

# Monimutkaisten ja suurikokoisten kappaleiden DED-valokaaritulos

sekä tulosteiden liittäminen perinteisiin rakenteisiin



Hannu Lund | IWE, DI  
Nuorempi tutkija,  
Hitsaustekniikka,  
LUT Yliopisto

*Hannu.Lund@lut.fi*



Lähde [1]



Euroopan unionin  
osarahoittama



# WAAM - Kiinnostus

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

Nykyisin kiinnostus perinteisten rakenteiden optimoinnissa

Läpilyönti, kun **kehitetään jotain uutta mitä ei ole voinut valmistaa perinteisillä menetelmillä**



WAAM-rakenne väsytykskokeessa



Euroopan unionin  
osarahoittama



# Sisältö:

- WAAM perusteet
  - Laatutekijät
  - Prosessin hallinta
  - Laitteistot ja ohjelmistot
  
- Suurten kappaleiden WAAM-menetelmät
  - Slicer-menetelmä muuttuvamuotoisen teräskomponentin WAAM:ssa
    - Ja hitsaaminen ristikkorakenteeseen
  - Pyörähdyssymmetrisen kappaleen valmistusmenetelmä WAAM:lla



# WAAM-laadun perusteet

**Vakioi nämä!**

Panos:

Esilämmitys ja työlämpötila

Polttimen kuljetus

Hitsiaineentuotto [kg/h]

Lämmöntuonti [kJ/mm]

Tuotos:

Hitsin muoto, leveys & korkeus [mm]

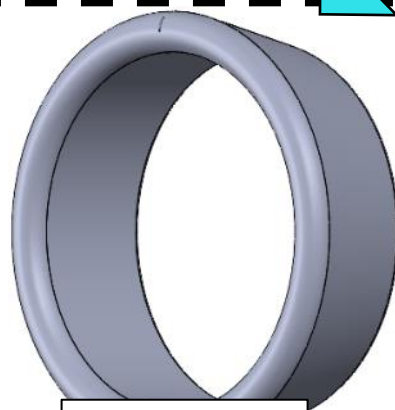
Lämpösykli ja jäähtymisajat

Materiaaliominaisuudet, mekaaniset ominaisuudet & väsymisominaisuudet

Mikä vaikutus rakenteeseen?

Rakenne

WAAM laadun tuottotekijät



Valmistus

Mikä vaikutus materiaaliin?



Materiaaliominaisuudet

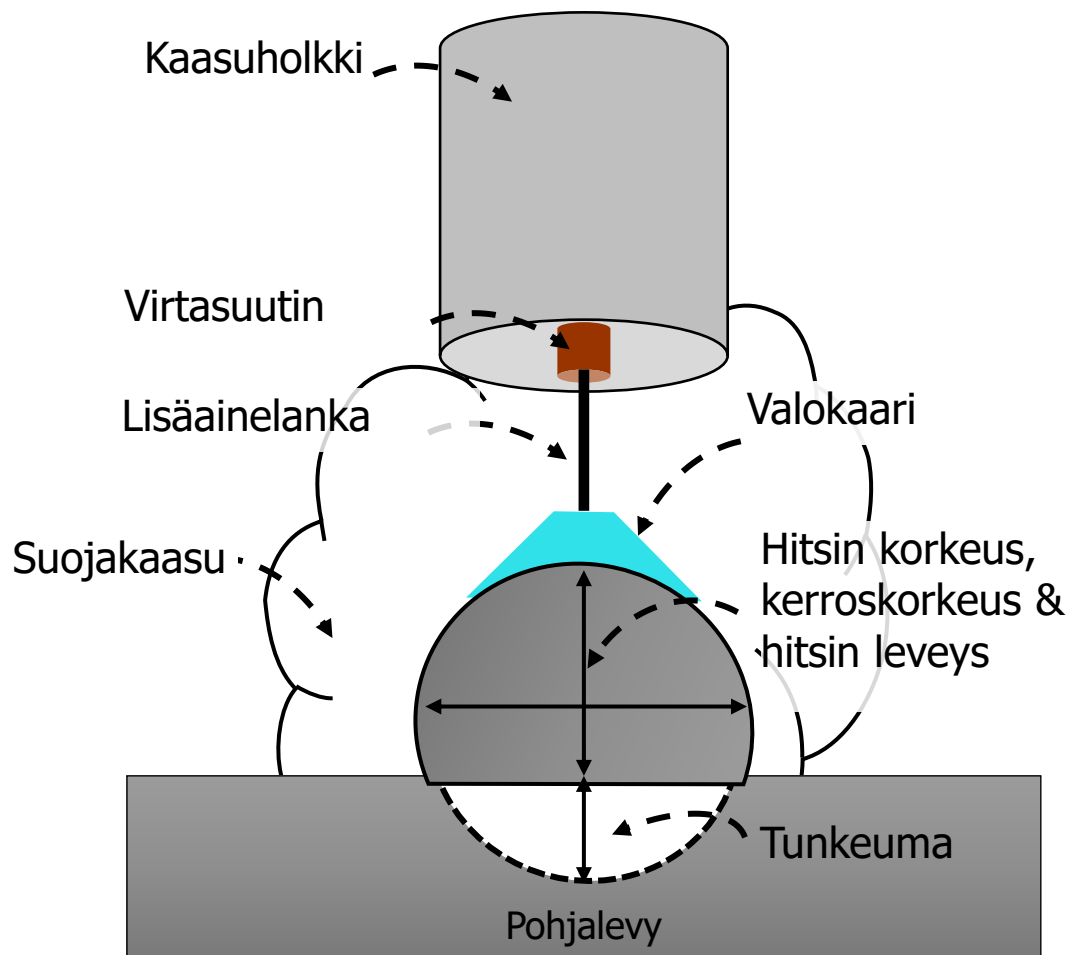


Euroopan unionin osarahoittama

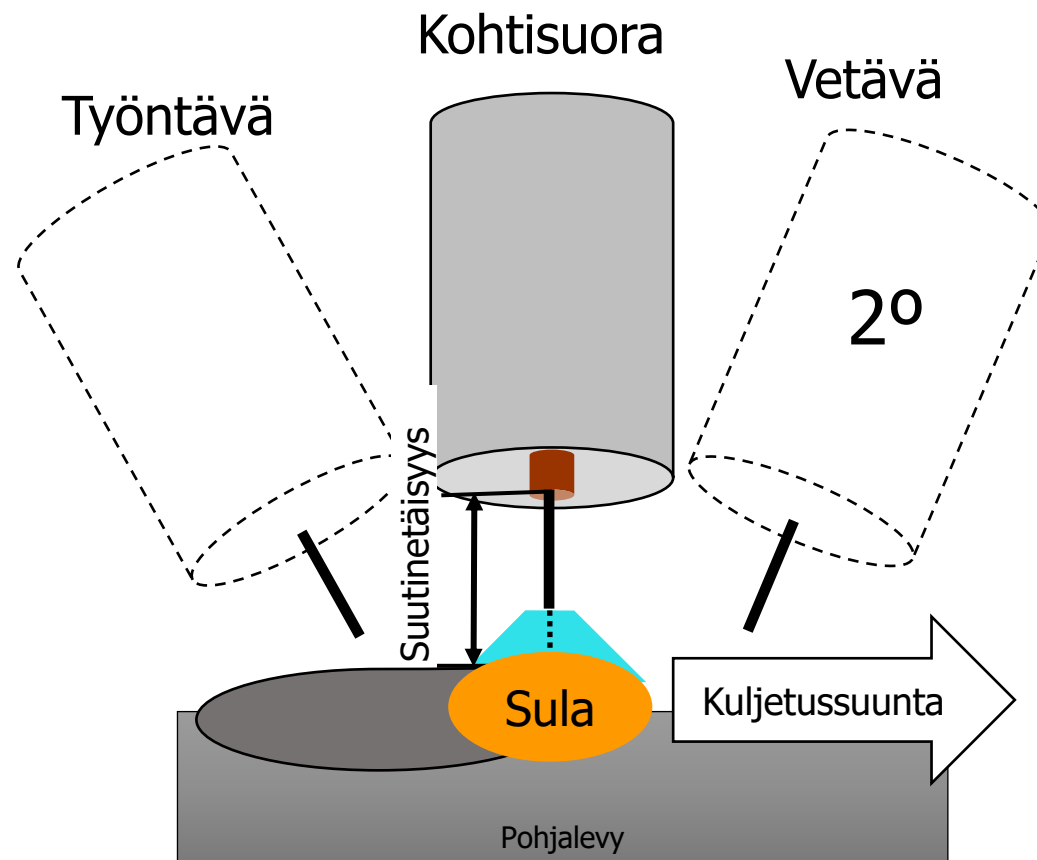


# Prosessin hallinnan perusteet

## Hitsausvirtalähde hoitaa:



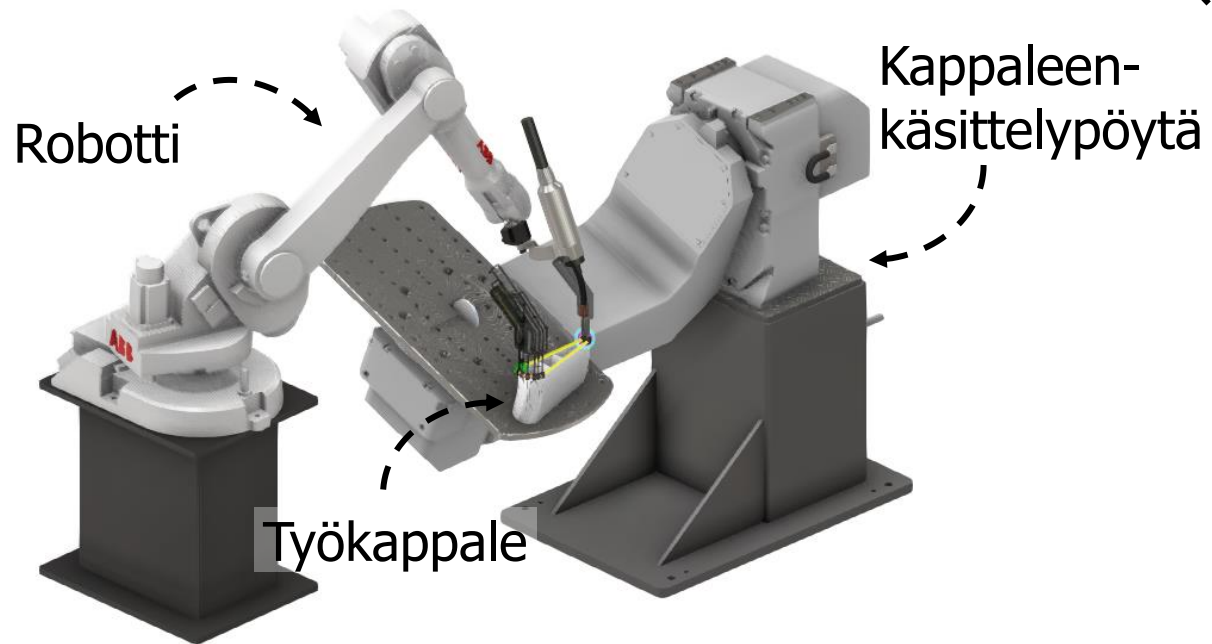
## Robotti hoitaa:



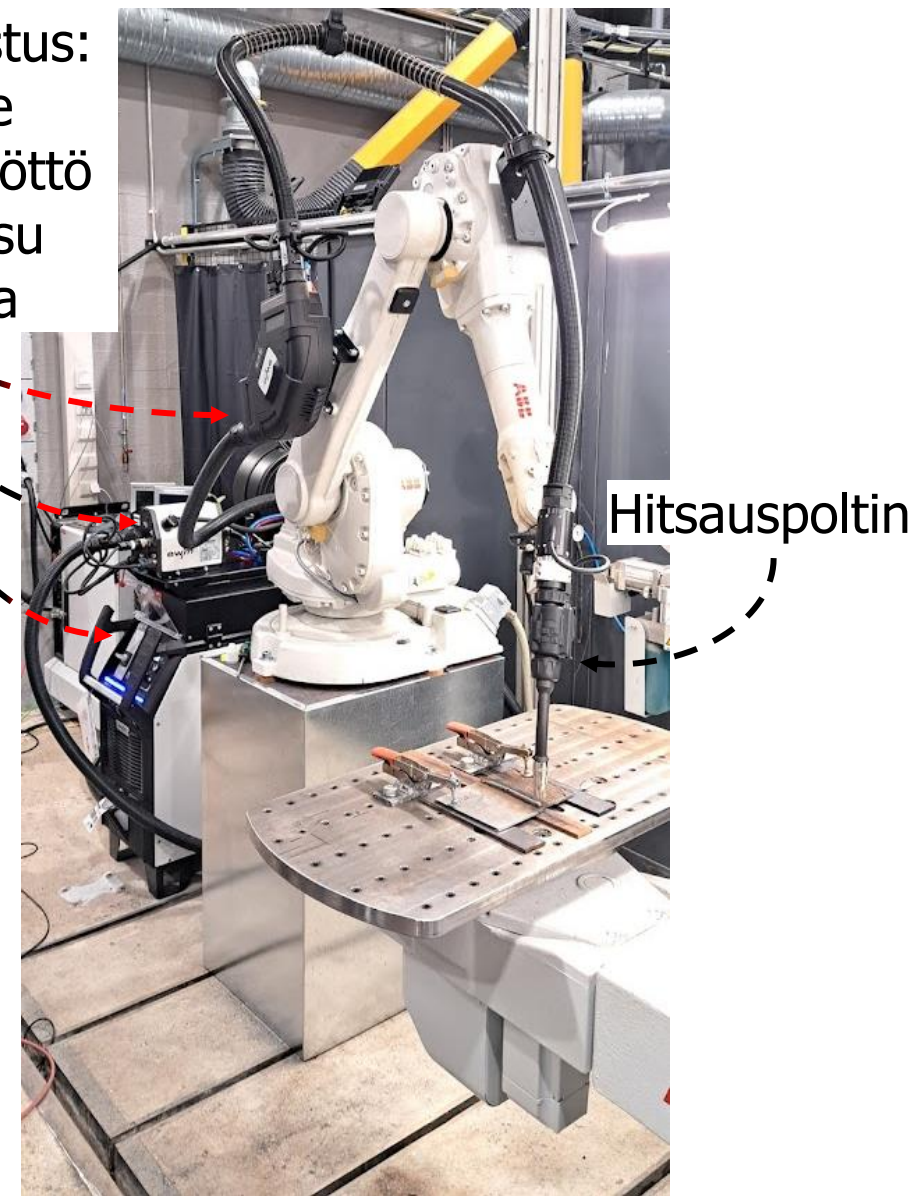
# Laitteistot ja ohjelmistot

## 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



- Hitsausvarustus:
- Virtalähde
  - Langansyöttö
  - Suojakaasu
  - Johtosarja



# Laitteistot ja ohjelmistot

## Näillä pääset alkuun:

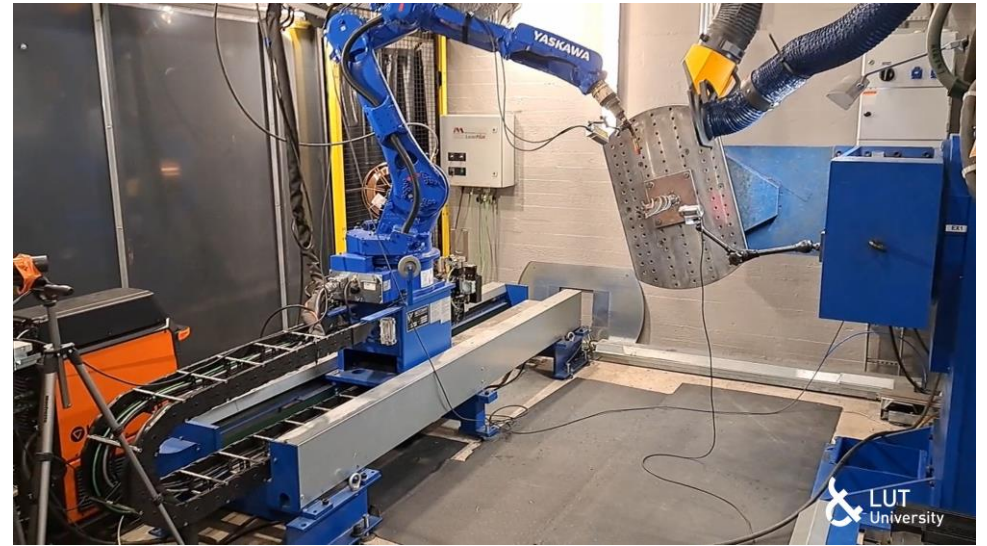
1. **Robottiasemat:** ABB & Yaskawa
2. **Hitsausvarustus ja virtalähteet:** EWM & Kemppi (MIG/MAG)
3. **Etäohjelmointiohjelmistot:** ABB RobotStudio + G-koodi Slicer & Visual Components Robotics OLP

## Hyvä olla:

- **Anturit ja monitorointi:** Cavitax 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



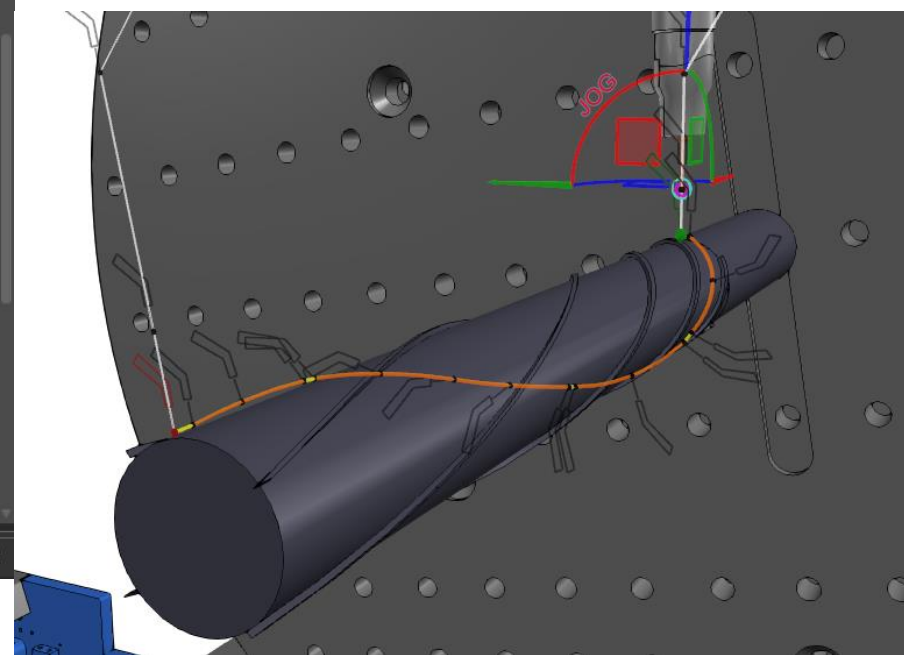
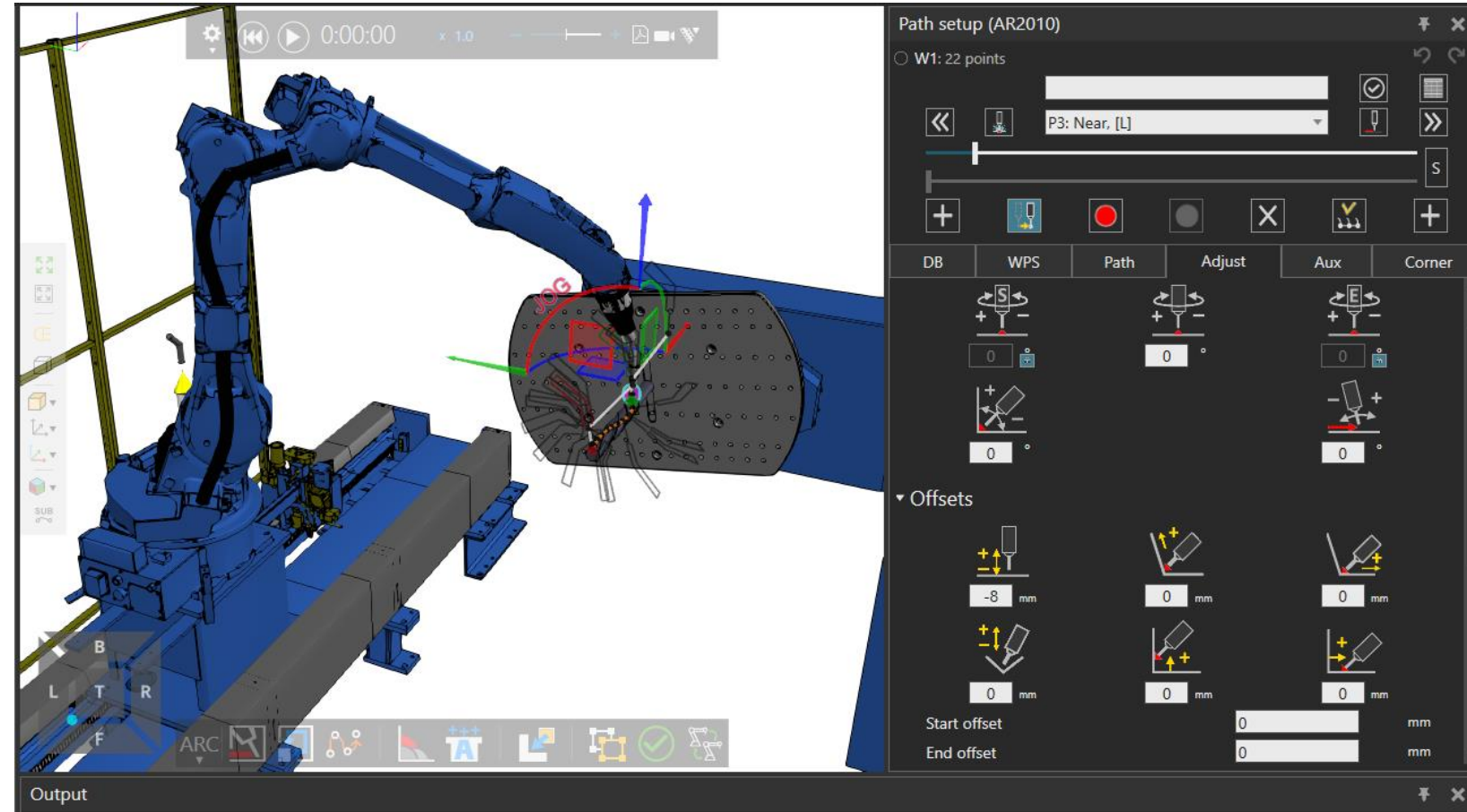
Euroopan unionin  
osarahoittama



# Etäohjelmointi: CAD tai G-koodi

Simulointi

Prosessiliikeradan säätö



Visual Components



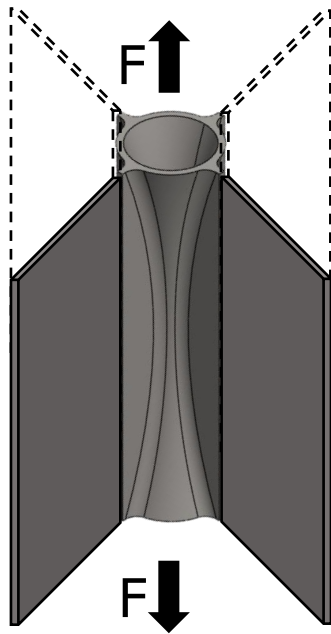
Euroopan unionin  
osarahoittama



# Suurten WAAM kappaleiden valmistus

## Case 1: Muuttuvamuotoinen tuloste

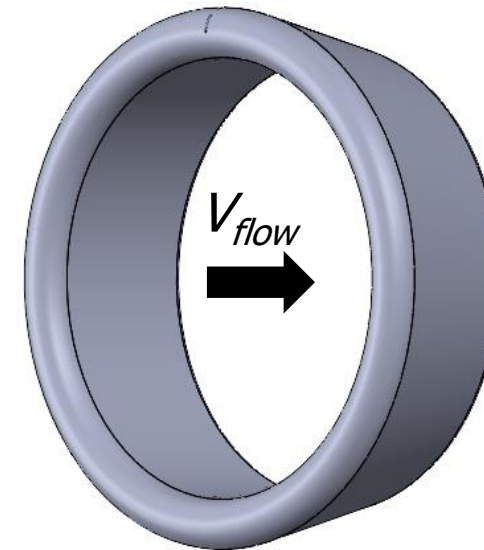
- Miten muuttuvamuotoinen kappale voidaan valmistaa WAAMilla?
  - Vaatimuksena:
    - Seinämän paksuus  $> 8 \text{ mm}$



Materiaali S355, perusteräs  
Kokoluokka 0,5 m

## Case 2: Pyörähdysymmetrinen tuloste

- Muoto kriittinen, joten tulostettava poikkileikkaussuunnassa, tavoite  $90^\circ$ 
  - Selvitetään kerroskiertymä, sekä miten reagoidaan sisä- ja ulkokehien "kerroskorkeuseroon"

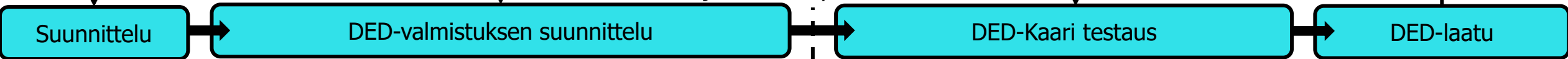


# The LUT Hitsaustekniikka metodi Lähde [2]

Tutkimuksen 1. vaihe

Tutkimuksen 2. vaihe

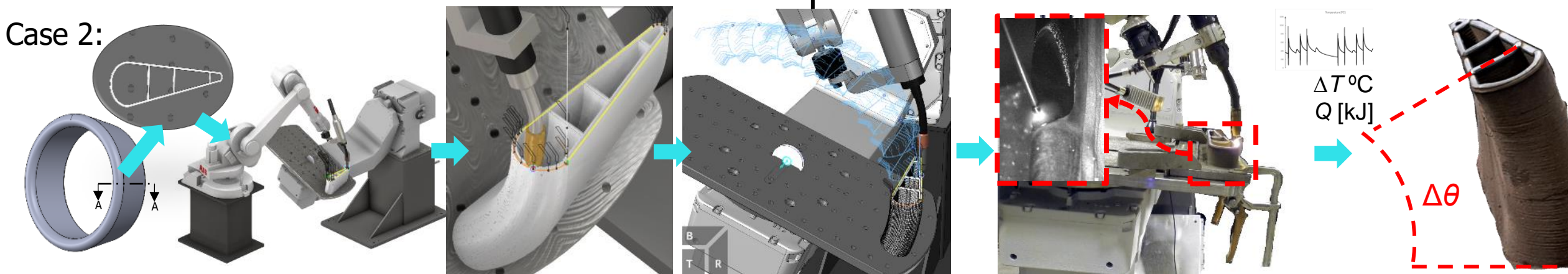
Tiedonkulku ja takaisinkytkentä DED-Kaaressa



Case 1:



Case 2:



Euroopan unionin osarahoittama



# Tulostustrategia 1

## • G-koodi: Prusa Slicer

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

● Layer height:

● Default extrusion width:

● Infill:

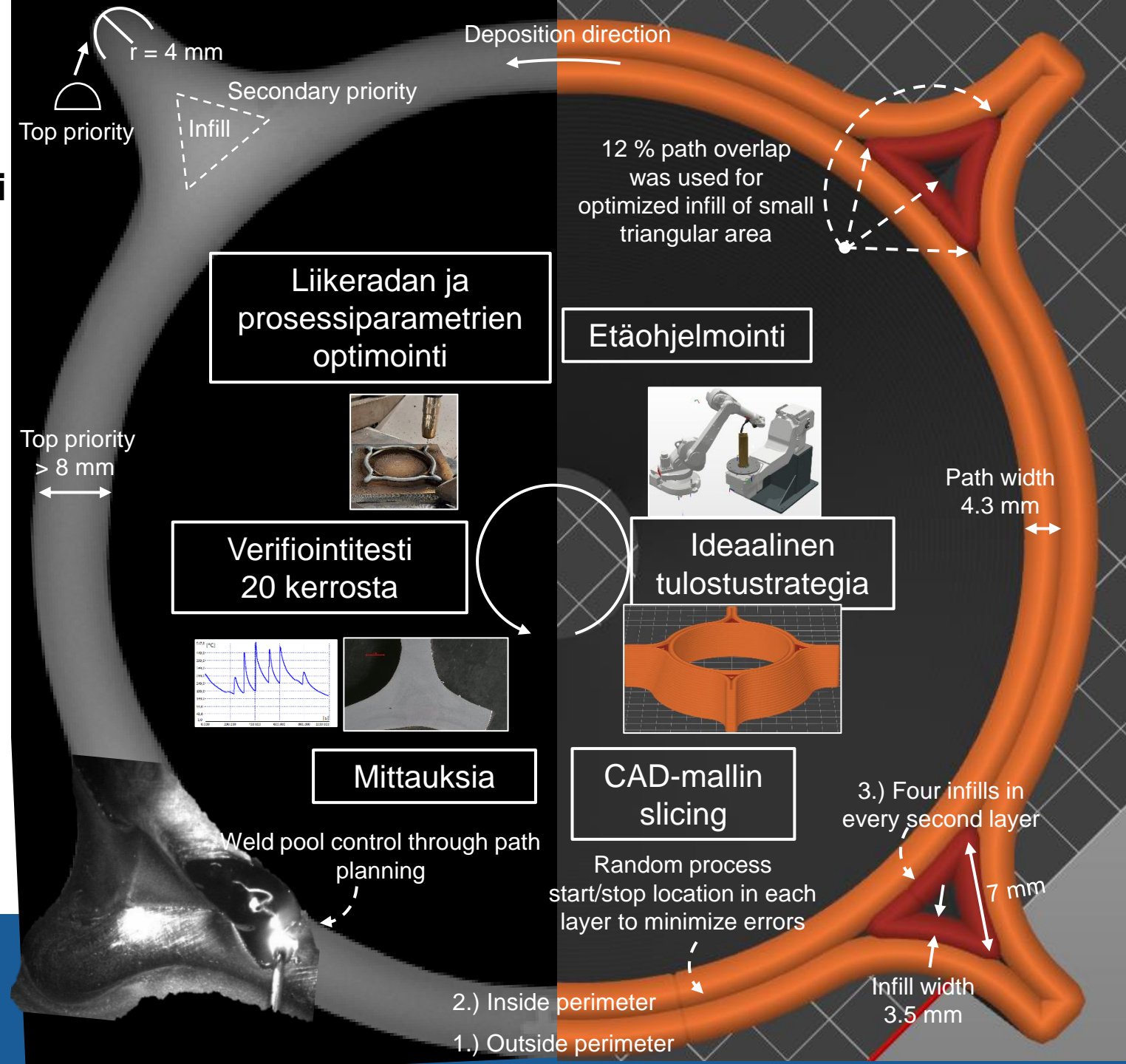
● Infill/perimeters overlap:

## +Tulostusliikeradat automaattisesti

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

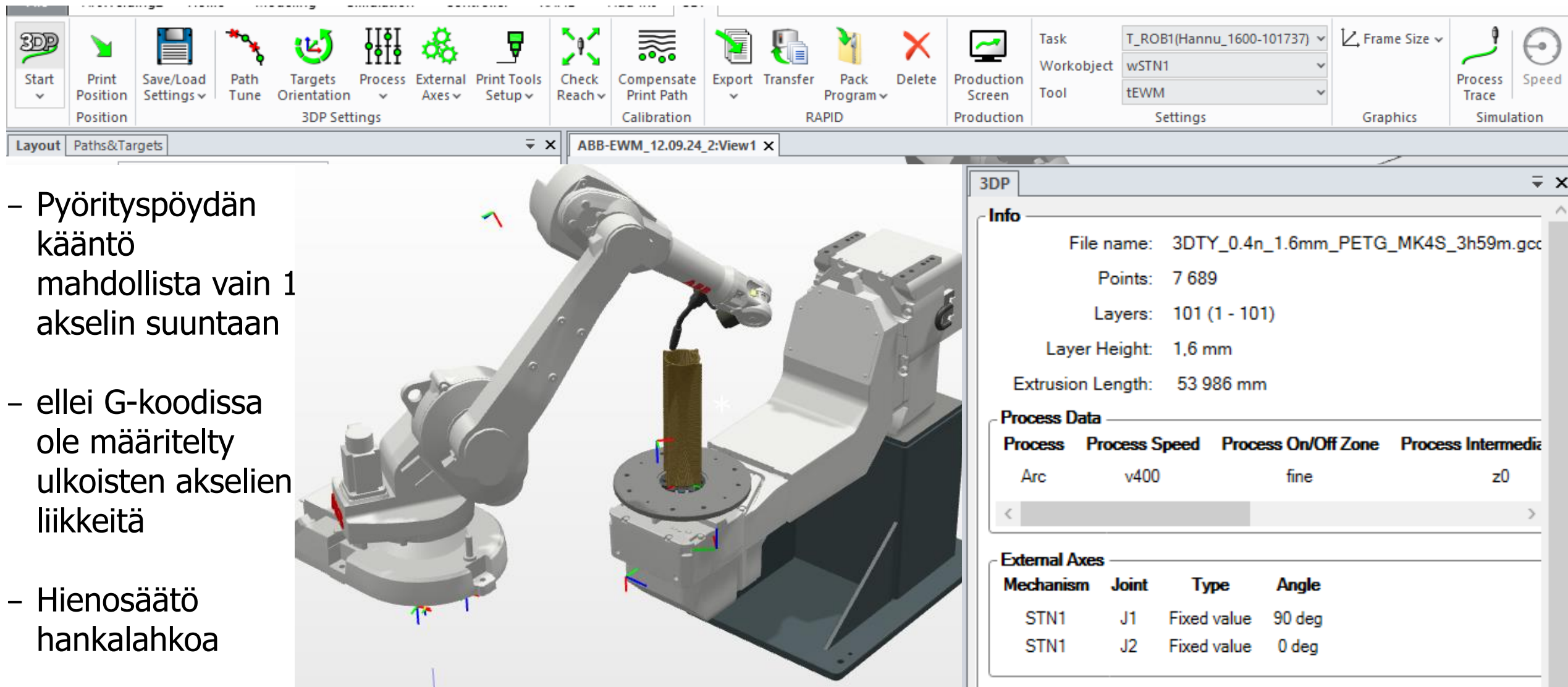
## • G-koodi -> ABB RobotStudioon etäohjelmointia varten

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



Euroopan unionin  
osarahoittama

# Etäohjelmointi: ABB RobotStudio ja 3D-printing powerpack



The screenshot displays the ABB RobotStudio software interface. The top toolbar contains various 3D printing functions such as Start, Print Position, Save/Load Settings, Path Tune, Targets Orientation, Process, External Axes, Print Tools Setup, Check Reach, Compensate Print Path, Export, Transfer, Pack Program, and Delete. The right side of the interface shows a task panel with fields for Task (T\_ROB1(Hannu\_1600-101737)), Workobject (wSTN1), and Tool (tEWM). The 3DP window on the right provides detailed information about the print job, including file name, points, layers, layer height, and extrusion length. It also includes a table for Process Data and a table for External Axes.

Process	Process Speed	Process On/Off Zone	Process Intermedia
Arc	v400	fine	z0

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

- Pyörityspöydän kääntö mahdollista vain 1 akselin suuntaan
- ellei G-koodissa ole määritelty ulkoisten akselien liikkeitä
- Hienosäätö hankalahkoa



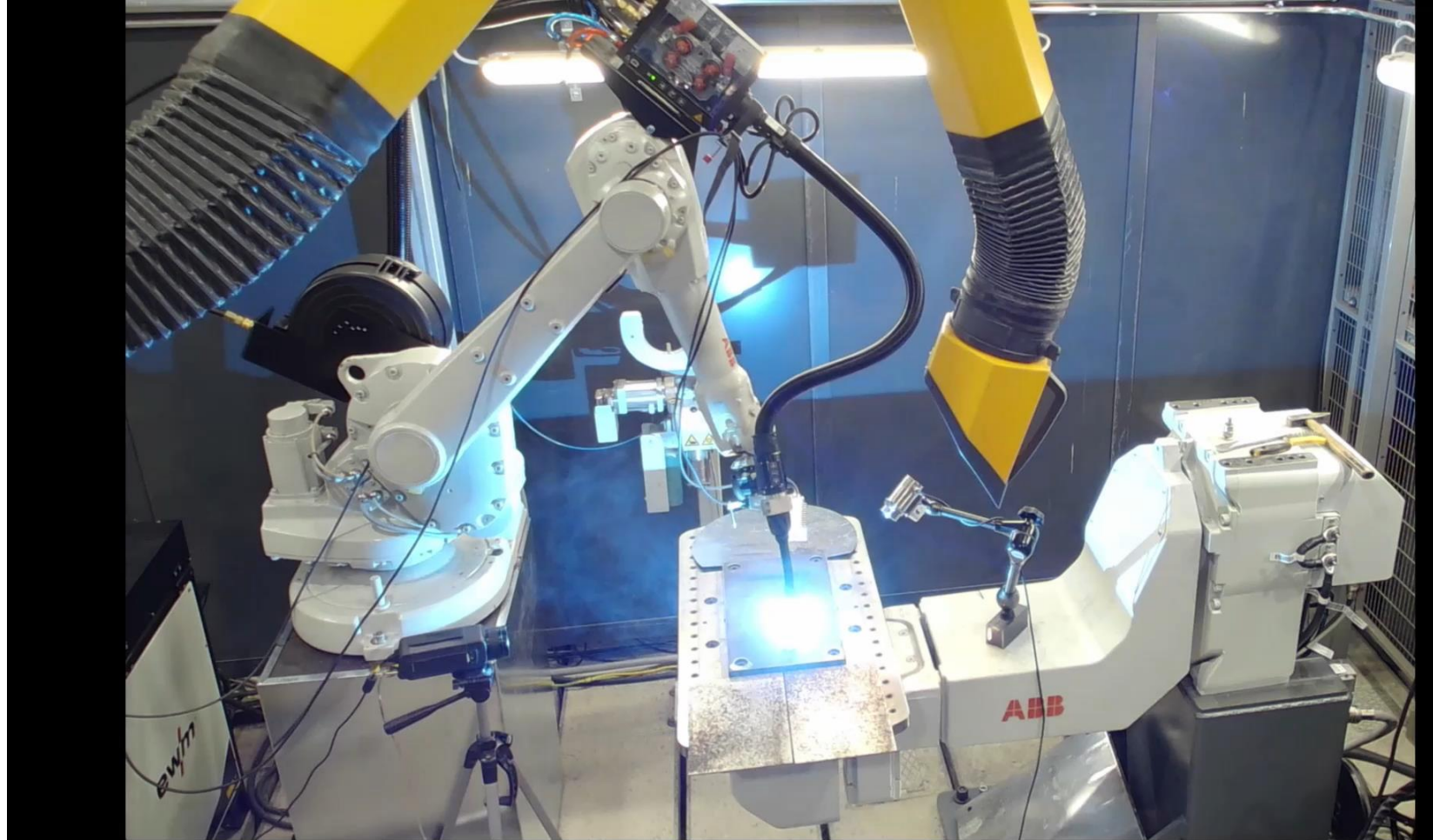
Euroopan unionin osarahoittama



# Tulostus: Case 1



- **Ottakaa huomioon jäähtymisen hidastuminen**
  - Aluksi nopeaa 3D jäähtymistä
  - Pohjalevyn esilämmitys!
- Noin 20 mm korkeuden jälkeen jäähtyminen hidastuu merkittävästi
  - 2D-jäähtyminen
  - Jäähtymisaajat kasvavat helposti 2-3 min teräksellä
  - **Tuottavuus kg/h ei toteudu, jos kappaletta ei jäähdytetä**



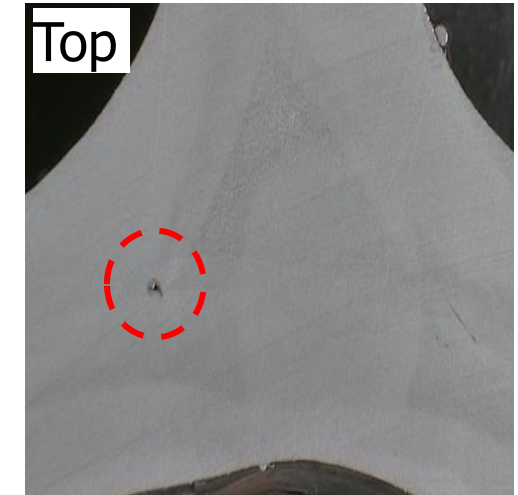
Euroopan unionin  
osarahoittama



# Tulostus: Case 1



- **Vakioi hitsausmetallurgiset ja -tekniset muuttujat**
  - (Lämmöntuonti,  $Q(I, U \& v)$  ja materiaalin syöttö (m/min))
- **Monitoroi materiaalin lämpöä ja vakioi välikerroslämpötila**
  - (Mustat teräkset 150-250°C)
- Sulan ja lämmön hallinta on erittäin haastavaa, **Jäähdytä**
  - Liika lämpö hidastaa sulan jähmettymistä ->
  - kerroskorkeus ja hitsin leveys muuttuvat
- Monitoroi suutinetäisyyttä (noin 18 mm) ja säädä tarvittaessa
  - Kerroskorkeus, tai työkoordinaatisto

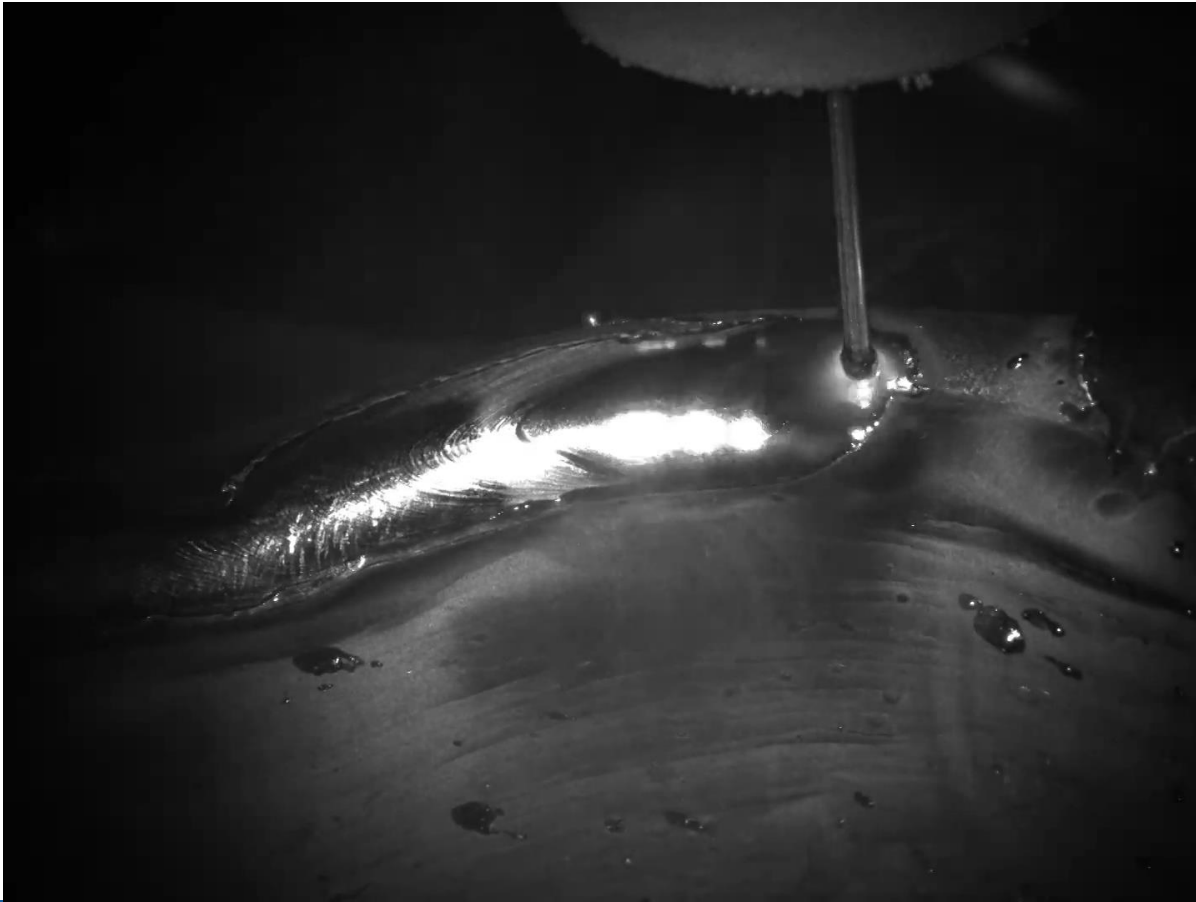


Täytön virheet toistuvat systemaattisesti,  
**Parempi jos kpl valmistettaisiin 2 yhtenäisellä palolla**



# Tulostus: Case 1

- Ulko- ja sisäkehä, prosessi erittäin vakaa, pienet täytöt hankalia
- optimoitu G-koodi ei täysin tottele ideaaliliikeratoja
- Aloitus- ja lopetuskohtia vaihdeltava

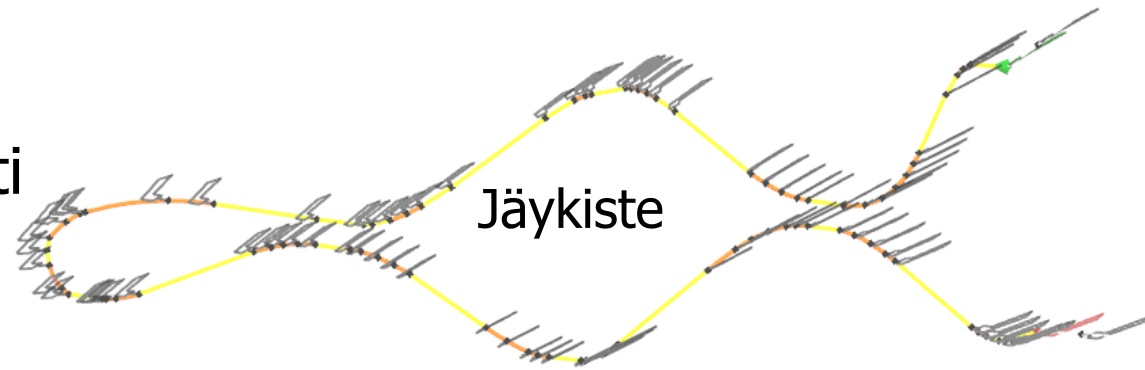


Euroopan unionin  
osarahoittama

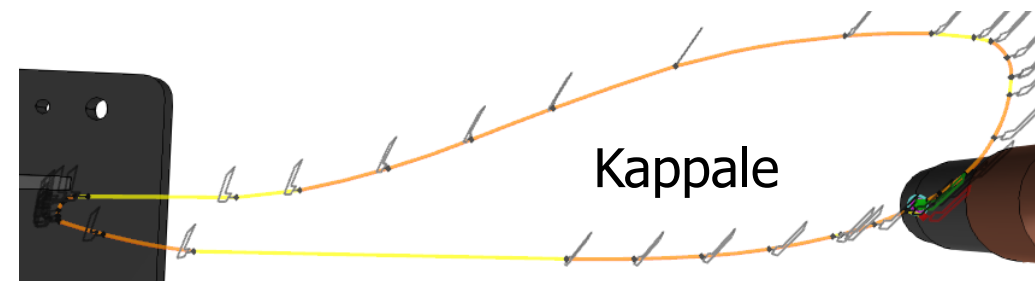


# Tulostustrategia 2

- Poikkileikkausperustainen liikeradan ohjelmointi
- Kerros voidaan valmistaa lähes keskeytyksettä
- Jokaiselle muodolle:
  - Oma hitsausmuuttuja



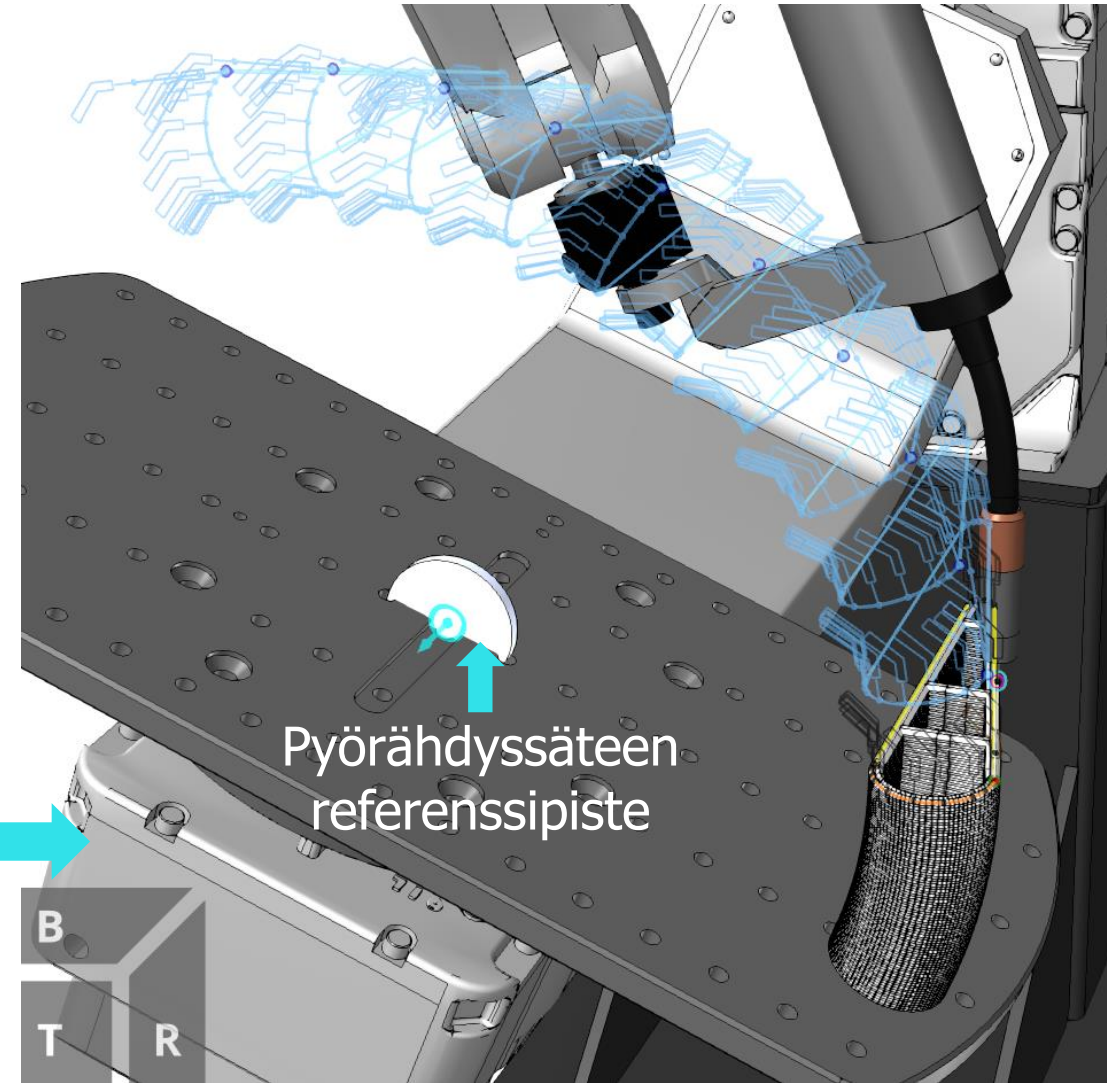
- Säättö kuljetusnopeudella
  - Sisäkehällä suurempi nopeus = vähemmän materiaalia
  - Ulkokehällä hitaampi nopeus = enemmän materiaalia



# Etäohjelmointi Visual Components Robotics OLP 4.9

- Liikeradat CAD-piirteiden mukaan,
- 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

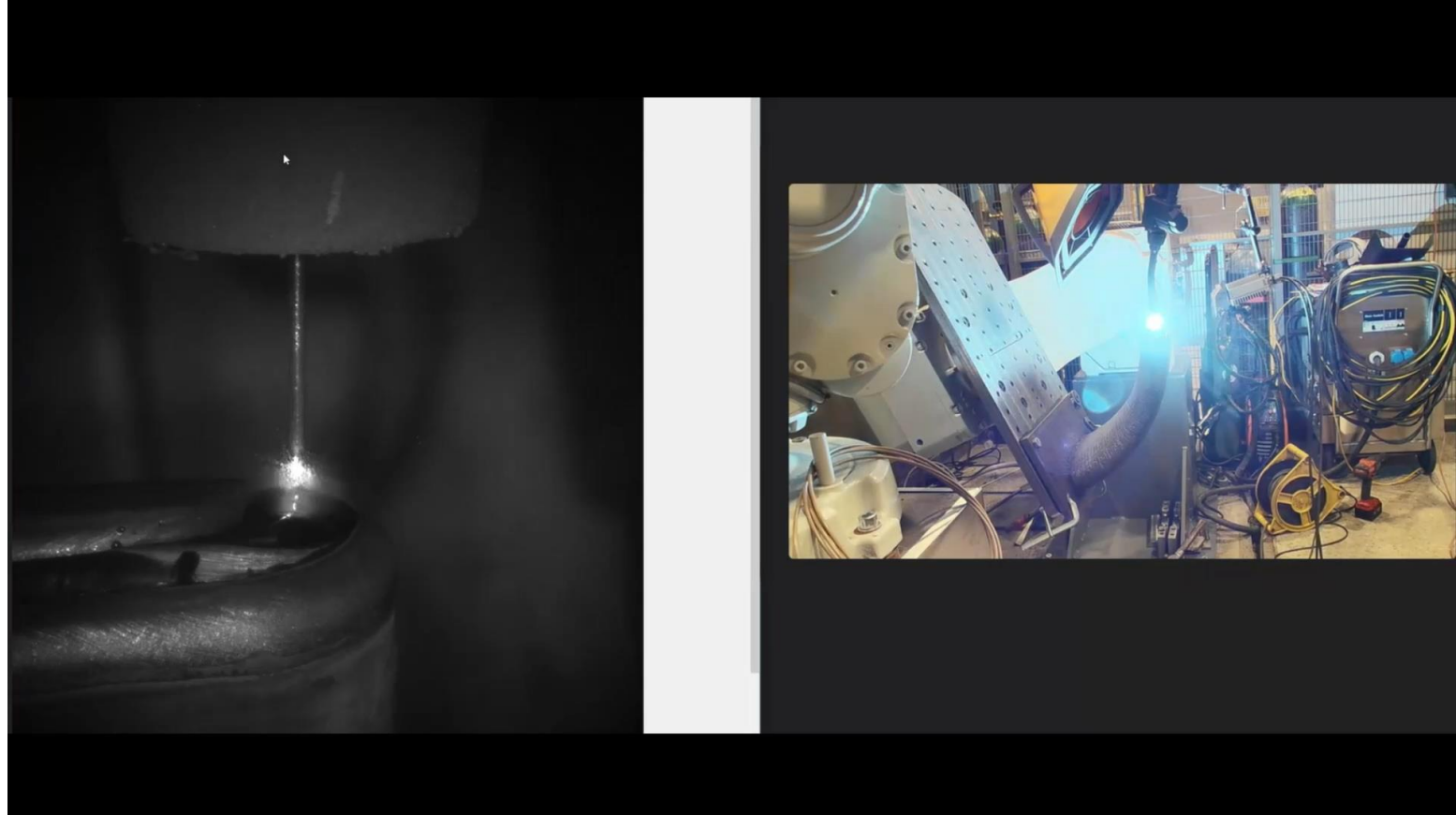
- Vakioparametreilla kerroskorkeus pysyy vakiona
  - Voidaan laskea ympyränkaaren pituudesta kerroskierähdys
- $2\pi r / \text{kerroskorkeus} = \text{Kerrostien määrä } 360^\circ$



# Tulostus: Case 2



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

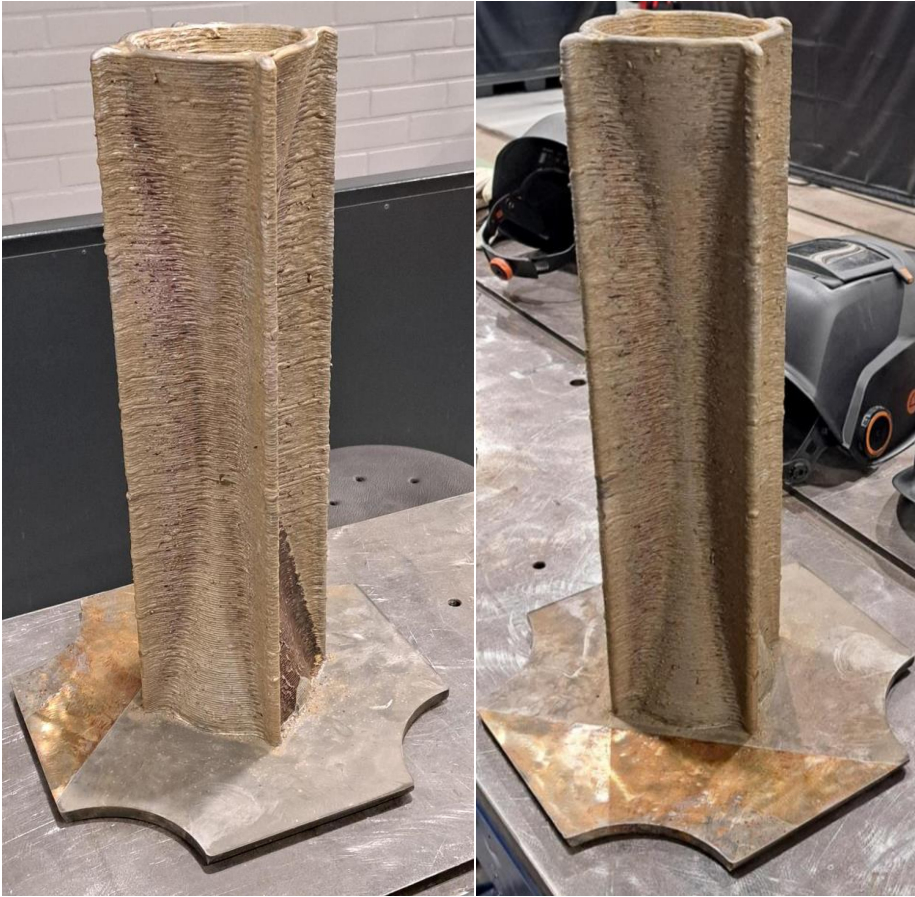


Euroopan unionin  
osarahoittama



# Valmiit tulosteet

**Muuttuvamuotoinen kappale  
voidaan tulostaa WAAM:lla**



**Virtausoptimoidussa tulostussuunnassa voidaan  
valmistaa pyörähdyskappaleen osa**



Euroopan unionin  
osarahoittama



# Valmiit tulosteet

**Muuttuvamuotoinen kappale  
voidaan tulostaa WAAM:lla**

**Virtausoptimoidussa tulostussuunnassa voidaan  
valmistaa pyörähdyskappaleen osa**



Teoreettinen materiaalintuotto noin:  
2 kg/h

-----  
Toteutunut materiaalintuotto

0,95 kg/h

|

1,25 kg/h

Robottihitsaus 100 €/h;

Teoreettinen valmistuskustannus 50 €/kg

-----  
Toteutunut valmistuskustannus

105 €/kg

|

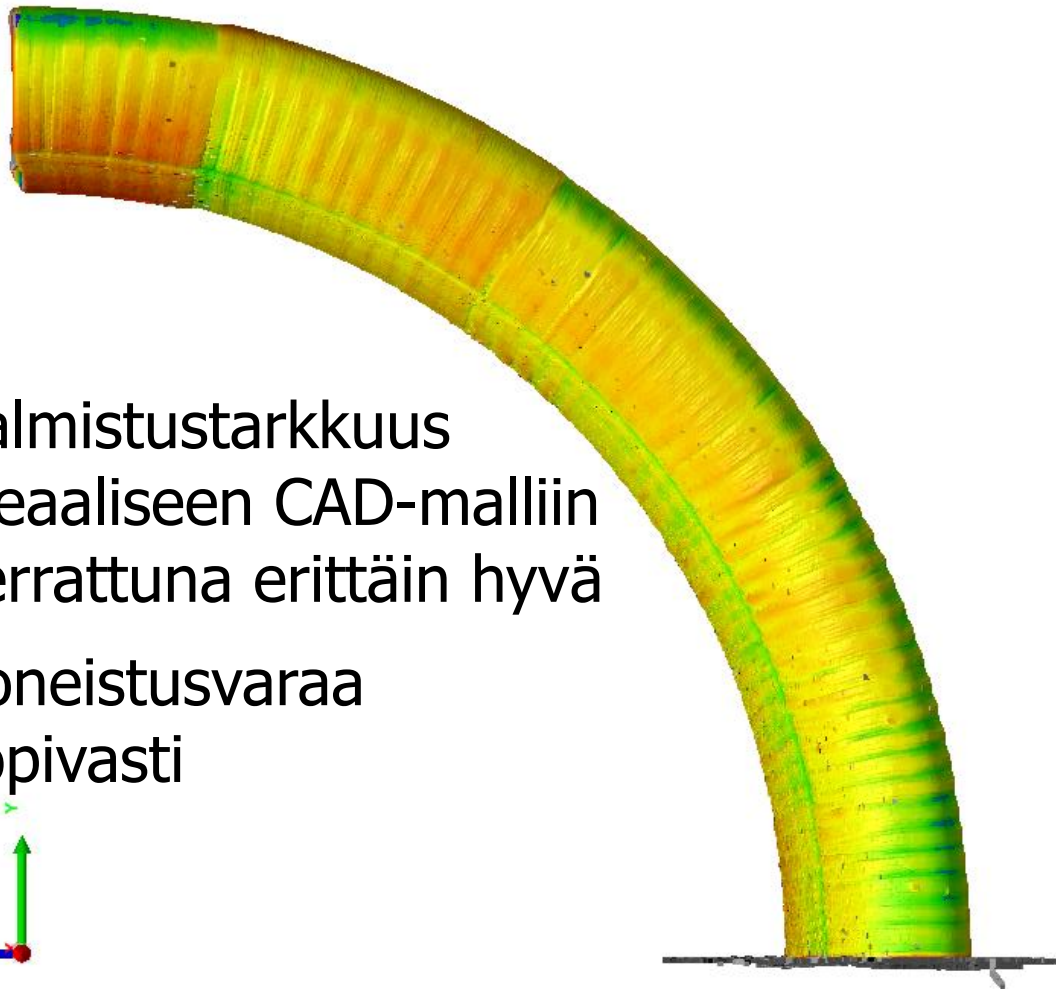
80 €/kg



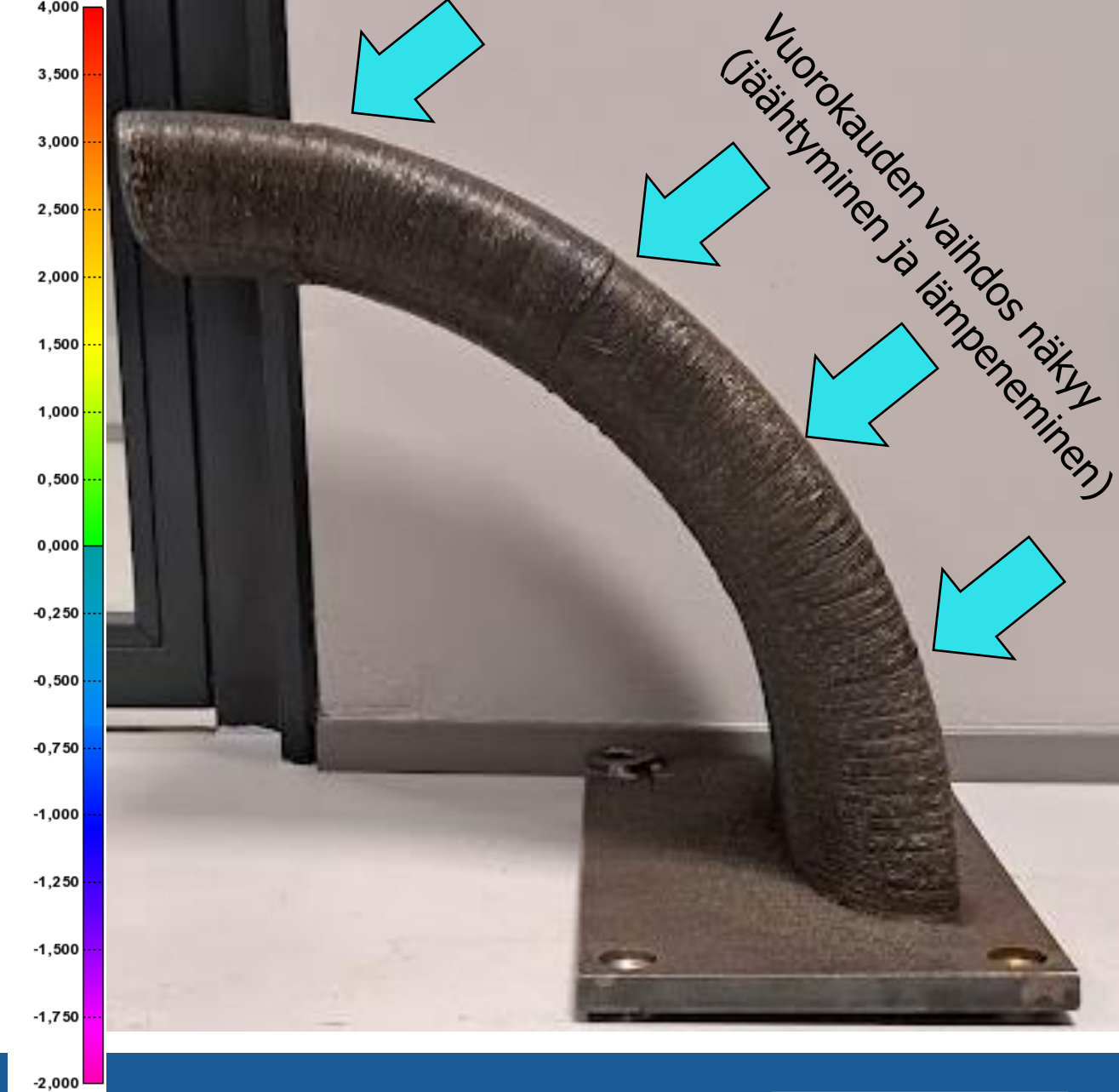
Euroopan unionin  
osarahoittama



# Case2 : Valmistustarkkuus



- Valmistustarkkuus ideaaliseen CAD-malliin verrattuna erittäin hyvä
- Koneistusvaraa sopivasti

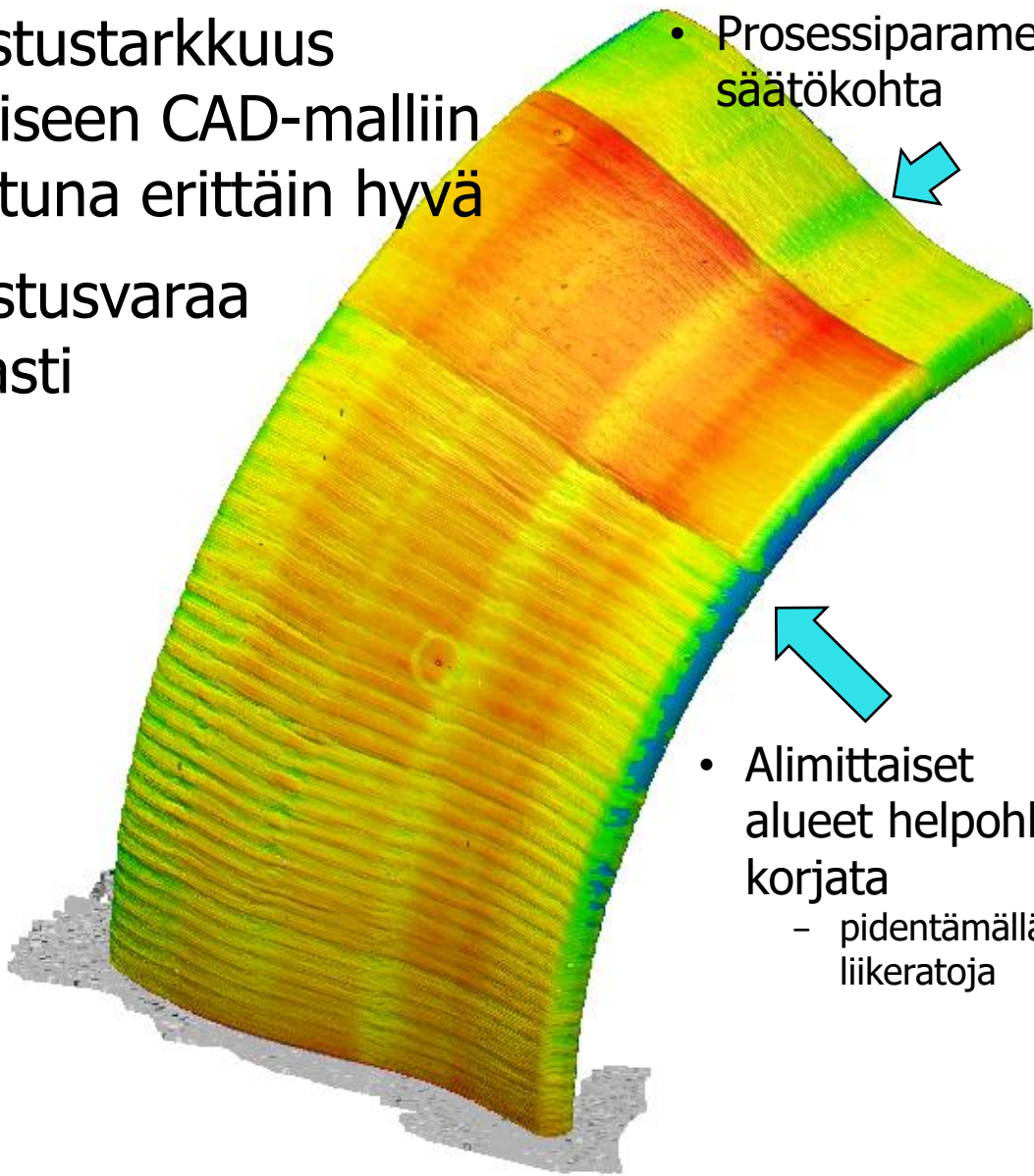


Euroopan unionin  
osarahoittama



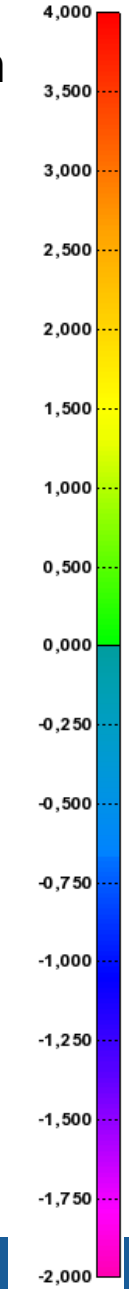
- Valmistustarkkuus ideaaliseen CAD-malliin verrattuna erittäin hyvä

- Koneistusvaraa sopivasti



- Prosessiparametrin säätökohta

- Alimittaiset alueet helpohko korjata
  - pidentämällä liikeratoja



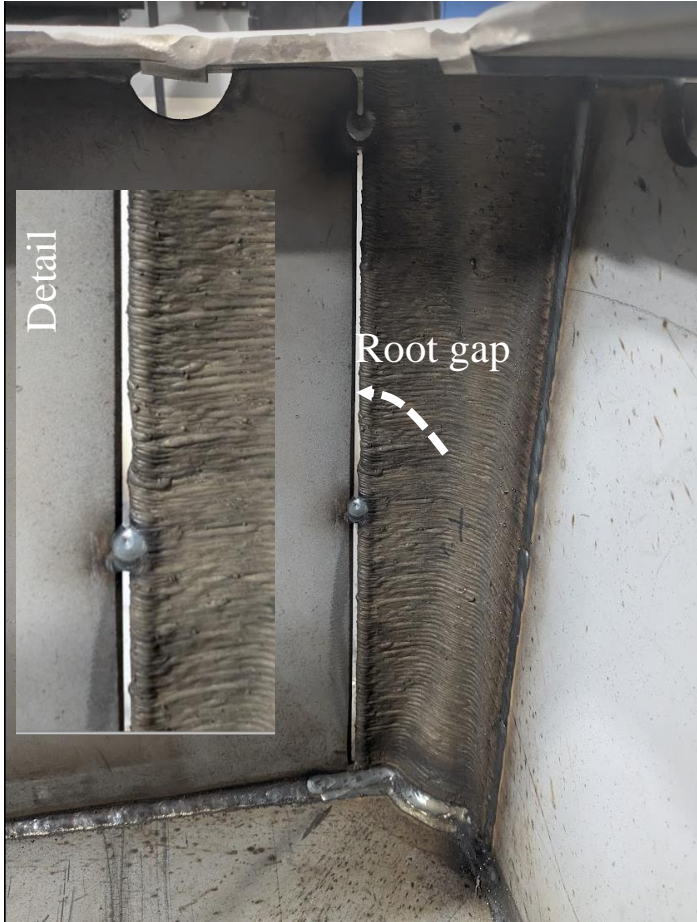
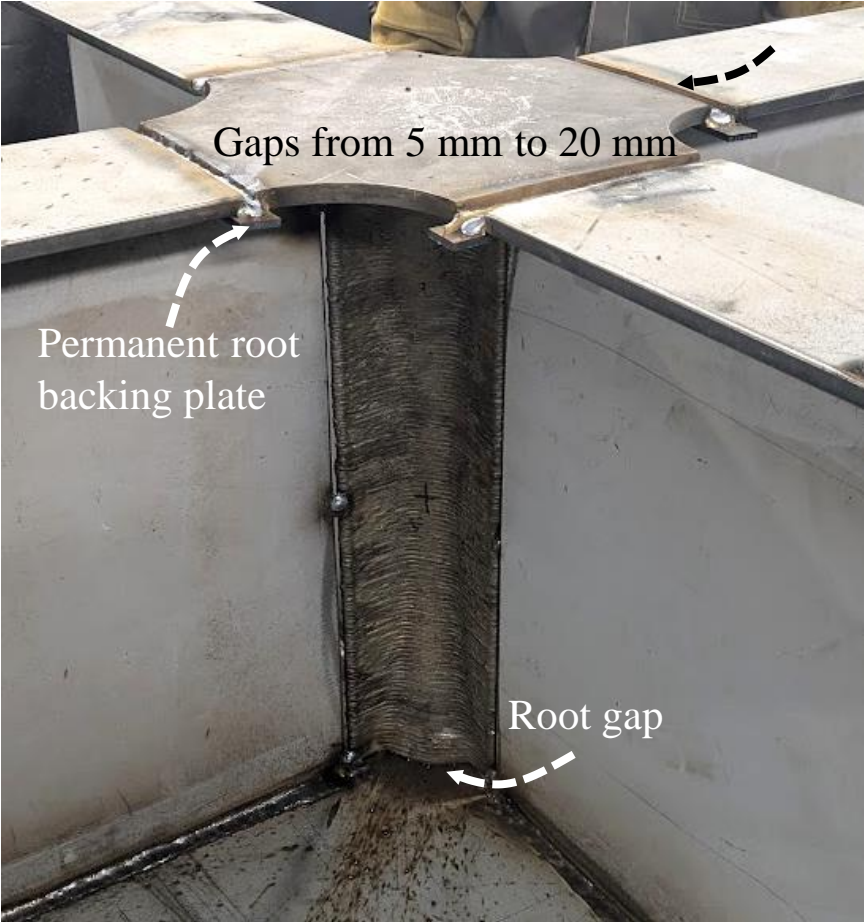
Tulosteen irrottaminen voi vaatia voimakeinoja



Euroopan unionin osarahoittama

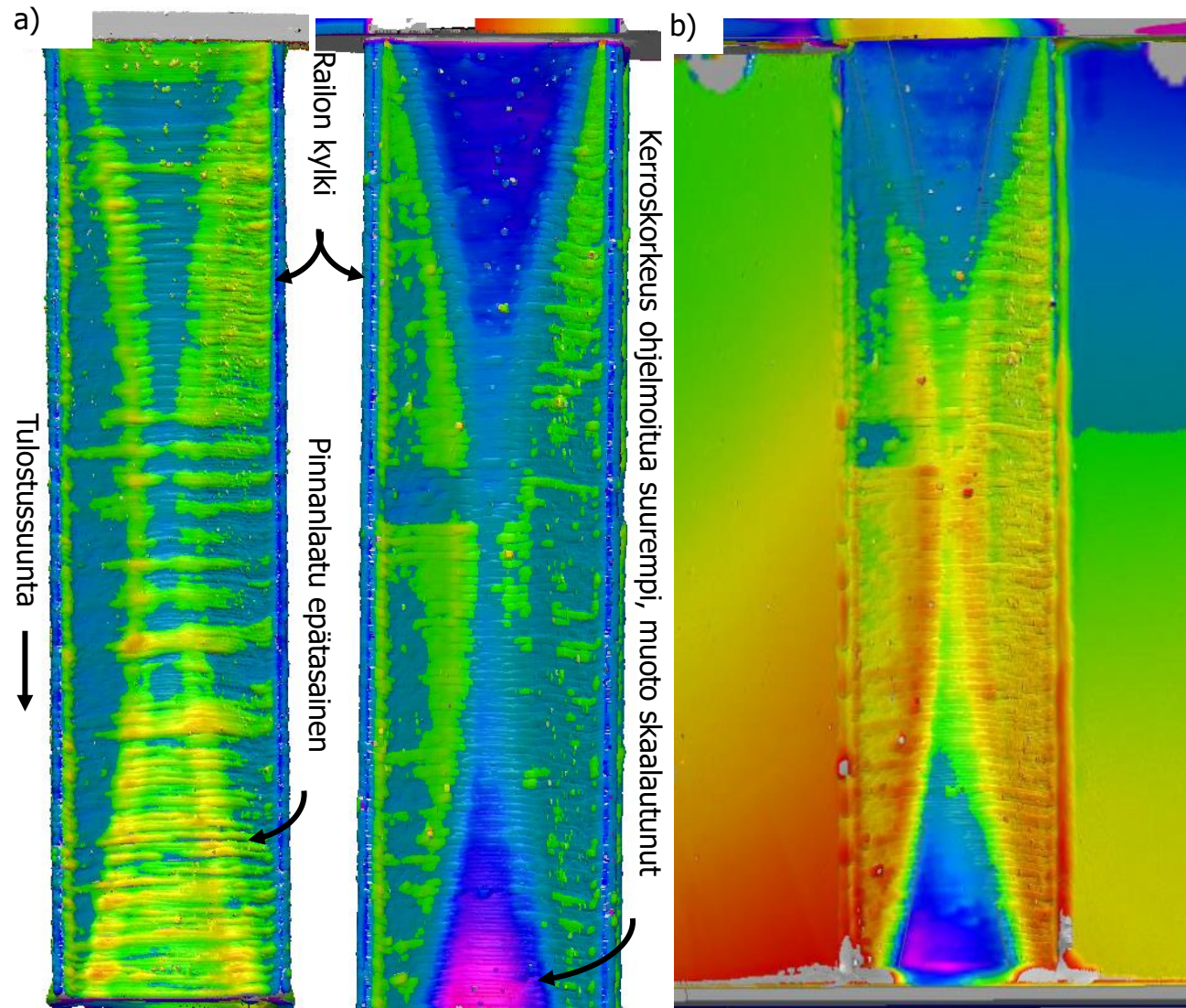


# Case 1: Tulosteen hitsaus ympäröivään rakenteeseen



# Tarkkuus

- Mittatarkkuus hyvä
- 1. Tuloste kärsi sytytysongelmista
- 2. Tulosteella hitsausolosuhteet saatiin vakioitua
  - Välipalkolämpötila 100 – 250 C°
  - Kerroskorkeus kasvoi 0,5 mm
  - Lopputuloste 20 mm ylisuuri
  - Pinnankarheus parhaimmillaan n. Ra 12 ja Rz 40 [µm]



1. Tuloste: Ilman lämpötilanhallintaa

2. Tuloste: Vakio välipalkolämpötila

Tuloste 2. hitsattuna koekappaleen rakenteeseen



Euroopan unionin osarahoittama



# Case 1 Väsytyiskoetulokset

- 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  $m=3$
- Valmistuksen kannalta mielenkiintoisin tulos tapahtui **ensimmäisellä kerroksella**

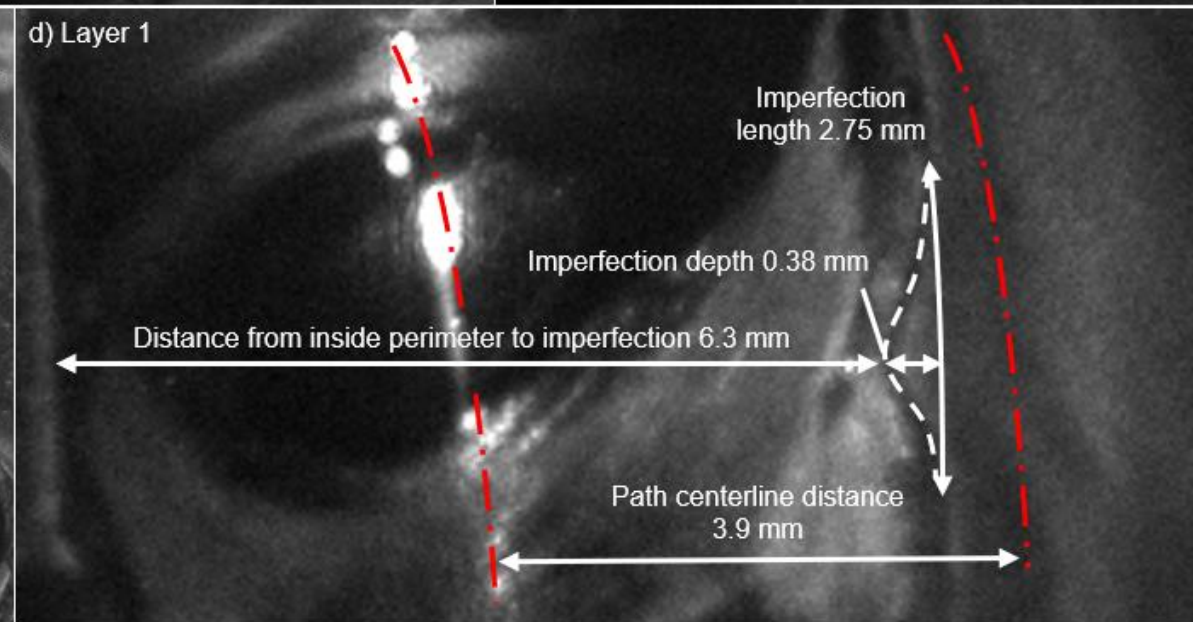
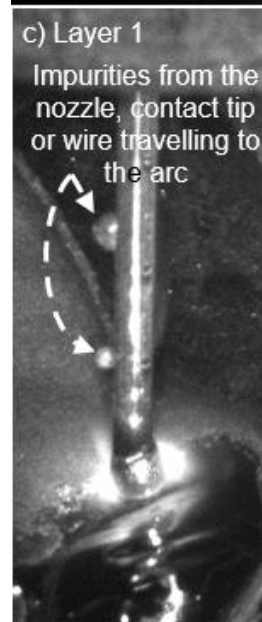
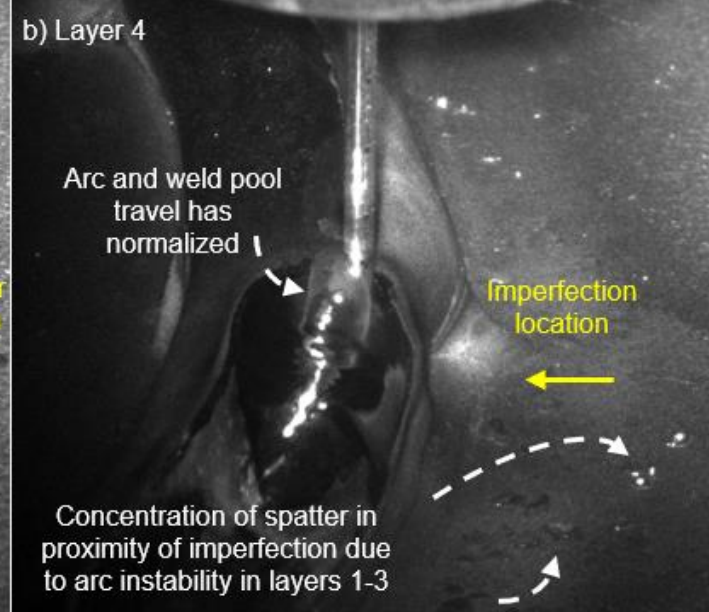
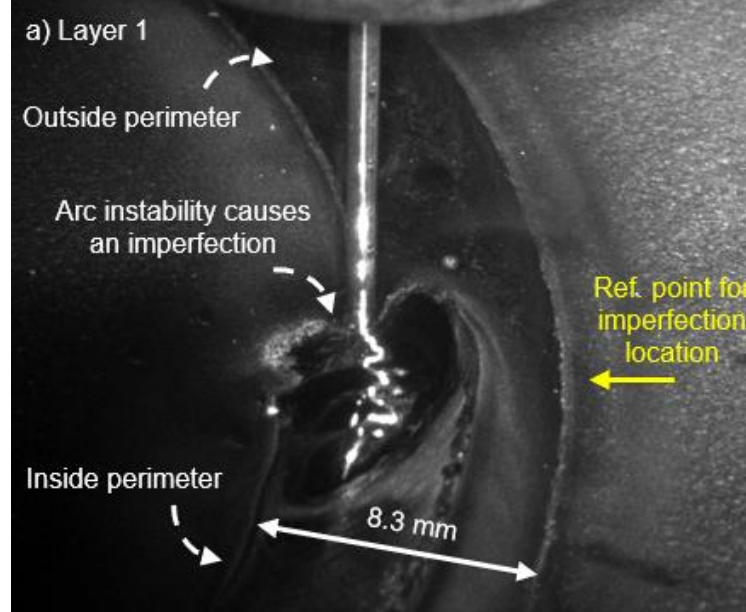


Euroopan unionin  
osarahoittama



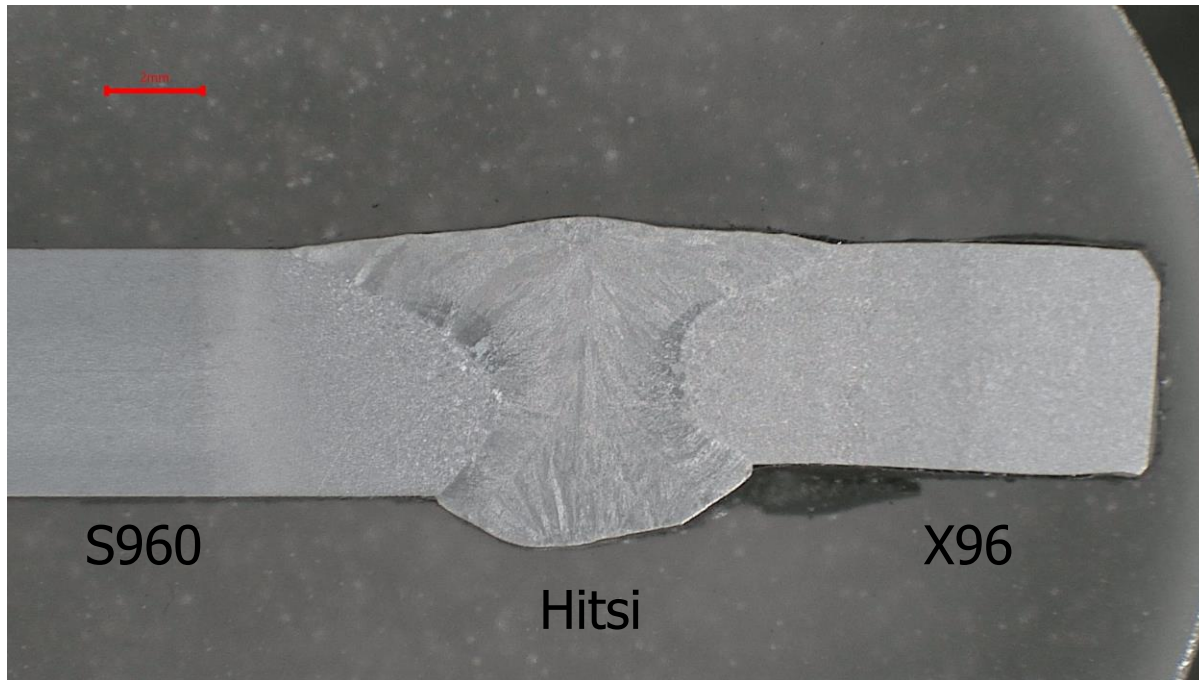
# Poikkeaman syyt

- A) 1. Kerroksen sisäradalla havaittiin pieni valokaaren ja sulan epävakaus
- B) 4. Kerroksen kuvamateriaalissa nähdään selvä kuoppa edellä mainitussa kohdassa
- C) Tarkemmassa tarkastelussa huomattiin, että 2 kuvaa (60 fps) ennen epävakautta langan mukana kulkeutuu epäpuhtauksia
- D) Mitattu poikkeama 0,38 mm syvä ja 2,75 mm pitkä

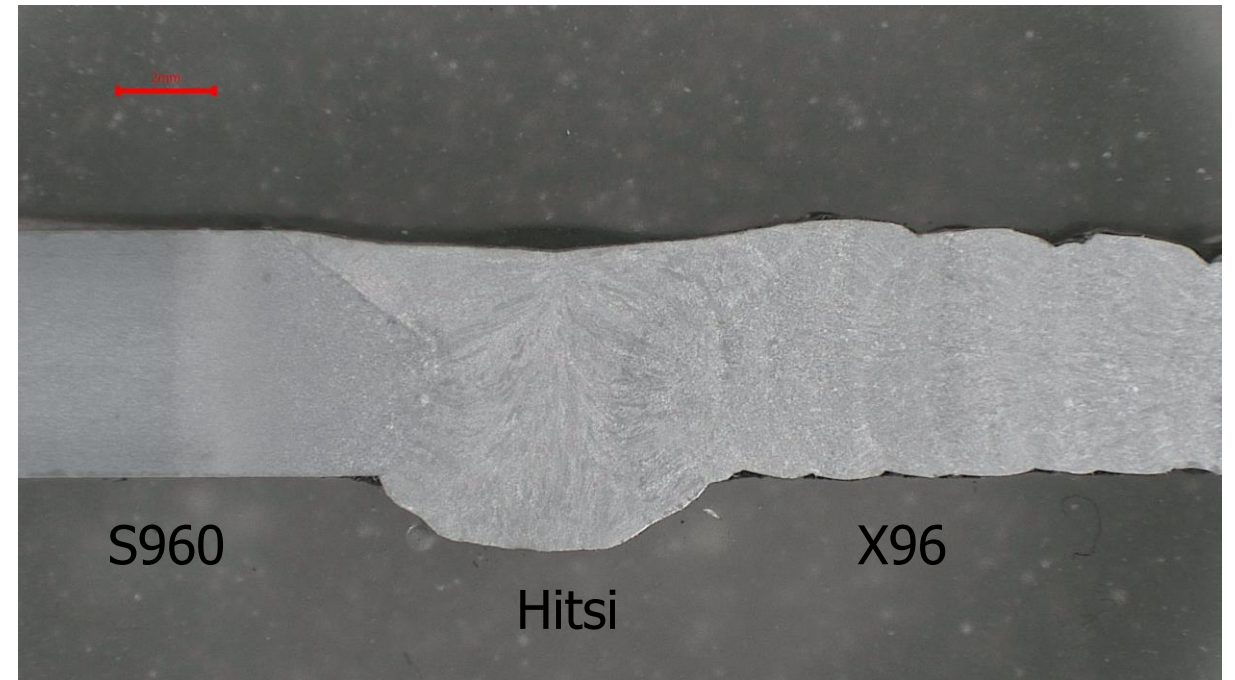


# Tulosteen hitsaus levyyn

Tulostussuunnalla on väliä



Tulostussuunta pitkittäin



Tulostussuunta poikittain



Euroopan unionin  
osarahoittama

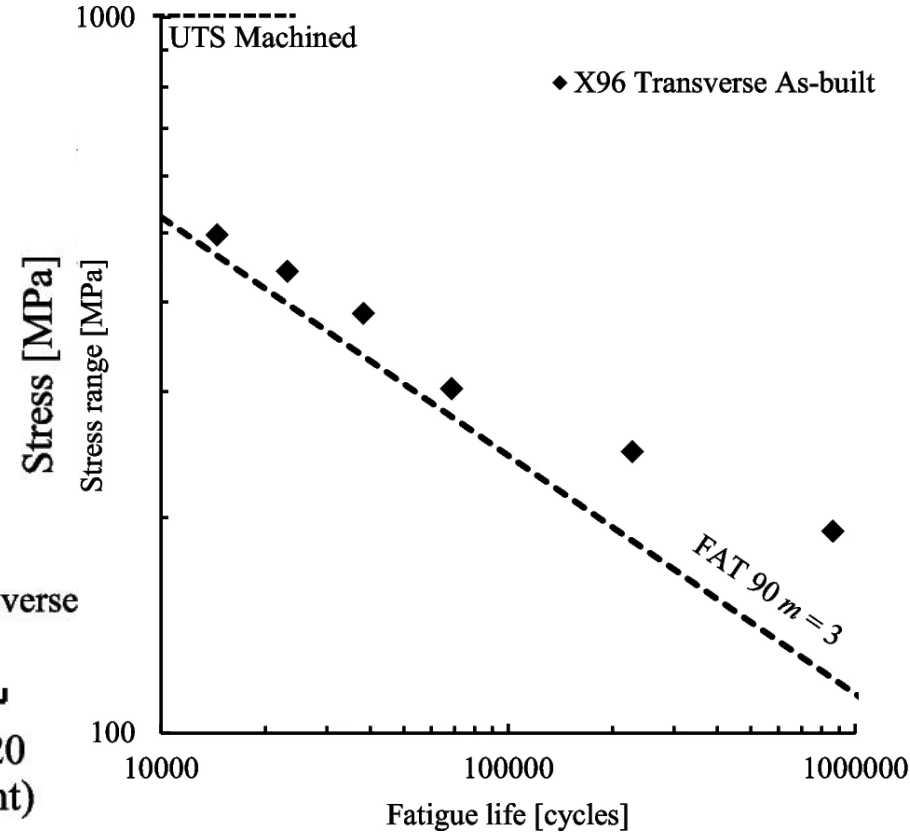
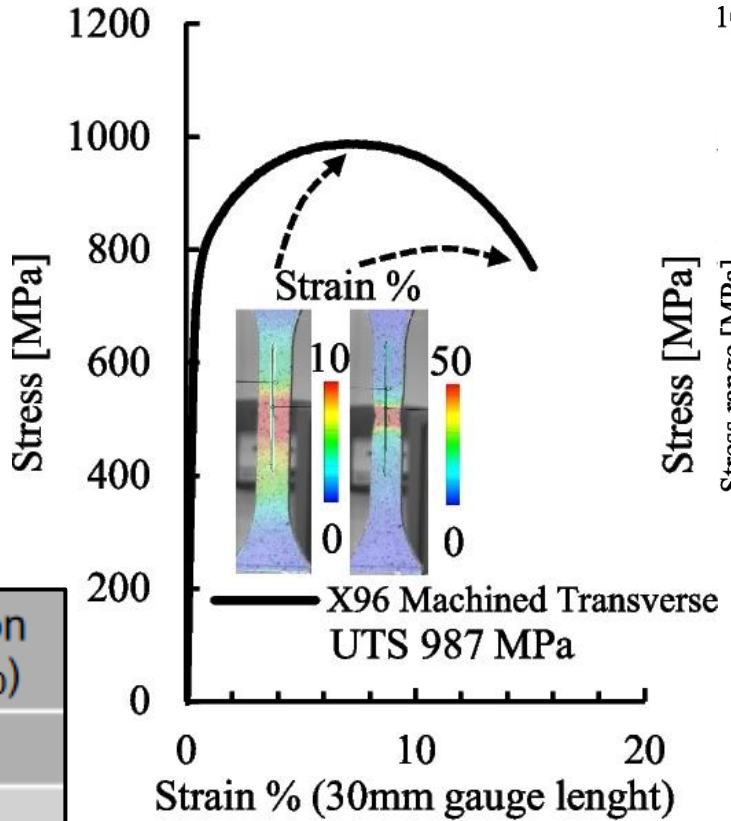


# X96 WAAM - Materiaaliominaisuudet

- Murtolujuus = 978 MPa
- Kovuus = 325 HV
- Väsymiskestävyys ylitti FAT 90 MPa  $m=3$  luokan valmistetussa tilassa

Yield strength $R_{p0,2}$	Tensile strength $R_m$	Elongation A ( $L_0=5d_0$ )
MPa	MPa	%
<b>980</b> ( $\geq 890$ )	<b>1020</b> (940 – 1180)	<b>16</b> ( $\geq 15$ )

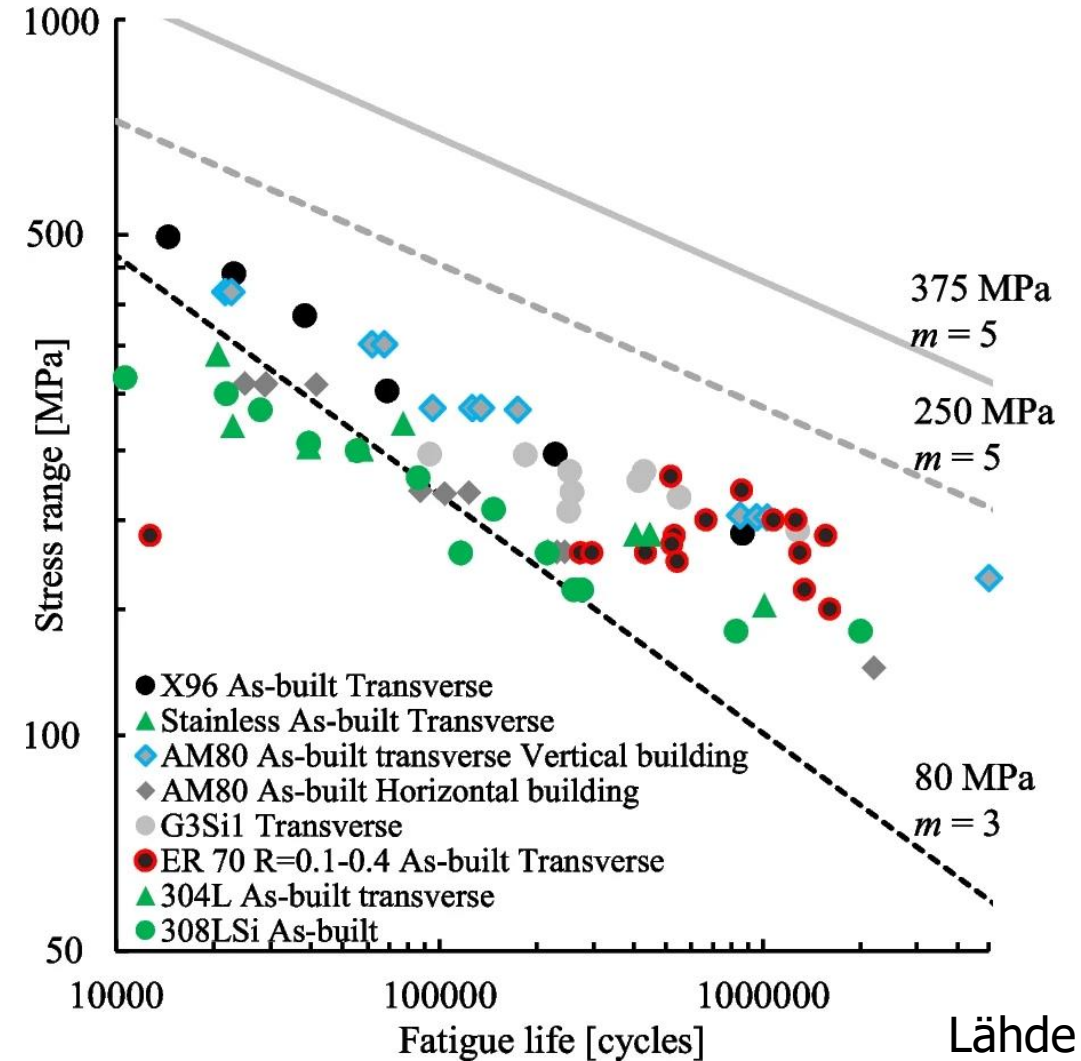
Valmistajan lupaamat arvot



Lähde [3]

# X96 WAAM - Materiaaliominaisuudet

- **WAAM valmistus ei merkittävästi huonontanut X96 materiaalin suorituskykyä**
- **Voidaan keskittyä valmistamaan laadukkaita WAAM-rakenteita**



Lähde [3]



Euroopan unionin  
osarahoittama



# WAAM mahdollisuudet ovat suurissa ja monimutkaisissa kappaleissa

- **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

## **Kustannustehokas**

Vähemmän esi- ja jälkivalmisteluvaiheita

## **Resurssitehokas**

Käytetty materia  
menee tulosteen  
valmistukseen

## **Energiatehokas**

Käytetty energia  
menee tulosteen  
valmistukseen



Euroopan unionin  
osarahoittama



# 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>

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, kysyttävää?

Ajankohtaista, jos **WAAM** kiinnostaa:

- Lappeenrannassa **LUT:lla 9.4.2025 WAAM demonstraatioita** (ja Cobotteja), tervetuloa!
- Lisätietoja ja ilmoittautuminen:
  - <https://link.webropolsurveys.com/EP/17AA9ED8697231B5>



Euroopan unionin  
osarahoittama

