

## Sekundäärisen momentin vaikutus hitsin lujuuteen

Niko Tuominen<sup>1</sup>, Timo Björk, Jesse Litmanen

**Tiivistelmä.** Artikkelissa esiteltävässä tutkimuksessa on testattu ja analyttisesti ratkaistu pienahitsin lujuutta, kun hitsin juuren sekundäärisen momentin suuntaa ja suuruutta on varioitu. Testaus on tehty S960 lujuusluokan teräksellä. Aiemmissa rakenneputkiliitoksia koskeneissa tutkimuksissa on havaittu pienahitsillä olevan usein oletettua suurempi kapasiteetti ja toisaalta usein vaurio on ollut muualla kuin hitsissä. Kyseisistä kokeista on kuitenkin vaarallista vetää suoria johtopäätöksiä pienahitsin lujuuteen levyliitoksissa, joten tarkempi tutkimus lujuuteen vaikuttavista tekijöistä oli tarpeen. Elementtimenetelmällä on tutkittu paikallisen jouston vaikutusta hitsin sekundäärisen momentin suuruuteen.

*Avainsanat:* pienahitsi, suurlujuusteräs, elementtimenetelmäanalysointi (FEA), hitsausliitokset

*Vastaanotettu 9.9.2016. Hyväksytty 28.12.2016. Julkaistu verkossa 30.12.2016.*

### Johdanto

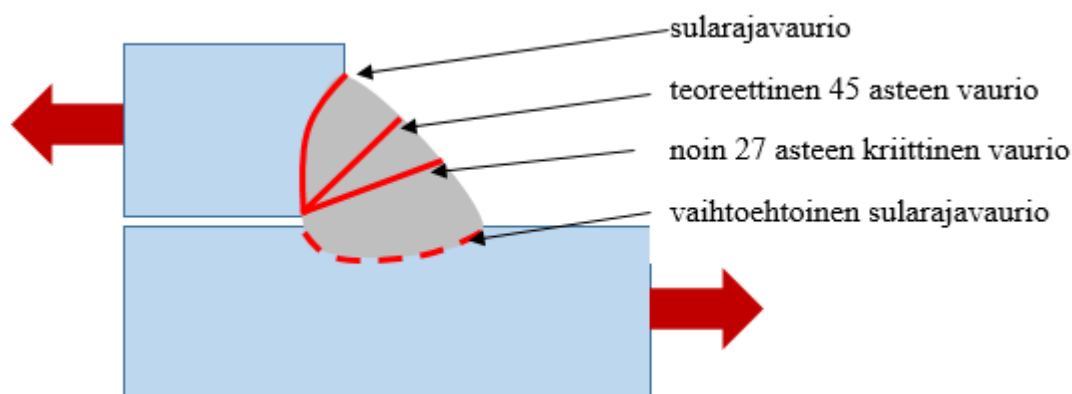
Eurocode 3:ssa (EC3) [1] (piena)hitsien mitoitus perustuu semi-empiirisesti sovellettuun von Mises teoriaan. Oikeastaan on kysymys kuvassa 1 esitetystä kriittisen tason mukaisesta mitoituskriteeristä, jossa ideaalisen pienahitsin kriittiseksi tasoksi oletetaan a-mitan mukainen taso. T. Penttilä & al. ovat osoittaneet, että tämä ei edusta kuitenkaan kriittistä tasoa, vaan leikkausjännityksen dominovasta vaikutuksesta kriittinen taso on kuormitus-suuntaan nähden vinommassa kaltevuudessa [2]. Lisäksi etenkin lujilla materiaaleilla on taipumus hitsin sularajamurtumaan, ellei sitä ole railon muotoilulla, tunkeumalla tai mitoituksella eliminoitu.

Etenkin rakenneputkiliitoksista on myös havainto, että matala- ja keskilujilla teräksillä hitsit kestävät selvästi käytettyä mitoituskriteeriä enemmän. Tähän on kolme syytä:

- muodonmuutoskykyisillä liitoksilla kehittyvä liitoksen kantokyvyn loppuvaiheessa hitsiin kalvojännitystilaa suosiva kuormitusmekanismi,
- liitokseen syntyvä sekundaarinen taivutusrasitus pienentää muodonmuutoskyvyllään heikompaa juuren puolen jännitystä,

<sup>1</sup> Vastuullinen kirjoittaja. niko.tuominen@lut.fi

- viereisen liitettävän osan synnyttämän paikallisen reunaehdon (constraint-efekti) vuoksi hitsiin syntyvä kolmiakσιαalinen jännitystila tuo lisää kuormituskapasiteettia hitsiin.



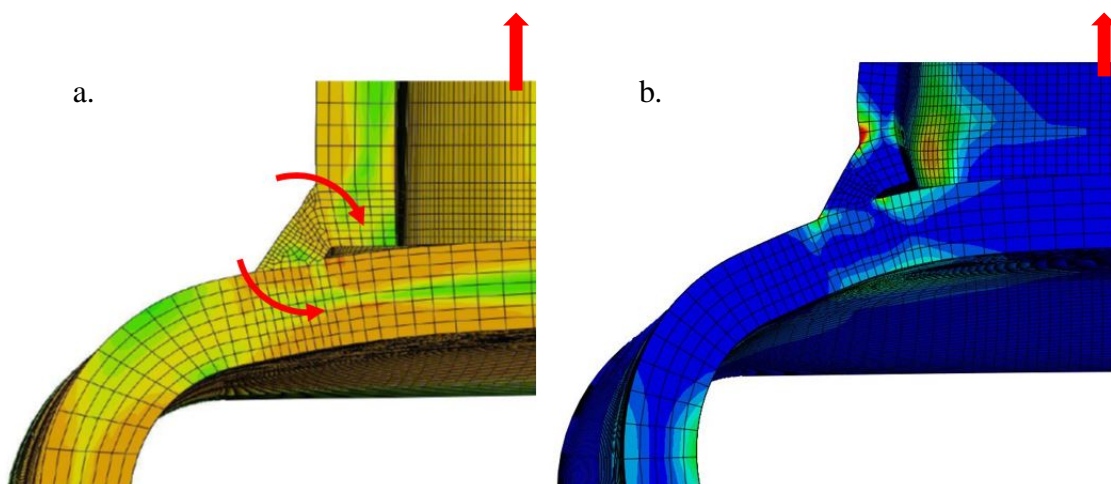
Kuva 1. Pienahitsin kriittiset murtotasot

Rakenneputkiliitoksien muodonmuutoksia ja hitsien kestävyyttä on tutkittu viitteissä [3, 4 ja 5]. Kuorman epäkeskisyydestä aiheutuvaa pienahitsin kiertymää ei tarvitse EC3:n mukaan ottaa huomioon, mikäli juuren puolelle syntyvä lisärasitus ei ole merkittävä. Esimerkiksi rakenneputkiliitoksissa seinämän leveys/paksuus-mittasuhteen oletetaan takaavan hitsin juuren puolen lisärasitusten pysymisen maltillisena liitosta rasitettaessa ja lisäksi normaaleissa rakenneputkiliitoksissa tämä lisärasitus on aina vastakkainen seinämän kalvojännitykselle. Siten juuren rasitus määräytyy monimutkaisella tavalla liitoksen mittasuhteista.

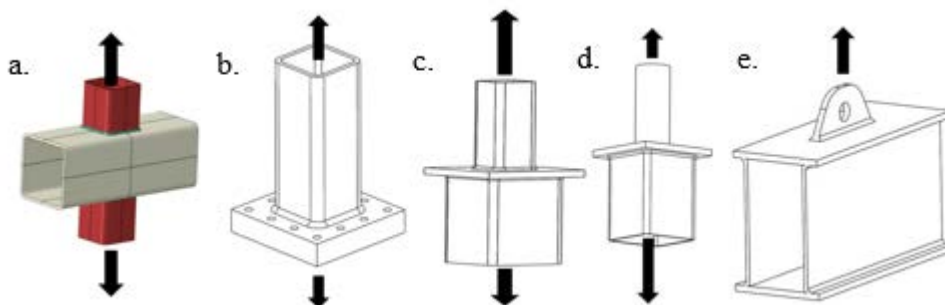
Kuvassa 2 on esitetty kahden eri X-liitoksen deformaatiot (vrt. kuva 3a). Kuva on otettu liitoksen kriittisen sivun keskeltä. Kuvasta 2 käy hyvin ilmi hitsin juuren deformaation määräytyminen, kun muuttuvana tekijänä on haaran ja paarteen seinämien paksuus-suhte. Kuvassa 2 on ainevahvuudeltaan 8 mm (2a.) ja 6 mm (2b.) paarreputket ja liitetyt uumat vastaavasti 6 ja 4 mm. Kuvasta 2 nähdään, että 6 mm paksun paarteen deformaatio on huomattavasti suurempi kuin 8 mm tapauksessa. Tästä johtuen hitsiin muodostuu kuormitusta lisättäessä aikaisemmin kalvojännitystila, joka on edullinen hitsin kestävyys-kannalta ja vaurio kehittyy todennäköisemmin perusaineen puolelle hitsin rajaviivalle. Suuremmat deformaatiot kuvan 2b tapauksessa myös vähentävät riskiä sularajavaurion tapahtumiselle, joka on selvästi liitoksen kapasiteettia alentava vauriomuoto. Seinämien paksuussuhteen lisäksi paarteen ja uuman leveysuhteella ( $\beta$ -suhteella) on merkitystä deformaation kehittymiseen. Kuvassa 2 on esitetty ulkoisen kuorman suunta nuolilla.

Kuvassa 2 esitetty hitsiin syntyvä taivutusmomentti, joka on luonteeltaan sekundaarinen, määräytyy siis paitsi pienahitsin epäkeskisyyttä vaikuttavasta myös alustarakenteen epäsymmetrisestä jäykkyydestä. Esimerkiksi rakenneputkien K-liitoksissa alustan epäsymmetrisen jäykkyys vaikuttaa merkittävästi sekä liitoksen että hitsin kestävyyskannalta [5]. Siten momenttia voi syntyä myös täysin läpihitsatun rakenneputkiliitoksen päittäishitsiin.

Vaikka tavanomaisissa rakenneputkiliitoksissa (kuvat 3a ja b) sekundaarinen taivutusmomentti helpottaa juuren rasiustilaa, tilanne voi olla päinvastoin. Kuvissa 3c-e on esitetty liitoksia, joissa sekundaarinen momentti on primaarijännitystä kasvattavaa hitsin juuren puolella, mikäli rakenteessa esiintyy aksiaalista jännitystä (vetoa tai puristusta, aksiaalivoimasta tai taivutusmomentista aiheutuvana). Näiden rakenteiden mitoituksessa sekundaarista taivutusjännitystä ei voida automaattisesti jättää huomioon ottamatta.



Kuva 2. Hitsin juuren puolen kiertymä ja rasiustila määräytyvät liitoksen mittasuhteista.



Kuva 3. Liitoksia (c-e), joiden sekundaaritaivutus lisää hitsin juuren puolen rasiusta.

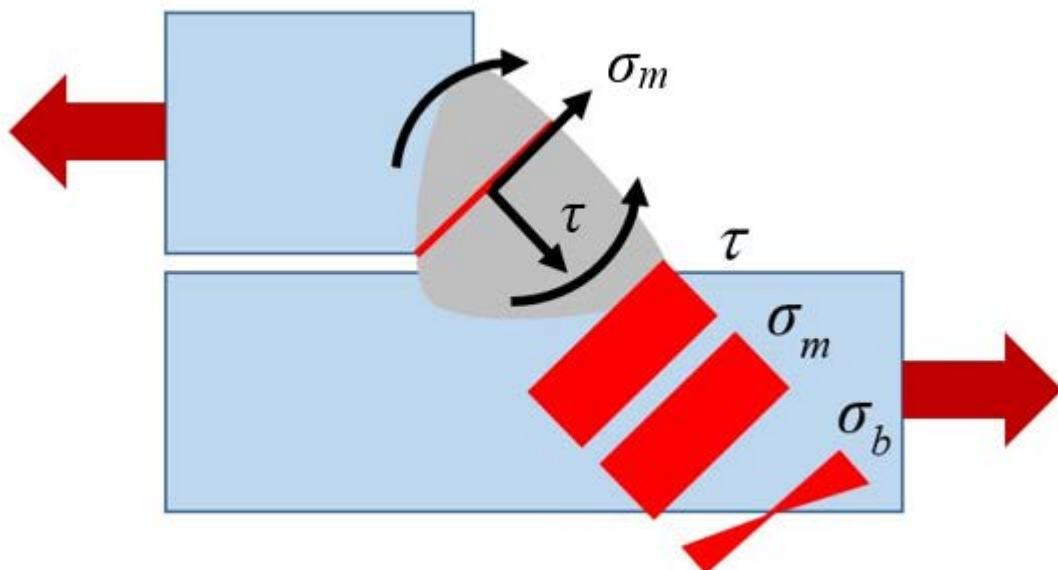
Erityisen kriittinen on tilanne, jos hitsin, sen sularajan tai viereisen hitsin vaikutusvyöhykkeen muodonmuutuskapasiteetti on heikentynyt. Pienentyminen voi aiheutua lujan teräksen käytöstä, alhaisesta käyttölämpötilasta tai tasalujaa pienempää hitsin kokoa käytettäessä. EC3 mitoitusohjeet ovat voimassa rakenneterästen lujuusluokkaan 700 MPa asti, mutta hitsin muodonmuutoskykyyn ei kuitenkaan anneta mitään lisärajoitteita [6]. Samoin pienempiä a-mittoja saa käyttää, kunhan varmistetaan hitsin kapasiteetti (EC3: 7.3.1 (6)) [1]. Hitsin kapasiteetti tarkoittaa ko. standardin kohdassa voima- ja deformaatiokapasiteettia. Jälkimmäinen pitää sisällään sekä kalvo- että kiertymäkapasiteetin. Tätä EC3 vaatimusta on virheellisesti tulkittu liitoksen kapasiteettivaatimukseksi. Se on tietysti oltava voimassa, mutta pienentämiseen liittyy nimenomaan vaatimus hitsin kapasi-

teetista, koska se tulee hitsin kokoa pienennettäessä helposti kriittiseksi. Hitsiltähän tarvitaan sekä translaatio että rotaatiokapasiteettia riippumatta siitä, kumpaa ominaisuutta liitoksesta vaaditaan. Erityisen tärkeä on hitsin kiertymään liittyvä kapasiteetti, koska hitsin paikallinen kiertymäjäykkyys muuttuu hitsin pituusakselin ympäri a-mitan kuutiossa ja taivutuskapasiteetti vastaavasti neliössä.

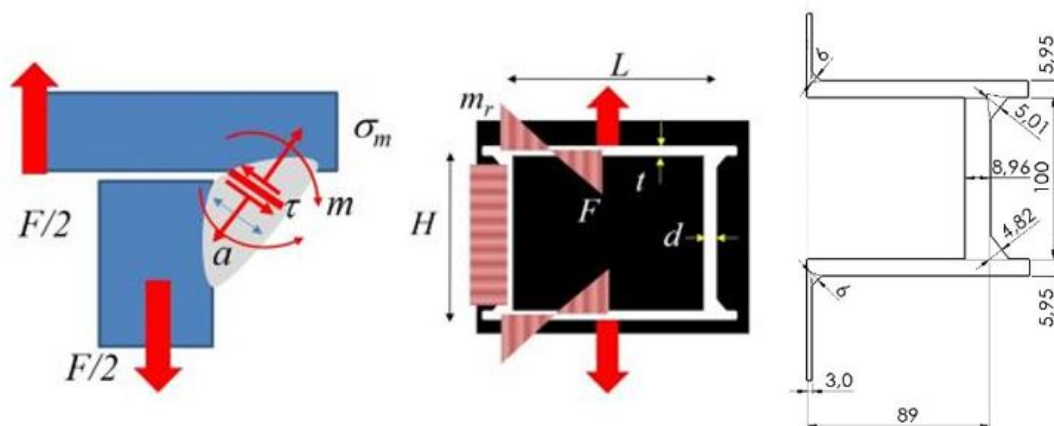
Tämä Eurocoden vaatimus hitsin kapasiteetista on tärkeä, koska se edellyttää asian varmistamisen tavalla tai toisella perusmateriaalin lujuusluokasta riippumatta. Tässä tutkimuksessa selvitetään pääsääntöisesti kokeellisesti sekundaarisen momentin vaikutusta liitoksen kestävyteen ja luodaan mitoitus ehdotus sen huomioonottamiseksi. Eurocode ei anna mitään ohjeistusta siitä, miten momenttikestävyys tulisi laskea eli saadaanko käyttää täysplastista momenttimallia vai tuleeko käyttää kimmoista jännitys jakauma oletusta ja miten voimasuureet asettuvat keskenään kriittisessä a-mitan määräämässä kannaksessa.

### Teoreettinen kapasiteetti

Hitsin alueen jännityksiä voidaan tarkastella useassa eri tasossa. Tässä tutkimuksessa hitsin rasitukset määritetään a-mitan määräämässä tasossa. Hitsin kapasiteetti määritetään EC3:n mukaisella tarkemmalla ns. komponenttimenetelmällä siten, että hitsiä kuormittavat voimat jaetaan kuvan 4 mukaisesti hitsin kriittisessä tasossa vaikuttavaksi leikkausjännitykseksi  $\tau$  ja sitä vastaan kohtisuorassa suunnassa vaikuttavaksi kalvojännitykseksi  $\sigma_m$ . Nämä komponentit määräytyvät hitsiin vaikuttavien voimien tasapainoehdosta. Koska tässä mielenkiinnon kohteena ovat rakenneputkiliitokset, hitsiin tulee sekä kalvojännitystä ja taivutusjännitystä. Toisaalta tutkimukseen ei haluta rakenneputken piiriä pitkin muuttuvaa jännitystä vaikeuttamaan analyysiä, vaan tutkimus toteutetaan kuvan 5 mukaisena kotelorakenteena, joka voidaan tyypistää 2D rakenteeksi.



Kuva 4. Hitsin jännityskomponentit komponenttimenetelmässä sekä taivutusjännitys  $\sigma_b$ .



Kuva 5. Tutkittava kehänurkka kehän momenttijakaumiseen ja mittapiirroksineen (RC01).

Seuraavaksi kuvan 5 hitsin kapasiteetti ratkaistaan analyttisesti käyttäen apuna elementtimenetelmäanalyysejä (FEA), josta saadaan määritettyä paikallisen jouston vaikutus kapasiteettiin. Kokeessa murtuneen hitsin a-mitta on otettu kapasiteetin laskentaan. Kotelarakenteen syvyysmitta ( $b$ ) on 70 mm. Hitsissä vaikuttava normaalijännitys ratkaistaan ensin:

$$\sigma_m = \tau = \frac{F}{2\sqrt{2}ab} = \sigma_m = \frac{F}{2\sqrt{2} \cdot 4.8 \cdot 70} = 1.05 \cdot 10^{-3} F . \quad (1)$$

Kehän nurkkaan syntyy kimmoteorian mukainen taivutusmomentti

$$m_r = \lambda FL = \frac{FL}{8 \left( 1 + \frac{Ht^3}{Ld^3} \right)} = \frac{FL}{8 \left( 1 + \frac{106 \cdot 6^3}{169 \cdot 9^3} \right)} = 0.105 FL \quad (2)$$

FE-analyysin avulla saadaan kerroin  $\lambda=0.070$  (ks. taulukko 2), jolla otetaan huomioon hitsin paikallinen jousto ja edelleen sekundaarisesti taivutusmomenttijännitykseksi saadaan

$$\sigma_b = \frac{km}{a^2b} = \frac{k\lambda FL}{a^2b} = \frac{4 \cdot 0.070 \cdot 169}{4.8^2 \cdot 70} F = 0.03 F , \quad (3)$$

jossa  $k$  on momenttijakaumakerroin. Jakauma oletetaan nyt täysplastiseksi, joten  $k = 4$ . Olettamalla EC3 mukaan von Mises hypoteesin olevan voimassa myös murtotilassa, saadaan

$$\sigma_{VM} = \sqrt{(\sigma_m + \sigma_b)^2 + 3\tau^2} = f_{u,w} , \quad (4)$$

jossa  $f_{u,w}$  on hitsin murtolujuus. Taulukossa 1 on esitetty laskelmissa käytettyjen materiaalien lujuusarvoja. Hitsin lujuutena on lisäaineen valmistajan ilmoittamia arvoja.

Taulukko 1 Testissä käytetyt materiaalit sekä FEA materiaalimallien arvot.

Materiaalit	$f_y$ [MPa]	$f_u$ [MPa]	A [%]	bi-lineaarisen materiaalimallin arvot (venymä/jännitys [mm/mm]/[MPa]) $E=210\text{GPa}$ , $\nu=0.29$	
Union X96	930	980	14	$(930/E) / 930$	0.116 / 1093
S 960 (nimellinen)	960	980 - 1250	7	X	X
S 960 (mat. todistus)	1041	1125	11	$(1041/E) / 1041$	0.11 / 1210

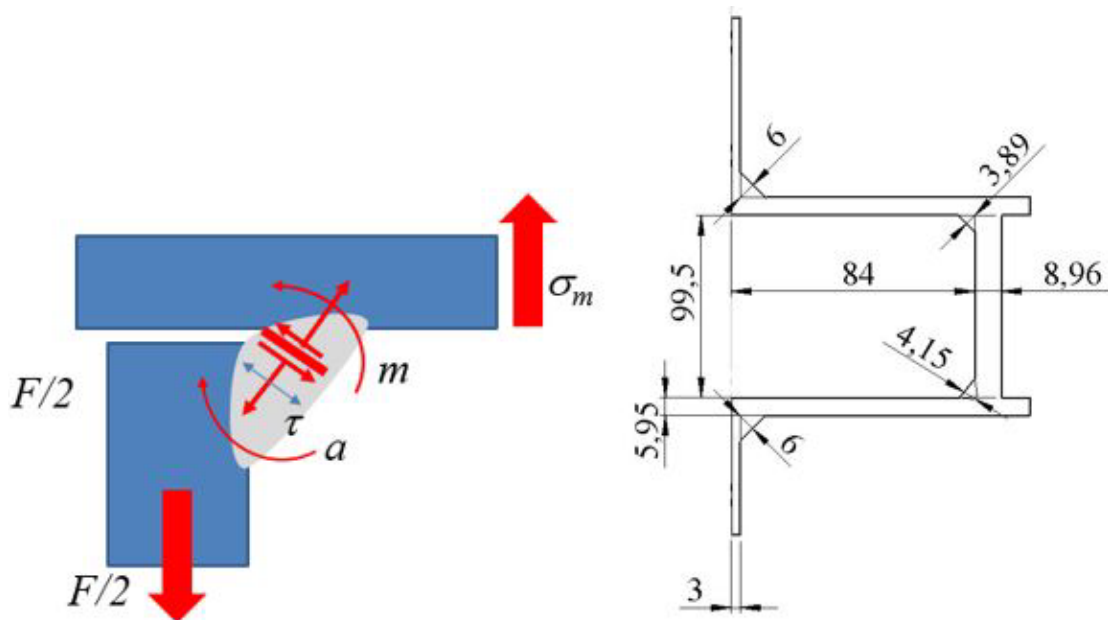
Rakenteen eli sen kahden hitsausliitoksen kestävyudeksi saadaan

$$F_{u,VM} = \frac{980}{\sqrt{(1.05 \cdot 10^{-3} + 0.03)^2 + 3 \cdot (1.05 \cdot 10^{-3})^2}} = 32 \text{ kN}. \quad (5)$$

Olettamalla jännitys jakauma kimmotilan mukaiseksi, saadaan  $k = 6$  ja kestävyudeksi

$$F_{u,E,VM} = 22 \text{ kN}.$$

Jos nurkan hitsin paikkaa muutetaan kuvan 6 mukaisesti kehän sisäpuolelle, syntyy normaalia rakenneputkiliitosta vastaava tilanne. Tässä tapauksessa, hitsiin ei kokeessa syntynyt vauriota ja siksi edellistä koekappaletta vastaava hitsin a-mitta on otettu laskentaan.



Kuva 6. Nurkka, jossa sekundaarimomentin suunta kuten rakenneputkiliitoksessa (RC02).

$$\sigma_m = \tau = \frac{F}{2\sqrt{2} \cdot 4.2 \cdot 70} = 1.20 \cdot 10^{-3} F \quad (6)$$

$$m_r = \frac{FL}{8\left(1 + \frac{Ht^3}{Ld^3}\right)} = \frac{FL}{8\left(1 + \frac{106 \cdot 6^3}{177 \cdot 9^3}\right)} = 0.106FL \quad (7)$$

Nyt FE-analyysin avulla saadaan kerroin  $\lambda=0.079$  ja hitsin sekundaarisiksi taivutusjännitykseksi saadaan

$$\sigma_b = \frac{km}{a^2b} = \frac{k\lambda FL}{a^2b} = \frac{4 \cdot 0.079 \cdot 177}{4.2^2 \cdot 70} F = 0.045F, \text{ missä } k = 4. \quad (8)$$

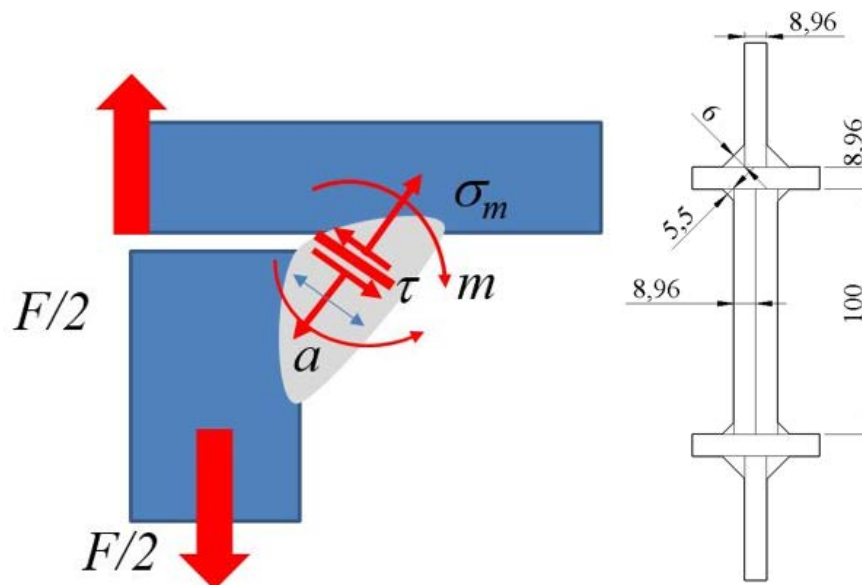
Hitsin määräämäksi rakenteen kestävyudeksi saadaan

$$F_{u,VM} = \frac{980}{\sqrt{(1.20 \cdot 10^{-3} + 0.045)^2 + 3 \cdot (1.20 \cdot 10^{-3})^2}} = 21 \text{ kN}. \quad (9)$$

Vastaavasti kimmoteorian mukaisen jännitys jakauman perusteella saadaan

$$F_{u,E,VM} = 14 \text{ kN}.$$

Kolmannessa kuvan 7 mukaisessa tapauksessa momentin vaikutus on minimoitu, mutta rakenne pidetty kuitenkin liitoksiltaan vastaavanlaisena. Liitoksen syvyysmitta on nyt 60 mm.



Kuva 7. Nurkka, jossa sekundäärinen momentti on minimissä (RC03).

$$\sigma_m = \tau = \frac{F}{2\sqrt{2} \cdot 5.5 \cdot 60} = 1.07 \cdot 10^{-3} F \quad (10)$$

$$m_r = \frac{FL}{8 \left( 1 + \frac{Ht^3}{Ld^3} \right)} = \frac{FL}{8 \left( 1 + \frac{109 \cdot 9^3}{9 \cdot 9^3} \right)} = 0.0095 FL \quad (11)$$

Tässä edellä käytetty FEM-korjaus ei toimi, vaan tarvittaisiin monimutkaisempi kontaktimalli ja koska ei tunneta ilmaraon todellista suuruutta ja toisaalta momentilla on nyt vähäinen vaikutus liitoksen kestävyys, käytetään tässä analyttisen laskennan mukaista liitosmomentin arvoa. Sekundaarinen taivutusjännitys on nyt

$$\sigma_b = \frac{km}{a^2 b} = \frac{k\lambda FL}{a^2 b} = \frac{4 \cdot 0.0095 \cdot 9}{5.5^2 \cdot 60} F = 0.189 \cdot 10^{-3} F \quad (12)$$

Rakenteen laskennalliseksi äärikestävyydeksi saadaan (ilman momenttivaikutusta 490 kN)

$$F_{u,VM} = \frac{980}{\sqrt{\left(1.07 \cdot 10^{-3} + 0.189 \cdot 10^{-3}\right)^2 + 3 \cdot \left(1.07 \cdot 10^{-3}\right)^2}} = 437 \text{ kN} \quad (15)$$

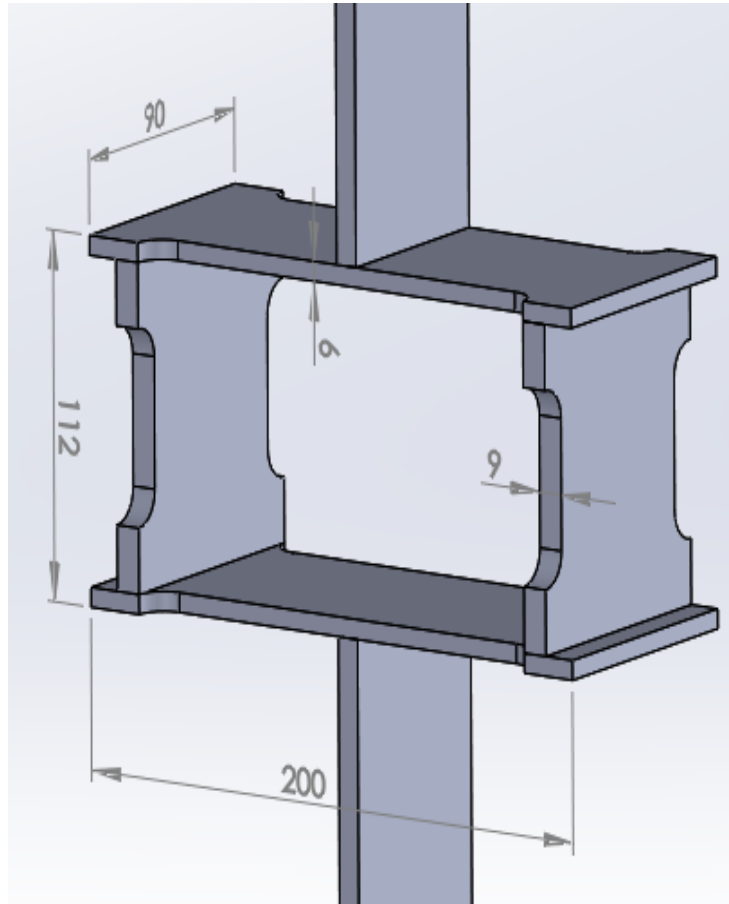
Kimmoisella momentin jännitys jakaumaoletuksella

$$F_{u,E,VM} = 427 \text{ kN} .$$

## Kokeellinen kestävyys

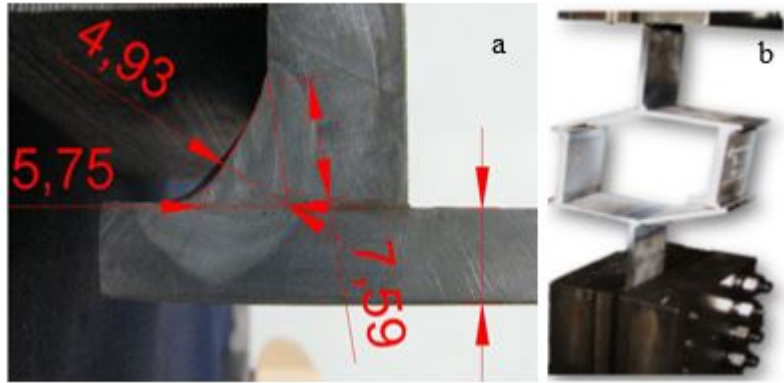
Lujien terästen hitsausliitosten kapasiteettia on tutkittu mm lähteissä [7,8], mutta näiden tutkimusten liitoksissa ei esiintynyt hitsin sekundaarista momenttia juurikaan. Tarkemmat kokeelliseen testaukseen liittyvät yksityiskohdat löytyvät lähteestä [9]. Tutkimusta varten tehtiin kolme koekappaletta RC01, RC02 ja RC03. Tyyppien RC01 ja RC02 periaatekuvat näkyvät kuvassa 8.



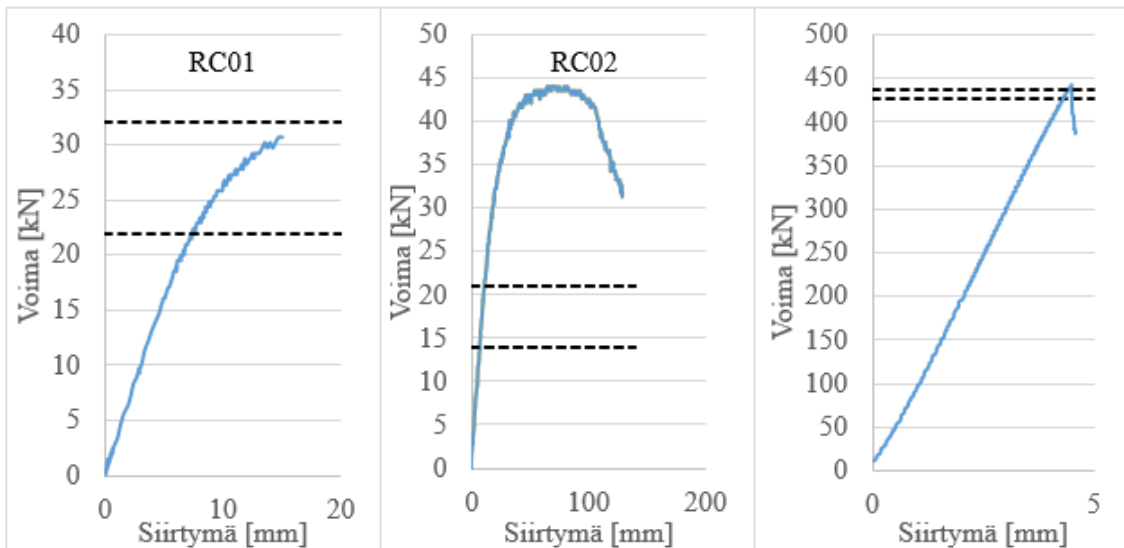


Kuva 8. Periaatekuva RC01 ja RC02 koekappaleesta.

Koekappaleiden mitat ja hitsien sijainnit muuhun rakenteeseen nähden on esitetty aiemmin analyttisten kestävyksien yhteydessä kuvissa 5, 6 ja 7. Nurkkien hitsaus tehtiin manuaalisesti WPS arvoja noudattaen. Kehämäisten koekappaleiden nurkat poistettiin hitsauksen jälkeen, jotta hitsi edusti koko matkalta mahdollisemman tasaista laatua. Hitsin a-mitat ja mahdolliset tunkeumat mitattiin koneistuksen jälkeen hitsin poikkipinnalta. Poikkipinta hiottiin ja hapotettiin, jolloin hitsin tunkeuma saatiin selvästi näkyviin. Kuvassa 9a on esitetty RC01 koekappaleen yhden pienahitsin dimensiot. Koekappaleita vetokuormitettiin sen keskellä olevista siivekkeistä asettamalla ne kiinni kuormituskehän kitkaleukoihin. Testijärjestelyn periaatekuva on esitetty kuvassa 9b. Kuormituksen aikana mitattiin vetovoimaa ja kiinnityskohdan siirtymää ja nämä tulokset on esitetty kuvan 10 käyrissä. Samoihin kuviin on merkitty eri tavoin lasketut teoreettiset kestävyudet.

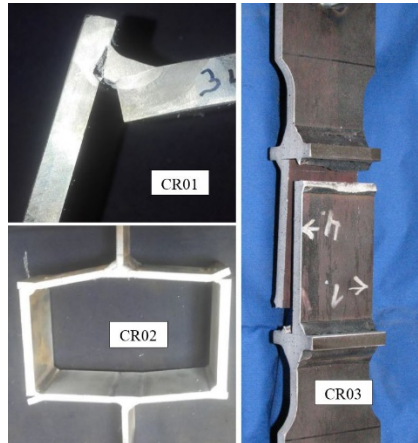


Kuva 9. Hitsin a-mitan määrittäminen kiillotetusta pinnasta ja koejärjestely.



Kuva 10. Kokeesta saadut voima-siirtymä käyrät ja laskennalliset kapasiteetit.

Kuvissa 11 on esitetty rakenteet kuormituksen jälkeen sekä vauriomuotoja. RC02 koe-kappale ei vaurioitunut vetokuormituksen aikana, vaan sylinterin liikelaajuuden loputtua sylinteri palasi lähtöasemaansa, mikä aiheutti kuvassa 11 (RC02) olevan vaurion. Maksimikuorma oli kuitenkin saavutettu jo aiemmin.

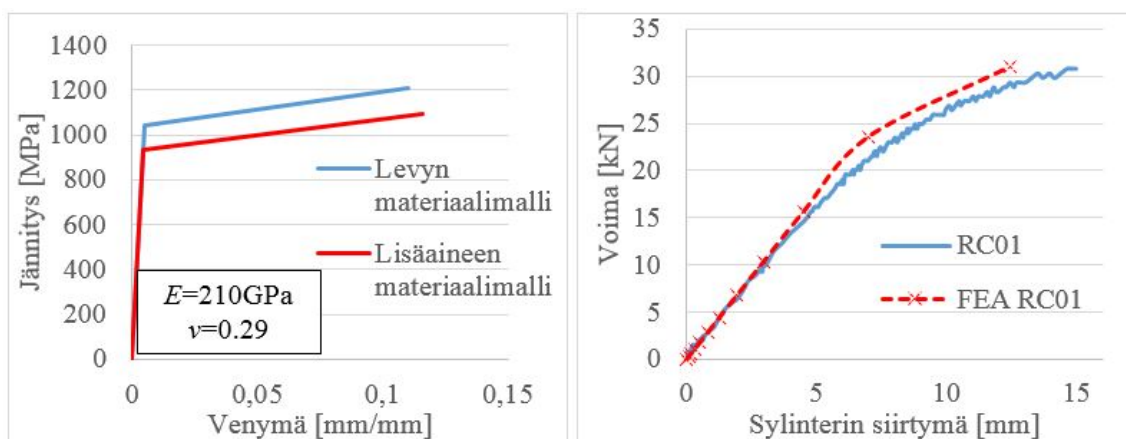


Kuva 11. Kokeista saadut vauriomuodot RC01, RC02 ja RC03 koekappaleista.

## FEA

Kuvassa 12 on esitetty RC01 koekappaleesta tehdyn elementtimallin tuloksia. Mallinnus on tehty Abaqus/CAE 2016 ohjelmistoa käyttäen. Mallissa käytetyt elementit ovat parabolisia kuorielementtejä (S8R) tasovenymätilassa. Symmetriaa hyväksikäyttäen on mallinnettu vain  $\frac{1}{4}$  - osa rakenteesta. Tutkittavaksi hitsiksi on valittu testissä saatu pienin kriittinen hitsi ja se on mallinnettu mahdollisimman tarkasti oikeaa kokoa ja muotoa jäljitellen. Juurirakona on käytetty 0.5 mm.

Kuormitus on asetettu vetolevyn päähän yhdelle solmulle ja vetolevyn pään muut solmut on yhtälö-tyyppisellä reunaehdolla pakotettu seuraamaan vetosolmun siirtymää. Näin vetopään solmut siirtyvät samalla tasolla kuormituksen kasvaessa. Analyysissa otetaan huomioon suuret siirtymät ja näiden tuoma epälineaarisuus. Materiaalimallien todelliset venymä- jännitys yhteydet on määritetty hitsin lisäaineen ja perusaineen ominaisuuksilla ja kuvattu bi-linearisella mallilla. Materiaalimallin arvot on esitetty aiemmin taulukossa 1. Materiaalimallit ovat esitetty kuvassa 12 yhdessä kokeesta ja analyysista saadun voima-siirtymä kuvaajan kanssa. Voima-siirtymä käyttäytymisestä havaitaan mallin seuraavan todella hyvin testin vastaavaa käyrää mutta myötäämisen alkaessa ero testin ja mallin välillä kasvaa merkittävästi. Syynä tähän on materiaalimallin yksinkertaistus nimenomaan tuolla alueella. FE-analyysin tuloksia hyödynnettiin kuitenkin alhaisilla voiman arvoilla eli kuormituksen lineaarisella osuudella, joten myötökäyttäytymisen erot eivät olleet tässä oleellisia.



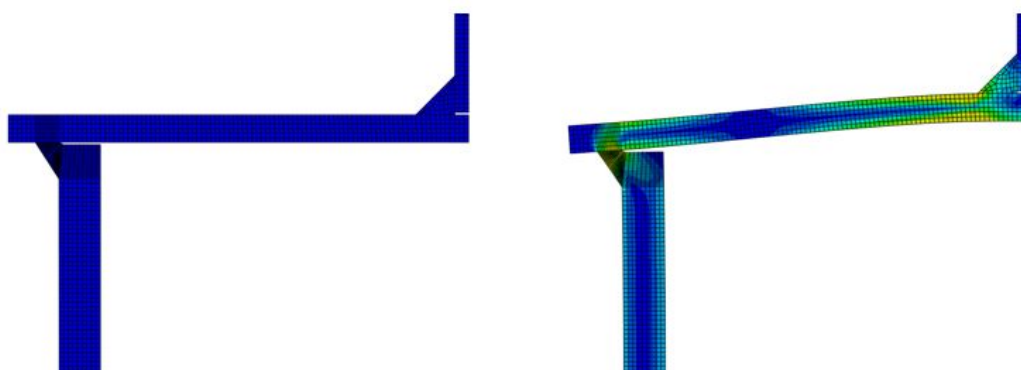
Kuva 12. Mallissa käytetyt materiaalmallit ja voima-siirtymäkäyrät

FE-analyysia käytettiin määrittämään aiemmin teoreettisessa laskennassa esitetyt FEM-korjauskertoimet kullekin testikappaleelle sekä kuvassa 14 esitetyn jännitysja-kauman määrittämiseen. Alla olevassa taulukossa 2 on esitetty FE-analyysillä määritetyt paikallisen jouston kertoimet. FEM-mallista määritetty RC03 koekappaleen korjauskerroin ei ollut uskottava johtuen mallista puuttuvasta kontaktista yhdessä olevien levyjen välillä (ks. kuva 7), joten RC03 koekappaleelle ei ole korjauskerrointa määritetty.

Taulukko 2 Paikallisen jouston kertoimet analyttisesti ja FE-analyysistä määritettynä.

Liitos	$m_r$	$\lambda (m_r, FEA)$
RC01	0.105	0.070
RC02	0.106	0.079
RC03	0.0095	-

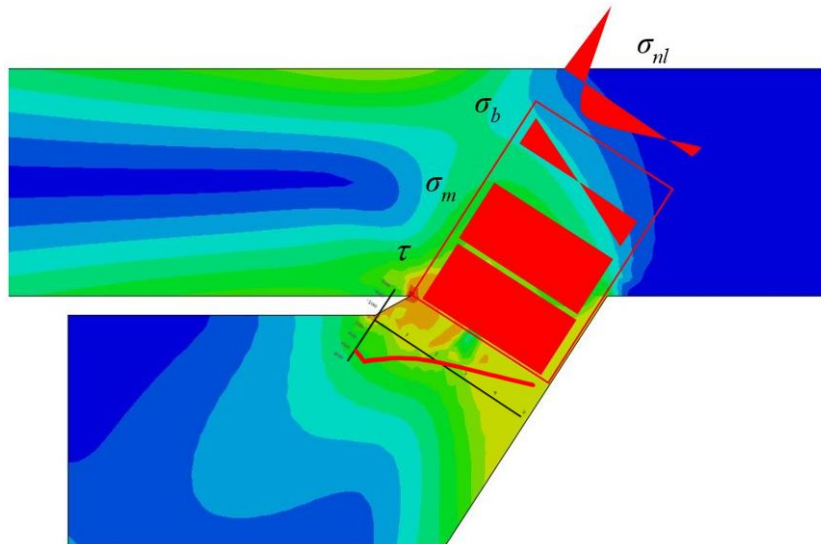
Kuvassa 13 on esitetty testiä RC01 vastaava malli ilman deformaatiota ja deformaationeena lähimpänä kohtaa, jossa koekappaleessa syntyi vaurio.



Kuva 13. FE-tulos ilman deformaatiota ja defomaation kanssa.

Kuvassa 14 olevasta hitsin jännityspirroksesta nähdään juuren lovijännityksen aiheuttama jännityskeskittymä. Sitä ei tarvitse toki laskelmissa ottaa huomioon, koska sen plasrisoitumiseen täytyy hitsin ja viereisen hatsin muodonmuutoskyky riittää (tai muutoin

ollaan pahasti pulassa). Sen sijaan sekundaarisen jännityksen vaikutus on otettava huomioon lujilla ja ultralujilla teräksillä. Kuvassa myös FE-analyysistä saatu hitsin a-mittaa vasten kohtisuora jännitysjaakauma juuresta lähtien.



Kuva 14. Jännitysjaakauma kriittisen hitsin a-mitan tasossa..

## Tulosten tarkastelua

Tuloksista nähdään, että hitsin deformaatiokapasiteetti ja erityisesti kiertymäkapasiteetti ovat oleellisia vaatimuksia hitsille ja että momentin suunnalla on keskeinen rooli etenkin lujista teräksistä hitsattujen rakenteiden kestävyteen. Kuormitussuunnan merkittävyyden vuoksi rakenneputkiliitoksilla tehdyt kriittiset hitsikoon määritykset eivät siten ole suoraan laajennettavissa levyrakenteisiin. Sekundaarinen momentti syntyy osittain pienahitsin epäkeskisestä vaikutuksesta ja osittain alusrakenteen epäsymmetrisestä jäykkyydestä. Näin ollen sekundaarista momenttia voi syntyä, vaikka hitsit tehtäisiin läpihitsattuina.

Tässä tehtyjen kokeiden perusteella sekundaarimomentti on otettava huomioon, koska juurta suojaavana se johti yli kaksinkertaiseen kapasiteettiin EC3:n mukaisin teoreettisiin laskelmiin nähden. Kokeiden perusteella näyttäisi toimivan malli, jossa juurta avaava momentti otettaisiin kimmoteoriaan perustuvan jännitysjaakauman mukaisena huomioon juuren yhdistelmäjäännitystä määritettäessä ja plastisuusteorian mukaisena siinä tapauksessa, että sekundaarimomentti pienentää juuren rasitustilaa, eli kun yhdistelmäjäännitys laskeaan hitsin ulkopinnassa. Taulukossa 3 on esitetty lihavoiduilla näin määritetyt yhdistelmäkapasiteetit. Periaatteessa tämä suhdeluku saisi olla 1, jolloin EC3:n mukaisesti meillä olisi vielä varmuutta  $\gamma_{M2} = 1.25$  suunnittelukuormitukseen. Mitään sofistikoituneempaa jännitysten redusointitapaa kriittisessä leikkauksessa ei tarvitse hyödyntää, kuten on osoitettu myös lähteessä [8].

Taulukko 3. Elastisen ja plastisen momenttijakauman vaikutus

Koe	momentti juuressa	Testattu kapasiteetti [kN]	Teoreettinen kapasiteetti, $F_u VM / F_u VM, E$	$F_{u, test} / F_u VM$	$F_{u, test} / F_u VM, E$
RC01	avaava	31	32/22	0.97	<b>1.41</b>
RC02	sulkeva	44	21/14	<b>2.10</b>	3.14
RC03	avaava	442	437/427	1.01	<b>1.04</b>

Lujista teräksistä hitsattujen liitosten sekundaärinen taivutusjännitys on määritettävä hitsin viereisessä rakenneosassa. Rakenneputkiliitoksissa suurin kalvojäännitys on putken nurkissa, mutta siellä on pienin sekundaarinen taivutusmomentti, eli liitoksessa tapahtuu luonnollista kompensatiota. Koska rakenneputkien liitokset mitoitetaan teholliselle pöörin pituudelle tulevan keskijännityksen mukaisesti, on malli varmallalla puolen, jos sekundaarisen momentin vaikutus määritetään tahkon keskeltä eli sieltä, missä se on suurimmillaan. Jatkotutkimuksissa on selvitettävä teräslujuusluokkakohtaisesti se sekundaaristen taivutusmomenttien taso, joka voidaan jättää huomioon ottamatta suunnittelutyössä. Pelkkää momentti ja kiertymäkapasiteettia on helppo tutkia kolmipistetaivutetulla yhdeltä puolen hitsatulla X-liitoksella, jossa juuren puoli on joko vedolla tai puristuksella. Yhdistelmäkuormituksessa tässäkin tutkimuksessa ollut rakenne on toimiva. Nurkan jouston vaikutuksen eliminoimiseksi pelkällä kulmaliitoksella yhdistelmävaikutuksen tutkiminen on yksiselitteisempää ja helpompaa, kunhan geometrinen epälineaarisuus otetaan huomioon.

## Johtopäätökset

- Hitsin deformaatiokapasiteettia koskeva vaatimus on oleellinen lujilla materiaaleilla.
- Rakenneputkien liitoshitsien kestävyystulokset eivät suoraan laajennettavissa levyrakenteisiin.
- Hitsin sekundaarisen momentin suunta on oleellinen pienahitsin kestävyydelle, etenkin lujilla teräksillä.
- Jos hitsin juuren puoli on määräävä, on käytettävä kimmoteorian mukaista jännitysjakamaa, muutoin voidaan käyttää plastisuusteorian mukaista jakamaa.
- Läpihitsaus ei välttämättä poista juuren kriittisyysongelmaa (momenttivaikutus voi tulla alustan epätasaisesta tuentavaikutuksesta/joustosta)!
- Liitosten suunnittelussa sekundaarinen momentti on otettava huomioon, koska juurta avaava rasitus vaatii suuremman a-mitan kuin ”normaali” rakenneputkiliitos.

- Myös kalvojännitys jakauma hitsin piiriä pitkin on tärkeä (tehollinen pituus).
- Lisätutkimuksia tarvittaisiin ohjeiden täsmentämiseksi.

## Viitteet

- [1] EN 1993 Part 1-8: “Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-8: Design of Joints”, 2005
- [2] T. Penttilä, T. Björk, Eri MAG-hitsausprosessien ja -parametrien vaikutus suurlujuusteräksestä valmistetun otsapienenahitsin äärikestävyyteen, muodonmuutoskykyyn ja vauriomuotoon, Diplomityö 2013, Lappeenrannan teknillinen yliopisto
- [3] N. Tuominen, T. Björk, Lujuusluokan S460 rakenneputken liitoksen kestävyys, Diplomityö 2013, Lappeenrannan teknillinen yliopisto
- [4] N. Tuominen, T. Björk, Ultimate capacity of welded joints made of high strength steel CFRHS, Eurosteel conference 2014, Lappeenranta University of Technology, Finland
- [5] T. Björk, N. Tuominen & T. Lähde, Effect of the secondary bending moment on K-joint capacity, ISTS 15 conference, Lappeenranta University of Technology, Finland
- [6] EN 1993 Part 1-12: “Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-12: Additional rules for the extension of EN 1993 up to steel grades S700”, 2010
- [7] Björk, T., Toivonen J, T, Nykänen, T. Capacity of fillet welded joints made of ultra high strength steel, *Welding in the World*, DOI: 10.1007/BF03321337, Volume 56, Number 71, 2012
- [8] Björk, T., Penttilä, T, Nykänen, T. Rotation capacity of fillet weld joints made of high-strength steel, *Welding in the World*, ISSN 0043-2288, Volume 58, Number 6, 2014
- [9] Litmanen J, Björk T, Tuominen, N. ”Hitsin juurenpuolen kriittisyys suurlujuus teräksillä”, Kandidaatintyö 2016, Lappeenranta University of Technology.

Niko Tuominen, Timo Björk, Jesse Litmanen  
 Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Teräsrakenteiden laboratorio  
 PL 20, 53851 Lappeenranta  
 niko.tuominen@lut.fi, timo.bjork@lut.fi, jesse.litmanen@lut.fi