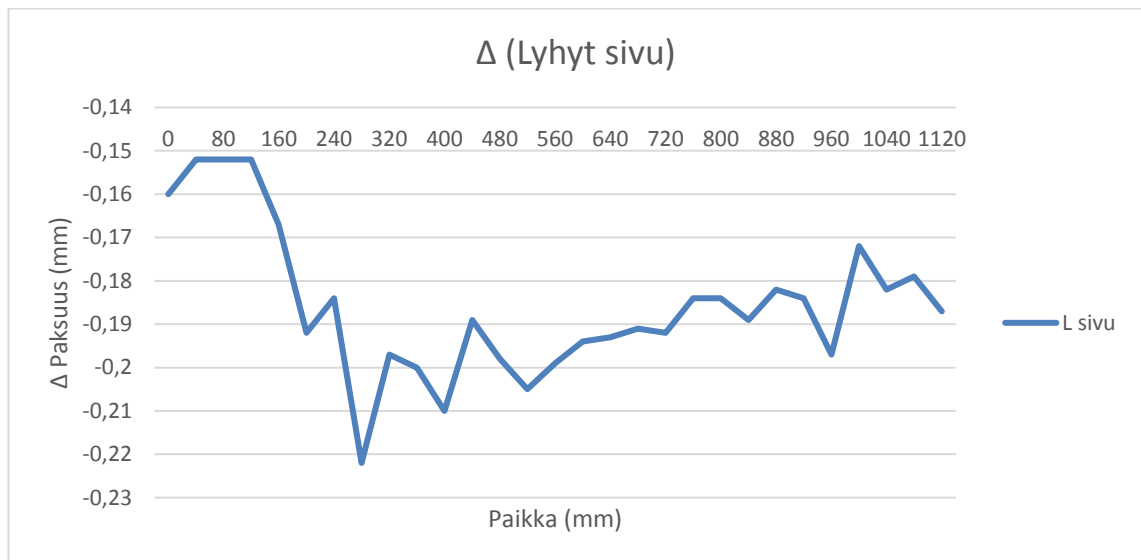
Tulokset kerättiin kahteen taulukkoon, ja tuloksista vähennettiin kunkin alueen suunniteltu paksuus, joka on CAD-mallin paksuus (kuviot 13–15). Suunnitellut paksuudet olivat 3,132 mm alueelle A, 2,382 mm alueille B ja C, 2,082 mm pitkälle sivulle ja 2,982 mm lyhyelle sivulle.



KUVIO 13. Leveiden alueiden tulokset, CAD-mallin paksuus vähennettynä koneistetusta



KUVIO 14. Pitkän sivun mittaustulokset, CAD-mallin paksuus vähennettynä koneistuksesta



KUVIO 15. Lyhyen sivun mittaustulokset, CAD-mallin paksuus vähennettynä koneistuksesta

13 TULOSTEN ANALYSOINTI JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Täysin varman tuloksen saamiseksi olisi pitänyt koneistaa useampi samankaltainen tuote. Pelkästään yhden osan tekemisellä päästiin kuitenkin yllättävän pieniin paksuuspoikkeamiin.

13.1 Koneistetun paksuuden jatkuvuus yksittäisellä alueella

Forest-Linén koneistama paksuusvaihtelu yhdellä koneistusalueella on 0,07 mm noin 1,4 metrin matkalla, mikä koettiin erittäin hyväksi. On muistettava, että tämä 0,07 vaihteluväli ei koske koko koneistettua osaa, vaan se koskee vain yhtä tiettyyn paksuuteen koneistettua aluetta.

Mittaustuloksista tosin huomaa, että koneistetut pitkät sivut tekevät matalan laakson mittausalueen päiden välille. On hankalaa sanoa, johtuuko tämä Forest-Linén akseleiden epätarkkuuksista tai aihion käyttäytymisestä imussa ja kiinnittimessä.

On tiedossa, että B- ja C-akseleita kalibroidessa on ilmentynyt jotain vikaa, joka on todennäköisesti syntynyt karan yhdestä tai useammasta törmäyksestä koneistuskiinnittimiin tai kappaleisiin. Työn mittaustulosten kaltaisten laaksojen systemaattista esiintymistä muissa tarkkuuskoneistusprojekteissa, joissa koneistetaan paksuutta, olisi hyvä tutkia lisää esimerkiksi koneistamalla samanmuotoisia osia testisarjana.

Koneistetussa paksuudessa ei havaittu sellaisia piirteitä, joissa paksuus olisi toistuvasti muuttunut kahden mittapisteen välillä yli 0,03 mm (liite 3). 0,07 mm on osan muodon kokonaisvaihtelualue yhdellä koneistusalueella, johon on syytä viitata osia ja niiden muototarkkuuksia koneistaessa.

On hankalaa sanoa, onko mikrometri oikea mittari paksuuden mittaukseen, sillä yksi kuitu on 5-10 μm , ja yksikin kuitu voi tuloksia hieman vääristää.

13.2 Paksuus verrattuna CAD-malliin, virhearvot ja niiden syyt

Koneistetun paksuuden todettiin olevan 0,14–0,26 mm ohuempi kuin CAD-mallissa määrätty paksuus. Tämä paksuusero voi johtua useasta erilaisesta syystä tai niiden yhtälöstä. Varmaa on, että tuenta ei ole täydellinen, joka selittää ainakin osan tuloksista. Lukujen vaihteluväli, ja samoin Forest-Linélle todettu toleranssi testiosan kaltaiseen koneistukseen, on

$$\Delta_L = L_{max} - L_{min} \quad (3)$$

$$\Delta_L = 0,259 \text{ mm} - 0,142 \text{ mm}$$

$$\Delta_L = 0,117 \text{ mm} \approx 0,12 \text{ mm}$$

Koneen akselien tarkkuustoleranssit ovat ensimmäinen mahdollinen syy mittavaihteluun. Volumetrisen tarkkuuden ollessa $\pm 0,25$ mm koneistetun paksuuden vaihtelu on toleranssialueen sisällä.

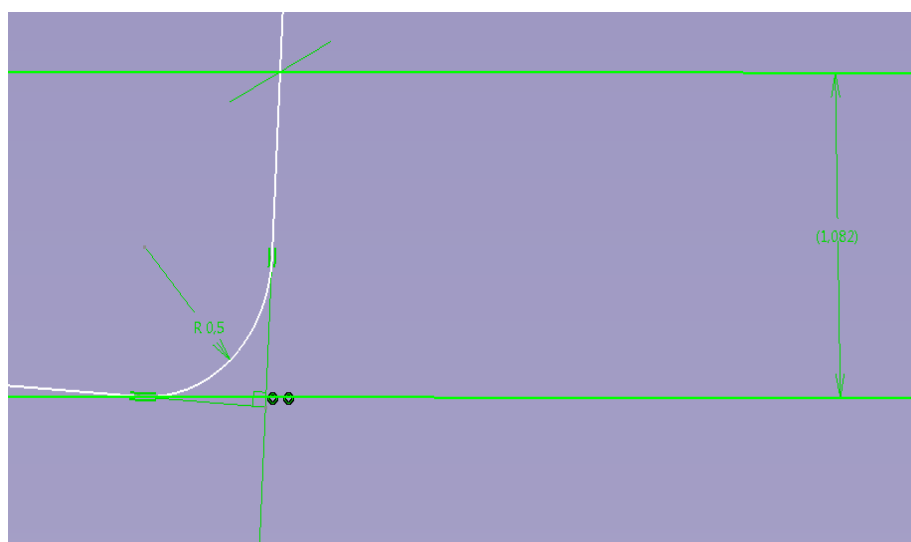
0,12 mm vaihtelu mittaustuloksissa selittyy todennäköisesti myös tuentavoimilla. Testiosa oli hyvin jyrkellä rakenteeltaan, vaikka se taipui hieman. Ollessaan kiinnittimessä testiosa pyrkii mukautumaan kiinnittimen ja imun luoman geometrian mukaiseksi. Testiosa on tosin voinut imutiivisteiden vuoksi jättää tietyn kokoisen tilan kiinnittimen ja testiosan väliin, joka ilmenee mittavirheenä. Myös kiinnittimen pohjalle koneistettu ura voi vaikuttaa lievästi muotoon.

Ennen koneistusta olisi ollut hyvä asentaa karaan kiinni mittakello, ja asettaa mittakello aihion yläpuolelle. Painelemalla aihiota käsin kello olisi ehkä heilahdellut. Koneistuksessa esiintyvä painava voima karan työkalusta on korkea, joka varmasti painaa osaa kiinnittimen muotoa ja imua vasten.

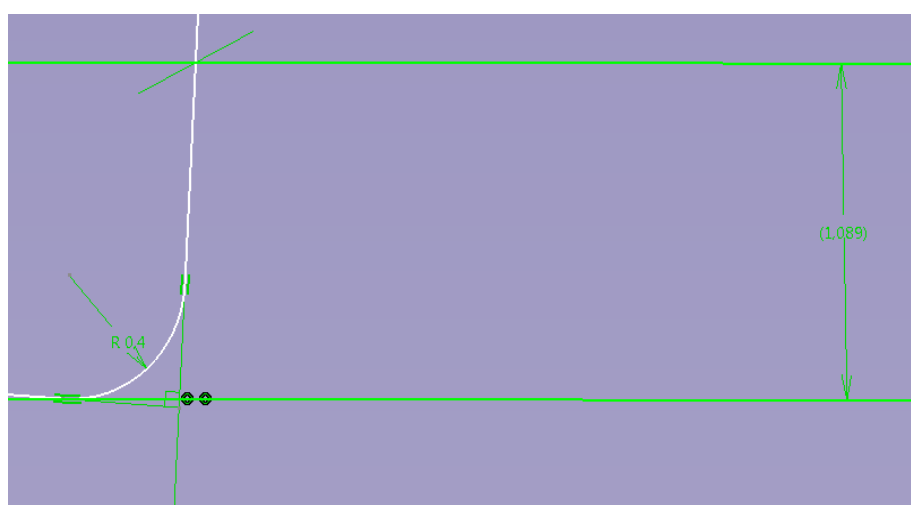
Toinen syy voi olla työkalun mittaus. On todettu, että Forest-Linén automaattisella työkalun mittauksella on $\pm 0,05$ mm ero todelliseen mittaan. Ollessaan mitattua pidempi työkalu koneistaa syvemmältä, ja ollessaan lyhyempi työkalu koneistaa korkeammalta. Työn

testiosan koneistuksessa mitattu terä on saattanut olla pidempi joko Necuronia koneistaessa tai testiosaa koneistaessa. Mikäli terän pituus on ollut lyhyempi kiinnittimessä ja pidempi osassa, se kertaantuu mittaustuloksiin suunniteltua syvempänä koneistuksena.

Kolmas syy voi olla itse käytetyn työkalun teräpalat. PCD-inserttiä ei sinänsä ole tarkoitettu testityön kaltaiseen koneistusprosessiin. Tällöin teräpaloille ilmoitetut nirkonsäteet eivät välttämättä ole 0,5 mm, vaan ne voivat olla mitä tahansa R0,01-R0,5 mm väliltä, sillä R0,5 on valmistajan ilmoittamaa nirkonsäteen maksimimitta. Mikäli teräpalan nirkko on 0,1 mm liian pieni, se merkitsee 0,07 mm heittoa koneistetussa syvyydessä (kuva 99; kuva 100). PCD-insertissä oli koneistushetkellä melko uudet teräpalat, jotka eivät ehtineet kulua paljoa.



KUVA 99. R0.5, työkalun keskipisteen etäisyys tasosta 1,082 mm



KUVA 100. R0.4, työkalun keskipisteen etäisyys työtasosta 1,089 mm

Jälkeenpäin teräpalajyrsimiä tutkittaessa huomattiin, että teräpalajyrsin D50 oli 0,14 mm alimittainen (kuva 101). Koneistusohjelmassa ei käytetty työkalun halkaisijan kompensointia, jolloin Necuron koneistui suunniteltua paksummaksi. Tällöin hiilikuituaihion koneistuspinna on laskenut, koska hiilikuituahiota koneistaessa käytettiin samaa Necuron-kiinnittimen nollapistettä. Jälkeenpäin mietittynä terä olisi pitänyt mitata ensin, muuttaa terän halkaisijan arvo CATIA:n CAM-rataan, ja postprosessoida koneistusohjelma uudelleen.



KUVA 101. Oikea D50:n halkaisija

Seuraavia vastaavia pintoja koneistaessa olisi syytä ottaa kappaleen pinnan normaalivektoria pitkin hieman siirtymää kappaleesta poispäin. Yrityksessä tätä sanotaan kompensatioksi. Forest-Linässä tämä onnistuu mittaamalla terä, ja antamalla terälle normaalia suurempi pituusarvo. Tällainen siirtymävara olisi vastaavan kaksoiskaarevan työn osalta paljon enemmän kuin keskivaihtelu 0,12 mm. Koko testikappaleessa suurin paksuusmittavirhe on pyöristettynä 0,26 mm, jonka pitäisi toimia hyvänä kompensatiomittana. Mikäli paksuutta jää koneistamatta alueelta liikaa, kompensatiomittaa voi pienentää ja koneistusohjelman voi päivittää vastaamaan tuloksia, kuten ensimmäisissä tuotteen prototyypeissä ja työkaluissa menetellään.

Koska koneistetut paksuudet ovat tuennaltaan ja pinta-alaltaan erilaisia, varmoja johtopäätöksiä ei voida luotettavasti linjata. Kappaleen koneistettu paksuus olisi mitattava ensimmäisen työstökerran jälkeen, ja muuttaa koneistusrataa koneistuneen paksuuden mukaisesti. Mikäli kiinnitin on tarkkamuotoinen ja jykevä, ja asiakas ei vaadi tarkempia mittoja kuin $\pm 0,3$ mm, kompensatiota ei välttämättä tarvitse. Tämä olisi kuitenkin todettava ensimmäisen koneistetun tuotteen mittaamisella.

Työkalun halkaisijat olisi mitattava ennen koneistuksen aloittamista. CATIA:n ja postproessorin loogisen toiminnan vuoksi terien halkaisijoiden muuttaminen ei pitäisi viedä paljoa aikaa. Ohjelmat ja Forest-Liné eivät kuitenkaan keskustele keskenään, joten terän halkaisijan muuttamista ei saada automaattiseksi.

13.3 Pinnankarheus

Mitattu pinnankarheus oli osittain epäsäännöllinen, joka johtuu irtirepeytyneistä kuiduista ja hieman tahriintuneesta matriisista, mutta muutoin pinnanlaatu saatiin hyväksi ja jatkuvaksi 5x-objektiivilla tarkasteltuna. Pinnanlaadusta ei tarkoilla mittauksilla erottanut työkalun kaltevuuden muodostamaa sädettä tai näiden säteiden muodostamaa poimumuotoa. Pinnankarheusmittauksilla pystyttiin kuitenkin toteamaan, että koneistettu laatu on niin sileää, että useimmat mittaustavat eivät havaitsisi koneistunutta poimua.

13.4 Forest-Linéen uusiminen ja tarkkuutta parantavat mahdollisuudet

Tämän tutkimuksen valossa Forest-Liné ei ollut tarkkuutensa puolesta uusimistarpeessa. Varoetäisyyksiä ottamalla ja lämpötilan kompensoinnilla Forest-Liné voisi mahdollisesti saavuttaa alle 0,1 mm vaihteluvälin paksuuskoneistuksessa. Tärkeintä olisi määrittellä, mitä nämä varoetäisyydet ovat, ja kuinka ne syntyvät. Tämä vaatisi melko pitkäjänteistä suunnittelua terän pituuden, teräpalojen nirkonsäteen, kiinnitysten ja lämpötilakompensointien kannalta. Mittaukset voisi teoriassa toteuttaa suhteellisen pienellä vaivalla, eikä koneistustapahtumakaan tulisi olemaan kovin haastavaa verrattuna työn testiaihioon muutoin kuin ajankäytöllisesti.

13.4.1 Lisämittaukset

Forest-Linella suoritetun koneistusprosessin tarkkuudesta saa varmaa tietoa vain tekemällä lisää tarkkoja koneistustöitä ja lisämittauksia. Nämä lisämittaukset voitaisiin toteuttaa esimerkiksi tekemällä testiosasta kokonainen testisarja. Testisarja varmentaisi tuloksia, ja tämän työn toteutuksen avulla tiedetään, mitä testityön koneistuksessa olisi voitu tehdä paremmin. Mittauksia tehtäessä on kuitenkin tärkeää miettiä, halutaanko mitata sen koneistusprosessin tarkkuutta, jota Forest-Linella suoritetaan, vai jonkin koneistusprosessin osa-aluetta, esimerkiksi akseleiden tarkkuutta, työkalun mittausta tai kiinnittimen tarkkuutta.

Esimerkiksi Necuronin muoto olisi voitu jyrsiä samalla työkalulla, millä testiosan pintaa koneistettiin. Näin työkalun säde olisi pysynyt ennallaan. Samaa terää käyttämällä mahdollinen mittaustarkkuudesta syntyvä virhe kiinnittimen muotoon ei olisi vaikuttanut testiosan paksuuteen, sillä työ olisi tehty samalla halkaisijalla.

13.4.2 Kontrolloitu tila

On mahdollista, että lämpötiloista aiheutuvat mittavaihtelut saataisiin pienennettyä tekemällä Forest-Linesta kontrolloitu tila, kuten yrityksen laminointipisteestä, jossa kontrolloidaan pölyä, lämpötilaa ja kosteutta. Tämä olisi kallista ja ei välttämättä edes toimisi. Koneistuskeskuksen toiminta ja kuitujen koneistusprosessi on itsessään pölyistä ja paljon lämpötilaa tuottavaa toimintaa. Kontrolloidun tilan rakentaminen koneen ympärille vaatisi varmasti suurehkot ilmastointilaitteet, ja se veisi tilaa muulta tuotannolta. Hyötyä ei saataisi mitattua ennen kuin tila on käyttövalmis. Kosteus ei ole myöskään tarkkuuteen vaikuttava tekijä (Salmi 2018).

13.4.3 Ohjauksen uusiminen

Kallein vaihtoehto, joka tulee jossain kohtaa koneistuskeskuksen elinkaarta tehtäväksi, on ohjauksen uusiminen. Työ maksaa satoja tuhansia. Ohjauksen uusimisessa uusitaan runkoa ja akseleita lukuun ottamatta kaikki erilliset komponentit ja tietokoneohjaus. Uu-

della tietokoneohjauksella saataisiin myös reaaliaikaista tietoa koneistuskeskuksen tilasta, esimerkiksi osien kulumisesta ja lämpötilasta, jonka avulla voitaisiin tehdä tarkempia tutkimuksia koneen tarkkuudesta ja kuluvien osien vaihdosta.

13.4.4 Ilmastointi

Halvin koneistustarkkuuteen positiivisesti vaikuttava vaihtoehto on pitää tehdas paremmin ilmastoituna aina, kun kone on käytössä (Salmi 2018). Ilman lämpötilan keskiarvon ei saisi nousta eikä laskea liikaa. Tämä on huomioitava niin pitkien kuin lyhyiden seisokkien jälkeen, esimerkiksi viikonlopun, töitä aloittaessa. Olisi hyvä, jos vähemmän tarkat mittatarkkuudet vaativat kappaleet koneistettaisiin ensimmäisinä kahtena vuorona, ja vaativammat jätettäisiin myöhemmäksi. Vaativammat kappaleet ovat yleensä kookkaampia, jolloin koneistuskeskuksen volumetrinen tarkkuuskin voi olla haasteena.

13.4.5 Lasermittauslaitteet

Välittömästi tarkkuuksia parantava vaihtoehto olisi Renishawin lasermittauslaitteiden (kuva 102) asentaminen. Lasermittauslaitteiden toiminta olisi samankaltainen kuin työkeskusta kalibroivat laserputket. Laitteen prisma kiinnitettäisiin liikkuvaan koneeseen, joka heijastaa säteen takaisin. Etäisyysmuutos tulisi lasketuksi kulmaeron avulla. Laitteiston hankintahinta ei ollut suuri, noin 5–7 000 €. Asennus ja logiikka tulisi suunnitella, ja asennus maksaa, mutta verrattuna koneessa oleviin mittasauvoihin lasermittauslaitteet eivät olisi paljoa kalliimpi investointi. Pölyä ei ole näyttänyt kertyvän laitteen akseleiden päätyihin kovin paljoa, vaikka mittasauvojen ylipaineistus on otettu pois päältä (Salmi 2018). Tällöin pölyn ei pitäisi olla ongelma lasereillakaan mitatessa.



KUVA 102. Renishaw XL-80 lasermittauslaite, jonka voisi asentaa työstökeskuksen akselien päihin (Kuva: Renishaw plc)

Salmi (2018) arvioi, että lasermittauslaitteiden antama parannus koneistustarkkuuteen olisi jopa hivenen isompi verrattuna lämpötilakompensatioon, koska laser kestää olosuhdevaihtelua koneeseen verrattuna paremmin. Lisäksi mittojen muutos olisi paljon lineaarisempi, jolloin pystyttäisiin aktiivisesti kompensoimaan akselien liikkeitä (Salmi 2018).

Lasermittauslaitteita asennettaisiin kolme. Yksi mittaisi Z-akselia ja kumpaankin X-akseliin tulisi yksi. Molemmat X-akselit tarvitsisivat yhden lasermittauslaitteen, sillä akselit ovat niin isoja, että jo puolen asteen ero lämpötilassa heikentää koneistustarkkuutta olennaisesti (Salmi 2018).

14 POHDINTA

Työn tavoitteena oli selvittää koneistetun CFRP-testiosan paksuus ja pinnankarheus. Tuloksena saatiin paksuuden vaihteluväliksi koneistusprosessissa 0,12 mm, ja yhden tietyn paksuuteen koneistetun alueen vaihteluväliksi 0,07 mm. Pinnanlaadusta saatiin mittausdataa ja selvä tieto, ettei nykyisillä menetelmillä voida päästä laadukkaampaan koneistuspintaan.

Koneistustarkkuuteen on nyt mahdollista vedota uusia koneistustöitä ja laitteiston uusintaa suunniteltaessa.

Työ oli haastava, sillä teoriaa ei ollut saatavana kollektiivisena opuksena käsillä olevista lähteistä. Tietoa täytyi etsiä lukuisista artikkeleista, jotka eivät kaikki käsitelleet samoja asioita. Tiettyjä mekaanisia tapahtumia ja faktoja etsittiin paljon ristiin, sillä artikkelien kirjoittajat siteeraavat toisiaan jatkuvasti. Aina siteerattuja artikkeleita ei ole saatavilla, jolloin samaa tietoa on etsittävä muista lähteistä.

Myös suunnitelmien muutokset koneistuksen ja mittauksen kannalta muuttuivat jatkuvasti aika- ja kustannusjännitteiden seurauksena. Työssä olisi ollut hyvä mitata ja koneistaa kappaletta tai sen osa-alueita useampana päivänä koneistuskeskuksen virheen todentamiseksi, mutta tätä ei lähdetty toteuttamaan aikatauluvaatimusten vuoksi.

Koneistusparametrien vaikutuksesta pinnankarheuteen ei voitu tehdä merkittäviä johtopäätöksiä muuten kuin toteamalla sen olevan niin sileää, että sitä ei voi kallistetulla terällä koneistamalla sileämmäksi saada. Mikäli pintaa olisi saanut koneistamalla sileämmäksi, ristikkäin koneistettu alue olisi ollut sekä topografisesti että profiililtaan tasaisempaa. SEM-tarkastelu on edelleen mahdollista osalle, ja niistä saattaisi selvittää parempaa tietoa topografiasta. Mittaus vaatisi näytteen sahaaminen ristikkäin- ja poikittain koneistetun alueen rajalta.

Mikäli työtä jatketaan koneistuskeskuksen työstötarkkuuden entistä tarkemmaksi määrittämiseksi, olisi koko koneistuskeskuksen työstöalueen ja lämpötilakompensoinnin käyttäminen harkinnan arvoista. Tämä ei välttämättä vaadi kokonaista 6 m * 4 m * 1,5 m

kokoista työkappaletta, vaan idean voisi toteuttaa esimerkiksi tarkasti asentamalla työstettäviä kappaleita ympäri koneistuskeskusta paikoitusreikiin, ja koneistamaan niitä samasta CAD-mallista.

Lisäksi terän mittauksen yhteydessä tapahtuvaa virhettä olisi hyvä testata vaihtamalla teriä keskenään ja puhdistamalla niitä joka vaihdon yhteydessä. Joka vaihdon jälkeen voisi koneistaa suoran linjan CFRP:hen tai vaneriin, ja koneistuksen jälkeen mitata lopputulos. Koneistuskiinnittimen ja imun aiheuttamaa virhettä on hankala korjata, mutta ongelma voi hoitua vaativissa kappaleissa antamalla terän ja koneistettavan pinnan väliin tarpeeksi varmuusetäisyyttä. Ensimmäisen koneistuksen jälkeen aihion muodon tai paksuuden voisi mitata, jonka jälkeen voidaan päättää, koneistetaanko syvemmältä. On myös huomioitava, että työssä ei sovellettu Forest-Liné'n lämpötilakompensaatiota, joka tarkentaisi tuloksia entisestään.

Yrityksen kannalta tärkeintä on todeta, että Forest-Liné ei ole työssä tehdyn tutkimuksen valossa ainakaan välittömän uusimisen tarpeessa, sillä se pääsee lämpötilakontroloituna huomattaviin tarkkuuksiin. Koneistusalueen koko on taas asia erikseen, joka voi nykyisillä toimialan markkinoilla olla ehkä pieni. On tosin muistettava, että ilmailu- ja avaruusteollisuuden vaatimia tarkkuuksia ei ole tarkassa tiedossa. Työn lopputulos on kuitenkin hyvä markkinointiväline uusia sopimuksia tiedustellessa ja toimintaa esiteltäessä.

LÄHTEET

Amalga Composites, Inc. 2018. Machining Techniques. Luettu 17.5.2018. <http://www.amalgacomposites.com/machining-techniques.php>

Ameur, M. F., Habak, M., Kenane, M., Aouici, H. & Cheikh, M. 2016. Machinability analysis of dry drilling of carbon/epoxy composites: cases of exit delamination and cylindricity error. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 88, 2557-2571.

Alicona 2018. InfiniteFocusSL. Luettu 24.5.2018. <https://www.alicon.com/products/infinitefocussl/>

CDTooling. 2018. PCD Diamon Tipped Carbide crill bits 8 facet point. Luettu 17.5.2018. <https://www.carbideanddiamondtooling.com/PCD.Diamond.drills.8.facet.point>

Chermoshentseva, A. S., Pokrovskiy, A. M. & Bokhoeva L. A. 2016. The behavior of delaminations in composite materials – experimental results. *IOP Conference Series: Material Science and Engineering* 116.

CompositesWorld. 2014. Composites repair. Luettu 17.5.2018. <https://www.compositesworld.com/articles/composites-repair>

Duboust, N., Ghadbeigi, H., Pinna, C., Ayvar-Soberanis, S., Collis, A., Scaife, R. & Kerrigan, K. 2016. An optical method for measuring surface roughness of machined Carbon Fibre Reinforced Plastic composites. *Journal of Composite Materials* 0 (0), 1-14.

Durão, L. M. P., Tavares, J. M. R. S., de Albuquerque, V. H. C., Marques J. F. S. & Andrade, O. N. G. 2014. Drilling Damage in Composite Material. *Materials*, 7, 3802-3819.

GDP Guhdo 2012. Determining When to Sharpen PCD Tooling. Yrityksen blogijulkaisu. Luettu 24.5.2018. <https://www.guhdo.com/blog/how-to-find-out-when-tools-should-ideally-be-sharpened/>

Haddad, M., Zitoune, R., Eyma, F. & Castanie, B. 2014. Study of the surface defects and dust generated during trimming of CFRP: Influence of tool geometry, machining parameters and cutting speed range. *Composites: Part A* 66, 142-154.

Horppu, P. 2010. Komposiittien käyttö tämän päivän koneenrakennuksessa. Lappeenranta teknillinen yliopisto. Teknillinen tiedekunta. Kandidaatintutkielma.

Jimeno, J. T. 2012. Analysis of tool wear after machining on Fibre Reinforced Polymers. Vienna University of Technology. Päättyö, alempi korkeakoulututkinto.

Kevra oy 2018. Lujitteiden ominaisuuksia. Luettu 17.5.2018. <https://kevra.fi/tuotteet/lujitteet/lujitteiden-ominaisuuksia/>

Kerrigan, K. CEng MIMechE RA-CIRP Composites Machining Group Lead 2018. A curiosity in one of your articles, CFRP surface roughness. Sähköpostiviesti. k.kerrigan@sheffield.ac.uk Luettu 3.5.2018.

Kitajima, T., Horiuchi, T., Yui, A. & Ito, Y. 2016. Effect of Cutting Speed on the Face Milling of CFRP Using a PCD Tool. Materials Science Forum 874, 487-491.

Kumar, D. & Singh, K. K. 2014. An approach towards damage free machining of CFRP and GFRP composite material: a review. Advanced Composite Materials 24, No. S1, 49-63.

Kyocera Precision Tools, Inc. 2018. Vulcan Compression End Mill for Routing Composites. Luettu 17.5.2018.

http://www.kyoceraprecisiontools.com/micro/pdf/VULCAN_Compression_End_Mill_for_Composites.pdf

Maavoimat 2018. NH90-kuljetushelikopteri (NH). Luettu 4.6.2018.

<http://maavoimat.fi/nh90>

Peters Aircraft 2018. Airbus A380 Introduction. Luettu 7.6.2018.

<http://www.petersaircraft.com/A380/Presentation.html>

Defense Industry Daily 2009. South Africa to Cancel its A400M Order. Luettu 7.6.2018.

<https://www.defenseindustrydaily.com/South-Africa-to-Cancel-its-A400M-Order-05919/>

Mustakangas, M. 2018. A320 VTP Ribs. Patria oyj. Luettu 17.5.2018. Vaatii sisäänkirjautumisen.

<https://patteri.intra.zeta.alfa.local/patria-yrityksena/liiketoiminnat/aerostructures/hankkeet/A320VTPRibs/Sivut/default.aspx>

NSTool 2018. Calculation for Cutting Speed, Spindle Speed and Feed. Luettu 24.5.2018.

https://www.ns-tool.com/en/technology/technical_data/cutting_speed/

Nurhaniza, M., Ariffin, M. K. A. M., Mustapha, F. & Babarudin B. T. H. T. 2015. Analyzing the Effect of Machining Parameters Setting to the Surface Roughness during End Milling of CFRP-Aluminium Composite Laminates. International Journal of Manufacturing Engineering 2016.

Panchagnula, K. K. & Palaniyandi K. 2017. Drilling on fiber reinforced polymer/nanopolymer composite laminates: a review. Journal of Materials Research and Technology 274.

Patria Aerostructures oy 2016. Poraustestiraportti, 8.1 mm tooling hole. Sisäinen powerpoint.

Patria Aerostructures oy 2018. Tuotokuva. Sisäinen tiedosto.

Patria oyj. 2018a. Konsernirakenne. Luettu 7.6.2018.

<https://www.patria.fi/fi/patria/konsernirakenne>

Patria oyj. 2018b. Liiketoiminnat. Luettu 17.5.2018.

<https://www.patria.fi/fi/patria/konsernirakenne/liiketoiminnot>

- Patria oyj. 2018c. International Support Partnerships uudeksi liiketoiminta-alueeksi. Luettu 17.5.2018.
<https://www.patria.fi/fi/media/tiedotteet/international-support-partnerships-uudeksi-liiketoiminta-alueeksi>
- Pinjanainen, M. 2018. Kevlar. Åbo Akademi. Laboratory of Polymer Technology. Luettu 17.5.2018.
<http://web.abo.fi/fak/tkf/tpk/chemweb/kevlar.html>
- Rahman, K. H. U. 2008. Evaluation of drill bit performance for carbon-fiber composites. Wichita State University. Department of Mechanical Engineering. Päättyö, ylempi korkeakoulututkinto.
- Renishaw plc 2018. XL-80 laser measurement system. PDF-tiedosto. Luettu 4.6.2018.
<http://www.renishaw.com/media/pdf/en/5d15dd21874642ba986dbdefb6ede174.pdf>
- RobbJack Corporation. 2018. High-Performance Machining of Composite Materials. Luettu 17.5.2018.
<https://robbjack.com/support-article/high-performance-machining-of-composite-materials/>
- Saab 2018. Saab 2000 Erieve AEW&C Airborne early warning & control. Luettu 4.6.2018.
<https://saab.com/air/airborne-solutions/airborne-surveillance/saab-2000-erieve-awec/>
- Saarela, O., Airasmaa, I., Kokko, J., Skrifvars, M. & Komppa, V. 2007. Komposiittirakenteet. 2. painos. Helsinki: Muoviyhdistys ry.
- Salmi, M. konsultti. 2018. Haastattelu 29.3.2018. Haastattelija Turja, P. Jämsä. Litteroitu.
- Sloan, J. CompositesWorld. 2009. Skinning the F-35 fighter. Luettu 7.5.2018.
<https://www.compositesworld.com/articles/skinning-the-f-35-fighter>
- ThomasNet. 2018. Nadcap Certification Definition. Luettu 17.5.2018.
<https://certifications.thomasnet.com/certifications/glossary/quality-certifications/nadcap/nadcap/>
- Turner, J., Scaife, R. J. & El-Dessouky, H. M. 2015. Effect of machining coolant on integrity of CFRP composites. Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science 1 (1), 54-60.
- Tyrrell, M. Aerospace Manufacturing. 2016. Accuracy in aerospace. Luettu 7.5.2018.
<https://www.aero-mag.com/accuracy-in-aerospace/>
- Uhlmann, E., Sammler, F., Richarz, S., Heitmüller, F., Bilz, M. 2014. Machining of Carbon Fibre Reinforced Plastics. Procedia CIRP 24, 19-24.
- van Daalen, A. valmistus- / työvälaineinsinööri. Disadvantages of using our waterjet machine to make holes using the waterjet process. Sähköpostiviesti. Luettu 5.6.2018.
- Vuorinen, J., Mustakangas, M. & Annala, M. 2016. Komposiitit – loputtomasti mahdollisuuksia. Tampereen teknillinen yliopisto, Patria oyj ja Muoviteollisuus ry.

Zelinski, P. 2008. Shattering Instead Of Shearing. *Modern Machine Shop* 81, 68-79.

Zhang, H., Chen, W., Dingchang, C. & Zhang, L. 2001. Assesment of the Exit Defects in Carbon Fibre-Reinforced Plastic Plates Caused by Drilling. *Key Engineering Materials* Vols. 196, 43-52.

Zhu, J-H., Liangliang, W., Guanping, G. & Zhu, A. 2016. Mechanical and Electrochemical Performance of Carbon Fiber Reinforced Polymer in Oxygen Evolution Environment. *Polymers* 393, 1-12.

LIITTEET

Liite 1. Profilometriltä saadut kuvat ja mittausasiakirjat, pienen testikappaleen pinnankarheusmittaus, 20x objektiivi

Pinnankarheus, alue

1 (7)

Alicona Imaging GmbH
Dr.-Auner Strasse 21a
A-8074 Raaba/Graz

alicon

Measurement Report

ProfileFormMeasurement

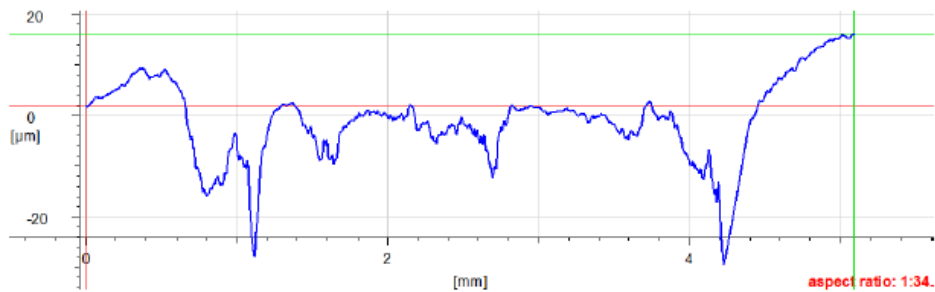
Measurement

Pinnankarheus_keskiosa_alue1x7 horizontal_20x



Alicona Imaging GmbH
Dr.-Auner Strasse 21a
A-8074 Raaba/Graz

alicon



ReferencePosition	l: 5.0948mm	z: 16.2123µm
MeasurePosition	l: 0.0000mm	z: 1.8631µm
RelativeMeasurement	Δl: -5.0948mm	Δz: -14.3492µm
	Angle: 180.1614°	Distance: 5.0948mm
Filter:	No Filter - Primary profile	

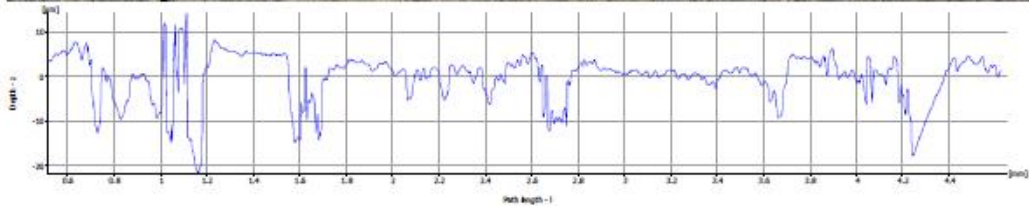
Alicona Imaging GmbH
Dr.-Auner Strasse 21a
A-8074 Raaba/Graz

alicon

Measurement Report

Profile Measurement

Pinnankarheus_keskiosa_alue1x7 horisontal_20x



Ra: 3.7919µm
Rq: 5.3125µm
Rz: 22.4123µm

Filter:

high pass - roughness profile
Lc:= 800.0000µm

Alicona Imaging GmbH
Dr.-Auner Strasse 21a
A-8074 Raaba/Graz

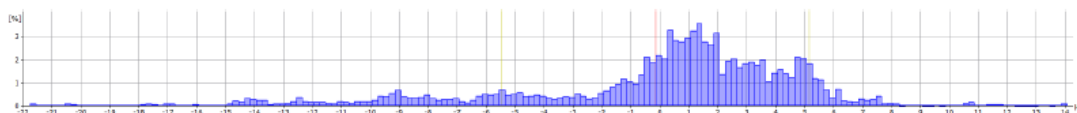
alicona

Measurement Report

Profile Roughness Measurement

Parameters of Roughness Profile

Pinnankarheus_keskiosa_alue1x7 horisontal_20x



Histogram Histogram Settings

Number of Classes: 179
Minimum Value: -21.7475µm
Maximum Value: 14.0525µm
Class Width: 0.2000µm

Statistics

Name	Value	[u]
Elements	6554	
Classes	179	
Mean Value	-0.1530	µm
Standard Deviation	5.3107	µm

Parameters

Name	Value	[u]	Description
Ra	3.7919	µm	Average roughness of profile
Rq	5.3125	µm	Root-Mean-Square roughness of profile
Rt	35.7594	µm	Maximum peak to valley height of roughness profile
Rz	22.4123	µm	Mean peak to valley height of roughness profile
Rmax	35.7594	µm	Maximum peak to valley height of roughness profile within a sampling length
Rp	14.0119	µm	Maximum peak height of roughness profile
Rv	21.7475	µm	Maximum valley height of roughness profile
Rc	19.0249	µm	Mean height of profile irregularities of roughness profile
Rsm	325.2855	µm	Mean spacing of profile irregularities of roughness profile
Rsk	-1.4089		Skewness of roughness profile
Rku	5.2050		Kurtosis of roughness profile
Rdq	0.6668		Root-Mean-Square slope of roughness profile
Rt/Rz	1.5955		Extreme Scratch/Peak value of roughness profile, (>=1), higher values represent larger scratches/peaks
l	5.1362	mm	Profile Length
Lc	800.0000	µm	LambdaC: cut off wavelength

Measurement Report

Profile Measurement

Advanced Parameters of Roughness Profile

$L_c = 800.0000\mu\text{m}$

Pinnankarheus_keskiosa_alue1x7 horisontal_20x

Mean of Profile Parameters

Name	Value	[u]	Description
mean Ra	3.8604	μm	Average roughness of profile
mean Rq	5.4235	μm	Root-Mean-Square roughness of profile
mean Rt	40.4709	μm	Maximum peak to valley height of roughness profile
mean Rz	23.3677	μm	Mean peak to valley height of roughness profile
mean Rmax	40.4709	μm	Maximum peak to valley height of roughness profile within a sampling length
mean Rp	18.7234	μm	Maximum peak height of roughness profile
mean Rv	21.7475	μm	Maximum valley height of roughness profile
mean Rc	22.3623	μm	Mean height of profile irregularities of roughness profile
mean Rsm	447.8870	μm	Mean spacing of profile irregularities of roughness profile
mean Rsk	-1.2842		Skewness of roughness profile
mean Rku	5.1858		Kurtosis of roughness profile
mean Rdq	0.7613		Root-Mean-Square slope of roughness profile
mean Rt/Rz	1.7283		Extreme Scratch/Peak value of roughness profile, (≥ 1), higher values represent larger scratches/peaks
Lc	800.0000	μm	LambdaC: cut off wavelength

Standard Deviation of Profile Parameters

Name	Value	[u]	Description
sigma Ra	43.1348	nm	Average roughness of profile
sigma Rq	130.6711	nm	Root-Mean-Square roughness of profile
sigma Rt	4.3690	μm	Maximum peak to valley height of roughness profile
sigma Rz	837.5707	nm	Mean peak to valley height of roughness profile
sigma Rmax	4.3690	μm	Maximum peak to valley height of roughness profile within a sampling length
sigma Rp	3.1427	μm	Maximum peak height of roughness profile
sigma Rv	1.2625	μm	Maximum valley height of roughness profile
sigma Rc	3.0143	μm	Mean height of profile irregularities of roughness profile
sigma Rsm	149.5726	μm	Mean spacing of profile irregularities of roughness profile
sigma Rsk	0.0279		Skewness of roughness profile
sigma Rku	0.3880		Kurtosis of roughness profile
sigma Rdq	0.0240		Root-Mean-Square slope of roughness profile
sigma Rt/Rz	0.1255		Extreme Scratch/Peak value of roughness profile, (≥ 1), higher values represent larger scratches/peaks
Lc	800.0000	μm	LambdaC: cut off wavelength

Mitta-alueen perustiedot

5 (7)

Alicona Imaging GmbH
Dr.-Auner Strasse 21a
A-8074 Raaba/Graz

alicona

Measurement Report

Surface Texture Measurement

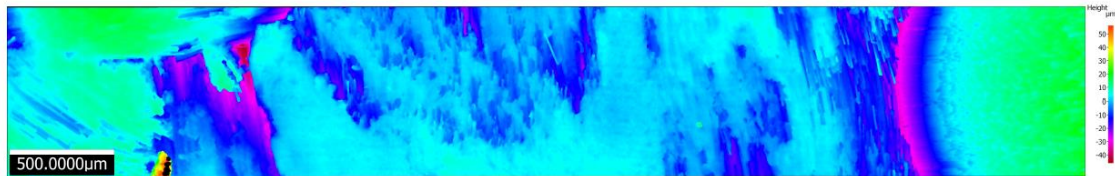
Primary Dataset

Pinnankarheus_ keskiosa_alue1x7 horisontal_20x

Metric size: 5.1498mm x 814.8453 μ m

Size: 7950 x 1258 points

2018-06-01T09:21:51



Lc: 1.0298mm

Width: 5.1492mm

Height: 814.1976 μ mTrue Area: 4.4286mm²Projected Area: 4.1533mm²

True to Projected Area Ratio: 1.0663

Area Surplus Amount: 0.0663

Alicona Imaging GmbH
Dr.-Auner Strasse 21a
A-8074 Raaba/Graz

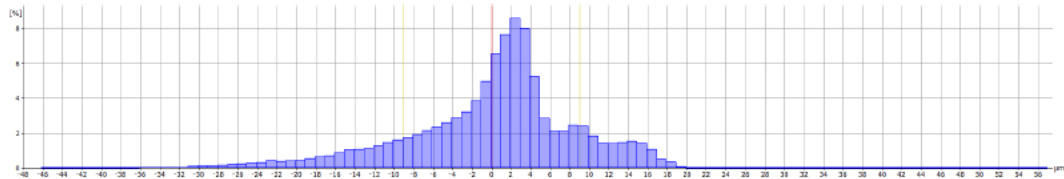
alicon

Measurement Report

Surface Texture Measurement

Surface Texture of Primary Dataset

Pinnankarheus_keskiosa_alue1x7 horisontal_20x



Histogram Histogram Settings

Number of Classes: 103
Minimum Value: -46.1324µm
Maximum Value: 56.8676µm
Class Width: 1.0000µm

Statistics

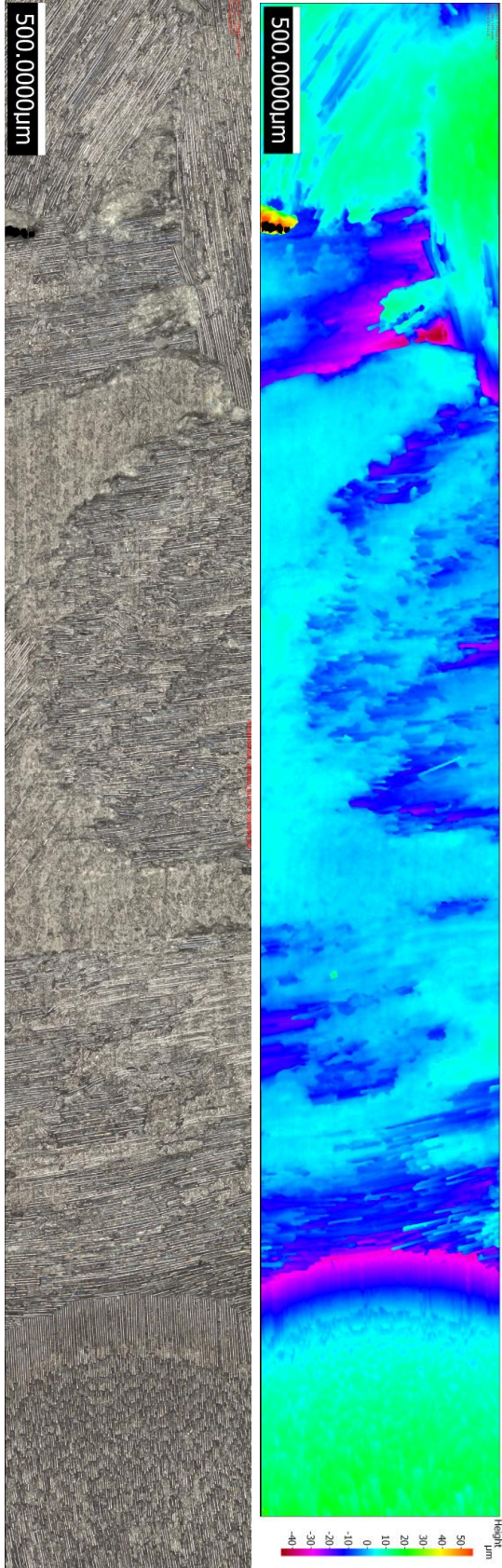
Name	Value	[u]
Elements	9907922	
Classes	103	
Mean Value	-0.0012	µm
Standard Deviation	9.0515	µm

Parameters

Name	Value	[u]	Description
Sa	6.6329	µm	Average height of selected area
Sq	9.0515	µm	Root-Mean-Square height of selected area
Sp	56.2920	µm	Maximum peak height of selected area
Sv	46.1324	µm	Maximum valley depth of selected area
Sz	102.4244	µm	Maximum height of selected area
S10z	92.2089	µm	Ten point height of selected area
Ssk	-0.6137		Skewness of selected area
Sku	4.7503		Kurtosis of selected area
Sdq	0.6295		Root mean square gradient
Sdr	12.7071	%	Developed interfacial area ratio
FLTt	102.4244	µm	Flatness using least squares reference plane

Pinnan lähikuva (vasen) ja topografia

7 (7)



Liite 2. Ristikkäinkoneistetun kappaleen pääty, risteävät koneistusradat

Profiilin yleiskuva

1 (7)

Alicona Imaging GmbH
Dr.-Auner Strasse 21a
A-8074 Raaba/Graz

alicona

Measurement Report

ProfileFormMeasurement

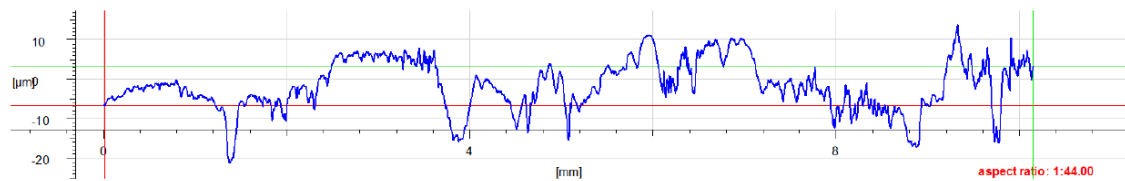
Preview

Isokappale_yleiskuva pääty2_alue_20x



Alicona Imaging GmbH
Dr.-Auner Strasse 21a
A-8074 Raaba/Graz

alicona



ReferencePosition

l: 1.0163cm

z: 3.2999µm

MeasurePosition

l: 0.0000nm

z: -6.6802µm

RelativeMeasurement

 Δ l: -1.0163cm Δ z: -9.9801µm

Angle: 180.0563°

Distance: 1.0163cm

Filter:

No Filter - Primary profile

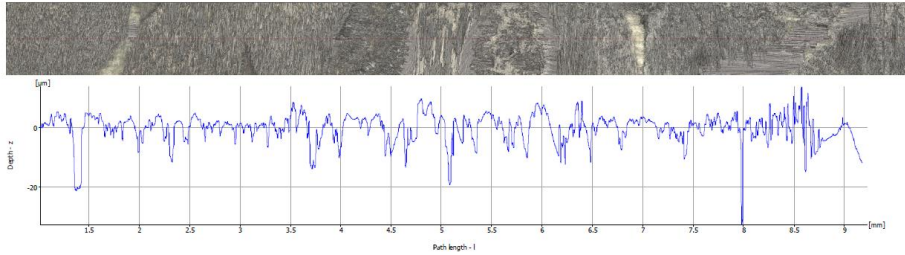
Profiilin pinnankarheus

2 (7)

Alicona Imaging GmbH
Dr.-Auner Strasse 21a
A-8074 Raaba/Graz

alicona**Measurement Report****Profile Measurement**

Isokappale_yleiskuva pääty2_alue_20x



Ra: 3.4541µm
Rq: 4.8261µm
Rz: 29.3529µm

Filter:

high pass - roughness profile
Lc:= 800.0000µm

Alicona Imaging GmbH
Dr.-Auner Strasse 21a
A-8074 Raaba/Graz

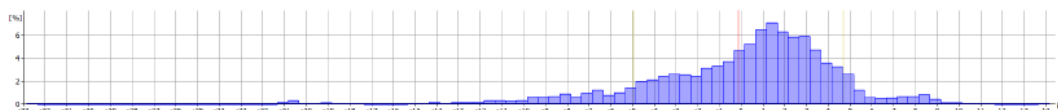
alicona

Measurement Report

ProfileRoughnessMeasurement

Parameters of Roughness Profile

Isokappale_yleiskuva pääty2_alue_20x



Histogram Histogram Settings

Number of Classes: 94
Minimum Value: -32.8417µm
Maximum Value: 14.1583µm
Class Width: 0.5000µm

Statistics

Name	Value	[u]
Elements	13108	
Classes	94	
Mean Value	-0.1254	µm
Standard Deviation	4.8246	µm

Parameters

Name	Value	[u]	Description
Ra	3.4541	µm	Average roughness of profile
Rq	4.8261	µm	Root-Mean-Square roughness of profile
Rt	46.7462	µm	Maximum peak to valley height of roughness profile
Rz	29.3529	µm	Mean peak to valley height of roughness profile
Rmax	46.7462	µm	Maximum peak to valley height of roughness profile within a sampling length
Rp	13.9045	µm	Maximum peak height of roughness profile
Rv	32.8417	µm	Maximum valley height of roughness profile
Rc	19.3993	µm	Mean height of profile irregularities of roughness profile
Rsm	382.6926	µm	Mean spacing of profile irregularities of roughness profile
Rsk	-1.6026		Skewness of roughness profile
Rku	8.1531		Kurtosis of roughness profile
Rdq	0.5657		Root-Mean-Square slope of roughness profile
Rt/Rz	1.5926		Extreme Scratch/Peak value of roughness profile, (≥ 1), higher values represent larger scratches/peaks
l	1.0195	cm	Profile Length
Lc	800.0000	µm	LambdaC: cut off wavelength

Alicona Imaging GmbH
Dr.-Auner Strasse 21a
A-8074 Raaba/Graz

alicona

Measurement Report

Profile Measurement

Advanced Parameters of Roughness Profile

$L_c = 800.0000\mu\text{m}$

Isokappale_yleiskuva pääty2_alue_20x

Mean of Profile Parameters

Name	Value	[u]	Description
mean Ra	3.4697	μm	Average roughness of profile
mean Rq	4.8561	μm	Root-Mean-Square roughness of profile
mean Rt	48.3016	μm	Maximum peak to valley height of roughness profile
mean Rz	30.0474	μm	Mean peak to valley height of roughness profile
mean Rmax	48.3016	μm	Maximum peak to valley height of roughness profile within a sampling length
mean Rp	15.4592	μm	Maximum peak height of roughness profile
mean Rv	32.8424	μm	Maximum valley height of roughness profile
mean Rc	20.4412	μm	Mean height of profile irregularities of roughness profile
mean Rsm	430.7668	μm	Mean spacing of profile irregularities of roughness profile
mean Rsk	-1.5907		Skewness of roughness profile
mean Rku	8.1472		Kurtosis of roughness profile
mean Rdq	0.6204		Root-Mean-Square slope of roughness profile
mean Rt/Rz	1.6082		Extreme Scratch/Peak value of roughness profile, (≥ 1), higher values represent larger scratches/peaks
Lc	800.0000	μm	LambdaC: cut off wavelength

Standard Deviation of Profile Parameters

Name	Value	[u]	Description
sigma Ra	16.9823	nm	Average roughness of profile
sigma Rq	35.4132	nm	Root-Mean-Square roughness of profile
sigma Rt	2.4172	μm	Maximum peak to valley height of roughness profile
sigma Rz	417.0967	nm	Mean peak to valley height of roughness profile
sigma Rmax	2.4172	μm	Maximum peak to valley height of roughness profile within a sampling length
sigma Rp	2.4237	μm	Maximum peak height of roughness profile
sigma Rv	56.0536	nm	Maximum valley height of roughness profile
sigma Rc	1.3402	μm	Mean height of profile irregularities of roughness profile
sigma Rsm	79.1379	μm	Mean spacing of profile irregularities of roughness profile
sigma Rsk	0.0442		Skewness of roughness profile
sigma Rku	0.1022		Kurtosis of roughness profile
sigma Rdq	0.0236		Root-Mean-Square slope of roughness profile
sigma Rt/Rz	0.0940		Extreme Scratch/Peak value of roughness profile, (≥ 1), higher values represent larger scratches/peaks
Lc	800.0000	μm	LambdaC: cut off wavelength

Alueen yleiskuva

Alicona Imaging GmbH
Dr.-Auner Strasse 21a
A-8074 Raaba/Graz

5 (7)

alicona

Measurement Report

Surface Texture Measurement

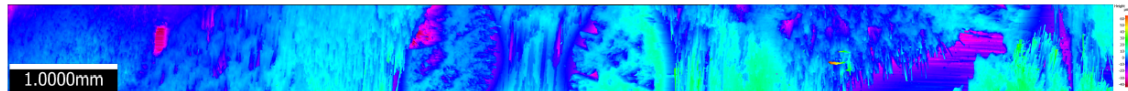
Primary Dataset

Isokappale_yleiskuva pääty2_alue_20x

Metric size: 1.0214cm x 818.3689 μ m

Size: 11172 x 895 points

2018-06-01T12:04:13



Lc: 2.0426mm

Width: 1.0213cm

Height: 817.4546 μ m

True Area: 9.2086mm²

Projected Area: 8.2476mm²

True to Projected Area Ratio: 1.1165

Area Surplus Amount: 0.1165

Alicona Imaging GmbH
Dr.-Auner Strasse 21a
A-8074 Raaba/Graz

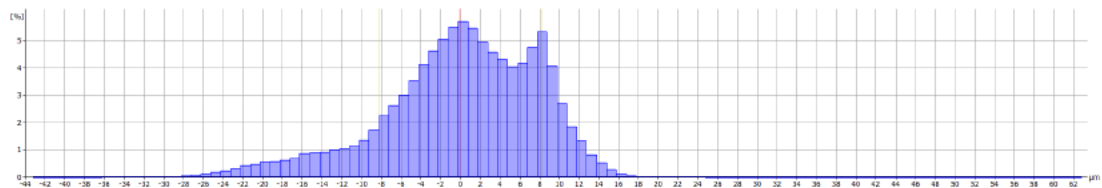
alicona

Measurement Report

Surface Texture Measurement

Surface Texture of Primary Dataset

Isokappale_yleiskuva pääty2_alue_20x



Histogram Histogram Settings

Number of Classes: 106
Minimum Value: -43.2403µm
Maximum Value: 62.7597µm
Class Width: 1.0000µm

Statistics

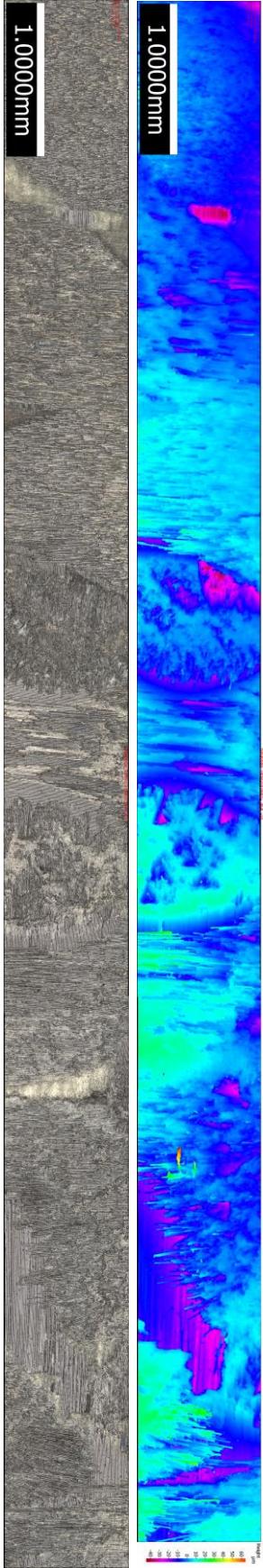
Name	Value	[u]
Elements	9868723	
Classes	106	
Mean Value	-0.0006	µm
Standard Deviation	8.1911	µm

Parameters

Name	Value	[u]	Description
Sa	6.3086	µm	Average height of selected area
Sq	8.1911	µm	Root-Mean-Square height of selected area
Sp	62.5598	µm	Maximum peak height of selected area
Sv	43.2403	µm	Maximum valley depth of selected area
Sz	105.8001	µm	Maximum height of selected area
S10z	78.7375	µm	Ten point height of selected area
Ssk	-0.7016		Skewness of selected area
Sku	4.2632		Kurtosis of selected area
Sdq	0.8606		Root mean square gradient
Sdr	20.8155	%	Developed interfacial area ratio
FLTt	105.8001	µm	Flatness using least squares reference plane

Pinnan lähikuva (vasen) ja topografia

7 (7)



Liite 3. Mittauspöytäkirjat

1 (2)

Paksuusmittaus (A-1, A-2, A-3, B-1, B-2, C-1, C-2)

N / Alue (mm)	A-1	A-2	A-3	A paikka (mm)	B-1	B-2	C-1	C-2	B & C paikka (mm)
N1	2,92	2,94	2,94	0	2,2	2,22	2,18	2,2	0
N2	2,96	2,94	2,94	30	2,22	2,22	2,2	2,2	30
N3	2,94	2,94	2,94	60	2,22	2,22	2,22	2,2	60
N4	2,96	2,94	2,94	90	2,24	2,22	2,22	2,2	90
N5	2,94	2,94	2,96	120					

CAD-mallin mitta vähennettynä paksuudesta (A-1, A-2, A-3, B-1, B-2, C-1, C-2)

CATIA-vähennys	A-1	A-2	A-3	A paikka (mm)	B-1	B-2	C-1	C-2	B & C paikka (mm)
N1	-3,132	-3,132	-3,132	0	-2,382	-2,382	-2,382	-2,382	0
N2	-3,132	-3,132	-3,132	30	-2,382	-2,382	-2,382	-2,382	30
N3	-3,132	-3,132	-3,132	60	-2,382	-2,382	-2,382	-2,382	60
N4	-3,132	-3,132	-3,132	90	-2,382	-2,382	-2,382	-2,382	90
N5	-3,132	-3,132	-3,132	120					

Pitkä ja lyhyt sivu, sekä niiden CAD-mallivähennykset

2 (2)

P sivu	CATIA P	Paikka	Uusi L sivu	CATIA L	Paikka
1,835	-0,247	0	2,822	-0,16	0
1,854	-0,228	25	2,83	-0,152	40
1,883	-0,199	50	2,83	-0,152	80
1,893	-0,189	75	2,83	-0,152	120
1,893	-0,189	100	2,815	-0,167	160
1,879	-0,203	125	2,79	-0,192	200
1,89	-0,192	150	2,798	-0,184	240
1,875	-0,207	175	2,76	-0,222	280
1,864	-0,218	200	2,785	-0,197	320
1,875	-0,207	225	2,782	-0,2	360
1,877	-0,205	250	2,772	-0,21	400
1,871	-0,211	275	2,793	-0,189	440
1,869	-0,213	300	2,784	-0,198	480
1,878	-0,204	325	2,777	-0,205	520
1,866	-0,216	350	2,783	-0,199	560
1,86	-0,222	375	2,788	-0,194	600
1,866	-0,216	400	2,789	-0,193	640
1,867	-0,215	425	2,791	-0,191	680
1,856	-0,226	450	2,79	-0,192	720
1,854	-0,228	475	2,798	-0,184	760
1,85	-0,232	500	2,798	-0,184	800
1,853	-0,229	525	2,793	-0,189	840
1,848	-0,234	550	2,8	-0,182	880
1,848	-0,234	575	2,798	-0,184	920
1,848	-0,234	600	2,785	-0,197	960
1,83	-0,252	625	2,81	-0,172	1000
1,836	-0,246	650	2,8	-0,182	1040
1,83	-0,252	675	2,803	-0,179	1080
1,832	-0,25	700	2,795	-0,187	1120
1,845	-0,237	725			
1,84	-0,242	750			
1,835	-0,247	775			
1,831	-0,251	800			
1,837	-0,245	825			
1,831	-0,251	850			
1,823	-0,259	875			
1,838	-0,244	900			
1,855	-0,227	925			
1,838	-0,244	950			
1,84	-0,242	975			
1,837	-0,245	1000			
1,847	-0,235	1025			
1,854	-0,228	1050			
1,843	-0,239	1075			
1,85	-0,232	1100			
1,852	-0,23	1125			
1,86	-0,222	1150			
1,865	-0,217	1175			
1,856	-0,226	1200			
1,851	-0,231	1225			
1,861	-0,221	1250			
1,864	-0,218	1275			
1,871	-0,211	1300			
1,872	-0,21	1325			
1,876	-0,206	1350			
1,886	-0,196	1375			
1,884	-0,198	1400			
1,868	-0,214	1425			
1,869	-0,213	1450			
1,854	-0,228	1475			