

Opinnäytetyö AMK

Konetekniikka

2023

Julia Merisaari, Veera Mustajoki

# Metallin 3D-tulostuksen muodonmuutoksien simulointi



Opinnäytetyö AMK | Tiivistelmä

Turun ammattikorkeakoulu

Konetekniikka

2023 | 67 sivua

Julia Merisaari, Veera Mustajoki

## Metallin 3D-tulostuksen muodonmuutoksien simulointi

Opinnäytetyön tavoitteena oli todentaa Siemens NX simulaation toimivuus metallin 3D-tulostuksen muodonmuutoksissa. Tutkimuksessa kartoitettiin ohjelmiston luomien kompensatiokappaleiden käytettävyyttä.

Opinnäytetyö toteutettiin toiminnallisena tutkimuksena. Tutkimus aloitettiin esitietojen selvityksellä sekä käytettyihin työmenetelmiin tutustumalla. Tutkimuksen toisena vaiheena suunniteltiin ja mallinnettiin käytetyt testikappaleet, jonka jälkeen kappaleet simuloitiin. Simuloinnin jälkeen kappaleet 3D-tulostettiin fyysisiksi kappaleiksi. Lopuksi tutkimuksessa selvitettiin simuloinnissa tapahtuvien muodonmuutoksien todellisuus 3D-skannauksella.

3D-skannauksen avulla pystyttiin havaitsemaan simulaation yhdenmukaisuus fyysisen kappaleen kanssa. Tutkimuksessa todettiin kompensatioiden tuottavan konkreettisen hyödyn tulostuksessa aiheutuviin muodonmuutoksiin.

Asiasanat:

Ainetta lisäävä valmistus, 3D-tulostus, simulointi, digitaalinen kaksonen, 3D-skannaus.

Bachelor's Thesis | Abstract

Turku University of Applied Sciences

Mechanical engineering

2023| 67 pages

Julia Merisaari, Veera Mustajoki

## Simulation of deformations in metal 3D printing

The goal of the thesis was to verify the functionality of Siemens NX simulation in the deformations analysis of metal 3D printing. The study assessed the usability of compensations generated by the software.

The thesis was conducted as a functional study. The research began with a review of background information and familiarization with the working methods used. In the second phase of the research, the test parts were designed and modeled, followed by simulation. After simulation, the parts were 3D printed into physical objects. Finally, the research examined the reality of deformations occurring in simulation through 3D scanning.

The 3D scanning allowed for the detection of the simulation's consistency with the physical object. Research concluded that compensations yield tangible benefits in addressing deformations arising during printing.

Keywords:

Additive manufacturing, 3D printing, simulation, digital twin, 3D scanning.

# Sisältö

<b>Käytetyt lyhenteet tai sanasto</b>	<b>8</b>
<b>1 Johdanto</b>	<b>9</b>
<b>2 3D-tulostus</b>	<b>10</b>
2.1 Yleisesti 3D-tulostuksesta	10
2.2 Menetelmäluokat	11
2.2.1 Prosessin määrittely	14
2.2.2 Esimerkkejä prosessin määrittelyn kirjaamiselle	15
2.3 Materiaalit	15
2.4 Jauhepetisulatus	16
2.4.1 Jauhepetisulatuksen edut ja rajoitukset	17
2.4.2 Tulostettava kappale	18
<b>3 Digitaalinen kaksonen</b>	<b>21</b>
3.1 Digitaalisen kaksosen määritelmä	22
3.1.1 Simulaatio ja digitaalinen kaksonen	22
<b>4 Siemens NX</b>	<b>23</b>
4.1 NX yleisesti	23
4.2 Additive manufacturing-työkalu	23
4.2.1 Additive manufacturing Simcenter	24
<b>5 3D-skannaus</b>	<b>26</b>
5.1 Yleisesti 3D-skannuksesta	26
5.2 ZEISS T-SCAN	27
5.3 Laserskannaus	29
<b>6 Tutkimus</b>	<b>31</b>
6.1 Tutkimuksen digitaalinen kaksonen	31
6.1.1 Testikappaleiden muotojen määrittely	32
6.1.2 Tulostus ja tukirakenteiden irrotus	35
6.2 Simulointi	38

6.2.1 Kompensaatiomuodot	39
6.3 Skannaus	41
<b>7 Tulokset</b>	<b>43</b>
7.1 Palkki-kappaleen tulokset	44
7.2 Porras-kappaleen tulokset	50
7.3 Tikku-kappaleen tulokset	56
7.3.1 Tulostimen parametrien puuttuminen	61
<b>8 Yhteenveto</b>	<b>64</b>
<b>Lähteet</b>	<b>66</b>

## **Liitteet**

Liite 1. Kalibrointitodistus 1

Liite 2. Kalibrointitodistus 2

Liite 3. Kalibrointitodistus 3

## **Kuvat**

Kuva 1 Yksi- ja monivaiheiset AM-valmistusprosessit (ISO/ASTM 52900:2021 2021 2021, 24)	10
Kuva 2 Sideaineen suihkutuspöly (Alonen ym. 2016, 24)	11
Kuva 3 Suorakerrostus (Alonen ym. 2016, 38)	11
Kuva 4 Materiaalin pursotus (Alonen ym. 2016, 19)	12
Kuva 5 Materiaalin suihkutuspöly (Alonen ym. 2016, 22)	12
Kuva 6 Jauhepetisulatus (Alonen ym. 2016, 31)	13
Kuva 7 Kerroslaminointi (Alonen ym. 2016, 25)	13
Kuva 8 Valokovetus altaassa, laskeva peti (Alonen ym. 2016, 29)	14
Kuva 9 Valokovetus altaassa, nouseva peti (Alonen ym. 2016, 29)	14
Kuva 10 Jauheenpoisto jälkikäsittelyssä	18
Kuva 11 optimoitu- ja yhtenäinen tukirakenne (Kang-Hyun ym. 2022)	19

Kuva 12 Tulostus ilman tukirakenteita (Bentley 2020)	20
Kuva 13 Digitaalinen kaksonen (Grieves 2015)	21
Kuva 14 Simulaatio prosessin kulku (Siemens Simcenter 3D for additive manufacturing simulation 2022)	24
Kuva 15 T-SCAN (ZEISS n.d)	27
Kuva 16 T-TRACK (ZEISS n.d)	28
Kuva 17 T-POINT (ZEISS n.d)	29
Kuva 18 Tutkimuksen digitaalinen kaksonen	32
Kuva 19 Palkki-kappale	33
Kuva 20 Tikku-kappale	34
Kuva 21 Porras-kappale	35
Kuva 22 Kappaleet tulostuspedillä	36
Kuva 23 Palkin tukirakenteiden repeytyminen	37
Kuva 24 Portaan tukirakenteiden repeytyminen	37
Kuva 25 Kompensaation valinta	39
Kuva 26 Optimoitu kompensatio valikko	40
Kuva 27 Skannatun kappaleen ja nominaalikappaleen eron varoitus	42
Kuva 28 Päällekkäisyys	42
Kuva 29 Pinnankarheudesta aiheutunut toleranssin raja-arvon ylittyminen	43
Kuva 30 Palkin lämpöjakauma	44
Kuva 31 Palkin vetäytyminen ennen tukirakenteiden poistamista, sivusta	45
Kuva 32 Palkin vetäytyminen ennen tukirakenteiden poistamista, edestä	45
Kuva 33 Palkin vetäytyminen tukirakenteiden poistamisen jälkeen, sivusta	46
Kuva 34 Palkin vetäytyminen tukirakenteiden poistamisen jälkeen, edestä	46
Kuva 35 Palkin repeytyminen irti tukirakenteista	47
Kuva 36 Palkin kupertumisen vertailu	48
Kuva 37 Optimoitu kompensoitu Palkki, etupuoli	49
Kuva 38 Optimoitu kompensoitu Palkki, takapuoli	49
Kuva 39 Portaan lämpöjakauma	50
Kuva 40 Portaan vetäytyminen ennen tukirakenteiden poistamista, sivusta	51
Kuva 41 Portaan vetäytyminen ennen tukirakenteiden poistamista, edestä	51
Kuva 42 Portaan vetäytyminen tukirakenteiden poistamisen jälkeen, sivusta	52

Kuva 43 Portaan vetäytyminen tukirakenteiden poistamisen jälkeen, edestä	52
Kuva 44 Portaan repeytyminen irti tukirakenteista	53
Kuva 45 Portaan kupertumisen vertailu	54
Kuva 46 Optimoitu kompensoitu Porras, etupuoli	55
Kuva 47 Tikku kappaleiden lämpöjakaumat	56
Kuva 48 Tikkujen vetäytyminen ennen tukirakenteiden poistamista, sivusta	57
Kuva 49 Tikkujen vetäytyminen ennen tukirakenteiden poistamista, takaapäin	57
Kuva 50 Tikkujen vetäytyminen tukirakenteiden poistamisen jälkeen, sivusta	58
Kuva 51 Tikkujen vetäytyminen tukirakenteiden poistamisen jälkeen, takaapäin	58
Kuva 52 Pystyasennossa tulostetun Tikun vertailu	59
Kuva 53 30 asteen kulmassa lyhyemmän sivun mukaan tulostetun Tikun vertailu	60
Kuva 54 30 asteen kulmassa pidemmän sivun mukaan tulostetun Tikun vertailu, takaapäin	61
Kuva 55 30 asteen kulmassa pidemmän sivun mukaan tulostetun Tikun vertailu, edestä	62
Kuva 56 optimoitu kompensoitu 30 asteen kulmassa pidemmän sivun mukaan tulostetun Tikun vertailu, edestä	62
Kuva 57 optimoitu kompensoitu 30 asteen kulmassa pidemmän sivun mukaan tulostetun Tikun vertailu, takaapäin	63

## Taulukot

Taulukko 1 Testikappaleiden nimet ja mitat	33
--	----

## Käytetyt lyhenteet tai sanasto

AM	Additive manufacturing, lisäävä valmistus
HIP	Hot isostatic pressing, kuuma isostaattinen puristus, teoreettisesti haluttu geometria
PLM	Product lifecycle management, tuotteen elinkaaren hallinta
PBF	Powder bed fusion, jauhepetisulatus



# 1 Johdanto

Opinnäytetyön aiheena on tutkia metallin 3D-tulostuksen muodonmuutoksien simulointia. Työn tavoitteena on todentaa Siemens NX simulaation toimivuus metallin 3D-tulostuksen aikana syntyvistä muodonmuutoksista, lisäksi haluttiin selvittää ohjelmiston tuottamien kompensatioiden käyttökelpoisuus. Työ toteutettiin Turun ammattikorkeakoululle. Toimeksiantajan tarpeena työlle oli todentaa käytössä olevan 3D-tulostimen ja ohjelmiston simulaatiotoiminnon yhteensopivuus.

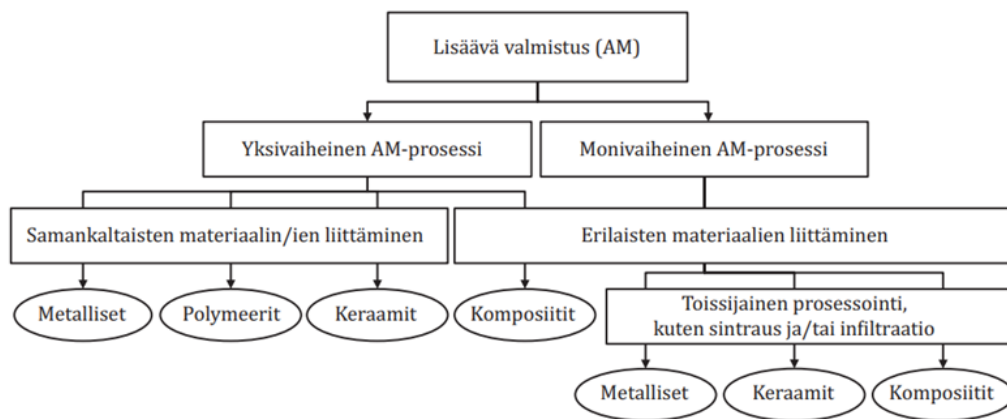
3D-tulostaminen on kasvava valmistusmenetelmä sen tuomien mahdollisuuksien myötä. Simulaatio-ohjelmistojen ja 3D-tulostusmenetelmien yhteensopivuus mahdollistaa tulevaisuudessa uusien tuotteiden ja tekniikoiden monipuolisemman tuottamisen.

Opinnäytetyö alkaa teoriaosuudella, joka pitää sisällään ainetta lisäävän valmistuksen, digitaalisen kaksosen, käytetyn ohjelmiston sekä 3D-skannauksen. Teoriaosuudessa keskitytään erityisesti tutkimuksessa käytettyihin menetelmiin ja prosesseihin. Tutkimusosuus käsittelee opinnäytetyön toiminnallisen osuuden, jossa kerrotaan tutkimuksen kokonaisvaltainen prosessi ja esitetään tutkimuksen vaiheet tarkemmin. Lopussa perehdytään tutkimuksessa syntyneisiin tuloksiin.

## 2 3D-tulostus

3D-tulostus tai kolmiulotteinen tulostaminen on 1980-luvulla syntynyt menetelmä, jossa materiaalia lisätään kerroksittain kappaleen valmistamiseksi. Menetelmästä käytetään myös nimitystä ainetta lisäävä valmistus (AM), jolla pyritään erottamaan valmistusmenetelmä perinteisistä materiaalia poistavista valmistusmenetelmistä, kuten jyrsinnästä tai sorvauksesta.

Tässä kappaleessa käydään yleisesti läpi standardin SFS-EN ISO/ASTM 52900:2021 määrittämistä tulostusmenetelmistä ja avataan tarkemmin opinnäytetyössä käytettyä menetelmää kappaleessa 2.4.



Kuva 1 Yksi- ja monivaiheiset AM-valmistusprosessit (ISO/ASTM 52900:2021 2021, 24)

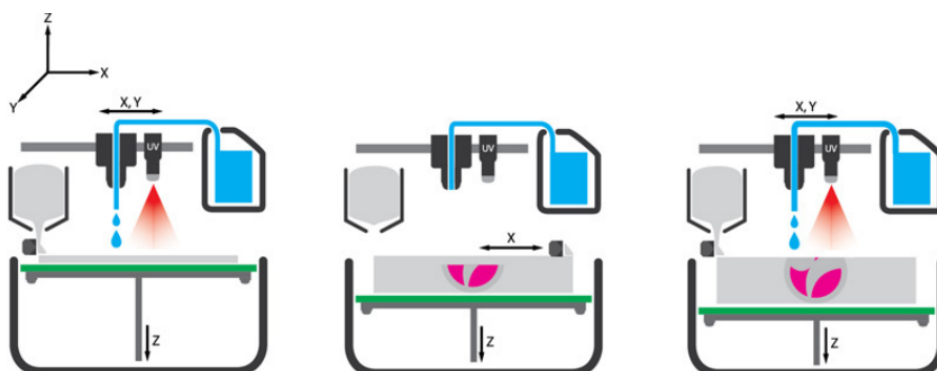
### 2.1 Yleisesti 3D-tulostuksesta

Peruseriaatteena AM-prosesseissa on, että materiaalia lisäämällä saadaan muodostettua kolmiulotteinen osa. AM-prosessissa osat voidaan valmistaa niin, että ne saavuttavat materiaalin suunnitellun perusgeometrian ja perusominaisuudet joko yksi- tai monivaiheisella prosessilla. Molemmat prosessit saattavat edellyttää jälkikäsittelyoperaatioita, kuten lämpökäsittelyä, kuuma isostaattista puristusta (HIP), viimeistelyä tai muita toimia, jotta lopputuote saavuttaa kaikki ominaisuudet. (SFS-EN ISO/ASTM 52900:2021 2021, 23–24)

## 2.2 Menetelmäluokat

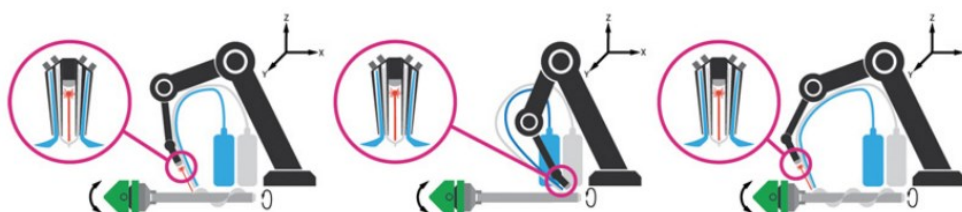
Standardin SFS-EN ISO/ASTM 52900:2021 mukaan AM menetelmäluokkia on seitsemän. Luokat ovat jaettu seuraavasti:

- Sideaineen suihkutus (BJT); lisäävän valmistuksen menetelmä, jossa nestemäinen sideaine kohdistetaan valittuihin kohtiin jauheen liittämiseksi.



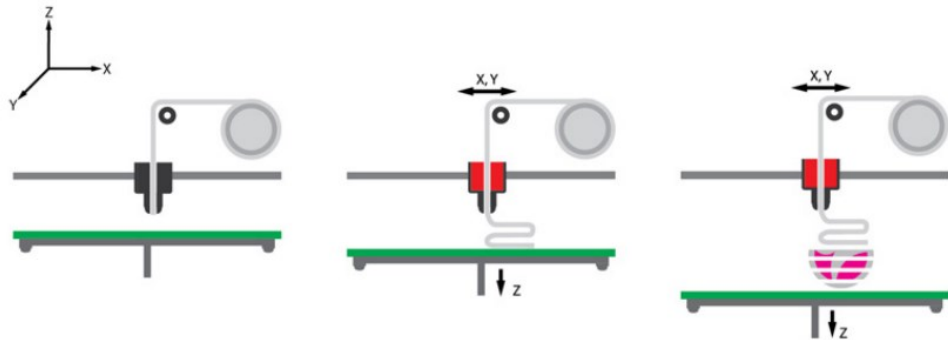
Kuva 2 Sideaineen suihkutus (Alonen ym. 2016, 24)

- Suorakerrostus (DED); lisäävän valmistuksen menetelmä, jossa kohdennettua lämpöenergiaa käytetään sulattamaan ja liittämään materiaali kohdennetusti. Kohdennettu lämpöenergia tarkoittaa, että energialähde (esim. laser, elektronisuihku tai plasma) kohdennetaan sulattamaan liitettävä materiaali.



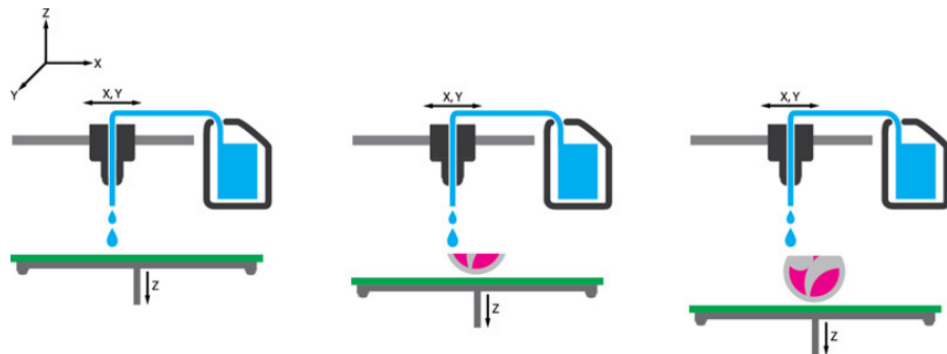
Kuva 3 Suorakerrostus (Alonen ym. 2016, 38)

- Materiaalin pursotus (MEX); lisäävän valmistuksen menetelmä, jossa materiaali annostellaan kohdennetusti suuttimen tai reiän läpi.



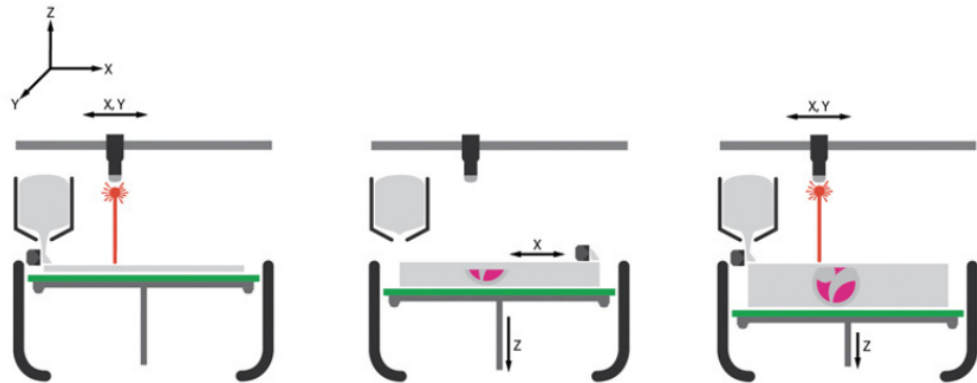
Kuva 4 Materiaalin pursotus (Alonen ym. 2016, 19)

- Materiaalin suihkutus (MJT); lisäävän valmistuksen menetelmä, jossa raaka-ainepisarat kovetetaan kohdennetusti.



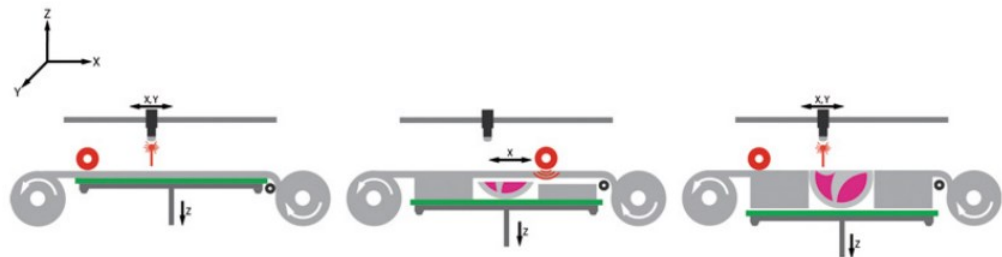
Kuva 5 Materiaalin suihkutus (Alonen ym. 2016, 22)

- Jauhepetisulatus (PBF); lisäävän valmistuksen menetelmä, jossa lämpöenergia sulattaa tai sintraa jauhepedin kohdennettuja alueita.



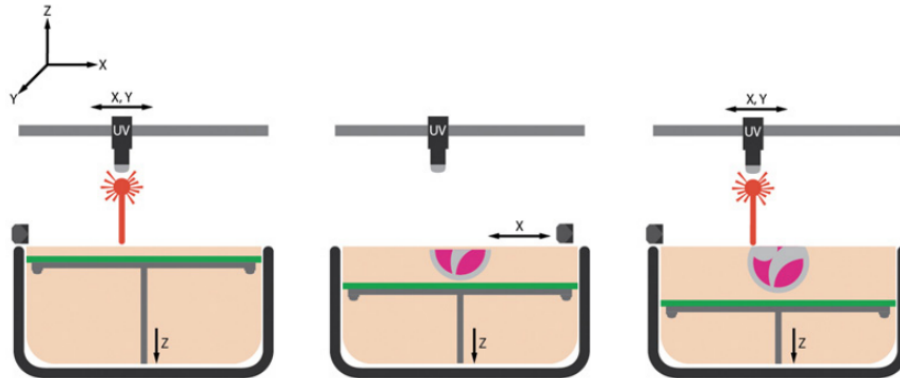
Kuva 6 Jauhepetisulatus (Alonen ym. 2016, 31)

- Kerroslaminointi (SHL); lisäävän valmistuksen menetelmä, jossa materiaalileikkeitä liitetään siten, että muodostuu kappale.

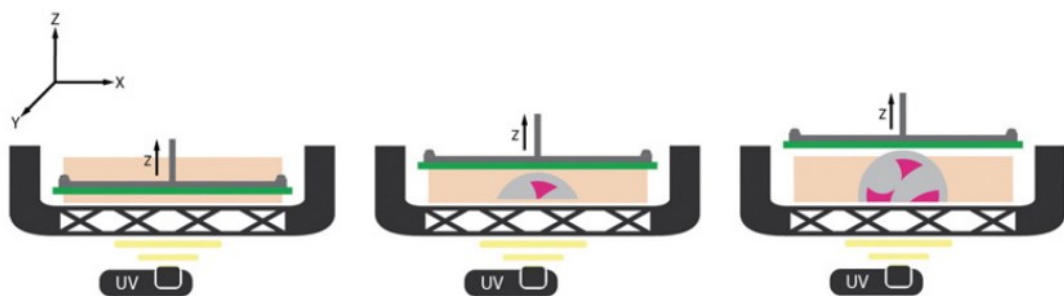


Kuva 7 Kerroslaminointi (Alonen ym. 2016, 25)

- Valokovetus altaassa (VPP); materiaalia lisäävän valmistuksen menetelmä, jossa nestemäinen muovi kovetetaan kohdennetusti käyttäen valoaktiivista polymerointia.



Kuva 8 Valokovetus altaassa, laskeva peti (Alonen ym. 2016, 29)



Kuva 9 Valokovetus altaassa, nouseva peti (Alonen ym. 2016, 29)

### 2.2.1 Prosessin määrittely

Prosessin määrittely kirjataan seuraavasti; ensin määritellään prosessikategoria, jonka jälkeen viivalla (-) eritellään AM-prosessin erityispiirteet ja lopuksi esitetään vinoviivalla (/) käytettävä materiaali. (SFS-EN ISO/ASTM 52900:2021 2021, 21–22)

Erytispiirteiden lyhenteet jauhepetisulatuksessa:

- LB lasersäteelle
- EB elektronisäteelle
- IrL kun lämpöenergiälähde on infrapunavallo

Perusmateriaalien lyhenteet ovat seuraavat:

- M metallimateriaaleille
- P polymeerimateriaaleille
- C keraamimateriaaleille
- Cp, kun on kyseessä komposiittimateriaalit, jotka ovat eri perustyyppisiä

Tarkempi käytetty materiaali merkitään vinoviivalla (/) materiaalin perään. (SFS-EN ISO/ASTM 52900:2021 2021, 22)

”Prosessiluokka on jauhepetisulatus (PBF), elektronisuihkua käytetään konsolidointiin (-EB), kyseessä on metallinen materiaali (/M), tarkemmin Ti6Al4V (/Ti6Al4V). Koska elektronisuihkua voidaan kuitenkin käyttää vain sähköä johtavan materiaalin konsolidointiin ja koska Ti6Al4V-metalliseosta voi tuskin erehtyä pitämään minään muuna kuin metallisena materiaalina, "/M" voidaan tässä tapauksessa jättää pois, jolloin spesifikaatio on: PBF-EB/Ti6Al4V” (SFS-EN ISO/ASTM 52900:2021 2021, 22).

### 2.2.2 Esimerkkejä prosessin määrittelyn kirjaamiselle

PBF-LB/M/AlSi10Mg, eli jauhepetisulatus-lasersäde/metalli/AlSi10Mg

PBF-EB/Inconel625, eli jauhepetisulatus-elektronisäde/Inconel625

PBF-IrL/P/PA12, eli jauhepetisulatus-infrapunvalo/polymeeri/PA12

PBF-LB/P/PMMA

PBF-EB/Al2023

### 2.3 Materiaalit

Tulostusmateriaalit vaikuttavat tulosteen ominaisuuksiin, haluttuun lopputulokseen ja yleiseen suorituskykyyn. Suunniteltu tuote ja sen funktio vaikuttavat merkittävästi materiaalin valintaan.

AM-prosessi hyödyntää yleisimmin polymeeriä ja metallia perusmateriaaleina. Nämä materiaalit muodostavat perusteet 3D-tulostukselle, mutta lisäksi käytetään monipuolisesti muita materiaaleja, kuten keraameja, komposiitteja ja paperia. Mielenkiintoisena lisänä voidaan mainita mahdollisuus tulostaa myös kudosta, joka avaa uusia mahdollisuuksia biolääketieteen tutkimuksissa ja terveydenhuollossa.

AM-prosessit mahdollistavat myös kombinaatiot, jotka yhdistävät useamman materiaalin käytön, jotta tuotteeseen saadaan erilaiset toiminnallisuudet.

## 2.4 Jauhepetisulatus

Jauhepetisulatus (Powder Bed Fusion) on suosittu AM-prosessi, jossa käytetään metallia ja polymeeriä materiaaleina. PBF-menetelmässä materiaali syötetään jauheena joko säiliöstä tai sen vierestä olevasta jauhevarastosta. Kappale muodostuu asteittain jauheen levittyessä kerroksittain tulostuspedille. Materiaali syötetään pedille telan tai terän avulla. Kerroksien välissä materiaalia sulatetaan prosessissa käytetyllä sulatusmenetelmällä. Tulostuksen jälkeen kammio jäähdytetään ja ylimääräinen jauhe kerätään uudelleenkäytettäväksi. Metallien ja polymeerien tulostukset sisältävät erilaisia prosessitekniikoita, joissa tulee ottaa käytettävän tekniikan erityispiirteet huomioon. Erityispiirteiden ansiosta valmistettavasta kappaleesta saadaan mahdollisimman optimaalinen. Esimerkiksi metallin käsittelyssä pystytään erottamaan PBF-LB, joka soveltuu metalleille ja polymeereille, ja PBF-EB, joka soveltuu vain metalleille. (ISO/ASTM 52911-1:2019 2019, 8)

Metallien PBF-LB-prosessissa voidaan käyttää pienitehoisia lasereita, joilla metallijauheen hiukkaset osittain sulaessaan kiinnittyvät toisiinsa. Lisäksi voidaan käyttää suuritehoisia lasereita, joissa säteet sulattavat jauhehiukkaset kokonaan yhteen. Polymeerien PBF käyttää pienitehoista laseria jauheen sintraamiseen yhteen lähes kaikissa tapauksissa. (ISO/ASTM 52911-1:2019 2019, 8)



PBF-EB-prosessissa energialla, joka siirretään säteellä metalliin, on korkeampi intensiteetti ja prosessi toimii korkeammassa lämpötilassa, kuin lasersulatuksessa. Tämä tukee tyypillisesti nopeampaa tulostusta pienemmällä resoluutiolla. (ISO/ASTM 52911-1:2019 2019, 8)

Koska yleensä jauhepeti esilämmitetään ja pidetään lähellä sulamispistettä tulostuksen aikana, elektronisuihkusulatuksessa käytettävä pienempi lämpö johtaa nopeampaan tulostusprosessiin ja pienempiin lämmön aiheuttamiin jännityksiin. Elektronisuihkusulatuksessa tulostuskammion pidempi jäähdytysaika, yleisesti tulostuksien suuri vähimmäisominaisuuskoko ja suurempi pinnan karheus antavat lasersulatukselle kilpailukykyä. (ISO/ASTM 52911-1:2019 2019, 8)

#### 2.4.1 Jauhepetisulatuksen edut ja rajoitukset

PBF-prosesseilla voidaan saavuttaa edullinen osien valmistus. Prosessit mahdollistavat suunnittelun vapauden sekä monimutkaisten geometrioiden tuottamisen, kuten vapaamuotoiset geometriat. Lisäksi topologiaoptimoinnilla pystytään vähentämään kappaleen massaa vaikuttamatta kappaleen mekaanisiin ominaisuuksiin. Täyttörakenteena kappaleissa voidaan käyttää erilaisia muotorakenteita, sekä pystytään integroimaan useat toiminnot samaan kappaleeseen. Kappaleen monimutkaisuus ei myöskään vaikuta sen valmistuskustannuksiin toisin kuin perinteisissä ainetta poistavissa menetelmissä. Koska kappaleet pystytään valmistamaan lähes lopulliseen muotoon ja kokoon, niiden kokoamis- ja liitosprosesseja voidaan vähentää, jolloin kappaleista saadaan kestävämpiä. Lisäksi kappaleen osien yleisiä ominaisuuksia pystytään konfiguroimaan valikoivasti säätämällä parametreja paikallisesti. Myös kappaleen läpivientiaika suunnittelusta tuotantoon nopeutuvat. (ISO/ASTM 52911-1:2019 2019, 9–10)

Näihin prosesseihin liittyy myös haittoja, jotka tulee ottaa huomioon tuotteiden suunnittelussa. Kappaleissa tapahtuu muodonmuutoksia, jäännösjännityksiä ja kutistumista, jotka johtuvat paikallisista lämpötilaeroista. Muodonmuutokset ja

pinnan laatu vaativat kappaleiden jälkikäsittelyn, ja näiden työstövara pitää ottaa huomioon suunnitteluvaiheessa. Prosessin suunnittelussa on myös huomioitava materiaalin anisotrooppiset ominaisuudet, jotka tulevat esille kerroksellisessa valmistuksessa. Kaikki materiaalit ja niiden ominaisuudet eivät sovellu PBF-prosessiin, sillä ne voivat poiketa odotetuista arvoista. Liiallinen tukirakenteiden käyttö voi lisätä materiaalihukkaa ja tulostuksen epäonnistumisen riski kasvaa. PBF-prosessissa jauheenpoisto on aina yksi vaihe jälkikäsittelyssä. (ISO/ASTM 52911-1:2019 2019, 9–10)

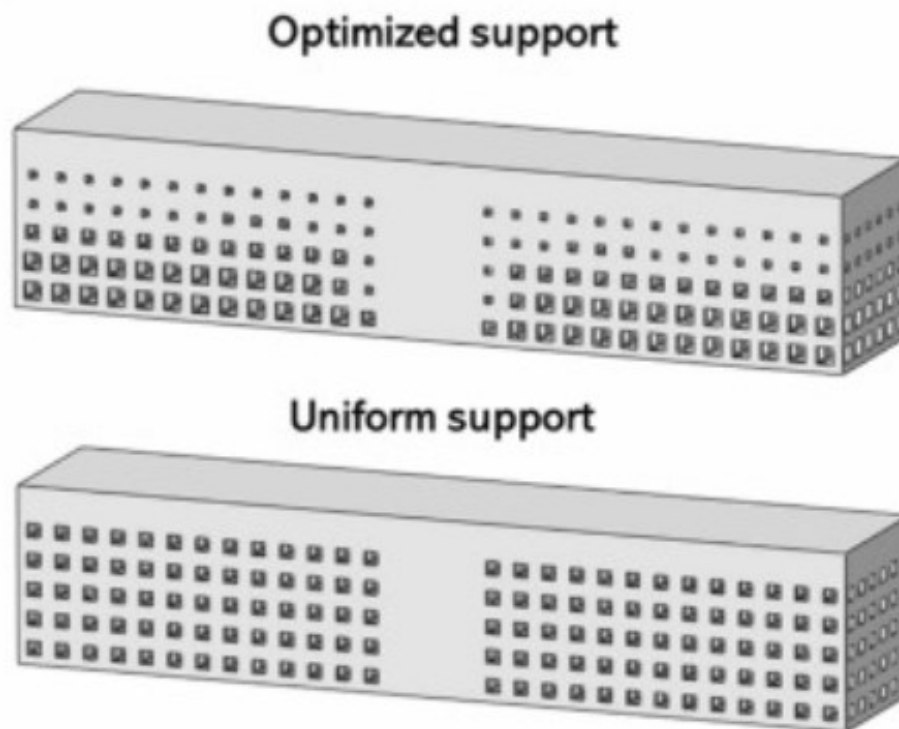


Kuva 10 Jauheenpoisto jälkikäsittelynä

#### 2.4.2 Tulostettava kappale

PBF-menetelmässä tulostettavien kappaleiden kokoa ei rajoita pelkästään jauhekammion työtilavuus, vaan jäännösjännityksistä aiheutuvat halkeamat ja muodonmuutokset vaikuttavat myös kappaleen kokoon. Lämmön siirtymistä

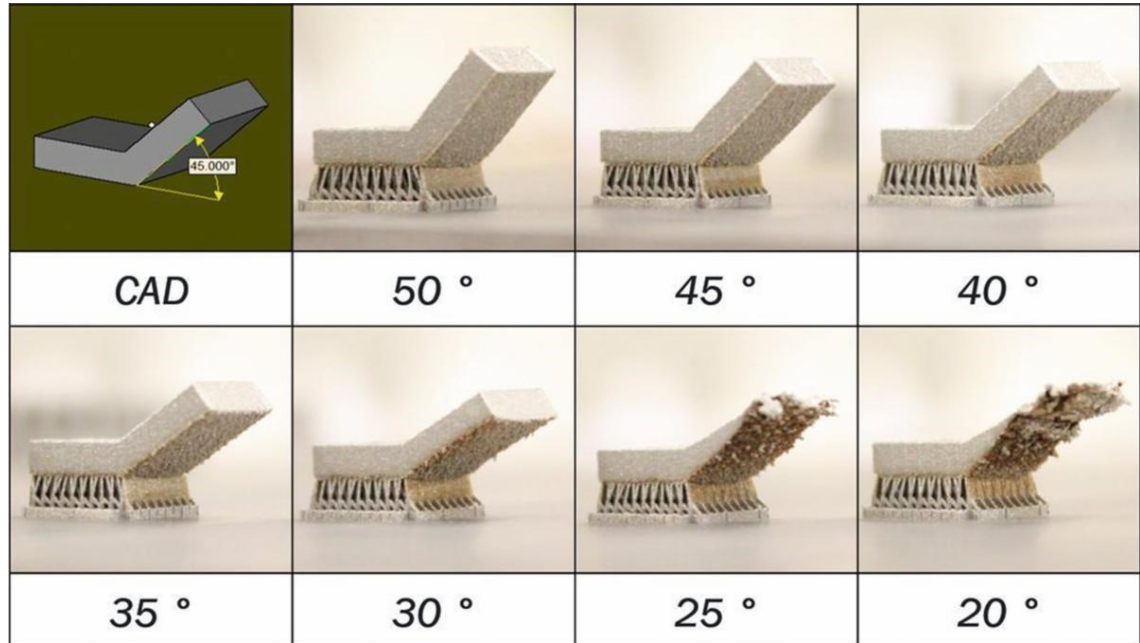
kappaleissa pystytään kontrolloimaan tukirakenteiden avulla (kuva 11) ja myös tukirakenteiden suunnittelulla pystytään vaikuttamaan kappaleiden tulostettavuuteen. (ISO/ASTM 52911-1:2019, 8–9; Kang-Hyun ym. 2022)



Kuva 11 optimoitu- ja yhtenäinen tukirakenne (Kang-Hyun ym. 2022)

Tukirakenteiden tehtävä on myös tukea tulostettavaa kappaletta ja niiden käyttöön liittyä sääntöjä. Metallia tulostettaessa käytetään tukirakenteita joissain tapauksissa kappaleen osille (kuva 12), mutta polymeerejä tulostettaessa niitä ei tarvita. Yhtenä tärkeänä tekijänä kappaletta tulostaessa pitää ottaa huomioon tuotantokustannukset. Näillä on suora vaikutus kappaleen kokoon ja sen tilavuuteen. Kustannuksia voidaan minimoida valitsemalla kappaleelle optimaalisin sijainti ja tulostussuunta. Kappaleen sijoittaminen pedille mahdollisimman matalaksi vähentää tulostuksessa käytettävän jauheen määrää. Jauheen uudelleenkäytön mahdollisuudet eri prosesseissa vaikuttavat tähän merkittävästi. Näin ollen jauheen tilavuuden hinta, joka tulostuspedin

täyttämiseen kuluu, pitäisi ottaa huomioon. Jauhe päätyy jätteeksi, jos jauhetta ei saa uudelleen käyttää, ja tämä nostaa kappaleen kustannuksia. Kappaleen tulostusprosessi olisi hyvä suunnitella siten, että tulostusalusta olisi määritelty. (ISO/ASTM 52911-1:2019 2019, 8–9; Kang-Hyun ym 2022)



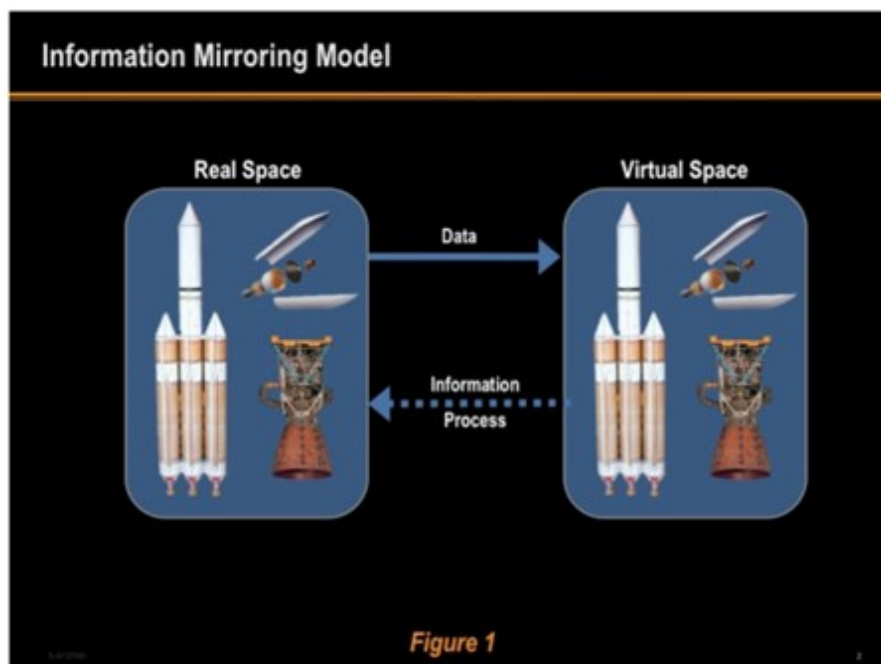
Kuva 12 Tulostus ilman tukirakenteita (Bentley 2020)

### 3 Digitaalinen kaksonen

Ensimmäinen ajatus digitaalisesta kaksosesta juontaa juurensa 1960-luvulle, jolloin NASA kehitti peilausteknologiaa simuloidakseen avaruudessa käytettäviä järjestelmiä monimuotoisten fyysikaalisten vastakappaleiden avulla. (Ferguson 2020)

Digitaalinen kaksonen käsite esiteltiin ensimmäisen kerran vuonna 2002 Michael Grievesin luentosarjassa Michiganin yliopistossa. Luento keskittyi tuotteen elinkaaren hallintaan PLM (Product lifecycle management). Tämä innovatiivinen konsepti tarkoitti yksinkertaisesti fyysisen tuotteen digitaalista esitystä ja niiden välisen tiedonsiirron helpottamista. (Grieves 2015)

2000-luvun alussa digitaaliset mallinnukset fyysisistä tuotteista olivat vielä varhaisessa kehitysvaiheessa sekä tuotteen digitaalinen ylläpito oli rajoittunutta ja pääasiassa manuaalisesti kerättyä tietoa. Käsitteen perusajatuksena oli näkemys kahdesta erillisestä osasta: fyysinen systeemi todellisessa tilassa ja virtuaalinen systeemi, joka sisältää kaiken tiedon fyysisestä vastineesta. (Grieves 2015)



Kuva 13 Digitaalinen kaksonen (Grieves 2015)

### 3.1 Digitaalisen kaksosen määritelmä

Digitaalinen kaksonen tarkoittaa todellisten kokonaisuuksien, kuten prosessien, fyysisen ominaisuuden, järjestelmien, laitteiden ja tuotteiden virtuaalista vastakappaletta fyysiselle kohteelle, jota voidaan käyttää simuloimaan, analysoimaan ja optimoimaan kohteen ominaisuuksia ja suorituskykyä realimaailmassa. Virtuaalinen vastakappale kulkee fyysisen kohteen mukana sen synnystä aina elinkaaren loppuun asti. (Devasia 2020)

Digitaalinen kaksonen pystyy osoittamaan monifysikaalisen simuloinnin, data-analytiikan ja koneoppimiskyvyn avulla suunnittelumuutosten, käyttöskenaarioiden ja ympäristöolosuhteiden vaikutukset. Datan keräys tapahtuu fyysisiin kohteisiin asetettujen antureiden avulla. Kerätyn datan perusteella vastakappale kehittyy ja päivittyy jatkuvasti peilaten kaikkea tietoa fyysisestä kohteesta. Digitaalinen kaksonen mahdollistaa jatkuvan tuotteiden optimoinnin sekä nopeamman kehityksen ja suorituskyvyn laskien kustannuksia. (Siemens Digital twin 2023)

#### 3.1.1 Simulaatio ja digitaalinen kaksonen

Digitaalinen kaksosen keskeinen osa on simulaatiomalli, joka toteuttaa simuloitun kohteen käyttäytymistä. Realiajassa kehittyvä simulaatio kehittää uusia ratkaisuja, jotka hyödyntävät jatkuvasti kasvavaa laskentatehoa ja samalla vähentää matemaattista monimutkaisuutta ja abstrakteja malleja fyysiseen käyttöön. Lopullisena tavoitteena on, että simulaatioalgoritmit voidaan laskea realiajassa niin, että ne voivat toimia rinnakkain fyysisen prosessin kanssa. Tämä tarjoaa parannetun päätöksenteon ja optimaallistaa lisätyn todellisuuden ja virtuaalisen havainnoinnin keinoja. (Siemens Simulation & Digital twin 2017)

## 4 Siemens NX

Siemen NX on suunnitteluohjelmisto, jonka Siemens Digital Industries Software on omistanut vuodesta 2007. Yritys on yhdysvaltalainen tietokoneohjelmistoyritys, joka on erikoistunut 3D- ja 2D- tuotteiden hallintaohjelmistoihin (PLM). (Siemens 2023)

### 4.1 NX yleisesti

Siemens NX ohjelmistoa käytetään monipuolisesti tuotekehityksen, suunnittelun ja valmistuksen erilaisiin tarpeisiin. Ohjelmistoa sovelletaan suunnitteluvaiheessa parametriseen suunnitteluun sekä suoraan kiinteään- ja pintamallinnukseen. Teknisten, kuten staattiseen, dynaamiseen, sähkömagneettiseen, nesteiden ja lämmön analyysien tuottamiseen voidaan käyttää simulointia. Ohjelmiston avulla voidaan suorittaa tarkastelua myös elementtimenetelmää hyödyntäen. (Siemens 2023)

Simuloinnilla tarkoitetaan kuvausta tai jäljennystä jostain tosielämän tapahtumasta tai toiminnosta. Simulointia käytetään tutkimaan tapahtumaa oikeissa olosuhteissa, ympäristössä ja oikeilla materiaaleilla.

Valmistuksen osalta ohjelmisto käyttää koneistusmoduulia, joka integroidaan saumattomasti valmiiseen suunnitteluun. Tämä mahdollistaa tehokkaan valmistusprosessin, jossa koneistusmoduulit tukevat suunnittelun saumatonta siirtymistä valmistusvaiheeseen. (Siemens 2023)

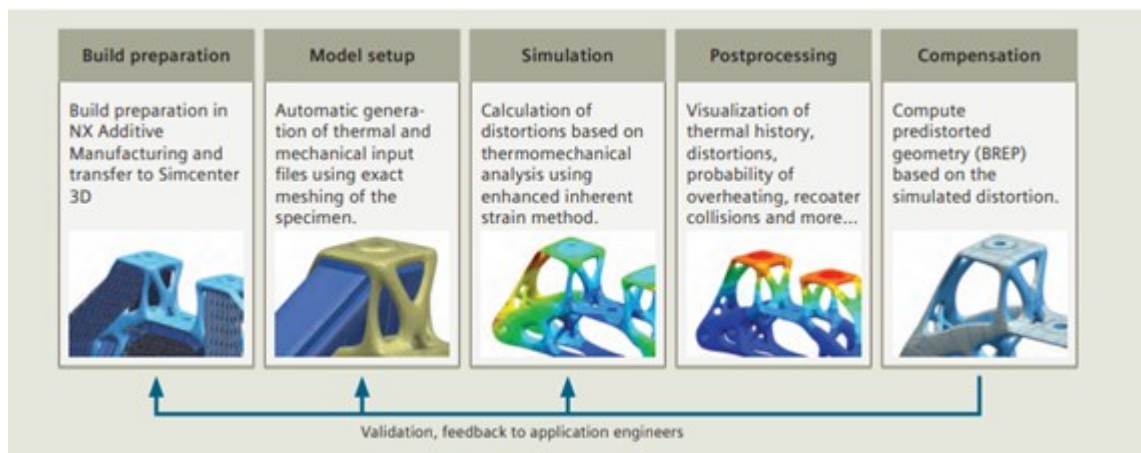
### 4.2 Additive manufacturing-työkalu

Additive manufacturing työkalu on osa Siemens PLM NX -ympäristöä, joka mahdollistaa osien suunnittelun muutokset. AM-työkalulla hallitaan osien sijaintia ja automatisoidaan parametrien hyötyä. (Siemens Additive manufacturing 2023)

Työn kulku alkaa osan suunnittelusta ja automaattisesta tuen generointimoduulista, joka luo CAD-pohjaisia tukirakenteita sekä graafisen käyttöliittymän tukirakennetyyppien mukauttamiseen ja rakenteiden parametrien valintaa. AM-työkalu pitää sisällään myös tuen saavutettavuuden ja asennusanalyysin, joiden avulla voidaan määrittää tukirakenteiden laajuus ja saavuttaa optimaalisimmat tuet rakenteelle. (Siemens Additive manufacturing 2023; Anand, S. ym. 2019)

#### 4.2.1 Additive manufacturing Simcenter

Simcenter on laadukas simulointiympäristö ainetta lisäävässä valmistuksessa. Simulointi ohjelmistoa käytetään vääristymien ja vikojen ennustamiseen ennen osien tulostamista. Tämä vähentää testitulosten määrää ja parantaa lopullisen tulosteen laatua. Ohjelmisto käyttää simulointiin tetraedri kuvioitua verkkoa, jonka geometria tukee tehokasta algoritmia. (Siemens Simcenter 3D for additive manufacturing simulation 2022)



Kuva 14 Simulaatio prosessin kulku (Siemens Simcenter 3D for additive manufacturing simulation 2022)

Ohjelma simuloi AM-moduulin hyötöprosessia selektiiviseen lasersulatukseen (SLM). Perustana käytetään rakennetun alustan osia, mukaan lukien osien tukirakenteet. Simulointiin valitaan osat ja määritetään tulostusprosessin parametrit. Parametrit koostuvat muun muassa materiaalista, osien määrästä,



kerrosleikkauksista ja halutusta simulointi lopputuloksesta. Tuloksena on saatavana lämpötilan jakautuminen ja osien vääristymä. Ohjelmisto luo kompensoitua geometriaa, perustuen simuloituilla vääristymäkentillä. Kompensoitusosätiedostoa voidaan käyttää korvaamaan alkuperäistä osaa ja siirtää suoraan rakennusalustalle. (Siemens Simcenter 3D for additive manufacturing simulation 2022)

## 5 3D-skannaus

3D-skannaus on tekniikka, jolla fyysinen kohde pystytään tallentamaan skannauksen avulla virtuaaliseen muotoon. Tekniikka käyttää erilaisia antureita vastaan ottamaan skannerin lähettämiä signaaleja kappaleen pinnan muodoista.

Tässä osiossa käydään läpi yleisesti erilaisia 3D-skannausmenetelmiä ja niiden peruseräiteitä. Lisäksi syvennyttään hieman opinnäytetyössä käytettyyn skanneriin ja sen toimintaan.

### 5.1 Yleisesti 3D-skannuksesta

3D-skannauksessa tuotetaan dataa pistepilvenä, koordinaattipisteinä tai etäisyysmittoina. Dataa esitetään joko mittakaavassa digitaalisella mallilla tai 3D-graafisella renderöinnillä. Kun data on saatu virtuaaliseen muotoon, kappaleen fyysiset ominaisuudet voidaan mitata. 3D-skannausdataa käytetään usein vertailemaan fyysisen kappaleen ja nominaalikappaleen eroja ja yhtäläisyyksiä. 3D-skannauksen menetelmiä ovat

- Laser-skannaus (lase scanning)
- Valokuvapohjainen skannaus (Photogrammetry)
- Strukturoitu valoskannaus (Structured light scanning/white light scanning)
- MRI- ja CT-skannaus (MRI and CT scanning)
- Ultraääniskannaus (Ultrasound scanning)
- Machine vision-skannaus (Machine vision)
- Teodoliitti-skannaus (Theodolite)
- Koordinaattimittausskannaus (Coordinate measuring machines, CMMs)
- Tracker-skannaus (Trackers)

Skannerit jaetaan koskettaviin ja ei-koskettaviin skannereihin, ja näistä ei-koskettavat jaetaan vielä aktiivisiin ja passiivisiin skannereihin. (3D ScanCo 2023; Ebrahim 2015)

## 5.2 ZEISS T-SCAN

ZEISS T-SCAN on modulaarinen mittausjärjestelmä, joka pystyy tallentamaan kappaleen tiedot 3D-muotoon optisella mittausmenetelmällä. T-SCAN mahdollistaa mitattujen kohteiden 3D-diagnosoinnin laserkolmioperiaatteen perusteella. Järjestelmä koostuu käsikäyttöisestä laser-skannerista T-SCAN (kuva 15),



Kuva 15 T-SCAN (ZEISS n.d)

optisesta seurantajärjestelmästä T-TRACK (kuva 16)



Kuva 16 T-TRACK (ZEISS n.d)

sekä kosketusanturista T-POINT (kuva 17). (ZEISS n.d; T-SCAN 20 measuring system 2020)



Kuva 17 T-POINT (ZEISS n.d)

### 5.3 Laserskannaus

3D-laserskannaus ja laserskannerit luokitellaan yleensä kolmeen pääluokkaan niiden toimintatavan perusteella. Toimintatavat ovat lentoaika, vaihesiirto ja laserkolmio, joita käytetään yleensä itsenäisesti, mutta voidaan myös käyttää yhdessä luomaan monipuolisempia skannausjärjestelmiä. (3D ScanCo 2023; Ebrahim 2015)

Lentoaikaskannerit (Time of flight laser scanners) lähettävät laservalopulssin, joka heijastuu skannattavasta kohteesta. Mallin muodostuminen tapahtuu anturien havaitessa heijastukseen kuluneen matkan ajan, sillä laservalon nopeus tiedetään tarkasti. (3D ScanCo 2023)

Vaihesiirtoskannerit (Phase shift laser scanners) toimivat osittain samalla periaatteella kuin lentoaikaskannerit, mutta vaihesiirtoskanneri tarkentaa vielä heijastuksen aikaa, kuten vernierin asteikossa. (3D ScanCo 2023)

Laserkolmioskanneri (Laser triangulation) projisoi laserviivaa tai -pistettä kappaleeseen ja tutkii sen heijastumista sensorilla, jonka paikka on määritetty. Kappaleen muodoista aiheutuvat heijastuskulmat tuottavat 3D-datan. (3D ScanCo 2023)

## 6 Tutkimus

### 6.1 Tutkimuksen digitaalinen kaksosen

Digitaalinen kaksosen tässä opinnäytetyössä pohjautuu kokonaisvaltaiseen prosessiin ja se koostuu neljästä eri vaiheesta. Digitaalisen kaksosen määrittämisessä käytetään yleisesti anturien lähettämää datatietoa, mutta tässä tutkimuksessa puhutaan mittausdatasta, joka saatiin skannerin avulla tuotettua. Digitaalisen kaksosen muodostaminen aloitettiin suunnittelusta ja eteni prosessin mukaisesti lopputuloksien määrittämiseen asti. Kaksosen tuki prosessin tekemistä ja ylläpitoa koko opinnäytetyön ajan.

Ensimmäisenä vaiheena tutkimuksessa luotiin halutut testikappaleet 3D-malleiksi. Mallit muodostettiin halutun lopputuloksen saavuttamisen mukaisiksi. Mallien määritystä avataan enemmän seuraavassa kappaleessa (6.1.1). 3D-mallinnukset hyödynnettiin simuloinnissa sekä ne loivat tarkastelupinnan virtuaaliseen kappaleeseen.

Toisessa vaiheessa siirrettiin virtuaaliset mallit simulaatioympäristöön ja toteutettiin virtuaalinen tulostusprosessi simulaationa, jotta saatiin ohjelmiston laskemat muodonmuutokset tuloksena. Lisäksi simulaatio malleille toteutettiin kompensatio, jota hyödynnettiin lopputuloksen saavuttamiseen.

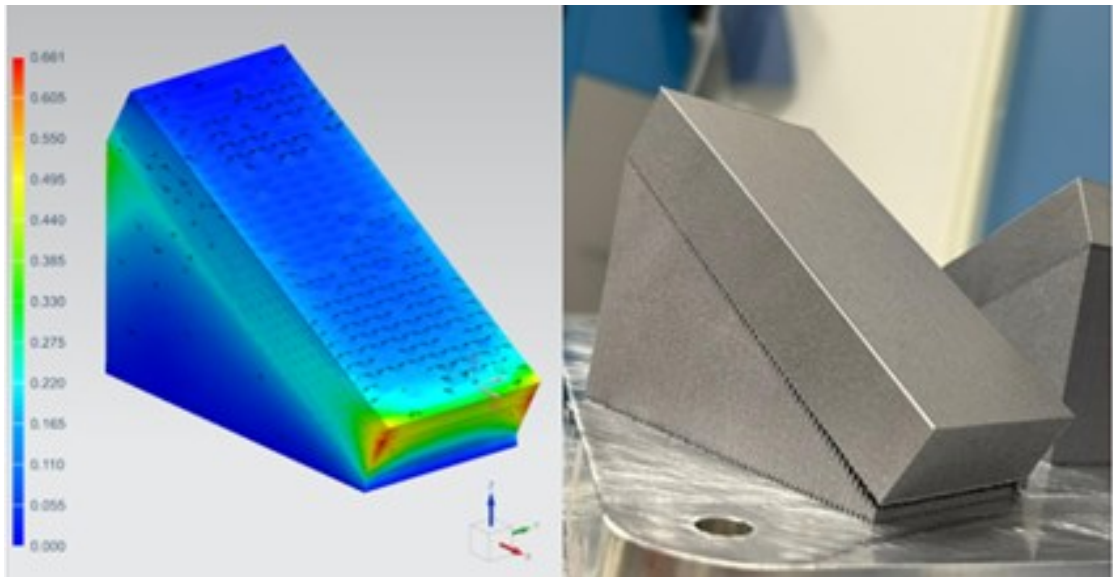
Kolmannessa vaiheessa tutkimusta aloitettiin mallinnuksien tulostaminen, joka loi tutkimuksen ensimmäiset fyysiset kohteet. Fyysisiin kohteisiin tapahtuvia muodonmuutoksia verrattiin simulaatiosta saatuihin muodonmuutoksiin sekä kompensatio kappaleet tulostettiin, jotta voitiin selvittää kompensation toimivuus.

Neljännessä vaiheessa hyödynnettiin skannausta mittausdatan todentamiseksi fyysisissä kappaleissa sekä virtuaalisissa kappaleissa.

Nämä neljä vaihetta sisältävät kaikki fyysisen prosessin ja virtuaalisen prosessin. Skannauksella määriteltiin mittausdata, jolla voitiin todeta digitaalisen

kaksosen paikkaansa pitävyydet. Tutkimusvaiheita avataan lisää seuraavissa kappaleissa.

Esimerkki tutkimuksen digitaalisesta kaksosesta on esitettyä kuvassa (kuva 18), jossa voidaan huomata simulaatiossa palkin suurin muodonmuutos muodostuvan alaosan yläkulmiin, joka on täysin verrannollinen fyysisen tulosteen kanssa. Fyysisessä tulosteessa suurin muodonmuutos on juuri muodostunut samaan kohtaan, joka on saanut palkin repeytymään tukirakenteesta irti ja kovertumaan.



Kuva 18 Tutkimuksen digitaalinen kaksonen

### 6.1.1 Testikappaleiden muotojen määrittäminen

Opinnäytetyössä testikappaleilla haettiin näkyviä muodonmuutoksia, joiden avulla pystyttiin havainnollistamaan metallin 3D-tulostuksen aikana syntyviä muodonmuutoksia. Kappaleiden haluttiin olevan mahdollisimman yksinkertaisia geometrialtaan, jotta muodonmuutokset olisivat helposti havaittavissa sekä skannausten tulokset olisivat mahdollisimman luotettavia. Yksinkertaisten kappaleiden muodonmuutosten analysointi ja dokumentointi olisi selkeämpää sekä se edistäisi tutkimuksen tavoitteiden saavuttamista. Lisäksi kappaleiden määrittämisen apuna hyödynnettiin laboratorioinsinöörin kokemuksia 3D-tulostuksen aikana syntyvistä muodonmuutoksista. Testikappaleet mallinnettiin



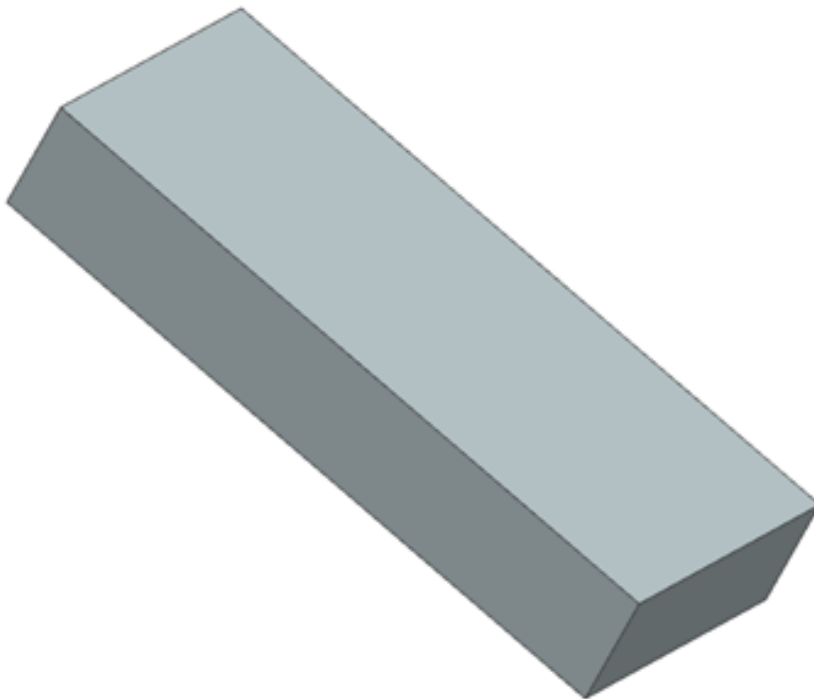
Siemens NX -ohjelmiston avulla, sillä Turun ammattikorkeakoululla on kyseiselle ohjelmistolle lisenssi.

Testikappaleiden muodoiksi määräytyi kolme eri muotoa (kuvat 19–21). Opin-  
näytetyössä on määritelty testikappaleille nimet, koska testikappaleet olivat  
geometrialtaan samanlaisia. Nimeäminen helpotti kappaleiden havainnointia.  
Taulukossa 1 kuvataan kappaleiden koot millimetreissä.

Kappale	Pituus	Leveys	Syvyys
Palkki	120	50	20
Tikku	120	20	10
Porras	120	50	40

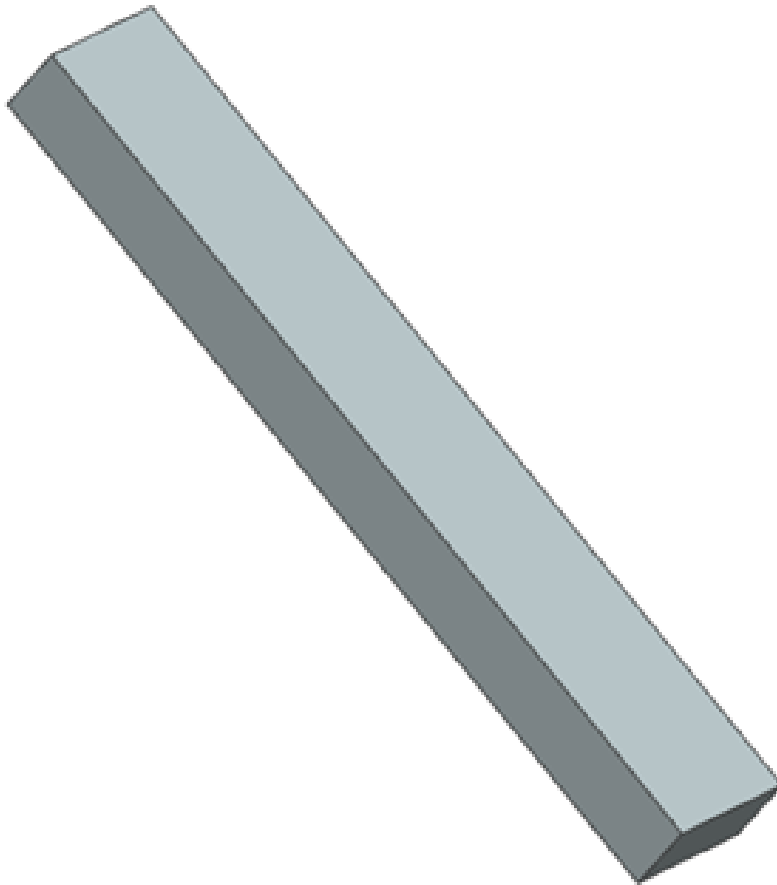
Taulukko 1 Testikappaleiden nimet ja mitat

Testikappale Palkki esitetään kuvassa 19. Kuten aiemmin mainittiin, kappaleen haluttiin olevan yksinkertainen, joten suorakaiteen muoto tuki tätä geometrialtaan. Kappaleen tulostamisessa huomattiin haluttua muodonmuutosta, jota lähdettiin vertaamaan pienempään kappaleeseen.



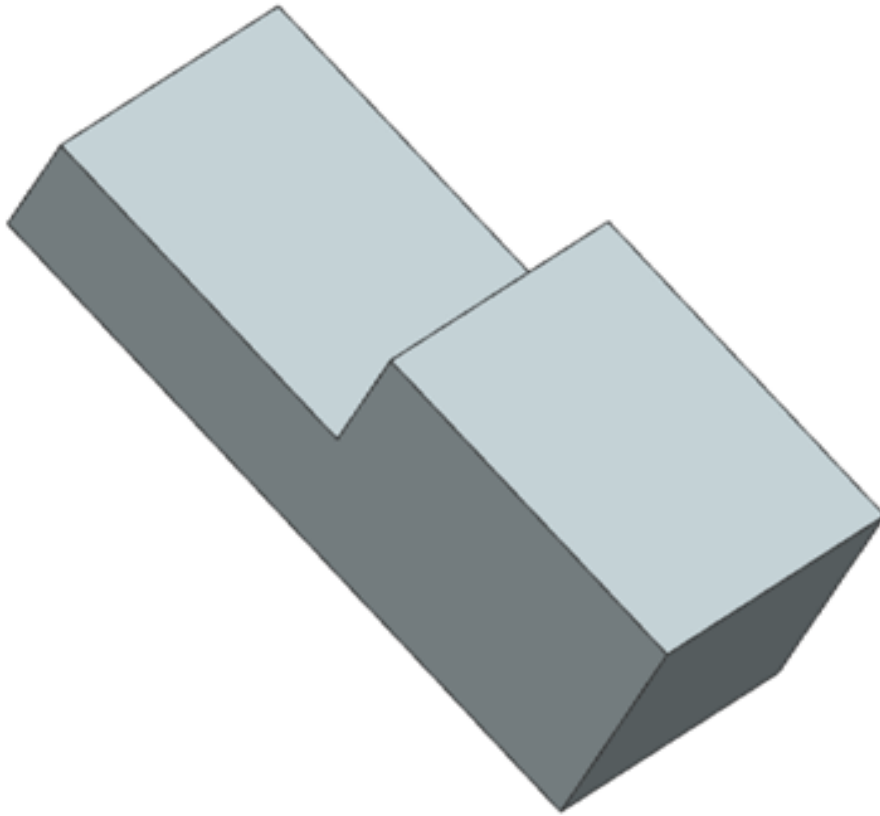
Kuva 19 Palkki-kappale

Testikappale Tikun (kuva 20) geometria oli leveydeltään sekä syvyydeltään pienempi ja sen muodolta odotettiin vielä suurempia muodonmuutoksia, sillä uskottiin pienemmän kappaleen taipuvan lämmön takia enemmän. Tätä johtopäätöstä tuki laboratorioinsinöörin kanssa käyty haastattelu kappaleiden muodonmuutoksista. (Törnqvist. haastattelu 10.10.2023)



Kuva 20 Tikku-kappale

Kolmas kappale eli Porras (kuva 21) määritettiin geometrialtaan sisältävän eri syvyiset osat, jonka muodonmuutoksia haluttiin tutkia eri syvyyksien vaikutuksista.

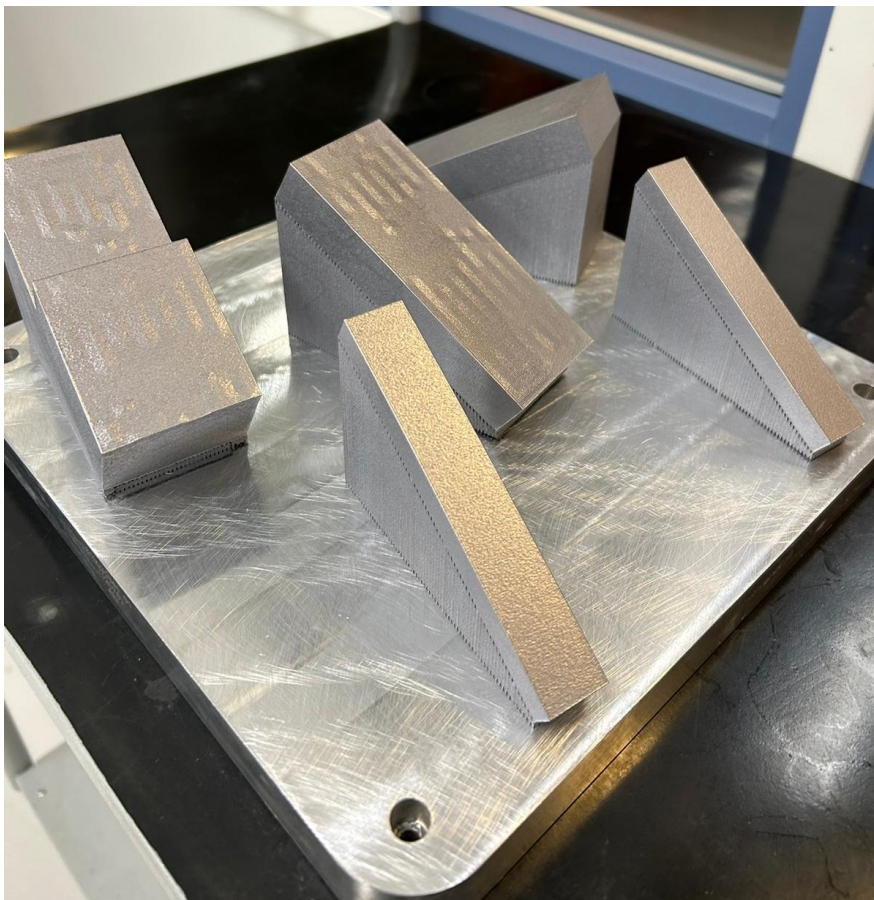


Kuva 21 Porras-kappale

### 6.1.2 Tulostus ja tukirakenteiden irrotus

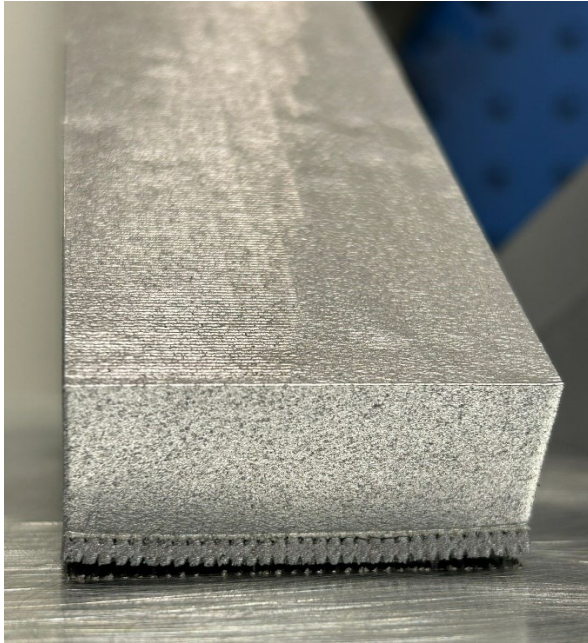
Standardiin ISO/ASTM 52911-1:2019 pohjaten kappaleet tarvitsevat usein tukirakenteita tulostettaessa, joten kappaleet asetoitiin tulostukseen 30 asteen kulmaan. Kappaleet suunniteltiin tulostettavaksi 45 asteen kulmassa, mutta käytetty ohjelmisto ei lisännyt kappaleille tukirakenteita. Kuitenkaan kappaleiden tulostus ei olisi onnistunut ilman tukirakenteita kappaleiden tulostusmenetelmän vuoksi. Palkki ja Porras tulostettiin 30 asteen kulmassa tulostus petiin nähden leveämmän sivun kautta kuten kuvassa 22 käy ilmi. Tikku tulostettiin pysty asennossa sekä 30 asteen kulmassa leveämmän ja kapeamman sivun kautta.

Tikku haluttiin tulostaa useamassa asennossa, jolla tutkittiin muodonmuutoksien muuttumista tulostusasentoihin nähden.

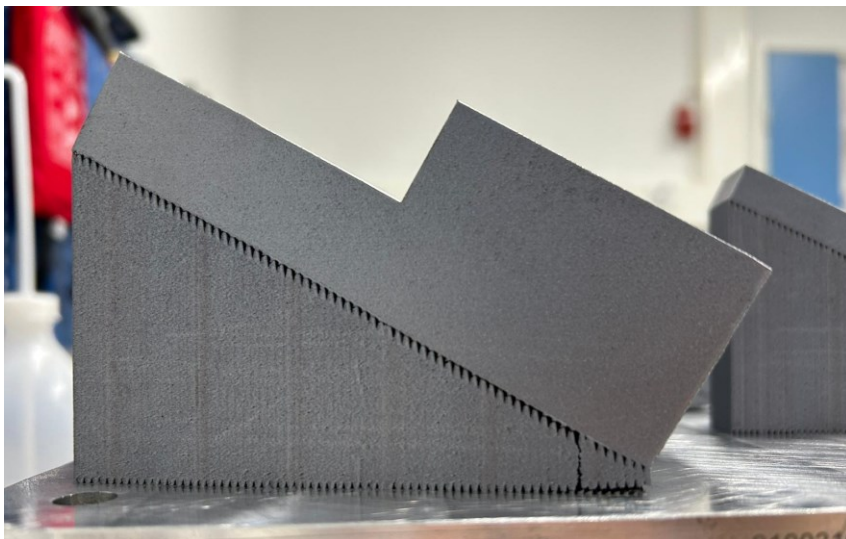


Kuva 22 Kappaleet tulostuspedillä

Kappaleiden tukirakenteet ovat tehty ohjelman oletus arvoilla, joten lämmönsiirtymiä kappaleesta ja tukirakenteista ei ole otettu huomioon. Tämä näkyy Palkin ja Portaan muodonmuutoksien aiheuttamasta tukirakenteiden repeytymisestä. (kuvat 23–24)



Kuva 23 Palkin tukirakenteiden repeytyminen



Kuva 24 Portaan tukirakenteiden repeytyminen

Tuostuspeti valmistettiin ohjelmistolla ennen tulostusta. Kappaleet nostettiin 3 mm päähän tulostuspedistä, jotta ohjelmisto tekisi kappaleiden ja pedin väliin tukirakenteet. Tällä saatiin kappaleiden irrotus helpommaksi sekä mahdollistettiin eheä irrotus. Kappaleiden irrottamiseen tulostuspediltä käytettiin käsikäyttöistä metallisaha.

Tukirakenteet irrotettiin kappaleista pihdeillä, jonka jälkeen kappaleita hiottiin. Kappaleiden pinnalta poistettiin loppu metallipöly lasikuulapuhalluksen avulla. Tämän jälkeen kappaleita voitiin käsitellä ilman suojarusteita.

## 6.2 Simulointi

Simulointi toteutettiin Siemens NX ja Simcenter3D-ohjelmistolla. Mallinnetut kappaleet täytyi valmistella simulointiin AM-prosessin mukaisesti.

Ensimmäiseksi luotiin AM-työtila, joka sisälsi käytetyn tulostimen tietoihin pohjautuvan tulostuspedin. Prosessin mukaisesti työtilaan tuotiin simuloitava kappale. Kappale määritettiin haluttuun tulostusasentoon ja sille lisättiin automaattisesti tukirakenteet. Tukirakenteita ei lähdetty muuttamaan parametrien avulla, vaan haluttiin niiden olevan oletusarvojen määrittämät tuet.

Kappaleen määrityksen jälkeen käynnistettiin simulointiympäristö.

Simulointiprosessin alussa määriteltiin kappaleen simulointityyppi. Simulointityyppinä on valittavissa lämpö, mekaaninen tai näiden yhdistelmä. Tässä tutkimuksessa käytettiin yhdistelmä simulaatiota. Simuloitavalle kappaleelle asetettiin materiaali eli alumiinijauhe.

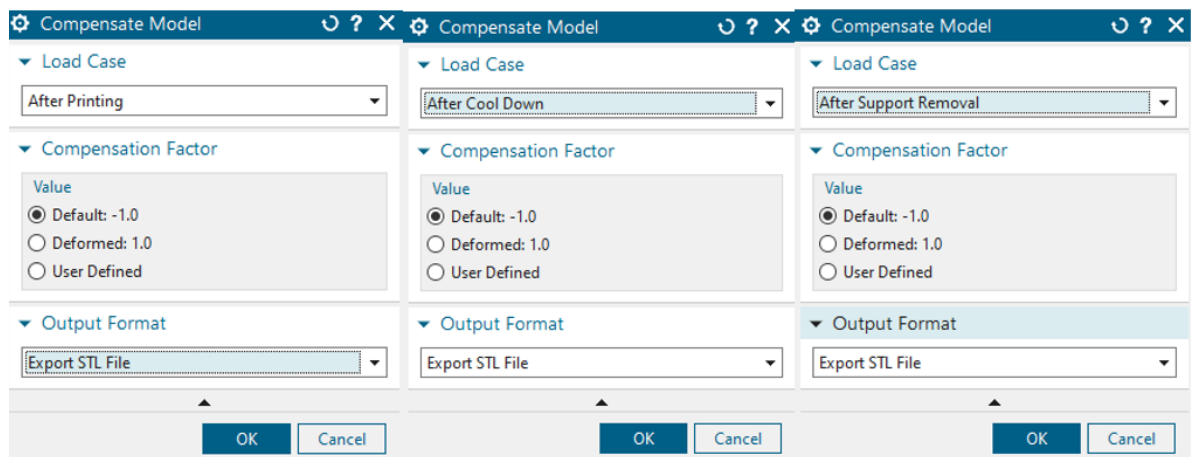
FEM valmisteluosiossa määritettiin simulaatiotyypit tarkemmin. Tässä osassa voitiin vaikuttaa simulaation leikkauserroksien määrään ja tarkkuuteen.

Tutkimuksessa määritettiin leikkauserroksien määräksi 3, joka oli tutkimustulokselle sopiva tarkkuus. Seuraavaksi luotiin simulointiverkko, joka oli tetraedrikuvioinen. Viimeisessä vaiheessa ennen simulaation käynnistämistä määritettiin laskentateho. Kappaleiden simuloinnilla haettiin ohjelmiston määrittämiä muodonmuutoksia, joita voitiin verrata tulostuksessa tapahtuviin muodonmuutoksiin. Simuloinnilla tuotettiin lisäksi kappaleiden lämpöjakaumat.

Ohjelmisto ehdottaa simuloitulle kappaleelle kompensatiota, jonka pitäisi tuottaa tulostuksessa mahdollisimman toivottu lopputulos. Tutkimuksessa yksi suurimpia tekijöitä oli kompensatio kappaleet. Kuitenkin niiden määrittämisessä ilmeni ongelmia opinnäytetyön aikana, jotka johtuivat lisenssi ongelmista. Kompensatiokappaleet määritti lehtori Kalevi Vesterinen tutkimuksessa tehtyjen simulaatioiden pohjalta. Huomiona kompensoitujen kappaleiden tekemisessä oli, että ohjelmisto tarvitsi kompensatioiden tekemiseen simuloinnin absoluuttisia tiedostonimiä (Vesterinen. Haastattelu 3.10.2023).

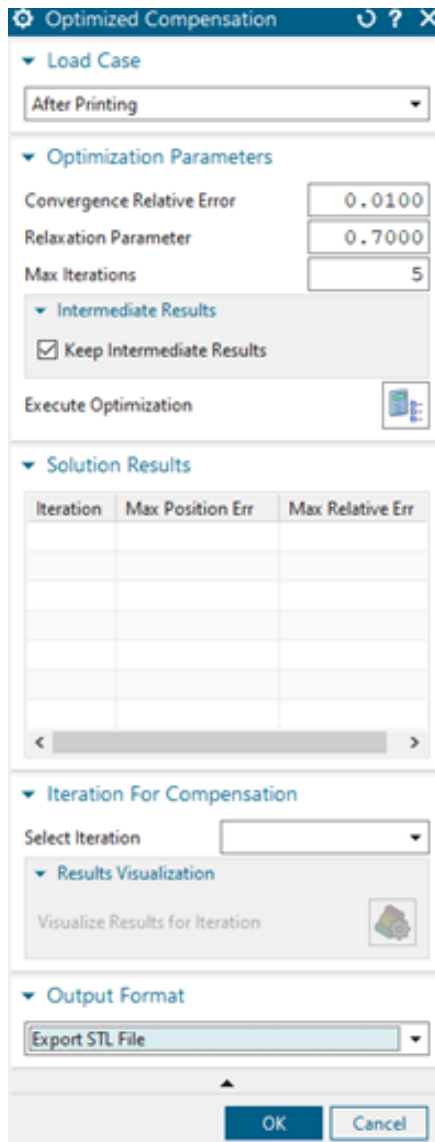
### 6.2.1 Kompensaatiomuodot

Kompensatiota voi luoda kahdella eri tavalla eli kompensoida suoraan tai laittaa ohjelmiston optimoimaan kappaleen. Lisäksi kompensoinnin voi valita tulostuksen jälkeen, jäähtymisen jälkeen ja tukien irrottamisen jälkeen tapahtuvaksi. Optimoidussa kompensaatiossa on samanlainen valinta kenttä kuin pelkässä kompensaatiossa.



Kuva 25 Kompensaation valinta

Tikku kappaleella haluttiin vertailla kompensatiomuotojen vaikutusta loputukseen, joten tikku kompensoitiin 30 asteen kulmassa lyhyemmän sivun mukaan kaikilla eri kompensatio muodoilla. Palkissa ja Portaassa käytettiin vain optimoitua kompensatiota lopputuloksien saavuttamiseen.



Kuva 26 Optimoitu kompensatio valikko



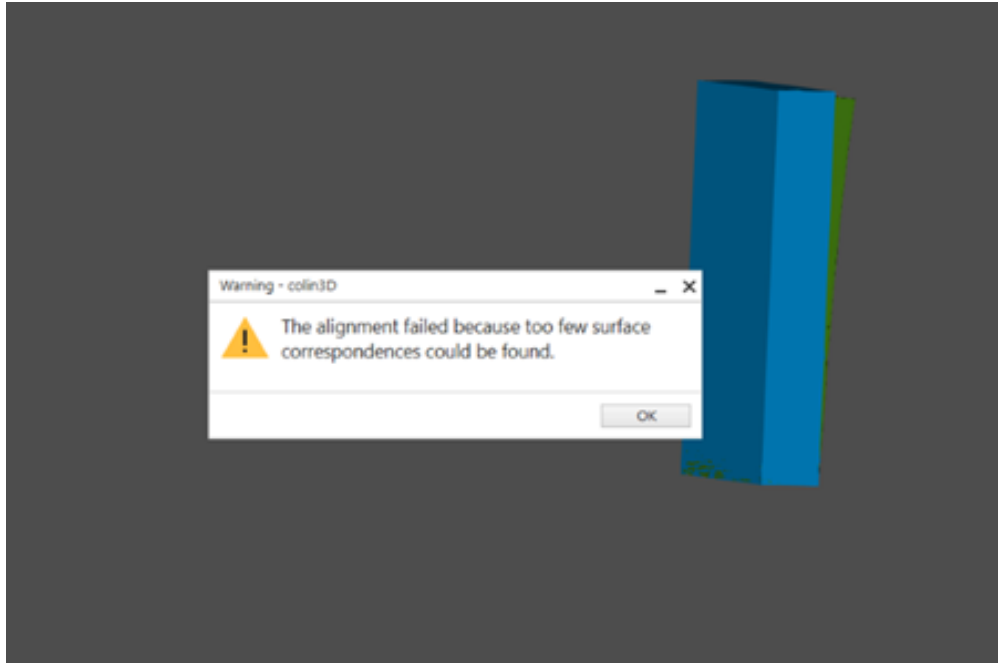
### 6.3 Skannaus

Tutkimuksen skannauksessa käytettiin laitteena ZEISS T-SCAN ja T-TRAK modulaaria. Ennen jokaista skannaus kertaa tehtiin laitteelle kalibrointi, joka suoritettiin käyttämällä laitteen omaa kalibrointi työkalua. Kalibroinneista saatiin todistukset (liitteet 1–3) todentamaan tukosten tarkkuus. Huomioina laitteen toiminnasta oli, että kylmä ilma vaikutti skannerin toimintaan.

Kaikki testikappaleet skannattiin ja niistä taltioitiin tarvittavat tiedot ylös. Kappaleet skannattiin siten, että nominaalikappale tuotiin skannatun kappaleen rinnalle. Skannauksessa pyrittiin käyttämään skannausohjelman omia oletusasetuksia helpottamaan tutkimuksen selkeyttä. Niiltä osin, joissa koettiin, että tutkimuksen laatu paransi, muutettiin oletusarvoja tarkkuuden lisäämiseksi.

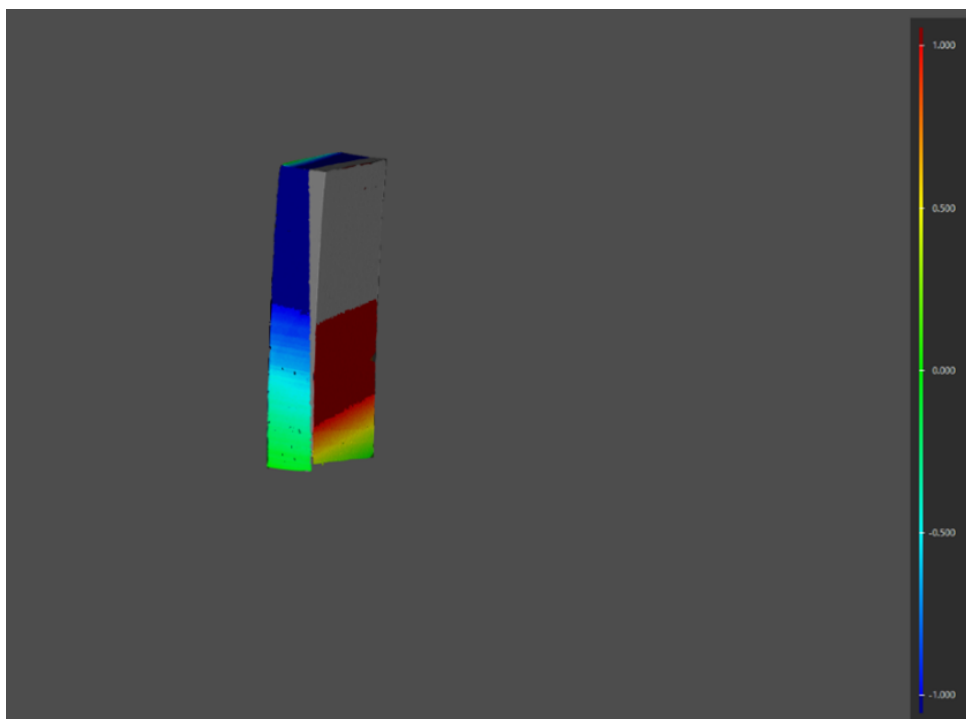
Skannerin asetuksista muutettiin heijastuksen suodatinta heikoksi (weak), sillä kappale oli lähinnä mattapintainen. Ohjelmisto loi skannauksen tuottamasta pistepilvestä kappaleen verkkopinnan. Pinnan muodostamiseen käytettiin asetusta laadunvalvonta (quality control). Skannattu kappale ja nominaalikappale yhdistettiin paras sovite -komennolla (best fit).

Jos nominaalikappaleen ja skannatun kappaleen ero oli liian suuri, ohjelma ei pystynyt sovittamaan nominaalikappaletta skannattuun kappaleeseen paras sovite -komennolla ja antoi siitä varoituksen (kuva 27)



Kuva 27 Skannatun kappaleen ja nominaalikappaleen eron varoitus

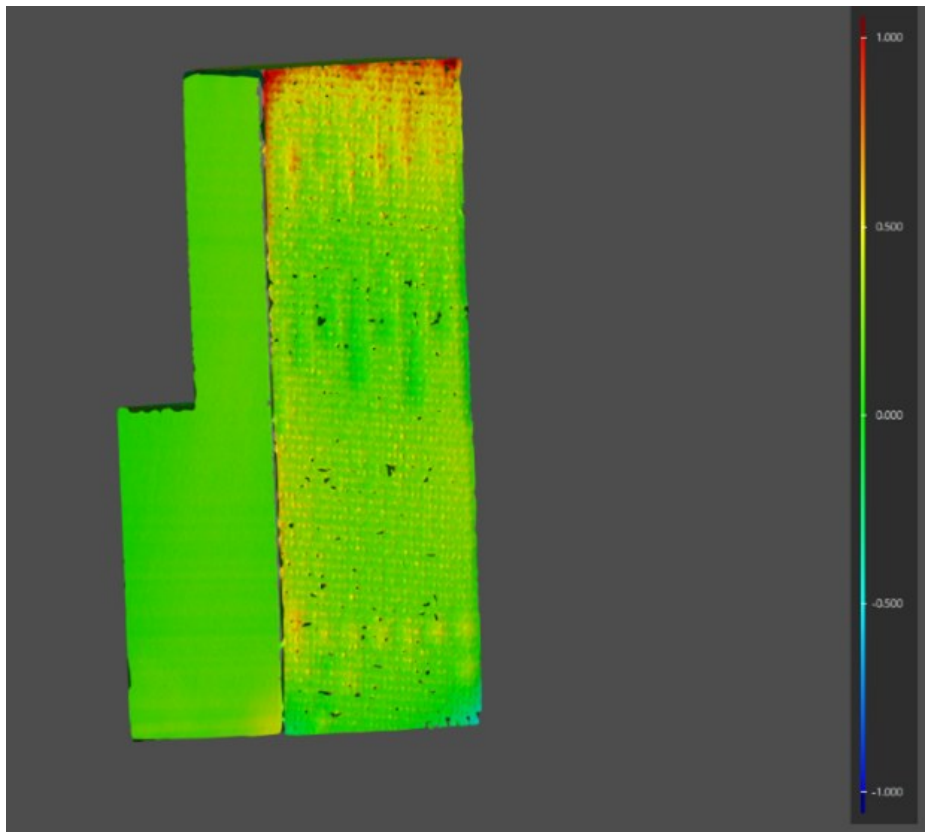
Ohjelma teki kuitenkin yhteenvedon kappaleiden päällekkäisyydestä, jotta eroavaisuuksia voitiin tutkia, kuten kuvassa 28 näkyy.



Kuva 28 Päällekkäisyys

## 7 Tulokset

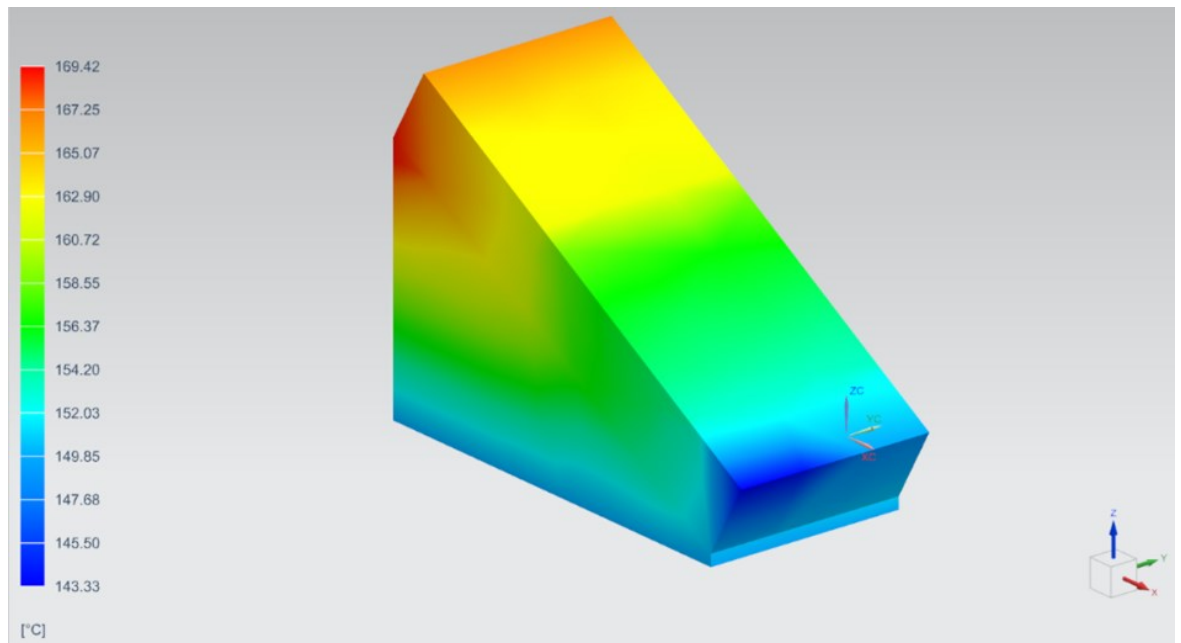
Tuloksien vertailussa käytettiin toleranssia 1 mm tarkkuudella sekä vertailua tehdessä otettiin huomioon pinnankarheus, joka tukirakenteiden poistamisesta jää. Pinnankarheudella voi olla merkitystä toleranssin raja-arvon ylittämiseen, kuten kuvassa 29 huomataan.



Kuva 29 Pinnankarheudesta aiheutunut toleranssin raja-arvon ylittyminen

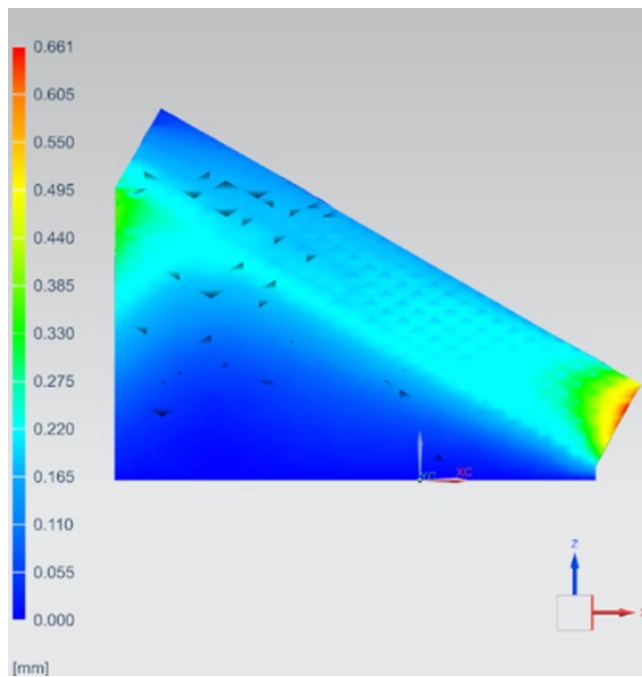
## 7.1 Palkki-kappaleen tulokset

Palkin simulaatiossa todettiin suurimman muodonmuutoksen tapahtuvan kappaleen alaosassa, koska Palkkiin kohdistunut lämpö keskittyy Palkin yläosaan (kuva 30). Tulostuksen jälkeen lämpötilaero Palkissa ja sen tukirakenteissa on noin 26 celsiusastetta.

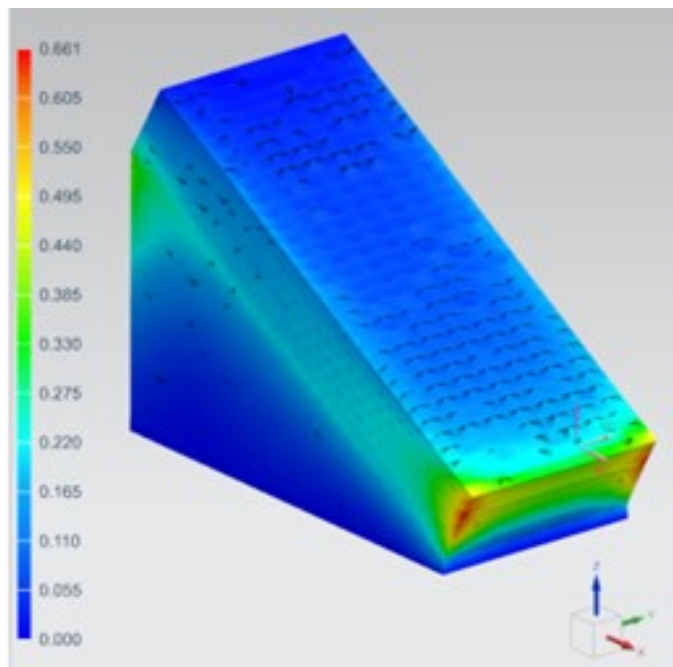


Kuva 30 Palkin lämpöjakauma

Lämmön epätasainen jakautuminen kappaleessa aiheuttaa materiaalin vetäytymistä, joka Palkilla oli ennen tukimateriaalien irrottamista 0,661 mm

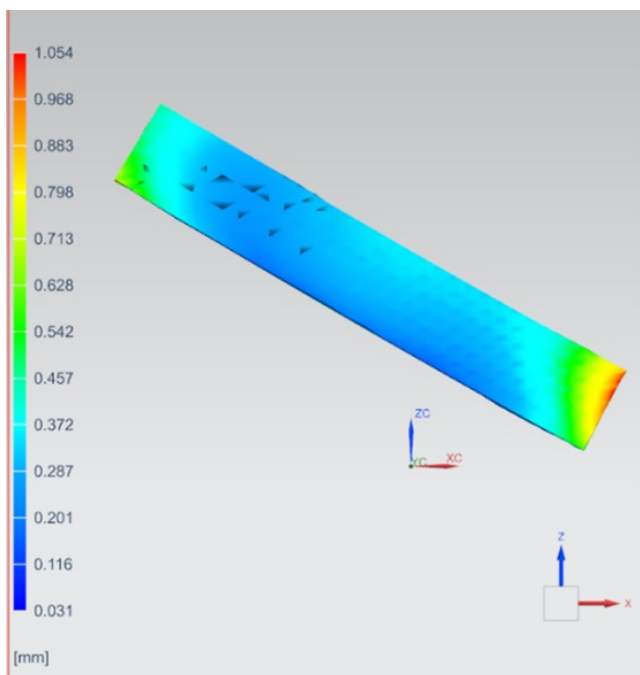


Kuva 31 Palkin vetäytyminen ennen tukirakenteiden poistamista, sivusta

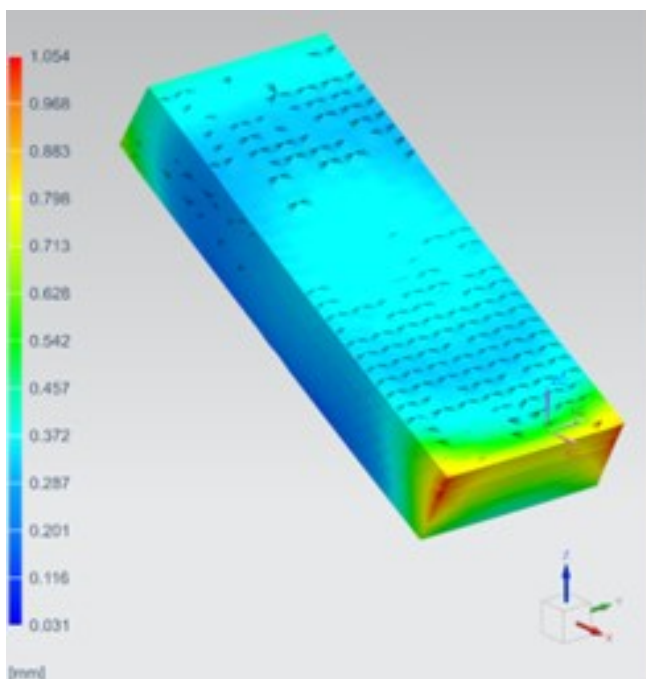


Kuva 32 Palkin vetäytyminen ennen tukirakenteiden poistamista, edestä

Palkin simulaatiossa jäähtymisen ja tukimateriaalien irrottamisen jälkeen vetäytyminen oli kasvanut 1.054 mm

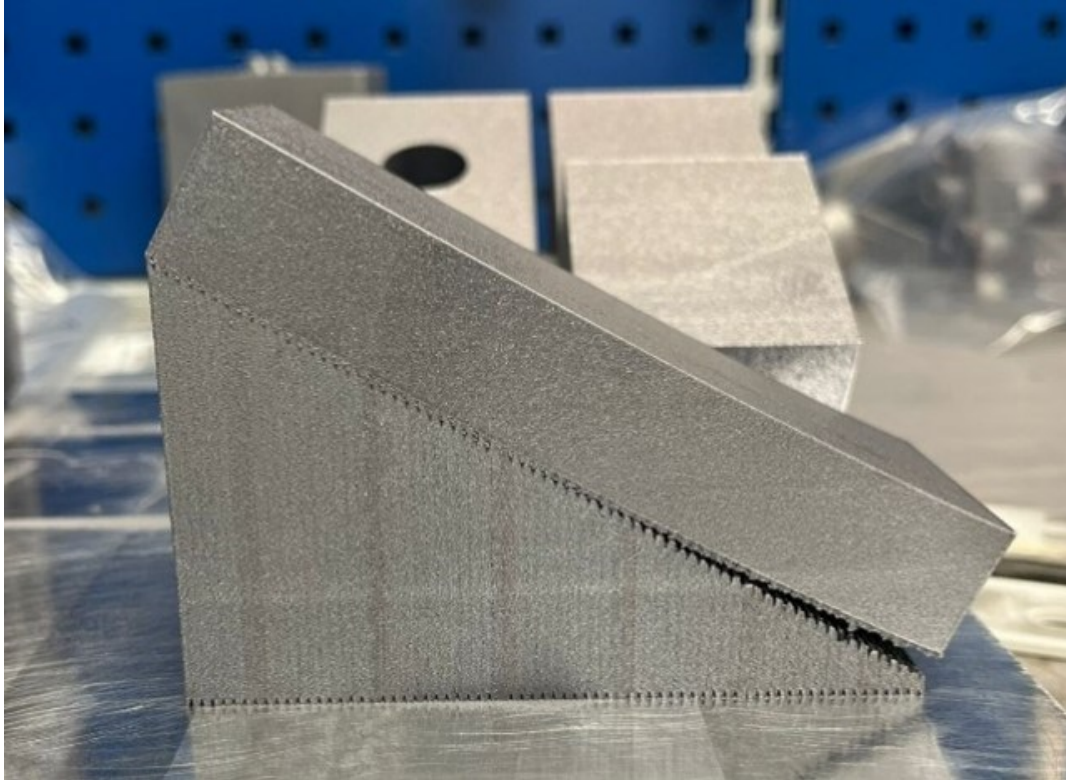


Kuva 33 Palkin vetäytyminen tukirakenteiden poistamisen jälkeen, sivusta



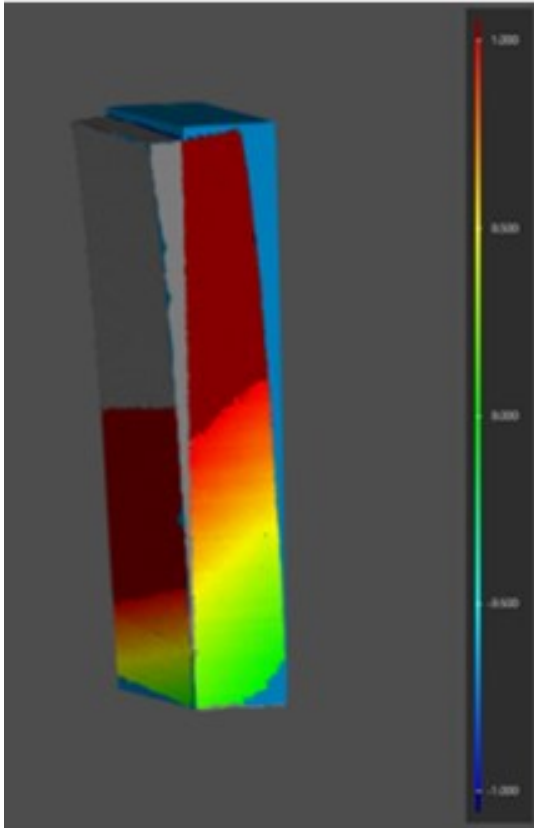
Kuva 34 Palkin vetäytyminen tukirakenteiden poistamisen jälkeen, edestä

Kuten simulaatiossa huomattiin, tulostuksen aikana syntynyt vetäytyminen aiheutti Palkin kovertumisen jäähtymisvaiheessa. Kovertumisen takia Palkki repeytyi irti tukirakenteista.



Kuva 35 Palkin repeytyminen irti tukirakenteista

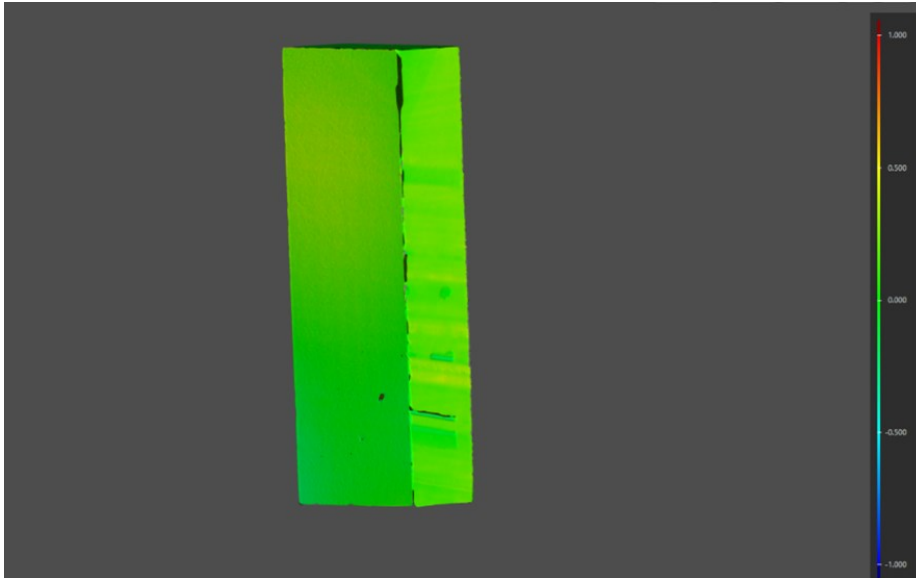
Muodonmuutokset todennettiin skannauksella. Skannatun Palkin ja nominaalikappaleen vertailussa (kuva 36) huomataan selkeää muodonmuutosta. Skannausohjelmassa punainen väri kuvastaa kovertumista ja sininen kupertumista.



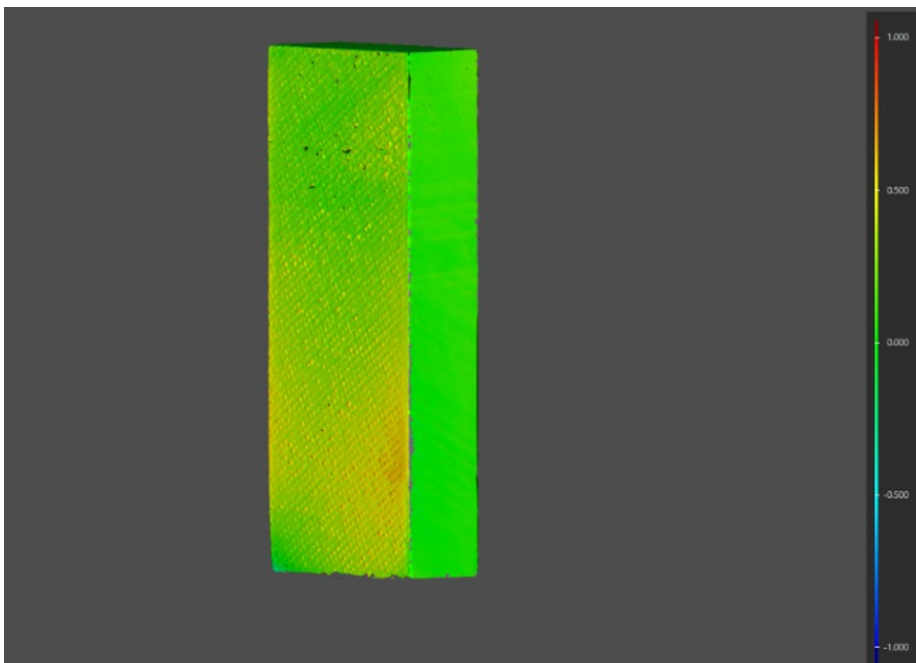
Kuva 36 Palkin kupertumisen vertailu



Skannatun Palkin optimoidun kompensaaion ja nominaalikappaleen vertailun tulos (kuvat 37–38). Tuloksena voidaan todeta optimoidun kompensaaion olevan tutkimuksen toleranssien sisällä.



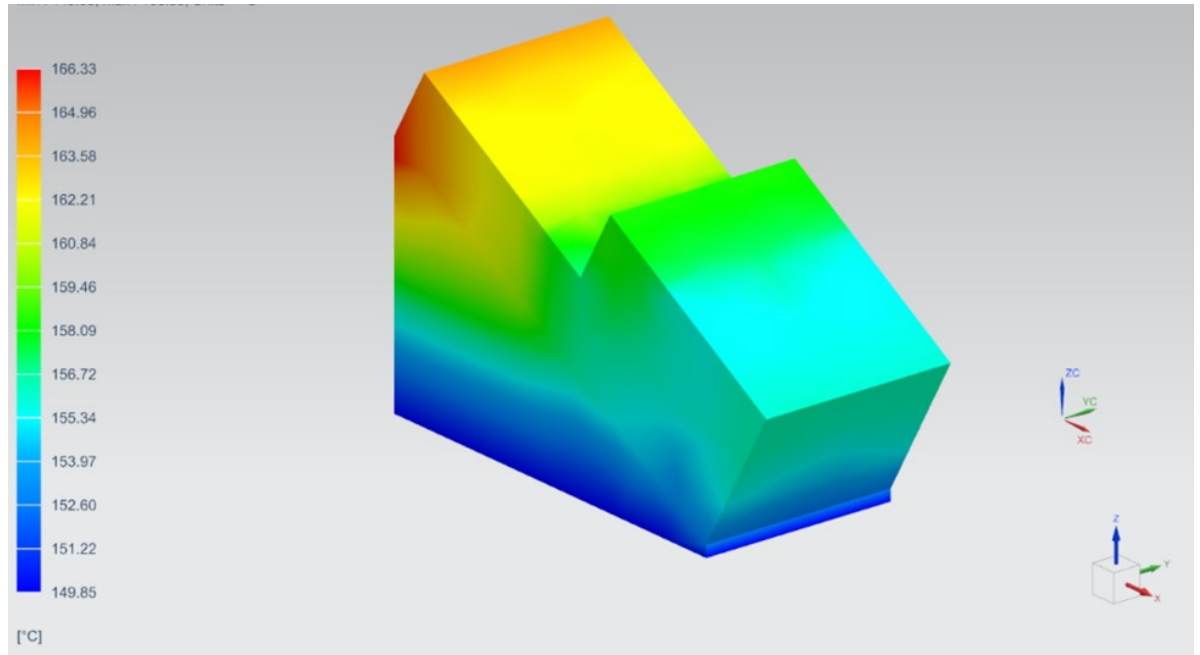
Kuva 37 Optimoitu kompensoitu Palkki, etupuoli



Kuva 38 Optimoitu kompensoitu Palkki, takapuoli

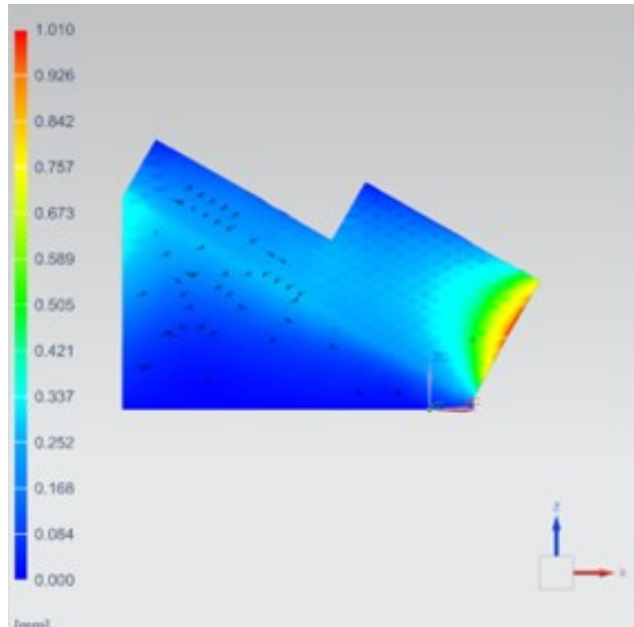
## 7.2 Porras-kappaleen tulokset

Portaan simulaatiossa suurin lämpö kohdistui kappaleen yläosaan, kuten kuvassa 39 huomataan. Lämpötilaerot Portaassa ja sen tukirakenteissa tulostuksen jälkeen olivat noin 27 celsiusastetta.

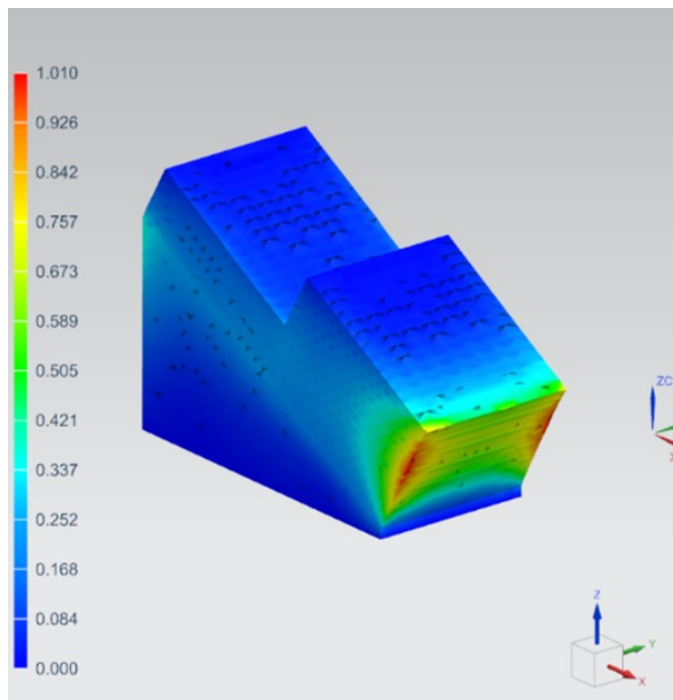


Kuva 39 Portaan lämpöjakauma

Lämmön jakautumisen vuoksi Portaaseen kohdistuu suurin vetäytymä sen alareunaan. Tulostuksen jälkeen vetäytymä oli suurimmillaan noin 1 mm (kuvat 40–41).

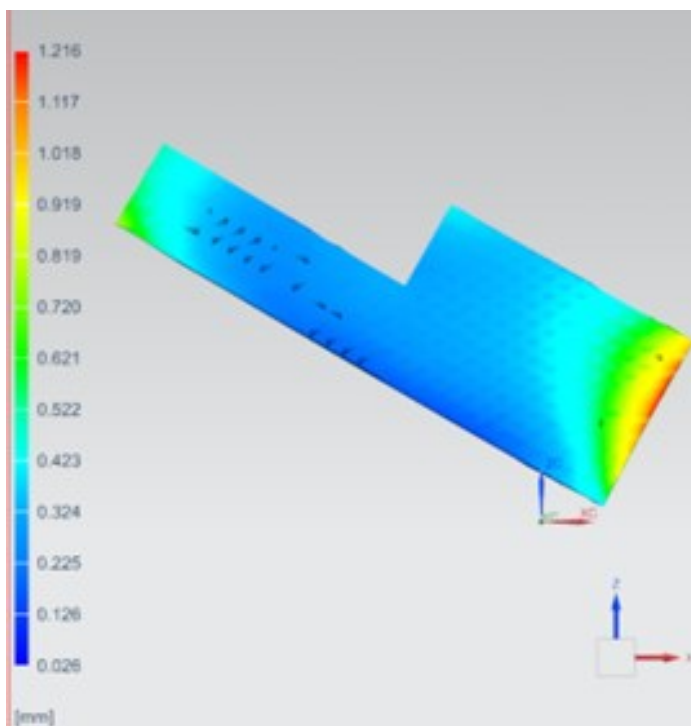


Kuva 40 Portaан vetäytyminen ennen tukirakenteiden poistamista, sivusta

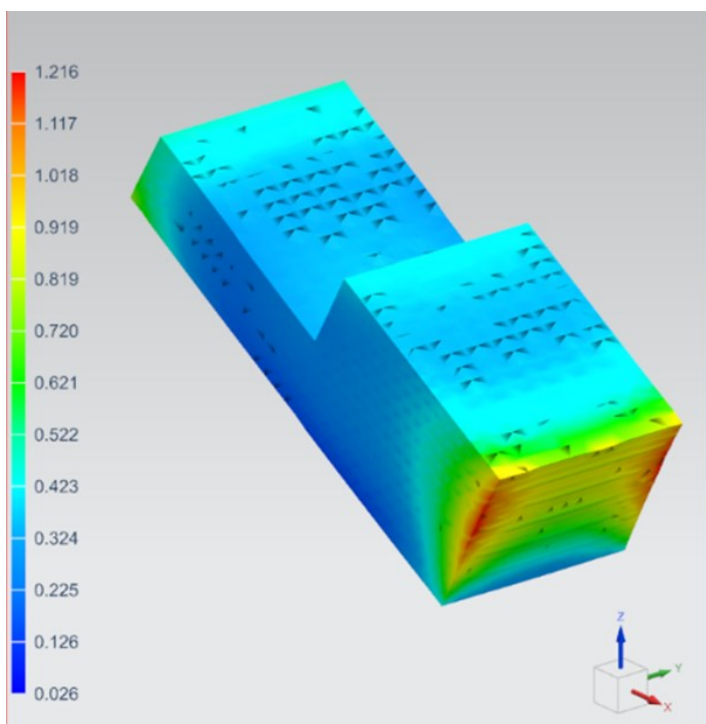


Kuva 41 Portaан vetäytyminen ennen tukirakenteiden poistamista, edestä

Jäähtymisen ja tukirakenteiden poistamisen jälkeen, simulaatiossa vetäytyminen Portaan alareunassa oli kasvanut 1,216 mm

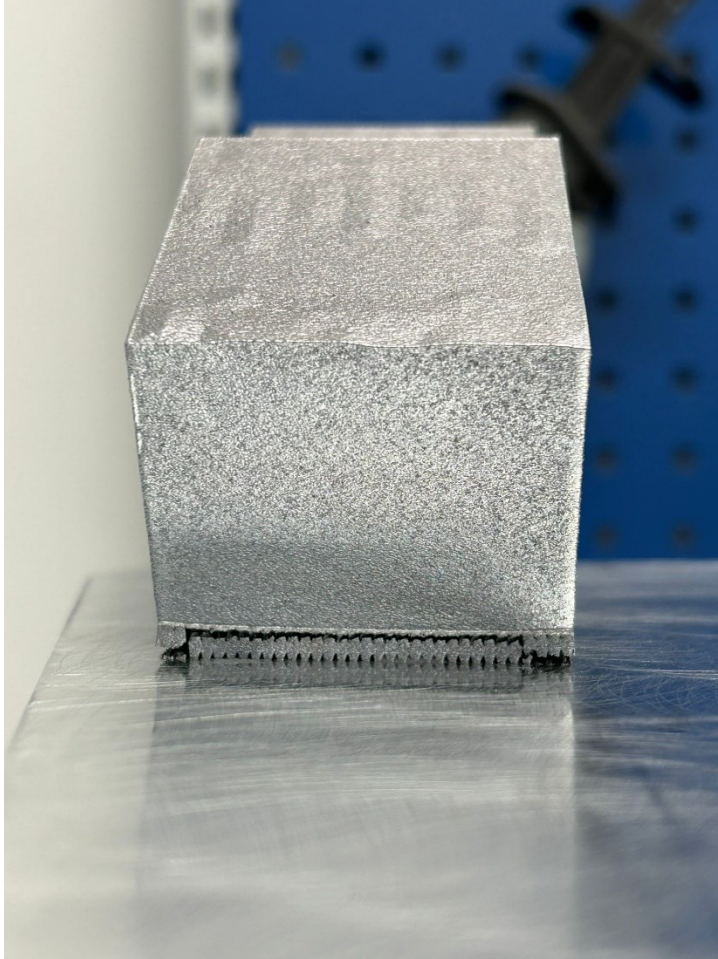


Kuva 42 Portaan vetäytyminen tukirakenteiden poistamisen jälkeen, sivusta



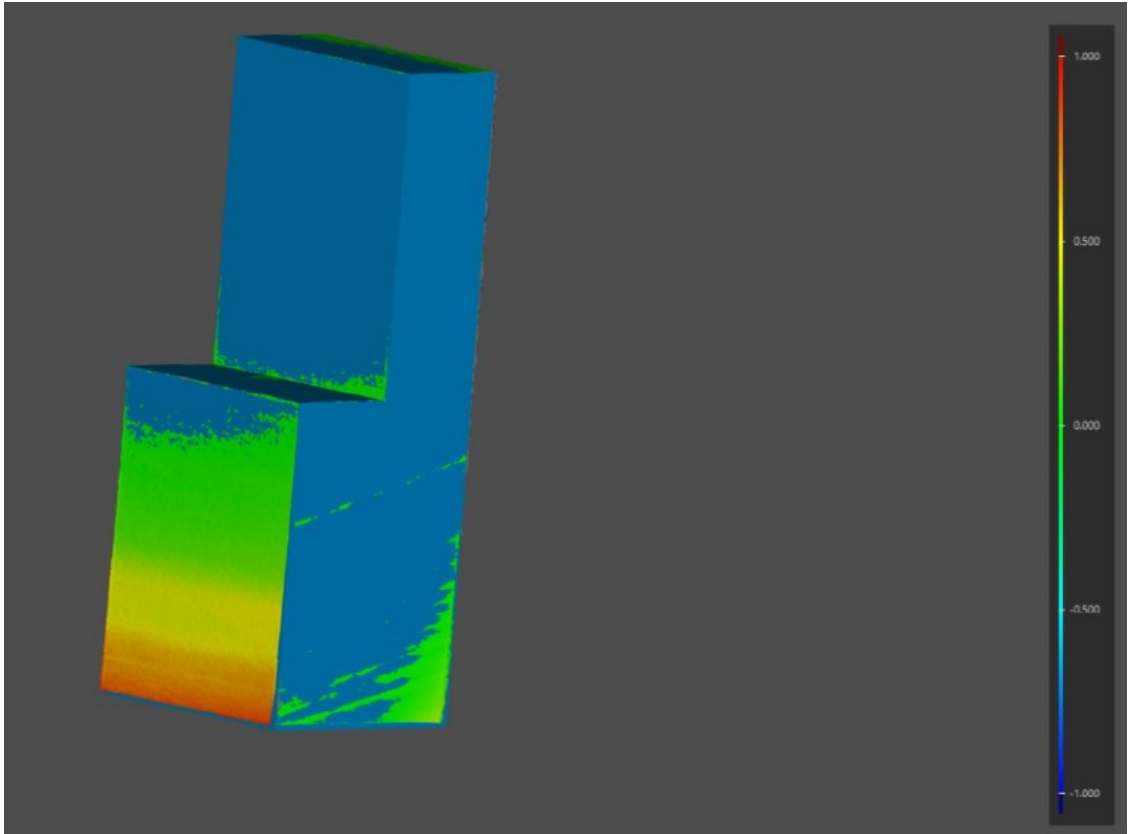
Kuva 43 Portaan vetäytyminen tukirakenteiden poistamisen jälkeen, edestä

Vetäytymisen kasvu aiheuttaa tulostaessa fyysisessä kappaleessa kovertumista, jonka takia Portaan alareuna repeytyi tukimateriaalista (kuva 44). Huomattavaa oli, ettei kovertuminen ollut niin voimakasta kuten Palkissa.



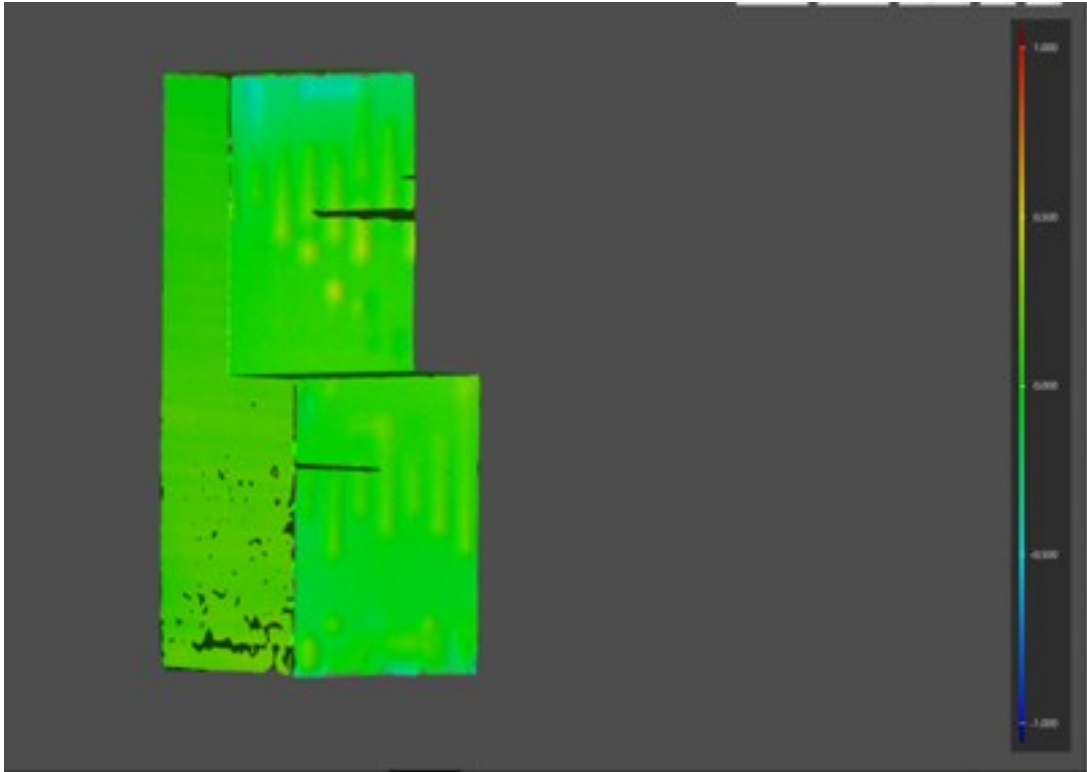
Kuva 44 Portaan repeytyminen irti tukirakenteista

Portaassa tapahtunut pieni kovertuminen pystyttiin myös todentamaan skannauksen avulla. Nominaalikappaleen kanssa verrattu Porras osoittaa suurinta muodonmuutosta alareunassa (kuva 45).



Kuva 45 Portaon kupertumisen vertailu

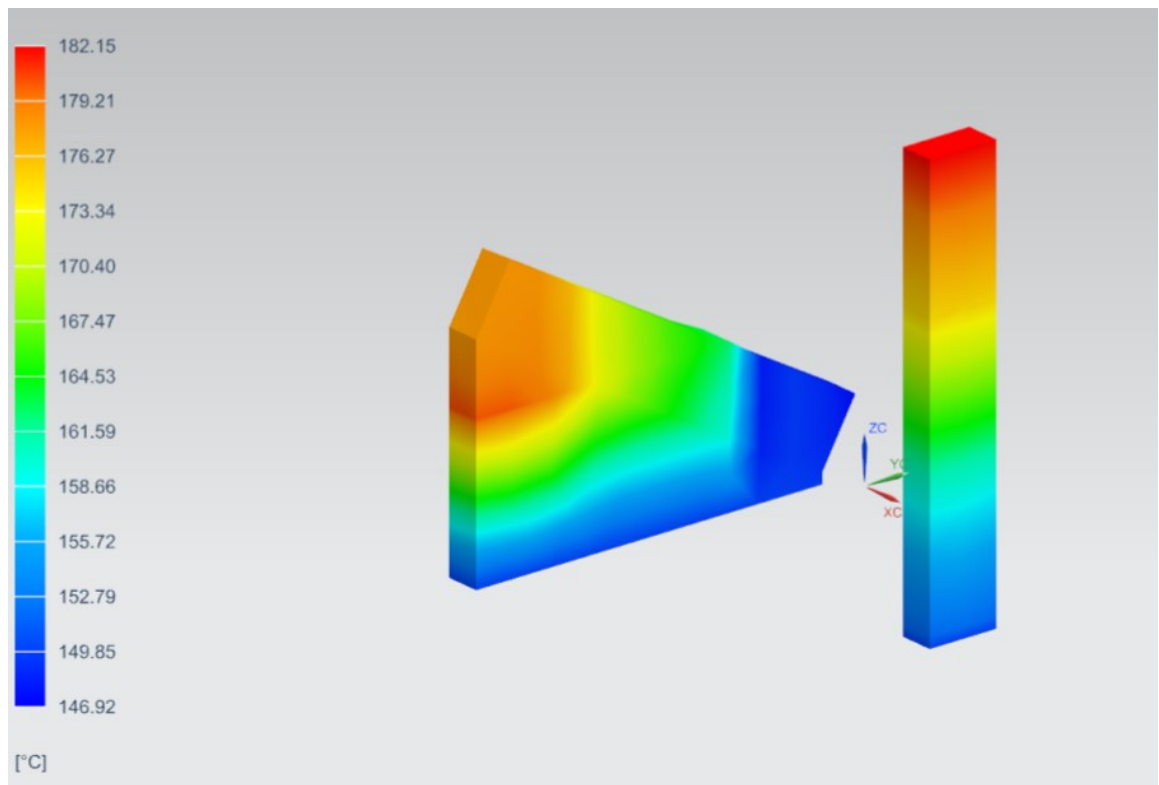
Skannattu optimoitu kompensoitu porras verrattuna nominaalikappaleeseen, osoittaa optimoidun kompensoinnin onnistuneen, sillä kappale on toleranssin rajoissa (kuvat 29 ja 46).



Kuva 46 Optimoitu kompensoitu Porras, etupuoli

### 7.3 Tikku-kappaleen tulokset

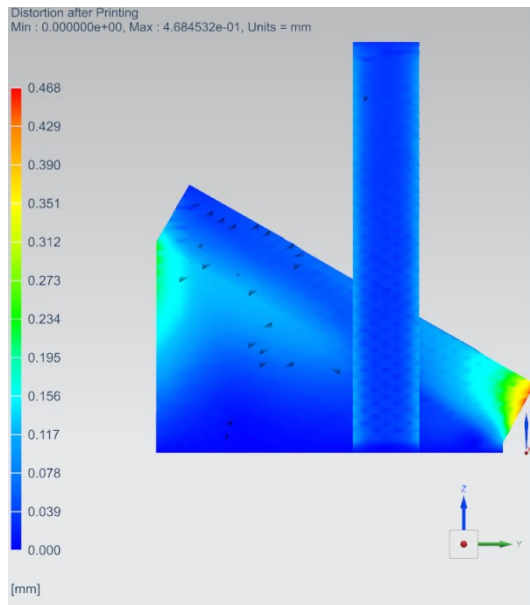
Tikku pystyasennossa sekä 30 asteen kulmassa lyhyemmän sivun mukaan simuloitiin samanaikaisesti. Samoin kuin Palkissa ja Portaassa, Tikku kappaleen suurin lämpö sijoittuu yläosaan. Pystyasennossa olevaan Tikkuun kohdistuu suurempi lämpö sen yläosaan, koska kappaleella ei ole tukirakenteita. Tukirakenteiden tarkoitus on siirtää lämpöä pois kappaleesta. Pystyasennossa tulostetun Tikun lämpötilaerot olivat noin 35 celsiusastetta. Kulmassa tulostetun Tikun ja sen tukirakenteiden lämpötilaerot olivat 32 celsiusastetta.



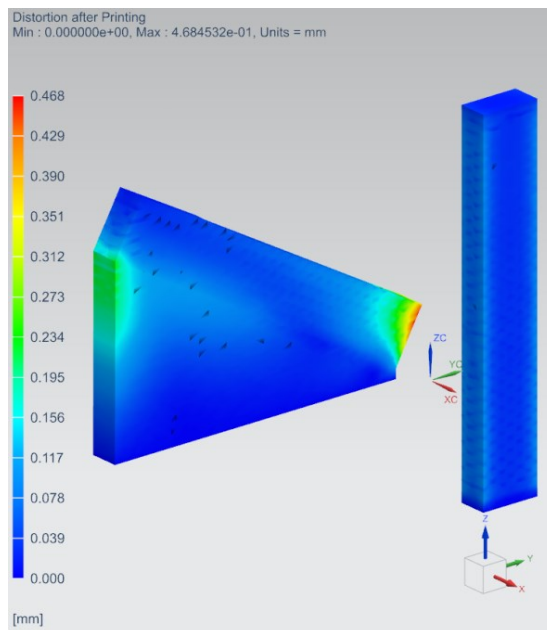
Kuva 47 Tikku kappaleiden lämpöjakaumat



Tikkujen simulaatiossa voidaan todeta pystyasennon vaikuttavan muodonmuutokseen, sillä siinä ei tapahtunut vetäytymistä. Kulma asennossa olevassa kappaleessa vetäytyminen on sijoittunut alaosaan. Suurin vetäytyminen oli ennen tukimateriaalien irrottamista 0,488 mm

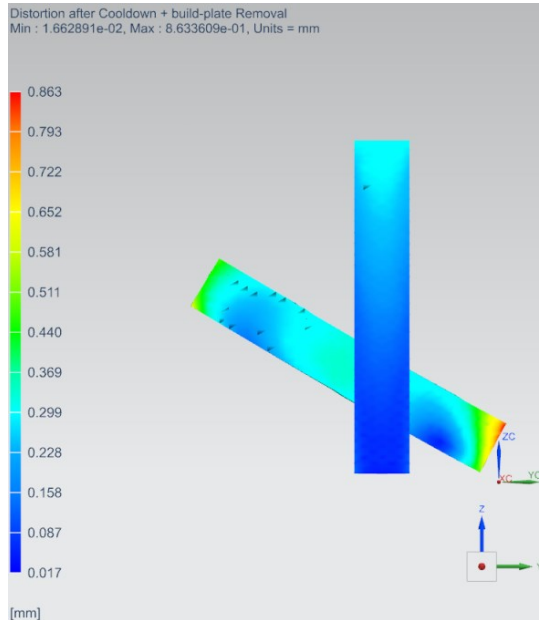


Kuva 48 Tikkujen vetäytyminen ennen tukirakenteiden poistamista, sivusta

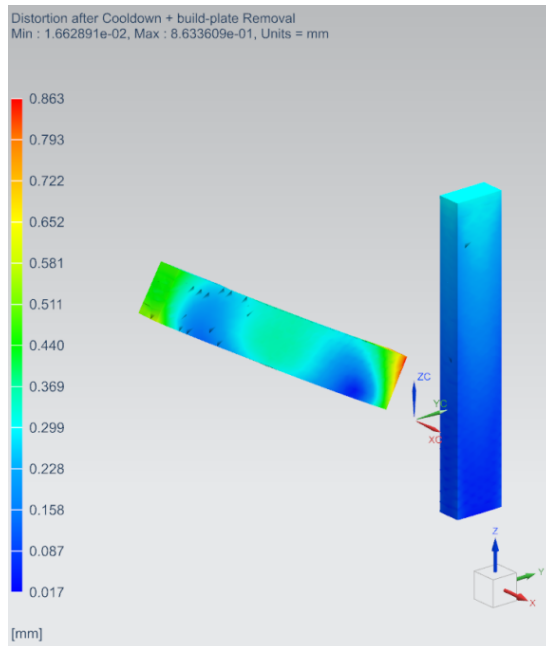


Kuva 49 Tikkujen vetäytyminen ennen tukirakenteiden poistamista, takaapäin

Simulaatiossa jäähtymisen ja tukimateriaalien irrottamisen jälkeen vetäytyminen oli kasvanut kulmaan asetetun Tikun kohdalla 0.863 mm. Lisäksi todetaan pystyasennossa olevan tikun vetäytymisen lievästi kasvaneen, kuitenkin vielä vaikuttamatta muodonmuutokseen.

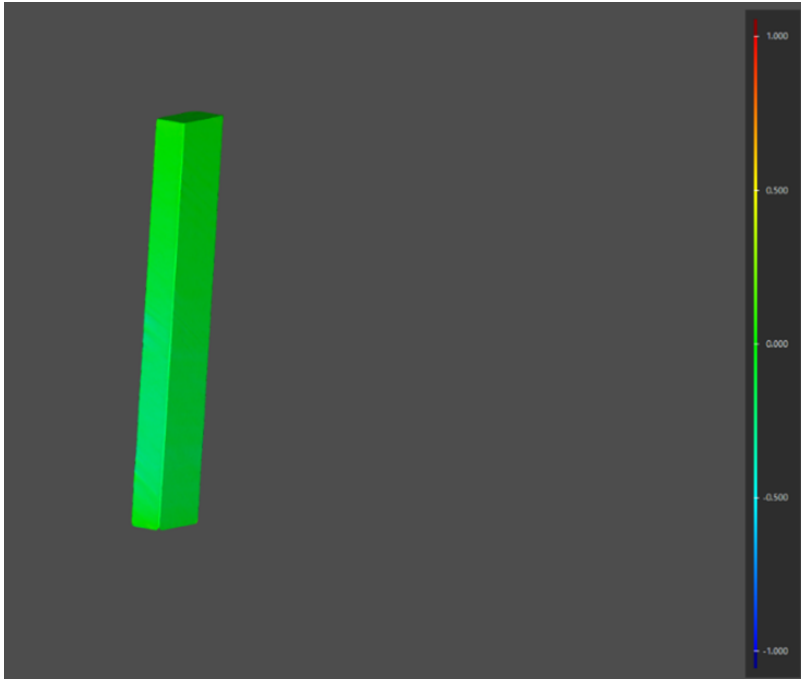


Kuva 50 Tikkujen vetäytyminen tukirakenteiden poistamisen jälkeen, sivusta



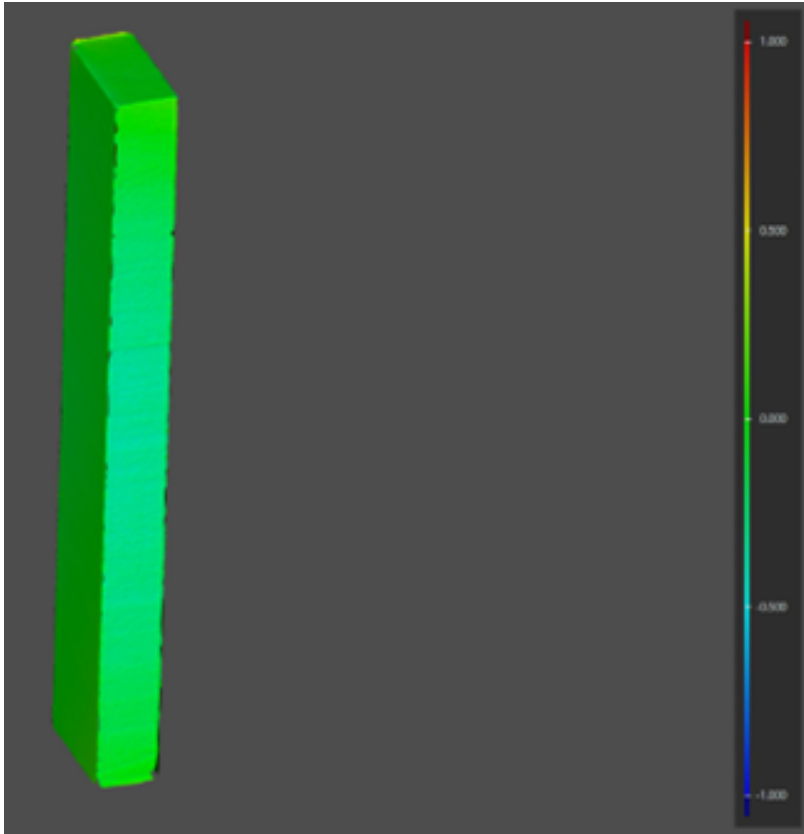
Kuva 51 Tikkujen vetäytyminen tukirakenteiden poistamisen jälkeen, takaapäin

Kuten simulaatiossa huomattiin vetäytymistä ei tapahtunut pysty asennossa juuri ollenkaan. Sama voidaan vielä todeta fyysisen kappaleen skannauksella. Skannauksella voitiin todistaa simulaation paikkaansa pitävyyttä.



Kuva 52 Pystyasennossa tulostetun Tikun vertailu

Tikun ollessa 30 asteen kulmassa lyhyemmän sivun mukaan, skannauksessa huomattiin lievää muodonmuutosta kupertumisen puoleen. Kupertuminen tapahtuu kuitenkin toleranssien sisäpuolella.



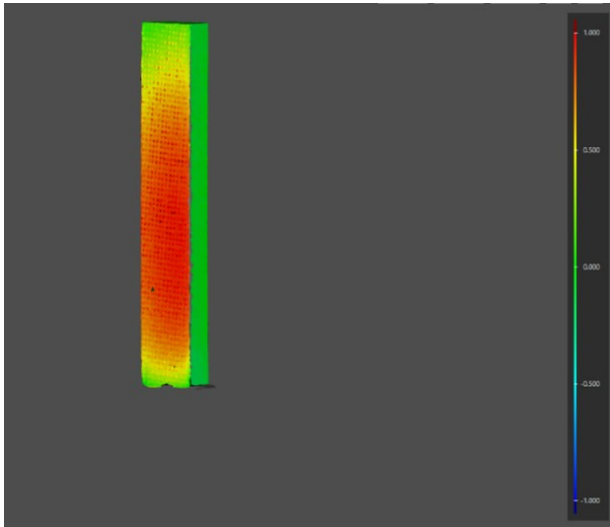
Kuva 53 30 asteen kulmassa lyhyemmän sivun mukaan tulostetun Tikun vertailu

Kulmaan asetetulle Tikku-kappaleelle toteutettiin kompensatiot kaikilla eri muodoilla, koska siltä odotettiin muodonmuutosta simulaation perusteella. Kuitenkin Tikku todettiin muuttuvan kappaleista vähiten verratessa Palkki- ja Porras-kappaleeseen. Tutkimuksessa havaittiin, ettei alle 1 mm vetäytyminen vaikuta kappaleiden muodonmuutoksiin metallin 3D-tulostuksessa.

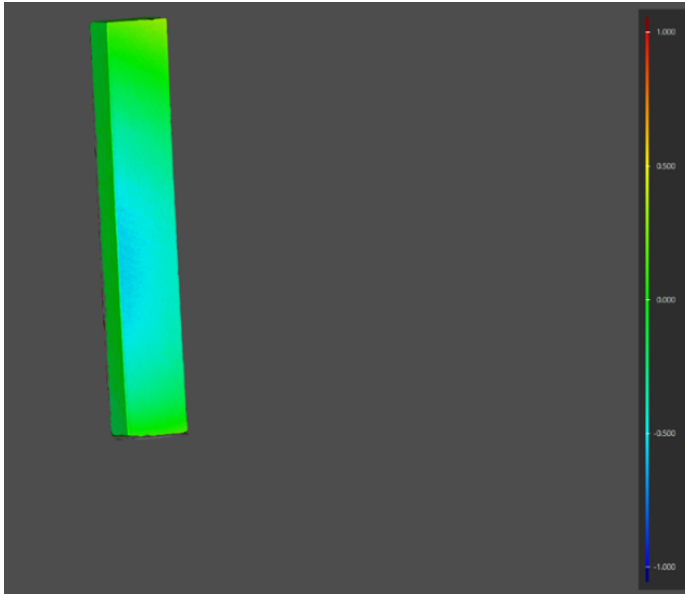
### 7.3.1 Tulostimen parametrien puuttuminen

Yhtenä osana tutkimusta havaittiin tulostimen parametrien tärkeys simuloidussa kappaleessa. Tikku kappale simuloitiin AM-työtilassa, joka ei käyttänyt minkään tietyn tulostimen parametrejä. Kappale määritettiin 30 asteen kulmaan tulostuspedille pidemmän sivun mukaan. Muut simulointia varten tarvitsemat tiedot määritettiin samalla tavalla kuin muissakin simuloinneissa. Lisäksi kappaleesta luotiin ohjelmiston kompensatio kappale.

Tikku kappale 30 asteen kulmassa pidemmän sivun mukaan ilman kompensatiota kovertui tulostuksessa. Kovertuminen johtui kappaleen lämpökuorman aiheuttamasta vetäytymisestä. (Kuvat 54–55)

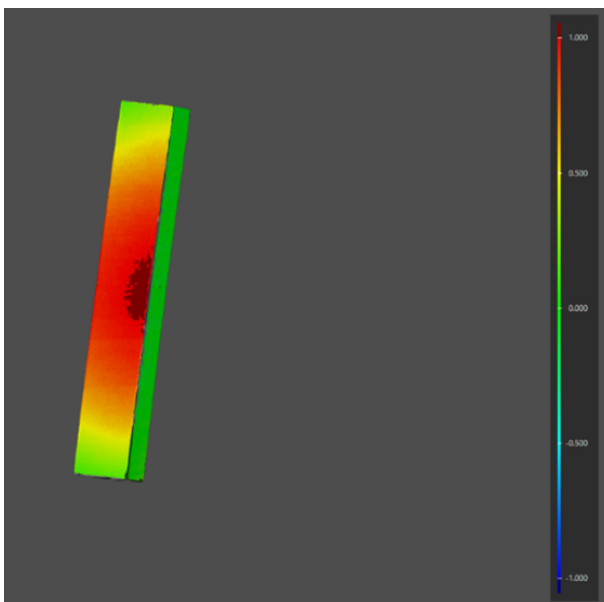


Kuva 54 30 asteen kulmassa pidemmän sivun mukaan tulostetun Tikun vertailu, takaapäin

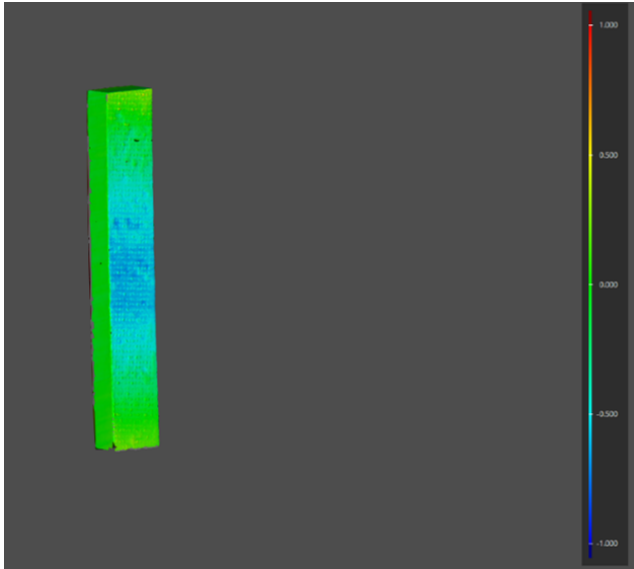


Kuva 55 30 asteen kulmassa pidemmän sivun mukaan tulostetun Tikun vertailu, edestä

Optimoitu kompensatio kupertuu tulostuksen jälkeen, joka johtuu suoraan tulostimen parametrien puuttumisesta. (Kuvat 56–57)



Kuva 56 optimoitu kompensoitu 30 asteen kulmassa pidemmän sivun mukaan tulostetun Tikun vertailu, edestä



Kuva 57 optimoitu kompensoitu 30 asteen kulmassa pidemmän sivun mukaan tulostetun Tikun vertailu, takaapäin

Tikun kompensoinnilla ilman tulostimen parametreja osoittaa, että niillä on kriittinen vaikutus halutun lopputuloksen onnistumiselle.

## 8 Yhteenveto

Opinnäytetyönä suoritettujen tutkimusten tavoitteena oli selvittää metallin 3D-tulostamisen aikana syntyvien muodonmuutoksien simuloinnin vaikutusta lopputulokseen. Lisäksi työssä kartoitettiin ohjelmiston tuottamien kompensatiotoiminnolla tuotettujen kappaleiden oikeellisuus. Tutkimus aloitettiin ongelman kartoituksesta, jossa hahmotettiin tulostuksen aikana syntyviä muodonmuutoksia ja niihin vaikuttavia elementtejä. Selvitysten jälkeen mallinnettiin sovitut testikappaleet sekä suoritettiin niiden simulointi. Simuloinnilla saatiin ennuste tulostuksessa aiheutuvista muodonmuutoksista, jonka takia pystyttiin toteuttamaan kompensatiot halutuille kappaleille. Simuloinnin jälkeen kappaleet 3D-tulostettiin.

Tutkimuksessa selvisi tulostuksessa käytettyjen asentojen vaikutus kappaleiden muodonmuutoksiin. Vähiten muodonmuutoksia aiheutti pystyasennossa tulostettu kappale. Tutkimuksessa havaittiin tulostimen parametrien tärkeys kompensatio kappaleiden teossa.

Lopuksi testikappaleet skannattiin. Skannauksen avulla voitiin todentaa tuloksien oikeellisuus. Tuloksia vertaillen pystyttiin todistamaan optimoidun kompensatian toimivan metallin 3D-tulostuksen aiheuttamiin muodonmuutoksiin. Tutkimuksella saavutettiin toivottu lopputulos, jolla pystyttiin osoittamaan simuloinnin yhdenmukaisuus tulostetun kappaleen kanssa.

Tutkimusta voitaisiin jatkaa selvittämällä parametrien vaikutusta simuloinnin tarkkuuteen, jolloin kompensatio kappaleista saataisiin vielä tarkempia. Tässä opinnäytetyössä käytettiin oletusarvoisia parametreja. Lisäksi kompensatio muotoihin perehtyminen laajemmin voisi tuottaa parannuksia tutkimuksen jatkokäyttöön. Tutkimuksessa ei otettu huomioon tukirakenteiden optimointia, joka vaikuttaa tulostetun kappaleen muodonmuutoksiin.



Opinnäytetyö on ollut kokonaisuudessaan monipuolinen sisältäen eri työvaiheita, kuten suunnittelua, mallinnusta, simulointia, 3D-tulostamista ja 3D-skannausta. Opinnäytetyö on opettanut todella laajasti eri osaamisalueita teoreettisesti ja käytännössä. Lisäksi opinnäytetyön aikana on saanut syventyä perusteellisesti käytettyihin työmenetelmiin.

## Lähteet

3DScanCo 2023. 3D Scanning technical information. Viitattu 20.11.2023.

<https://www.3dscanco.com/3d-scanning-technical-information/>

Alonen Antti, Alonen Lauri, Hietikko Esa 2016 Lisäävän valmistuksen perusteet, Painos Savonia. Viitattu 20.11.2023

Bentley, D. 2020 AM support structures: The need, impact, and elimination strategies. Viitattu 20.11.2023 <https://www.cadalyst.com/design-related-technologies/3d-printers/am-supportstructures-need-impact-and-elimination-strategies>

Devasia, A. 2020 Digital twinning: Leaders in the emerging technology. Viitattu 16.11.2023 <https://control.com/technical-articles/digital-twinning-leaders-in-the-emerging-technology/>

Ebrahim, M. 2015. 3D laser scanners' techniques overview. Viitattu 20.11.2023 [https://www.researchgate.net/profile/Mostafa-Ebrahim-3/publication/282753883\\_3D\\_Laser\\_Scanners'\\_Techniques\\_Overview/links/561b66cb08ae044edbb24210/3D-Laser-Scanners-Techniques-Overview.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Mostafa-Ebrahim-3/publication/282753883_3D_Laser_Scanners'_Techniques_Overview/links/561b66cb08ae044edbb24210/3D-Laser-Scanners-Techniques-Overview.pdf)

Ferguson, S. 2020. Apollo 13: The first digital twin Viitattu 15.11.2023 <https://blogs.sw.siemens.com/simcenter/apollo-13-the-first-digital-twin/>

Grieves, M. 2015. Digital twin: Manufacturing excellen trough virtual factory replication Viitattu 15.11.2023 (PDF) Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication (researchgate.net)

ISO/ASTM 52900:2021 Lisäävä valmistus. Yleiset periaatteet. Perusteet ja sanasto. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry

ISO/ASTM 52911-1:2019 Additive manufacturing. Design. Part 1: Laser-based powder bed fusion of metals. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry

Kang-Hyun, L & Gun, J.Y 2022 Design optimization of thermally conductive sup-port structure for laser powder-bed fusion process with part-scale thermal histo-ry. Elsevier Additive Manufacturing. Vol. 51. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860422000355>

Sam Anand, Omkar Ghalsasi, Botao Zhang, Archak Goel, Srikanth Reddy, Shriyanka Joshi, Gil Morris. 2019 Additive manufacturing simulation tools in education, USA. Viitattu 20.11.2023

<https://ieeexplore.ieee.org/document/8629689/authors>

Siemens 2017. Simulation & Digital twin Viitattu 20.11.2023

<https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:3a888b679aaf5feeb7cf9eacfe8806aa0c6046b6/factsheet-cct-simulation-and-digital-twin-en.pdf>

Siemens 2023. Additive manufacturing Viitattu 20.11.2023

<https://plm.sw.siemens.com/en-US/nx/manufacturing/additive-manufacturing/>

Siemens 2023. Digital twin. Viitattu 18.11.2023

<https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/our-story/glossary/digital-twin/24465>

Siemens 2023. Viitattu 20.11.2023 <https://www.sw.siemens.com/en-US/>

Siemens. 2022 Simcenter 3D for additive manufacturing simulation Viitattu 19.11.2023 Simcenter 3D for additive manufacturing simulation (siemens.com)

T-SCAN 20 Operating instructions 2020. Viitattu 30.11.2023

Törnqvist, P. Haastattelu. Turun ammattikorkeakoulun laboratorioinsinööri Pekka Törnqvistiä haastatteli 10.10.2023 Julia Merisaari ja Veera Mustajoki

Vesterinen, K. Haastattelu. Turun ammattikorkeakoulun lehtori Kalevi Vesteristä haastatteli 3.10.2023 Julia Merisaari ja Veera Mustajoki

ZEISS, n.d. #HandsOnMetrology. Viitattu 18.11.2023.

<https://www.handsonmetrology.com/products/t-scan/>

# Kalibrointitodistus1

## Protocol T-SCAN alignment calibration



### Results

Date/time:	11/6/2023 11:43 AM
Scanner:	LTM1001826
Standard deviation:	0.044 mm
Temperature range measurement:	21.4 °C - 21.4 °C

### System information

Scanner calibration date:	8/12/2019 11:38 AM
Tracking system:	CTM1000070
Tracker factory calibration date:	8/22/2019
Permissible temperature range:	20.2 °C - 26.2 °C
Calibration sphere:	ESP1001057
Sphere diameter:	∅ 49.994 mm
colin3D version:	8.0.1.355

## Kalibrointitodistus 2

### Protocol T-SCAN alignment calibration



#### Results

Date/time:	11/7/2023 1:54 PM
Scanner:	LTM1001826
Standard deviation:	0.049 mm
Temperature range measurement:	21.4 °C - 21.4 °C

#### System information

Scanner calibration date:	8/12/2019 11:38 AM
Tracking system:	CTM1000070
Tracker factory calibration date:	8/22/2019
Permissible temperature range:	20.2 °C - 26.2 °C
Calibration sphere:	ESP1001057
Sphere diameter:	∅ 49.994 mm
colin3D version:	8.0.1.355

## Kalibrointitodistus 3

### Protocol T-SCAN alignment calibration



#### Results

Date/time:	11/11/2023 10:49 AM
Scanner:	LTM1001826
Standard deviation:	0.041 mm
Temperature range measurement:	17.6 °C - 17.7 °C

#### System information

Scanner calibration date:	8/12/2019 11:38 AM
Tracking system:	CTM1000070
Tracker factory calibration date:	8/22/2019
Permissible temperature range:	20.2 °C - 26.2 °C
Calibration sphere:	ESP1001057
Sphere diameter:	Ø 49.994 mm
colin3D version:	8.0.1.355