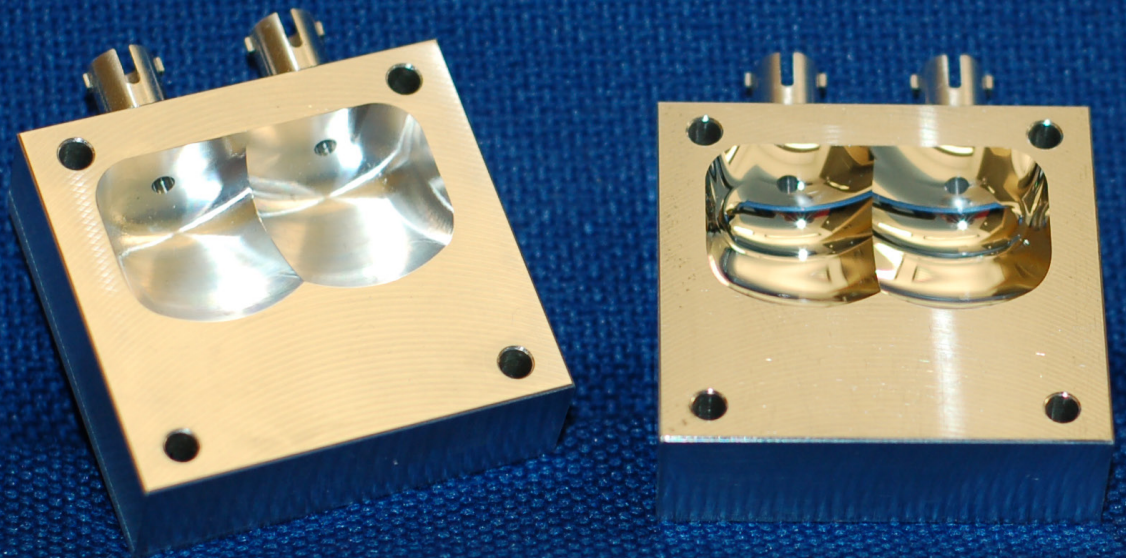


Juha Väyrynen & Kari Mönkkönen



# ToNaVa - Toiminnallisten mikro- ja nanorakenteiden valmistus

Loppuraportti





# **ToNaVa - Toiminnallisten mikro- ja nanorakenteiden valmistus**

Loppuraportti

Juha Väyrynen & Kari Mönkkönen

*Julkaisusarja*

C: Raportteja, 16

*Vastaava toimittaja*

Kari Tiainen

*Sivuntaitto*

Kaisa Varis

*Kansikuva*

Sini Kivi (VTT-Kuopio)

© Tekijät ja Karelia-ammattikorkeakoulu

Tämän teoksen osittainenkin kopiointi on tekijänoikeuslain mukaisesti kielletty ilman nimenomaista lupaa.

ISBN 978-952-275-119-5

ISSN-L 2323-6914

ISSN 2323-6914

*Julkaisujen myynti  
ja jakelu*

Karelia-ammattikorkeakoulu  
julkaisut@karelia.fi  
tahtijulkaisut.net

Joensuu 2014

# Sisällys

<b>Tiivistelmä</b>	<b>6</b>
<b>Abstract</b>	<b>7</b>
<b>Taustaa</b>	<b>8</b>
<b>1 Kansainvälinen yhteistyö</b>	<b>10</b>
<b>2 Resurssit ja organisaatio</b>	<b>12</b>
<b>3 Tavoitteet ja tulokset</b>	<b>14</b>
3.1 Terästeknologian tutkiminen	14
3.2 Suunnittelu ja datan käsittely	16
3.3 Nano- ja mikrotyöstö sekä valmistusteknologiat	22
3.4 Pinnoitteet	27
3.5 Sovellusalueet	29
<b>4 Tulosten hyödyntäminen</b>	<b>32</b>
<b>5 Julkaisut</b>	<b>34</b>

# Tiivistelmä

Fotoniikan ja tarkkuusteknologioiden osaaminen on noussut yhdeksi Pohjois-Karjalan tärkeimmistä kehittämisen kohteista. Määrätietoinen vuosikymmeniä sitten aloitettu panostaminen on tehnyt Joensuun seudusta Suomen johtavan ja kansainvälisesti arvostetun fotoniikan sekä materiaali- ja tarkkuusteknologioiden osaamiskeskittymän. Toiminnalliset mikro- ja nanorakenteet (Tonava) -hanke toteutettiin yhteistyössä alueellisten yritysten, Joensuun Tiedepuisto Oy:n, Karelia-ammattikorkeakoulun sekä Itä-Suomen yliopiston kesken.

Tonava-hankkeen tavoitteina olivat sovelluslähtöiset tutkimukset toiminnallisten rakenteiden suunnittelumenetelmissä, simulaatioissa ja valmistuksessa. Hankkeen tavoitteena oli myös saada aikaan liike-elämää hyödyntävää palvelutoimintaa, sekä tuottaa uutta tietoa korkealaatuisina opinnäytteinä ja tieteellisinä julkaisuina. Hankkeen loppuvaiheessa saavutettiin tavoitteena ollut tuotesovellustaso toiminnallisten rakenteiden valmistusketjussa.

# Abstract

Photonics and precision manufacturing technologies have become an essential part of regional development in North Karelia. Firmly established and dedicated work has turned Joensuu region into an internationally acclaimed center of excellence in the field of photonics, material technologies and precision manufacturing. The photonics innovation ecosystem supports the joint research and development activities of regional manufacturing companies, Joensuu Science Park Ltd., Karelia University of Applied Sciences and University of Eastern Finland. Based on this collaboration the Tonava-project was generated to promote the use of micro- and nanostructures in applied product development. Tonava-project focused in designing processes, simulations and manufacturing processes of functional structures. The objectives of the project were also to promote value addition for industry through fundamental applied research, produce new knowledge of manufacturing techniques and generate scientific publications in the field of study. As an outcome of the research several new process chains were established to promote the use of micro- and nanostructures in real life industrial applications.

# Taustaa

Itä-Suomen yliopiston fysiikan laitoksen pitkäjänteinen tutkimus aalto-optisen teknologian, teollisuusoptiikan, optisten materiaalien sekä spektriväritutkimuksen aloilla ovat tehneet siitä kansainvälisesti tunnetun sekä Suomen johtavan fotonikan tutkimuksen yksikön. Hankkeen aikana yliopiston fotonikkaan liittyvä tutkimus koottiin yhden toiminnallisen yksikön, Fotonikan instituutin alle. Instituutin tehtävänä on tehdä korkeatasoista tutkimusta fotonikan alalla, auttaa yrityksiä fotonikkaan liittyvissä ongelmissa ja levittää tietoa fotonikan mahdollisuuksista muilla tutkimusalueilla kuten biologiassa, farmasiassa ja lääketieteessä. Hankkeessa yhtenä tavoitteena oli kartoittaa fotonikan ja tarkkuustyöstömenetelmien hyödyntämismahdollisuuksia em. alojen tutkimuksessa.

Karelia-ammattikorkeakoulun tutkimustoimintaa ohjaavan strategiakauden keskeisiä painopistealueita olivat ISAT-kumppanuuden rakentaminen ja yhteistyö Itä-Suomen yliopiston kanssa. Tonava-hanke keskittyi tarkkuustekniikkaan, joka valittiin Karelia-amk:n strategiseksi painopistealueeksi. Karelia-amk:lla ja yliopistolla on ollut vahva panos koko maakunnan valmistustekniikan osaamistason nostamisessa, innovaatioympäristöjen kehittämisessä ja keskeisten toimijoiden yhteistyön rakentamisessa.

Alueellisten tutkimus- ja koulutusorganisaatioiden lisäksi monista alueen yrityksistä (Nanocomp, GreenFox, SoftColor, Thermo Fisher Scientific, Okun koneistuspalvelu ja Medisize) löytyy tarkkuusvalmistukseen liittyvää korkeatasoista osaamista. Teknologioiden kehittämisen ohella toimijat ovat pyrkineet kaupallistamaan tutkimuksessa syntyneitä uusia tutkimustuloksia ja sovelluksia. Hankkeessa kehityksen osaamisen pohjalta verkosto (Karelia-amk, Itä-Suomen yliopisto ja yritykset) pystyvät kokonaisuutena tarjoamaan asiakkaille räätälöityjä palveluja tutkimuksesta aina fotonikan massatuotantoon asti.

Tonava-tutkimushanke oli yksi fotonikan, materiaali- ja tarkkuusteknologioiden osaamiskeskusohjelman alueellisista keihäänkärkihankkeista. Hankkeessa hyödynnettiin nykyistä ja kehitettiin uutta korkeatasoista osaamista seuraavilla osaamisaloilla:



- » Optisten teknologioiden koulutus ja tutkimus (Itä-Suomen yliopisto UEF)
- » Mikro- ja nanorakenteiden suunnittelu ja valmistus (UEF, SIB Labs, Karelia-amk ja Nanocomp Oy)
- » Timanttiterien kasvatusta CVD-menetelmällä (UEF, GramonD)
- » Toiminnallisten rakenteiden suunnittelu ja valmistus hyödyntämällä suoraa valmistusmenetelmiä
- » 3D-kappaleiden pinnoitusten tutkiminen (UEF)
- » Teräksen timanttityöstön tutkiminen (Karelia-amk)
- » Mikro- ja nanorakenteiden valmistuksen tutkiminen (Karelia-amk)
- » UV-valun ja ruiskuvalun yhdistäminen (Karelia-amk, Nanocomp Oy)
- » Tarkkuustyöstö (alueelliset yritykset ja yhteistyökumppanit muualla)

# 1 Kansainvälinen yhteistyö

**K**ansainväliseen osaamisen tuntemukseen panostettiin merkittävästi hankkeen aikana. Hankkeen tutkimuksen tulokset julkaistiin kansainvälisesti, tieteellisesti korkeatasoisissa, vertaisarviointimenettelyä käyttävissä lehdissä. Hankkeen aikana osallistuttiin aktiivisesti maailmanlaajuisen tarkkuustekniikan ja nanoteknologia verkoston (EUSPEN-The European Society for Precision Engineering and Nanotechnology) toimintaan mm. osallistumalla kolmeen Euspenin maailmankonferenssiin ja viiteen työpajaan (topical meeting/workshop).

Tutkijan liikkuvuutta hankkeen aikana toteutettiin Saint Petersburg State Polytechnical University:n kanssa. Tutkijatohtori Vera Loboda oli kehittämässä interferometriä mittausten menetelmiä Karelia-ammattikorkeakoulussa syksyllä 2011. Lisäksi hankkeen aikana toteutettiin lukuisin ulkomaanvierailuja kumppanuuskorkeakouluihin ja tutkimuslaitoksiin. Hankkeen aikana tehtiin tiivistä yhteistyötä Moscow State University:n kanssa timanttineulan terätekniologiaan liittyen. Timanttineulateriä voidaan hyödyntää mikro- ja naorakenteiden työstössä sekä pienten rakenteiden mittaamisessa koskettamalla. Tohtori Rinat Ismagilov ja professori Alexander Obraztsov kehittivät timanttineulojen CVD-kasvatusta (Chemical Vapor Deposition) ja terien kiinnittämistä mikromanipulaattorille teräpidikkeeseen. Tämä työ tehtiin pääosin Moskovassa. Tsinghuan yliopiston Department of precision instruments and mechnology toimi pinnoituksiin liittyvässä osa-alueessa yhteistyötahona. Hankkeen aikana toteutui ko. yliopiston kanssa tutkijavaihtoa n. 1 kk verran.

Lisäksi osallistuttiin mm. neljään mikro- ja nano-optiikan konferenssiin Hollannissa, Iso-Britanniassa, Japanissa sekä timantti ja nanohiili-konferenssiin Puerto Ricossa. Ulkomaanvierailuja tehtiin kumppanuusyliopistoihin, alan teknologiamessuille, yrityksiin ja tutkimuslaitoksiin.

Hankkeessa tehtiin kansainvälistä yhteistyötä seuraavien tahojen kanssa:

- » Juken Ltd., Toyohashi, Japani
- » Cranfieldin yliopisto, Iso-Britannia
- » UPS<sub>2</sub> Ultra Precision and Structured Surfaces-verkosto, Iso-Britannia
- » EUSPEN
- » Moore Nanotechnology, USA
- » Moscow State University, Venäjä
- » Saint Petersburg State Polytechnical University, Venäjä
- » Tsinghuan yliopisto, Department of precision instruments and mechnology, Kiina
- » Yhteiseurooppalainen kiihdytinlaboratorio CERN, Sveitsi

Hankkeen toteutusta tukevaa tutkimus yhteistyötä tehtiin myös Oulun yliopiston, VTT:n, Aalto-yliopiston ja Tampereen Teknillisen Yliopiston kanssa.

## 2 Resurssit ja organisaatio

Hanke toteutettiin rinnakkaishankkeina Itä-Suomen yliopiston (UEF) ja Karelia-ammattikorkeakoulun toimesta. Hankkeiden vastuullisina johtajina toimivat yliopettaja Kari Mönkkönen (Karelia-amk) ja professori Markku Kuittinen (UEF). Hankkeen rahoitukseen ja johtoryhmätyöskentelyyn osallistuivat seuraavat yritykset ja henkilöt:

- » Kalevi Pölönen, Tekes
- » Juha Laiho ja Jani-Pekka Hirvonen, Medisize Oy
- » Rami Vuorinen, Gasmot Technologies Oy
- » Jyrki Huttunen, Oplatek Group Oy
- » Samuli Siitonen, Nanocomp Ltd
- » Niina Sande, Thermo Fisher Scientific Oy
- » Aki Gröhn, Joensuun Tiedepuisto
- » Kari Mönkkönen, Karelia-amk, esittelijävastuu
- » Markku Kuittinen, UEF, esittelijävastuu

Johtoryhmä kokoontui hankkeen aikana seitsemän kertaa.

Tonava-hankkeen projektipäällikköinä toimivat Juha Väyrynen (Karelia-amk) ja Jarkko Mutanen (UEF). Lisäksi hankkeessa Karelia-amk:ssa työskenteli määräaikaisina tutkijoina seuraavat henkilöt: Janne Niemi, Jari Hämäläinen, Jussi Nyyssönen ja Jussi Kinnunen. Hankkeen tutkimustyöhön osallistui myös Sami Hassinen, joka oli tutkimustyön aikana palkattomalla vapaalla Nanocomp Oy:stä. Suunnittelu- sekä koneistusmenetelmien tutkimuksesta kehittämisestä vastasivat Juha Väyrynen ja Janne Niemi. Jari Hämäläinen ja Jussi Nyyssönen vastasivat käytännön työstötesteistä timanttityöstökoneella.

UEF:ssa hankkeessa työskenteli Alexander Obraztsov, hän kehitti CVD-menetelmään perustuvien timanttineulojen kasvattamista. Rinat Ismagilov työskenteli hankkeessa jatko-opiskelijana tutkimusalueena CVD-menetelmään perustuvien timanttineulojen kasvattaminen. Anni Partanen teki mm. pro gradu -työtä projektiin liittyen ja tutki-

musta wire-grid-polarisaattorin suunnittelusta terahertsialueelle ja on myös selvittänyt ohutkalvopakoilla toteutettavia heijastamattomia- ja peilipintoja. Victor Prokofiev toimi hankkeessa projektitutkijana ja vastaten toiminnallisten rakenteiden valmistamisesta ja 3D-pintojen pinnoittamiseen liittyvästä tutkimuksesta ALD-laitteistolla (Atomic Layer Deposition). Hemmo Tuovinen toimi hankkeessa projektitutkijana ja hän vastasi valmistettujen optisten rakenteiden testaamisesta ja anturisovelluksista. Ranskalainen tutkija Matthieu Roussey työskenteli osittain Tonava-projektissa mm. lähestymisanturitutkimukseen liittyen ja lisäksi hän kontaktoi hankkeen eurooppalaisiin yhteistyötahoihin. Toni Saastamoinen vastasi hankkeessa käytetyn optiikan suunnittelusta (esim. freeform-optiikat hybridilinsseissä). Janne Laukkanen toimi hankkeessa projektitutkijana ja hän vastasi rakenteiden valmistamisesta (litografia-laitteet ja ALD). Kari Leinonen toimi hankkeessa projektitutkijana ja hänen vastuullaan oli 3D-pintojen pinnoittamiseen liittyvä tutkimus (ALD). Pertti Pääkkönen toimi hankkeessa projektitutkijana ja hänen vastuullaan hankkeessa oli rakenteiden karakterisointi (profilometrimittaukset jne.). Martti Silvennoinen toimi hankkeessa tutkijana ja hänen vastuullaan oli fs-laserablaatioon (femtosekunnin) liittyvä tutkimus.

## 3 Tavoitteet ja tulokset

**T**utkimuksen kesto oli yhteensä 3 vuotta. Hanke oli jaettu kuuteen puolivuotisperiodiin. Kunkin tavoitealueen tuloksellisuutta arvioitiin johtoryhmän kokouksessa puolivuositain.

Hankkeessa saavutettuja yleisiä tavoitteita olivat:

- » tuntee projektin päätyttyä rajoitukset toiminnallisten rakenteiden valmistuksessa ja liittää nämä rajoitukset suunnittelumenetelmiin
- » kehittää menetelmiä, joiden avulla pystytään automatisoimaan suunnittelua ja valmistusprosesseja toiminnallisille rakenteille
- » tuottaa uutta tietoa, korkealaatuisia opinnäytetöitä, tieteellisiä julkaisuja ja patenteja
- » verkostoitua kansainvälisesti ja yhteistyöverkoston kautta saattaa uusia ideoita yritysten tuotekehitysprojekteiksi sekä nostaa alan yritysten teknologista osaamista

Hankkeen tutkimuksellisia päätavoitteita ja niiden toteutumista tarkastellaan seuraavissa luvuissa.

### 3.1 TERÄTEKNOLOGIAN TUTKIMINEN

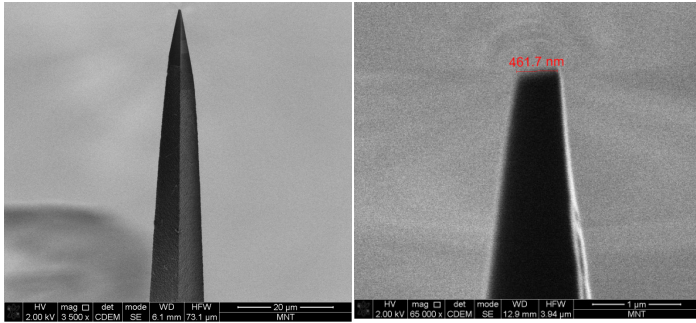
Timanttityöstökoneella työstämiseen liittyvät olennaisena osana lastuamiseen käytettävät timanttiterät. Kaupallisesti saatavilla olevien timanttierien koot vaihtelevat pienimmästä 900 nm teräkoosta useisiin mikrometreihin. Tonava-hankkeessa käytettävän 5-akselisen timanttityöstökoneen paikoitustarkkuuden ollessa alle 1 nanometri (nm), työstökoneen koko työstöpotentiaalia ei voida hyödyntää mikro- ja nanorakenteiden pienimpien yksityiskohtien valmistuksessa kaupallisesti saatavilla olevilla timanttiterillä. Kaupallisten terien ongelmana on se, että terät ovat liian lyhyitä ja terien työstö-osa on liian paksu syvien mikro- ja erityisesti nanorakenteiden yksityiskohtien ja rakenneyhdistelmien valmistami-

seksi. Vain yksi (japanilainen) yritys maailmassa valmistaa alle mikrometrin kokoluokkaa olevia timanttiteriä, joten käytännössä terien saatavuus on heikkoa ja toimitusajat todella pitkiä. Yhden 900 nm timanttiterän valmistaminen kestää noin 3 kuukautta. Muidenkin kuin erittäin pienten timanttiterien kohdalla, valmistusteknisistä rajoituksista johtuen, teräkooltaan lähellä mikrometriä ( $\mu\text{m}$ ) olevien timanttiterien toimitusajat ovat pitkiä ja terien hinnat nousevat useisiin tuhansiin euroihin kappaleelta.

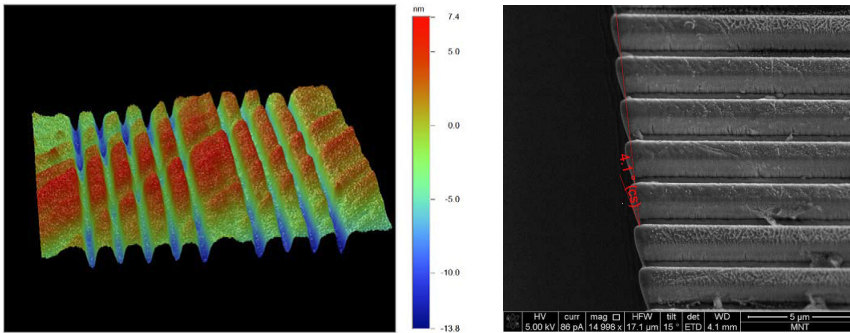
Edellä mainittujen timanttityöstökoneen timanttiteräteknologian ongelmakohtien ratkaisemiseksi Tonava-hankkeessa merkittävänä tutkimuksellisenä toimenpiteenä keskityttiin työstöön soveltuvien timanttikärkien ja terien kasvatus- ja valmistusprosessien tutkimiseen sekä kehittämiseen. Teräteknologian tutkimuksessa kartoitettiin sekä tutkittiin menetelmiä timanttiterien muodon, koon ja kiderakenteen laadun (ml. kovuus) parantamiseksi erityisesti alle mikrometrin kokoluokan terille. Hankkeessa kehitettiin myös menetelmiä millimetrikokoluokan timanttiterien valmistukseen. Hankkeen kannalta tärkeänä terien kehitysvaiheena CVD-kasvatettuja (Chemical Vapour Deposition) timanttiterien kärkiä muokattiin Oulun yliopiston FIB-laitteistolla (Focused Ion Beam) lastuavaksi. Lisäksi hankkeessa kehitettiin menetelmiä timanttikärkien kiinnittämiseksi teränpitimeen. Tähän liittyen kansainvälisenä yhteistyönä käytettiin Moscow State Universityn mikromanipulaattorilaitteistoa, jolla timanttiterät kiinnitettiin UV-kovetteisella liimalla teränpitimeen. Vaihtoehtoisesti kehitettiin prosessia, jossa Oulun yliopiston FIB-laitteistolla platinasintrattiin timanttiterä kiinni teränpitimeen. Timanttineulan pitimen muodon muokkauksessa käytettiin myös femtosekunnin-laseria (fs-laser), jolla neulaterän kiinnitysurien ja -kolojen profiili saatiin optimoitua kiinnitystä varten. Lisäksi hankkeen aikana tutkittiin timanttiterien valmistusketjua, jossa terän kasvatus- ja teränpitimeen kiinnittäminen pyrittiin kehittämään mahdollisemman nopeaksi, optimaaliseksi ja kustannustehokkaaksi prosessiksi.

Nanotimanttineulojen äärimmäisen pienen koon takia terän pinnan kosketuksen havaitsemiseksi hankkeessa kehitettiin Scanning Near-field Optical Microscope (SNOM) -menetelmää käyttävä lähestymisanturi. SNOM-menetelmässä valon intensiteetin vaihtelua käytettiin timanttineulaterän ja työstettävän näytteen etäisyyden määrittämiseen. Menetelmällä timanttineulan kulloinenkin etäisyys työstettävän kappaleen pintaan nähden voidaan määrittää ja neulasta tulevaa dataa käyttää hyväksi työstön reaaliaikaisen etenemisen seurannassa.

Timanttineulaterien ohella tukittiin muita potentiaalisia materiaaleja timanttityöstöteriksi. Potentiaalisin näistä materiaaleista oli piikarbididi ( $\text{SiC}$ ), josta kehitettiin hilarakenteitten kertatyöstöön soveltuva kampaterä. Piikarbiditerän etsaukseen lastuavaksi teräksi kehitettiin uusi valmistusprosessi. Sekä CVD-timanttineulaterien, että  $\text{SiC}$ -kampaterien teräosan muokkauksessa lastuavaksi käytettiin fs-laserablaatiota ja varta vasten terien prosessointiin kehitettyjä fs-laserohjausalgoritmeja. Kuvassa 1 on esitetty CVD-kasvatettuja timanttiteriä yksityiskohtineen ja kuvassa 2 on esitetty timanttineulaterällä työstettyjä hilarakenteita.



**Kuva 1.** Yksityiskohta CVD-kasvatettujen ja FIB-prosessoitujen timanttineulaterien kärjestä.



**Kuva 2.** Timanttineulaterällä työstyttä hilarakennetta ja SEM-kuva piikarbidikampaterästä.

Tällä hetkellä kukaan maailmassa ei pysty kaupallisesti valmistamaan alle 900 nm teräkolokluokkaa olevia timanttityöstöön tarkoitettuja timanttiteriä tai valmistamaan nanotasolla riittävän syviä rakenteita timanttityöstön avulla, vaikka näille olisikin kansainvälistä kysyntää toiminnallisten rakenteiden valmistuksessa. Tonava-hankkeen timanttiterätutkimuksesta saavutettiinkin urauurtavia sovelluksia nanoskaalan timanttiterien valmistukseen ja timanttityöstöön. Tästä osoituksena hankkeen aikana tehtiin kolme teräteknologioihin liittyvää keksintöilmoitusta.

### 3.2 SUUNNITTELU JA DATAN KÄSITTELY

Toiminnalliset rakenteet (esim. hydrofobinen pinta, hilarakenteita sisältävä pinta, mikrorakenteita sisältävä pinta tai antiheijastava pinta) suunnitellaan käyttäen hyväksi kirjallisuuden mukaista luonnontieteistä (aalto-oppi, virtausmekaniikka, sähkö-oppi, yms.) johdettuja teoreettisia malleja. Useimmissa tapauksissa teoreettiset laskelmat antavat suuntaa antavan tuloksen valmistettavalle funktionaaliselle rakennekoolle ja valmistettavan pinnan muototarkkuudelle. Suunnitteluvaiheen jälkeen tutkimusta jatketaan valmistamalla lajitelma erikokoisia rakenteita ja pintoja, jotka ovat lähellä teoreettisia malleja. Seuraavassa vaiheessa näiden rakenteiden toiminnallisuus testataan laboratoriossa, jonka jälkeen valitaan parhaiten toimiva rakennekoko ja kuvioidaan toiminnallinen komponentti tai muotin osa toimivaksi havaitulla rakenteella. Edellä kuvattua sykliä joudutaan toista-



maan useampia kertoja toiminnallisen komponentin rakennekoon löytämiseksi. Sopivan muoto- ja rakennekoon löydyttyä on huomioitava myös sopiva massavalmistusteknologia (työstö tai valu). Valutekniikat lisäsivät hankkeen tutkimuksellisuutta, koska tällöin on vielä huomioita valettavan materiaalin valinta, rakenteen koptoituminen muotista, tuotegeometrioiden mittaaminen (interferometria, profiilometria ja mikroskopia) ja valun toiminnallinen karakterisointi.

Toiminnallisten rakenteiden suunnitteluvaiheen jälkeen on huomioitava myös rakenteen mallintaminen 3D-ohjelmistolla osaksi tuote geometria (tuotteen pääpiirteet). Yleensä toiminnalliset komponentit sisältävät pienempiä alueita, joissa toiminnallisuus tapahtuu (esim. mikrokanavistojen pohjan tietyt alueet tulisi olla hydrofiilisiä tai linssipinnan tulisi sisältää hilarakenteita). Komponenttien valmistettavuuden kannalta nämä rakenteet tulisi pystyä mallintamaan osaksi lopullista geometriaa. Tämä vaihe on havaittu haastavaksi. Toiminnallisten rakenteiden kokoluokka on tyypillisesti muutamia kymmeniä/satoja nanometrejä. Tämä tarkoittaa monissa tapauksissa sitä, että mikro- ja nanodetaljien mallintamiseen soveltuvia 3D-mallinnus ohjelmistoja on rajoitettu määrä. Lopullisten 3D-mallien tiedostokoko kasvaa suureksi johtuen pienistä yksityiskohdista pinnoilla. Aikaisemmissa tutkimuksissa on havaittu erittäin haasteelliseksi mikro/nanometriluokkaa sisältävien pintarakenteiden datan käsittely. Eräs merkittävä haaste on tiedoston koon kasvaminen, kun suunniteltu kappaleen pinta kuvataan mahdollisimman tarkasti tiukalla muototarkkuudella ( $\pm 100$  nm). Etenkin kuvantavan optiikan muototoleranssit on havaittu erittäin haasteellisiksi valmistuksen kannalta.

Tonava-hankkeessa kehitettiin suunnittelu, valmistus ja datan käsittelymenetelmiä seuraaville toiminnallisille komponenteille:

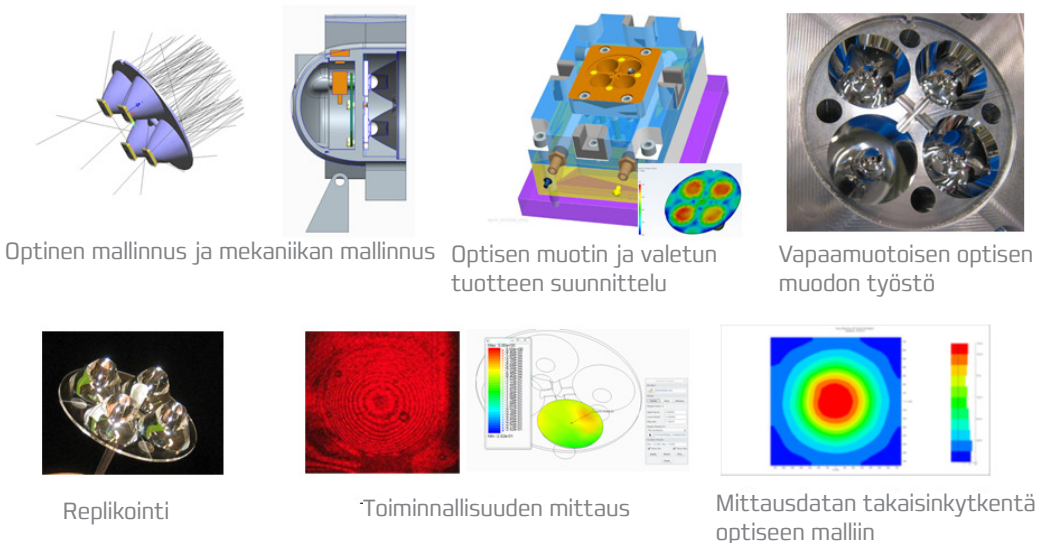
- » Mikrofluidistiikka ja mikro/nanorakenteita sisältävät polymeeriset laitteet
- » Kaarevat valetut polymeerisille linssipinnat sisältäen hilarakenteita
- » Vapaamuotoiset valetut optiset komponentit
- » Monikerrostekniikkaan perustuvat ruiskuvalua ja UV-valua yhdistävät polymeerikomponentit
- » Teräksiset timanttityöstetyt optiset pinnat
- » Timantilla työstetyt vapaamuotoiset optiset komponentit

Kaikista yllä olevista aihe-alueista suunniteltiin, valmistettiin ja karakterisoiitiin koekomponentteja. Tarkkojen muotopintojen ja niissä olevien pintarakenteiden suunnittelussa päädyttiin kehittämään menetelmiä, joissa valmistettava perusmuoto (pintageometria) eriytetään mikro- ja nanodetaljeja sisältävästä dataa. Valmistuksen kannalta mikro- ja pintadatan yhdistäminen on ongelmallista. Pienten detaljien tietomäärä pienelläkin pinta-alalla tai volymetrialla kasvaa helposti niin isoksi että kappaleesta ei pystytä muodostamaan 3D-mallia.

Hankkeen tuloksena syntyi edellä mainituille kuudelle komponentti-alueelle suunnittelu- ja valmistusprosesseja ja kokoelma toiminnallisia rakenteita työstötesteihin. Koekomponentit aihe-alueittain oli suunniteltu huomioiden valmistettavuus, mahdollinen uusi työstöteknologia (työstö timantilla, laser-ablaatio, valuprosessien yhdistäminen ja pin-

noittaminen), replikointi sekä syntyneiden komponenttien karakterisointi.

Valmistusteknisesti ajateltuna valamalla replikoidut polymeeriset kappaleet ovat aina vapaamuotoisia. Tämä johtuu siitä seikasta, että polymeerit kutistuvat valuprosessin aikana 1-5 %. Tämä pätee niin ruiskuvalettuihin, kuin UV-valettuihin polymeereihin. Kutistuman johdosta suunnittelu- ja valmistusprosessia joudutaan iteroimaan. Hankkeen aikana kehitettiin prosessia, jossa optisesta suunnitelmasta siirrytään STEP-geometrian (Standard for the Exchange of Product model data) avulla mekaniikan, ruiskuvalutuotteen ja ruiskuvalumuotin mallinnukseen. Tällöin kyetään ottamaan huomioon mekaniikan asettamat rajoitteet kappaleelle, muotinvalmistusprosessin tarkkuus ja huomioimaan valu kutistuma myös optisessa mallissa. Ruiskuvaluketjun tuottamasta optisesta komponentista mitataan myös optinen toiminnallisuus optisessa koepenkissä. Valetun kappaleen muodonmuutokset mitataan (profilometria ja koordinaattimittaus) ja nämä tiedot voidaan taas syöttää takaisin alkuperäiseen optiseen malliin. Tällöin voidaan kompensoida optista mallia kappaleen todellisen mitatun vääristymän mukaan. Kuvassa 3 on esitetty ruiskuvalettujen vapaamuotoisten optisten komponenttien suunnittelu- ja valmistusketju. Valmistusketjun kyvykkyys on esitetty julkaisussa "Practical Shrinkage Compensation method for Injection Molded LED Optics". Hyvällä ruiskuvalettavan tuotteen ja muotin suunnittelulla päästään alle mikrometrin muototarkkuuteen valetuilla optisilla pinnoilla kuvan 3 mukaisella ketjulla.

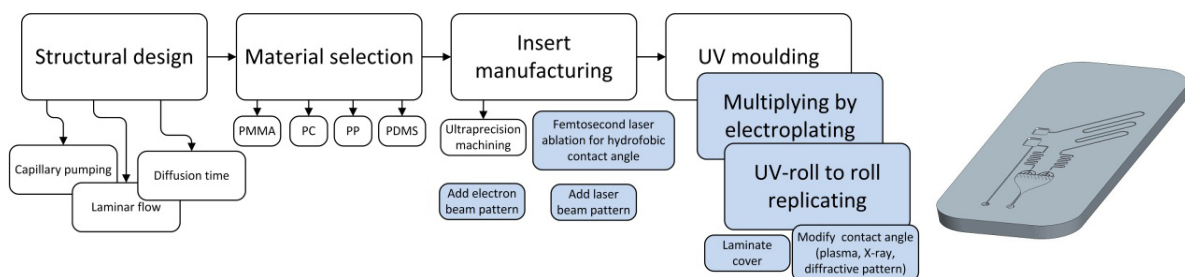


**Kuva 3.** Vapaamuotoisten optisten 3D-komponenttien suunnittelu- ja valmistusketju.

Alle mikrometrin muototarkkuuden saavuttaminen ruiskuvalettavissa linsseissä esitetään EUSPEN 2014 Proceedings of the 14th euspen International Conference julkaisussa "An experimental study of the injection moulding of optical lenses".

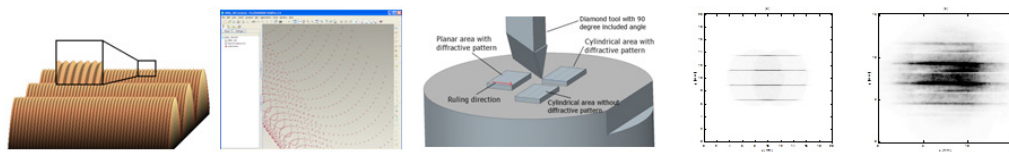
Polymeeristen mikrofluidistiikkalaitteiden valmistus on haastavaa ja poikkitieteellistä. Laitteen suunnittelussa tulee huomioida polymeeri materiaalien pintakemia, laitteen läpi

virtaavan nesteen ominaisuudet, kanavistorakenteet, muotoa antavien osien valmistustavat, valutekniikat, kanaviston sulkevan kannen laminointi ja mahdollinen sekundäärinen mikro- nanorakenne kanavistoissa tai reaktio-alueille. Hankkeen aikana valmistettiin ja suunniteltiin ruiskuvalettuja ja UV-valettuja fluidistiikkalaitteita. Kuvassa 4 on esitetty hankkeen aikana kehitetty suunnittelu- ja valmistusketju polymeerisille fluidistiikkalaitteilla. Mikrojyrsintäprosessilla kyetään valmistamaan 30 ja 50 mikrometrin halkaisijan terillä kanavistorakenteita, joissa jyrsittyjen pintojen pinnankarheus on noin 20 nanometriä. UV-valettujen mikrojyrsittyjen mikrofluidistiikkalaitteiden valmistusprosessi on esitetty julkaisussa ”A novel method for producing a polymer microfluidic device”.



**Kuva 4.** Mikrofluidistiikka sisältävien polymeeristen laitteiden suunnittelu- ja valmistusketju.

Optisten laitteiden toiminnallisuuden parantamiseksi kehitettiin hankkeessa uusia suunnittelu- ja valmistusprosesseja, joissa yhdistetään kaarevalle pinnalle hilarakenteita. Hankkeessa valmistettiin useita UV-valettuja linssi hila komponentteja, joiden toiminnallisuus testattiin optisesti. Vastaavaa osaamista löytyy maailmasta hyvin vähän. Kuvassa 5 on esitetty hilarakenteiden suunnittelu- ja valmistusketjua kaareville polymeerisille linssipinnoille.

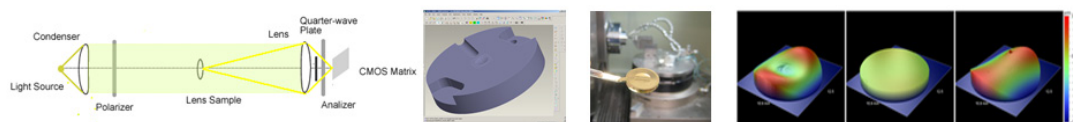


**Kuva 5.** Suunnittelu- ja valmistusketju kaareville valetuille polymeerisille linssipinnoille valmistettavista hilarakenteista.

Tutkimustulokset kaareutuvilla hilarakenteilla on esitetty julkaisuissa ”Design, fabrication, and characterization of hybrid structure” ja ”Fabrication of hybrid optical line generator by direct machining. Höyläämällä kyetään valmistamaan mikrometrikokoluokan hilarakenteita kaareville pinnoille. Näistä pinnoista voidaan tehdä UV-valettujen kopioita, joissa kopioitujen rakenteiden pinnankarheus on 5 nanometriä.

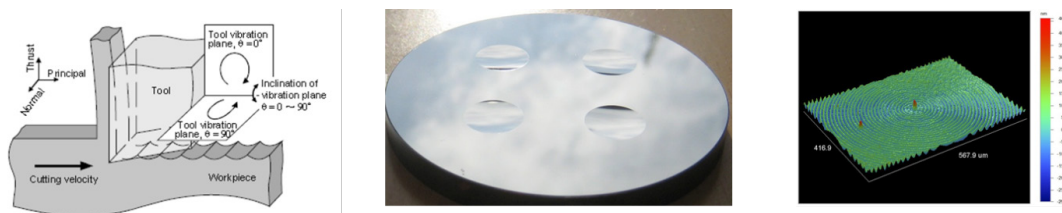
Ruiskuvalettujen linssien muototarkkuutta voidaan parantaa yhdistämällä ruiskuvalettuun pintaan UV-valu. Hankkeessa kokeiltiin PMMA (Polymethyl Methacrylate) linssin muodon korjaamista UV-valulla. Timanttityöstämällä valmistettiin koemuotti josta tehtiin ruiskuvalut. Ruiskuvaletun 7  $\mu\text{m}$  muototarkkuuden virhe linssin tasopinnassa saatiin

oikaistu UV-valulla 0,6  $\mu\text{m}$  muototarkkuuteen. Kuvassa 6 esitetty valmistusketju ruiskuvalun ja UV-valun yhdistämiseen linssipinnoille mahdollistaa alle mikrometrin muototarkkuuden saavuttamisen polymeerisillä komponenteilla. Tutkimusta aihe-alueesta on tehty maailmalla hyvin vähän. Yhdistelmävalun tulokset on esitetty julkaisussa ”Combining UV-replication techniques with injection moulded”.



**Kuva 6.** Suunnittelu- ja valmistusketju monikerrostekniikalla valmistetulle polymeerikomponentille.

Terästen työstöä timantilla tutkittiin hankkeessa koekomponentein. Menetelmä mahdollistaa optisen tarkkuuden teräksisten muotoa antavien keernojen työstön. Keernoja voidaan käyttää optisen pinnalaadun tuotesovelluksissa ruiskuvalussa suurilla sarjasuuruuksilla. Poikkeuttamalla timanttiterää 40 kHz taajuudella muutaman mikrometrin kokoista elliptistä rataa työstön aikana saadaan lastu katkeamaan pieniksi pätkiksi. Lastun katko estää timanttiterän liiallisen kuumenemisen ja liukenemisen työstettävään teräkseen. Kuvassa 7 on esitetty ultra-äänityöstetyn timanttityöstöprosessin tuloksia.



**Kuva 7.** Teräksen ultra-ääni timanttityöstön valmistusprosessi.

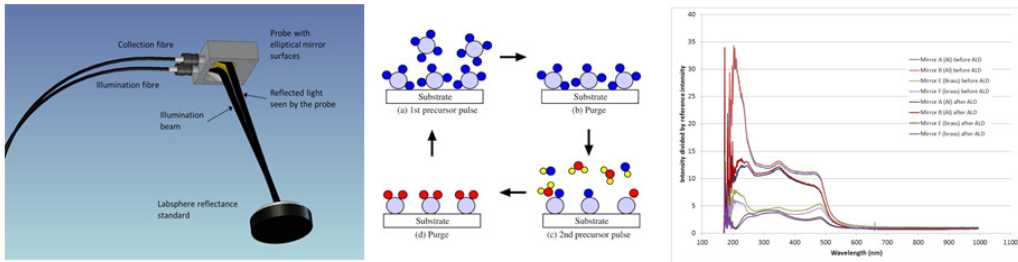
Ultra-äänityöstön prosessi soveltuu sorvaustyypisten teräksisten kappaleiden valmistukseen seuraavin parametrein:

- » Soveltuu parhaiten vähähiilisille työkaluteräksille kovuuksilla 52-56 HRC
- » Toimii parhaiten erkautuskarkenevilla työkalu teräksillä
- » Alhainen lastuamisnopeus 1-2 m/min
- » Lastuamisleveys- ja syvyys 5-10  $\mu\text{m}$
- » Aihiot on esityöstettävä tarkasti
- » Mittaustulosten perusteella prosessilla kyetään tekemään vapaamuotoisia teräskeernoja muototarkkuudella 2  $\mu\text{m}$  ja pinnankarheudella 5-6 nm

Terästen ultra-ääni timanttityöstö on erittäin kiinnostava tutkimuskohde. Toimiessaan prosessi tuottaa hyvin korkealaatuisia keernoja ja soveltuu lisäksi sorvaus tyyppisten vapaamuotoisten muotojen valmistukseen.

Vapaamuotoisten optisten komponenttien käyttö mahdollistaa valoa hyödyntävien mit-

talaitteiden laitekoon pienentämisen. Hankkeessa valmistettiin yhdessä VTT:n kanssa vapaamuotoinen kaksoispeili, joka voidaan kytkeä spektrometriin valokuidulla. Peilien optiset pinnat pinnoitettiin SiO<sub>2</sub> (Silicon Dioxide) ALD-tekniikalla. Peileissä saavutettiin 5 nm pinnakarheus mikrojyrsimällä ja kuituspektrometri toimi hyvin aallonpituusalueella 0,2 – 1 µm. Kuvassa 8 on esitetty timantilla työstettyjen pinnoitettujen vapaamuotoisten optisten komponenttien valmistusketjua. Aiheesta tehtiin julkaisu ”Manufacturing of Freeform Mirror by Milling and Altering its Optical Characteristics by ALD SiO<sub>2</sub> Coating”.



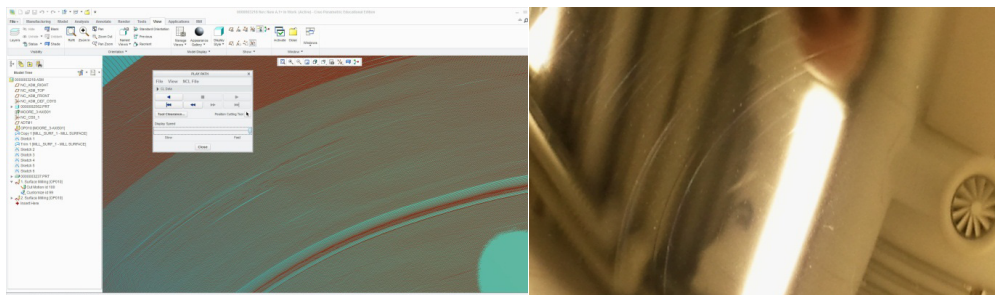
**Kuva 6.** Timanttityöstettyjen vapaamuotoisten optisten komponenttien suunnittelu- ja valmistusprosessientille.

Hankkeen aikana syntyvien koekomponenttien valmistuksessa työstämällä käytettiin pääsääntöisesti seuraavaa polkua:

- » ZEMAX, hilarakenteiden mallinnus kaareville pinnoille (hilarakenteet kaarevilla pinnoilla)
- » Light Tools, optinen mallinnus valon kulkua ohjaavasta komponentista, 3D- malli tallennettavissa STEP formaatissa mekaniikan suunnittelua varten (vapaamuotoiset ja kutistumakompensoidut valo johtavat tai heijastavat komponentit)
- » CREO 3D, tuotteen, mekaniikan, muottien ja valu kutistumien mallinnus
- » Rhino, tiheiden pistepilviedostojen generointi optisesti työstettävien kappaleten STEP-standardi geometrioiden päälle
- » Diffsys, tiheiden työstöratageometrioiden laskenta Rhino-pistepilvidatan perusteella (vapaamuotoiset komponentit)
- » Tiheän resoluution vapaamuotoisten optisten muotojen timanttityöstö timanttityöstökoneella (moniakselinen sorvaus tai jyrsintä)
- » Toiminnallisten rakenteiden lisääminen fs-lasertyöstöllä (fluidistiikkasovellukset)
- » Timanttityöstettyjen osien ja keurnojen muotojen mittaaminen laser-interferometrialla ja profilometrialla (muoto ja pinnankarheus)
- » Työstettyjen muotojen replikointi massavalmistustekniikoilla: UV-valu, ruiskuvalu ja kuumapaino
- » Tuotteen karakterisointi optisesti, pyyhkäisyelektronimikroskopiolla, koordinaattimittamalla, interferometrialla ja profilometrialla
- » Mittauksessa esiintyvien muotovirheiden takaisinkytkentä optiseen ja mekaaniseen suunnittelumalliin
- » Suunnittelu ja valmistusketjun iterointi mittaustietojen perusteella ja muotovirheiden kompensointi



Työstämällä valmistetuissa optisissa komponenteissa suunnittelulliset tutkimushaasteet ovat tiedon siirtämisessä eri järjestelmien välillä. Hankkeessa valmistettujen koekomponenttien mukaan geometriatiedostojen siirrossa järjestelmästä toiseen toimii parhaiten STEP-standardigeometria. Laskettaessa työstöratoja tulee kuitenkin huomioida että useamman eri pintamallin yhtymäkohdissa voi olla pieniä kymmenien nanometriä vuotokohtia. Kuvassa 9 on esitetty työstöratojen radan laskennassa esiintyviä virheitä STEP mallin päällä ja työstetyssä kappaleessa. Nämä kohdat ovat ongelmallisia etenkin työstöratoja laskettaessa. Edellä mainituista virheistä pääsee osittain eroon suodattamalla työstöratoja. Tällöin tosin muototarkkuus heikkenee.



**Kuva 9.** Vapaamuotoisen alumiinisen peilin työstöradan laskennan virheet STEP geometrian päällä ja timanttityöstetyssä kappaleessa.

Tällä hetkellä tutkimuskäytössä olevat optiikan suunnitteluohjelmistot, kuten esimerkiksi Zemax, eivät tue suoraan mikro- ja nanorakenteita sisältävien pintojen siirtoa 3D-suunnitteluohjelmistoihin (CAD). Zemaxista löytyy tiedostomuunnin yleisimpiin CAD-formaatteihin (STEP, yms.) mutta tutkimuksessa tehtyjen selvitysten perusteella näiden formaattien tarkkuus Zemaxista käännettynä datana ei yllä riittävällä tasolla tavoitteena olevaan  $0.1 \mu\text{m}$  muototarkkuuteen.

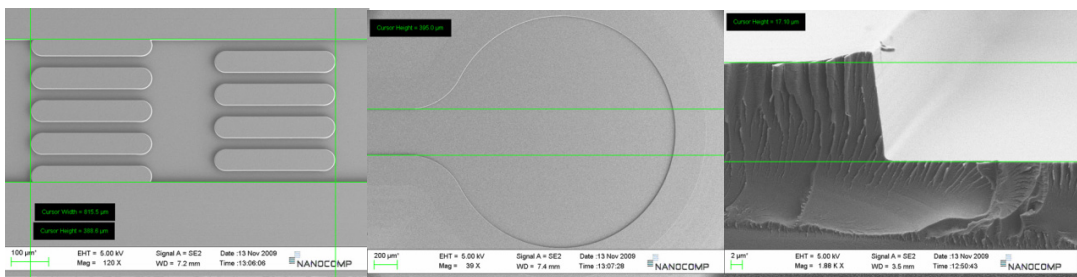
### 3.3 NANO- JA MIKROTYÖSTÖ SEKÄ VALMISTUSTEKNOLOGIAT

*Mikro- ja nanofluidistiikkaa* sisältävissä komponenteissa keskeisiä haasteita ovat esimerkiksi nesteiden pintajännitykseen ja kapillaarivoimiin liittyvät fysikaaliset ilmiöt. Toimiakseen fluidistiikan laitteet vaativat pääsääntöisesti kanavistorakenteita, erillisiä käsittelyjä pintarakenteen aktivoimiseksi ja toiminnallisia komponentteja (venttiilejä, pumppuja) nesteiden siirtoon. Tonava-hankkeessa tutkittiin erilaisia integroituja valmistusmenetelmiä fluidistiikkalaitteiden toiminnallisuuden lisäämiseksi. Integroitujen valmistusmenetelmien avulla esimerkiksi kanavistossa virtaavan nesteiden pintajännitystä voidaan hallita kanavistoon valmistetun sekundäärin toiminnallisen rakenteen avulla. Tutkittavia menetelmiä fluidistiikkalaitteiden valmistuksessa olivat timanttityöstön ja laserablaation yhdistäminen, muottiteräksen nanotyöstäminen laserablaatiolla sekä ruiskuvalun ja UV-valun yhdistäminen. Tämä osa-alue tuotti ainutlaatuisen valmistusprosessiketjun tuotteille, joissa on aikaisemmin tarvittu useita eri valmistusprosesseja ja vaiheita (litografiaan perustuvat valmistusprosessit). Fluidistiikan valmistuksesta tehtiin työstämällä neljä erilaista koekappaletta:

- » Mikrojyrsitty fluidistiikkakeerna, josta UV-valu replikointi
- » Mikrojyrsitty sekoitinkeerna, josta ruiskuvalettu replikointi
- » Mikrojyrsitty kapillaarinen fluidistiikkakeerna, josta ruiskuvalettu replikointi ja pinnan aktivointi säteilyttämällä
- » Mikrojyrsitty ja ablaoitu fluidistiikkakeerna, josta ruiskuvalettu replikointi

Esimerkkinä fluidistiikan massavalmistuksesta hankkeessa tutkittiin menetelmää yhdistää tarkkuuskoneistus ja UV-valu polymeeristen mikrofluidististen laitteiden valmistuksessa. Timanttityöstökoneella työstettiin kemialliseen nikkeliin 50 µm mittakaavan mikrofluidistinen kanavisto- ja sekoitinrakenne. Työstetystä rakenteesta tehtiin UV-kovettuvasta polymeeristä tasopainamalla replikaatteja, joita tutkittiin SEM-kuvin (Scanning Electron Microscope) ja laserinterferometrisesti. Interferometrinen mittaustulosten perusteella saavutettiin UV-valuissa 22 nm RMS (Root Mean Square) pinnankarheuden arvo. SEM-kuvien perusteella pienten muotojen suurnopeustyöstö mikro jyrsimällä onnistui erittäin hyvin ja 50 µm halkaisijan kovametallinen jyrsinterä kesti 15 tunnin fluidistiikka rakenteen lastuamisen kemialliseen nikkeliin. Kuvassa 10 on esitetty UV-valetun fluidistiikkalaitteen yksityiskohtia.

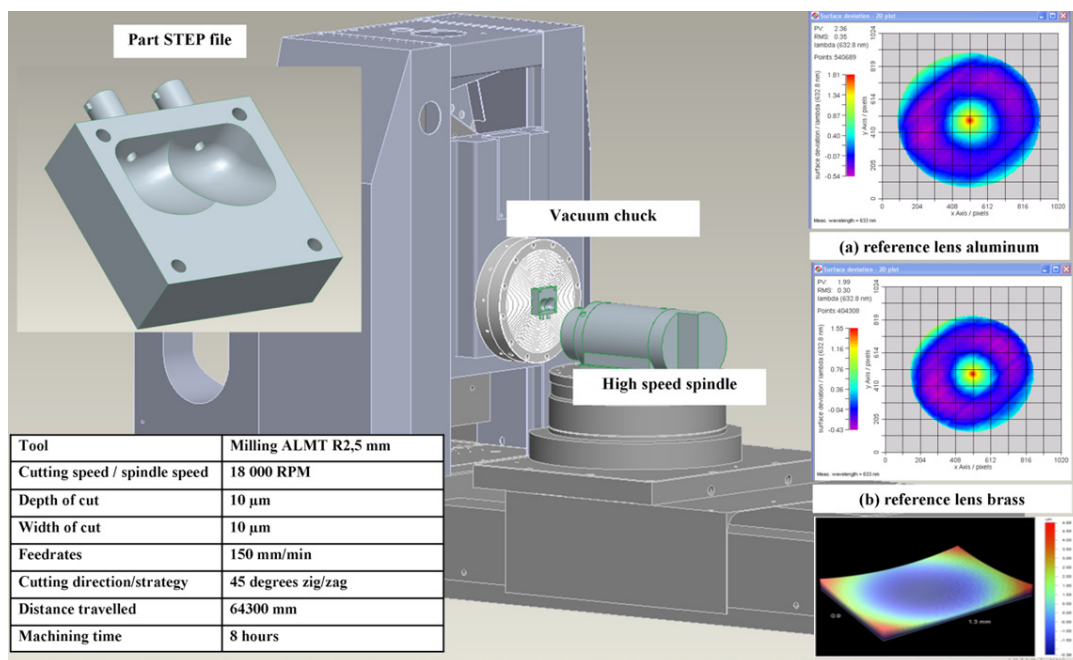
Tehtyjen kokeiden perusteella mikrofluidistiikan työsto tarjoaa lyhyemmän valmistusprosessin verrattuna litografiaan perustuviin valmistustekniikoihin. Mikrojyrsintä sopii hyvin mikrokanavistojen jyrsintään kanavistojen kokojen ollessa kymmeniä mikrometrejä. Pienimmät jyrsintyökälyt ovat halkaisijaltaan 10 µm mutta niiden kesto aika metalleja työstettäessä on jo hyvin rajallinen. Kuitenkin jyrsinterät, jotka ovat läpimitaltaan 30 µm, ovat todellisuudessa jo käyttökelpoisia ja kykenevät lastuamaan pitkiä jaksoja. Mikrotyöstön etuna on, että samaan keernaan voidaan työstää myös prisma- ja linssirakenteita, joita tarvitaan fluidististen reaktioiden mittaamisessa valon avulla. Polymeeristen mikro- ja nanofluidistiikan laitteiden toiminnallisuus edellyttää kuitenkin yleensä valetun pinnan tai muotoa antavan keernan pintarakenteen muokkaamista fs-laserablaatiolla, pinnoittamalla tai säteilyttämällä. Fluidistiikkalaitteen pintarakenne on aktivoitava jotta nesteiden virtausta pystytään hallitsemaan.



**Kuva 10.** UV-valettuja mikrofluidistiikan rakenteita.

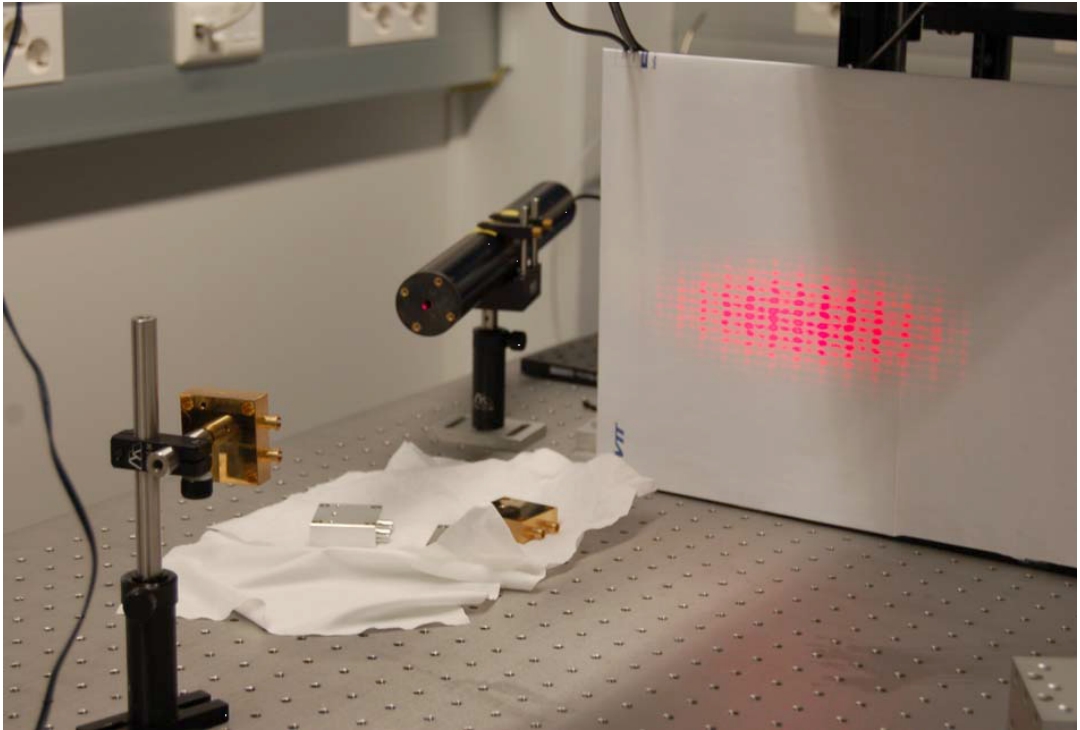
Vapaamuotoisten korkeiden muototarkkuuksien komponenttien valmistaminen alle mikrometrin muototarkkuudella edellyttää erityistä tarkkaan määriteltyä työtapaa ja prosessia. Hankkeen aikana viimeisteltiin prosessikuvaus ja toimintatapa vapaamuotoisten komponenttien työstölle ja karakterisoinnille.

Hankkeessa valmistettiin yhteistyössä VTT:n kanssa vapaamuotoisia kuituoptyisiä peilejä. Kaksi alumiinista ja messinkistä peiliä mikrotyöstettiin timanttityöstökoneella timanttiterällä ja pinnoitettiin 100 nm piidioksidipinnoitteella (ALD-pinnoitus). Peileihin työstettiin linssipintojen lisäksi referenssilinssejä työstämällä. Vapaamuotoisten peilien muotojen ja pinnakarheuden mittaaminen on hyvin vaikeaa interferometrisesti ja tämän vuoksi muotojen ja pinnankarheuden mittaaminen oli tehtävä referenssilinsseistä. Interferometrisesti on mahdollista mitata vapaamuotoisten komponenttien muoto, siten että kappaleesta mitataan valkoisen valon interferometrillä pieniä pinta-aloja, jotka sitten liitetään matemaattisesti yhdeksi kokonaiseksi pinnaksi. Menetelmä on kuitenkin erittäin työläs ja vaikea. Referenssilinsseistä mitattujen interferometrinen tulosten perusteella mikrotyöstetty pinta on valmistettu noin 1 µm muototarkkuudella ja 5 nm pinnankarheudella. Referenssilinsseistä havaittiin hyvin pientä työstöstä aiheutuvaa diffraktiojälkeä, joka heikentää komponentin toiminnallisuutta. Näistä 30-50 nm työstöjäljistä eroon pääseminen on erittäin vaikeaa ja edellyttää kappaleiden jonkin asteista jälkikäsitelyä (pinnoitus tai mekaaninen kiillotus). Kuvassa 11 on esitetty työstettyjen vapaamuotoisten peilien valmistusprosessia ja referenssilinsien mittaustuloksia ja kuvassa 12 on esitetty työstössä syntyvien hilarakenteiden vaikutusta mittalaitteen toimivuuteen. Hilarakenteet toimivat säteenjakajina hajottaen monokromaattisen valon ja heikentävät kuitupeilin toimintaa.



**Kuva 11.** Työstettyjen vapaamuotoisten peilien valmistus- ja mittaustuloksia.

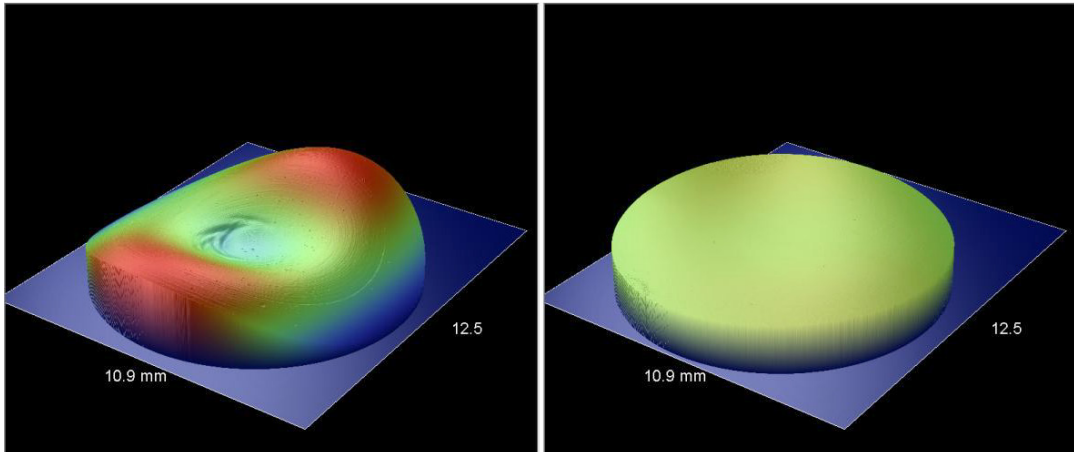




**Kuva 12.** Työstössä syntyvien hilarakenteiden vaikutus kuitupeilien toimintaan.

Optisten komponenttien ruiskuvalaminen tarkoilla toleransseilla on aikaisempien tutkimusten perusteella havaittu tarpeelliseksi tutkimuskohteeksi. Paksuseinämaisten linssien valmistamiseen ruiskuvalamalla käytetään yleensä kompressio- eli puristustekniikkaa muotissa. Lisäksi kompressiotekniikalla voidaan kontrolloida muototarkkuutta vain yhteen suuntaan. Eräissä valonjohdesovellutuksissa vaaditaan erityistä muototarkkuutta vähintään kahdessa suunnassa. Tonava-hankkeessa tutkittiin valutekniikoiden yhdistämistä valojohteiden valmistuksessa. Yhdistämistekniikkatutkimuksessa aihio, jossa on yksi tarkka pinta, valmistetaan joko ruiskuvalamalla tai koneistamalla. Tämä aihio siirretään edelleen UV-valuprosessiin, jossa kappaleeseen valetaan toinen tarkka pinta korjaamaan muotovirheet.

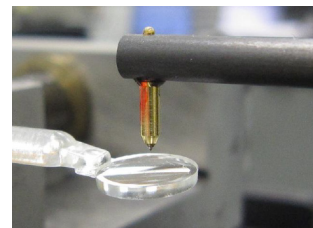
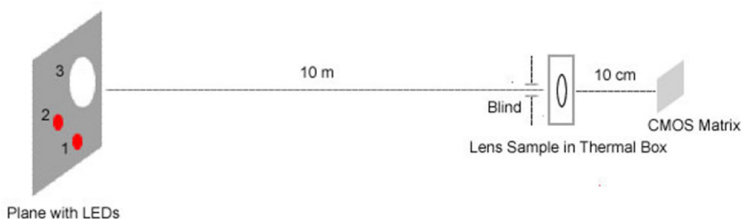
Hankkeessa tutkittiin mahdollisuutta parantaa valettujen polymeerilinssien muototarkkuutta yhdistämällä ruiskuvalu ja UV-valu. Ruiskuvalun ja UV-valun yhdistämiseksi valettiin sarja polymeerisiä linssejä (tasopinta ja linssipinta), joissa tasopinta oikaistiin UV-valulla. Ruiskuvallettujen linssien muotoa antavat alumiiniset keernat oli tehty timanttityöstämällä. UV-valu oikaisu tehtiin valamalla ruiskuvalatun tasopinnan päälle UV-kovettuvaa muovia. UV-kovettuvan muovin päälle asetettiin tasolasi, jonka läpi muovi kovetettiin UV-lampulla. Oikaistujen linssien ja oikaisemattomien linssien tasopintojen optiset ominaisuudet testattiin ja muodot mitattiin valkoisen valon interferometrillä. Kuvassa 13 on esitetty yhdistetyn ruiskuvalu- ja UV-valuprosessin tuloksia. Oikaisemalla saatiin korjattua ruiskuvallettua tasopinnan muotoa  $7 \mu\text{m}$  muotovirheestä  $0,6 \mu\text{m}$  muotovirheeseen. Lisäksi oikaistun linssin pinnankarheus  $R_q$  tippui arvosta  $50,7 \text{ nm}$  arvoon  $5,52 \text{ nm}$ .



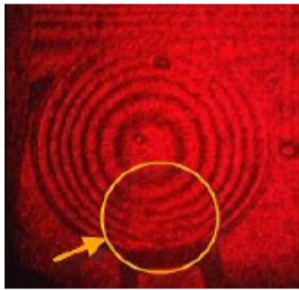
**Kuva 13.** Interferometriset mittaustulokset oikaisemattomasta ja UV-valulla oikaistusta linssistä.

Ruiskuvaletuista (ilman UV-oikaisua) linseistä tehtiin lisäksi optisia toiminnallisia mittaauksia. Kokeissa testattiin kolmen eri polymeerin (PMMA Altuglas, PMMA Diakon and COC Topas) optisten ominaisuuksien muuttumista taitekertoimen ja linssin muodon funktiona lämpötila-alueilla  $+20\text{ °C}$  -  $-25\text{ °C}$ .

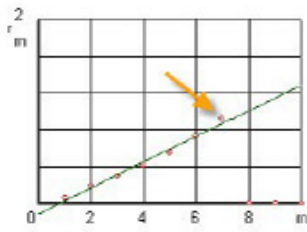
Lisäksi linseistä mitattiin muoto ja pinnalaatu optisella profiometrillä, koskettavalla kärjellä mittaavalla profiometrillä sekä valkoisen valon interferometrillä. Tulosten perusteella COC-polymeeri (Cyclic Olefin Copolymer) on stabiilein ympäristön vaihteluille mutta linssien laatuun vaikuttavat myös ruiskuvaluparametrit ja erityisesti ruiskutus piste. Ruiskuvalettujen linssien poikkeamat pallopinnasta (muodon tarkkuus) olivat valkoisen valon interferometrillä mitattuna  $1 - 2\text{ }\mu\text{m}$  luokkaa. Kuvassa 14 on esitetty koejärjestelyt ja mittausjärjestelyt (profiometriamittaus) ruiskuvaletuille linseillä ja kuvassa 15 on esitetty tuloksia ruiskutus pisteen vaikutuksesta linssin muototarkkuuteen. Saavutettu muototarkkuus ei kuitenkaan ihan vielä riitä laadukkaan kuvantavan optiikan tarpeisiin. Ruiskuvaletun muodon tarkkuutta on kuitenkin vielä mahdollista parantaa oikealla tuote- ja muottisuunnittelulla, jolloin alle mikrometrin muototarkkuus voidaan saavuttaa.



**Kuva 13.** Koejärjestely ruiskuvaletun linssipinnan toiminnallisesta optisesta mittauksesta ja profiometrisestä mittauksesta.



a)



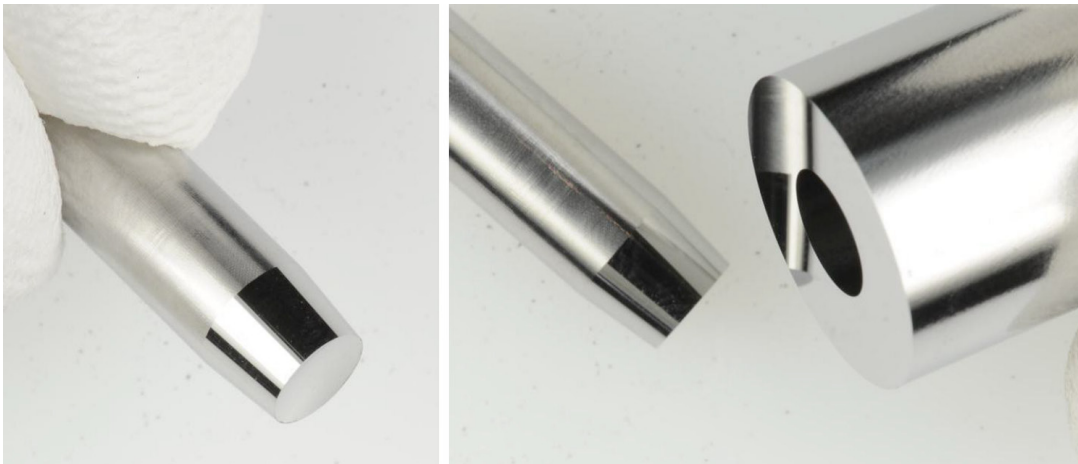
b)



c)

**Kuva 15.** Ruiskutuspisteen vaikutus ruiskuvaletun linssin muotoon.

Optisten pintoja timanttityöstöä tutkittiin hankkimalla timanttityöstökoneeseen lisälaite, joka korkeataajuisien ultra-äänivärähtelyn avulla mahdollistaa sorvaamalla valmistettujen optisten pintojen työstön teräkseen. Ultra-äänivärähtelijä poikkeuttaa timanttiterää 40 000 Hz taajuudella elliptisellä mikrometrien kokoisella liikeradalla. Koekappaleina valmistettiin kuvan 16 mukaisia tasopintoja, linssipintoja pinnankarheuksilla 4-6 nm. Lisäksi eri teräslaatujen vaikutusta timanttiterän kulumiseen testattiin koekomponentein.



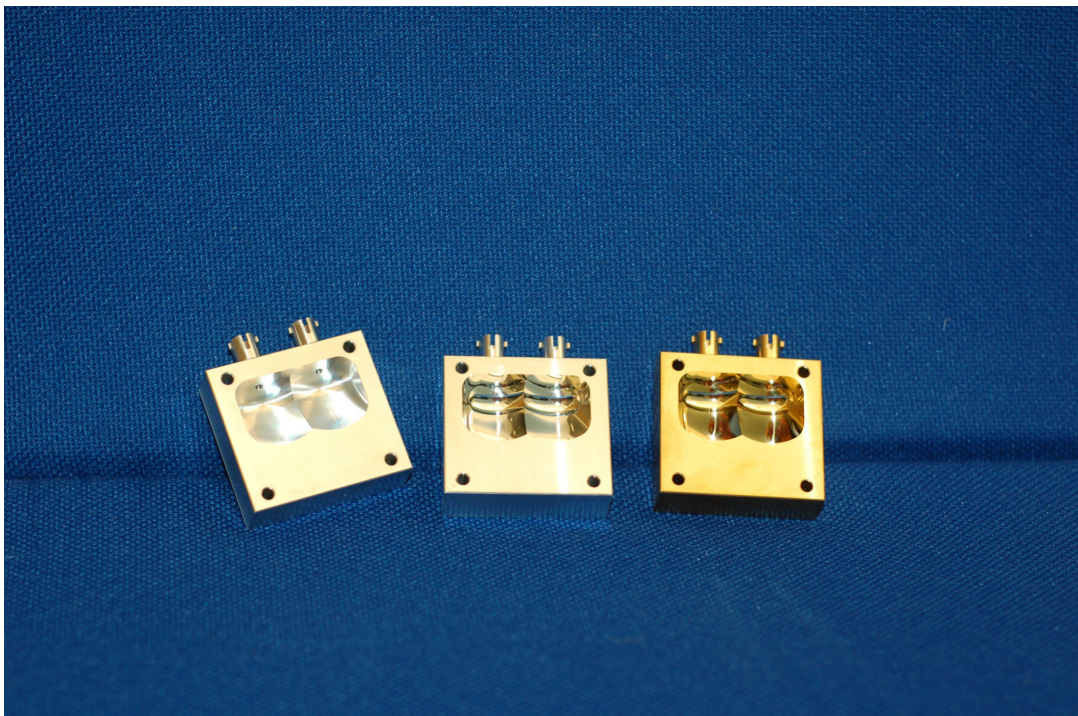
**Kuva 16.** Timantilla ultra-äänityöstettyjä teräskeernoja.

### 3.4 PINNOITTEET

Pinnoitteiden avulla voidaan muokata materiaalien ominaisuuksia hyvin monipuolisesti: pinnoitteilla voidaan lisätä kappaleiden kulutuskestävyyttä, kemiallista kestävyyttä, vähentää pintojen likaantumista ja muokata pintojen optisia ominaisuuksia. Tonava-hankkeessa selvitettiin pinnoitteiden käytön tarjoamia mahdollisuuksia sekä valmistettujen kappaleiden pinta-ominaisuuksien muokkaamista.

Hankkeen aikana selvitettiin ja mallinnettiin ohutkalvopakoilla toteutettavien heijastamattomien- ja peilipintojen rakennetta sekä valmistusta. Hankkeen aikana otettiin uutena mielenkiintoisena pinnoitusmenetelmänä käyttöön Atomic Layer Deposition -tekniikka (ALD), jolla pystytään valmistamaan tasapaksu nanometrikokoluokan pinnoite vapaamuotoisen kappaleen päälle. Tämän tekniikan tarjoamia mahdollisuuksia pinnoitteiden valmistuksessa testattiin hankkeen aikana. ALD-pinnoitukseen liittyen hankkeessa valmistettiin yhteistyössä VTT:n kanssa kuvan 17 mukaisia vapaamuotoisia kuituoptisia peilejä, joita käytetään kompakteissa spektrometreissä. Alumiinisia ja messinkisiä peilejä mikrojoysittiin timanttityöstökoneella timanttiterällä ja pinnoitettiin 100 nm paksuudelta ALD-menetelmällä piidioksidi-pinnoitteella. Pinnoitteen tarkoituksena oli parantaa peilin toimivuutta UV-VIS (Ultra Violet Visible Spectroscopy) aallonpituusalueella, parantaa peilin pinnan laatua ja suojata alumiinipeilejä kulumiselta. Lisäksi hankkeessa testattiin ja kehitettiin ruteenin ja rhodiumin ALD-pinnoitusprosesseja, joista ruteenin prosessi saatiin toimivaksi käytössä olevalla ALD-laitteella.

Osa-alueeseen liittyen mallinnettiin ja valmistettiin laajakaistaisia näkyvän alueen resonanssirefektoreita, joissa heijastus useitten kymmenien nanometriä aallonpituuskaisella on 100 % luokkaa. Reflektorit perustuvat hila- ja ohutkalvojen yhdistelmiin, joihin optimoimalla saadaan aikaiseksi halutunlainen heijastusspektri. Rakenteen valmistuksessa käytettiin mm. ALD-titaanioksidipinnoitusta.



**Kuva 17.** ALD-pinnoitettuja kuituspektrometrin vapaamuotoisia peilipintoja.



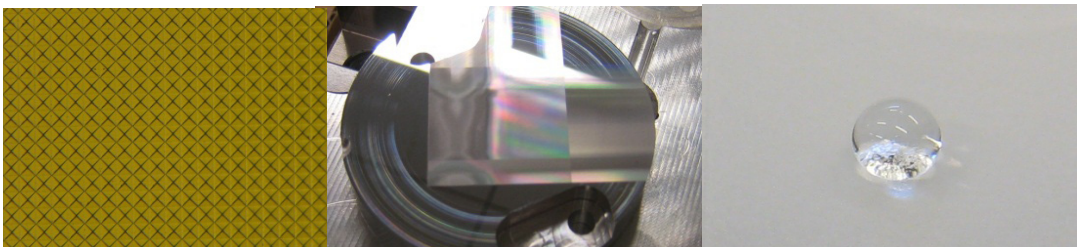
### 3.5 SOVELLUSALUEET

Kehitettäviä teknologioita sovellettiin mukana olevien yritysten tuotekehitystyössä. Hankkeessa kehitettävien teknologioiden tavoitteina oli päästä hankkeen loppuvaiheessa jo tuotesovellustasolle. Yleisempiä hankkeessa kehitettävän teknologian sovellusalueita olivat peilipinnat optisissa sovelluksissa, pintarakenteiden vaikutukset nestevirtausten kontrolloinnissa fluidistiikkasovelluksissa, pintojen ominaisuuksien kontrollointi mikro- ja nanorakenteiden avulla ja heijastamattomat pinnat. *Aurinkoenergiesovelluksissa* kennojen valonkeräystehoa voidaan kasvattaa huomattavasti mikrolinssimatriisien avulla. Linsit voivat olla tyypiltään joko taittavia linsejä tai sitten diffraktiivisiä linsejä. Molempia linsityyppejä voidaan valmistaa nanotyöstön avulla. Hankkeessa kehitetty valmistusketju mahdollistaa laajalla aallonpituuskaistalla ja suurella numeerisella apertuurilla toimivien mikrolinssien ja näistä linseistä muodostettujen linssimatriisien masterelementtien valmistuksen ja linssimatriisien kopioinnin joko UV-valulla rullalta rullalle tekniikalla tai ruiskuvalulla.

Kirjallisuuden mukaan pintojen kitkaominaisuuksia voidaan muokata mikro- ja nanorakenteiden avulla. Tonava-hankkeessa kehitetyt työstötekniikat mahdollistavat mikro- ja nanorakenteiden käytön muovi- ja koneteknisissä laitteissa pintojen kitkaominaisuuksien muokkaamiseksi.

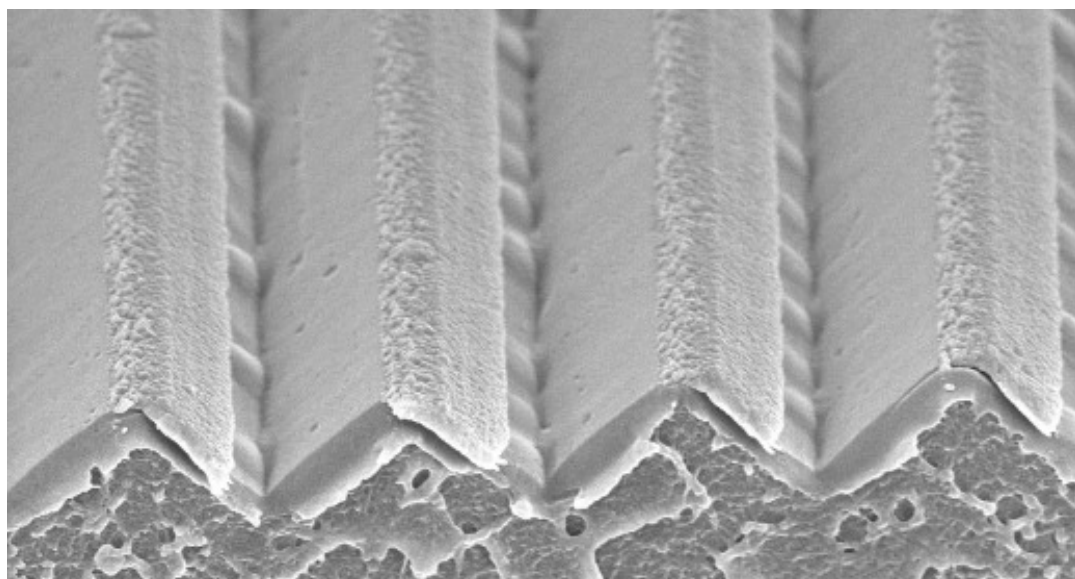
Kaikissa sovellusalueissa pyrittiin toteuttamaan tuotedemoja mukana olevien yritysten tarpeiden mukaisesti. Seuraavassa on listattuna muutamia toiminnallisten rakenteiden sovellusesimerkkejä jo aikaisemmin raportissa mainittujen lisäksi:

*Hydrofobisten rakenteiden työstöä* ja ruiskuvalua testattiin valmistamalla alumiininen koemuotti, jonka muotoa antavaan optisen laadun alumiinin keernan nikkeli pinnoitukseen työstettiin höyläämällä 90 asteen kärkikulman timanttierällä  $4 \times 4 \mu\text{m}$  (sivujen mitat) pyramidirakenteita  $6 \mu\text{m}$  periodilla. Työstetystä alueesta ruiskuvalettiin HDPE (High Density Polyethylene) muoviin koekappaleita, joiden päälle tiputettiin vesipisaroita veden ja kappaleen pinnan välisen kontaktikulman muutoksen mittaamista varten. Kuvassa 18 on esitetty hydrofobisia työstettyjä pyramidi rakenteita keernassa (a), työstetty keerna (b) ja vesipisaran pallomainen muoto HDPE valussa (c). Työstetyllä ja valetulla rakenteella saatiin muutettua muovin ja veden välistä kontaktikulmaa arvosta  $101 \pm 5$  astetta arvoon  $155 \pm 3$  astetta HDPE muovilla.



**Kuva 17.** Pyramidi rakenteita keernassa (a), työstetty keerna (b) ja vesipisaran pallomainen muoto.

Esimerkkinä toiminnallisen rakenteen tuotantoketjusta hankkeessa valmistettiin polymeerinen tuotantokustannuksiltaan halpa ja ominaisuuksiltaan laadukas *terahertsi-alueen wire-grid-polarisaattori*, jonka sovellusalueita ovat terahertsi-alueen kuvantamis- ja spektroskopiasovellukset. Polarisaattorin valmistusketju koostui polarisaattorin suunnittelusta, mallintamisesta, kolmionhilarakenteen valmistamisesta timanttityöstöllä ja rakenteen kopioinnista kahteen muovilaatuun kuumapainomenetelmän avulla. Tämän jälkeen rakenteen pinnalle valmistettiin varsinainen wire-grid -polarisaattori höyrystämällä pinnalle alumiinia vinossa kulmassa, siten että pinnoitetta kuvan 19 mukaisesti kertyi pääosin kolmiorakenteen toiselle sivulle (vasen sivu ao. kuvassa). Lisäksi sekä timanttityöstetty muotti, että muovikopioiden pintaprofiilit karakterisoitiin ja komponenttien toiminta testattiin FTIR-spektrometrin (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) avulla.

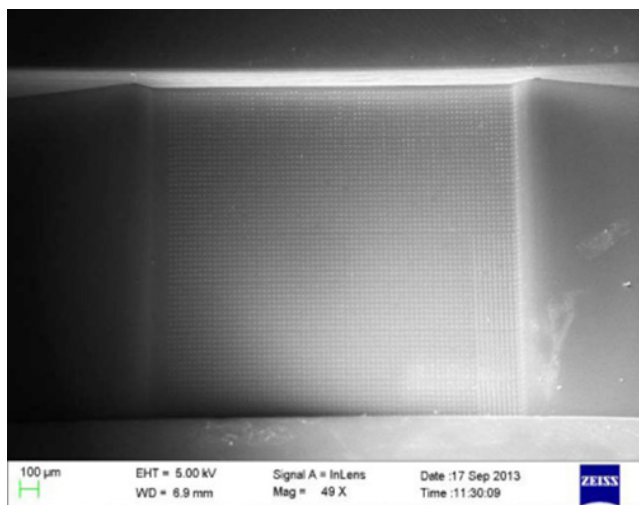


**Kuva 18.** Terahertsialueen wire-grid-polarisaattorin profilia.

*Fluidistiikkasovelluksissa* nesteiden käyttäytymistä mikrokanavissa voidaan hallita kanavien pintaan valmistettävien mikro- ja nanorakenteiden avulla. Hydrofobisilla pinnoilla nesteet saadaan virtaamaan lisäämällä kanaviin mikro- ja nanorakenteita. Toisaalta neste voidaan pysäyttää sekä levittää ohueksi kalvoksi analyysiä varten hydrofiilisellä pinnalla. Tällaisilla kanavarakenteilla on runsaasti sovelluksia esim. lääketieteellisessä analytiikassa. Hankkeessa selvitettiin millaisia toimintoja fluidistiikassa voitaisiin toteuttaa kanavien mikro- ja nanorakenteiden avulla, sekä testattiin joitakin rakenteita konkreettisissa sovelluksissa. Analyysilaitteet ovat tyypillisesti kertakäyttöisiä, joten hankkeessa selvitettiin myös fluidistiikkarakentiedien massavalmistusmahdollisuuksia.

Fluidistiikkasovellus esimerkkinä hankkeessa toteutettiin fluidistiikkainserttien valmistus yhteistyönä Tampereen teknillisen yliopiston kanssa. Inserttien kanavamuoitit valmistettiin ensin mikrotyöstöllä ja sen jälkeen muotteihin lisättiin fs-laserablaation avulla mikroreaktorikammiorakenteita ja mikroventtiilejä nesteiden virtausta kontrolloimaan. Tämän jälkeen muottien rakenteitten työstön onnistumista testattiin karakterisoimalla muottien

profileja ja inserteistä valmistettiin ruiskuvalulla toiminnalliset fluidistiikkarakenteet muoviiin. Kuva 20 esittää SEM-kuvaa ruiskuvaletusta fs-työstöllä tehdystä reaktiokammista.



**Kuva 20.** SEM-kuva ruiskuvaletun insertin fs-työstetystä reaktoriokammista.

Työstökettjun toimivuutta arvioitaessa todettiin, että fluidistiikkamuotin Karelia-amk:n mikrotyöstö – UEF:n fs-laserablaatio-valmistuskettjun osa onnistui hyvin, mutta toisaalta rakenteen toimivuutta ei päästy täysin testaamaan, koska yhteistyökumppanin inserttien ruiskuvalussa fluidistiikkakanavistojen ”korkeat” fs-ablatoidut rakenteet eivät kopioituneet kunnolla.

## 4 Tulosten hyödyntäminen

**H**ankeen tulokset laajensivat Nanocomp Oy:n valmistusketjua mahdollistaen 3-ulotteisten optisia pintoja sisältävien tuotteiden valmistuksen. Hankkeessa kehitetty hybriditeknologia (UV-valun ja ruiskuvalun yhdistäminen) mahdollistaa uusien haasteellisten tuotteiden valmistamiseen. Kehitetty valmistusketju yksinkertaistaa ja parantaa Nanocomp Oy:n tuotantoprosessia. Tulevaisuudessa Nanocomp Oy voi hyödyntää paremmin kaarevia pintoja tuotteissaan. Lisäksi kehitetyn teknologian myötä tuotteiden integroitavuus parantui merkittävästi.

Medisize Oy:lle hankeen tulokset mahdollistavat toiminnallisia mikrokanavia sisältävien tuotteiden valmistuksen. Lisäksi tuloksena suunnitelluilla ja valmistetuilla nanorakenteilla sekä pinnoitteilla voidaan parantaa esimerkiksi ruiskuvalumuottien toimivuutta massatuotannossa.

Gasmet Technologies Oy:n optisten peilien ja mittalaitteiden valmistustekninen osaaminen lisääntyi merkittävästi. Erityisesti hankkeessa tutkittujen uusien materiaalien nanotyöstön ja pinnoituksen kautta yritys voi saavuttaa merkittävän etulyöntiaseman kilpailijoihinsa verrattuna tulevaisuudessa.

Hanke laajensi Oplatek Group Oy:n osaamista muotin valmistuksessa lasin puristus-tekniikkaan liittyen. Sovelluskohteena on mikrorakenteiden liittäminen optisiin lasituotteisiin. Tämä kehitetty teknologia mahdollistaa uusia sovelluskohteita. Lisäksi hankkeen pinnoitustutkimus mahdollistaa uuden tyyppisten pinnoitteiden käyttämisen.

Thermo Fisher Scientific Oy:lle hanke on tuonut arvokasta lisätietoa nanotyöstön soveltamisesta muottien valmistukseen. Nanotyöstö soveltuu hyvin tasomaisten muottipintojen kuviointiin. Sen sijaan pitkän ja ohuen geometrian omaavien keernojen työstössä ei hankkeessa saavutettu merkittävää etua.

Hankkeessa julkaistiin kolmetoista artikkelia tieteellisesti korkeatasoisissa, vertaisarvioitujen lehdissä, sekä tehtiin kaksi opinnäytetyötä.



Hankkeen aikana osallistuttiin aktiivisesti kansainvälisen EUSPEN-verkoston toimintaan. Karelia-amk:n tunnettavuus EUSPEN-verkostossa lisääntyi merkittävästi. Erikoistutkija Juha Väyrysen julkaisu ja esitelmä valittiin EUSPEN Berliinin konferenssin vuoden 2013 merkittävimpien julkaisujen kokoelmaan (EUSPEN Selected Papers) sekä vastuullinen johtaja Kari Mönkkönen nimitettiin EUSPEN tieteellisen komitean jäseneksi.

## 5 Julkaisut

A. Partanen, J. Väyrynen, S. Hassinen, H. Tuovinen, J. Mutanen, T. Itkonen, P. Silfsten, P. Pääkkönen, M. Kuittinen, and K. Mönkkönen, "Fabrication of Terahertz Wire-grid Polarizer by Direct Machining", Proceedings: The Japan Society of Applied Physics: 17th Microoptics Conference (MOC'11), Sendai, Japan, Oct. 30 - Nov. 2, 2011. 2011.

A. Partanen, J. Väyrynen, S. Hassinen, H. Tuovinen, J. Mutanen, T. Itkonen, P. Silfsten, P. Pääkkönen, M. Kuittinen, K. Mönkkönen, and T. Venäläinen, "Fabrication of Terahertz Wire-Grid Polarizers." Proc. of 8th EOS Topical Meeting on Diffractive Optics 2012. 2012.

R.R. Ismagilov, A.A Zolotukhin, J. Mutanen, and A. Obraztsov, "Diamond and Graphite Nano-needle Probes and Tools", New Diamond and Nano Carbons Conference, Costa Rica, 2012.

J. Mutanen, S. Kivi, J. Väyrynen, M. Toiviainen, A. Partanen, J. Laukkanen, V. Prokofiev, P. Pääkkönen, M. Juuti, M. Kuittinen, and K. Mönkkönen, "Manufacturing of Freeform Mirror by Milling and Enhancing its UV/VIS Characteristics by ALD SiO<sub>2</sub> Coating", Proceedings of EOS Annual Meeting (EOSAM 2012), 25-28 September 2012, Scotland, UK. 2012.

J. Mutanen, J. Väyrynen, S. Siitonen, A. Kauppila, A. Partanen, P. Pääkkönen, H. Tuovinen, T. Itkonen, M. Kuittinen, J. Niemi, and K. Mönkkönen, "Combining UV-replication techniques with injection moulded polymer optics", Proceedings of the 12th international conference of the European society for precision engineering and nanotechnology Vol1-2. 2012.

J. Mutanen, J. Väyrynen, S. Kivi, M. Toiviainen, J. Laukkanen, P. Pääkkönen, T. Itkonen, A. Partanen, M. Juuti, M. Kuittinen, K. Mönkkönen, "Manufacturing of Freeform Mirror by Milling and Altering its Optical Characteristics by ALD SiO<sub>2</sub> Coating" Proceedings of the 13th Euspen International Conference-Berlin-May 2013. 2013.

T. Saastamoinen, J. Väyrynen, A. Partanen, H. Tuovinen, J. Mutanen, K. Mönkkönen, and M. Kuittinen, "Design, fabrication, and characterization of hybrid structure", Technical digest of the eighteenth micro-optics conference. (MOC'13), Japan, 2013.

A. Partanen, J. Väyrynen, S. Hassinen, H. Tuovinen, J. Mutanen, T. Itkonen, P. Silfsten, P. Pääkkönen, M. Kuittinen, K. Mönkkönen, and T. Venäläinen, "Fabrication of terahertz wire-grid polarizers.", *Appl. Opt.* 51:35, 2012, 8360-8365.

T. Saastamoinen, M. Korhonen, and M. Kuittinen, "Wide-band resonance reflectors for the visible spectrum", *Adv. Opt. Techn.*, Vol 1 (2012) pp. 181-185.

T. Saastamoinen, J. Väyrynen, J. Mutanen, H. Tuovinen, A. Partanen, K. Mönkkönen, and M. Kuittinen, "Fabrication of hybrid optical line generator by direct machining", to be submitted to *Optics Express*.

M. Kuittinen, ja J. Mutanen, "CVD:llä valmistettujen nanotimanttineulojen kiinnitysmekanismi tarkkuustimanttityöstökoneita varten", Itä-Suomen yliopisto, keksintöilmoitus (2012).

M. Kuittinen, J. Mutanen, ja V. Prokofiev, "Piikarbidikampaterä hilarakenteiden nano/mikrotyöstöä varten", Itä-Suomen yliopisto, keksintöilmoitus (2012).

M. Kuittinen, J. Mutanen, ja H. Tuovinen, "Lähestymis- ja monitorointianturi tarkkuustimanttityöstökoneen nano- ja mikrotyöstöä varten", Itä-Suomen yliopisto, keksintöilmoitus (2012).

J. Väyrynen, K. Mönkkönen "A novel method for producing a polymer microfluidic device" *Proc. EUSPEN, Laser Metrology and Machine Performance X (LAMDMAP 2013)*, March (2013), Chicheley, United Kingdom.

K. Mönkkönen, J. Väyrynen, D.D. Karov, and A. Sh. Tukhvatulin, "Manufacturing and Investigation of Precision Optics" *Proc. EUSPEN, 12th International Conference*, June (2012), Stockholm, Sweden. ISBN 13: 9780956679000.

J. Väyrynen, K. Mönkkönen, and J. Niemi, "Practical Shrinkage Compensation method for Injection Molded LED Optics" *Proc. EUSPEN, 12th International Conference*, June (2012), Stockholm, Sweden. ISBN 13: 9780956679000.

Fotoniikan ja tarkkuusteknologioiden osaaminen on noussut yhdeksi Pohjois-Karjalan tärkeimmistä kehittämisen kohteista. Määrätietoinen vuosikymmeniä sitten aloitettu panostaminen on tehnyt Joensuun seudusta Suomen johtavan ja kansainvälisesti arvostetun fotoniikan sekä materiaali- ja tarkkuusteknologioiden osaamiskeskittymän. Toiminnalliset mikro- ja nanorakenteet (Tonava) -hanke toteutettiin yhteistyössä alueellisten yritysten, Joensuun Tiedepuisto Oy:n, Karelia-ammattikorkeakoulun sekä Itä-Suomen yliopiston kesken. Hankkeen tavoitteina olivat sovelluslähtöiset tutkimukset toiminnallisten rakenteiden suunnittelumenetelmissä, simulaatioissa ja valmistuksessa. Hankkeen tavoitteena oli myös saada aikaan liike-elämää hyödyntävää palvelutoimintaa, sekä tuottaa uutta tietoa korkealaatuisina opinäytteinä ja tieteellisinä julkaisuina. Hankkeen loppuvaiheessa saavutettiin tavoitteena ollut tuotesovellustaso toiminnallisten rakenteiden valmistusketjussa. Tässä raportissa kuvataan hankkeen aikana tehtyä tutkimus- ja kehitystyötä sekä hankkeen tuloksia.

## KARELIA-AMMATTIKORKEAKOULUN JULKAISUJA C:16

ISBN 978-952-275-119-5 | ISSN 2323-6914