

3D-tulostuksen yhteishanke 3D TY

Design for WAAM – Suorakerrostuksen mahdollisuudet ja rajoitukset suunnittelun näkökulmasta

FMT päivät 21.-22.05.2025 Nivalassa

Kari Mäntyjärvi

Oulun yliopisto – Tulevaisuuden tuotantoteknologiat (FMT)

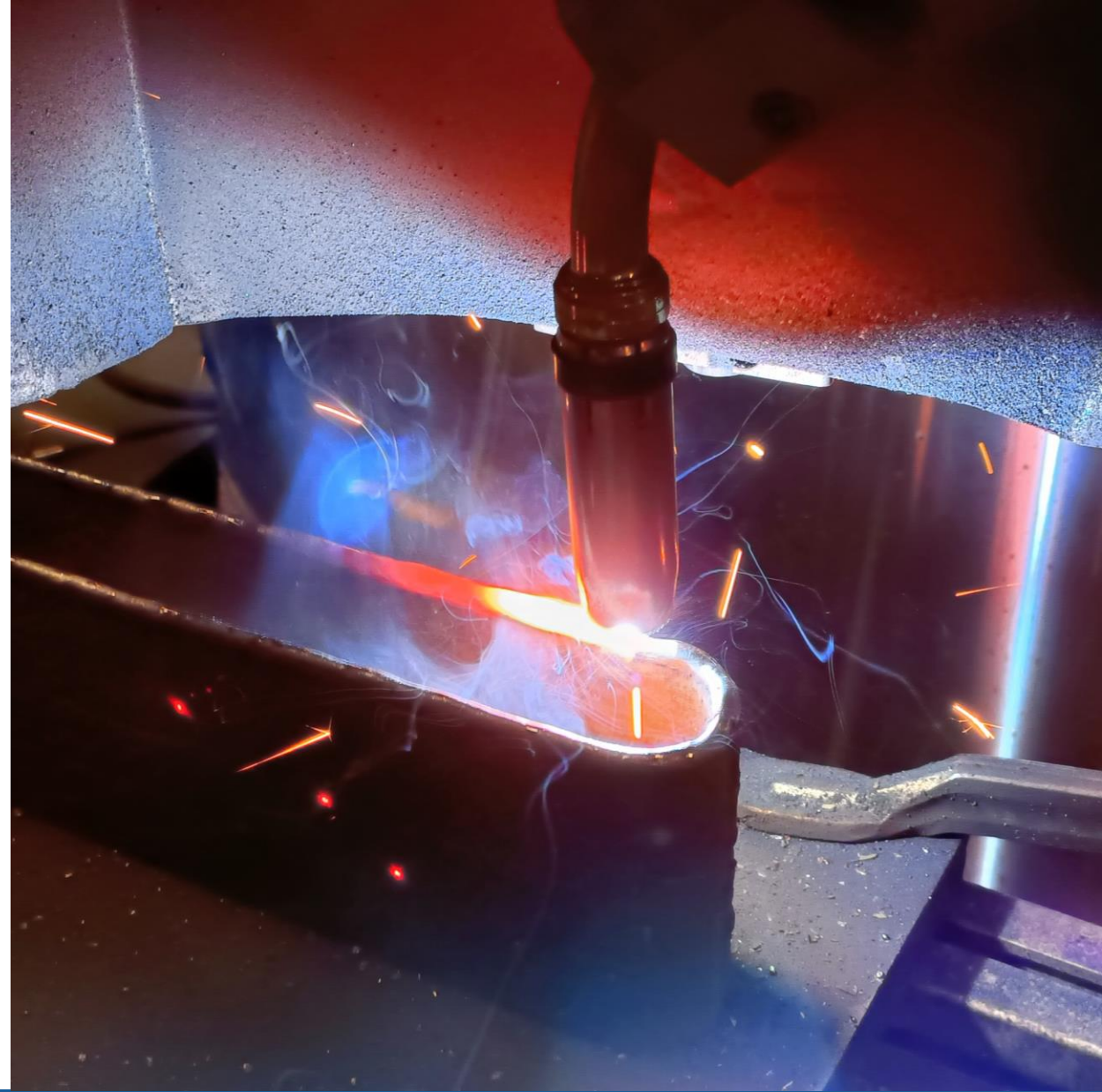


Euroopan unionin
osarahoittama



WAAM (Arc-DED)

- WAAM on metallien suorakerrostus (Directed Energy Deposition, DED) menetelmä, jossa metallilankaa sulatetaan kerroksittain kaarihitsausmenetelmällä haluttuun muotoon.
- Menetelmä mahdollistaa suurikokoisten, monimutkaisten metalliosien nopean ja kustannustehokkaan valmistuksen, ja se hyödyntää samoja laitteita kuin teollinen kaarihitsaus.
- "3- tai 5-akselinen" tulostus robotilla tai CNC mekaniikalla.



Euroopan unionin
osarahoittama





Lähde: <https://www.dezeen.com/2018/04/17/mx3d-3d-printed-bridge-joris-laarman-arup-amsterdam-netherlands/>

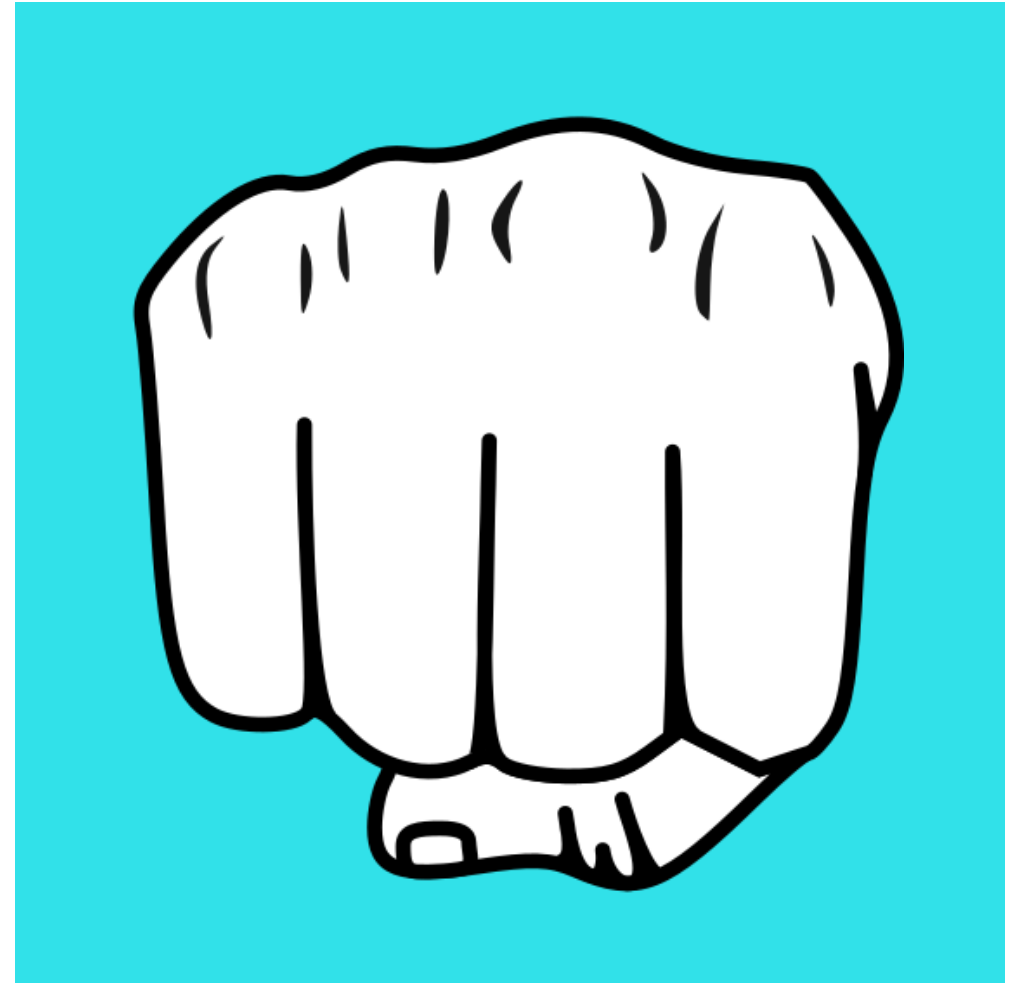


Euroopan unionin
osarahoittama



Lisäävän valmistuksen nyrkkisäännöt 1 ja 2:

1. **"Jos osan voi valmistaa kustannustehokkaasti perinteisillä menetelmillä, niin sitä ei luultavasti kannata valmistaa AM menetelmillä!"**
 - Hyvät 3D-tulostettavat osat ovat yleensä:
 - o sellaisia, että niissä kyetään hyvin hyödyntämään AM-menetelmän mahdollisuuksia
 - o rakenteeltaan sellaisia, että niitä on hankala tai mahdoton valmistaa muilla menetelmillä
 - o niissä saadaan yhdistettyä monta osaa yhdeksi kokonaisuudeksi
 - o prototyyppi- tai piensarjaosia
 - o yksittäisosia tai personoituja osia
2. **"Geometrian monimutkaistuminen ei yleensä lisää lisäävän valmistuksen kustannuksia ja rakenteen keventäminen taas yleensä vähentää niitä! "**
 - Suunnitellaan aina keveitä (ja kestäviä 👍) AM-osia



Kuva: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/1/1d/Human_fist_different_sides.svg/2560px-Human_fist_different_sides.svg.png



Euroopan unionin
osarahoittama



DFMA - Design for Additive Manufacturing

- Perusperiaate on suunnitella tuotteet siten, että ne hyödyntävät lisäävän valmistuksen mahdollisuuksia ja huomioivat sen rajoitteet – ei vain siirtää vanhaa suunnittelua uuteen valmistustapaan, vaan ajatella tuotteet ja niiden rakenne uudestaan AM-tekniikan ehdoilla
- Geometrinen vapaus, valmistettavuus, luotettavuus ja kustannusten optimointi



Kuva generoitu tekoälyllä: Sora (OpenAI, 2025)



Euroopan unionin
osarahoittama





DFMA - Design for Additive Manufacturing

- Geometrian FEM pohjainen optimointi
 - lujuus- ja paino-optimointi
- Osien vähentäminen yhdistelemällä osia
 - Kustannuksia pois osavalmistuksesta ja etenkin kokoonpanosta!
- Rakenteen moninaisuus
 - esim. kenno-, verkko- ja huokosrakenteen hyödyntäminen
- Massaräätälöinti
 - jokainen osa voi olla erilainen
- Monimateriaalitulos
 - erilaisia ominaisuuksia/materiaaleja samassa tulosteessa
- Tulostusasennon ja tukien huomiointi jo kappaleen suunnitteluvaiheessa → jälkikäsittelyn minimointi
- Lisäävän valmistuksen yhdistäminen muihin menetelmiin
 - Jälkikoneistus hyvin yleisesti
 - Valut, levyosat, kierrätetyt rakenteet/korjaus

Kuva generoitu tekoälyllä: Sora (OpenAI, 2025)



Euroopan unionin
osarahoittama





Lähde: <https://all3dp.com/1/waam-what-is-wire-arc-additive-manufacturing/>
All3DP: WAAM! What Is Wire Arc Additive Manufacturing? by Carolyn Schwaar, Updated Jun 6, 2024
The stainless steel impeller used as a turbocharger for marine diesel engines was produced using WAAM technology by Gefertec (Source: Gefertec)



Euroopan unionin
osarahoittama



Suorakerrostuksen huomioiminen suunnittelussa

”yleisestä yksityiskohtiin ja takaisin”

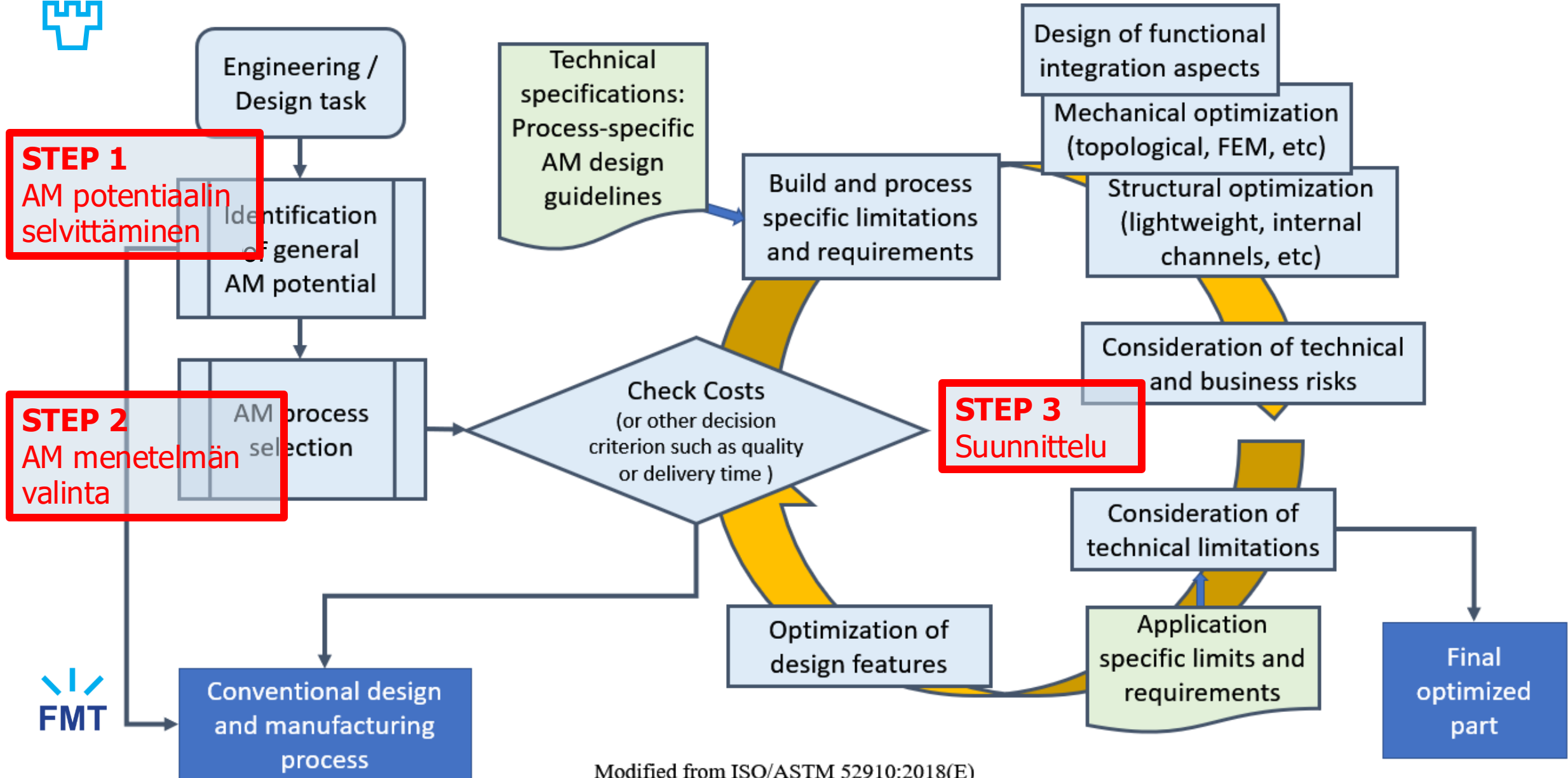


Kuva generoitu tekoälyllä: Sora (OpenAI, 2025)



Euroopan unionin
osarahoittama





Modified from ISO/ASTM 52910:2018(E)

Tuotteen ja sen rakenteen analyysi

Tekniset haasteet

- Rakenteelliset ja kestävyteen liittyvät
- Materiaaliin liittyvät
- Valmistustekniikkaan liittyvät
- Piensarjatuotannon ongelmat
- Asiakkaiden vaatimukset ja toiveet
- Räätelöinti ja kustomointi-haasteet

Kaupalliset ja hallinnolliset haasteet

- Osien valmistus-kustannukset
- Kokoonpanokustannukset
- Ajoitus ja ajan säästö
- Tuotteen hallintaan ja tuotetukeen liittyvät asiat
- Standardit ja hyväksynät

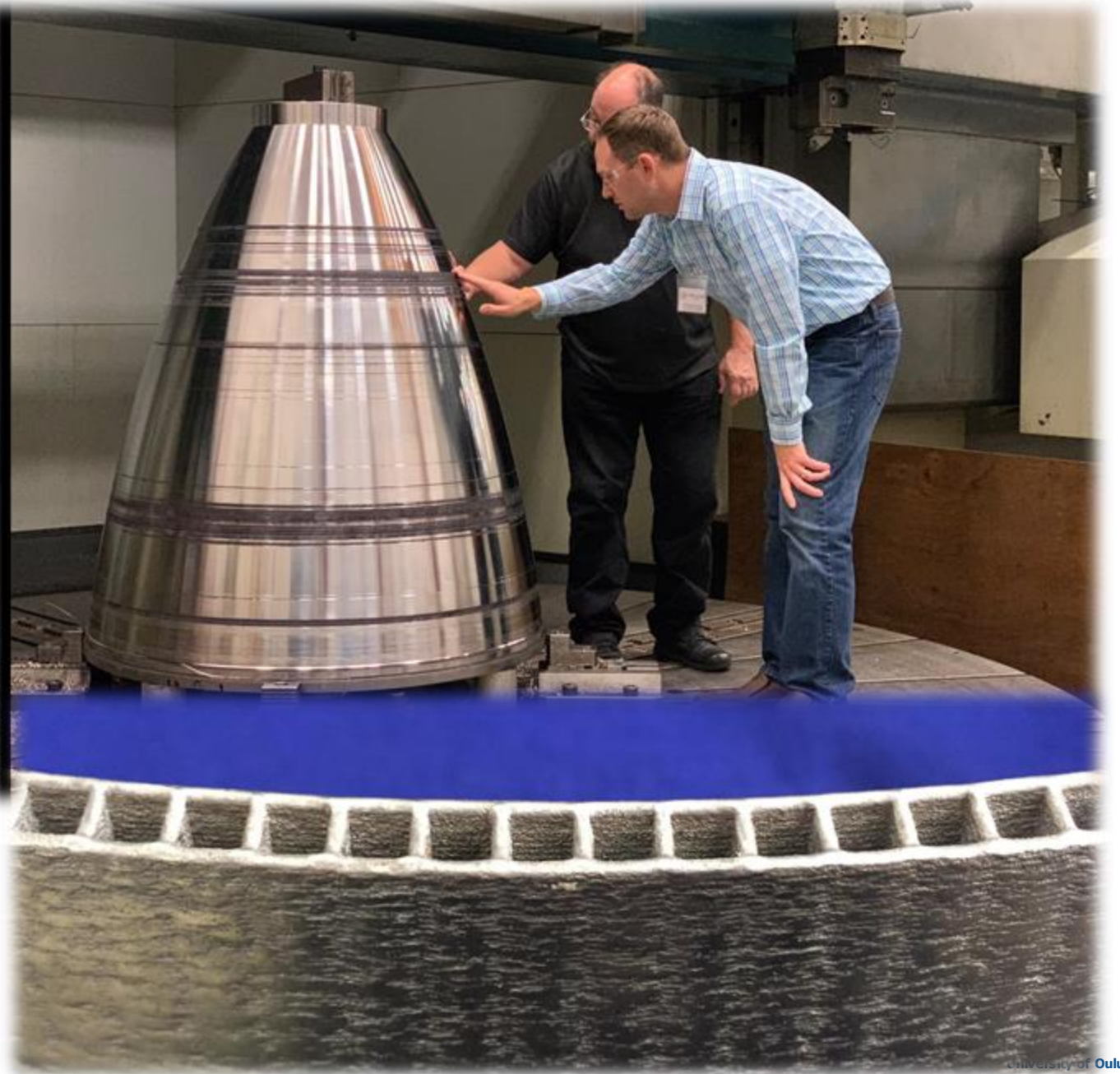
- STEP 1 ja 2

- Mietitään voisiko lisäävä valmistus/suorakerrostus ratkaista ongelmia tai tuoda etua
- Toisaalta katsotaan toimitus-/valmistusketjua ja katsotaan voisiko AM tuoda lisäarvoa tai säästöjä



Euroopan unionin
osarahoittama





Source: <https://www.nasa.gov/centers/marshall/news/releases/2020/future-rocket-engines-may-include-large-scale-3d-printing.html>



Top-Down ja Bottom-Up

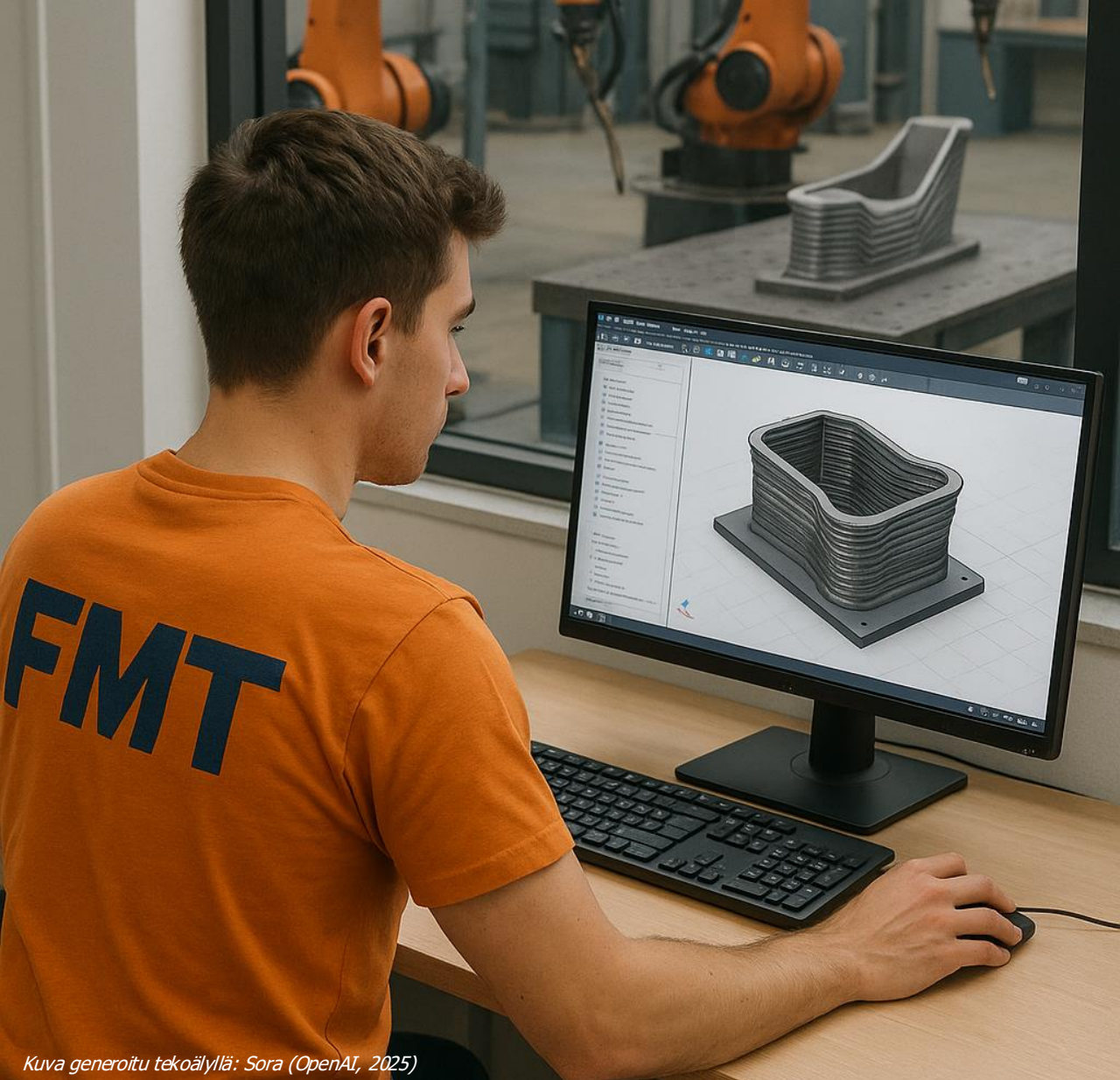
Yleisestä yksityiskohtiin ja yksityiskohdista kokonaisuuteen

- Top-Down-lähestymistavassa (~Kokonaissuunnittelu) suunnittelu lähtee liikkeelle kokonaisuuden (järjestelmän tai lopputuotteen) määrittelystä. Suunnittelu lähtee liikkeelle kokonaisuudesta ja etenee kohti yksityiskohtia. Ensin määritellään tuotteen päätoiminnot ja rakenne, ja sen jälkeen suunnitellaan yksittäiset komponentit.
- Bottom-Up-lähestymistavassa (~Detailisuunnittelu) suunnittelu lähtee liikkeelle yksittäisistä komponenteista tai alajärjestelmistä, jotka yhdistetään lopulta kokonaisuudeksi.
- Yhdistämällä iteratiivisesti molempia lähestymistapoja saavutetaan paras lopputulos: Ensin kokonaisuuden suunnittelu (Top-Down), mutta sitten yksityiskohtien kehitys valmistustekniikka huomioiden (Bottom-Up).



Euroopan unionin
osarahoittama





Top-Down Yleisestä yksityiskohtiin

- **Koko tuotteen rakenne edellä:** Suunnitellaan ensin tuotteen toiminnot, kuormitukset ja kokonaisgeometria, minkä jälkeen mietitään, mitkä osat ja muodot voidaan toteuttaa WAAM:lla.
- **Osien vähentäminen:** Top-Down-lähestymistavassa osien yhdistäminen pyritään näkemään osana systeemin yksinkertaistamista
 - Toiminnallisuuksien yhdistäminen
 - Kokoonpanotyön väheneminen
- **Geometrian suunnittelu/Rakenteellinen optimointi:** WAAM:n mahdollistamat muodot (esim. jättöpinnat, reunapyöristykset, ontot rakenteet, ei-tavanomaiset sisäiset muodot) voidaan ottaa huomioon jo aikaisessa vaiheessa.
 - Vältetään tarpeettomat mekaaniset liitokset
 - optimoidaan massaa ja lujuutta

Kuva generoitu tekoälyllä: Sora (OpenAI, 2025)



Euroopan unionin
osarahoittama



Bottom-Up

Yksityiskohdista yleiseen

- Aloitetaan WAAM-menetelmän mahdollisuuksien ja rajoitusten ymmärtämisestä
- Tunnistetaan valmistettavissa olevat perusgeometriat ja -muodot
- Rakennetaan kokonaisuus yhdistelemällä näitä elementtejä
- Tekniset parametrit ohjaavat suunnittelua (kerrostettavuus, materiaaliominaisuudet, jne.)



Euroopan unionin
osarahoittama



Katse rakenteeseen ja kokoonpanoon

- Toimintojen yhdistäminen yhteen osaan:
 - Toiminnallisuuden lisääminen:
 - Jäähdytys/lämmitys/voitelu/johdotus yms kanavistot samaan osaan
 - Työvaiheiden vähentäminen:
 - Leikkaus, muovaus, koneistus, kokoonpanotyö...
 - Suorituskyvyn nostaminen / toiminnan parantaminen rakennetta optimoimalla
 - Rakenteen keventäminen ja parempi kestävyys (mekaaninen, kulutus yms)
 - Esim. hydrauliiikan ja pneumatiikan jakotutkit
- Robottihitsaus + WAAM
 - Merkkaaminen hitsaamalla
 - Osien/kokoonpanotyön vähentäminen hitsauspäällä tulostamalla
 - Räätelöidyt piirteet tulostamalla
- Valut + WAAM
 - Valun korvaaminen joko kokonaan tai osiittain
 - Esim pumpun juoksupyörän räätelöinti asiakastarpeen mukaan
- Ja tietenkin
 - Korjaushitsaukset ja pinnoitukset
 - Osien muutokset ja päivitykset

Keskitytään vapaamuotoisen geometrian suunnittelun ja osien määrän vähentämiseen: WAAM soveltuu erinomaisesti monimutkaisten, yhdistettyjen rakenteiden luomiseen, jotka vähentävät kokoonpanoon tarvittavien osien määrää. Tässä mahdollisuus kustannussäästöihin ja parempaan suorituskykyyn.



Euroopan unionin
osarahoittama



Kevyttä ja kestäväää

Kimmo kertomia:

- Alumiini: 47-80 GPa
- Teräset 200 GPa
- Titaani: 120 GPa
- Inconel: 200 GPa

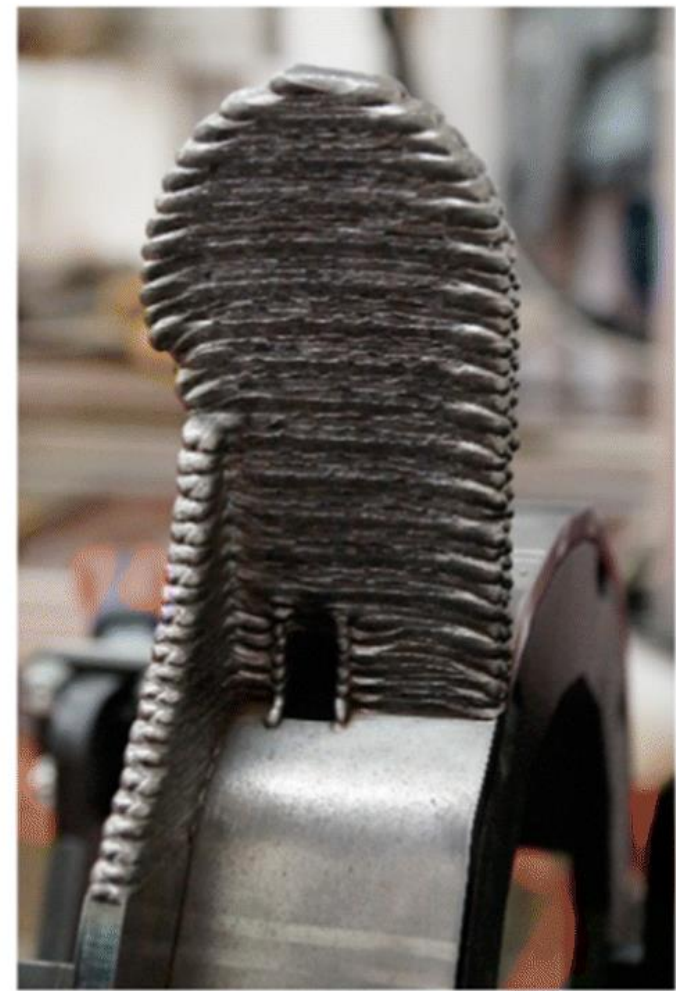
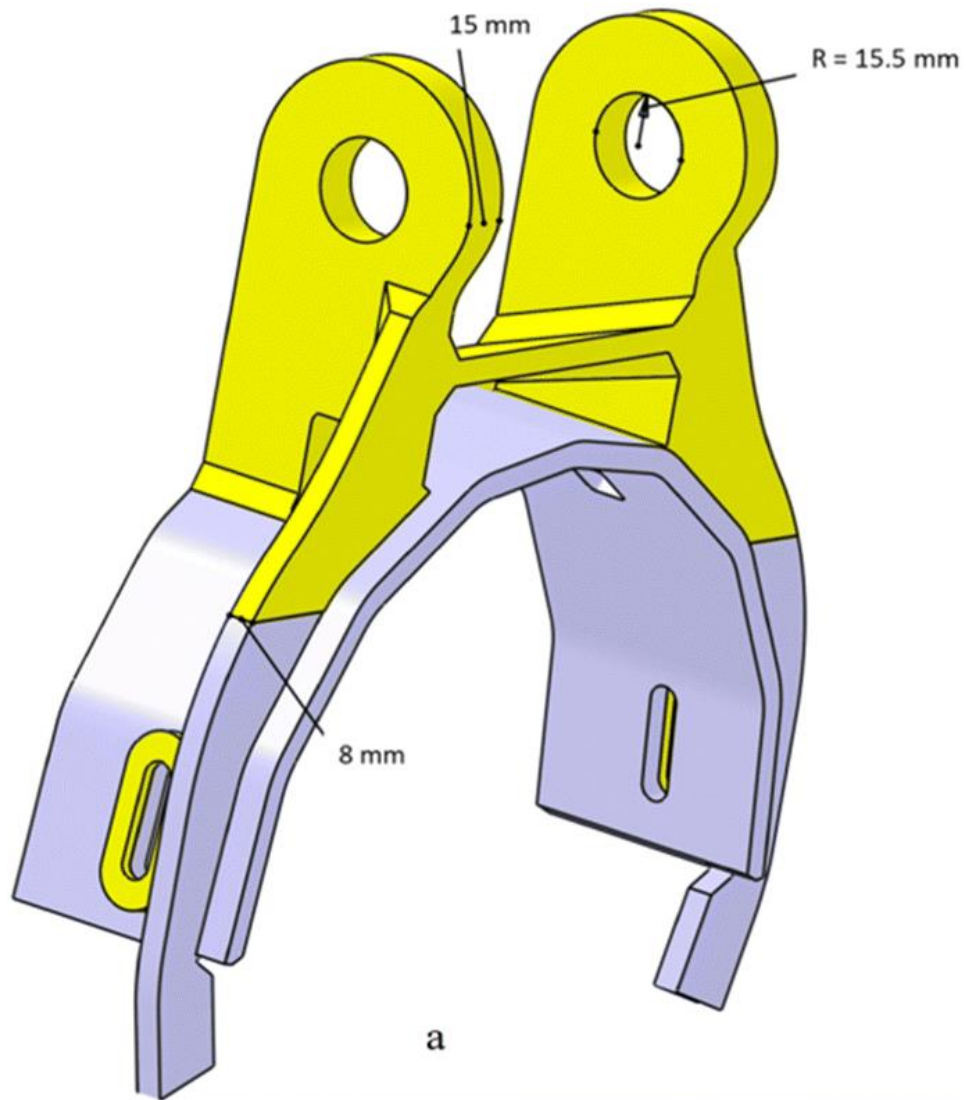
- Materiaali (vain) sinne missä sitä pitää ollakin:
 - Tunnistetaan kaikki rakenteeseen tulevat kuormitukset ja erilaiset kuormitus tilanteet
 - Tässä etenkin dynaaminen kuormitus eri tilanteissa
 - Käynnistys, ajotilanteet, siirto, korjaus, "sallitut töttöilyt", jne
 - Tulostusalusta / esivalmis rakenne
 - Osan kiinnitys eri työvaiheissa
 - Optimoidaan geometria: Topologiaoptimointi, generatiivinen suunnittelu, FEM laskennan hyödyntäminen, virtauslaskennan hyödyntäminen, jne
- Lujuus
 - Hyödynnetään lujia materiaaleja
 - Materiaali sinne missä sitä pitää olla
- Jäykkyys
 - Hyödynnetään käytettävissä oleva tila
 - "Laajat" kuori-, ristikko- ja kennorakenteet
- 3xOikein: Oikea määrä oikeaa materiaalia oikeaan paikkaan

Muista: WAAM tarjoaa uudenlaisia mahdollisuuksia, joten vanhoista suunnittelutottumuksista kannattaa irrottautua. Älä suunnittele osia ikään kuin ne työstettäisiin tai hitsattaisiin perinteisesti.



Euroopan unionin
osarahoittama





Lähde: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-020-05966-8#Fig78>

Liu, J., Xu, Y., Ge, Y. *et al.* Wire and arc additive manufacturing of metal components: a review of recent research developments. *Int J Adv Manuf Technol* 111, 149–198 (2020).

<https://doi.org/10.1007/s00170-020-05966-8>



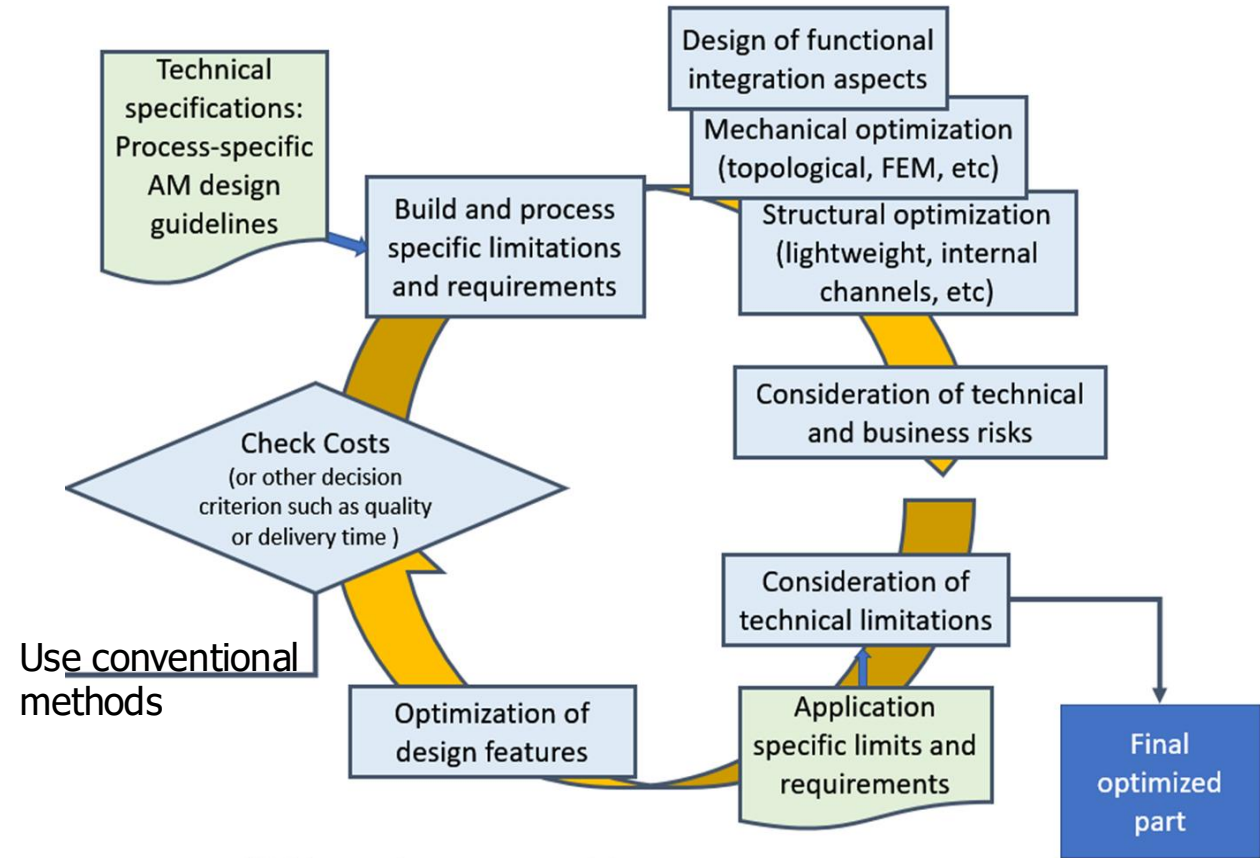
Euroopan unionin
osarhoittama



Osan suunnittelu

- Osan toiminnallinen muoto
 - Liitynnät ja toiminnalliset piirteet
 - Tila jossa materiaalia saa olla
- Tulostusalustan paikka ja muoto
 - Levy, putki, napa, rakenne
- Muodon optimointi
 - Lujuus, paino, virtaus, jne.
- Valmistustekniikan rajoitteet

- Iteratiivinen prosessi!



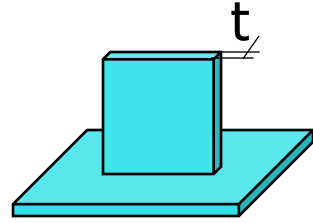
Modified from ISO/ASTM 52910:2018(E)



Euroopan unionin
osarahoittama



Osan suunnittelu – Seinämän vahvuus



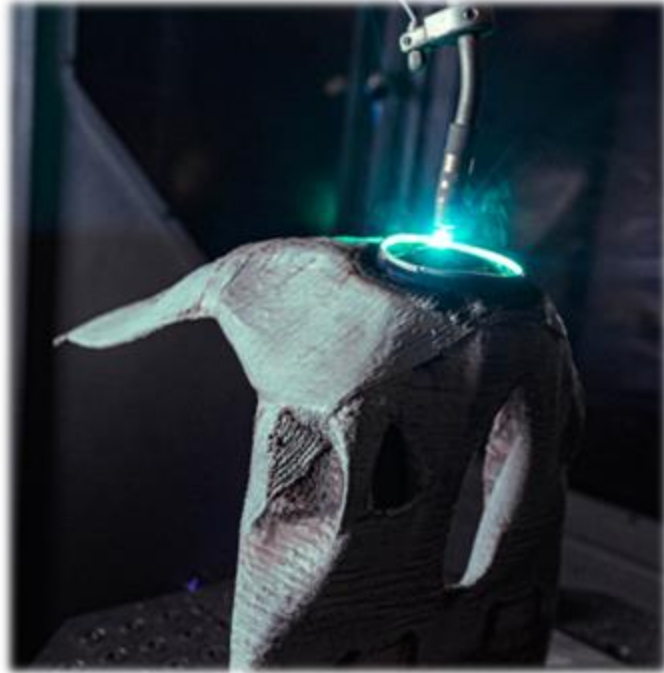
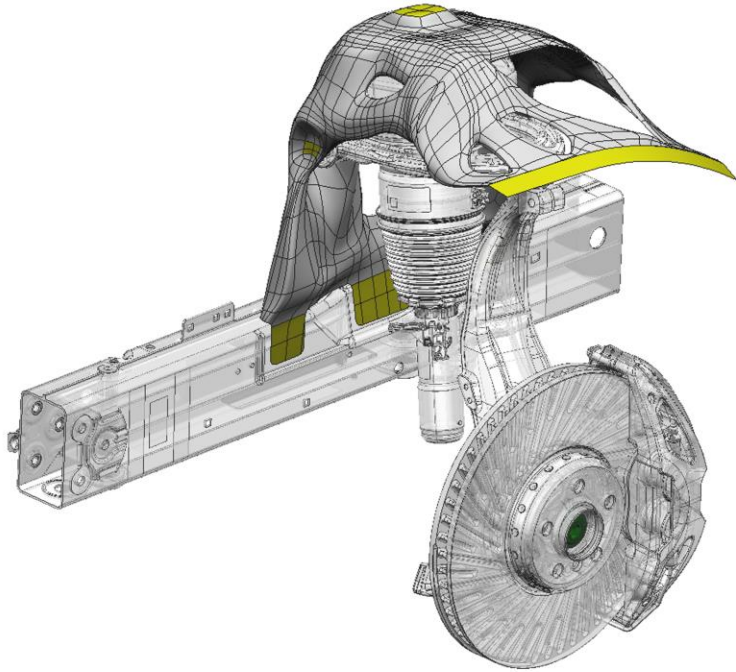
Langan paksuus	Materiaalityyppi	Minimi seinämän vahvuus (t_{\min})	Tyypillinen seinämän vahvuus (t)
0.8 mm	Alumiini	2.5 mm	3-5 mm
0.8 mm	Teräs/titaani	2.0 mm	3-4 mm
1.0 mm	Alumiini	3.0 mm	4-6 mm
1.0 mm	Teräs/titaani	2.5 mm	3-5 mm
1.2 mm	Alumiini	3.5 mm	5-7 mm
1.2 mm	Teräs/titaani	3.0 mm	4-6 mm
1.6 mm	Alumiini	4.5 mm	6-8 mm
1.6 mm	Teräs/titaani	4.0 mm	5-7 mm

Arvot ohjeellisia! Vaihtelevat suuresti laitteistosta, langan vahvuudesta ja materiaalista riippuen.



Euroopan unionin
osarahoittama





Lähde: <https://www.press.bmwgroup.com/global/article/detail/T0440485EN/bmw-group-with-%E2%80%9Clive-wire%E2%80%9D-to-innovative-production-of-vehicle-components-in-waam-process?language=en>
PressClub Global · Article: BMW Group with “live wire” to innovative production of vehicle components in WAAM process.



Euroopan unionin
osarahoittama



Osan suunnittelu - sauvarakenteet



https://www.youtube.com/shorts/wCAw7DL2_eo

Langan paksuus	Pienin pylvään halkaisija	Maksimi korkeus-halkaisija -suhde	Prosessityyppi
0.8 mm	3.0 mm	8:1	TIG/Plasma
1.0 mm	3.5 mm	7:1	CMT
1.2 mm	4.5 mm	6:1	Pulssi-MIG
1.6 mm	6.0 mm	5:1	MIG/MAG

Arvot ohjeellisia! Vaihtelevat suuresti laitteistosta, langan vahvuudesta ja materiaalista riippuen.



Euroopan unionin
osarahoittama





Lähde: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-020-05966-8#Fig3>
Liu, J., Xu, Y., Ge, Y. *et al.* Wire and arc additive manufacturing of metal components: a review of recent research developments. *Int J Adv Manuf Technol* 111, 149–198 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05966-8>



Euroopan unionin
osarahoittama



Osan suunnittelu - Levy vai sauva?

- WAAM soveltuu erityisen hyvin levymäisten, jatkuvien seinämien ja yksinkertaisten, paksuhkojen rakenteiden valmistukseen. Tyypillinen seinämän vahvuus yhdellä kerroksella on 3,5–8 mm, ja seinämät voidaan optimoida vastaamaan hitsauslangan paksuutta ja prosessiparametreja.
- Sauvamaiset, hyvin ohuet tai pienisäteiset muodot ovat haastavampia, koska lämmönhallinta ja materiaalin stabiilius voivat aiheuttaa muodonmuutoksia tai huokoisuutta. Pienet poikkileikkaukset voivat olla hitaita ja hankalia valmistaa ja saada riittävän laadukkaiksi.



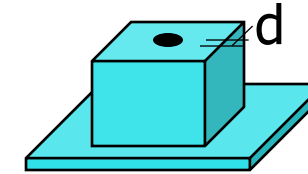
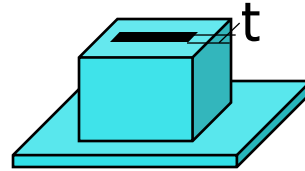
Kuva generoitu tekoälyllä: Sora (OpenAI, 2025)



Euroopan unionin
osarahoittama



Osan suunnittelu – Rako ja reikä



Prosessityyppi	Minimi pystysuoran raon leveys	Minimi pystyreijän halkaisija
CMT (Cold Metal Transfer)	2.5 mm	6 mm
Pulssi-MIG/MAG	3.0 mm	8 mm
Perinteinen MIG/MAG	3.5 mm	10 mm
TIG-WAAM	2.0 mm	5 mm
Plasmakaaritormi (PAW)	1.8 mm	4 mm

Robotin kyvykkyys rajoittaa.
Turvallinen D8-12 mm.

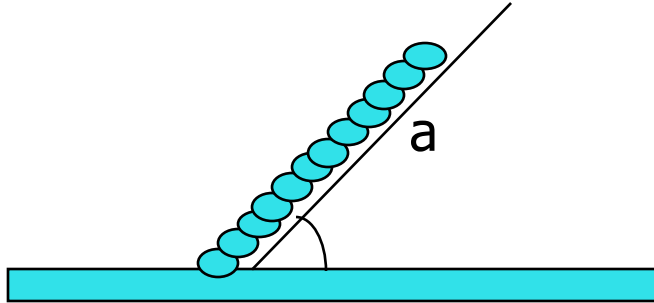
Arvot ohjeellisia! Vaihtelevat suuresti laitteistosta, langan vahvuudesta ja materiaalista riippuen.



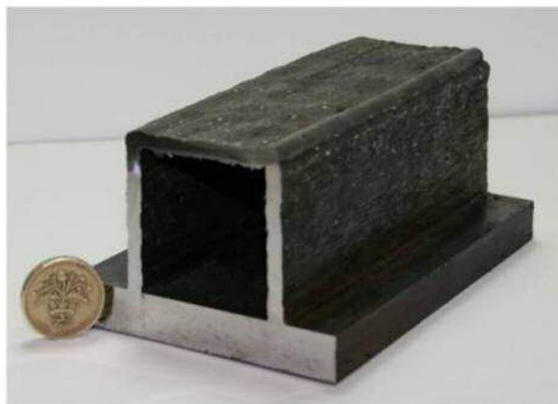
Euroopan unionin
osarahoittama



Osan suunnittelu – Seinämän kulma



- Tyypillisesti: **25-45 astetta** vaakatasosta riippuen prosessiparametreista ja kerrosten jähdetyksestä.
- Huomaa tässä ero 3- ja 5-akselisen mekaniikan välillä:
 - 5-akselisessa mekaniikassa rajoitusta ei juuri ole...



Mehnen, Jorn; Ding, Jialuo; Lockett, Helen and Kazanas, Panos (2014). Design study for wire and arc additive manufacture. International Journal of Product Development, 19(1/2/3) pp. 2–20.

Arvot ohjeellisia! Vaihtelevat suuresti laitteistosta, langan vahvuudesta ja materiaalista riippuen.



Euroopan unionin
osarahoittama





Lähde: <https://all3dp.com/1/waam-what-is-wire-arc-additive-manufacturing/>

All3DP: WAAM! What Is Wire Arc Additive Manufacturing? by Carolyn Schwaar, Updated Jun 6, 2024
Architecture and design applications of WAAM 3D printing result in unique designs and far lower costs than machining (Source: MX3D)

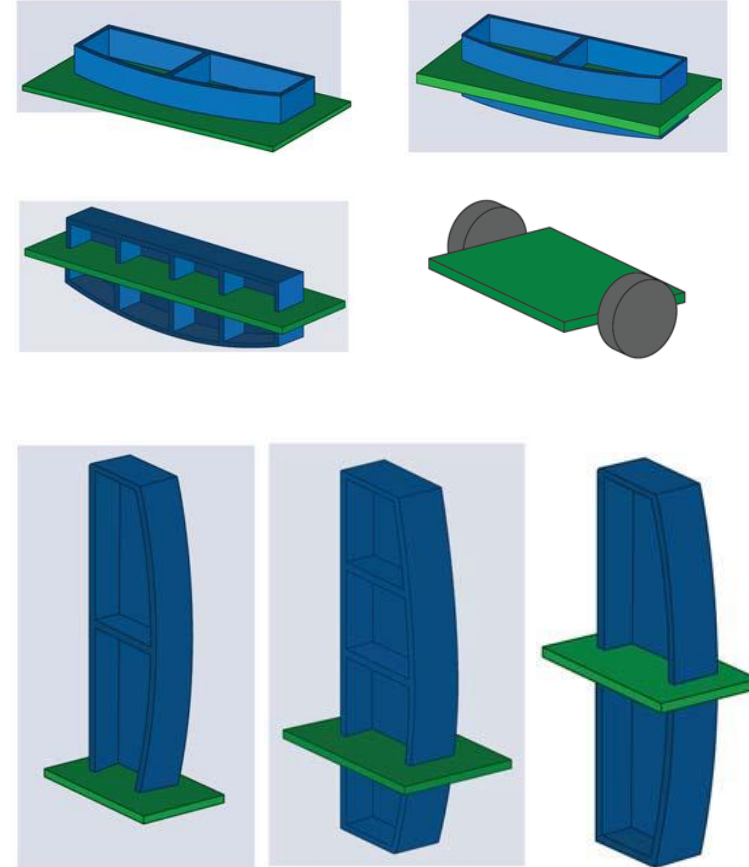


Euroopan unionin
osarahoittama



Osan suunnittelu - rakennusaluista

- Tulostus rakennusalustalle
 - Levy, napa, rakenne/kokoonpano (valu, hitsattu, muovattu, jne) tai jotakin muuta
- Oltava riittävän tukeva jotta säilyttää muotonsa
- Symmetria alustan suhteen on hyödyllistä lämmön jakautumisen kannalta
- Voi jäädä osaksi kappaletta tai kappale voidaan irrottaa alustasta tai alustaa voidaan työstää muotoon leikkaamalla, koneistamalla tms.
- Suorakerrostusta voi käyttää myös lisäämään rakenteeseen yksityiskohtia
 - Räätelöinnit, osien korvaaminen, korjaukset tai kuluneen osuuden korvaaminen
 - Voi myös käyttää merkkaukseen!



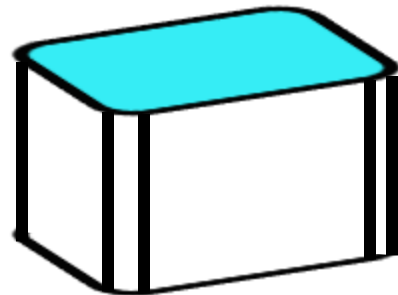
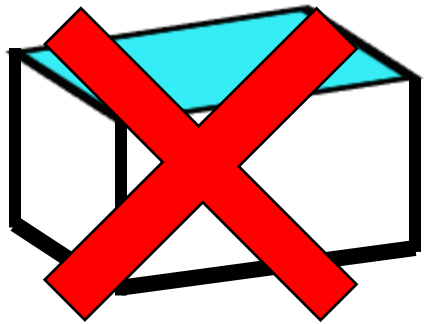
ASTM F3413-19



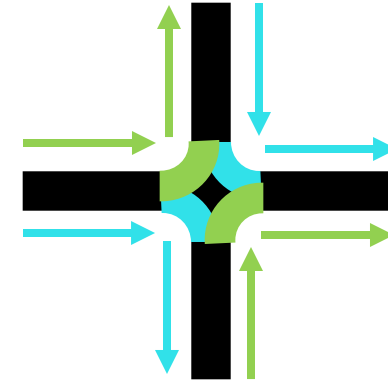
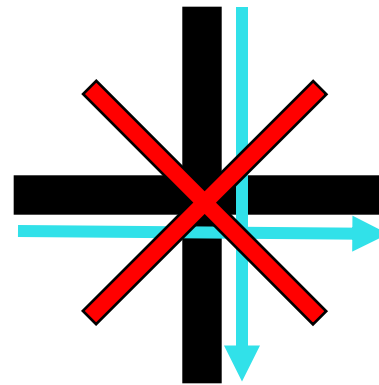
Euroopan unionin
osarahoittama



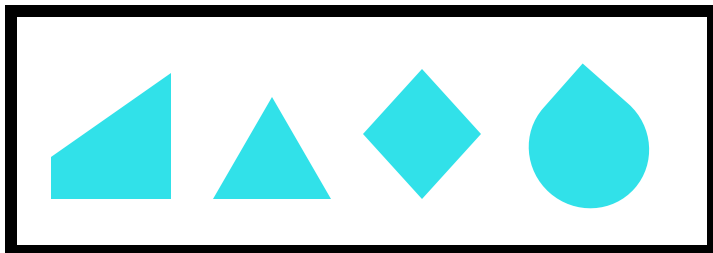
Osan suunnittelu – nurkat ja risteykset



Suosi pyöristettyjä kulmia!



Risteävät muodot – ei hitsauspalon ylitystä



Vaakareissä ja kanavissa talo, kolmio, salmiakki tai kyynel!



Euroopan unionin
osarahoittama





Lähde: <https://all3dp.com/1/waam-what-is-wire-arc-additive-manufacturing/>
All3DP: WAAM! What Is Wire Arc Additive Manufacturing? by Carolyn Schwaar, Updated Jun 6, 2024.
Once WAAM 3D printed, parts such as this titanium bracket are machined to precision, saving close to 70% of the raw material compared to machining (Source: Norsk Titanium)



Euroopan unionin
osarahoittama



Osan suunnittelu – jälkikäsittelyt



- WAAM-prosessissa jälkikäsittely on lähes aina välttämätöntä kriittisille pinnoille
 - Koneistus
 - Hiekka-/kuulapuhallus
 - Lämpökäsittelyt
- Jälkikäsittelyt kannattaa huomioida suunnitteluvaiheessa
- Koneistuksen työvaran lisääminen komponenttiin
 - Kiinnitys, työkalun ulottuma, jne
 - Tulostuksen ja koneistuksen vuorottelu?
 - Tyypillinen työstövara on 0.5-2 mm pinnalle riippuen tarkkuusvaatimuksista
 - Muista: Koneistus vain sinne jossa se on välttämätöntä

Kuva: <https://www.gtusun.com/product/en/Product-20231104-025750.html>



Euroopan unionin
osarahoittama



Osan suunnittelu

- **Vältä teräviä kulmia:** Käytä pyöristyksiä (≥ 2 mm) jännitysten ja huonon tulostuslaadun välttämiseksi.
- **Suosi jatkuvia muotoja:** WAAM toimii parhaiten, kun geometria on jatkuva ja kerroksittain rakennettavissa ilman äkillisiä siirtymiä.
- **Optimoi rakennussuunta:** Valitse rakennussuunta, joka minimoi tukien tarpeen ja mahdollistaa hyvän pinnanlaadun.
- **Suunnittele jälkikoneistusvara:** Lisää 0.5–2 mm koneistusvaraa kriittisiin pintoihin.

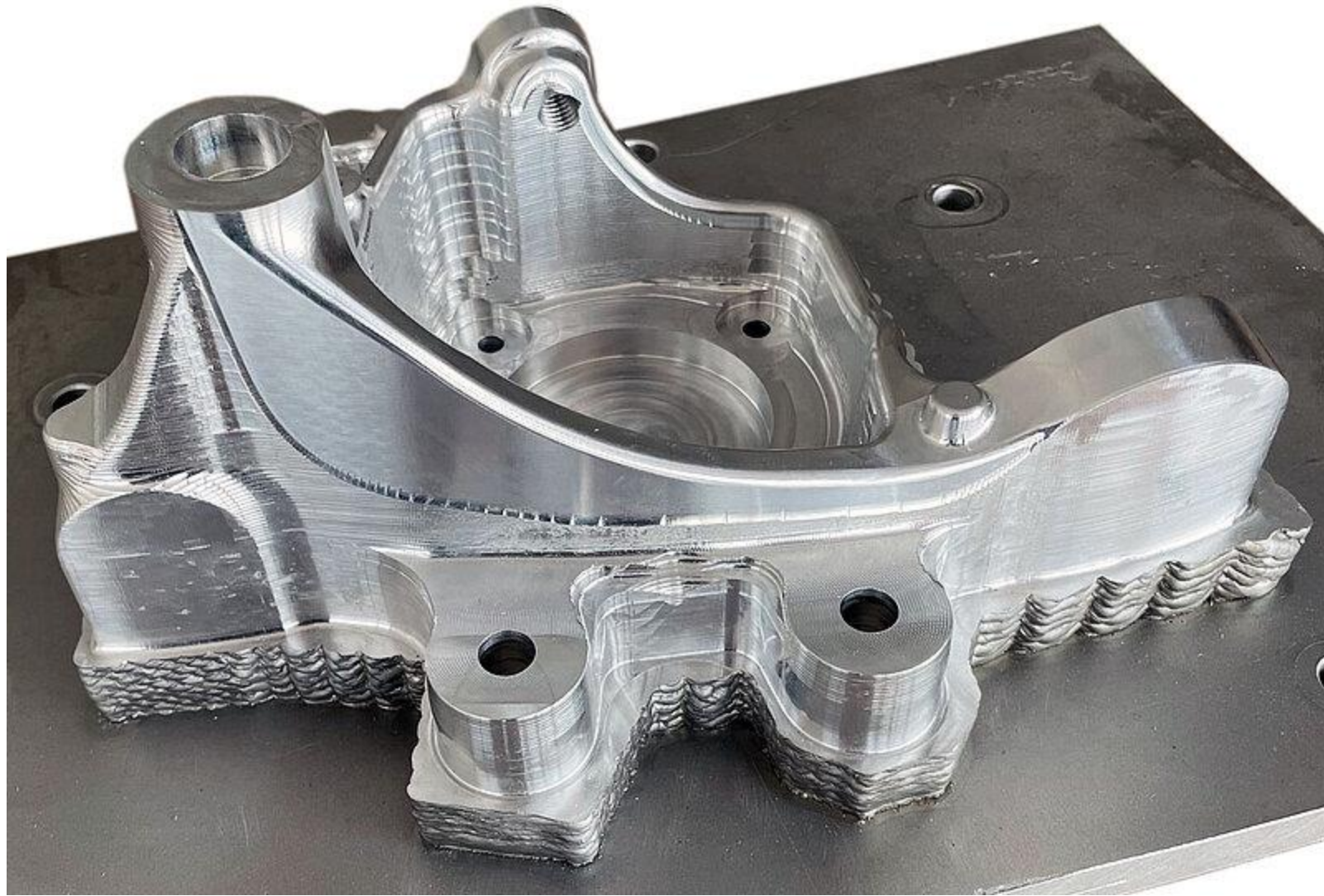


FMT



Euroopan unionin
osarahoittama





Lähde: <https://www.migal.co/en/waam>



Euroopan unionin
osarahoittama



UNIVERSITY
OF OULU



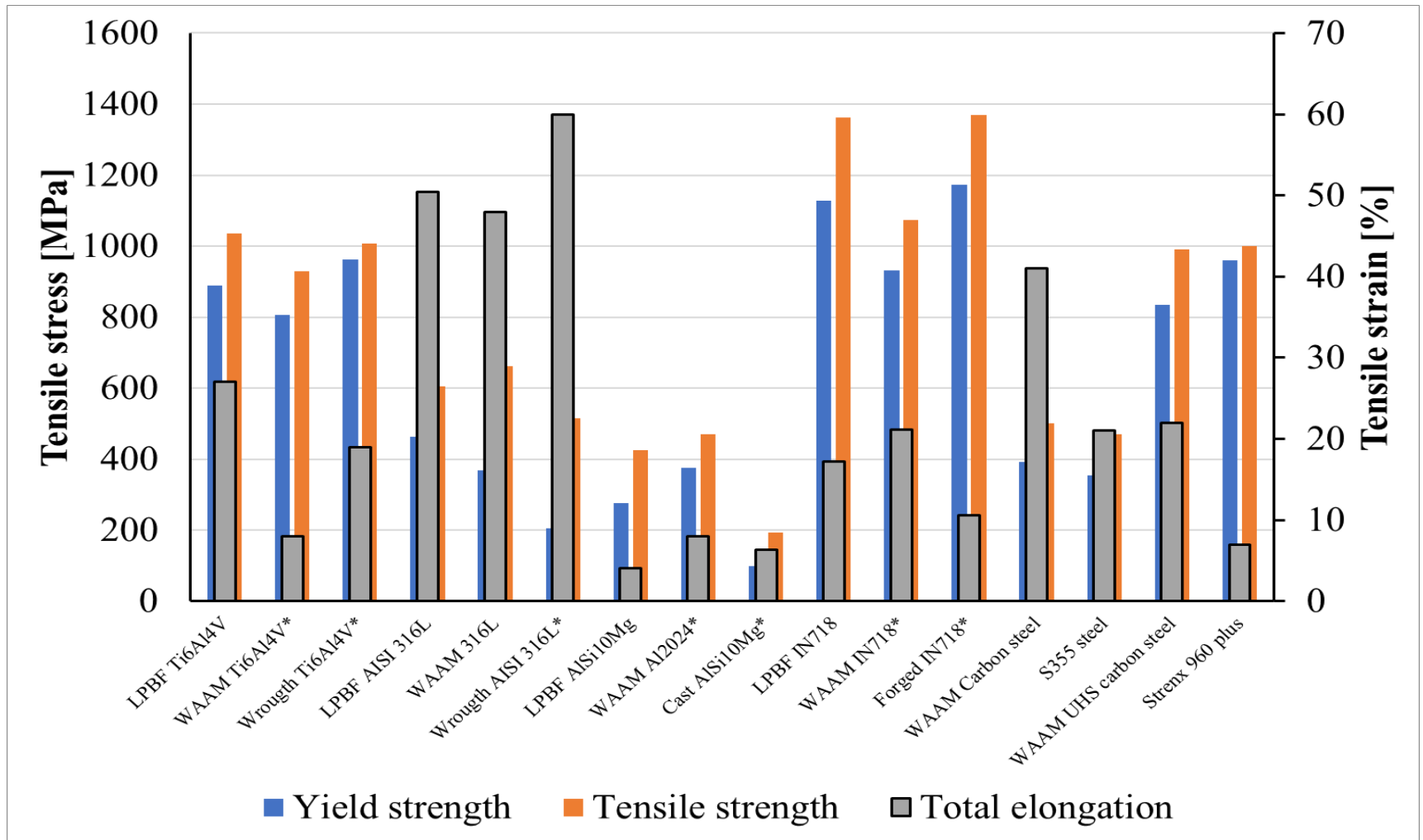
FUTURE MANUFACTURING
TECHNOLOGIES



3DTY

Materiaalit

- Lähes kaikki hitsauksen lisäainelangat jotka soveltuvat monipalkohitsaukseen
- Muutama DED käyttöön suunniteltu lanka
 - Esim Böhler 3Dprint AM lankasarja
- Kuten yleensä hitsauslisäaineiden kanssa hitsi on lujempaa kuin perusmateriaali mutta venymä on vaatimattomampi



DREAMS-project, DIMECC-Uni.Oulu / SSAB datasheets

Wire + Arc Additively Manufactured Inconel 718: Effect of post-deposition heat treatments on microstructure and tensile properties, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108157>

Microstructure, defects, and mechanical properties of wire + arc additively manufactured Al Cu4.3-Mg1.5 alloy, DOI: 10.1016/j.matdes.2019.108357

Investigation into the influence of the interlayer temperature on machinability and microstructure of additively manufactured Ti-6Al-4V, <https://doi.org/10.1007/s11740-023-01192-9>

Microstructure and Mechanical Properties of Wrought and Additive Manufactured Ti-6Al-4 V Cylindrical Bars, <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2015.07.037>

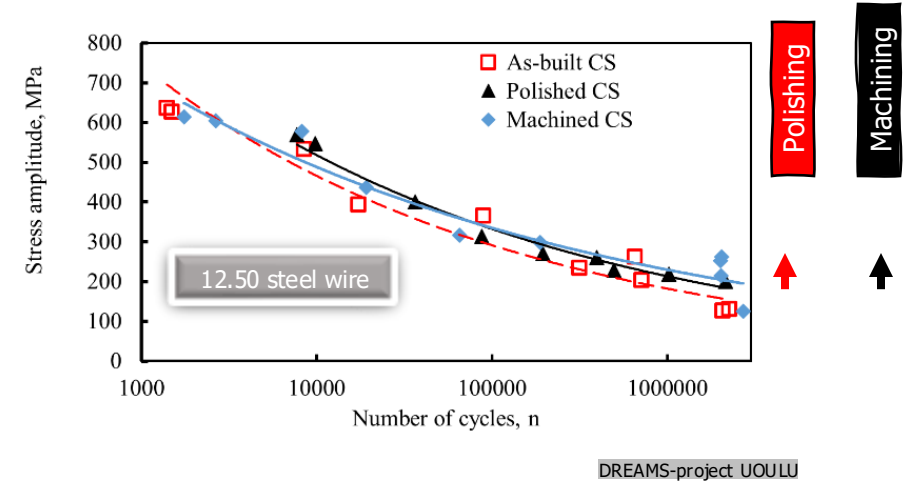
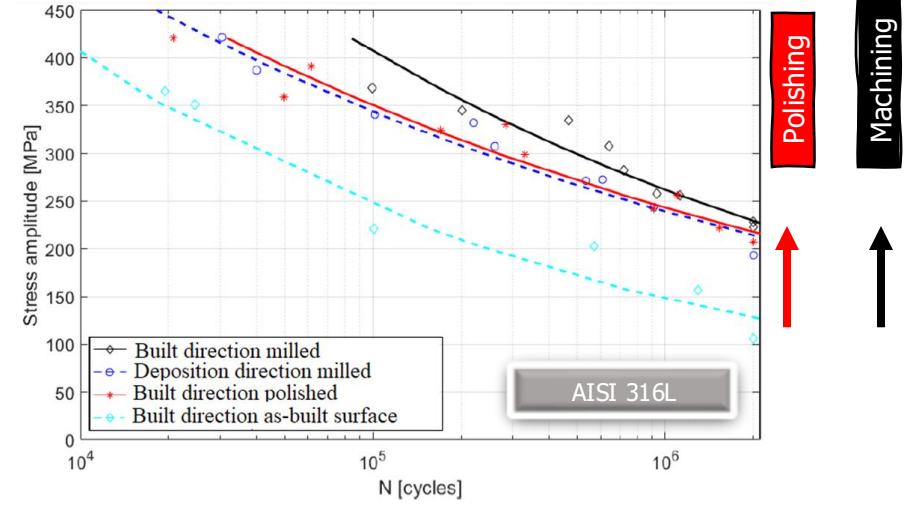
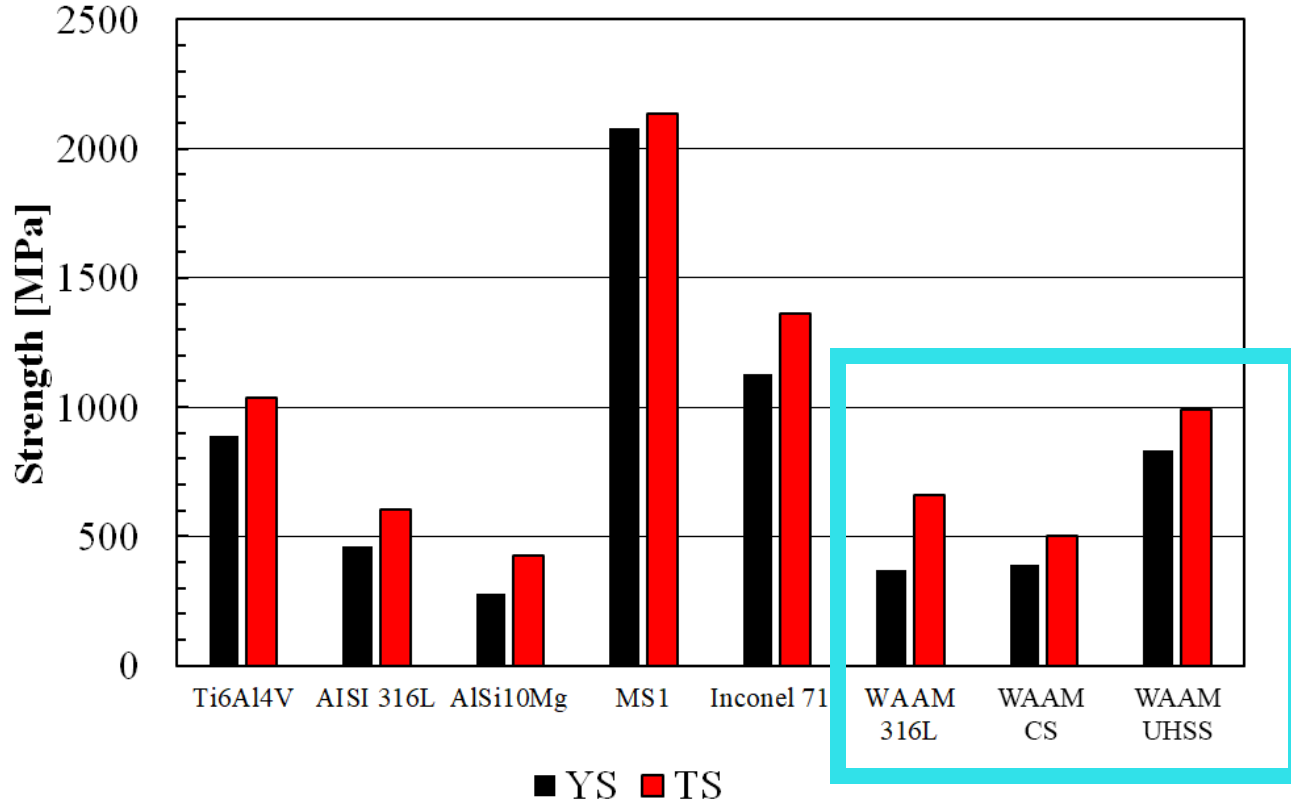
Mechanical properties and microstructure of AISI10Mg alloy obtained by casting and SLM technique



Euroopan unionin
osarahoittama

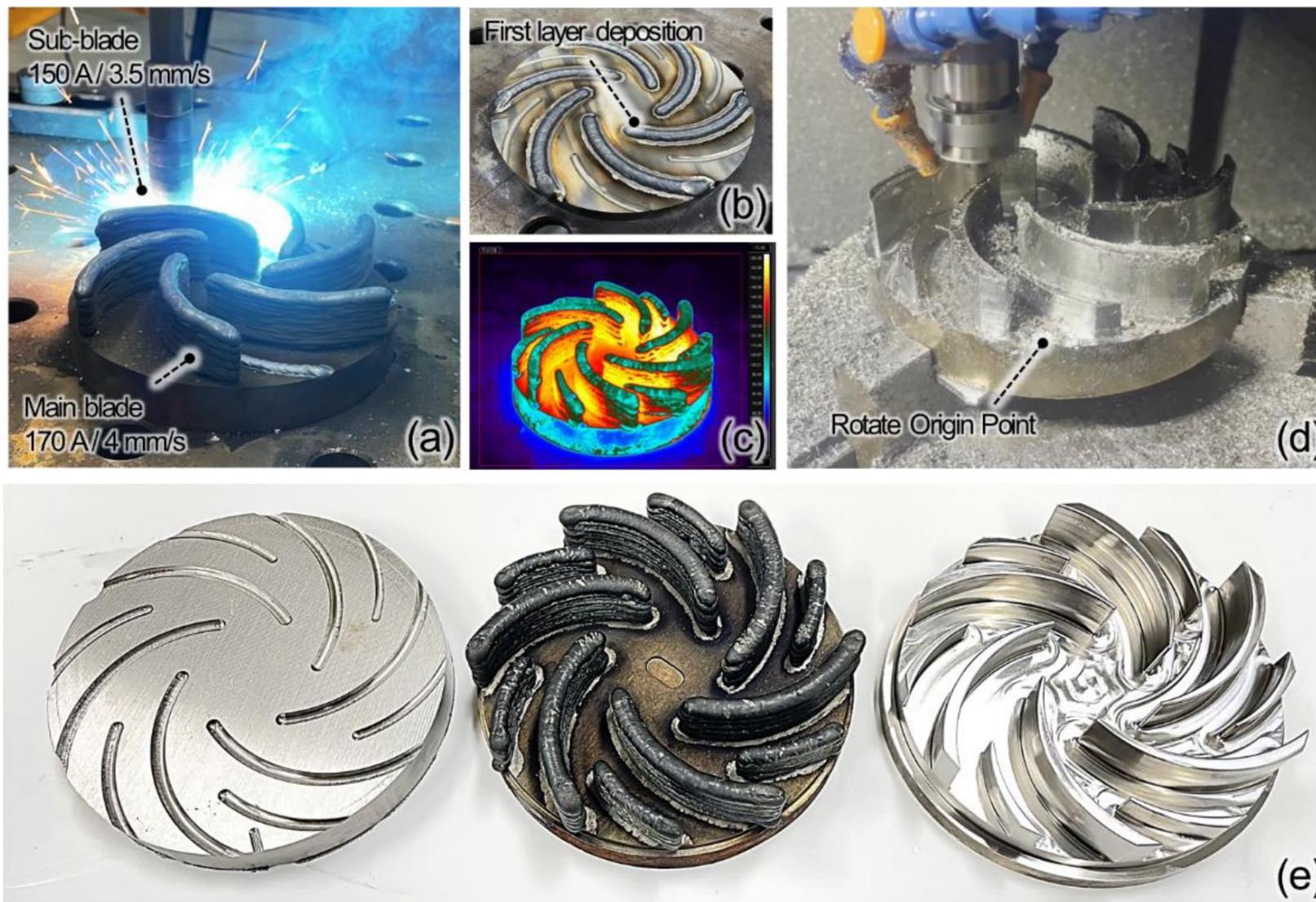


Materiaalit



Euroopan unionin osarahoittama





Son, H.J., Seo, B.W., Kim, C.J. *et al.* Coordinate system setting for post-machining of impeller shape by wire arc DED and evaluation of processing efficiency. *Sci Rep* **14**, 18262 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-68723-x>



Euroopan unionin
osarahoittama



Yhteenvetoa

- DED standardit ja oppaat – kannattaa tutustua!
- Yleisestä yksityiskohtiin ja takaisin
- Oikea määrä oikeaa materiaalia oikeaan paikkaan
- Tulostusalustan rooli osana kappaletta
 - Levy, napa, rakenne...
- Valmistusmenetelmän kyvyt ja rajoitukset
- Tarkat yksityiskohdat koneistamalla



Euroopan unionin
osarahoittama





KIITOS!



FMT

**FUTURE MANUFACTURING
TECHNOLOGIES**

**Contact Information:
Development Manager Kari Mäntyjärvi
040 084 3050
kari.mantjarvi@oulu.fi**

