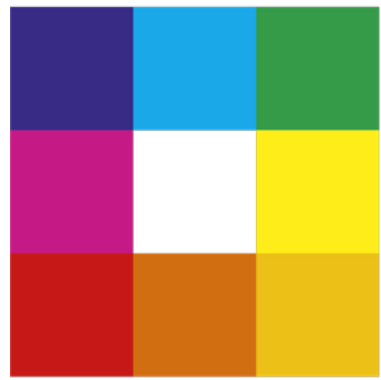




# LAND OF THE CURIOUS





# TEKNOLOGIA<sup>25</sup>



TEKNOLOGIA25 06.11.2025

## SUURIKOKOISTEN METALLIKAPPALEIDEN WAAM-TULOOSTUS

**WAAM** on *tuottavin* (2-5 kg/h) ja *ainut* AM-prosessi suurten (m<sup>3</sup>) metallikappaleiden valmistamiseksi

Hannu Lund | TkT, IWE

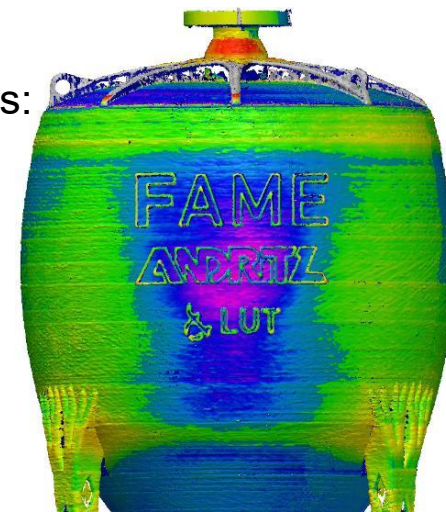
Tutkijatohtori

Hitsaustekniikka

LUT Yliopisto



Painekoestus:  
111 [bar]



Lähde [1]

# SISÄLTÖ:

- » WAAM perusteet
  - » Laatutekijät
  - » Prosessinhallinta
  - » Laitteistot ja ohjelmistot
- » Menetelmät
  - » Slicing vs Etäohjelmointi
- » Tulokset
  - » Ristikkorakenne
  - » Pyörähdyssymmetrinen kappale
- » Yhteenveto



WAAM-ristikkorakenne väsytykskoeksessa.

Lähde [4]

# WAAM PERUSTEET

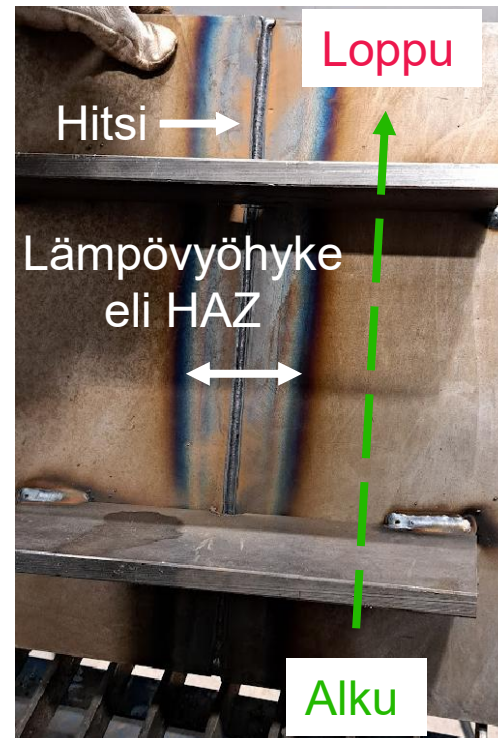


LUT:n hitsauskoulutukset WAAM:iin. IWE/IWT (Kansainvälinen hitsausinsinööri), sekä Hitsausinsinööri (DI)

## Hitsaus –

*”Yhdistää ja lisää materiaa”*

- Sulatetaan materiaalia
  - Paljon lämpöä
  - Jäähdytysnopeus
- Lisätään materiaalia
  - $V_{\text{langansyöttö}} \times Q_{\text{lämmöntuonti}}$
- Hitsejä 1 - muutamaa kymmeneen



## WAAM –

*”Luo uusia mahdollisuuksia”*

- » **Prototyypittää** uusia tuotteita, osia tai osakokoonpanoja
- » **Rakenteet ja muodot** joita ei voi tai kannata tehdä perinteisillä valmistusmenetelmillä
- » Lisätään kerroksia, 1000 kerrosta noin 1-2 m korkeutta
- » Materiaali ja lämpö pintakerrokseen, minimoidaan sulatus

# WAAM LAATUTEKIJÄT

**Vakioi nämä!**

Panos:

Esilämmitys ja työlämpötila

Polttimen kuljetus

Hitsiaineentuotto [kg/h]

Lämmöntuonti [kJ/mm]

Tuotos:

Hitsin muoto, leveys & korkeus [mm]

Lämpösykli ja jäähtymisajat

Materiaaliominaisuudet, mekaaniset ominaisuudet & väsymisominaisuudet

Mikä vaikutus rakenteeseen?

Rakenne

Kerros 0

Kerros n+1

WAAM

Mikä vaikutus mekaanisiin ominaisuuksiin?

WAAM  
Laadun  
tuottotekijät

Valmistus

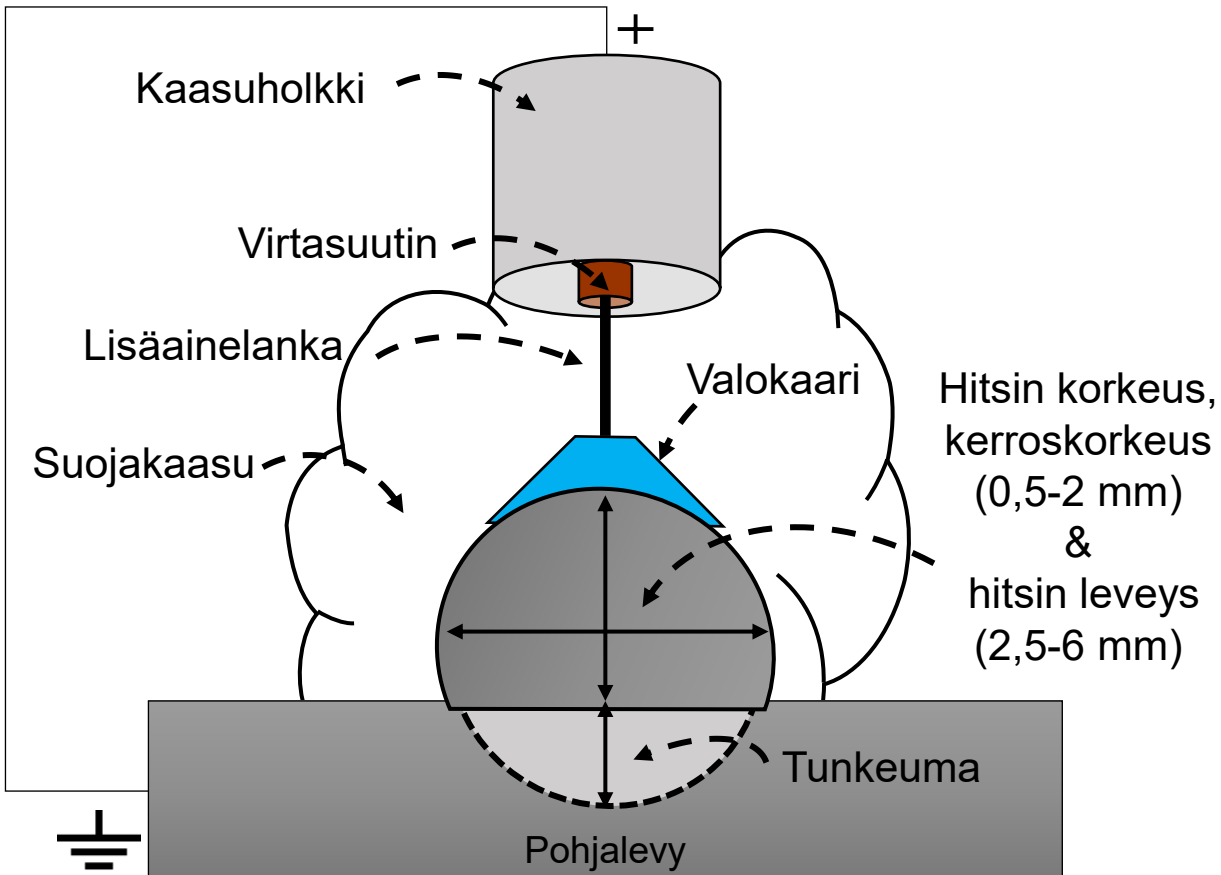
Mikä vaikutus materiaaliin?

Materiaaliominaisuudet

# PROSESSINHALLINTA

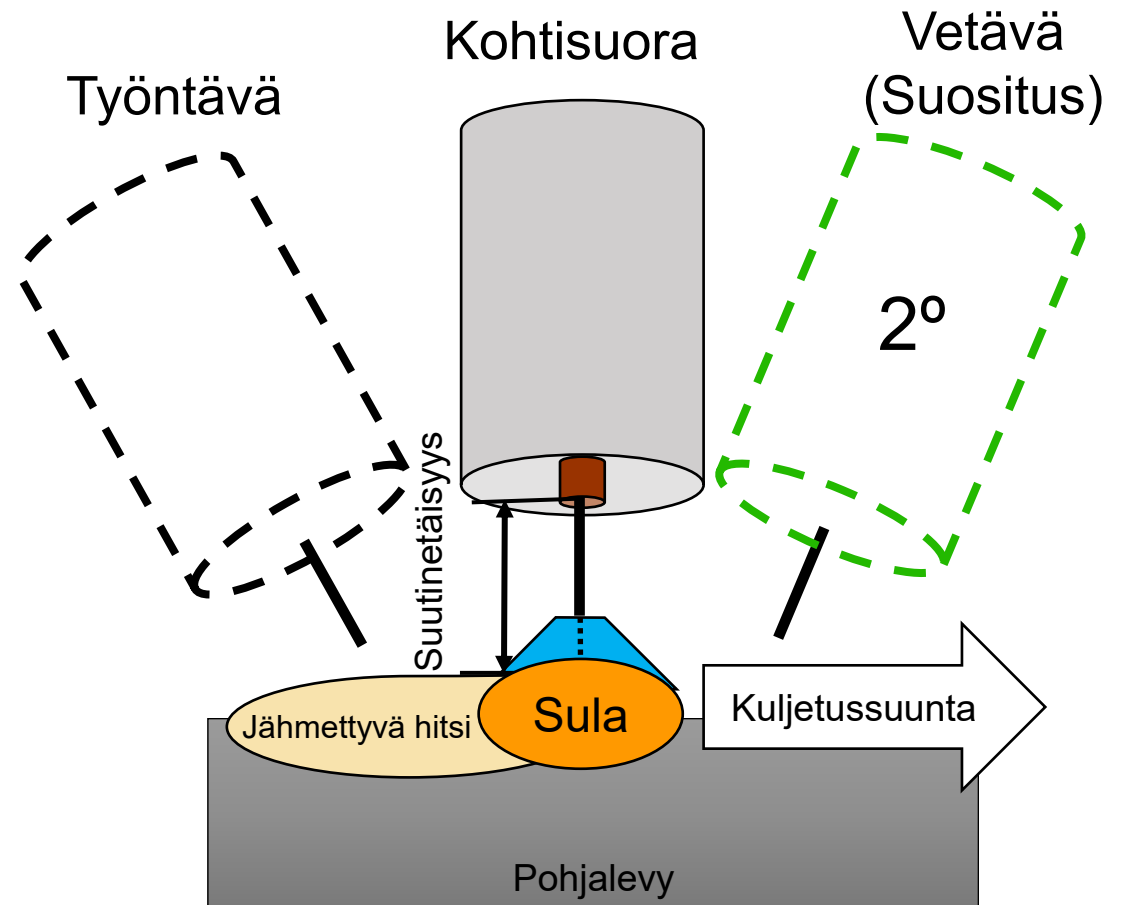
## Hitsausvirtalähde hoitaa:

S355-S1100: Langansyöttönopeus  $7 \pm 0.5 \dots 1$  [m/min]  
Jännite hienosäätö  $\pm 2 \dots 5$  [V]



## Robotti hoitaa:

Vakioi: Kuljetusnopeus 10 [mm/s], suutinetäisyys 18 mm



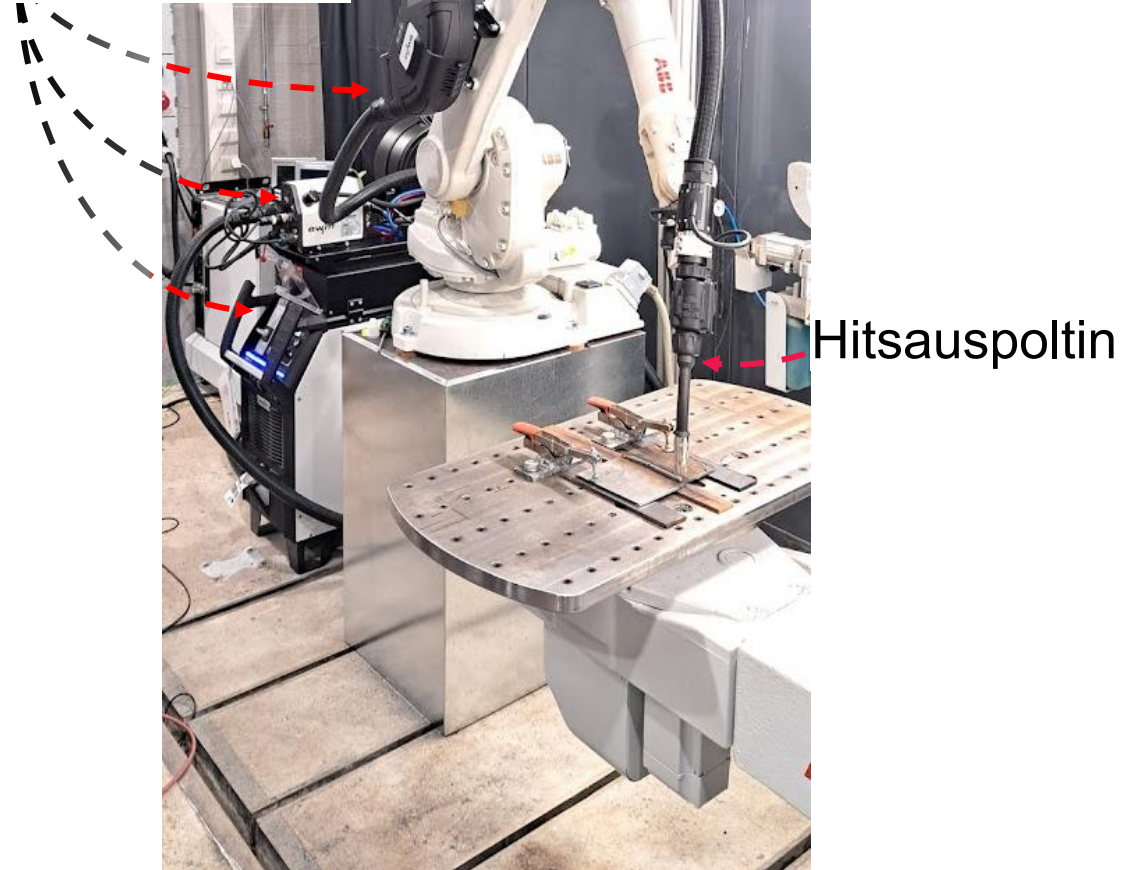
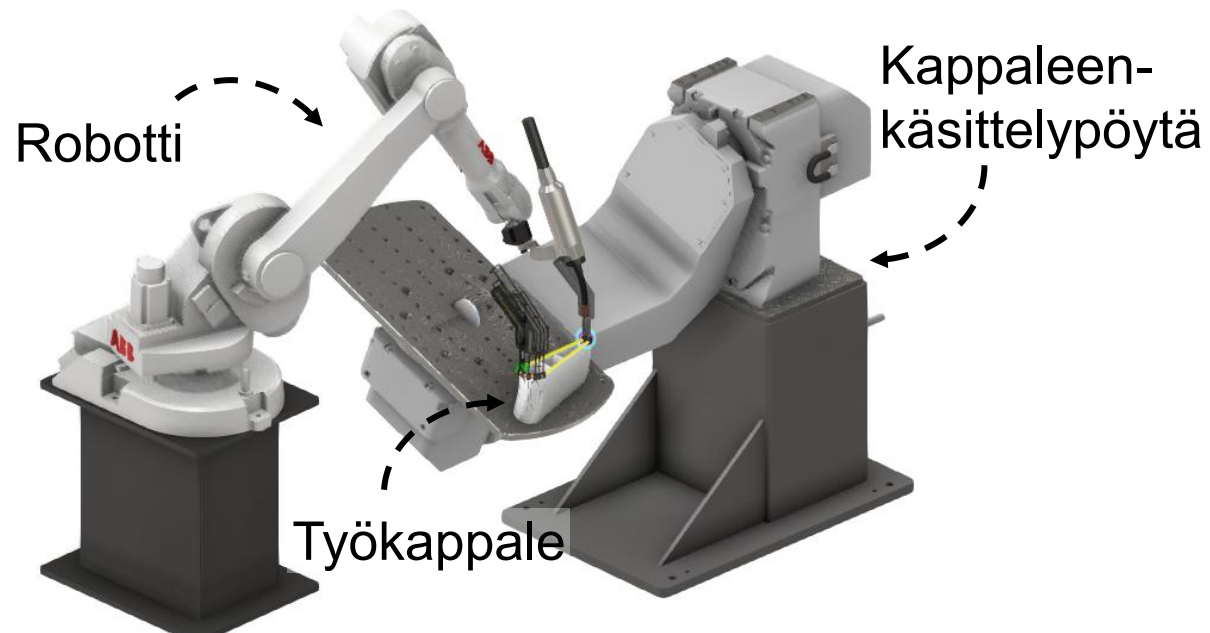
# LAITTEISTOT JA OHJELMISTOT

Hitsausvarustus:

- Virtalähde
- Langansyöttö
- Suojakaasu
- Johtosarja

**Näillä pääset alkuun:**

- 1. Robottiasemat:** ABB & Yaskawa
- 2. Hitsausvarustus ja virtalähteet:** EWM & Kemppi, (MIG/MAG)
- 3. Etäohjelmointiohjelmistot:** ABB RobotStudio + G-koodi Slicer & Visual Components Robotics OLP:



## Näillä pääset alkuun:

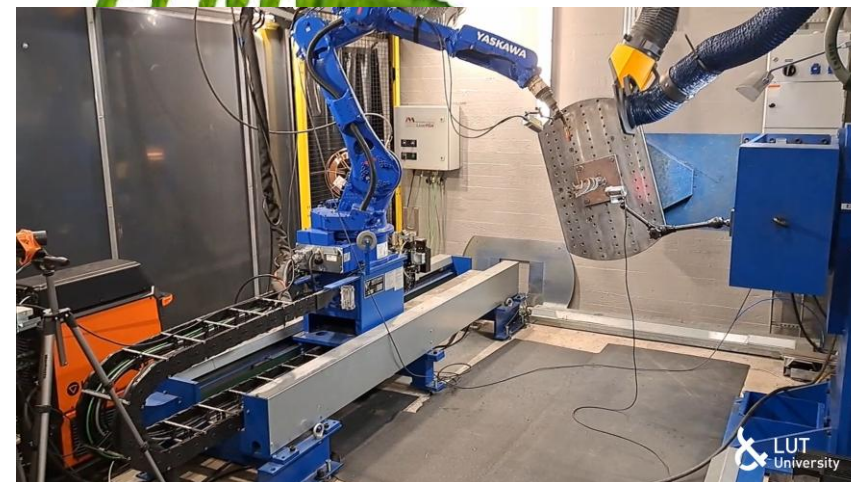
1. **Robottiasemat:** ABB & Yaskawa
2. **Hitsausvarustus ja virtalähteet:** EWM & Kemppi (MIG/MAG)
3. **Etäohjelmointiohjelmistot:** ABB RobotStudio + G-koodi Slicer & Visual Components Robotics OLP

## Hyvä olla:

- » **Anturit ja monitorointi:** Cavitär Hitsauskamera, webkamera, railonhakuanturointi & lämpökamera tai pyrometri
- » **WAAM-menetelmäohje:** Jokaiselle muodolle ja yksityiskohdalle

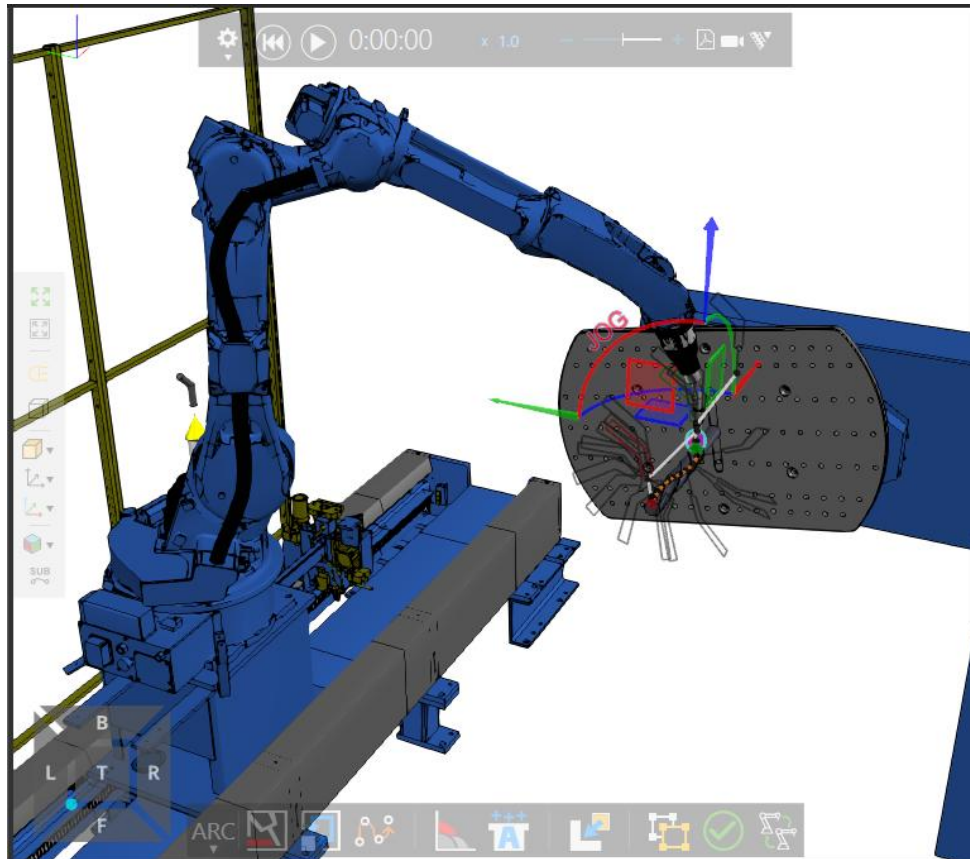
## Jos nyt oikein tarkkoja ollaan niin...

- » **Laadunvarmistus:** Metallografiset tutkimuslaitteet, 3D-muodonmittauslaitteet, NDT ja DT testauslaitteet
- » **Mallinnus & simulointi:** Simufact Welding, & muut FEM-mallinnusympäristöt



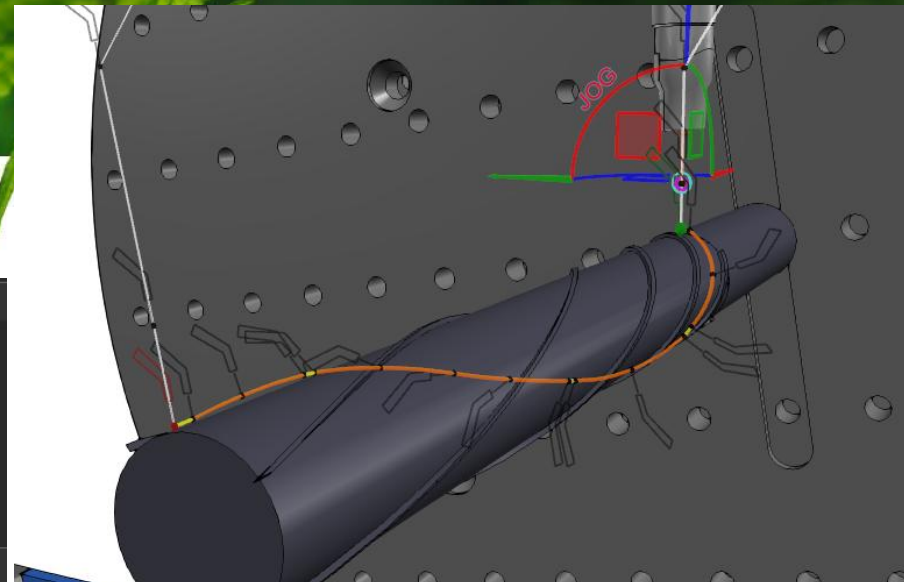
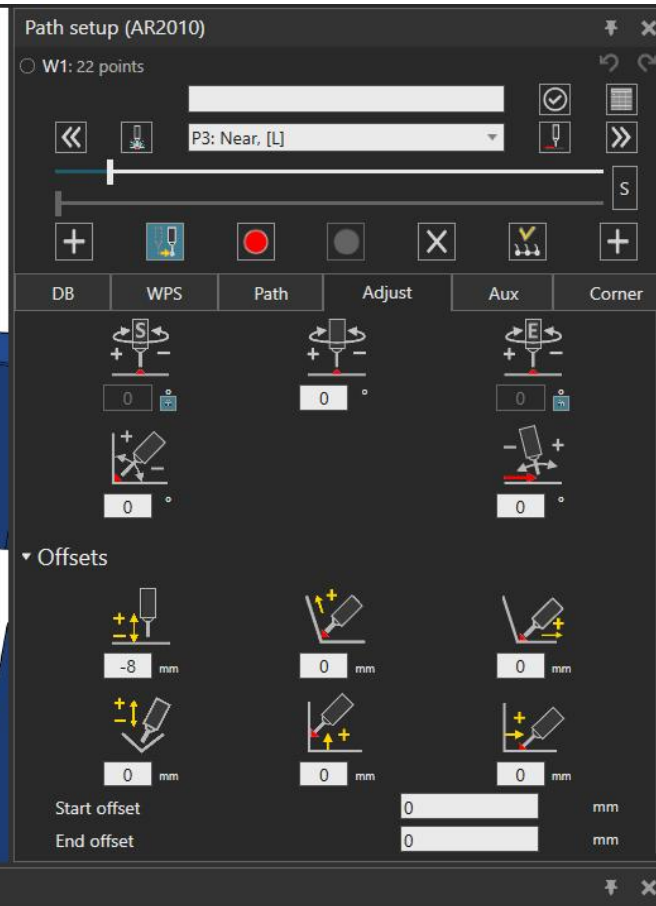
# ETÄOHJELMOINTI: CAD TAI G-KOODI

## Simulointi



Visual Components OLP

## Prosessiliikeradan säätö



Tunnistettu muoto ja liikerata



Euroopan unionin  
osarahoittama



# SUURIKOKOISTEN METALLIKAPPALEIDEN WAAM-TULOSTUS



Euroopan unionin  
osarahoittama

# THE LUT HITSAUSTEKNIikka METODI

Tutkimuksen 1. vaihe

Tiedonkulku ja takaisinkytkentä DED-Kaassa

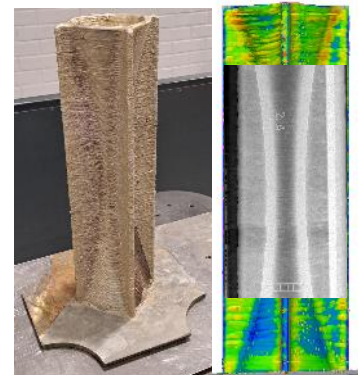
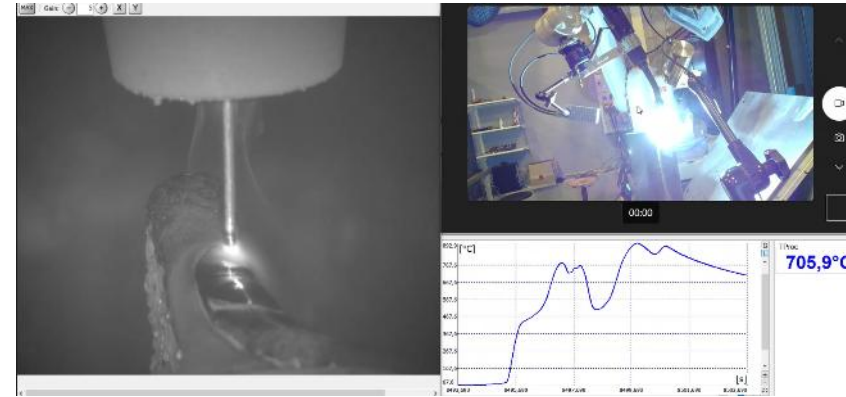
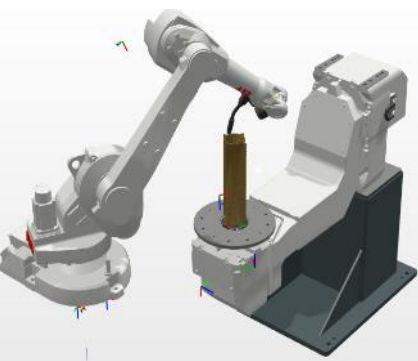
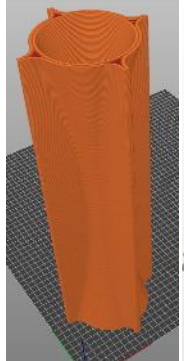
Suunnittelu

DED-valmistuksen suunnittelu

DED-Kaari testaus

DED-laatu

Case 1:



CAD-malli

Simulointimalli

+

Parametrit

+

Liikerata

→

Tulostusohjelma

→

Esivalmistelut

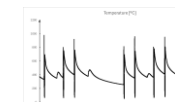
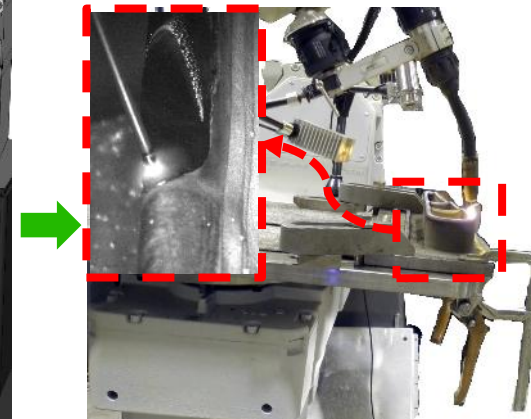
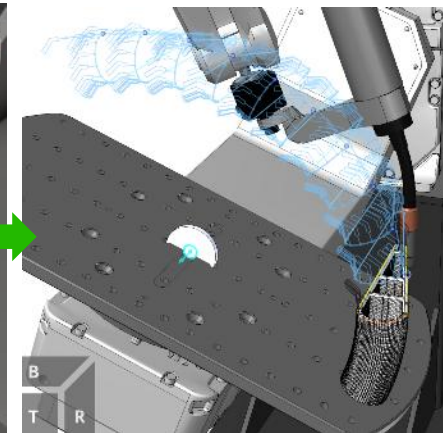
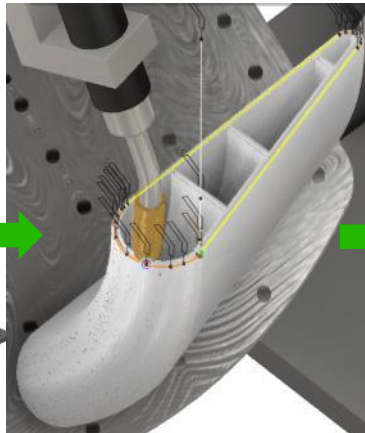
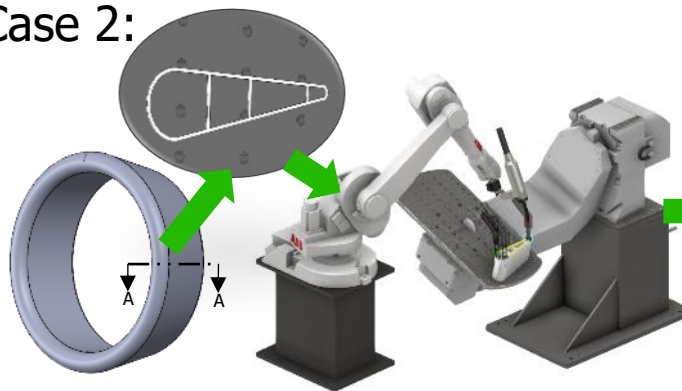
+

Monitorointi & ohjaus

→

Mittaus

Case 2:



$\Delta T$  °C

Q [kJ]

$\Delta \theta$



Euroopan unionin osarahoittama



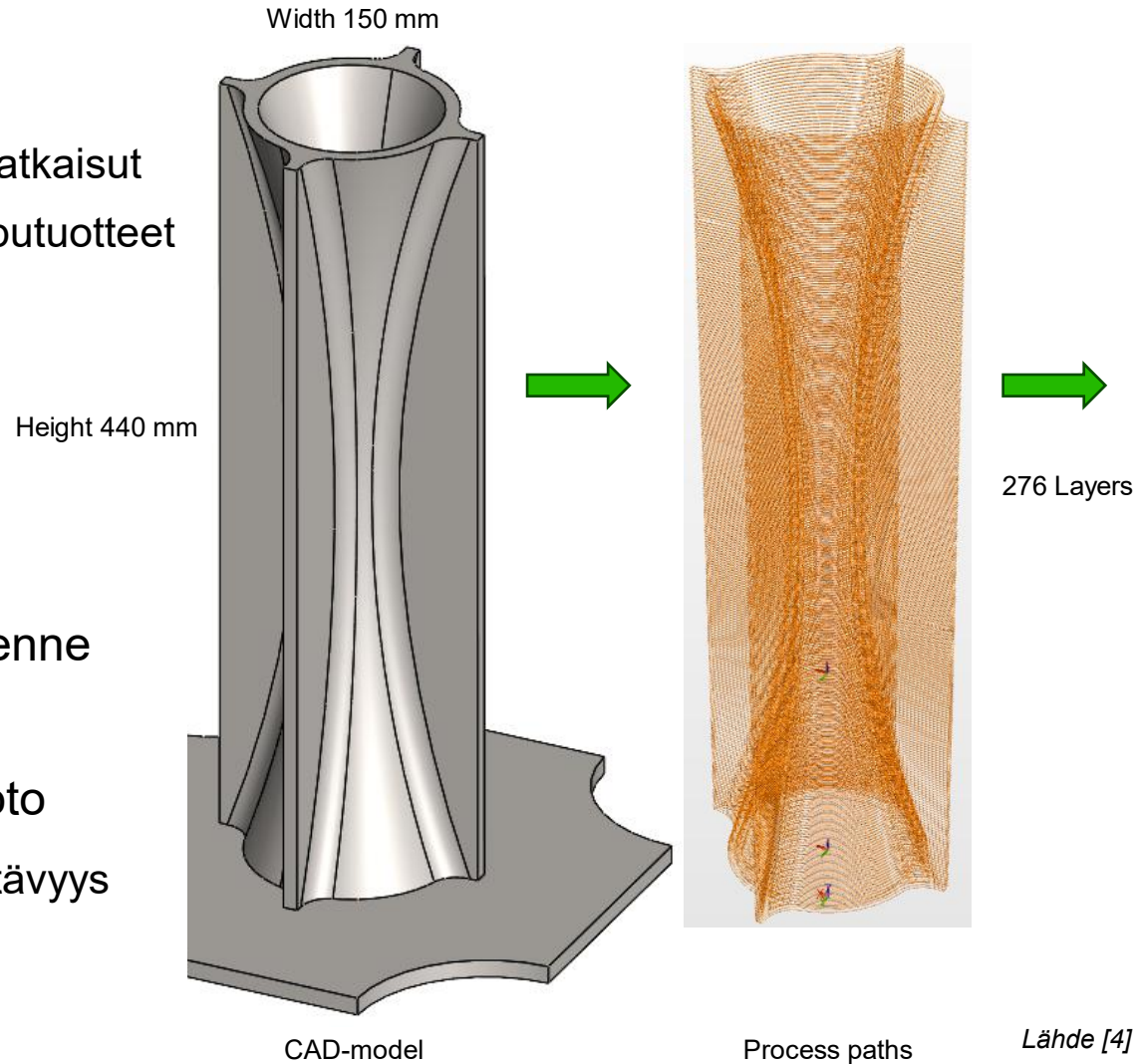
# CASE 1: MUUTTUVAMUOTOINEN WAAM

## »» Käyttökohde:

- »» Vaativat rakenneratkaisut
- »» Painokriittiset lopputuotteet

## »» Tavoite:

- »» Kevyempi rakenne
  - -8 kg
- »» Optimoitu muoto
  - Väsymiskestävyys



Lähde [4]

# SLICING JA PARAMETRITESTAUS

## » G-koodi: *Prusa Slicer*

- » Liikeradat
- » Muoviparametrit -> **metalliparametreiksi**
- » Kerroskorkeus, hitsin leveys, täytön leveys ja limittäisyys

● Layer height:

● Default extrusion width:

● Infill:

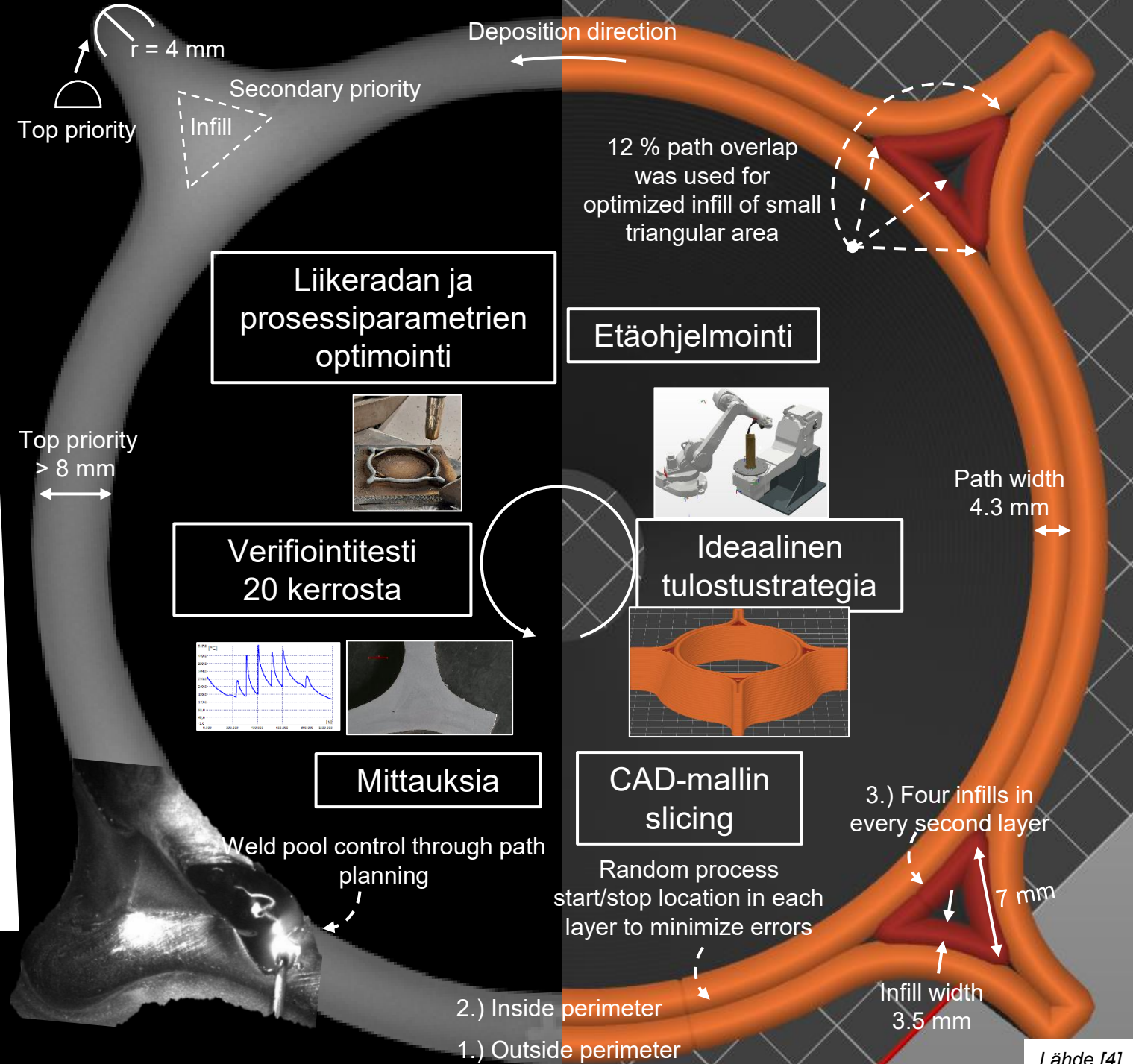
● Infill/perimeters overlap:

### +Tulostusliikeradat automaattisesti

- Liikaa pisteitä robotille ja muuta turhaa koodia
- Ei ulkoisia akseleita
- Vain Z-suunta
- Ei ymmärrä metalleista mitään

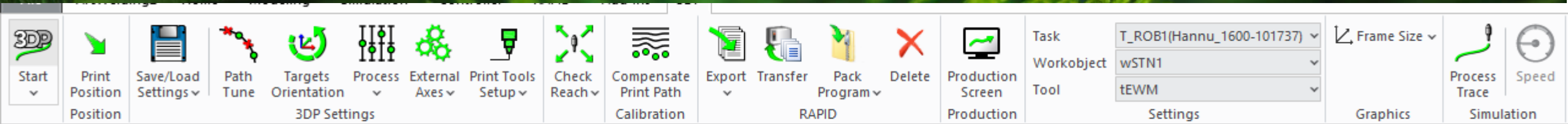
## » G-koodi -> ABB RobotStudioon etäohjelmointia varten

- » Poltinkulmat, hitsausparametrit ja viimeistelysäädot
- » **Hienosäätö hankalahkoa**



Euroopan unionin  
osarahoittama

# ETÄOHJELMOINTI: ABB ROBOTSTUDIO JA 3D-PRINTING POWERPACK



Layout Paths&Targets ABB-EWM\_12.09.24\_2:View1 x

3D

Info

File name: 3DTY\_0.4n\_1.6mm\_PETG\_MK4S\_3h59m.gcc

Points: 7 689

Layers: 101 (1 - 101)

Layer Height: 1,6 mm

Extrusion Length: 53 986 mm

Process Data

| Process | Process Speed | Process On/Off Zone | Process Intermediate |
|---------|---------------|---------------------|----------------------|
| Arc     | v400          | fine                | z0                   |

External Axes

| Mechanism | Joint | Type        | Angle  |
|-----------|-------|-------------|--------|
| STN1      | J1    | Fixed value | 90 deg |
| STN1      | J2    | Fixed value | 0 deg  |

Pyörityspöydän kääntö mahdollista vain 1 akselin suuntaan

G-koodissa määritettävä useamman ulkoisten akselien liikkeit

Hienosäätö hankalahkoa

## 1. Vakioi hitsausmetallurgiset ja -tekniset muuttujat

» (Lämmöntuonti,  $Q(I, U \& v)$  ja materiaalin syöttö (m/min), polttimen kohdistus- ja kuljetuskulmat)

## 2. Monitoroi materiaalin **lämpöä** ja vakioi välikerroslämpötila

» Vaikutus muotoon. (Mustat teräkset 150-250°C)

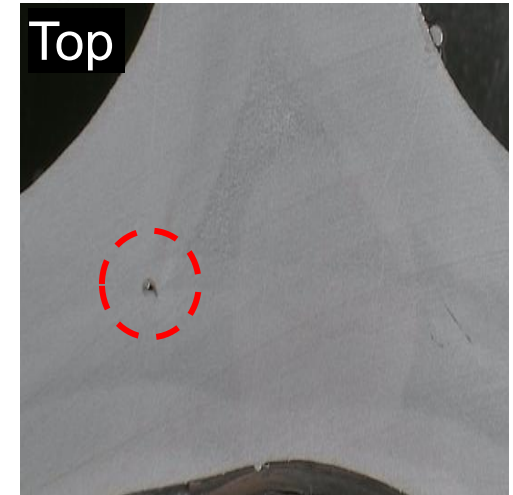
## 3. Haasteena tuottavuudelle ja laadulle: **Sulan ja lämmön hallinta,**

**Ulkoinen jäähdytysjärjestelmä / Useampi tuloste**

» Liika lämpö hidastaa sulan jähmettymistä ->  
» kerroskorkeus ja hitsin leveys muuttuvat

## 4. Monitoroi suutinetäisyyttä (noin 18 mm) ja säädä tarvittaessa

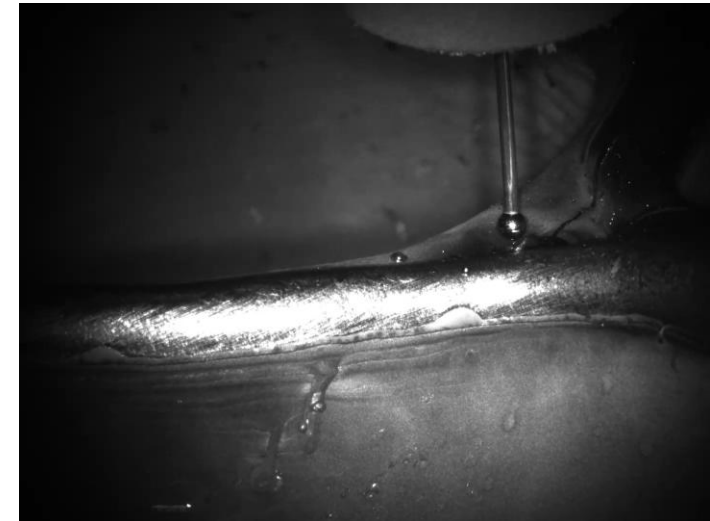
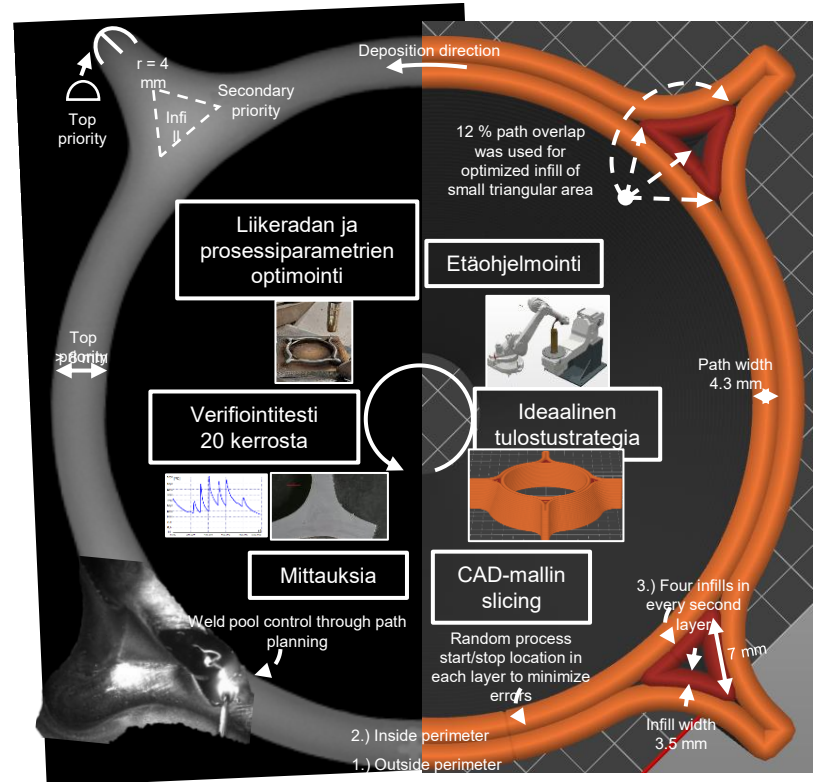
» Kerroskorkeus, tai työkoordinaatisto



Täytön virheet toistuvat systemaattisesti,  
**Parempi jos kappale valmistettaisiin 2 yhtenäisellä palolla**

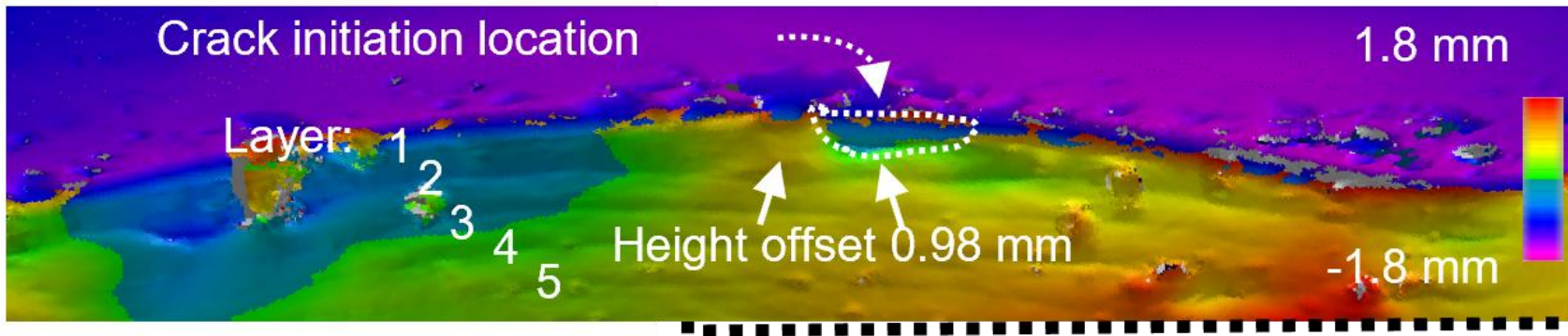
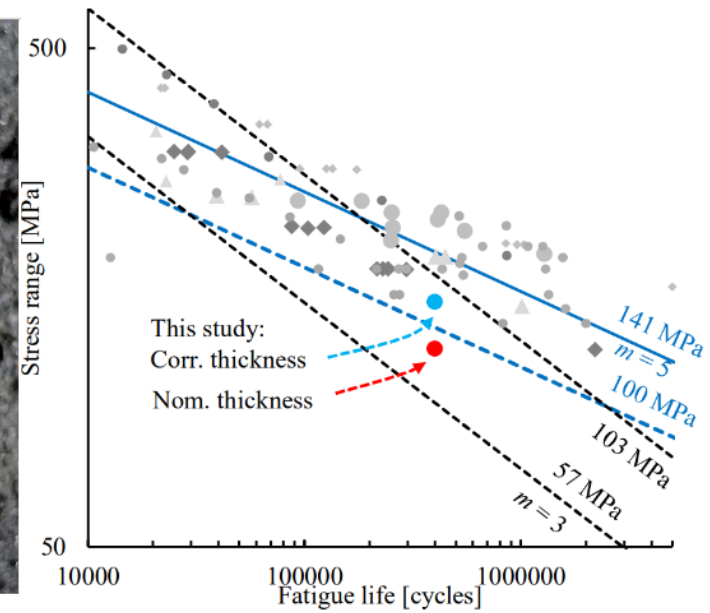


- » Ulko- ja sisäkehä:
  - » prosessi vakaa,
  - » pienet täytöt hankalia
- » Robotstudion optimoi G-koodin
  - » Ei täysin tottele ideaaliliikeratoja
  - » G-koodissa liian tiheään pisteitä robotille
  - » Tulostusmuodon tärkeitä pisteitä välttämättä säilytetä.
- » Aloitus- ja lopetuskohtia vaihdeltava



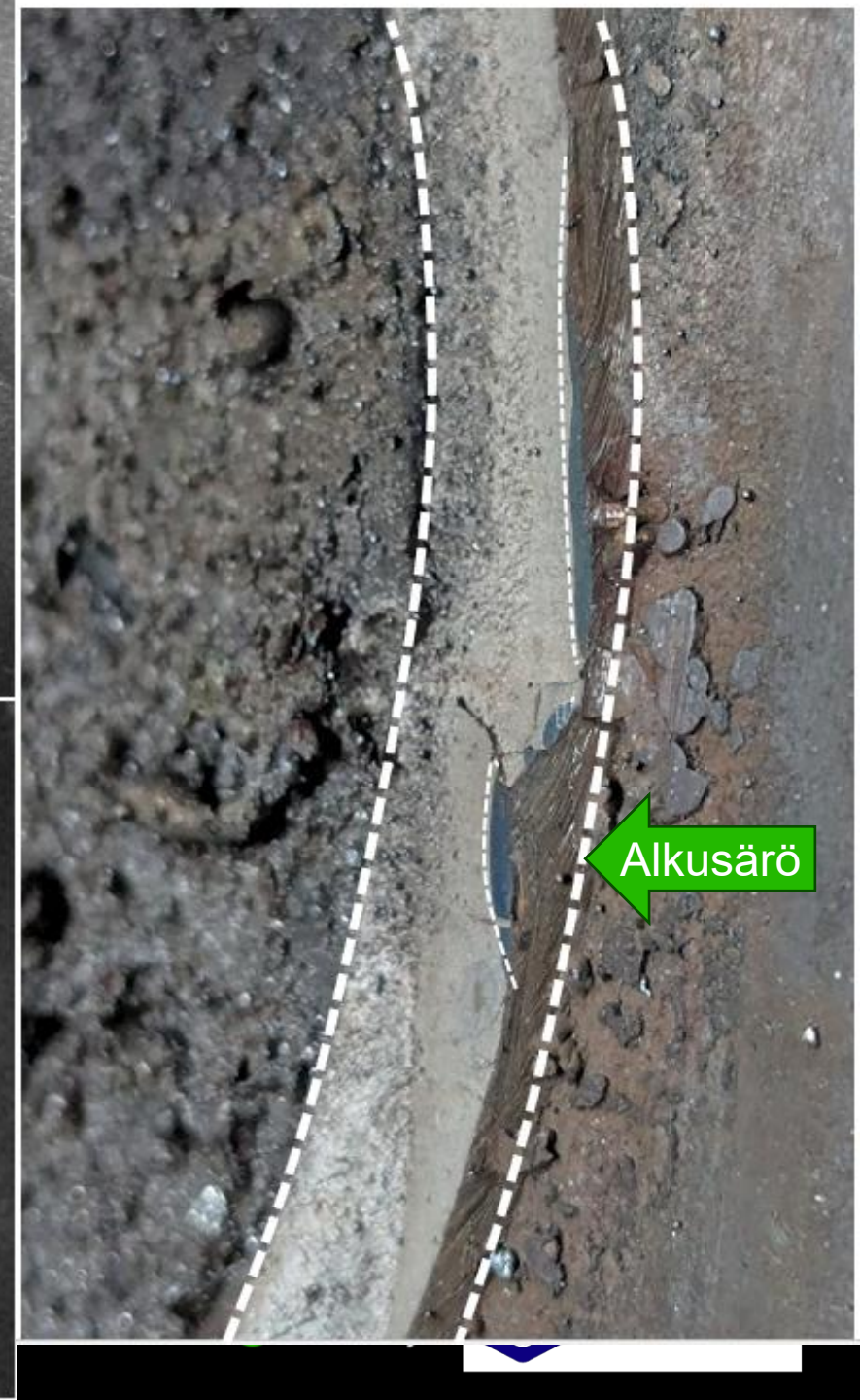
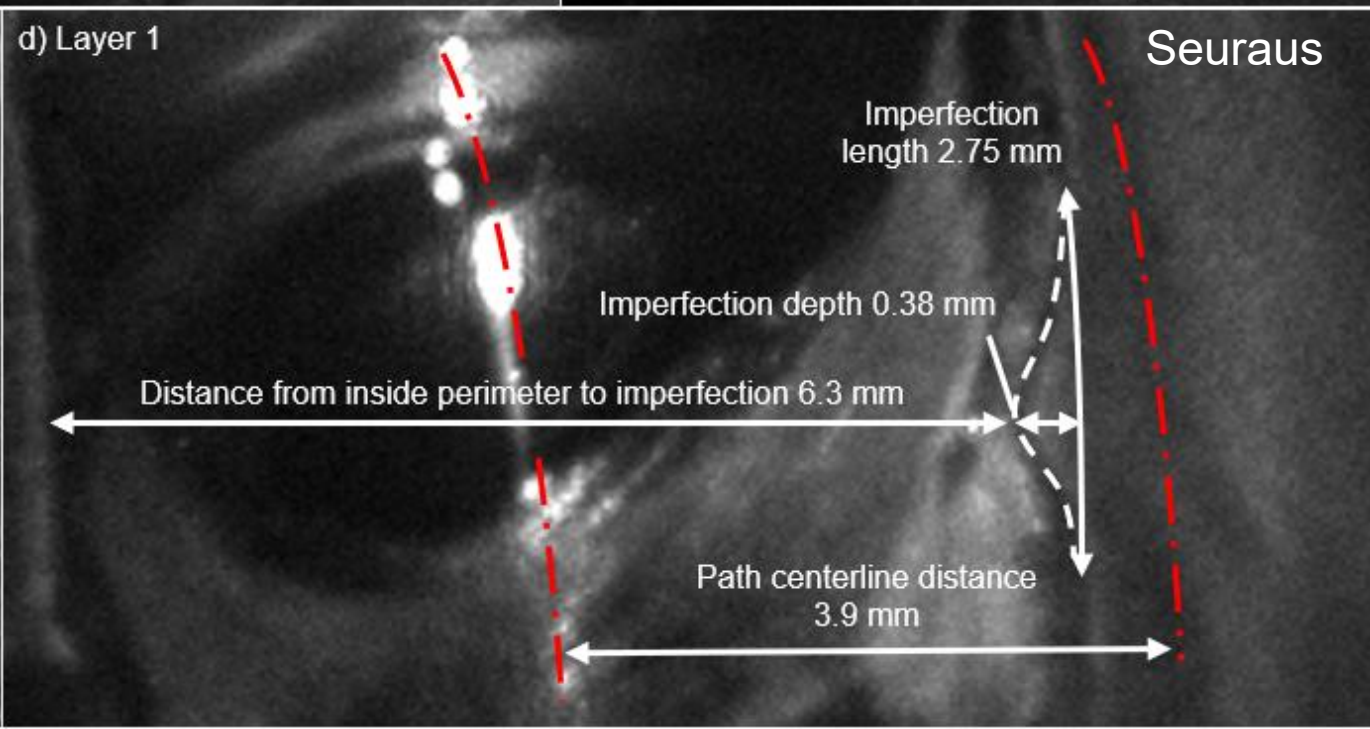
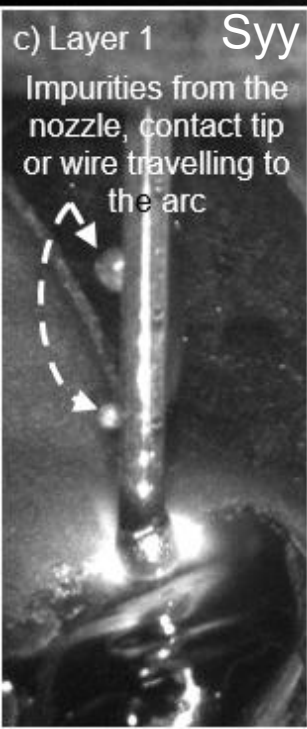
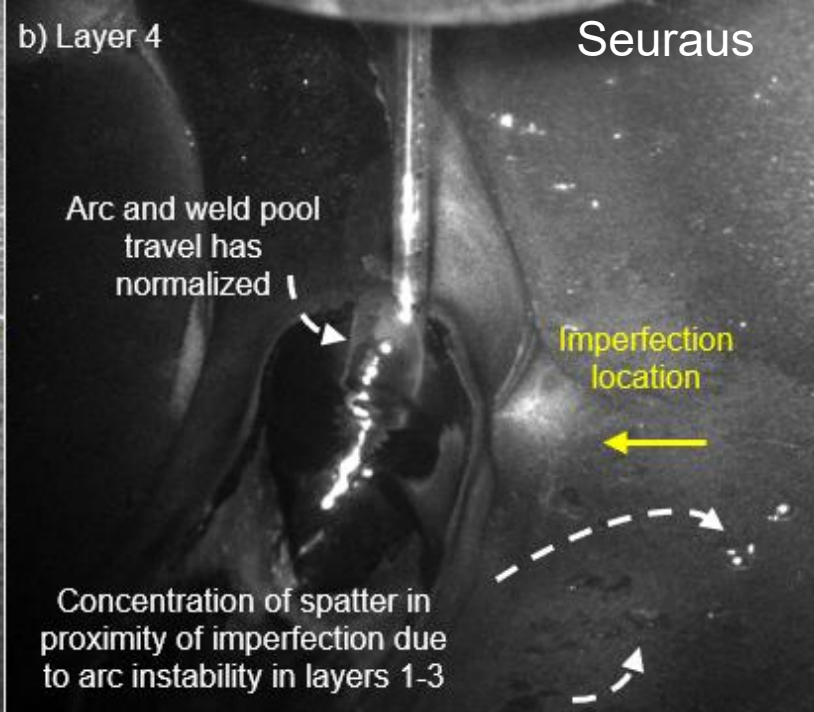
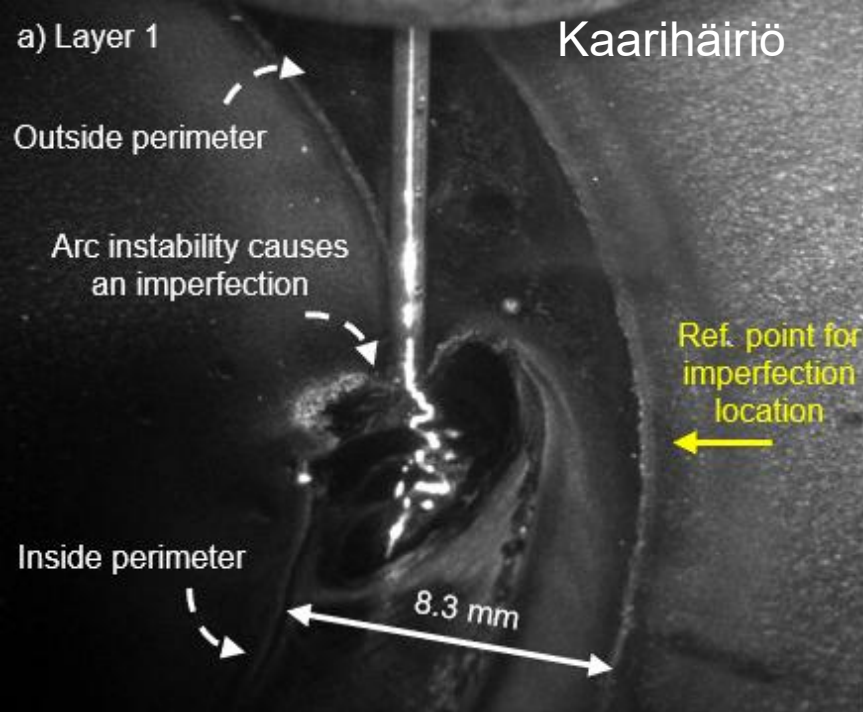
# MURTUMA JA VÄSYMISKESTÄVYYS

- » Tuloste + rakenne **kesti helposti nimelliskuorman** 200-1 kN ja 500t sykliä
- » **Ylikuormalla** (600-1 kN) tuloste rikkoutui (570t sykliä), nimellisseinämän paksuudella (8 mm) FAT 73 MPa  $m=3$  ja todellisella (6,5 mm) 90 MPa  $m=3$
- » Valmistuksen kannalta mielenkiintoisin tulos tapahtui **ensimmäisellä kerroksella**



Euroopan unionin  
osarahoittama

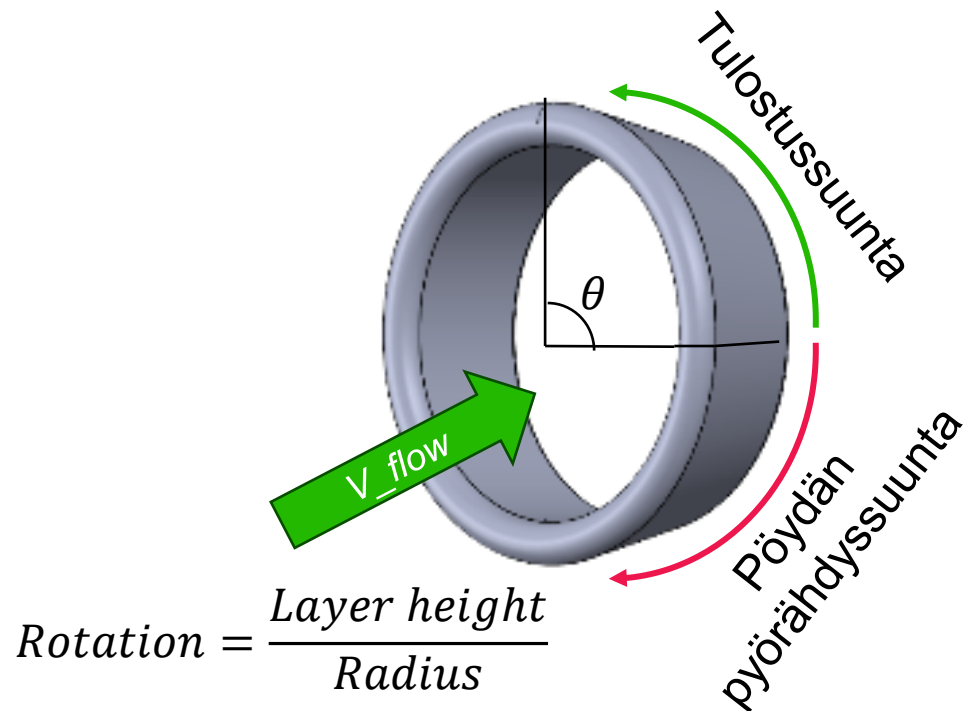




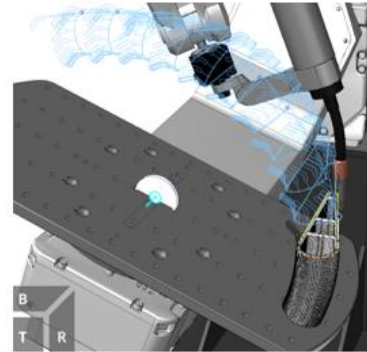
# CASE 2: PYÖRÄHDYSKAPPALEEN WAAM

## » Tavoite:

- » Muodon optimointi - pinnantasaisuus
- » Pyörähdyssymmetrisyys tulostettaessa
  - Sisä- ja ulkokehällä eri volyymi materiaa



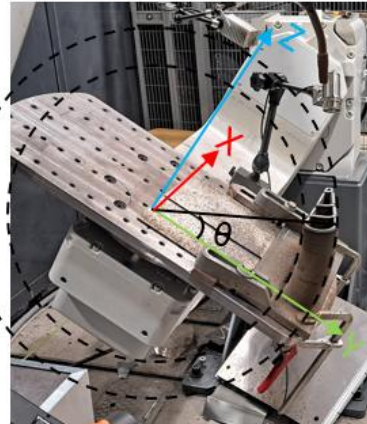
DED-Kaari prosessiparametrit jaettu sisä- ja ulkokehän mukaan



Tulostusstrategia



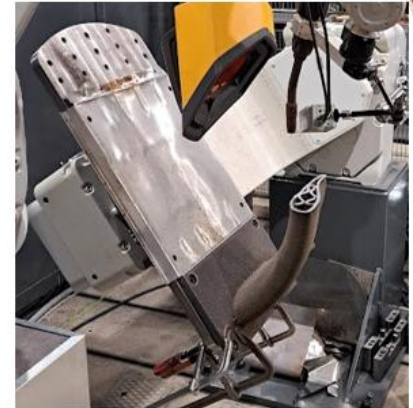
Sisäkehä Ulkokehä



Parametritesti



Jokaisella muodolla oma prosessiparametrinsä



Koekappale

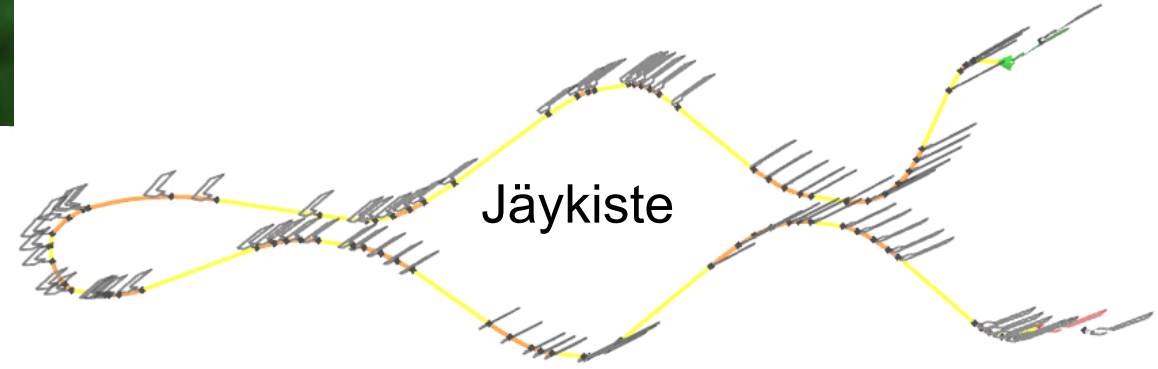
# TULOSTUSTRATEGIA 2

- » Poikkileikkausperustainen liikeradan ohjelmointi
  - » Sisä- ja ulkorata
- » Kerros voidaan valmistaa lähes keskeytyksettä
- » Jokaiselle muodolle:
  - » Oma hitsausmuuttuja
- » Aloitus- lopetusstrategia:
  - » Aloitus: ei oleellisesta kohdasta
  - » Lopetus: parametrisäädöllä ja ylihitsauksella
- » Sääto kuljetusnopeudella
  - » **Sisäkehällä suurempi nopeus** = vähemmän materiaalia
  - » **Ulkokehällä hitaampi nopeus** = enemmän materiaalia

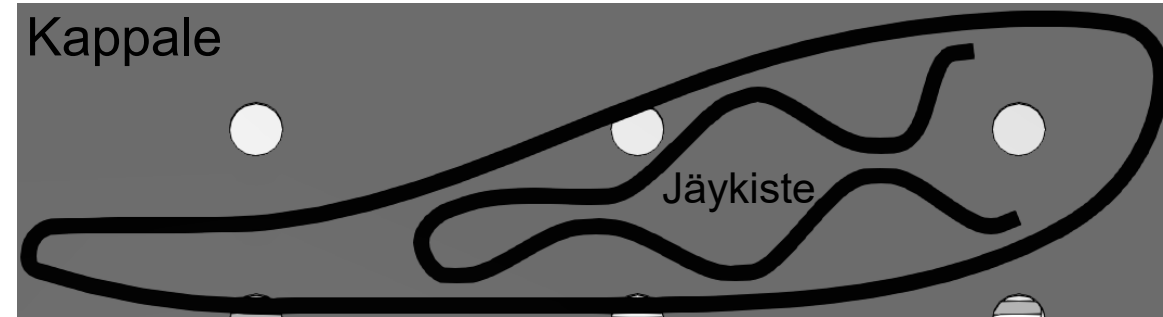
|        |
|--------|
| W1     |
| W2     |
| W3...  |
| ... W6 |

Sisin palko

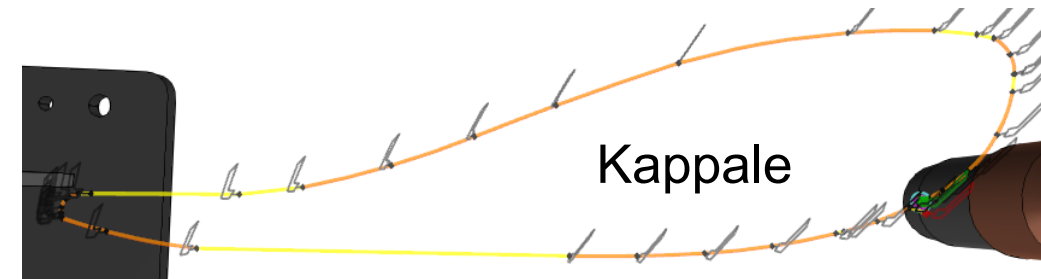
Aloitus



Kappale



Ulkoisin palko

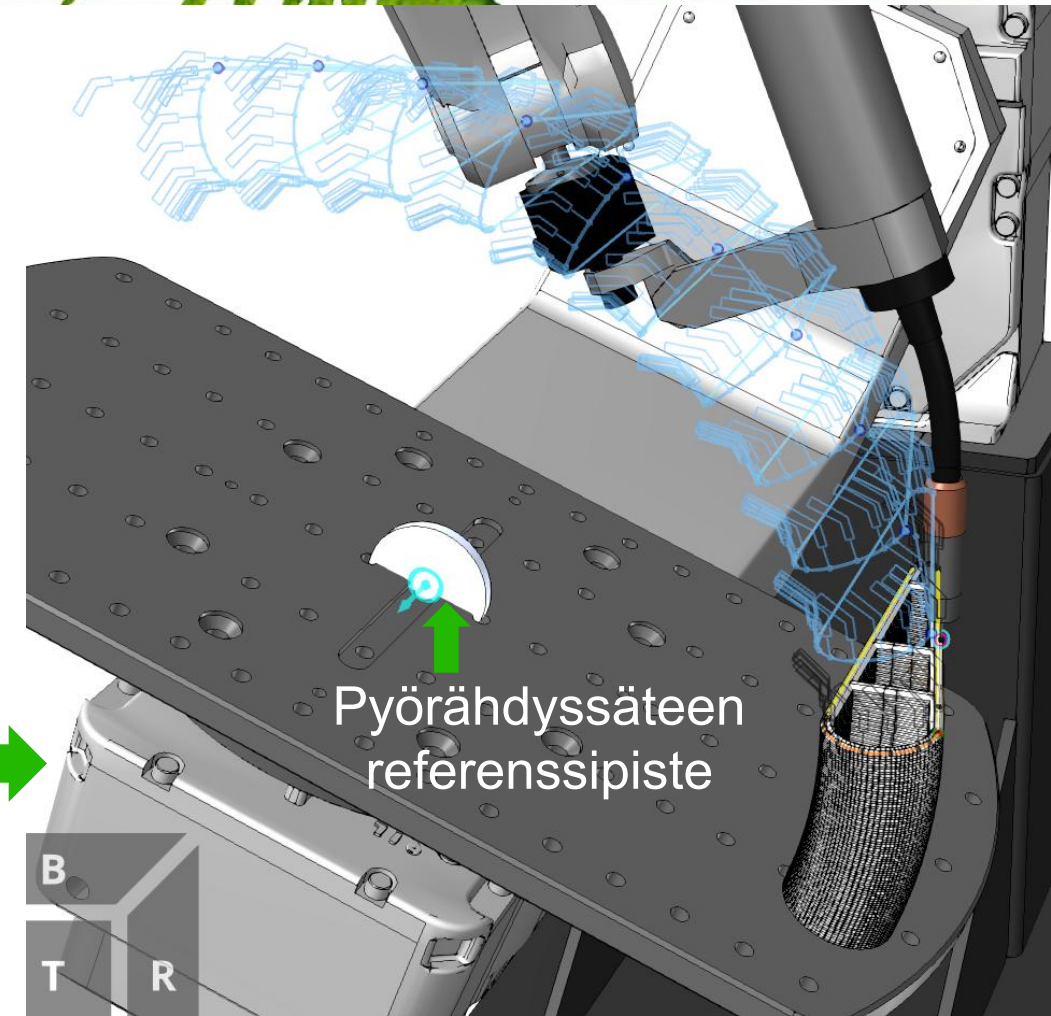


Euroopan unionin  
osarahoittama



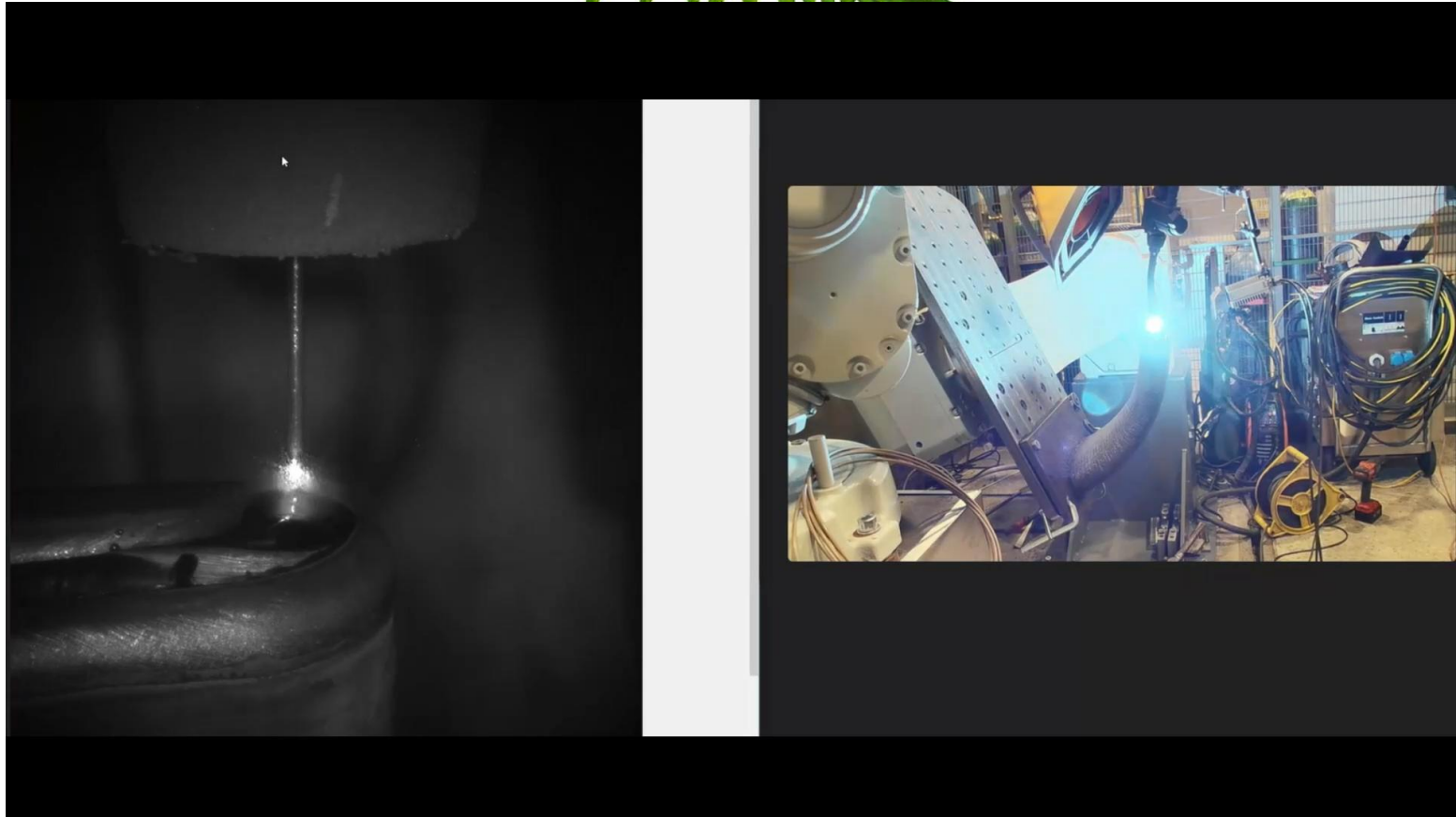
- » **Liikeradat:** Manuaalisesti CAD-poikkileikkauksesta
- » Poltinkulmat, liikeratojen ja ulkoisten akselien säätö automaattisesti (3 hiiren klikkausta)
- » Tulostukseen liittyvä hienosäätö työlästä, mutta ohjelmoijalla vapaus hienosäätöön
- » Sopii parhaiten kun toistetaan yhtä piirrettä / kerroksen liikerataa kauan
- » **Geometrian muutos = uusi ohjelmointi-iteraatio**

- » Vakioparametreillä kerroskorkeus pysyy vakiona
- » Voidaan laskea ympyränkaaren pituudesta kerroskierähdys
- »  $2\pi r / \text{kerroskorkeus} = \text{Kerrosten määrä } 360^\circ$

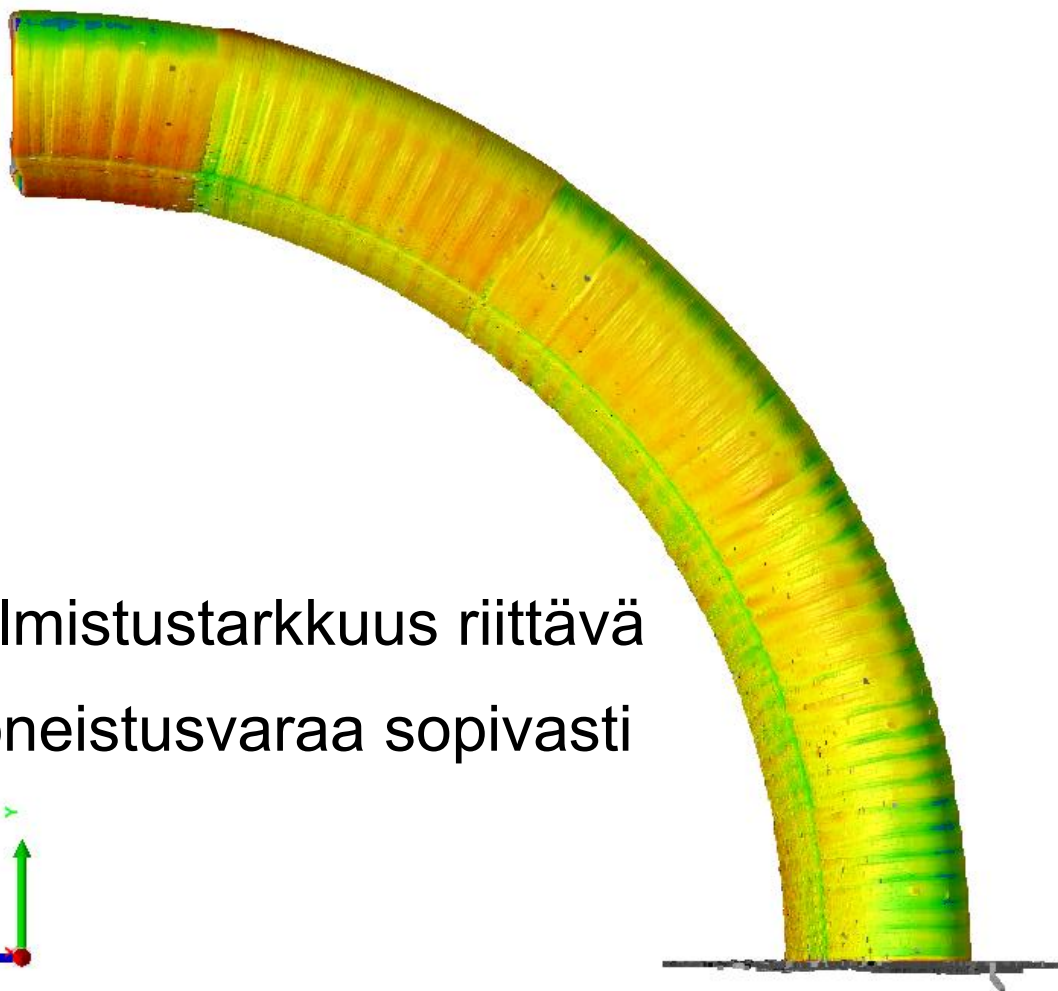




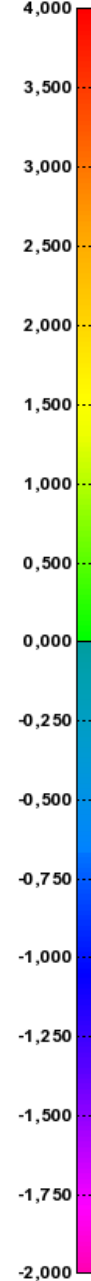
- Prosessi vakaa
- 100 kerrosten jälkeen muodoilla hieman korkeusvaihtelua
- WAAM-kuljetusnopeutta säätämällä saadaan korkeuserot tasoitettua



# VALMISTUSTARKKUUS



- Valmistustarkkuus riittävä
- Koneistusvaraa sopivasti



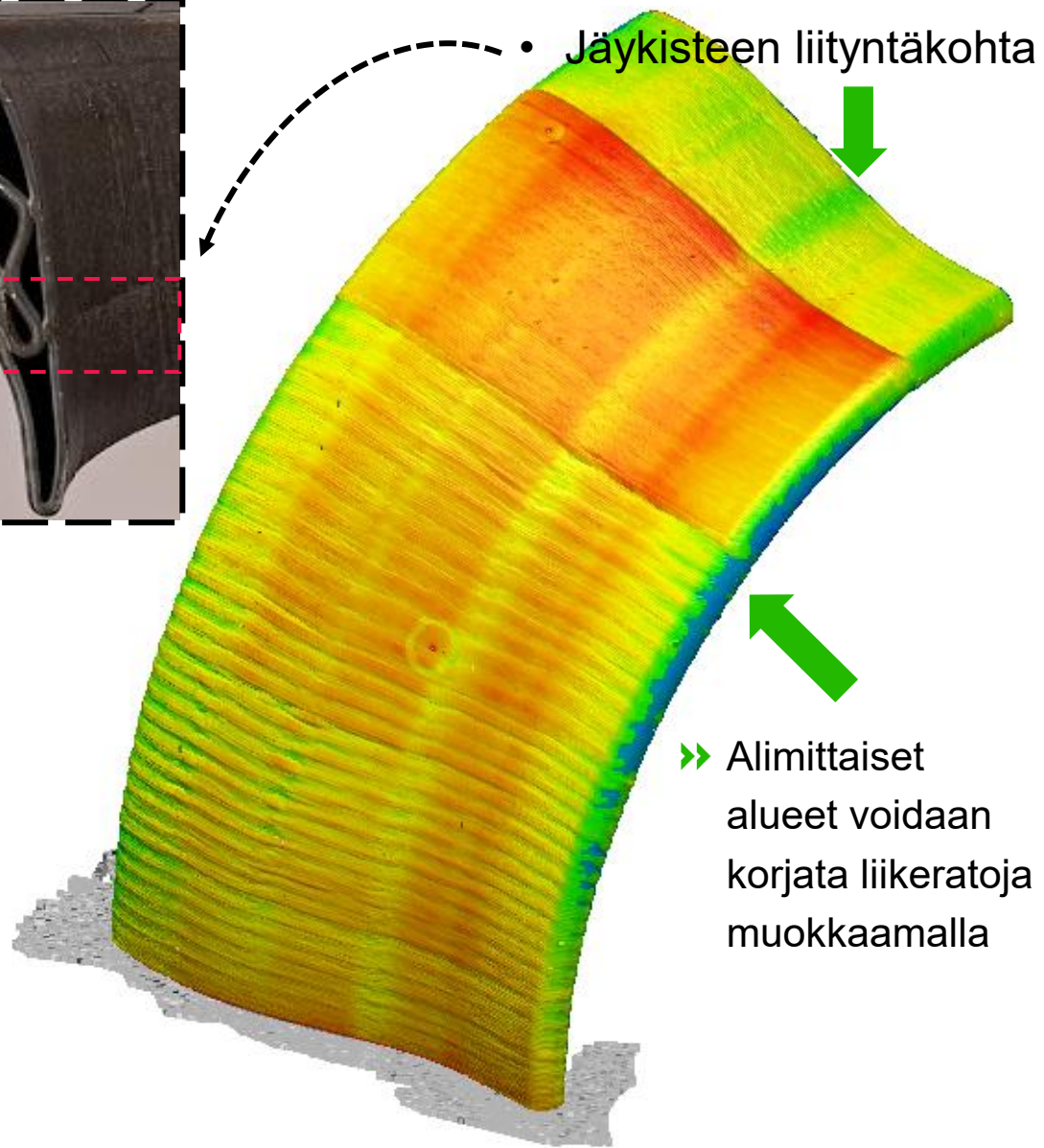
Jäähtyminen ja lämpeneminen  
näkyä muodonmuutoksina

Day



Euroopan unionin  
osarahoittama





Euroopan unionin  
osarahoittama

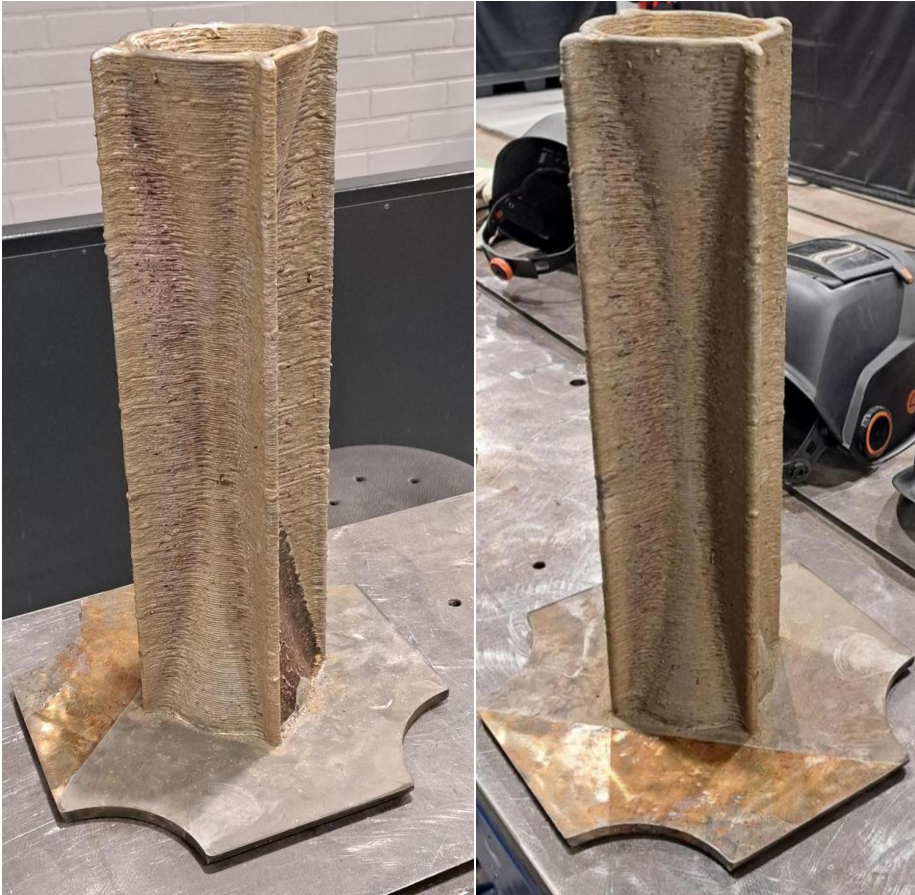




# YHTEENVETO

# YHDET WAAM-PARAMETRIT - KAKSI TULOSETTA

Muuttuvamuotoinen kappale voidaan tulostaa WAAM:lla



Virtausoptimoidussa tulostussuunnassa voidaan valmistaa pyörähdyskappaleen osa



# ROBOTIN KÄYTTÖ MÄÄRITTÄÄ TUOTTAVUUDEN

Muuttuvamuotoinen kappale voidaan  
tulostaa WAAM:lla



Teoreettinen materiaalityöntuotto noin:  
2 kg/h

-----  
Toteutunut materiaalityöntuotto

0,95 kg/h  
48%

1,25 kg/h  
63%

Robottihitsaus 100 €/h;  
Teoreettinen valmistuskustannus 50 €/kg

-----  
Toteutunut valmistuskustannus

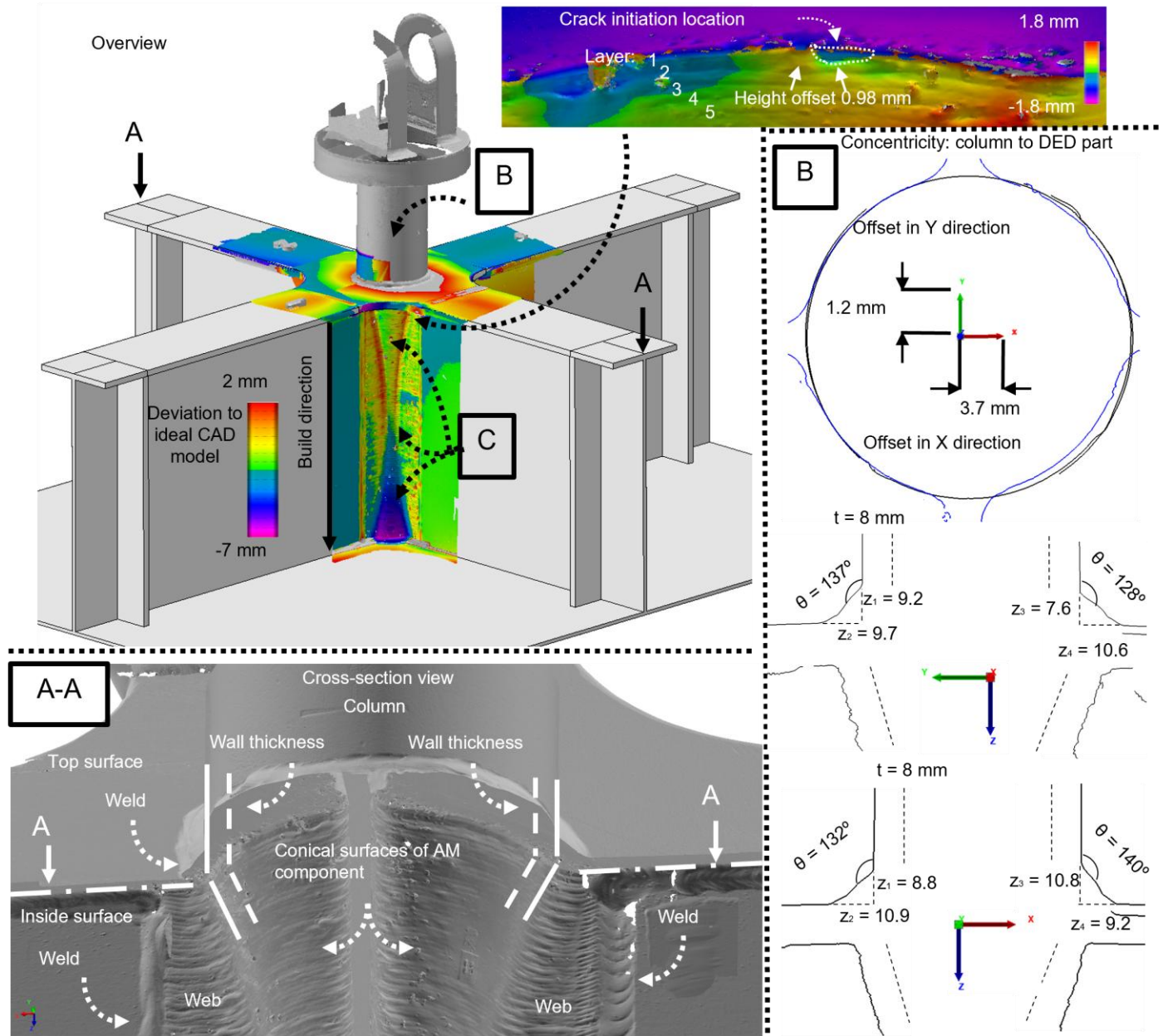
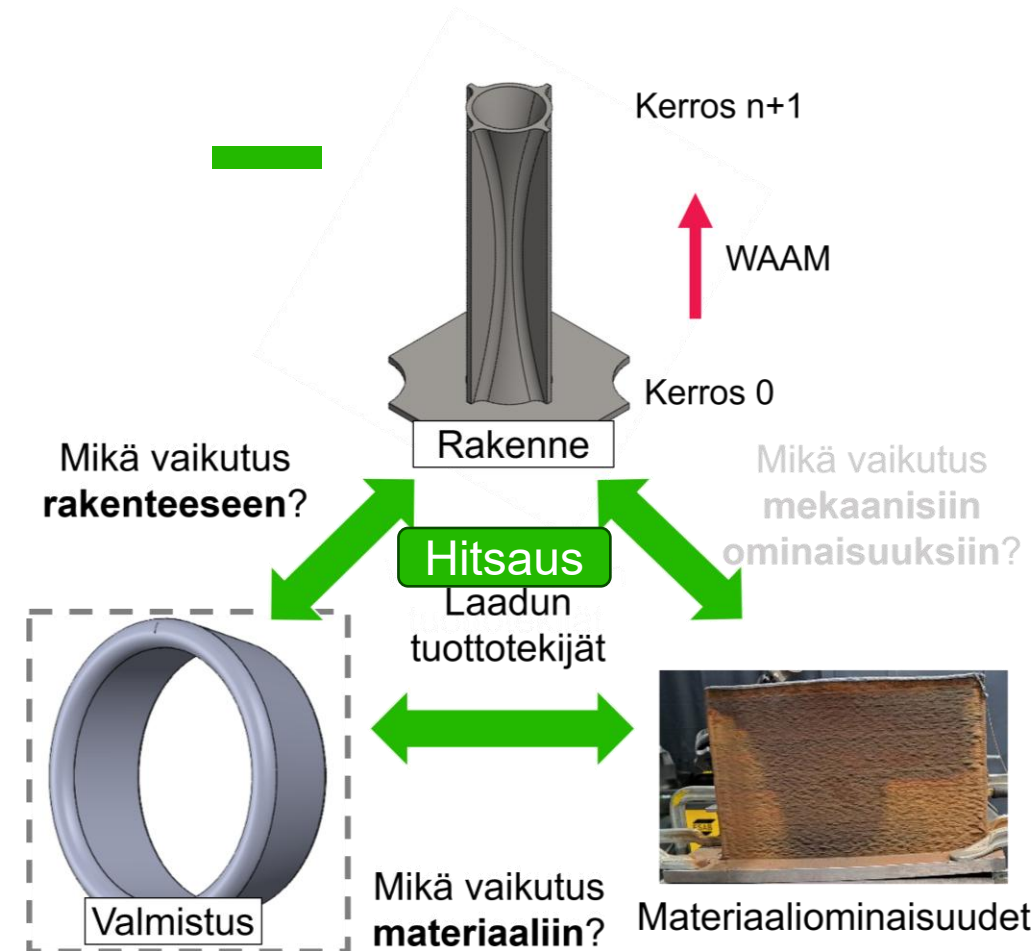
105 €/kg

80 €/kg

Virtausoptimoidussa tulostussuunnassa  
voidaan valmistaa pyörähdyskappaleen osa



# WAAM-TULOSTE OSANA HITSATTUA RAKENNETTA



Euroopan unionin  
osarahoittama



# MAHDOLLISUUDET: SUURET JA MONIMUTKAISET KAPPALEET

»» Jokainen robottihitsausasema on WAAM-asema

»» Suomessa on valtava potentiaali lisätä WAAM-tuotantoa

»» Kapasiteettia olisi:

- Suomessa 6000 robottikannasta 22 % on hitsausrobotteja
- Teoreettinen huippu hitsiaineentuotolle, jopa 9 kg/h -> eli 11 €/kg

»» Mutta kuormaa ei ole tarpeeksi:

- Yrityksissä, hitsausrobottien käyttöaste (kaariaika) matalahko
- Tuottavuus parhaimmillaan, kun robotille on "ruokaa" 2-vuorossa,
  - Nykytilanteessa 1-vuoro on saavutus

»» WAAM:lle ne 2 muuta vuoroa?

»» 16h ehtisi tekemään 32-80 kg materiaalia (2-5 kg/h)

## Suurikokoisten kappaleiden valmistus

Kokoluokka m<sup>3</sup>

## Monimutkaisten kappaleiden valmistus

Mullistaa rakenteiden muotoilun.  
Ei enää pelkkiä levy- ja palikkaratkaisuja

### Vaativat materiaalit

Mullistaa rakenteiden muotoilun.  
Ei enää pelkkiä levy- ja palikkaratkaisuja

## Resurssi, energia ja kustannustehokas

Vähemmän esi- ja jälkivalmisteluvaiheita

### Resurssitehokas

Käytetty materia  
menee tulosteen  
valmistukseen

### Energiatehokas

Käytetty energia  
menee tulosteen  
valmistukseen



# LÄHTEET



1. Lipiäinen, K., Afkhami, S., Lund, H., Ahola, A., Varis, S., Skriko, T., & Björk, T. (2024). Manufacturing and mechanical performance of a large-scale stainless steel vessel fabricated by wire-arc direct energy deposition. *Materials & Design*, 113044. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2024.113044>
2. Lund, H., Penttilä, S., & Skriko, T. (2024). Extended reality implementation possibilities in direct energy deposition-arc. *Frontiers in Sustainability*, 5, 1408604. <https://doi.org/10.3389/frsus.2024.1408604>
3. Lipiäinen, K., Ahola, A., Lund, H. et al. Fatigue strength assessment of additively manufactured component considering local quality. *Weld World* (2025). <https://doi.org/10.1007/s40194-025-02002-9>
4. Lipiäinen Kalle, Lund Hannu, Penttilä Sakari, Suikkari Tomi, Peippo Juha, Raitila Juuso, Ahola Antti, Skriko Tuomas. Design, manufacturing and fatigue performance of directed energy deposited beam-to-column connection for marine applications (IIW doc. XV-1714-2025)

Lisää materiaalia:

» [LinkedIn: https://www.linkedin.com/company/lut-laboratory-of-welding-technology](https://www.linkedin.com/company/lut-laboratory-of-welding-technology)



Euroopan unionin  
osarahoittama

Kiitos!

