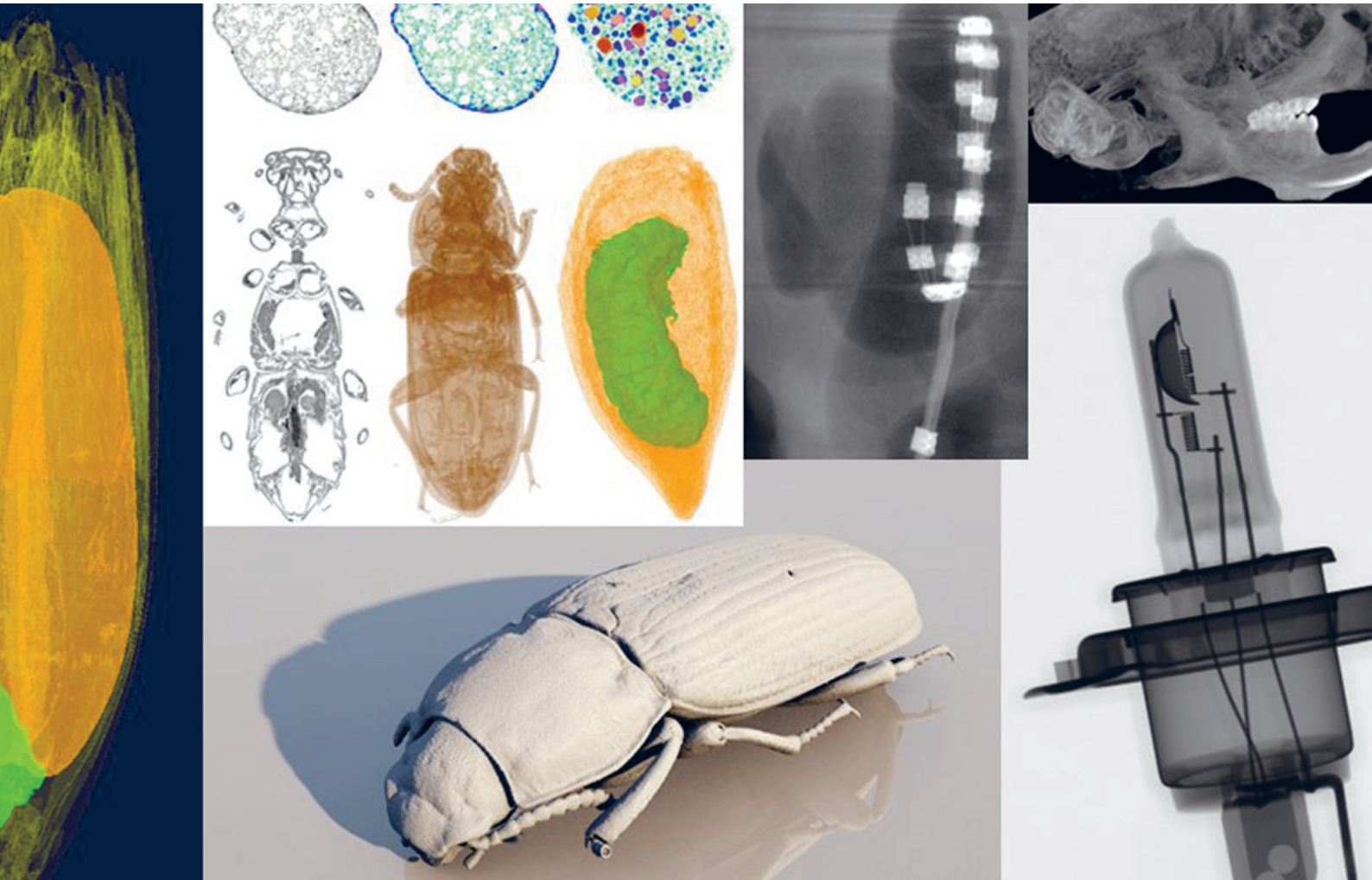


# TOMOLAB

Röntgentomografialaboratorion kehittäminen alueen uudistuvan TKIO-toiminnan tueksi — Hankkeen loppuraportti



**SAVONIA**

ammattikorkeakoulu

**5/2022**

**TEKNIIKAN ALA**

TOIMITTANEET: Tuomo Silvast ja Laura Tomppo

## SAVONIA-AMMATTIKORKEAKOULUN JULKAISUSARJA 5/2022

COPYRIGHT © TEKIJÄT JA  
SAVONIA-AMMATTIKORKEAKOULU



Teksti, kuvat ja taulukot  
CC BY-SA 4.0 poislukien kuvat ellei  
toisin alla mainittu

**KANNEN KUVA**  
Tuomo Silvast

**JULKAISIJA**  
Savonia-ammattikorkeakoulu  
Julkaisutoiminta  
PL 6 70201 KUOPIO  
julkaisut@savonia.fi

**ULKOASU JA TAITTO**  
Tapio Aalto

ISBN 978-952-203-305-5 (verkkojulkaisu)  
ISSN 2343-5496

# **TOMOLAB**

**Röntgentomografialaboratorion kehittäminen alueen  
uudistuvan TKIO-toiminnan tueksi  
— Hankkeen loppuraportti**

**TOIMITTANEET:** Tuomo Silvast ja Laura Tomppo



Vipuvoimaa  
EU:lta  
2014–2020

Pohjois-Savon liitto tukee  
maakunnan  
menestystä



UNIVERSITY OF  
EASTERN FINLAND

SIBabs  
SCIENCE – INNOVATION – BUSINESS



ABLOY



*pharmatest*



# HANKKEEN TOTEUTTAJAORGANISAATIOT JA JULKAISUN KIRJOITTAJAT

## **Itä-Suomen yliopisto**

Jiri Jäntti, väitöskirjatutkija  
Arto Koistinen, tutkimusinfrastruktuurijohtaja  
Petri Paakkari, nuorempi tutkija  
Tuomo Silvast, tutkijatohtori  
Teemu Tuomainen, nuorempi tutkija

## **Luonnonvarakeskus**

Veli Hietaniemi, erikoistutkija  
Lea Hiltunen, erikoistutkija  
Katri Himanen, erikoistutkija  
Marja Jalli, erikoistutkija  
Jouni Karhu, erityisasiantuntija  
Juha-Matti Pihlava, erikoistutkija  
Anna-Liisa Välimaa, erikoistutkija

## **Savonia-ammattikorkeakoulu**

Antti Alonen, tki-asiantuntija  
Lauri Alonen, projekti-insinööri  
Ari Tanskanen, tutkimusinsinööri

## **Savon ammattiopisto**

Hannu Miettinen, hankepäällikkö  
Miika Räsänen, kouluttaja  
Jukka Saastamoinen, opettaja

## **Kuopion yliopistollinen sairaala**

Matti Iso-Mustajärvi, erikoislääkäri

## SISÄLLYSLUETTELO

- 7 Tiivistelmä
- 7 Summary
- 8 Hankkeen tausta
- 8 Tomolab-hankepari
- 8 Hankesuunnitelma
- 8 Hankkeen toiminta
- 9 Investoinnin valmistelut
- 9 Röntgentomografialaboratorio
- 9 Nikon XTH 225 käyttöönotto
- 9 Ohjelmistot
- 11 Tarvikkeet
- 11 Ohjeet
- 11 Viestintä
- 13 Materiaalia julkaisuihin ja opinnäytteisiin
- 13 Tavoitteiden toteutuminen
- 13 Pilotointikuvaukset
- 14 Analysointivalmiudet
- 15 Kehitettävää
- 15 Jatkotoimet
- 16 Nikon XTH 225 lyhyt käyttöohje
- 18 Työpaketin Biologiset kohteet pilottikuvauksia
- 18 Kauran lajiketunnistus  $\mu$ CT-kuvantamisella
- 19 Perunan juurien 3D-kuvantaminen sekä kuorirokkotaudin aiheuttamat muutokset juurissa
- 20 Ohran jyvien 3D-kuvantaminen sekä punahomeen vaikutukset ohran jyvien itämisprosessissa
- 21 Sisäkorvaimplantit
- 22 Nivelrusto (hevonen)
- 23 Nivelrusto (nauta)
- 24 Nivelrusto (humaani)
- 25 MikroCT-säteilyannoksen vaikutus männynsiementen itävyyteen
- 26 Jauhopukki
- 27 Visakoivu
- 28 Hammaspaikkavälien tarkkuus
- 29 Työpaketin Komposiittimateriaalit ja 3D-tulostus pilottikuvauksia
- 29 3D-tulosteiden tulostusvauriot, metallituloste
- 30 3D-tulosteiden tulostusvauriot, muovituloste
- 31 3D-tulosteiden sisäkanavat
- 32 Pintamallista 3D-tulosteeksi
- 33 Kiviekko
- 34 Yrityskohde: Komposiittilautojen kuituanalyysi
- 35 Työpaketin Metallikappaleet pilottikuvauksia
- 35 Hitsausvirheet
- 36 Yrityskohde: Metallikappaleen huokoisuus
- 37 Tiedotusmateriaalia

## Tiivistelmä

Röntgentomografiaa käytetään erilaisten materiaalien, eliöiden ja kappaleiden rakenteen ainetta rikkomattomaan kuvantamiseen kolmiulotteisesti. Röntgentomografia tukee monia Pohjois-Savon toimijoille tärkeitä aloja. Mm. biologisten ja biolääketieteellisten materiaalien ja farmasian tutkimuksissa röntgentomografia voi olla korvaamaton kuvantamistapa. Lisäksi röntgentomografiaa voidaan hyödyntää esimerkiksi materiaalitieteen, geologian, eläinten ja kasvien rakenteen tutkimuksessa, elektroniikan vaurioiden ja elintarvikkeiden kuvantamisessa, 3D-tulostuksessa sekä virtuaali- ja lisätyn todellisuuden ratkaisuisissa.

Röntgentomografiakuvia analysoimalla voidaan laskea 2- tai 3-ulotteisesti mm. rakenneosien tai vaurioiden tilavuuksia, pinta-aloja, suuntautuneisuutta ja kokojakaumaa. Laitteistojen kuvantamistarkkuus ja -herkkyys sekä tekniikka on kehittynyt, mikä mahdollistaa esimerkiksi aiemmin huonosti erotettujen kohteiden selkeämmän visualisoinnin ja suurempien kappaleiden tarkan kuvantamisen. Kuvantamalla muodostettuja 3D-malleja voidaan hyödyntää myös opetustarkoituksissa virtuaali- ja lisättyä todellisuutta käyttäen, tai erittäin nopeasti kehittyvällä 3D-tulostuksen alalla teollisuudessa.

Tässä hankekokonaisuudessa toteutettiin rinnakkaisten laiteinvestointi- ja kehittämishankkeiden toimenpiteet: laitteistojen kilpailutus, vertailu, käyttöönotto, pilotointi ja koulutus. Hankekokonaisuuden avulla kehitettiin Itä-Suomen yliopiston tutkimus-, kehitys- ja opetusympäristöä ja vahvistettiin Kuopion Savilahteen keskittävää kokonaisuutta monipuolisen ja korkealaatuisen kuvantamisen, tuotteiden laadunvarmistuksen ja tuotekehityksen toteuttajana erityisesti terveystieteitä, luonnontieteitä ja tekniikkaa sekä niihin liittyvää yritystoimintaa hyödyttäen. Hankkeen aikana kuvannettiin lukuisia määriä erityyppisiä pilottinäytteitä yhdessä osatoteuttajien ja alueellisten yritysten kanssa. Näiden pilotointien avulla teknologian tarjoamat kuvantamis- ja analysointimahdollisuudet ja toisaalta rajoitteet ovat tulleet tutuiksi sidosryhmille. Hankekokonaisuuden ansiosta korkealaatuinen röntgentomografia on alueellisesti käytettävissä tukena niin koulutuksen eri tasoilla, TKI-toiminnassa kuin yritysten laadunvarmistuksessa ja kehitystyössäkin.

Raportin lopussa esitellään joitakin tämän hankkeen pilottitutkimuksia.

## Summary

X-ray tomography is employed in nondestructive imaging of the structure of different materials, organisms and samples. X-ray tomography supports many fields of operation in North-Savo. Such as investigation of biological and biomedical materials and pharmacological investigations may find X-ray tomography as an invaluable source of information. In addition, X-ray tomography can be used for example in material science, geology, morphological and anatomical investigation of animals and plants, and imaging of damages of small electronic devices, 3D imaging of food, virtual- and augmented reality solutions, and in 3D-printing failure analysis.

By analysing X-ray tomographic slice images one can calculate many quantities including volumes, surface areas, orientation, and size distribution of structures or fissures and cracks in 2D or 3D. Improvements in imaging precision, imaging sensitivity, and engineering of the instrumentation enables visualization of the samples that were earlier almost impossible due to low contrast or the size of the sample. 3D models can be leveraged tremendously in teaching applying virtual- and augmented reality or in 3D-printing industry.

The main aim of this project was to carry out the developmental work related to the adjacent investment project. That is, facilitate the procurement process and perform pilot studies and user training. Strategic aims of the consortium were to develop the infrastructure and know-how for research, development and education in the University of Eastern Finland, and strengthen the entire research ecosystem related to high-level imaging for health science and science located in Savilahti, Kuopio city.

Some of the pilot studies are shortly shown at the end of this report.

## Hankkeen tausta

Röntgentomografia on ainetta rikkomatonta kuvantamista, jolla voidaan tutkia monenlaisia kappaleita ja eliöitä. Tarkasteltava biomateriaali voi olla esimerkiksi kasvin osa, puutuote, kudospala, eläimen tai ihmisen luuta sisältävä kappale, hyönteinen, hammas tai muu pieni eläimen osa. Materiaalitutkimuksessa kohteena voi olla mm. komposiittituote, hitsausliitos, metallinen tai muovinen 3D-tuloste. Myös lääketabletteja, sedimenttinäytteitä, kiviä tai pienelektroonikkaa voidaan tutkia.

Laajoista sovellusmahdollisuuksista johtuen röntgentomografia voi tukea monia yrityksiä ja hanketta valmistellessa kartoitettiinkin laite- ja osaamistarpeita. Lähes sadan paikallisen yrityksen ja yhteisön piirissä tehdyn kartoituksen pohjalta todettiin, että Pohjois-Savon alueella on paljon toimijoita, jotka voisivat hyötyä tämän tyyppisestä palvelusta.

## Hankesuunnitelma

Tomolab eli Röntgentomografialaboratorion kehittäminen alueen uudistuvan TKIO-toiminnan (Tutkimus – Kehitys – Innovaatiot – Opetus) tueksi -hanke toteutettiin hankeparina vuosina 2019-2022. Itä-Suomen yliopiston investointihankkeessa toteutettiin laitehankinta. Jotta investointi saataisiin alueella tehokkaaseen käyttöön, toteutettiin kehittämishanke usean toteuttajan yhteishankkeena. Kehittämishankkeessa jalostettiin laite- ja analysointiosaamista alueen toimijoiden tarpeisiin vastaavaksi tutkimuspalveluksi.

Hanke kytkeytyy alueella laajemmin käynnissä olevaan kone- ja materiaali teknologian kehittämiseen. Muita kokonaisuuteen kuuluvia hankkeita olivat mm. Savonian koordinoima 3D-tulostuslaboratorion investointi ja kehittäminen, sekä Itä-Suomen yliopiston koordinoima Materiaalianalyysin, käytönaikaisen kunnon seurannan ja tekoälyn hyödyntäminen teollisessa kiertotaloudessa. Näissä hankkeissa oli alueen korkeakoulujen lisäksi toteuttajina mm. Kuopion yliopistollinen sairaala, Savon koulutuskuntayhtymä ja Ylä-Savon koulutuskuntayhtymä.

Röntgentomografia ja Tomolab tukevat myös muita maakunnan kehittämiskokonaisuuksia ja innovaatiokärkiä. Röntgentomografiaa voidaan hyödyntää mm. hyvinvointiteknologian, koneteollisuuden ja puunjalostuksen sekä digitaalisen tekniikan kehittämisessä. Jo aiemmin menetelmää on hyödynnetty mm. tuki- ja liikuntaelinsairauksien tutkimuksessa. Esimerkiksi Sovelletun fysiikan laitoksella rusto-luu -tutkimusta on tehty röntgentomografisesti kontrastiaineilla jo vuodesta 2006 lähtien. Kansallisella tasolla on vuonna 2017 perustettu FinTomo-verkosto, jonka yhteistyöllä pyritään jakamaan osaamista tomografiatoimijoiden kesken ja välttämään päällekkäisyyksiä laitekannassa.

Hankkeen toiminnan tärkeimmiksi sidosryhmiksi tunnistettiin kappaleiden rakenteesta tietoa tarvitsevat organisaatiot, yritykset ja asiantuntijat. Esimerkiksi Itä-Suomen yliopistossa Sovelletun fysiikan laitos, Ympäristö- ja biotieteiden laitos, Lääketieteen laitos, Farmasian laitos, A.I. Virtanen -instituutti, SIB Labs sekä Metsätieteiden osasto. Hankkeen osatoteuttajien lisäksi mm. Kuopion yliopistollinen sairaala (KYS), Geologian tutkimuskeskus (GTK) ja alueen monet yritykset voivat hyödyntää tämän hankkeen tuloksena syntyvää osaamista. Alueen korkeakoulut ja ammattopistot opiskelijoineen voivat hyödyntää laitteistoa ja menetelmien sovelluksia opetuksessaan sekä oppinäytetöissään.

## Tomolab-hankepari

### Investointihanke 1.5.2019-30.4.2021

Päätoteuttaja: Itä-Suomen yliopisto (UEF)

Päärahoittaja: Pohjois-Savon liitto, Euroopan aluekehitysrahoitus (EAKR), A74800

Osarahoittaja: Pohjois-Savon sairaanhoitopiirin kuntayhtymä

### Kehittämishanke 1.5.2019-30.4.2022

Päätoteuttaja: Itä-Suomen yliopisto (UEF)

Päärahoittaja: Pohjois-Savon liitto, Euroopan aluekehitysrahoitus (EAKR), A74798

Osatoteuttajat:

- Luonnonvarakeskus (Luke),
- Savonia ammattikorkeakoulu Oy (Savonia)
- Savon koulutuskuntayhtymä (Sakky)

Osarahoittajat:

- Abloy Oy
- Lunawood Oy
- Pharmatest Services Oy
- Rayo 3D-Toothfill Oy

## Hankkeen toiminta

Hankkeen sisältö ja toimenpiteet jaettiin kolmeen osaan:

- 1) investoinnin valmistelut,
- 2) käyttöönotto ja pilottiprojektit,
- 3) toimintaohjeet, osaamisen siirto ja tuotteistaminen.

Investointihanke sisälsi ainoastaan laitehankinnan investointiosuuden. Kaikki investointiin liittyvät käytännön työt toteutettiin kehittämishankkeessa. Hankkeen kuluessa tarkennettiin suunnitelmaan sisällyneitä tarpeita, kohderyhmien analyysitarpeita ja hankittiin tarvittavia ohjelmiston lisäosia, tarvikkeita sekä kalibrointikappaleita.

Edelleen kehityshankkeessa toteutetut pilottiprojektit jaoteltiin kolmeen työpakettiin:

- **Biologiset ja biolääketieteelliset tutkimuskohteet** -työpaketissa paneuduttiin eläin- ja ihmiskudosten, sekä kasvien rakenteen kuvantamiseen. Kuvauskohteita olivat mm. nivelrusto, luu, sisäkorvaimplantit, hampaat ja hammaspaikat, viljanjyvät, mählyn siemenet ja perunan juuristo.
- **Komposiittimateriaalit ja työkalut 3D-tulostuksen tueksi** -työpaketissa kuvauskohteina oli muovi- ja metallitulosteita, joiden laadunvarmistusta kehitettiin vertaamalla tomografian rakennetietoa CAD-malleihin. Kuvausdatan pohjalta tehtiin myös 3D-tulosteita.
- **Metallisten materiaalien analysointivalmiuksien parantaminen** -työpaketissa kehitettiin osaamista metallikappaleiden vaurioanalyysiin. Kuvauskohteina oli erilaisia metallikappaleita ja hitsausaumoja.

Työpakettien pilottiesimerkkejä esitellään jäljempänä tässä julkaisussa.



Kuva sivun alareunassa: Hitsausaumoja on perinteisesti kuvattu filmille (oikeanpuoleinen osakuva). Uuden röntgentomografialaitteen näytenäyttöä on kallistuva, joten sylinterimäisen hitsausliitoksen kuvaaminen vie vain muutaman minuutin.

## Investoinnin valmistelut

Valmistelut sisälsivät suunnittelua ja vaatimusmäärittelyä, kilpailutuksen ja ennen laitteiston saapumista tehtävät valmistelut kiinteistörakenteisiin liittyen.

Laitteistovaatimuksia ja hankkeen kehittämiskohteita määriteltäessä kartoitettiin yliopiston, osatoteuttajien ja sidosryhmien tarpeet, jotta hankittava laite ja osaaminen vastaisi mahdollisimman hyvin toimijoiden toiveita. Tämän jälkeen työ eteni vaiheittain seuraavasti:

- 1) Markkinakartoitus, jolla selvitettiin käytettävissä olevilla resursseilla saatavilla olevien laitteiden saatavuutta, suorituskykyä ja ominaisuuksia.
- 2) Laitteistojen suorituskyvyn vertailun suunnittelu. Testinäytteiksi valittiin hitsausliitos terässylinterissä, luu-rustonäyte ja kartonkipala.
- 3) Laitteistojen kilpailutuksen ja hankintalain mukaiset määrittelyt.
- 4) Tarjousten ja laitteistojen vertailu, mikä sisälsi tarjousten läpikäynnin, testinäytteiden kuvaukset ja laitteistokokemusten tarkastelun sekä lopulta tarjousten pisteytyksen näiden tietojen pohjalta.
- 5) Hankintapäätöksen tekeminen. Saatujen tarjousten ja testimittausten perusteella päädyttiin hankkimaan Nikon XTH 225.
- 6) Kiinteistövalmistelut, mihin sisältyi laitteen sijoituspaikan valinta ja laitesijoituksen vaatimat muutostyöt.
- 7) Kehitystarpeisiin liittyvät kirjallisuusselvitykset.

## Röntgentomografialaboratorio

Röntgentomografialaboratorioon kuului jo ennestään 2006 hankittu Skyscan 1172 -röntgentomografialaite ohjelmistoineen. Tämän hankkeen myötä laboratorioon saatiin toinen röntgentomografialaite ohjelmistoineen. Lisäksi laboratorion varustelua täydennettiin monipuolisilla tarvikkehankinnoilla. Tämän hankkeen pilottiprojekteissa käytettiin sekä uutta että vanhaa laitteistoa ohjelmistoineen.

### Nikon XTH 225 käyttöönotto

Käyttöönotto sisälsi laitteiston asentamisen, testauksen, kalibroinnin ja toimintakyvyn varmistamisen yhdessä laitetoimittajan kanssa.



Kuva: Nikon XTH 225 röntgentomografialaite.

Pilottiprojektit toteutettiin yhdessä kohderyhmien kanssa hankkeen aikana. Laitteiston hyöty todennettiin kohderyhmien sovelluksiin liittyvissä kehitysprojekteissa, joiden tuloksia on julkaistu myös mm. opinnäytteinä ja tieteellisinä artikkeleina.

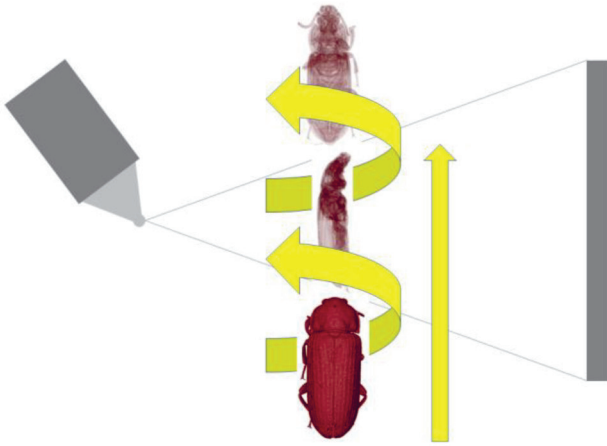
Laitehankinta sujui alkuvaiheiden jälkeen hyvin ja uusi laite saatiin käyttökuntoon 10 kk hankkeen alkamisesta maaliskuussa 2020. Noin puoli vuotta asennuksen jälkeen laitteeseen tuli kuvatarkennusvika, jonka korjaamiseen kului koronarajoitusten vuoksi lähes 6 kuukautta. Tämä viivästytti pilottiprojektien toteutusta merkittävästi.

Laitehankintaan kuului viiden päivän koulutus, joka toteutui kahdessa osassa. Alkeiskoulutus laitteen käyttöön annettiin pian laiteasennuksen jälkeen maaliskuussa 2020. Toinen syvemmälle menevä koulutusjakso toteutettiin laitehäiriöiden ja pandemian vuoksi kuitenkin vasta maaliskuussa 2022.

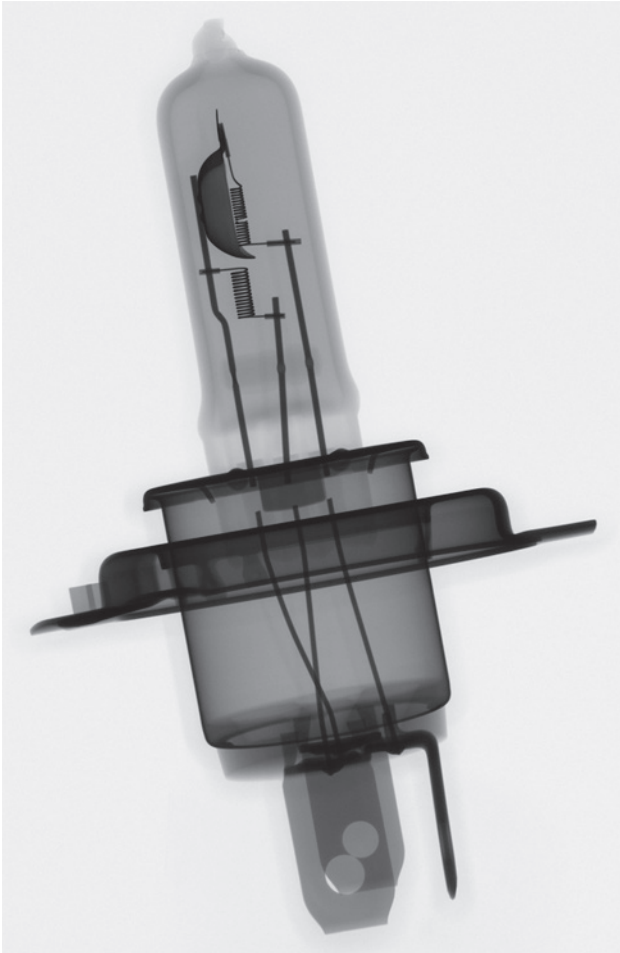
## Ohjelmistot

Nikon on tehnyt omat ohjelmat laitteen käyttöä varten. XTH 225 tomografialaitteen ohjausohjelma on *Inspect-X*. Kuvaamisvaihtoehtoina ovat tavallinen sylinterikuvaus ja ns. helical-kuvaus, jolloin kappale sekä pyörii että kohoaa kuva-alalla koko kuvauksen ajan. Lisäksi voidaan ottaa ja käsitellä yksittäisiä läpivalaisukuvia. Tomografiakuvausprojektiokuvat ohjataan suoraan erilliselle tehokkaalle kuvalaskentakoneelle. Kuvalaskenta-asetukset tehdään ohjelmalla *CT 3D Pro* ja varsinaisen kuvalaskenta ohjelmalla *CT Agent*.





**Kuva:** Helical-kuvauksen periaate. Näyte sekä pyörii että nousee, kun se kulkee säteilykartion läpi tomografiakuvauksen kuluessa.



**Kuva:** Läpivalaisukuva auton ajovalopolttimosta.

Laitehankintaan kuului analysointiohjelma *Volume Graphics Studio Max* sekä sen ohjelmaosiot

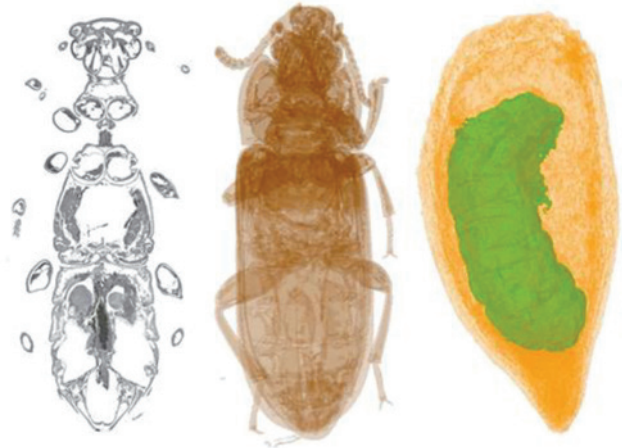
- koordinaattimittaukset (*Coordinate Measurement*),
- huokoisuus ja sulkeuma-analyysi (*Porosity/Inclusion analysis*),
- vaahto ja jauheanalyysi (*Foam/Powder analysis*), sekä
- kuitukomposiittianalyysi (*Fiber Composite Material analysis*).

Myöhemmin hankittiin vielä ohjelmaosa

- tomografiadata CAD-tiedostoksi (*Reverse Engineering*).

Ohjelmat mahdollistavat monipuolisen rakenteen kvalitatiivisen ja kvantitatiivisen analysoinnin sekä esimerkiksi vertailun CAD-mallin ja tomografiadatan kesken. Nyt tomografiakuvauksesta muodostettua CAD-tiedostoa voidaan verrata suunnitteluvaiheen CAD-tiedostoon ja todeta esimerkiksi dimensiomuutoksia.

Skyscan-ohjelmistolle hankittiin päivityslisenssi, jolla ohjelmisto voidaan pitää päivitettyinä uusimpiin lisensoituihin versioihin. Tämä kokonaisuus on Brukerin *3D.Suite*-ohjelmisto: kuvalaskenta (*NRecon V2*), analysointiohjelmisto (*CTAn*) sekä visualisointiohjelmistot (*CTVol* ja *DataViewer*). Visualisointiohjelmillä saadaan muodostettua leikekuva mistä tahansa suunnasta, säädettyä harmaasävyjakaamaa ja tallennettua uusi leikekuvasarja halutusta suunnasta. 3D-stl-tiedostosta voidaan tehdä osittain läpinäkyvä ja väritetty kuva tai video, jonka taustaksi saadaan myös omavalintainen kuva.



**Kuva:** Jauhopukin (*Tenebrio molitor*) leikekuva ja 3D-kuva, sekä männyn siemen, jonka sisältä löytyi toukka.

Bruker Skyscan-ohjelmistoja käytettiin koko hankkeen ajan Nikonin ohjelmien ja *Volume Graphics*-ohjelmiston rinnalla. *Bruker 3D.Suite*-ohjelmistolla voidaan visualisoida ja analysoida myös Nikonilla otettuja leikekuvasarjoja. Esimerkiksi *Skyscan CT Analyser* tarvitsee vain kuvan pikselikoon määrittämisen, jotta analyysien mittakaava on oikea. Vastaavasti *Volume Graphics Studio Max*-ohjelmaan voidaan helposti ladata Skyscan-laitteella aikaansaatu leikekuvasarja analysoimaan tai visualisoimaan varten.

Sekä Nikonin että Brukerin ohjelmistot ovat lisensoituja ja vaativat (akateemisille laiteasiakkaille ilmaisen) lisenssitiedoston toimiakseen kaikilta osin. *Volume Graphics Studio Max* vaatii hyvin tarkasti kontrolloidun lisenssin toimiakseen. *Volume Graphics* on kaupallinen ohjelmistotalo, joka on osa Hexagon-konsernia.



**Kuva:** Skyscan 1172 röntgentomografialaite.

Kun analyysi ja siihen liittyvä data on tallennettu *Volume Graphics* -ohjelmalla, voi koko analyysidataa tallennettuine kuvineen tarkastella ilmaisella ja ohjelmistovalmistajan sivuilta vapaasti ladattavalla ohjelmalla *myVGL*. Kuvasarjoja voi käsitellä myös esimerkiksi ilmaisella *FIJI*-ohjelmistolla. Yksittäisiä kuvia voi käsitellä millä tahansa ohjelmilla, jotka osaavat muokata 8- tai 16-bittisiä harmaasävykuvia.

Tomografiakuvasarjat ovat yleensä hyvin suuria, tavallisesti 10-100 GB, joten kuvalaskenta ja analysointiohjelmat vaativat tehokkaan tietokoneen ja suuren määrän RAM-muistia toimiakseen sujuvasti.

### Tarvikkeet



**Kuva:** Istukkapuristin.

Näytteet tulee kiinnittää esimerkiksi kaksipuolisella teipillä joko suoraan näytealustalle tai johonkin vähän röntgensäteilyä vaimentavaan kappaleeseen, kevyet näytteet tavallisimmin styrokseen. Lisäksi erilaisille näytteille yleisnäytepitimeksi hankittiin istukkapuristin.

Näytteiden tiheyden analysointi on tärkeää esimerkiksi vertailtaessa olosuhteiden vaikutusta kasvien ominaisuuksiin tai luun tiheyden muutoksia sairauksien edetessä. Tiheyden muutos voi osoittaa materiaalin muuttumista, vaikka rakenteessa ei selkeästi havaittavaa

muutosta olekaan vielä nähtävissä. Tiheysanalyyseja varten hankittiin 8-osainen **tiheysfantomisarja**. Fantomit ovat 3 mm paksuisia ja 10 mm pituisia sylintereitä, joiden tiheydet ovat

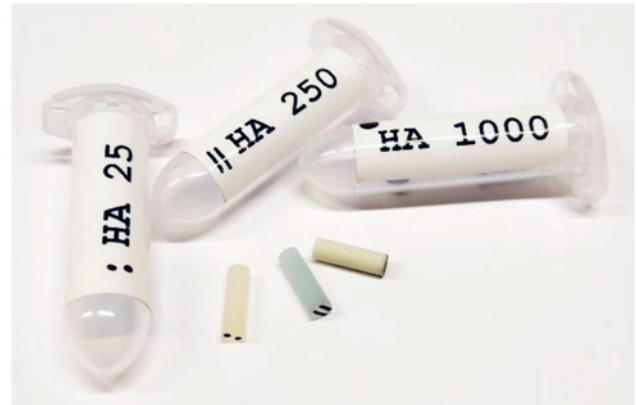
- HA 0 (1,13 g/ cm<sup>3</sup>),
- HA 25 (1,15 g/ cm<sup>3</sup>),
- HA 50 (1,16 g/ cm<sup>3</sup>),
- HA 100 (1,19 g/ cm<sup>3</sup>),
- HA 250 (1,28 g/ cm<sup>3</sup>),
- HA 500 (1,44 g/ cm<sup>3</sup>),
- HA 750 (1,61 g/ cm<sup>3</sup>),
- HA 1000 (1,77 g/ cm<sup>3</sup>),

missä HA on kalsium-hydroksiapatiitti  $\text{Ca}_5(\text{OH})(\text{PO}_4)_3$ . Nämä tiheysfantomit soveltuvat pienten, senttiluokan biologisten näytteiden tiheysalueelle vertailukappaleiksi. Näille luonnonmateriaaleille, kuten kudokset, jyvät, puu ja luu, ei yleensä ole tiheystietoa valmiina olemassa. Sen sijaan teollisesti tuotetuille suuremmille kappaleille tiheystietoa ja vertailukappaleita on useimmiten saatavilla.

Tomografiakuvista tehtävien mittausten kalibrointia varten hankittiin neljän mittakalibrointitestikappaleen sarja. **Mittakalibrointikappaleet** ovat tankoja, joiden päissä on pallomaiset osat. Pallojen välimatkat L ja halkaisijat D ovat

- L = 8 mm, D = 2 mm,
- L = 30 mm, D = 3 mm,
- L = 60 mm, D = 6 mm,
- L = 120 mm, D = 8 mm.

Kukin sarjan erikokoisista kappaleista antaa tarkimman kuvan omassa mittakaavassaan. Kalibroituja mittauksia tarvitaan erityisesti mm. teollisesti valmistettujen kappaleiden analysoinnissa sekä tomografiadatasta tehtyjen CAD-tiedostojen mittatarkkuuden tarkistamisessa.



**Kuva:** Tiheyskalibrointikappaleita.



**Kuva:** Mittakalibrintikappaleita.

Tomografiakuvauksissa syntyy suuri määrä dataa. Ulkoiset, verrattain edulliset kovalevyt todettiin paremmaksi ratkaisuksi asiakkaiden datan siirtoon ja tallennukseen kuin yksi suuri ja kallis datatallennuspaikka.

## Ohjeet

Toimintaohjeet ovat oleellinen työvaihe osaamisen jakamiseksi ja palvelun tuotteistamiseksi. Nikon XTH 225 -röntgentomografialaitteen päivittäiskäyttöön tehtiin ohje normaalkäyttäjälle, sekä erikseen muistio pääkäyttäjälle. Myös Skyscan 1172:n käyttöohje ja analysointiohje päivitettiin.

*Volume Graphics Studio Max* -ohjelmalle tehtiin yleisohje, jolla pääsee tekemään perusvisualisointia ja -analyseja. Omat ohjeet eivät kuitenkaan korvaa laitteen tai ohjelmien omia käsikirjoja, joista löytyvät tarkemmat ja seikkaperäisemmät ohjeet. Laittevalmistajan tai ohjelmistotalon omia käsikirjoja on käytettävä erityisesti kalibrointien yhteydessä.

Näillä ohjeilla tuettiin erityisesti osaamisen siirtoa ja madallettiin kynnystä käytön aloittamiseen. Kirjallisten ohjeiden lisäksi hankkeen aikana opastettiin useita henkilöitä eri toteuttajaorganisaatioista laitteen ja analysointiohjelmien itsenäiseen käyttöön sekä analysointimenetelmien itsenäiseen hyödyntämiseen. Laitteen ja ohjelmistojen käyttöastetta saadaan näin laajennettua. Laitteikäytön osaavia henkilöitä on hankkeen jälkeen neljä. Analysointiohjelmien käyttöön on opastettu kuusi henkilöä.

Hyvä ohjeistus auttaa jatkossakin perehdyttämistä. Ohjeita ylläpidetään ja päivitetään myös hankkeen päätyttyä tarpeen mukaan.

## Viestintä

Hankkeen viestinnän keskeisimpiä tavoitteita oli siirtää osaamista kuvantamis- ja analysointitarpeista sekä tekniikan ja laitekannan tarjoamista mahdollisuuksista TKIO-toiminnassa. Edelleen tavoitteena oli tuotteistaa röntgentomografiapalvelu siten, että se on helpposti saatavilla. Toisaalta palvelun tuotteistamisessa ja hinnoittelussa oli tärkeää huomioida myös tutkimusorganisaation erityiset tarpeet, rajoitteet ja velvoitteet, jotka poikkeavat pelkästään kaupallisen toimijan vastaavista. Laitteistolle määriteltiin jatkoa varten käyttöhintaa ja analyysipalveluille hinnoitteluoheja.

Kuvantamis- ja analysointimahdollisuuksien esittelemiseksi on laadittu esimerkiksi tuotekortti ja esitteitä. Osa esittelymateriaalista on tämän julkaisun liitteinä.

**SIBabs**  
Small Industry Based Analysis

**X-RAY TOMOGRAPHY**

- Radiographic images, tomographic scans.
- Use **stl-file** in 3D printing, or **compare sample dimensions** to CAD-file.
- Samples from **ant to basketball**.
- Penetration power as much as **3 cm steel** or **12 cm aluminum**.

**Samples**

- Wood, seeds, bone, tooth, implants, tablets
- Geological samples, small electronics, weldings
- 3D printed materials, composites

Better resolution means smaller sample, starting from 3 mm diameter.

**Research questions**

- Structure? Different materials inside the sample?
- Pore location and distribution? Cracks, defects?

**WORKFLOW**

1. Fasten the sample to the manipulator
2. Voltage, current and filter optimization
3. Imaging
4. Reconstruction with optimal settings
5. Surface and region of interest determinations
6. Analysis
7. Visualization with colours and transparency

**ANALYSIS**

- Structures and structure defects
- Homogeneity
- Volume, surface area
- Pores, inclusions
- Fiber orientation

**SIB LABS INFRASTRUCTURE**

	<b>NIKON XT H 225</b> 225 kV, 225 W Detector 43 x 43 cm 2880 x 2880 pixels Resolution 3 µm		<b>SKYSCAN 1172</b> 100 kV, 10 W Detector 34 x 18 mm, 4000 x 4000 pixels Resolution 5 µm
--	--	--	---

**CONTACT**  
Tuomo Silvast, +358 44 327 4046, tuomo.silvast@uef.fi  
Laura Tomppo, +358 40 355 2541, laura.tomppo@uef.fi

Hankkeen valmistelusta ja hankintasuunnitelmista tiedotettiin suorilla yhteenotoilla yliopiston sisäisesti sekä yhteistyökumppaneille. Hankkeen aikana viestintä tapahtui osallistuvien toimijoiden kesken sähköpostitse, puhelimitse, palavereissa, molemminpuolisilla vierailuilla ja ohjausryhmätoiminnassa. Julkiseen viestintään käytettiin SIB Labsin Twitter-tiliä, UEF Connect -hankeprofiilia sekä SIB Labsin verkkosivuja ja niiden kautta ladattavia esitemateriaaleja ja tuotekortteja. Hankejulistetta oli esillä mm. SIB Labsin ilmoitustaululla sekä röntgentomografialaboratoriossa. Laboratoriossa pidettiin myös esittelyjä vierailijoille. Vierailijat tulivat sekä hankkeeseen osallistuvista organisaatioista että hankkeen ulkopuolisista tutkimus- ja oppilaitoksista.

Hankkeen pilottikuvauksia on esitelty mm seuraavissa yhteyksissä:

- KYS sisäkorvakuvausten esittely 28.8.2020.
- Mikrokuvantamisen webinaari 18.11.2020.
- Teollisuuden digievästys 5.5.2021.
- SIB Labs seminaari 7.12.2021.

Tomografiaa on esitelty myös maakunnallisen Kone- ja materiaali-ekosysteemin www-sivuilla <https://www.materiakeskus.fi/>, ja röntgen-tomografian esittelyvideo on katsottavissa Materiakeskuksen YouTube-kanavalla <https://www.youtube.com/watch?v=hpVXTwYoVFK>.

## Materiaalia julkaisuihin ja opinnäytteisiin

Alla on lueteltu jo tehtyjä tai pitkälle valmisteltuja julkaisuja, joissa on käytetty mm. tämän hankkeen pilottikuvauksissa syntyneitä materiaalia. Saatuja tuloksia on esitelty myös kansainvälisissä konferensseissa. Näiden lisäksi on tiedossa muita aiheita, joista on tulossa julkaisuja.

Ahlholm Pekka, *Digital techniques in restorative dentistry – attitudes among dentists, benefits of digital impression, and applicability of 3D printing*, Itä-Suomen yliopisto 2022. Väitöskirja terveystieteiden alalta. Tähän liittyvään tutkimussarjaan kuvattiin useita näyte-sarjoja, tehtiin kuvatakistuksia ja opastettiin kuvien analysointiin.

Ahlholm Pekka, Sipilä Kirsi, Tarvonen Pirkko-Liisa, Silvast Tuomo, Lappalainen Reijo, *Accuracy of dental restorations fabricated using milling vs. 3D printed moulds, an in vitro study*, The International Journal of Prosthodontics. Lähetetty käsikirjoitus (helmikuu 2022).

Iso-Mustajärvi Matti, Tuomo Silvast, Tuomas Heikka, Jyrki Tervaniemi, Pia Linder, Aarno Dietz, julkaisu sisäkorvaimplanttien mikroCT-kuvauksista. KYS Mikrokirurgiakeskus.

Jäntti Jiri, *Nano-contrast agent of osteoarthritis in computed tomography*. Väitöskirja, Itä-Suomen yliopiston, Sovelletun fysiikan laitos.

Kuusisto Niina, opinnäytetyö mikroCT-kuvausten hyödyntämisestä oikeushammaslääketieteen pätevytyksen alalla.

Merivaara Arto, Kekkonen J, Monola J, Koivunotko E, Savolainen M, Silvast T, Svedström K, Diaz A, Holler M, Korhonen O, Yliperttula M, Valkonen S, *Near-infrared analysis of nanofibrillated cellulose aerogel manufacturing*, International Journal of Pharmaceutics, 2022. Nanosellumateriaalinäytteiden mikroCT-kuvaukset ja analyysit.

Orava Heta, *Estimation and prediction of artificial articular cartilage structure and function – Computational methods and CT imaging in characterization*. Väitöskirja, Itä-Suomen yliopiston, Sovelletun fysiikan laitos.

Paakkari Petri, *Contrast enhanced imaging of articular cartilage using spectral computed tomography*. Väitöskirja, Itä-Suomen yliopiston, Sovelletun fysiikan laitos.

Sipilä Kirsi, Ahlholm Pekka, Silvast Tuomo, Lappalainen Reijo, *Accuracy of dental fillings manufactured using CAD/CAM technique*, 2019 IADR/AADR/CADR General Session (Vancouver, Canada), suullinen esitelmä 20.6.2019.

Sorjonen Joonas, *Prediction of tablet integrity during drug product manufacture*, Pro Gradu (12.7.2021) proviisorin tutkintoa varten, Itä-Suomen yliopisto, Terveystieteiden tiedekunta, Farmasian laitos. Tähän opinnäytetyöhön tehtiin lääkeainetablettien mikroCT-kuvauksia sekä annettiin ohjausta ja opastusta kuvien ja analyysien tulokintaa varten.

Välimaa Anna-Liisa, Silvast Tuomo, Pihlava Juha-Matti, Karhu Jouni, Hietaniemi Veli, *MikroCT-kuvaus kauralajikkeiden 3D-kuvantamiseen ja mallintamiseen*, Maataloustieteen päivät 2022 (Viikki, Helsinki). Poster.

## Tavoitteiden toteutuminen

Hankkeen etenemistä seurattiin säännöllisten kokousten avulla ohjausryhmässä, jonka kokoonpano oli seuraava:

- Arto Koistinen, UEF SIB Labs
- Juha Minkkinen, Pohjois-Savon liitto
- Antti Haapala, UEF Metsätieteiden osasto
- Esa Jääskeläinen, Savonia
- Rami Korhonen, UEF Sovellettu fysiikka
- Hannu Miettinen, Sakky
- Jukka Morko, Pharmatest
- Sauli Seppänen, Abloy
- Kenneth Tarvonen, Rayo 3D-Toothfill
- Esko Vanninen, KYS
- Teemu Vilppo, Lunawood
- Anna-Liisa Välimaa, Luke

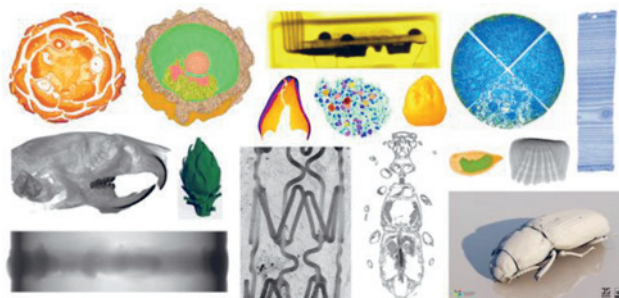
sekä asiantuntijajäsenenä Tuomo Silvast, UEF SIB Labs.

Hankesuunnitelman mukaiset tavoitteet saavutettiin viiveistä ja koronarajoituksista huolimatta, minkä mahdollisti kehittämishankkeen hankeajan jatkaminen yhdellä vuodella. Konkreettisimmat, erinomaisesti saavutetut käytännön tavoitteet olivat laitteistojen kilpailutus, vertailu, käyttöönotto, pilotointi ja koulutus. Hanke palveli hyvin myös strategisia tavoitteitaan, eli hankkeen avulla kehitettiin Itä-Suomen yliopiston tutkimus-, kehitys- ja opetusympäristöä, jota voidaan hyödyntää monipuolisesti sidosryhmien kanssa, sekä vahvistettiin Kuopion Savilahteen keskittyvää kokonaisuutta monipuolisen ja korkealaatuisen kuvantamisen toteuttajana erityisesti terveystieteitä ja luonnontieteitä, sekä niihin liittyvää yritystoimintaa hyödyttäen.

Täysipäiväinen hanketyöntekijä oli välttämätön, jotta hankkeen tavoitteet saatiin toteutettua suunnitellussa laajuudessa.

## Pilotointikuvaukset

Hankkeessa onnistuttiin pilottikuvauksen suhteen hyvin. Pilottikohteita oli monipuolisesti ja kaikki kuvaukset palvelivat osaltaan kaikkien hankkeen toteuttajaosapuolten tavoitteita. Nikonin laiterikko siirsi joitakin ajoitettuja kasvien kuvaussarjoja seuraavaan kasvukauteen. Pääosa kappaleista kuvattiin Nikon XTH 225 -laitteella, mutta Skyscan 1172 -laitetta käytettiin esimerkiksi useimmissa hammaskuvaussarjoissa.

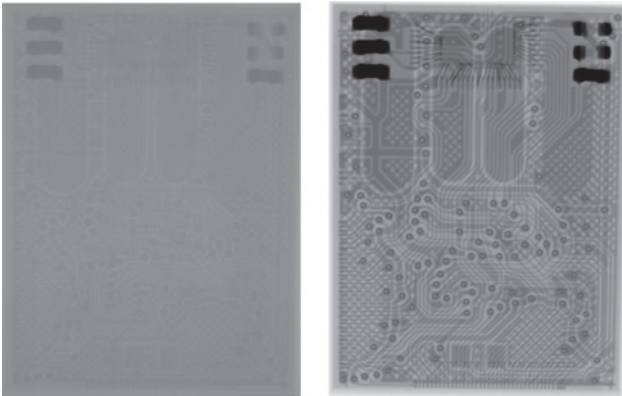


Varsinaisen kuvausajan lisäksi välttämättömään toiminta-aikaan kuuluvat laitteen päivittäiset röntgenputken lämmitysajat sekä huolto- ja ylläpitotoimet, esimerkkinä virhetoimintojen syiden selvittäminen ja filamenttien vaihtaminen. Näytteiden käsittely ja kuvaussuunnittelu, kuvalaskenta, analysoinnit, muu datan muokkaus – esimerkiksi visualisointi – sekä datatoimitukset ja kommunikointi asiakkaiden kanssa moninkertaistavat yksittäiseen kuvaukseen kuluvan ajan jokaisen näytteen kohdalla.

## Analysointivalmiudet

Analysointivalmiudet kehittyivät hankkeen ansiosta sekä Skyscan-että Volume Graphics -ohjelmistojen osalta. Merkittävin kehitysas- kel oli, että kuvaus- ja analysointimahdollisuudet laajenivat kooltaan suurempien näytteiden suuntaan. Myös metallinäytteitä on nyt mah- dollista kuvantaa. Analysointitaito kehittyi hankkeen loppua kohti ko- kemusten karttuessa ja laiteomittajan pitämän toisen koulutusjak- son ansiosta. Harmillisesti tämä koulutusjakso voitiin toteuttaa vasta aivan hankkeen loppuvaiheessa. Hankkeeseen suunnitellut analy- sointiohjelmiston valmistajan koulutukset eivät toteutuneet korona- pandemian vuoksi. Jonkin verran tätä korvasivat ohjelmistovalmis- tajan järjestämät webinaarit.

Tomografiakuvauksia voidaan jatkossa tehdä kappaleille, jotka ovat kooltaan muurahaisen pään ja koripallon välillä. Metalliin läpäisykyky rajoittuu kolmeen senttimetriin terästä, joten suuria metallikappaleita ei voida kuvata. Millimetriluokan kappaleelle kuvapikselin koko saa- daan muutaman mikrometrin kokoiseksi, mutta koripallon kokoiselle kappaleelle kuvapikseli on jo 100 mikrometrin luokkaa. Kuvamateri- aalin laatu vaikuttaa vahvasti saavutettavissa olevaan analyysin laa- tuun. Huonosta kuvamateriaalista ei saa hyvää analysointitulosta.



**Kuva:** Kuvaoptimoinnin vaikutus projektiokuvan selkeyteen. Vasemmalla lähtökohta ja oikealla optimoitu projektiokuva.

Kuvaoptimoinnin keinoja ovat

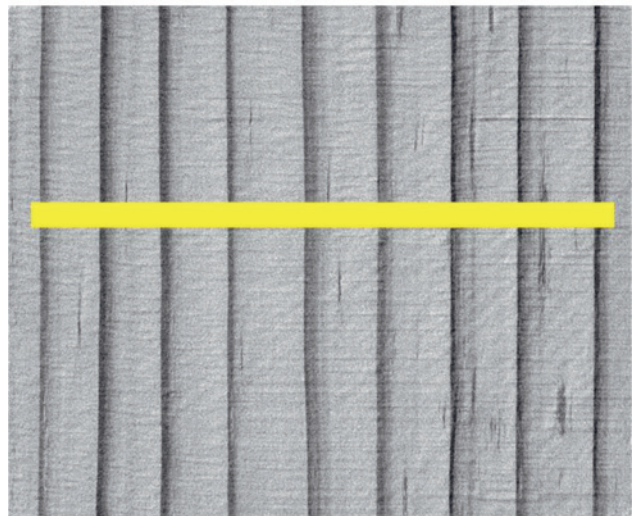
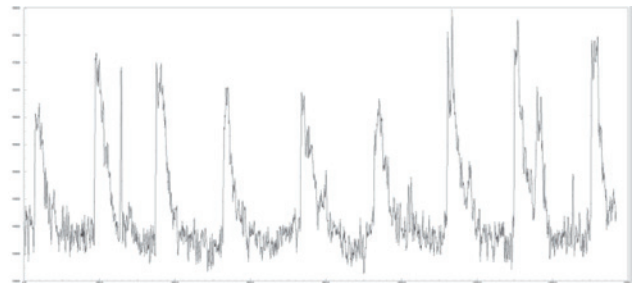
- suurempi **virta**,
- pidempi **valotusaika**,
- pienempi detektorin **vahvistus**,
- enemmän **projektiokuvia**,
- enemmän projektiokuvien **keskiarvoistusta**.

Huomattava kuitenkin on, että parhaat kuvausasetukset löytyvät aina kompromissina. Esimerkiksi valotusajan pidentäminen ja projektiokuvien määrän lisääminen pidentävät nopeasti kuvausaikaa. Pro- jektiokuvien lukumäärän lisääminen kasvattaa myös kuvausdatan

määrää. Detektorin vahvistuksen pienentäminen vaatii vastaavas- ti joko suuremman virran tai pidemmän valotusajan, mikä voi kyllä tuottaa paremman harmaasävyerottelun. Keskiarvoistuksen lisää- minen vähentää projektiokuvien kohinaa ja tuottaa parempilaatui- set leikekuvat, jos kuvattava kappale pysyy liikkumattomana piden- tyneen kuvauksen ajan. Suuri datamäärä hidastaa selkeästi myös analyysilaskentoja. Joskus datamäärä on niin suuri, ettei analyysi- tietokone edes kykene laskemaan haluttuja analyyseja. Siinä tapa- uksessa kuvatarkkuuutta on ohjelmallisesti vähennettävä tai analyy- seja laskettava pienissä osissa.

Läpäisykyky säädetään röntgensäteilyn energialla ja suodattimilla, kuvan laatu virran ja projektiokuvien lukumäärällä. Suodatinta, me- tallilevyä säteilyenergian rajaamiseksi, suositellaan käytettävän yli 70 kV jännitteillä.

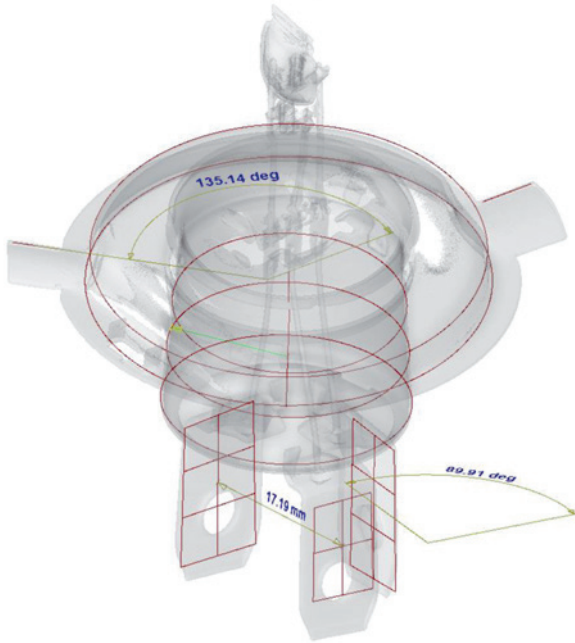
Kuvausasetukset tallentuvat lokitiedostoon, joten kuvauksen voi toistaa samanlaisena yhä uudelleen. Leikekuvat voi tallentaa tiff- tai DICOM-muodossa, 8- tai 16-bit kuvina.



**Kuva:** Puun vuosilustot saa harmaasävykuvasta käyräksi (ylempi kuva), jota voi analysoida esimerkiksi signaalinkä- sittelyn keinoin.

Tomografiakuvauksen avulla nähdään röntgenvaimennukseen pe- rustuen kappaleen sisärakenne sitä rikkomatta ja kuvankäsittelyn keinoin saadaan eri osat erotettua toisistaan. Esimerkiksi 3D-tulos- tettujen kappaleiden tulostusvirheiden analysointi rakenteiden si- sältä on vaikeaa ilman röntgentomografiaa, koska suurin osa tu- lostusmateriaaleista ei ole läpinäkyviä. Tarkka röntgentomografia tuo myös paljon mahdollisuuksia 3D-tulostusparametrien säätöön, jolloin tulostuksen laatu on hallittavampaa.

Kuvista voidaan valmistaa video, jossa eri osat ovat korostettuina eri värein. Video voidaan tehdä myös kuvasarjoista tai 3D-kuvasta, jossa kappale pyörii osittain läpinäkyvänä. Kuvasarja saadaan muodostettua halutusta suunnasta katsoen. Erillisiä saman kappaleen kuvauksia voidaan myös liittää yhdeksi eri menetelmillä.



**Kuva:** Kappaleeseen voidaan liittää mittauksia varten erilaisia pintoja, ja mitat saadaan tallennettua kuviin mukaan.

Kappaleesta voidaan tehdä **huokosanalyysi**, tai vaahtomaiselle materiaalille **vaahtoanalyysi**, jolloin voidaan nähdä esimerkiksi huokosten kokojakauma, muoto ja sijainti. Materiaalista voidaan saada selville mm. rakennepaksuus ja rakennevälien jakauma, rakenteen muotoindeksi, tilavuus ja pinnan ala. Kuiturakenteisesta materiaalista voidaan laskea **kuitusuuntautuminen**. Kuvattuun pintaan voidaan liittää geometrisina kappaleina esimerkiksi pisteitä, taso tai sylinteripinta. Lisäksi erilaiset **mittaukset** ovat mahdollisia: välimatka, kulma, paikka, säde tai halkaisija. Kappaleesta voidaan tehdä **CAD-tiedosto**, mikä tosin monesti vaatii kuvankäsittelyoperaatioita, jotta lopputuloksesta saadaan kuvahäiriöistä siistitty ja kooltaan riittävän pieni tiedosto. Jos jokin osa kappaleesta on ohjelmallisesti erotettavissa irralleen, voidaan se analysoida erikseen ja muodostaa siitä **3D-stl-malli**. Kuvien harmaasävy voidaan kalibroida tiheysvertailuja varten.

### Kehitettävää

Hanketta suunniteltaessa oli jossain määrin varauduttu viivästyksiin, mutta niiden mittakaava yllätti toteutusvaiheessa. Koronapandemiaan ja sen vuoksi pitkittyneeseen laiterikkoon ei olisi voinutkaan täysin varautua. Toisaalta pandemian tuomat haasteet pyrittiin voittamaan, minkä vuoksi toiminta kehittyi yhä paremmin sähköisiä järjestelmiä hyödyntäväksi ja joiltain osin esim. viestintä tavoitti webinaareissa laajemman joukon kuin minkä paikallisesti järjestettävä seminaari olisi tavoittanut. Tiedottamisessa ja viestinnässä onnistuttiinkin suhteellisen hyvin.

Investointien sujuva onnistuminen vaatii hyvää taustatyötä jo ennen hankkeen toteuttamista. Esiselvitykset tutkimuskohteista ja laitteiden

suorituskyvyistä helpottavat kilpailutusta ja varsinaista vertailua tarpeisiin sopivimman laitteiston valitsemiseksi.

Henkilöstöressurssien hyvä suunnittelu on tärkeässä roolissa lyhyehkössä hankkeessa ja erityisesti viivästyneiden paikkaaminen vaatii myös joustavuutta. Hankkeen aikana työt myös ajoittain kasaantuvat, koska myös datan määrä muodostui yllättävän suureksi ja analysointiin kului siksi suunniteltua runsaammin aikaa. Datamäärästä ja ohjelmallisensseistä johtuen analysointi ei myöskään onnistunut millä tahansa tietokoneella, ja joiltain osin myös laiteresurssit olivat alimitoitettuja. Riittävien resurssien varaamiseen pitää siis jatkossa kiinnittää huomiota niin hankkeissa kuin yksittäisissä mittauksissakin.

### Jatkotoimet

Röntgenlaboratorion toiminnasta vastaa jatkossa Itä-Suomen yliopiston SIB Labs -yksikkö. Laitetta ja hankkeen tuloksia hyödynnetään tulevaisuudessa mm. hankkeeseen osallistuneiden organisaatioiden tutkimushankkeissa, yritysyhteistyössä, koulutuksessa ja opetuksessa sekä palvelututkimuksissa.

Jatkokäyttöä ajatellen sekä laitteen että analysoinnin tekniset mahdollisuudet ja edellytykset ovat nyt paremmin tiedossa ja esimerkiksi hankkeiden tai tuotekehitysprojektien suunnittelu voi olla siltä osin täsmällisempää. Tässä hankkeessa saavutetun tietotaidon avulla myös henkilöstöressurssit osataan tulevaisuudessa allokoida täsmällisemmin. Yritysnäkökulmasta pysyvä henkilöstö on tärkeää, jotta hankittu osaaminen on käytettävissä hankkeen jälkeenkin viivästyksittä.

Nikon XTH 225 -laite sallii eri komponenttien vaihdon, joten laitetta voi kehittää tai jalostaa uusilla, tehokkaammilla komponenteilla. Esimerkiksi röntgenputki tai detektori voidaan vaihtaa laitteistokehityksen myötä parempaan tai toisenlaiseen. Tämä parantaa edellytyksiä pitää laite ajantasaisena ja käyttökelpoisena vielä pitkään.

Kuopion Savilahden rakentuvan tutkimus-, kehitys- ja opetusympäristön kehittämistä jatketaan tämän hankkeen jälkeenkin, jotta alueen monipuolinen ja korkealaatuinen kuvantamisen osaaminen ja infrastruktuuri elää ja kehittyy ympäröivää yhteiskuntaa ja erityisesti yritystoimintaa palvellen.

Tässä hankkeessa käytöön otettu teknologia on hyvin monipuolinen ja sitä voidaan soveltaa laajasti alueen toimijoiden tarpeisiin. Tomografia on mm. osa jatkumoa biolääketieteellisessä kuvantamisessa, johon Savilahden alueella on kyvykkyyttä lähtien solukuvantamisesta ja päätyen aina kliiniseen potilastutkimukseen saakka. Lisäksi vuonna 2023 alkava tekniikan koulutus ja siihen kytkeytyvä yhteistyö alueen teknologiayritysten kanssa antavat pohjaa materiaaleihin liittyvän osaamisen kehittämiseksi Itä-Suomessa.

## Nikon XTH 225 lyhyt käyttöohje

Laitetta ei saa kontaminoida näytteellä tai siitä irtoavalla materiaalilla.

Normaalikäytössä *System Power* ja *Xray Power* sekä ohjaustietokone **ovat aina päällä**. Pidä näytekammion ovi suljettuna.

### Aloitustoimet

1. Tarkista että jäähdytin on käynnissä ja +20 °C.
2. Laita tietokonenäyttö päälle ja kirjaudu sisään.
3. Laita näytekammioon **valo**.
4. Laita *Interlock Key -avain paikalleen* ja käännä se ON-asentoon.
5. **Ota kaikki näytepöydältä pois**. Tee näyteaseman kalibrointi "*Homing*".
6. Paina *Setup*-välilehtiotsikon alla olevaa **i**-painiketta.
  - a. Totea tyhjän tila. Normaali tyhjä on noin 4400 mV ja 6,15E-05 Pa.
7. Käynnistä röntgenputken "*Auto-conditioning*". Sen voi keskeyttää, kun suurin **jännite** (esim. 220 kV) on pysynyt **stabiilina** vähintään 5 min.
  - a. Päivittäin käytettäessä aikaa menee noin 30 min, kerran viikossa käytettäessä 1-2 h.

### Tavallinen tomografiakuvaus

1. Aloita aina *Setup*-ikkunalla. **Huomaa, että näytepöydän törmäysesteitä ei ole**.
2. **Kuvalaskentakoneen** ja sen *CT Agent* -ohjelman pitää olla käynnissä.
3. Asemoi kuvattava kappale siten, että **tasaiset pinnat** eivät ole vaaka- tai pystysuorassa.
4. **Lukitse** x-akseli = 0 ja kallistus = 0, myös *Helical*-kuvauksessa.
5. **Keskitä kuvattava kappale** näytealustalle käsin siirtämällä.
  - a. Paras lopputulos saadaan, kun koko näyte näkyy kaikista suunnista kokonaan kuvausalueella.
  - b. *Tall sample*, siirrä korkean kappaleen yläreuna (*Sample end*) kuvan yläosan tasalle ja **asetä näytepöydän y-koordinaatin arvo**, ja vastaavasti siirrä kappaleen alareuna kuvan alaosan tasalle ja aseta *Sample start* y-koordinaatin arvo.
6. Poista *Shading correction* päältä asetusten optimoinnin ajaksi (*Radiography*, 1. välilehti).
7. **Säädä jännite** (kV) riittävän läpäisyn saamiseksi (**alasävyt yli 10 000** optimi).
8. Tarkista binning-asetus (pikselien lukutarkkuus, 1x1 tai 2x2).
9. Käytä dynaaminen alue mahdollisimman leveästi. Seuraa säätöjä tehdessäsi histogrammia, milloin **materiaaliipiikit** (tummemat harmaasävyt) ovat voimakkaimmillaan tai toisistaan **erotuvimmat**.
  - a. Vaimennus- ja taustajakaumat kauemmas toisistaan: **lisää tehoa** (W) tai **valotusaikaa**, jännitettä voi samalla tarpeen mukaan laskea. Jos pikselikoko ei ole oleellinen, käytä 2x2 binningiä ja tehoa enemmän.
  - b. Vaimennus- ja taustajakaumaa lähemmäs toisiaan: **lisää suodatinta**, jolloin keskimääräinen energia (kV) kasvaa ja tausta vähenee tai tummenee (**yläsävyt alle 60 000** optimi). Samalla säteilykovenemavirhe (**beam hardening**) vähenee. Valitse mieluummin näytteen kanssa **samaa materiaalia** oleva suodatinta. Ohutta suodatinta voi suositella yli 70 kV energioilla.
  - c. **Tehton pienentäminen** parantaa resoluutiota (jos pikselikoko on tehokkuusarvoa pienempi), koska röntgensäteilypiste pienenee.

d. Käytännössä resoluutioon vaikuttava **pikselikoko** seuraa tehon lukuarvoa, 7 W = 7 µm, 30 W = 30 µm. Huomaa, että alle 13 µm pikselikoolla (*binning* 1x1) näytepöydän kiristystappi ulottuu röntgenkohtioon.

e. **Läpäisykyky** säädetään energialla (kV) ja suodattimilla. **Kuuvan laatu** virran (µA) ja projektiokuvien avulla. **Kuvaoptimoinnin** vaihtoehtoja:

- i. lisää virtaa, huomaa että yli 250 µA virta lyhentää filamentin elinaikaa merkittävästi,
- ii. kasvata valotusaikaa,
- iii. vähennä detektorin vahvistusta,
- iv. lisää projektiota (tavallisesti 2400-4476),
- v. lisää projektiokuvien keskiarvoistusta,
- vi. tee kohinaa vähentäviä manipulointeja kuvalaskennassa.

10. Tee *Shading correction* asetukset vähintään **2 min** ajalle. Kun yläsävyt ovat huomattavasti alle 60 000, valitse *white target* noin **puoliväliin** kuvan yläsävyjä ja arvoa 60 000.

11. **Nimeä kuvaus** havainnollisesti. Aloita nimi nimikirjaimillasi, jotta kuvaus on helposti tunnistettavissa omaksesi.

12. Mahdolliset lisävalinnat

- a. Tarvitsetko kirkkkausnormalisointia (*Flux normalization*)? Tee se sellaiseen kuvakohtaan, joka on koko kuvauksen ajan tyhjänä.
  - b. Automaattinen kuvalaskenta (*Reconstruction*) ja tilavuusanalyysi (*Volume analysis*) ovat sidoksissa toisiinsa: ei toista ilman ensimmäistä. Normaalisti kuvalaskenta tehdään **erillisellä kuvalaskentakoneella** (Nikon *ReconPC*:ssä verkkojohto alemmassa pistokkeessa, LAN2).
  - c. "*Minimize ring artefacts*" toimii start-stop -mekanismilla, joten se päivittää **histogrammin joka projektiolle**, eli näet live-histogrammin.
  - d. *Continuous*-asetuksella näytealusta pyörii tasaisesti koko ajan. Kuvakeskiarvoistuksen lisääminen hidastaa pyörimistä, jotta keskiarvoistettu liike projektiokuvassa on pienempi kuin kuvapikselin koko.
13. Siirrä **kappale pois kuva-alalta** (*Safe position*) taustakorjauskuvien ottoa varten.
- a. Jos latasit edellisen kuvauksen asetukset ja näyte on samanlainen, näytepöytä siirtyy *safe position* -asentoon tarvittaessa automaattisesti.

### Helical-skannauksen lisäksi

1. **Lukitse** x-akseli = 0 ja kallistus = 0 myös *Helical*-kuvauksessa. Pidä näyte mahdollisimman lähellä näytepöytää.
2. **Kohdista ja vahvista** *Sample top* ja *Sample bottom* kuva-alan **keskiviivalle**. Jätä keskiviivan ja näytteen väliin noin 1 cm, jotta päädyistä saadaan hyvät leikekuvat.
3. Aja näyte **alas kuva-alalta** ja vahvista *Start position check*.
4. Aja näyte **ylös kuva-alalta** ja vahvista *End position check*.
5. Valitse *Continuous scan* nopeamman kuvauksen vuoksi.
6. Ota **0° ja 90° kuvat** koko näytteestä kuvalaskentarajauksia varten (sylinterikuvake kuvalaskentavälillä).
7. **Optimoi projektiot** tarpeen mukaan.

### Lopetustoimet

1. Sammuta röntgentuotto.
2. Ota **kaikki näytepöydältä pois**.
3. Jos olet päivän viimeinen kuvaaja, käännä *Interlock Key -avain* OFF-asentoon ja ota **avain pois**.
4. Sammuta näytekammion valo.
5. **Lukitse näyttö** ja sammuta tietokonenäyttö.



Nikon XTH 225 heijastuskohtiassa on neljä eri kohtiomateriaalia: volframi (W), molybdeeni (Mo), kupari (Cu) ja hopea (Ag), joista kaksi ensin mainittua ovat yleisimmin käytössä. Molybdeeniä käytetään yleensä alle 60 kV jännitteillä. Hopea sulaa helposti, joten hopeaa käytettäessä pidä teho alle 7 W.

Kuvalaskentaohjelma skaalaa harmaasävyt kuvadatan mustimman ja kirkkaimman pikselin välille, mitkä todennäköisesti muuttuvat eri kuvausten kesken. Esimerkiksi röntgenputki antaa lämmitessään enemmän tehoa ja projektiokuva on kirkkaampi. Tiheysmittauksia varten harmaasävyt pitää kalibroida erillisillä kalibrointikappaleilla, kuvalaskentavaiheessa tai ladattaessa data Volume Graphics-analysointiohjelmaan.

Nikon XTH 225 **kuvausasetuksia tallentuu** useisiin tiedostoihin: "\_ctdata.txt", projektiot, kuvauskulma ja aikaleima, keskiarvoistus ja valotusaika. "nimi.ctprofile", kaikki asetukset xml-muodossa. "nimi.xtekt", iso osa asetuksista tekstimuodossa. Leikekuvat tallentuvat kansioihin "nimi\_01", "nimi\_02" jne.

Detektorin vahvistus Nikonin lokitiedostossa

	dB	6	12	18	24	30	36
<b>Numeroarvo lokitiedostossa</b>		0	1	2	3	4	5

Binning Nikonin lokitiedostossa

	Binning	1x1	2x2
<b>Numeroarvo lokitiedostossa</b>		0	1

Nikon XTH 225 käyttää Agar Scientific A054X filamentteja.

## Työpakettin Biologiset kohteet pilottikuvauksia

Anna-Liisa Välimaa, Jouni Karhu, Juha-Matti Pihlava, Veli Hieta-  
niemi, Tuomo Silvast

### Kauran lajiketunnistus $\mu$ CT-kuvantamisella

Kauralajikkeet ovat erilaisia ja niiden ominaisuudet ja käyttökohteet vaihtelevat. Tutkimuksessa selvitettiin, voidaanko mikroCT:tä käyttää kauran jyvien 3D-kuvantamiseen ja lajiketunnistukseen. Tarkastelu-kohteena oli lajikkeiden väliset erot jyvän rakenteessa.

Suomalaisten Niklas- ja Donna -kauralajikkeiden kuorimattomia ja kuorittuja jyviä kuvattiin muoviputkilossa Nikon XTH 225 röntgentomografialaitteella (SIB Labs, UEF, Kuopio). Pikselikoko oli 10 mikrometriä, kuvausjännite 100 kV ja teho 10 W. Koeputkien poikkileikekuvapakka koostui 16-bit harmaasävykuvista, joiden lukumäärä oli noin 5000. Yhden poikkileikkauksen koko oli noin 1700 x 1700 pikseliä. Yhden jyväputken poikkileikekuvapakan datamäärä oli 32 GB. Kuvadata käsiteltiin Bruker Skyscan CT Analyser v1.20.8 -ohjelmalla.

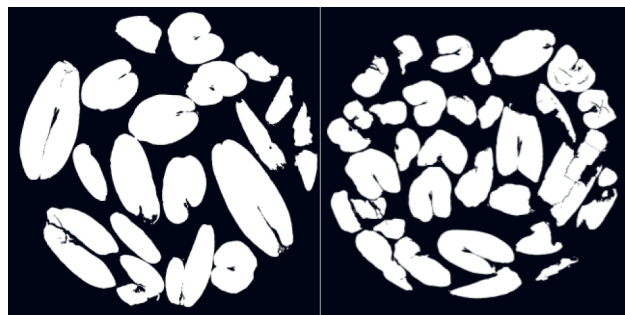
MikroCT-kuvantamisella kauran jyvistä tuotettiin 3D-kuva, jossa voitiin erottaa jyvän osasia (kuva 1). Menetelmällä voitiin havaita molempien kauralajikkeiden kuorelliset ja kuorettomat jyvät sekä niiden tilavuudet (kuvat 2 ja 3). Sen sijaan eroja kahden eri kauralajikkeen jyvien rakenteissa ei havaittu. Menetelmän soveltuvuutta kauran lajiketunnistukseen ei kuitenkaan voida arvioida vielä tämän työn perusteella, sillä mittaukset tulisi analysoida tässä toteutettua monipuolisemmin ja tehdä suuremmilla näytemäärillä.



**Kuva 1:** Kauran 3D-kuva. Jyvän osat on käsin rajaamalla erotettu omiksi stl-tiedostoikseen ja yhdistetty eri värisinä samaan kuvaan: kuori keltainen, jyvä oranssi ja alkio vihreä.



**Kuva 2:** Kuorellinen kauran jyvä. Donna-lajike vasemmalla ja Niklas oikealla.



**Kuva 3:** Kuorittu kauran jyvä. Donna-lajike vasemmalla ja Niklas oikealla.

## Perunan juurien 3D-kuvantaminen sekä kuorirokkotaudin aiheuttamat muutokset juurissa

Perunan kuorirokko on yleinen perunan laatua ja satoa alentava tauti, jota aiheuttaa *Spongospora subterranea* -mikrobi. Tauti ilmenee perunan mukuloissa sadon laatua pilaavina laikkuina ja juurissa kasvin elintoimintoja häiritsevinä infektioina, jotka voivat johtaa äkämäkasvainten muodostumiseen. Mukulaoireet tunnetaan hyvin. Sen sijaan juurioireiden kehittymisestä on vähän tietoa. Tämän työn tavoitteena oli selvittää, soveltuuko käytettävissä oleva röntgentomografialaitteisto

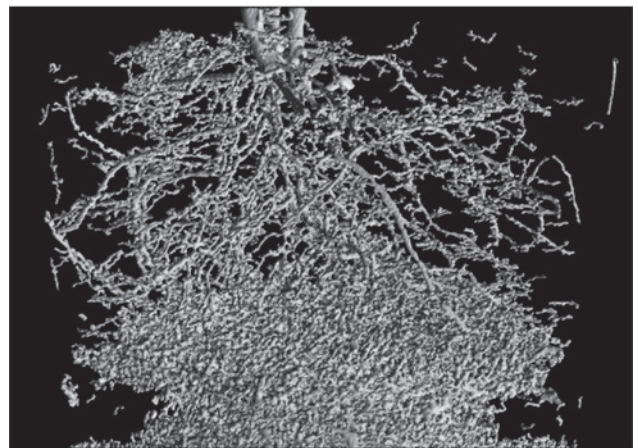
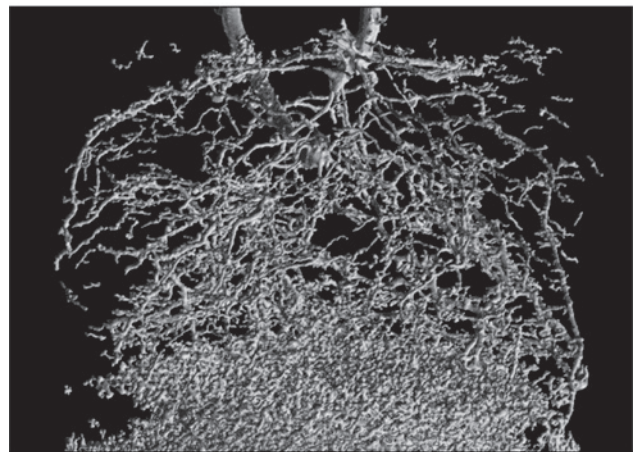
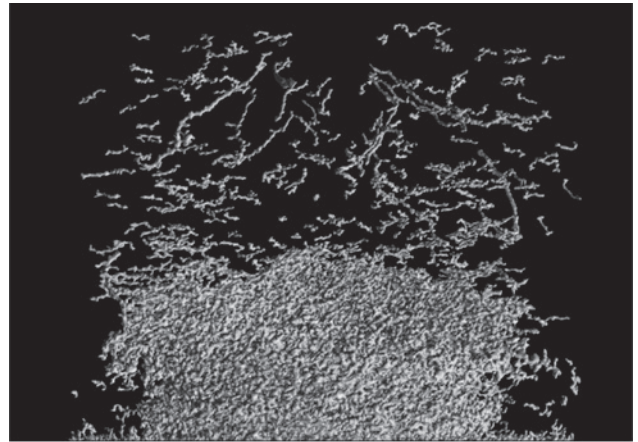
- 1) perunan juurien 3D-kuvantamiseen,
- 2) kuorirokkoinfektion seurauksena tapahtuvien muutosten havainnointiin perunan juurissa.

Perunoita kasvatettiin ruukuissa kontrolloiduissa oloissa kahden, kolmen tai neljän viikon ajan. Kasvualustana käytettiin hiekkaa. Osa perunoista tartutettiin istutusvaiheessa kuorirokkomikrobilla. Juurien havainnointia varten ruukut (16 kpl) kuvattiin kokonaisuudessaan. Tuotetun kuvadatan käsittelyyn testattiin kahta eri ohjelmaa.

### Kuvausparametrit:

- Kuvaus: Nikon XTH 225
- 210 kV, 30 W
- Kuvausaika 2 h / näyte
- Projektioita 4476 kpl, kuvausdataa 67 GB / näyte
- Pikselikoko 70 µm kuvattaessa, 140 µm muokattuna analysointia varten
- Leikekuvien datamäärä 24 GB / näyte (alkuperäinen) ja 3,1 GB (muokattu)
- Kuvadatan käsittely: RooTrak- ja Rootine v.2 -ohjelmat

Perunan juurien 3D-kuvantaminen *in situ* onnistui hyvin Nikon XTH 225 -röntgentomografialaitteistolla. Sen sijaan kuvadatan käsittely vaatii jatkokehitystä, sillä kumpikaan kuvankäsittelyohjelma ei erottanut juuria kasvualustana käytetystä hiekasta riittävän hyvin. Rootine v.2 -ohjelmalla pystyttiin löytämään ja visualisoimaan perunan juuria yksittäisistä poikkileikkauksista, mutta juurien jäljittäminen ruukussa oli ongelmallista (Kuva). Erottamista vaikeutti muun muassa kosteuserot ruukun eri osissa. Näin ollen myöskään kuorirokkomikrobin aiheuttamia muutoksia perunan juurissa ei ollut mahdollista arvioida luotettavasti. Hanke tuotti kuitenkin arvokasta tietoa ja kokemusta, jonka pohjalta röntgentomografian käyttöä perunan juurien kuvantamisessa voidaan edelleen kehittää.



**Kuva:** Esimerkkejä Rootine v.2 -ohjelmalla tuotetuista perunan juurten visualisointikuvista. Ylimpänä kahden, keskellä kolmen ja alimpana neljän viikon ikäisen perunan juuret. Kasvualustan (hiekan) kosteus ruukun alaosassa vaikeutti juurien erottamista.

## Ohran jyvien 3D-kuvantaminen sekä punahomeen vaikutukset ohran jyvien itämisprosessissa

Viljojen punahomeet ovat yksi merkittävistä viljan laatuun ja satoon vaikuttavista kasvitaudeista. Ne lisäävät viljan ja lopputuotteen mykotoksiinipitoisuutta, pienentävät jyvääkokoja, lisäävät laatuongelmia mallastusprosessissa ja heikentävät itämistä. Punahomeita aiheuttavat *Fusarium*-sienet. Aiempien Lukessa tehtyjen tutkimuksen perusteella kaurasadon mykotoksiinipitoisuudella ja itävyydellä on vahva negatiivinen korrelaatio. On kuitenkin epäselvää, miten sieni ja mykotoksiinit vaikuttavat kehittyvään alkioon ja mikä on *Fusarium*-kestävyydeltään erilaisten lajikkeiden rooli prosessissa.

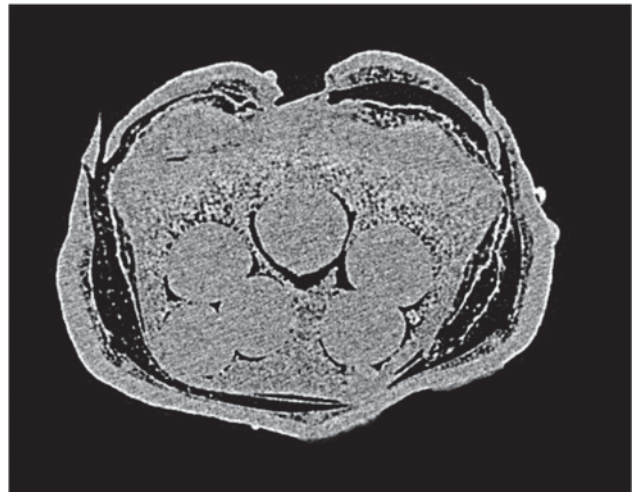
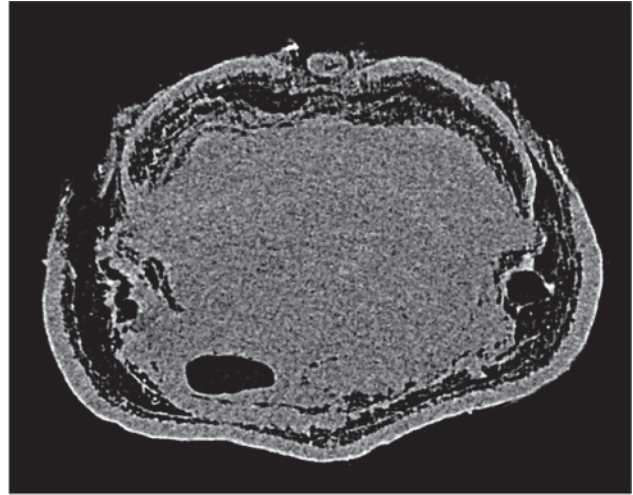
Tämän työn tarkoituksena oli selvittää:

- 1) Pystytäänkö käytettävissä olevaa röntgentomografialaitteistoa hyödyntämään ohran alkion itämisen vaiheiden kuvantamisessa.
- 2) Pystytäänkö käytettävissä olevaa röntgentomografialaitteistoa hyödyntämään ohran siemenessä olevan *Fusarium*-sienen kuvantamisessa.
- 3) Pystytäänkö käytettävissä olevaa röntgentomografialaitteistoa hyödyntämään selvitetäessä *Fusarium*-sienen / mykotoksiinin vaikutuksia ohran siemenessä.

Tutkimuksessa verrattiin kolmen *F. graminearum* -sienellä tartutetun ja idätetyn mallasohralajikkeen siemeniä tartuttamattomiin ja idätettyihin siemeniin röntgentomografiaa hyödyntämällä. Lajikkeina olivat: Harbinger, Repekka ja RGT Planet. Terve siemenmateriaali tuotettiin kasvihuoneessa kontrolloiduissa olosuhteissa. *F. graminearum* -tartunnan saanut siemenmateriaali tuotettiin tutkimuskentällä keinotekoisien tartutuksen avulla. Ennen kuvausta siemeniä idätettiin noin 5 vuorokautta vesi-agar maljoilla. MikroCT-kuvantamiset suoritettiin Itä-Suomen yliopistossa Kuopiossa.

Kuva-aineistosta pystyttiin arvioimaan eroja terveiden ja *Fusarium*-tartutettujen jyvien tärkkelyksen määrässä ja alkion kunnossa. Kuvista saatiin tietoa alkion rakenteesta itämisprosessin aikana. Kasvihuoneessa lisätystä siemenestä otetuissa kuvissa näkyi, kuinka pyöreät alkion sisällä olevat rakenteet (5–6 kpl) olivat kehittyneet. Suurimmassa osassa *F. graminearum* -tartutettuja jyviä pyöreitä rakenteita ei erottunut, vaan massa oli hyvin homogeenista (katso kuvat). Jos pyöreitä rakenteita ei näkynyt, ei jyvissä erottunut myöskään silmin nähtäviä itämisen merkkejä.

Kyseessä oli ensimmäinen *F. graminearum* -tartutetun mallasohran itämisprosessia kuvantava tutkimus. Eri tavoin tehdyt halkileikkaukset antoivat tietoa jyvän rakenteesta ja lisäsivät ymmärrystä itämisprosessista. Kuvien avulla pystyttiin vertailemaan eri jyvien tärkkelyksen määrää ja alkioden kuntoa. Kuvista ei pystynyt erottamaan *F. graminearum* -sienirihmastoja tai itiöitä.



**Kuva:** Ylempänä *F. graminearum* -tartunnan saaneen RGT Planet-lajikkeen jyvän poikkileikkaus noin 5 vrk idätyksen alusta. Alempana vastaava terveen siemenen alkio, jossa pyöreät rakenteet alkiossa erottuvat.

## Sisäkorvaimplantit

Itä-Suomen Mikrokirurgiakeskus tekee mm. sisäkorvaimplantteihin liittyvää tutkimusta. Tämän röntgentomografiatutkimuksen tarkoitus oli selvittää elektrodin asemoitumista sisäkorvasimpukassa kirurgisen toimenpiteen jälkeen. Yksi erikseen tarkasteltavista kohteista oli, onko elektrodin asentaminen rikkonut simpukan välikalvoa. Välikalvon rikkoutuminen vaikuttaa dramaattisesti kuuloaistin toimivuuteen sisäkorvaelektrodin avulla. Tomografiakuvien avulla sisäkorva-alueita voidaan tarkastella mistä tahansa suunnasta ja halutussa leiketiasossa, mikä on huomattava etu perinteiseen histologialeikkeeseen nähden.

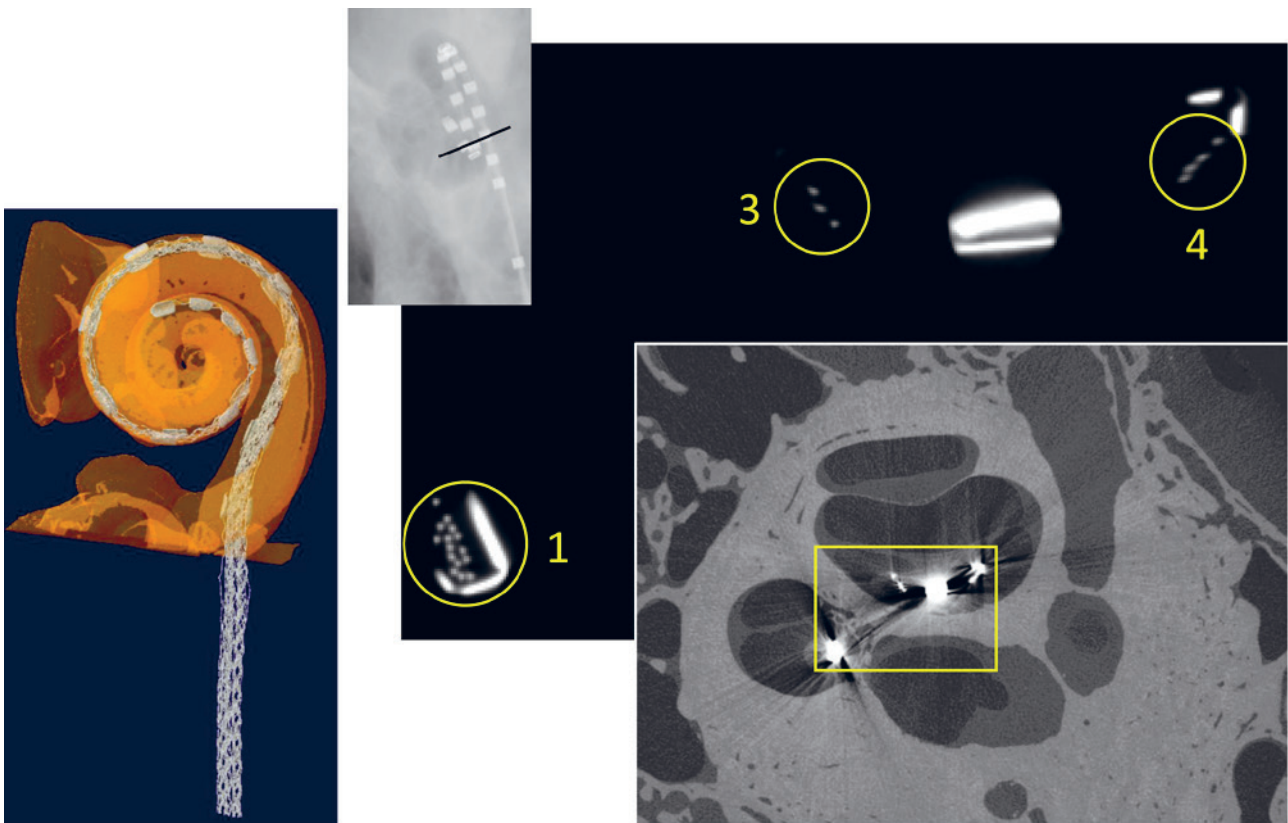
Kuvausparametrit:

- Kuvaus: Nikon XTH 225
- 150 kV, 7 W
- Kuvausaika 20 min, suodatin 0,1 mm Al
- Projektiotia 4476 kpl 360°, kuvausdataa 68 GB
- Pikselikoko 15 µm
- Leikekuvien datamäärä 8 GB
- Kuvadatan käsittely: Bruker 3D.Suite (DataViewer, CT Analyser, CT Volume)

Vertailun vuoksi voi mainita, että Skyscan 1172:lla (100 kV, 10 W, 180°) näytteen kuvaus vei 8 h, kun vastaavilla asetuksilla Nikon XTH 225 (100 kV, 10W, 360°) kuvasi näytteen yhdessä tunnissa.

Kuva vasemmalla alla: Yhdistetty 3D-kuva sisäkorva-alueen luustosta ja sisäkorvaelektrodista. Leikekuvista muodostettiin suodatettu ja binarisoitu kuvapakka, josta tehtiin omat stl-tiedostot luuosalle ja elektrodille. Näille 3D-tiedostoille annettiin omat värit ja läpinäkyvyydet ja yhdistettiin samaan 3D-kuvaan.

Kuvakollaasi oikealla: Sisäkorva-alueen yksittäinen leikekuva, jossa on nähtävissä elektrodin sijoittuminen simpukan välikalvon suhteen. Elektrodi metallisena kappaleena aiheuttaa säteittäisiä kuvaushäiriöitä. Suurennettu kuva on sama leikekuva kuin alla, mutta harmaasävykaistaa on säädetty eri tavalla. Tästä voidaan laskea jopa elektrodin johtojen lukumäärät eri kohdissa elektrodia sekä nähdä elektrodin kontaktipaksunnokset ja niiden muoto. Yläkulman pienessä kuvassa on merkitty mustalla viivalla viereisen leikekuvan sijainti.



## Nivelrusto (hevonen)

Nivelruston kuntoa selvitettiin mittaamalla varjoaineen imeytymistä nivelruston sisään. Imeytyminen laskettiin röntgentomografiakuvien pohjalta harmaasävyjen muuttumista tulkiten.

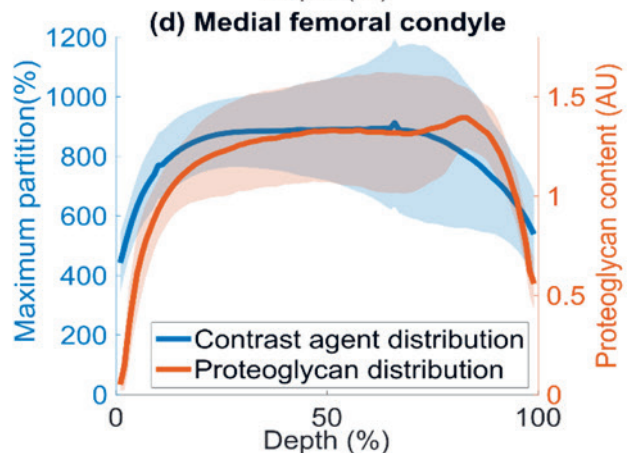
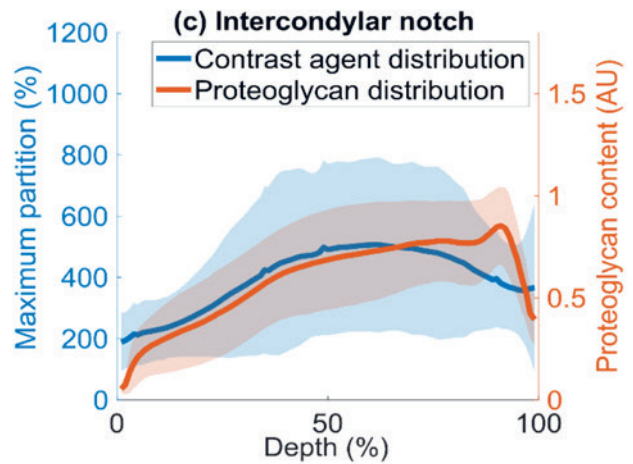
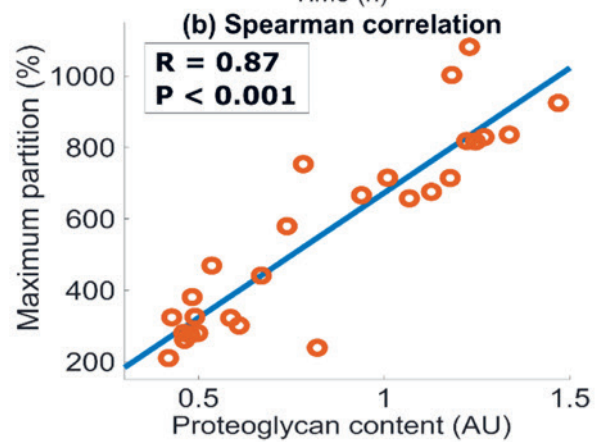
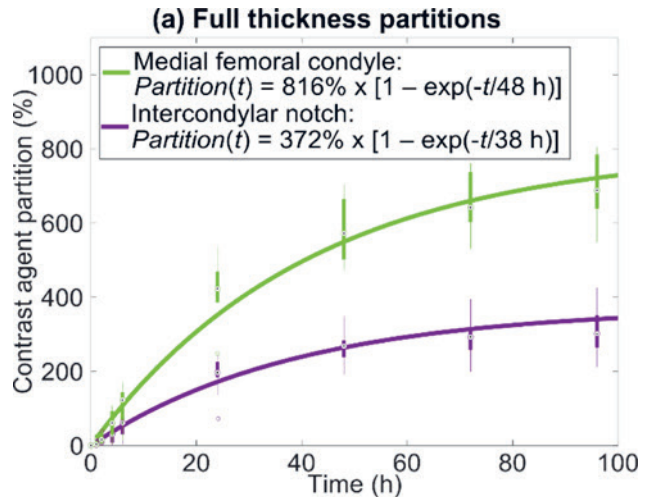
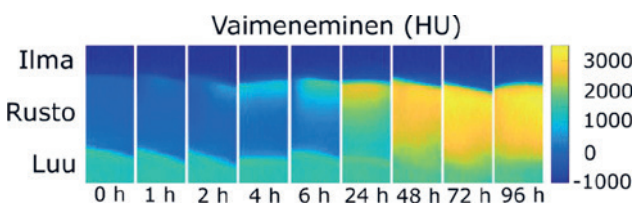
Nanovarjoaineen diffuusiomittaukset suoritettiin Nikon XTH 225  $\mu$ CT -laitteella. Hevosen nivelrusto-plugeja (lukumäärä 30, halkaisija 8,5 mm) kuvattiin ennen varjoaineen imeytymisen alkamista sekä 1 h, 2 h, 4 h, 6 h, 24 h, 48 h, 72 h ja 96 h sen jälkeen. Diffuusiomittauksissa vaatimuksena oli suorittaa kuvaus mahdollisimman nopeasti, jotta diffuusio ei merkittävästi ehdi etenemään kuvauksen aikana.

Kuvausparametrit:

- Kuvaus: Nikon XTH 225
- 150 kVp ja 25 W
- Suodatus: 0,5 mm kuparisuodatin
- Projektiot: 1 x 1440
- Pikselikoko kuvatussa: < 40  $\mu$ m (rekonstruktiot: 40  $\mu$ m)
- Kuvausaika: 6 min
- Yhden kuvauksen datamäärä: 20-25 GB projektiokuvia, 1-2 GB leikekuvia
- Kuvamuokkaus: MATLAB

Tulokset analysoitiin itse tehdyllä MATLAB (R2019b, MathWorks, Inc., USA) koodilla. Leikekuvista laskettiin keskiarvoiset vaimenemisprofiilit (havainnekuva alla), joista määritettiin keskiarvoiset varjoainemäärät koko rustossa eri ajan hetkillä.

Lopuksi estimoitiin varjoainemäärä tasapainossa sovittamalla eksponenttiyhtälö (kuva a). Rustoon imeytyneen varjoaineen määrä tasapainossa korreloi vahvasti ruston proteoglykaanien määrän kanssa (kuva b) ja varjoaineprofiilit heijastelivat proteoglykaaniprofiileja syvyyssiippuvaisesti (kuva c ja d).



## Nivelrusto (nauta)

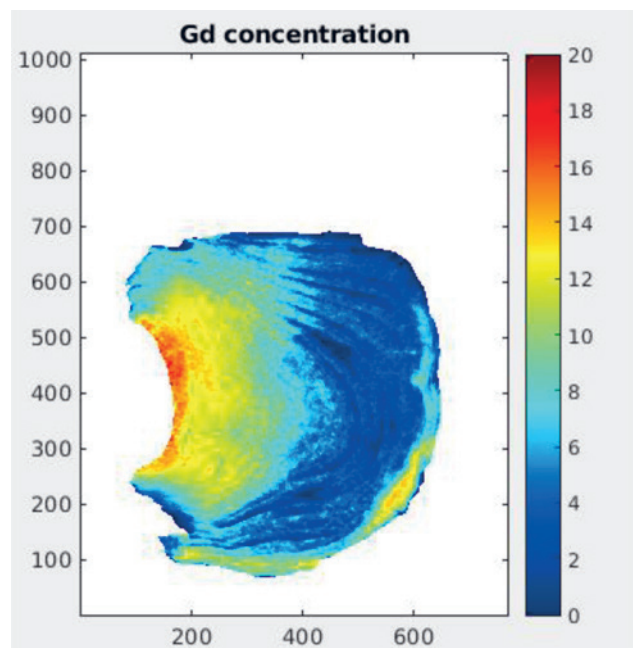
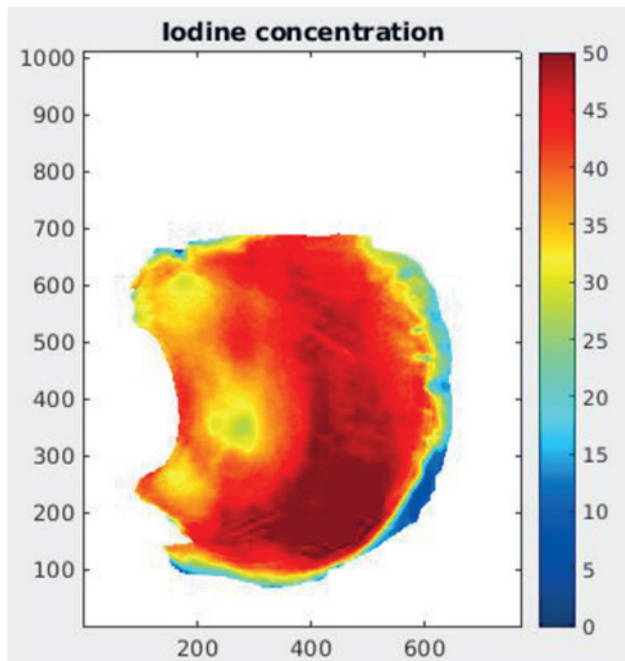
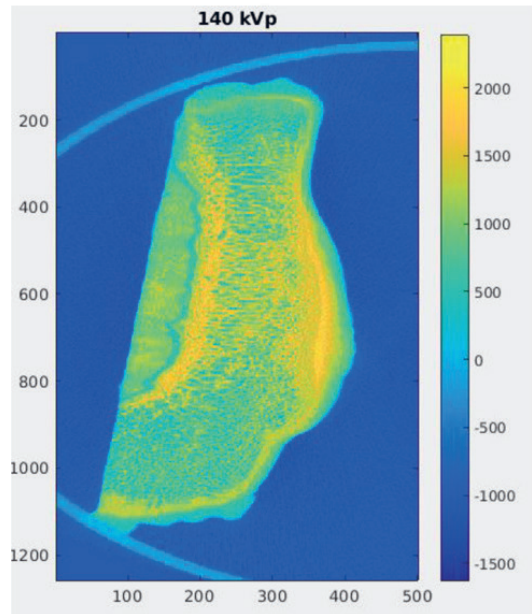
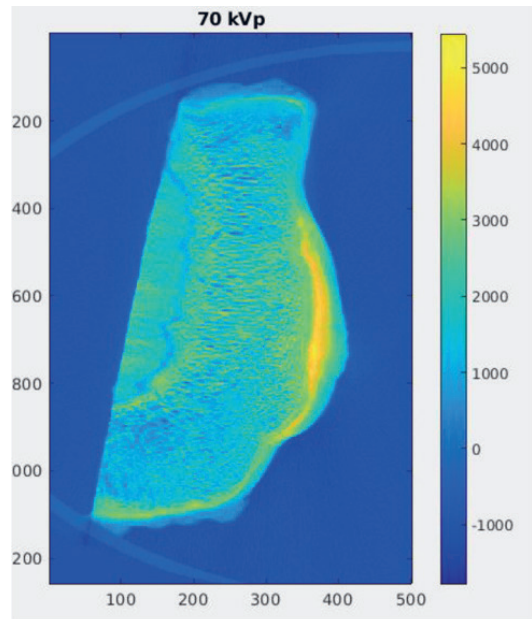
Naudan polvesta kerättiin sääriluun rustopinta kokonaisena ja rustoluunäyte upotettiin varjoaineseokseen 72 tunniksi. Varjoaineseos koostui jodipohjaisesta positiivisesti varatusta CA4+ varjoaineesta (Boston University) ja gadolinium-pohjaisesta neutraalista Gadolinium:sta (Prohance®). Kaksoisenergiakuvauksen datasta selvitettiin varjoainekonsentraatiot kalibraatiopohjaisella materiaalihajotelma -menetelmällä.

Kuvausparametrit:

- Kuvaus: Nikon XTH 225
- Matala energia: 70 kVp ja 20 W, suodatus 0,1 mm kupari, kuvausaika 13 min
- Korkea energia: 140 kVp ja 35 W, suodatus 2,0 mm kupari, kuvausaika 13 min
- Projektio: 1 x 2200
- Pikselikoko kuvatussa: 60  $\mu\text{m}$  (rekonstruktiot: 100  $\mu\text{m}$ )
- Yhden kuvauksen datamäärä: 2x 35 GB projektio kuvia, 2x 5 GB leikekuvia
- Kuvamuokkaus: MATLAB ja 3D Slicer

Rekonstruktiodataa käsiteltiin esim. mediaanisuodattimella ja analysoitiin (esim. materiaalihajotelma varjoaineille) itse tehdyllä MATLAB (R2018b, MathWorks, Inc., USA) koodilla. Analyysivaiheessa rusto segmentoitiin 3D Slicer (v4.11.202110226, The Slicer Community) ohjelmalla ja segmentoidusta rustosta tehtiin konsentraatiokartat molemmille varjoaineille.

Kuvissa oikealla on yksittäinen poikkileike näytteestä molemmilla energioilla. Pikseliarvot on muutettu leikekuvien harmaasävyistä Hounsfield Unit (HU) yksiköihin. Alakuvissa on jodin ja gadolinium konsentraatiokartat.



## Nivelrusto (humaani)

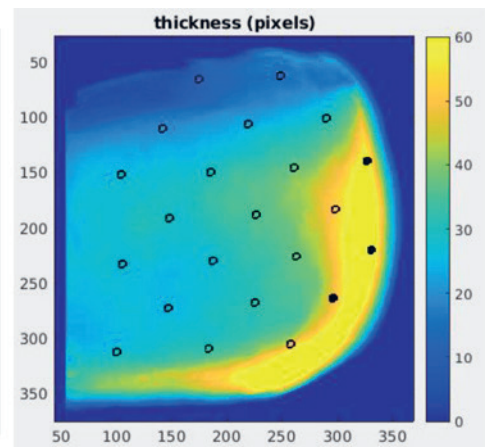
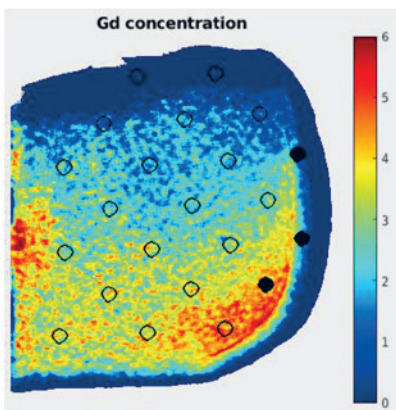
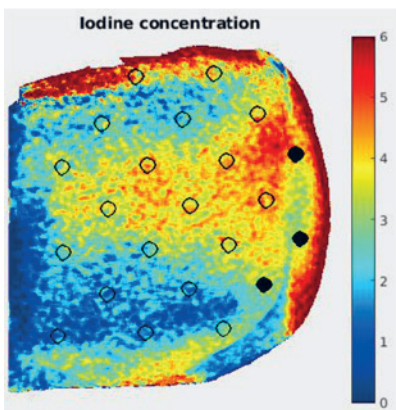
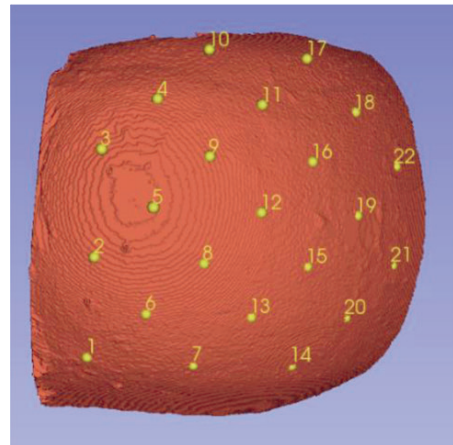
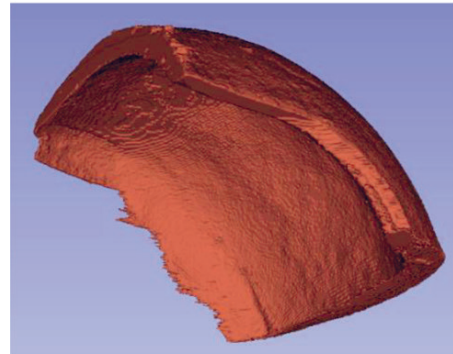
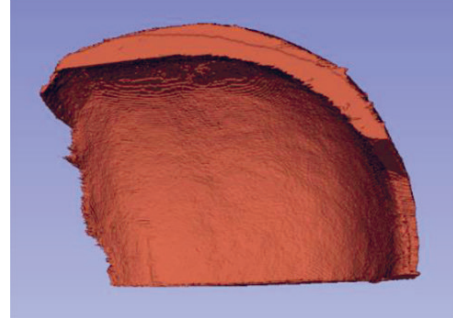
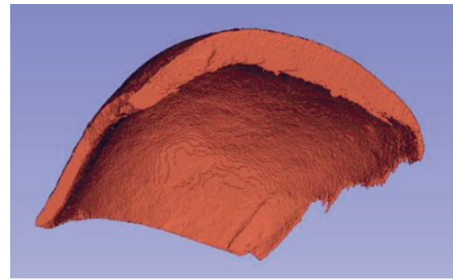
Tutkimuksessa vainajan polveen injektoitiin varjoaineseos ja tarkoituksena oli selvittää kahden varjoaineen, jodipohjaisen positiivisesti varatun CA4+ varjoaineen (Boston University) ja gadolinium-pohjaisen neutraalin Gadolinium (Prohance®), konsentraatioita nivelrustossa. Myöhemmin sääriiluun rustopinnat kerättiin vainajasta ja kuvattiin 3 tunnin jälkeen injektioista Nikon XTH 225:lla. Koska käytössä oli kaksi varjoainetta, tarvittiin kaksoisenergiakuvaus varjoaineiden konsentraation määrittämiseen.

Kuvausparametrit:

- Kuvaus: Nikon XTH 225
- Matala energia: 70 kVp ja 20 W, suodatus 0,1 mm kupari, kuvausaika 13 min
- Korkea energia: 140 kVp ja 35 W, suodatus 2,0 mm kupari, kuvausaika 13 min
- Projektiot: 1 x 2200
- Pikselikoko kuvatussa: 65 µm (rekonstruktio: 100 µm)
- Yhden kuvauksen datamäärä: 2x 30-35 GB, 2x 10 GB leikekuvia
- Kuvamuokkaus: MATLAB ja 3D Slicer

Rekonstruktiodataa käsiteltiin esim. mediaanisuodattimella ja analysoitiin (esim. materiaalihajotelma varjoaineille) itse tehdyllä MATLAB (R2018b, MathWorks, Inc., USA) koodilla. Analyysivaiheessa rusto segmentoitiin 3D Slicer (v4.11.202110226, The Slicer Community) ohjelmalla ja segmentoidusta rustosta tehtiin konsentraatiokartat molemmille varjoaineille.

Kuvissa oikealla 3D Slicerin segmentoitu nivelrusto reisiluun päästä polvesta. Alla jodi ja gadolinium -konsentraatiokartat sekä ruston paksuuskartta pikseleissä kyseiselle nivelrustonäytteelle.





## MikroCT-säteilyannoksen vaikutus männynsiementen itävyyteen

Pilotoinnissa määritettiin mikroskooppisen tietokonetomografian ( $\mu$ CT) kuvausparametrien vaikutusta männyn siemenistä (*Pinus sylvestris* L.) saatavien leikekuvien kuvanlaatuun sekä kuvauksen vaikutusta siementen itävyyteen.  $\mu$ CT-pilotti liittyi aiemmin toteutettuun mikroskooppista magneettikuvausta käsittelevään Euroopan aluekehitysrahaston Pohjois-Savon liiton kautta rahoittamaan hankkeeseen (A73998 ja A74016).

### Kuvausparametrit:

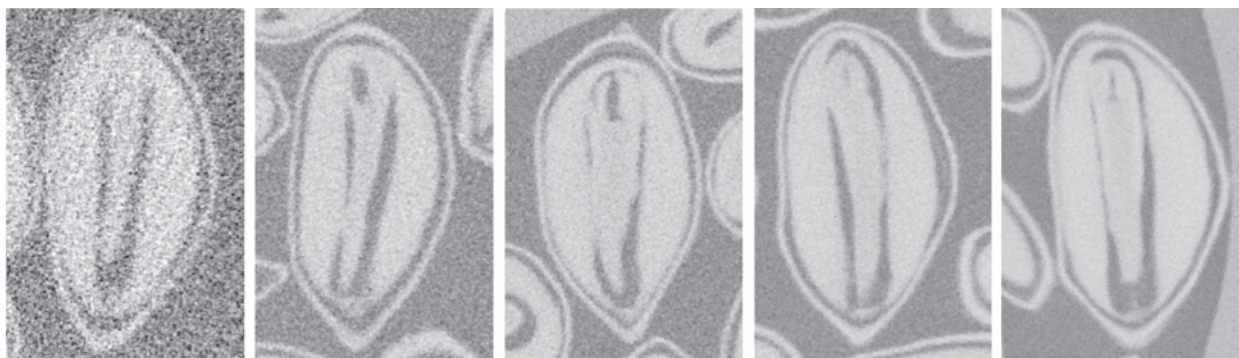
- Kuvaus: Nikon XTH 225
- 100 kV, 12 W
- Kuvausaika 1 - 40 min
- Projektioita 136 - 6738 kpl riippuen säteilytysajasta
- Pikselikoko 20  $\mu$ m
- Leikekuvien datamäärä 1 - 12 GB / kuvaus

Nykyisin metsänviljelyaineistoksi tuotettavia männyn kaupallisia siemeniä tutkitaan tasoröntgenillä erilaisten itävyyteen vaikuttavien rakenteellisten poikkeavuuksien havaitsemiseksi (mekaaniset vauriot, ongelmat kehityksessä). Menetelmä on myös yleisessä käytössä siementutkimuksessa. Tasoröntgenin kaksiulotteisuudesta johtuen osa kiinnostuksen kohteena olevista rakenteista voi kuitenkin jäädä piiloon, esimerkiksi toisten rakenteiden alle. Männyn siemenet ovat kokoluokaltaan muutamia millimetrejä, ja ne sisältävät tunnistettavina rakenteina kovan siemenkuoren sisällä (i) alkion, (ii) sitä ympäröivän vararavintosolukon sekä (iii) erilaisia kalvorakenteita. Toisin kuin tasoröntgen, tietokonetomografia mahdollistaa todellisen kolmiulotteisen tarkastelun esimerkiksi leikekuvina.

Ennen tietokonetomografian laajamittaista hyödyntämistä siementutkimuksessa on liiallisen, itävyyteen vaikuttavan säteilyannoksen määrä selvitettävä, sillä kuvantamistulokset on tarpeen yhdistää siemenistä mitattaviin muihin tietoihin, mm. itämisnopeuteen. Myös nykyisin käytetty tasoröntgen aiheuttaa pienimuotoisen säteilyannoksen, mutta sen ei ole käytännössä havaittu vaikuttavan siemenien itävyyteen.

Pilotoinnissa kuvattiin kuusi männyn kaupallista siemenereää erilaisilla kuvausajoilla muuttamalla kuvausprojektoiden määrää. Säteilyannos määritettiin erillisessä mittauksessa vaihtamalla männynsiemenien tilalle annosmittari ja toteuttamalla kuvaus männynsiementen kuvauksessa käytetyillä kuvausparametreilla. Muodostuneen datan analyysi toteutettiin pääosin laadullisena tarkasteluna leikekuvista säätämällä eri kuvausajoilla muodostettujen kuvasarjojen kontrastit mahdollisimman yhdenmukaisiksi ja vertailukelpoisiksi (kuvat alla). Kuvausten jälkeen siemenet idätettiin yhteistyökumppanin siemenlaboratoriossa (Luonnonvarakeskus, Suonenjoki), ja tarkasteltiin säteilyannosten välisiä eroja itävyydessä sekä vaihteliko säteilyn vaikutus itävyyteen siemenien välillä.

Tietokonetomografian havaittiin vaikuttavan lyhyemmällä kuvausajoilla lievästi ja pidemmällä kuvausajoilla merkittävästi siementen itävyyteen. Tulokset olivat yhdensuuntaiset kaikilla tutkituilla siemenereillä. Jotta tietokonetomografiaa voidaan hyödyntää siementutkimuksessa ja metsänviljelyaineiston kaupallisen tuotannon apuna, joudutaan tasapainottelemaan riittävän kuvanlaadun sekä säteilyvaikutusten hallitsemisen välillä.



1 min

5 min

10 min

20 min

40 min

## Jauhopukki

Jauhopukki (*Tenebrio molitor*)-kovakuoriainen kuvattiin testikappaleena. Tarkoituksena oli tarkastella rakenteiden näkymistä ja testata kuvien jatkojalostusta videoiksi ja 3D-tiedostoksi.

Kuvausparametrit:

- Kuvaus Skyscan 1172
- 40 kV, 10 W
- Projektioita 4x902 kpl (4-osainen kuvaus 360°)
- Kuvausaika 4 h 15 min
- Pikselikoko 5 µm
- Datamäärä 14 GB projektiokuvia, 5 GB leikekuvia
- Kuvamuokkaus: DataViewer, CT Analyser ja CT Volume (Bruker Skyscan)

Yksi hankkeen tavoitteista oli tomografiadatan saaminen virtuaaliympäristöön. Jauhopukin leikekuvia muokattiin selkeämmiksi suodattamalla ja kuvasarjan datamäärää pienennettiin ohjelmallisesti pikselikokoja suurentamalla. Data tallennettiin 3D-pintakuvana stl-tiedostomuodossa.

Kuopiolainen 3D Talo Finland Oy latasi 600 MB stl-tiedoston VR-ympäristöön omalla Design Space -ohjelmallaan noin 5 minuutissa. Lyhyt VR-video näkymästä on katsottavissa 3D Talon Youtube-kanavalla <https://www.youtube.com/watch?v=IGj6q7PUiJU>.



## Visakoivu

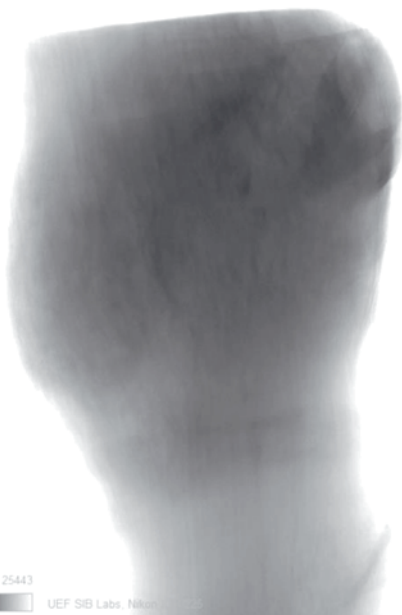
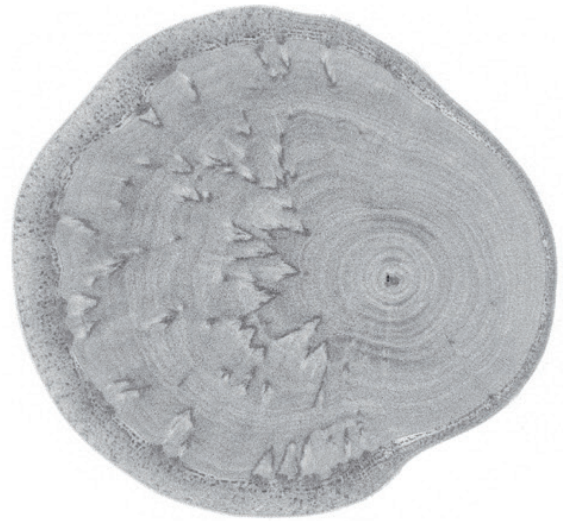
Visakoivunäytteen kuvauksella haluttiin selvittää, kuinka hyvin visa tai visaisuus näkyy röntgenkuvassa ja tomografialeikekuvissa. Todettiin, että visaisuus näkyy jopa yllättävän selvästi tomografiakuvissa.

Kuvausparametrit:

- Kuvaus Nikon XTH 225
- Kuvausjännite 100 kV, 13 W
- Projektioita 4476 kpl 360°, keskiarvoistus 16
- Kuvausaika 4 h 10 min
- Pikselikoko 100 µm
- Datamäärä 68 GB projektiokuvia, 15 GB leikekuvia
- Kuvamuokkaus: DataViewer (Bruker Skyscan)

Rungon ulkonäkö ei aina kerro missä kohdissa runkoa visaa on (kuvat alhaalla). Oikealla ylhäällä ja keskellä olevista kuvista voi vuosilustojen avulla nähdä miten visa alkaa kehittyä muutaman vuoden ikäisessä rungossa. Tomografialeikkeistä voi esimerkiksi tarkastella miltä tietty sahauspinta näyttää, kun kuvankäsittelyohjelmassa katselusuuntaa ja leikkaustasoa voi vaihtaa mielivaltaisesti jo sahauksen suunnitteluvaiheessa. Pienestä kappaleesta voi valita parhaan tai halutun sahauskohdan ennen kuin kappaletta alkaa työstää, eli tuotteen pinnassa näkyvän visakuvion voi suunnitella jo ennen työhön ryhtymistä.

Näytteet: Belluswood, Paavo Pesonen.



0 25443  
UEF SIB Labs, Nikon



## Hammaspaikkavälien tarkkuus

Tomografiakuvausten tarkoituksena oli hammaspaikkojen 3D-tulostuksen tarkkuuden ja siten paikan istuvuuden selvittäminen. 3D-tulostamalla hammaspaikka voidaan muotoilla vaativimpiinkin kohteisiin täsmällisesti.

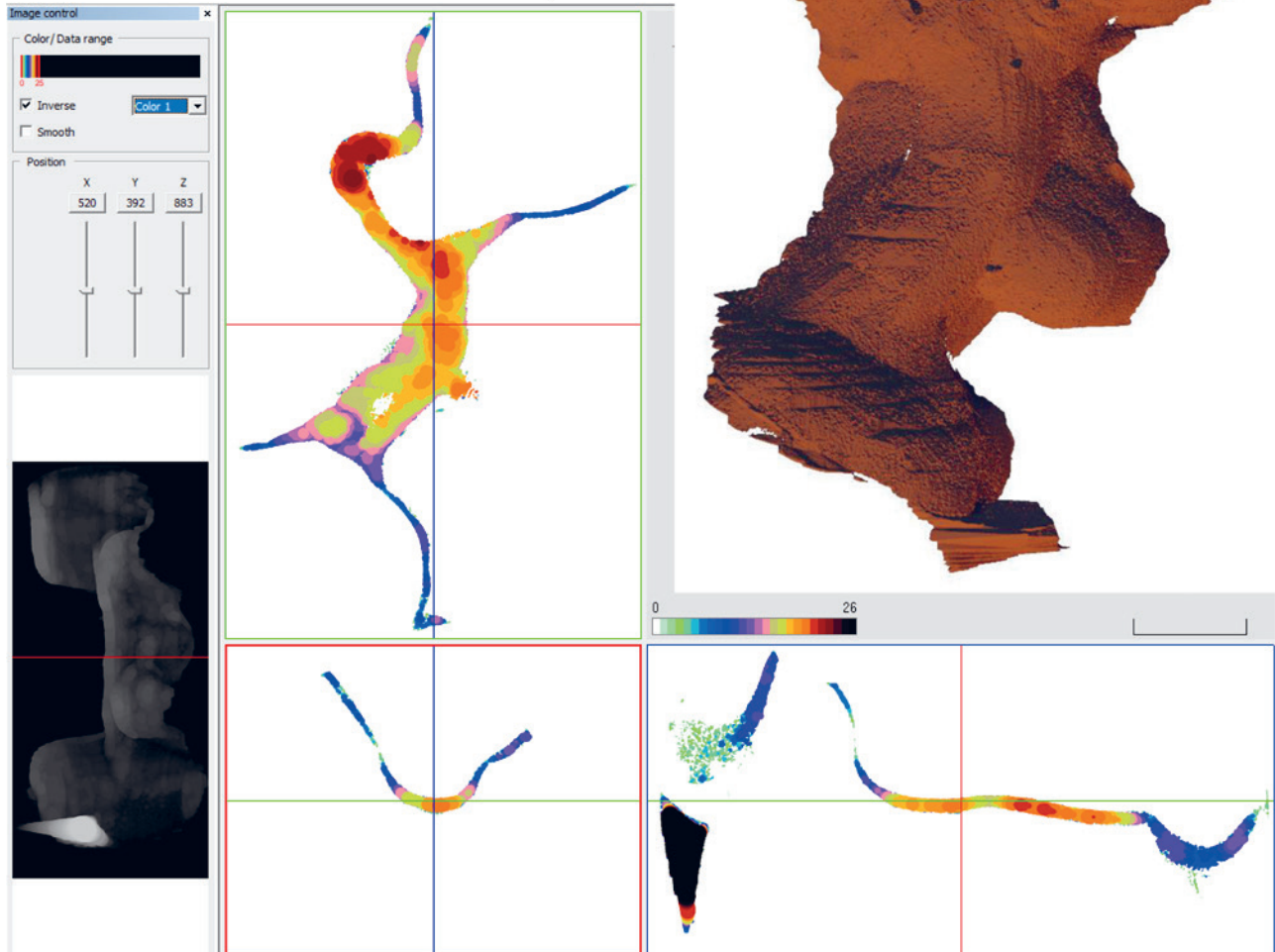
Kuvausparametrit:

- Kuvaus Skyscan 1172
- Kuvausjännite 100 kV, 10 W
- Projektiota 2 x 514 kpl 180° (kaksi sylinterikuvausta yhdistettynä), keskiarvoistus 4
- Kuvausaika 2 h 15 min, suodatoin Al+Cu, mikä vastaa 2 mm Al
- Pikselikoko 7 µm
- Datamäärä 4 GB projektiokuvia, 6,4 GB leikekuvia
- Kuvamuokkaus ja analyysit: DataViewer, CT Analyser, CT Volume (Bruker Skyscan)

Hammaspaikkojen välejä mitattiin manuaalisesti suoraan leikekuvista, jotka voitiin asemoida haluttuun suuntaan. Välitilavuudesta tehtiin myös kolmiulotteinen tilavuusanalyysi, jossa välin suuruus on visualisoitu kolmiulotteisesti eri värein (kuvat sivun alareunassa). Välin suuruus on pienin vihreän sävyisillä kohdilla ja suurenee sinisen ja keltaisen kautta lähes mustaksi. Hammaspaikan suurin läpimitta on tässä noin 7 mm. Välin tilavuusjakauma saadaan myös taulukoituna tallennettua.

Oikealla olevassa kuvassa sama paikan ja hampaan välinen tila on havainnollistettu 3D-kuvana. Joissakin kohdin on nähtävissä reikiä, mikä osoittaa paikan ja hammasluun kiinnittymiskohtia.

Tarkempia tietoja tuloksista löytyy mm. Pekka Ahlholmin väitöskirjasta (UEF 2022).



## Työpaketin Komposiittimateriaalit ja 3D-tulostus pilottikuvauksia

Ari Tanskanen

### 3D-tulosteiden tulostusvauriot, metallituloste

3D-tulostamalla valmistettuihin kappaleisiin voi eri vaiheissa valmistusprosessia syntyä erilaisia vaurioita, poikkeavuuksia tai virheitä. Tulostusprosessin aikana syntyvät virheet voivat johtua esimerkiksi vääristä valmistusparametreistä, raaka-aineen ominaisuuksista tai sopimattomista ympäristöolosuhteista, kuten liian korkeasta ilmankosteudesta. Eri tulostusmenetelmät aiheuttavat erilaisia virheitä. Esimerkiksi jauhepetimenetelmässä liian lähekkäin sijoitettuihin kappaleisiin voi syntyä roiskeita tai lämpöjälkiä. Pursottavassa menetelmässä materiaalin syöttöön liittyvät parametrit voivat aiheuttaa ylimääräisiä aukkoja rakenteeseen tai huonontaa pinnan laatua. Tulostusprosessiin ja valmistusparametreihin liittyvät virheet jäljitetään useasti siivutusohjelmaan, jolla parametrit ja kappaleiden sijoittelu määritetään. Siivutusohjelmia on paljon erilaisia eri tulostusmenetelmille, ja niissä on ohjelmasta riippuen erilaajuisesti parametrivalintoja tehtävänä.

Jälkikäsitteilyn aikana virheitä ja vaurioita voi syntyä esimerkiksi kappaleiden irrottamisen tai tukirakenteiden poiston aikana. Kaikkia virheitä ja poikkeavuuksia ei pystytä havaitsemaan silmämääräisesti niiden pienen koon tai sijainnin vuoksi. Kun tulostetut kappaleet kuvataan röntgentomografisesti, pystytään piiloon jäävät virheet havaitsemaan ja analysoimaan. Myös lisäävälle valmistukselle tyypilliset rakenteelliset ominaisuudet, kuten tulostuskerrokset ja filamenttien väliset raot, pystytään erottamaan erittäin tarkasti.

Jauhepetimenetelmällä H13 -työkaluteräksestä valmistetuissa kiinnitinkappaleissa havaittiin silminnähtävästi pieni halkeama kappaleen terävässä sisänurkassa. Halkeama toistui kaikissa tulostetuissa kappaleissa hieman eri kokoisina, ja joissakin kappaleissa halkeama vaikutti olevan vain kappaleen toisella sivulla. Ilman tarkempaa tarkastelua ei voitu varmistua, miten syväle halkeama kappaleen rakenteissa ulottuu. Röntgentomografiakuvista erotettiin selvästi halkeaman ulottuvan huomattavasti pidemmälle, kuin silmin oli nähtävissä.

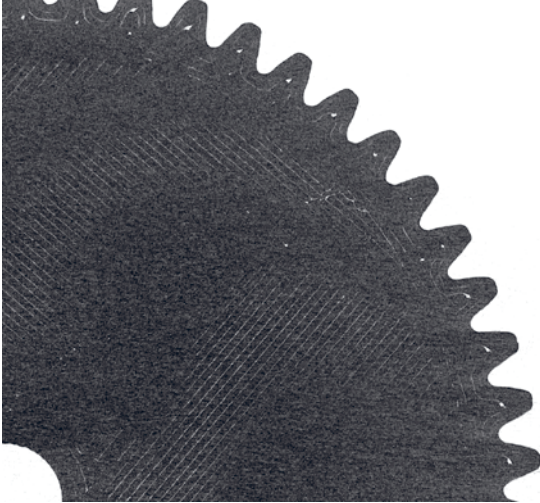
Materiaalin ominaisuuksien vuoksi H13 -työkaluteräs todettiin vaikeaksi materiaaliksi tulostaa. Tulostus tehtiin laite- ja materiaalivalmistajien suosituksen mukaisesti, mutta siltikään kappaletta ei saatu onnistuneesti tulostettua. Materiaalista tuli kuitenkin uusi versio, jolla näitä ongelmia ei pitäisi enää olla, mutta uutta materiaalia ei ehditty hankeaikana hankkimaan ja testaamaan. Sama geometria saatiin kuitenkin onnistuneesti tulostettua toisella työkaluteräksellä (1.2709 Maraging-teräs).



**Kuva:** Työkaluteräksestä tulostettu osa, jossa näkyy selkeä halkeama ylhäällä sisäkulmassa. Kuvaushäiriöt (mm. vaaleat viivat ja sävyvaihtelut tasaisella pinnalla) ovat selkeitä tiheillä metallikappaleilla.

### 3D-tulosteiden tulostusvauriot, muovituloste

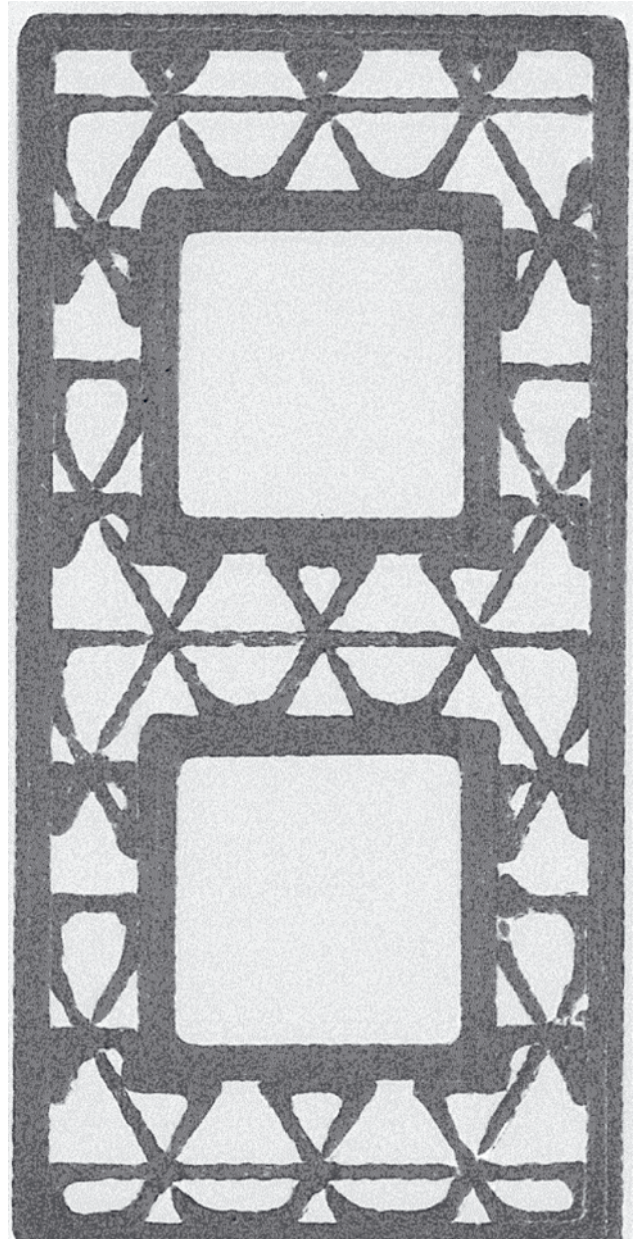
Pursottavalla menetelmällä PLA-muovista 0,1 mm kerroskorkeudella valmistetussa rattaassa näkyy rattaan hampaiden kärkiin jääneet pienet aukot. Filamenttien suunnat ovat hyvin näkyvissä ja filamenttien välissä näkyy pieniä rakoja. Nämä virheet johtuvat geometri-an siivutuksesta, johon voidaan vaikuttaa siivutusohjelmien asetuksia muuttamalla.



**Kuva:** Pursottavalla menetelmällä tulostettu ratas PLA-muovimateriaalista.

Pursottavalla menetelmällä hiilikuituvahvistetusta nailonista (Mark-forged Onyx -materiaali) valmistetun liittimen kennorakenne saatiin hyvin näkyviin röntgentomografialla. Liittimen ulkoseinämiin tulostus- ja siivutusohjelma tekee kaksi seinämäkerrosta, joiden välissä on havaittavissa pieni rako.

Tulostusohjelmiin voidaan määritellä, montako prosenttia kennorakenteen täyttöaste sisärakenteen tilavuudesta on. Analysoimalla kuvattu liitin voidaan esimerkiksi laskea kuinka paljon toteutunut täyttöprosentti todellisuudessa on.



**Kuva:** Pursottavalla menetelmällä hiilikuituvahvisteisesta nailonista tulostetun liittimen poikkileikkaus. Tulostusvirheistä on tässä havaittavissa mm. tulostuskerrosten väleissä tyhjiä onteloita ja rakenteissa paksuusvaihteluita.

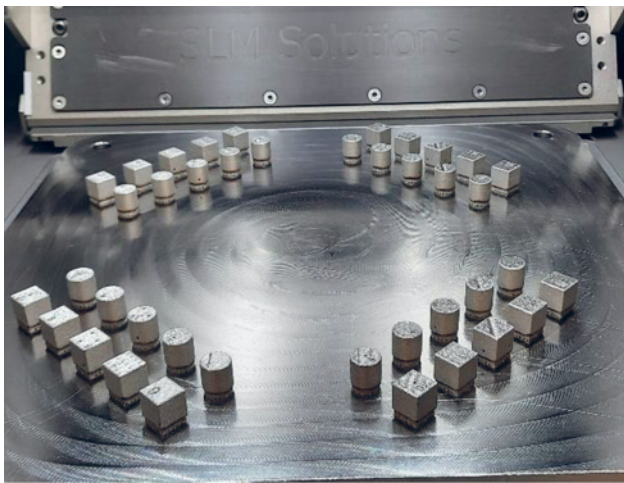
Liittimen kuvausparametrit:

- Kuvaus Nikon XTH 225
- Kuvausjännite 80 kV, 10 W
- Projektioita 3600 kpl 360°, keskiarvoistus 2
- Kuvausaika 2 h
- Pikselikoko 20 µm
- Datamäärä 54 GB projektio kuvia, 9 GB leikekuvia
- Kuvamuokkaus: DataViewer (Bruker Skyscan)

### 3D-tulosteiden sisäkanavat

3D-tulostuksen yksi suurimpia hyötyjä on mahdollisuus valmistaa geometrisesti monimutkaisia rakenteita myös kappaleiden sisälle. Tällaisia rakenteita voidaan tarvita esimerkiksi erilaisissa kanavarakenteissa. Sisäisten rakenteiden todentaminen ja laadunvarmistus on kuitenkin todella vaikeaa ilman nykyaikaisia tutkimuslaitteistoja, ja tähän tarkoitukseen mikroCT soveltuu erittäin hyvin kappaleiden ollessa riittävän pieniä.

Koekappaleina tulostettiin mm. 10x10x10 mm kuutioita ja lieriöitä, joissa on erilaisia sisärakenteita. Rakenteet suunniteltiin tarkoituksellisesti siten, että osa kanavarakenteista tulisi oletettavasti romahtamaan ja osa tulostuisi hyvin. Koekappaleet tulostettiin 316L ruostumattomasta teräksestä jauhepetimenetelmällä SLM 280HL tulostimella.

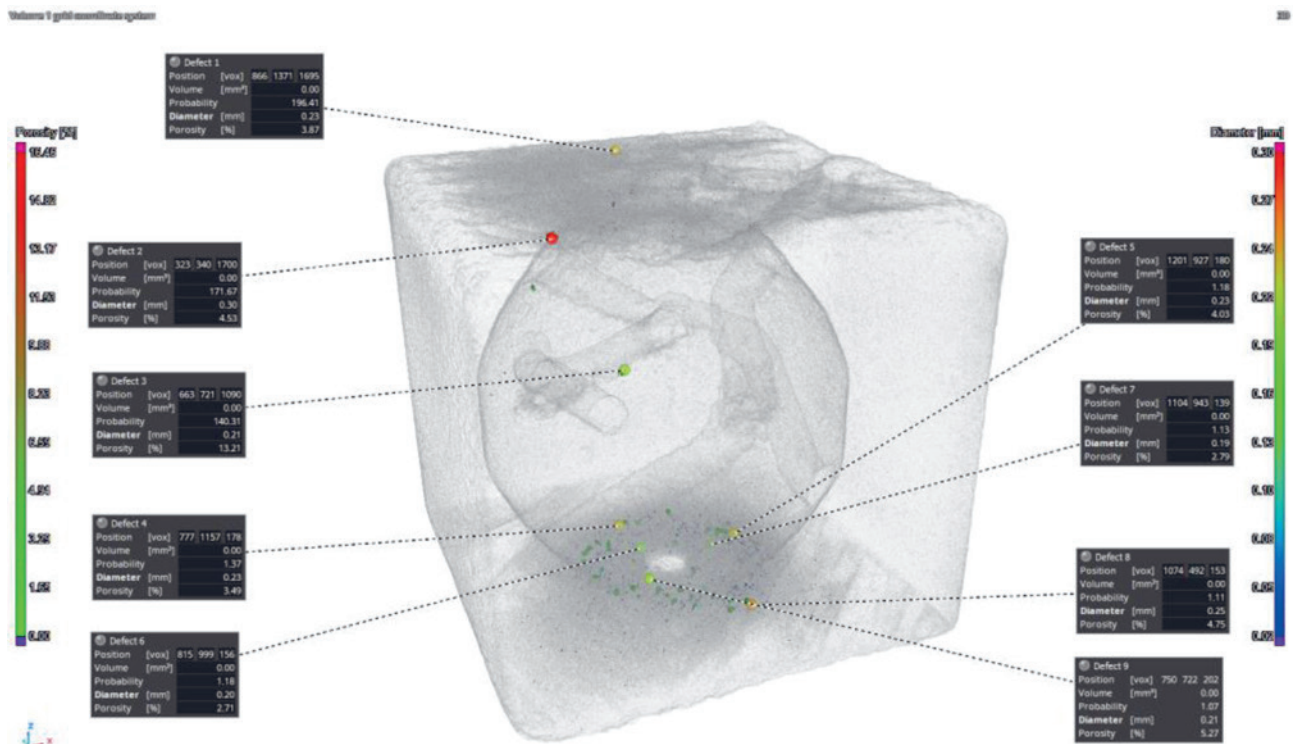


**Kuva:** Koekappaleet tulostimessa.

Koekappaleiden tomografiakuvien perusteella pystyttiin näkemään kuinka sisärakenteiden tulostaminen onnistui. Lisäksi sisäiset rakenteet pystytään erottamaan omaksi 3D-malliksi tomografiakuvien perusteella muodostetun 3D-mallin pohjalta. Koko kappaleesta pystyttiin tekemään myös huokoisuusanalyysi, jolla voidaan varmistaa rakenteen yhtenäisyys etenkin päätypintojen jauheentyhjennysreikien alueella. Tämä on tärkeä alue, koska siinä kappaleen pinta on tulostettu osittain tyhjän päälle.



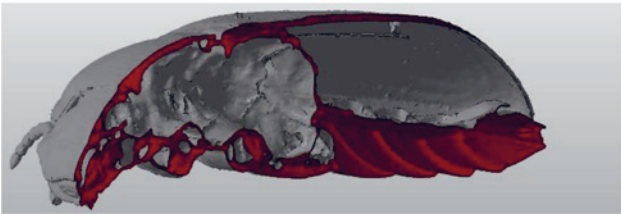
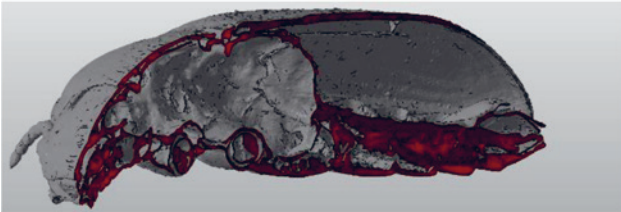
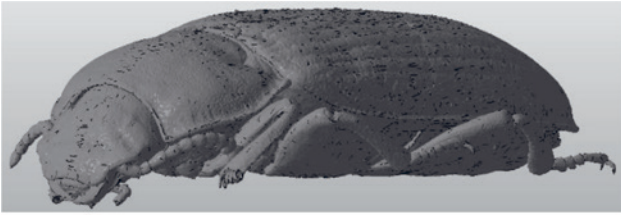
**Kuva:** Kanavarakenteet erotettuna STL-3D pintamallista. Kuvan kanavat on irrotettu suunnittelumallista.



**Kuva:** Huokoisuusanalyysi koekappaleesta Volume Graphics Studio Max -ohjelmistolla visualisoituna.

## Pintamallista 3D-tulosteeksi

Tulostus vaatii geometrian 3D-mallin STL-formaatissa olevana tiedostona. STL-tiedosto muodostaa kappaleen 3D-geometrian tasomaisten kolmioiden avulla, jolloin tasomaiset pinnat ovat tarkkoja, mutta kaarevien pintojen tarkka toistaminen vaatii paljon pieniä kolmioita. Mikäli STL-tiedoston sisältämässä geometriassa on aukkoja, ei kappaleen tulostus onnistu oikein. Mitä monimutkaisempi kappaleen geometria on, sitä todennäköisemmin STL-tiedostoissa esiintyy epätoivottuja aukkoja. Geometrian monimutkaisuus myös lisää tiedoston kokoa, joka hidastaa tiedoston käsittelyä, koska se vaatii enemmän laskentatehoa tietokoneelta.



Ennen tulostusta STL-tiedoston eheys on siis tarkastettava ja mahdolliset aukot on korjattava. Korjausta voidaan tehdä erilaisilla ohjelmistoilla, joissa on asiaan tarkoitettuja ominaisuuksia, kuten Autodesk NetFabb tai Ansys SpaceClaim.



Hankkeen aikana tulostettiin onnistuneesti röntgentomografialla kuvattu jauhopukki, josta oli tomografiakuvien pohjalta muodostettu 3D-malli STL-muotoon. MikroCT kuvatus jauhopukin 600 MB kokoista STL-tiedostoa korjattiin 3D-tulostusta varten, jonka jälkeen tiedostokoko oli noin 60 MB.

Korjauksessa jauhopukin tarpeettomat sisäiset muodot poistettiin ja tarvittavat ulkopinnat korjattiin. Tästä edelleen mallia siistittiin mm. Ansys SpaceClaim ohjelman Shrinkwrap -toiminnolla.

Lopuksi jauhopukin 3D-malli halkaistiin pituussuunnassa kahtia ja tulostettiin Stratasys J735 3D-tulostimella suuremmaksi skaalattuna Stratasys Digital ABS Plus -materiaalista.





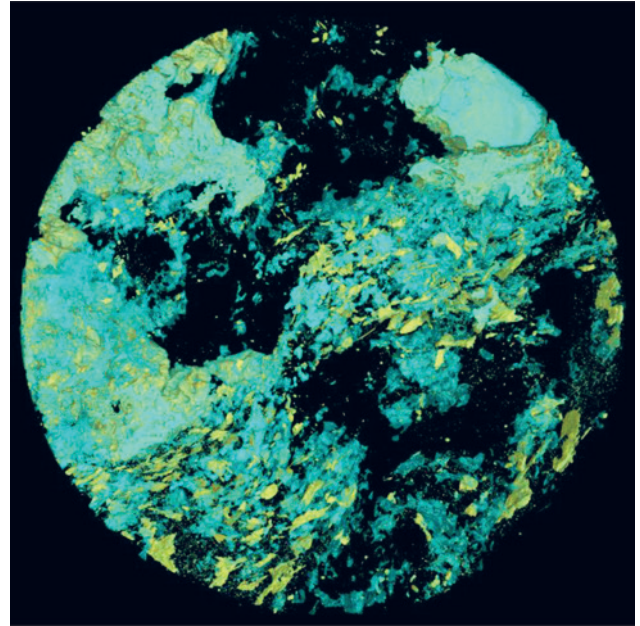
## Kivikiekko

Kivimateriaalin erilaisten mineraalialueiden erottaminen kiven sisäosissa on tärkeää esimerkiksi kaivosnäytteiden analysoinnissa. Haluttu mineraali voidaan tunnistaa kiven pinnassa, mutta mineraalialueen laajuus kiven sisällä ei ole suoraan havaittavissa. Röntgentomografialla mineraalialueet voidaan visualisoida kolmiulotteisesti.

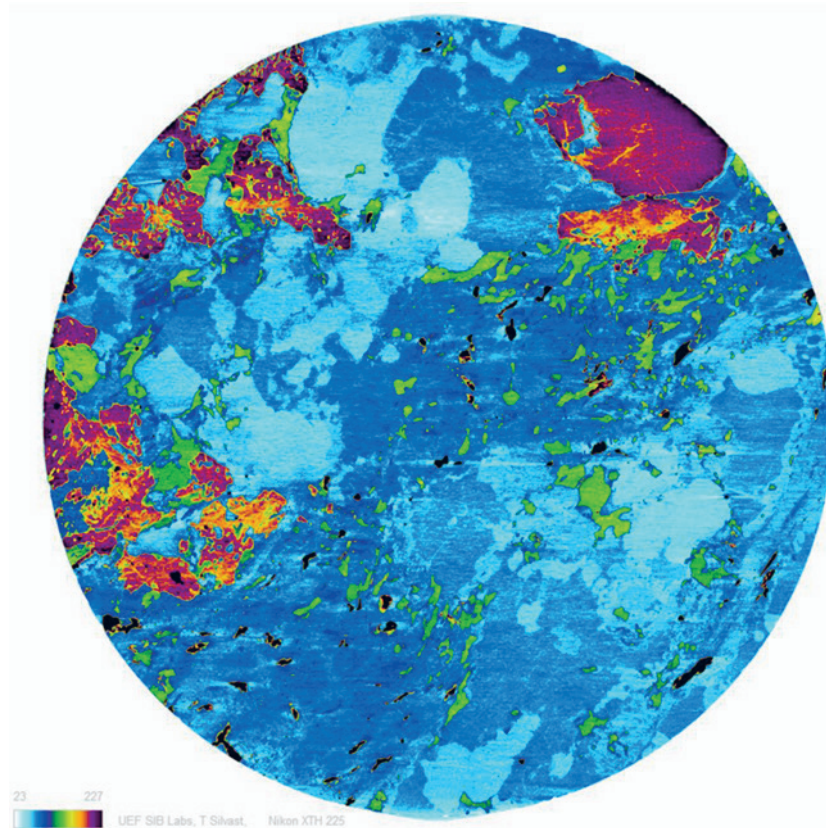
Tässä tarkoituksena oli kivikiekon kuvaus ja visualisointi esimerkinomaisesti. Kiekon halkaisija 32 mm ja paksuus 2 mm.

Kuvausparametrit:

- Kuvaus Nikon XTH 225
- Kuvausjännite 130 kV 7 W, suodatin 0,5 mm alumiini
- Pikselikoko 14  $\mu\text{m}$ , kuvausaika 1,5 h
- Projektioita 3600 kpl 360°, keskiarvoistus 4
- Datamäärä 54 GB projektiokuvia, 4 GB leikekuvia
- Kuvamuokkaukset: DataViewer, Volume Graphics Studio Max



**Kuva yllä:** *Volume Graphics Studio Max* -ohjelmalla tehty 3D-kuva kivikiekon tiheimmistä alueista. Eri tiheyksiset osat voidaan visualisoida erillisinä, jolloin esimerkiksi erilaiset mineraalialueet saadaan näkymään eri väreillä tai muusta kiviaineksesta erillään.



**Kuva:** Kivikiekon yhden 14 mikrometrin paksuisen leikekuvan väärävärivärjäys röntgenvaimennuksen mukaisesti. Tummat kohdat ovat tiheimpiä ja vaalean siniset kohdat vähiten röntgensäteilyä vaimentavia alueita.

## Yrityskohde: Komposiittilautojen kuituanalyysi

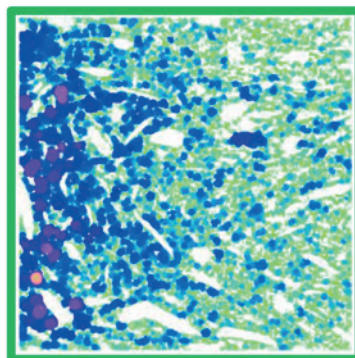
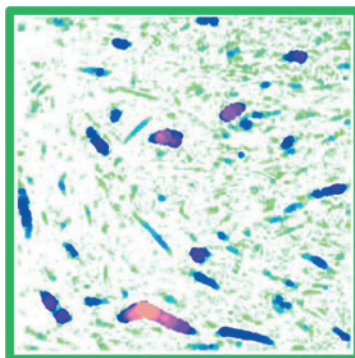
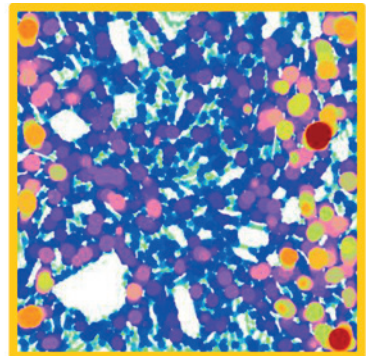
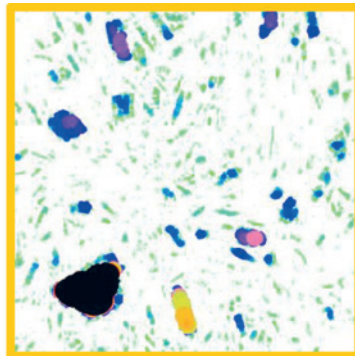
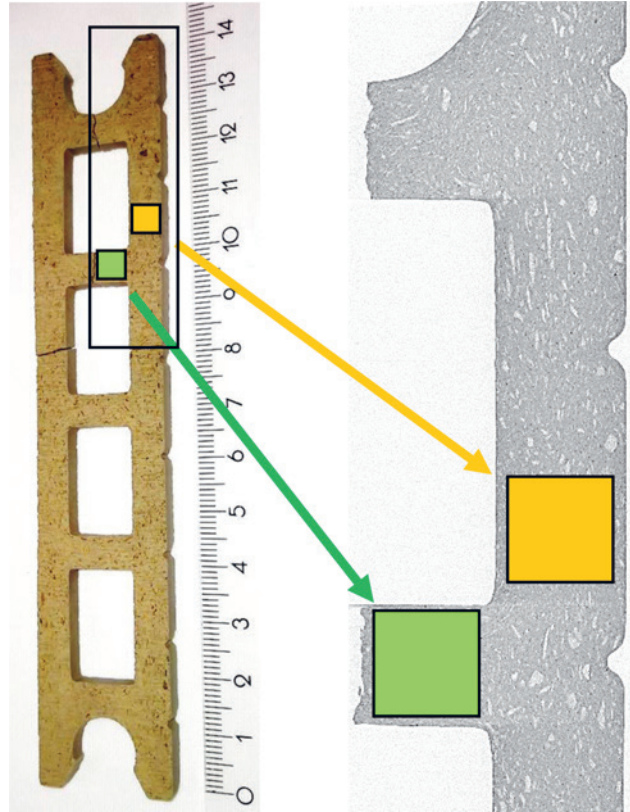
Komposiittilaudan ohut näytepala kuvattiin kuitujen kokojakauman ja suuntautumisen selvittämiseksi. Tarkkaa kuvausta varten näytekappaleesta otettiin vain pieni osa tarkasteltavaksi ja kuvattavaksi.

Kuvausparametrit:

- Kuvaus Skyscan 1172
- Kuvausjännite 60 kV 10 W, suodatiti 0,5 mm alumiini
- Pikselikoko 5  $\mu\text{m}$ , kuvausaika 4x 4 h = 16 h
- Projektioita 4x 720 kpl 180°, keskiarvoistus 3
- Datamäärä 24 GB projektiokuvia, 30 GB leikekuvia
- Kuvamuokkaukset: DataViewer, CT Analyser, CT Volume

Alkuperäisiin leikekuviiin nähden kappaleen asentoa suoristettiin, jotta analysointialueen määrittäminen saatiin suoraviivaisesti vakiokoiseksi. Kuvat muutettiin analyyseja varten 16 bit tiff-kuvista 8 bit bmp-kuviksi. Kuvien kohinaa vähennettiin kolmen pikselin säteiselällä 3D-pallo mediaanisuodatuksella. Mediaanisuodatuksen jälkeen kuvat binarisoitiin. Ennen analyyseja binaaridatasta poistettiin alle 10 tilavuuspikselin kokoiset irralliset 3D-klusterit.

Datasta laskettiin huokoisuuslukuja, materiaalilavuuksia, rakennepaksuuksia sekä mm. rakenneosasten pinnan ala ja muotoindeksit (SMI). Kuvasarjoista tehtiin myös videoita. Leikekuvavideoista kävi selville kuitusuuntautuminen ja sen muuttuminen eri kohdissa. Datasta muodostettiin myös toisen komponentin osalta 3D-kuvat (stl-muodossa) sekä niistä videot.



## Työpaketin Metallikappaleet pilottikuvauksia

Tuomo Silvast

### Hitsausvirheet

Hitsausliitoksia syntyy teollisuudessa vuosittain kymmeniä tuhansia, ja hitseissä käytännössä sallitaan tietyn tyyppisiä virheitä. Hitsausvirhe voi olla esimerkiksi ontelo, muotovirhe, halkeama tai roiske. Hitsausvirheille on tarkat standardisoidut hyväksymisrajat, joilla pyritään varmistamaan kestävä hitsausliitos.

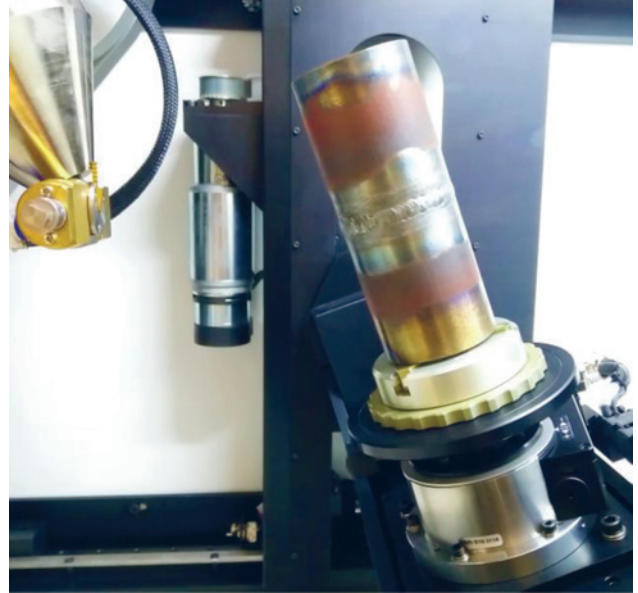
Tässä tarkastelukohteena oli testihitsin hitsausvirheiden visualisointi sekä röntgenkuvien ottaminen hitsausliitoksen laadunarviointia varten.

Kuvausparametrit:

- Kuvaus Nikon XTH 225
- Kuvausjännite 210 kV 30 W, suodatin 2,0 mm kupari
- Pikselikoko 30  $\mu\text{m}$ , kuvausaika 6 h
- Projektioita 4476 kpl 360°, keskiarvoistus 16
- Datamäärä 68 GB projektio kuvaa, 6 GB leikekuvia
- Kuvankäsittely: DataViewer ja FIJI

Sylinterimäisessä hitsauksessa hitsi kiertää sylinterin ympäri ja näkyy suoraan sivulta kuvattuna päällekkäin toisella puolella olevan hitsin kanssa (kuva alla). Nikon XTH 225 näytepöytää voidaan kallistaa 30 astetta, jolloin röntgenkuvassa nähdään sekä etupuolen että takapuolen hitsi yhtä aikaa. Näytettä on helppo myös kiertää haluttu astemäärä kallistetussa asennossa, jolloin hitsi saadaan kuvattu kolmella tai neljällä yksittäisellä läpivalaisukuvalla kokonaan. Tällaisen yhden läpivalaisukuvan ottamiseen menee aikaa muutamia sekunteja.

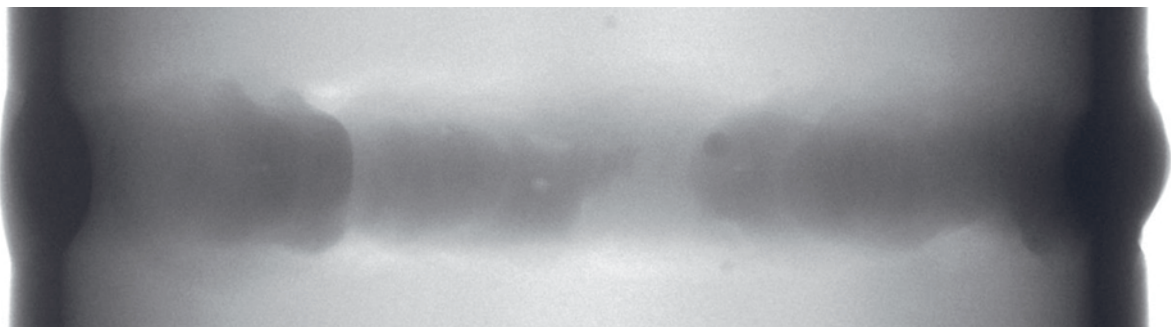
Savon ammattiopistossa hitsien tomografiakuvia on käytetty hitsaajien kouluttamisessa ja hitsausvirheiden osoittamisessa. Pienten kappaleiden hitsien tai näyttökoehitsien laaduntarkastukseen röntgenlaite on nopea ja kustannustehokas ratkaisu. Syvämmän kuvan hitsistä saa tekemällä tomografiakuvauksen.



**Kuva:** Nikon XTH 225 näytepöytä kallistuu 30 astetta sekä eteen että taaksepäin. Näytettä voi myös kiertää haluttu astemäärä kallistetussa asennossa. Istukkakiinnityksessä sylinteri on nopeasti vaihdettavissa.



**Kuva:** Sylinterihitsausliitoksen läpivalaisukuva, kun kappaletta on kallistettu, jotta hitsi nähdään sekä etu- että takapuolelta.



**Kuva:** Sylinteriputkessa olevan hitsausliitoksen läpivalaisukuva.

## Yrityskohde: Metallikappaleen huokoisuus

Metallinen testikappale kuvattiin materiaalivirheiden visualisoimiseksi sekä huokosten ja huokoisuuden määrittämiseksi.

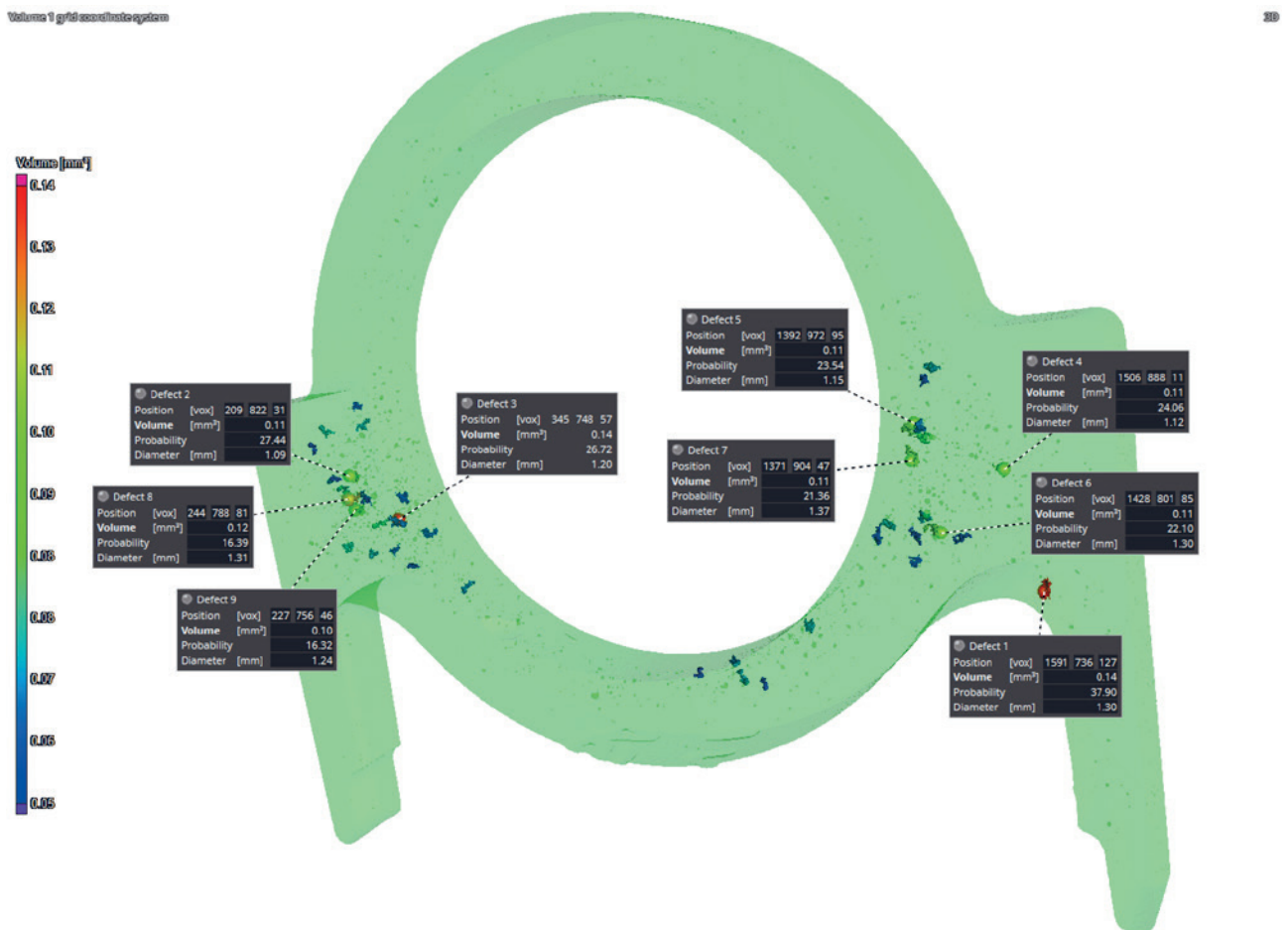
Kuvausparametrit:

- Kuvaus Nikon XTH 225
- Kuvausjännite 200 kV 20 W, suodatin 2,5 mm alumiini
- Pikselikoko 35  $\mu\text{m}$ , kuvausaika 45 min
- Projektiota 3600 kpl 360°, keskiarvoistus 4
- Datamäärä 54 GB projektiokuvia, 43 GB leikekuvia
- Kuvamuokkaukset ja analyysit: Volume Graphics Studio Max

Tomografiakuvauksen yhteydessä kokeiltiin erilaisia suodattimia ja kuvausasetuksia, jotta saatiin mahdollisimman hyvälaatuinen projektiokuva sarja leikekuvien laskentaa varten.

Data laskettiin tiff-kuvasarjaksi, jotta sitä voidaan tarkastella myös muilla kuvankäsittelyohjelmilla. Kuvat luettiin sellaisenaan analysointiohjelmaan, mikä laskee mm. jokaisen huokosen tilavuuden, läpimitan, sijainnin, muodon ja etäisyyden kappaleen pinnasta. Laskentavaiheessa ohjelmaan voi myös asettaa visualisoitavalle huokoskoolle ala- ja ylärajan, jolloin laskentaa voidaan nopeuttaa joskus huomattavastikin. Laskentatuloksia saadaan numerotaulukkona, erilaisina histogrammeina tai pistejoukkoina sekä värillisinä kuvina.

Pilottikappaleiden rakenne ja materiaalit vaihtelivat moninaisesti. Röntgentomografia-kuvausmenetelmä todettiin soveltuvaksi ja tarpeita vastaavaksi tutkimusmenetelmäksi. Mahdollisuuksia tehdä vastaavanlaisia analyysejä myös jatkossa aiotaan hyödyntää. Erityisen hyödyllinen piirre tässä tutkimusmenetelmässä on mahdollisuus analysoida rakennetta ilman mekaanista ja kappaletta rikkovaa työtä.



**Kuva:** Metallikappaleen osan analyysikuva, johon on visualisoitu muutaman suurimman huokosen paikat ja joitakin huokosen ominaisuuksia.

**SIB LABS SEMINARS**

**ADVANCED APPLICATIONS OF SPECTROSCOPIC AND IMAGING  
TECHNOLOGY IN (BIO)MEDICINE**

**Tue 7.12.2021 12:15-14:00, Teams**

**SIBabs**  
SCIENCE - INNOVATION - BUSINESS

**MicroCT IMAGING AND APPLICATIONS**

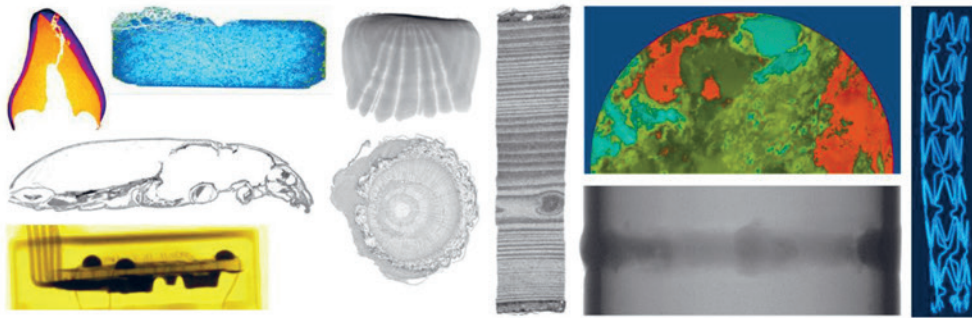
**Tuomo Silvast**, SIB Labs, UEF  
*X-ray tomography at UEF SIB Labs*

**Matti Iso-Mustajärvi**, Microsurgery Center, KUH  
*Cochlear implant imaging with micro-CT*

**Ville-Veikko Wettenhovi**, Applied Physics, UEF  
*OMEGA - open-source MATLAB emission and  
transmission tomography software*

# Tomolab

## Röntgentomografialaboratorion kehittäminen alueen uudistuvan TKIO-toiminnan tueksi



Tavoitteena on **ajankukainen**, läpäisykyvyltään tehokas ja näytekooltaan monipuolinen **röntgentomografialaite**, jolla vahvistetaan kuvantamis- ja analysointipalvelujen jatkuvuutta. Erityisesti kuvataan **biologisia ja biolääketieteellisiä materiaaleja**, komposiittimateriaaleja, 3D-tulosteita sekä **metallituotteita**. Analysoitavina piirteinä voivat olla mm. kappaleen **rakenne ja muodot**, säröt, huokokset sekä rakenneseosien suuntautuneisuus ja kokojakauma. Kuvattujen kappaleiden **3D-visualisointia** voidaan hyödyntää esimerkiksi kappaleiden laadunvalvonnassa, vaurioanalyysissä, mallintamisessa tai **lisätyn todellisuuden** materiaalina.

Strategisena tavoitteena on kehittää Itä-Suomen yliopiston tutkimus-, kehitys-, innovaatio- ja opetusympäristöä, jota voidaan **hyödyntää** monipuolisesti myös **yhteistyössä** alueen yritysten ja sidosryhmien kanssa.

**Tomolab** liittyy mm. 3D-tulostusympäristön kehittämiseen Savoniassa, Itä-Suomen Mikrokirurgiakeskuksen näytteiden rakennetutkimukseen sekä Luonnonvarakeskuksessa elintarvikkeiden ja kasvitautien tutkimukseen.

**Hankeaika 1.5.2019 – 30.4.2022**



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

Kestävää kasvua ja työtä -ohjelma

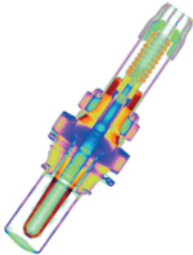
Vipuvoimaa  
EU:lta  
2014–2020



# Mikrokuvantaminen

webinaari 18.11.2020, 12.30-15.00

## μCT esimerkkejä



Happianturin rakenne



Sisäkorvaimplantin rakenne



Jyvän anatomia

Mikrokuvantamisella tarkoitetaan mikroskooppisella tarkkuudella toteutettavaa kuvantamista; alle 100 μm (10<sup>-4</sup> m) resoluutiolla.

Webinaari esittelee kahden toisiaan tukevan kuvausmenetelmän, **röntgentomografian** (μCT) ja **magneettikuvauksen** (μMRI), mahdollisuuksia erilaisten materiaalien ja eliöiden mikroskooppisessa kuvantamisessa pääosin Pohjois-Savon alueella toimivien organisaatioiden ja yritysten tarpeisiin. Webinaari sisältää laitteiden esittelyä sekä esimerkkejä näytepiloteinnista. Menetelmillä pystytään keräämään näytteistä 2- ja 3-ulotteisia kuvia, joita voidaan hyödyntää suoran anatomisen ja rakennetiedon lisäksi myös esimerkiksi erilaisissa mallinuksissa ja 3D-tulosteissa.

Tapahtuma on maksuton, mutta vaatii ennakkorekisteröitymisen.

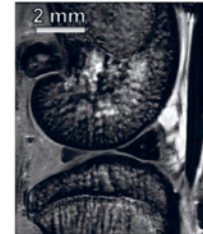
Ohjelma ja ilmoittautumisohjeet julkaistaan:

[sites.uef.fi/mikromri/tapahtumat](https://sites.uef.fi/mikromri/tapahtumat)

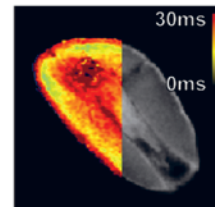
Webinaari järjestetään pääosin suomeksi.

Webinar will be held mainly in Finnish

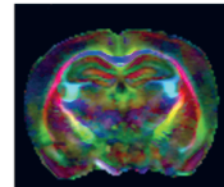
## μMRI esimerkkejä



Rotan polvinivelen anatomia



Siementen anatomia ja kvantitatiivinen analyysi



Hiiren aivojen diffuusio



Pohjois-Savon liitto tukee  
maakunnan  
menestystä



Euroopan aluekehitysrahaston kehityshankkeiden [A74016](#) (MikroMRI) ja [A74798](#) (Tomolab) yhteiswebinaari.

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

Kestävää kasvua ja työtä -ohjelma

Vipuvoimaa  
EU:lta  
2014-2020



## X-RAY TOMOGRAPHY

- Radiographic **images**, tomographic scans.
- Use **stl-file** in 3D printing, or **compare** sample dimensions to CAD-file.
- Samples from **ant** to **basketball**.
- Penetration power as much as **3 cm steel** or **12 cm aluminum**.

### Samples

- Wood, seeds, bone, tooth, implants, tablets
- Geological samples, small electronics, weldings
- 3D printed materials, composites

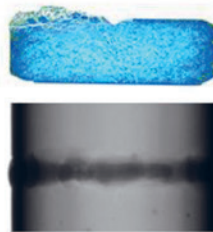
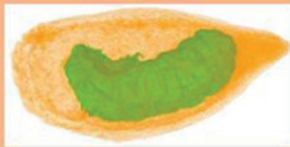
Better resolution means smaller sample, starting from 3 mm diameter.

### Research questions

- Structure? Different materials inside the sample?
- Pore location and distribution? Cracks, defects?

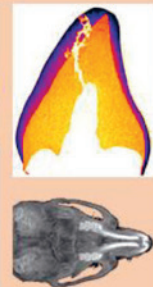
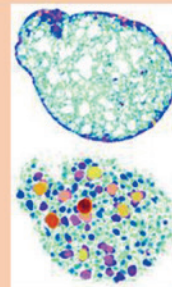
### WORKFLOW

1. Fasten the sample to the manipulator
2. Voltage, current and filter optimization
3. Imaging
4. Reconstruction with optimal settings
5. Surface and region of interest determinations
6. Analysis
7. Visualization with colours and transparency



### ANALYSIS

- Structures and structure defects
- Homogeneity
- Volume, surface area
- Pores, inclusions
- Fiber orientation



## SIB LABS INFRASTRUCTURE



### NIKON XT H 225

225 kV, 225 W  
Detector 43 x 43 cm  
2880 x 2880 pixels  
Resolution 3  $\mu$ m



### SKYSCAN 1172

100 kV, 10 W  
Detector 34 x 18 mm, 4000 x 4000 pixels  
Resolution 5  $\mu$ m

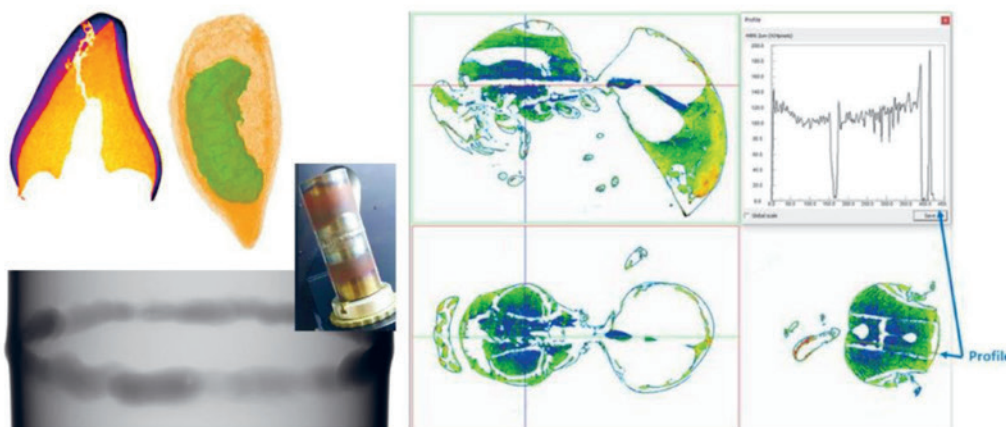
### CONTACT

Tuomo Silvast, +358 44 327 4046, tuomo.silvast@uef.fi  
Laura Tomppo, +358 40 355 2541, laura.tomppo@uef.fi



## MikroCT röntgentomografia

- Röntgentomografialla voidaan määrittää kappaleen **sisärakenne näytettä rikkomatta** mikrometriluokan tarkkuudella.
- Leikekuvasarja voidaan **suunnata ja analysoida** tarpeen mukaan. Kuvista voi nähdä **rakennevirheitä**, huokosia tai kuitujen suuntautumisen.
- Kuvasarjoista voidaan tehdä videot. Kohteen piirteitä voidaan korostaa **väärävärivärikuvas**. Leikekuvista voidaan muodostaa **3D-kuvia** ja stl-tiedostoja, ja eri tavoin rajatut osat voidaan näyttää eri väreillä. 3D-kuvista voidaan myös tehdä video.
- **Skyscan 1172** mikroCT soveltuu pienten metallittomien näytteiden kuvantamiseen. **Nikon XTH 225** soveltuu suurempien sekä metallinäytteiden kuvantamiseen.



- Näytteen koko voi vaihdella **muurahaisesta koripalloon**. Kuvattavan kappaleen **optimikoko** on halkaisijaltaan **muutama cm**, jolloin kappale saadaan kuvattua noin kymmenen mikrometrin pikselikoolla.
- Näyte **kiinnitetään liikkumattomaksi** kuvauksen ajaksi. Näytteen sulaminen, kuivuminen tai nesteliikunnot vähentävät kuvien tarkkuutta. **Kuvausaika** vaihtelee noin 20 minuutista useisiin tunteihin.

### YHTEYSTIEDOT:

Tuomo Silvast, FT  
Itä-Suomen Yliopisto, SIB Labs  
Yliopistonranta 1 E  
70211 Kuopio  
Puh. 044 3274046

<http://www.materiakeskus.fi>



**SAVONIA**



SAVON  
KOULUTUSKUNTAYHTYMÄ

Pohjois-Savon liitto tukee  
maakunnan  
menestystä



Vipuvoimaa  
EU:lta  
2014–2020



Euroopan unioni  
Euroopan aluekehitysrahasto  
Euroopan sosiaalirahasto

## MikroCT röntgentomografialaite

Nikon XT H 225 (3/2020-)

Skyscan 1172 (6/2006-)

**Röntgenkuvia** tavallisesti 180° (Skyscan 1172) tai 360° (Nikon XT H) suunnista. **Kuvausaika** on tapauskohtainen ja vaihtelee minuuteista tunteihin. **Skyscan 1172** soveltuu pienille näytteille: puu, hyönteiset, hampaat, tabletit, siemenet. Läpäisykyky kevyttä metallia < 3 mm paksuudelta. **Nikon XT H** soveltuu kaiken muun lisäksi myös metallinäytteille: läpäisykyky terästä 3 cm tai alumiinia 12 cm. Näytealusta kallistuu 30°.



### SIB Labs

Yliopistonranta 1 E  
PL 1627  
70211 Kuopio

Lisätietoja:

Tuomo Silvast  
044 327 4046

tuomo.silvast@uef.fi

	Nikon XT H 225	Skyscan 1172
<b>Kuvausala (L x K)</b>	3D: 25 x 25 cm 2D: 28 x 28 cm	3,4 x 1,8 cm (6,8 x 5,5 cm)
<b>Näyttekoko (L x K)</b>	48 x 65 cm	6,5 x 7 cm
<b>Näytemassa</b>	15 kg	0,5 kg
<b>Röntgenputki</b>	20 – 225 kV, 225 W 25 – 180 kV, 10 W	20 – 100 kV, 10 W
<b>Vokseli</b>	1 – 225 µm	1 – 35 µm
<b>Resoluutio</b>	2 µm (3 µm)	5 µm
<b>Kuvanopeus</b>	15 – 30 /s	2 – 6 /s
<b>Kuvapikseleitä</b>	2880 x 2880 1440 x 1440	4000 x 2096 1000 x 524

### Yleisin kuvauskokonaisuus

- kuvaus, kuvalaskenta ja analyysin suunnittelu,
- yksi mikroCT-kuvaus (kuvausdata tiff-läpivalaisukuvia),
- optimoitu leikekuvien laskenta ja leikekuvat (tiff tai bmp),
- yksi vakio-ROI tai VOI (sylinteri tai suorakulmainen särmiö) -2D tai 3D-analyysi tiedostoineen (.txt),
- datan toimitus asiakkaalle mahdollisesti erikseen hankittavalla tallennusmedialla.

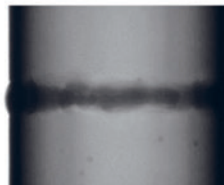


Kuva-ala (mm)	Pikselikoko (µm) lukutarkkuudella			Kuvausaika-arvio (h) lukutarkkuudella		
	4x4	2x2	1x1	4x4	2x2	1x1
Leveys x korkeus						
34 x 18	34,7	17,4	8,7	0,5	2	3-9
30 x 16	30	15	7,5	0,5	1,5	2-6
20 x 11	20	10	5	0,3	1	2-4
7 x 3.5	8	4	2	0,5	1,5	2-6
3 x 1.5	4	2	1	0,5	2	3-9

### Skyscan 1172

Kuvausaikataulukko.

Materiaalitestaukseen **puristus tai venytys** liikepituudella 6 mm ja kuormalla 220 N, näytehalkaisija < 20 mm ja näytek korkeus < 22 mm. **Jäähdytys** +20... -25°C < 10 mm näytteelle.



Vipuvoimaa  
EU:lta  
2014–2020



## Kuvaussuunnittelussa huomioitavia seikkoja

Näyte on **kiinnitettävä** niin, että näyte ei liiku kuvauksen aikana leikekuvassa havaittavasti, eikä näytteestä saa haihtua aineita kuvauskammioon. Näytteen **sulamien tai kuivuminen** aiheuttavat häiritseviä liikuntoja, ja **nestevirtaukset** voivat tuottaa häiriöitä leikekuviiin. Laitteen tuulettimen ilmavirta voi liikuttaa tai irrottaa keveitä osia näytteestä laitteen sisällä kuvauksen aikana.

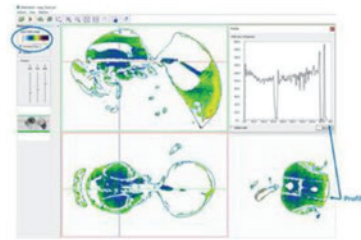
### Näytteen käsittely

- Näytteen säilyttäminen, kosteusolot? Voiko näytettä leikata tai muokata? Tarvitaanko näytteen valmisteluja?
- Miten näytteen voi kiinnittää pidikkeeseen (kiilaaminen, teippaus, liimaus)? Näytteen pintaa koskettava kiinnitys?
- Huomioi, että näyte ei sula tai kuivu kuvauksen aikana, eikä siitä haihdu aineita kuvauskammioon.
- Voiko tapahtua haitallista kontaminaatiota? Turvallinen käsittely? Käyttöturvallisuustiedote? Näytteen käsittely kuvauksen jälkeen ja hävittäminen?



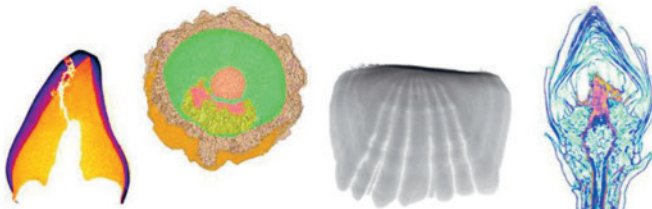
### Kuvauksen tarkoitus

- Mitä kappaleita? Montako? Minkä kokoinen näyte on?
- Mitä kuvauksella halutaan selvittää? Kuvataanko koko näyte vai jokin osa? Onko valmista kuvaus- tai analysointiprotokollaa?
- Mikä on piirteiden mittakaava? Minkä kokoinen kuvan pikselikoko halutaan?
- Tarvitaanko tiheysmittauksia? Millaisia vaimennuseroja (tiheyseroja) näytteessä on?
- Tehdäänkö analyyseja 2D tai 3D? Analysoitava alue? Millainen ROI-alue ja VOI-tilavuus? Mitä parametreja lasketaan?
- Käsitelläänkö kuvasarjaa edelleen vääräväriviksi, 3D-kuviksi tai videoiksi?
- 3D-stl? Erotetaanko kuvista joitakin osia eri värisiksi?



### Kuvien käyttö

- Miten kuvia tai tuloksia saa hyödyntää opetuksessa, tutkimuksessa ja julkaisemisessa?
- Onko salassa pidettävää aineistoa? Asiakkaan luovuttama materiaali ja asiakirjat?
- Miten kuvauskokonaisuudesta raportoidaan? Raportin sisältö?
- Mitä tiedostoja tai dataa asiakkaalle toimitetaan, tallennusmedian hankinta?
- Aikataulu ja kustannusarvio?



# TOMOLAB

## Röntgentomografialaboratorion kehittäminen alueen uudistuvan TKIO-toiminnan tueksi — Hankkeen loppuraportti

**Röntgentomografialaboratorion** kehittäminen alueen uudistuvan TKIO-toiminnan tueksi -hankepari eli Tomolab toteutettiin vuosina 2019-2022. Paikallisten yritysten ja yhteisöjen piirissä tehdyn kartoituksen pohjalta oli todettu, että Pohjois-Savon alueella on paljon toimijoita, jotka voivat hyötyä röntgentomografiapalveluista. Tomolab-hankeparissa hankittiin uusi tomografiалаite ja sen soveltuvuutta erilaisiin kehittämis- ja tutkimuskohteisiin pilotoitiin.

**Tomografiadata voidaan** analysoida numeerisesti, visualisoida kuvina ja videoina sekä käyttää esimerkiksi virtuaaliodellisuuden osana. Pilottiprojektit kattoivat monipuolisesti biologisia kohteita, komposiittimateriaaleja ja metallikappaleita, joista osa esitellään tässä julkaisussa. Visualisoinnit ja laiteasetusten luettelot antavat kuvaa siitä, millaisia näytteitä voidaan laadukkaasti kuvata ja millaisia analyysejä on mahdollista tehdä.

**Toteutettu laitehankinta** ja osaamisen lisääntyminen vahvistavat Kuopion Savilahteen keskittyvää monipuolista ja korkealaatuista kuvantamis- ja analysointikokonaisuutta, mikä on käytettävissä koulutuksessa, tutkimuksessa ja yritysten kehitystyössä.



Euroopan unioni  
Euroopan aluekehitysrahasto

Vipuvoimaa  
EU:lta  
2014–2020

Pohjois-Savon liitto tukee  
maakunnan  
menestystä



**SAVONIA**  
ammattikorkeakoulu



**SAVONIA**

ammattikorkeakoulu

ISBN: 978-952-203-305-5 (PDF)

ISSN: 2343-5496

SAVONIA-AMMATTIKORKEAKOULUN JULKAISUSARJA: 5/2022



9 789522 033055