



Jiri Toivanen

# Turbon kompressorisiiven käänteinen suunnittelu ja valmistus

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Konetekniikka

Insinöörityö

20.5.2023

## Tiivistelmä

Tekijä:	Jiri Toivanen
Otsikko:	Turbon kompressorisiiven käänteinen suunnittelu ja valmistus
Sivumäärä:	56 sivua + 2 liitettä
Aika:	20.5.2023
Tutkinto:	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma:	Konetekniikan tutkinto-ohjelma
Ammatillinen pääaine:	Koneensuunnittelu
Ohjaajat:	Lehtori Tero Karttiala

---

Tämän insinööriyön tarkoituksena oli valmistaa turbon kompressorisiivestä tarkka kopia hyödyntäen käänteistä suunnittelua. Työn tilaajana toimi Metropolia Oy. Valmistus toteutettiin 5-akselisesti koneistamalla. Mallikappale oli turboahtimen kompressorisiipi.

Opinnäytetyön vaiheisiin kuului mittaaminen, mallintaminen, työstöratojen suunnittelu ja lopuksi vielä itse kappaleen valmistus 5-akselisesti. Mittaaminen toteutettiin Metropolian omalla koordinaattimittalaitteella, jota hallittiin PCDMIS-ohjelmalla. Mallintaminen ja työstöratojen suunnittelu tehtiin Siemens NX:llä. Itse valmistus toteutettiin koneaan 5-akselisella Haas UMC-750 -työstökeskuksella.

Lopputulokseen oltiin erittäin tyytyväisiä ja kaikki tavoitteet saavutettiin. Viimeistelyn taso oli hyvä, ja suurimmilta ongelmilta vältyttiin.

Avainsanat: 5-akselinen työstö, koneistus, CNC, PCDMIS, Haas, UMC-750

## Abstract

Author: Jiri Toivanen  
Title: Designing and Manufacturing a Turbo Compressor Wheel Using Reverse Engineering  
Number of Pages: 56 pages + 2 appendices  
Date: 20 May 2023

Degree: Bachelor of Engineering  
Degree Programme: Mechanical Engineering  
Professional Major: Mechanical Design  
Supervisors: Senior Lecturer Tero Karttiala

---

The purpose of this Bachelor's thesis was to manufacture a turbo compressor wheel with a 5-axis CNC machine using reverse engineering. The purpose of reverse engineering is to produce an exact copy of an already manufactured object. The Bachelor's thesis was assigned by Metropolia. All of the manufacturing was carried out with Metropolia's machinery. The compressor wheel was manufactured out of aluminium, which was kindly provided by Alumeco Oy.

This thesis included several stages. The original compressor wheel was first measured using Metropolia's own Hexagon Global Performance Coordinate measuring machine, which was controlled by PCDMIS software. Measurement results came in the form of a point cloud, which was used to create a 3D model of the compressor wheel. Siemens NX was used for modelling and also for the designing of CAM lines. With a post process program the CAM lines were converted into G-code. This G-code was then transferred into a Haas UMC-750 CNC machine for the actual manufacturing. Because of the complicated shape of the compressor wheel, manufacturing had to be made using 5-axis machining.

All the stages went really well, considering that most of them were less familiar prior to this thesis. Using the measuring machine was quite intuitive but the PCDMIS software needed some time to get used to. Siemens NX was a very effective and versatile software. Also using the same software with modelling and with the CAM lines, came with the benefit of not having any compatibility issues. Manufacturing stage was mostly quite straight forward. Thanks to careful preparation, well-made models and CAM lines, no major issues occurred during manufacturing. The quality of the final product was really good, and every goal was achieved.

Keywords: 5-axis, machining, CNC, PCDMIS, Haas, UMC-750

# Sisällys

## Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Mallikappale	2
3	Turbo yleisesti	4
4	Valmistusmenetelmä	5
5	Mittaaminen	7
6	Mallintaminen	10
6.1	Siipipyörän mallintaminen	10
6.2	Aihoiden mallintaminen	16
6.3	Jigin mallintaminen	18
7	Työstöarvojen suunnittelu	19
7.1	Pohjan työstöarvot	21
7.2	Yläpuolen työstöarvot	24
7.3	Shroud työstöarvot	26
7.4	Siipipyörän työstöarvot	26
7.4.1	Rouhinta – Impeller Rough	27
7.4.2	Viimeistely – Hub Finish	32
7.4.3	Viimeistely – Blade Finish	35
8	Työstöarvot	38
9	Valmistus	40
9.1	Pohjan valmistus	40
9.2	Päälipinnan valmistus	43
9.3	Shroud-pinnan valmistus	46
9.4	Siipien valmistus	46
10	Yhteenveto	55
	Lähteet	57

## Liitteet

Liite 1: Alumeca AL2011:n materiaalitodistus

Liite 2: Työkalujen työstöarvotaulukko

## **Lyhenteet**

CAD: Computer aided design. Tietokoneavusteinen suunnittelu.

CAM: Computer aided manufacturing. Tietokoneavusteinen valmistus.

CNC Computerized Numerical Control. Tietokoneistettu numeerinen ohjaus.

## 1 Johdanto

Tämän insinööriyön tarkoituksena oli valmistaa 5-akselisesti koneistamalla turbon kompressorisiivestä tarkka kopio hyödyntäen käänteistä suunnittelua. Käsite tunnetaan englanniksi nimellä Reverse Engineering. Käänteisen suunnittelun tarkoituksena on valmistaa tarkka kopio jo valmistetusta kappaleesta. Insinööriyön tilaaja oli Metropolia Oy. Työssä syntynyttä materiaalia voitaisiin myöhemmin hyödyntää opetuksessa.

Työvaiheisiin kuului mallikappaleen mittaaminen, 3D-mallin ja työstöratojen luominen sekä valmistus koneistamalla. Mittaaminen toteutettiin Metropolian koodinaattimittalaitteella. 3D-mallin ja työstöratojen suunnittelu toteutettiin Siemens NX -ohjelmistolla. Valmistus toteutettiin Metropolian 5-akselisella Haas UMC 750 -työstökeskuksella. Viimeistelty kompressorisiipi näkyy kuvassa 1.



Kuva 1. Koneistamalla valmistettu kompressorisiipi.

## 2 Mallikappale

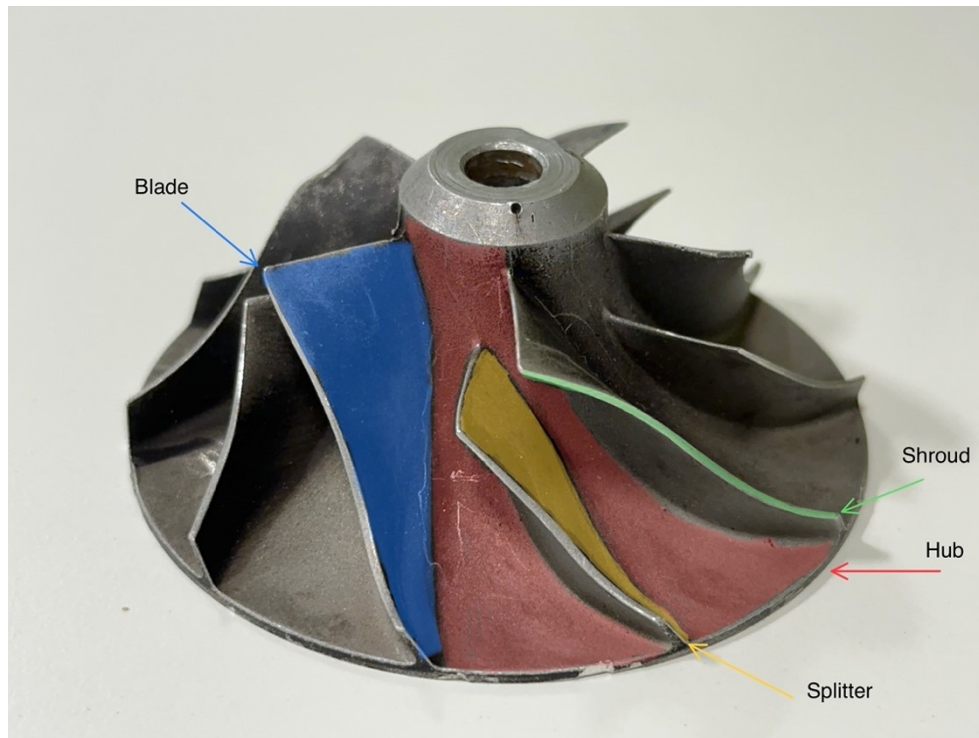
Siipipyörän muoto saatiin mallikappaleesta. Kuvassa 2 näkyvä mallikappale oli peräisin rikkoutuneesta Toyota Celican pakokaasuahtimeesta. Kompressorisiivestä oli vain muutama siipi ehjänä, mutta muuten vaikutti ehjältä. Täysin ehjän kopion valmistukseen tarvittiin mitat ainoastaan yhdestä ehjästä siivestä, sillä siivet ovat samanlaisia. Kompressorisiivessä on yhteensä viisi isompaa pääsiipeä ja näiden välissä pienempi splitter-siipi, yhteensä kymmenen siipeä.

Siipipyörän osien nimet ovat peräisin Siemens NX:n CAM-moduulista. Nämä olivat piirteitä, jotka täytyi määritellä jokaista operaatiota varten. Osat olivat hub, blade, splitter ja shroud. Osat ovat selkeästi näkyvillä kuvassa 3.



Kuva 2. Alkuperäinen kompressorisiipi.





Kuva 3. Kompressorisiiven osat.

Alkuperäisen siipipyörän materiaali oli Metropolian LIBS-mittauslaitteen perusteella AL4043. Mittalaite näkyy kuvassa 4. Tämän alumiinin pääseosaine on pii, joka viittaa siihen, että kappale on valmistettu valamalla (Karttiala 2022). Pakokaasuahtimen kompressorisiiven lämpötila voi korkeimmillaan olla jopa 200 °C. AL4032:n maksimitoimintalämpötila on suunnilleen samaa luokkaa (Turboahdin toiminta). Tässä työssä materiaali valittiin ensisijaisesti materiaalin ominaisuuksien perusteella.

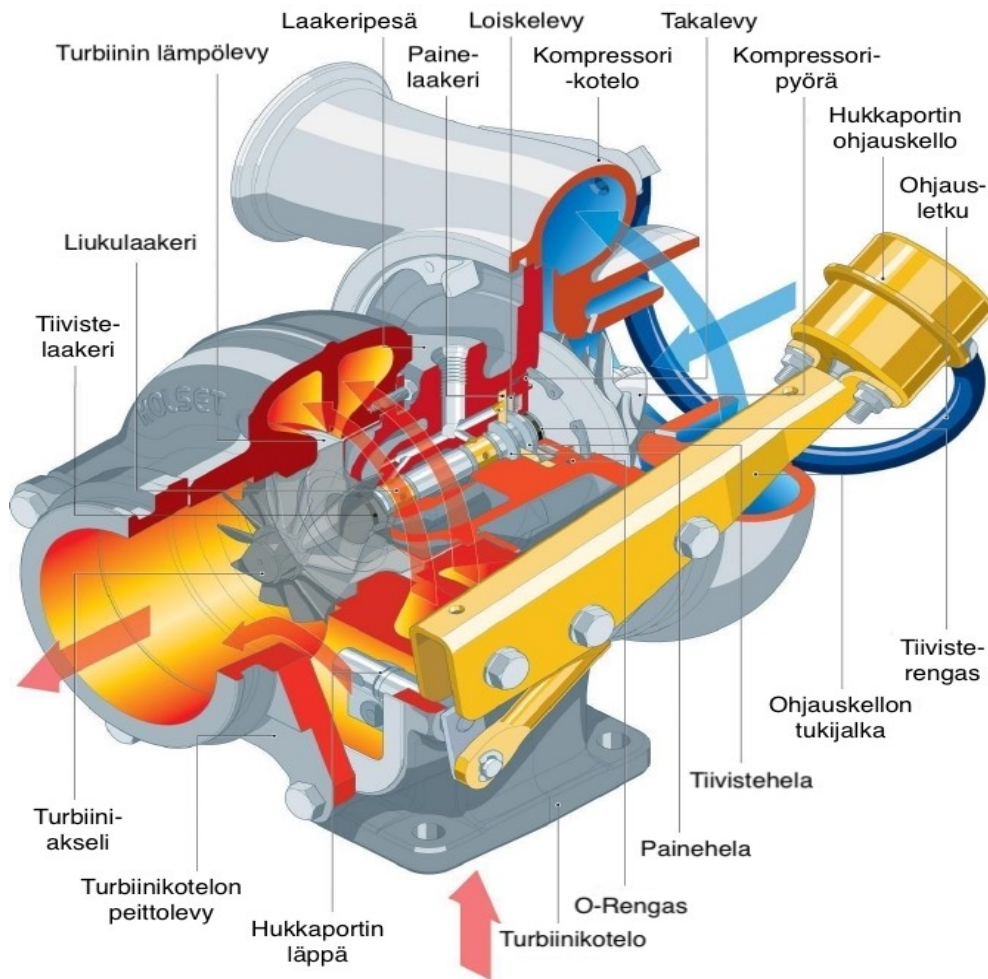
Työkappaleen materiaaliksi valittiin AL2011. Tämän alumiinin pääseosaine on kupari (liite 1). AL2011 on myös hiukan kovempaa kuin perinteiset alumiinit ja sen maksimitoimintalämpötila on yli 200 °C (Eklund 2022). Työstön kannalta tämä ei kuitenkaan aiheuttanut ongelmaa. Materiaalin toimitti ystävällisesti yhteistyössä Alumeco Oy.



Kuva 4. LIBS-mittauslaite.

### 3 Turbo yleisesti

Lopulta valmistettu siipipyörä oli tarkoitus asentaa turboahtimeen. Kappale täytyisi tasapainottaa ammattilaisen toimesta ennen asennusta. Kompressorisiipipyörii parhaimmillaan 150 000 kierrosta minuutissa, joten tasapainotus pakollinen. Turboahtimen rakenne näkyy kuvassa 5. Turboahtimen perusidea on yksinkertainen. Pakoputkesta tuleva pakokaasu on hukkaan mennyttä energiaa, jonka turboahdin käyttää hyödyksi. Pakokaasu pyörittää turbon turbiinisiipeä, ja samalla akselilla olevaa kompressorisiipipyörää. Kompressorisiipi pakottaa eli ahtaa, pyöriessään enemmän ilmaa sylinterin palotilaan. Näin moottorista saadaan enemmän tehoa irti, ja hyötysuhde on niin kutsuttua vapaasti hengittävää moottoria parempi. Turbo ei ainoastaan kasvata moottorin tehoa, vaan myös tekee moottorista taloudellisemman. (Turboahdin toiminta.)



Kuva 5. Yleiskuva turboahtimesta (Turboahdin toiminta).

#### 4 Valmistusmenetelmä

Pienen valmistusmäärän takia valmistusmenetelmä kyettiin valitsemaan vapaammin. Kappale valmistettiin koneistamalla yhdestä kappaleesta. Siipipyörän haasteellisen muodon vuoksi valmistus toteutettiin 5-akselisesti Haasin UMC-750 -työstökeskuksella, joka näkyy kuvassa 6. Tähän päädyttiin monestakin syystä. Ensinnäkin siipipyörän muoto olisi ollut hyvin hankala valmistaa perinteisillä valmistusmenetelmillä. Muoto käytännössä vaati 5-akselisen valmistuksen. Toisekseen Metropolian tiloissa oli 5-akselinen Haas UMC-750 -työstökone vapaasti käytettävissä. (Karttiala 2022.)



Kuva 6. Haas UMC-750 -työstökone.

Tämän lisäksi 5-akselinen työstö vaati vähemmän kiinnityksiä. Vähemmän kiinnityksiä pienentää uudelleen kiinnityksestä aiheutuvaa epätarkkuutta (Karttiala 2022). Painavin syy menetelmän valitsemiseen oli puhtaasti kiinnostus valmistusmenetelmää kohtaan.

Keskeisin ero, miten 5-akselinen työstö eroaa perinteisestä 3-akselisesta työstöstä, on luonnollisesti akselien määrä. Tämä tarkoittaa, että liikkuvia suuntia työstön aikana on enemmän. Työstökoneen rakenteesta riippuen akselien määrä ja suunta vaihtelee. Usein on kuitenkin kyseessä vaihteleva määrä lineaarisia ja pyöriviä akseleita. Metropolian Haas-työstökeskuksessa akseleita on 5. Nämä ovat x, y, z, b ja c. Työstökoneen terä liikkuu sivu-, syvyys- ja korkeussuunnassa. Nämä ovat x-, y-, ja z-suunnat. Haasin tapauksessa kaksi lisäakselia ovat b- ja c-akseli. B-akseli pyörii y-akselin ympäri, ja c-akseli pyörii z-akselin ympäri. Näin syntyy 5 akselia. C-akselin pyörivän liikkeen Haasin tapauksessa toteuttaa pyörivä pöytä. Pöytä on taas kiinnitetty eräänlaisen kehdon sisään, joka nimensä mukaisesti keinuu. Tämä on b-akselin liike. Tämä näkyy kuvassa 7. (Apro 2008: 14.)



Kuva 7. Pöytä kallistettuna 5-akselisessa työstössä.

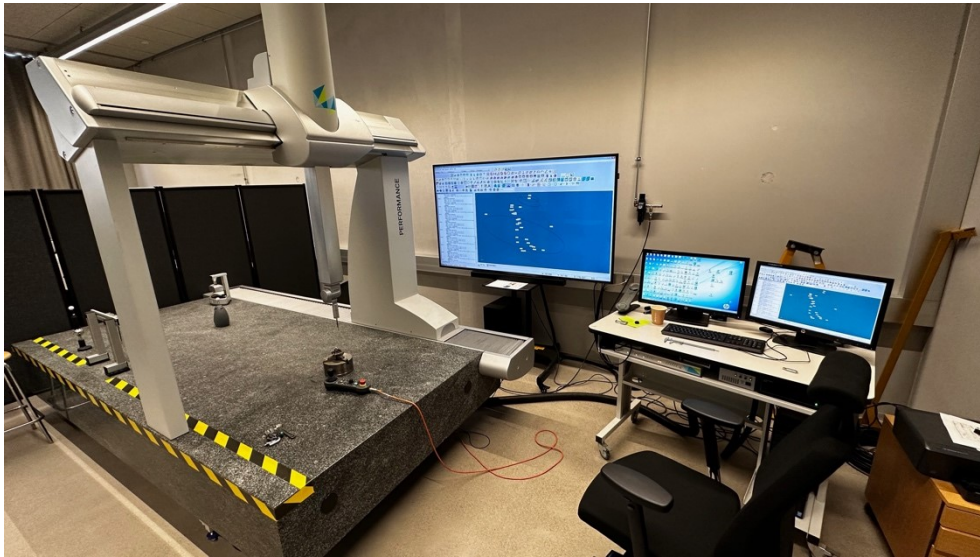
Työstökone kykenee liikkumaan kaikkien näiden 5:n akselinsa suhteen samanaikaisesti, joka mahdollistaa hankalien muotojen työstämisen.

Monimutkaisia kaarevia pintoja pystyy valmistamaan myös perinteisillä menetelmillä, kuten 3-akselisesti jyrsimällä tai sorvaamalla. Tämä kuitenkin lisää työvaiheiden ja samalla kiinnityksien määrää. Mitä useampaan kertaan työkappaletta kiinnitetään uudestaan, sitä enemmän uudelleen kiinnittämisestä johtuvia paikoitusvirheitä syntyy. 5-akselisessa työstössä kappale voidaan valmistaa parhaimmassa tapauksessa yhdellä kiinnityksellä. (Karttiala 2022.)

## 5 Mittaaminen

Työvaiheita oli loppujen lopuksi jonkin verran. Käänteinen suunnittelu alkaa mallikappaleen mittaamisella. Muoto saatiin talteen pistepilven muodossa mittaamalla mallikappale Hexagon Global Performance -koordinaattimittalaitteella. Mittalaitetta hallittiin PCDMIS-ohjelmistolla.

Siipipyörän reikä mitattiin kolmipistemikrometrillä ja suuntaa antavat mitat mitattiin työntömitalla. Koordinaattimittalaite nähtävissä kuvassa 8.

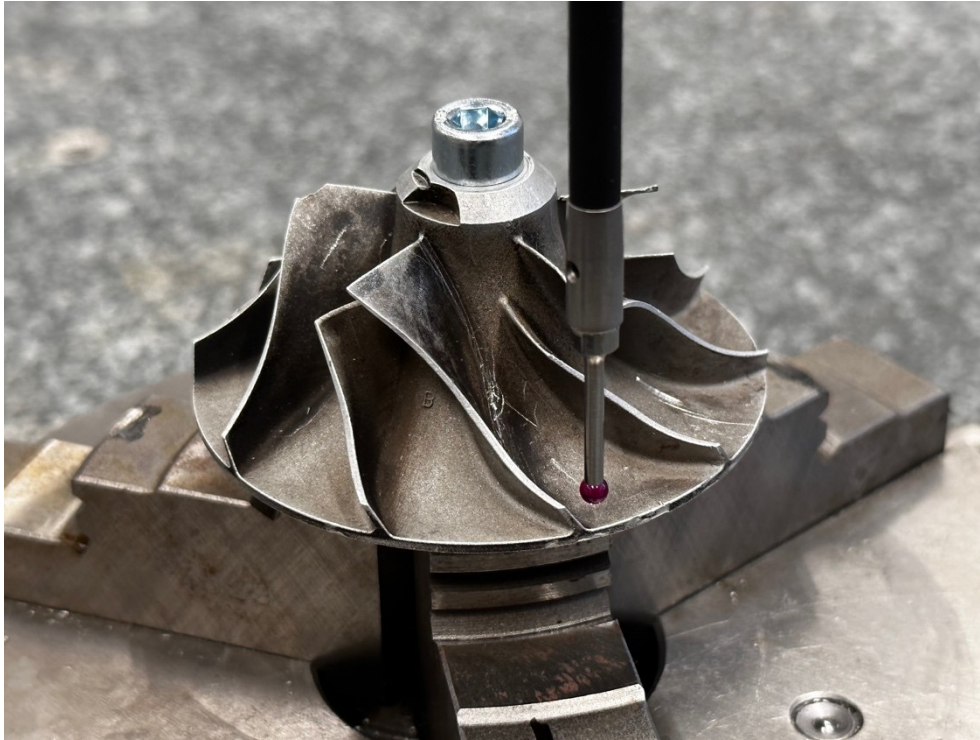


Kuva 8. Koordinaattimittalaite Metropolian mittalaboratoriossa.

Mittalaite tallentaa sijaintipisteitä koordinaatistoon, kun kappaleen pintaa kosketaan mittapäällä. Mitattava kappale asetetaan esimerkiksi ruuvipenkkiin, joka on asetettu mittalaitteen rungon päälle. Mittatikku liikkuu rungon päällä kiskoilla ja voi tehdä mittauksen kaikista suunnista paitsi alhaalta. Tätä kuitenkin hiukan rajoittaa mittapään asento, joka on joko alaspäin tai osoittaen oikealle. Tämä tarkoittaa sitä, että määrättyjen pintojen mittaaminen ei onnistu kuin joko ylhäältä tai vasemmalta päin.

Mitattava kappale asetetaan ruuvipenkkiin tukevasti, eikä sitä voi poistaa ennen kuin kaikki mittaukset ovat tehty (Jalava-Kanervio 2022). Tämän takia siipipyörästä otettiin mahdollisimman monta pistettä, jotta muoto saatiin varmasti talteen. Haasteena mallikappaleen mittaamisessa oli sen koko. Siipipyörän pohjan halkaisija oli 65 mm, ja ahtaimmat siipien välit olivat vain 6–7 mm. Itse mittatikuksen päässä on rubiiniuula, jonka halkaisija oli 3 mm (Karttiala 2022). Tarkan mallin luomiseksi mittoja piti ottaa useasta kohtaa. Mallikappaleen äärimittojen lisäksi mitattavana oli hub, siipi eli blade ja pienempi splitter-siipi. Hubin mittaaminen piti tehdä useammasta eri suunnasta, koska kyseessä oli kaareva pinta, jonka

normaalisuunta muuttui alhaalta ylöspäin mentäessä melkein  $90^\circ$ . Mittausta haittasivat myös muut siivet, koska ne olivat niin lähellä. Hubin pinnasta otettiin yhteensä noin 10 mittauspistettä. Hubin mittaamista näkyy kuvassa 9.



Kuva 9. Mallikappaleen hubin mittaus.

Siipien muodon mittaamista täytyikin ajatella huomioiden tuleva mallintaminen. Mallinnustyökalut, joita tulitisiin käyttämään, toimivat paremmin, kun spline-viivat oli asetettu siiven pintaan poikittain. Tämä tarkoitti, että oli suotavaa mitata siiven pinnasta pisteitä tasaisin välein, edeten siiven johtoreunasta jättöreunaan. Pisteiden avulla pystyttäisiin luomaan siiven pintaan poikittaisia viivoja, joiden avulla saatiin luotua sulava pinta.

Ahtaat siipien välit osoittautuivat siipien mittaamisessa ongelmaksi. Mittalaite teki mittauksen jälkeen eräänlaisen automaattisen vetäytymisen, ja tämä oli asetettu liian suureksi. Tämä aiheutti sen, että mittauksen jälkeen mittapää törmäsi viereiseen siipeen aiheuttaen virheen. Ongelma saatiin kuitenkin ratkaistua säätämällä liikkeen pituutta asetuksista pienemmäksi. Siiven pinnasta lopulta mitattiin pisteitä koko siiven matkalta kolmelta eri linjalta: kummastakin

reunasta ja keskeltä. Näin saatiin mallinnusvaiheessa luotua spline-viivoja siiven pintaan poikittain tasaisin välein.

## 6 Mallintaminen

Mallintamiseen käytettiin Siemens NX -ohjelmistoa. Ohjelmisto valittiin sekä saatavuuden että aikaisemman kokemuksen ja osaamisen takia. Valintaan vaikutti myös se, että myös työstöratujen suunnittelu tapahtui samalla ohjelmistolla. Tämä helpotti mallin muokkaamista kesken työstöratujen suunnittelun, ja samalla välttyttiin yhteensopivuusongelmilta.

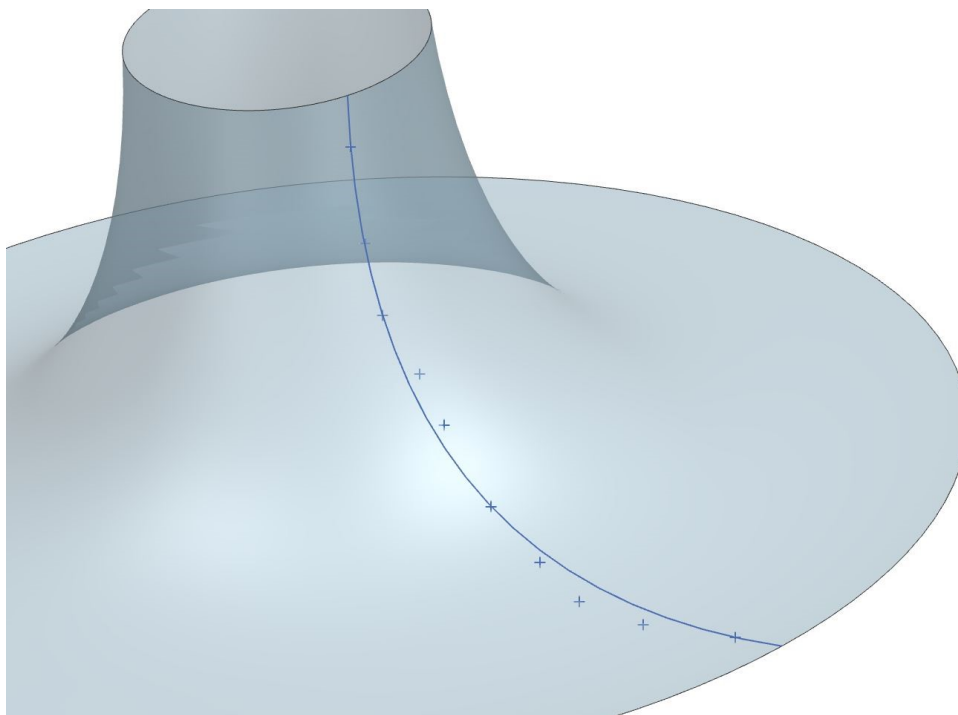
Mallintaminen tehtiin pistepilven avulla, joka oli saatu koordinaattimittalaitteelta. Pistepilvi siirrettiin stp-tiedostomuodossa. Pistepilven avulla mallintaessa huomattiin yksi keskeinen työllistävä tekijä. Koska kaikki mittapisteet on mitattu kapaleen äärimittojen sisältä, yksikään mitattu piste ei ole samassa paikassa varsinaisen nurkan tai kulman kanssa. Niinpä mittapisteet nurkille ja reunoille puutuivat. Nämä piti luoda mallintaessa eri mallin piirteiden risteyskohtiin. Periaatteessa jokainen pinta luotiin samojen työkalujen ja oletuksien avulla. Ensin luotiin pistepilven pisteiden avulla viivoja muodon luomista varten. Näitä viivoja jatkettiin piirteen ulkopuolelle, jotta saatiin luotua muiden piirteiden kanssa risteyskohtia. Lopuksi pinta- tai tilavuusmalli viimeisteltiin yhdistelemällä ja leikkaamalla. Lopputuloksena oli sulava yhtenäinen 3D-malli.

### 6.1 Siipipyörän mallintaminen

Ensimmäiseksi mallinnettiin siipipyörän hub. Hubin kaaresta oli otettu noin kymmenen mittauspistettä, joiden avulla saatiin luotua spline-viiva. Tarkoitus oli saada mahdollisimman sulava kaari, joten spline-viiva luotiin vain neljällä pisteellä. Kummastakin päädyistä yksi ja näiden välistä tasaisin välein kaksi. Käyttäen vain neljää pistettä pisteet ovat harvemmassa ja suunnanmuutokset ovat loivempia. Jälkeenpäin tätä viivaa voitiin verrata mittauspisteisiin ja todeta kuinka paljon virhettä on syntynyt. Lopulta suurin virhe mittapisteisiin verrattuna

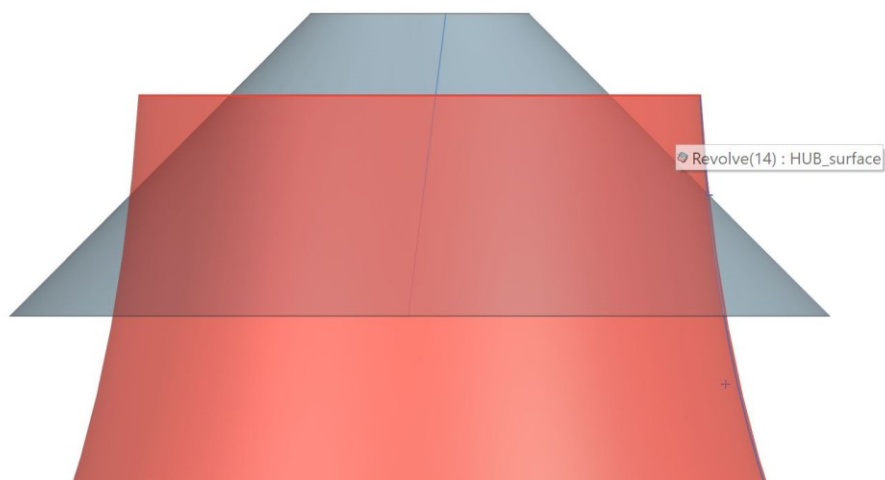


oli vain 0,1 mm. Lopuksi viivan avulla luotiin pinta Revolve-työkalulla, joka näkyy kuvassa 10.



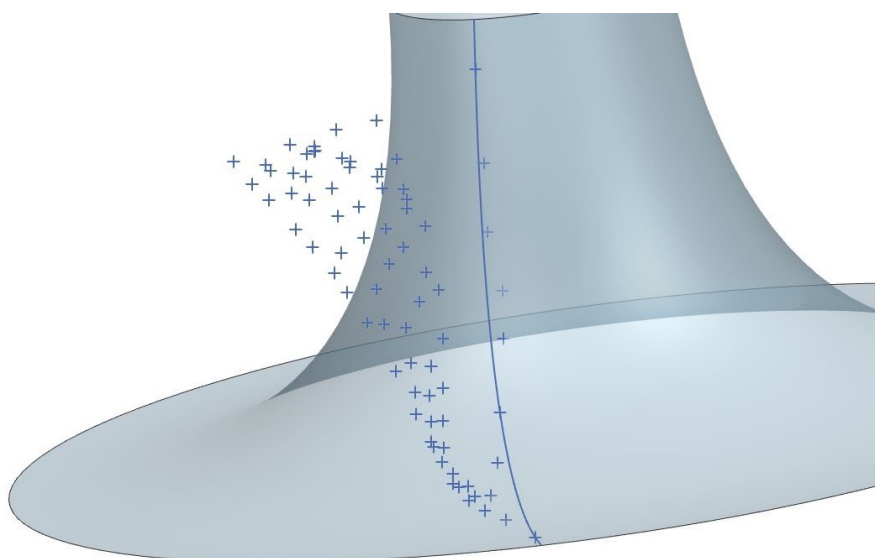
Kuva 10. Hubin pinta sekä spline-viiva.

Kuten jo aikaisemmin mainittiin, kulmien luomiseen piirteitä täytyi jatkaa hiukan yli. Tässäkin tapauksessa viivaa, jonka perusteella hubin pintamalli luotiin, jatkettiin tahallisesti niin ylä- kuin alapäästäkin vähän pidemmälle. Tämä mahdollisti reikää ympäröivän viisteen ja hubin pinnan leikkaavan keskenään. Tämä näkyy kuvassa 11. Myöhemmin näillä pinnoilla leikattiin tilavuusmallia, jotta saatiin haluttu muoto.



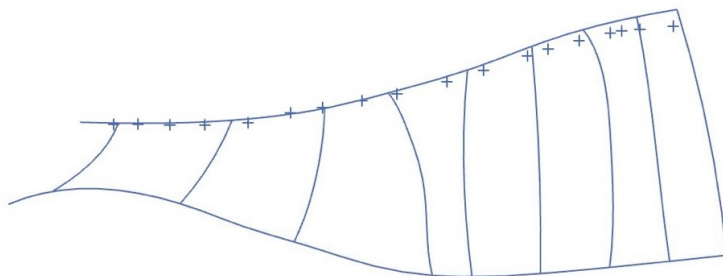
Kuva 11. Hubin ja viisteen pinnat.

Siiven mallintamisessa käytettiin jokseenkin samoja työkaluja. Ainoa ero oli, että nyt oli kyseessä piirre, joka oli paljon monimutkaisempi. Juuri tämä siiven kaartuminen ja kiertyminen samanaikaisesti vaatii 5-akselista työstöä. Mallintaminen aloitettiin samalla tavalla mittapisteiden avulla. Kuten näkyy kuvassa 12, mittapisteitä on aikaisempaa enemmän. Koska mittapisteitä ei voitu ottaa myöhemmin lisää, otettiin niitä alun alkaen reilusti, jolloin oli mistä valita.



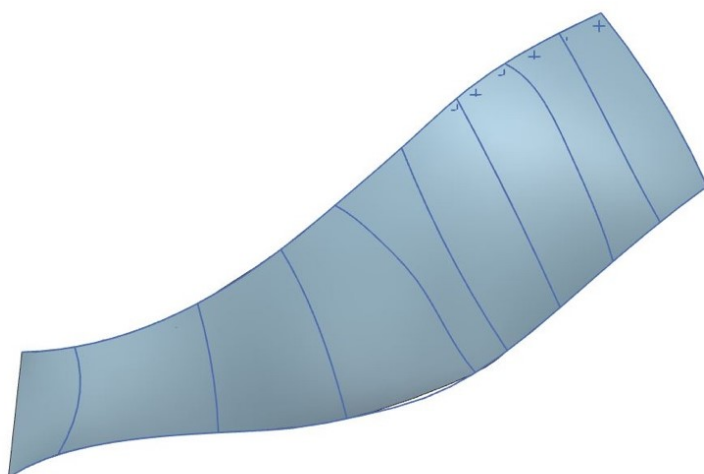
Kuva 12. Siiven pistepilvi.

Siiven pintamalli luotiin Sweep through curves-työkalulla. Työkalu toimi käytännössä niin, että pinnalle valitaan ääriviivat, joiden sisään muoto luodaan. Sen lisäksi ääriviivojen sisältä valitaan ohjaavia viivoja, jotka määrittelevät pinnan muodon matkan varrella. Ohjaavat poikkiviivat näkyvät kuvassa 13.



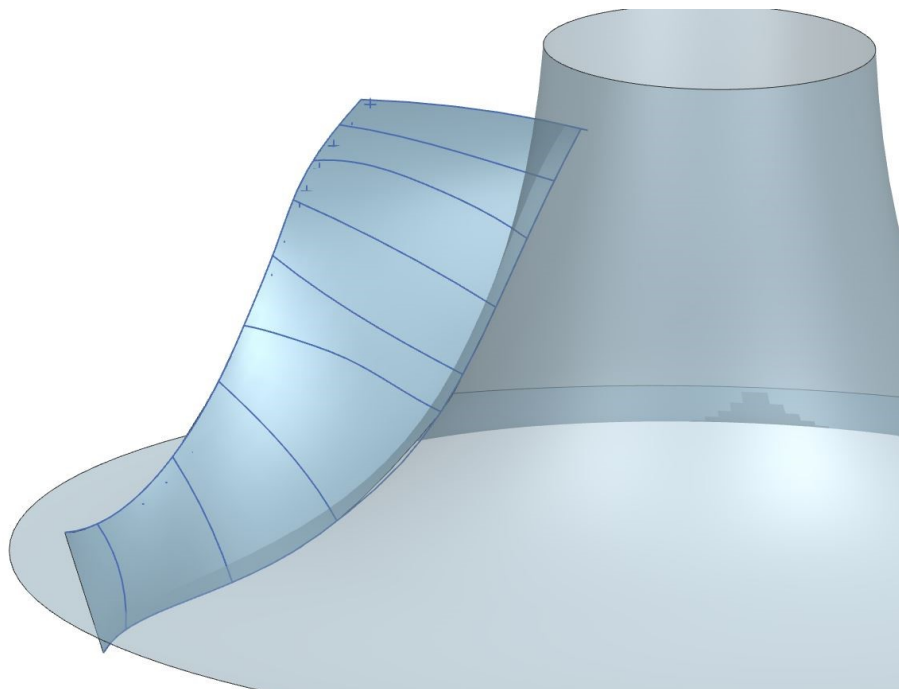
Kuva 13. Siiven muoto spline-viivoilla.

Jokainen poikkiviiva oli kolmen pisteen kautta kulkeva spline-viiva. Kutakin viivaa jatkettiin taas yli, jotta saatiin pinta menemään reunan yli. Pala palalta saatiin muodostettua tarpeeksi ohjaavia viivoja ottaen huomioon sopivan tasapaino tarkkuuden ja sulavuuden välillä. Lopulta saatiin muodostettua siivelle pintamalli, joka näkyy kuvassa 14.



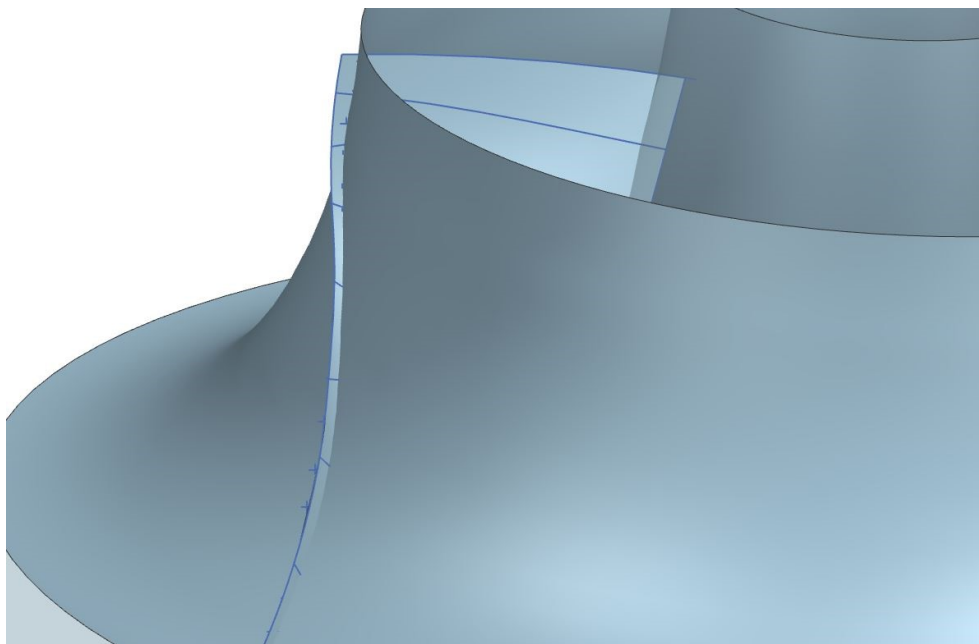
Kuva 14. Siiven pintamalli.

Pintamallin muoto ei vastannut vielä lopullista muotoa. Tämä johtui nimenomaan siitä, että pintamallit vietiin tahallisesti aina hiukan yli. Kuvassa 15 näkyy, miten siiven pintamalli uppoaa hubin pintamallin sisään.



Kuva 15. Siiven ja hubin pintamalli.

Oleellinen osa siiven mallintamasta on siipien shroud-pinta. Pinta on täsmennetty aikaisemmin kuvassa 3. Tämä on pyörähdysymmetrinen pinta, jolla tultaisiin lopuksi leikkaamaan siipien tilavuusmallia. Shroud-pintamalli näkyy kuvassa 16. Tämä pinta on vain muutaman millimetrin kymmenyksen päässä turbon kompressorin kotelosta. Vaikka koordinaattimittalaite on tarkka, pintamalliin lisättiin varmistukseksi 0,1 mm:n marginaali. Näin ollen siipipyörän ja turbon kotelon väliin pitäisi jäädä hiukan enemmän tilaa. Tämä luultavasti tulee heikentämään turbon tehokkuutta, mutta kuitenkin katsottiin järkevämmäksi varmistaa, etteivät kappaleet hankaa keskenään.



Kuva 16. Shroud-pintamalli.

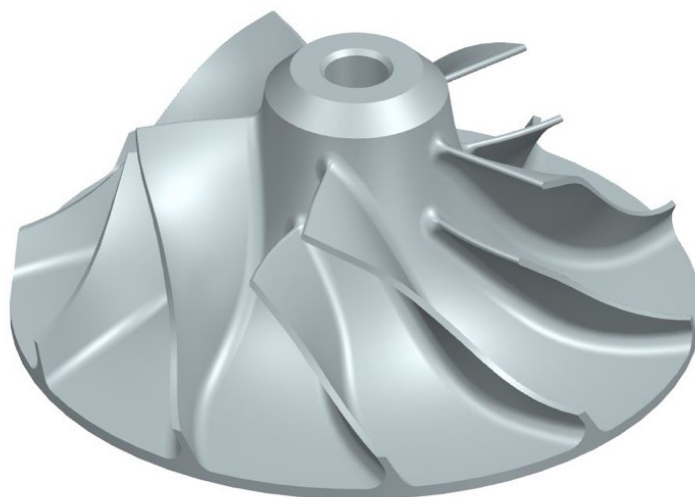
Siiven muodon kanssa tehtiin käytännön takia yleistys siiven paksuuden suhteen. Siipi mitattiin ajan säästämiseksi ainoastaan ulkopuolelta ja mallinnusvaiheessa siivelle luotiin kauttaaltaan 0,7 mm:n paksuus käyttäen Thickness-työkalua. Tämä oli alkuperäisen työkappaleen siiven arvioitu keskimääräinen paksuus. Arviointi perustui mittauksiin työntömitalla.

Siiven mallin luomisen jälkeen voitiin vertailla pinnan sijaintia ja käyttämättömien mittapisteiden sijaintia. Tämä antoi meille kuvan siitä, kuinka paljon sulaavuuden suosiminen maksoi epätarkkuutta. Suurin ero, joka havaittiin, oli 0,1 mm. Tämä on täysin siedettävä. Loput siivet luotiin monistamalla pysty akselin ympäri. Pienempi splitter-siipi mallinnettiin ja monistettiin täsmälleen samalla tavalla kuin varsinaiset siivet. Tämän vaiheen loppuksi vielä yhdistettiin tilavuusmallit yhdeksi malliksi Unite-työkalulla.

Tilavuusmallien yhdistämisen jälkeen siipien juuriin tehtiin säteeltään 1,6 mm:n pyöristykset. Alkuperäisen kompressoripyörän vastaava kohta oli hiukan jyrkempi. Tässä tehtiin kuitenkin valmistusteknisestä syystä kompromissi. Metropolian koneistuslaboratorion vakio työkaluihin kuuluu 6 mm:n pallopääterän

lisäksi 3 mm:n pallopääterä, joka sopisi kokonsa puolesta loistavasti pyörityksien valmistukseen. Jyrkemmän pyörityksen työstö olisi vaatinut pienemmän terän. Pyörityksen ei oletettu olevan kriittinen, joten tämän suhteen tehtiin kompromissi ajan säästämiseksi. Lopuksi myös pyöritykset yhdistettiin aikaisempaan yhtenäiseen tilavuusmalliin.

Siipipyörä oli viimeistä vaihetta vaille valmis. Tässä vaiheessa tilavuusmalleja oli yhdistämisen takia vain yksi, ja se piti viimeistellä lopulliseen muotoonsa. Siivet eivät olleet vielä lopullisessa muodossa, joten niitä piti leikata. Tämä tehtiin aikaisemmin mainitulla ja kuvassa 16 näkyvällä shroud-pinnalla. Lopputuloksena oli yksittäinen tilavuusmalli. Viimeistely malli näkyy kuvassa 17.

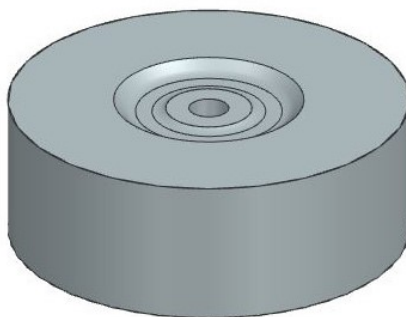


Kuva 17. Kompressorisiiven 3D-malli.

## 6.2 Aihoiden mallintaminen

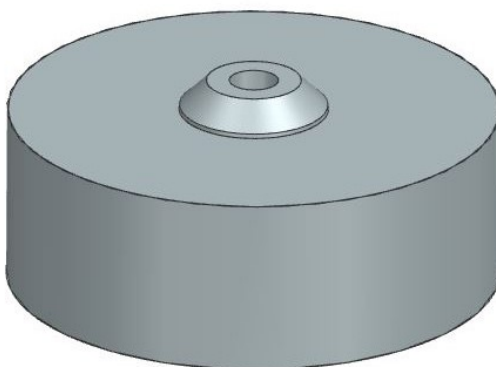
Valmistaminen tulisi tapahtumaan monessa eri vaiheessa, joten tarvittiin useampi 3D-malli työstöratojen luomista varten. Mallit edustivat kyseisen vaiheen lopputuloksen lisäksi tulevan vaiheen ahiota. Näiden mallien luomisessa pystyttiin käyttämään jo luodun siipipyörän 3D-mallin välivaiheita hyödyksi.

Ensimmäisen mallin avulla tultaisiin luomaan työstöradat ensimmäistä ja toista työstövaihetta varten. Jokainen malli tulisi muistuttamaan enemmän lopullista siipipyörää. Ensimmäisen mallin pohjan muoto, joka näkyy kuvassa 18, oli lopullinen. Kaikki pohjan piirteet tultaisiin siis valmistamaan lopulliseen muotoonsa tämän mallin avulla.



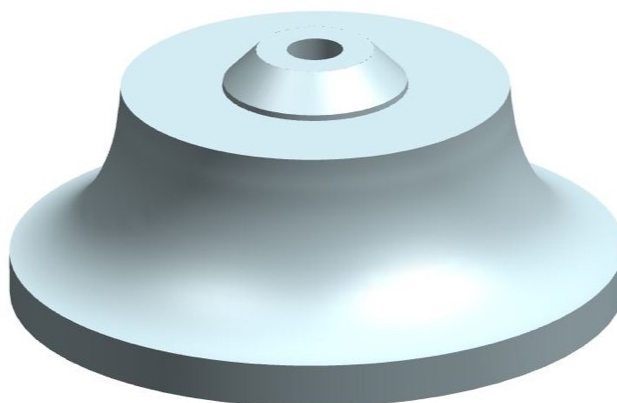
Kuva 18. Pohjan 3D-malli.

Kuvassa 19 näkyy sama 3D-malli kuin kuvassa 18 mutta vain toisin päin. Kuvassa 19 nähdään päälipinnan muoto, jossa reikää ympäröivä uloke viisteineen oli lopullisessa muodossaan. Siipien päälle oli vielä jätetty työstövaraa kolmatta työstövaihetta varten.



Kuva 19. Päälipinnan 3D-malli.

Kuvassa 20 näkyy 3D-malli, joka liittyy seuraavaan vaiheeseen. Tarkoitus oli viimeistellä siipien shroud-pinta. Sen lisäksi tämä malli tulisi toimimaan siipien valmistuksen aihiona. Kompressorisiiven mallintamisen aikana oli jo luotu tuo siipiä leikkaava shroud-pinta, joten tämän mallin luominen oli periaatteessa jo tehty samassa yhteydessä.

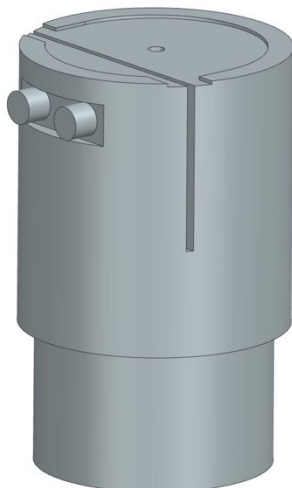


Kuva 20. Shroud-pinnan 3D-malli.

### 6.3 Jigin mallintaminen

Valmistuksen viimeisen vaiheen kiinnitystä varten piti valmistaa jigi. Jigin tarkoitus oli muodostaa vahva kiinnitys, joka estäisi kappaleen liikkumisen työstön aikana. Alun perin kiinnitys piti toteuttaa pelkästään pultilla puristaen keskeltä. Tässä vaihtoehdossa oli kuitenkin se riski, että kappale lähtisi pyörimään pultin ympäri. Tätä varten valmistettiin jigi, jotta työkappale pystyttiin pulttikiinnityksen lisäksi puristamaan pohjan kyljestä jättämättä jälkiä viimeisteltyyn pintaan. Jigin 3D-malli näkyy kuvassa 21.



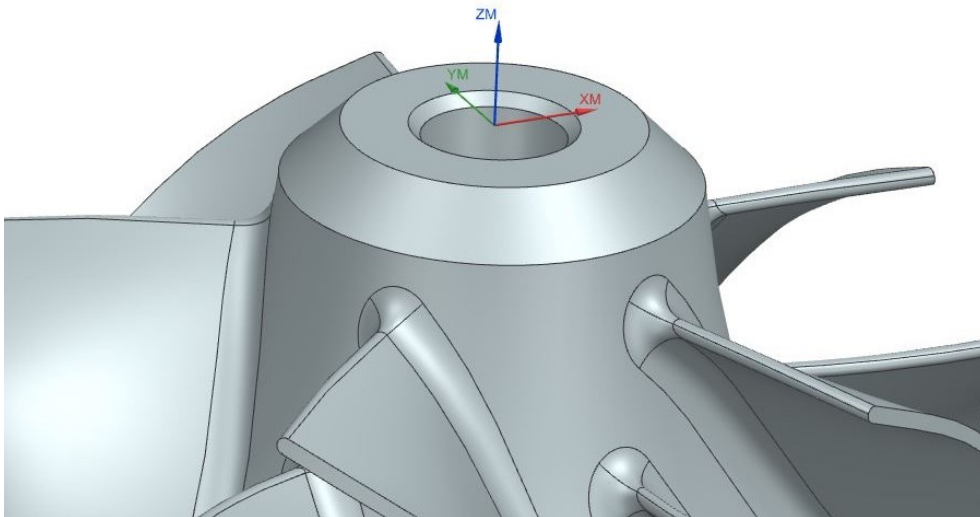


Kuva 21. Jigin 3D-malli.

## 7 Työstöratojen suunnittelu

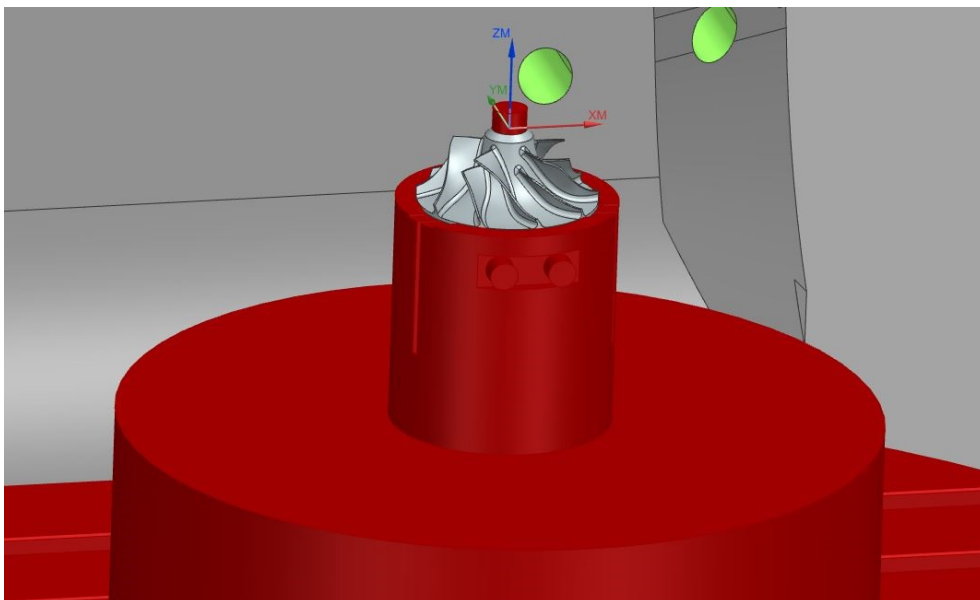
Työstöradat luotiin Siemens NX:n CAM-ohjelmalla. Aikaisemmat 3D-mallit luotiin työstöratojen luomista varten. Työstöradat tulitaisiin lopulta muuttamaan G-koodiksi Post process -ohjelman avulla. Tämä G-koodi ohjaa työstökoneen liikkeitä ja komentoja. CAM-ohjelmassa työstöradat ovat ikään kuin G-koodin visuaalinen muoto. Työstöratojen luomisen yhteydessä määritellään myös jokaisen vaiheen työkalut ja työstöarvot.

Työstöratojen luominen alkaa tuomalla CAM-ohjelmaan työkappaleen 3D-malli, joka halutaan valmistaa. Tälle määritellään seuraavaksi aihio, jota tulitaisiin käyttämään. Aihio voitiin joko määritellä tekemällä sitä varten erillinen malli, tai vaihtoehtoisesti annettiin ohjelman ”pursottaa” työkappaleen ympärille aihio annettuihin mitoihin. Tämän jälkeen aihio ja työkappale asemoidaan oikein toisiinsa nähdessä, jotta se vastaa todellista aihiota, joka tulitaisiin kiinnittämään työstökoneen leukoihin. Tämän jälkeen määriteltäisiin koordinaatiston sijainti. Koordinaatiston sijainnin lisäksi asetuksista täytyi määritellä mikä koordinaatisto oli kyseessä. Tässä käytettiin G54-koordinaatistoa. Koordinaatiston sijainnin suhteen ei ollut periaatteessa mitään määräävää tekijää, joten päädyttiin se sijoittamaan keskelle aihion päälle. Tämä näkyy kuvassa 22.



Kuva 22. Koordinaatisto G54.

Tämän kanssa täytyi olla tarkkana. Monesti koordinaatisto vain vaikuttaa olevan oikeassa paikassa. Sijainti pitää aina varmistaa. Lisäturvaa kolareiden välttämiseksi CAM-ohjelmaan voitiin määritellä osat, joita väistää. Tämä näkyy kuvassa 23.

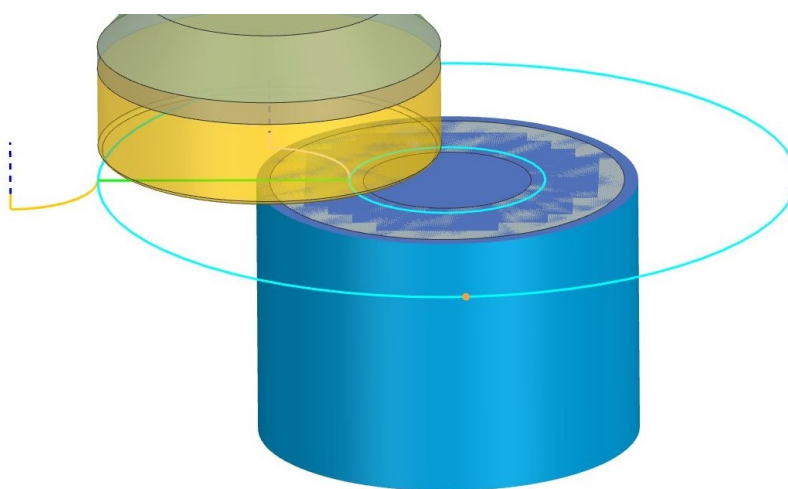


Kuva 23. Väistettävät osat.

Väistämistä varten mallinnettiin myös kolmileukapakka ja jigi, jota tulnaisiin työstön aikana käyttämään. Nämä mallit vietiin ohjelmaan sisään samaan tapaan kuin työkappaleen 3D-malli ja valittiin väistettäväksi Check-ominaisuutta käyttäen. Tämä ei vielä itsessään poista kolarin mahdollisuutta. Tämä ainoastaan esti terän osumasta väistettäviin malleihin. CAM-ohjelma ei automaattisesti tiedä koneen muita osia tai liikeratoja. Tätä varten käytössä oli konesimulointimalli. Tämä oli käytännössä CAD-kokoonpano, joka vastasi meidän Haas UMC 750 -työstökeskusta. Sen lisäksi että siinä oli tarkat osat mallinnettuna, sen liikkeet vastasivat todellisuutta. Näin ollen työstöratojen luonnin jälkeen pystyttiin simuloimaan työstön kaikki vaiheet. Näin kyettiin tarkistamaan työstöratojen toiminta ja turvallisuus ennen varsinaista työstöä. Simuloinnin aikana tulisi varoitus, jos jokin työstöradoista aiheuttaisi kolarin. Näistä ominaisuuksista huolimatta työstöä on aina hyvä valvoa, varsinkin alussa, jotta voidaan varmistua, että työstöradat toimivat.

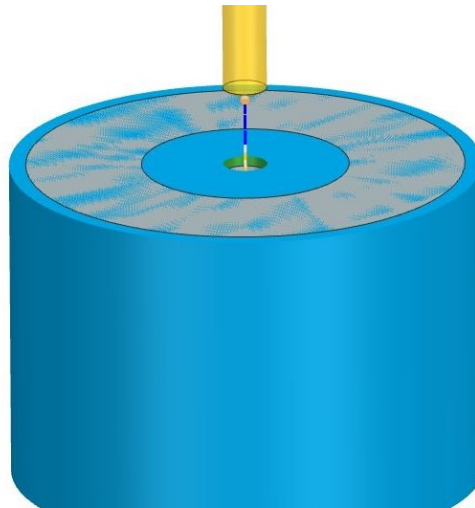
### 7.1 Pohjan työstöradat

Ensimmäiset työstöradat suunniteltiin työkappaleen pohjan rouhintaa varten. Ensin suoritettiin pohjalle tasojuysintä eli ”plaanaus”. Tähän käytettiin Floor facing -operaatiota. Pohja työstettiin lopulliseen pintaan asti. Työstörata näkyy kuvassa 24.



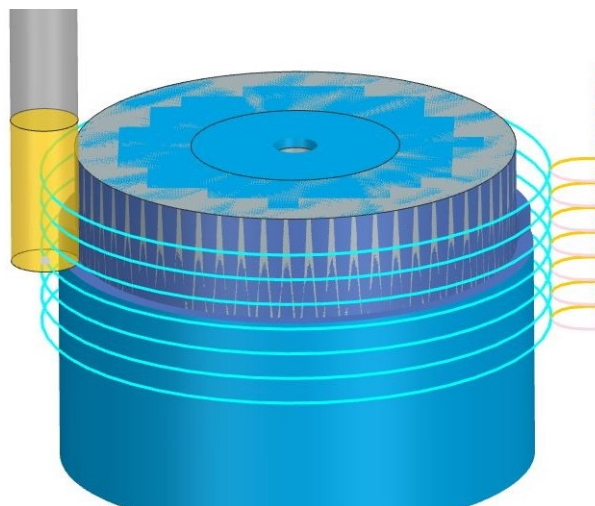
Kuva 24. Pohjan ”plaanaus”.

Seuraavaksi luotiin työstörata porausta varten, ensin keskiöporaus työvaiheella Spot Drilling ja sen jälkeen Deep Hole Drilling. Tämä työvaihe mahdollisti lastujen poiston kesken porauksen ja paransi viimeistelyn laatua. Poraussyvyys oli 30 mm, ja työvaihe sisälsi kaksi nostoa 11 mm:n välein.



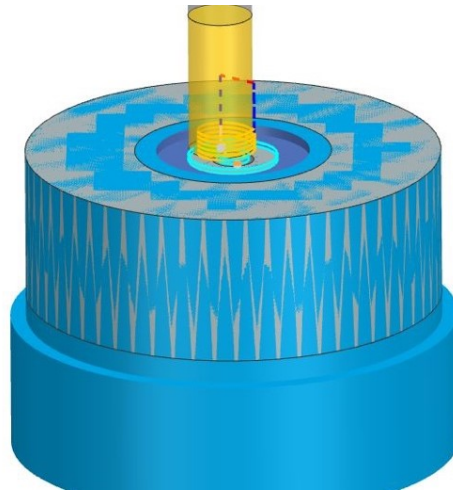
Kuva 25. Reiän poraus.

Seuraavaksi suunniteltiin työstörata kyljen työstöä varten. Työvaihe toteutettiin Cavity Mill -operaatiolla. Näkyy kuvassa 26.



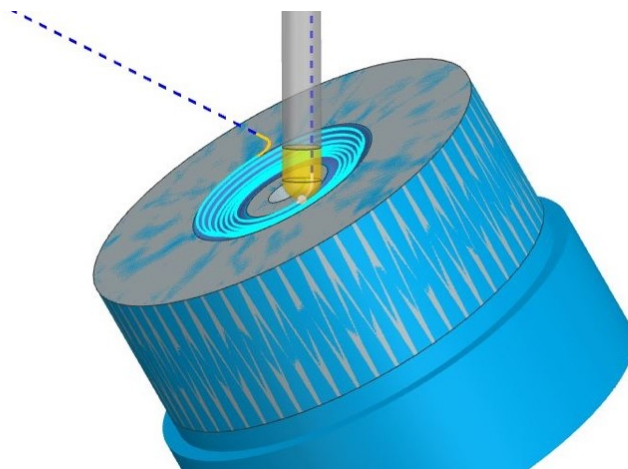
Kuva 26. Kyljen viimeistely.

Samalla 10 mm jyrsintapilla toteutettiin myös syvennyksen rouhinta reiän ympäriltä (Kuva 27).



Kuva 27. Upotuksen rouhinta.

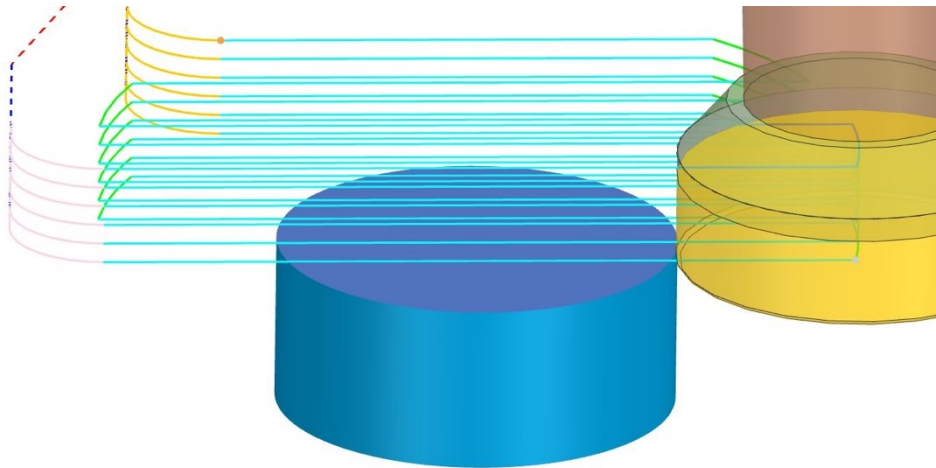
Toistaiseksi työvaiheet oli toteutettu 3-akselisesti. Reikää ympäröivässä upotuksessa oli kaareva muoto, jonka työstö päätettiin toteuttaa pallopääterällä, ja 3 + 2 -työstöohjelmalla. Työstöradat toteutettiin Streamline contour -ohjelmalla, joka oli yksi multi-axis-työstöohjelmista. Tämä näkyy kuvassa 28. Kokonaisuudessa pohjan työstöohjelman kesto oli n. 7 min.



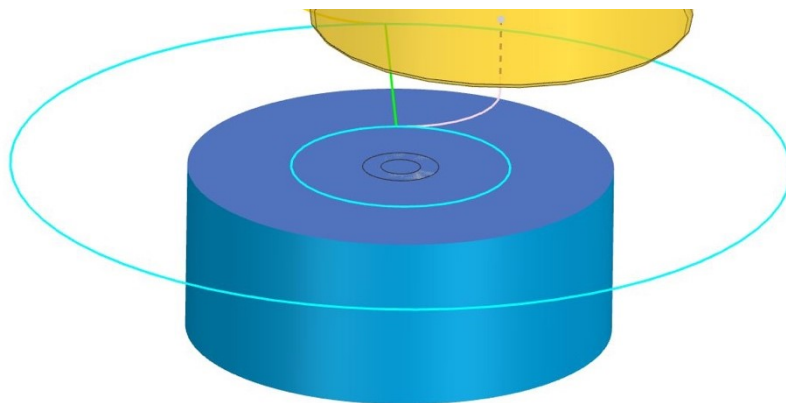
Kuva 28. Pohjan upotuksen työstö Siemens NX CAM:ssa.

## 7.2 Yläpuolen työstöradat

Kuvassa 29 ja 30 näkyy, miten ensin poistettiin päälipinnalta ylimääräiset pois perinteisen plaanauksen avulla. Työkalu oli jälleen vakiotyökalu, 63 mm:n ot-sajyrsein.

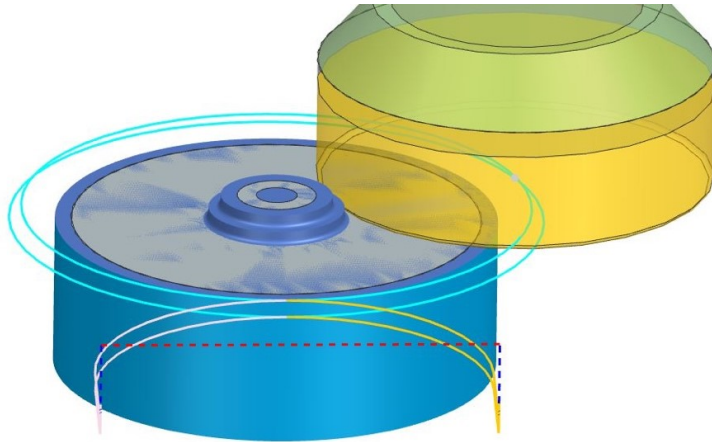


Kuva 29. Päälipinnan rouhinta.



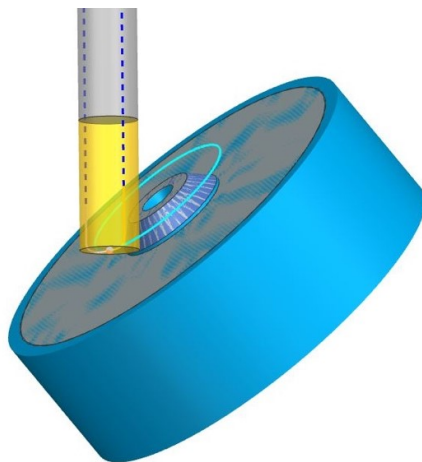
Kuva 30. Päälipinnan viimeistely.

Seuraavaksi jatkettiin samalla työkalulla ja poistettiin ulokkeen ympäriltä ylimääräiset pois. Tämä näkyy kuvassa 31.



Kuva 31. Ulokkeen rouhinta.

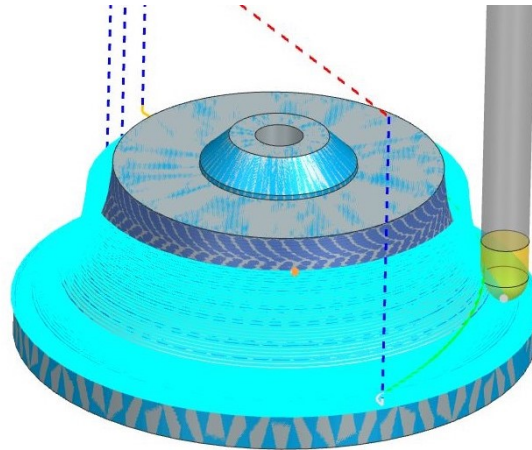
Reiän ympäröivä viiste viimeisteltiin ottamalla lisää akseleita käyttöön. Menetelmää kutsutaan 3 + 2 -menetelmäksi. Tässä tapauksessa työstön aikana ainoa akseli, joka teoriassa tekee töitä, on c-akseli, koska pöytä pyörii työstön aikana. Pöytä on voitu kallistaa ennen työstöä, ja sen jälkeen sen voisi lukita. Samoin x-, y- ja z-akseleiden ei teoriassa tarvitsisi tehdä mitään. Tämä ei käytännössä kuitenkaan ole näin. Mikään ei ole käytännössä absoluuttisen keskellä, joten akselit liikkuvat työstön aikana, jotta haluttu tulos saavutetaan. Tähän käytettiin vakiotyökalua, 10 mm:n jyrsintappia (kuva 32).



Kuva 32 Viisteen 3 + 2 -työstö

### 7.3 Shroud työstöradat

Shroud-pinnan työstöratojen luomiseen lopulta päädyttiin käyttämään operaatiota Z level steep. Työstörata näkyy kuvassa 33.



Kuva 33 Shroud-pinnan viimeistely

### 7.4 Siipipyörän työstöradat

Siipien työstöradat olivat täysin uusi asia. Suunnittelussa päästiin ensikertaa kokeilemaan uusia 5-akselisia työstöratoja, kuten Multi Axis Blade. Ennen varsinaisia työstöratoja piti määritellä muutama tuttu perusasia: työkappale, aihio, koordinaatisto ja työkalu. Aihiona tulitaisiin käyttämään kuvan 20 mallia. Koordinaatisto G54 asetettiin keskelle aihion päälle. Multi Axis Blade oli suunniteltu nimenomaan tällaista kappaletta varten, mikä helpotti suunnittelua. Siipien valmistukseen käytettävät työstöradat jakaantuivat kolmeen osioon: Impeller Rough, Hub finish ja Blade finish.



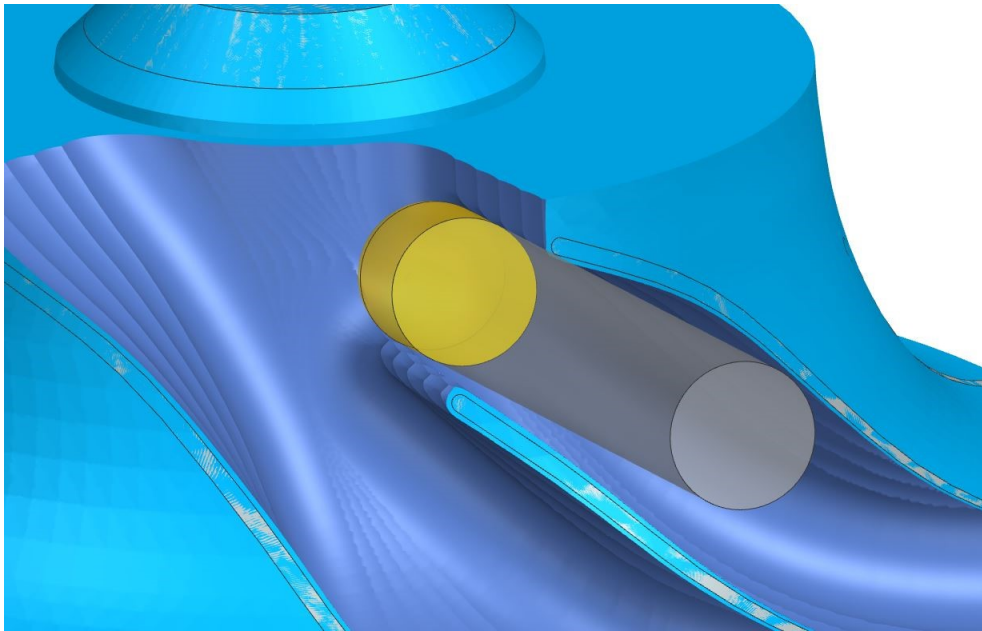
### 7.4.1 Rouhinta – Impeller Rough

Rouhinnan työstöradat luotiin Impeller Rough -operaatiolla. Rouhinnan tarkoituksena oli poistaa turhaa materiaalia mahdollisimman tehokkaasti. Tehokkuus määräytyy lastuvirran  $Q$  perusteella, johon vaikuttaa mm. terän halkaisija (Karttiala 2022), joten teräksi valittiin mahdollisimman suuri terä. Kokoa rajoittivat kuitenkin siipien ahtaat välit, joten suurin mahdollinen terä oli 6 mm:n pallopääterä.

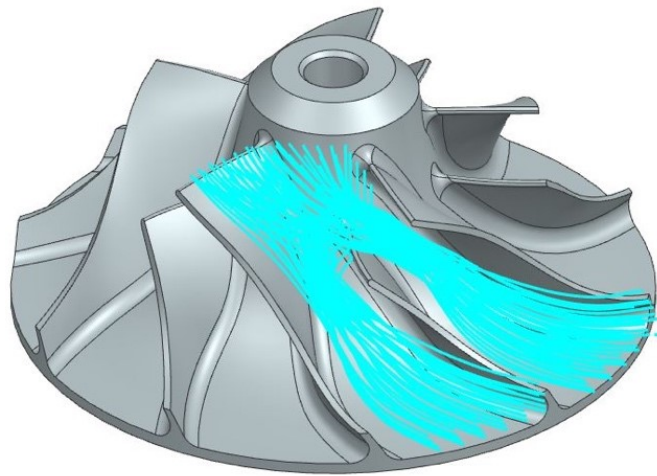
Jokaisen operaation kohdalla asetuksissa piti määritellä siipipyörän osat. Nämä olivat, jo aikaisemmin monesti mainitut hub, shroud, blade ja splitter. Osat näkyvät kuvassa 3. Työstövara viimeistelyä varten oli oletuksena 0,5 mm. Tämä tuotti kuitenkin ongelman. Huomattiin, että työkalu ei olisi mahtunut rouhinnan aikana siipien väliin, joten työstövaraa pienennettiin. Lopulta työstövaraksi jätettiin vain 0,2 mm. Kuvassa 34 näkyy, kuinka työkalu mahtuu siipien väliin.

Luonnollisesti asetuksia oli ohjelmassa erittäin paljon ja suurin osa jätettiin oletusarvoihinsa. Oletusarvoja ei ollut lähtökohtaisesti syytä muuttaa. Työstöratojen monimutkaisen luonteen ja kokemattomuuden takia pääasiallinen tavoite oli luoda toimivia työstöratoja. Tämä pidettiin loppuun asti päätavoitteena ja liiallinen työstöratojen optimointi jätettiin pois.

Rouhinnan työstö kuvio eli Cut Pattern oli oletuksena ZIG. Tämä tarkoitti, että työstö tapahtui yhteen suuntaa tässä tapauksessa hubin alaosasta kohti huippua. Pallopääterällä tuli olla työkalu aina vähän kallistettuna työstettävän pinnan suhteen. Jos terä olisi täysin kohtisuorassa pintaa kohden, tapahtuisi työstö pallopääterän kärjellä.



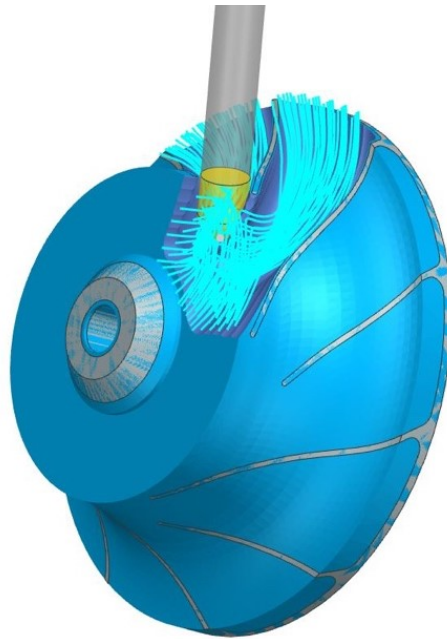
Kuva 34. Hubin rouhintaa 6 mm:n pallopääterällä.



Kuva 35. Hubin rouhinnan työstöradat.

Tämä ei ole suositeltavaa, koska lakipisteessä terä ei leikkaa ja viimeistelyn laatu on huono. Luonnollisesti myös työkalu kärsii. Tämän takia suositetaan joko sivuttaista Tilt-kallistusta, liikkeen suuntaista Lead-kallistusta tai molempia. Siemens NX:n Lead-kallistus oli oletuksena vähintään 30°, joten tämä takasi sen,

että terä oli koko työstön ajan kallistettuna. Työkalun lähestyessä siipeä työkalu kallistui siivestä poispäin  $0,2^\circ$ .



Kuva 36. Hubin rouhinta 5-akselisesti.

Työstöratojen suunnittelun yhteydessä piti myös määritellä työstöarvot. Kokeimuksen puutteen takia päädyttiin käyttämään terävalmistajan suosituksia. Suositukset olivat saatavilla valmistajan sivuilta (liite 2). Työstöarvotaulukon tulkitsemiseen tarvittiin kaksi asiaa, työkalun halkaisija ja työstettävä materiaali. Työkalun halkaisija oli 6 mm, ja materiaali oli 2000-sarjan alumiini. Näillä tiedoilla valmistajan suositus oli seuraava:

Lastuamisnopeus	(Surface Speed)	$V_c = 105 \text{ m/min}$
Teräsyöttö	(Feed per Tooth)	$f_z = 0,025 \text{ mm}$

Muut arvot saatiin laskemalla käyttäen laskukaavoja 3 ja 4.

Työstöarvojen laskemiseen vaikuttavat tekijät:

$D = \text{Terähalkaisija (mm)}$

$n = \text{Karanopeus (rpm)}$

$z = \text{Terien lukumäärä (kpl)}$

$a_p = \text{Aksiaalinen lastuamissyvyys (mm)}$

$a_e = \text{Radiaalinen lastuamissyvyys (mm)}$

Lastuamisnopeus  $v_c$  (Surface Speed)  $m/min$

$$v_c = \frac{D\pi n}{1000} \quad (1)$$

Teräsyöttö  $f_z$  (Feed per Tooth)  $mm$

$$f_z = \frac{v_f}{nz} \quad (2)$$

Karanopeus  $n$  (Spindle Speed)  $rpm$

$$n = \frac{v_c 1000}{\pi D} \quad (3)$$

Pöytäsyöttö  $v_f$  (Cut)  $mm/min$

$$v_f = f_z n z \quad (4)$$

Lastuvirta  $Q$   $cm^3/min$

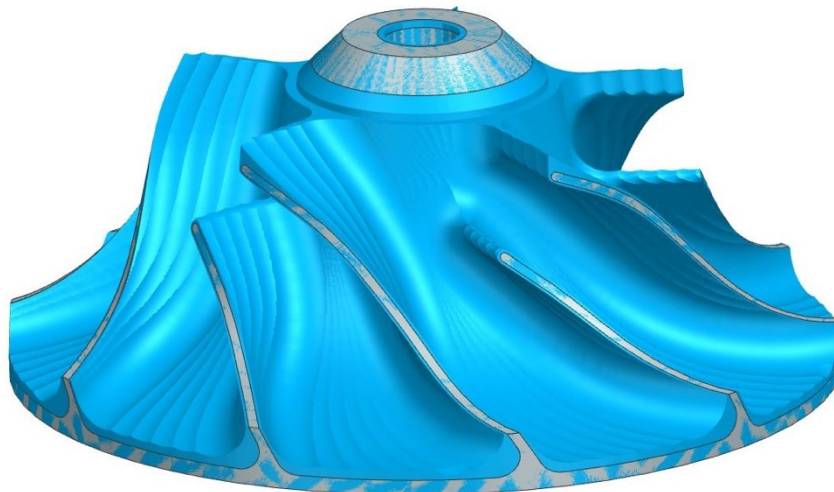
$$Q = \frac{a_p a_e v_f}{1000} \quad (5)$$

Siemens NX laski karanopeuden  $n$  ja pöytäsyötön  $V_f$ , jotka olivat seuraavat:

Karanopeus	(Spindle Speed)	$n = 5570 \text{ rpm}$
Pöytäsyöttö	(Cut)	$V_f = 280 \text{ mm/min}$

Työstöarvot olivat hyvin maltilliset, mikä näkyi hiukan työstöajassa. Tässä vaiheessa oli kuitenkin liian aikaista lähteä nostamaan työstöarvoja, ennen kuin niitä oli kokeiltu käytännössä.

Seuraavaksi otettiin kantaa, miten terä käyttäytyisi ennen ja jälkeen työstöraton. Ennen kuin terä alkaa työstämään, terä lähestyy työkappaletta ns. pikaliikkein. Etäisyyttä, kuinka lähelle terä liikkuu pikaliikkein, pystytään määrittelemään. Etäisyydeksi määritettiin 80 mm ja tämä asetettiin työkappaleen pohjan keskipisteestä pallon muodossa joka suuntaan. Tämä loi työkappaleen ympärille eräänlaisen turvakehän ja antoi työstökoneen käyttäjälle aikaa reagoida, jos kone tekisi jotain odottamatonta. Liikkeiden turvallisuutta tarkasteltiin lopulta vielä simulaation kautta ennen varsinaista työstöä. Rouhinnan tulos CAM-ohjelmassa näkyy kuvassa 37.



Kuva 37. Kompressorisiipi rouhinnan jälkeen Siemens NX:ssä.

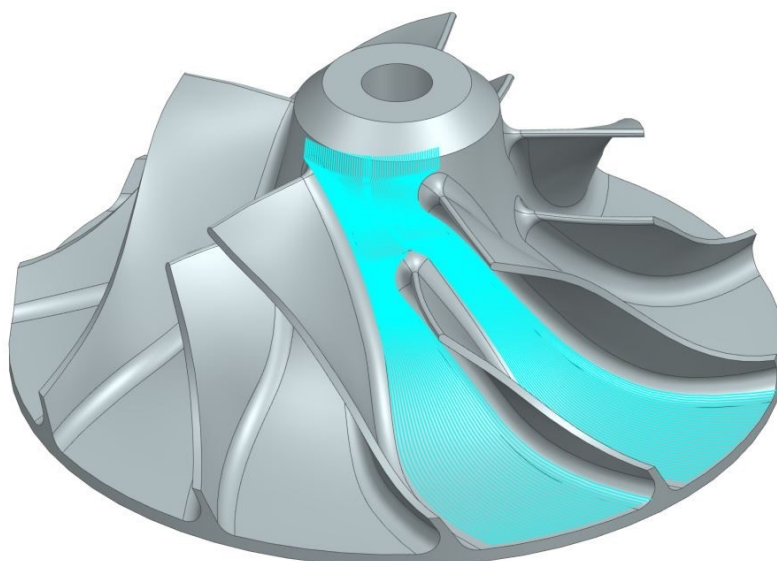
## 7.4.2 Viimeistely – Hub Finish

Rouhinnan jälkeen siirryttiin suoraan viimeistelyyn. Viimeistelyn työstöradat suunniteltiin Hub finish -operaatiolla. Tämä oli ehkä vähän vasten perinteistä ajattelua. Tyypillisesti tehtäisiin myös väliviimeistely, mutta koska harjoitellessa viimeistelyn laatu ilman väliviimeistelyä oli niin hyvä, se jätettiin väliin ajan sääntämiseksi. Viimeistelyssä käytettiin 3 mm:n pallopääterää. Koko valittiin, koska se on yksi koneistuslaboratorion vakiotyökaluja ja niitä oli myös saatavana lisää mahdollisen rikkoutumisen varalta. Myös jokaista työstöä ennen vaihdettiin uudet terät käyttöön, jotta viimeistelyn laatu olisi mahdollisimman hyvä. Toinen syy oli siipien kannan pyöristyksen säteen koko. Mallinnusvaiheessa pyöristys tehtiin sopimaan tuohon terään. Pyöristyksen säde on 1,6 mm, joten 3 mm:n pallopää sopii siihen hyvin. Työstöarvoina käytettiin terävalmistajan suosituksia:

lastuamisnopeus	(Surface Speed)	$V_c = 103 \text{ m/min}$
teräsyöttö	(Feed per Tooth)	$f_z = 0,01 \text{ mm}$
karanopeus	(Spindle Speed)	$n = 11000 \text{ rpm}$
pöytäsyöttö	(Cut)	$V_f = 220 \text{ mm/min}$

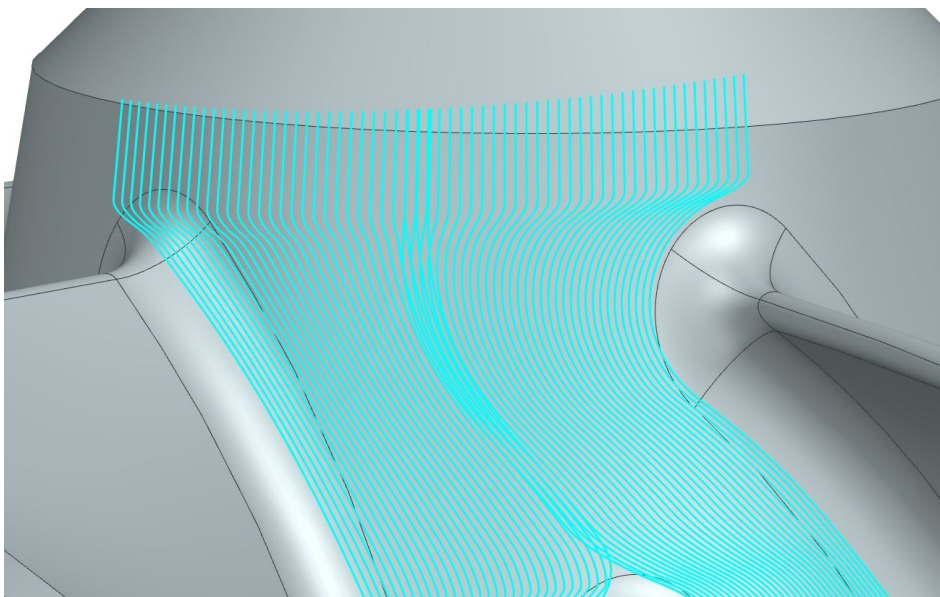
Työstöarvoissa ei ollut juuri varaa muutoksiin, koska Haas-työstökoneen maksimikierrosluku oli 12000 rpm. Näin ollen muutoksia ei tehty.

Kaiken kaikkiaan työstöratojen perusteella valmistukseen piti mennä runsaat 4 tuntia. Todellisuudessa aikaa kului hiukan enemmän. Tämä johtui osittain matalampien pikaliikenopeuksien käytöstä.



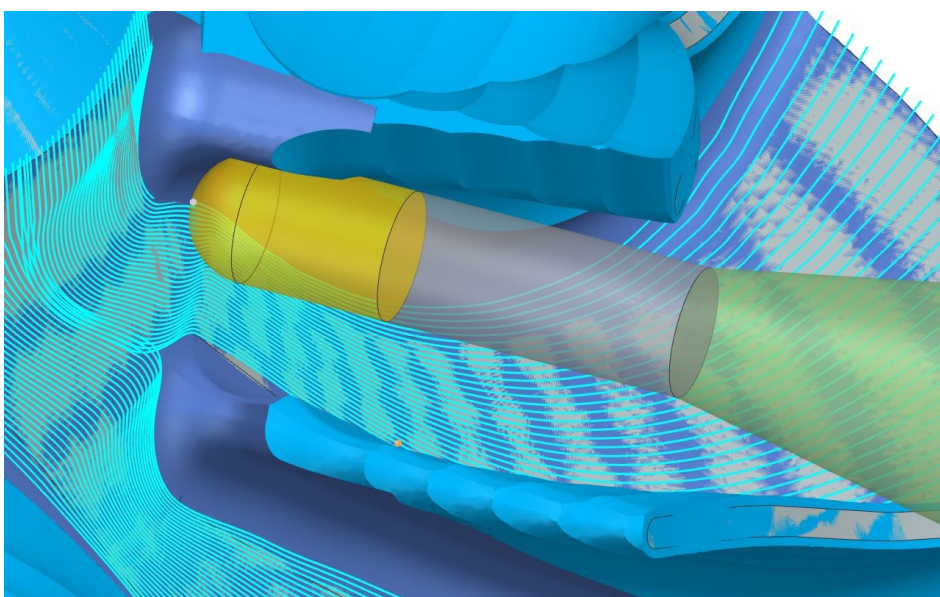
Kuva 38. Hubin viimeistelyn työstöradat.

Hubin viimeistelyssä käytettiin myös ZIG-työstökuviota kuten rouhinnassa, eli terä liikkui edelleen alhaalta ylös. Nyt kuitenkin piti kiinnittää suurempaa huomiota ratojen yksityiskohtiin, jotta viimeistelyn taso olisi mahdollisimman korkea. Työstöradan sai esimerkiksi halutessaan pyöristämään mutkia, jota säädettiin prosenttiluvuin. Tämän asetuksen avulla pintaan pystyi jättämään hienot sulavat linjat. Tämä kuitenkin saattoi jättää alueita viimeistelemättä, jos oikoisi liikaa. Lopulta päädyttiin käyttämään 25 %:n asetusta. Asetuksissa oli myös osio, jolla säädettiin terän käyttäytymistä radan alku- ja loppupäässä. Kumpaakin päähän lisättiin hiukan työstöradan pituutta, mikä pakotti terän jatkamaan työstöreunan yli. Näin ollen reunasta tulisi todennäköisemmin terävä ja tarkka eikä reunalle jäisi kohtia viimeistelemättä. (Kuva 39.)



Kuva 39. Hubin viimeistelyn työstöradat yläpäässä.

Terän ollessa vain 3 mm huolenaiheeksi nousi, tulisiko terä taipumaan viimeistelyn aikana. Kaiken lisäksi terä joutui olemaan noin 25 mm ulkona istukasta, jottei istukka osuisi työkappaleeseen viimeistelyn aikana. Jotta ongelmaa ei tulisi, päädyttiin käyttämään terää, jonka varsi oli 6 mm. Kuvassa 40 näkyy, miten terä mahtuu liikkumaan siipien välissä.



Kuva 40. Hubin viimeistelyä 3 mm pallopääterällä.

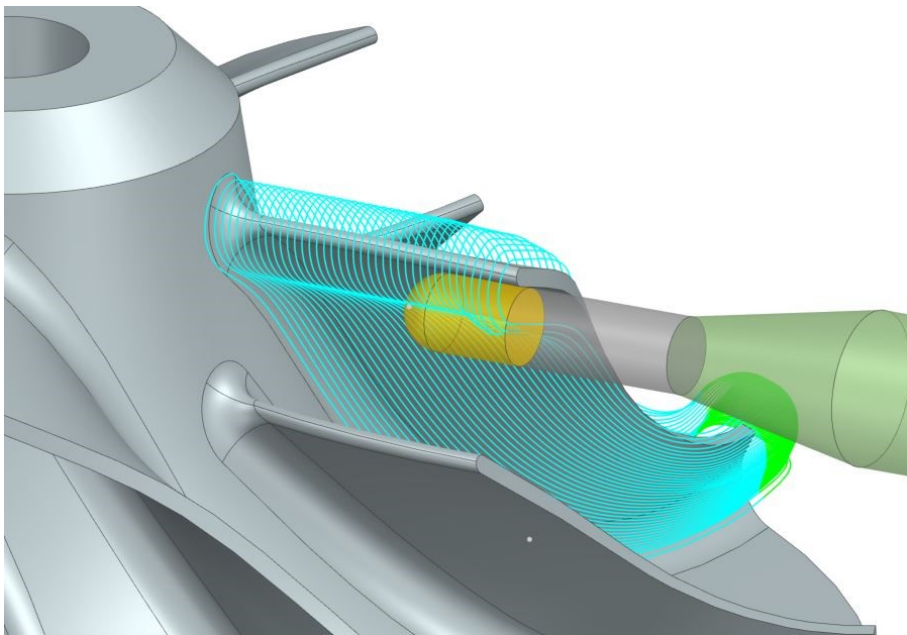


Merkkejä terän taipumisesta ei ilmennyt harjoittelun aikana, joten voitiin olettaa, että terä ei taivu. Simulaation avulla pystyttiin varmistamaan, kuinka paljon terän tulisi olla ulkona, ilman että se aiheuttaisi kolarin työkappaleen kassa.

### 7.4.3 Viimeistely – Blade Finish

Viimeiset työstöradat liittyivät siipien viimeistelyyn. Sekä pää- eli blade-siipien sekä pienempien splitter-siipien työstöradat luotiin Blade finish -operaatiolla. Viimeistely tulitisiin tekemään samalla 3 mm:n pallopääterällä kuin aikaisempikin vaihe. Valintaan päädyttiin samoista syistä. Viimeistelyn taso oli ollut hyvä, teriä oli saatavilla, ja terän koko sopi hyvin siiven juuren pyöritykseen. Myös työkalun vaihtaminen vie koneelta aina aikaa, joten sitä vältettiin työstön nopeuttamiseksi.

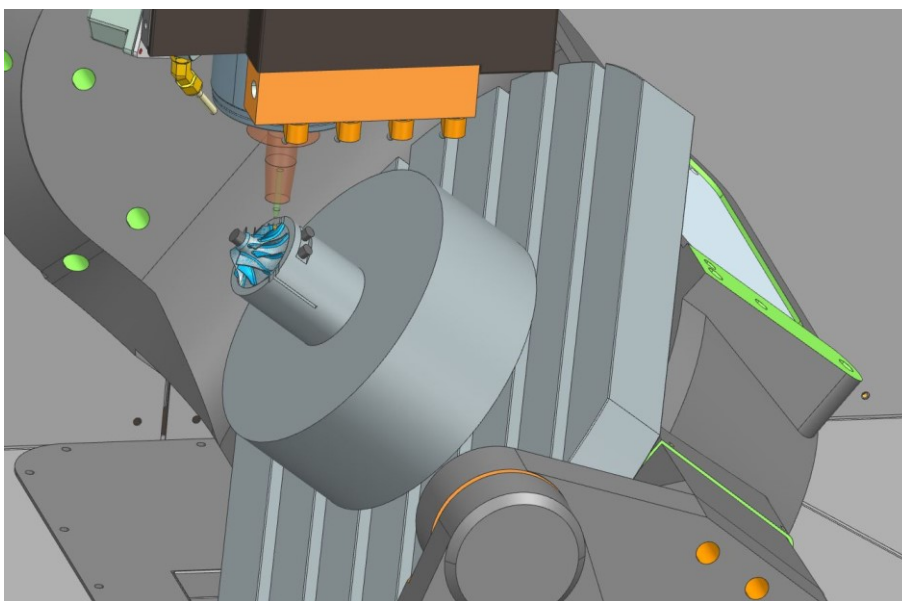
Osien määrittelyn jälkeen asetuksista määritettiin, mihin siipeen työstörajoja ollaan luomassa. Ensin luotiin radat pääsiipeen. Työstörajojen kuvioksi valittiin jälleen ZIG, joka tarkoitti sitä, että työstö tapahtui jälleen yhteen suuntaan. Tämä tulisi kuitenkin poikkeamaan hubista sen verran, että nyt rata tulisi alkamaan ja päätymään lähes samaan paikkaan. Radat näkyvät kuvassa 41.



Kuva 41. Siiven työstöradat.

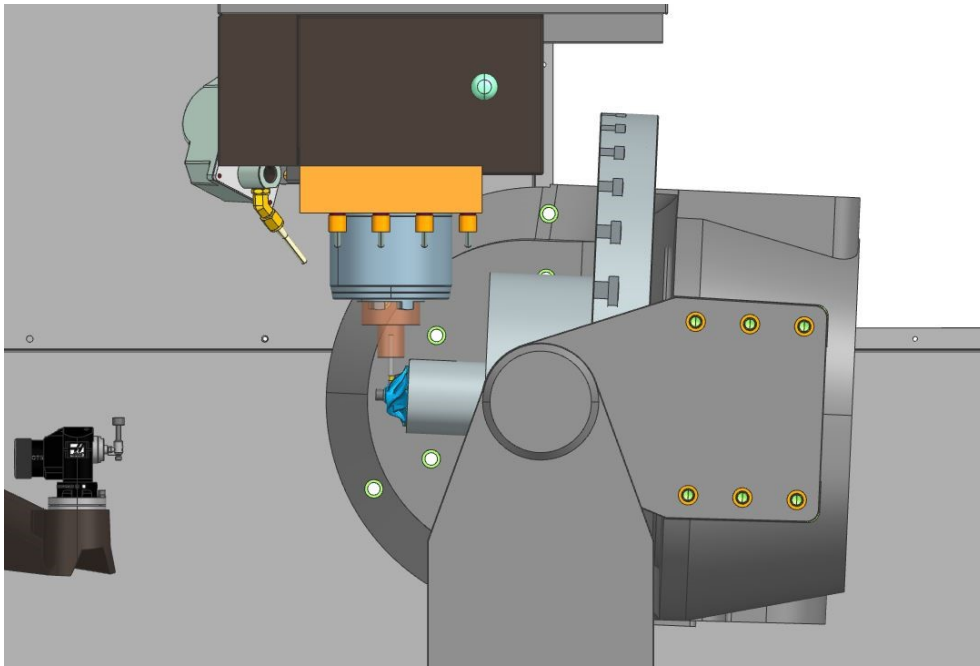
Työstörata alkaisi siiven jättöreunasta hubin pohjalta liikkuen siiven johtoreunaa kohden, kiertäen siiven toiselle puolelle ja palaisin takaisin lähelle, mistä rata alkoi. Suunta ei muuttunut siiven pinnan suhteen, joten koko matkan kyseessä oli myötätyöstöä. Ensimmäinen rata olisi luonnollisesti uloin rata. Jotta terän varsi ei osuisi siipeen, terän minimikallistuskulmaksi pois päin siivestä asetettiin jälleen tuo sama  $0,2^\circ$ . Myös minimityöstön suuntainen kulma, Lead angle, oli sama  $30^\circ$ . Työstöarvoiksi asetettiin täsmälleen samat arvot kuin hubin viimeistelyssä. Näitä ei ollut syytä muuttaa viimeistelyn hyvän tason takia.

Asetusten määrittelyn jälkeen työstöä pystyttiin tarkkailemaan simulaation (kuva 42) avulla. Näin saataisiin myös ohjelmalta varoitukset mahdollisista kolareista. Niitä ei kuitenkaan ilmaantunut. Tämän mahdollisti todellisuutta vastaavat mallit sekä näiden välinen asemointi.



Kuva 42. Siemens NX:n simulointi siiven viimeistelystä.

Akseleiden yhtenäistä työskentelyä on vaikea kokemattoman hahmottaa. Simulaation avulla näkee todellisuudessa ensimmäistä kertaa, miten se tapahtuu. Akseleiden yhteistyö on näyttävää. Kuvassa 43 voi huomata, kuinka paljon pöytä kallistuu ja kuinka lähellä se todellisuudessa käy työstökoneen muita osia.

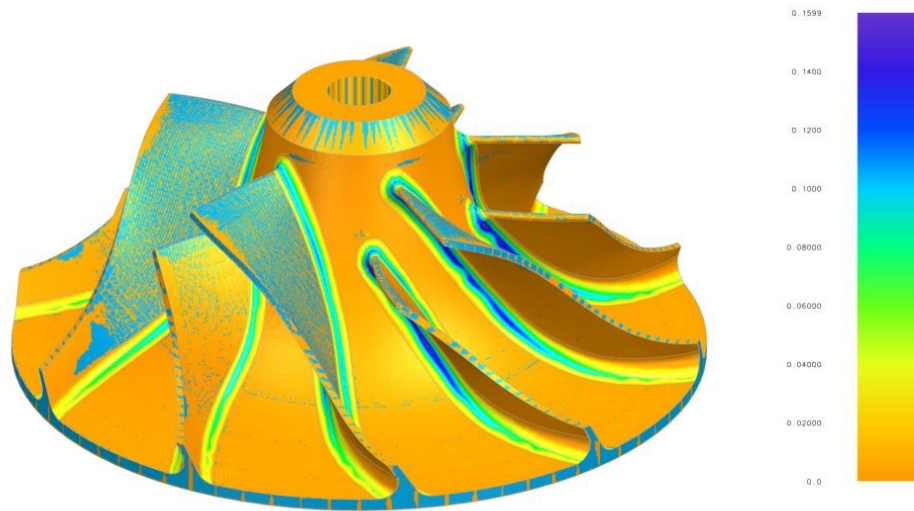


Kuva 43. Siiven viimeistelyn aikana tapahtuva pöydän kallistus.

Tässä huomataan tarkkojen mallien ja niiden asemoinnin tärkeys. Myös työstökoneen liikeratojen näkeminen auttaa ymmärtämään 5-akselisen työstön vaatimuksia esimerkiksi kiinnityksen suhteen. Jos työkappaleen olisi kiinnittänyt 50 mm alemmaksi, olisi osuma ollut jo todella lähellä.

Lopuksi voitiin tehdä analyysi, kuinka paljon materiaalia työkappaleen pintaan jäisi näiden työstöratojen perusteella. Viimeistely malli on kuvassa 44.

Kuvan perusteella hubin pintaan ei jää käytännössä yhtään materiaalia, siiven pintaan noin 0,08 mm ja siiven juureen paikoittain 0,1 mm. Tämä oli odotettavaa, koska radoissa tehtiin ajan säästämiseksi kompromissi tuon alueen kohdalla. Blade Blend -operaatio olisi viimeistellyt kyseisen alueen, mutta sitä ei tehty, koska 3 mm:n pallopääterä käsitteli alueen sekä hubin että siiven viimeistelyn aikana lähes kokonaan. Tuloksessa näkyy hinta tuolle kompromissille, 0,1 mm. Tämä oli täysin hyväksyttävä.



Kuva 44. Siemens NX:n analyysi viimeistellystä kappaleesta.

## 8 Työstöarvot

Vähäisen työstökokemuksen takia valmistuksessa turvauduttiin sekä valmistajan että opettajien suosittelemiin työstöarvoihin (liite 2). Alustavissa aihiota valmistelemissa työstövaiheissa käytettiin työstöarvoina opettaja Tero Karttialan suosituksia. Siipien koneistukseen käytettiin enimmäkseen terävalmistajan suosituksia. Rouhintavaiheessa terävalmistaja suositteli 6 mm:n pallopääterälle lastuamisnopeudeksi 105 m/min, teräsyötöksi 0,025 mm ja pöytäsyötöksi 280 mm/min, ja karanopeus oli 5600 rpm. Arvoja päätettiin kuitenkin muuttaa ajan säästämiseksi ja työstön tehokkuuden nostamiseksi. Tehokkuuden mittarina toimii lastuvirta  $Q$  ( $cm^3/min$ ). Karanopeuden nostaminen nostaa pöytäsyöttöä, joka lisää myös lastuvirtaa. Teräsyötöksi jätettiin 0,025 mm ja karanopeudeksi nostettiin 12 000 rpm. Tämä oli myös Haas-työstökoneen maksimikaranopeus. Tämä muutti lastuamisnopeudeksi 226 m/min ja pöytäsyötöksi 600 mm/min. Uusien työstöarvojen perusteluksi riitti suurempi lastuvirta. Mahdollinen terän vaurioituminen oli toissijaista pienen valmistusmäärän takia sekä epätodennäköistä. Myös asiantuntevat opettajat olivat luottavaisia työstöarvoihin (Karttiala 2022; Jalava-Kanervio 2022). Ensimmäinen koeajo osoitti työstöarvojen olevan

täysin turvallisia, minkä lisäksi rouhinnan jättämä jälki oli hyvää ja tehokkaampaa.

Työstökoneella harjoitellessa materiaalina käytettiin AL6000-alumiinia. Materiaalia oli hyvin saatavana Metropoliassa suoraan hyllystä. Lopullinen siipipyörä valmistettiin kovemmasta, paremmin lämpöä kestävästä AL2011-alumiinista (Eklund 2022). Materiaalin toimitti Alumeco Oy. Tämän kovemman materiaalin kanssa käytettiin kuitenkin samoja työstöarvoja. Työstön aikana kuitenkin huomattiin taajuudeltaan hiukan korkeampi työstöääni. Tämä tuli esiin, kun ensimmäinen siipipyörä valmistettiin tuosta materiaalista. Tämän takia päätettiin hiukan laskea karanopeutta. Seuraavan kappaleen työstön aikana ääni oli kuitenkin samanlainen kuin ennen. Rouhinnan taso oli kummillakin työstöarvoilla kuitenkin samaa laatua. Lopulliset työstöarvot kullekin vaiheelle olivat seuraavat:

#### Rouhinta

Lastuamisnopeus	(Surface Speed)	$V_c = 169 \text{ m/min}$
Teräsyöttö	(Feed per Tooth)	$f_z = 0,025 \text{ mm}$
Karanopeus	(Spindle Speed)	$n = 9000 \text{ rpm}$
Pöytäsyöttö	(Cut)	$V_f = 450 \text{ mm/min}$

#### Hub, blade ja splitter viimeistely

Lastuamisnopeus	(Surface Speed)	$V_c = 103 \text{ m/min}$
Teräsyöttö	(Feed per Tooth)	$f_z = 0,01 \text{ mm}$
Karanopeus	(Spindle Speed)	$n = 11000 \text{ rpm}$
Pöytäsyöttö	(Cut)	$V_f = 220 \text{ mm/min}$

## 9 Valmistus

Valmistuksen keskiössä oli 5-akselinen koneistus, menetelmä, joka mahdollisti siipien monimutkaisen muodon työstämisen. Lopullista 5-akselista työstövaihetta edelsi useampi valmisteleva vaihe. Aihio piti koneistaa siihen pisteeseen, että se voitaisiin kiinnittää jigiiin siipien valmistusta varten. Tämän kiinnityksen jälkeen työkappaletta ei voisi enää irrottaa. Työvaiheita suunniteltaessa ongelmaksi muodostui työkappaleen pohjan ura reiän ympärillä. Ratkaisu kuitenkin lopulta löytyi, ja vaiheet käydään seuraavaksi läpi.

### 9.1 Pohjan valmistus

Pohja päädyttiin valmistamaan ensin. Näin saataisiin työkappale kiinnitettävä leu-koihin kunnolla, ilman että viimeisteltyyn pintaan jäisi jälkiä. Ensimmäinen aihio sahattiin Alumecon toimittamasta 70 mm:n alumiinipyörötangosta 50 mm:n pituinen pala.

Aihio kiinnitettiin 30 mm leveiden suuntaisalojen päälle. Leuat olivat 40 mm korkeat, joten näin ollen aihio oli tukevasti 10 mm:n alueelta kiinni. Ideana tässä oli, että koko siipipyörän kylki voitaisiin työstää koko korkeudelta samalta puolelta. Näin ollen käännön aiheuttama virhe ei siirtyisi eteenpäin työkappaleen käännön jälkeen. Aihiossa oli vielä 40 mm tilaa, ja koska siipipyörä oli noin 27 mm korkea, se mahtuisi aihion sisään hyvin.

Ensin suoritettiin tasoajrsintä, jolla työstettiin päälipinta eli siipipyörän pohja taiseksi. Tähän käytettiin koulun koneistuslaboratorion vakiotyökaluihin kuuluvaa 63 mm:n tasoajrsintä. Pinta viimeisteltiin jo tässä vaiheessa lopulliseen mitaansa.



Kuva 45. Aihio kiinni kolmipisteleuoissa.

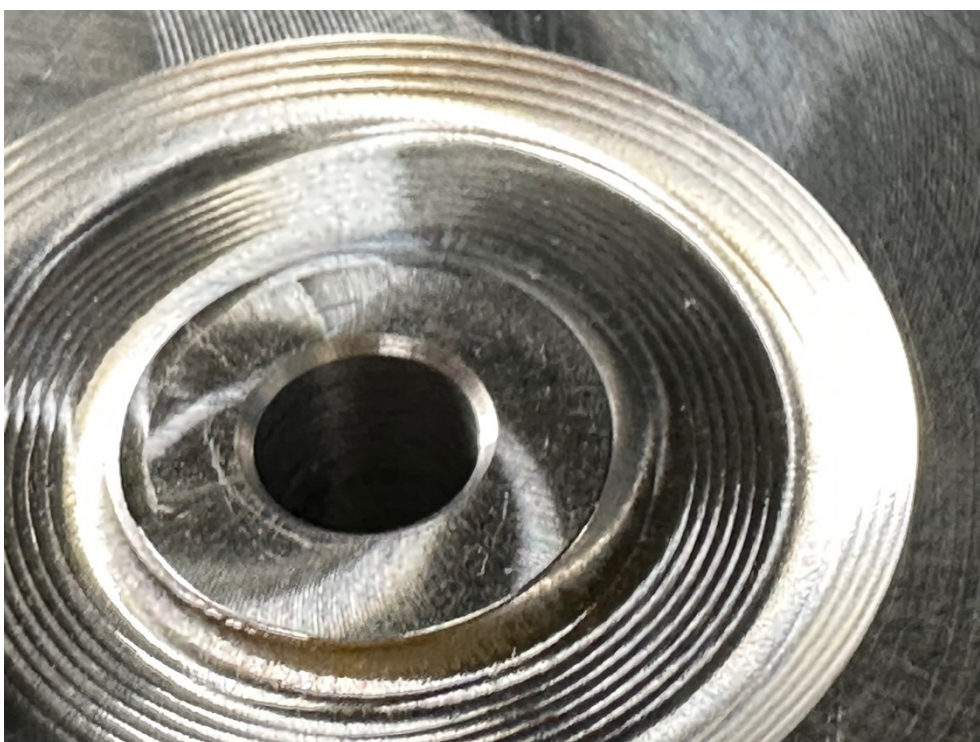
Reikä porattiin seuraavaksi. Luonnollisesti ennen reiän porausta tehtiin keskiöporaus NC-poralla ja siihen päälle 6,5 mm poralla Deep hole drilling. Jostain syystä nostojen välissä pieni hetki paikoillaan lastujen poistoa varten ei välittynyt G-koodiin asti, ja tämä piti manuaalisesti lisätä.

Aihion ollessa halkaisijaltaan vain 10 mm suurempi ei kyljessä ollut paljon rouhittavaa. Siksi päätettiin kylki rouhia ja viimeistellä 10 mm:n jysintapilla. Samalla välttyttiin ylimääräiseltä työkalunvaihdolta. Samalla terällä rouhittiin ympäröivää aluetta. Tämä näkyy kuvassa 46.

Pohjan lopullinen muoto saatiin käyttämällä 6 mm:n pallopääterää ja pöydän kyykä kallistua. Pöydän kallistus ei ollut välttämätöntä, mutta tämä toimi hyvänä harjoitteluna tulevia valmistusvaiheita varten. Kyseessä ei ollut vielä täysi 5-akselinen työvaihe, mutta tätä voisi kutsua 3 + 2 -työvaiheeksi. Muoto näkyy kuvassa 47.



Kuva 46. Rouhittu pohja.

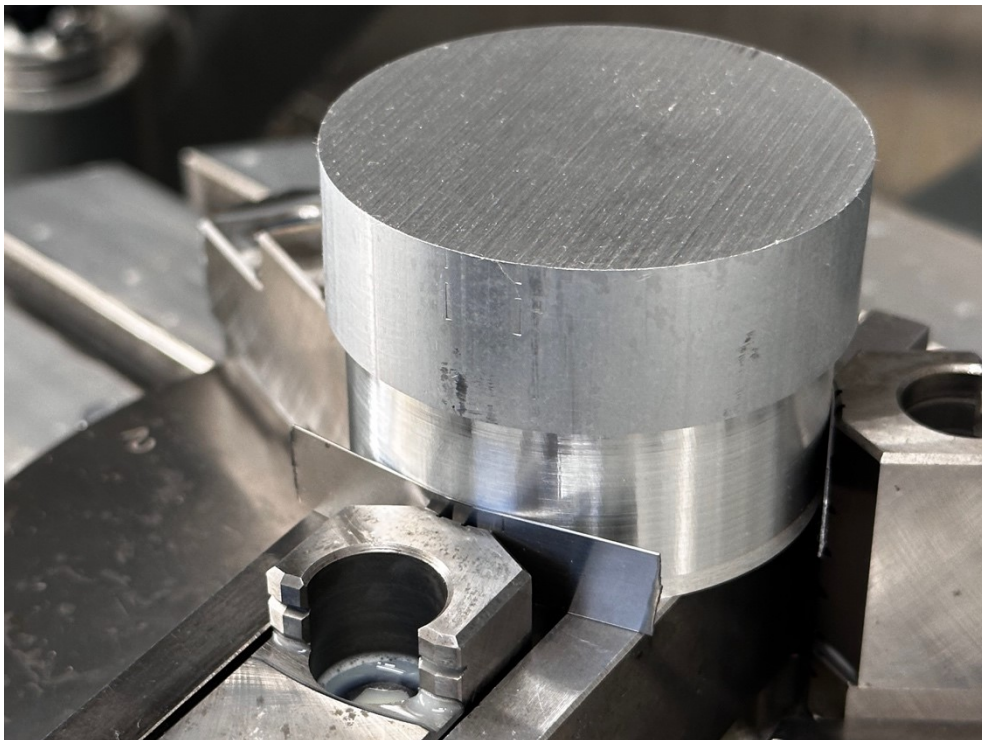


Kuva 47. Pohjan upotus.



## 9.2 Päälipinnan valmistus

Pohjan valmistuksen jälkeen kappale irrotettiin leuoista ja käännettiin. Nyt työkappale jouduttiin kiinnittämään viimeistellystä pinnasta. Tätä yritettiin alun perin välttämään, mutta oli lopulta kuitenkin paras ratkaisu ottaen kaikki huomioon. Kuvasta 48 nähdään, miten viimeistely pinta suojattiin jälkien välttämiseksi pienillä metallinpaloilla.



Kuva 48. Viimeistely pinta suojattuna kiinnityksessä.

Kääntöjen välissä täytyi olla tarkkana koordinaatiston kanssa. X- ja y-koordinaatteihin ei tarvinnut tässä vaiheessa vielä koskea, mutta z-koordinaatti piti päivittää. Tällä kertaa ei ainoastaan riittänyt, että käytiin pinnalta mittaamassa sen sijainti. Täytyi myös tietää, kuinka paljon on suuntaisjalan, jonka päällä aihio istuu, ja aihion päälipinnan välinen etäisyys. Tämä mitattiin Haasin mittapäällä ja z-koordinaatiksi jätettiin aihion päälipinta. Mitattu etäisyys lisättiin tässä välissä CAM-ohjelmaan, jotta ohjelma tietäisi täsmälleen, kuinka paljon täytyi poistaa. Tämä osoitti, kuinka prosessin kaikki vaiheet liittyivät toisiinsa koko prosessin läpi.

Päälipinnalle suoritettiin tämän jälkeen tasoajyräsimellä tyypillisellä 63 mm:n otsajyräsimellä. Tällä edettiin niin pitkään kuin mahdollista, ennen kuin tarvittiin tarkempaa työstöä. Kuvassa 49 nähdään aihio valmiina päälipinnan ulokkeen työstöön.

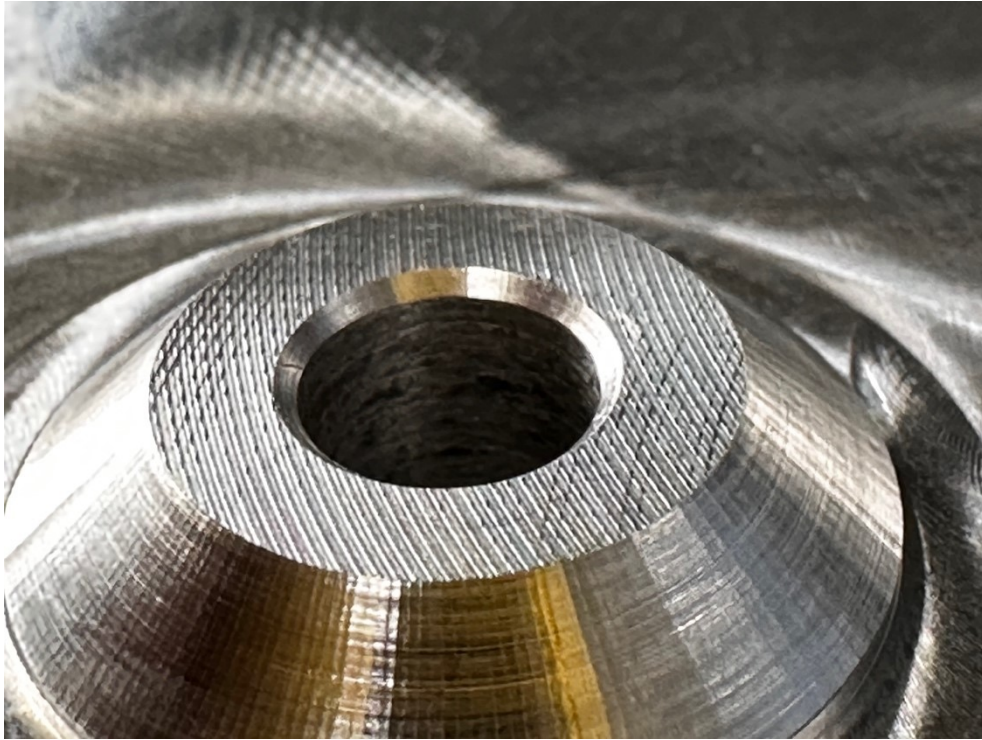


Kuva 49. Päälipinnan uloke.

Tässä vaiheessa, kun viimeistely kylki oli paljastunut, otettiin x- ja y-koordinaatit uudestaan. Näin varmistettiin, että uloke ja reikä tulevat keskelle. Ulokkeen viiste näkyy kuvassa 50.

Tämäkin muoto työstettiin pöydän kallistusta hyödyntäen. Tässä siitä oli apua, koska näin saatiin jyräsimen kylki kohtisuoraan pintaa vasten kuten aikaisemmin näkyi kuvassa 32.

Kuvassa 51 näkyy, kuinka aihio on shroud-pinnan valmistusta varten kiinnitetty jigiiin. Tämä oli viimeinen kiinnitys, eikä ahiota irrotettu, ennen kuin koko siipipyörä olisi täysin valmis. Aihio kiinnitettiin keskeltä yhdellä 6 mm:n pultilla, ja myös jigisti puristi siipipyörän reunoista estäen mahdollisen pyörimisen.



Kuva 50. Reiän viiste.



Kuva 51. Aihio kiinnitettyä jigiin.

### 9.3 Shroud-pinnan valmistus

Ennen kuin varsinaisia siipipyörän tunnistettavia muotoja alettaisiin valmistamaan, oli tässä välissä vielä yksi vaihe. Siipiä leikkaava shroud-pinta piti työstää esiin. Tähän käytettiin perinteistä 3-akselista työstöä ja 63 mm:n otsajyrsimen lisäksi 6 mm pallopääterää. Ensin isommalla terällä rouhittiin suurin osa pois, minkä jälkeen viimeisteltiin pallopääterällä. Kuvassa 52 näkyy viimeistelty shroud-pinta.



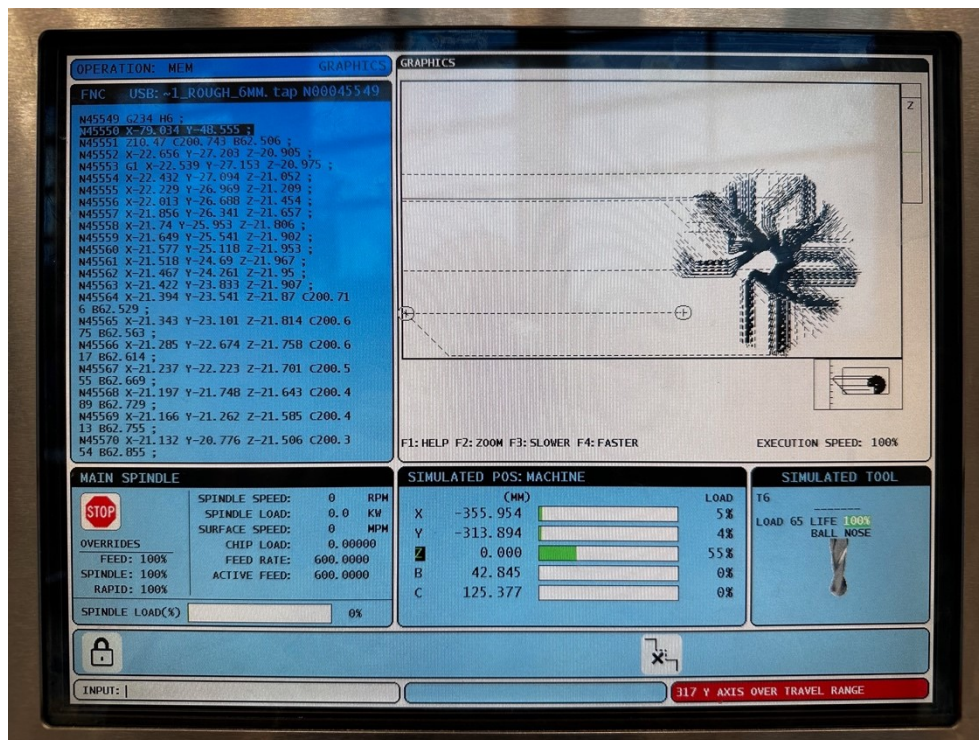
Kuva 52. Viimeistelty shroud-pinta.

### 9.4 Siipien valmistus

Viimeisenä osuutena oli varsinaisten siipien valmistus. Tähän tultaisiin käyttämään kaikkia akseleita yhtä aikaa eli työstö tultaisiin toteuttamaan 5-akselisesti. Siipien valmistus oli koko opinnäytetyön odotetuin ja samalla pelätyin osio. Suunnitteluun oli käytetty paljon aikaa, jotta kaikki oli otettu huomioon ongelmien välttämiseksi. Ennen työstöä tultaisiin tekemään uudestaan rutiinomaiset toimenpiteet, kuten terien tarkistus ja mittaus sekä koordinaatiston asettaminen.

Terät päädyttiin kuitenkin vaihtamaan varmuuden vuoksi, jotta työstöjälki olisi mahdollisimman hyvä.

Suunnitellut työstöradat oli muutettu Post process -ohjelmalla G-koodin muotoon, ja tämä piti siirtää Haasin muistiin toteutusta varten. Monimutkaisen työstön takia rivejä oli paljon, kaiken kaikkiaan noin 350 000 riviä, ja pelkkien siipien valmistukseen tarvittiin vajaa 200 000 riviä G-koodia. Suurin osa oli koordinaattiston sijainteja. Joka ikinen koordinaattipiste piti syöttää työstökoneeseen tekstin muodossa, joten rivien määrä ei yllätä. Koodi oli mahdollista tarkistaa vielä Haas-työstökeskuksen omalla käyttöjärjestelmällä, jota ohjattiin suoraan työstökeskuksen näytöltä. Kuvassa 53 näkyy, kuinka Haasin ohjelmisto tarkastaa siipien rouhintaan liittyvää G-koodia. Kuvan vasemmassa reunassa näkyy G-koodi ja oikealla terän sijaintitiedot visuaalisessa muodossa. Kuva on suhteellisen pelkistetty, mutta siitä saa suunnilleen käsityksen, missä vaiheessa työstö on.



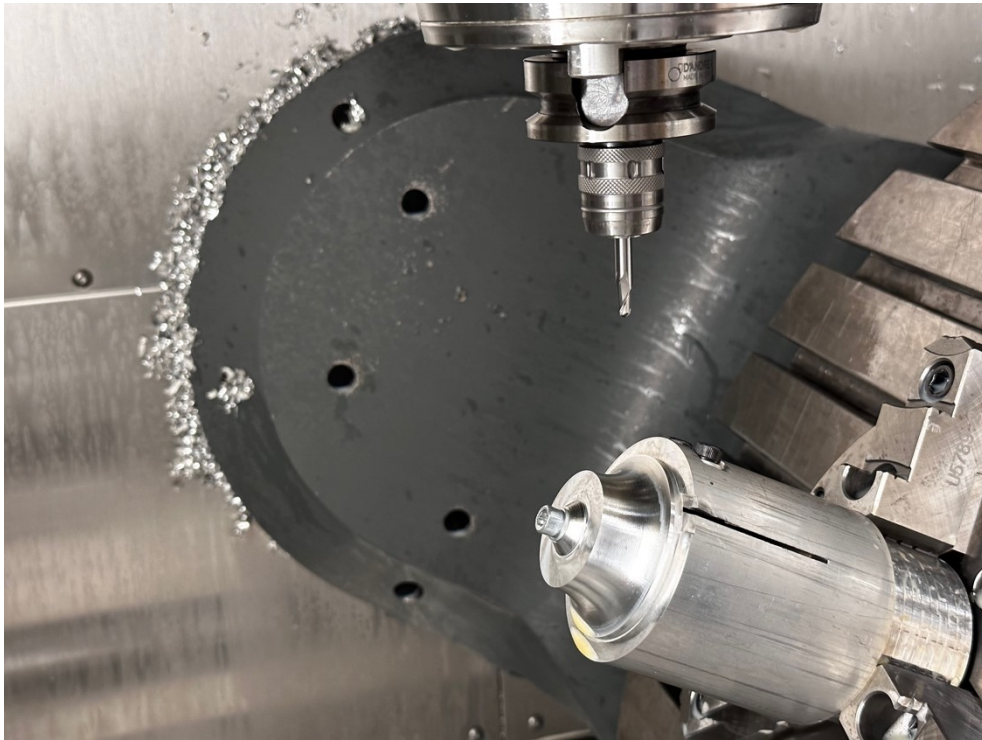
Kuva 53. Haasin G-koodin tarkistus.

G-koodin kanssa ilmeni työstön aikana vain muutama ongelma. Alustavien vaiheiden aikana reiän poraukseen liittyvästä koodista puuttui eräs komento. Kyseessä oli Deep Hole Drilling -työstörata, ja tarkoitus oli, että terä poraa ennalta määrättyyn syvyyteen, minkä jälkeen terä pysähtyy, pyörii paikoillaan hetken ja sen jälkeen tekee niin sanotun välinoston, jonka tarkoituksena on poistaa lastut reiästä. Tämän jälkeen terä laskeutuu jatkamaan porausta. Tätä koskevat asetukset olivat puutteelliset, ja tästä Haasin oma tarkistus ilmoitti virheen. Aika, jonka terän oli tarkoitus pyöriä paikoillaan ennen välinostoa, puuttui. Kun asia oli selvitetty, koodiin lisättiin puuttuva komento manuaalisesti. Tässä tapauksessa puuttuva koodi P50 lisättiin koodiin ja rivi näytti seuraavalta: G4 P50 X1. Rivillä mainittu G4 tarkoitti tuota pysähdyskomentoa, englanniksi Dwell. Sen jälkeen koodissa on lisätty aika; P50 tarkoittaa, että pysäytys oli 50 ms.

Toinen ongelma G-koodin kanssa ilmeni siipien viimeistelyssä. Jostain syystä kaikkia siipiä ei kyetty ajaa peräkkäin. Haas ilmoitti virheen 317 Y AXIS OVER TRAVEL RANGE, joka liittyi koneen maksimiliikeratoihin. Syytä tähän ei ikinä löydetty. Liikeradat eivät missään vaiheessa ylittyneet, mutta jokin ongelma siellä kuitenkin oli. Siiven työstöradat oli suunniteltu vain koskien yhtä siipeä. Tämän jälkeen tuo työstörata monistettiin jokaiselle siivelle. Virhettä ei tullut, kun jokaiseen siiven G-koodin tarkastutti Haasin ohjelmalla erikseen. Tämän perusteella työstöradoissa ja niiden G-koodissa ei ollut varsinaisesti mitään vikaa, vaan näiden eri ohjelmien välissä tapahtuvassa siirtymisessä oli jokin ongelma. Tästä päädyttiinkin siihen, että ongelma pystyttiin kiertämään hyvin yksinkertaisesti ajamalla yksittäiset ohjelmat erikseen.

G-koodiin liittyvien ongelmien ratkomisen jälkeen päästiin aloittamaan. Kaikki asetukset oli määritetty, G-koodi tarkastettu, koordinaatisto asetettu. Nyt vain jäätii tarkkailemaan, että työstössä ei tapahdu mitään poikkeavaa. Kuvassa 54 näemme, kuinka terä on tekemässä ensimmäistä lähestymistä ennen siipien rouhintaa. Ennen kuin terä osuu kappaleeseen, kytkettiin jäähdytinneste päälle manuaalisesti.

Jotta olisi enemmän aikaa reagoida, pikaliikkeiden nopeutta vähennettiin 25 %:iin, ja todella kriittisissä paikoissa 5 %:iin. Ennalta oli pantu merkitte millä G-koodin rivillä tapahtui kriittisimmät tapahtumat, joten Haasin näytöltä pystyttiin seuraamaan koko ajan, milloin lähestytään kriittisimpiä vaiheita. Tämä näkyy kuvassa 55.



Kuva 54. Siipien rouhinta.



Kuva 55. Haasin näyttö työstön aikana.

Rouhinta tapahtui sulavassa yhteistyössä kaikkien akseleiden kesken. Terä käyttäytyi ilman ongelmia koko ohjelman läpi, eikä tapahtunut mitään poikkeavaa. Tämä tarkoitti, että missään vaiheessa ei ollut pakko keskeyttää ohjelmaa. Varotoimenpiteenä työstön ensimmäisten kriittisten vaiheiden aikana kytkettiin Haasista Single block -asetus päälle. Tämän seurauksena Haas suoritti yhden rivin G-koodia kerrallaan. Näytölle oli mahdollista valita näkyviin seuraava komento, jonka avulla pystyttiin arvioimaan seuraavan liikkeen turvallisuutta. Jos kaikki näytti hyvältä ja odotetulta, painettiin Cycle start -painiketta ja ohjelma jatkui taas seuraavan rivin. Tätä tehtiin kuitenkin vain lähestymisen ja poistumisen aikana. Työstön aikana ei keskeytetty, ellei olisi ollut täysin pakko. Tämä siksi, että jokainen pysäytys olisi jättänyt jäljen. Jonkin verran piti luottaa laitteeseen ja omaan huolelliseen valmistautumiseen. Niinpä kun terä oli lähestynyt turvallisesti lähelle kappaletta ja seuraava liike näytti järkevältä, kytkettiin Single block pois päältä, ja annettiin koneen toimia rauhassa. Alun tarkkailun jälkeen pikaliikkeet nostettiin 50 %:iin.



Rouhinnan jälkeen tarkasteltiin kappaletta, jotta nähtiin, oliko jälki tyydyttävää. Rouhinnan lopputulos näkyy kuvassa 56.

Luonnollisesti kokemuksen puutteen takia jäljen tulkitsemiseen tarvittiin ulkopuolisen apua. Jälki oli tosin sen verran hyvää, että jopa kokemattomampikin koneistaja olisi tajunnut, ettei ainakaan mitään hälyttävää työstön aikana ole tapahtunut. Kaikki vaikutti olevan hyvin ja jatkettiin seuraavaan vaiheeseen.

Seuraavaksi vuorossa oli hubin viimeistely. Tämä tarkoitti terän vaihtoa ja uuden ohjelman syöttämistä Haasiin. Koordinaatistoa ei tarvinnut asettaa uudelleen, eikä kappaletta välissä irrotettu. Päinvastoin sitä ei saanut irrottaa enää tässä vaiheessa ennen kuin siipipyörä olisi kokonaan valmis.

Kuvassa 57 näkyy 3 mm:n pallopääterän lähestyminen kohti työkappaletta. Näkyy, miten terän varsi on itse terää paksumpi, mikä aikaisemmin näkyi työstörajojen kuvissa.

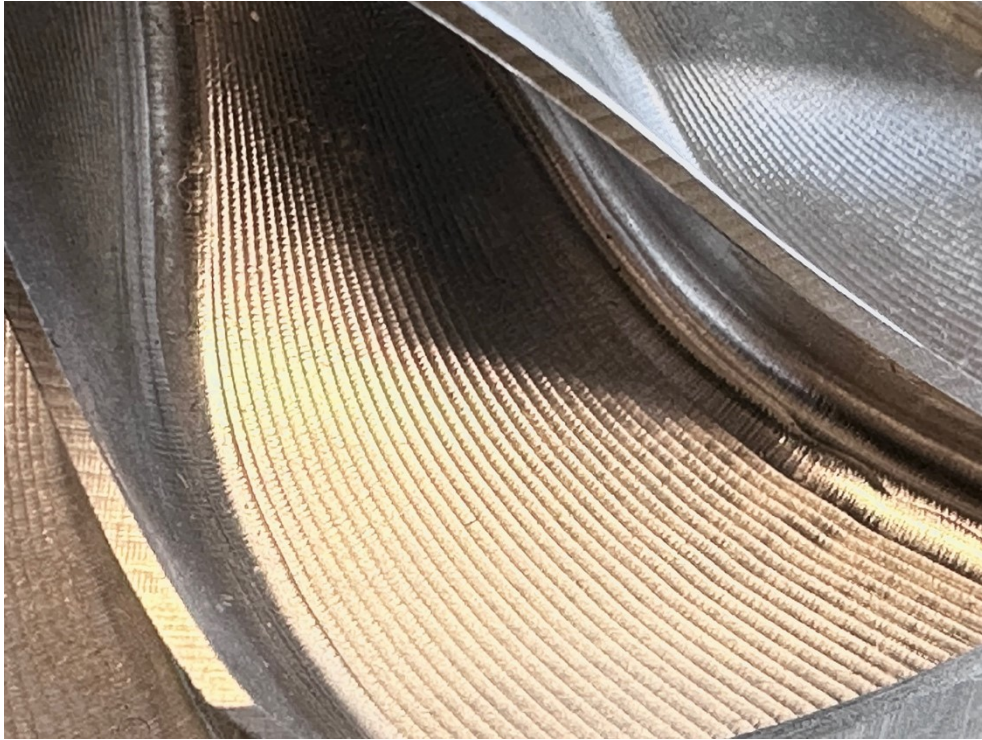


Kuva 56. Rouhittu siipipyörä.



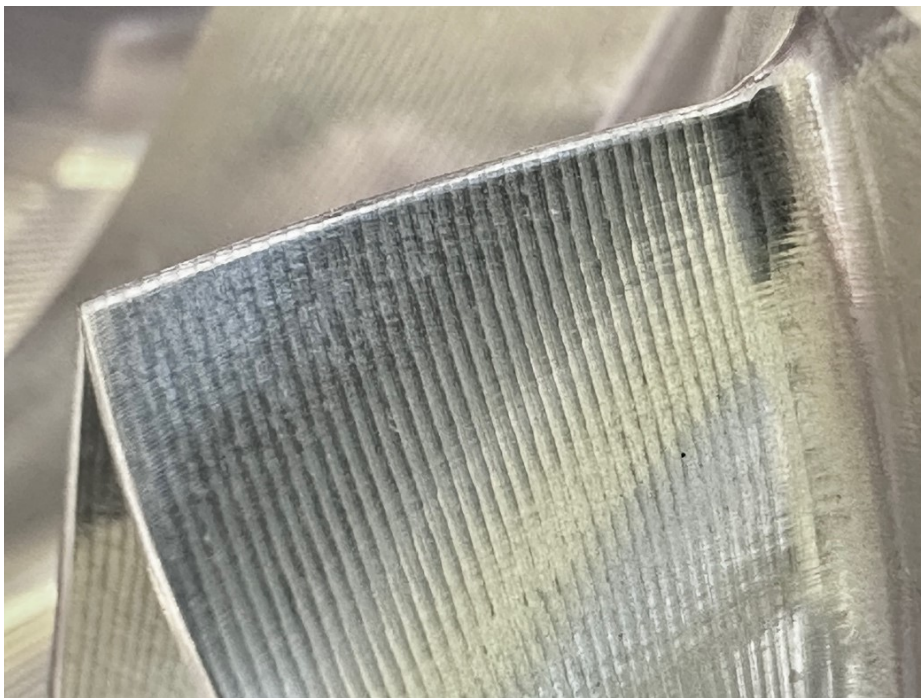
Kuva 57. Hubin viimeistely.

Heti hubin viimeistelyn alussa työstön ääni oli hiukan kovempi, mutta ääni rauhoittui ensimmäisen radan jälkeen. Tämän arveltiin johtuvan siitä, että siiven työssä oli vähän enemmän poistettavaa materiaalia ja tämän takia ääni oli erilainen. Heti kun terä siirtyi siiven kyljestä pois viimeistelemään pelkästään hubia, ääni muuttui. Kyseessä ei ollut valtava muutos mutta sellainen, joka kiinnitti huomion. Työstön aikana akseleiden yhteistyö muistutti hyvin paljon rouhinnan aikaisia liikkeitä. Pöytä keinui noin 90°:n sisällä. CAM-ohjelman laskelmien mukaan hubin viimeistelyn piti kestää noin 1 t 15 min, mutta todellisuudessa aikaa meni hiukan pidempään.



Kuva 58. Viimeistely hubin pinta.

Siipien työstöön siirryttiin samalla terällä ja samoilla työstöarvoilla. Niitä ei ollut syytä muuttaa. Hubin viimeistelyn jälki oli hyvää, ja samoilla jatkettiin. Siiven työstövaiheessa arvelutti myös ohut siipi. Siiven paksuuden ollessa vain 0,7 mm oli mahdollista, että siipi lähtisi väreilemään työstön aikana. Tätä myös pahensi se, että siipi oli rouhittu kokonaan esiin, joten sen tuki oli heikompi. Siipi olisi saanut enemmän tukea, jos rouhinta olisi tehty siiven viimeistelyn kanssa samaan aikaan, vaiheittain. Siiven värinän pelko osoittautui kuitenkin turhaksi. Työstön alussa, kun terä kääntyi siiven toiselle puolelle, ääni voimistui hiukan. Tämä johtui luultavasti siitä, että siipi väreili hiukan voimakkaammin, mutta ero ei ollut huolestuttavan suuri ja ääni kesti vain hetken. Muuten ei ollut minkäänlaisia ongelmia, vaikka ei tuotakaan varsinaiseksi ongelmaksi voisi kutsua vaan enemmänkin huomioksi. Kuvassa 59 näkyy siiven pinnasta lähikuva, jossa näkyy hyvin työstön suuntaiset raidat.



Kuva 59. Viimeistely siiven pinta.

Kokonaisuudessaan varsinaisien siipien työstöön meni aikaa noin 2 t ja kokonaisuudessa koko siiven valmistukseen noin 5 t. Lopulta siipipyörä oli valmis (kuva 60).



Kuva 60. Viimeistely siipipyörä.

## 10 Yhteenveto

Tässä insinööriyön valmistettiin yhdestä alumiinin kappaleesta turboahtimen kompressorisiipi hyödyntäen käänteistä suunnittelua. Kompressorisiipi valmistettiin 5-akselisesti Haas UMC 750 -työstökeskuksella. Alkuperäinen mallikappale mitattiin Metropolian Hexagon Global Performance -koordinaattimittalaitteella. Mittalaitetta käytettiin PCDMIS-ohjelmistolla ja mittalaitteen luoman pistepilven avulla luotiin siipipyörästä 3D-malli. Valmistusta varten luotiin vielä samalla ohjelmalla työstöradat. Lopuksi kompressorisiipi valmistettiin 5-akselisesti Haas-työstökoneella, ja lopputuloksena oli lähestulkoon identtinen kopio.

Loppuun voi todeta, että lopputulokseen oltiin enemmän kuin tyytyväisiä. Kaikki vaiheet saatiin toteutettua eikä mistään jouduttu luopumaan. Suuremmilta kompromisseilta vältyttiin, ja kaikki päätavoitteet toteutuivat. Mallikappale saatiin mitattua, 3D-malli luotua ja kappale valmistettua 5-akselisesti. Suuria ongelmia ei ollut, ja pienet, joita oli, saatiin selätettyä.

Koordinaattimittalaitteen käytössä oli alkuun pieniä ongelmia, mutta perehdytyksen jälkeen laite oli yllättävän suoraviivainen käyttää. Perehdytyksen järjesti Metropolian Juho Jalava-Kanervio. Mittalaite oli vapaasti käytettävissä koko opinnäytetyön ajan.

Mallintaminen Siemens NX:llä vaati myös opettelua. Mallintamisesta oli aikaisempaa kokemusta mutta NX:llä vähemmän. Jokainen ohjelma pitää sisällään oman logiikkansa ja työkalunsa. Ohjelma on todella laaja, ja kaikkien sen ominaisuuksien opettelu ei tässä vaiheessa ollut tarpeen eikä mahdollista. Mallintaminen onnistui käyttäen perinteisiä mallinnustyökaluja. Kehittyneempää NX-osaamista ei vaadittu.

Työstöratojen tekemisestä oli opiskelun ajalta jonkin verran kokemusta, mutta tämä oli ensimmäinen kerta, kun 5-akselisia työstöratvoja käytettiin. Siemens NX:n automaatiikka ja avustavat työkalut toimivat hyvin. Työstöratvoja olisi ollut mahdollista hienosäätää loputtomiin, mutta se ei ollut tarpeen. Ohjelma piti

sisällään suoraan tällaiseen muotoon suunnitellun operaation Multi Axis Blade, joka osasi suoraan ehdottaa työstöratia. Työn laajuuden takia hienosäätämisen jätettiin pienemmälle. Päätaavoite oli luoda toimivat työstöradat, joiden avulla viimeistelyn taso olisi hyvä. Ohjelman ehdottaman työstöradat toimivat lähes moitteettomasti; vain muutamia oletusarvoja täytyi muuttaa.

Itse valmistaminen onnistui todella hyvin. Viimeistelyn taso oli erittäin hyvä, ja kolareilta vältyttiin. 5-akselinen työstö toimi moitteettomasti. Ainoat ongelmat liittyivät postprosessointiin. Jostain syystä poraukseen liittyvä G-koodi oli puutteellinen, ja koodia piti täydentää manuaalisesti. Toinen ongelma liittyi ylittyviin liikeratuihin. Syytä tähän ei löydetty ja kaikki työstöradat saatiin yksittäin kuitenkin menemään läpi ilman ongelmia.

Viimeisteltäviä kappaleita valmistettiin lopulta kolme kappaletta. Yksi kappale jää Metropolialle, yksi minulle ja yksi kappale menee mallikappaleen omistajan käyttöön. Tarkoitus on asentaa valmistettu siipipyörä turboon kiinni. Siipipyörä pitää käyttää ensin tasapainotuksessa. Mielenkiintoista nähdä, miten siipipyörä toimii käytännössä. Se jää nähtäväksi.

Lopuksi kiitos kuuluu Metropolialle, joka tarjosi tarvittavan laitteiston sekä perehdytystä ja muuta tukea. Samoin kiitos kuuluu Alumecolle, joka ystävällisesti toimitti materiaalin tätä työtä varten.

## Lähteet

Apro, Karlo. 2008. Secrets of 5-Axis Machining. New York: Industrial Press.

Eklund, Paul. 2022. Product Manager, Alumeco Oy. Keskustelu 25.10.2022.

Jalava-Kanervio, Juho. 2022. Projektipäällikkö, Metropolia Oy. Keskustelu 21.9.2022.

Karttiala, Tero. 2022. Lehtori, Metropolia Oy. Keskustelu 15.12.2022.

Turboahdin toiminta. Verkkoaineisto. Turbotekniikka Oy. <<https://turbotekniikka.fi/turbot/turboahdin-toiminta>>. Luettu 17.12.2022.

## Alumeco AL2011 Materiaalitodistus



25038 ROVATO (BS) Italy  
Via S. Andrea, 3  
Tel. 030 7725011  
Fax sections dept. 030 7701228  
Fax uff. comm. profili  
Fax bars dept. 030 7702847  
Fax uff. comm barre

**INSPECTION CERTIFICATE**  
**CERTIFICATO DI COLLAUDO**

**ALUMINIUM SEMI-FINISHED EXTRUDED AND DRAWN PRODUCTS**  
**ESTRUSI E TRAFILATI DI ALLUMINIO**

According to: EN 10204 3.1  
Conforme a:

Customer Cliente	<b>ALUMECO A/S</b>	Your Order Vs. Ordine	<b>120570042</b>
		Conf.No. Nr.Conf.	<b>5953000006</b>
		Batch Lotto	<b>2206010101</b>
Material Materiale	<b>BARRA TONDA ESTRUSA 70</b>		EN 755-3
Alloy Lega			EN AW-2011 EN 573-3
Temper Stato			T6 EN 755-2

**CHEMICAL ANALYSIS - ANALISI CHIMICA (%)**

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr	Pb	Bi	
Required Prescritte	min		5,000						0,200	0,200	
	max	0,400	0,700	6,000	0,050	0,050	0,300	0,050	0,400	0,600	
Found / Riscontrato											
Cast. No. Nr. Colata	2218G23	0,117	0,546	5,502	0,050	0,002	0,067	0,015	0,008	0,308	0,504

**MECHANICAL PROPERTIES - CARATTERISTICHE MECCANICHE**

	Tensile strength Carico Unitario di rottura Rm (MPa)	Yield strength Carico Unitario di snervamento Rp0,2 (MPa)	Elongation Allungamento A (%)		
Required Prescritte	min	310,00	230,00	8,00	
	max				
Found / Riscontrato					
	362,86	259,79	11,00		

**REMARKS OF TEST INSPECTOR - DICHIARAZIONI DEL COLLAUDATORE**

This product is conform to a.m. order - Il materiale testato e' conforme a quanto specificato in fase d'ordine  
This alloy complies with: 2011/65/EU (RoHS II) - 2015/863/EU (RoHS III) - 2000/53/EC (ELV) directives  
Prodotto conforme alle direttive: 2011/65/EU (RoHS II) - 2015/863/EU (RoHS III) - 2000/53/EC (ELV)

Quality System certified according to ISO 9001:2008, ISO/TS 16949:2009, ISO 14001:2004  
Sistema Qualità certificato secondo ISO 9001:2008, ISO/TS 16949:2009, ISO 14001:2004

MADE IN ITALY

Rovato mercoledì 13 luglio 2022  
M0904.01B Rev 10

Approved / Approvato  
Quality Manager  
Gianfranco CAZZAGO

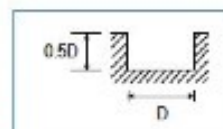


## Työkalujen työstöarvotaulukko


**RECOMMENDED CUTTING CONDITIONS**  
**EMPFOHLENE SCHNEIDKONDITIONEN**
**HSSCo8, 3 FLUTE - SLOTTING**  
**HSSCo8, 3 SCHNEIDEN - NUTENFRÄSEN**
**E2572, E2573, E2516, E2553, E2554, E2551, E2552 SERIES**

MATERIAL	P											
	CARBON STEELS ALLOY STEELS TOOL STEELS				CARBON STEELS ALLOY STEELS TOOL STEELS				CARBON STEELS ALLOY STEELS TOOL STEELS			
	~ 600N/mm <sup>2</sup>				~ HRc20 500 ~ 800N/mm <sup>2</sup>				HRc20 ~ HRc30 800 ~ 1000N/mm <sup>2</sup>			
HARDNESS STRENGTH DIAMETER	RPM	FEED	Vc	fz	RPM	FEED	Vc	fz	RPM	FEED	Vc	fz
2.0	5600	35	35	0.002	4500	25	30	0.002	4000	20	25	0.002
3.0	3500	50	35	0.005	3200	35	30	0.004	2500	25	25	0.003
4.0	2600	60	35	0.007	2200	45	30	0.007	1800	30	25	0.008
5.0	2200	80	35	0.012	1800	55	30	0.010	1600	40	25	0.008
6.0	1800	80	35	0.015	1600	65	30	0.014	1200	40	25	0.011
8.0	1400	90	35	0.021	1100	70	30	0.021	900	50	25	0.019
10.0	1100	90	35	0.027	900	70	30	0.026	800	55	25	0.023
12.0	900	100	35	0.037	800	80	30	0.033	630	55	25	0.029
14.0	800	100	35	0.042	700	70	30	0.033	560	55	25	0.033
16.0	700	100	35	0.048	580	70	30	0.042	450	50	25	0.037
18.0	630	90	35	0.048	500	70	30	0.047	400	50	25	0.042
20.0	560	90	35	0.054	450	70	30	0.052	400	50	25	0.042
22.0	500	90	35	0.060	450	70	30	0.052	350	50	25	0.048
25.0	450	80	35	0.059	400	65	30	0.054	310	40	25	0.043
28.0	400	70	35	0.058	350	55	30	0.052	280	35	25	0.042
30.0	350	60	35	0.057	310	50	30	0.054	250	30	25	0.040
32.0	350	60	35	0.057	280	45	30	0.054	220	30	20	0.045
35.0	320	55	35	0.057	260	40	30	0.051	210	25	25	0.040
36.0	310	55	35	0.059	250	40	30	0.053	200	25	25	0.042
40.0	280	55	35	0.065	220	40	30	0.061	180	25	25	0.046

MATERIAL	P				N			
	CARBON STEELS ALLOY STEELS TOOL STEELS				ALUMINUM ALUMINUM ALLOYS			
	HRc30 ~ HRc40 1000 ~ 1300N/mm <sup>2</sup>							
HARDNESS STRENGTH DIAMETER	RPM	FEED	Vc	fz	RPM	FEED	Vc	fz
2.0	2200	10	15	0.002	12000	110	75	0.003
3.0	1800	15	15	0.003	11000	170	105	0.005
4.0	1100	20	15	0.008	8000	200	100	0.008
5.0	900	20	15	0.007	6300	210	100	0.011
6.0	800	25	15	0.010	5600	210	105	0.013
8.0	560	30	15	0.018	4000	260	100	0.022
10.0	450	30	15	0.022	3100	270	95	0.029
12.0	400	35	15	0.029	2500	260	95	0.035
14.0	350	35	15	0.033	2200	240	95	0.036
16.0	280	30	15	0.036	2000	240	100	0.040
18.0	250	30	15	0.040	1800	240	100	0.044
20.0	220	30	15	0.045	1600	220	100	0.046
22.0	220	30	15	0.045	1400	200	95	0.048
25.0	180	20	15	0.037	1200	190	95	0.053
28.0	160	20	15	0.042	1100	180	95	0.055
30.0	160	20	15	0.042	1100	180	105	0.055
32.0	140	20	15	0.048	1000	160	100	0.053
35.0	130	15	15	0.038	950	150	105	0.053
36.0	120	15	15	0.042	900	150	100	0.056
40.0	110	15	15	0.045	800	130	100	0.054



RPM = rev/min  
 FEED = mm/min  
 Vc = m/min  
 fz = mm/tooth

\* The FEED, in long & extra long types, should be reduced by around 50%



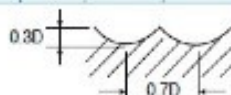
**RECOMMENDED CUTTING CONDITIONS**  
**EMPFOHLENE SCHNEIDKONDITIONEN**

**HSSCo8, 2 FLUTE BALL NOSE**  
**HSSCo8, 2 SCHNEIDEN STIRNRADIUS**

**E2535, E2492 SERIES**

MATERIAL	P											
	CARBON STEELS ALLOY STEELS TOOL STEELS				CARBON STEELS ALLOY STEELS TOOL STEELS				CARBON STEELS ALLOY STEELS TOOL STEELS			
HARDNESS	~ 500N/mm <sup>2</sup>				~ HRc20				HRc20 ~ HRc30			
STRENGTH	~ 500N/mm <sup>2</sup>				500 ~ 800N/mm <sup>2</sup>				800 ~ 1000N/mm <sup>2</sup>			
DIAMETER	RPM	FEED	Vc	fz	RPM	FEED	Vc	fz	RPM	FEED	Vc	fz
R1.5 × 3.0	4500	95	40	0.011	3400	70	30	0.010	2000	30	20	0.008
R2.0 × 4.0	3200	115	40	0.018	2400	80	30	0.017	1400	35	20	0.013
R3.0 × 6.0	2200	135	40	0.031	1700	90	30	0.026	1000	45	20	0.023
R4.0 × 8.0	1600	160	40	0.050	1200	105	30	0.044	700	50	20	0.036
R5.0 × 10.0	1300	180	40	0.069	1000	120	30	0.060	560	60	20	0.054
R6.0 × 12.0	1000	170	40	0.085	800	105	30	0.066	450	55	15	0.061
R8.0 × 16.0	800	150	40	0.094	600	100	30	0.083	350	55	20	0.079
R10.0 × 20.0	600	140	40	0.117	500	85	30	0.085	300	50	20	0.083
R12.5 × 25.0	500	130	40	0.130	400	70	30	0.088	220	40	15	0.091

MATERIAL	P				N			
	CARBON STEELS ALLOY STEELS TOOL STEELS				ALUMINUM ALUMINUM ALLOYS			
HARDNESS	HRc30 ~ HRc40							
STRENGTH	1000 ~ 1300N/mm <sup>2</sup>							
DIAMETER	RPM	FEED	Vc	fz	RPM	FEED	Vc	fz
R1.5 × 3.0	1400	20	15	0.007	11000	230	105	0.010
R2.0 × 4.0	1000	25	15	0.013	8000	260	100	0.016
R3.0 × 6.0	700	25	15	0.018	5600	280	105	0.025
R4.0 × 8.0	500	30	15	0.030	4000	350	100	0.044
R5.0 × 10.0	400	35	15	0.044	3200	360	100	0.056
R6.0 × 12.0	320	35	10	0.055	2500	340	95	0.066
R8.0 × 16.0	250	35	15	0.070	2000	300	100	0.075
R10.0 × 20.0	200	35	15	0.088	1600	280	100	0.088
R12.5 × 25.0	160	30	15	0.094	1300	250	100	0.096



\* The FEED, in long & extra long types, should be reduced by around 50%

RPM = rev/min  
FEED = mm/min  
Vc = m/min  
fz = mm/tooth