



Karelia-ammattikorkeakoulu  
Insinööri (AMK)  
Konetekniikka

# **SPI A2 -pinnan koneistaminen ruiskuvalumuotin valmistuksessa ja vertailu käsin kiillotukseen**

Konsta Lamminsalo

Opinnäytetyö, helmikuu 2025

[www.karelia.fi](http://www.karelia.fi)



**OPINNÄYTETYÖ**  
**Helmikuu 2025**  
**Konetekniikan koulutus**

Tikkarinne 9  
80200 JOENSUU  
+358 13 260 600

**Tekijä**  
Konsta Lamminsalo

**Nimeke**  
SPI A2 -pinnan koneistaminen ruiskuvalumuotin valmistuksessa ja vertailu käsin kiillotukseen

**Toimeksiantaja** Muottituote Group Oy

**Tiivistelmä**

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää toimeksiantajan kyvykkyys valmistaa kiiltävää pinnanlaatua koneistamalla ruiskuvalumuotin osiin. Vuoden 2024 alkusyksyn aikana toimeksiantaja valmisti asiakkaalle muotin, jonka muotti-inserttien pinnanlaaduksi vaadittiin SPI A1 -pintaa. Tässä opinnäytetyössä perehdyttiin eri pinnanlaatuihin ja mitä ne valmistukselta vaativat. Lisäksi tarkasteltiin kiiltävän pinnanlaadun valmistuksen kannattavuutta tarkkuuden puolesta ja taloudellisesta näkökulmasta suurnopeuskoneistuksen ja perinteisten menetelmien välillä. Perinteinen kiillotusmenetelmä tarkoittaa yleisesti käsin kiillotusta.

Opinnäytetyön kirjallisuuskatsauksessa on perehdytty suurnopeuskoneistukseen ja sen eroihin tavanomaiseen koneistukseen verrattuna sekä eri pinnanlaatuojen vaatimuksiin. Lähtötilanteessa havaittujen ongelmien, teorian ja eri lähdemateriaalina olevien tutkimusten avulla kiiltävän pinnanlaadun koneistusprosessia pyrittiin kehittämään.

Tuloksena kiiltävän pinnanlaadun koneistusprosessia onnistuttiin parantamaan, mutta yrityksen nykyisellä konekannalla prosessi on edelleen liian epävarma luotettavaan toistettavuuteen. Vaatimusten mukainen pinnanlaatu on kuitenkin saavutettavissa. Opinnäytetyön myötä on selvillä, kuinka tulevaisuudessa kannattaa kiiltävää pinnanlaatua valmistaa.

**Kieli**  
suomi

Sivuja 47  
Liitteet 3  
Liitesivumäärä 8

**Asiasanat**  
suurnopeustekniikka, lastuava työstö, jyrshintä, kiillotus



**THESIS**  
**February 2025**  
**Degree Programme in Mechanical Engineering**

Tikkarinne 9  
80200 JOENSUU  
FINLAND  
+ 358 13 260 600

Author  
Konsta Lamminsalo

Title  
Machining the SPI A2 Surface in the Manufacture of an Injection Mold and Comparison with Hand Polishing

Commissioned by Muottituote Group Oy

Abstract

The goal of this thesis was to determine the ability of the client to produce a glossy surface finish by machining injection mould parts. During the early autumn of 2024, the client produced a mould for a customer that required a SPI A1 surface finish on the mould inserts. In this thesis, different surface qualities were examined and what they required from the manufacturing process. The feasibility of producing a glossy surface finish was also examined in terms of accuracy and from an economic point of view between high-speed machining and conventional methods. The conventional polishing method generally refers to hand polishing.

The literature review of the thesis examines high-speed machining and its differences compared to conventional machining, as well as the requirements for different surface qualities. Theory, various source studies and the problems identified in the baseline study were used to develop a glossy surface finish machining process.

As a result, the machining process for the glossy surface quality was improved, but with the company's current machinery, the process is still too uncertain for reliable repeatability. However, the required surface quality is achievable. The thesis has provided a clearer idea of how to machine a glossy surface in the future.

Language  
Finnish

Pages 47  
Appendices 3  
Pages of Appendices 8

Keywords  
high-speed technology, machining, milling, polishing

# Sisältö

1	Johdanto .....	6
1.1	Aihe ja tavoitteet .....	6
1.2	Toimeksiantajana Muottituote Group Oy .....	7
1.2.1	Historia ja nykypäivä .....	7
1.2.2	Toiminta ja konekanta .....	8
2	Suurnopeuskoneistus .....	8
2.1	Mitä on suurnopeuskoneistus .....	8
2.2	Suurnopeuskoneistus verrattuna perinteiseen koneistukseen .....	10
2.3	Suurnopeuskoneistus ruiskuvalumuottien valmistuksessa .....	11
2.4	Työstöstrategian merkitys .....	11
2.5	Työkalut suurnopeuskoneistuksessa .....	12
2.6	Moniakselisuus .....	13
2.7	Suurnopeuskoneistuksen merkitys pinnanlaatuun .....	15
3	Pinnanlaatu ruiskuvalumuottien osissa .....	16
3.1	Pinnan tasaisuus .....	16
3.2	Pinnan tasaisuuden saavuttaminen koneistamalla .....	17
3.3	SPI-standardi .....	18
3.3.1	Kiiltävä – Luokka A .....	18
3.3.2	Puolikiiltävä – Luokka B .....	19
3.3.3	Matta – Luokka C .....	19
3.3.4	Teksturoitu – Luokka D .....	20
4	Mittaus valmistusteollisuudessa .....	20
4.1	Koordinaattimittakoneet .....	20
4.2	Koordinaattimittaus .....	21
4.3	Pinnankarheuden mittaus .....	21
5	Yrityksen konekanta .....	22
5.1	Mikron HSM 800 LP .....	22
5.2	Röders RXP601DSH .....	23
5.3	Konekannan käyttö .....	23
6	Kiiltävän pinnanlaadun suurnopeuskoneistus Muottituote Group Oy:n Joensuun tehtaalla .....	24
6.1	Lähtötilanne .....	24
6.1.1	Työstörata .....	25
6.1.2	Jäähdytys .....	27
6.1.3	Työkappaleiden asettelu .....	28
6.1.4	Havaitut ongelmat ja kehityskohteet .....	29
6.1.5	Kosketusmittaus Muottituotteella lähtötilanteessa .....	30
6.1.6	Pinnankarheuden mittaus lähtötilanteessa .....	31
6.2	Lopputilanne .....	31
6.2.1	Koneistus .....	33
6.2.2	Havainnot .....	38
6.2.3	Käsin kiillotus .....	39
6.2.4	Kosketusmittaus Muottituotteella lopputilanteessa .....	39
6.2.5	Pinnankarheuden mittaus lopputilanteessa .....	42
6.2.6	Taloudellinen näkökulma .....	42
7	Pohdinta .....	44
	Lähteet .....	46

- Liite 1 Kosketusmittaukset lähtötilanteessa
- Liite 2 Raportti pinnankarheuden mittauksista lähtötilanteessa
- Liite 3 Raportti pinnankarheuden mittauksista lopputilanteessa

# 1 Johdanto

## 1.1 Aihe ja tavoitteet

Vuoden 2024 alkusyksyn aikana Muottituote Group Oy valmisti asiakkaalle ruiskuvalumuotin, jonka muotti-inserttien pinnanlaaduksi vaadittiin asiakkaan toimesta SPI A1 -pintaa. Tässä opinnäytetyössä perehdyttiin eri pinnanlaatuihin ja mitä ne valmistukselta vaativat. Lisäksi tarkasteltiin valmistuksen kannattavuutta taloudellisesta näkökulmasta yritykselle suurnopeuskoneistuksen ja perinteisten menetelmien välillä. Perinteinen kiillotusmenetelmä tarkoittaa yleisesti käsin kiillotusta.

Tarve selvitykselle ja kokeilemiselle kiiltävän pinnanlaadun valmistamisesta koneistamalla syntyi asiakkaan muotin tarkkuuden vaatimuksista. Kyseessä oleva osa on optinen tuote, jonka läpi johdetaan valoa. Valokuvion muovikappaleen läpi tulisi olla mahdollisimman ehjä. Suurnopeuskoneistuksella päästään todella hyviin mitta- ja muototarkkuuksiin, joten se olisi lähtökohtaisesti parempi vaihtoehto käsin kiillotukselle kyseisen projektin kannalta. Yrityksen Joensuun tehtaalla ei ole aiemmin koneistettu suoraan SPI A1 -vaatimusten mukaista pinnanlaatua, vaikkakin tähän kykenevää teräteknologiaa on kokeiltu jossain määrin. Tähän asti kaikki kiiltävän pinnan vaativat insertit ovat kiillotettu käsin. Useampi työkaluvalmistaja tarjoaa työkaluja, joilla kyseinen pinnanlaatu on mahdollista saavuttaa.

Opinnäytetyössä tarkastellun muotin inserttien valmistuksessa käytettiin NS Tool -nimisen terävalmistajan tarjoamia työkaluja. Myös ajoarvot ja koneistusstrategia ovat terävalmistajan suositusten mukaiset. Valmistuksen tarkkuuden takia lähtökohta oli valita koneistukseen yrityksen uusin ja myös tarkin jyrsinkone, mutta tässä opinnäytetyössä perehdytään myös syihin, miksi kyseinen kone on luontevin valinta koneistukselle.

Tämä projekti oli myös osaltaan tutkimus yrityksen mahdollisuuksista. Projektin tulosten myötä tiedettäisiin paremmin yrityksen mahdollisuudet ottaa jatkossa

vastaavan kaltaisia muotteja valmistettavaksi. Valmistuksen jälkeen hyödynnettiin yrityksen ulkoisia palveluja todentaaksemme saavutetun pinnanlaadun. Muotin insertit käytettiin Itä-Suomen yliopiston laboratoriossa pinnankarheuden mittauksessa.

Tässä opinnäytetyössä ei ole perehdytty tarkemmin mittauksen epävarmuuteen, vaikka se pinnankarheuksien mittaraportissa esiintyy. Epävarmuudella on kuitenkin merkitystä, jos pinnankarheudesta ja kosketusmittauksista vaadittaisiin täysin tarkkoja lukemia.

## **1.2 Toimeksiantajana Muottituote Group Oy**

### **1.2.1 Historia ja nykypäivä**

Muottituote Group Oy on vuonna 1973 perustettu perheyritys. Yrityksen juuret ovat Raumalla, jossa Jouko Nurmi ja Pekka Virtanen perustivat Metallikoneistamo Nurmi & Virtanen kommandiittiyhtiön. Ensimmäiset vuodet yritys toimi Nurmen perheen kotitalon kellaritiloissa. Vaikka kellaritiloja laajennettiin kasvaneen kysynnän ja monipuolistuneen konekannan myötä, kävi tila ahtaaksi. Vuonna 1984 yritys muutti Raumalla isompiin rakentamiinsa tiloihin, jossa se toimi aina vuoteen 2019 saakka. Yritys laajensi Joensuuhun vuonna 2010 entisiin Perlos Toolsin tiloihin ostettuaan sen toiminnan. (Östman 2023.)

Perheyhtiön sukupolven vaihdos tapahtui vuonna 2003, jolloin Jouko Nurmi jatkoi hallituksen puheenjohtajana ja toimitusjohtajaksi siirtyi Joukon poika Jukka Nurmi. Vuonna 2017 Joensuun tehtaanjohtajana aloittanut ja yhtiön osakkaanakin toiminut Tero Vanninen nimitettiin yrityksen uudeksi toimitusjohtajaksi vuoden 2023 toukokuussa ja Jukka Nurmi jatkoi työtään hallituksen puheenjohtajana sekä Rauman tehtaan tehtaanjohtajana. Vuoden 2023 lopussa yritys laajensi entisestään toimintaansa ostamalla Korpilahdella sijaitsevan Rapala VMC -konsernin koko ruiskuvaluliiketoiminnan. Muottituote Group -nimellä yhtiö on toiminut vuodesta 2008 eteenpäin. (Östman 2023.)

## 1.2.2 Toiminta ja konekanta

Muottituote Group Oy on yksi Pohjoismaiden johtavista muotinvalmistajista ja ruiskuvalutuotannon toimijoista. Yrityksellä on vahva kokemus toimialoilla ja se kykenee tarjoamaan asiakkaalle niin ruiskuvalun, muottien valmistuksen sekä muottihuollon saman katon alla. Yrityksellä on konekanta ruiskuvaluun yli 50 kappaletta kokoluokassa 20–450 tn sekä lisäksi 3 kappaletta painevalukoneita 20 tn kokoluokassa. Myös automaatio on kehitetty tehokkaalle tasolle, jolloin jaksoaika ruiskuvalussa saadaan asiakkaan vaatimusten mukaiseksi ja tuotanto tehokkaaksi. Osa ruiskuvaluhallista on rakennettu puhdistilaksi, jotta yritys pystyy valmistamaan tuotteita myös lääketeollisuuteen. (Vanninen 2024.)

Rauman ja Joensuun tehtailla tapahtuu muottien valmistus, huolto ja ruiskuvalua. Korpilahdella on vain ruiskuvalua sekä painevalua.

Muottien valmistuksessa yrityksellä on käytössä nykyaikainen korkealle automatisoitu konekanta. Konekanta pitää sisällään CNC-sorvin, 4- ja 5- akseliset CNC-jyrsinkoneet, niin taso- kuin pyöröhiomakoneet, uppokipinäkoneet ja lankasahat, sekä suurnopeusjyrsinkoneet. Mittatarkkuus varmistetaan 3D-malliin vertaavalla mittalaitteistolla. (Vanninen 2024.)

## 2 Suurnopeuskoneistus

### 2.1 Mitä on suurnopeuskoneistus

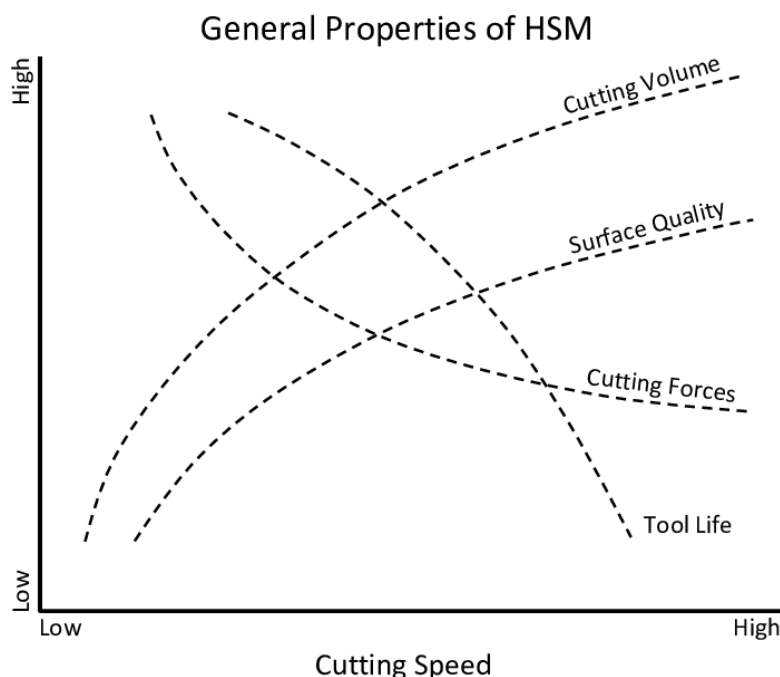
Suurnopeuskoneistus (*engl.* high-speed milling) on nykyaikainen teknologia, joka mahdollistaa tavanomaiseen koneistukseen verrattuna paremman tehokkuuden, tarkkuuden ja laadun valmistettavissa työkappaleissa. Se myös alentaa valmistuksen kustannuksia sekä työstöaikojen pituutta.

Suurnopeuskoneistuksen käyttö teollisuudessa jakaantuu pääasiassa kolmeen luokkaan. Ensimmäinen luokka on teollisuus, jossa valmistetaan paljon samankaltaisia osia, kuten esimerkiksi auto- ja lääketeollisuus. Toisena on lentokoneteollisuus, jossa valmistetaan suuria ja usein ohuita alumiinisia osia.

Kolmas sektori on muottiteollisuus, jossa valmistetaan osia karkaistuista materiaaleista suurella tarkkuudella. (Przybylski & Słodki 2002, 74.)

Grandguillaumen, Lavernhen, Quinsatin ja Tournierin (2015, 13) mukaan muottien tuotannon yhteydessä usein tapahtuvat muutokset suunnittelussa sekä lisääntynyt kilpailukyky edellyttävät kokonaisvaltaisesti optimoitua valmistusprosessia. Tähän valmistusprosessiin suurnopeuskoneistus tyypillisesti kuuluu viimeistelyvaiheessa. Sen jälkeen muotopinnat usein kiillotetaan vaaditun pinnankarheuden saavuttamiseksi. (Grandguillaume ym. 2015, 13.) Viimeistelyvaiheen jälkeen työkappale vastaa todella tarkasti CAD-mallia.

de Souza, Machado, Beckert ja Diniz (2014, 188) kuvailevat, että suurnopeuskoneistuksessa aksiaalinen ja radiaalinen leikkaussyvyys on pieni, kun taas karan pyörimisnopeus korkea. Tämä johtaa korkeisiin leikkuunopeusarvoihin. Vaikka lastuvirta on suurnopeuskoneistuksessa alhainen verrattuna tavanomaiseen jyrsintään, on se korkeampi kuin kipinätyöstössä. (de Souza ym. 2014, 188.)



Kuvio 1. Suurnopeuskoneistuksen yleiset ominaisuudet (Peak Machine Sales 2024).

Leikkuunopeuden kasvattaminen alentaa lastuamisvoimia, mutta sillä on negatiivinen vaikutus työkalun keston. (kuvio 1). Parametrien määrittely on aina tasapainottelua halutun lopputuloksen kanssa.

## **2.2 Suurnopeuskoneistus verrattuna perinteiseen koneistukseen**

Suurnopeuskoneistuksen voisi luonnehtia olevan käytännössä kokonainen laaja prosessi, joka toteutetaan erityisillä koneilla ja menetelmillä (Przybylski & Słodki 2002, 73). Prosessiin liittyvät tarpeeksi kontrolloitu ympäristö, kiinnitysjärjestelmät, työkalut pitimiseen ja työstöratojen tekeminen suurnopeuskoneistukseen soveltuvaksi.

Suurnopeuskoneistuksessa tulee huolehtia puhtaudesta niin koneen kuin työstettävienkin osien osalta. Mahdollinen lika, kuten esimerkiksi koneistuslastut kiinnittimissä tai työstökoneen karalla aiheuttavat epätarkkuutta (Przybylski & Słodki 2002, 76). Perinteisessä koneistuksessa käytettävät kiinnittimet voivat olla esimerkiksi karkeasti ruuvilla säätäviä puristimia. Suurnopeuskoneistukseen tarkoitetut puristimet ovat sen sijaan yleensä hiottupintaisia ja näin ollen paljon tarkempia. Suurnopeuskoneistukseen on myös markkinoilla erillisiä kiinnitys- ja palettijärjestelmiä. Näistä esimerkkinä Erowa, joka tarjoaa todella monipuolisia ratkaisuja valmistuksen automatisointiin (Erowa 2024).

Työkalupitimet ovat pääasiassa lämpökutisteistukoita, kun taas perinteisessä koneistuksessa käytetään lisäksi holkki- ja ruuvikiristeisiä istukoita. Suurnopeuskoneistuksessa käytettävät työkalut ovat yleensä tappi-, torus- ja pallojyrsimiä. Edellä mainittujen terätyyppien lisäksi perinteisessä koneistuksessa käytetään myös paljon teräpalajyrsimiä sekä poria. Sen lisäksi, että jyrsinterät valmistetaan todella mittatarkaksi, tulee työkalujen pyöriä tarkasti keskiössä (run-out). Eräs suurimmista eroista perinteiseen jyrsintään suurnopeuskoneistuksessa on jyrsinkoneen kara. Kara on luultavasti kaikista kriittisin elementti matalan run-outin saavuttamiseksi (Przybylski & Słodki 2002, 76).

### **2.3 Suurnopeuskoneistus ruiskuvalumuottien valmistuksessa**

Ruiskuvalumuottien valmistuksen kannalta koneistus on tärkein valmistusmenetelmä. Valettavilta kappaleilta vaaditaan usein kiiltävää pintaa ja sen saavuttaminen on kallista. Täysin kiiltävän pinnan voi saavuttaa käytännössä vain käsin kiillottamalla muottipesät useiden kiillotusvaiheiden kautta tai koneistamalla nykyaikaisilla työkaluilla. Näistä käsin kiillottaminen on vielä yleisimmin käytössä oleva menetelmä. Koneistamalla voidaan saavuttaa monimutkaisia muuttuvamuotoisia pintoja, joita ruiskuvalettavissa osissa usein esiintyy. (de Souza ym. 2014, 188–189.)

Lisäksi kipinätyöstöä käytetään muotopintojen valmistukseen, mutta tämän työstömenetelmän jälkeen muottipesien pinnanlaatu on samea ja rakeinen. Kiillotusprosessi on todella aikaa vievä, joten mitä parempi pinnanlaatu on ennen tätä työvaihetta, sitä kustannustehokkaampaa muottien valmistus on. Mahdollisimman hyvän pinnanlaadun saavuttaminen lyhentää kiillotusaikaa vaatii tarkat suurnopeusjyrsinkoneet. Koneistus ja kiillotus kulkevat käsikädessä pinnan muoto-poikkeamien suhteen (de Souza ym. 2014, 188–189). Suurnopeuskoneistamisen tehokkuus ja tarkkuus viimeistelyssä tekevät siitä ruiskuvalumuottien valmistuksen kannalta tärkeän valmistusmenetelmän.

### **2.4 Työstöstrategian merkitys**

Oikeanlaisen työstöradan luominen on tärkeä tekijä värinän vähentämisessä ja työkappaleen pinnankarheuden parantamisessa, sekä mahdollisimman lyhyitä ajoaikoja tavoitellessa. Työstöstrategian valitseminen tarkoittaa työstöradan, sen suunnan ja työkalun suunnan, sekä työkalun akselin kaltevuuden määrittämistä jyrsittävään pintaan nähden. Sopivan työstöstrategian valinnalla voidaan suoraan vaikuttaa työkalun värinän määrään, mikä johtaa parempaan pinnanlaatuun. Nämä tekijät vaikuttavat suoraan kokonaiskustannuksiin muotin valmistuksessa. (de Souza ym. 2014, 191.)

## 2.5 Työkalut suurnopeuskoneistuksessa

Työkaluilla koneistetaan usein 45–68 HRC kovaksi karkaistuja seostettuja teräksiä. Nämä materiaalit on vaikeita työstää ja ne tuottava paljon lämpöä, joten tarvitaan pinnoitettuja kovametalliteriä. (Gaurav, B. & Choudhury, S.K. 2012.) Kovametalliterät ovat perinteisessä koneistuksessa usein käytettyjä pikaterästyökaluja pidempi kestoisia, mutta myös kalliimpia. Toisaalta kovametalliterät ovat yleistyneet laajalti myös perinteiseen jyrshintään. Kovametalli on haurasta, joten jyrsimen nurkat voivat herkästi vaurioitua esimerkiksi huonon työstöradan tai liian suuren syvyyslastun takia.

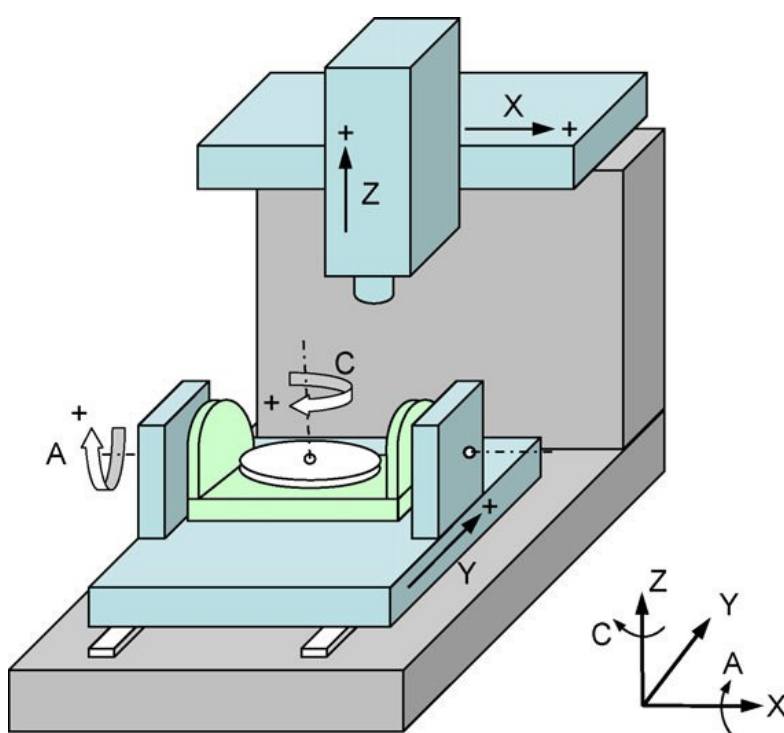
Joitain tyypillisiä kovametalliterien pinnoitteita on TiAlN, TiN, TiCN, TiCON, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, kuutiomainen boorinitridi (CBN, *engl.* Cubic Boron Nitride) ja monikiteinen kuutiomainen boorinitridi (PCBN). (Gaurav, B. & Choudhury, S.K. 2012). PCD-työkalut (*engl.* Poly Crystalline Diamond) ovat yleisesti käytössä komposiittimateriaalien ja erittäin kovien metallien työstämisessä pidentääkseen työkalun kestoja, sillä nämä materiaalit ovat todella kuluttavia työkaluille (Telcon 2024). Sandvikin (2024) mukaan: ”PCD on komposiitti, jossa timanttipartikkeleita on sintrattu yhteen metallisen sideaineen avulla. Timantti on kaikista aineista kovin ja kestää siten parhaiten abrasiivista kulumista. Teräaineena sillä on hyvä kulumiskestävyys.” (Sandvik 2024.)

CBN valmistetaan samankaltaisesti syntetisoimalla korkeassa lämpötilassa ja paineessa kuin PCD. Se on timantin jälkeen toiseksi kovinta saatavilla olevaa materiaalia, mutta se on kemiallisesti ja termisesti timanttityökaluja vakaampaa. (Jain & Bajpai 2020, Sandvik 2024.)

PCD- ja CBN-työkalut ovat vielä vähemmän käytettyjä työkaluja korkeiden hintojen takia varsinkin, kun halvempia kehittyneitä keraamisia ja pinnoitettuja kovametalliteriä on saatavilla (Mativenga ym. 2024, 214). PCD- ja CBN-työkaluja käytetään kovaksi karkaistujen terästen viimeistelyyn erinomaisen mittatarkkuuden ja pinnanlaadun saavuttamisen vuoksi (Jain & Bajpai 2020).

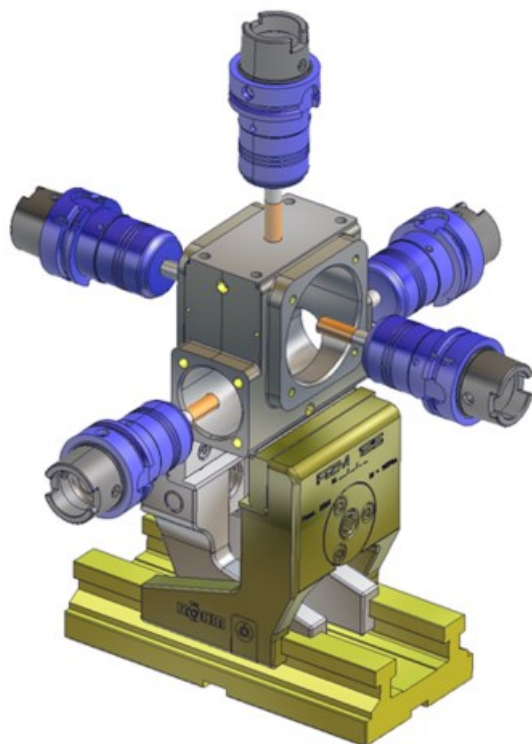
## 2.6 Moniakselisuus

Perinteisesti jyrsinkoneet ovat 3-akselisia, jolloin liikkuvia akseleita koordinaatistossa tarkastellessa ovat X-, Y-, ja Z-akselit. 5-akseliset jyrsinkoneet tuovat mukaan A- ja C-akselin (kuvio 2), jotka ovat pyörähdysakseleita X- ja Z-akselien ympäri (Apro 2008, 15). Joissain 5-akselisissa jyrsinkoneissa voi olla B-akseli, joka on pyörähdysakseli Y-akselin ympäri.



Kuvio 2. 5-akselisen jyrsinkoneen akselit (Ibaraki 2010).

Moniakselisuus tuo useita valmistusteknillisiä hyötyjä ruiskuvalumuotin osien valmistuksessa. Jotkin osat ovat mahdollittomia koneistaa 3-akselisella jyrsinkoneella. Esteeksi voi tulla pinnat, jotka kiertyvät päältä päin tarkastellessa toisten pintojen taakse. Tähän avuksi tulee indeksointi. Tämä mahdollistaa työstettävän kappaleen kiertämisen positiivisesta Z-akselista nähden johonkin muuhun kiinteään kulmaan (kuvio 3).



Kuvio 3. Työstäminen indeksoituna. Positiivinen Z-akseli kuvassa ylöspäin (Vectorcam 2024).

5-akselinen koneistaminen vähentää myös kiinnitysten lukumäärää, kun samalla kiinnityksellä päästään koneistamaan useista eri suunnista (Apró 2008, 8). Kiinnitettäessä työstettävä kappale eri asentoihin useita kertoja, lisääntyy virheiden riski. Tarkkuus voi kärsiä useiden kiinnitysten myötä ja jokainen uusi kiinnitys lisää valmistuksen työaika. CNC-jyrsinkoneiden pystyessä koneistamaan pitkäkestoisia ajoja miehittämättömänä on taloudellisesti kannattavampaa saada yhdellä kiinnityksellä mahdollisimman paljon osasta valmiiksi.

Moniakselisuus mahdollistaa myös simultaanikoneistuksen, mikä tarkoittaa työkappaleen ja työkalun liikuttamista samanaikaisesti, kun jotain pyörähdysakselia käytetään (Apró 2008, 65). Tämä on merkittävä etu koneistettaessa muottien inserttejä. Se mahdollistaa mahdollisimman lyhyen terän käyttöä esimerkiksi syvissä poteromuodoissa ja yhtäläisten työstöratojen luomista pinnoille, joita olisi mahdotonta koneistaa 3-akselisesti yhdellä työkalulla. Koneistettaessa jokin pinta kokonaan yhdellä työkalulla ei siihen jää työkalujen välistä rajasaumaa. Tämä tarkoittaa tasaisempaa pintaa.

Mahdollisimman lyhyen työkalun käyttö toisaalta vähentää värinää ja terän kesto pitenee (Apró 2008, 131).

## **2.7 Suurnopeuskoneistuksen merkitys pinnanlaatuun**

Suurnopeuskoneistuksessa tulee kiinnittää erityistä huomiota syöttönopeuksiin. Mitä suurempi hammaskohtainen syöttö on, sitä karheampi pinnanlaatu on työstettävässä kappaleessa. On kuitenkin pidettävä mielessä, että liian alhainen hammaskohtainen syöttö voi aiheuttaa hankautumista, mikä esiintyy epätasaisuutena pinnassa. Suuremmat työkalun kierrokset koneistuksessa vähentävät lastunpainetta, jolloin työstölastutkin ovat pienempiä kuin alhaisilla kierroksilla koneistettaessa. Tämäkin parantaa pinnalaatua. (Luminoso 2024.)

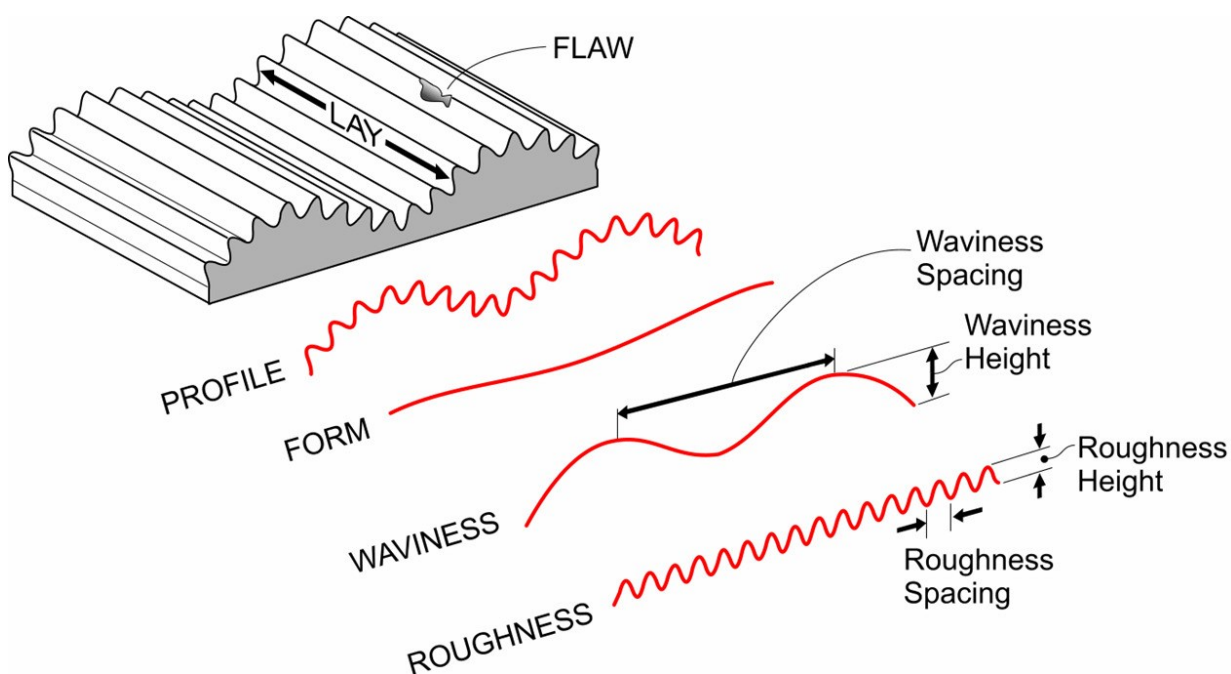
Lämmön poistaminen työkalulta ja työkappaleesta on tärkeää, sillä työkalu kuluu nopeammin, jos se kuumenee liikaa. Myös työkappale voi vaurioitua liiallisesta lämmöstä. Suurnopeuskoneistuksessa työstölastut siirtyvät nopeammin leikkuunopeuksien takia pois työstöalueelta kuin perinteisessä koneistuksessa. Lämpö siirtyy pääasiassa lastuun, jolloin terä ei pääse kuumenemaan liikaa. (Lezanski & Shaw 1990).

Myös värinä on merkittävässä roolissa suurnopeuskoneistuksessa. Luminoson (2024) mukaan jyrsinkoneen rungon tulee kestää suuria voimia ja siitä syntyvää värinää. Polymeerigraniittirunkoinen kone esimerkiksi vaimentaa ja kestää värinää todella hyvin. Niin koneen kuin työkalunkin värinä heikentää mahdollisuuksia saavuttaa hyvä pinnanlaatu. (Luminoso 2024.)

### 3 Pinnanlaatu ruiskuvalumuottien osissa

#### 3.1 Pinnan tasaisuus

Pinnan tasaisuuteen vaikuttavat karkeasti neljä asiaa: pinnankarheus, pinnanmuodostus, pinnan virheet ja pinnan aaltomaisuus.



Kuvio 4. Havainnollistus pinnantasaisuuden termeistä (Zygo 2024).

Pinnankarheus (*engl.* Roughness) kuvaa pinnan geometriassa havaittavia epäsäännöllisyyksiä. Epäsäännöllisyydet voivat olla niin pieniä, että pinta näyttää peilimäiseltä tai hieman suurempia, kuten hiekanjyvät. (Kalpakjian & Schmid 2010, 954–955.)

Pinnanmuodostus (*engl.* Lay) johtuu työstömenetelmistä, jolla pinta on valmistettu. Se syntyy työkalun tai koneen liikkeistä pinnalla, kuten hioessa laikan naarmuista tai koneistaessa työkalun pyörimis- ja liikkumissuunnasta. Pinnanmuodostus voi olla kohtisuora, yhdensuuntainen, ristiin varjostettu, säteittäinen, monisuuntainen, yhdensuuntainen tai isotrooppinen. (Kalpakjian & Schmid 2010, 954–955.)

Pinnan virheitä (*engl.* Flaw) ovat erilaiset satunnaiset selkeästi muusta pinnasta poikkeavia epäsäännöllisyyksiä, kuten esimerkiksi naarmuja, pieniä kuoppia tai halkeamia. Nämä virheet voivat syntyä työstämisen myötä, mutta ne voivat johtua myös materiaalin rakenteesta. (Kalpakjian & Schmid 2010, 954–955.)

Pinnan aaltomaisuus kuvaa merkittävämpää, makroskooppista eroa pinnassa, joka vastaa sen tasaisuutta. Aaltomaisuus (*engl.* Waviness) on suurempaa kuin pinnankarheuden pituus, mutta tarpeeksi pientä ja lyhyttä, jotta sitä voidaan pitää tasaisuusvirheenä. Tämä voi syntyä koneistusvirheistä, jotka tyypillisesti johtuvat työkalun taipumasta tai värinästä ja lämpötilojen epätasaisuudesta. (Kalpakjian & Schmid 2010, 954–955.)

### **3.2 Pinnan tasaisuuden saavuttaminen koneistamalla**

Muotti-insertit valmistetaan työkaluteräksistä, jotka ovat seostettu vastaamaan ruiskuvalun vaatimuksia. Teräs usein karkaistaan, mikäli muotilla on tarvetta ajaa suuria määriä tuotantoa tai jos muotilta vaaditaan kestävyyttä. Koneistettaessa mahdollisimman tasaista pintaa, tulee huomioida erilaisia työstön lopputulokseen vaikuttavia tekijöitä.

Lähtökohtaisesti on valittava niin lyhyt työkalun pituus kuin mahdollista (Röders GmbH 2022, 12). Työkalun leikkaavat särmät tulee olla ehjänä. Työkalun kuluminen on usein syynä taipumiselle ja värinälle. Jos työkalu on liian kulunut, ei se enää leikkaa kunnolla ja tällöin voi syntyä lämpöä työkappaleeseen, kun lämpö ei enää poistu normaalisti työstölastun mukana. Jäähdytyksellä pyritään pitämään koneistettavan kappaleen sekä työkalun lämpötila tasaisena ja tarpeeksi alhaisena. Tyypillisimpiä jäähdytyksiä suurnopeuskoneistuksessa ovat paineilma, öljysumu ja leikkuuneste. Pinnan tasaisuuteen vaikuttavat myös muut aiemmin suurnopeuskoneistus -osiossa mainitut tekijät.

Saavutettavasta pinnankarheudesta suurnopeuskoneistamalla löytyy erittäin vaihtelevia tutkimustuloksia, mutta tässäkin opinnäytetyössä käytettyjen

työkalujen valmistajan mukaan heidän PCD-työkaluillaan on saavutettu Ra 0,030–0,046 µm pinnankarheus (NS Tool 2024).

### 3.3 SPI-standardi

SPI viittaa amerikkalaiseen pinnankäsittelystandardiin. Nimi tulee sanoista Society of the Plastic Industry. Standardi kattaa 12 SPI-kiillotuslaatua: SPI A1 – SPI D3. SPI-luokat on jaettu kolmeen osaan. Standardi on laajasti käytössä muottien valmistuksessa ja teollisuudessa ympäri maailman. SPI-pinnanlaatu kulkee käsikädessä pinnankarheuden kanssa, jota kuvaa Ra-arvo. (Plastopia 2024.) Ra-arvo mittaa profiilipoikkeamien aritmeettista keskiarvoa mittauspituudella (Kalpakjian & Schmid 2010, 955). SPI-pinnanlaatua määriteltäessä käytetään usein myös tähän tarkoitukseen tehtyjä vertailukappaleita, joihin on tehty eri luokitusten vaatima pinnanviimeistely.

On yleistä, että muottien valmistuksessa valmistettavan osan 2D-piirrustukseen on suoraan merkattu vaaditut pinnanlaadut, mutta niiden tulisi selvittää ainakin tuotteen 2D-piirrustuksesta. Valmistuksen eri työvaiheille on merkittävää tietää vaadittava pinnanlaatu ja se voi suoraan määrittää valmistusmenetelmän. Suunnittelijan tulee myös huomioida, että pinnanlaatuvaatimuksella on suora vaikutus valmistettavan muotin kustannuksiin.

#### 3.3.1 Kiiltävä – Luokka A

Kiiltävä luokan A pinnanlaatu on usein vaatimus tuotteen pinnoille, joiden täytyy näyttää sileiltä tai peilimäisiltä ja jotka ovat visuaalisesti silmää miellyttäviä. Tällaiset pinnat ovat kalleimpia valmistaa. Tämän luokittelun pinnat jättävät muoviesineen joko kiiltäväksi tai läpinäkyväksi, mikäli tuotteeseen käytetään kirkasta muovilaatua. Amorfiset muovilaadut voivat olla läpinäkyviä, kun taas osakiteiset muovit eivät ole. Yleisimpiä tämän pinnanlaadun vaativia tuotteita ovat erilaiset optiset tuotteet ja läpinäkyvät säilytystarvikkeet. (Jmerson 2024.)

Kaikkia kolmea SPI A -pinnanlaatua varten tarvitaan timanttkiillotustahnaa perusteelliseen muotin kiillotukseen. Kiiltävien luokitusten pinnankarheus on Ra-arvona ilmaistuna 0,012–0,10 µm. (Jmerson 2024.)

### **3.3.2 Puolikiiltävä – Luokka B**

Puolikiiltävän luokan B pinnat ovat keskitason kiillotusta. Pintakäsittelyyn kuuluu pintojen hionta edestakaisin ja se suoritetaan erikokoisilla viilatyökaluilla. Hiontaliike aiheuttaa enemmän visuaalisesti näkyville jääviä viivoja tuotteessa verrattuna SPI A -luokan pintakäsittelyihin. Luokan B viimeistelyä vaaditaan usein tuotteiden osiin, jotka eivät jää näkyviin tai joiden ei tarvitse olla esteettisesti miellyttäviä (Jmerson 2024).

SPI B -luokan pinnankarheus Ra-arvona ilmaistuna on 0,05–0,32 µm (Jmerson 2024). Luokan B pinnanlaatuojen saavuttamiseen ei tarvita enää timanttihnaa, vaan käytetään hiomapaperin karkeuksia 320, 400 ja 600 pinnanlaatuokituksen numeron mukaan (Järvelä ym. 2000, 284).

### **3.3.3 Matta – Luokka C**

Matan luokka C:n pinnanlaatu on samankaltainen kuin B-luokka, mutta karkeampi. Tätä pinnanlaatua käytetään tuotteisiin, jotka vaativat keskitasoista karheutta tuotteen virheiden peittämiseksi ja pidon parantamiseksi, kuten esimerkiksi kaukosäätimen pinnoilla. Jokaiseen C-luokan SPI-viimeistelyyn käytetään tiettyä hiontakiven karkeutta. Nämä pinnanlaatuokatat ovat taloudellisin ja suosituin pintakäsittely muoviteollisuudessa. (Jmerson 2024.)

Luokan C pinnanlaatuojen saavuttamiseen käytetään hiomakiven karkeuksia 320, 400 ja 600 pinnanlaatuokituksen numeron mukaan (Järvelä ym. 2000, 284). Ra-arvo luokan C pinnanlaaduilla on 0,35–0,70 µm (Jmerson 2024).

### 3.3.4 Teksturoitu – Luokka D

Luokan D pinnat ovat yleensä hiekkarakenteisia karkeimpia pintoja tuotteille, joilla on oltava tietty visuaalinen vaikutus ja tuntuma. Näille pinnoille tehdään yleensä käsittely kivijauheella tasoittaakseen pinnan. Tämän jälkeen voidaan tehdä lasikuula- tai alumiinioksidipuhallus, jolla saadaan aikaan sileä pintakäsittely. Pinnassa ei kuitenkaan ole enää havaittavissa työstön aiheuttamia hankaus- tai koneistusjälkiä. Nämä pinnanlaatuvaatimukset ovat laajasti käytössä teollisuudessa esimerkiksi erilaisissa kahvoissa, joissa tarvitaan edellistä luokitusta parempaa pitoa (Jmerson 2024).

D1 pinnanlaatu saavutetaan kuivalla lasikuulapuhalluksella ja D2 sekä D3 pinnanlaatu eri karkuisella alumiinioksidipuhalluksella (Järvelä ym. 2000, 284). Luokan D pinnankarheus Ra-arvona ilmoitettuna on SPI D1 -pinnoille 0,80–1,00 µm, D2-pinnoille 1,00–2,80 µm ja D3-pinnoille 3,20–18,0 µm, joten tässä luokassa on kaikkein eniten vaihteluväliä pinnankarheuksien osalta (Jmerson 2024).

## 4 Mittaus valmistusteollisuudessa

### 4.1 Koordinaattimittakoneet

Koordinaattimittakoneet ovat laajasti valmistusteollisuudessa käytettyjä laitteita, joilla voidaan mitata osia ja tuotteita tarkasti sekä täsmällisesti. Laitetta käytetään työkappaleiden fyysiseen mittaamiseen. (Metrology News 2023.)

Mittausprosessin keskeisessä roolissa on mittakoneen anturi. Anturit jaetaan kosketusantureihin ja kosketuksettomiin antureihin. Koskettava anturi on usein teräksestä, keraamista tai rubiinista valmistettu pallo. Kosketuksettomat anturit ovat joko optisia tai lasertekniikkaa hyödyntäviä antureita. (Goodfish Group 2024.)

## 4.2 Koordinaattimittaus

Koordinaattimittakoneella mitataan piirteitä työkappaleiden halutuista pinnoista. Mittapiirteet ovat esimerkiksi pisteitä, tasoja tai ympyröitä. Nykyaikaista mittakoneita ohjataan tietokoneen ohjelmistolla, johon tuodaan mitattavan osan 3D-malli ja ohjelmistolla luodaan mittapiirteitä määrittelemällä piirteitä ja geometrioita 3D-mallista. Mittakone suorittaa mittauksen automaattisesti koskettamalla mittakärjellä työkappaleen pintaa ja vertaamalla tätä kosketusta 3D-malliin.

Metrology Newsin (2023) artikkelin mukaan mallipohjainen määrittely (MBD – Model Based Definition) on jatkuvasti kasvava suuntaus koordinaattimittakoneen ohjelmoinnissa. Mallipohjainen määrittely sisältää osan tai kokoonpanon 3D-mallin, johon on sisällytetty osan geometria ja toleranssit. Toisinaan 3D-malli voi olla huonolaatuinen. Tällöin esimerkiksi ympyrän määrittely malliin voi helpottaa mittaajan työtä, kun mittakone tunnistaa piirteen varmasti ympyräksi. Mallipohjainen määrittely vähentää käyttäjän tekemien virheiden mahdollisuutta sekä mittausprosessin tehokkuutta manuaalisen mittatietojen syöttämisen jäädessä pois. Se myös lisää joustavuutta sekä jäljitettävyyttä, sillä mittatiedot seuraavat mallia aina. (Metrology News 2023.)

Koordinaattimittakoneita voidaan käyttää myös osana automaatiota liittämällä mittakone esimerkiksi koneistussoluun, jolloin työstetty kappale voidaan ohjata mitattavaksi valmiiksi määritellyn mittausohjelman mukaan.

Koordinaattimittakoneita käytetään myös työkappaleiden paikoitustietojen, eli esiasetusten luomiseen. Työkappaleen paikoitus mitataan paletin keskiöön nähden ja saadut tulokset syötetään työstökoneelle.

## 4.3 Pinnankarheuden mittaus

Pinnankarheuden mittaaminen on mahdollista manuaalisilla ja digitaalisilla menetelmillä. Yleisin käytössä oleva pinnankarheuden mittauslaite on profilometri, joka on yksi tarkimmista työkaluista mitata pinnankarheutta.

Profilometrejä on koskettavia ja kosketuksettomia. Koskettavassa profilometrissä on neulan kärkeä muistuttava piirrin, jota raahataan mitattavaa pintaa pitkin. Piirrin kulkee pinnanmuodon huippujen ja laaksojen yli ja korkeuden muutokset rekisteröidään sähköisesti. Korkeuden muutoksista syntyy pinnan profiili, josta pinnankarheus voidaan määrittää. (GD&T Basics 2021.)

Optinen profilometri käyttää valoa pinnan profiilin mittaamiseen. Valo johdetaan laitteen läpi ja valo heijastuu mitattavasta kappaleesta takaisin laitteeseen. Tarkkaan kohdistetut peilit laitteessa luovat kappaleesta kolmiulotteisen kuvan, jonka laitteen kamera havaitsee. Optinen profilometri on turvallisempi vaihtoehto pinnankarheuden mittaamiseen, koska se ei jätä mitään jälkiä mitattavaan pintaan. (GD&T Basics, 2021.) Tuloksia on myös helppoa ja nopeaa tarkastella suoraan tietokoneen näytöllä.

## **5 Yrityksen konekanta**

### **5.1 Mikron HSM 800 LP**

Mikron HSM 800 LP on sveitsiläisvalmisteinen 3-akselinen suurnopeusjyrsinkone. Koneen maksimiliikealueet ovat 800 x 600 x 500 mm. Koneessa on kivikomposiittirunko ja jäykkä valurautainen konepöytä. Jokaisen akselin välitön voimansiirto mahdollistavat täysin samanaikaiset akselien liikkeet, sekä koneen lineaariset johteet todella hyvän paikoitustarkkuuden. (Alltek 2024.)

Valmistajan ilmoittama paikoitukseen liittyvä epävarmuus on 8 µm, paikoituspoikkeaman virhe 5 µm, väljyys 4 µm ja toistotarkkuus 5 µm. Koneen huippunopeus jokaisella akselilla on 60 m/min. Kone on vuosimallia 2017. Jyrsinkoneessa on 15 kilowatin HSK-E50 kara, jonka maksimi kierrosnopeus on 36 000 RPM. Koneessa on pelkästään paineilmajäähdytys työkalulle. (GF Machining Solutions 2016.)

## 5.2 Rödgers RXP601DSH

Rödgers RXP601DSH -suurnopeusjyrsinkone on 5-akselinen jyrsinkone, joka on valmistettu Saksassa. Sen maksimiliikealueet ovat 600 x 600 x 600 mm. Koneessa on myös kivikomposiittirunko ja kaksipuolisesti tuettu konepöytä. Myös tässä koneessa on välitön voimansiirto kaikille akseleille sekä lineaariset johteet (Rödgers GmbH 2022.)

Valmistajan määrittelemä tarkkuus jakaantuu neljään tekijään. Paikoituksen epävarmuus on 2,5 µm, paikoituspoikkeaman virhe 1 µm, väljyys 0,5 µm ja toistotarkkuus 1,5 µm. (Cohrs 2024.)

Jyrsinkone on valmistettu vuonna 2022. Kone on varustettu työkalun öljysumujäähdytysjärjestelmällä, mutta se ei ole niin sanotusti märkäkone, eli sillä ei voi käyttää jatkuvaa jäähdytysnestehuuhtelua. RXP601DSH koneita saa myös kyseisellä optiolla varusteltuna. Lisäksi koneessa on paineilmajäähdytys työkalulle. Koneessa on Muottituotteella käytössä olevan Mikronin tavoin 15 kilowatin HSK-E50 kara, jonka maksimi kierrosnopeus on 36 000 RPM. (Rödgers GmbH 2022.)

## 5.3 Konekannan käyttö

Samalla karalla varustellut jyrsinkoneet helpottavat työstöratojen ohjelmoijan työtä, sillä tehdessä työstöratoja käytetään usein törmäystarkastus ominaisuutta. Tarkastaessa törmäyksiä työstöradassa tulee työkalulle määrittää pidin, jonka jälkeen voidaan tarkastaa törmäykset 3D-malliin verraten. Kun molemmat suurnopeusjyrsinkoneet ovat varusteltu samalla karalla, voidaan ohjelmoidut ja törmäystarkastellut työstöradat koneistaa vaivattomasti kummalla koneella tahansa.

Yrityksellä käytössä olevan automatisoidun solun ansiosta on myös mahdollista työstää kappaleita molemmilla jyrsinkoneilla peräkkäin. Tämä on hyödyllistä silloin, kun työstettävään kappaleeseen tulee joitain 5-akselisuutta vaativia

piirteitä, mutta muutoin kappale on mahdollista valmistaa 3-akselisesti Mikronilla. Esimerkiksi tilanne, jossa koneet asetetaan työstämään samaa kappaletta peräkkäin voi olla silloin, kun Rödgers on asetettu työstämään pitkään miehittämätöntä koneistusta ja on tarve saada yhtäaikaisesti Mikronille työstettävää. Tällöin koneistetaan kappale muutoin valmiiksi Mikronilla, paitsi jotkin yksittäiset 5-akselisuutta vaativat piirteet jätetään Rödgersille.

Lisäksi Joensuun tehtaalla on toinen Rödgers RXP601DSH jyrsinkone, mutta se on pääasiassa käytössä elektrodien valmistukseen grafiitista ja kuparista. Koneessa on myös eri kiinnitinjärjestelmä ja kara, joten konetta käytetään raudan koneistamiseen erityistilanteissa, kuten konerikon sattuessa.

## **6 Kiiltävän pinnanlaadun suurnopeuskoneistus Muottituote Group Oy:n Joensuun tehtaalla**

### **6.1 Lähtötilanne**

Muottituotteella valmistettuun ruiskuvalumuottiin kuului pesä, keerna, pukkauskehä sekä pesään ja keernaan tuleva irtokeerna, joihin vaadittiin SPI A1 -pinnanlaatua. Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan pelkästään keernaa, sillä se soveltuu hyvin pinnankarheuden mittaamiseen ja siihen on helpoin tehdä monipuolisesti erilaisia työstöratoja. Ennen kyseistä 4-pesäistä muottia kesän 2024 aikana valmistettiin 1-pesäinen protomuotti, jonka valmistuksessa opittuja asioita hyödynnettiin tämän 4-pesäisen massamuotin valmistuksessa. Lähtökohtaisesti suurnopeuskoneistus tapahtui Muottituotteella vakiintuneita menetelmiä käyttäen ottaen huomioon kuitenkin työkalujen tuomat vaatimukset.

Koneistaminen päädyttiin tekemään Rödgers RXP601DSH -koneella useasta syystä. Jo pelkästään sen tarkkuus on syynä valinnalle, sillä koneistettaessa peilipintaa PCD-työkalulla tulee esiviimeistelyssä jättää työvara kauttaaltaan yhtä tarkasti koneistettavaan muotoon. Tarkkuuden puolesta Rödgers on huomattavasti parempi kuin Mikron. Myös 5-akselisuus on vaikuttava tekijä, sillä

pallotyökalu toimii paremmin muulla kuin niin sanotulla nollaleikkuulla, eli terän keskikohdalla. Rödersillä pystyy kääntämään työkappaleen haluttuun kulmaan, jolloin työkalu ei leikkaa pelkästään nollaleikkuulla. Lisäksi työkalun öljysumujäähdytys onnistuu vain Rödersillä.

### 6.1.1 Työstörata

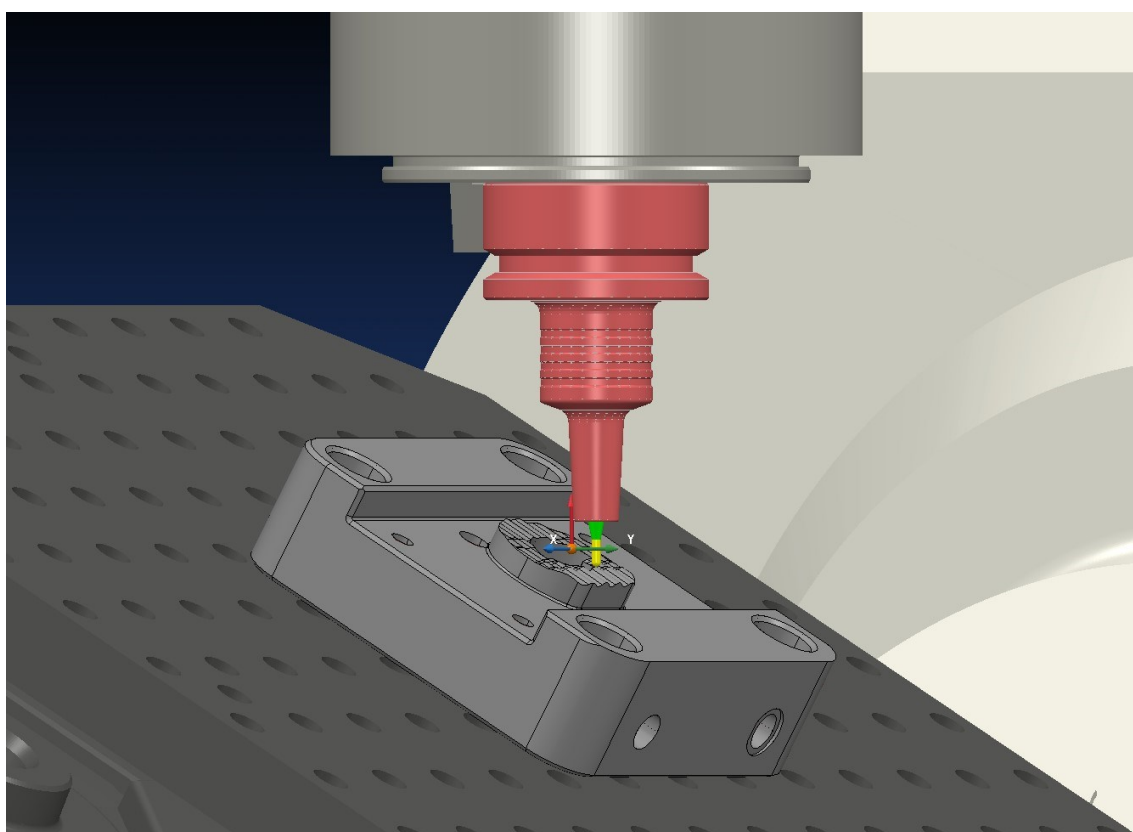
Työstöradan tekemisessä käytettiin Muottituotteella vakiintuneita menetelmiä sekä terävalmistajan ohjeistamia työstöarvoja ja työstöstrategiaa. Ohjelmointi tapahtui PowerMill 2020 -ohjelmistolla. Koneistukseen käytetyt työkalut ja parametrit ovat esitetty taulukossa 1.

Työstövaihe	1. rouhinta	2. rouhinta	3. rouhinta	1. esiviimeistely	2. esiviimeistely	Viimeistely
Työkalu	D8xR2x16	R2x10	R1x6	R1x6	CBN R1x5	PCD R1x5
Karanopeus (r/min)	6000	23 000	34 000	36 000	36 000	36 000
Pöytäsyöttö (mm/min)	3500	2100	2100	1400	700	700
Lastuamis- syvyys ap×ae(mm)	0.1×2.0	0.06×0.6	0.05×0.063	0.025×0.05	0.02×0.02	0.005×0.005
Työvara (mm)	0.1	0.05	0.05	0.025	0.005	-
Laskennallinen työstöaika	3min	10min	6min	10min	51min	3hr24min

Taulukko 1. Koneistusparametrit lähtötilanteessa.

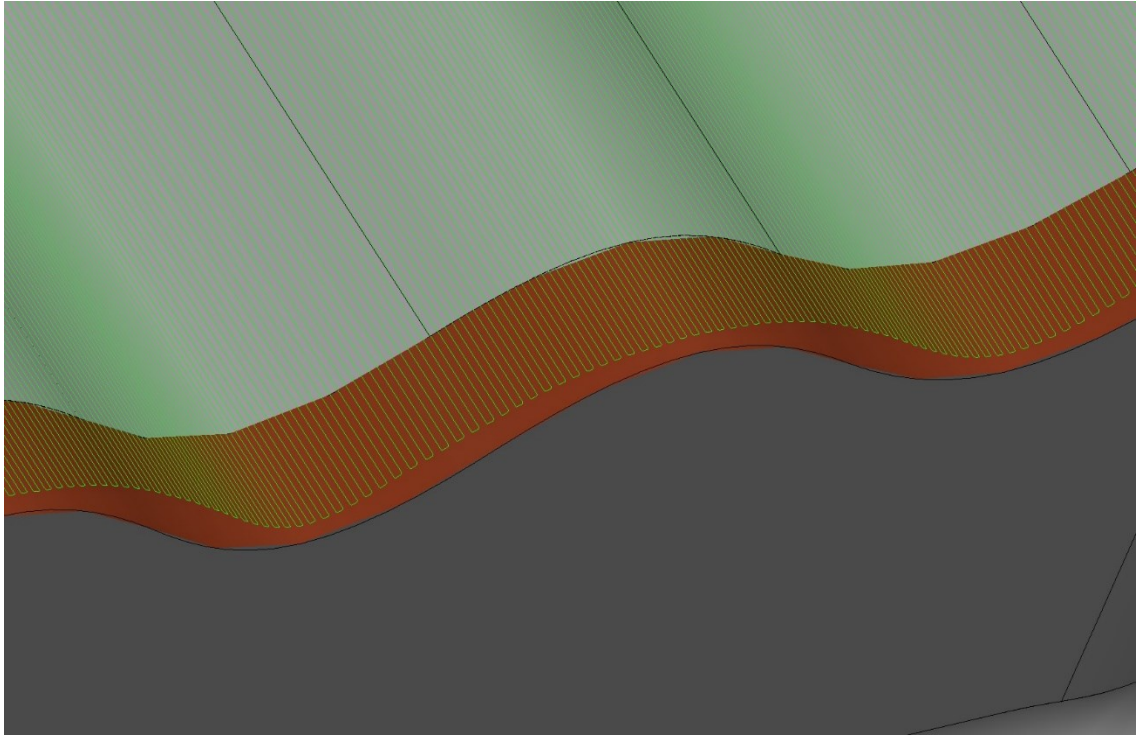
Rouhinta 1 -vaiheessa on käytetty Mallin aineenpoisto -työstörataa, jolla koneistetaan kappalemuodosta nopeasti suurin aineenpoisto. Rouhinta 2 -vaiheessa on käytetty Mallin jäännös aineenpoisto -työstörataa. Tämä työstörata laskee edellisestä rouhintaoperaatiosta jääneen aineen malliin nähden ja koneistus tapahtuu vain alueille, jossa ainetta on jäljellä. Rouhinta 3 on 3D offset viimeistely -työstörata, jossa työkalu pysyy mahdollisimman hyvin koko ajan aineessa ilman ylimääräisiä nostoja. Tällä työstöradalla on koneistettu muotoon kauttaaltaan tasaiset työvarat ja poistettu aiemmista työstöradoista aiheutuneet työstölastujen väliset portaat.

Esiviimeistely 1 on Rasteri viimeistely -työstörata, jossa työkalu työstää edestakaisella liikkeellä koko muodon, pysyen koko ajan mahdollisimman hyvin aineessa. Esiviimeistely 2 ja viimeistely ovat kopioita edellisestä Rasteri viimeistely -työstöradasta, mutta vain eri työkalulla, työvaroilla ja työstöparametreillä. Esiviimeistely- ja viimeistelytyöstöradoissa on kappaletta indeksoitu X-akselin ympäri 30 astetta, jotta terä ei leikkaa nollaleikkuulla (kuva 1). Kaikissa muissa työvaiheissa käytetyt työkalut ovat leikkaavia, paitsi viimeistelyssä. Viimeistelyssä käytetty PCD-työkalu on peilipinnan työstöön tarkoitettu pallo, joka on täynnä timanttipartikkeleita (esitetty myöhemmin kuvassa 4), jolloin siinä ei ole varsinaista leikkaavaa särmää ollenkaan.



Kuva 1. Konesimulointi indeksoidusta työstöradasta, jossa pidin on punaisena ja työkalu keltavihreänä. (Kuva: Konsta Lamminsalo)

Kaikissa viimeistelyvaiheissa on työstöratojen ohjelmoinnissa käytetty mallinnettuja apupintoja, jolloin terä saadaan lähestymään työstettävän materiaalin ulkopuolelta jouhevasti ja työstölastujen yhdistävät liikkeet tapahtuvat irrallaan aineesta (kuva 2).



Kuva 2. Apupinnat ja työstörata. (Kuva: Konsta Lamminsalo)

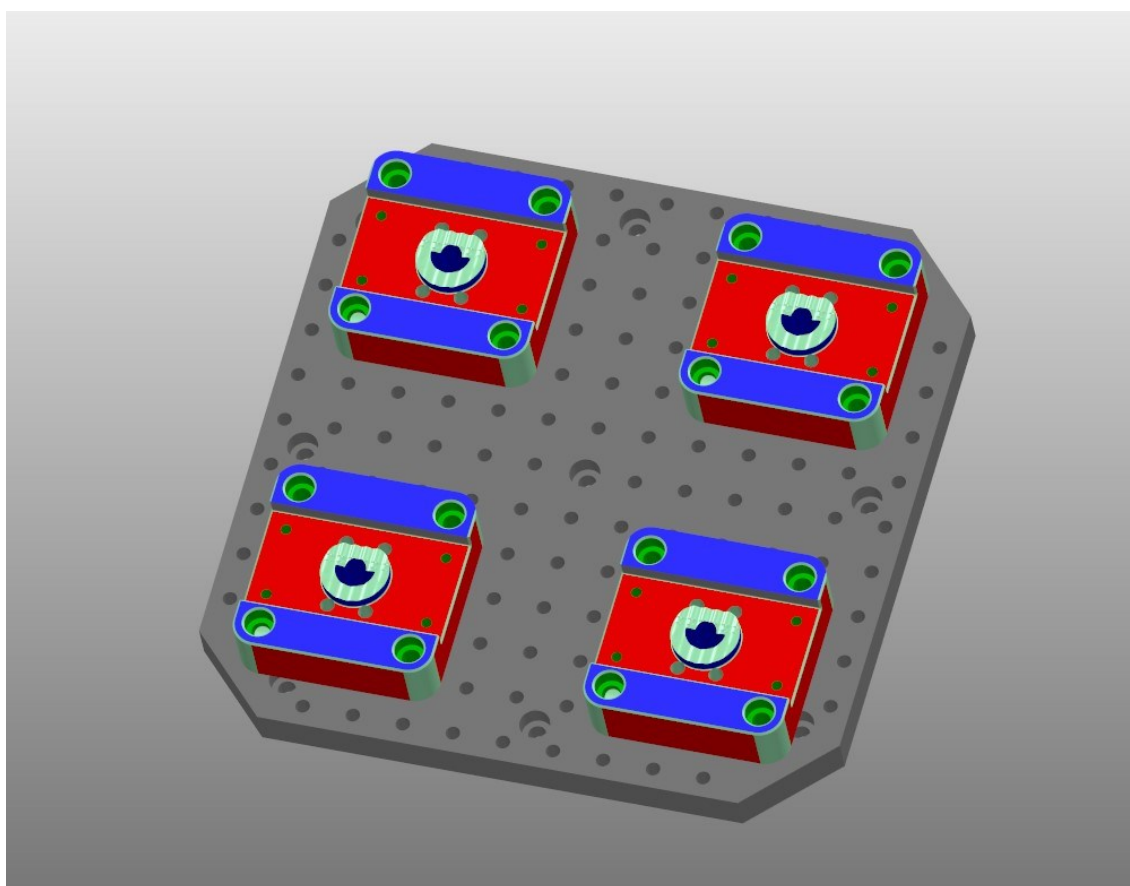
Apupintojen mallinnus on tapahtunut PowerShape 2020 -ohjelmistolla. Kuvassa harmaat pinnat ovat alkuperäistä 3D-mallia ja ruskea pinta apupintaa. Työstöradan liikkeet näkyvät vihreänä.

### 6.1.2 Jäähdytys

Työkalun jäähdytyksessä noudatettiin terävalmistajan suosituksia hieman soveltaen yrityksen konekannalle sopivaksi. Rouhinnassa ja väliviimeistelyssä käytettiin paineilmajäähdytystä, kuten pääsääntöisesti aina karkaistuja teräksiä koneistettaessa ja kovametalliteriä käytettäessä. Esiviimeistelyssä käytettiin leikkaavaa CBN-työkalua. Tälle terälle terävalmistaja suosittelee leikkuunestejäähdytystä, mutta koska terä on leikkaava työkalu ja kappaleesta täten irtoaa lastu hyvin, käytettiin paineilmajäähdytystä. Myös viimeistelyssä käytetylle PCD-työkalulle terävalmistaja suosittelee leikkuunestehuuhtelua, mutta Muottituotteen konekanta ei mahdollista tätä, joten jäähdytyksenä käytettiin öljysumua. Tällä terällä paineilmajäähdytys ei luultavasti toimisi ollenkaan, sillä neste toimii myös voiteluna työkalun ja työstettävän kappaleen välissä.

### 6.1.3 Työkappaleiden asettelu

Muottituotteella käytetään UPC-paletteja yhdessä Erowan robottisolun kanssa. UPC-palettien päälle on kiinnitetty M8- ja M10-kiinnityslevyjä, joissa on kiinnityskierteitä kappaleille 25x25 mm jaolla (kuva 3). UPC-paletin koko on 320x320 mm. Tämä mahdollistaa useiden työkappaleiden kiinnityksen samalle paletille, mikäli kappaleet ovat tarpeeksi pieniä. Valmistettavissa keernoissa oli M8-kiinnityspulttien reiät 75x75 mm jaolla, joten niitä mahtui 4 kappaletta samalle paletille (kuva 3).



Kuva 3. UPC-paletin M8-kiinnityslevy ja kappaleiden asetus paletille. (Kuva: Konsta Lamminsalo)

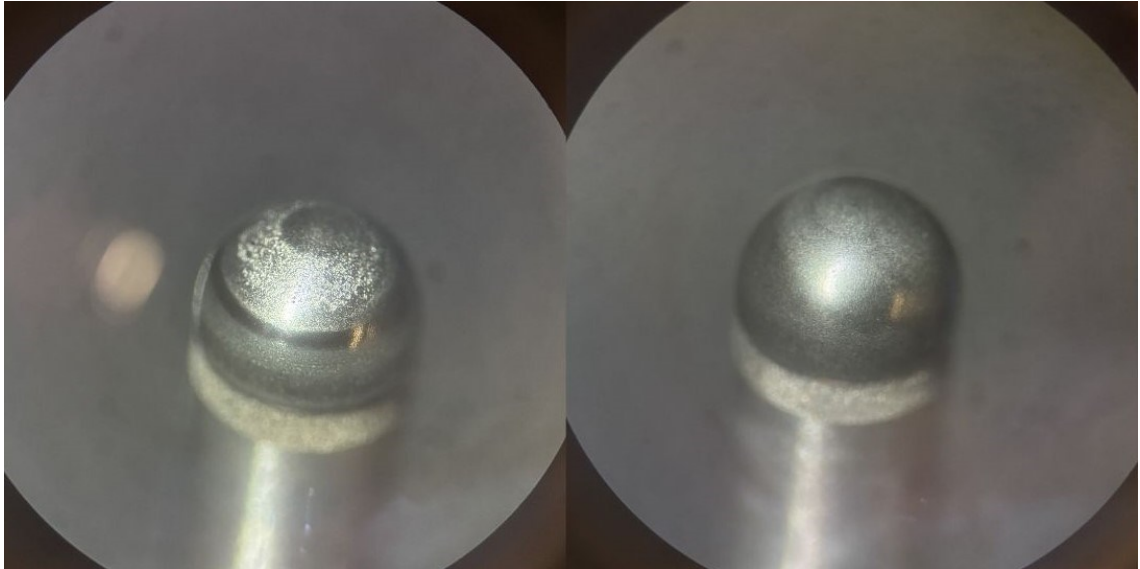
Kaikki 4 keernaa kiinnitettiin samalle paletille kuvan 3 mukaisesti, sillä tämä nopeuttaa työskentelyä. Palettien lataaminen ja kappaleiden esiasetusmittaus on nopeampaa, kun kappaleet ovat samalla paletilla eikä kaikki omalla paletillaan. Näin myös jää enemmän paletteja vapaaksi muille työkappaleille. Yhteensä Muottituotteen Joensuun tehtaalla on käytettävissä 8 kappaletta M8-

paletteja ja 6 kappaletta M10-paletteja, joten lähtökohtaisesti ei ole kannattavaa varata neljää M8-palettia yhden projektin työkappaleille, jos on mahdollista asettaa kaikki neljä osaa yhdelle paletille.

#### **6.1.4 Havaitut ongelmat ja kehityskohteet**

Ensimmäisenä ongelmana vastaan tuli työkappaleiden puhtaus. Koko kappale koneistettiin ilman yhtään välipuhdistusta, joten lastua ja likaa kerääntyi työkappaleiden päälle huomattavasti. Varsinkin öljysumujäähdytys aiheutti sen, että öljyä jäi muiden työkappaleiden päälle. Kun ensimmäinen kappale oli viimeistelty öljysumujäähdytyksen kanssa, kerääntyi seuraavien osien koneistuksen aikana koko ajan enemmän lastua kappaleiden päälle. Öljy aiheutti sen, että paineilma ei riittänyt poistamaan lastuja kappaleiden pinnalta vaan lastut tarttuivat öljyyn.

Lika ja lastut aiheuttavat herkästi PCD-työkalun tukkeutumisen. Metallia alkaa jäämään terän pinnalle (kuva 4) ja tämän jälkeen työkalu ei toimi enää niin kuin sen kuuluisi. Seurauksena on pinnanlaadun heikkeneminen tai kiiltävän pinnan täysin pilalle meno. Jotta pinta tämän jälkeen saataisiin kiiltäväksi, tulee kiiltävä pinta rikkoo koneistamalla uudestaan leikkaavalla työkalulla ja aloittaa viimeistelyprosessi alusta. Tämä tarkoittaa työkappaleen osalta sitä, että se ei vastaa enää mitoiltaan 3D-mallia.



Kuva 4. Vasemmalla PCD-työkalu, johon on jäänyt metallia pintaan. Oikealla työkalu, jolla koneistus on onnistunut ja terä on pysynyt ehjänä. (Kuva: Konsta Lamminsalo)

Myös öljyn viskositeetti voi aiheuttaa ongelmia lastujen puhdistumisessa. Käytössä oleva öljy on valikoitu mahdollisimman matalan viskositeetin mukaan huomioiden sen saatavuus. Öljyn viskositeetilla on merkitystä siihen, miten hyvin työkappaleet puhdistuvat. Öljysumussa on myös se ongelma, että sumutettavan öljyn määrä on moninkertaisesti pienempi kuin nesteen määrä leikkuunestehuuhtelussa. Leikkuunestehuuhtelu poistaa lastut tehokkaasti kappaleen pinnalta, mutta öljysumu ei.

#### **6.1.5 Kosketusmittaus Muottituotteella lähtötilanteessa**

Mittasin muotin osat Muottituotteella Zeiss Duramax -koordinaattimittauskoneella selvittääkseni koneistuksen tarkkuuden toistumisen useiden työkappaleiden välillä. Muotin neljän pesälevyn välillä on yksittäisten tuhannesosa millimetrien mittaeroa (taulukko 2), joten koneistuksen tarkkuuden toistumista voidaan pitää tarpeeksi tarkkana kyseessä olevan muotin vaatimuksille.

	Pesä 1	Pesä 2	Pesä 3	Pesä 4
Tavoitemitta	-0.020 mm	-0.020 mm	-0.020 mm	-0.020 mm
Saavutettu mittaväli	-0.017 mm – -0.020 mm	-0.017 mm – -0.022 mm	-0.018 mm – -0.027 mm	-0.014 mm – -0.019 mm

Taulukko 2. Lähtötilanteen viimeistelykoneistuksen mittaustulokset.

Kaikki pesien mittaustulokset ovat nähtävissä liitteessä 1. Työstörataan on ohjelmoitu -0.02 mm negatiiviset työvarat malliin nähden. Lopputulos on todella lähellä ohjelmoitua työvaraa.

### 6.1.6 Pinnankarheuden mittaus lähtötilanteessa

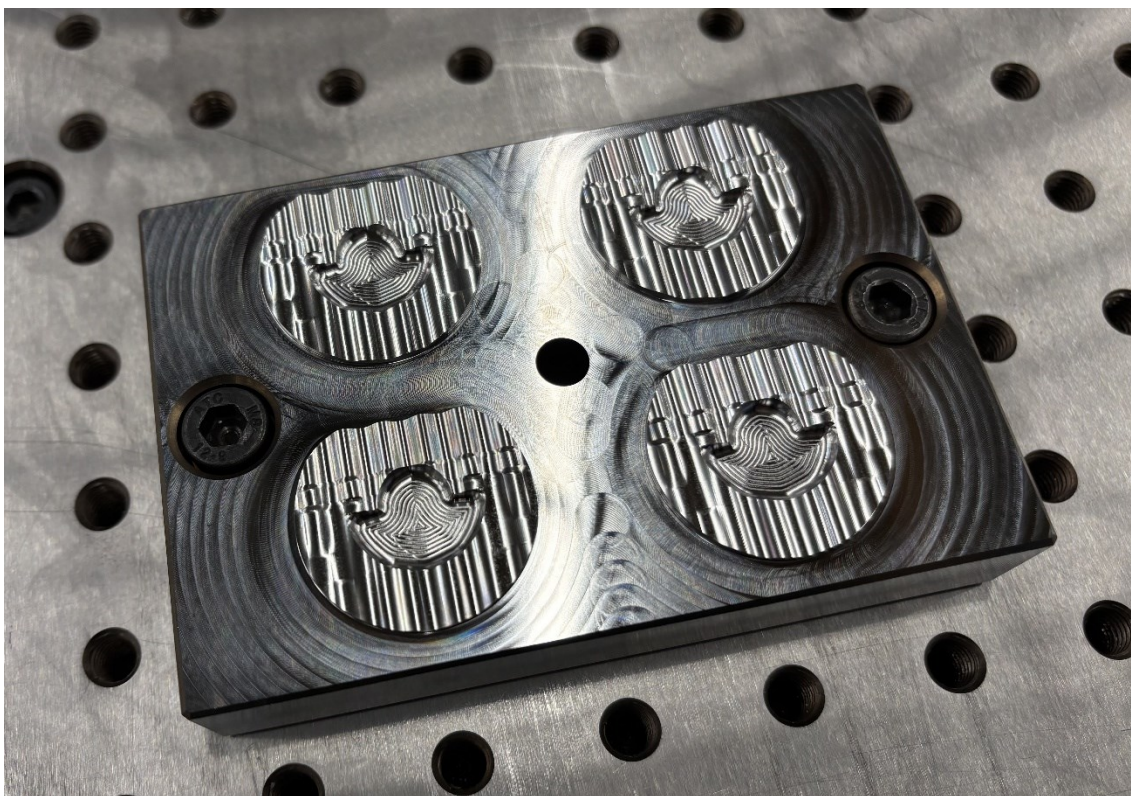
Pinnankarheuksissa tuli hieman muottipesä kohtaisia eroja, vaikkakin visuaalisesti osat näyttävät lähes yhtä hyvä laatusilta. SPI A1 - pinnankarheuden vaatimus on Ra 0.012–0.025  $\mu\text{m}$ , joten muottipesä 1 vastaa vaatimuksia kaikkien mittapisteiden osalta. Muiden muottipesien osalta ei kuitenkaan päästy vaadittuun pinnankarheuteen, vaan useat mittapisteet olivat SPI B -luokan tasolla. Yksittäiset mittapisteet jopa SPI C -luokan tasolla. Yksittäisen pesän mittapisteidenkin välillä on tullut suuria eroja. Mittaustulokset lähtötilanteesta ja lisäksi kappaleita mikroskoopilla kuvattuna havainnollistamaan pinnankarheuksien vaihtelua on esitetty liitteessä 1.

Pinnankarheudet lähtevät selkeästi heikkenemään muissa, paitsi pesässä numero 1 sitä mukaa, mitä pidemmälle kappale on työstetty. Ensimmäinen mittauspiste on jokaisen pesän osalta parempi ja keskenään samankaltainen.

## 6.2 Lopputilanne

Lähtötilanteessa käytetyt osat ovat asiakkaalla muotissa käytössä ja ei ole tarvetta valmistaa varaosiksi samanlaisia pesiä. Siksi suunnittelin erillisen osan (kuva 5), jota käytettiin koneistettaessa kiiltävää pintaa uudestaan. Osaan on

kopioitu alkuperäisen muotin osan tuotemuodot, jotta vertailu alku- ja lopputilanteen välillä on mahdollisimman helppoa ja selkeää.



Kuva 5. Lopputilanteen selvitystä varten valmistettu osa. (Kuva: Konsta Lamminsalo)

Koneistukseen valmistettuun osaan on kopioitu tuotemuodot neljään kertaan ja tehty M8-palettiin sopivat kiinnityspulttien paikat. Päädyin tekemään vain yhden erillisen osan lopputilannetta varten, jotta sen valmistus viimeistelyä varten on mahdollisimman nopeaa ja kustannukset pysyvät alhaisina. Lisäksi opinnäytetyötäni varten ei tarvitse varata kuin yksi M8-paletti suurnopeuskoneistuksessa. Osan tulee olla koko viimeistelyn ajan kiinnitettynä samalla paletilla mahdollisimman hyvän tarkkuuden takaamiseksi.

Lisäksi valmistin erillisen osan käsin kiillotusta varten, jotta koneistusta ja käsin kiillotusta voi vertailla samanlaisessa kappaleessa. Kyseisessä osassa on kertaalleen samat kappalemuodot.

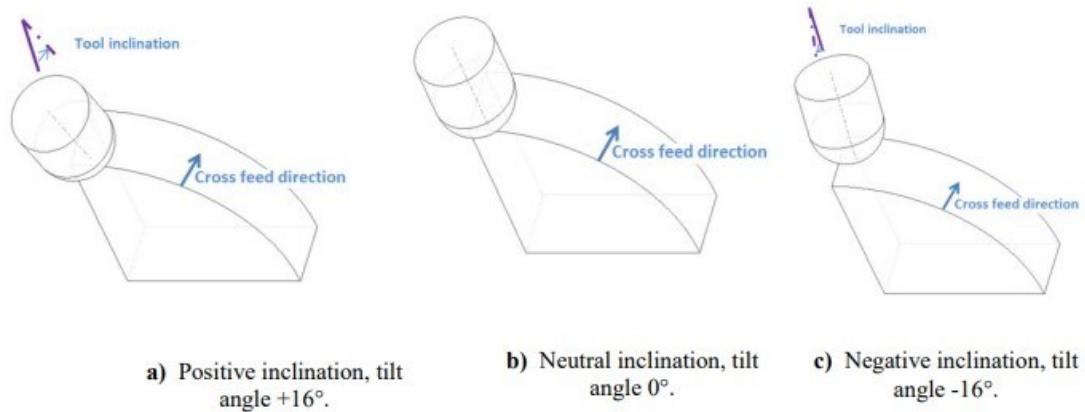
### 6.2.1 Koneistus

Koneistus lopputilanteessa tapahtui samalla Rödersillä kuin lähtötilanteessakin. Työstöstrategiaa ja työstöparametrejä ei lopputilanteessa muutettu lähtötilanteeseen nähden, mutta esiviimeistelyyn ja viimeistelyyn kokeiltiin erilaisia työstöratoja. Muilla työstöradoilla ja niiden mahdollisilla muutoksilla ei ole lopputulokseen merkitystä. Yhden pesämuodoista päädyin myös lopuksi koneistamaan uudelleen pelkästään esiviimeistely työkalulla, jotta sain yritykselle tärkeää tietoa esiviimeistelyllä saavutetusta pinnankarheudesta.

Rasteri todettiin jo lähtötilanteessa toimivaksi työstöradaksi, joten sillä työstöradalla koneistettiin 3 lopputilanteen pesämuodoista. Näiden operaatioiden välillä ainoita eroja oli eri kappaleen kiertokulma ja työstösuunta. Aiemmasta kokemuksestani koneistajana Muottituotteella kyseisillä muutoksilla on saatu positiivisia tuloksia viimeistellyissä kappaleissa. Lisäksi da Costa Castanhera & Diniz (2016) ovat tutkimuksessaan saavuttaneet tähänkin tapaukseen hyödyllisiä tuloksia eri kiertokulman ja työstösuunnan vaikutuksesta lopputulokseen.

Ensimmäinen pesämuoto koneistettiin Rasteri viimeistely -työstöradalla, jossa työkalu työstää edestakaisella liikkeellä koko muodon ja kappaletta on indeksoitu X-akselin ympäri 30 astetta. Edestakainen liike aiheuttaa sen, että työstetään välillä myötä- ja välillä vastajyrsinnällä. Tämä on sama menetelmä kuin lähtötilanteessa ja valikoitui lopputilanteeseen nähdäkseni, tuleeko kappaleen välipuhdistuksista suoraan eroa lähtötilanteeseen.

Toinen pesämuoto koneistettiin samanlaisella Rasteri viimeistely -työstöradalla kuin ensimmäinen, mutta indeksointi oli 20 astetta X- ja Y-akselin ympäri ja työstöliike oli vain yhteen suuntaan. Tarkoitus oli selvittää, tuleeko pienemmästä kiertokulmasta ja työkalun työstösuuntaan kallistuksesta (kuvio 5) eroa. Lisäksi pienempi kiertokulma on parempi varsinkin isompien ja syvempien kappalemuotojen kohdalla, koska silloin ei tule niin helposti ongelmia karan, paletin ja kappaleen reunojen törmäyksen kanssa. Varsinkin tulevaisuuden projektien kannalta tästä menetelmästä sai hyödyllistä tietoa yritykselle.



Kuvio 5. Työkalun kallistus työstösuuntaan nähden. (da Costa Castanhera & Diniz 2016)

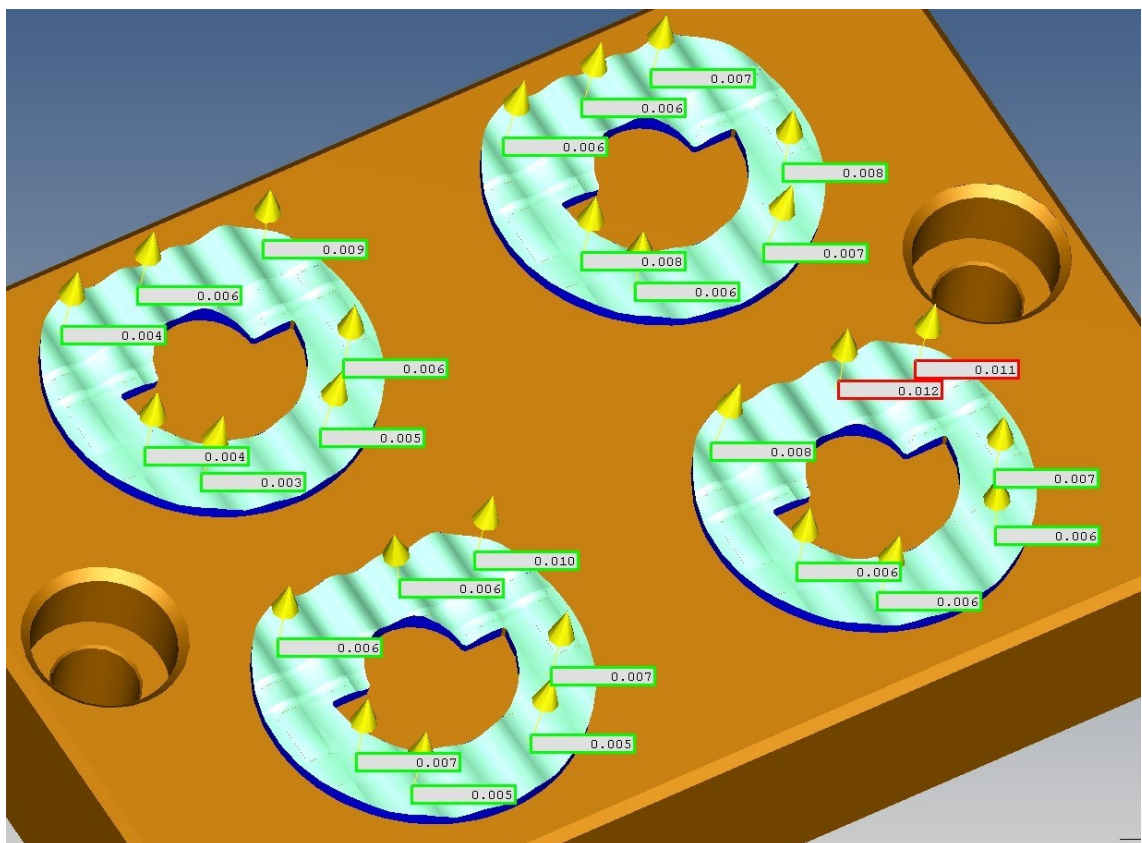
Kolmas pesämuoto koneistettiin 3D-offset viimeistelyllä myötäjyrsinnällä ja kappaleen indeksointi oli 30 astetta X-akselin ympäri. Tämä valikoitui vaihtoehdoksi siksi, koska työkalu pysyy kyseisessä operaatiossa todella hyvin aineessa ja näin ollen ylimääräiset lähestymiset jäävät minimiin. Tämän operaation käytöllä on myös de Souza'n ym. (2014) tutkimuksessa saavutettu Spiraali työstöradan lisäksi parhaat tulokset pinnankarheudessa. Spiraali työstörata ei kappalemuodon vuoksi soveltunut tähän tilanteeseen yhtä hyvin kuin 3D offset viimeistely.

Neljäs pesämuoto koneistettiin Rasteri viimeistely -työstöradalla, mutta aloitus tapahtui kappaleen alareunasta ja työstölastun suunta oli vain yhteen suuntaan. Tässä tulee paljon enemmän lähestymisiä ja pikaliikkeitä, mutta työstäminen on koko ajan myötäjyrsintää. Sandvikin (2025) mukaan myötäjyrsintää tulisi suosia aina, kun se on mahdollista. Myötäjyrsinnässä työkalun pyörimissuunta on sama, kuin syöttöliike ja vastajyrsinnässä taas syöttöliike on vastainen pyörimissuuntaan nähden. (Sandvik 2025.) Kappaleen indeksointi oli tässäkin työstöradassa 30 astetta X-akselin ympäri.

Työstörata	Rasteri edestakaisin	Rasteri yhteen suuntaan	3D-viimeistely	Rasteri yhteen suuntaan
Esiviimeistely (CBN) työstöaika	59min	1h 22min	1h 3min	1h 23min
Viimeistely (PCD) työstöaika	3h 52min	5h 29min	4h 28min	5h 57min

Taulukko 3. Esiviimeistelyyn ja viimeistelyyn kulunut aika.

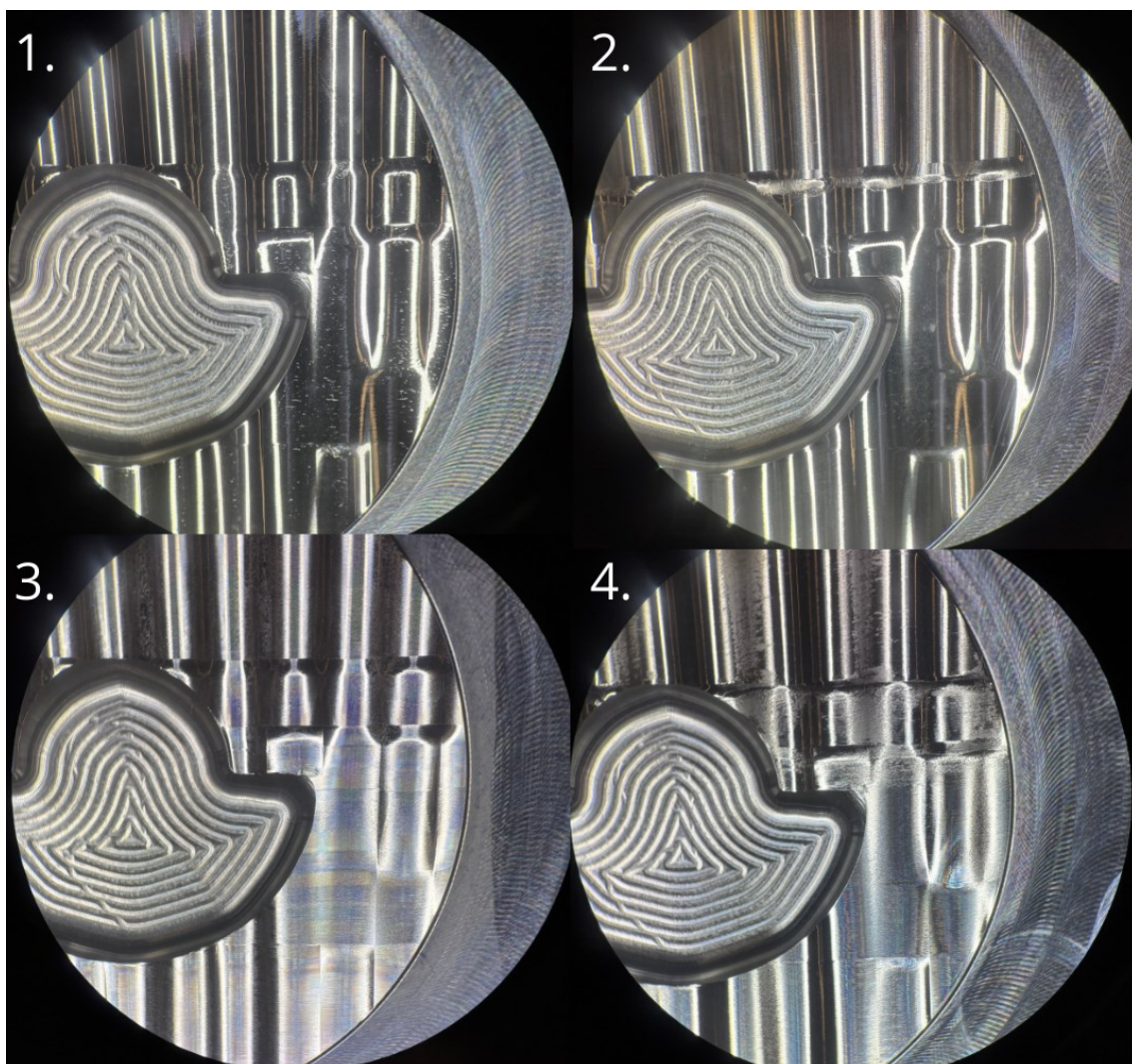
Lähtötilanteessa kohdattiin paljon ongelmia kappaleiden puhdistumisessa työstölastusta. Lopputilanteessa ei koneistettu yhtään pesämuotoa rouhinnasta viimeistelyyn asti yhdellä ajolla. Kaikkiin pesämuotoihin koneistettiin rouhinnat ja 1. esiviimeistely, jonka jälkeen kappale puhdistettiin. Tämän jälkeen mitattiin työvarojen toteutuminen ja koneistettiin 2. esiviimeistely kaikkiin pesämuotoihin peräkkäin jokainen omalla CBN-työkalullaan. 2. esiviimeistely koneistettiin paineilmajähdytyksellä, joten tämän työstöradan kanssa ei tule ongelmaa lastun poistumisesta kappalemuodoista. Ennen viimeistelyä puhdistin kappaleen jälleen ja mittasin toteutuneet työvarat. Työvarojen välimittaus (kuva 6) toteutettiin todetakseni tarkkuuden säilyvän jokaisen vaiheen välillä.



Kuva 6. Välimittaus ennen viimeistelyä. (Kuva: Konsta Lamminsalo)

Välimittauksen tulosten perusteella tarkkuus viimeistelyyn on tarpeeksi hyvä, vaikkakin yksittäisen pesän kohdalla terän kuluma oli aiheuttanut hieman enemmän vaihtelua työvarassa. Kyseinen pesämuoto on kuvassa 6 oikealla alareunassa. Työvarat toteutuivat kuitenkin lähes halutulla 0.005 mm tarkkuudella, joten jatkoin koneistusta viimeistelyvaiheeseen. Viimeistely tapahtui pesämuotoihin yksi kerrallaan. Jokaisen ajon jälkeen kappale puhdistettiin öljystä ja työstölastuista.

Visuaalisella tarkastelulla pesämuotojen välillä oli havaittavissa selkeitä eroja (kuva 7) ja vain yksi kappalemuoto näytti vastaavan lähtötilanteen parhaita tuloksia. Pesämuodossa 1 on nähtävissä vielä esiviimeistelyterän jättämiä jälkiä, vaikkakin muutoin pinta näyttää hyvin kiiltävältä. Pesämuoto 2 on lähes kauttaaltaan kiiltävä ja parhaan näköinen, mutta terävän muotoharjanteen reunalla pinnanlaadussa näkyy jokin poikkeama. Pesämuoto 3 on tasalaatuinen esiviimeistelyterän jälkeen, ja tähän pesään jätettiin esiviimeistely pinta. Pesämuoto 4 on melko tasalaatuinen, mutta siinä on havaittavissa epätäydellisyyksiä.



Kuva 7. Pesämuodot viimeistelykoneistusten jälkeen. (Kuva: Konsta Lamminsalo)

Tarkastelin myös viimeistelytyökaluja koneistuksen jälkeen. Pesien 1 ja 4 koneistukseen käytetyt työkalut olivat hyväkuntoisia. Pesän 2 koneistuksen työkalu oli osin tukkeutunut metallista. Pesän 3 viimeistelytyökalu oli täysin tukkeutuneen näköinen ja osin menettänyt pallomaisuuden. Tästä syystä päädyin koneistamaan kyseisen pesän uudestaan alusta esiviimeistelyterällä koneistukseen asti. Epäonnistuneen koneistuksen pinnankarheutta olisi myös ollut täysin turha mitata, joten esiviimeistellystä muodosta saaduista mittatuloksista on enemmän arvoa yritykselle.

## 6.2.2 Havainnot

Viimeistelyajon jälkeen tein havainnon, että kappaleet ovat huomattavasti puhtaampia kuin lähtötilanteessa ajon jälkeen. Kappaleen välipuhdistuksilla saavutettiin siis selvä parannus lähtötilanteessa tunnistettuun ongelmaan. Kuitenkin työkaluun oli jäänyt yksittäisen kappaleen koneistuksen aikana metallia pintaan (kuva 4), mikä oli todennäköisin syy kyseisen kappaleen epäonnistumiseen.

Uutena ongelmana ja jatkossa huomiota vaativana tekijänä havaittiin, että kaikkien pitimien run-out ei ole tarpeeksi hyvä CBN-työkalulle. Vaikkakin pidin oli käytännössä uusi niin terän havaittiin kuluneen vain toiselta puolikkaalta koneistuksessa. Totesimme tämän johtuvan run-outista mittaamalla terän siten, että karalla on 36 000 RPM ja ilman karan pyöritystä. Pyörivän työkalun halkaisijamitta oli 2.021 mm ja ilman pyöritystä 2.009 mm.

Lisäksi ongelmia aiheutti aikaväli, jolla koneistus tapahtui. Aloitin lopputilanteen koneistamisen keskiviikkona. Samana päivänä tapahtui kappaleen asetus ja esiasetusmittaus, sekä rouhintakoneistus. Seuraavan yön aikana tapahtui kaikkien pesien esiviimeistely. Torstai-iltapäivällä alkoi ensimmäisen kappaleen viimeistely ja perjantaina viikonloppua vasten seuraava viimeistely.

Maanantaina havaitsin, että toinen koneistus ei viikonlopun aikana ollut työstänyt mitään. Tarkastettuani esiasetusmittauksen huomasin, että esiasetus oli muuttunut edeltävään keskiviikkoon nähden 0.005 mm Z-akselin suunnassa, eli työstövarojen verran. Uuden esiasetuksen tallennettuani koneistin toisen kappalemuodon uudestaan, jolloin viimeistely onnistui.

Vajaan viikon aikana jokin tekijä aiheutti esiasetusmittojen muuttumisen, jolla on selvä vaikutus tilanteen kaltaiseen koneistukseen. Tähän voi olla syynä mm. lämpötilamuutos hallissa, työstökoneen karan ja antureiden puhtaus tai palettien paikoitustarkkuus työstökoneen konepöydän istukkaan. Tässä opinnäytetyössä ei kuitenkaan lähdetty tätä ongelmaa tarkemmin tutkimaan.

### 6.2.3 Käsiniillotus

Erillinen kiillotukseen valmistettu kappale koneistettiin samalla strategialla kuin lähtötilanteen osat muutoin, paitsi siitä jätettiin CBN- ja PCD-työkalulla koneistus pois. Lähtötilanteessa 1. esiviimeistely tehtiin R1x6 palloterällä koneistaen kappale 0,025 mm työvaroilta, mutta tämä kiillotukseen valmistettu kappale koneistettiin samalla työstöradalla nollatyövaroilta. Tilanne vastaa täten normaalia prosessia, jossa työkappale viimeistellään kovametallisella leikkaavalla työkalulla ja tämän jälkeen kiillotetaan käsin.

Kiillotusprosessi etenee vaiheittain karkeasta hiomapaperista todella hienojakoiseen timanttihahnaan. Jokaisessa kiillotusvaiheessa kappalemuodoista poistetaan edellisen työvaiheen aikana muodostuneet naarmut. Alla olevassa taulukossa 4 on kuvattu kaikki käytetyt työvaiheet ja niihin kulunut aika.

Työvaihe (hiomapaperi)	600	800	1000	1500
Käytetty aika	43min	35min	28min	18min
Työvaihe (kiillotustahna)	#9 / 1800	#6 / 3000	#3 / 8000	#1 / 14000
Käytetty aika	9min	6min	3min	1min

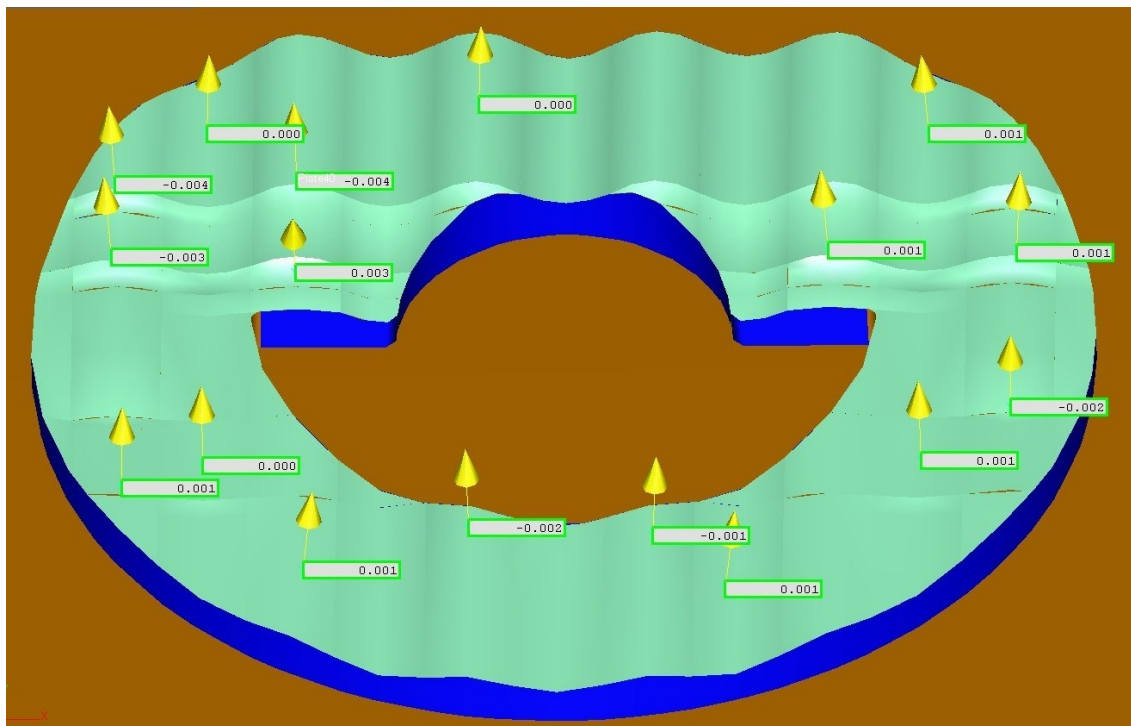
Taulukko 4. Kiillotuksen työvaiheet.

Hiomapaperin luku on FEPA (Federation of European Producers Association) luokituksen mukainen. Kiillotustahnan luokitus on muutettu taulukkoon vastaamaan samaa FEPA-luokitusta. #1-luokituksen tahnan timanttipartikkelien koko on 0–2 µm, kun taas P600 hiomapaperin rakeiden koko on noin 26 µm.

### 6.2.4 Kosketusmittaus Muottituotteella lopputilanteessa

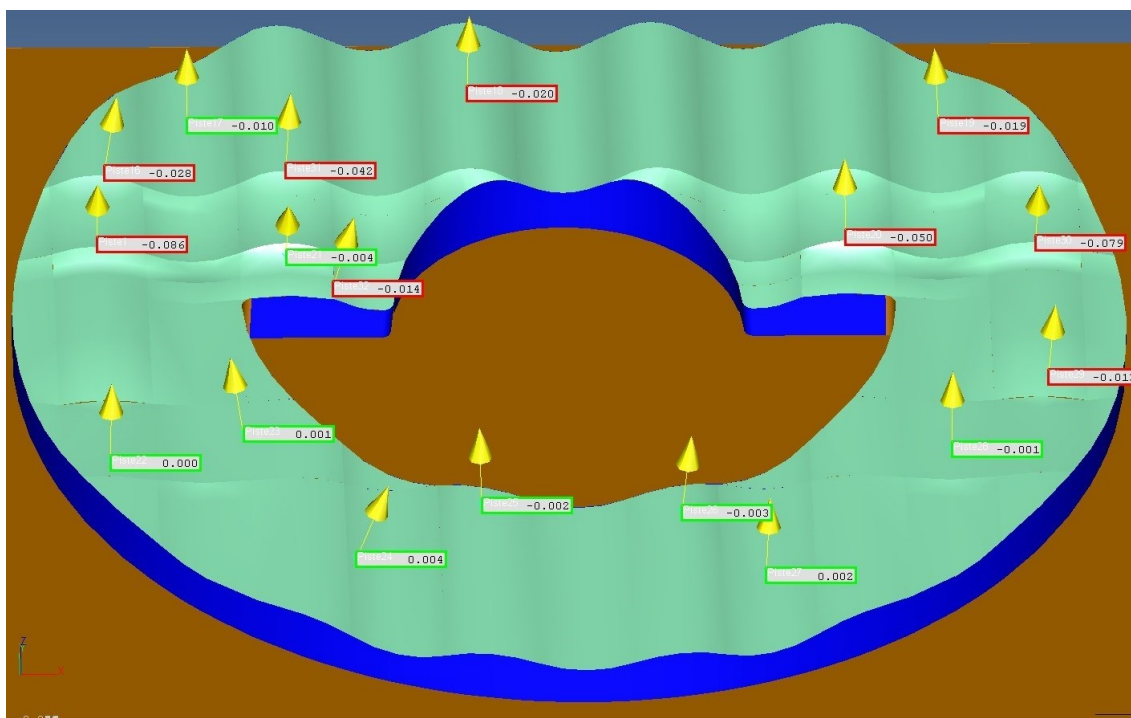
Lopputilanteen mittaustulokset ovat hyvin samankaltaisia kuin alkutilanteenkin tulokset. Työvarat ovat pääsääntöisesti toteutuneet ja kappalemuoto on säilynyt





Kuva 9. Tarkempi kuva yksittäisestä pesästä. (Kuva: Konsta Lamminsalo)

Mittasin myös käsin kiillotetun kappaleen pinnan muotojen säilyvyyden vertailun vuoksi.



Kuva 10. Käsin kiillotettu pesämuoto. (Kuva: Konsta Lamminsalo)

Tämän kappaleen kohdalla on selkeästi havaittavissa, että varsinkin terävien kappalemuotojen tarkkuus kärsii herkästi käsin kiillotuksesta, vaikkakin kiillottaja on pyrkinyt varomaan nurkkien pyöristymistä. Muoto on kuitenkin muutoin säilynyt melko hyvin.

### **6.2.5 Pinnankarheuden mittausta lopputilanteessa**

Lopputilanteen pinnankarheuksissa tuli selkeästi lähtötilanteen tuloksiin nähden erilaisia eroja. Yksikään pesistä ei vastaa kauttaaltaan SPI A1 - pinnankarheuden vaatimuksia. Tarkastellessa pesiä 1, 2 ja 4 vaihtelu mittapisteiden välillä on kuitenkin pienempää kuin lähtötilanteessa. Parhaimmillaan on saavutettu SPI A1 -luokan vaatimukset, mutta huonoimpien pinnankarheuksien osalta on päästy SPI B -luokan tasolle. Pinnankarheudet asettuvat välille Ra 0.025–0.207  $\mu\text{m}$ . Pesä numero 3, eli esiviimeistely kappalemuoto on pinnankarheuksiltaan välillä Ra 0.159–0.415  $\mu\text{m}$ . Tämä vastaa parhaimmillaan SPI B2 -luokan ja huonoimmillaan SPI C1 -luokan viimeistelyä. Lopputilanteen pinnankarheuksien mittaustulokset ja mikroskooppilla kuvatut pesämuodot ovat liitteessä 3. Liitteen mikroskooppikuvissa on esitetty neljästä eri mittapistestä pesäkohtaisesti paras ja huonoin saavutettu pinnankarheus.

Käsin kiillotettu kappale on kauttaaltaan pinnankarheuksien puolesta paras. Myös mikroskooppikuvissa se on selkeästi kaikkein tasalaatuisin. Käsin kiillotetun kappaleen pinnankarheus on välillä 0.013–0.026  $\mu\text{m}$ , eli saavutetaan SPI A1 -luokan vaatimukset. Liitteessä 3 käsin kiillotettu kappale on nimellä Irtomuotti.

### **6.2.6 Taloudellinen näkökulma**

Yritykselle tärkeää on arvioida valmistuksen kokonaiskustannuksia. Tutkimuksen kaltaisen kiiltävän pinnan valmistuskustannukset koneistamalla jakaantuvat työkalukustannuksiin, työntekijän käytettyyn työmäärään ja

koneaikaan. Kiillotuksessa kustannuksia ovat vain materiaalikustannukset sekä työntekijän työmäärästä aiheutuneet kustannukset.

Näitä kuluja laskiessa käytetään Muottituote Group Oy:llä seuraavia arvioituja hintoja:

- suurnopeuskoneistus 70 €/h
- käsin kiillotus 50 €/h.

Koneistuksessa laskentaa on hieman yksinkertaistettu ja on käytetty parhaiten toimineen työstöradan koneaika. Koneistusajan laskenta on yhdelle kappalemuodolle, jotta vertailu onnistuu käsin kiillotukseen. Teräkulut sisältyvät arvioituun tuntihintaan. Rouhintakoneistukset ja 1. esiviimeistely, sekä ohjelmointi on jätetty laskelmien ulkopuolelle. Näihin vaiheisiin kulunut työmäärä ja -aika pysyy lähestulkoon samana, tehtiinpä viimeistely koneistamalla tai käsin kiillottamalla. Viimeistelytyöstöratujen ohjelmointiaika voi vaihdella, mikäli kappalemuodot ovat vaativia. Tässä tapauksessa ylimääräistä ohjelmointiaikaa viimeistelytyöstöradoille kertyi kuitenkin vain noin 15 minuuttia. Alla olevassa taulukossa on esitetty työaika ja kustannukset työvaiheittain.

Työvaihe	Koneistus	Käsin kiillotus
Käytetty työaika	4h 51min	2h 23min
Kustannukset	340 €	119 €

Taulukko 5. Valmistuskustannukset.

Laskennat on pyöristetty yhden euron tarkkuuteen. Laskennoista selviää, että yksittäisen pesämuodon koneistaminen kiiltävälle pinnalle on lähes 3 kertaa kalliimpaa kuin käsin kiillottaminen. Koneistus jakaantuu esiviimeistelyyn, johon meni 59 minuuttia ja viimeistelyyn, johon meni 3 tuntia ja 52 minuuttia.

## 7 Pohdinta

Aikataulun osalta opinnäytetyöni valmistuminen venyi hieman aiottua pidemmälle. Työskentelin täyspäiväisesti Muottituotteella koko opinnäytetyöprosessin ajan työvaiheessa, jossa myös suurnopeuskoneistettavat kappaleet valmistin. Muiden projektien aikataulu meni pari kertaa opinnäytetyöni edelle, joten eteneminen siinä viivästyi. Loppujen lopuksi olen kuitenkin tyytyväinen aikaan, jossa tämä työ valmistui.

Alkuperäisen suunnitelman ja olettamien perusteella päädyin koneistamaan vain neljä erillistä pesämuotoa, sillä luulin parannusten lähtötilanteeseen nähden riittävän toimivaan prosessiin. Tähän oli lisäksi syynä kustannusten pitäminen kohtuullisena. Erillisillä pesämuodoilla oli pääasiallinen tarkoitus lähteä hakemaan oikeaa suuntaa työstöradan ohjelmointiin ja selvittämään, mikä rata toimii parhaiten. Nyt kuitenkin olen sitä mieltä, että prosessi on liian epävarma ja sen toistettavuutta tulisi saada parannettua ennen kuin voi lähteä hakemaan toimivinta ratkaisua työstöratojen osalta.

Tulosten perusteella voi kuitenkin todeta, että koneistamalla on mahdollista saavuttaa jopa SPI A1 -luokan pinnankarheuksia Muottituote Group Oy:n Joensuun tehtaalla. Toimeksiannon mukaan tavoitteena oli SPI A2 -luokan viimeistely, mutta pinnankarheuksiltaan näille luokille on sama arvo. Prosessin luotettavamman onnistumisen selvittämiseen tarvitsisi koneistaa useita testejä, jolloin toistettavuudesta saataisiin parempia tuloksia. Näillä lähtö- ja lopputilanteen tuloksilla ei voi vielä varmaksi todeta, että mitkä tekijät nykyisellä konekannalla takaisivat parhaan tuloksen.

Pinnankarheuksien mittauksessa epävarmuus kasvoi, mitä parempi pinnankarheus oli kyseessä. Opinnäytetyöni kannalta ei ole olennaisinta pinnankarheuden absoluuttinen arvo, vaan tutkimuksessa oli pääasiallinen tarkoitus selvittää koneistuksen kyvykkyyttä Joensuun tehtaalla ja pidän tuloksia tarpeeksi luotettavina tähän tarkoitukseen. Vaikkakin epävarmuudet kasvavat parempiin pinnankarheuksiin mennessä, saadaan tuloksista ja

mikroskooppikuvista kokonaiskuva hyvin esille ja näitä tuloksia voidaan vertailla käsin kiillotuksen ja koneistuksen välillä luotettavasti muotin valmistuksen näkökulmasta.

Aloittaessani opinnäytetyötä minulla oli vahva oletus, että pelkästään välipuhdistukset kappaleille riittäisi huomattavasti parempiin tuloksiin. Suurin ongelma koneistusprosessissa vaikuttaisi kuitenkin olevan jäähdytys ja sen myötä lastujen poistuminen työstöalueelta. Paremmalla jäähdytyksellä kappaleen ja työkalun välinenkin voitelu viimeistelyssä olisi varmemmin jatkuvaa. Tulevaisuudessa tapahtuvia konehankintoja suunnitellessa on järkevää harkita leikkuunestehuuhtelulla varusteltua suurnopeuskonetta, mikäli tarkoitus on koneistaa muototarkkoja SPI A1 -pintoja.

CBN-työkalulla esiviimeistelyn tulosten perusteella on myös hyvä miettiä, että kehitettäisiin perinteistä menetelmää. Muutoin prosessi sisältäisi samat vaiheet kuin tässä opinnäytetyössä PCD-työkalulla viimeistellessäkin, mutta vain kyseinen terä jäisi pois. Näin säästettäisiin käsin kiillotuksessa useampi eniten aikaa vievä työvaihe ja muotopoikkeamat saataisiin minimoitua.

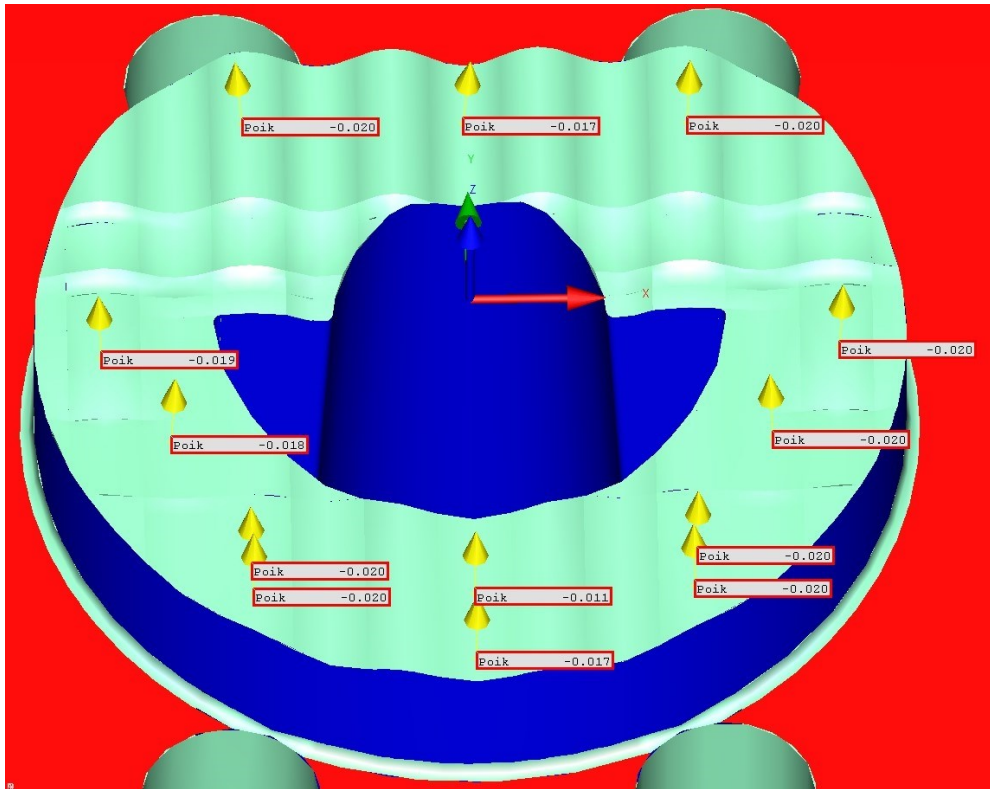
Pinnankarheuksien viimeistelyohjeiden ja esiviimeistelystä saatujen tulosten mukaan käsin kiillotus olisi mahdollista aloittaa jopa suoraan timanttitahnalla CBN-työkalun jälkeen.

## Lähteet

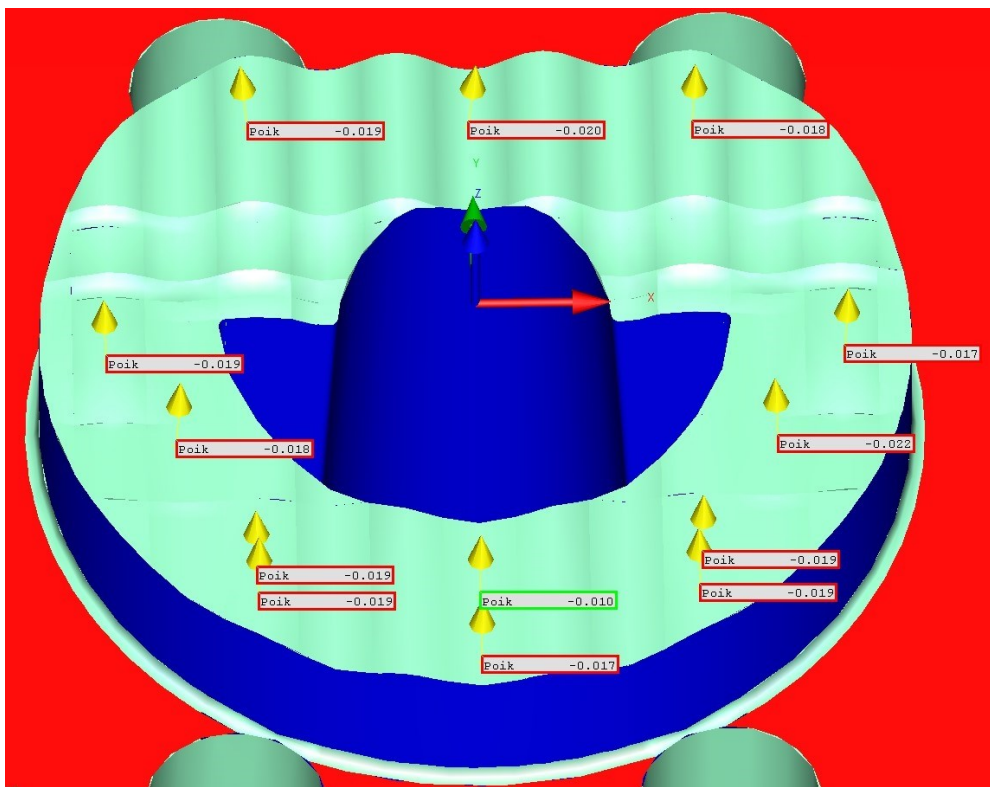
- Alltek. 2024. High Speed Machine (HSM). <https://www.alltek.com.au/high-speed-machines1.html> 21.12.2024
- Apro, K. 2008. *Secrets of 5-Axis Machining*. New York: Industrial Press, Inc.
- Cohrs, S. 2024. HSC-tarkkuuskoneiden kehitysjohdaja. Sähköpostikeskustelu. Rödgers GmbH. Saksa.
- da Costa Castanhera I. & Diniz A. 2016. High Speed Milling of Hardened Steel Convex Surface. *Procedia Manufacturing*. Vol 5.
- de Souza, A., Machado, A., Beckert, S. & Diniz, A. 2014. Evaluating the roughness according to the tool path strategy when milling free form surfaces for mold application. *Procedia CIRP*. Vol 4.
- Erowa. 2024. Etusivu. <https://www.erowa.com/en>. 16.11.2024
- Gaurav, B. & Choudhury, S.K. 2012. State of the Art in Hard Turning. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. Vol. 53.
- GD&T Basics. 2021. What is profilometer? <https://www.gdandtbasics.com/what-is-a-profilometer/>. 12.12.2024
- GF Machining Solutions. 2016. Operating manual. Machining center MIKRON X/HSM 600(U)/ 800 LP. Heidenhain iTNC 530 HSCI. Biel, Sveitsi.
- Goodfish Group. 2024. A Look at Probing in Coordinate Measuring Machines (CMM). <https://www.goodfishgroup.com/a-look-at-probing-in-coordinate-measuring-machines-cmm>. 11.12.2024
- Grandguillaume L., Lavernhe S., Quinsat Y., & Tournier C. 2015. Mold manufacturing optimization: a global approach of milling and polishing processes. *Procedia CIRP*. Vol 31.
- Ibaraki, S., Sawada, M., Matsubara, A. & Matsushita, T. 2010. Machining tests to identify kinematic errors on five-axis machine tools. *Precision Engineering*.
- Jain, A. & Bajpai, V. 2020. Chapter 1 - Introduction to high-speed machining (HSM). *High Speed Machining*. Academic Press.
- Jmerson, L. 2024. Mastering Injection Molding Surface Finishes: SPI and VDI. <https://firstmold.com/guides/injection-molding-surface-finishes/#h-understanding-injection-molding-surface-finishes-standards>. 9.11.2024
- Järvelä, P., Syrjälä, K. & Vastela, M. 2000. *Ruiskuvalu*. Tampere: Plastdata Oy.
- Kalpakjian, S. & Schmid, R. 2010. *Manufacturing Engineering and Technology*. Singapore: Pearson Education, Inc.
- Lezanski, P., Shaw, M.C. Tool face temperatures in high speed milling. *J. Eng. Ind.* 1990. 112, 132–135.
- Luminoso, L. 2024. Enhance surface finish with high-speed machining. *Canadian Metalworking*. <https://www.canadianmetalworking.com/canadianmetalworking/article/metalworking/enhance-surface-finish-with-high-speed-machining>. 21.11.2024
- Mativenga, P., Schoop, J., Jawahir, I.S., Biermann, D., Kipp, M., Kilic, Z., Tuğrul, Ö., Wertheim, R., Arrazola, P. & Boing, D. 2024. Engineered design of cutting tool material, geometry, and coating for optimal performance and customized applications: A review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. Vol 52. 212-215.

- Metrology News. 2023. The CMM's Evolution into its Role In Smart Manufacturing. <https://metrology.news/the-cmm-evolution-into-a-role-in-smart-manufacturing/>. 11.12.2024
- NS Tool. 2024. Mirror Finishing STAVAX / 52HRC / PCDRB / PCD Ball End Mill. <https://www.ns-tool.com/en/technology/case/sample07/>. 21.11.2024
- Plastopia. SPI Finish: The Definitive Guide to Surface Finish Standard. <https://www.plastopialtd.com/spi-finish/>. 21.11.2024
- Przybylski, L. & Słodki, B. 2002. High speed machining (HSM) - The effective way of modern cutting. Krakovan teknillinen yliopisto, tuotantotekniikan instituutti.
- Pääkkönen, P. 2025. Yli-insinööri. Sähköpostikeskustelu. Itä-Suomen yliopisto. Joensuu.
- Röders GmbH. 2022. Yleiset turvallisuus- ja käyttöohjeet. Tuotenro ASB\_654\_100\_fin\_01. Käyttöohjeet. HSC jyrsinkoneet. Soltau, Saksa.
- Sandvik. 2024. Teräaineet. <https://www.sandvik.coromant.com/fi-fi/knowledge-old/materials/cutting-tool-materials>. 16.11.2024
- Sandvik. 2025. Myötäjyrsintä vs. vastajyrsintä. <https://www.sandvik.coromant.com/fi-fi/knowledge/milling/down-milling-vs-up-milling>. 25.1.2025
- Telcon. 2024. What is Polycrystalline diamond PCD. <https://telconpcd.com/what-is-polycrystalline-diamond-pcd/>. 16.11.2024
- Vanninen, T. 2024. Toimitusjohtaja. Muottituote Group Oy. Joensuu. Henkilökohtainen tiedoksianto 11.11.2024.
- Vectorcam. 2024. 3+2 axis indexing. <https://www.vectorcam.com/en/cam-software/3-2-achsen-indexieren-vectorcam/>. 16.11.2024
- Peak Machine Sales. 2024. What is High Speed Machining? <https://www.peakedm.com/WhatIsHighSpeedMachining.html>. 11.11.2024
- Zygo. 2024. Roughness Measurements - Let's Take a Closer Look. <https://www.zygo.com/insights/blog-posts/roughness-measurements>. 28.2.2025
- Östman, M. 2023. Muottiin valetut vuodet – Muottituote Group täytti 50 vuotta. <https://www.muottituote.fi/muottiin-valetut-vuodet-muottituote-group-taytti-50-vuotta/>. 9.11.2024

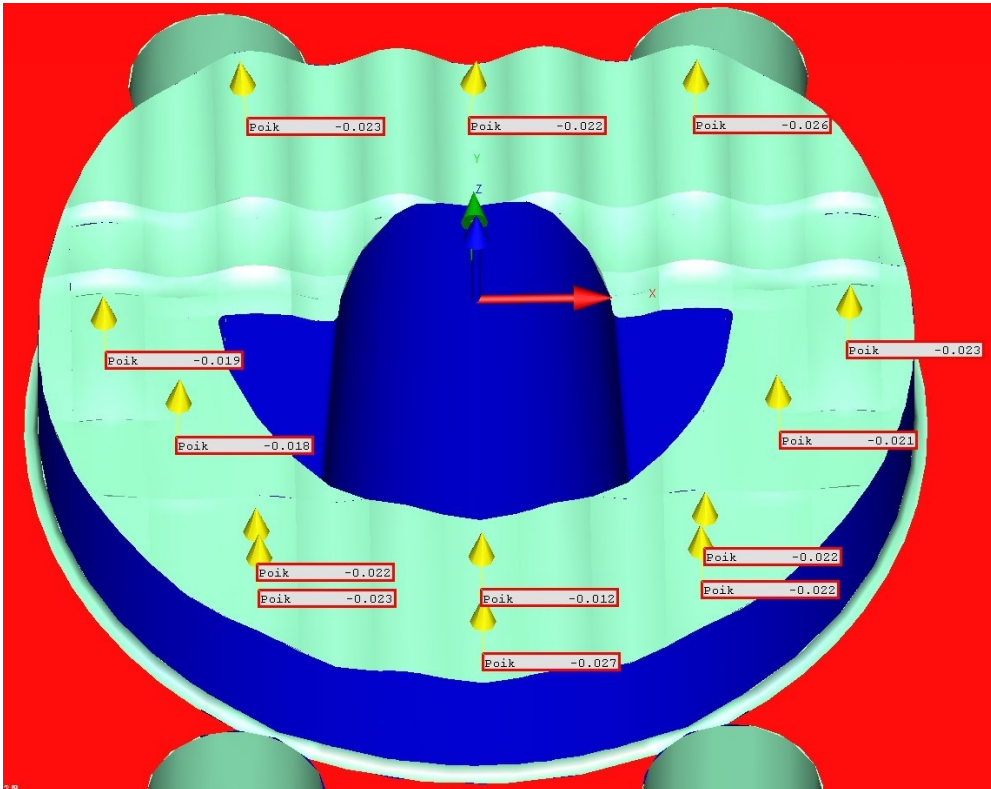
## Liite 1 Kosketusmittaukset lähtötilanteessa



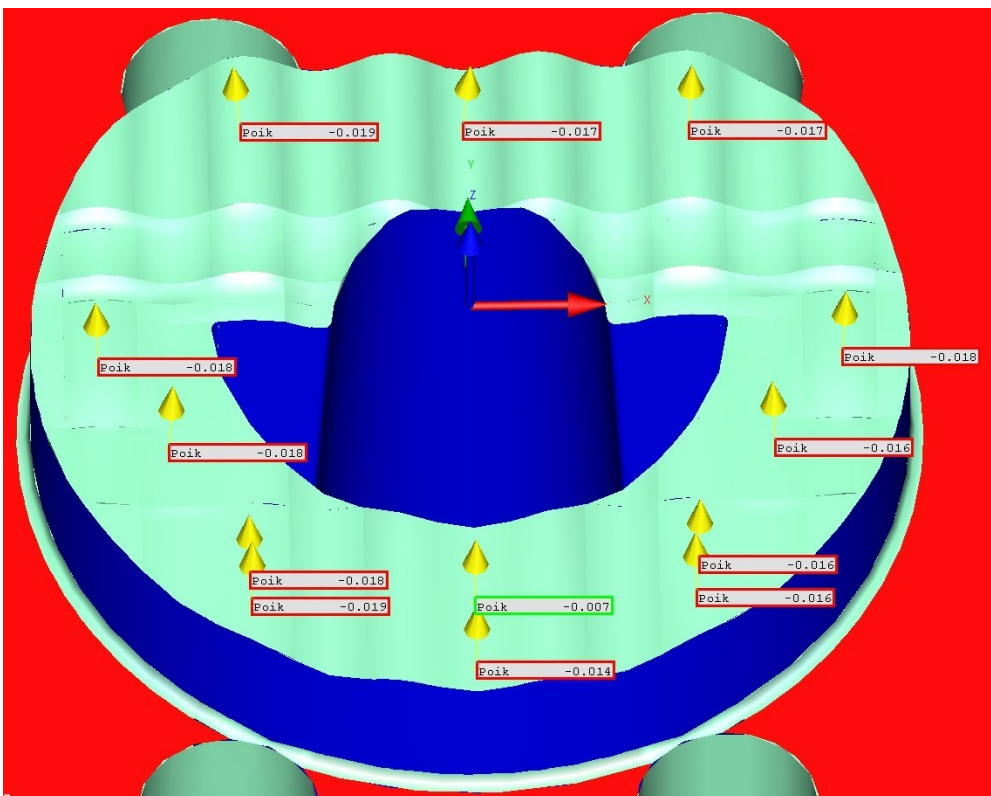
Pesä 1:n kosketusmittaustulokset lähtötilanteessa. (Kuva: Konsta Lamminsalo)



Pesä 2:n kosketusmittaustulokset lähtötilanteessa. (Kuva: Konsta Lamminsalo)



Pesä 3:n kosketusmittaustulokset lähtötilanteessa. (Kuva: Konsta Lamminsalo)

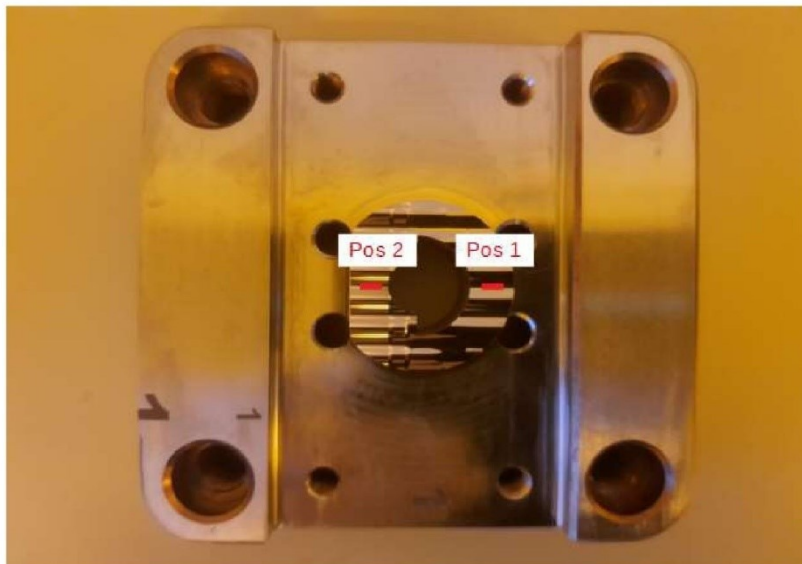


Pesä 4:n kosketusmittaustulokset lähtötilanteessa. (Kuva: Konsta Lamminsalo)

## Liite 2 Raportti pinnankarheuden mittauksista lähtötilanteessa

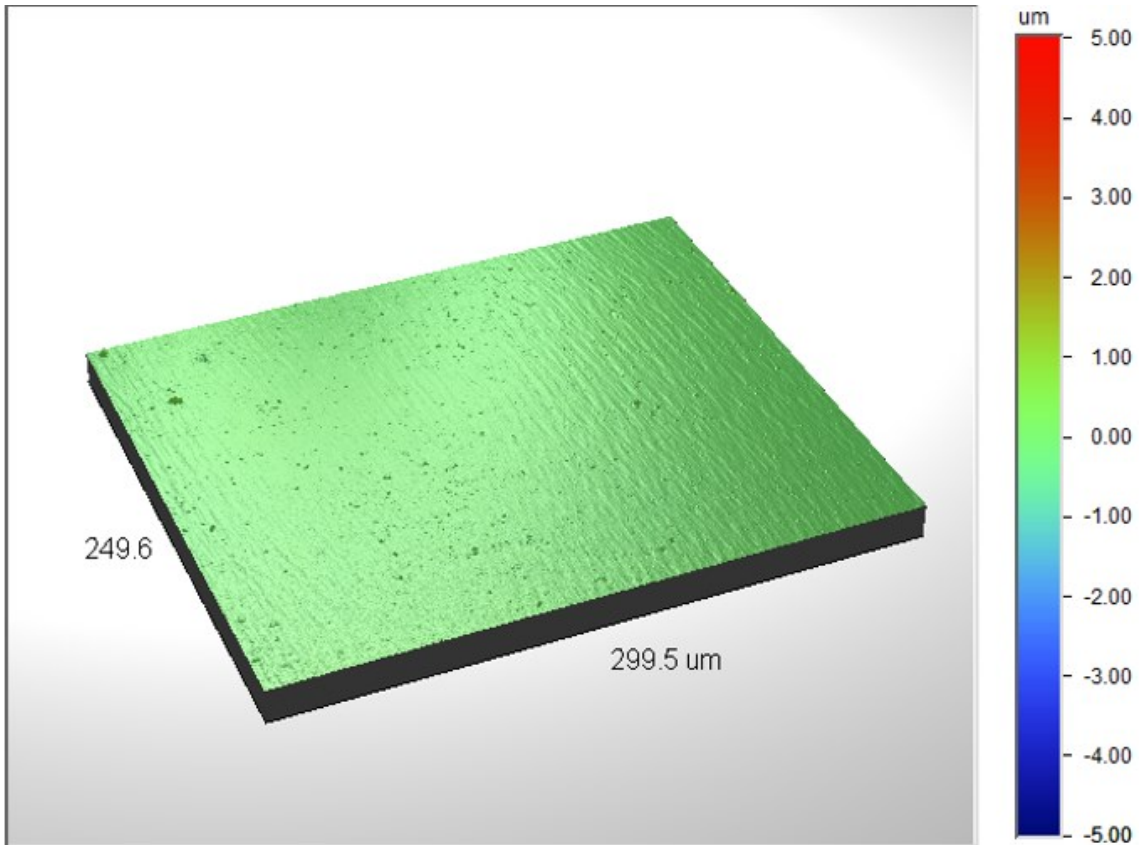
Mittaaja Perti Pääkkönen, Itä-Suomen yliopisto  
 Mittauspäivä 23.8.2024  
 Näytteet Neljä muottipesää  
 Instrumentti Bruker ContourX-500 optinen profilometri  
 Konfiguraatio 50x Mirau objektiivi  
 Menetelmä Vertical Scan Interferometry (VSI)  
 Mittayksikkö Mikrometri  
 Kalibrointi 19,424 ±0,117 k = 1,96  
 Mittaus Pinnankarheus Ra ja Rq  
 Standardi ISO 4287, mittapituus 1.75 mm, ylipäästösuodatus 0.25 mm  
 Mitt.epävarmuus Mittauksen toistettavuus, kalibroinnin epävarmuus sekä keskiarvon keskivirhe, 95 % luottamustaso (k=2)

	Toistettavuus	Viivoja	Ra	STD <sub>Ra</sub>	Epävarmuus	Rq	STD <sub>Rq</sub>	Epävarmuus
Muotti 1 Pos 1	0,0093	500	<b>0,018</b>	0,002	<b>0,019</b>	<b>0,025</b>	0,003	<b>0,019</b>
Muotti 1 Pos 2	0,0093	500	<b>0,020</b>	0,003	<b>0,019</b>	<b>0,032</b>	0,009	<b>0,019</b>
Muotti 2 Pos 1	0,0382	500	<b>0,086</b>	0,017	<b>0,076</b>	<b>0,119</b>	0,027	<b>0,076</b>
Muotti 2 Pos 2	0,0382	500	<b>0,220</b>	0,147	<b>0,078</b>	<b>0,290</b>	0,198	<b>0,078</b>
Muotti 3 Pos 1	0,0473	500	<b>0,152</b>	0,013	<b>0,095</b>	<b>0,188</b>	0,013	<b>0,095</b>
Muotti 3 Pos 2	0,0473	500	<b>0,487</b>	0,081	<b>0,095</b>	<b>0,596</b>	0,091	<b>0,095</b>
Muotti 4 Pos 1	0,0090	500	<b>0,045</b>	0,004	<b>0,018</b>	<b>0,056</b>	0,005	<b>0,018</b>
Muotti 4 Pos 2	0,0090	500	<b>0,463</b>	0,262	<b>0,030</b>	<b>0,617</b>	0,363	<b>0,037</b>

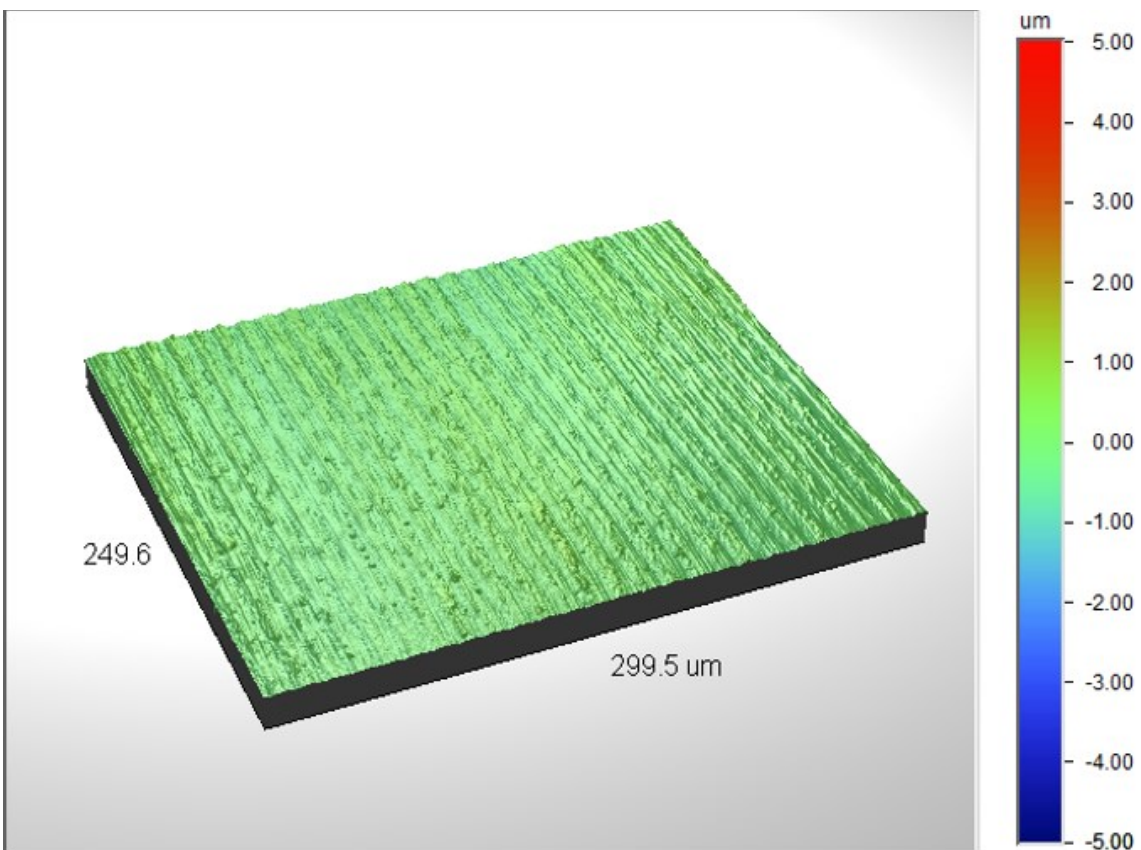


Mittauspisteet, mittaviivan pituus 1.75 mm.

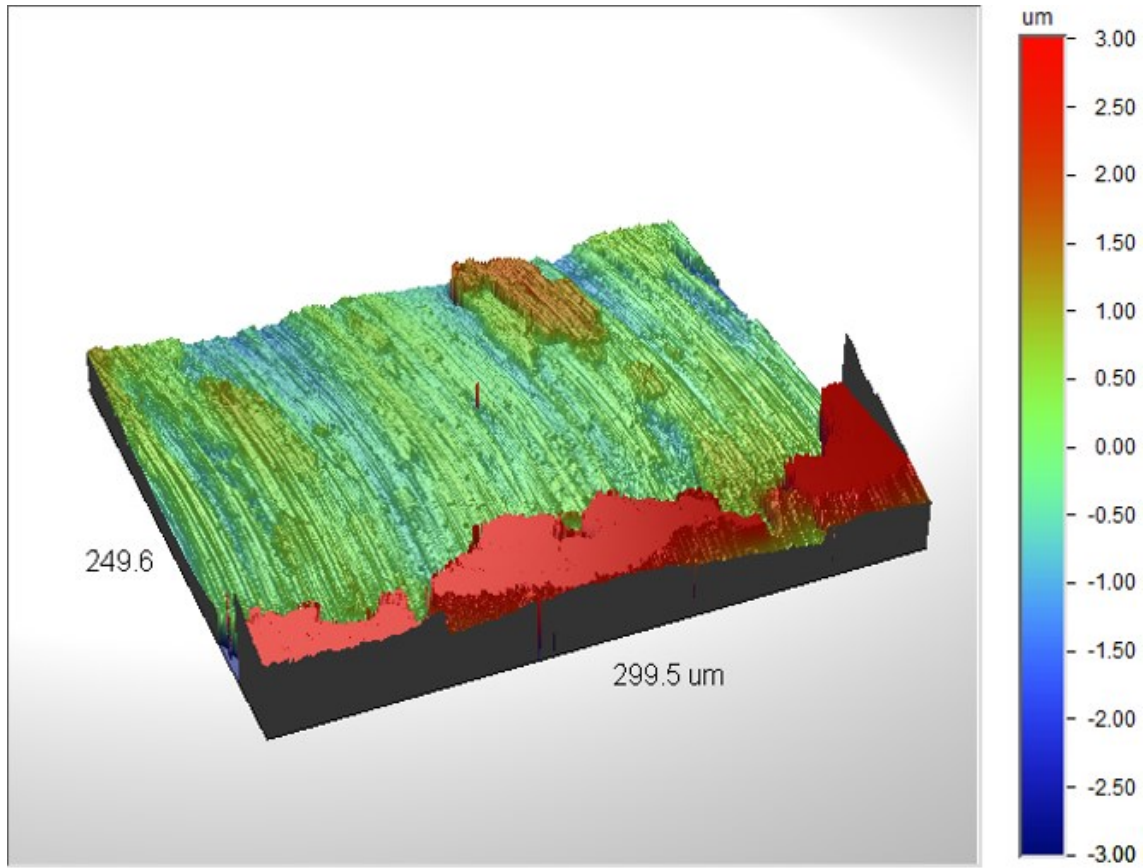
Pinnankarheuden mittaus lähtötilanteessa (Pääkkönen 2024).



Pesä 1:n ensimmäinen mittapiste. (Pääkkönen 2024)



Pesä 3:n ensimmäinen mittapiste. (Pääkkönen 2024)



Pesä 4:n toinen mittapiste. (Pääkkönen 2024)

## Liite 3 Raportti pinnankarheuden mittauksista lopputilanteessa

Mittaja Pertti Pääkkönen, Itä-Suomen yliopisto  
 Mittauspäivä 17.1.2025  
 Näytteet Neljä muottipesää sekä irtomuotti  
 Instrumentti Bruker ContourX-500 optinen profiometri  
 Konfiguraatio 50x Mirau objektiivi  
 Menetelmä Vertical Scan Interferometry (VSI)  
 Mittayksikkö Mikrometri  
 Kalibrointi 19,424 ±0,117 k = 1,96  
 Mittaus Pinnankarheus Ra ja Rq sekä Rz<sup>1</sup>  
 Standardi ISO 4287, mittapituus 1.75 mm, ylipäästösuodatus 0.25 mm  
 Mitt.epävarmuus Mittauksen toistettavuus, kalibroinnin epävarmuus sekä keskiarvon keskivirhe, 95 % luottamustaso (k=2)

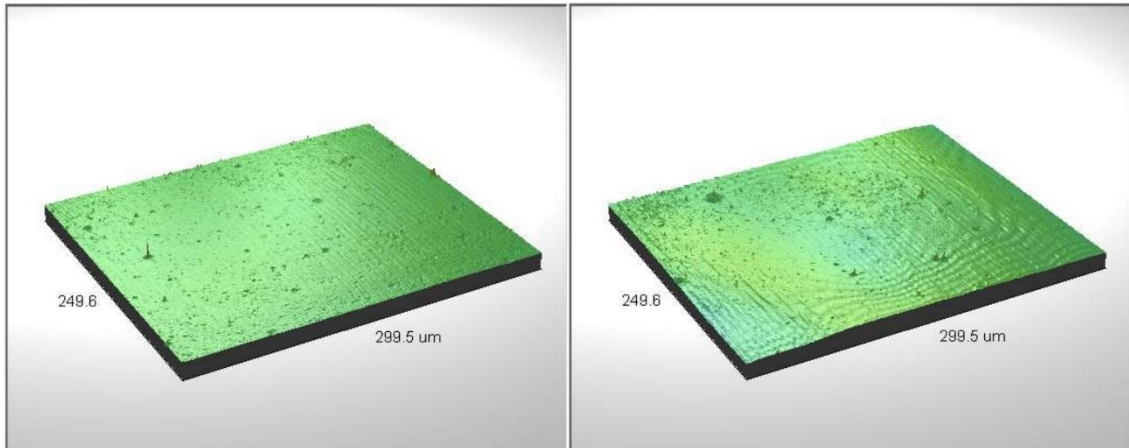
	Toistettavuus	Viivoja	Ra	STD <sub>Ra</sub>	Epävarmuus	Rq	STD <sub>Rq</sub>	Epävarmuus	Rz	STD <sub>Rz</sub>	Epävarmuus
Muotti 1 Pos 1	0,0273	500	<b>0,029</b>	0,005	<b>0,055</b>	<b>0,048</b>	0,013	<b>0,055</b>	<b>0,579</b>	0,198	<b>0,057</b>
Muotti 1 Pos 2	0,0364	500	<b>0,062</b>	0,028	<b>0,073</b>	<b>0,082</b>	0,037	<b>0,073</b>	<b>0,550</b>	0,223	<b>0,075</b>
Muotti 1 Pos 3	0,0296	500	<b>0,122</b>	0,020	<b>0,059</b>	<b>0,152</b>	0,028	<b>0,059</b>	<b>0,762</b>	0,196	<b>0,062</b>
Muotti 1 Pos 4	0,0234	500	<b>0,171</b>	0,037	<b>0,047</b>	<b>0,224</b>	0,063	<b>0,047</b>	<b>0,183</b>	0,367	<b>0,057</b>
Muotti 2 Pos 1	0,0379	500	<b>0,115</b>	0,016	<b>0,076</b>	<b>0,151</b>	0,019	<b>0,076</b>	<b>1,122</b>	0,163	<b>0,077</b>
Muotti 2 Pos 2	0,0216	500	<b>0,024</b>	0,003	<b>0,043</b>	<b>0,030</b>	0,005	<b>0,043</b>	<b>0,187</b>	0,065	<b>0,044</b>
Muotti 2 Pos 3	0,0238	500	<b>0,094</b>	0,004	<b>0,048</b>	<b>0,117</b>	0,007	<b>0,048</b>	<b>0,705</b>	0,120	<b>0,049</b>
Muotti 2 Pos 4	0,0365	500	<b>0,025</b>	0,003	<b>0,073</b>	<b>0,036</b>	0,006	<b>0,073</b>	<b>0,346</b>	0,099	<b>0,074</b>
Muotti 3 Pos 1	0,0383	500	<b>0,159</b>	0,016	<b>0,077</b>	<b>0,207</b>	0,023	<b>0,077</b>	<b>1,388</b>	0,191	<b>0,078</b>
Muotti 3 Pos 2	0,0365	500	<b>0,302</b>	0,010	<b>0,073</b>	<b>0,362</b>	0,008	<b>0,073</b>	<b>1,901</b>	0,087	<b>0,073</b>
Muotti 3 Pos 3	0,0511	500	<b>0,327</b>	0,041	<b>0,102</b>	<b>0,398</b>	0,052	<b>0,102</b>	<b>2,114</b>	0,289	<b>0,105</b>
Muotti 3 Pos 4	0,0368	500	<b>0,415</b>	0,012	<b>0,074</b>	<b>0,500</b>	0,018	<b>0,074</b>	<b>2,426</b>	0,143	<b>0,075</b>
Muotti 4 Pos 1	0,0156	500	<b>0,067</b>	0,007	<b>0,031</b>	<b>0,087</b>	0,014	<b>0,031</b>	<b>0,579</b>	0,199	<b>0,036</b>
Muotti 4 Pos 2	0,0375	500	<b>0,135</b>	0,013	<b>0,075</b>	<b>0,169</b>	0,016	<b>0,075</b>	<b>1,029</b>	0,214	<b>0,077</b>
Muotti 4 Pos 3	0,0292	500	<b>0,207</b>	0,009	<b>0,058</b>	<b>0,264</b>	0,011	<b>0,058</b>	<b>1,598</b>	0,138	<b>0,060</b>
Muotti 4 Pos 4	0,0287	500	<b>0,199</b>	0,010	<b>0,057</b>	<b>0,250</b>	0,014	<b>0,057</b>	<b>1,431</b>	0,134	<b>0,059</b>
Irtomuotti Pos 1	0,0253	500	<b>0,026</b>	0,002	<b>0,051</b>	<b>0,033</b>	0,003	<b>0,051</b>	<b>0,218</b>	0,044	<b>0,051</b>
Irtomuotti Pos 2	0,0101	500	<b>0,017</b>	0,009	<b>0,020</b>	<b>0,026</b>	0,028	<b>0,020</b>	<b>0,188</b>	0,327	<b>0,036</b>
Irtomuotti Pos 3	0,0490	500	<b>0,011</b>	0,001	<b>0,098</b>	<b>0,015</b>	0,001	<b>0,098</b>	<b>0,088</b>	0,018	<b>0,098</b>
Irtomuotti Pos 4	0,0216	500	<b>0,013</b>	0,001	<b>0,043</b>	<b>0,017</b>	0,002	<b>0,043</b>	<b>0,094</b>	0,022	<b>0,043</b>

1) Rz on määritelty mittausalueen viiden korkeimman piikin keskiarvon sekä viiden matalimman laakson keskiarvon välisenä erotuksena.

Esimerkkikuvissa pinnat on oikaistu mitta-aineistoon sovitetulla sylinteripinnalla ja kuvien korkeusrajat on asetettu ±3.0 µm:iin vertailun helpottamiseksi.

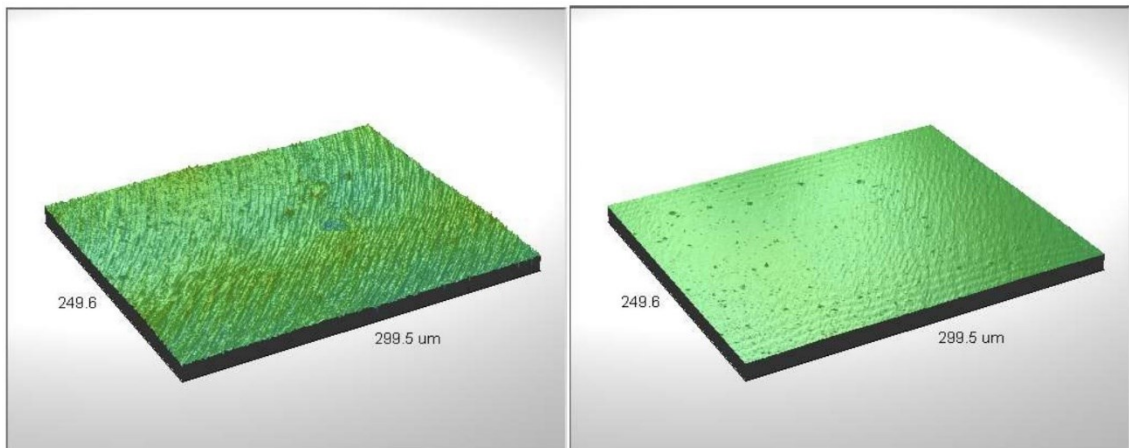


Pinnankarheuden mittaus lopputilanteessa (Pääkkönen 2025).



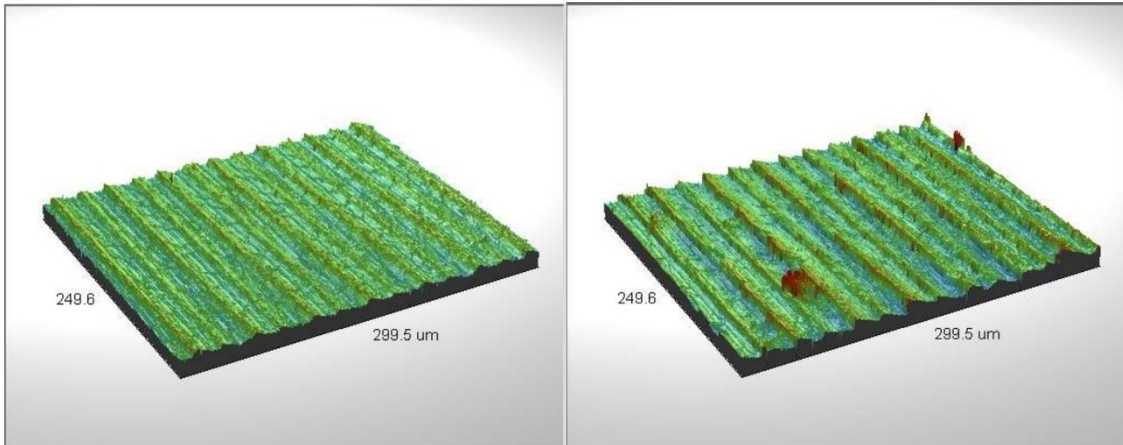
Kuvat muotista 1 Pos 1 ja 4

Kuvat mikroskoopilla 1. pesämuodosta (Pääkkönen 2025).



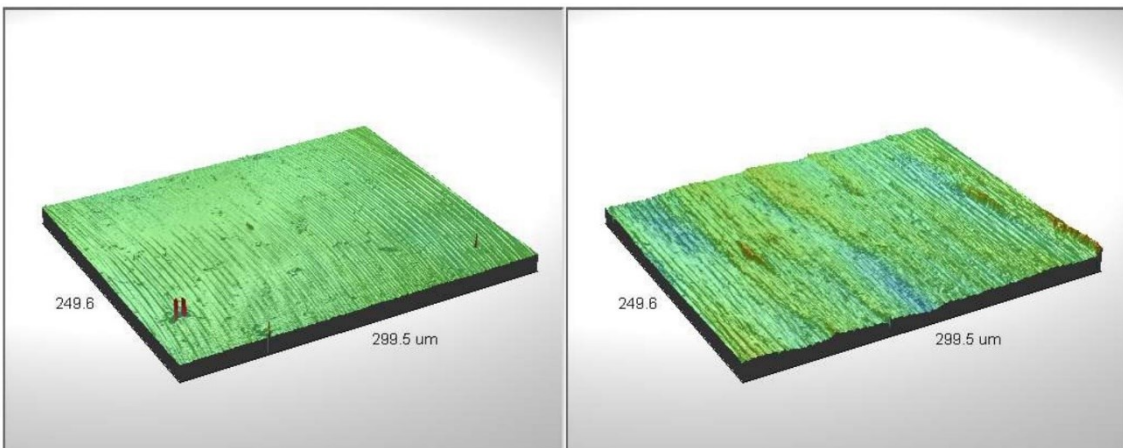
Kuvat muotista 2 Pos 1 ja 4

Kuvat mikroskoopilla 2. pesämuodosta (Pääkkönen 2025).



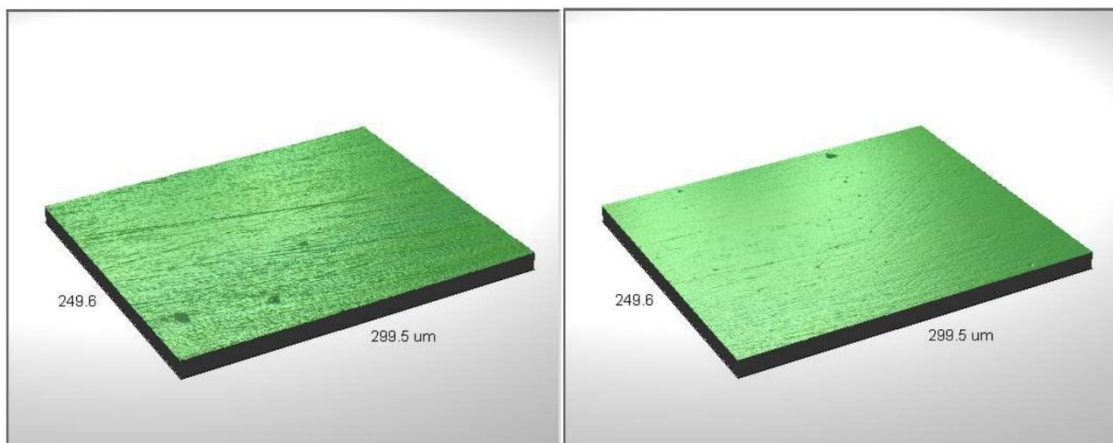
Kuvat muotista 3 Pos 1 – 4

Kuvat mikroskoopilla 3. pesämuodosta (Pääkkönen 2025).



Kuvat muotista 4 Pos 1 ja 4

Kuvat mikroskoopilla 4. pesämuodosta (Pääkkönen 2025).



Kuvat käsinkillotuksesta Pos 1 ja 4

Kuvat mikroskoopilla irtokeernasta (Pääkkönen 2025).