



## **KOVAN JA PEHMEÄN JAUHELEVITTIMEN VERTAILU RAKENNUSLAA- TUUN JAUHEPETISULATUSPROSESSISSA**

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Konetekniikan kandidaatintyö

2025

Eetu Knuutinen

Tarkastaja(t): Nuorempi tutkija Sami Westman

## TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Konetekniikka

Eetu Knuutinen

### **Kovan ja pehmeän jauhelevittimen vertailu rakennuslaatuun jauhepetisulatusprosessissa**

Konetekniikan kandidaatintyö

2025

30 sivua, 5 kuvaa, 5 taulukkoa ja 11 liitettä

Tarkastaja: Nuorempi Tutkija Sami Westman

Avainsanat: Jauhepetisulatusprosessi, Pehmeä levitin, Kova levitin, Pinnanlaatu, PBF

Tässä kandidaatintyössä tutkitaan pehmeän ja kovan jauhelevittimen vaikutusta rakennuslaatuun jauhepetisulatusprosessissa (PBF). Rakennuslaatua arvioidaan pinnanlaadun ja tulostettujen kappaleiden mikro- ja makrokuvaamisella. Työ koostuu kirjallisuuskatsauksesta sekä käytännön kokeesta, joka suoritettiin EOS M290 -tulostimella käyttäen materiaalina 316 L ruostumatonta terästä.

Kolmenlaisia testikappaleita tulostettiin molemmilla levittimillä: kuutioita ulokkeilla, ohuita levyjä ja kulmassa olevia levyjä. Pinnanlaatua mitattiin profilometrillä ja sisäisiä rakenteita analysoitiin makro- ja mikroskooppikuvilla. Tulokset osoittivat, että levittimien välillä ei ollut merkittäviä eroja pinnanlaadussa. Molemmat levittimet onnistuivat tulostamaan kaikki testikappaleet, eikä rakenteellisia eroja havaittu. Sen sijaan kappaleiden geometrialla ja erityisesti tyhjän päälle rakentuvilla pinnoilla huomattiin olevan selkeä vaikutus pinnanlaatuun. Tutkimuksen perusteella levittimen valinnalla ei ole merkittävää vaikutusta rakennuslaatuun tavanomaisissa olosuhteissa, mutta kappaleen orientaatio ja muoto vaikuttavat ratkaisevasti Rakennuslaatuun. Tulokset ovat hyödyllisiä sekä tieteellisessä tutkimuksessa että teollisessa jauhepetisulatusprosessin soveltamisessa.

## ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Mechanical Engineering

Eetu Knuutinen

### **Comparison of Hard and Soft Powder Recoaters on Build Quality in the Powder Bed Fusion Process**

Bachelor's thesis

2025

30 pages, 5 figures, 5 tables and 11 appendices

Examiners: Junior Researcher Sami Westman

Keywords: PBF, Overhang, Surface quality, Powder bed fusion, 3D-printing

This bachelor's thesis investigates the differences in build quality between soft and hard recoaters in the powder bed fusion (PBF) additive manufacturing process. Build quality is evaluated based on surface roughness and through macro and micro imaging. The study includes a literature review and practical experiments using an EOS M290 printer and 316L stainless steel powder. Three types of test specimens were printed with both a carbon fiber brush recoater and a hard metal recoater: cubes with overhangs, thin plates, and angled plates.

Surface quality was measured using profilometry, and internal structures were analyzed through macro and micro imaging. The results showed minimal differences in surface quality between the two recoaters. Both recoaters successfully printed all test specimens, and no significant structural differences were observed. However, overhangs and low angle surfaces consistently exhibited poorer surface quality, regardless of recoater type. The study concludes that recoater selection has a negligible effect on build quality under standard conditions, but part orientation and geometry significantly influence surface outcomes. These findings are relevant for both academic research and industrial applications of PBF technology.

## SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

### Roomalaiset

A	Pinta-ala	$m^2$
---	-----------	-------

### Lyhenteet

AM	Additive manufacturing
----	------------------------

CAD	Computer aided design
-----	-----------------------

MAM	Metal additive manufacturing
-----	------------------------------

PBF	Powder bed fusion
-----	-------------------

Sa	aritmeettinen keskikorkeus
----	----------------------------

SEM	Pyyhkäisyelektronimikroskooppi
-----	--------------------------------

Sz	Maksimikorkeus
----	----------------

## Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

(Symboli- ja lyhenneluettelo)

1	Johdanto.....	7
2	Kirjallisuuskatsaus.....	8
2.1	Kirjallisuuskatsauksen toteutus.....	8
2.2	Materiaalia lisäävä valmistus.....	8
2.2.1	Jauhepetisulatus prosessi .....	9
2.2.2	Valmistuksessa käytettävä materiaali .....	9
2.2.3	Jauhelevitin .....	10
2.3	Kirjallisuuskatsauksen tulokset.....	11
3	Metodit .....	13
3.1	Käytännön kokeen järjestelyt.....	13
3.1.1	Testikappaleet .....	14
3.1.2	Testikappaleiden mittaus .....	15
4	Tulokset ja analyysi.....	17
4.1	Ohutlevykappaleet .....	17
4.2	Kuutiot .....	18
4.3	Levyt.....	20
4.3.1	Pehmeällä levittimellä valmistetut levyt.....	20
4.3.2	Kovalla levittimellä valmistetut levyt.....	22
5	Johtopäätökset ja yhteenveto .....	25
5.1	Pohdinta .....	25
5.2	Työn jatkotutkimusaiheet .....	26
5.3	Tutkimuksen validiteetti ja reliabiliteetti .....	27
5.4	Yhteenveto .....	27
	Lähteet .....	29

Liitteet

## Kuvaluettelo

Kuva 1: Testikappale 1 havainnollistava kuva

Kuva 2. Harjalla tulostettu ohutlevykappale OH-1

Kuva 3. Testikappale KH2 (Vasen) ja KK2 (Oikea) mikrokuva kuution keskeltä 5x tarkennuksella

Kuva 4. Testikappaleen 45H-1 yläpinta

Kuva 5. Testikappaleen 45H-1 alapinta

## Taulukkoluetelo

Taulukko 1: 316 L kemiallinen koostumus

Taulukko 2. Horn et.al tutkimuksessa saadut pinnanlaadun arvot

Taulukko 3. Harjalla valmistetuista testikappaleista saatujen pinnanlaatuksen keskiarvot

Taulukko 4. Terällä valmistetuista testikappaleista saatujen pinnanlaatuksen keskiarvot

Taulukko 5. Levittimien pinnanlaadun vertailu

# 1 Johdanto

Tässä kandidaatintyössä tutkitaan pehmeällä ja kovalla levittimellä syntyviä rakennuslaadullisia eroja jauhepetisulatusprosessilla tuotetuissa kappaleissa. Rakennuslaatu viittaa tässä tutkimuksessa pinnanlaatuun ja siihen kuinka tulostetut kappaleet vastaavat CAD-mallin muotoja. Työn ongelmana on: Selvittää millaisia rakenteellisia eroja eri levittimistä syntyy kappaleisiin, vai onko eroja edes olemassa. Työ pyrkii vastaamaan seuraaviin tutkimuskysymyksiin: Syntyykö kappaleiden pinnanlaatuun eroja, pystyvätkö molemmat levittimet tulostamaan kaikkia testikappaleita, Onko tilanteita, jossa tulisi käyttää tiettyä levitintä. Vanhan tiedon etsimistä vaikeuttaa eri tutkimuksissa käytettävät tulostin mallit, materiaalit ja testikappaleiden muodot. Useissa edeltävissä tutkimuksissa keskitytään tulostettujen kappaleiden mekaanisiin ominaisuuksiin kuten veto- ja väsymislujuuteen, mutta nämä ominaisuudet rajataan tämän tutkimuksen ulkopuolelle.

Tätä kandidaatintyötä voidaan käyttää, kun pohditaan mitä jauhelevitintä johonkin tulostukseen tulisi käyttää, sekä työstä voidaan oppia millaisia muotoja ja seinämäpaksuuksia tulisi välttää tulostuksella valmistettavaa kappaletta suunnitellessa. Työn taustana on LUT-yliopiston lasertyöstön ja lisäävän valmistuksen laboratorion hankkima hiilikuituharja levitin. Työllä halutaan selvittää, voidaanko harjalla tulostaa kovan levittimen sijaan, ilman tulosteiden laadun kärsimistä. Työn merkityksellisyys on tiedeyhteisössä, sekä tuotannossaan jauhepetisulatusta soveltavissa yrityksissä. Työllä voidaan myös arvioida, kuinka suurta virhettä pinnanlaatuun syntyy tyhjän päälle rakentuvaan tasoon. Tutkimus tulee koostumaan lyhyestä kirjallisuuskatsauksesta ja käytännönkokeesta. Käytännönkoe tullaan suorittamaan tulostamalla testikappaleita kovateräksisellä jauhelevittimellä, sekä hiilikuituharjalevittimellä. Testeillä pyritään löytämään tapauksia, joissa toisen levittimen käyttämisestä syntyy selvää hyötyä toisen yli. Käytännönkokeessa tullaan tulostamaan erilaisia kappaleita ja visuaalisesti tarkastelemaan niitä, sekä mittaamaan niistä pinnanlaadun arvoja. Kirjallisuuskatsauksella pyritään selvittämään edeltävistä tutkimuksista levittimien välisiä eroja. Näitä tuloksia voidaan verrata omaan tutkimukseen arvioidakseen kokeiden validiteettia.

## 2 Kirjallisuuskatsaus

Tässä pääluvussa käydään läpi kirjallisuuskatsauksen toteutuksesta ja pyritään selvittämään vastaukset seuraaviin kysymyksiin: onko pehmeällä tai kovalla levittimellä vaikutusta tulostetun kappaleen pinnanlaatuun ja syntyykö tyhjän päälle tulostamisesta ongelmia kappaleen pinnanlaatuun.

### 2.1 Kirjallisuuskatsauksen toteutus

Kirjallisuuskatsauksessa pyritään selvittämään mitä jauhepetisulatus on ja millaista edeltävää tutkimusta aiheesta on tehty. Kirjallisuuskatsaus toteutetaan käyttämällä lähteitä jauhepetisulatusprosessista ja erilaisista levittimistä. Lähteitä on haettu google scholarista ja LUT Primosta seuraavia hakusanoja käyttäen: PBF, metal 3d printing, PBF Spreader, 316 L, Additive manufacturing ja Jauhepetisulatus levitin. Lähteissä on pyritty suosimaan mahdollisimman uusia lähteitä, sekä tieteellisiä artikkeleja. Näillä ehdoilla löytyneet lähteet on luettu läpi ja työn aiheeseen sopivimmat on tallennettu. Lopuksi tarkastellaan muista vastaavista tutkimuksista saatuja tuloksia ja kerätään ne kokonaisuudeksi, sekä pyritään vastaamaan asetettuihin kysymyksiin.

### 2.2 Materiaalia lisäävä valmistus

Materiaalia lisäävä valmistus (AM) on valmistusmenetelmä, jossa kappaleita valmistetaan lisäämällä kerros kerrokselta materiaalia. Materiaalia lisäävä valmistus on kehittynyt ja yleistynyt viimeisen kolmenkymmenen vuoden aikana (Li, J. Z. et al., 2019, s. 2) ; (Fox, Kamaraj ja Drake, 2022, s.1). AM avulla pysyy valmistamaan kappaleita suoraan CAD-mallista ja käyttää materiaalina pulveria tai lankaa eikä tarvitse aihiota (Li, J. Z. et al., 2019, s. 1). Lisäävissä valmistusmenetelmissä on useita hyötyjä perinteisiin valmistusmenetelmiin verrattuna. Hosseini et.al mukaan valmistusmenetelmällä voidaan vähentää materiaalihävikkiä, valmistaa entistä pienempiä eriä sekä valmistaa monimutkaisia geometrioita (2019, s. 2). Näiden ominaisuuksien ansiosta lisäävä valmistus sopii hyvin nopeaan prototyyppi tuotantoon ja vähentää materiaalihävikkiä teollisuudessa. Valtaosa laajassa käytössä olevista

valmistus menetelmistä on materiaalia poistavia valmistusmenetelmiä AM menetelmien sijaan. Tämän takia AM menetelmät eivät ole yhtä tuttuja monille yrityksille. Tämä lisää aiheeseen tehtyjen tutkimusten merkityksellisyyttä.

### 2.2.1 Jauhepetisulatus prosessi

Jauhepetisulatusprosessi (Powder bed fusion, PBF) on metallia lisäävä valmistusmenetelmä (MAM). Tällä prosessilla valmistetaan komponentteja CAD-ohjelmistolla luoduista malleista. Tämä tapahtuu tulostusalustalla, joka on inertillä kaasulla suojatussa tilassa. Tulostus tapahtuu kerroksissa, ensin kone levittää tulostettavaa jauhetta kerroksen tulostusalustalle. Seuraavaksi laser sulattaa jauheen CAD-mallin mukaisesti kohdista, joihin tulee tulostettavaa materiaalia. Tämän jälkeen jauhelevitin levittää uuden kerroksen jauhetta. Tämä toistetaan kaikille kerroksille, kunnes lopputuloksena on toivottu kappale. Lopuksi jauhe poistetaan ja kappaleet voidaan irrottaa tulostusalustalta. Menetelmä vähentää materiaalihävikkiä, sillä kaikki sulattamatta jäänyt jauhe voidaan uudelleen käyttää. (Neikter et al., 2021)

### 2.2.2 Valmistuksessa käytettävä materiaali

316 L on laajasti käytössä olevaa ruostumatonta terästä. Materiaalista on sen hyvän hitsattavuuden ja monipuolisten käyttötärpeiden ansiosta tullut suosittu materiaali jauhepetisulatukseen (Li, Z. et al., 2019, s. 2). Se on rautapohjainen metalli, jonka suurimmat seosaineet ovat kromi, nikkeli, molybdeeni ja hiili. Materiaalin tarkempi koostumus on saatu valmistajan tietolomakkeesta esitetty ja on esitetty taulukossa 1 (EOS GmbH, 2022). PBF tarvitsee metallin jauheena, joka voidaan syöttää koneeseen. Yleisin tapa tuottaa tulostettavaksi tarkoitettua jauhetta on kaasuatomisoinnilla, sillä tällä metodilla jauheesta saadaan mahdollisimman virtaavaa (Martín, Cepeda-Jiménez ja Pérez-Prado, 2020, s. 2). Hyvä virtaavuus on hyödyksi jauhetta levitettäessä.

Taulukko 1. 316 L kemiallinen koostumus (EOS GmbH, 2022)

316 L Jauheen kemiallinen koostumus		
Materiaali	Vähimmäismäärä	Enimmäismäärä
Rauta (Fe)	Tasapainossa	
Kromi (Cr)	17.00 %	19.00 %
Nikkeli (Ni)	13.00 %	15.00 %
Molybdeeni (Mo)	2.25 %	3.00 %
Hiili (C)	-	0.03 %
Typpi (N)	-	0.10 %

### 2.2.3 Jauhelevitin

Jauhepetisulatusprosessissa jokaisen tulostetun kerroksen jälkeen tarvitaan uusi ohut kerros jauhetta tulostuspedille. Tämän kerroksen luomisen tekee jauhelevitin. Jauhelevitin tasoittaa ja pakkaa syötetyn jauheen edeltävän kerroksen päälle. Jauhelevitin valinnalla on suuri vaikutus tulosteen laatuun ja kappaleen ominaisuuksiin (Horn et al., 2024; Miao et al., 2022). Jauhelevittäjiä on useita malleja, mutta ne voidaan karkeasti jakaa koviin ja pehmeisiin levittäjiin. Karkeita levittäjiä on esimerkiksi kovateräksisiä ja keraamisia. Pehmeitä levittäjiä taas ovat hiilikuituharjat ja kumilastat. On myös olemassa rulla levittäjiä, mutta ne rajataan tämän työn ulkopuolelle. Kova levitin pakkaa jauheen tiiviimmäksi kerrokseksi kuin pehmeä, mutta aiheuttaa suurempia voimia jo tulostettuun osaan kappaleesta. Suurempi voima kohdistuu koko tulostuspetiin ja altistaa prosessin ongelmille, jos terä ottaa kontaktia tulostettavaan kappaleeseen esimerkiksi lämpölaajenemisen takia. Pehmeä levitin ei aiheuta samanlaista voimaa tulostuspetiin, mutta saavuttaa heikomman tiheyden. Tämä voi johtaa huokoisempaan rakenteeseen ja ongelmiin rakennuslaadun kanssa. Samassa tutkimuksessa mainittiin harjalevittimen olevan parempi monimutkaisen geometrian tulostamiseen, mutta tarkempaa määritelmää monimutkaiselle ei anneta (Horn et al., 2024 s. 2).

### 2.3 Kirjallisuuskatsauksen tulokset

Kirjallisuuskatsauksessa huomattiin useiden vastaavien tutkimusten keskittyvän kappaleiden mekaanisiin ominaisuuksiin, kuten vetolujuuteen ja väsymiskestävyyteen, pinnanlaadun sijaan. Lähes kaikissa tutkimuksissa kuitenkin tarkasteltiin silmin nähtäviä rakennevirheitä ja epäonnistuneita tulostuksia. Aiheen selvittämisen ja eri termien avaamisen suhteen kirjallisuuskatsauksessa päästiin tavoitteeseen.

Max Horn et.al kirjoittama tutkimus 'Laser powder bed fusion recoater selection guide— Comparison of resulting powder bed properties and part quality' on kirjallisuuskatsauksessa löydetyistä tutkimuksista parhaiten verrattavissa tähän työhön. Tutkimuksessa käytetään samaa tulostinta ja tutkitaan myös kovia ja pehmeitä levittämiä. Tutkimuksessa koekappaleet eroavat tämän tutkimuksen koekappaleista ja materiaalina käytetään Inconel 718, 316 L sijaan. Koekappaleiden erot voivat aiheuttaa eroja tuloksissa, mutta ne ovat silti verrattavissa. Tutkimuksessa saatiin taulukossa 2 esitetyt arvot levittimille. Tuloksista huomataan kovan levittimen saavan aikaan parempaa pinnanlaatua, vaikkakin ero on vain 3 % aritmeettisessa keskikorkeudessa (Sa). Myös maksimikorkeudessa (Sz) erot ovat alle mikrometrin päässä toisistaan. Tutkimuksessa myös löydetään pehmeän levittimen onnistumaan kovaa levitintä paremmin ohutseinäisten koekappaleiden tulostamisessa. (Horn et al., 2024, s. 7-9)

Taulukko 2. Horn et.al tutkimuksessa saadut pinnanlaadun arvot

Mitattava arvo	Pehmeä levitin	Kova levitin
Sa	$6.16 \pm 0.29 \mu\text{m}$	$5.98 \pm 0.21 \mu\text{m}$
Sz	$65.02 \pm 3.89 \mu\text{m}$	$64.18 \pm 5.81 \mu\text{m}$

Gülcan et.al tutkimuksessa pyrittiin selvittämään tyhjän päälle rakentuvan osan pinnanlaatua PBF prosessissa. Tutkimuksessa tulostettiin kappaleita 20, 30 ja 40 asteen nousukulmissa. Tutkimuksessa käytettiin eri tulostinta ja kobolttikromi seosta. Tutkimuksessa huomattiin matalan kulman laskevan kappaleen pinnanlaatua. Työssä tutkittiin myös levittimen suunnan vaikutusta pinnanlaatuun, mutta jättämällä kulman tarkastelu tämän työn ulkopuolelle, nähdään 30 asteen pinnanlaadun olevan noin 30 % heikompi kuin 40 asteen pinnassa. (Gülcan, Günaydın ja Tamer, 2024 s, 7–9).

Grinschek et al. tutkimuksessa selvitetään kaasutiiviin rakenteen valmistettavuutta jauhepe-  
tisulatuksessa. Tutkimuksessa käytettiin materiaalina 316 L se toteutettiin tulostamalla sy-  
linterimäisiä kappaleita, joissa oli eri nousukulmissa olevia pintoja. Tutkimuksessa huomati-  
tiin matalan kulman aiheuttavan enemmän vuotoja ja ongelmia laadun kanssa. Tuloksissa  
myös suositellaan välttämään pintoja alle 45° kulmissa ja huomasi vuotojen syntyvän kul-  
miin. Tutkimuksessa myös huomattiin paksumpien seinämäkokojen vähentävän virheellis-  
ten tulosteiden määrää (Grinschek et al., 2022 s. 12)

## 3 Metodit

Tämä kappale käsittelee työssä toteutettavaa käytännön koetta ja sen toteutusta. Kappaleessa käydään läpi myös, millaisia testikappaleita valmistetaan ja mitä laitteita valmistukseen käytetään. Myös testikappaleista mitattavat arvot ja niiden merkitys käydään läpi. Työssä on käytetty myös Microsoft Copilot tekoälyä tekstin kieliasun parantamiseen, sekä apuna tiivistelmän luomiseen. Tekoälylle on syötetty valmista tekstiä ja sitä on paranneltu tekoälyn suositusten mukaisesti.

### 3.1 Käytännön kokeen järjestelyt

Käytännön koe tullaan suorittamaan tulostamalla testikappaleita kovalla jauhelevittimellä ja uudestaan pehmeällä jauhelevittimellä. Tulostus tullaan suorittamaan EOS M290 jauhepetisulatusprosessilla toimivalla tulostimella. Tulostettavana materiaalina käytetään 316 L ruostumatonta terästä. Koe tullaan suorittamaan LUT-yliopiston lasertyöstön ja lisäävän valmistuksen laboratoriossa.

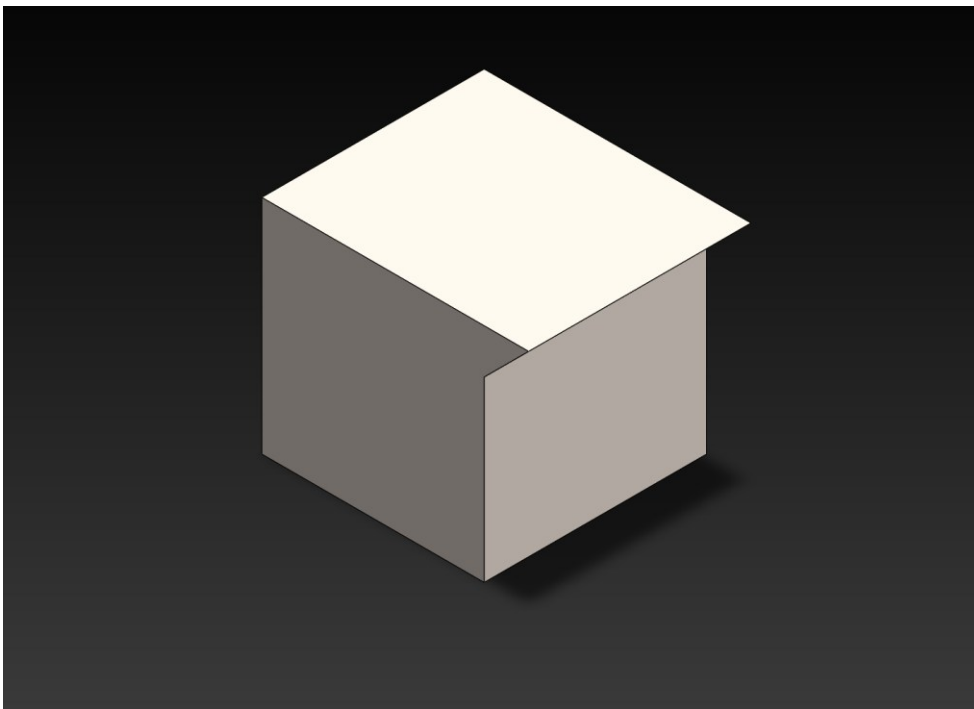
Testikappaleet tullaan suunnittelemaan Solidworks CAD-ohjelmistolla. Malleille tullaan luomaan tulostukseen tukirakenne Materialise Magics ohjelmistolla. Mallit tullaan siirtämään stereolitografiatiedostona (Stl) tulostimelle. Tulostamisessa käytettiin EOS:in 316\_040\_FLexM291 1.11 parametrisettiä. Parametreistä syntyvät vaikutukset koekappaleisiin on rajattu ulos. Testikappaleita on kolmea eri mallia, joita tullaan tulostamaan useampi kappale reliabiliteetin varmistamiseksi. Nämä eri mallit ovat seuraavia: Kuutio palikka ulokkeella, erittäin ohut levyt ja hieman paksumpi levy kolmessa eri asennossa Molemmilla levittimillä tuotettuja koekappaleita tullaan mittaamaan Keyence VR-3000 profiometrillä ja otetaan makrokuvia rakennuslaadun selvittämiseksi. Validiteetin varmistamiseksi tuloksia tullaan vertaamaan kirjallisuuskatsauksessa löydettyihin vastaaviin tuloksiin.

### 3.1.1 Testikappaleet

Testikappale 1 on kuutio, jonka särmän pituudet ovat 10 mm. Kuutiossa on yhdellä reunalla uloke, joka alkaa 8 mm korkeudelta. Testikappaleen 1 tarkemmat mitat on esitetty liitteessä (Liite 1) ja kuution muotoa havainnollistaa kuva 1. Kappaleen tarkoituksena on selvittää tulostetun kappaleen sisäistä rakennuslaatua.

Testikappale 2 on hyvin ohut levy, jonka mitat ovat 15 x 15 x 0.16 mm. Testikappale tulostetaan vaaka-asennossa. Tällä testikappaleella pyritään havaitsemaan ongelmia, jotka syntyvät, kun liian ohueen kappaleeseen kohdistuu liikaa lämpöä. Tätä ongelmaa pyritään korostamaan 0.16 mm paksuus valinnalla. Tällä paksuudella tulostin tekee yhden kerroksen kovemmalla teholla, joka on tarkoitettu sisärakenteen luomiseen. Kun tämä kerros on viimeinen tulostettu kerros, estetään sen piiloon jääminen seuraavien kerrosten alle.

Testikappale 3 on paksumpi levy, jonka mitat ovat 15 x 30 x 2 mm. Levy tulostetaan 45°, 50° ja 55° kulmissa tulostus pinnasta. Levyihin luodaan tuki vain alimpaan pohjanurkkaan, jolloin levy rakentuu tyhjän päälle. Tällä pyritään selvittämään eri nousukulmilla nousevien ulokkeiden vaikutusta pinnanlaatuun. Tällä testikappaleella myös nähdä onko kulmassa tulostetussa kappaleessa eroja ylä- ja alapinnan välillä.



Kuva 1. Testikappale 1 havainnollistava kuva

### 3.1.2 Testikappaleiden mittaus

Testikappale 1 tullaan halkaisemaan kahteen osaan laboratorioissa. Tämän jälkeen halkaisusta pinnasta otetaan makro- ja mikrokuvia sisäisen rakenteen tutkimiseksi. Kuvia otetaan 5x, 20x ja 40x tarkennuksella. Kuvat otetaan kuution keskeltä, kyljestä ja ulokkeesta. Kuvissa keskitytään eri kerroksien rajojen tutkimiseen ja mahdollisten virheiden kuten ilmakuplien tai halkeamien löytämiseen. Kuvilla pyritään myös löytämään mahdollisia eroja ulokkeen sisärakenteessa. Testikappaletta 2 tullaan tutkimaan silmämääräisesti ja makrokuvamaan erilaisten tulostus ja valmistusvirheiden löytämiseksi.

Testikappaleen 3 kaikista versioista tullaan mittaamaan ylä- ja alapinnan pinnanlaatu profiilometrillä ja suorittamaan visuaalinen tarkastelu erojen löytämiseksi. Tutkimus tullaan suorittamaan kappaleiden molemmille pinnoille. Pinnanlaatua tarkastellaan ottamalla pinnan aritmeettinen keskikorkeus ja maksimikorkeus. Profilometrillä saadaan myös kuvaajat, joista nähdään pinnan korkeuden arvo pituus ja leveys suunnissa. Talteen otetaan myös topografinen kartta kappaleen pinnasta. Mitatessa tullaan käyttämään korjausta pinnan kieroudesta, jos tarpeen.

Testitulokset tullaan nimeämään seuraavalla järjestelmällä. Testikappaletta 1 tullaan kutsumaan nimellä KX, jossa X on harjalevittimellä H ja kovalla levittimellä K. Testikappaletta 2 tullaan kutsumaan OX-n, jossa n on identtisten kappaleiden juokseva luku. Esimerkiksi toista harjalla valmistettua ohutlevyä kutsutaan 'OH-2'. Testikappaleet 3 nimetään mallilla 45X-nA. Tässä mallissa ensimmäinen numero on kulma, jossa kappale on tulostettu, X ja n toimivat samoin kuin toisissa kappaleissa ja viimeinen kirjain A/Y tarkoittaa kappaleen alatai yläpintaa. Esimerkiksi harjalla 45 asteen kulmassa tulostettu toisen kappaleen alapinta nimetään '45H-2A'.

Pinnanlaatua mitataan standardin SFS-EN ISO 25178-2 mukaisilla Sa ja Sz arvoilla. Molemmat arvot kuvaavat pinnanlaatua eli kuinka karhea ja epätasainen pinta on. Molemmissa arvoissa pienempi on parempi. Esimerkiksi hiomapaperilla olisi korkea Sa arvo ja laakerin pinnoissa taas matala Sa arvo. Sa ja Sz ovat kolmiulotteisia versioita Ra ja Rz arvoista, joilla

mitataan pinnanlaatu suoralla viivalla.  $S_a$  on pinnan aritmeettinen keskikorkeus. Tämä tarkoittaa sitä, kuinka kaukana keskimääräinen piste on pinnan keskikorkeudesta. Arvo lasketaan seuraavalla kaavalla.

$$S_a = \frac{1}{A} \iint_A |Z(x, y)| dx dy$$

Jossa  $A$  on mitattava pinta-ala. Tässä työssä profilometri laskee  $S_a$  arvon.  $S_z$  arvo tarkoittaa maksimi eroa, joka on pinnan korkeimman huipun ja matalimman kuopan välillä. Myös tämä arvo saadaan tuloksena profilometriltä (SFS-EN ISO 25178-2:2022:En).

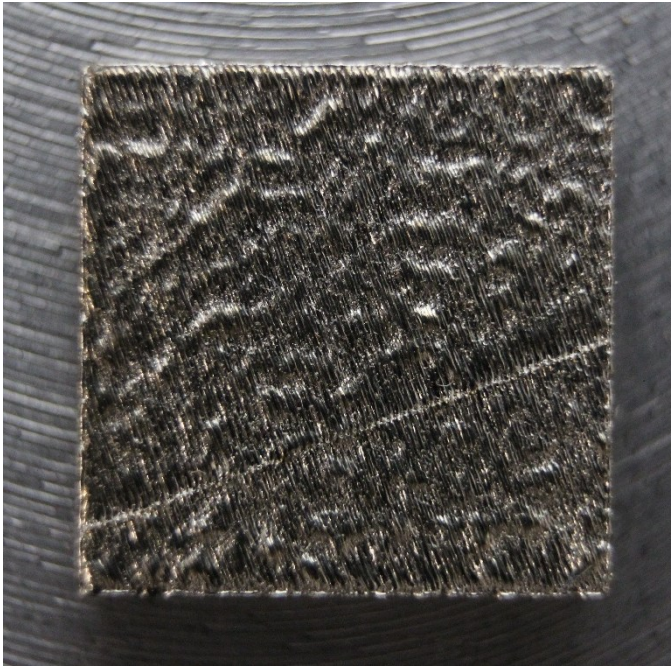
## 4 Tulokset ja analyysi

Tässä kappaleessa tullaan käymään läpi testeistä saatuja tuloksia. Kaikki kappaleet tulostuivat onnistuneesti. Laserilla merkatessa testikappaleita tapahtui virhe. 50 ja 45 asteen paksut levyt merkattiin ristiin väärillä kulmilla. Tämä on korjattu jälkeenpäin kutsumalla levyjä oikeilla nimillään väärästä lasermerkkauksesta huolimatta.

### 4.1 Ohutlevykappaleet

Ohutlevy testikappaleita ei irrotettu tulostusalustasta ennen kappaleiden kuvaamista. Tämä tehtiin välttääkseen irrottamisesta levyyn syntyvää vahinkoa. Harjalla valmistetussa ohutlevyissä on näkyvissä epätasaisuutta ja jonkinlaista ongelmaa tulostuksessa (Kuva 2). Makrokuva vahvistaa pinnan epätasaisuuden ja tulosteen epäonnistumisen (Liite 2). Kappaleeseen syntyy selkeä vinottainen raja, joka on havaittavissa paljain silmin. Molemmat tulostetut kappaleet OH-1 ja OH-2 ovat hyvin samankaltaisia ja samat ongelmat esiintyvät molemmissa kappaleissa.

Tarkemmin pintaa tarkastellessa kuvassa nähdään suunta, jossa laser on sulattanut jauheen. Liitteessä 2 näkyy paljon ylimääräistä metallia, joka voi johtua kappaleen puutteellisesta puhdistuksesta ennen kuvausta. Virheiden muodosta ei löydy yhteistä jatkuvaa tekijää tai muotoa. Kuopat ja huiput vaikuttaisivat syntyvän hyvin sattumanvaraisesti. Kuvassa 2 näkyvät epätasaisuudet ovat huomattavasti suurempia kuin tarkemmassa kuvassa näkyvät epätasaisuudet laserin kulkusuunnassa. Tämä viittaisi ongelman johtuvan jostain ilmiöstä sen sijaan että prosessi olisi vain epätarkka tai kykenemätön tuottamaan tämänkaltaista kappaletta. Koska kaikki 4 tulostettua ohutta levyä epäonnistuivat, uskoisin ongelman olevan liian ohuessa paksuudessa. Tulostin ei jostain syystä pysty tulostamaan näin ohuita levyjä onnistuneesti.



Kuva 2. Harjalla tulostettu ohutlevykappale OH-1

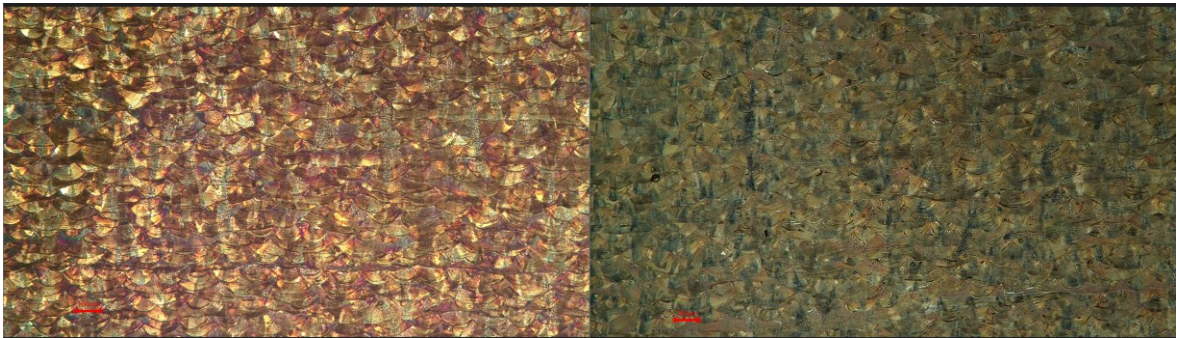
Myös kovalla levittimellä valmistetuissa kappaleissa esiintyy samoja ongelmia kuin harjalla valmistetuissa. Silmin ei ole nähtävissä selkeää eroa kovan ja pehmeän levittimen välillä. Koska molemmilla levittimillä valmistetuissa kappaleissa esiintyy huomattavia eroja, syntyvät ongelmat liian ohuesta seinämäpaksuudesta. Ongelman välttämiseksi molemmilla levittimillä kannattaisi käyttää paksumpia seinämiä kappaleita suunniteltaessa.

#### 4.2 Kuutiot

Kuutioiden kuvaamisessa oli aluksi ongelmia, sillä halkaistuista kuutioista irtosi partikkeleita, jotka naarmuttivat kuvattavaa pintaa hionnassa. Kappaleet hiottiin tämän jälkeen uudestaan ja kuvattiin.

Kuutioista saaduissa makrokuvissa ei ole suuria eroja levittimien välillä. Liitteessä 3 nähdään molempien kuutioiden olevan pyöristyneitä yläreunasta. Pyöristyminen voi johtua tukirakenteista ja levitin valinta ei näyttäisi vaikuttavan kovinkaan merkittävästi pyöristymisen määrään. Molemmista kuvista nähdään uloke osuuden aiheuttaneen ongelmia tulostuksessa. Makrokuvien perusteella sisäinen rakenne ulokkeessa vaikuttaisi olevan vastaavanlai-

nen kuin kuutioiden keskellä. Molemmissa kuutioissa huomataan ulokkeen olevan kieroutunut ja pinnan olevan hyvin rosainen. Kuvassa 3 on kuutioiden poikkileikkauksen mikrokuvat 5x tarkennuksella kuutioiden keskeltä. Kuvissa ei ole selvää eroa levittimien välillä. Kuvissa nähdään selvät rajat kerrosten välillä, mutta kerrokset vaikuttaisivat sulautuneen yhteen onnistuneesti. Mikrokuvien samanlaisuus viittaisi molemmilla levittimillä valmistuvan rakenteellisilta ominaisuuksiltaan hyvin samankaltaisia kappaleita.



Kuva 3. Testikappale KH2 (Vasen) ja KK2 (Oikea) mikrokuva kuution keskeltä 5x tarkennuksella

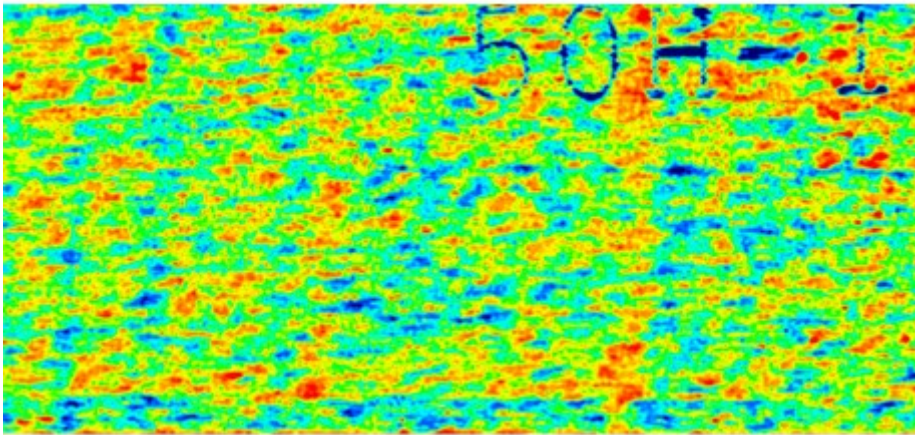
Liitteessä 4 nähdään mikrokuvat kuutioiden ulokkeen poikkileikkauksesta. Molemmista mikrokuvista nähdään tulostuksessa olleen samankaltaisia ongelmia. Alapinnoissa huomataan esiintyvän kuplivia ulkonevia rakenteita, jotka eivät ole tasaisesti kiinni lopussa rakenteessa. Nähdään myös halkeamia eri kerrosten välillä, tämä viittaisi puutteelliseen fuusioon kerrosten välillä. Selvä ero kuution sisäiseen rakenteeseen on kuution pinnassa, jossa on selkeästi suurempi raekoko kuin muualla rakenteessa. Samanlaista suurempaa raekoko ei nähdä kuution kyljen rajapinnassa (Liite 5). 40x tarkennuksen kuvissa eri levittimillä valmistetuissa kuutioissa on hyvin samankaltainen raekoko, eikä selviä eroja löydy. Liitteessä 6 nähdään, kuinka ulokkeen rajapinnassa raekoko on samankaltainen kuin kuution sisäisessä rakenteessa, pinnassa käytettävän raekoon sijaan. Yksi mahdollinen selitys tälle heikolle pinnalle tyhjän päälle rakentuvassa ulokkeessa on, että tulostin ei osaa käyttää pinnassa pintaan tarkoitettua tehoa, jolla raekoko kasvaisi mahdollisesti parantaen pinnanlaatua. Kokonaisuudessaan levittimien välillä ei löydetä kuutioissa selkeitä eroja, jotka vaikuttaisivat tässä tutkimuksessa määriteltyyn rakennuslaatuun.

### 4.3 Levyt

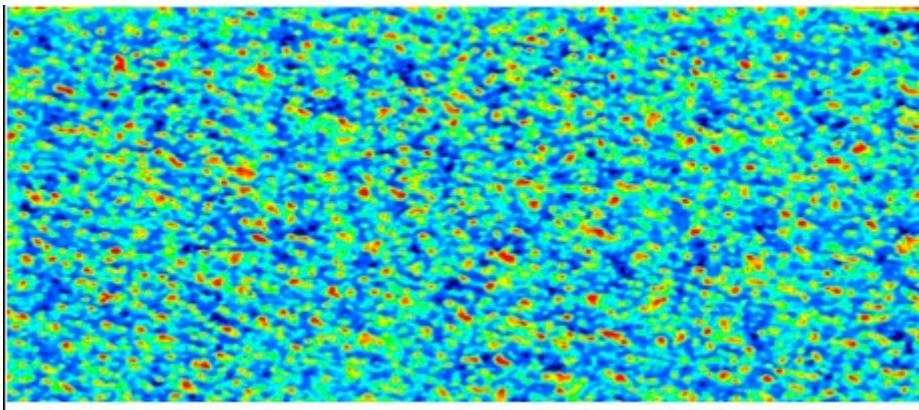
Levyjen tulostus ja irrotus tulostuspinnalta tapahtui ilman erityisiä ongelmia. Tulostuksen jälkeen levyt laser merkattiin levyjen päälipinnan oikeaan ylänurkkaan. Siirtäessä levyjä tulostimelta lasermerkkajalle tapahtui 45 ja 50 levyjen sekoittuminen. Profilometrillä kappaleille suoritettiin mittaukset ja datan käsittely. Koska kappaleet olivat hieman kieroja, täytyi profilometrin ohjelmalla antaa kierouden korjausta kappaleelle, sillä jokaisessa levyssä oli pientä kieroutumaa. Jokaiselle mitatulla kappaleelle annettiin 5 vahvuuden korjaus, jotta tulokset olisivat vertailukelpoisia. Profilometrillä kappaleista mitattavasta pinnasta rajattiin reunat pois, jotta tukirakenteista syntyneet virheet eivät vaikuta dataan. Sa ja Sz arvot otettiin poikittais- ja pituussuunnassa keskeltä kappaletta. Kerätty data siirrettiin Exceliin, jossa eri kulmille ja levittimille laskettiin keskiarvot vertailun helpottamiseksi. Exceliin laskettiin myös prosentuaalinen ero pinnanlaadussa levittimien välillä. Myös riittävän suuren eräköön varmistamiseksi laskettiin kappaleiden suhteellinen keskihajonta.

#### 4.3.1 Pehmeällä levittimellä valmistetut levyt

Levyjen valmistus onnistui harjalta ilman suurempia ongelmia. Kappaleet tulostuivat haluttuun muotoon, eikä niissä ollut visuaalisella tarkastelulla virheitä. Kuvissa 4 ja 5 nähdään testikappaleen 50H-1 ylä- ja alapinnan topografinen kuva. Kuvissa punainen tarkoittaa korkeaa kohtaa ja sininen matalaa. Testikappaleissa yläpinnassa poikkeamat ovat matalia kuoppia, kun taas alapinnassa on korkealle nousevia huippuja. Tämä ilmiö toistuu kaikissa levyissä.



Kuva 4. Testikappaleen 45H-1 yläpinta



Kuva 5. Testikappaleen 45H-1 alapinta

Taulukossa 3 nähdään pinnanlaadun arvot testikappaleissa. Arvot on mitattu kappaleen pinnasta jättäen lasermerkatun nimi merkinnän pois arvosta. Taulukkoon on otettu kolmesta kappaleesta saatu keskiarvo reliabiliteetin parantamiseksi. Tuloksista huomataan kappaleiden pinnanlaadun olevan huomattavasti parempi kappaleiden yläpinnassa. Eri kulmat tuloksessa eivät näytä vaikuttavan kovinkaan paljon yläpintaan. Tuloksissa odotusten mukaisesti 55 asteessa tulostettu kappale oli paras laadultaan. Harjalla 45 asteen kulmassa valmistettu kappale oli pinnanlaadultaan heikoin, mutta suurin ero pinnanlaadussa syntyy, kun nousee 55°. Ero 50H ja 55H alapinnassa on jopa 45,6 %. Ero yläpinnassa on maltillisempi 27,2 %, mutta kuitenkin selkeä.

Taulukko 3. Harjalla valmistetuista testikappaleista saatujen pinnanlaatujen keskiarvot

Testikappale	Sa ( $\mu\text{m}$ )	Sz ( $\mu\text{m}$ )
45H-Y	6,29	97,27
45H-A	24,35	282,50
50H-Y	6,15	162,30
50H-A	19,67	255,75
55H-Y	4,48	84,00
55H-A	10,70	156,69

Liitteissä 7 ja 8 nähdään testikappaleen 45H-1 ylä- ja alapinnan profiili kuvaajana. Profiilista huomataan heti, että heikompi pinnanlaatu ei synny yksittäisestä virheestä, vaan on koko kappaleen yli hyvin sahaava. 45 asteen levyjen alapinnan profiileissa nähdään suuria huippuja, jotka näkyivät jo topografisessa kuvassa. Pitkittäis- ja pystysuuntaisissa profiileissa ei ole selkeitä eroja.

#### 4.3.2 Kovalla levittimellä valmistetut levyt

Myös kovalla levittimellä valmistetut levyt tulostuivat ilman mainittavia ongelmia. Levyissä ei ollut visuaalisesti näkyviä virheitä tai ongelmia. Liitteissä 9 ja 10 nähdään 45K-3 testikappaleen ylä- ja alapinnan topografinen kuva. Kuvissa ei ole suurta eroa harjalla valmistettuihin kappaleisiin ja sama korkeiden huippujen ilmiö kappaleen alapinnassa toistuu. Myös kovalla levittimellä valmistetuissa kappaleissa ilmeni kieroutumista, joka oli korjattava Profilometrillä. Profiilin kuvaajaa tarkasteltaessa ei löydy selkeitä eroja harjalla valmistettuihin kappaleisiin. Myös kovalla levittimellä valmistetuissa kappaleissa pysty- ja poikittaissuuntaiset profiilit ovat samanlaisia.

Taulukossa 4 on esitetty kovalla levittimellä valmistettujen testikappaleiden pinnanlaadun keskiarvoja. Tulokset ovat kolmesta levystä saatujen tulosten keskiarvot. Pinnanlaatu on otettu kappaleen pinnasta, jättäen pois reunoista noin milli sekä laser merkattu alue. Myös

kovalla levittimellä huomataan 45° kappaleiden olevan pinnanlaadultaan heikoimpia ja kulman kasvaessa pinnanlaatu kasvaa. Myös kovalla levittimellä suurin parannus pinnanlaadussa tapahtuu noustessa 55° asteeseen. Myös yläpinnan laadussa tapahtuu muutosta positiiviseen suuntaan kulman kasvaessa, mutta muutos ei ole niin merkittävä.

Taulukko 4. Terällä valmistetuista testikappaleista saatujen pinnanlaatuojen keskiarvot

Testikappale	Sa (µm)	Sz (µm)
45K-Y	6,27	93,38
45K-A	26,35	304,49
50K-Y	5,82	105,94
50K-A	20,05	227,30
55K-Y	4,58	91,02
55K-A	10,58	153,29

Kokonaisuudessaan levittimien välillä ei löytynyt suurta eroa. Taulukossa 5 nähdään erot levittimien tuottamien kappaleiden välillä. Tuloksista nähdään, ettei selkeää trendiä paremmalle levittimelle löytynyt. Kova levitin on parempi kahdessa kolmesta yläpinnasta, mutta on huonompi 55° levyssä. Alapinnassa taas pehmeä levitin on parempi 45° ja 50° levyissä, mutta häviää 55° levyssä. Suurin ero levittimien välillä on vain 7.59 % ja suurin osa eroista on vain muutama prosentti. Molemmissa levittimissä on selvää, että suurempi kulma auttaa parantamaan pinnanlaatua dramaattisesti. Tästä huolimatta molemmilla levittimillä vielä 55° levyssäkin alapinnan pinnanlaatu on huomattavasti heikompi kuin yläpinnassa. Kulman kasvaessa alapinnan arvot lähestyvät yläpintaa pinnanlaadussa. Mahdollinen syy tälle selvälle erolle olisi tulostimen käyttämässä tehossa sen luodessa ulkopintaa. Kuutioiden mikrokuivissa huomattiin tyhjän päälle rakentuvassa rakenteessa alapinnan raekoon olevan sama kuin

rakenteen sisällä, eikä sama kuin kappaleen yläpinnassa. Suurempi raekoko on pinnanlaadulle parempi, sillä se vähentää mikrokuvissa näkyvää sahaavaa rakennetta ja heikosti kiinnittyneiden metallikuplien määrää. Jos tulostin käyttää vinossa tulostuvan kappaleen yläpintaan suurempaa tehoa luoden suurempia rakeita, tämä selittäisi miksi yläpinnassa pinnanlaatu on huomattavasti parempi kuin alapinnassa.

Taulukko 5. Levittimien pinnanlaadun vertailu

Levittimien vertailu					
Kappale	Pinnanlaatu (Sa)		Voittaja		
	Harja	Kova	Pehmeä	Kova	Ero (%)
45-Y	6,295	6,270		X	0,39 %
45-A	24,345	26,345	X		7,59 %
50-Y	6,147	5,816		X	5,38 %
50-A	19,674	20,051	X		1,88 %
55-Y	4,485	4,582	X		2,12 %
55-A	10,699	10,585		X	1,07 %

## 5 Johtopäätökset ja yhteenveto

Tässä kappaleessa arvioidaan kuinka hyvin tutkimus onnistui kokonaisuudessaan. Tämä tapahtuu pohtimalla mitä tuloksista voidaan ymmärtää, arvioimalla reliabiliteettia, ehdottamalla jatkotutkimusaiheita ja pohtimalla saavutettiin työille asetetut tavoitteet. Kappaleessa myös vastataan asetettuihin kysymyksiin.

### 5.1 Pohdinta

Tulosten pohjalta voidaan todeta levittimien välisten erojen olevan hyvin pieniä. Tutkimuksella löydettiin selkeitä trendejä tulostamisessa, sekä hyviä jatkotutkimusaiheita. Levittimillä ei löydetty olevan vaikutusta tulosteiden onnistumiseen, sillä kaikki testikappaleet tulostuivat loppuun asti. Ohutlevy testikappaleilla pyrittiin aiheuttamaan ongelmia tulostettuihin kappaleisiin. Kuplivaa pintaa syntyi molemmilla levittimillä, eikä levittimien välillä ollut selkeää eroa. Ohuesta levystä huomattiin, että kumpaakaan levitintä käyttäessä ei saisi käyttää liian ohuita seinämäpaksuuksia. Liian ohuet seinämät aiheuttavat 'kuplimista' seinämän pintaan.

Halkaisemalla kuutio testikappaleet huomattiin molemmilla levittimillä valmistetuissa kappaleissa olevan hyvin samankaltainen mikrorakenne. Mikrokuvista myös huomattiin kuutiossa tyhjän päälle rakentuvassa osassa olevan ongelmia. Ulokkeen alapinnassa kerrokset eivät yhdisty tasaiseksi pinnaksi ja siinä esiintyy halkeamia ja irtonaisia partikkeleja. Tämä voi johtua liian vähäisestä tehosta tulostettaessa alapinnan kerroksia, sillä raekoko alapinnassa on verrattavissa sisäisen rakenteen raekokoon yläpinnan sijaan.

Paksuissa levyissä tulostus onnistui molemmilla levittimillä, ja pinnanlaadun arvoissa erot olivat hyvin maltillisia. Pehmeällä levittimellä saatiin 45° levyllä 7.5 % parempi pinnanlaatu, mutta muihin tuloksiin verratessa sama trendi ei jatku, joten tulos saattaa olla sattumaa. Kuitenkin huomattiin kulman kasvaessa molemmilla levittimillä pinnanlaadun parantuvan selkeästi. Tämän takia suunnitellussa kappaleita tulostettavaksi olisi hyvä välttää alle 55 asteen nousukulmaa. Selkeämmät löydöt tutkimuksessa liittyvät ongelmiin tiettyjen rakenteiden tu-

lostamisessa. Paksuissa levyissä huomattiin tyhjän päälle rakentuvassa osassa kulman olevan hyvin merkittävä tekijä pinnanlaatuun. Kappaleissa oli suurin ero ylä- ja alapinnan välillä. Tätä voitaisiin käyttää hyväksi kappaleita suunniteltaessa. Tulisi aina varmistaa näkyvien pintojen olevan tyhjän päälle rakentuvassa osassa yläpuolella. Huomattiin myös kulmaa kasvattaessa pinnanlaadun parantuvan dramaattisesti. Tämän perusteella olisi hyvä välttää mahdollisimman paljon rakenteita, jossa joudutaan tulostamaan tyhjän päälle materiaalia.

Tutkimustuloksia voidaan vielä verrata kirjallisuuskatsauksen löytöihin. Max Horn et.al tutkimuksessa huomataan kovalla levittimellä kappaleiden Sa arvon olevan 3 % parempi kuin harjalla. Tämä on linjassa oman tutkimukseni löytöihin, sillä myös tämän tutkimuksen tulokset viittaisivat eron olevan hyvin pieni. Laskemalla omaan tutkimukseen levyjen yläpintojen mukaan kova levitin olisi 1.22 % parempi, mutta koska testikappaleita on liian vähän, tulkitsisin vain levittimien olevan yhtä hyviä. Gülcan et.al sekä Grinschek et.al tutkimuksissa huomattiin kulmalla olevan suuri vaikutus tyhjän päälle rakentuvan kappaleen pinnanlaatuun. Myös omassa tutkimuksessani kulmalla oli valtava vaikutus varsinkin ulokkeen alapintaan.

## 5.2 Työn jatkotutkimusaiheet

Työn perusteella saatiin paljon hyviä jatkotutkimusaiheita. Työtä voisi jatkaa pidempänä ja syvempänä tutkimuksena, jotta löydettäisiin selkeämpiä eroja levittimien välillä. Useammassa vastaavassa tutkimuksessa on tutkittu kappaleiden mekaanisia ominaisuuksia, niitä olisi myös hyvä tutkia esimerkiksi vetolujuus kokeella. Kappaleiden väsymiskestävyys tutkimisella voitaisiin myös löytää eroja, jotka syntyisivät mahdollisista huokoisuus eroista kappaleissa. Kuutioiden mikrorakennetta voisi tutkia tarkemmin pyyhkäiselektronimikroskoopin (SEM) avulla. Tällä saataisiin tarkemmin tutkittua mikrorakennetta ja voitaisiin löytää mahdollisia eroja levittimien välillä. Hyvä tutkimus aihe olisi jatkuuko pinnanlaadun parantuminen suuremmilla kulmilla tulostettaessa paksuja levyjä. Tätä voitaisiin jatkaa myös toiseen suuntaan laskemalla kulmaa ja vertaamalla alkavatko eri levittimet epäonnistumaan tarpeeksi pienessä kulmassa. Syytä olisi myös testata syntyykö hyvin korkeassa kulmassa esimerkiksi 80 asteessa eroa ala- ja yläpinnan välille. Kirjallisuuskatsauksen perusteella jauheen levitys suunnalla voisi olla vaikutusta pinnanlaatuun tyhjän päälle tulostettaessa. Tätä

laajentaen voisi tutkia onko kumpikaan levitin herkempi tästä levityksistä syntyvälle vaikutukselle. Paksuista levyistä olisi myös voinut ottaa mikrokuvat ja katsoa onko alapinnassa samankaltaista ongelmaa kuin kuutioissa havaittiin. Ohutlevyissä voitaisiin kokeilla kasvattaa levyn paksuutta molemmilla levittimillä ja verrata missä paksuudessa kupliminen päättyy ja pinnanlaatu paranee. Levyjen ongelmaa voisi myös tutkia pidemmälle selvittämään ongelman syntymekanismiin.

### 5.3 Tutkimuksen validiteetti ja reliabiliteetti

Vähäinen testikappaleiden määrä heikentää tutkimuksen reliabiliteettia. Koska ohuita levyjä ja kuutioita oli vain kaksi koekappaletta, on mahdollista kappaleiden olleen huonoja yksilöitä. Kuitenkin huomattiin molemmilla levittimillä valmistettujen kappaleiden olevan hyvin samankaltaisia, joka viittaisi tasaisiin tuloksiin. Paksuja levyjä valmistettiin kolme kopiota reliabiliteetin parantamiseksi, mutta koska näistä kappaleista saatiin numeroarvoja visuaalisen tarkastelun sijaan, olisi syytä tutkia kuinka paljon kopioiden välillä on heittoa. Kappaleille laskettiin suhteellinen hajonta. Suhteellinen hajonta lasketaan jakamalla tulosten keskihajonta keskiarvolla. Liitteessä 11 nähdään taulukko kappaleiden suhteellisesta hajonnasta. Nähdään  $S_a$  arvojen olevan 3–7 % luokkaa ja  $S_z$  arvojen olevan korkeampia 4–11 %.  $S_a$  arvojen keskihajonta on suurimmaksi osaksi hyvin maltillista, joka viittaisi suhteellisen hyvään toistettavuuteen.  $S_z$  arvoissa taas jopa kolmessa kohdassa on yli 11 % suhteellinen hajonta. Näin korkea hajonta voi viitata ongelmiin tutkimuksen reliabiliteetissa. Kokonaisuudessaan suhteellista hajontaa voitaisiin laskea valmistamalla useampia kopioita testikappaleista, joka tässä tilanteessa parantaisi tutkimuksen reliabiliteettia. Myös paksujen levyjen sekoittuminen kokeen aikana antaa epävarmuutta testituloksista.

### 5.4 Yhteenveto

Kokonaisuudessaan tutkimuskysymyksiin onnistuttiin vastaamaan ja kokeiden tulokset olivat tarkoituksenmukaisia. Kirjallisuuskatsauksella saatiin tietoa jauhepetisulatuksen taustasta sekä edeltävästä tutkimuksesta aiheen parissa. Käytännön kokeeseen kehitettiin tarkoituksenmukaiset koekappaleet ja selvitettiin mitä niistä tulisi mitata. Kokeiden tuloksissa

huomattiin levittimien välisten erojen olevan hyvin maltillisia ja huomattiin tyhjän päälle rakentuvien ulokkeiden olevan ongelma levitin valinnasta huolimatta. Huomattiin myös ulokkeiden alapinnan virheen mahdollisesti johtuvan fuusion puutteesta kerrosten välillä.

Työn ongelmana oli: Selvittää millaisia rakenteellisia eroja eri levittimistä syntyy kappaleisiin, vai onko eroja edes olemassa. Ongelmaan vastattiin seuraavien tutkimuskysymysten avulla. Syntykö kappaleiden pinnanlaatuun eroja? Kappaleiden pinnanlaatu oli hyvin samankaltainen molemmilla levittimillä, eikä arkiseen käyttöön vaikuttavia pinnanlaadullisia eroja löydetty. Pystyvätkö molemmat levittimet tulostamaan kaikkia testikappaleita? Tämän työn perusteella molemmat levittimet onnistuivat valmistamaan kaikki testikappaleet, jotka kokeeseen tulostettiin. Onko tilanteita, jossa tulisi käyttää tiettyä levitintä? Tutkimuksen perusteella ei olisi selkeitä tilanteita jossa toinen levitin tulisi valita toisen yli. Kokonaisuudessaan ongelma saatiin ratkaistua ja päästiin tulokseen, että levittimien välillä ei ole rakenteellisia eroja tai erot ovat normaaliin käyttöön merkityksettömän pieniä.

## Lähteet

EOS GmbH. 2022. EOS StainlessSteel 316L Material Data Sheet. Viitattu 15.3.2025 .Saata-  
vissa [https://www.eos.info/var/assets/03\\_system-related-assets/material-related-contents/metal-materials-and-examples/metal-material-datasheet/stainlesssteel/material\\_datasheet\\_eos\\_stainlesssteel\\_316l\\_en\\_web.pdf](https://www.eos.info/var/assets/03_system-related-assets/material-related-contents/metal-materials-and-examples/metal-material-datasheet/stainlesssteel/material_datasheet_eos_stainlesssteel_316l_en_web.pdf)

Fox H, Kamaraj AB ja Drake D (2022) Investigating the effect of powder recoater blade material on the mechanical properties of parts manufactured using a powder-bed fusion process. *Manufacturing Letters* 33: 561–568.

Grinschek F, Charles A, Elkaseer A, Klahn C, Scholz SG ja Dittmeyer R (2022) Gas-tight means zero defects - design considerations for thin-walled fluidic devices with overhangs by laser powder bed fusion. *Materials & Design* 223: 111174.

Gülcan O, Günaydın K ja Tamer A (2024) The effect of overhang and recoater angles on the quality of laser powder bed fusion produced parts with contactless supports. *Materials Research Express* 11(11): 116514.

Horn M, Schmitt M, Langer L, Schlick G ja Seidel C (2024) Laser powder bed fusion recoater selection guide—Comparison of resulting powder bed properties and part quality. *Powder Technology* 434: 119356.

Li JZ, Alkahari MR, Rosli NAB, Hasan R, Sudin MN ja Ramli FR (2019) Review of wire arc additive manufacturing for 3D metal printing. *International Journal of Automation Technology* 13(3): 346–353.

Li Z, Voisin T, McKeown JT, Ye J, Braun T, Kamath C, King WE ja Wang YM (2019) Tensile properties, strain rate sensitivity, and activation volume of additively manufactured 316L stainless steels. *International Journal of Plasticity* 120: 395–410.

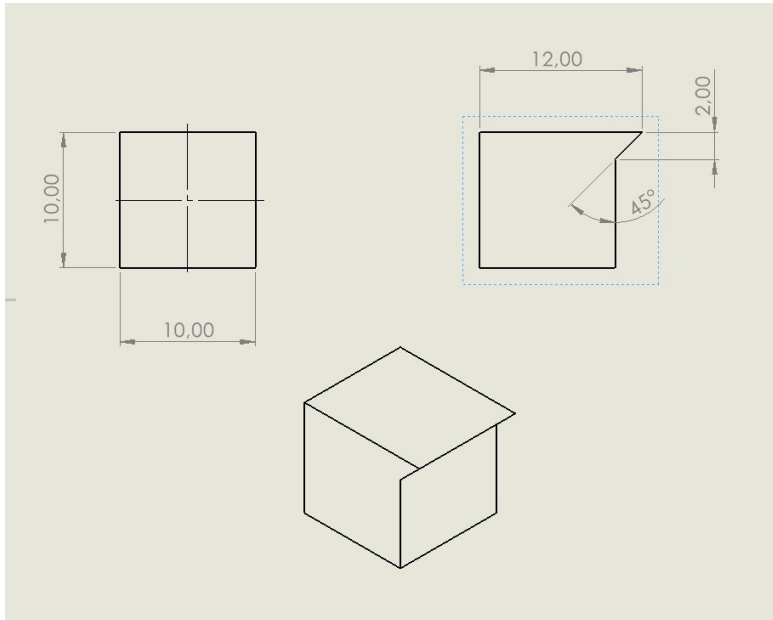
Martín A, Cepeda-Jiménez CM ja Pérez-Prado MT (2020) Gas atomization of  $\gamma$ -TiAl alloy powder for additive manufacturing. *Advanced Engineering Materials* 22(1): n/a.

Miao G, Du W, Pei Z ja Ma C (2022) A literature review on powder spreading in additive manufacturing. *Additive Manufacturing* 58: 103029.

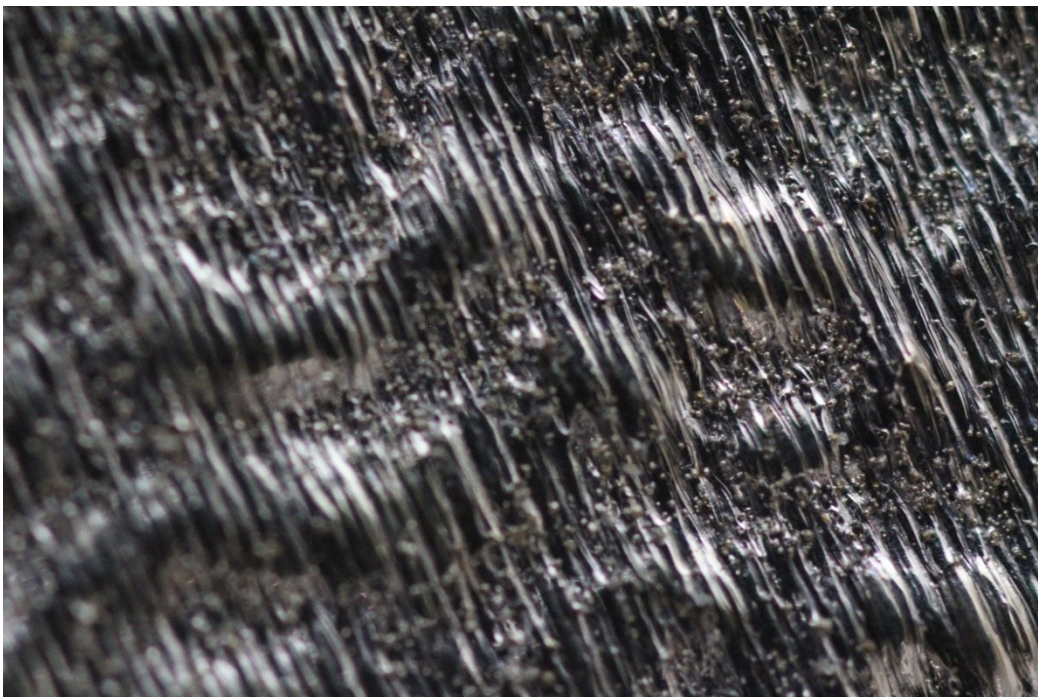
Neikter M, Edin E, Proper S, Bhaskar P, Nekkalapudi GK, Linde O, Hansson T ja Pederson R (2021) Tensile properties of 21-6-9 austenitic stainless steel built using laser powder-bed fusion. *Materials* 14(15): 4280.

SFS-EN ISO 25178-2:2022:En. (2023) Geometrical product specifications (GPS). Surface texture: Areal. Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters Helsinki. Suomen standardoimisliitto

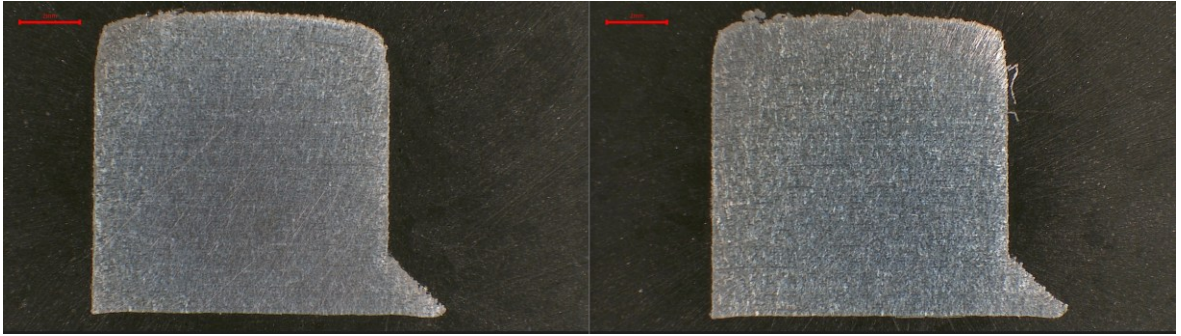
## Liitteet



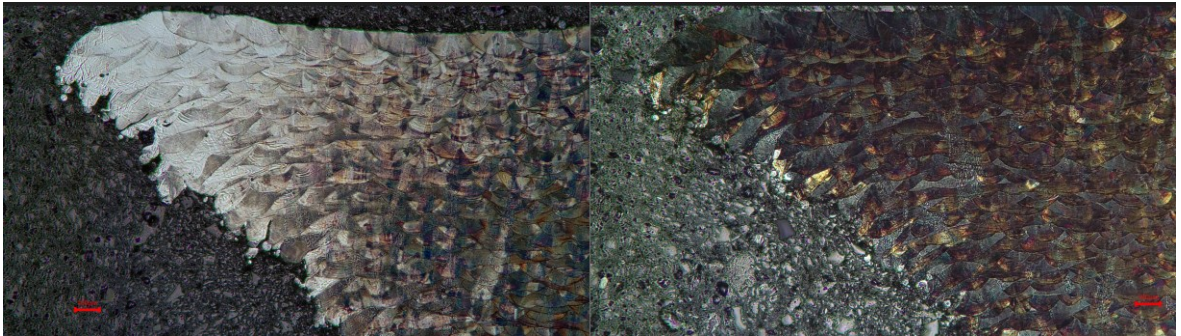
Liite 1. Testikappale 1 piirustus



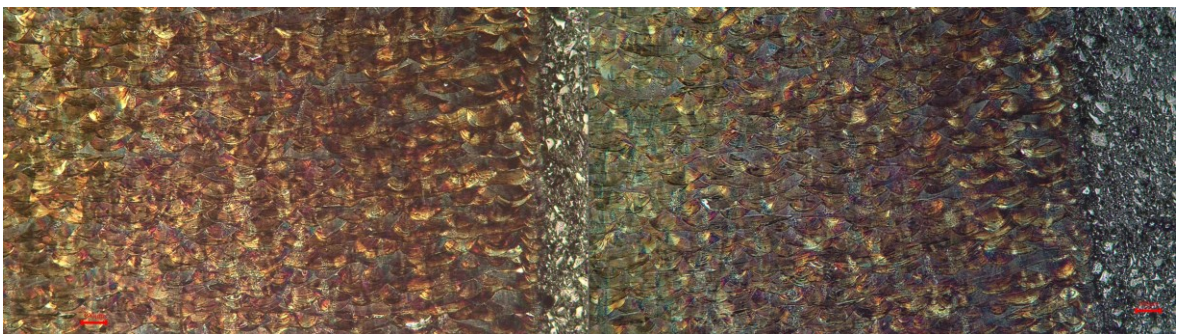
Liite 2. Testikappale 2 harjalla tuotettuna, makrokuva



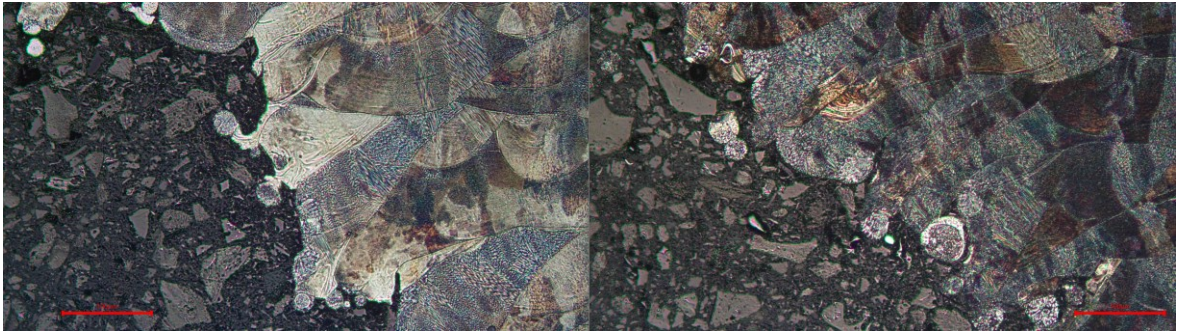
Liite 3. Testikappaleiden KH2 (Vasen) ja KK2 (Oikea) poikkileikkaukset



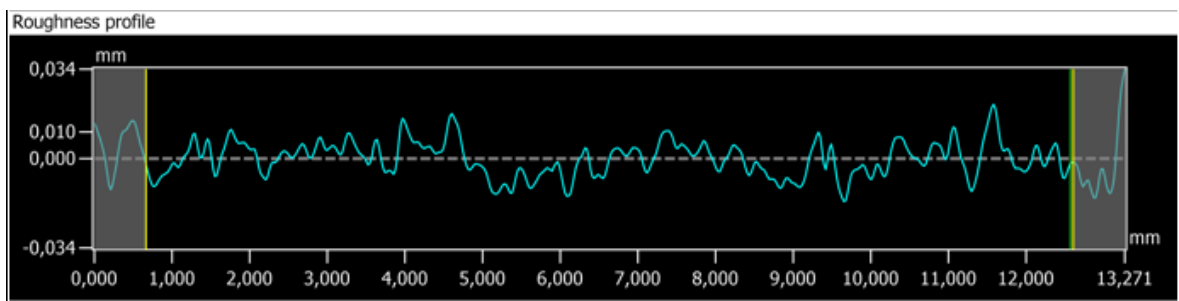
Liite 4. Testikappaleiden KH2 (Vasen) ja KK2 (Oikea) mikrokuvat poikkileikkauksesta ulokkeen kohdasta 5x tarkennuksella



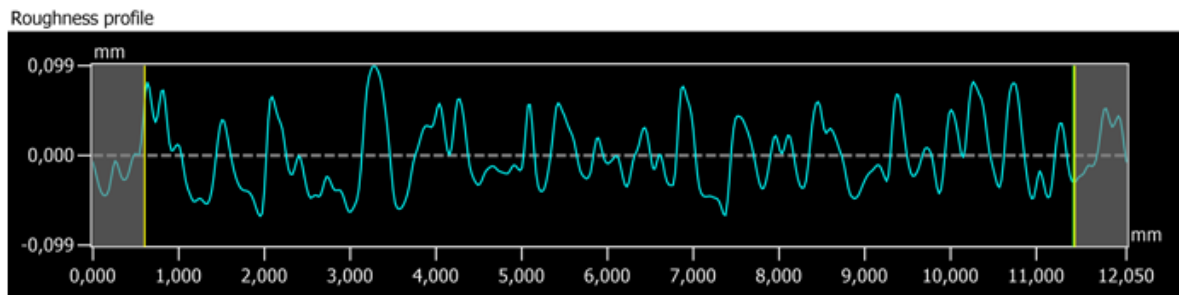
Liite 5. Testikappaleiden KH2 (Vasen) ja KK2 (Oikea) mikrokuvat poikkileikkauksesta kyljen kohdalta 5x tarkennuksella



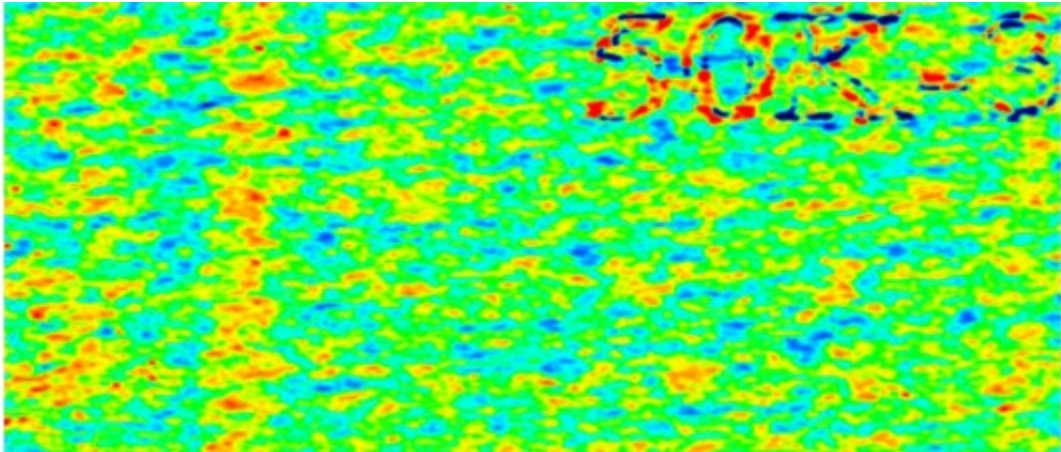
Liite 6. Testikappaleiden KH2 (Vasen) ja KK2 (Oikea) mikro kuvat ulokkeesta kyljen kohdalta 20x tarkennuksella



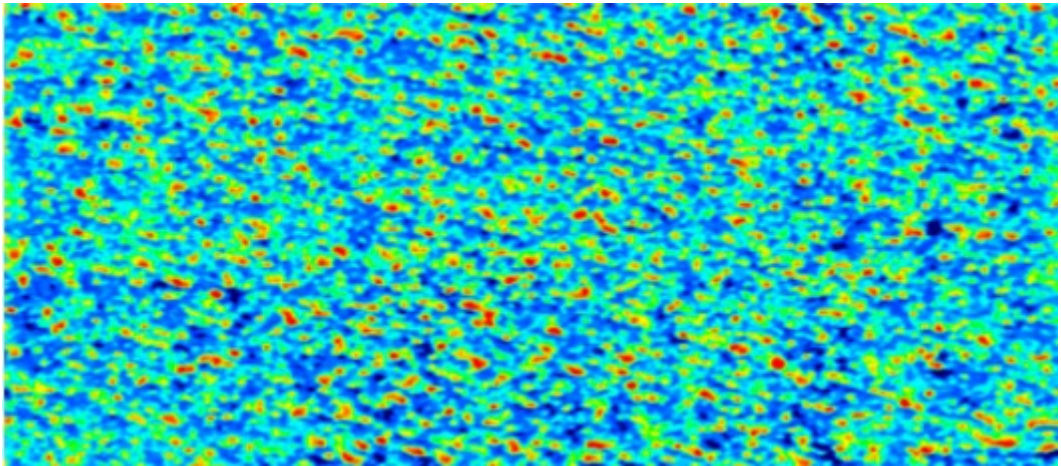
Liite 7. 45H-1 yläpinnan profiili



Liite 8. 45H-1 alapinnan profiili



Liite 9. 45K-3 yläpinta



Liite 10. 45K-3 alapinta

Suhteellinen hajonta		
Kappale	Sa	Sz
45H-Y	3,54 %	11,17 %
45K-Y	2,14 %	11,63 %
45H-A	6,48 %	9,22 %
45K-A	5,42 %	8,56 %
50H-Y	6,56 %	7,71 %
50K-Y	4,14 %	11,81 %
50H-A	4,82 %	1,22 %
50K-A	3,36 %	1,37 %
55H-Y	2,04 %	4,56 %
55K-Y	3,26 %	4,21 %
55H-A	7,84 %	7,40 %
55K-A	6,78 %	7,56 %

Liite 11. Testikappaleiden suhteellinen hajonta