



Teräsrakenneyhdistys  
Finnish Constructional Steelwork Association

## TERÄSRAKENTAMISEN T&K - PÄIVÄT

24-25.8.2023

Paidia-sali, Nokia Areena, Tampere

### Hitsausliitoksen kestävyys lujilla ja ultralujilla teräksillä

Timo Björk, Antti Ahola,  
Teräsrakenteiden laboratorio  
LUT-yliopisto

## SISÄLTÖÄ

HITSAUSLIITOKSET JÄNNITYKSET

LIITOSMATERIAALIN KAPASITEETTI

HITSAUSLIITOKSEN MITOITUSPERIAATE

LUJIEN TERÄSTEN ERITYISPIIRTEITÄ

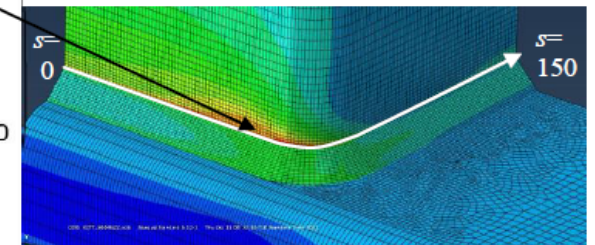
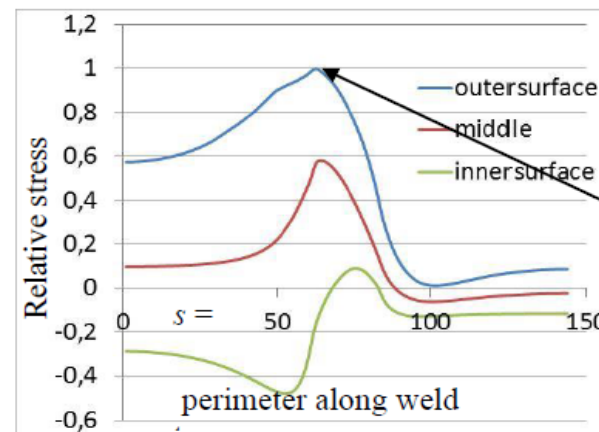
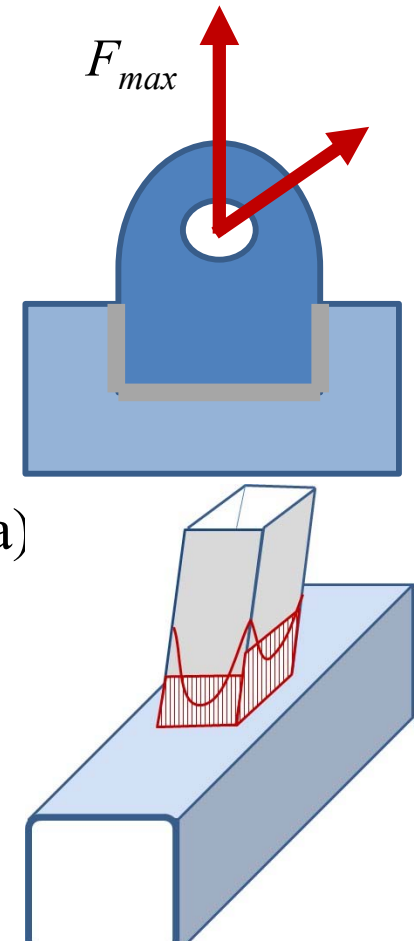
- a) SUORAKARKAISTUT (DQ) JA PÄÄSTETYT (QT) TERÄKSET
- b) JUUREN KRIITTISYYS YHDELTÄ PUOLEN HITSATUSSA LIITOKSESSA
- c) SULARAJAONGELMA
- d) TUNKEUMAN HYÖDYNTÄMINEN

MITOITUS JA MUOTOILUNÄKÖKOHTIA

YHTEENVETO

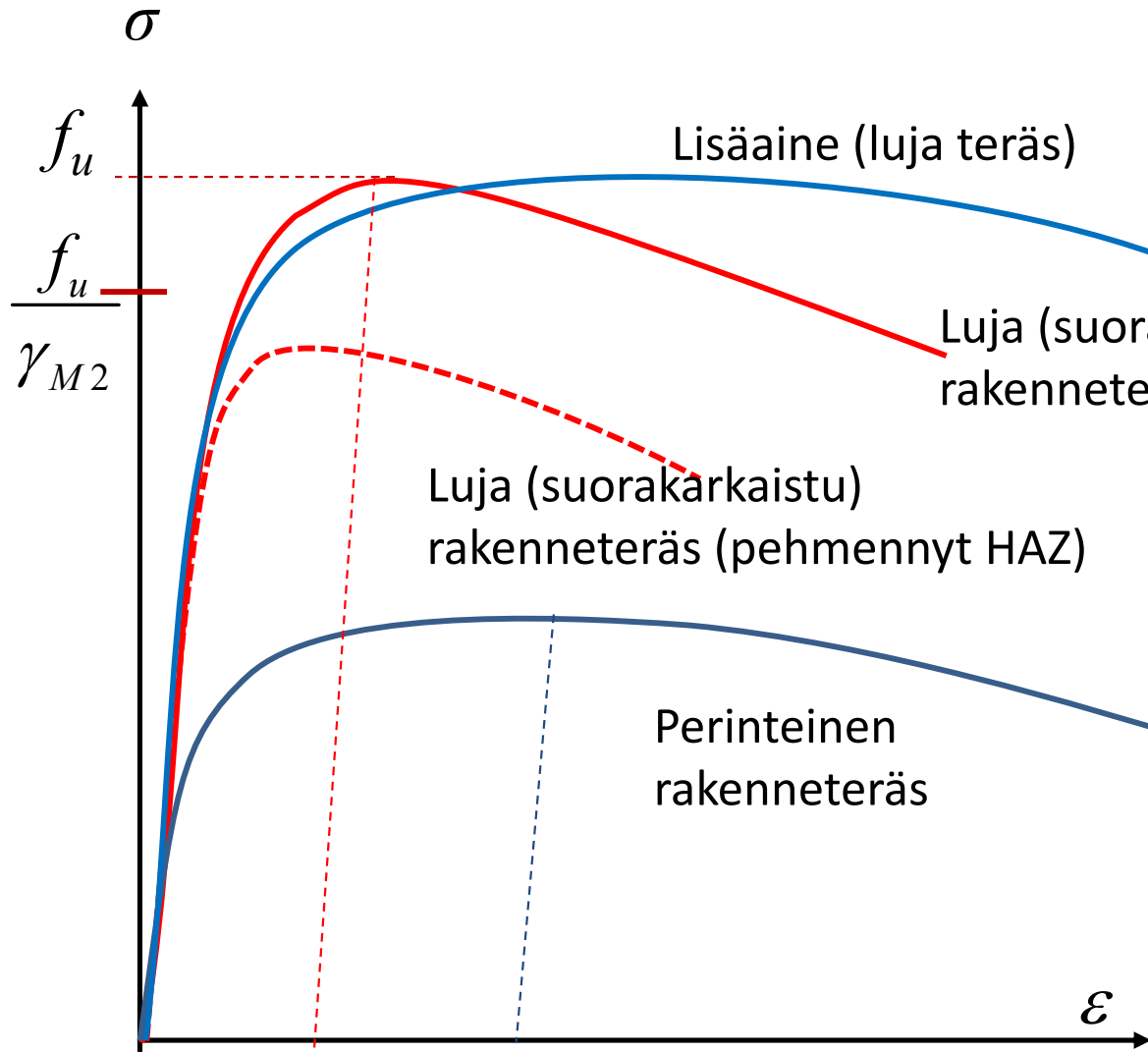
# HITSAUSLIITOKSET JÄNNITYKSET

- Hitsin mitoittava kuormitus?
  - liitoksen elinkaaren aikainen maksimaaliseen a-mittaan johtava kuorma (ei välttämättä komponentin maksimi voima)
- Huomioon otettavat jännitykset (jännitystila monimutkainen)
  - kalvojännitykset (makrogeometriavaikutus keskiarvostettuna)
  - sekundaarinen taivutus (lineaarisesti seinämäpaksuuden yli)
  - tertiäärinen (epälineaarinen, tasapainossa)
  - jäännösjännitystila (hitsin pituussuunnassa  $\approx f_y$ )
- Edellyttää plastisoitumiskykyä

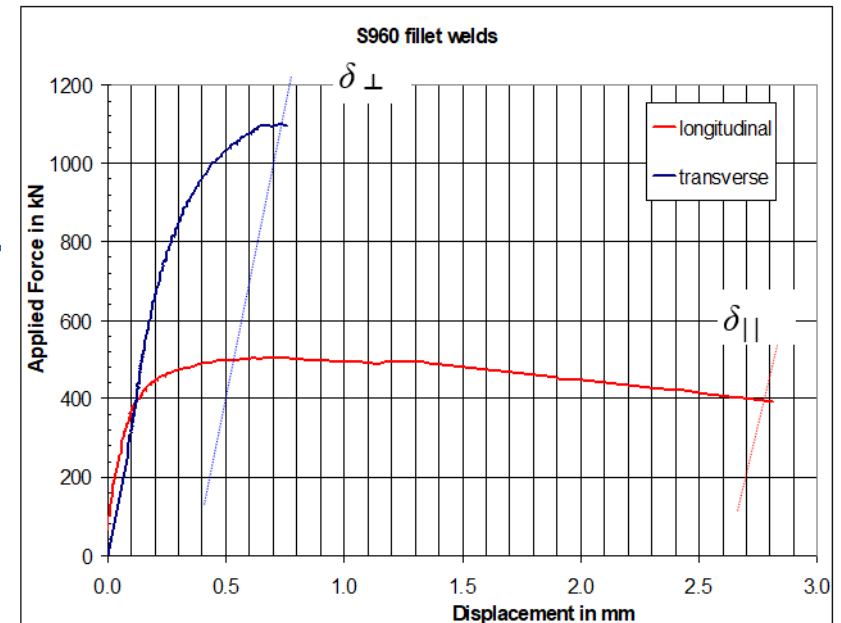
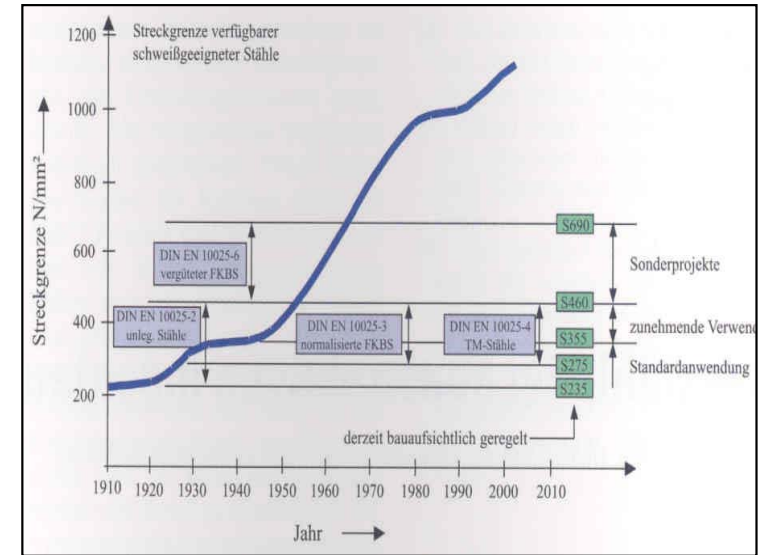


# LIITOSMATERIAALIN KAPASITEETTI

- $\sigma$ - $\epsilon$  käyrät



- materiaaliosaaminen ja hitsausmetallurgia!



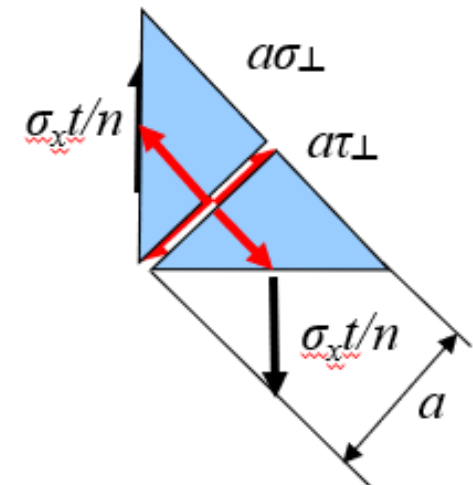
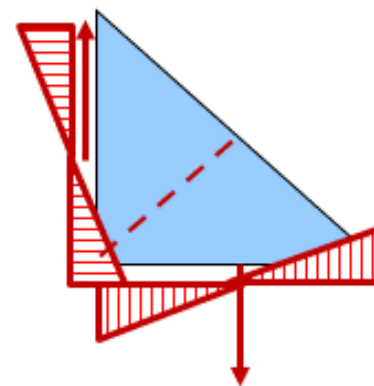
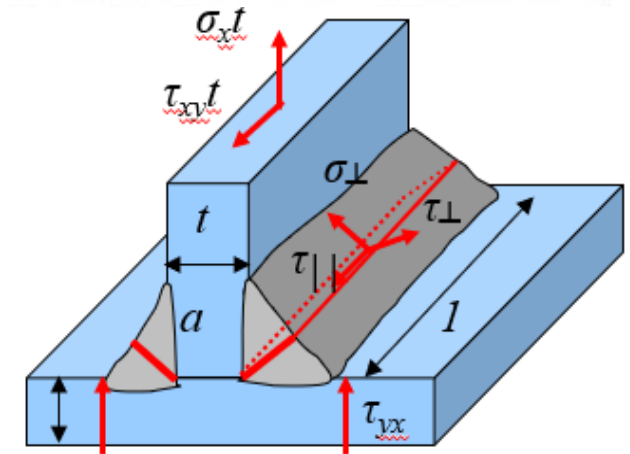
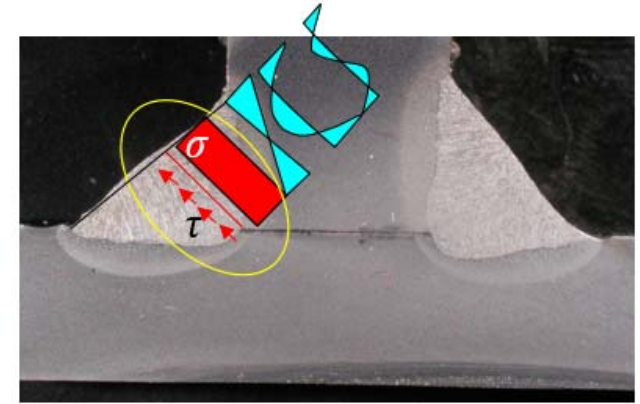
# HITSAUSLIITOKSET MITOITUSPERIAATE

- Komponenttimenettely
  - kriittisen tason idea: membraani normaali ja leikkausjännitys
  - suositeltava, koska yleispätevä etenkin jos jännityksessä gradienttia hitsin pituussuunnassa

$$a \geq \frac{\beta_w \gamma_{M2} t}{n f_u} \sqrt{2\sigma_x^2 + 3\tau_{xy}^2}$$

- FEM kuorimallin kalvojäännityskomponentit yhteensopiva
- hitsi ei tasapainossa
- tasaluja mitoitus takaa muodonmuutoskapasiteetin (HAZ ?)

$$a \geq \frac{\sqrt{2} \beta_w \gamma_{M2} f_y}{n \gamma_{M0} f_u} t_i$$



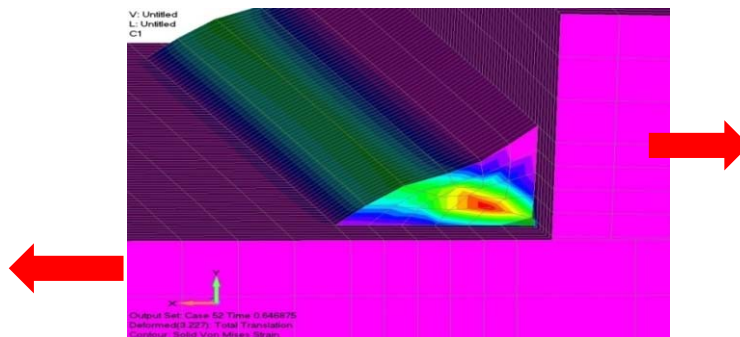
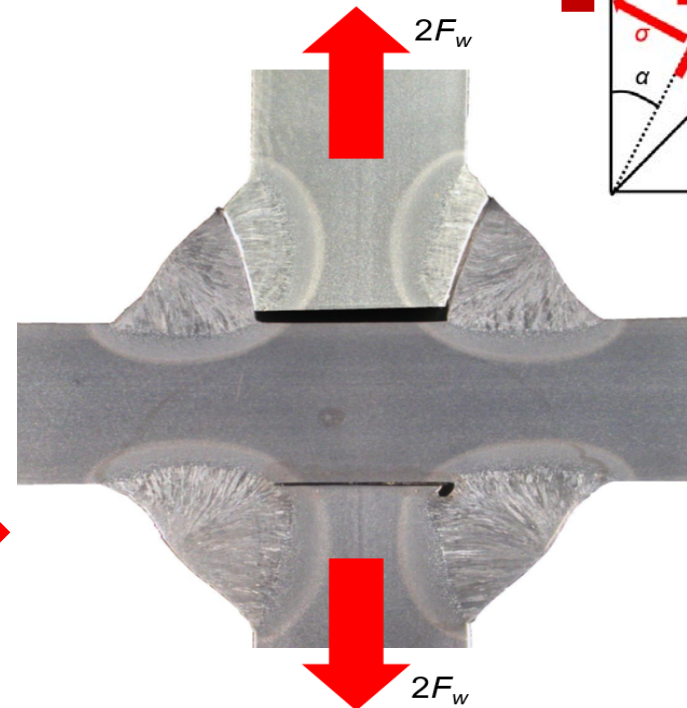
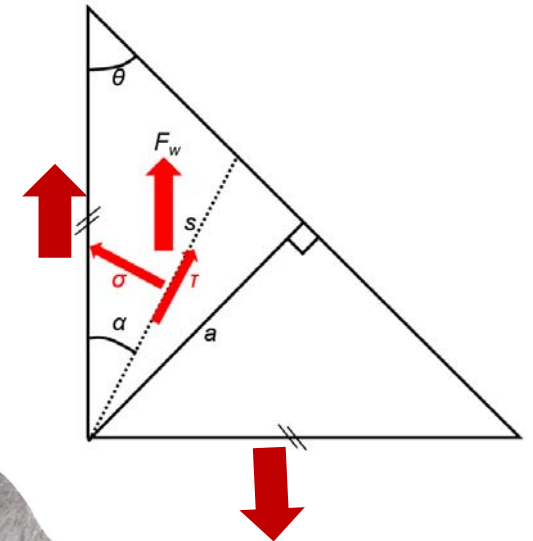
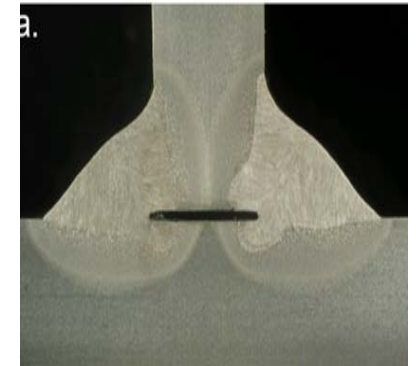
# HITSAUSLIITOKSET MITOITUSPERIAATE

- Kriittinen vauriotaso
- tutkimuksessa tarvittavan teoreettisen pienen toteuttaminen hitsausteknisesti hankalaa (ratkaisuna wolfram-levy juuripinnassa)
- 45° vain pitkittäin leikkausta kantavilla voima kiinnityshitseillä
- muutoin kriittinen taso 27 asteen kulmassa (leikkaus dominoi)

$$k_1 \geq \left( \frac{\sin \alpha}{\tan \alpha} + \cos \alpha \right) \sqrt{\sin^2 \alpha + 3 \cos^2 \alpha} \frac{\beta_w \gamma_{M2} F_w}{l f_u}$$

$$\alpha = 27 \text{ deg} \quad a \geq 1.53 \cdot \frac{\beta_w \gamma_{M2} F_w}{l \cdot f_u}$$

- vaikka mitoitusteknisesti merkityksetön
- Lievä kateettipoikkeama hyvä idea vrt. ISO5817!

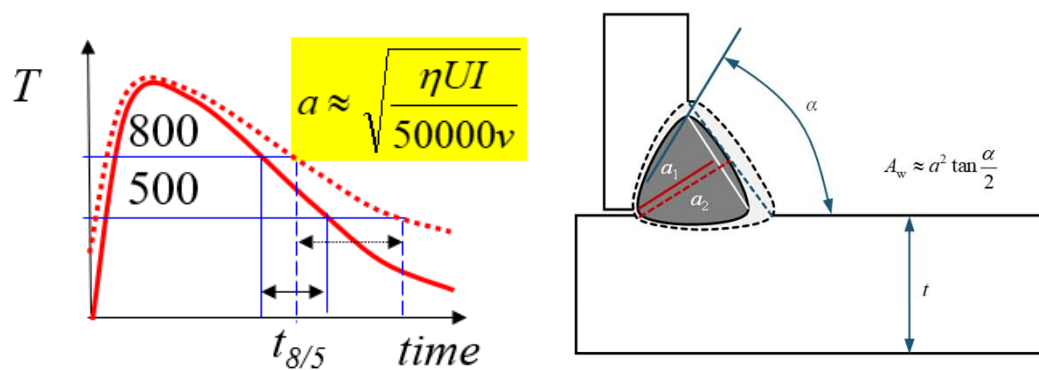
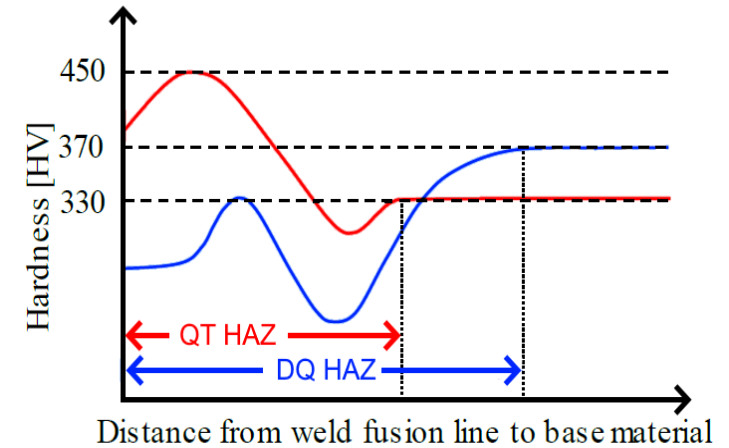


# LUJIEN TERÄSTEN ERITYISPIIRTEITÄ

## a) LUJAT SUORAKARKAISTUT (DQ) JA PÄÄSTETYT (QT) TERÄKSET

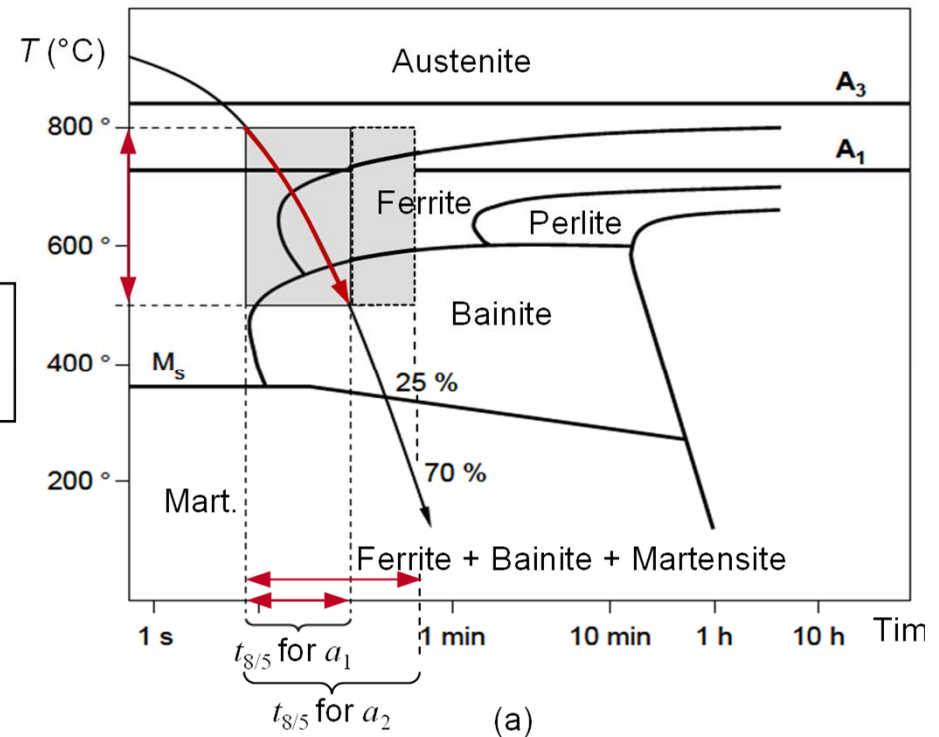
- HAZ
  - pehmeneminen (DQ) ja karkeneminen (QT)
  - erilainen lämmöntonilla ohjattava **jäähtymiskriteeri**  $t_{8/5}$
  - suunnittelija ottaa kantaa hitsausmetallurgiaan: CCT

$$a = \frac{\beta_w t}{\gamma_{M2} f_u} \sqrt{2\sigma_x^2 + 3\tau_{xy}^2} = \sqrt{\frac{A_w}{\tan \frac{\alpha}{2}}} = \sqrt{\frac{\eta UI}{kv \tan \frac{\alpha}{2}}} = \sqrt{\frac{Q}{k \tan \frac{\alpha}{2}}}$$



$$t_{8/5} = (6700 - 5T_p) Q \left( \frac{1}{500 - T_p} - \frac{1}{800 - T_p} \right) F_3$$

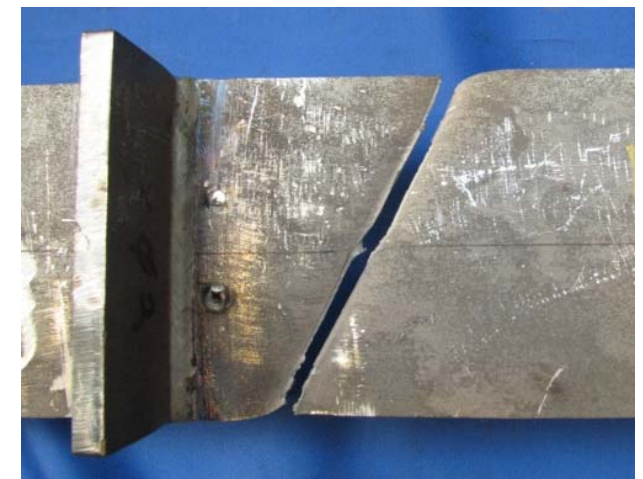
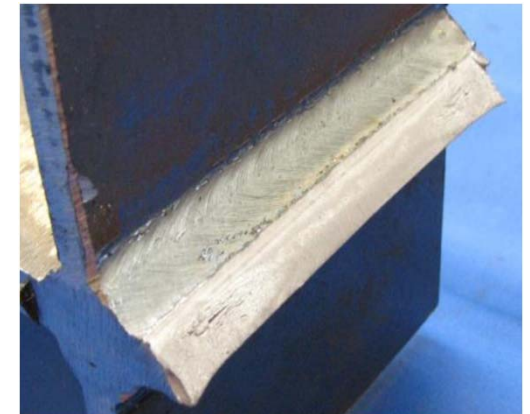
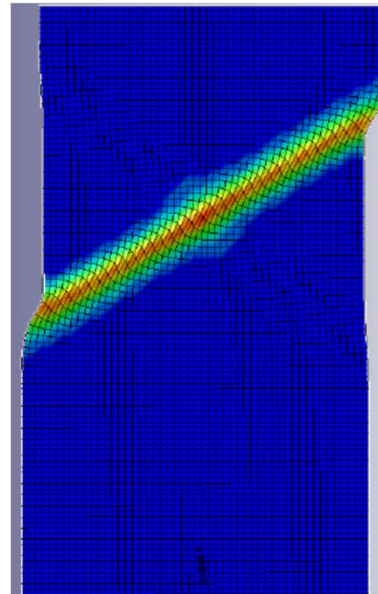
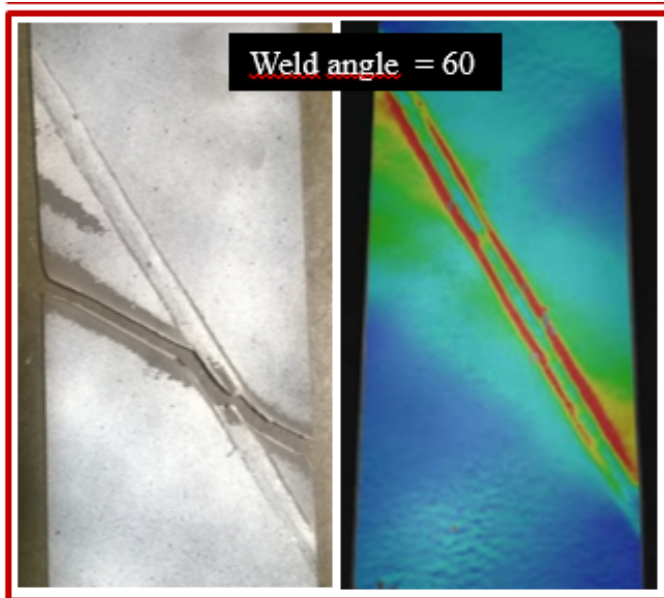
$$t_{8/5} = \frac{(4300 - 4.3T_p) \cdot 10^5 Q^2}{t^2} \left[ \frac{1}{(500 - T_p)^2} - \frac{1}{(800 - T_p)^2} \right] F_2$$



# LUJIEN TERÄSTEN ERITYISPIIRTEITÄ

- Liitoksen vauriomekanismit
  - uusi vauriokriteeri pehmenemisen vuoksi (DQ)!
  - terve levy pyrkii katkeamaan katkeaa 30 asteen kulmassa (kriittisen tason kriteeri)

$$F = \frac{b t f_y}{\cos \alpha \sqrt{3 - 2 \cos^2 \alpha}} = \frac{2 \sqrt{2} b t f_y}{3} = 0.94 b t f_y$$



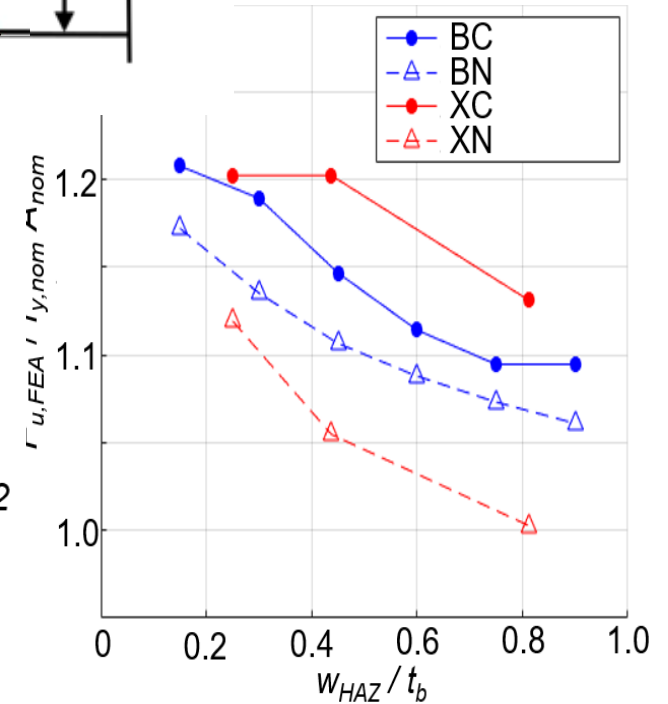
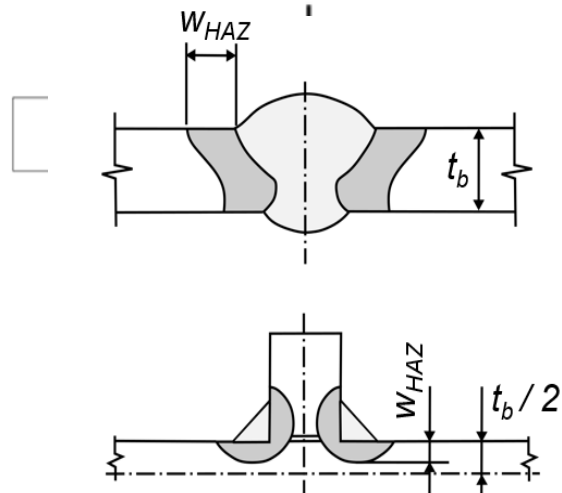
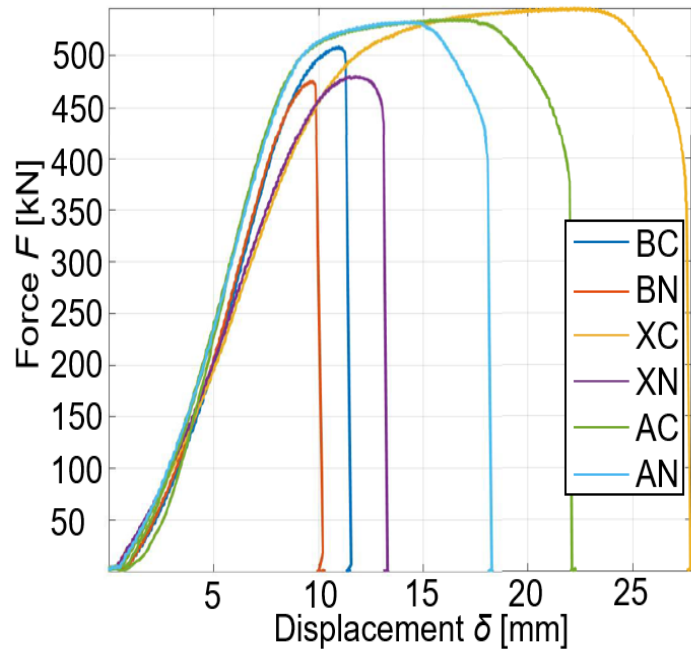
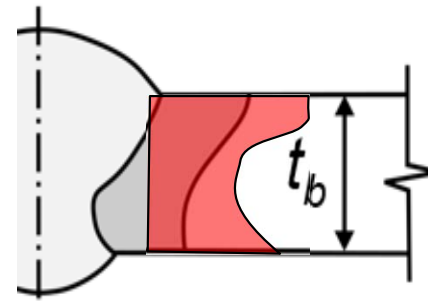
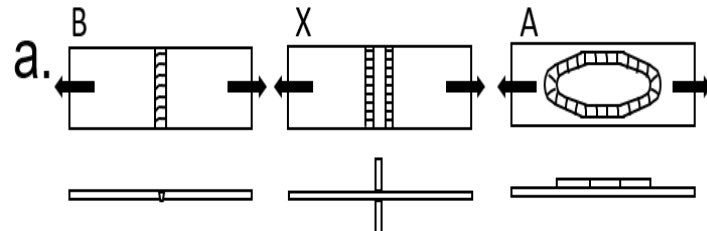
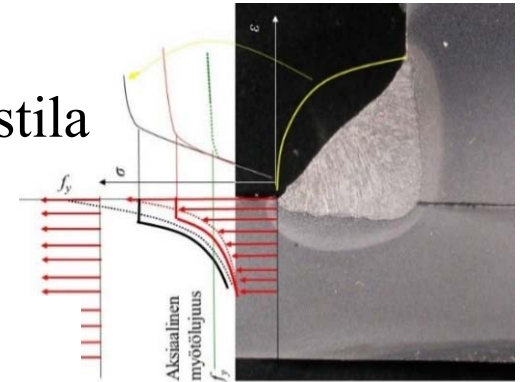
- vinoonhitsaus huono idea!



# LUJIEN TERÄSTEN ERITYISPIIRTEITÄ

- Constraint-efekti

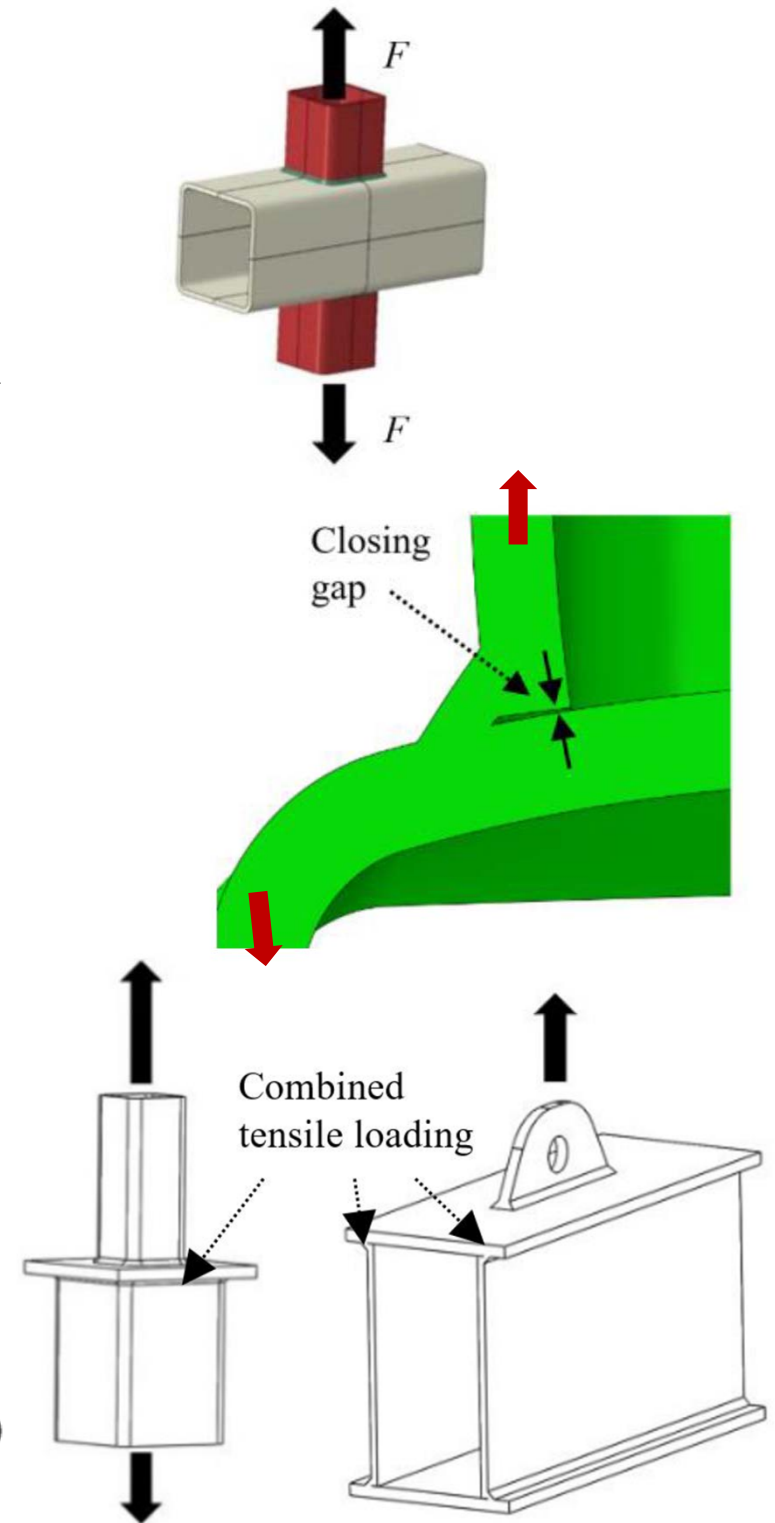
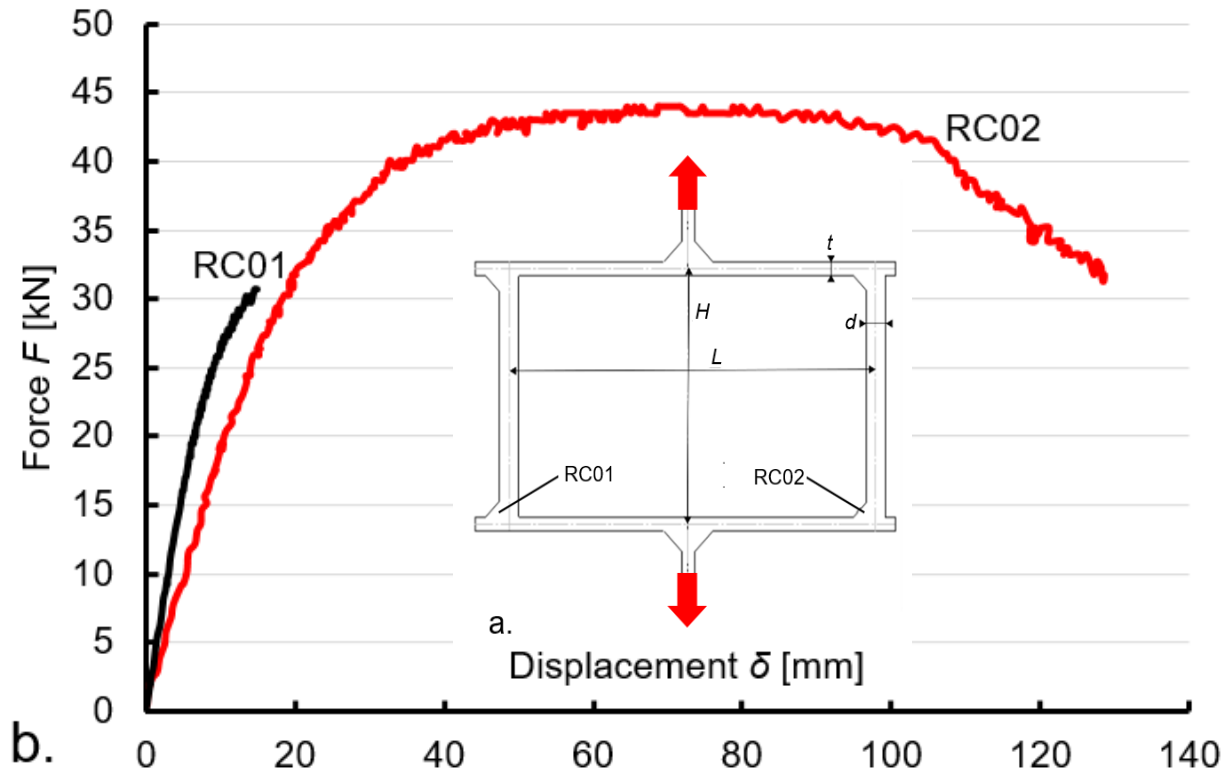
- pehmeneminen heikentää lujuutta hitsin vieressä
- rajaviivalla lovivaikutus, jännityskeskittymä ja 3D jännitystila
- constraint-efekti lujittaa liitosta rajaviivan vieressä
- kuumilla oikomisella myrkkyä DC teräksille!



# LUJIEN TERÄSTEN ERITYISPIIRTEITÄ

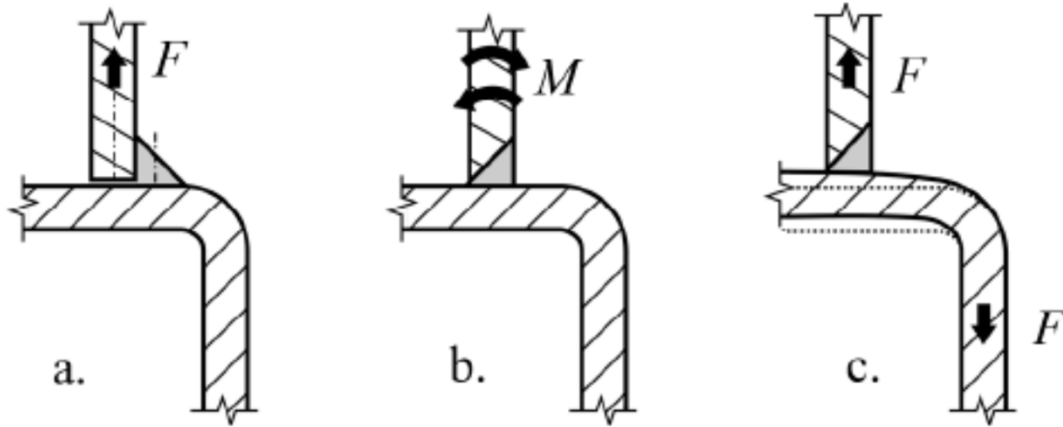
## b) JUUREN PUOLEN KRIITTISYYS YHDELTÄ PUOLEN HITSATUSSA LIITOKSESSA

- Epäkeskisyyden/taivutusmomentin vaikutus
  - usein juurta puristava efekti
  - juurenpuolen muodonmuutoskyky voi olla heikko!



# LUJIEN TERÄSTEN ERITYISPIIRTEITÄ

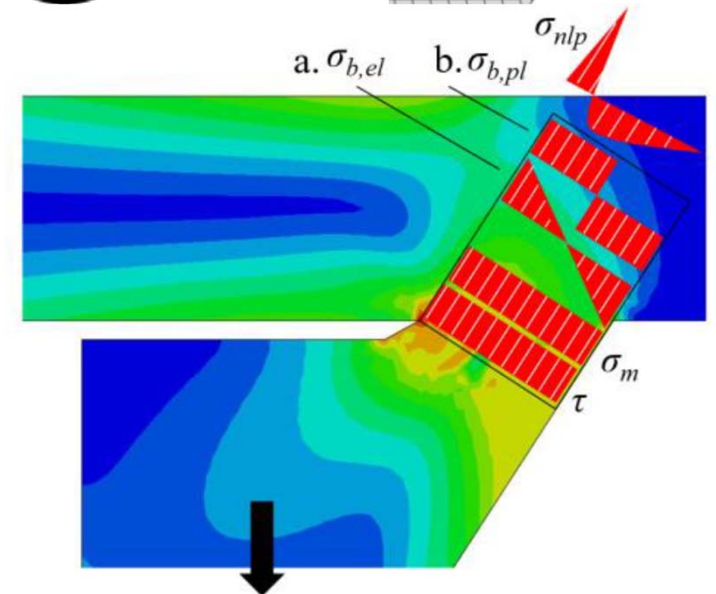
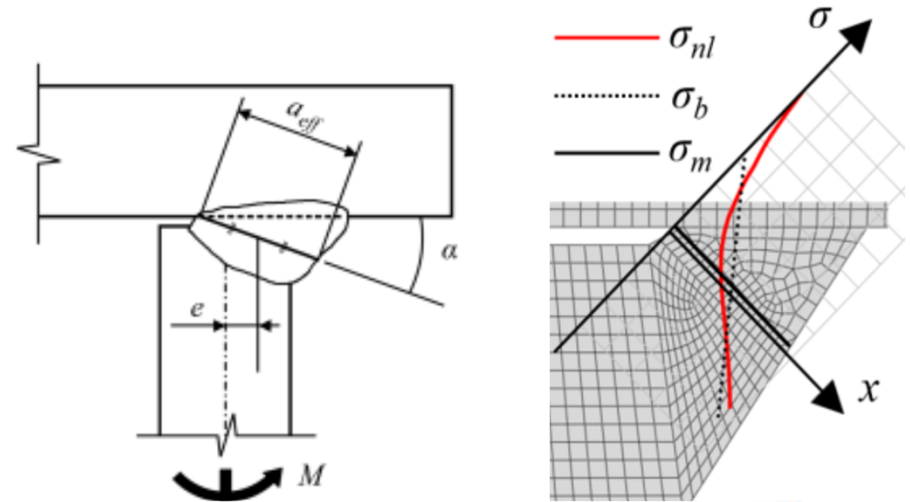
- Vetokuormitetun juuren puolen kestävyys  
- alusta kiertymä epäkeskisyyttä oleellisempi



$$\sigma_m = \frac{F \cos \alpha}{nab} \quad \sigma_b = \frac{k(nM \pm Fe)}{na^2b} \quad \tau = \frac{F \sin \alpha}{nab}$$

$$\sigma_{red} = \sqrt{(\sigma_m + \sigma_b)^2 + 3\tau^2} = \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}}$$

$$F_w = \frac{nabf_u}{\beta_w \sqrt{\left[ \cos \alpha + \frac{k(n\lambda b + e)}{a} \right]^2 + 3 \sin^2 \alpha}} \quad M_w = \frac{a^2 b f_u'}{k \beta_w}$$

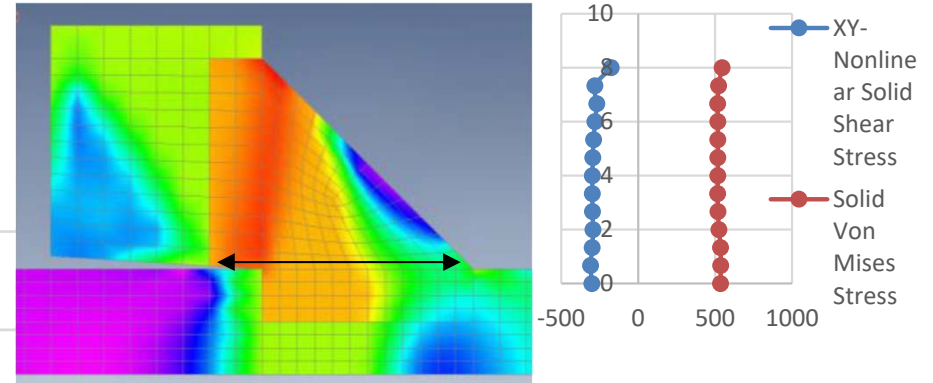
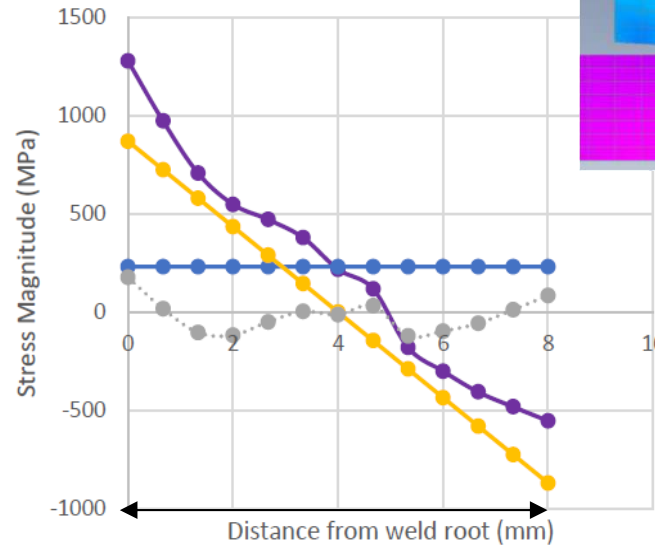
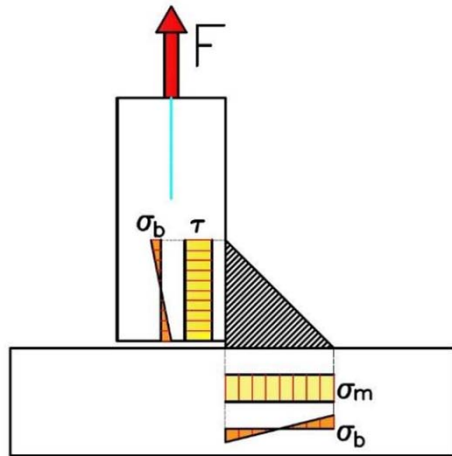


$k = 6$ , jos juuri vedolla, muutoin 4

# LUJIEN TERÄSTEN ERITYISPIIRTEITÄ

- Jännitysjaakaumat hitsin kateeteilla

a) kiertymä ei estetty

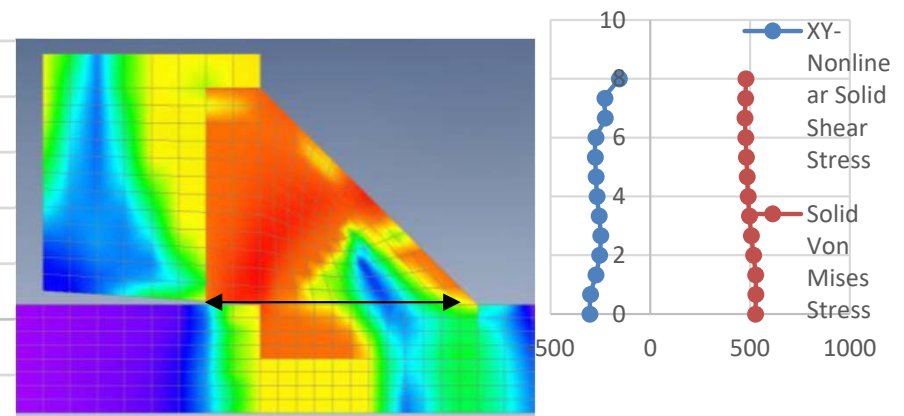
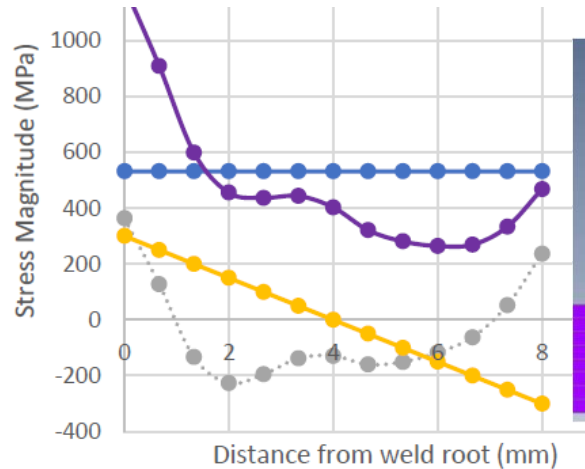


$$\sigma_m = \frac{1}{t} \int_{x=0}^{x=t} \sigma(x) dx$$

$$\sigma_{b,el} = \frac{6}{t^2} \int_{x=0}^{x=t} \sigma(x) \left(\frac{t}{2} - x\right) dx$$

$$\sigma_{nlp} = \sigma(x) - \sigma_m - \left(1 - \frac{2x}{t}\right) \sigma_{b,el}$$

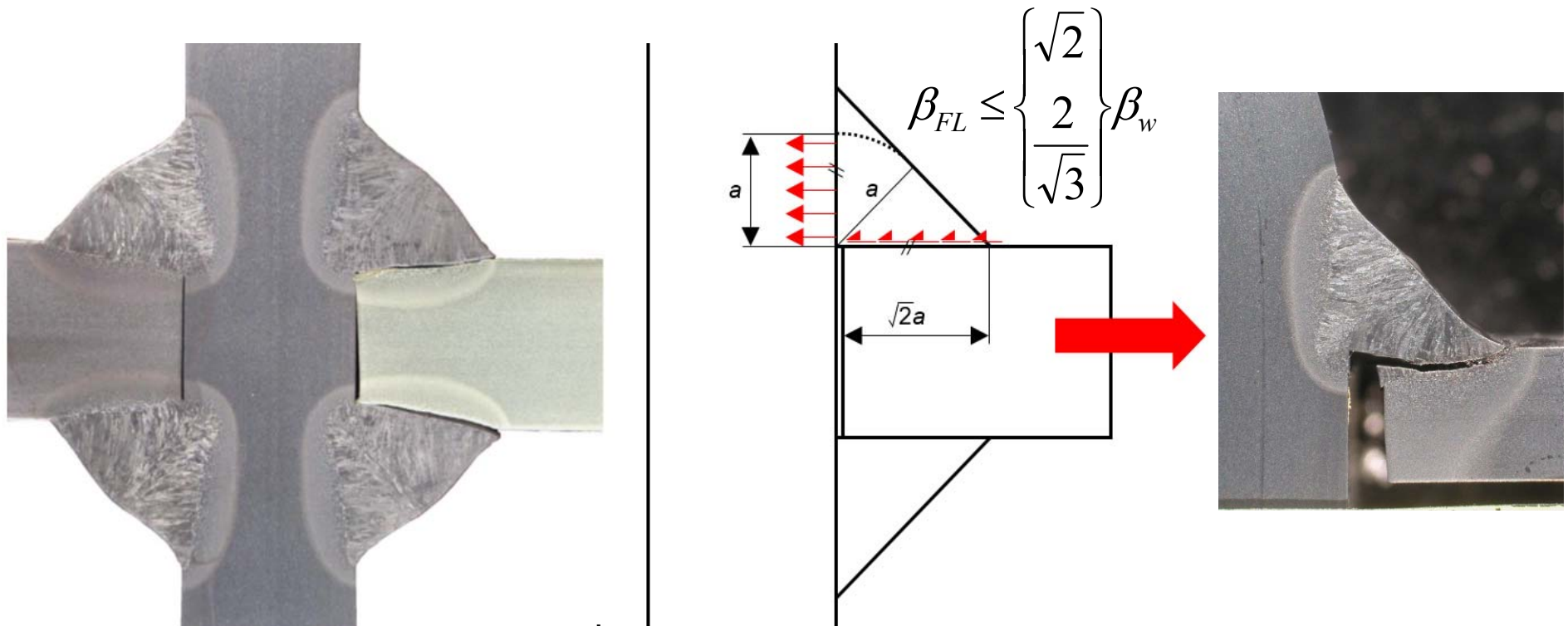
b) kiertymä estetty



# LUJIEN TERÄSTEN ERITYISPIIRTEITÄ

## c) SULARAJAONGELMA

- Lujuus ja muodonmuutoskyky
  - sularajalla metallurginen epäjatkuvuuskohta ja pehmeneminen
  - teoreettisesti jo 14 % lujuuden alennus (pehmeneminen) aiheuttaa ongelman
  - sularajan pituuden kasvattaminen auttaa



- välttä puoli V- ja K-hitsejä kohtisuorassa vetokuormituksessa!

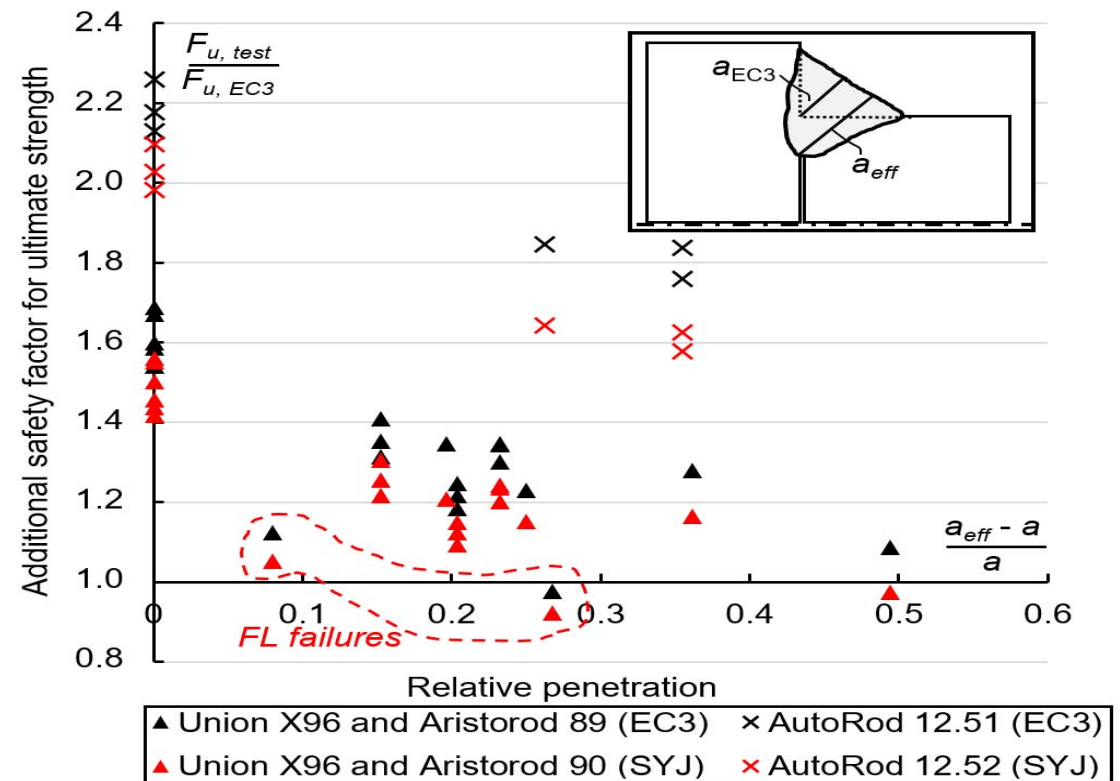
# LUJIEN TERÄSTEN ERITYISPIIRTEITÄ

## d) TUNKEUMAN HYÖDYNTÄMINEN

- Tarkoituksenmukaisuus
  - lujuustekniset perusteet ja tuottavuus
  - tunkeuma ei täysin tehollista

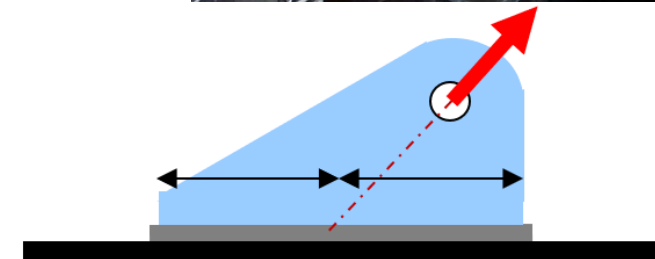
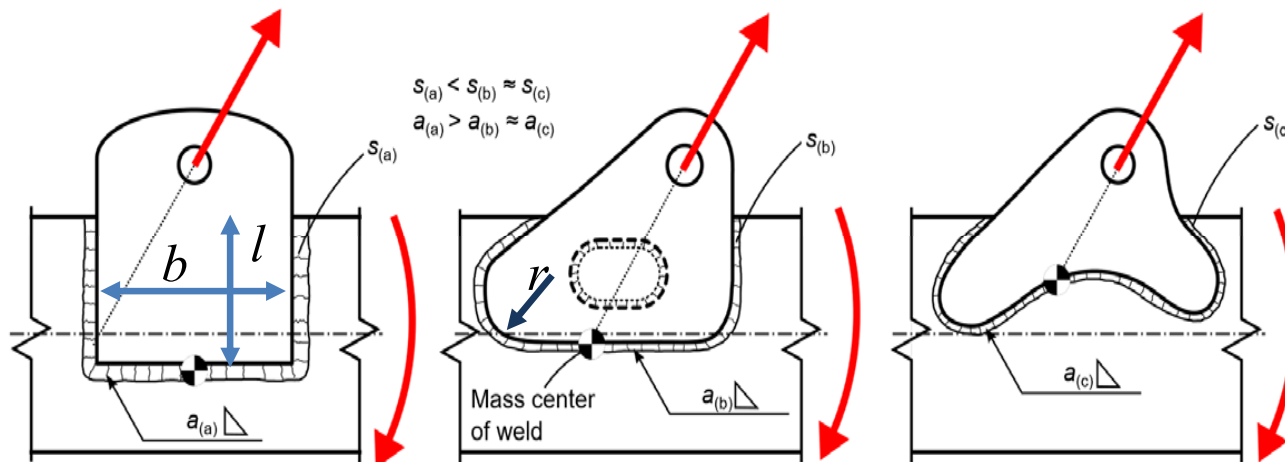
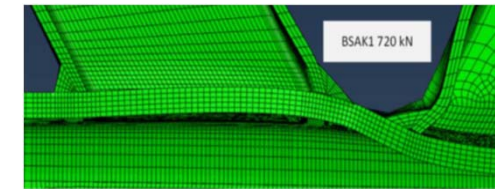
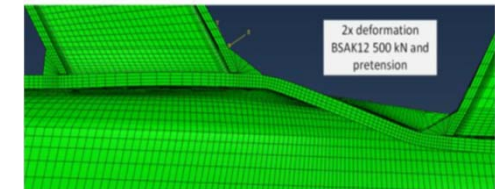
$$f_{u,red} = 0.25f_{u,BM} + 0.75f_{u,FM}$$

- mitoituksellinen hyödyntäminen edellyttää automatisoitua hitsausta



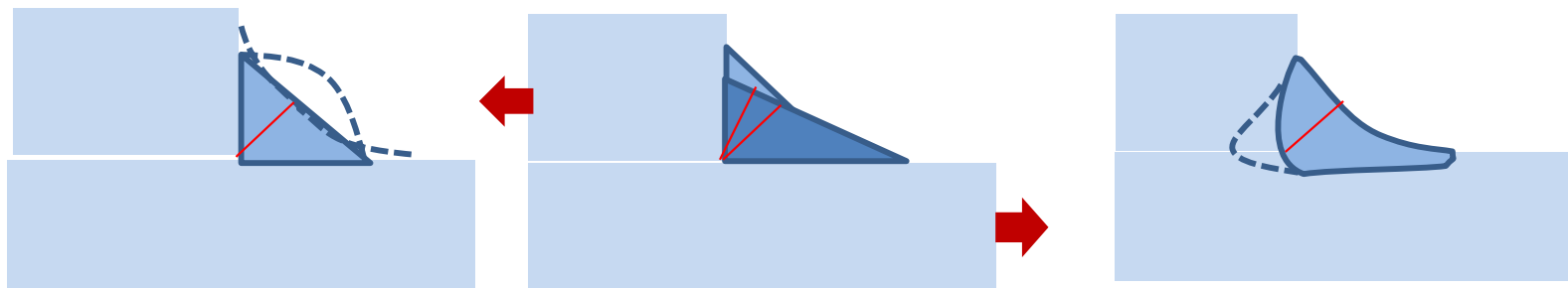
# MITOITUS JA MUOTOILUNÄKÖKOHTIA

- Liitoksen muotoilu
    - kalvojännityskeskittymät alas, esim. K-liitos:  $\beta, g/t_o$
    - $a = a_{opt,prosessi}$  (=4..5 mm /GMAW/1.2 mm)  $\rightarrow l$
    - kestävyystarve  $l$ :ää säätämällä, ei  $a$ - mittaa
- $F \approx al$        $V \approx a^2l$**
- liitosten mittasuhteet ja muodot ( $l/a, l/b$  ja  $r$ ) tärkeitä
  - ylimitoitettut kiinnityshitsit myrkkyyä vetelyille ja tuottavuudelle  
 esim.  $a = 5$  mm riittäisi, hitsataan  $a = 6$  mm eli 20 % ylitys  
 $\rightarrow$  hitsilavuus ja vetelyt kasvavat lähes 44 % ja läpimenoaika 200%
  - optimi: mitoittava voima hitsin painopisteen kautta
  - kolopienahitsi ok, mutta usein muodostaa tehottomia katveita



# MITOITUS JA MUOTOILUNÄKÖKOHTIA

- Hitsin muotoilu
  - railo/liitostyypillä ( $\blacktriangle$ , V, K) ei staattisesti kuormitetussa liitoksessa ei merkitystä, kun  $a$ -mitta sama, poikkeuksena sularajaongelma
  - hitsin muodollakaan ei merkitystä (kun  $a$ -mitta sama)
  - sekä kovera että kupera muoto lisäävät hitsivolyymia/kapasiteetti
  - jyrkkä liittymä kasvattaa lovivaikutuksen avulla constraint-efektiä, mikä tuo lisää kuormitettavuutta mutta heikentää muodonmuutoskapasiteettia
  - lievä kateetipoikkeama kuorman suuntaa hyvä (lisää staattista ja väsymiskestävyyttä)
  - riittävä tunkeuma ja sen suuntaus tärkeitä (hitsautumissyvyys, ei sulamis-)
  - kovera muoto hyvä sularajan ollessa kriittinen
  - kateetipoikkeama ja juohevuus rajaviivalla tärkeitä laatuhitseille (väsyminen)





## YHTEENVETO

**Kollaa kesti**

-

**Kestääkö** lujan teräksen hitsit ?

-

**Kestääkö** asian varmistuminen vielä kauankin ?

-

Näiden 15 min **kestämisestä,**

**KIITOS!**