

# WAAM simulaatiomallin rakentaminen

Metalliwebinaari

10.12.2025

Sami Westman, LUT

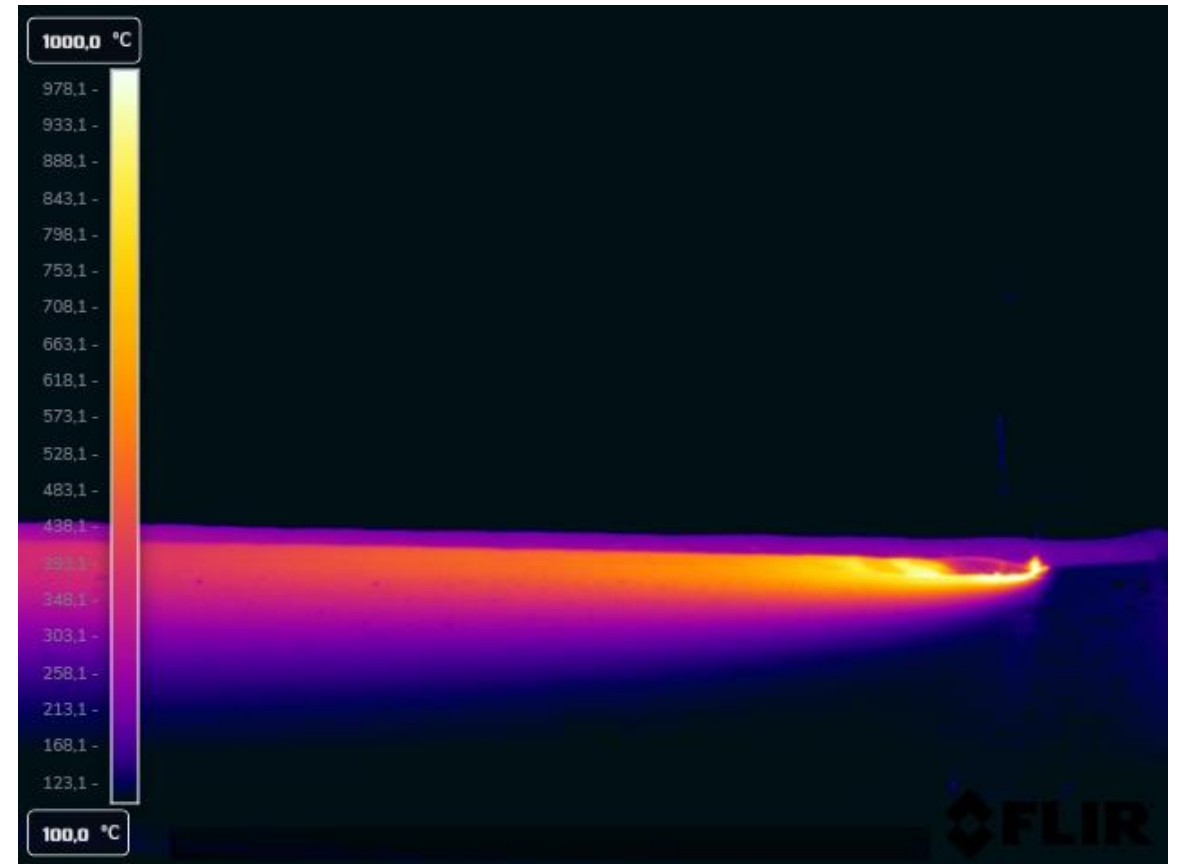


Euroopan unionin  
osarahoittama



# Suorakerrostus ja simulaatio

- Suuri lokaali lämmön tuonti -> suuret lämpö erot
  - Jäännös jännitykset
  - Siirtymät
  - Materiaali ominaisuudet
- Ongelmat harvemmin prosessin alussa
  - Hankala testata hukkaamatta materiaalia/aikaa
- Simulaatio suuntaa antava



Euroopan unionin  
osarahoittama

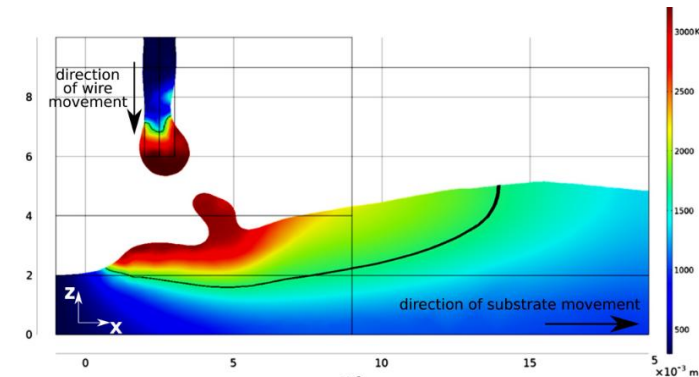
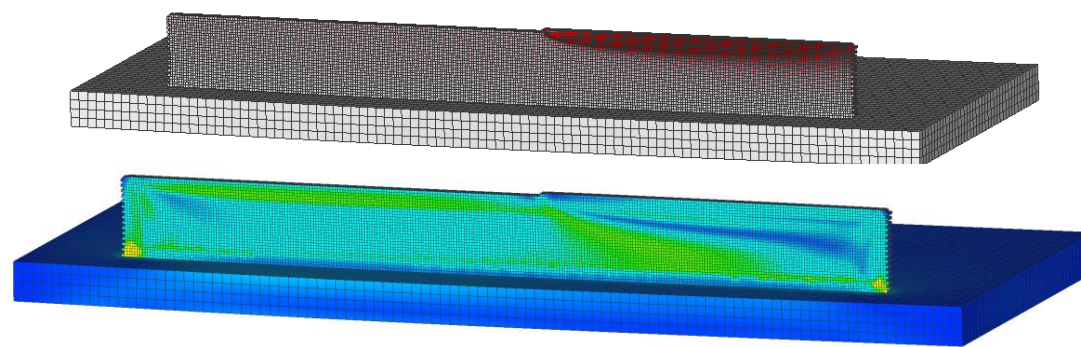
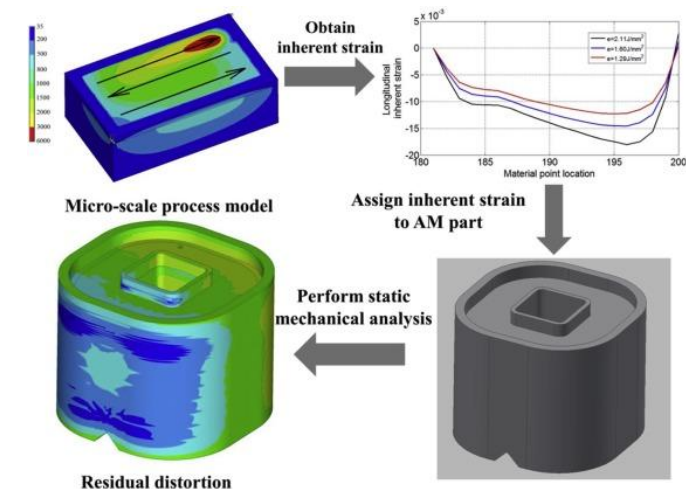


# Simulaatio tyypit

Lyhentynyt simulaatio aika

Lähempänä todellisuutta

- Inherent strain
  - Materiaali/parametri ominainen materiaali käyttäytyminen
  - Pelkästään mekaaninen analyysi
  - Standardisoitu prosessi
- Lämpö mekaaninen analyysi
  - Täysi lämpöhistoria ja mekaaninen käyttäytyminen
  - Skaalattavuus
- Virtausanalyysi
  - Sulan käyttäytyminen/jähmettyminen
  - Palkojen muodot



Cadiou, S. et al. (2020) 3D heat transfer, fluid flow and electromagnetic model for cold metal transfer wire arc additive manufacturing (Cmt-Waam). *Additive manufacturing*. [Online] 36.

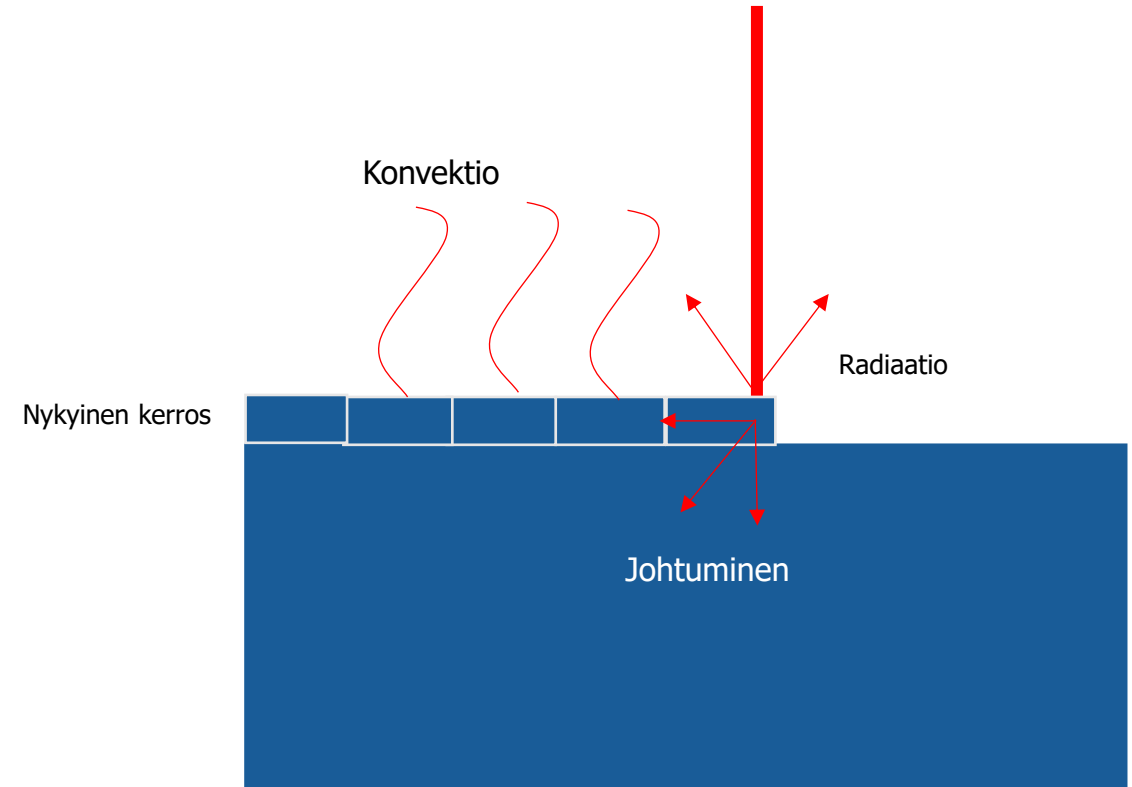


Euroopan unionin  
osarahoittama



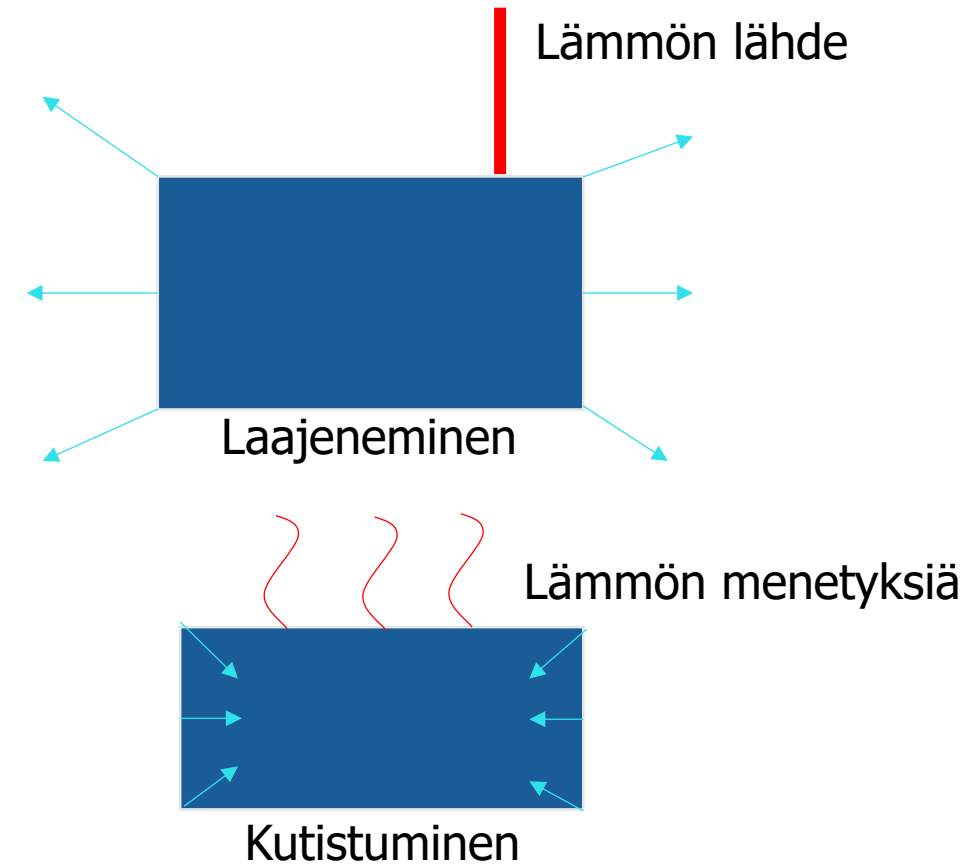
# Lämpö simulaatio

- Yksinkertaistettu malli "sulasta"
  - Sulan virtausta ei simuloitu
  - Lämmön lisäys -> johtuminen -> poistuminen prosessista
- Miten lämpö energia liikkuu prosessissa
- Lämpötilariippuvaliset materiaali ominaisuudet
  - Elementin sen hetkisen lämpötilan mukaan



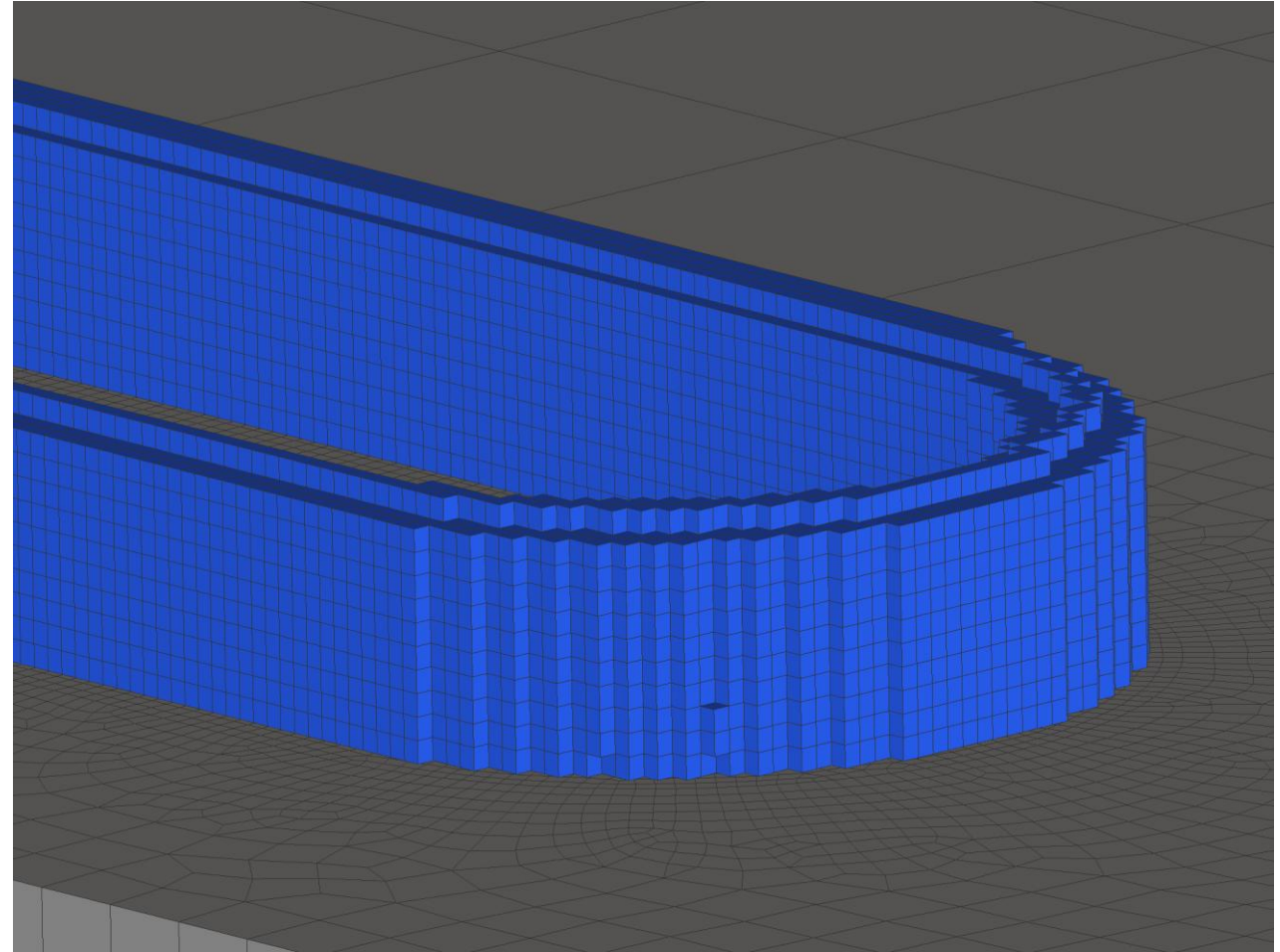
# Mekaaninen simulaatio

- Kappaleen mekaaninen käyttäytyminen prosessissa
  - Lämmön lähde lämmittää kappaletta → Materiaali laajenee → Materiaali jäähtyy → Kutistuminen → Ympäröivän materialin kuormitus → Jäännös jännitykset/siirtymät



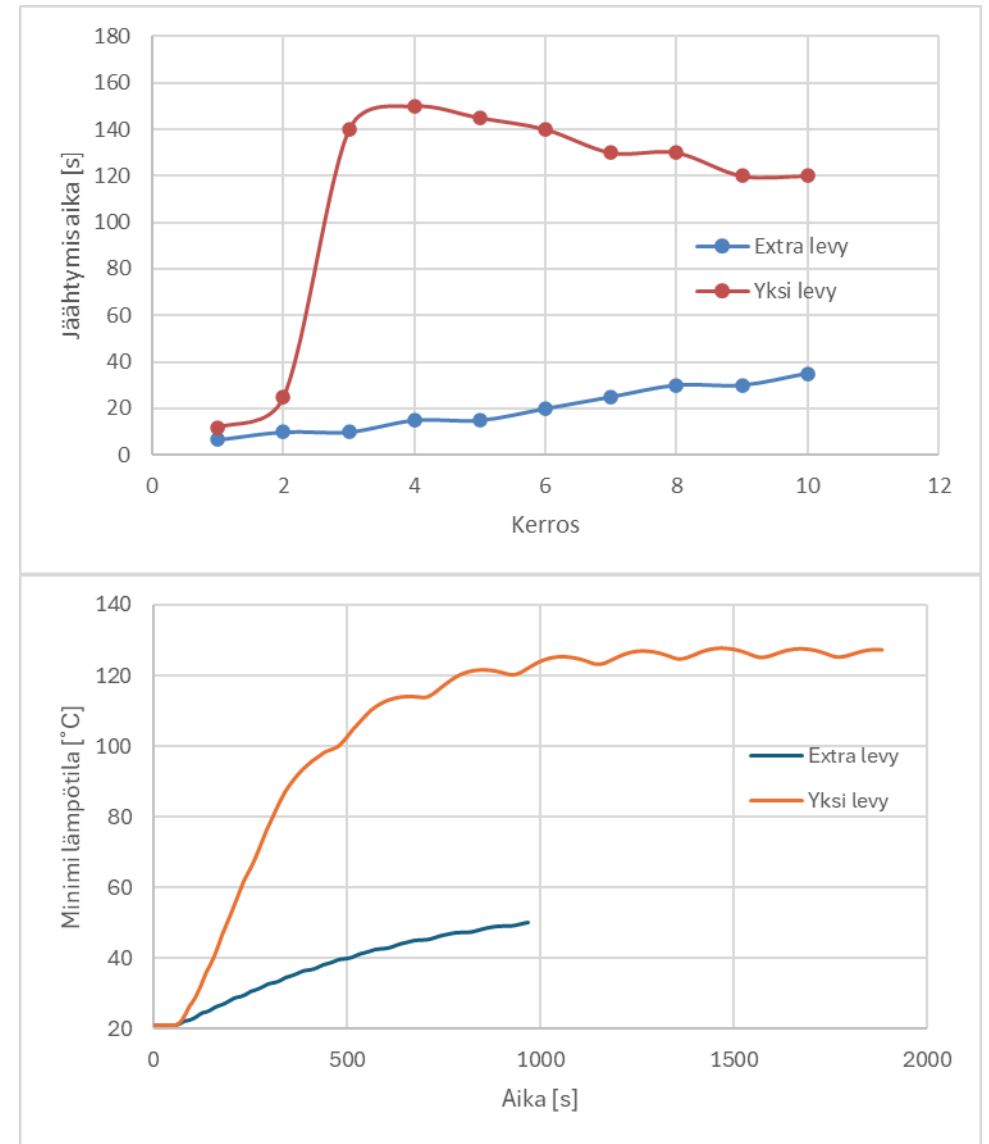
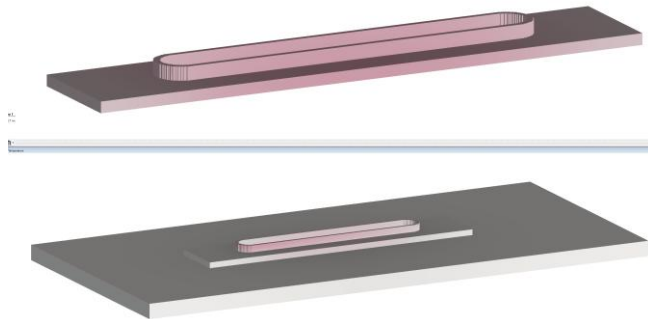
# Malli ja verkotus

- Verkotettu malli
  - Elementin korkeus hyvä olla jaollinen kerroksen paksuudella
  - Palkon koko (korkeus/leveys) pitää olla tiedossa
- Vokseli
  - Yksinkertainen (Lyhyempi simulointi aika)
  - Verkotus aina tasossa
  - Ongelmat pyöreiden muotojen kanssa
    - Terävät kulmat → Jännitys piikki
    - Paksuus vaihtelu
- Heksaedri
  - Seuraa tarkemmin kappaleen muotoja
  - Raskaampi laskennalle
  - Hankalampi verkottaa
    - Vaatii yleensä manuaalista työtä



# Muu mallinnettava

- Ympäröivä rakenne mallinnettava tiettyyn pisteeseen asti
  - Pidä yksinkertaisena (Lisää elementtejä → Pidempi laskenta aika)
- Suurin tekijä jäähtymisnopeudessa lämmönjohtuminen

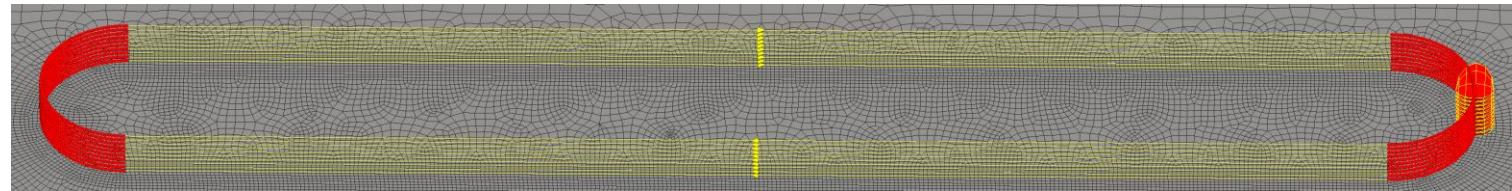




# Liikeradat

- Ohjelmoidaan "todellinen" ohjelma
  - "Robotin liikeradat"
- Hyväksytyt tiedosto muodot vaihtelevat ohjelmistosta riippuen
  - Pisteet
    - CSV, BDF,
  - Liikerata
    - NC (G-code)

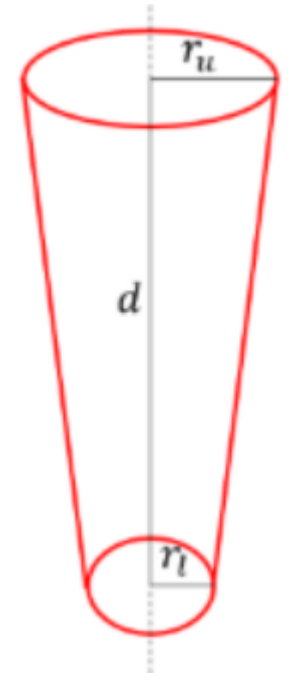
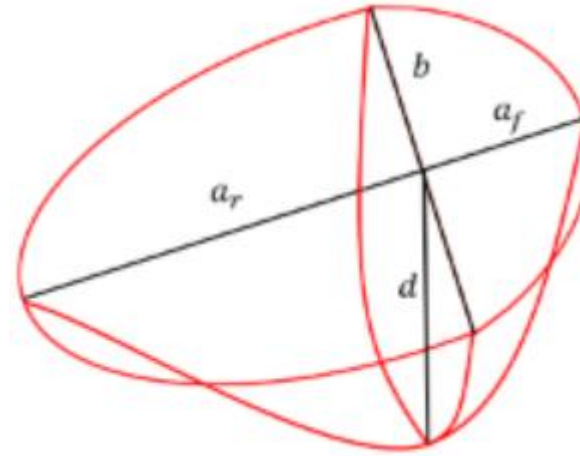
```
1 G21      ; Set units to mm
2 G90      ; Absolute positioning
3 G1 F1000 ; Set feed rate
4
5 ; Start point (left straight section start)
6 G0 X0 Y0
7
8 ; Move along first straight section
9 G1 X300 Y0
10
11 ; First arc (right end, clockwise)
12 G2 X320 Y20 I0 J20
13
14 ; Move along second straight section (top)
15 G1 X0 Y40
16
17 ; Second arc (left end, clockwise)
18 G2 X-20 Y20 I0 J-20
19
20 ; Back to start
21 G1 X0 Y0
22
23 M30      ; End program
```





# Lämmönlähde

- Liikkuva malli joka määrittää lämmön tuonnin prosessiin
  - Energian syöttö suoraan prosessi parametreista
  - Tehokkuus
    - Kaari (mig/mag) 60-80%
    - Laser 30-50%
  - Koko
  - Energia jakauma
- Ei niin tarkkaa kuin hitsauksessa
  - Kokonais energia määrällä enemmän merkitystä
  - Sulan koko muuttuu prosessin aikana

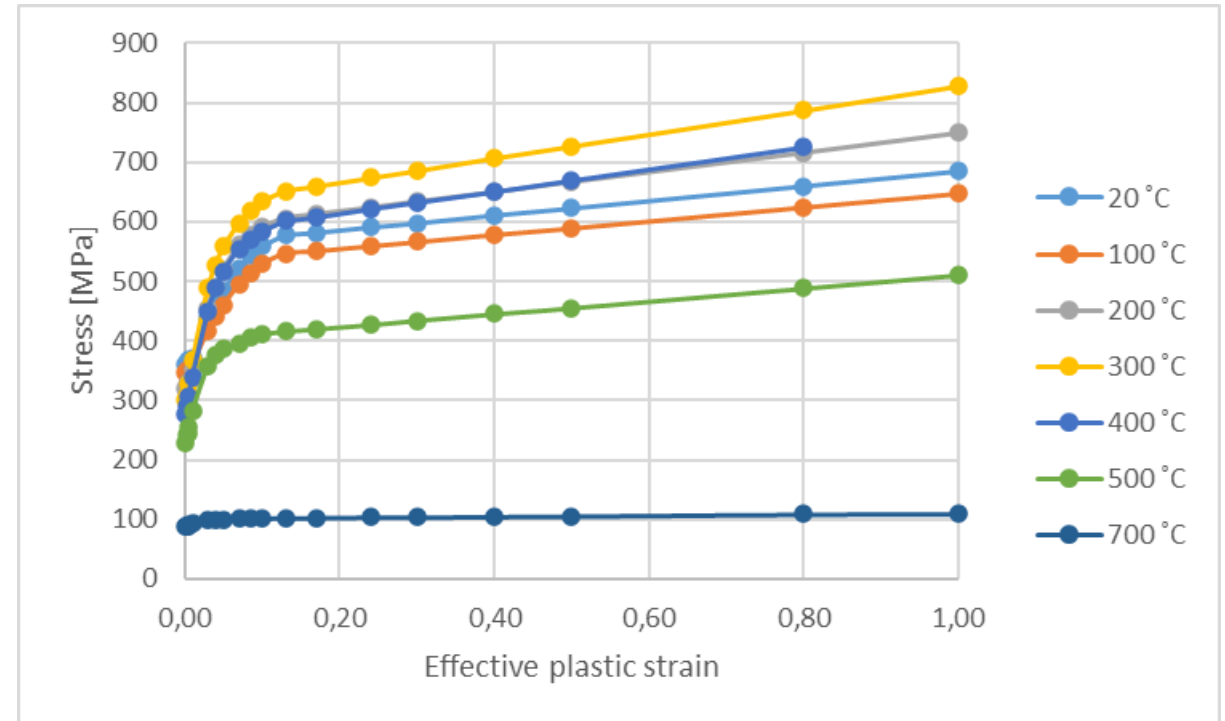


Simufact welding



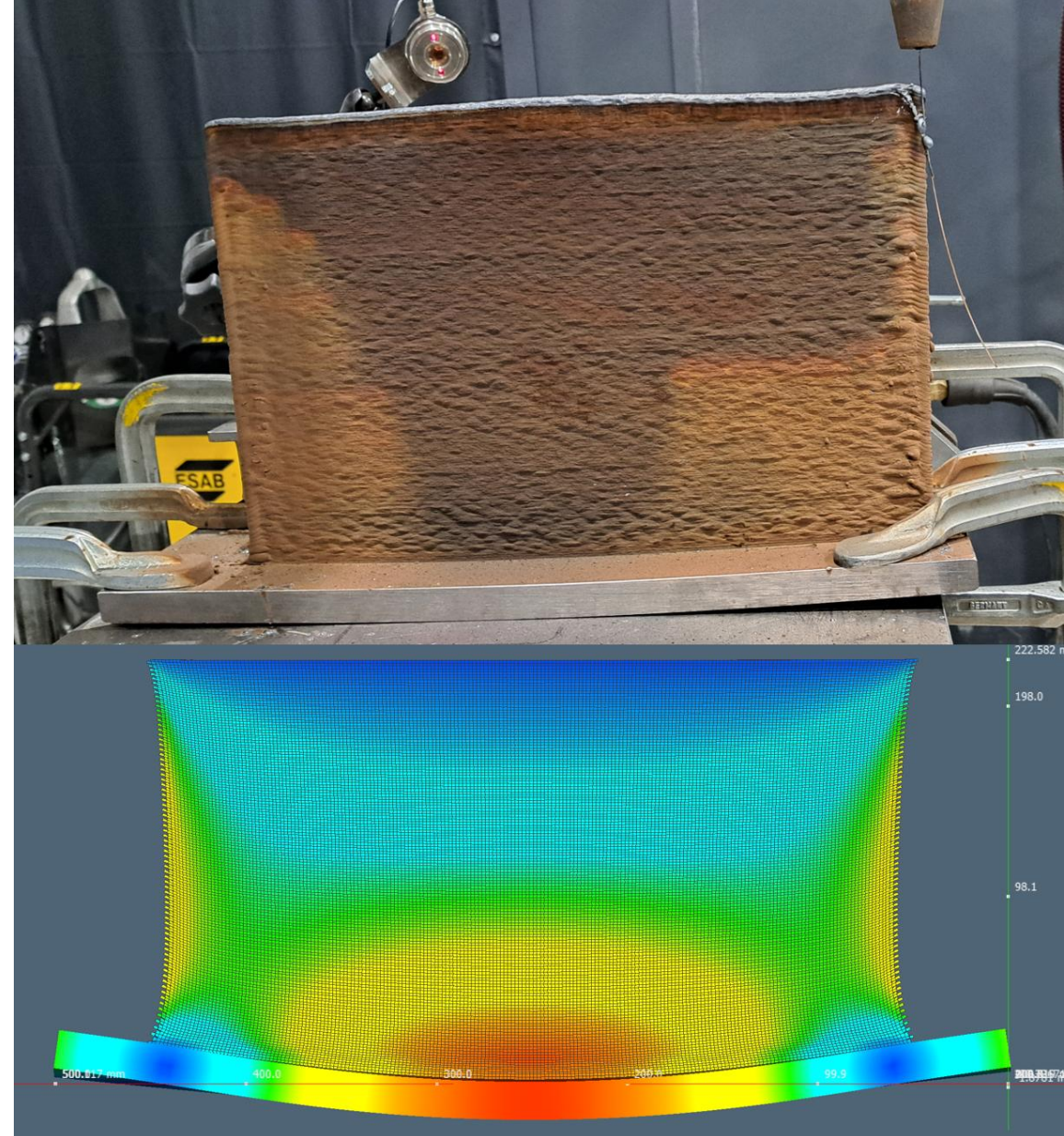
# Materiaalimalli

- Materiaali ominaisuudet muuttuvat kappaleen lämmetessä
  - Huomioidaan lämpötila riippuvaisilla materiaali ominaisuuksilla
- Tärkeitä lämpötila riippuvia ominaisuuksia
  - Mekaaninen
    - Myötöraja
    - Kimmokerroin
    - Lämpölaajeneminen
  - Lämpö
    - Ominaislämpökapasiteetti
    - Lämmön johtuminen



# Kiinnitys

- Jokaiseen suuntaan täytyy olla rajoitukset (XYZ)
- Lämpösimulaatio
  - Ei vaikutusta
- Mekaaninen
  - Suuri vaikutus siirtymiin ja jäännösjännitysten muodostumisiin

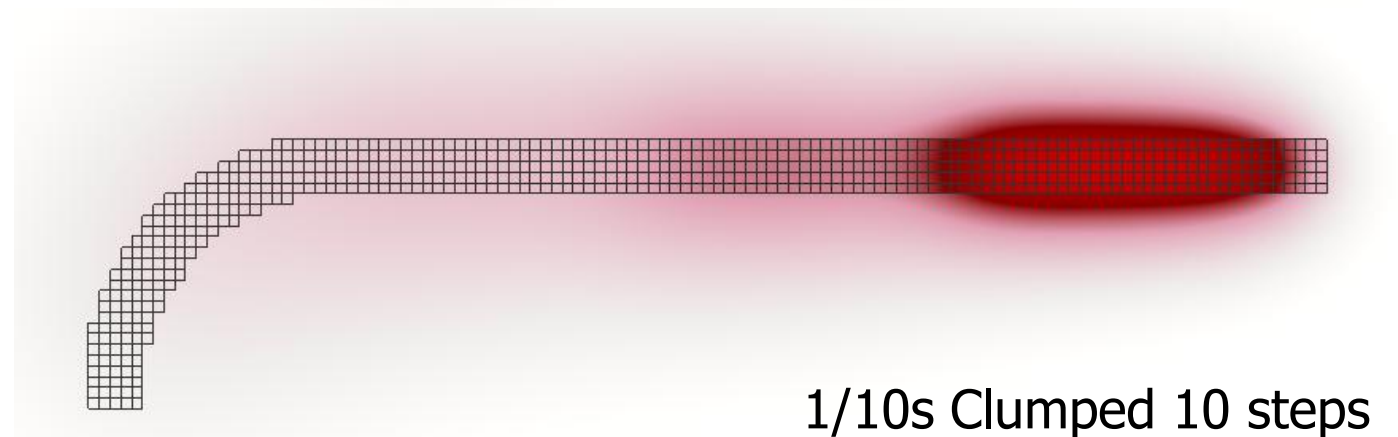
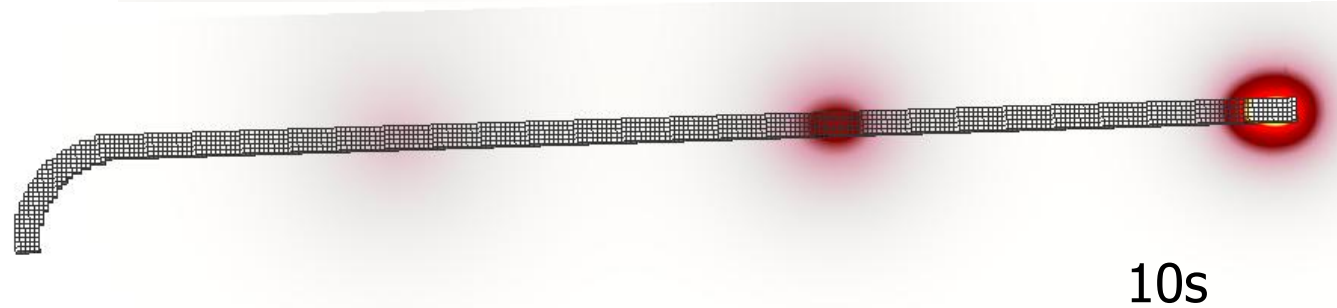
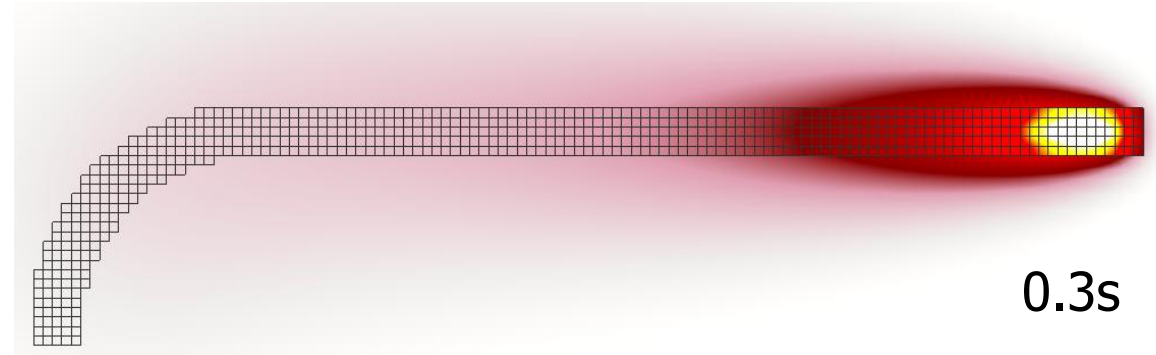


Euroopan unionin  
osarahoittama



# Inkrementit

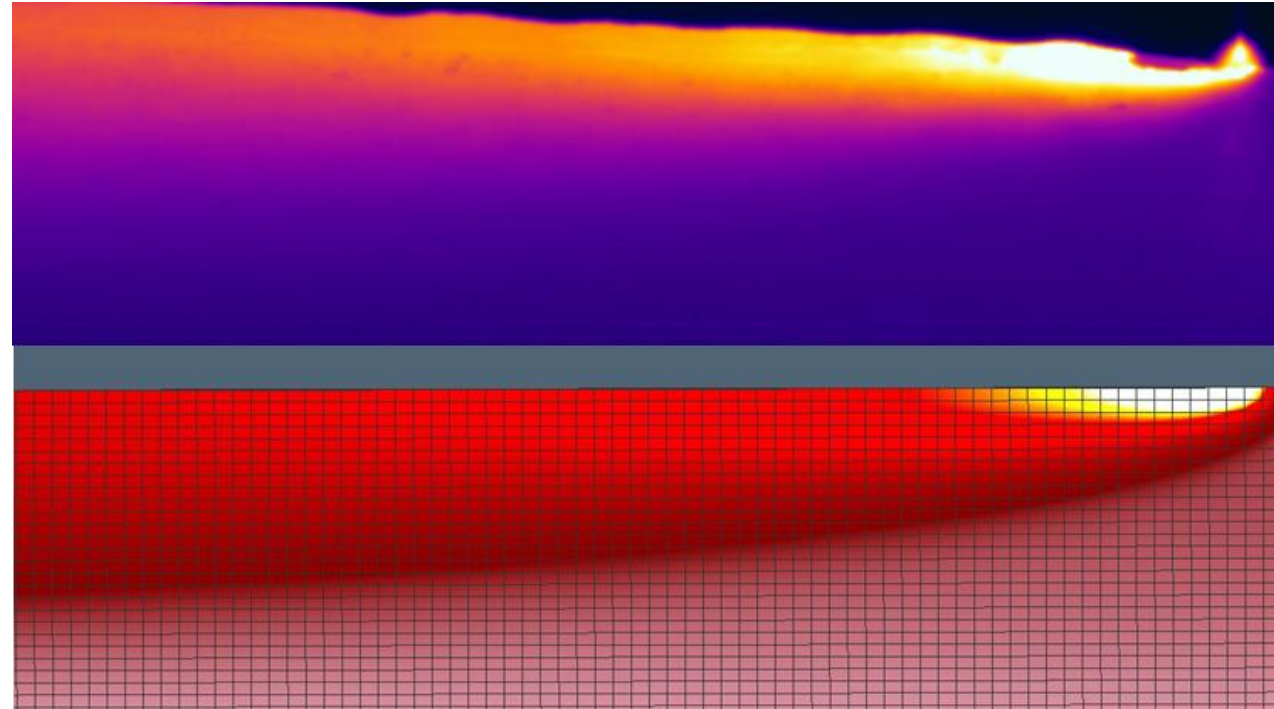
- Step increment
  - Steppien pituus
    - Tiedoston koko
    - Simulaatio aika
    - Tarkkuus
- Clumped
  - Pitkillä stepeillä kannattaa huomioida että simulaatio jakaa lämpö energian





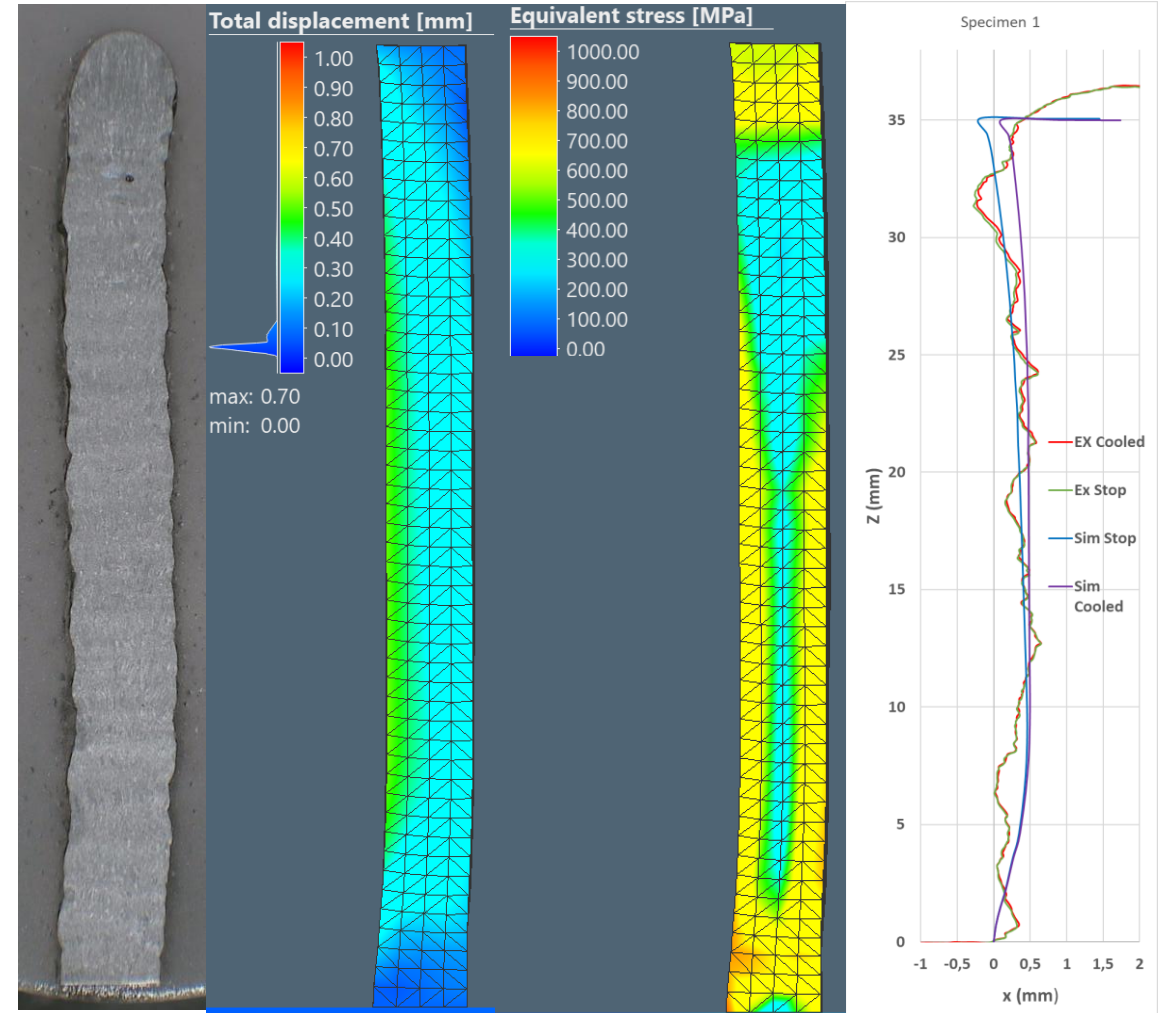
# Kalibraatio Lämpö

- Verrataan simulaatio tuloksia koe dataan
  - Aloita yksinkertaistetusta mallista
- Lämpösimulaatiosta kannattaa aloittaa
  - Lämpökamera > pyrometri
  - Lämpöhistoria nopeampi simuloida
  - Jos lämpö simulaatio kaukana todellisuudesta → Virheelliset inputit mekaaniselle simulaatiolle
  - Vähemmän muuttujia
- Muutettavia asioita
  - Käytännössä kaikki paitsi prosessi parametrit



# Mekaaninen

- Tarkkaillaan kokonais rakenteen siirtymiä
  - Hankala pienissä rakenteissa joissa palkon geometrialla suuri merkitys osan lopulliseen muotoon
  - Monimutkaisissa geometrioissa 3D skannaus hyödyksi



# Kiitos



Euroopan unionin  
osarahoittama

