



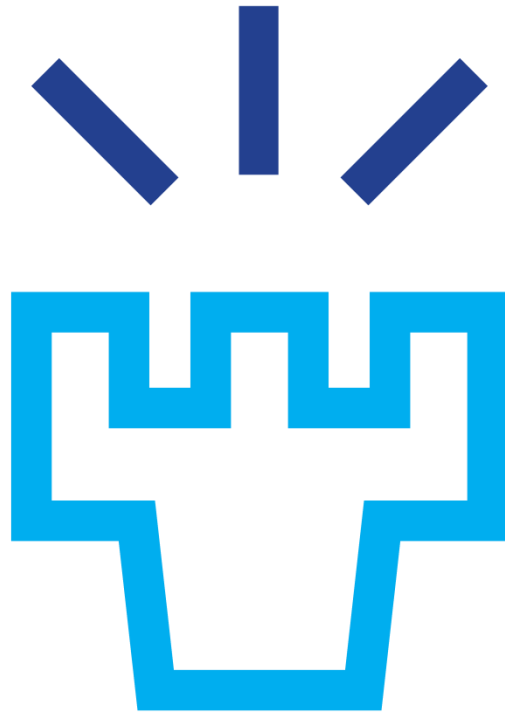
**UNIVERSITY  
OF OULU**

**KERTTU SAALASTI  
INSTITUTE**

***Science  
With  
Arctic  
Attitude!***

**FMT**  
FUTURE MANUFACTURING  
TECHNOLOGIES





**UNIVERSITY  
OF OULU**  
KERTTU SAALASTI INSTITUTE

# 3D Metallitulosuus

**FMT**  
FUTURE MANUFACTURING  
TECHNOLOGIES

UNIVERSITY OF OULU  
KERTTU SAALASTI INSTITUTE

**FMT**

FUTURE MANUFACTURING  
TECHNOLOGIES

**C3TS**

Arctic platform to Create, 3D-print, Test and Sell



# Yhteistyössä

**Interreg  
Pohjoinen**

Euroopan aluekehitysrahasto



EUROOPAN UNIONI



**TROMS** County Council  
**TROMS** fylkeskommune



LAPIN LIITTO



Science  
*with*  
Arctic  
Attitude



UNIVERSITY OF OULU  
KERTTU SAALASTI INSTITUTE

**FMT**

FUTURE MANUFACTURING  
TECHNOLOGIES





# Sisältö



- Alkulauseet
- **Ainettalisäävä valmistus ja AM valmistusmenetelmät**
- **Suunnittelu AM valmistus huomioiden**
  - yleisesti suunnitteluprosessi
  - SLM menetelmälle suunnittelu tarkemmin
- **AM valmistuksen hyödyntäminen teollisuudessa**
  - hyödyntämisenäkymät
  - kaupalliset palveluntarjoajat
- **Loppuyhteenvedo**

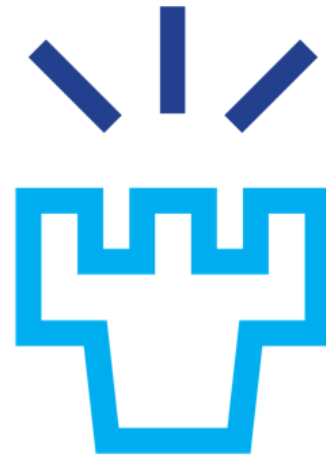


# FMT

FUTURE MANUFACTURING  
TECHNOLOGIES



Kari Mäntyjärvi  
Tutkimusjohtaja



UNIVERSITY  
OF OULU  
KERTTU SAALASTI INSTITUTE

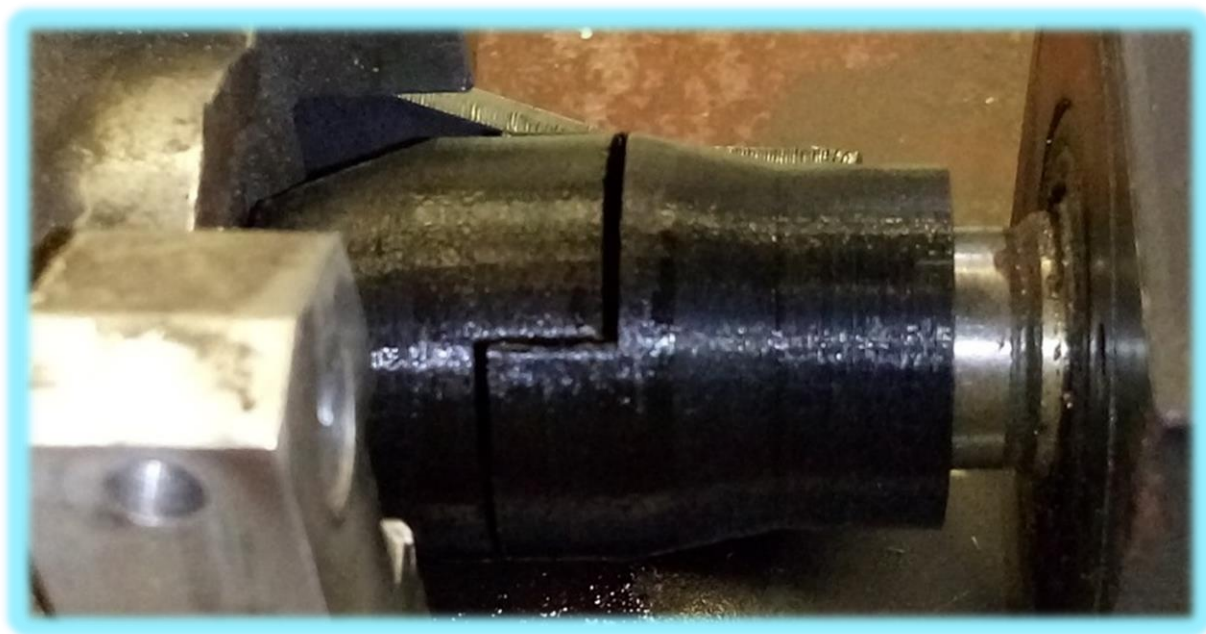


Tero Jokelainen  
Projektitutkija  
AM asiantuntija





# Tulevaisuuden tuotanto- teknologiat (FMT) ryhmä



## Resurssit

- 18 henkeä, toimintaa Nivalassa (ELME Studio), Oulussa (Linnanmaan kampus) ja Raahessa (Raahen Aiku)
- monipuolinen laitekanta – lasertyöstöstä materiaalin koeistukseen
- Oulun yliopiston Konetekniika-alan ja Jedun metallin asiantuntemus tukena

## Tutkimus

- Yli 60 kansainvälistä tieteellistä julkaisua vuosina 2007-2017
- Julkisrahoitteisia kansainvälisiä ja kansallisia projekteja sekä tilaustutkimusta
- Taustalla alueen yritysten tarve, tulosten hyödynnettävyys aikajänne pääosin 0-5 vuotta

## Yrityspalvelu

- Vuosittain n. 50 yrityksille tehtyä tutkimusta ja selvitystä
- Tilaustutkimusta, prototyyppejä ja konsultointipalvelua

## Opinnäytteet

- 19 diplomi-insinööriä ja 35 insinööriä

## Kansainvälinen yhteistyö

- Ruotsi, Egypti, Norja, Islanti, Irlanti, Skotlanti, Saksa, Ranska, Puola, Iran ja Intia
- Yhteistyö laitteita ja tekniikkaa kehittävien kv. yritysten kanssa

CASR  
Centre for Advanced  
Steels Research



# FMT tutkimus - Fokusalueet



DFMA (Design for Manufacturing and Assembly)  
SUUNNITTELU VALMISTUSTEKNIikka HUOMIOIDEN  
Materiaali - Suunnittelu - Valmistus - Tuoteominaisuudet



## Kevyet ja kestävät rakenteet + Laser- tekniikan soveltaminen

- Materiaalit, suunnittelu ja valmistus
- Kennotekniikat, muovaus, hitsaustutkimus
- Ultralujien hyödyntäminen
- Simuloinnin hyödyntäminen

## Erikoisteräkset – teräksistä tuotteiksi

- Piensarjateräkset
- Muovaus ja erikoisprosessit
- Väsyttävän kuormituksen vaikutus
- Metallografia

## Ainettalisäävä valmistus ja sen yhdistäminen muuhun valmistukseen

- Materiaalit, suunnittelu ja valmistus

## Kustannustehokas tuotantoautomaatio

- Räätelöity automaatio
- Tuotannon seuranta
- Digitalisaatio ja teollinen internet





# C3TS

Arctic platform to Create, 3D-print, Test and Sell

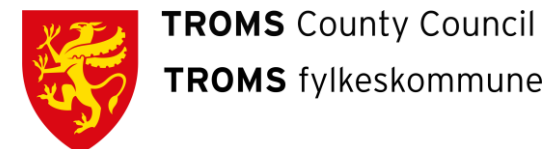




**C3TS on Interreg -ohjelman rahoittama, Luulajan teknillisen yliopiston vetämä hanke, jossa FMT osatoteuttajana.**

**Hankkeen kokonaisvaltaisena tavoitteena on parantaa alueen pk-yritysten kansainvälistä kilpailukykyä tekemällä metallien 3D-tulostusta tunnetuksi uutena valmistusmenetelmänä.**

**Metallien 3D-tulostusteknologia voi mahdollistaa tuotteiden rakenteen innovatiivisemmän muotoilun, laskea tuotantokustannuksia ja vaikuttaa vähemmän ympäristöön uusilla, harvempia tuotantoportaita käyttävillä tuotantolinjoilla samalla, kun valmistuksessa käytetään pienempiä määriä materiaalia.**





Science  
*with*  
Arctic  
Attitude

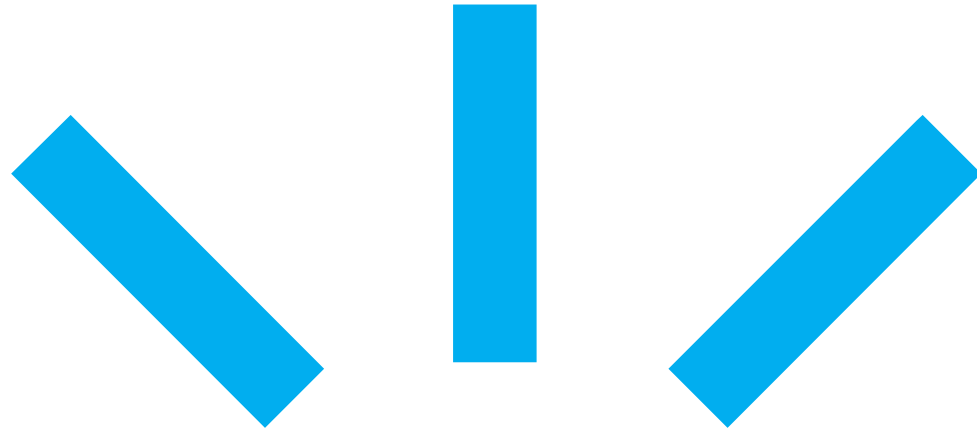


UNIVERSITY OF OULU  
KERTTU SAALASTI INSTITUTE

**FMT**

FUTURE MANUFACTURING  
TECHNOLOGIES





# Ainettalisäävä valmistus ja sen menetelmät



# Ainettalisäävä valmistus

## 3D Tulostus



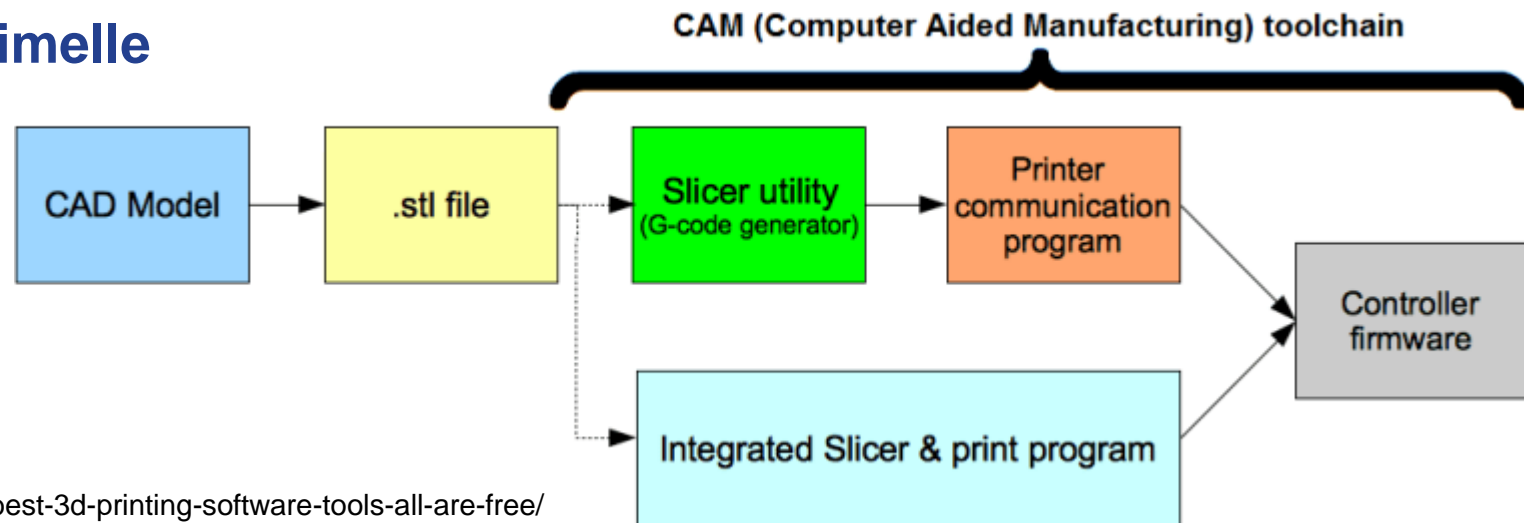
- **Additive Manufacturing**
  - Ainettalisäävä valmistus
  - Materiaalia lisäävä valmistus
  - 3D tulostus
  - Joukko valmistusmenetelmiä jotka perustuvat aineen lisäämiseen (vastakohtana ainetta poistavat ja aineita liittävät menetelmät)
    - Laajasti kaikki menetelmät joissa kappale valmistetaan ainetta lisäämällä
  - Menetelmät<sup>\*)</sup>:
    - Powder Bed Fusion – Jauhepetisulatus
    - Material Extrusion – Pursotus
    - Vat Photopolymerization – Valokovetus altaassa
    - Material Jetting – Materiaalin suihkutus
    - Binder Jetting – Sideaineen suihkutus
    - Directed Energy Deposition - Suorakerrostus
    - Sheet Lamination – Kerroslaminointi

<sup>\*)</sup> Käännökset: <http://www.firpa.fi/html/sanasto.html>



# 3D mallista tulosteeseen

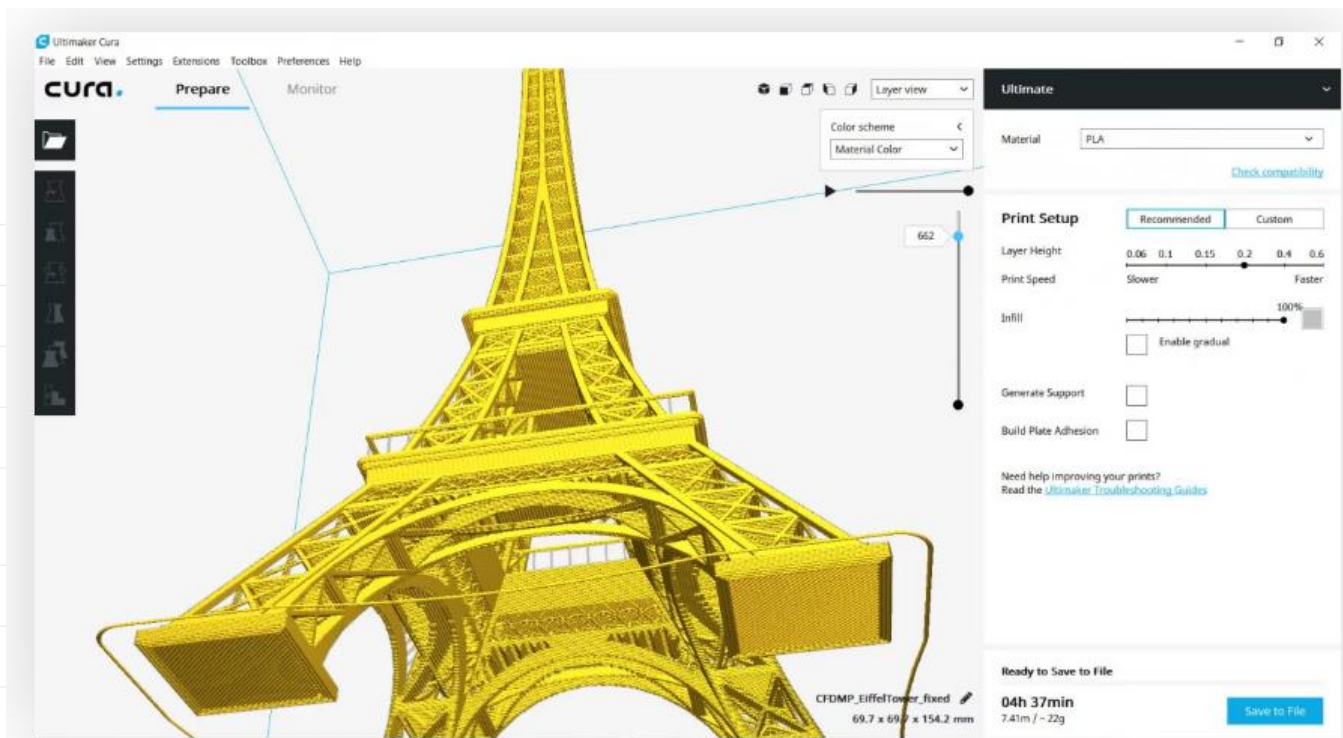
- **Suunnittelussa valmistusmenetelmän huomioiminen**
  - Tukien tarve, tulostusorientaation vaikutus, jälkikäsittelyiden huomioiminen/minimointi, materiaalin anisotropian vaikutus
- **Valmiin kappaleen / kappaleiden valmistaminen tulostettavaksi esikäsittelyohjelmalla**
  - Sijoittaminen tulostusalustalle
  - Tukien määrittäminen
  - Tulostusparametrien valinta ja asettaminen
- **Ohjelman muodostus (automaattinen)**
  - Rakenteen jakaminen kerroksiin
  - Kerroksen liikeratojen muodostaminen
- **Ohjelman siirto tulostimelle**
- **Tulostus**





## 3D tulostimen ohjelmointi Maksuttomia ohjelmia

<a href="#">KISSlicer</a>	Slicer	Intermediate	Windows, Mac, Linux	<a href="#">KISSlicer</a>
<a href="#">Slic3r</a>	Slicer	Intermediate	Windows, Mac, Linux	<a href="#">Slic3r</a>
<a href="#">SliceCrafter</a>	Slicer	Intermediate	Browser	<a href="#">SliceCrafter</a>
<a href="#">Cura</a>	Slicer, 3D Printer Host	Beginner	Windows, Mac, Linux	<a href="#">Cura</a>
<a href="#">OctoPrint</a>	Slicer, 3D Printer Host	Intermediate	Windows, Mac, Linux, Raspbian (as OctoPi image)	<a href="#">OctoPrint</a>
<a href="#">Repetier-Host</a>	Slicer, 3D Printer Host	Intermediate	Windows, Mac, Linux	<a href="#">Repetier</a>
<a href="#">AstroPrint</a>	Slicer, 3D Printer Host	Beginner	Browser	<a href="#">AstroPrint</a>
<a href="#">MatterControl 2.0</a>	Slicer, 3D Printer Host, Design	Beginner	Windows, Mac, Linux	<a href="#">MatterControl</a>
<a href="#">IceSL</a>	Slicer, Design	Intermediate	Windows, Linux	<a href="#">IceSL</a>
<a href="#">3D-Tool Free Viewer</a>	STL Analysis	Intermediate	Windows	<a href="#">3d-Tool Viewer</a>
<a href="#">MakePrintable</a>	STL Editor, STL Repair	Intermediate	Browser	<a href="#">MakePrintable</a>
<a href="#">Meshmixer</a>	STL Editor, STL Repair	Intermediate	Windows, Mac	<a href="#">Meshmixer</a>
<a href="#">MeshLab</a>	STL Editor, STL Repair	Professional	Windows, Mac, Linux	<a href="#">MeshLab</a>
<a href="#">3DPrinterOS</a>	STL Editor, STL Repair, Slicer, 3D Printer Host	Beginner	Windows, Mac, Ubuntu, Raspberry Pi	<a href="#">3DPrinterOS</a>
<a href="#">Netfabb</a>	STL Repair, Slicer	Professional	Windows	<a href="#">Netfabb</a>



Cura settings can be quite extensive. (Source: All3DP)

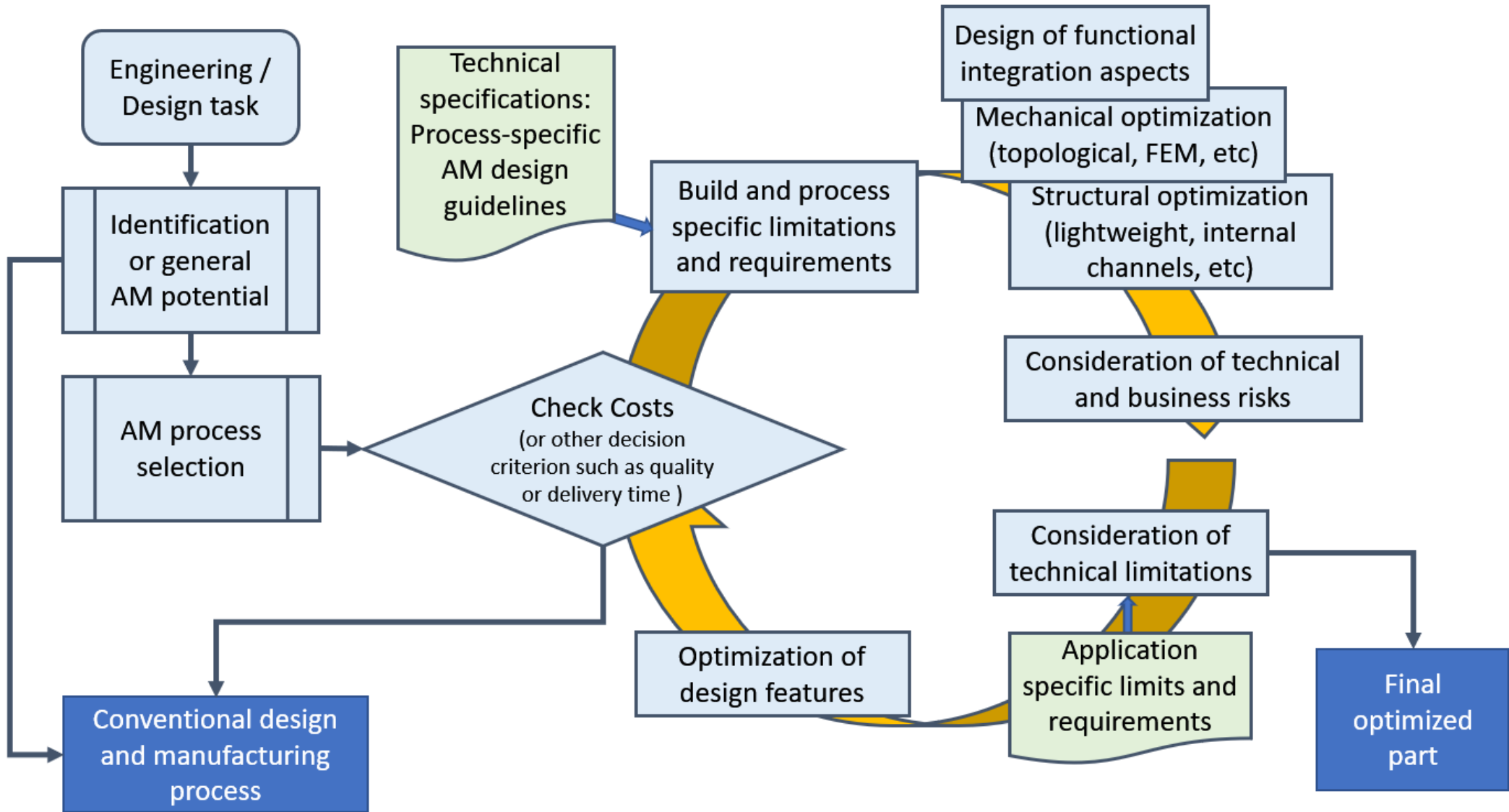
### FEATURES

Software	Cura	Price	Free
Function	Slicer, 3D Printer Host	System	Windows, Mac, Linux
Level	Beginner	Download/Visit:	<a href="#">Cura</a>

<https://all3dp.com/1/best-free-3d-printing-software-3d-printer-program/>



# AM menetelmän potentiaalın arviointi, valinta ja suunnitteluprosessi Standardin ISO/ASTM 52910:20 mukaan.







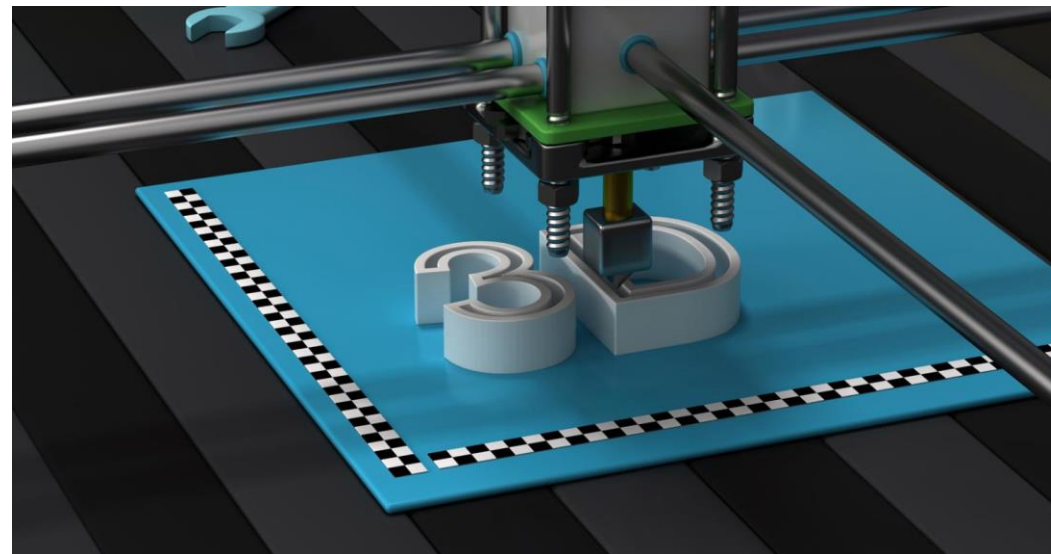
# Erilaiset AM prosessit



Kuva: FMT



- Yksivaiheiset  $\leftrightarrow$  Monivaiheiset
- Materiaali (metalli, polymeeri, keraami)
- Materiaalin liittymisprosessi (sulautuminen vs kiinnittyminen)
- Lisättävän aineen lähtötila
  
- Hyvää tietoa lähteestä <https://www.3dhubs.com/knowledge-base> !!



Kuva: <https://www.machinedesign.com>



## ISO/ASTM 52900:2015(E)

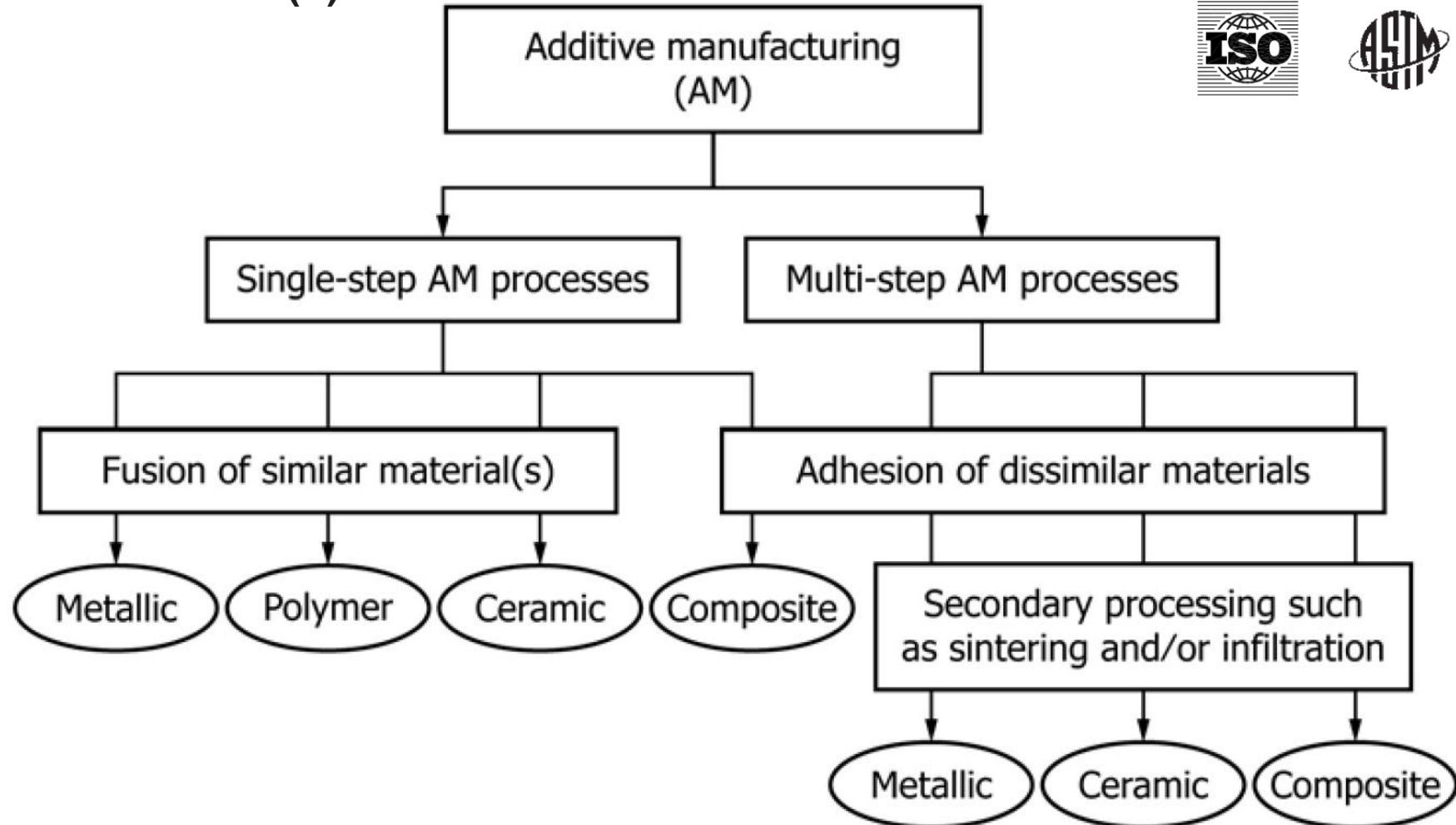


FIG. A1.1 Single-step and Multi-step AM process principles



- Powder Bed Fusion
  - Laser Powder Bed Fusion
    - Selective Laser Melting
    - Selective Laser Sintering
  - (Selective) Electron-Beam Melting
- Direct Energy Deposition
  - Direct Laser Deposition
  - Electron-Beam Deposition

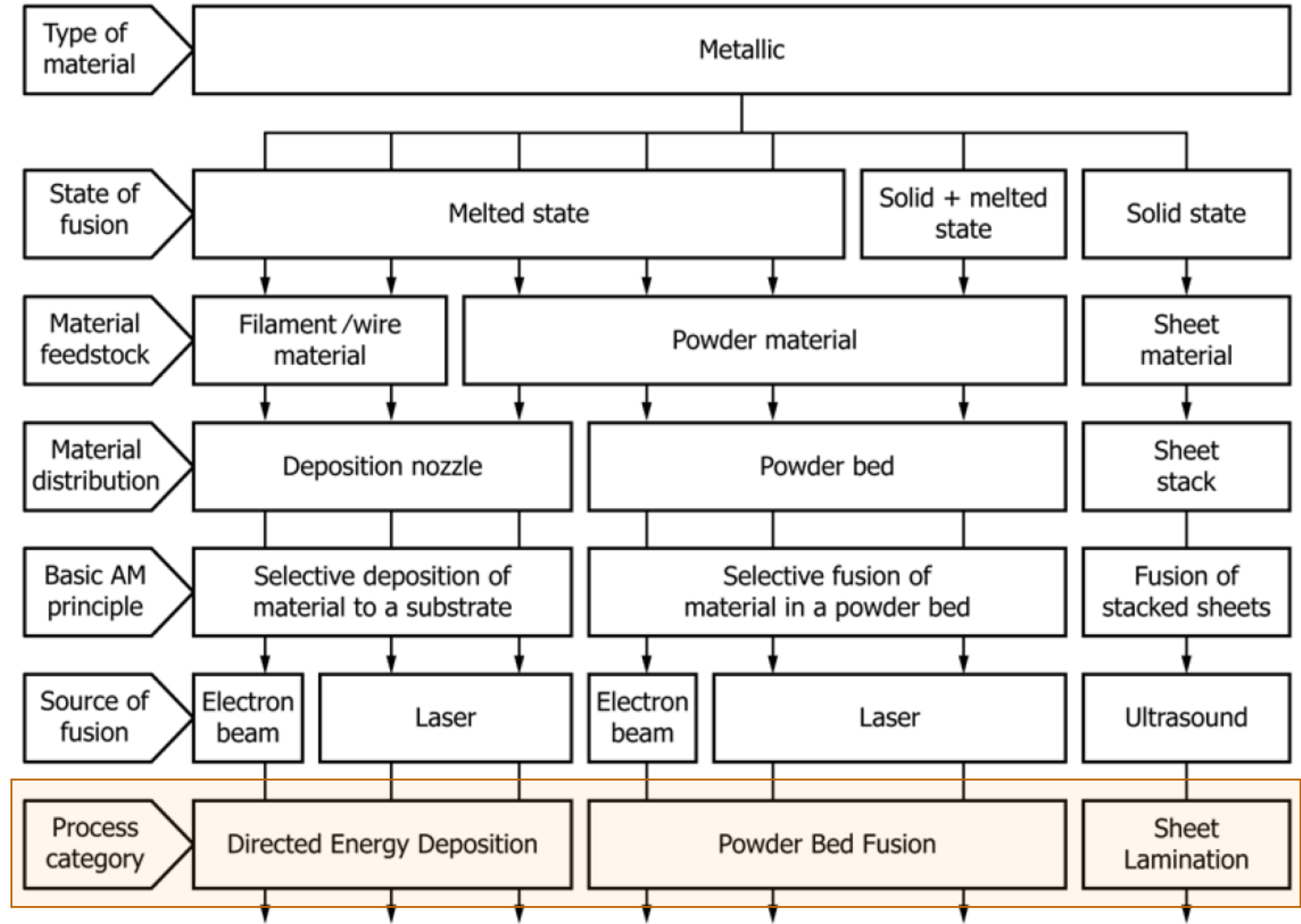
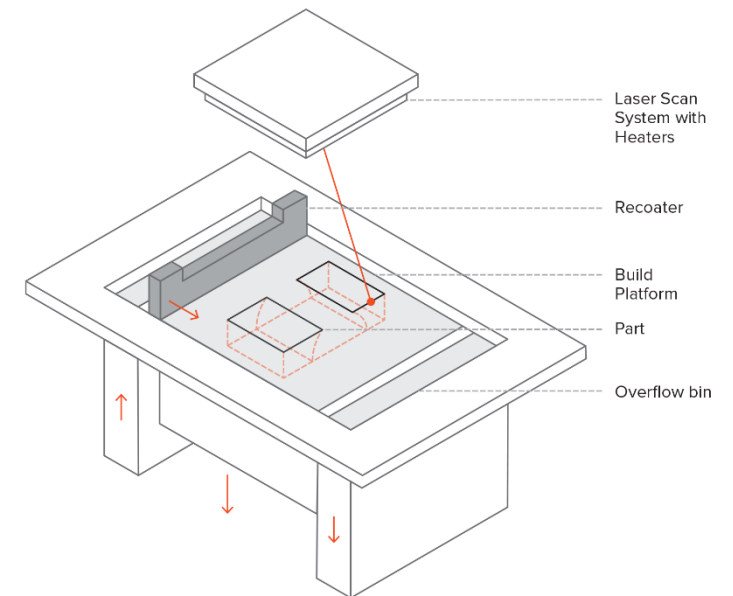
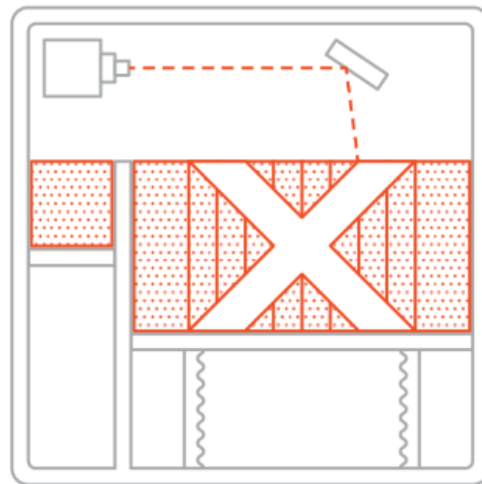
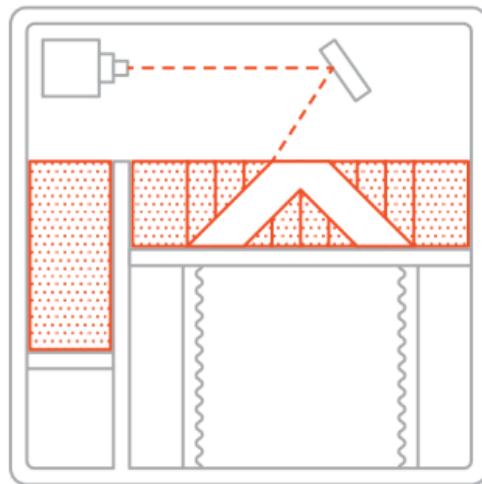
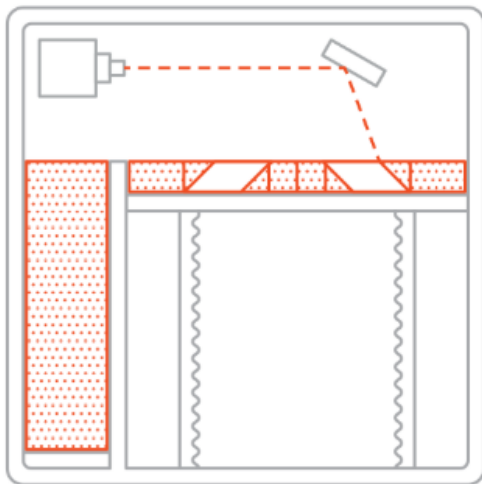


FIG. A1.2 Overview of single-step AM processing principles for metallic materials

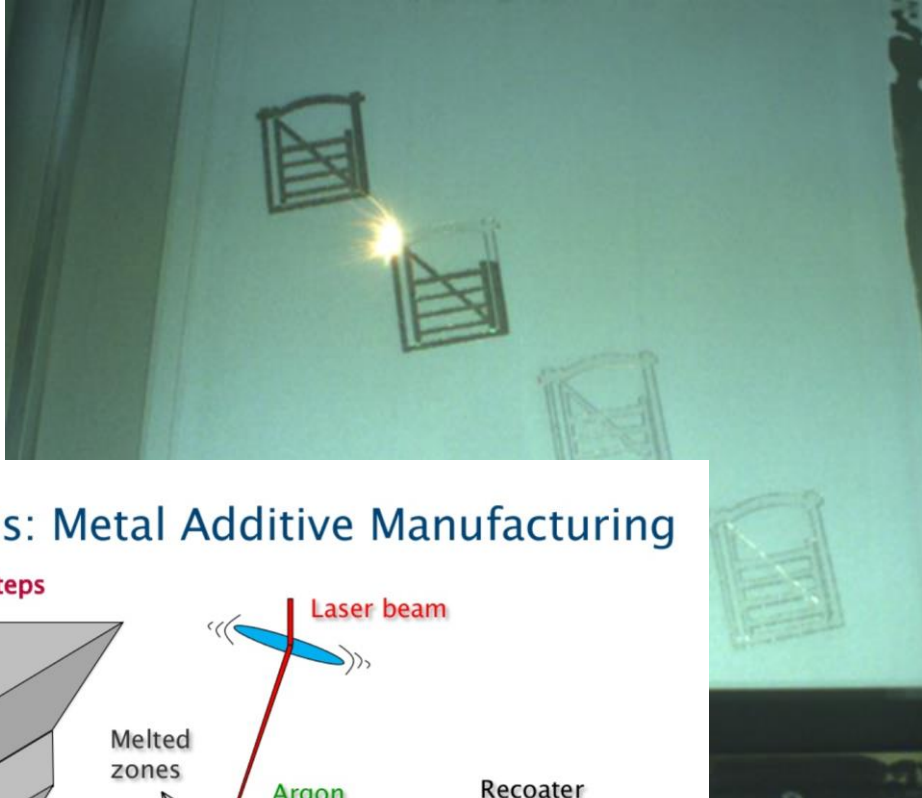


## Selective Laser Melting – Selektiivinen lasersulatus

- Yleisin metallien 3D tulostusmenetelmä
- Direct Metal Laser Sintering – Muuten sama mutta metallia ei sulateta vaan kuumennetaan sintrauslämpötilaan – pienempi lasertehontarve
- Metallijauhe sulatetaan kerroksittain laserilla
- Rakenne kerrostetaan kiinni alustaan
- Tukirakenteet tarpeellisia (samaa materiaalia)
- Yleisemmät materiaalit AISI 316L (haponkestävä ruostumaton) ja AISI10Mg (Aumiini)
  - Titaaniseokset, työkaluteräkset, superseokset, jne
  - Perus hiiliteräkset ei onnistu

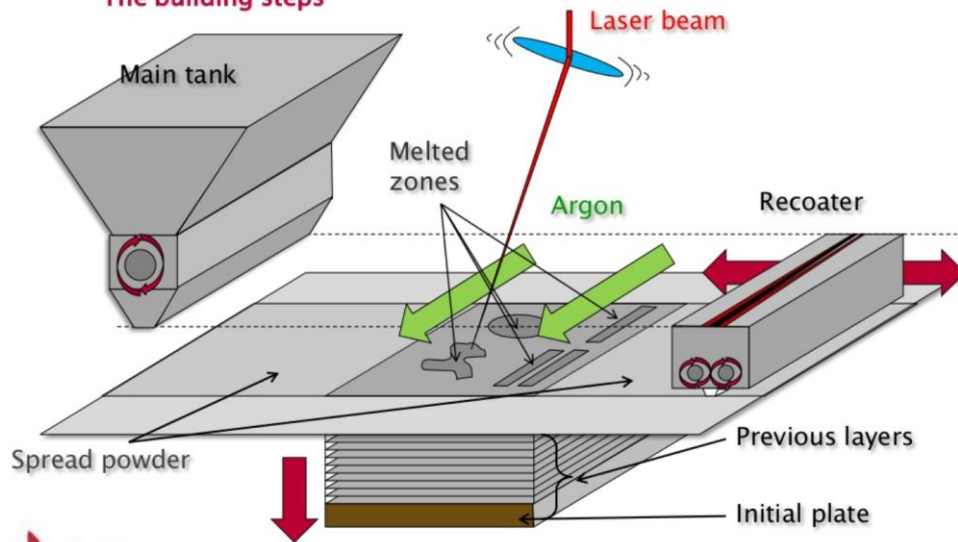


Lähde: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-metal-3d-printing>



## Generalities: Metal Additive Manufacturing

### The building steps



© Sirris | www.sirris.be | info@sirris.be | 25/11/2013 13



<https://www.3dprintingmedia.network/slm-solutions-presents-upgraded-slm-280-2-0-3d-printer-tire-technology-exhibition/>



## AlSi10Mg

SLM Solutions' Al-Alloy AlSi10Mg is an aluminum-based alloy that is widely used in the additive manufacturing industry for production of functional parts as well as prototypes. AlSi10Mg is often used in applications requiring good mechanical properties and low weight.

### Chemical Composition (nominal), %

Element / Material	Al	Si	Mg	Cu	Fe	Mn	Zn	Ti	Ni	Pb	Sn	Others	Total Others
AlSi10Mg 20-63 µm	Bal.	9.00-11.00	0.20 - 0.45	0.05	0.55	0.45	0.10	0.15	0.05	0.05	0.05	0.05	0.15

### Mechanical Data<sup>5</sup>

### Formula Symbol and Unit

AlSi10Mg<sup>2,3</sup>

Tensile strength	R <sub>m</sub> [MPa]	386 ± 42
Offset yield stress	R <sub>p0,2</sub> [MPa]	268 ± 8
Break strain	A [%]	6 ± 1
Reduction of area	Z [%]	7 ± 1
E-Modul	E [GPa]	61 ± 9
Hardness by Vickers	[HV10]	122 ± 2
Surface roughness	R <sub>a</sub> [µm]	8 ± 1
Surface roughness	R <sub>z</sub> [µm]	63 ± 10

### Material Characteristics

- Very good corrosion resistance
- Good electrical conductivity
- High dynamic toughness
- Excellent thermal conductivity

### Typical Application Areas

- Aerospace
- Automotive
- Engineering
- Heat exchangers



## 316L

SLM Solutions' Stainless Steel 316L is an austenitic high chromium steel with excellent processability on SLM Solutions' additive manufacturing machines. 316L is often used in applications requiring good mechanical properties and excellent corrosion resistance, especially in chloride environments.

### Chemical Composition (nominal), %

Element / Material	Fe	Cr	Ni	Mo	Si	Mn	C	N	P	S	O
316L (1.4404) 10-45 µm	Bal.	16.00 - 18.00	10.00 - 14.00	2.00 - 3.00	1.00	2.00	0.030	0.10	0.045	0.030	0.10

Mechanical Data <sup>5</sup>	Formula Symbol and Unit	1.4404 / 316L <sup>2,3</sup>
Tensile strength	R <sub>m</sub> [MPa]	633 ± 28
Offset yield stress	R <sub>p0,2</sub> [MPa]	519 ± 25
Break strain	A [%]	31 ± 6
Reduction of area	Z [%]	49 ± 11
E-Modul	E [GPa]	184 ± 20
Hardness by Vickers	[HV10]	209 ± 2
Surface roughness	R <sub>a</sub> [µm]	10 ± 2
Surface roughness	R <sub>z</sub> [µm]	50 ± 12

### Material Characteristics

- Very good corrosion resistance
- High strength under elevated temperatures
- High ductility

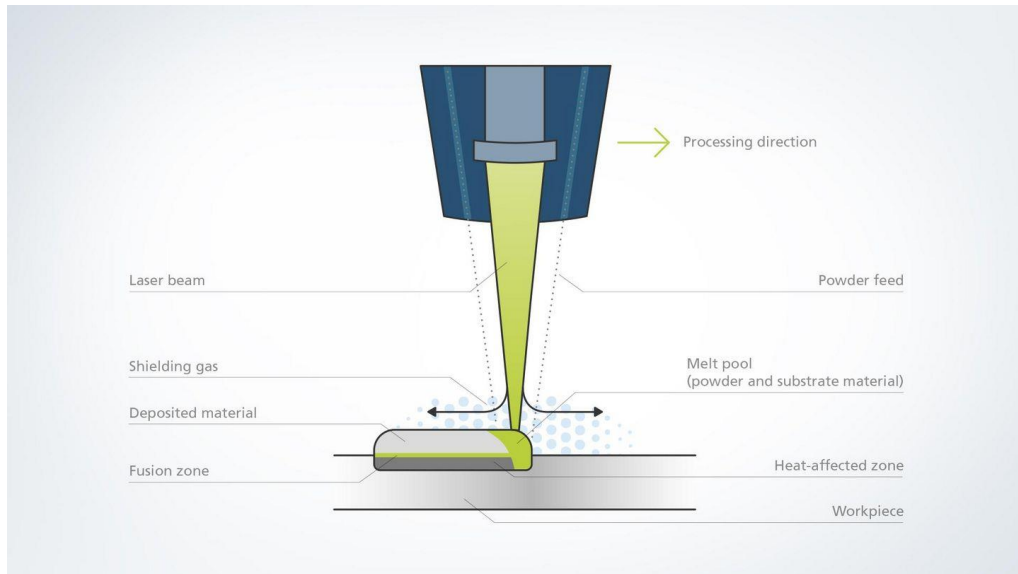
### Typical Application Areas

- Aerospace /Automotive
- Surgical Instruments
- Food Industry
- Maritime

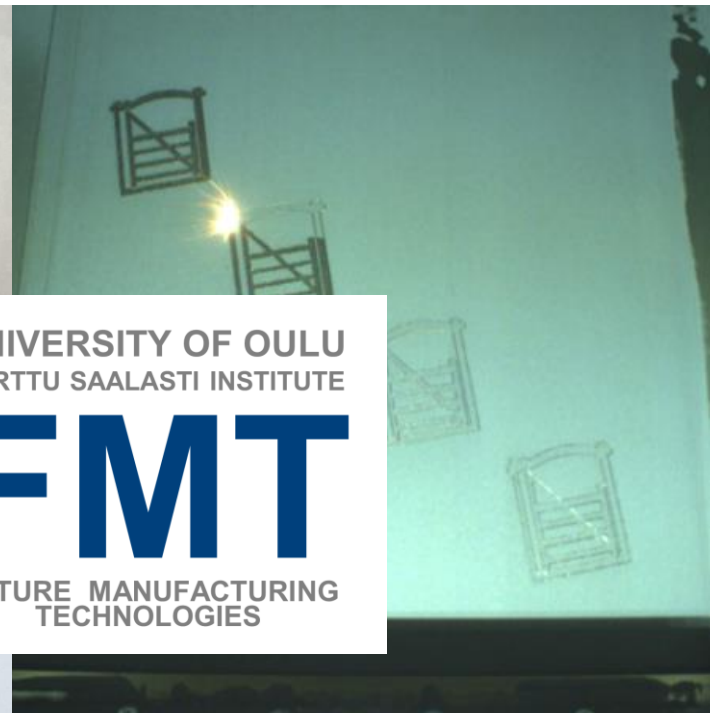
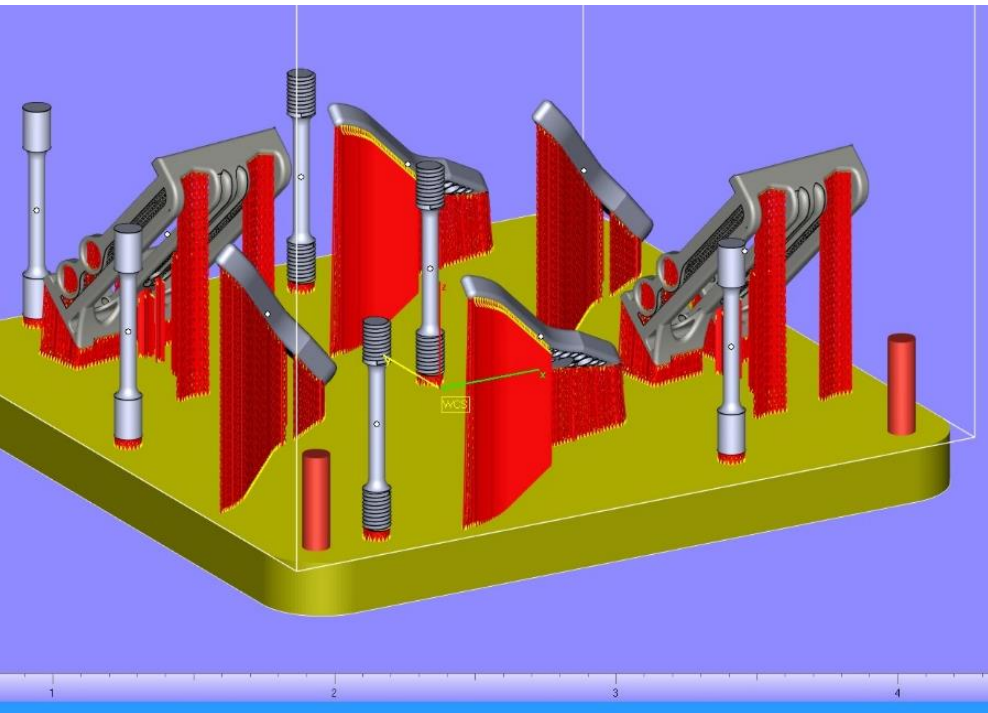


## Direct Laser Deposition – Laser suorakerrostus

- Jauhe tai lanka sulatetaan suoraan kohteeseen
- Vaikka kyse on kerroksellisesta lisäämisestä laitteet ovat usein moniakselisia
- Yksityiskohtien lisääminen jo olemassa olevaan rakenteeseen
- Ei (vielä) niin tarkka kuin SLM menetelmä, mutta nopeampi
- Tekniikka samanlainen kuin laser ruiskupuhalluksessa (laserpinnoitus)







UNIVERSITY OF OULU  
KERTTU SAALASTI INSTITUTE  
**FMT**  
FUTURE MANUFACTURING  
TECHNOLOGIES





- Extrusion
  - Fused Filament Fabrication / Fused Deposition Modelling
- Powder Bed
  - Selective Laser Sintering
- Jetting
  - Binder jetting
  - Material jetting
- Photopolymerization

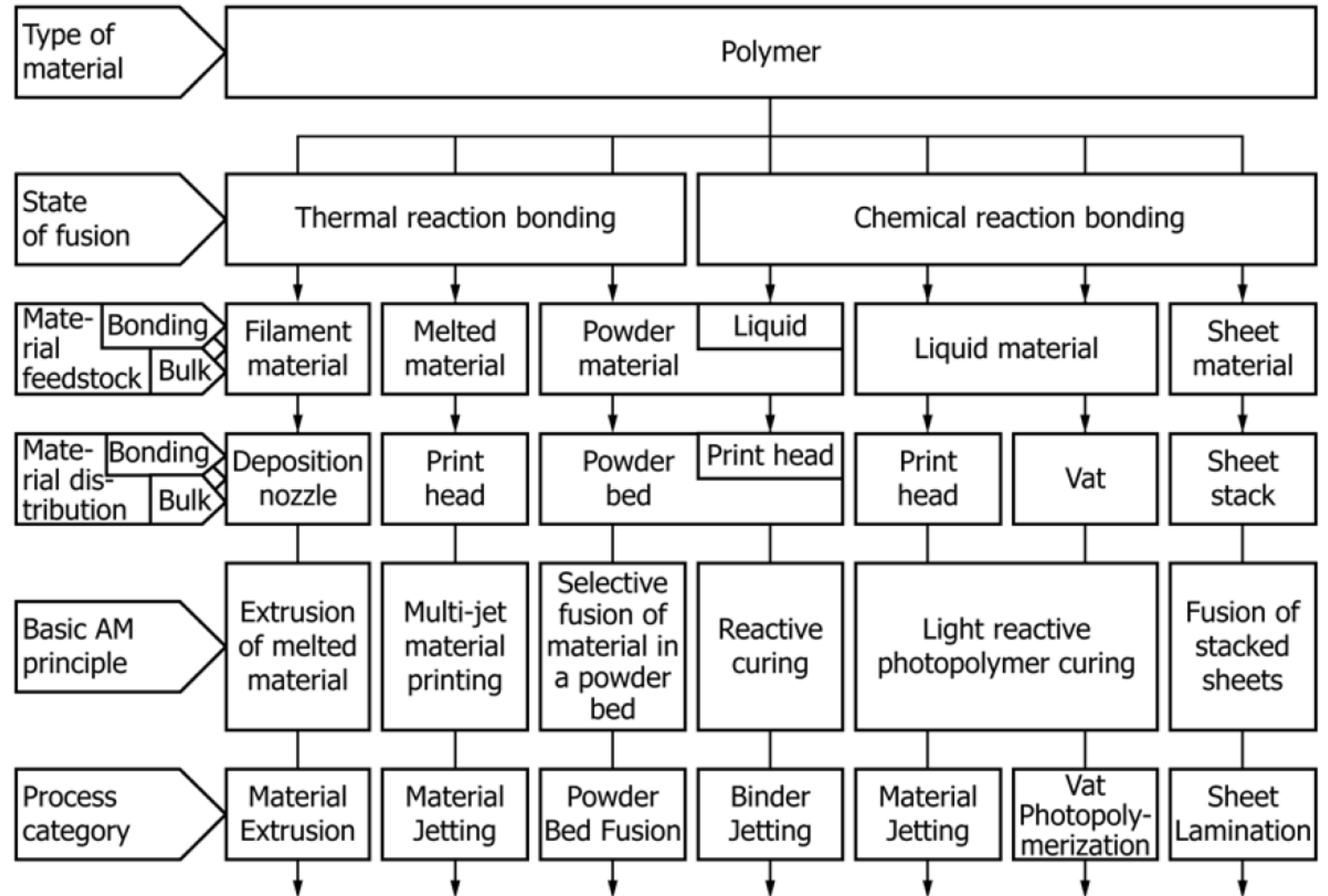
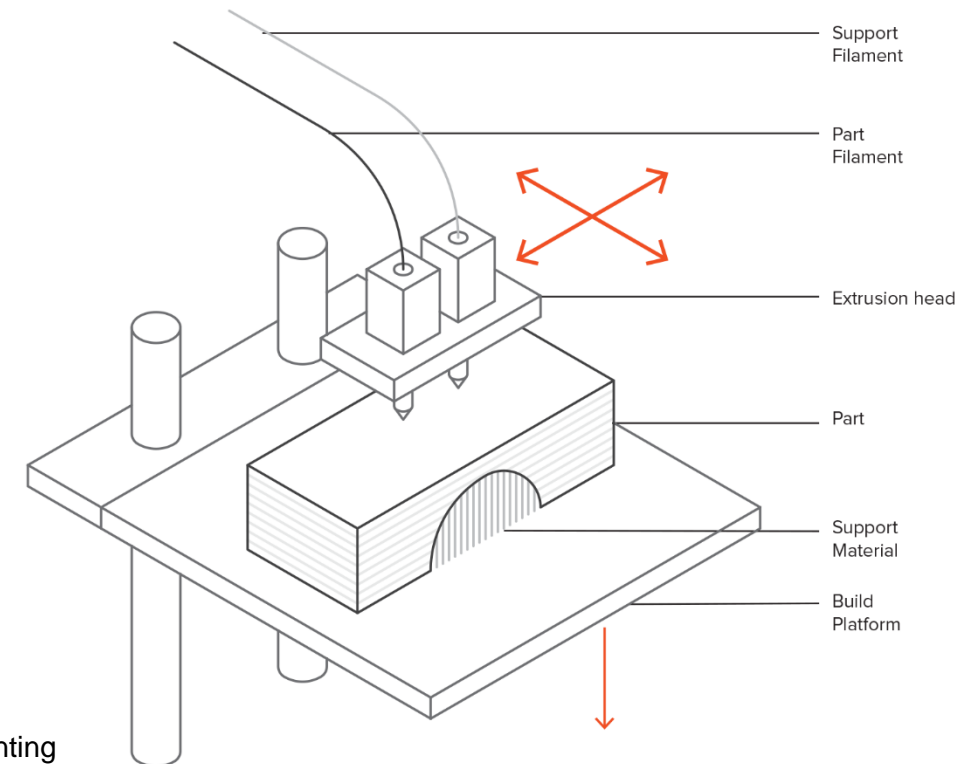
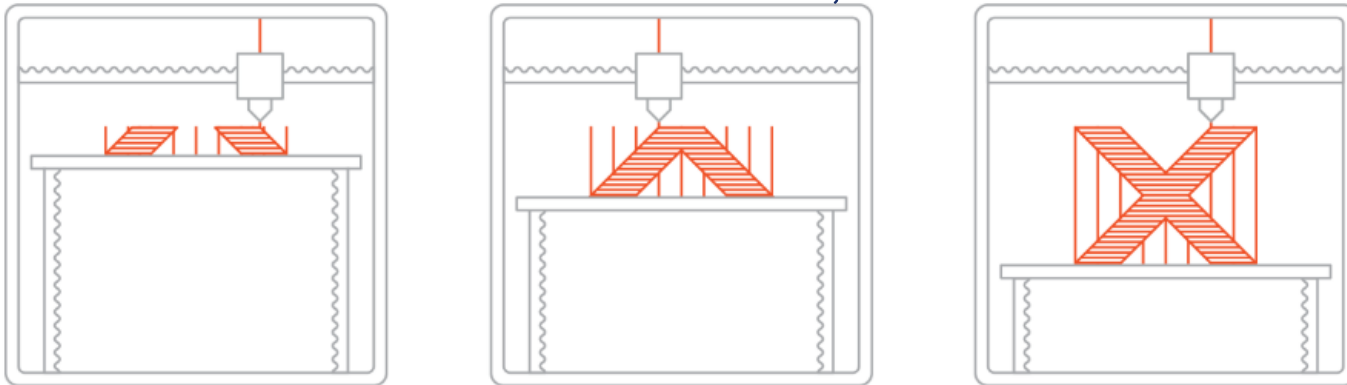


FIG. A1.3 Overview of single-step AM processing principles for polymer materials

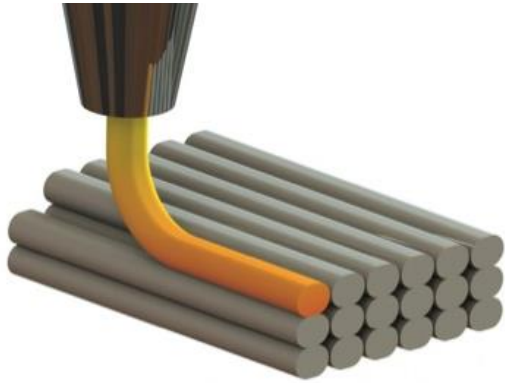


## Fused Deposition Modelling – Materiaalin pursotus

- Käytetään myös termiä ”Fused Filament Fabrication”
- Yleisin 3D tulostusmenetelmä
- Perustuu polymeerilangan kuumentamiseen ja pursottamiseen kerroksittain haluttuun muotoon
- Monipuolisesti laitteita edullisista kotilaitteista teollisiin tulostimiin
- Monimateriaalitulostus
- Joissakin tilanteissa tarvitaan tukirakennetta
- Monipuolisesti materiaaleja eri tarpeisiin  
”Suklaasta PEEKkiin....”
- Kerroksellinen rakenne, ei kovin tarkka



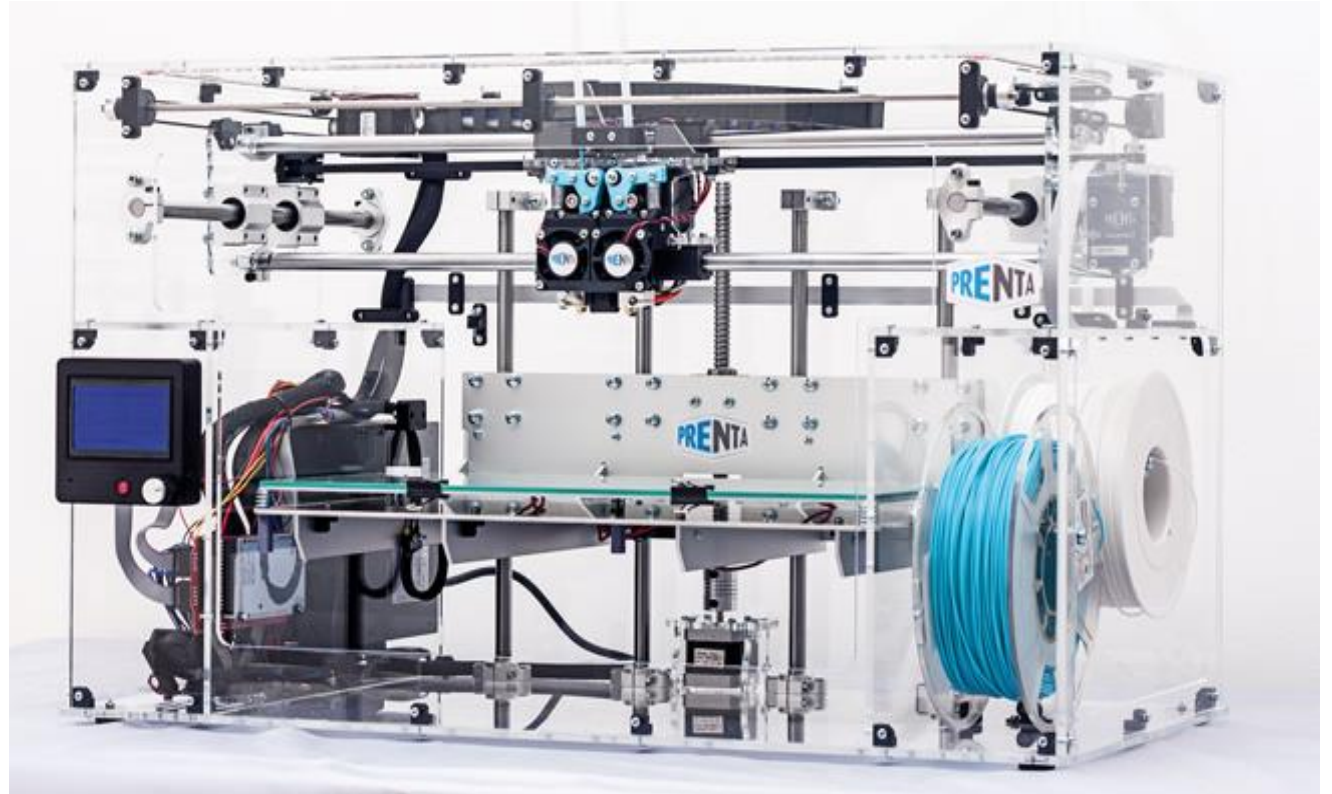
Lähde: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-fdm-3d-printing>



<https://www.additive3d.com/extrusion-deposition-fused-deposition-modeling-fdm/>



28 <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-fdm-3d-printing>



<https://shop.prenta.fi/laitteet-palvelut/3d-tulostimet/prenta-duo-xl>



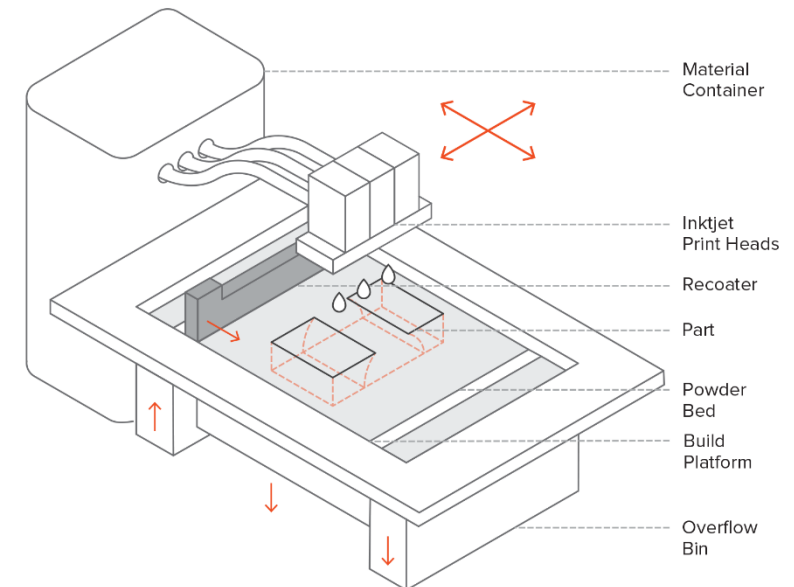
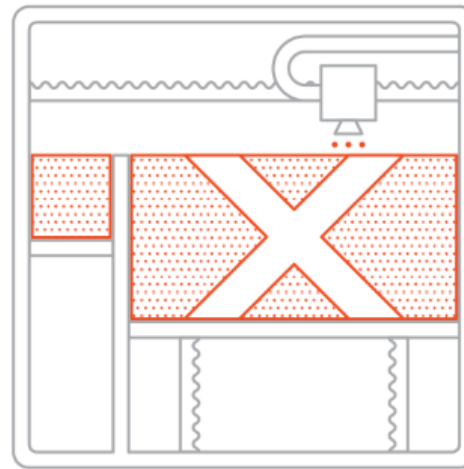
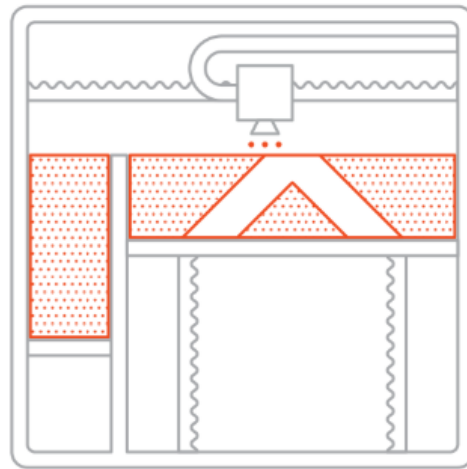
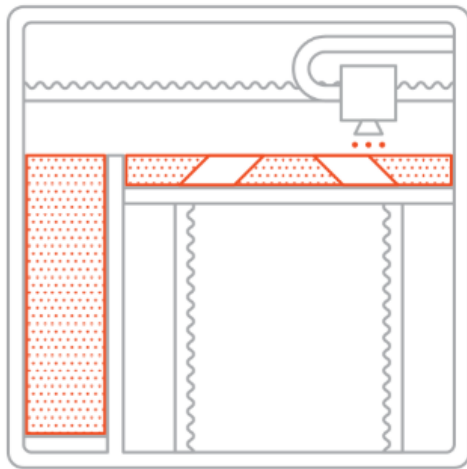
## Binder jetting - Sideaineen ruiskutus

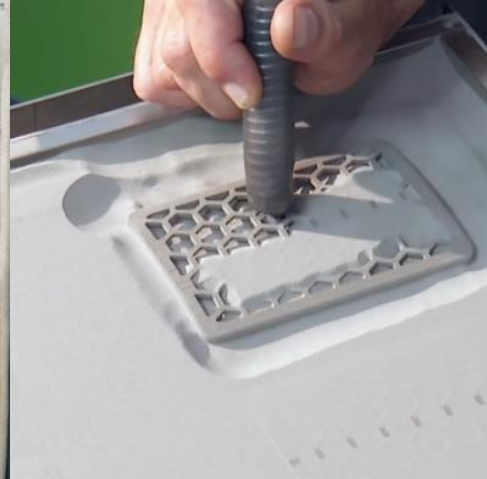
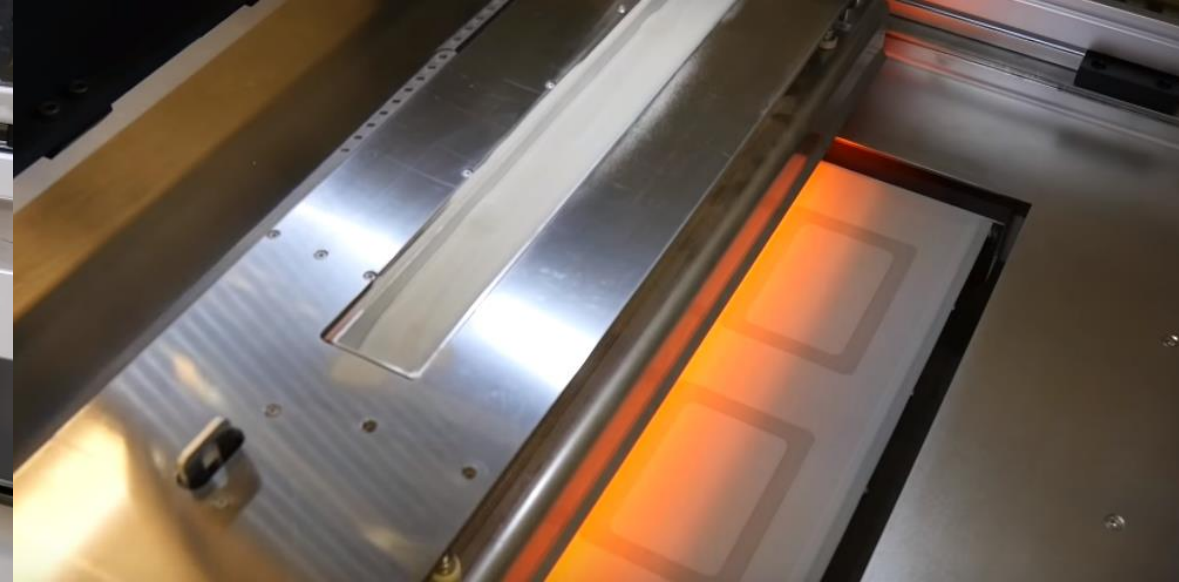
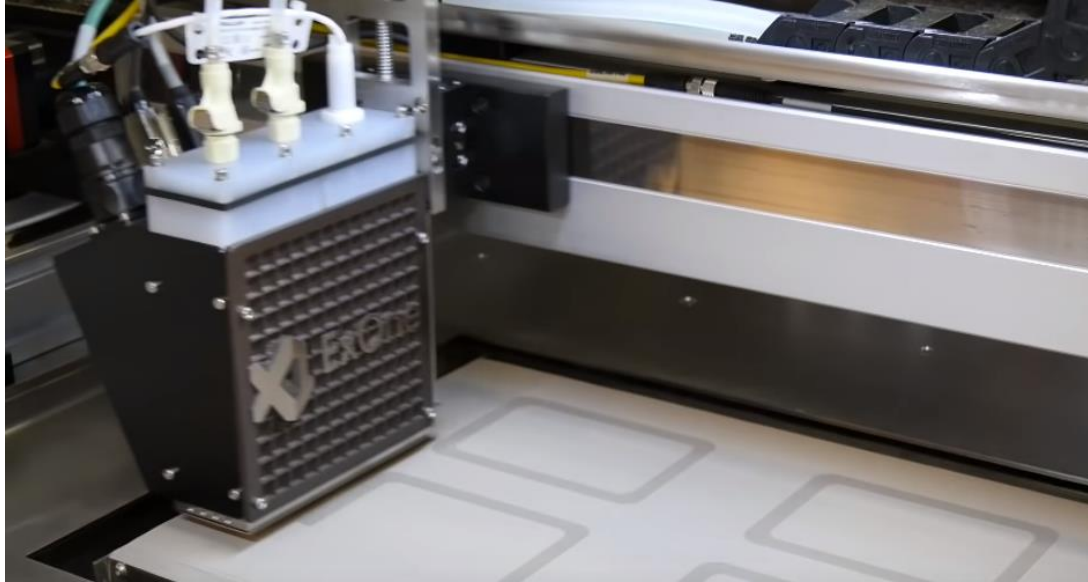
- 3D mustesuihkutulostin
- Jauhepeti ja sideaineen ruiskutus
- Jauhe tukee – ei tarvitse tukirakenteita
- Moniväritulostus muoveilla
- Valumuottien tulostus – isoja tulostimia!
- Metallitulostus
  - Sintraus uunissa

FIRPA:

”Menetelmässä kappale rakentuu jauhemaiseen aineeseen, johon ruiskutetaan perusmateriaalin kanssa reagoivaa nestemäistä sideainetta. Sideaine jää aina osaksi kappaletta. Vaikka sideaine reagoi huoneenlämmössä, jauheen pitää jäähmettyä muutamia tunteja ennen kappaleiden irrottamista.

<http://www.firpa.fi/html/suomi.html>



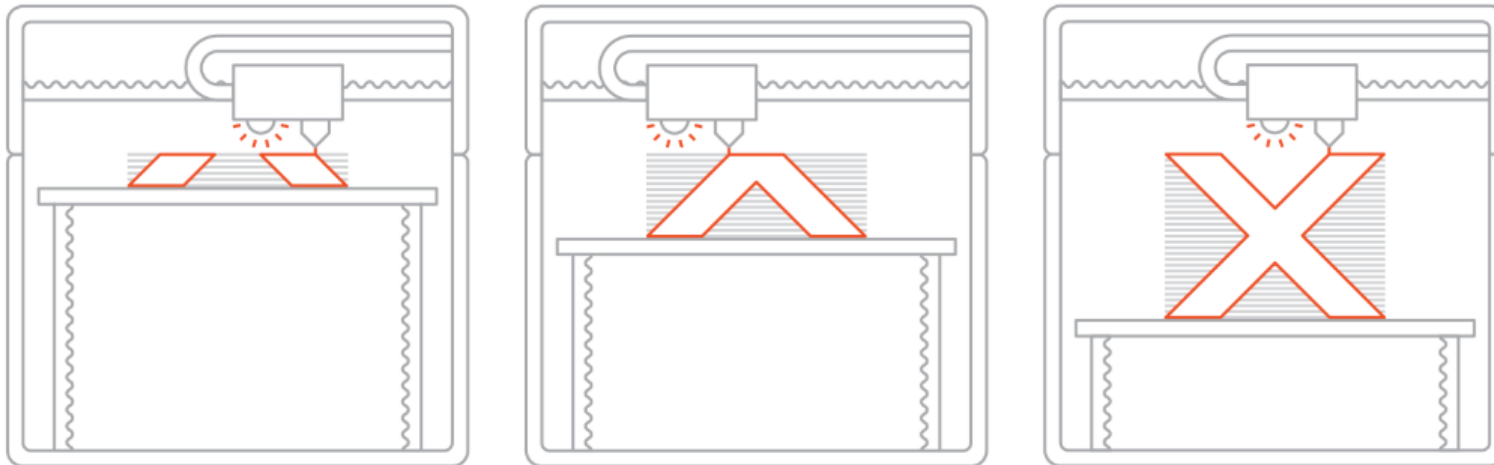


<https://www.exone.com/Resources/Technology-Overview>



## Material jetting - Materiaalin ruiskutus

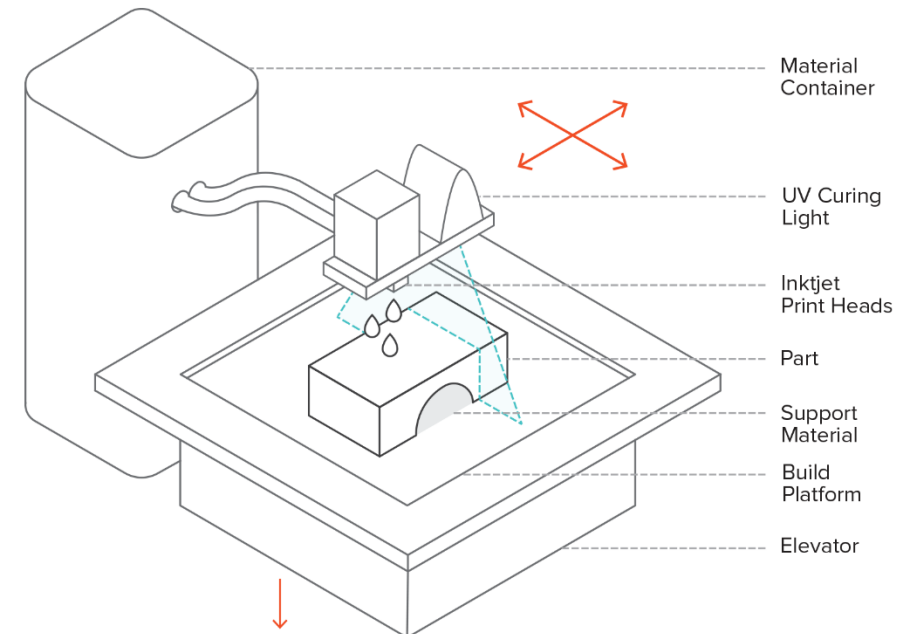
- UV kovetteisten materiaalien tulostus
  - vahat ja fotopolymeerit
- Materiaalipisaroiden ruiskutus
- Laajasti materiaaleja
  - Monimateriaalitulostus mahdollista
- Suhteellisen hyvä tarkkuus ja pinnanlaatu
- ”Valonarkuus” ja mekaaniset ominaisuudet



FIRPA:

”Menetelmässä materiaalipisaroita ruiskutetaan määriteltyihin kohtiin rakennuspinnalle. Pisaroiden ruiskuttamiseen käytetään yhtä tai useampaa tulostuspäätä, jotka liikkuvat rakennusalustan yläpuolella. Materiaalina käytetään yleisimmin kasetilta syötettävää valokovettuvaa polymeeriä tai vahaa.”

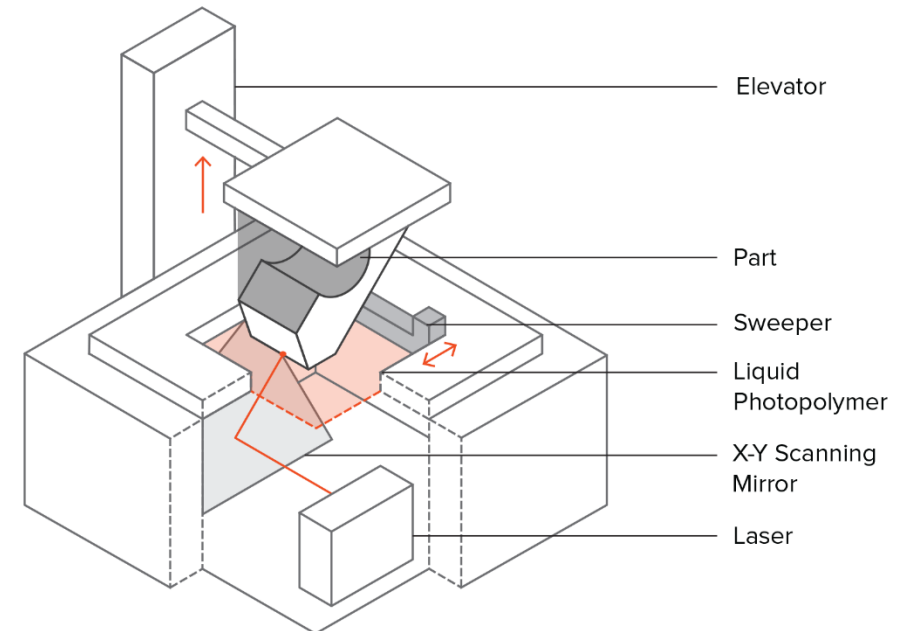
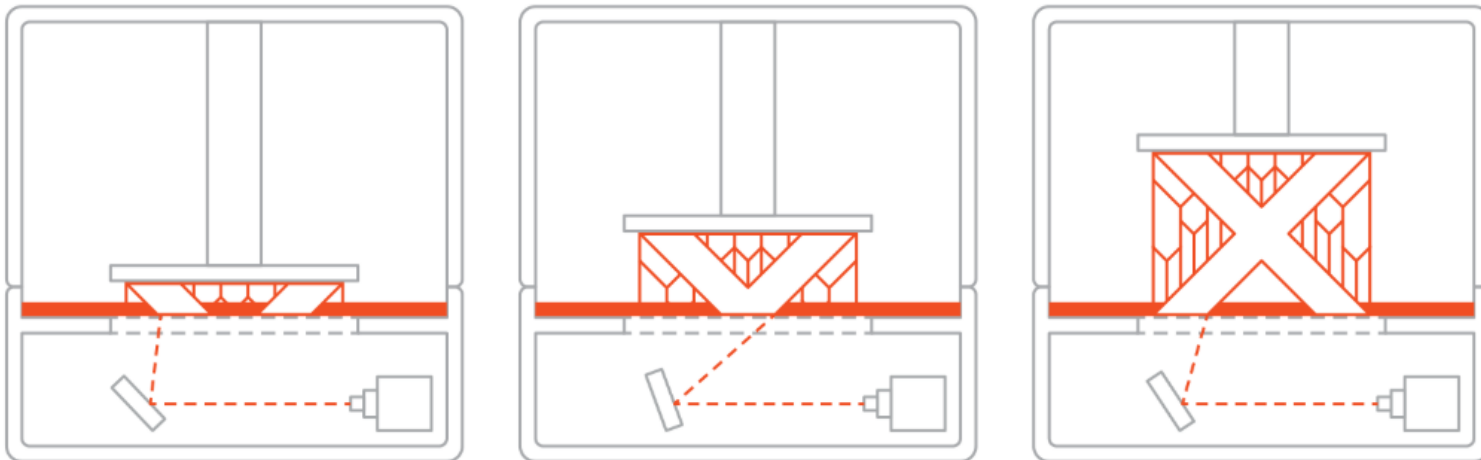
<http://www.firpa.fi/html/suomi.html>





## Stereolithography – Stereolitografia

- Vanhin 3D tulostusmenetelmä
- UV kovetteisen polymeerihartsin tulostus
- Hyvä tarkkuus ja pinnanlaatu
- ”Valonarkuus” ja mekaaniset ominaisuudet
- Tukirakenteet samaa materiaalia kuin tuloste







UNIVERSITY OF OULU  
KERTTU SAALASTI INSTITUTE

**FMT**

FUTURE MANUFACTURING  
TECHNOLOGIES





- Powder bed
- Green compact “raakapuriste”

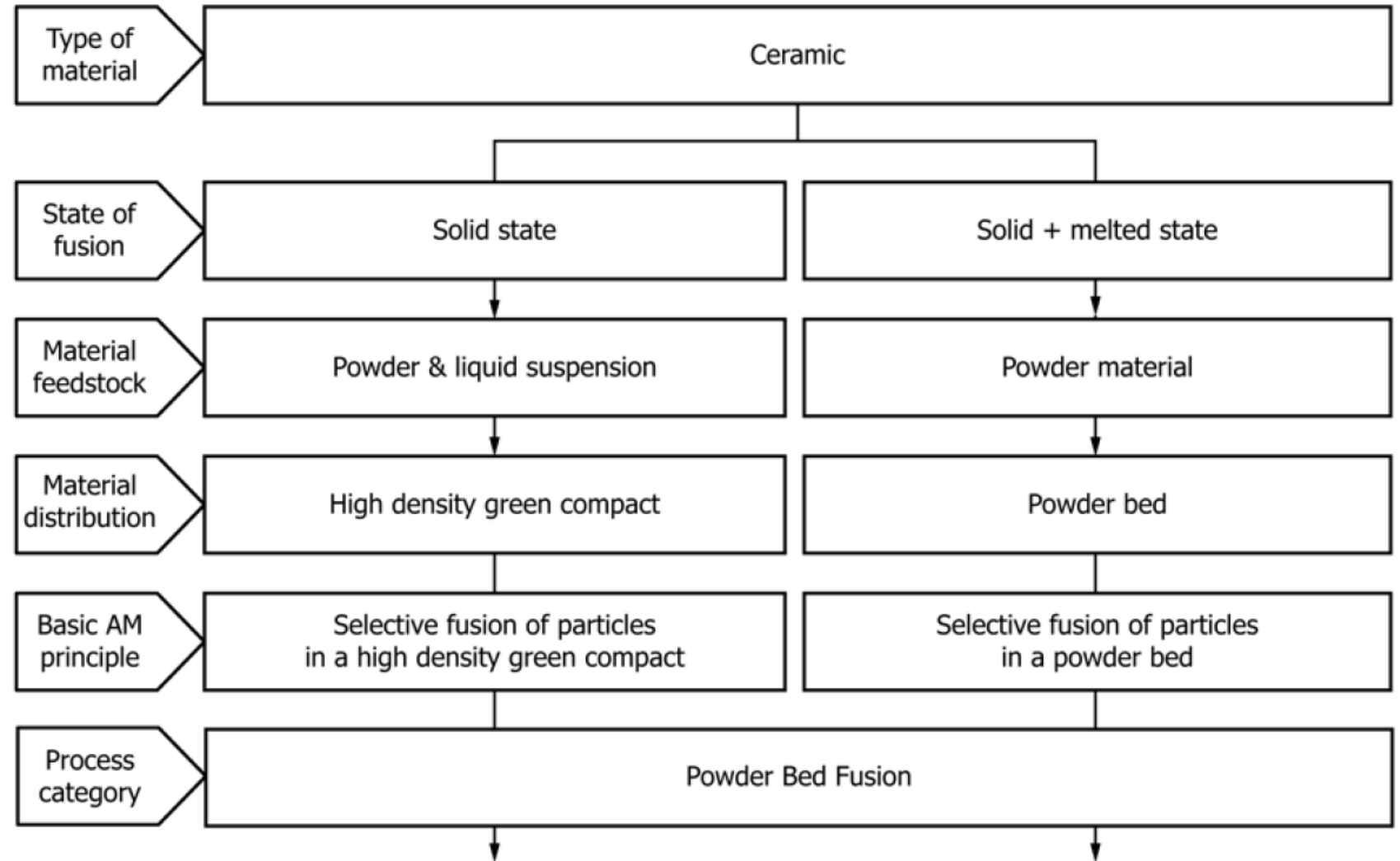


FIG. A1.4 Overview of single-step AM processing principles for ceramic materials



## Multi step AM processing – Monivaiheinen kappaleen muodostus

- Metallit, keraamit ja komposiitit
- Tyypillisesti ensimmäisessä vaiheessa tulostettava materiaali sidostuu väliaineen avulla
- Seuraavissa vaiheissa väliaine poistuu yleensä lämpökäsittelyn avulla
- Lopuksi kappale sintrautuu, tässä vaiheessa siihen voidaan imeyttää täytemateriaalia
- HIP – Hot Isostatic Pressing (400-2070 bar) ja n. 2000 °C käsittelyä käytetään tiivistämään kappale

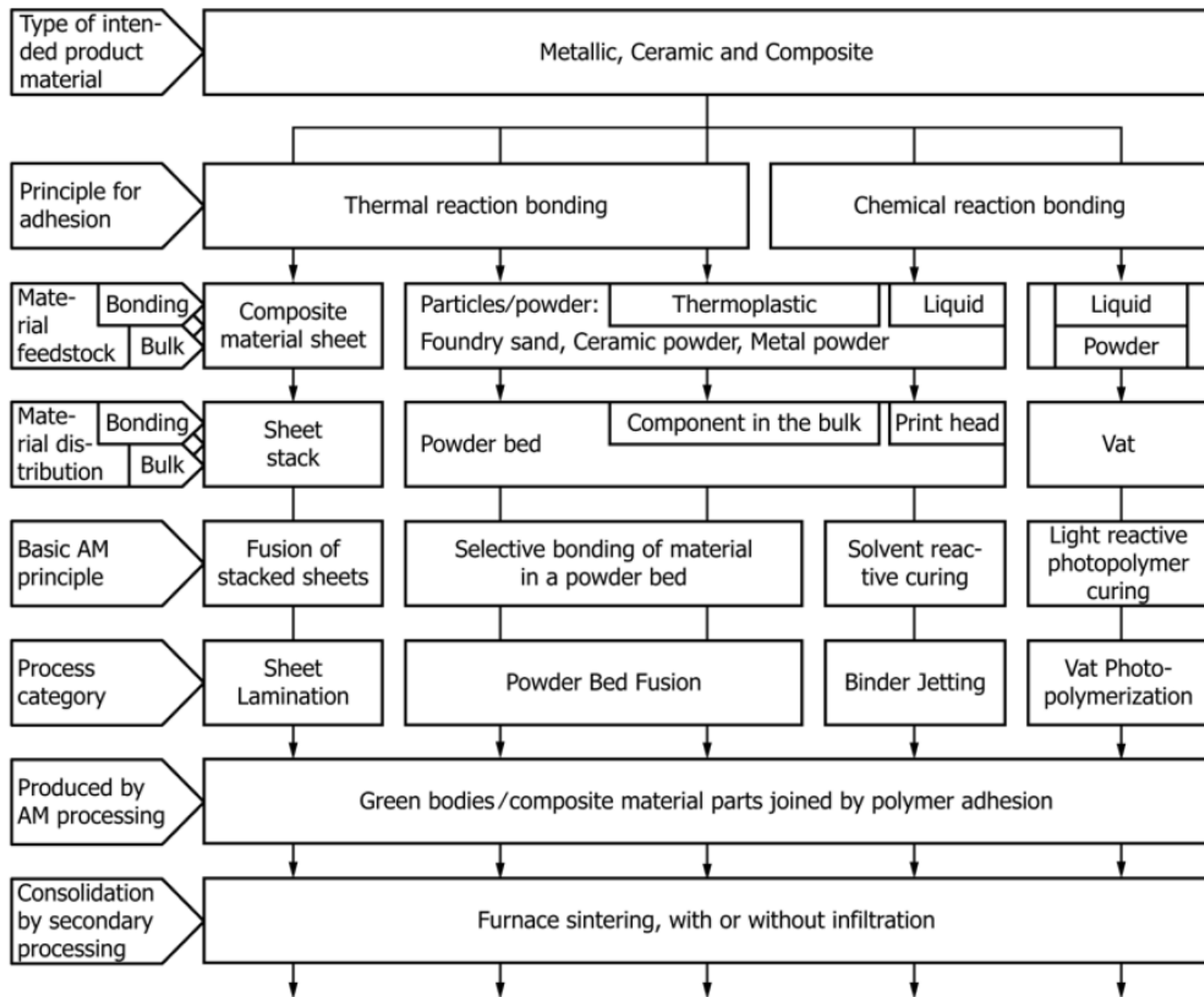


FIG. A1.5 Overview of multi-step AM processing principles for metallic, ceramic and composite materials



# KERTAUSTA ja KESKUSTELUA

**Powder Bed Fusion – Jauhepetisulatus**

**Material Extrusion – Pursotus**

**Vat Photopolymerization – Valokovetus altaassa**

**Material Jetting – Materiaalin suihkutus**

**Binder Jetting – Sideaineen suihkutus**

**Directed Energy Deposition - Suorakerrostus**

**Sheet Lamination – Kerroslaminointi**

- **TUKIRAKENTEIDEN TARVE**
- **JÄLKIKÄSITTELYTARVE**
- **TULOKSEN ANSIOTROPIA**
- **GEOMETRISET RAJOITUKSET**
- **MATERIAALIT JA TULOSTEIDEN MEKAANISET OMINAISUUDET**

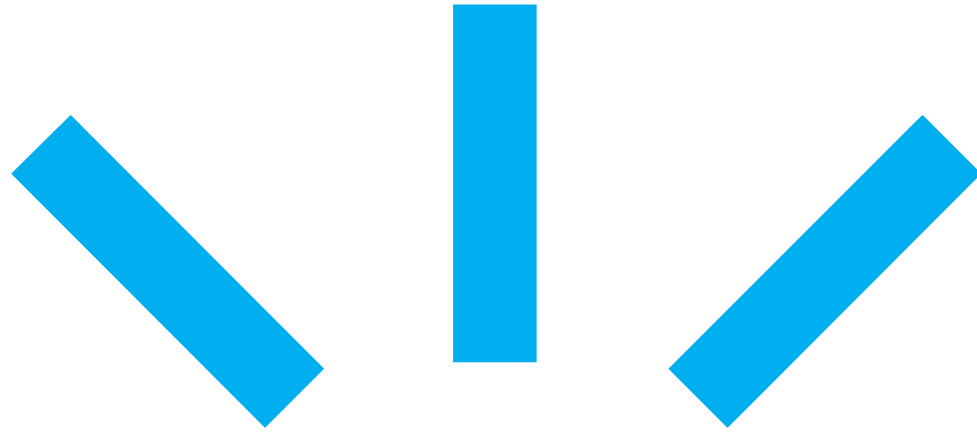


UNIVERSITY OF OULU  
KERTTU SAALASTI INSTITUTE

**FMT**

FUTURE MANUFACTURING  
TECHNOLOGIES





# DFAM

**Suunnittelu ainettalisäävä valmistus  
huomioiden**



# Sisällysluettelo

- **Esimerkki laitteisto ja ohjelmistot**
- **Prosessi**
- DFAM
- Osien suunnittelu
- Tukien luonti ja tulostusparametrit (Magics)
- Tulostusajan määräytyminen ja osan hinta
- Pinnanlaatuun vaikuttavat tekijät
- Mekaaniset ominaisuudet
- SLM 280HL tulostimen käyttö
- Toimenpiteet tulostuksen jälkeen
- Osien jälkityöstö
- **DFAM**
- Case study: Topologian optimointi
- Case study: Osien yhdistäminen kokoonpanoksi
- **Lisätoimenpiteet**
- Eri tulostusalustat
- Materiaalinvaihto
- Jauheen seulonta-asema



# Esimerkki laitteisto

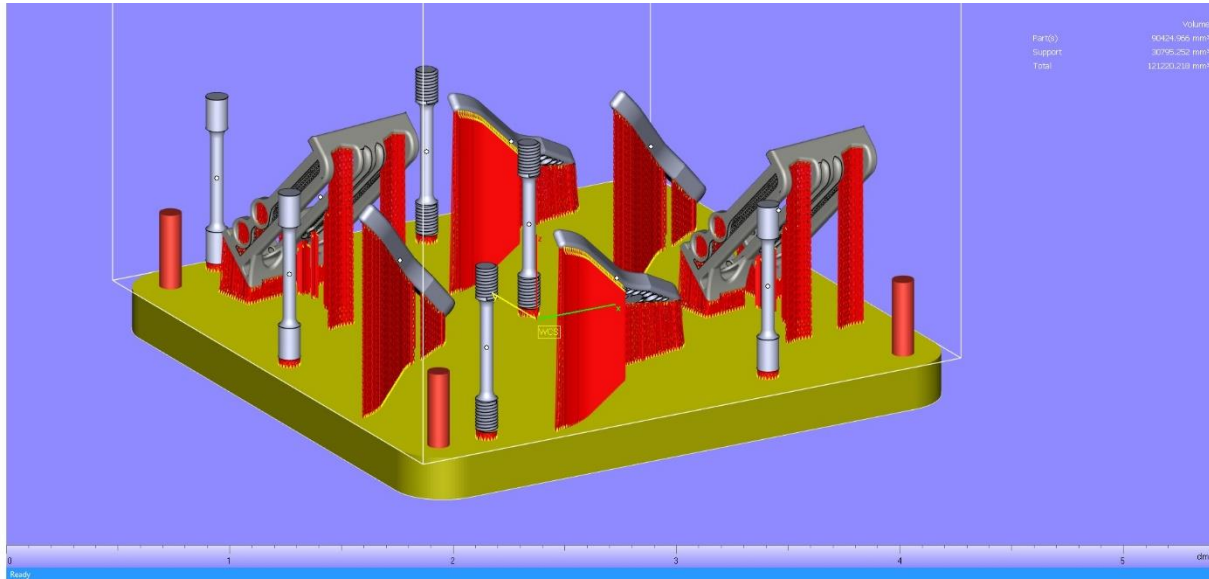


- **SLM Solutions 280 HL**
  - Vapaasti säädettävät parametrit sekä mahdollisuus vaihtaa materiaalitoimittajaa
  - Isoin tulostustilavuuden koko 280 x 280 x 365 mm<sup>3</sup>, pienin 50x50x80 mm<sup>3</sup>
  - Kerrospaksuudet 20 – 75 µm
  - 1 x 700W kuitulaser
  - Materiaalit: AlSi10Mg, AISI 316L, AISI 420, Inconel 718, CoCr ja Ti6Al4V. Raekoot teräksillä tyypillisesti 10 – 45 µm ja alumiini/titaani 20-65 µm
  - Käytettävä kaasu: Argon tai typpi
  - Kerroksen valvontajärjestelmä LCS (Layer Control System)
  - Lisävarusteena: MPM (Melt Pool Monitoring), LPM (Laser Power Monitoring) ja HTH (High Temperature Heater)
- **Sieving station PSM 100**
  - Kaksi eri reikäkokoa siivilään; 75 µm (teräkset) ja 100 µm (alumiini ja titaani)
- **Jälkikäsittelylaitteisto**
  - Lasikuulapuhalluslaitteisto, vannesaha, lämpökäsittelyuuni, koneistuskeskus, sorvit, käsityökalut...





# Käytettävä laitteisto ja ohjelmistot



- **3D-suunnittelu ja FE-analyysi**
  - Osan mallinnus
  - Topologian optimointi
  - FE-analyysi
  - Tiedoston tallennus .STL formaattiin
- **3D työsuunnittelu**
  - Alustan osien sijoittelu alustalle eli ”nestaus”
  - Tukirakenteen luominen osiin (kuvassa punaisella tukirakenne)
  - Työstöparametrien säätäminen
    - Laserin teho ja nopeus, kerrospaksuus...
  - Alustan ja parametrien tallennus koneen ymmärtämään muotoon (.SLM formaatti)
  - Työsuunnitteluohjelmistoja 3D tulostukseen
    - Autodesk Netfab
    - Materialise Magics
    - Yms.
- **Tulostuksen simulointi**
  - Laserin liikeratojen tarkasteluun eri kerroksilla
  - Nähdään parametrien käyttö eri kohdissa osaa
- **Tulostuksen esivalmistelu**
  - Alustan tuominen koneelle
  - Alustan lämpötilan säätö
  - Minimiaika kerrosten kaavausten välillä (Jäähdytisaika)
  - Kaasun virtauksen säätö
  - Ensimmäisen kerroksen valmistelu
  - Koneohjelmisto MCS:n avulla



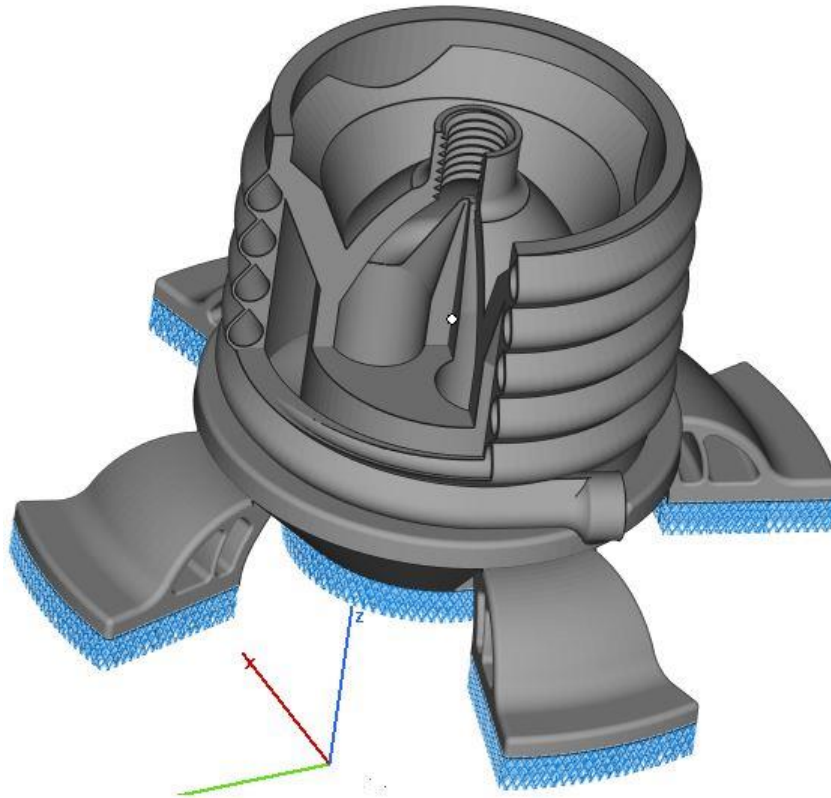
# Prosessi - DFAM



- DFMA = Design for additive manufacturing
- Kappaleiden suunnittelu valmistusmenetelmä huomioiden on tärkeää!
- Geometrinen vapaus - Vanhojen tapojen ja perinteisten mallien rikkominen!
- Valmistettavuus, luotettavuus ja kustannusten optimointi
  
- **Suunnittelussa:**
  - Geometrian FEM pohjainen optimointi – lujuus- ja paino-optimointi (Case study)
  - Osien vähentäminen yhdistelemällä osia – Kustannuksia pois osavalmistuksesta ja etenkin kokoonpanosta! (Case study)
  - Rakenteen moninaisuus – esim. kenno-, verkko- ja huokosrakenteen hyödyntäminen
  - Massaräätälöinti – jokainen osa voi olla erilainen
  - Monimateriaalitulostus (ei vielä metallitulostamisessa) – erilaisia ominaisuuksia/materiaaleja samassa tulosteessa
  - Tulostusasennon ja tukien huomiointi jo kappaleen suunnitteluvaiheessa → jälkikäsittelyn minimointi



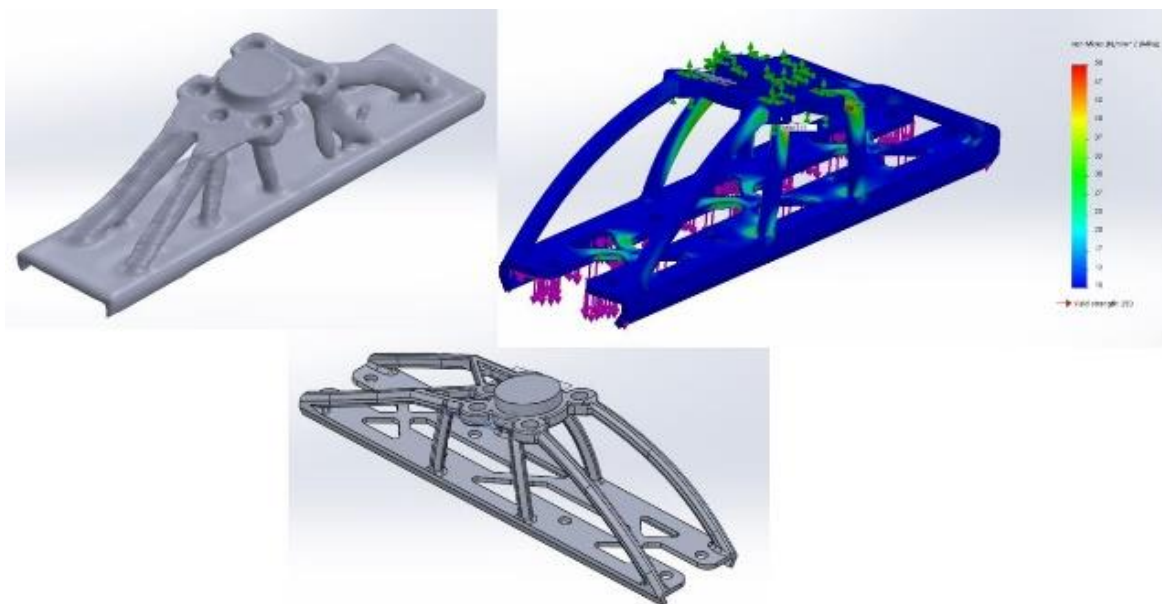
# Prosessi – Osien suunnittelu



- Jos osan voi tehdä perinteisillä menetelmillä kustannustehokkaasti, niin sitä ei luultavasti kannata tulostaa SLM-menetelmällä.
- Hyvät 3D-tulostettavat osat ovat yleensä:
  - sellaisia, että niissä kyetään hyvin hyödyntämään menetelmän mahdollisuuksia
  - rakenteeltaan sellaisia, että niitä on hankala tai mahdoton valmistaa muilla menetelmillä
  - niissä saadaan yhdistettyä monta osaa yhdeksi kokonaisuudeksi
  - prototyyppi-, piensarja- tai yksittäisosia
  - yksittäisosia tai personoituja osia



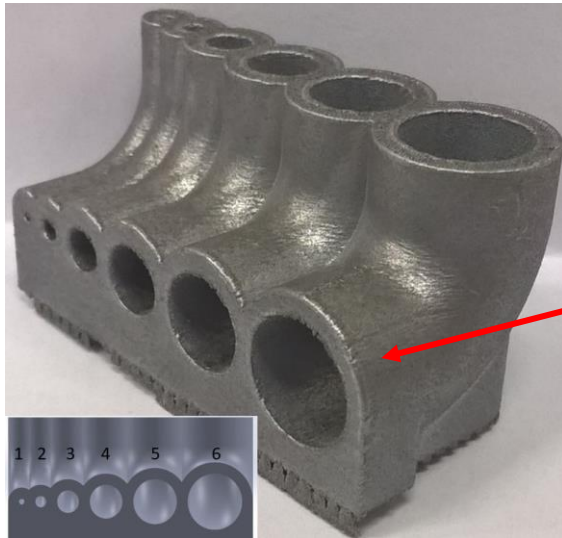
# Prosessi – Osien suunnittelu



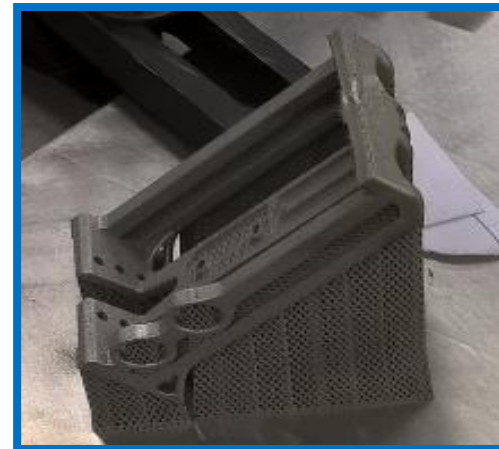
- Osien suunnittelussa huomioidaan osan teknisten vaatimusten lisäksi tulostusmenetelmän erityspiirteet ja jälkikäsittely.
- Osien suunnittelussa on tärkeää huomioida tulostussuunta ja sen vaikutus osan valmistukseen.
- Topologian optimointi on hyvä työkalu osan paino- ja lujuusoptimointiin (kuva)
- Suunnitteluohjeita:
  - Standards:
    - ISO / ASTM52910 – 17: Standard Guidelines for Design for Additive Manufacturing
    - VDI 3405 Part 3: Additive manufacturing processes, rapid manufacturing – Design rules for part production using laser sintering and laser beam melting
  - Free Guidelines:
    - Fraunhofer Institute: DESIGN FOR ADDITIVE MANUFACTURING Guidelines and Case Studies for Metal Applications ([http://canadamakes.ca/wp-content/uploads/2017/05/2017-05-15\\_Industry-Canada\\_Design4AM\\_141283.pdf](http://canadamakes.ca/wp-content/uploads/2017/05/2017-05-15_Industry-Canada_Design4AM_141283.pdf))
    - Reinshaw: Design for metal AM - a beginner's guide (<http://www.renishaw.com/en/design-for-metal-am-a-beginners-guide--42652>)
    - Design Guidelines by Materialize (<http://www.materialise.com/en/manufacturing/materials/design-guidelines>)
    - Erin Komi (VTT): Design for Additive Manufacturing (<http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2016/VTT-R-03159-16.pdf>)



# Prosessi – Osien suunnittelu



- **Rajoituksia**
- Pienin kulma ilman tukia:
  - Teräksillä 40-45 astetta, riippuen geometriasta
  - Pitkä ja hoikka sauva voi vääntyillä ilman tukia myös 45 asteen kulmassa
  - Alumiini jopa 30 asteessa voi onnistua
  - Pinnanlaatu heikkenee huomattavasti (porrastusefekti)
- **Pyöreäreikä vaakatasossa**
  - Teräkset alle 5 mm
  - Alumiini jopa 10 mm asti
  - Pyöreän reiän geometria muuttuu hieman ovaaliksi
  - Kuvassa reiät 1 mm – 10 mm
- **Materiaalirajoitteet**
  - Alumiinin lämmönjohtavuus vrt. teräkset
  - Tukirakenteiden eroavaisuudet

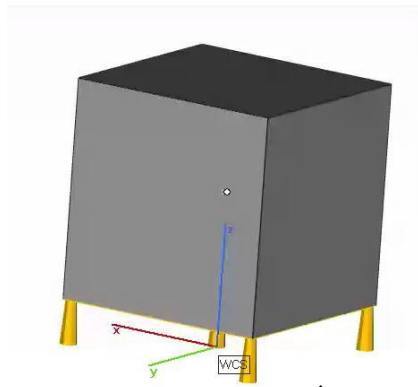


Tuet: 316L

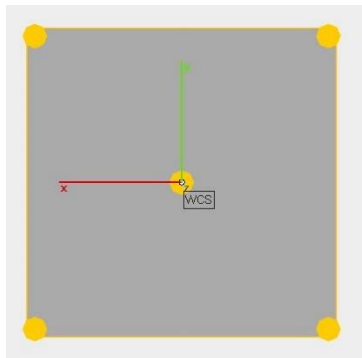


# Prosessi – Osien suunnittelu

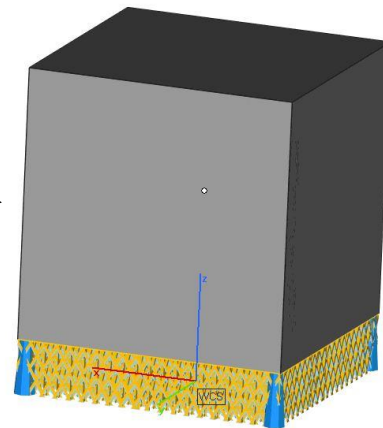
- **Tukien tarkoitus**
  - On siirtää kappaleeseen tuotu lämpö mahdollisimman tehokkaasti alustaan
  - ”Ankkuroida” kappale kiinni ja ehkäistä lämmöstä johtuvia muodonmuutoksia
- **Kappale on hyvä lisäävän valmistuksen tekniikkaan kun**
  - Tukirakenteiden tilavuus on pienempi kuin osan
    - Osan edellisen kerroksen täytyy tukea seuraava kerros → vältetään tukirakenteilta



Ankkurointi (cones)

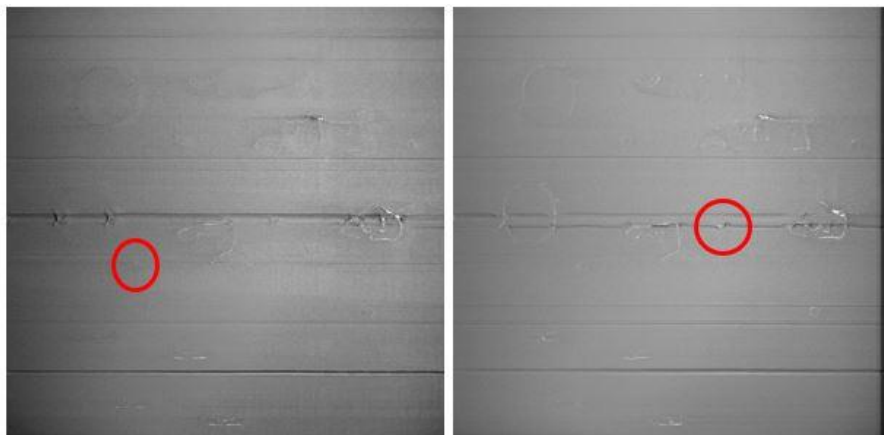


Lämmönsiirto (block)

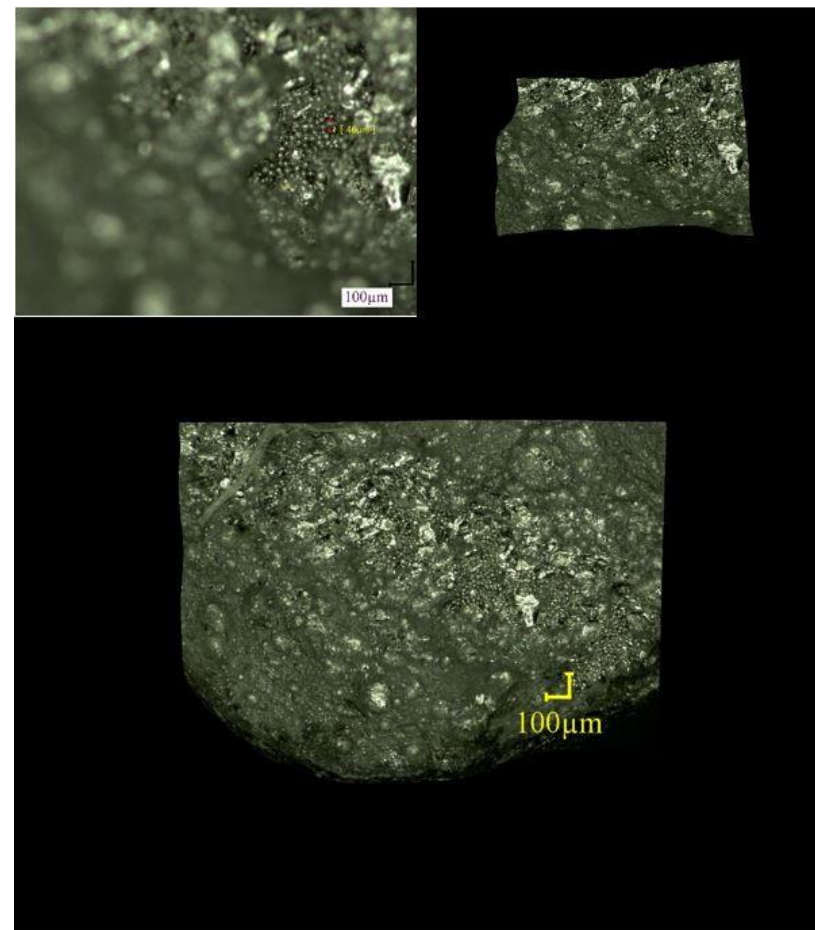




# Prosessi – Osien suunnittelu

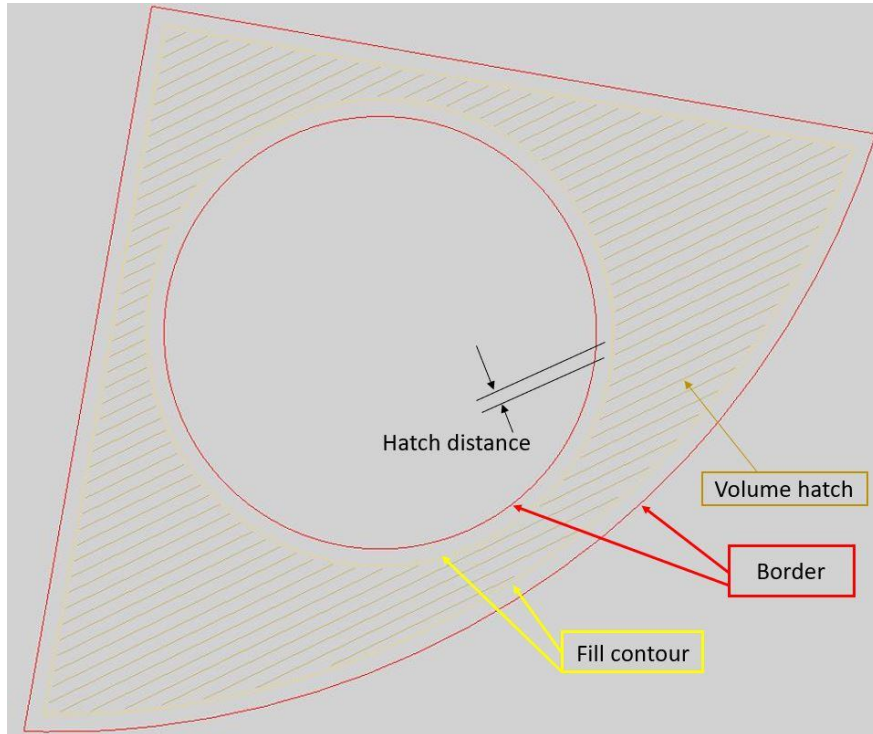


- Kuvassa näkyy kaavarin törmäys osaan (osien suunnittelun tärkeys)
- Huono geometria ja puuttellinen tuenta → huokoinen mikrorakenne ja sulamattomat jauhepartikkelit!
- Todella huonot mekaaniset ominaisuudet





# Prosessi – Tukien luonti ja tulostusparametrit



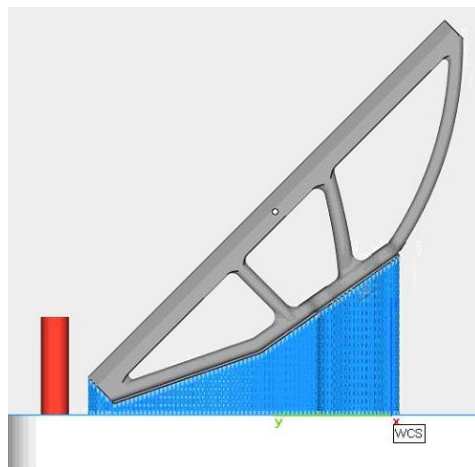
- **Osien siirtäminen 3D tulostuksen esikäsittelyohjelmistoon STL-muodossa**
- Osien sijoittaminen alustaan
- Osien orientaation suunnittelu
- Tukien suunnittelu
  - Tukien vaihtoehtoja muun muassa lohko-, viiva-, piste- ja puutuki
  - Eri materiaaleille on erilaiset tuentatarpeet
- Laserparametrien valinta/muokkaus eri kohtiin osassa (kuva) esim.
  - Laser teho
  - Laserin työstönopeus
  - Laserin tekemän täytön asetukset
- Kerrospaksuuden valinta
- Asetustiedoston teko (.SLM)



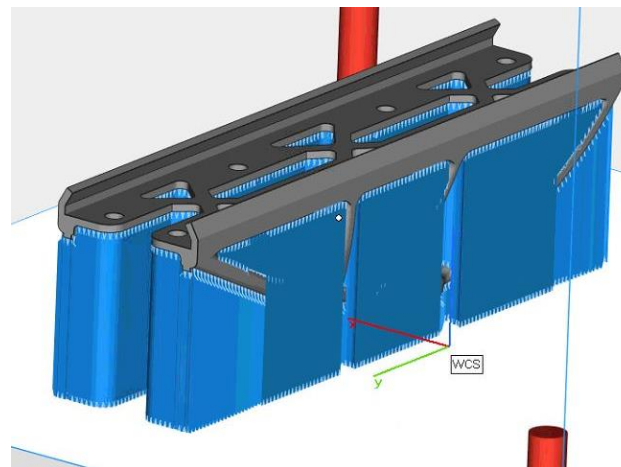


# Prosessi – Tulostusajan määräytyminen ja osan hinta

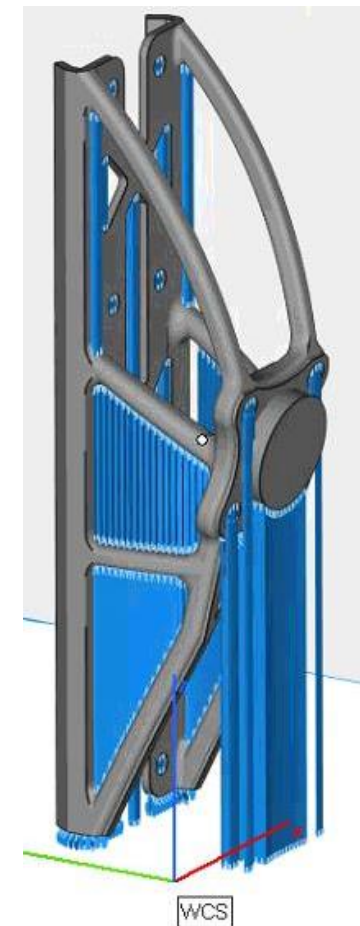
Kaavarointiaika +  
laserointi-aika + kerrosten  
välinen jäähtymisaika = 1  
**kerroksen tulostusaika**



45 deg (30  $\mu\text{m}$ , AlSi10Mg):  
Part volume 37203 [mm<sup>3</sup>]  
Support volume 10875 [mm<sup>3</sup>]  
Printing time: 12 h 30 min  
Post-processing: easy



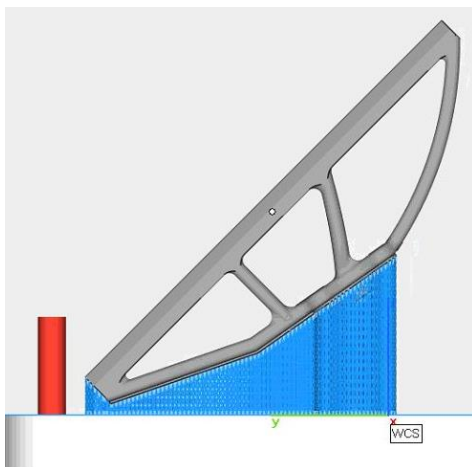
0 deg (30  $\mu\text{m}$ , AlSi10Mg):  
Part volume 37203 [mm<sup>3</sup>]  
Support volume 66165 [mm<sup>3</sup>]  
Printing time: 8 h  
Post-processing: hard



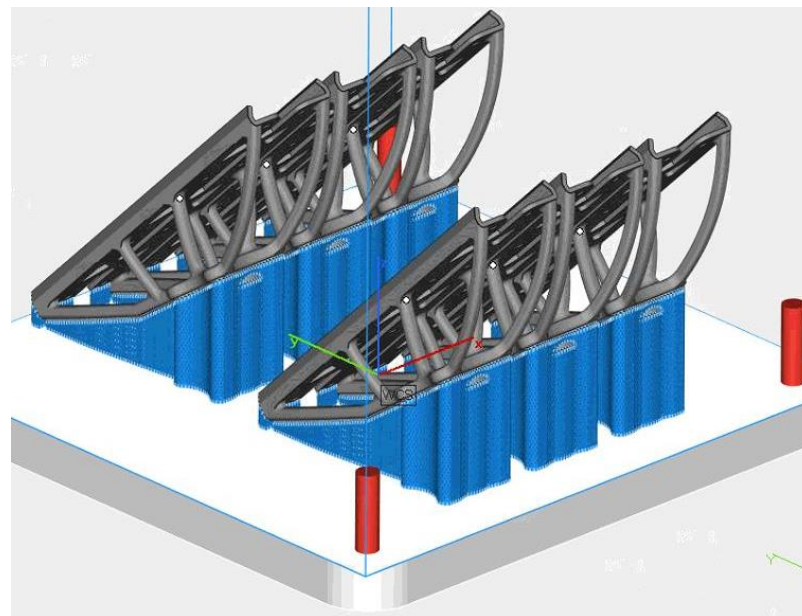
90 deg (30  $\mu\text{m}$ , AlSi10Mg):  
Part volume 37203 [mm<sup>3</sup>]  
Support volume 9749 [mm<sup>3</sup>]  
Printing time: 15 h 30 min  
Post-processing: medium



# Prosessi – Tulostusajan määräytyminen ja osan hinta



45 deg (30  $\mu$ m, AlSi10Mg):  
Part volume 37203 [mm<sup>3</sup>]  
Support volume 10875 [mm<sup>3</sup>]  
Printing time: 12 h 30 min  
Printing cost/part: 1000 € + post-processing



6 kpl 45 deg (30  $\mu$ m, AlSi10Mg):  
Part volume 223218 [mm<sup>3</sup>]  
Support volume 65250 [mm<sup>3</sup>]  
Printing time: 29 h 30 min  
Printing cost/part: 393 € + post-processing



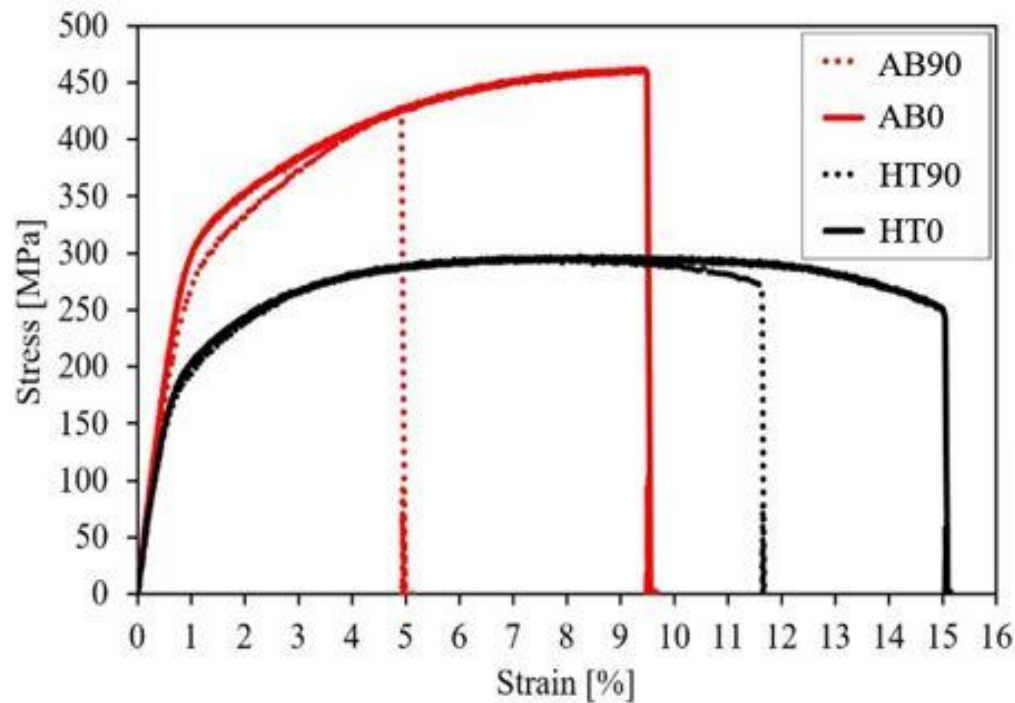
# Prosessi – Pinnanlaatuun vaikuttavat tekijät

- Kerrospaksuus
- Osan geometria
- Alapinnat/jättöpinnat ja niiden kulmat vaakatasoon nähden
- Käytettävän metallijauheen partikkelikoko
  - Yleensä:
    - Teräkset 10-45  $\mu\text{m}$
    - Reaktiiviset materiaalit alumiini ja titaani 20-63  $\mu\text{m}$
- Reunojen (border) ja alapintojen (downskin) laserointiparametrit





# Prosessi – Mekaaniset ominaisuudet



AlSi10Mg tehdyt vetokokeet kahteen suuntaan. Lämpökäsiteltynä ja ilman lämpökäsittelyä.

## – Vaikuttavat tekijät

- Osan geometria
- Materiaalin oikea valinta
- Materiaalin anisotropia
  - Eri tulostussuunnilla (orientaatioilla) on merkitystä
- Laserointiparametrit erityisesti sisäosalle (volume hatch ja hatch distance)
- Jauheen kosteusprosentti < 5 % → Ehkäisee huokoisuutta
- Kerrospaksuus

Parameter set	Yield strength [MPa]	Ultimate Strength [MPa]	Uniform Elongation %	Total Elongation %
Set 1	491 ± 2	645 ± 4	16.4 ± 0.1	30.1 ± 0.5
Set 2	504 ± 1	660 ± 2	17.6 ± 0.5	31.8 ± 0.2
Set 3	538 ± 10	701 ± 2	19.1 ± 0.3	33.4 ± 0.4
Reference set	290 ± 3	612 ± 2	47.9 ± 0.2	61.7 ± 0.4

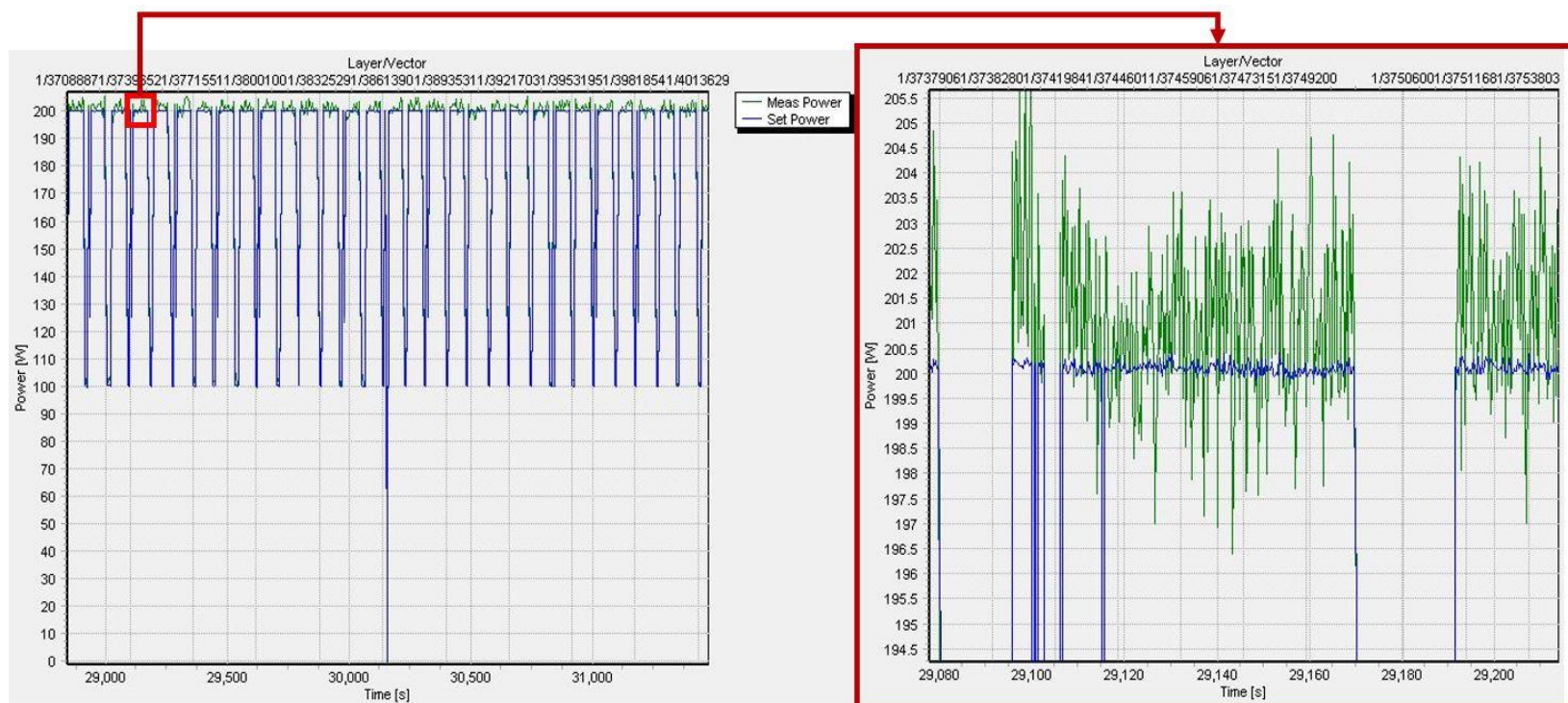
316L tehdyt vetokokeet kolmella eri parametreillä. Lämpökäsiteltynä.

- Set 1  $E_d = 101 \text{ J/mm}^3$
- Set 2  $E_d = 79 \text{ J/mm}^3$
- Set 3  $E_d = 61 \text{ J/mm}^3$



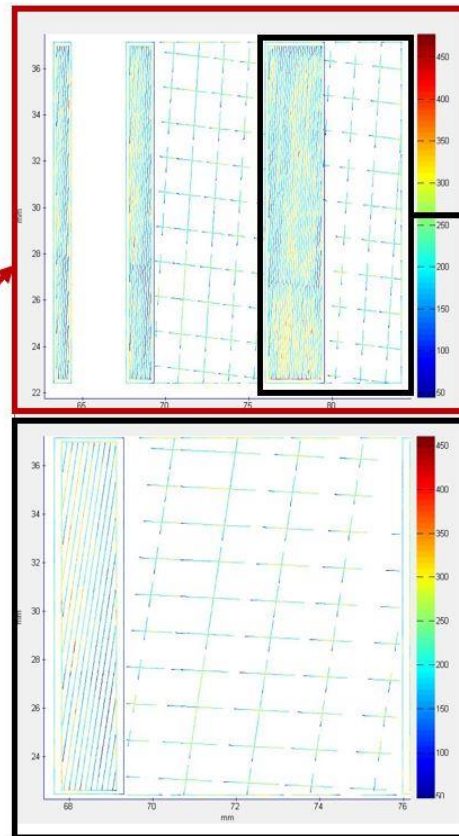
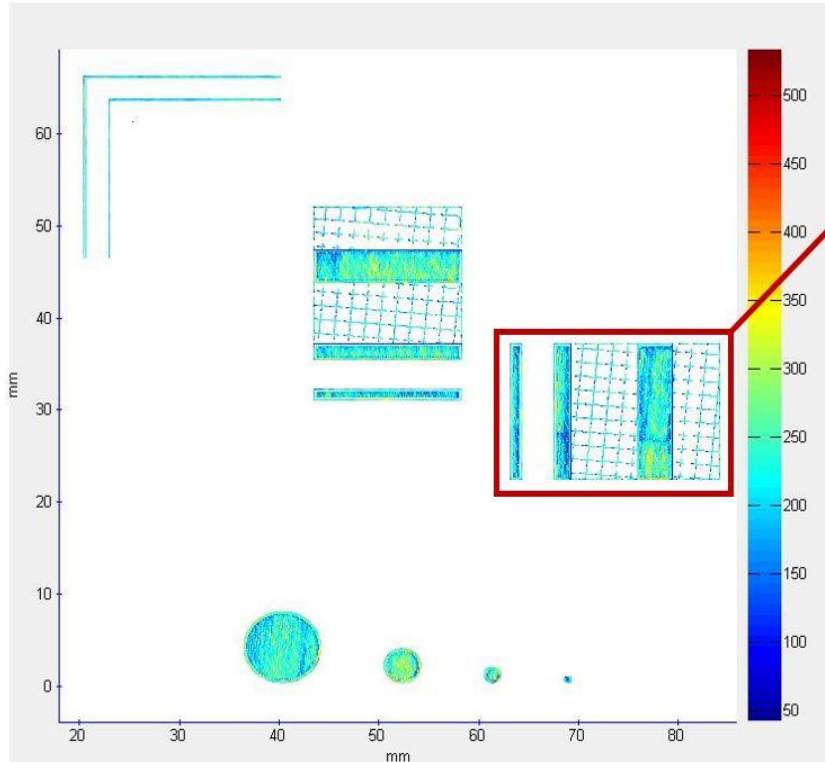
# Prosessi – Mekaaniset ominaisuudet

- Seurantatyökalut LPM (Laser power monitoring) ja MPM (Melt Pool Monitoring)
- Valmistajat ovat alkaneet kehittää erilaisia ohjelmistoja laadun seurantaan varten
- LPM käytetään laserin reaaliaikaisen tehon seurantaan
  - Huomataan jos nimellisteho ja todellinen antoteho poikkeavat merkittävästi
- Kaasuanalysointori





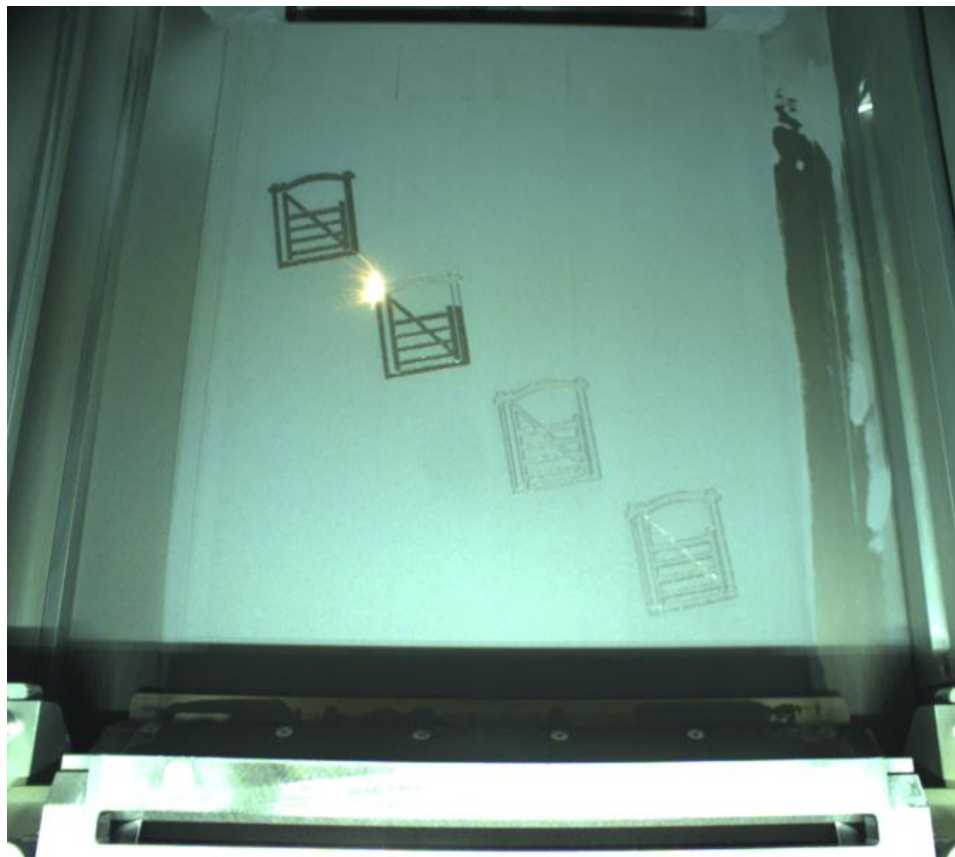
# Prosessi – Mekaaniset ominaisuudet



- **Seurantatyökalut LPM (Laser power monitoring) ja MPM (Melt Pool Monitoring)**
- Laite valmistajat ovat alkaneet kehittää erilaisia ohjelmistoja laadun seurantaan varten
- MPM käytetään laserin tuottaman sulan seurantaan reaaliajassa
  - Voidaan havaita poikkeamia sulassa (huokokset)
  - Mikäli jokin osa ei ole onnistunut niin voidaan katsoa MPM:n avulla repeämiskohta, jolloin osa voidaan uudelleen suunnitella tämän tiedon avulla
  - Tavoitteena saada täydellinen sulan lämpöhistoria



# Prosessi – SLM 280HL tulostimen käyttö



- Asetustiedoston vienti tulostimeen MCS:lle (.SLM)
- Mahdolliset koneenparametrien muokkaukset
  - Jäähdytysaika kerrosten välillä
  - Jauheen syöttö
  - Suojakaasun virtausnopeuden säätö (argon, typpi)
  - Alustan lämpötilan asetus
- **Alkuasetusten teko**
  - Alustan ja kaavarin kalibrointi lähtökorkeuteen
  - Laserin suojalasin puhdistus
  - Todella ohut aloituskerros metallijauhetta
  - Suojakaasun lataaminen koneeseen → hapeton tila
- **MPM käynnistys**
- **LPM käynnistys**
- **Koneen käynnistys**
- **Tulostuksen ollessa käynnissä on seurattava:**
  - Jauheen ja suojakaasun riittävyys, suojakaasun virtaus ja jauheen tasainen levitys.



# Prosessi – Toimenpiteet tulostuksen jälkeen

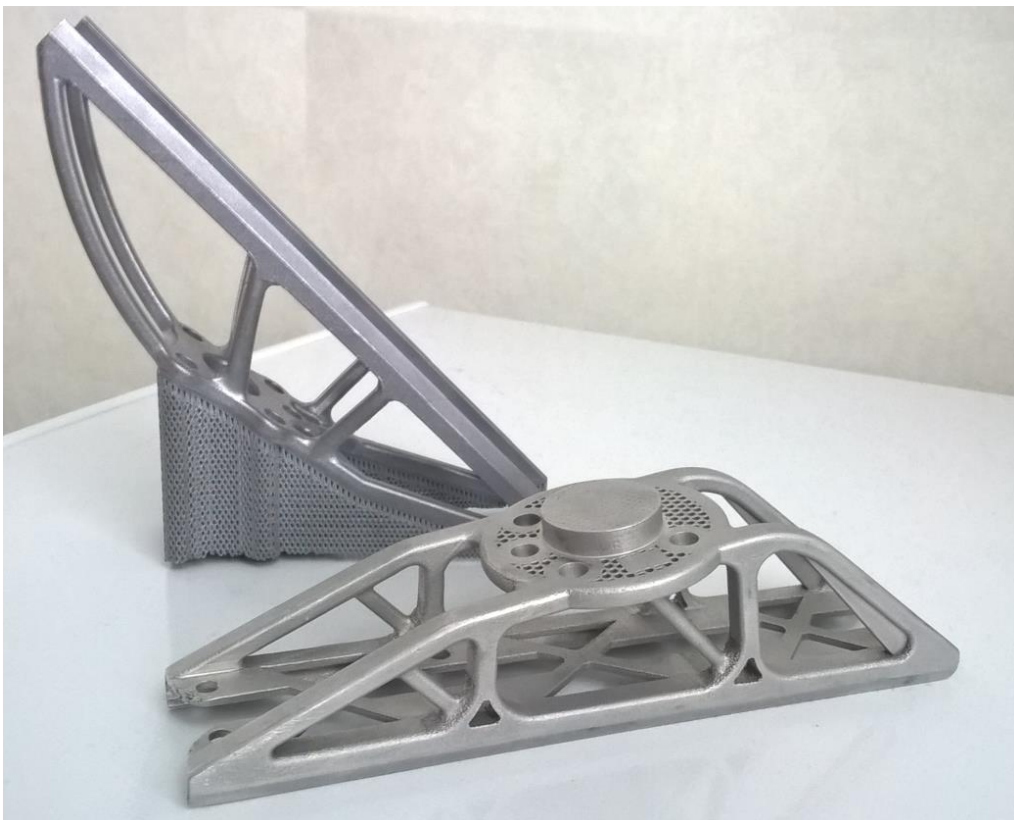


- **Tulostuksen ollessa valmis**
- Jauheen talteenotto koneesta
  - Alustaa aletaan nostamaan ylöspäin manuaalisesti, jolloin voidaan lastalla/harjalla viedä jauhetta ylijuoksutusastioihin
  - Tätä toistetaan niin kauan, että alusta on nolapisteessä
- Jauheen siivilöinti
- Siivilöidyn jauheen syöttö takaisin koneeseen (kuva)
- Alustan irrotus koneesta
- Laserin suojalasin puhdistus
- Osien irrotus alustasta
  - Osat yleensä lämpökäsitellään (jännityksen poisto hehkutus), kun ne ovat kiinni alustassa
- Osien siirto jälkikäsittelyyn
- Alustan puhdistus tukijäämistä → Alusta takaisin tulostimeen





# Prosessi – Osien jälkityöstö



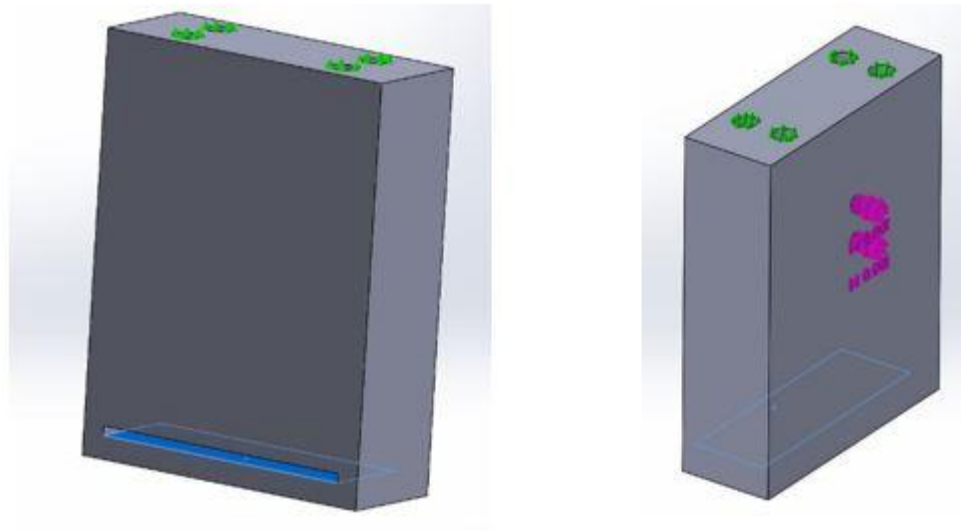
- Yleensä kappale ei ole valmis suoraan tulostimesta otettuna, eli sille pitää tehdä jälkikäsittelyitä.
- Kappaleen (osa + tuki) puhdistus jauheesta
- Tarvittaessa lämpökäsitellään jäännösjännitysten purkamiseksi
- Irrotetaan tulostusalustasta ja sen tulostuksenaikaiset tukirakenteet poistetaan.
- **Jälkikäsittelyitä ja menetelmiä ovat esimerkiksi:**
- Osien mekaaninen irrotus valmistusalustasta eli sähköiset ja ei-sähköiset käsityökalut, **konesahat**, lankasaha (wire EDM)
- Teolliset pesumenetelmät (esim. ultraäänipesuri)
- **Koneistus**
- **Hionta**
- **Lämpökäsittelyt**
- Kemialliset käsittelyt, kuten **etsaus**
- **Kuulapuhallus ja –rummutus**
- **Pinnoitus**



# DFAM – Topologian optimointi case study robottikoura

## Step 1:

- Massamallin teko
  - Tilarajoitukset
    - Massamallin mitat
  - Reunaehdot
    - Kiinnitykset
    - Kuormitukset





# DFAM – Topologian optimointi case study robottikoura



## Step 2:

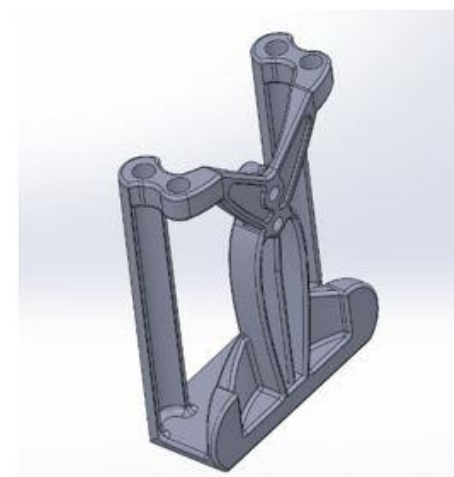
- Ensimmäinen FEM-laskennan tulos
  - Optimoidaan jäykkyyden ja keveyden suhteen
    - Tässä tapauksessa tavoitteena 75 % keveämmäksi
  - Saadaan kuvan mukainen alustava tulos
    - Jännitysten kulku
    - Osan piirteet
- Ei ota huomioon valmistusmenetelmää → uudelleen suunnittelu



# DFAM – Topologian optimointi case study robottikoura

## Step 3:

- Uudelleen suunnittelu
  - Käytetään hyväksi ensimmäisen FEM-optimoinnin tuloksia
  - Otetaan huomioon myös valmistusmenetelmät rajoitteet
  - Valitaan paras orientaatio (70 astetta vaakatasosta), jonka suhteen kappaletta aletaan suunnittelemaan

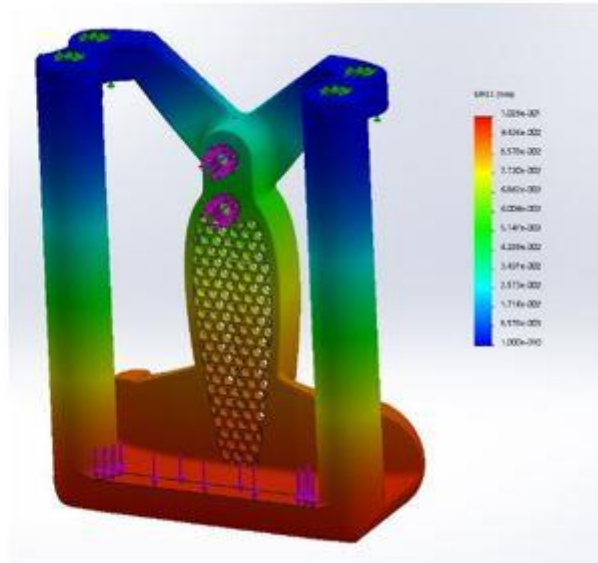
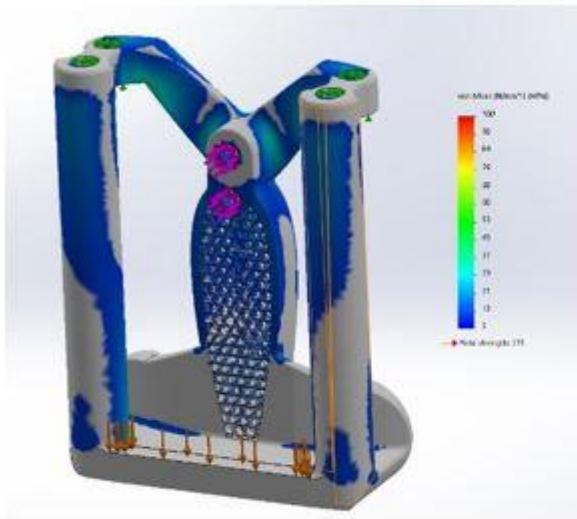




# DFAM – Topologian optimointi case study robottikoura

## Step 4:

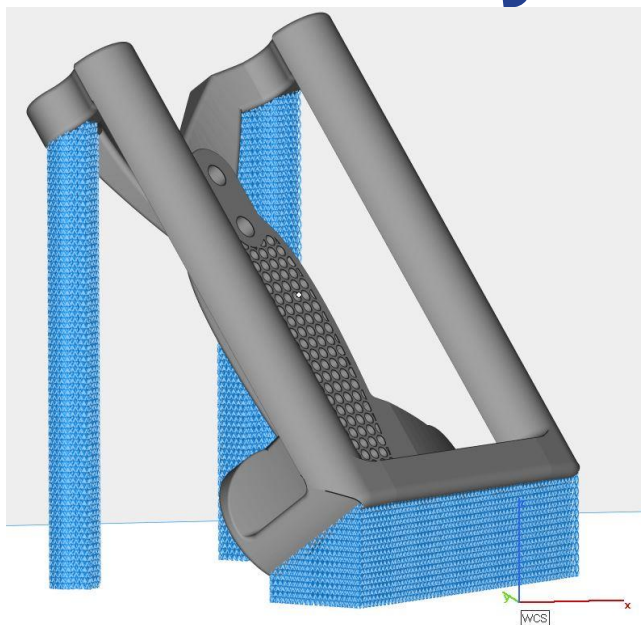
- Lujuuslaskenta uudelleen
  - Varmistetaan osan kestävyys...
  - ...ja todetaan että kestää!
- Tästä voidaan jatkaa tukien suunnitteluun
- Tämän keissin tulokset:



Model	weight [kg]	Measuring tool
Mass model	0.416	Solidworks
Topology optimized	0.077	Solidworks
3D printed part	0.072	Kern FFN scale



# DFAM – Topologian optimointi case study robottikoura

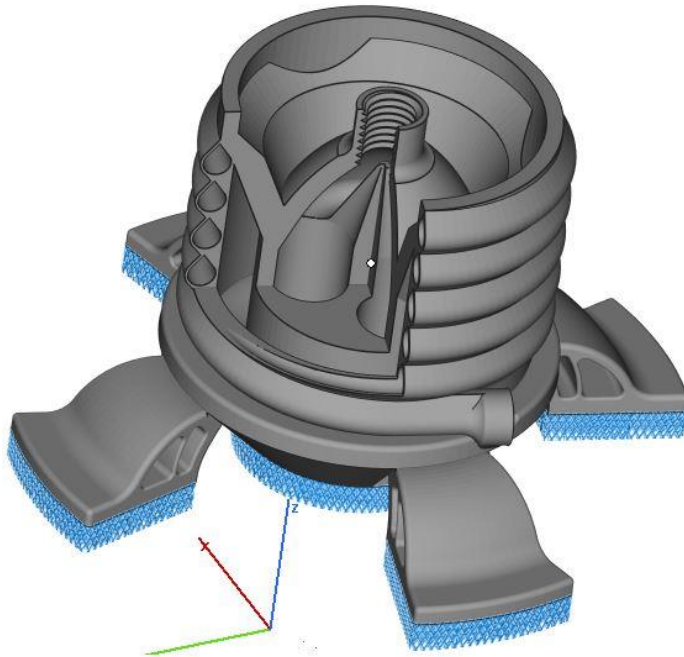


## Step 5:

- Tukien luonti ja prosessiparametrit:
  - Orientaatio on osalle päätetty uudelleen suunnitteluvaiheessa
  - Geometrian mukaan valitaan
    - Tässä tapauksessa on valittu block-tyyppinen tuki, koska pinta-alat ovat suuria ja tuet koneistetaan pois
    - Valitaan paras kerrospaksuus ja laserointiparametrit
- Tässä keississä tulostettiin neljä kappaletta:
  - Tuloaika 16 h 30 min
  - Hinta/osa 330 € + jälkityöstö 25 min
  - Jälkityöstönä koneistus + lasikuulapuhallus



# DFAM – Osien yhdistäminen kokoonpanoksi case study



- Materiaalinsekoittaja suutinrakenne
  - Kolme kanavaa pohjasta yhdistyy ja kulkeutuu suuttimen kautta ulos
- Ympäriällä jäähdytyskanavisto
- Materiaaliksi valittu AlSi10Mg hyvän lämmönjohtamisen vuoksi
- Kahdeksan osaa yhdistetty yhdeksi
- Suunniteltu siten, että edellinen kerros tukee seuraavaa kerrosta → tukirakennetta ei tarvita
  - Pohjalle laitettu tuet irrotusta varten
  - Voisi laittaa myös suoraan alustalle ja irrottaa lankasahalla
- Tulostettiin neljä kappaletta
- Tulostusaika 29 h → yhden kappaleen tulostushinnaksi tuli 580 € + koneistus



# Lisätoimenpiteet- Eri tulostusalustat

- Tulostimessa on tällä hetkellä mahdollista käyttää kolmea erikokoista tulostusalustaa
- Korkean lämmön alusta (HTH)
  - (muodoltaan pyöreä) halkaisija 90 ja tulostuskorkeus 100 mm
  - Maksimilämpötila 550 °C
  - Yli 200 °C lämpötiloissa käytetään keraamikaavarin terää. Tällöin kaavaus vain yhteen suuntaan.
  - Korkean lämmön alustat löytyvät titaanille ja teräksille
- Pienennetty alusta
  - Tulostustilavuus 50x50x80 mm<sup>3</sup>
  - Ei erillistä lämmitystä
  - Pienennetyt alustat löytyvät titaanille, teräksille ja alumiinille
- Yleinen alusta
  - Tulostustilavuus 280x280x365 mm<sup>3</sup>
  - Lämmitys enintään 200 °C





# Lisätoimenpiteet- Materiaalinvaihto

- **Materiaalinvaihto teräs-teräs ja teräs-alumiini välillä eroaa työmäärältään paljon**
- Reaktiivisten (alumiini ja titaani) jauheiden välillä koneen puhdistus ei vaadi niin paljon työtä, kuin vaihto teräksestä reaktiiviseen. Teräksien vaihto keskenään ei vaadi myöskään paljoa koneen puhdistusta.
  - Esimerkiksi materiaalinvaihto teräksestä alumiiniin edellyttää:
    - Vaihtamaan suodattimet
    - Puhdistamaan ”likaisen” linjan putket
    - Puhdistamaan tulostuskammio
    - Puhdistamaan kaavari
    - Pääsäiliön puhdistus
    - Jauhesäiliöiden puhdistus
    - Seulan puhdistus
    - Imurin puhdistus

# Lisätoimenpiteet- Jauheen seulonta- asema PSM 100

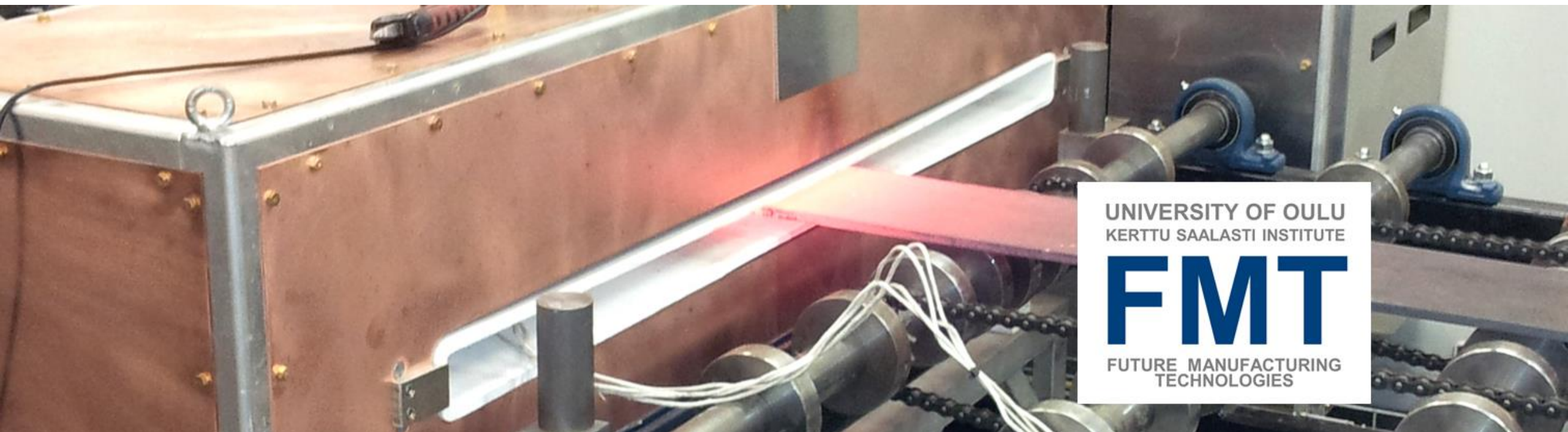


- Erillinen jauheen seulonta yksikkö PSM 100
- Sisältää kaksi eri seulaa 75  $\mu\text{m}$  (teräksille) ja 100  $\mu\text{m}$  (alumiini ja titaani).
- Seulotaan uudesta jauheesta huonot partikkelit pois
- Seulotaan tulostuksen yhteydessä "ylijäämä" jauhe, jotta saadaan yhteen sulautuneet partikkelit pois



# Osuuden yhteenveto ja keskustelu

- SLM menetelmä käytännössä
- Suunnittelu SLM menetelmää varten
- Jälkikäsittelyt ja niiden minimointi
- Paljon materiaaleja tarjolla – onko ne oikeasti käytettävissä

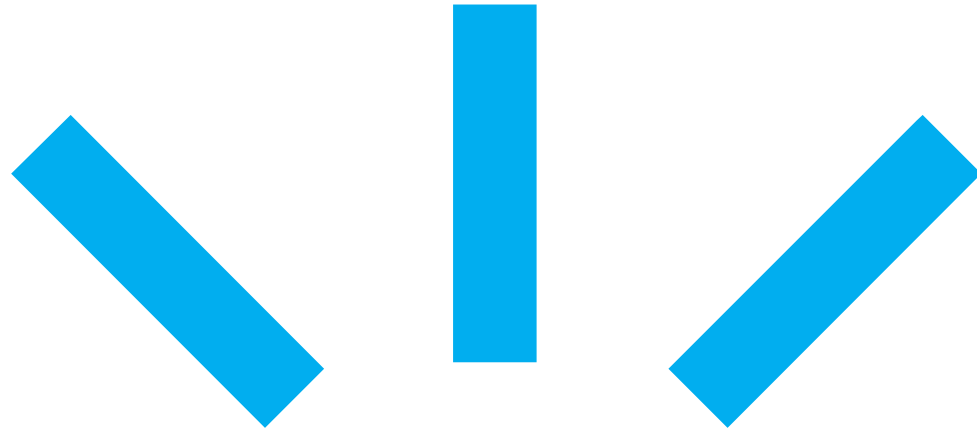


UNIVERSITY OF OULU  
KERTTU SAALASTI INSTITUTE

**FMT**

FUTURE MANUFACTURING  
TECHNOLOGIES





# AM valmistuksen hyödyntäminen



# Mitä homma maksaa?

**Laite**  
**Materiaalit**  
**Suodattimet**  
**Kaasut**  
**Käyttökulut**  
**Jälkikäsittely**

## – Laitteet

- Muovitulostin 300...100 000€
- SLM tulostin 300 ... 2000 k€

## – Filamentit

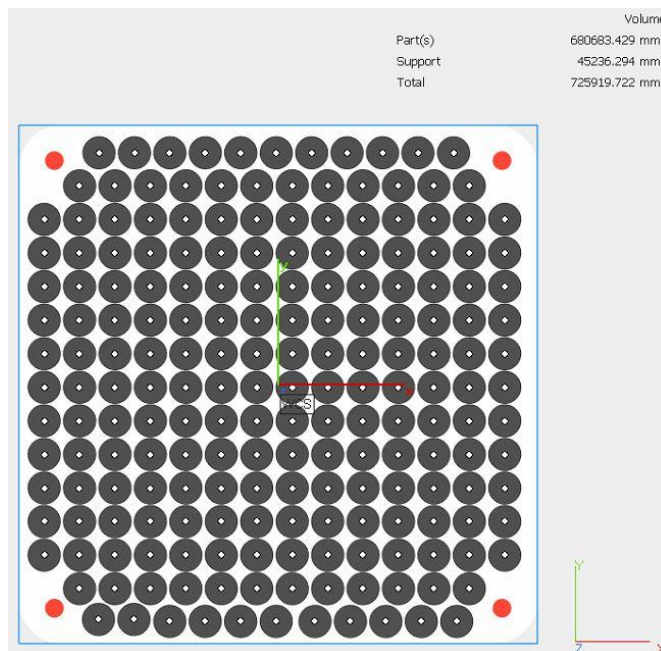
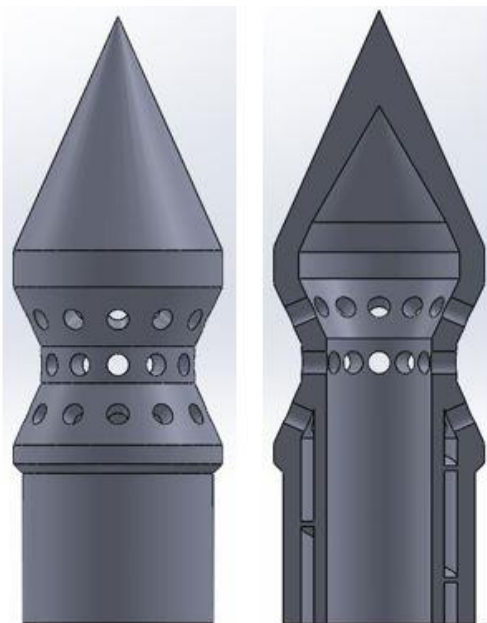
- PLA n. 20 €/Kg, Antimikrobinen 50 €/kg
- ABS n. 25 €/kg
- Nylon n. 80 €/kg

## – Metallijauheet

- 316L n. 42 €/kg
- ALSi10Mg n. 75 €/kg
- Ti6Al-4V n. 310 €/kg
- 18Ni300 n. 80 €/kg



# Mitä homma maksaa?



- 200 kappaleen tulostus palomiessuutin (SLM280HL single 700W laser)
- 725919 mm<sup>3</sup> kokonaistilavuus (osat + tuet)
  - Tukien osuus 45236 mm<sup>3</sup> (noin 6 % kokonaistilavuudesta)
- Ajoaika 133 h
- Tulostuskustannukset kaikki
  - Koneenkäyttöhintaa 133 h \* 100 €/h = 13300 €
  - Materiaalin hinta 573.5 €
  - Jälkityöstön hinta
- Tulostusvaiheen kustannukset/osa 13873.5 € / 200 = 69.4 €/osa
- Jälkityöstön hinnaksi arvioitiin noin 30 €/osa (Lämpökäsittely, Osien irrotus alustasta, Tukienpoisto ja o-rengas uran sorvaus)
- Kokonaiskustannus/osa 99.4 €
- Miten vielä halvemmaksi?
  - Tulostuskammion tilavuus käyttöön!!



# Metallitulostimien aikakausi?

- SLM solutions
- EOS
- Concept Laser
- 3D systems
- Renishaw
- Trumpf
- Mazak (hybrid; metal 3D-printing/CNC)
- DMG Mori
- Arcam
- HP (tulossa metallin 3D-tulostin)
- Desktop Metal
- Markforged

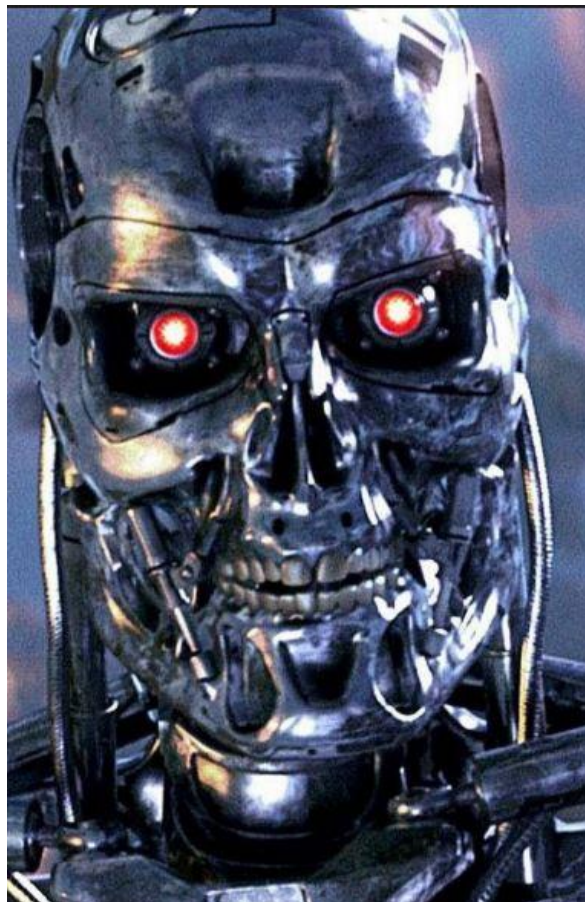
- Nykypäivä
  - Lasereiden lukumäärä lisääntynyt tulostimissa
  - Tulostuskammioiden koko noussut
    - Lisääntynyt koneen tuotto
  - Koneiden automaatio parantunut
    - Automaattinen jauheen kierrätys
    - Automaattinen koneiden kammioiden putsaus ja vaihto
    - Mahdollisuus CNC:n käyttöön tulostettaessa
  - Tulostusparametrien optimointi lisääntynyt ja parantunut
    - Laatu
  - Tulostusprosessin seurantaohjelmat
  - Nopeampia koneita markkinoille
    - Mahdollisuus tehdä osia nopeasti (mekaaniset ominaisuudet eivät välttämättä ykköskriteeri)

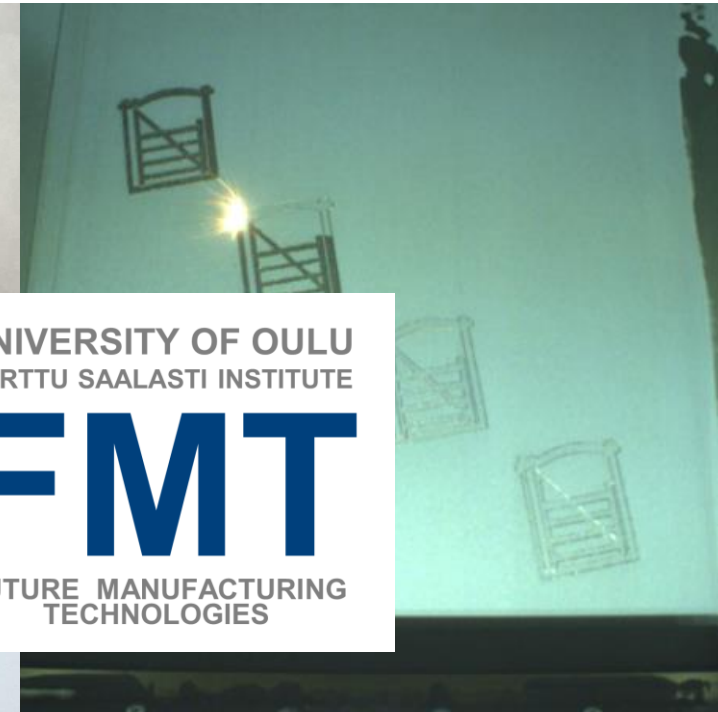
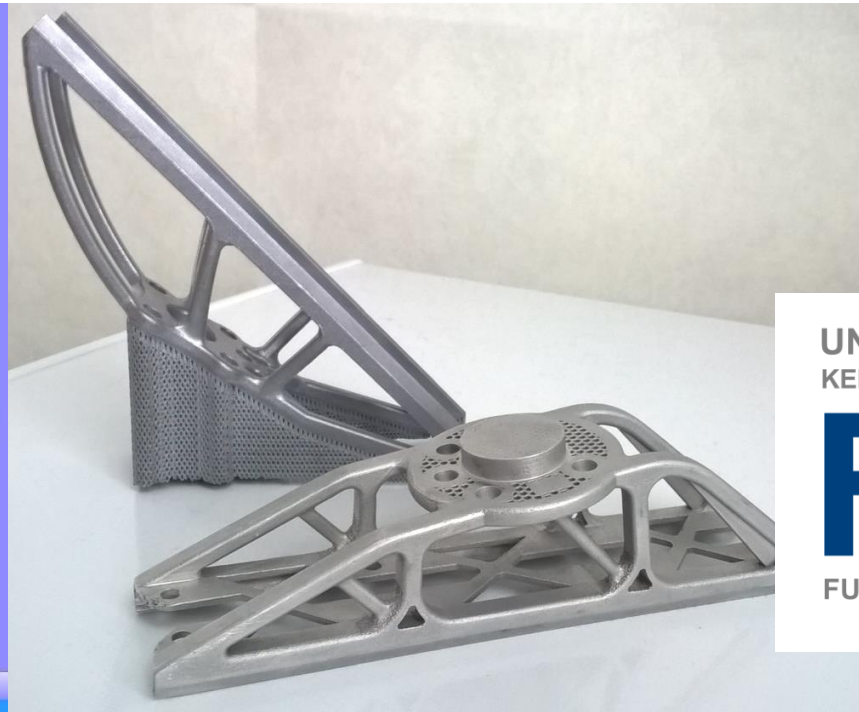
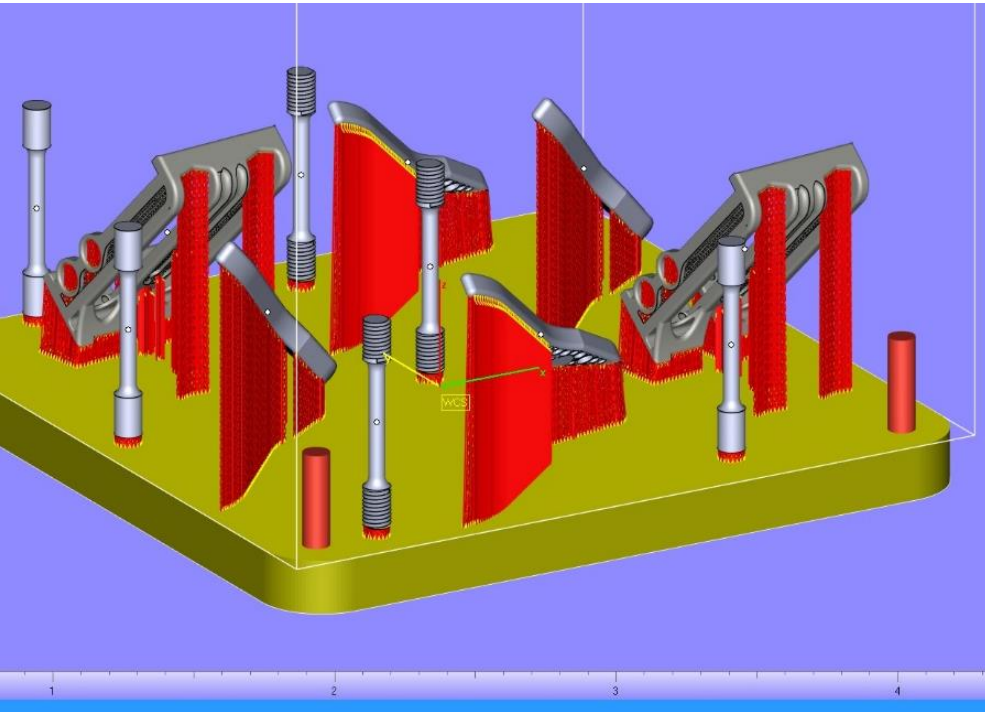




# Metallitulostimien tulevaisuus?

- Tulevaisuus
  - Koneiden lisääntynyt automaatio
  - Tukirakenteiden poistuminen
  - Lisääntynyt laitekanta
  - Multimateriaali myös metalleilla?
  - Parantunut laaduntarkkailu
    - Kone osaa itsenäisesti parantaa laatua ajon yhteydessä
  - SLM, DLD, Jetting prosessit





UNIVERSITY OF OULU  
KERTTU SAALASTI INSTITUTE  
**FMT**  
FUTURE MANUFACTURING  
TECHNOLOGIES



UNIVERSITY OF OULU  
KERTTU SAALASTI INSTITUTE

**FMT**

FUTURE MANUFACTURING  
TECHNOLOGIES

**C3TS**

Arctic platform to Create, 3D-print, Test and Sell



# Yhteistyössä

**Interreg  
Pohjoinen**

Euroopan aluekehitysrahasto



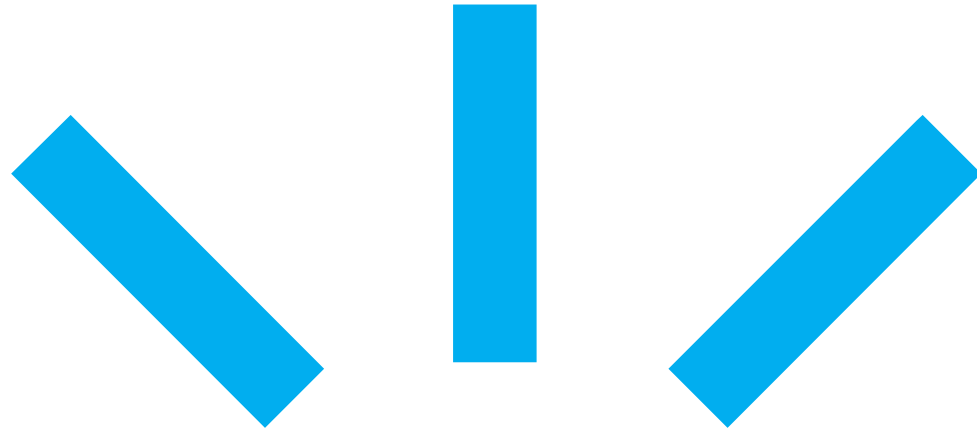
EUROOPAN UNIONI



**TROMS** County Council  
**TROMS** fylkeskommune



LAPIN LIITTO



# Yhteenveto ja loppukeskustelu



- 3D tulostuksen tekniikat
- DFAM – Suunnittelu
- SLM tulostaminen käytännössä
- Teollinen hyödyntäminen ja tulevaisuus
- Keskustelu ja kommentit





# *Thank you for your kind attention!*



**Contact Information:**  
**Research Director Kari Mäntyjärvi**  
**040 084 3050**  
**[kari.mantjarvi@oulu.fi](mailto:kari.mantjarvi@oulu.fi)**



**FMT**  
FUTURE MANUFACTURING  
TECHNOLOGIES



**UNIVERSITY  
OF OULU**

**KERTTU SAALASTI  
INSTITUTE**

***Science  
With  
Arctic  
Attitude!***

**FMT**  
FUTURE MANUFACTURING  
TECHNOLOGIES

**Contact Information:  
Research Director  
Kari Mäntyjärvi  
040 084 3050  
[kari.mantjarvi@oulu.fi](mailto:kari.mantjarvi@oulu.fi)**