

Tutkimusraportti 48  
Research Report 48

# **MIG-juotto väsymiskestävyyden parantamismenetelmänä**

Janne S. Lepistö

ISBN 951-764-871-5 (paperback)

ISBN 951-764-872-3 (PDF)

ISSN 1459-2932

Lappeenrannan teknillinen yliopisto  
Konetekniikan osasto/konstruktio­teknii­kan laitos  
Teräsrakenteiden ja lujuusopin laboratorio  
PL 20, FI-53851 Lappeenranta  
Puh. (05) 62 111

LTY digipaino 2004

## TIIVISTELMÄ

Janne S. Lepistö

### **MIG-juotto väsymiskestävyyden parantamismenetelmänä**

Lappeenrannan teknillinen yliopisto, konetekniikan osasto

Tutkimusraportti 48

Lappeenranta 2004

73 sivua, 42 kuvaa, 19 taulukkoa ja 8 liitettä

ISBN 951-764-871-5 (paperback)

ISBN 951-764-872-3 (PDF)

ISSN 1459-2932

Tässä tutkimuksessa esitellään MIG-juoton periaatteet ja tarkastellaan menetelmää siitä näkökulmasta, että menetelmä voisi toimia yhtenä varteenotettava hitsattujen liitosten väsymiskestävyyden parantamismenetelmänä. Muiden parantamismenetelmien laajaa kirjoa esitellään lyhyesti. MIG-juoton soveltuvuutta parantamismenetelmäksi tutkittiin väsytyksokkein. Kokeiden avulla määritettiin pelkästään MIG-juotetun liitoksen väsymiskestävyys erilaisissa tapauksissa. Lisäksi määritettiin väsymiskestävyys tapauksessa, jossa perinteisen MAG-pienahitsin rajaviivalle MIG-juotettiin ylimääräinen palko. Jälkimmäisessä tapauksessa menetelmä toimii väsymiskestävyyden parantamismenetelmänä.

Väsytyksokkeita tehtiin kaikkiaan 63 kpl. Kaikkiaan erilaisia väsytyksokoesarjoja oli kymmenen, joista kuusi oli 8–10 koekappaletta käsittäviä varsinaisia tutkittavia tapauksia ja neljä pieniä, vain kaksi tai kolme koesauvaa käsittäviä pilottikoesarjoja. Koetuloksia verrattiin IIW:n (International Institute of Welding) suunnitteluohjeisiin ja suosituksiin.

MIG-juotettujen liitosten väsymiskestävyys oli yleisesti ottaen hyvä. Päittäisliitos oli vähintään yhtä hyvä kuin tavanomaisesti hitsattu. Voimaa kantavassa taivutustapauksessa saatiin 110 % parempi väsymislujuus verrattuna IIW:n suunnitteluohjeeseen. Voimaa kantamattomissa poikittaisissa kiinnitysliitoksissa puolestaan saavutettiin paikallisia nimellisiä jännityksiä käyttäen 70–80 %:n paranus suunnitteluohjeeseen nähden. Pelkästään MIG-juotetun liitoksen ja ”paranetun” liitoksen väsymislujuudet olivat tässä tapauksessa likimain yhtä suuret.

MIG-juottoa käytetään vaihtoehtoisena liittämismenetelmänä jo joissakin teollisissa sovelluksissa. Tämän tutkimuksen koetulokset antavat selviä viitteitä siitä, että menetelmä voisi toimia yhtenä varteenotettavana väsymiskestävyyden parantamiskeinona uusille tai korjatuille rakenteille. Vaaditaan kuitenkin vielä lisätutkimuksia, jotta menetelmää voisi soveltaa luottavaisin mielin tuotantokäytössä väsymiskestävyyden parantamismenetelmänä.

Hakusanat: MIG-juotto, kaarijuotto, väsymiskestävyys, väsymiskestävyyden parantamismenetelmä, väsytyksokoe

## ABSTRACT

Janne S. Lepistö

### **MIG-brazing as an improvement method of fatigue strength**

Lappeenranta University of Technology, Department of Mechanical Engineering  
Research Report 48  
Lappeenranta 2004

73 pages, 42 figures, 19 tables and 8 appendices

ISBN 951-764-871-5 (paperback)

ISBN 951-764-872-3 (PDF)

ISSN 1459-2932

In this work, MIG-brazing has been studied as a potential fatigue strength improvement method for welded connections.

Following a short survey of other available fatigue strength improvement methods for welded joints, basic principles of MIG-brazing are presented and the technique is examined as a potential fatigue strength improvement method. The fatigue strength of joints produced by MIG-brazing alone was studied experimentally for different joint types. Additionally, the fatigue strength of joints fabricated using traditional welding methods improved by MIG-brazing was established. The effect of the improvement for a typical structural steel weld is achieved by a final pass along the weld toe using MIG-brazing.

In total, 63 fatigue tests were performed. These tests include four pilot cases with only two or three specimens per series and six main cases with eight to ten specimens per series. The results of the fatigue tests were compared to IIW recommendations for as-welded and improved welds.

The fatigue strength of MIG-brazed joints was, in general, good. The fatigue strength of butt joints was approximately the same as for joints produced using conventional welding techniques. In the load carrying bending case, 110 % better fatigue strength was obtained when compared to IIW recommendations. For transverse non-load-carrying attachments, an improvement of 70–80 % measured as local nominal stress was gained with respect to IIW recommendations. The fatigue strength of solely MIG-brazed joints and joints improved by MIG-brazing was almost equal.

As an alternative joining method, MIG-brazing is used in some industrial applications. This study has given clear indications that this method could also potentially be used as a weld improvement method for new or repaired structures. However, additional research is needed in order to gain more confidence that the degree of improvement can reliably be obtained in production.

Keywords: MIG-brazing, GMA-brazing, arc-brazing, fatigue strength, weld improvement method, fatigue test

## ALKUSANAT

Tämä tutkimus oli osa TEKES:n rahoittamaa KENNO – kevyet levyt -ohjelmaan kuuluvaa hanketta *Kerroslevyrakenteiden suunnittelu*. Hankkeessa olivat mukana tutkimuslaitoksista Oulun yliopisto koordinaattorina ja Lappeenrannan teknillinen yliopisto (silloin Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu). Yrityspartnereita olivat mm. Aker Finnyards, Beacon Finland LTD ja Talgo Transtech, jotka olivat Oulun yliopiston yrityspartnereita. LTY:n yritysosuus rahoituksesta tuli Hitsattujen rakenteiden optimointi -foorumin (HRO-foorumi, joka nykyään on äskettäin perustetun Suomen hitsaus- ja liittämisinstituutin, SHI:n, suunnittelufoorumi) rahoituksena. Tähän foorumiin kuuluu jäsenenä joukko Suomen teollisuutta, joille yhteistä on kiinnostus hitsattujen rakenteiden väsymiseen. Hanke toteutettiin aikavälillä 1999–2002.

Kiitän kaikkia hankkeeseen osallistuneita henkilöitä rakentavassa ilmapiirissä käydyistä keskusteluista asian tiimoilta ja kiinnostuksesta tutkimuksen aihepiiriä kohtaan.

Tämän raportin sisältö on pieniä muutoksia lukuun ottamatta yhtenevä tekijän samannimisen lisensiaatintutkimuksen kanssa.

Lappeenrannassa 15.1.2004

Janne Lepistö

# SISÄLLYSLUETTELO

<b>KÄYTETYT MERKINNÄT .....</b>	<b>vii</b>
<b>1 JOHDANTO .....</b>	<b>1</b>
1.1 Tämän tutkimuksen tavoitteet.....	1
<b>2 MITÄ ON MIG-JUOTTO? .....</b>	<b>2</b>
2.1 MIG-juoton periaate.....	2
2.2 Metallurgia.....	4
2.2.1 Juotosviat.....	4
2.2.2 Sinkin vaikutus.....	5
2.3 Lisäaineet.....	6
2.4 Kaarimuodot.....	7
2.4.1 Pulssikaari.....	7
2.5 Suojakaasut.....	9
2.6 Railomuodot.....	9
2.7 Laitteistot.....	10
2.7.1 Virtalähde.....	10
2.7.2 Langansyöttö.....	11
2.8 Polttimen asento.....	11
2.9 Työhygienia.....	11
2.10 MIG-juotettujen liitosten lujuudesta.....	12
2.11 Sovellukset.....	13
<b>3 VÄSYMISKESTÄVYYDEN PARANTAMISMENETELMÄT .....</b>	<b>14</b>
3.1 Hitsigeometrian parantamiseen perustuvat menetelmät.....	14
3.1.1 Koneistusmenetelmät.....	14
3.1.1.1 Koneviilaus.....	16
3.1.1.2 Laikkahionta.....	17
3.1.1.3 Vesisuihkuhionta.....	17
3.1.2 Uudelleensulatusmenetelmät.....	18
3.1.2.1 TIG-käsittely.....	18
3.1.2.2 Plasmakäsittely.....	19
3.1.3 Erikoishitsausmenetelmät.....	19
3.1.3.1 Hitsiprofilin kontrollointi.....	20
3.1.3.2 Erikoiselektrodit.....	20
3.1.4 Kaarijuottomenetelmät.....	21
3.2 Jäännösjännityksiin perustuvat menetelmät.....	23
3.2.1 Mekaaniset menetelmät.....	23
3.2.1.1 Vasarointimenetelmät.....	23
3.2.1.1.1 Kuulapuhallus.....	23
3.2.1.1.2 Vasarointi.....	24
3.2.1.1.3 Neulavasarointi.....	25
3.2.1.1.4 Ultraäänivasarointi (UIT).....	25
3.2.1.2 Ylikuormitusmenetelmät.....	25
3.2.1.2.1 Esiylukuormitus.....	25
3.2.1.2.2 Paikallinen puristus.....	25
3.2.2 Jännityksen poistoon perustuvat menetelmät.....	26
3.2.2.1 Myöstökäsittely.....	26

3.2.2.2	Värähtelykäsittely .....	26
3.2.2.3	Pistekuuminen .....	26
3.2.2.4	Gunnertin menetelmä .....	26
3.2.2.5	Räjähdekäsittely .....	27
<b>4</b>	<b>SUORITETUT VÄSYTYSKOKEET .....</b>	<b>28</b>
4.1	Päittäisliitoksen väsytykset .....	29
4.1.1	Koekappaleet .....	29
4.1.2	Materiaalit .....	29
4.1.3	Koejärjestelyt .....	30
4.1.4	Tulokset .....	30
4.2	Voimaa kantavan T-liitoksen taivutusväsytykset .....	31
4.2.1	Koetapaukset .....	31
4.2.2	Koekappaleet .....	31
4.2.3	Materiaalit .....	32
4.2.4	Koejärjestelyt .....	32
4.2.5	Tulokset .....	34
4.3	Ristiliitoksen väsytykset .....	35
4.3.1	Koekappaleet .....	35
4.3.2	Materiaalit .....	36
4.3.3	Koejärjestelyt .....	36
4.3.4	Tulokset .....	36
4.4	Voimaa kantamattoman, poikittaisen kiinnitysliitoksen vetoväsytykset .....	37
4.4.1	Tutkitut tapaukset .....	37
4.4.2	Koekappaleet .....	38
4.4.3	Materiaalit .....	39
4.4.4	Koejärjestelyt .....	39
4.4.5	Tulokset .....	41
<b>5</b>	<b>TULOSTEN TARKASTELUA .....</b>	<b>43</b>
5.1	Tuloksissa esiintyvien suureiden laskenta .....	43
5.1.1	Eri jännityssuureet ja niiden laskeminen .....	43
5.1.1.1	Nimellinen jännitys .....	43
5.1.1.2	Paikallinen nimellinen jännitys .....	43
5.1.1.3	Venymäliuskan perusteella määritetty jännitys .....	44
5.1.1.4	Rakenteellinen hot spot -jännitys .....	45
5.1.2	Kerroinyhtälöt .....	45
5.1.2.1	Aksiaalinen sovitusero .....	45
5.1.2.2	Kulmaverro .....	46
5.1.2.3	Aksiaalisen sovituseron ja kulmaverro yhteisvaikutus .....	48
5.1.2.4	Venymäliuskan jännityksen ekstrapolointikerroin epäkeskisyyttä, kulmaverroa tai molempia sisältävissä tapauksissa .....	49
5.1.2.5	Eri kulmaverrotausten vertailua .....	51
5.1.3	S–N-käyrän määrittäminen .....	52
5.1.3.1	Keskimmäisen väsymisloukan laskeminen .....	52
5.1.3.2	Karakteristisen väsymisloukan laskeminen .....	53
5.2	Päittäisliitokset .....	54

5.3	Voimaa kantavan T-liitoksen taivutusväsytykokeet.....	56
5.4	Ristiliitoksen väsytykokeet .....	59
5.5	Voimaa kantamattoman, poikittaisen kiinnitysliitoksen vetoväsytykokeet .....	60
<b>6</b>	<b>JOHTOPÄÄTÖKSET .....</b>	<b>68</b>
<b>7</b>	<b>JATKOTUTKIMUKSEN TARVE.....</b>	<b>69</b>
	<b>LÄHDELUETTELO .....</b>	<b>70</b>
	<b>LIITTEET .....</b>	<b>73</b>

## KÄYTETYT MERKINNÄT

$A$	Poikkipinta-ala
$A_5$	Murtovenymä
$C$	Väsymiskapasiteetti
$C_k$	Karakteristinen väsymiskapasiteetti
$C_m$	Keskimääräinen väsymiskapasiteetti
$F$	Voima
$FAT$	Väsymiskuokka, usein myös karakteristinen väsymisluokka
$FAT_k$	Karakteristinen väsymisluokka
$FAT_m$	Keskimääräinen väsymisluokka
$E$	Kimmokerroin
$I$	Neliömomentti (jäyhyysmomentti)
$L$	Pituus, paikkamitta, tukietäisyys
$L_L$	Venymäliuskan etäisyys tuesta
$L_r$	Tuen ja rajaviivan välinen matka
$M$	Taivutusmomentti
$M_\alpha$	Kulmavirheestä aiheutuva taivutusmomentti
$N$	Kestoikä
$\bar{N}_{\log}$	Kestoikien 10-kantaisten logaritmien keskiarvo
$Q$	Poikkeuttava voima
$R$	Minimi- ja maksimijännityksen suhde
$R_{eh}$	Ylempi myötöraja
$R_m$	Murtolujuus
$R_{p0,2}$	Jännityksen arvo, jolla saavutetaan 0,2 %:n pysyvä venymä (0,2-raja, myötöraja)
$T_L$	Sulamislämpötila (likvidus)
$T_S$	Jähmettymislämpötila (solidus)
$W$	Taivutusvastus
$W_a$	Pienen a-mitan taivutusvastus
$a$	a-mitta
$b$	Leveys
$e$	Epäkeskisyys
$k$	Kerroin yleensä. Kerroin, jolla keskihajonta kerrotaan, jotta saavutetaan haluttu luotettavuusväli keskiarvolle
$k_L$	Ekstrapolointikerroin
$k_{L,\alpha}$	Ekstrapolointikerroin rakenteelle, jossa on kulmavirhettä
$k_{L,e\alpha}$	Ekstrapolointikerroin rakenteelle, jossa on sekä aksiaalista epäkeskisyttä että kulmavirhettä
$k_m$	Jännityksen suurennuskerroin
$k_{m,\alpha}$	Kulmavirheestä aiheutuva jännityksen suurennuskerroin
$k_{m,e}$	Aksiaalisesta epäkeskisyydestä aiheutuva jännityksen suurennuskerroin
$k_{m,e\alpha}$	Aksiaalisesta epäkeskisyydestä ja kulmavirheestä aiheutuva yhdistetty jännityksen suurennuskerroin
$k_{m,\alpha x}$	Kulmavirheestä aiheutuva jännityksen suurennuskerroin matkan $x$ päässä rajaviivalta
$k_{m,ex}$	Aksiaalisesta epäkeskisyydestä aiheutuva jännityksen suurennuskerroin matkan $x$ päässä rajaviivalta



$k_{m,exx}$	Aksiaalisesta epäkeskisyydestä ja kulmavirheestä aiheutuva yhdistetty jännityksen suurennuskerroin matkan $x$ päässä rajaviivalta
$k_{m,m}$	$k_m$ -kertoimien keskiarvo
$k_{m,med}$	$k_m$ -kertoimien mediaani
$k_s$	Rakenteellinen jännitykonsentraatiokerroin
$m$	S–N-käyrän kulmakerroin
$n$	Datapisteiden lukumäärä, koesauvojen lukumäärä
$s$	Keskihajonta
$t$	Levynpaksuus, Studentin jakautuma
$v$	Taipuma
$x$	Etäisyyskoordinaatti
$x_k$	Karakteristinen arvo yleensä
$x_m$	Keskiarvo yleensä
$y$	Kulmavirheestä aiheutuva momenttivarsi
$\Phi$	Gaussin normaalijakautuman tiheysfunktio
$\alpha$	Kulmavirheen kulma tai kulma yleensä
$\beta$	Aputermi
$\varepsilon$	Venymä
$\varepsilon_1$	Suurempi päävenymä tasojännitystilassa
$\varepsilon_2$	Pienempi päävenymä tasojännitystilassa
$\kappa$	Aputermi
$\lambda$	Pituuden korjauskerroin
$\nu$	Poissonin vakio
$\rho$	Tiheys
$\sigma$	Jännitys yleensä
$\sigma_1$	Suurempi pääjännitys
$\sigma_{max}$	Maksimijännitys
$\sigma_{min}$	Minimijännitys
$\chi^2$	$\chi^2$ -jakautuma
$\Delta F$	Voiman vaihtelu, maksimi- ja minimivoiman erotus
$\Delta M$	Taivutusmomentin vaihtelu, maksimi- ja minimimomentin erotus
$\Delta \varepsilon$	Venymävaihtelu
$\Delta \sigma$	Jännitysvaihtelu yleensä
$\Delta \sigma_a$	a-mitan perusteella laskettu pienen poikkileikkauksen taivutusjännitysvaihtelu
$\Delta \sigma_{b,nim}$	Taivutuksesta aiheutuva nimellinen jännitysvaihtelu
$\Delta \sigma_{hs}$	Rakenteellisen hot spot -jännityksen vaihtelu
$\Delta \sigma_L$	Venymäliuskan venymävaihtelun perusteella laskettu jännitysvaihtelu liuskan kohdalla
$\Delta \sigma_{nim}$	Nimellinen jännitysvaihtelu
$\Delta \sigma_{n,nim}$	Aksiaalisesta voimasta (normaalivoimasta) aiheutuva nimellinen jännitysvaihtelu
$\Delta \sigma_{pnim}$	Paikallinen nimellinen jännitysvaihtelu. Kulmavirheen ja epäkeskisyyden aiheuttama jännitystason nousu on otettu huomioon, mutta ei esimerkiksi hitsistä tai rakenteesta aiheutuvaa jännityskonsentraatiota.
$\overline{\Delta \sigma}_{log}$	Jännitysvaihtelujen 10-kantaisten logaritmien keskiarvo

# 1 JOHDANTO

Rakenteessa oleva hitsi on aina heikko kohta, jos sitä tarkastellaan väsymiskestävyuden ja/tai sitkeyden kannalta. Nykyaikainen teräksen valmistustekniikka on jo niin kehittynyttä, että sitkeys ei nykyään aiheuta juurikaan ongelmia ja liian vähäisen sitkeyden aiheuttamat – joskus jopa katastrofaalisetkin – hitsien haurasmurtumat ovat nykyään melko harvinaisia, mikäli sovelluskohteeseen on valittu oikeanlainen teräs.

Väsymiskestävyteen ei sen sijaan ole juuri pystytty vaikuttamaan teräksen valmistustekniikan kehittämisellä. Nykyaikaisten terästen korkean lujuuden mahdollistamat suuremmat jännitystasot tekevät väsymisestä mitoittavan tekijän, jolloin taas korkean lujuuden etuja ei päästä hyödyntämään täysimittaisesti. Väsymiseen liittyviä ongelmia voidaan usein välttää osaavalla suunnittelulla ja huolellisella valmistuksella. Toisin sanoen suunnittelussa pyritään sijoittamaan hitsit kohtiin, joissa rasitus ei ole suurin ja toisaalta rakenteen sopivalla muotoilulla voidaan vaikuttaa siihen, että suuret jännityskeskittymät saadaan pienemmiksi. Aina ei näillä keinoilla kuitenkaan ole mahdollista vaikuttaa asiaan. Tällöin katseet kohdistuvat erilaisiin hitsin väsymiskestävyuden parantamiseen tarkoitettuihin jälkikäsitteilymenetelmiin tai vaihtoehtoisiin liittämismenetelmiin.

Tässä tutkimuksessa tarkastellaan MIG-juottoa yhtenä vaihtoehtoisena liittämismenetelmänä ja toisaalta väsymiskestävyuden parantamismenetelmänä. Tutkimuksessa tarkastellaan ohuehkojen levyjen väsymiskestävyyttä, kun ne on liitetty ko. menetelmällä. Edelleen verrataan yhdessä tyypillisessä liitosmuodossa pelkkää MIG-juottoa ja tapausta, jossa perinteisen MAG-hitsin rajaviivalle on lisätty MIG-juottoa käyttäen toinen palko. Tällöin menetelmä siis toimisi väsymiskestävyuden parantamismenetelmänä.

## 1.1 Tämän tutkimuksen tavoitteet

Tällä tutkimuksella oli kaksi pääasiallista tavoitetta:

1. Tutkia MIG-juotetun piena- ja päittäisliitoksen väsymiskestävyyttä väsytyksokkein.
2. Arvioida em. kokeiden perusteella, voisiko MIG-juottoa käyttää yhtenä väsymiskestävyuden parantamismenetelmänä.

Kokeet tehtiin ohuehkoilla levynpaksuuksilla, jolloin myös kriteeri kevytrakenteesta tuli täytetyksi. Tämä kriteeri oli eräs koko tutkimushankkeen reunaehdoista. Lisäksi MIG-juotosta ei juuri ole kokemuksia paksummilla levyillä ja toisaalta kirjallisuuden mukaan menetelmä soveltuu parhaiten ohuille levyille.

## 2 MITÄ ON MIG-JUOTTO?

MIG-juotto – tai kaarijuotto, joksi menetelmää kuulee myös kutsuttavan – on alun perin päälystettyjen, varsinkin sinkittyjen ohutlevyjen hitsauksessa syntyvien ongelmien vähentämiseksi kehitetty menetelmä. Menetelmän nimitys on kirjallisuudessa varsin kirjavaa. Esimerkiksi englanninkielisessä kirjallisuudessa käytetään mm. nimityksiä MIG-brazing, GMA-brazing, arc-brazing, GMA braze welding, arc braze welding ja joskus jopa pelkästään braze welding. Vastaavasti saksankielisessä kirjallisuudessa näkee nimityksiä MIG-Löten, MSG-Löten, Metall-Inertgashartlöten jne. Kirjavan nimityskäytännön vuoksi ei artikkelien otsikon (eikä joskus abstraktinkaan) perusteella aina pysty sanomaan, mistä menetelmästä kulloinkin on kyse.

Sinkityn levyn hitsauksessa höyrystyvä sinkki aiheuttaa monenlaisia ongelmia, kuten esimerkiksi [1]:

- roiskeet
- huokoisuus
- epävakaa valokaari
- sinkkihöyryt
- suojaavan sinkkikerroksen vaurioituminen → jälkikäsittelyn tarve

Näitä ongelmia yritetään pienentää mm. käyttämällä pienempää lämmöntuontia. Tällöin käytettävän lisäaineen mahdollisimman alhainen sulamislämpötila on edullinen, koska höyrystyvän sinkin määrä pienenee. Pienempi lämmöntuonti lisäksi pienentää hitsauksesta aiheutuvia muodonmuutoksia.

Lähes kaikki kirjallisuudessa esiintyvä MIG-juottoon liittyvä materiaali käsittelee liitettävien materiaalien osalta pinnoitettuja levyjä keskittyen valtaosin sinkittyihin levyihin. Tästä voi vetää johtopäätöksen, että tavanomaisten, pinnoittamattomien levyjen liittämistä ko. menetelmällä ei ole juuri tutkittu tai sitten ainakaan yleisesti raportoitu. Tämä johtunee siitä, että menetelmä on yleisimmin käytössä nimenomaan autoteollisuudessa ja sovellutukset käsittävät pääosin sinkittyjä levyjä käytäviä kohteita.

MIG-juotettujen liitosten staattiseen lujuuteen liittyviä kokeita on tehty jonkin verran, mutta niiden raportointi on varsin ylimalkaista. Väsymiseen liittyvää materiaalia ei sen sijaan löydy käytännöllisesti katsoen lainkaan.

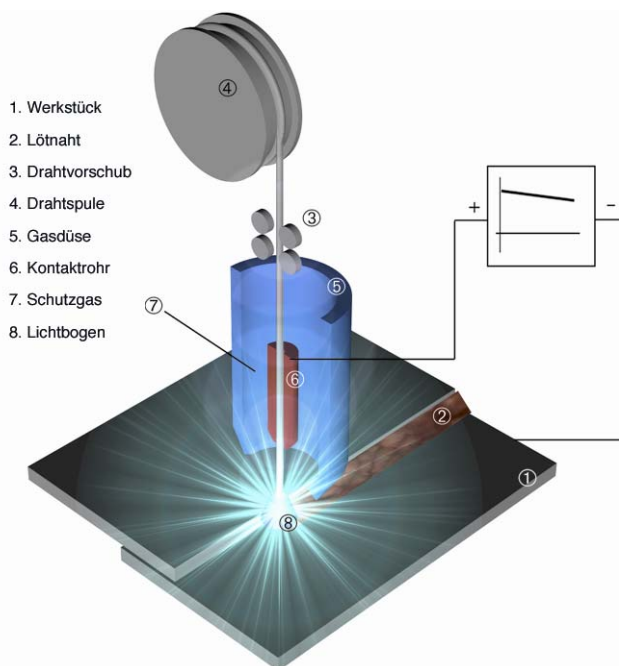
MIG-juottoon (tai suurin piirtein vastaavanlaiseen prosessiin) liittyviä artikkeleita löytyy jo 60-luvun puolelta [2], mutta varsinaisesti menetelmän yleistyminen alkoi 80-luvun puolivälin paikkeilla, jolloin autoteollisuus alkoi kiinnostua asiasta [3][4][5][6]. Kiinnostus on edelleen kasvanut 90-luvun puolivälin jälkeen, mikä johtunee laitteistojen kehittymisestä ja toisaalta pinnoitettujen levyjen käytön lisääntymisestä etenkin autoteollisuuden piirissä [7][8][9][10].

### 2.1 MIG-juoton periaate

MIG-juoton peruseriaatteet on esitetty varsin monessa kirjoituksessa. Hackl et al. ovat esitelleet menetelmän periaatetta materiaalin ollessa sinkittyä levyä

monessa artikkelissa [11][12][13][14], jotka ovat kaikki suurin piirtein samansisältöisiä. Kotimaisissa julkaisuissa Leino [15] on esitellyt MIG-juottoa jo 80-luvun puolivälissä, mutta vasta viime aikoina aiheesta on ollut muitakin artikkeleita [1][10][16]. Lisäksi eri laite- ja lisäainevalmistajien www-sivuilta ja asiakaslehdistä löytyy jonkin verran perustietoa [9][17][18][19].

MIG-juotto on periaatteessa MIG/MAG-hitsauksen prosessimuunnos. Lisäainelangan ja railon välissä palava valokaari (kuva 1) lämmittää perusaineen ja sulattaa lisäaineen, joka kostuttaa railopinnat. Liitos syntyy sulan jähmettyessä. Juoksuotteita ei tarvita, sillä positiivisessa navassa palava valokaari aktivoi liitettävät pinnat ja toisaalta suojakaasu estää pintojen oksidoitumista. Oleellisin ero MIG/MAG-hitsaukseen nähden on menetelmässä käytettävä kuparipohjainen lisäainelanka, jonka sulamispiste (n. 980–1080 °C riippuen seoksesta) on alhaisempi kuin teräksen sulamispiste (n. 1500 °C). Tällöin ideaalitapauksessa ei juuri tapahdu perusaineen sulamista. Prosessi muistuttaa siis tältä osin läheisesti perinteistä kovajuottoprosessia. Käytännössä tilanne on kuitenkin monesti se, että perusaineen sulamista tapahtuu jonkin verran; varsinkin pienahitsien juuren puolella on usein havaittavissa tunkeumaa (kuva 2). Rajaviivalla sulamista ei kuitenkaan yleensä tapahdu, mikäli parametrit ovat kohdallaan ja juottaminen onnistuu normaalisti.



Kuva 1. MIG-juoton periaate [20].

Sinkityillä levyillä sinkkikerroksen paksuus on yleensä noin 1–20 µm riippuen valmistustavasta. Koska sinkin sulamispiste on noin 420 °C ja höyrystyslämpötila 906 °C, aiheuttaa tämä em. ongelmia hitsauksessa. Koska MIG-juoton lisäaineen sulamispiste on vähän korkeampi kuin sinkin höyrystyslämpötila, tapahtuu tälläkin menetelmällä sinkin höyrystymistä, mutta ei niin paljon kuin tavanomaisessa hitsauksessa. Esimerkiksi päittäisliitoksen juuren puolella on sinkkikato paljon vähäisempää kuin hitsatulla liitoksella, jolloin liitoksen korrosio-ominaisuudet paranevat. Lisäksi itse lisäaine on kuparipohjaista, jolloin sekin ei ole altis korroosiolle. MIG-juoton etuina pidetään mm. [14]:

- liitoksen hyvä korroosiokestävyys
- vähän roiskeita
- sinkkikerroksen vähäinen poispalaminen
- pieni lämmöntuonti
- liitoksen helppo jälkikäsitely
- perusmateriaalin katodinen suojaus liitoksen välittömässä läheisyydessä



Kuva 2. Esimerkki MIG-juotetusta pienaliitoksesta, jossa perusaine on juuren puolella hieman sulanut ja syntynyt tunkeuma selkeästi nähtävissä. Levyjen paksuudet 2 mm ja 5 mm. Lisäaine CuAl8 ja perusaine S355K2G3. Suoja-kaasuna Argon.

## 2.2 Metallurgiaa

Kuparipohjaisen lisäaineen käyttö johtaa pieneen perusaineen sulamiseen joh-tuen kuparin tai kupariseoksen alhaisemmasta sulamispisteestä. Pienellä sula-neella rautamäärällä on dentriittinen rakenne. Lisäaineen koostumuksesta riip-puen myös pieni osa raudasta liikenee sulaan hitsiaineeseen. Jos hitsiaineelle (tai juotosaineelle) asetettavat vaatimukset lujuuden ja sitkeyden suhteen ovat vähäiset, ei jopa 10 prosentin rautamäärä ole vaarallinen [12][13]. Lisäaineella, juottoparametreilla ja polttimen asennolla on oleellinen merkitys liukenevaan raudan määrään.

### 2.2.1 Juotosviat

Kuten muillakin juottomenetelmillä, myös MIG-juotettaessa on kuparipohjaisen lisäainemateriaalin vuoksi riski juotoshaurauteen. Juotoshalkeamia voi syntyä, jos teräs on vetojännityksen alaisena tai siinä on vetojäännösjännityksiä ja sula kupari tai kupariseos kostuttaa sen pinnan. Lähteessä [21] on esitetty juotoshal-keamien syntyvän seuraavasti: Kupariseoksesta koostuva juote muodostaa se-

kunnin murto-osassa perusaineen kanssa metalliseoskerroksen, joka on vain muutaman hilavakion paksuinen. Heti tämän seoksen muodostumisen jälkeen alkaa lisäaineen ja perusaineen ainesosat sekoittua toisiinsa. Jos juotoskohta on juuri tällä hetkellä vetojännityksen alaisena, ei diffuusioreaktio tapahdu tasaisesti koko pinnalla, vaan sula juote tunkeutuu tietyissä kohdissa raerajoja pitkin teräkseen. Koska sula juote ei pysty kantamaan vetojännitystä, halkeaa teräs kohdista, joissa rae on sulan juotteen peittämä. Tämän tapahtuman mekanismi on siis analoginen jännityskorroosion kanssa; erona on se, että sula metalli on korrodoivan väliaineen tilalla.

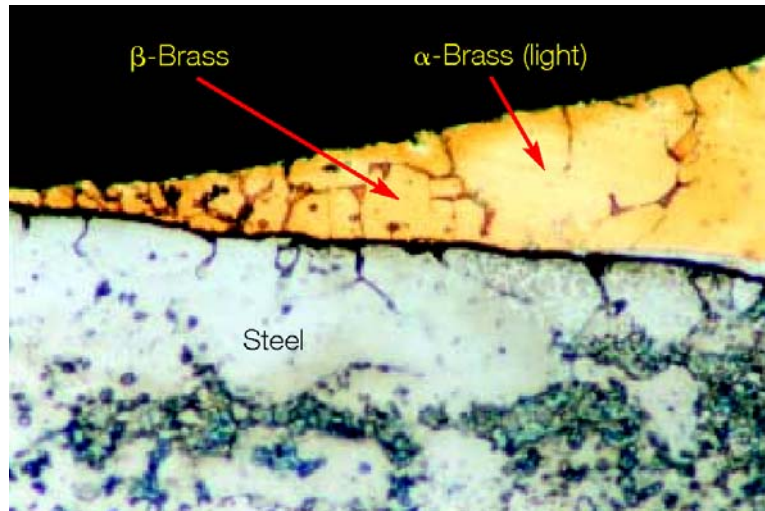
Syntyneiden halkeamien koko ja tyyppi voivat olla eri tapauksissa kovin erilaiset. Halkeamat voivat olla täyttyneitä tai joko osittain tai kokonaan täyttymättömiä. Näiden välillä on selkeä ero, sillä täyttynyt halkeama on vain metallissa olevaa epähomogeenisuutta, kun taas osittain tai kokonaan täyttymättömässä halkeamassa on kyseessä todellinen metallissa tapahtuva separoituminen. MIG-juotossa on yleisimmin kyseessä juuri täyttyneet halkeamat, joita esiintyy melko vähän ja jotka on vain poikkeustapauksessa otettu huomioon [12].

Lappeenrannan teknillisessä yliopistossa suoritetussa tutkimuksessa [16] havaittiin, että tinapronssilisäaineella oli taipumusta tunkeutua raerajoille varsinkin austeniittisilla ruostumattomilla teräksillä ja aiheuttaa juotosvikoja. Myös alumiinipronssilisäaineella on tunkeutumista havaittu tapahtuvan juuri austeniittisten ruostumattomien terästen kanssa [8].

Juotoshaurauden vaikutusta staattiseen ja väsymiskestävyyteen ei ole tutkittu kovinkaan paljon. Herold et al. havaitsivat saksalaisessa tutkimuksessa [21] kupariseoksen tunkeutuvan raerajoille, mutta staattisissa kokeissa sen ei havaittu vaikuttavan murtolujuuteen. Sen sijaan murtovenymään ilmiöllä oli jonkin verran vaikutusta. Kyseisessä tutkimuksessa suoritetuissa testeissä koekappaleet murtuivat HAZ-alueelta, eivätkä alueelta, jossa kupariseos oli tunkeutunut raerajoille. Muissakaan tutkimuksissa, joita tässä tutkimuksessa käytettiin lähteenä ja joissa raportoitiin staattisten kokeiden tuloksia, ei kerrottu murtumisen aiheutuneen juotoshaurauden takia. Tässä tutkimuksessa tähän asiaan ei paneuduttu lainkaan – toisaalta ilmiön vaikutus sisältyy väsytyскоetuloksiin, jos sitä koekappaleissa esiintyi.

### **2.2.2 Sinkin vaikutus**

Juottamisen aikana myös pinnalla oleva sula sinkki (kaikki ei höyrysty pois) liukenee osittain sulaan juotteeseen muodostaen messinkiseoksen [19]. Tätä tapahtuu varsinkin alueella, jossa siirrytään juotteesta sinkkipitoiseen pintakerrokseen juotepalon vieressä. Kuvassa 3 pronssilisäaine näkyy oikealla. Vaalea väriyys kertoo pienestä sinkin osuudesta. Tämä käsittää pääosin  $\alpha$ -messinkiä. Kun lähestytään sinkkipinnoitetta, tummenee väriyys, mikä tarkoittaa sitä, että sinkin osuus on suurempi, jolloin tuloksena on  $\beta$ -messinkiä. Tämä juoheva siirros pronssilisäaineesta messinkiä sisältävän kerroksen kautta sinkkiin antaa hyvän korroosiosuojan.



Kuva 3. Siirryttäessä pronssijuotteesta sinkittyyn perusmateriaaliin sinkki ja pronssilisäaine sekoittuvat keskenään muodostaen messinkiä [19].

## 2.3 Lisäaineet

Sinkittyjen levyjen MIG-juottoon tarkoitettuja kuparipohjaisia lisäaineita on useita. Seuraavat lisäaineet ovat kuitenkin suositeltavia ja yleisimpiä [13]:

- SG-CuSi3 (DIN 1733/2.1461)
- SG-CuAl8 (DIN 1733/2.0921)
- SG-CuSi2Mn (DIN 1733/2.1522)

Piipronssi CuSi3 on kaikista yleisimmin käytetty lisäaine varsinkin sinkittyjen levyjen MIG-juotossa. Seoksen melko pieni kovuus on usein etu, koska mekaaninen jälkikäsitteily on helppoa. Tämä on tarpeen tapauksissa, joissa liitos pitää saada näkymättömäksi. Tästä syystä esimerkiksi autoteollisuus suosii tätä lisäainetta. Lisäksi piipronssin juoksevuuskäyttäytymiseen voidaan helposti vaikuttaa piipitoisuudella. Nostamalla piipitoisuutta sulamisalue laajenee ja sula tulee jähmeämmäksi. Tämä merkitsee sitä, että piipitoisuus tulee pitää alhaisena tiettyjen rajojen sisällä. Tällöin saadaan juokseva hitsisula, jonka seurauksena saadaan suuri liittämisenopeus ja pieni sinkin poispalaminen erityisesti juuren puolella.

Toiseksi yleisimmin käytetty lisäaine lienee alumiinipronssi CuAl8. Tämä sopii varsinkin alumiinipinnoitetuille levyille sekä pinnoittamattomille levyille. Tämän lisäaineen lujuus on hieman suurempi kuin edellä mainitun piipronssin, samoin kovuus on suurempi. Austeniittisia ruostumattomia teräksiä liitettäessä tällä lisäaineella saattaa seurauksena olla juotosvikoja juotteen raerajoille tunkeutumisen seurauksena.

Lisäainetta CuSi2Mn käytetään myös jonkin verran sinkkipäällysteisille levyille. Seoksen sisältämä mangaani (n. 1 %) kasvattaa kovuutta, jolloin mekaaninen työstäminen on vaikeampaa. Täten käyttökohteet, joissa ei tarvita jälkeinpäin tapahtuvaa työstämistä, ovat sopivia tälle lisäaineelle.

Myös muita lisäaineita on saatavilla:

- SG-CuAl8Ni2
- SG-CuSn
- SG-CuSn6
- SG-CuAl10Fe
- SG-CuMn13Al7
- SG-CuSi3MnAl

Nikkeliä sisältävä CuAl8Ni2 on huomattavasti kovempaa kuin yllä mainitut ensimmäisessä listassa olevat lisäaineet. Kuten edellä todettiin tinapronssit CuSn ja CuSn6 saattavat aiheuttaa juotosvikoja varsinkin austeniittisille ruostumattomille teräksille käytettäessä, joten näiden osalta asiaa ei vielä ole tutkittu riittävästi. Lisäaine CuMn13Al7 on varsin lujaa ja melko kovaa, joten se soveltuu kulutusta kestävään päällejuottoon. CuSi3MnAl puolestaan sopii valmistajan mukaan myös lujille sinkityille (sinkin paksuuteen 20 µm asti) teräksille aina lujuusluokkaan 600 MPa saakka (lisäaineen  $R_{p0,2} > 360$  MPa,  $R_m = 500\text{--}580$  MPa). Taulukossa 1 on esitetty eräiden em. lisäaineiden ominaisuuksia. Kuten taulukosta huomataan, poikkeavat eri valmistajien samankin luokituksen mukaiset lisäaineet koostumukseltaan jonkin verran toisistaan. Sama pätee myös joissakin tapauksissa mekaanisten ominaisuuksien kohdalla, joskin erot eivät ole oleellisen suuria.

## 2.4 Kaarimuodot

Paksut sinkkikerrokset (yli 15 µm) aiheuttavat paljon sinkin höyrystymistä, joka puolestaan saa aikaan epästabiiliutta liittämisprosessiin. Näissä tapauksissa on usein parasta käyttää kuumakaarta tai lyhytkaarta hyvin lyhyellä kaaripituudella. Lyhyt valokaaren pituus mahdollistaa kaaren pitämisen vakaampana. Tämä asettaa tiettyjä vaatimuksia virtalähteelle ja sen säätöominaisuuksille [12].

### 2.4.1 Pulssikaari

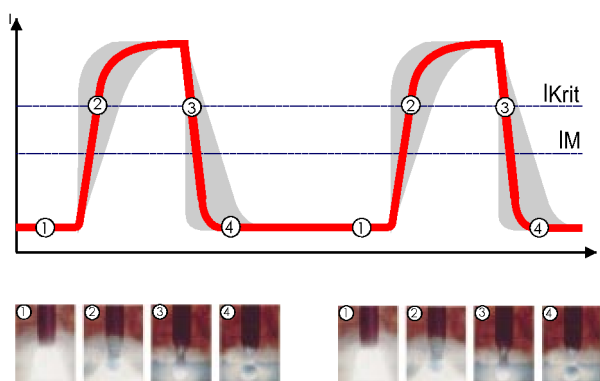
Käytettäessä pääosin argonia sisältäviä suojakaasuja on mahdollista saavuttaa kontrolloitu, oikosuluton metallin siirtyminen valitsemalla sopivat parametrit perus- ja pulssivirrälle (kuva 4). Kun on löydetty optimaaliset parametrien arvot, irtoaa lisäainelangan lisäainetta vain yksi pisara per pulssi. Tällöin saavutetaan melkein roiskeeton juotto.

Tutkimukset ovat osoittaneet, että eri lisäaineille ja suojakaasuille pitää olla omanlaisensa pulssimuoto. Tämä on johtanut jokaiselle eri lisäaineelle räätälöityjen pulssimuotojen käyttöön etenkin pronssilangoilla.



Taulukko 1. MIG-juotossa käytettäviä lisäaineita ja niiden ominaisuuksia. Taulukkoon on koottu kahden eri valmistajan ilmoittamat tiedot.

Lisäaine	SG-CuSi3	SG-CuAl8	SG-CuAl10Fe	SG-CuMn13Al7	SG-CuSn	SG-CuSn6
Koostumus	Al < 0,01 Si 2,8–4,0 Mn 0,75–1,5 Sn < 0,2 Zn < 0,2 Pb < 0,02 Fe < 0,3 P < 0,02 muut < 0,4 Cu loppu	Al 7,5–9,5 Si < 0,2 Mn < 1,0 Ni < 0,8 Zn < 0,2 Pb < 0,02 Fe < 0,5 muut < 0,4 Cu loppu	Al 9,0–11,0 Si < 0,1 Mn < 1,0 Ni < 0,8 Zn < 0,02 Pb < 0,02 Fe 0,75–1,5 muut < 0,4 Cu loppu	Al 7,5–8,3 Si < 0,05 Mn 12,0–14,0 Ni 2,0–2,5 Zn < 0,15 Pb < 0,02 Fe 2,0–3,0 muut < 0,4 Cu loppu	Al < 0,01 Si 0,1–0,5 Mn 0,1–0,5 Ni < 0,05 Sn 0,5–1,0 Pb < 0,01 Fe < 0,03 P < 0,015 As < 0,03 muut < 0,1 Cu loppu	Al < 0,01 Zn < 0,1 Sn 5,5–8,0 Pb < 0,02 Fe < 0,1 P 0,1–0,35 muut < 0,4 Cu loppu
$\rho$ [kg/dm <sup>3</sup> ]	8,5	7,7	7,7	7,4	8,9	8,7
$T_s$ [°C]	910–1025	1030–1040	1030–1040	945–985	1020–1050	910–1040
$T_L$ [°C]	1025	1040	1040	985	1050	1040
$R_m$ [MPa]	330–370	390–450	390–500	800–900	210–245	320–360
$A_5$ [%]	40	45	35	10		25
Kovuus [HB]	80–90	140	140–160	180–240	60–80	80–90
Lisäaine	SG-CuSi3	SG-CuAl8	SG-CuAl8Ni2	SG-CuMn13Al7	SG-CuSn	SG-CuSn6
Koostumus	Cu bal. Mn 0,9 Si 3,0 Sn 0,1	Al 7,9 Cu bal. Mn 0,1 Si 0,05	Al 8,0 Cu bal. Fe 2,0 Mn 2,0 Ni 2,0 Si 0,02	Al 8,0 Cu bal. Fe 2,0 Mn 13,0 Ni 2,0	Cu bal. Mn 0,2 Si 0,2 Sn 0,8	Cu bal. P 0,2 Sn 6,1
$R_{p0,2}$ [MPa]	160	175	330	≥ 400	100	
$R_m$ [MPa]	300	430	600	≥ 650	220	260
$A_5$ [%]	23	40	40	10	23	20
Kovuus	99 HV	126 HV		290 HB	70 HV	
Iskusitkeys	25 J / +20 °C	70 J / +20 °C 70 J / -20 °C	65 J / +20 °C		75 J / +25 °C 40 J / -20 °C	



Kuva 4. Muuttuva pulssimuoto [13].

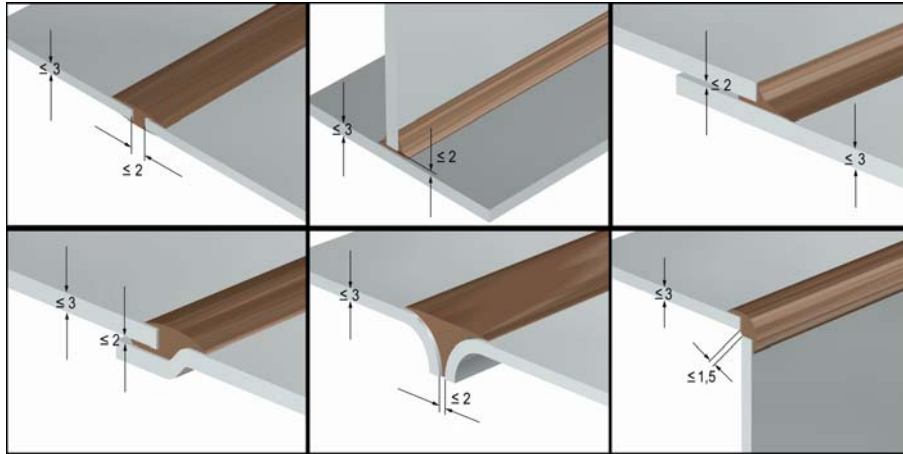
Jotta sinkittyjen levyjen MIG-juotossa sinkin höyrystyminen olisi mahdollisimman pientä, pitää juoton tapahtua mahdollisimman pienellä lämmöntuonnilla. Tällöin siis pätee sääntö: ”*Vain tarpeellinen määrä lämpöä!*”. Tämä vaatimus aiheuttaa sen, että virtalähteen tulee kyetä tuottamaan vakaa valokaari myös alhaisella tehoalueella. Jotta valokaari voidaan pitää lyhyenä, on yhtä tärkeää se, että perusvirta voidaan asettaa riittävän alhaiseksi, kuin se, että on nopeasti reagoiva kaaripituuden kontrolli. Näiden ollessa kunnossa tuloksena on pieni lämmöntuonti ja pienentynyt sinkin höyrystyminen, joka puolestaan johtaa vähäiseen huokoisuuteen ja roiskeettomaan lopputulokseen.

## 2.5 Suojakaasut

Puhdas argon on varsin yleisesti käytetty suojakaasu. Tutkimuksissa on kuitenkin todettu, että suojakaasu, joka sisältää pienen määrän aktiivista kaasua on myös soveltuvaa MIG-juottoon. Esimerkiksi kaasuseoksen Ar + 1–2 % CO<sub>2</sub> on todettu antavan vakaamman valokaaren käytettäessä piipronssisia lisäaineita (CuSi<sub>3</sub>). Saksassa tehdyissä tutkimuksissa [8][19] on puolestaan todettu, että pieni happilisäys (Ar + 1 % O<sub>2</sub>) parantaa sulan juoksevuutta ja kostutusominaisuuksia, sekä parantaa valokaaren stabiiliutta tuottaen näin roiskeettomamman ja ulkonäöltään paremman näköisen lopputuloksen. Joskus tosin liian herkkäliikkeen sula saattaa olla jopa haitaksi; esimerkkinä mainittakoon vaikkapa päittäisliitoksen MIG-juotto, jossa saattaa syntyä läpivalumista, mikäli sula on liian herkkäliikkeistä. Eräässä amerikkalaisessa tutkimuksessa [22] puolestaan verrattiin puhdasta argonia ja ns. Mison-kaasua (Ar + NO) ja todettiin, että myös tämä parantaa sulan juoksevuutta ja tuottaa leveämmän palon kuin argon. Myös Argonin ja heliumin seosta (62 % Ar + 48 % He, 50 % Ar + 50 % He) on käytetty [23].

## 2.6 Railomuodot

MIG-juottamiseen sopivat samanlaiset railomuodot kuin ohutlevyjen hitsauksessa yleensäkin. Kirjallisuudessa menetelmän kerrotaan sopivan ohutlevyille; paksummille materiaaleille menetelmää ei ole ilmeisesti juurikaan tänä päivänä sovellettu. Garriott [2] kuitenkin esittelee esimerkkejä paksummille materiaaleille tehdyistä liitoksista vastaavan tyyppisellä menetelmällä. Näissä 60-luvun lopulle sijoittuvissa esimerkeissä käytetyt railomuodot olivat vastaavat kuin hitsauksessa. Käytetty menetelmä olikin tavallaan hitsaamista, mutta käytetty lisäaine oli kuparipohjaista, melko lähellä nykyisiä alumiinipronssilisäaineita. Joissakin tapauksissa MIG-juotto sallii suuremman ilmaraon kuin tavallinen hitsaus. Tästä on varsinkin ohuita levyjä liitettäessä joskus hyötyä. Toisaalta menetelmä on joskus herkkä ilmaraon vaihtelulle. Kuvassa 5 on muutamia tyyppillisiä MIG-juottoon soveltuvia railomuotoja.



Kuva 5. Tyypillisiä railomuotoja MIG-juottoa varten [20].

## 2.7 Laitteistot

Periaatteessa MIG-juottoon käy samanlainen laitteisto kuin perinteiseen MIG/MAG-hitsaukseenkin. Kuten edellä jo todettiin, tarvitaan käytettävältä laitteistolta kuitenkin lisäominaisuuksia, joita tavallisilla MIG-laitteistoilla ei aina ole. Viime aikoina laitevalmistajat ovatkin kehittäneet laitteistoja, joissa on otettu huomioon MIG-juottamisen tarpeet.

### 2.7.1 Virtalähde

Virtalähteen tulee olla sellainen, että siinä on riittävän laajat mahdollisuudet eri parametrien säätöön. Mikäli käytettävissä on tarpeeksi suuri määrä säädettäviä parametreja (n. 30), on mahdollista parantaa pisaroiden irtoamista pulssikaarijuotossa, samoin kuin lyhytkaaren oikosulkujen käyttäytymistä varsin laajalla lisäaineskaalalla.

Hyvällä säädettävyydellä on tietenkin myös varjopuoleensa. Laitteiden käytettävyys vaikeutuu olennaisesti, mikä puolestaan tarkoittaa sitä, että vain pitkälle koulutetut ekspertit osaavat käyttää niitä tehokkaasti. Tähän ongelmaan ratkaisuna laitevalmistajat ovat kehittäneet laitteistoja, joissa monimutkaiset säädöt eri lisäainelanka- ja suojakaasuyhdistelmille on jo ennakkoon ohjelmoitu laitteen muistiin ja täten käytettävyyttä voidaan parantaa. Laitetta voidaan nyt käyttää helposti vain valitsemalla käytettävä lisäaine ja suojakaasu. Tällöin puhutaan ns. synergisestä toiminnasta. Laitteen mikroprosessori huolehtii lopuista säädöistä esiohjelmoitujen synergiaohjelmien avulla. Uusimmat laitteet mahdollistavat jopa laitteen ohjelmoinnin ja omien säätöjen tallentamisen, jolloin aiemmin säädetyt, hyviksi havaitut asetukset voidaan ladata käyttöön myöhemminkin.

Huomattakoon kuitenkin, että MIG-juottoa voidaan suorittaa tavanomaisillakin MIG-virtalähteillä esimerkiksi suoritettaessa pienehköjä korjaustöitä. Tällöin sovit parametrit pitää etsiä useimmiten kokeilemalla. Menetelmän tehokas käyttö kuitenkin edellyttää virtalähteeltä yllä kuvattuja ominaisuuksia (esim. pulssitus jne.), joita yleensä löytyy suuremmista teollisuuskäyttöön tarkoitetuista laitteistoista.

## 2.7.2 Langansyöttö

MIG-juotossa käytettävät pronssilangat ovat varsin pehmeitä verrattuna MIG/MAG-hitsauksessa käytettyihin lankoihin. Tämä aiheuttaa tiettyjä erikoisvaatimuksia langansyöttölaitteistolle. Lankaa syötettäessä sen tulee kulkea kitkattomasti. Nelirullaisella syöttölaitteella, jossa on sopivat rullat, saavutetaan riittävä siirtovoima kontaktipaineen jäädessä kuitenkin pieneksi. Jotta kitka olisi langanjohtimessa mahdollisimman pieni, pitää käyttää esimerkiksi teflonista langanjohdinta. Tasainen ja tarkka langansyöttö on yksi onnistuneen juottamisen perusedellytyksistä.

## 2.8 Polttimen asento

Kun sinkittyjä levyjä juotetaan työntävällä pistoolin kuljetusasennolla, lämmittää valokaaren perusvirta sinkkikerroksen niin kuumaksi, että se riittää sinkin höyrystymiseen juuri ennen kuin lisäainepisara irtoaa langasta [13]. Sulan lisäainepisaran lämpöenergia höyrystää puolestaan jäljelle jääneen sinkkikerroksen. Täten sulaan jää vain pieni määrä sinkkihöyryä, jolloin höyryn poistumiseen tarvittava aika on riittävän pitkä ennen kuin sula alkaa jähmettyä. Tämä tuottaa kohtalaisen huokosettoman juotoksen.

Jos pistoolin kuljetusasento puolestaan on vetävä, ei esilämmitysefekti ole riittävä, jotta sinkin höyrystymislämpötila saavutettaisiin. Tämä aiheuttaa sen, että sinkkiä tunkeutuu paljon enemmän sulaan. Vaikka tämän kuljetusasennon jälkilämmitysvaikutus pidentää kaasunpoistumisaikaa, ei se silti ole riittävän pitkä poistamaan sulasta kaikkea lisääntyntä sinkkihöyryn määrää. Lisäksi tässä asennossa valokaaren stabiilius häiriintyy sinkkihöyryjen takia enemmän kuin työntävässä asennossa.

## 2.9 Työhygieniä

Sinkkipinnoitettujen levyjen MIG-juoton kokonaisemissiohuurut aikayksikköä kohti ovat suurin piirtein samat kuin hitsauksessakin. Vaikka sinkkioksidihuuruja syntyy hitsaukseen verrattuna noin puolet vähemmän, syntyy pronssilisäaineesta johtuen puolestaan lähes vastaava määrä kuparihuuruja, jotka ovat sinkkiä haitallisempia epäpuhtauksia. Kuparin emissiot ovatkin siten MIG-juoton kriittinen työturvallisuusriski [16]. Lappeenrannassa tehdyssä tutkimuksessa [24] kupariemissioiden määrät työpisteen lähellä mitattiin olevan selvästi yli HTP-arvojen (arvot, joiden ylittyessä on todettu selviä terveydellisiä haittoja). Tämä todettiin sekä käsivaraisessa että mekanisoidussa juotossa.

Ruostumattomien terästen MIG-juotossa kromi- ja nikkelihuurujen määrä jää alhaisemmaksi kuin hitsauksella. Kuparihuuruja kuitenkin syntyy tässäkin tapauksessa MIG-juotossa, mutta hitsauksessa ei.

MIG-juotto edellyttää huuruemissioiden kannalta työpisteessä samantasoista yleisilmanvaihtoa kuin hitsaus. Työn suorittajan suojausta voidaan helpottaa sitä kautta, että MIG-juotto voidaan helposti mekanisoida ja automatisoida, jolloin työntekijän etäisyys työkohteesta saadaan suuremmaksi. Tällöin hengitysväyhykkeen epäpuhtaudet alenevat merkittävästi. Vain tätä kautta voidaan kupari-

huurujen arvot saada HTP-arvojen alapuolelle, jolloin operaattori voi työskennellä turvallisesti ilman raitisilmamaskia, joka on välttämätön sekä sinkityn että ruostumattoman teräksen hitsauksessa, niin kuin myös käsin tapahtuvassa MIG-juotossakin.

Melun ja säteilyn kannalta MIG-juotto ei oleellisesti poikkea hitsauksesta, joten tarvitaan hitsausta vastaavat suojaustasot ja -varustukset.

## 2.10 MIG-juotettujen liitosten lujuudesta

Kuten jo edellä on todettu, MIG-juotettujen liitosten väsymiskestävyydestä ei ole kirjallisuudesta löydettävissä paljoakaan tietoa. Frings ja Stöckel [23] ovat kaikesti tutkineet asiaa jonkin verran, mutta asiaa koskeva parin rivin selostus on niin ylimalkainen, että siitä ei saa oikeastaan mitään kunnon käsitystä. Kirjoittajan oletus on, että kyseessä olisi päittäisliitokset, koska samassa tutkimuksessa oli tehty myös juuri sinkittyjen levyjen päittäisliitosten staattisia testejä. Tutkimuksessa tultiin kuitenkin siihen johtopäätökseen, että tutkitut liitokset olivat ainakin yhtä hyviä, elleivät parempia, kuin vastaavat hitsatut liitokset. Leino ja Hiltunen [16] mainitsevat myös väsymiskokeet, mutta itse asiassa tässä viitataan tämän tutkimuksen alustaviin tuloksiin.

Staattisista kokeista sen sijaan on jonkin verran tuloksia olemassa. Frings ja Stöckel [25] tutkivat edellä mainitun tapauksen lisäksi myös aluminoidujen levyjen liittämistä ja tekivät siinä staattisia kokeita. Kummallekin tutkimukselle yhteistä oli se, että rikkoontuminen tapahtui aina perusaineesta. Jälkimmäisessä tutkimuksessa todettiin MIG-juotetun liitoksen staattinen kestävyys paremmaksi kuin vertailukohteena olleen MAG-hitsatun liitoksen. Hackl [11] mainitsee myös pari tulosta staattisista vetokokeista, joissa verrattiin lisäaineita SG2 (tavallinen MAG) ja CuSi3. Koekappaleet rikkoontuivat taas perustainneesta vetolujuuden ollessa viiden prosentin tarkkuudella samat. Herold et al. [21] tekivät myös staattisia kokeita ja totesivat, että juotoshauraus ei vaikuttanut staattiseen lujuuteen, kuten edellä jo mainittiin. Koekappaleet rikkoontuivat HAZ-alueelta, eivätkä juotoksesta. Saavutetut lujuudet olivat noin 350–360 MPa.

Dilthey ja Bachem [8] tutkivat liitosten staattista kestävyyttä eri lisäaineilla ja parilla railomuodolla ja totesivat niin ikään, että kaikki koesauvat rikkoontuivat perusaineesta. Käytetty perusaine oli Z STE 260 Z ja liitokset olivat päittäis- ja päällekkäisliitoksia. Käytetyt lisäaineet olivat CiSi3, CuAl8, BS 100 (Cu + 10 % Sn) ja Comas (Cu + 1 % Mn + 0,2 % Sn + 1,8 % Si). Päittäisliitoksen todettiin olevan lujempi kuin päällekkäisliitoksen. Tulokset on artikkelissa ilmoitettu voimassa, joten koesauvojen mittoja tietämättä jännitystasosta ei voi sanoa mitään. Rohde et al. [19] ilmoittaa kolme vetokoetulosta päällekkäisliitokselle; lisäaineena OK Autrod 19.30 (CuSi3). Koesauvat rikkoontuivat taaskin perusaineesta jännitystasolla 345–353 MPa. Käytetystä perusaineen materiaalista ei ole tietoa.

Joseph et al. [26] tutkivat erästä pulssitetun MIG-juoton variaatiota, jossa napaisuus vaihtuu (+/-) ja jossa napaisuuden balanssia voidaan muuttaa. He testasivat alumiinipronssi- ja piipronssilisäaineella sekä pulssitettua MIG-juottoa että VP-GMAW-juottoa (Variable Polarity Gas Metal Arc Weld Brazing). Testatut

sauvat rikkoontuivat – kuten muutkin – perusaineesta. Lukuarvoja ei näistä ilmoitettu.

## 2.11 Sovellukset

Valtaosa MIG-juoton sovellutuksista löytyy autoteollisuuden parista. Esimerkiksi Opel käyttää menetelmää robotisoidusti eräissä ovien liitoksissa [6]. Jaguar taas käytti XJ40-mallissa menetelmää mm. A-pilarin yläpäässä [5]. Näkyvissä paikoissa olevissa liitoksissa savutetaan etua mm. siinä, että liitoksen jälkikä-sittely on lisäaineen pehmeiden takia helpompaa. Menetelmää käytetään myös kolariautojen korjauksessa [4][10]. Saavutettava hyöty tulee esiin esimerkiksi kynnyskoteloiden hitsauksessa. Koska materiaali on yleensä sinkittyä levyä, on tärkeää, että juuren puolella olisi liittämisen jälkeen mahdollisimman hyvä kor-roosiokestävyys, sillä koteloiden juuren puolelta ei juuri pääse käsittelemään jälkeen-päin. Muutkin autovalmistajat, kuten esimerkiksi Seat, Volkswagen, Audi ja GM, käyttävät MIG-juottoa valmistusprosessissaan. Eräs kuljetuskontteja valmistava yritys käyttää menetelmää, koska konttien seinät valmistetaan sinkitystä levystä [17].

Muita sovellutuksia ovat esimerkiksi bensiinitankin täyttöputki, erilaisten kiinnik-keiden liitokset, oven sarana jne. Myös polkupyörän runko on yksi sovelluskoh-teista lähinnä siksi, että saavutettaisiin parempi väsymiskestävyys [14]. Muita sovelluskohteita löytyy mm. ilmanvaihto- ja ilmastointitekniikan parista.

### 3 VÄSYMISKESTÄVYYDEN PARANTAMISEN MENETELMÄT

Väsymiskestävyyden parantamismenetelmät voidaan jaotella esimerkiksi kuvan 6 mukaisesti. Haagensen [27] lienee yksi kyseessä olevan jaottelun ensimmäisiä esittäjiä, esimerkiksi lähteessä [28] esitetty kuva pohjautuu hänen esittämänsä kuvaan. Tässä esitetyn kuvan pohjaksi on otettu edellä mainituissa lähteissä esitetyt kuvat, joita tekijä on täydentänyt.

Menetelmät voidaan jakaa kahteen pääluokkaan; hitsigeometrian parantamiseen perustuviin menetelmiin ja jäännösjännityksiin perustuviin menetelmiin. Ensimmäiseen luokkaan kuuluvat menetelmät pyrkivät poistamaan hitsin rajaviivalla olevat viat ja toisaalta parantamaan rajaviivan muotoa siten, että hitsin aiheuttama jännityskonsentraatio pienenee. Jälkimmäisen luokkaan kuuluvat menetelmät puolestaan pyrkivät saattamaan särön avautumisen – ja sen kautta särön kasvun – estävän puristusjännitystilan alueelle, josta säröt pyrkivät kasvaamaan. Joissakin tapauksissa taas pyritään pienentämään hitsauksesta aiheutuneita jäännösjännityksiä esimerkiksi lämpökäsittelyllä.

#### 3.1 Hitsigeometrian parantamiseen perustuvat menetelmät

Hitsin rajaviivalla esiintyy useimmiten pieniä reunahaavoja, joista särö lähtee kasvamaan tai sitten itse hitsin geometria on sellainen, että se aiheuttaa suuren jännityskonsentraation. Näitä voidaan korjata mm. seuraavasti:

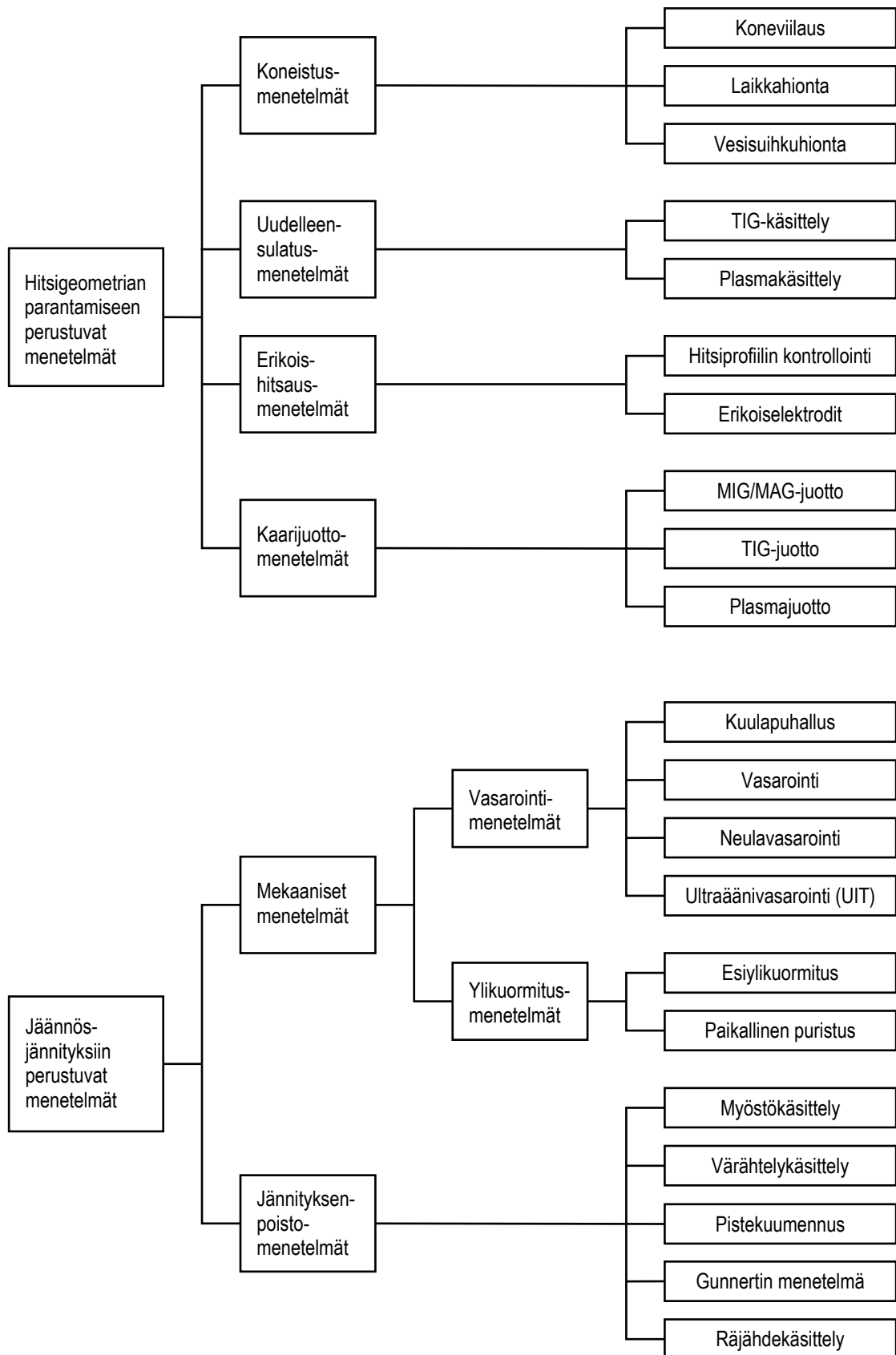
- muotoilemalla rajaviivaa jollakin työstömenetelmällä
- sulattamalla rajaviivan vyöhyke
- kontrolloimalla itse hitsaustapahtumaa siten, että saadaan mahdollisimman juoheva rajaviivan muoto
- käyttämällä sellaista liittämismenetelmää, että rajaviivalle ei tule mainittavasti vikoja
- lisäämällä rajaviivalle ylimääräinen palko menetelmällä, joka ei aiheuta uudelle rajaviivalle mainittavia vikoja

Jotta hitsigeometrian parantamisesta saataisiin mahdollisimman suuri hyöty, pitäisi käsittelyn poistaa kaikki pintaan asti ulottuvat hitsausvirheet ja toisaalta pienentää paikallista jännityskonsentraatiota.

##### 3.1.1 Koneistusmenetelmät

Koneistusmenetelmät perustuvat yleensä hiontaan. Näitä menetelmiä ovat koneviilaus, laikkahionta ja vesisuihkihionta. Menetelmien peruserätyksenä on poistaa hitsin rajaviivalta materiaalia mekaanisesti, jolloin myös virheet poistuvat. Käsittely parantaa myös hitsin rajaviivan geometriaa siten, että lovijännityskonsentraatio pienenee.

Päittäisliitoksessa hitsikupu voidaan hioa tasaiseksi, jolloin jännityskeskittymä poistuu ja väsymiskestävyys paranee lähes peruslevyn tasolle, mikäli hitsi on virheetön. Pienahitsille tällaista käsittelyä ei voida tehdä, vaan käsittely rajoittuu rajaviivaan ja osaan hitsipinnasta.



Kuva 6. Jälkikäsittelymenetelmät ja niiden jaottelu [27][28]. Täydennetty siten, että kaarijuotomenetelmät ehdotetaan lisättäväksi hitsigeometrian parantamiseen liittyviin menetelmiin.



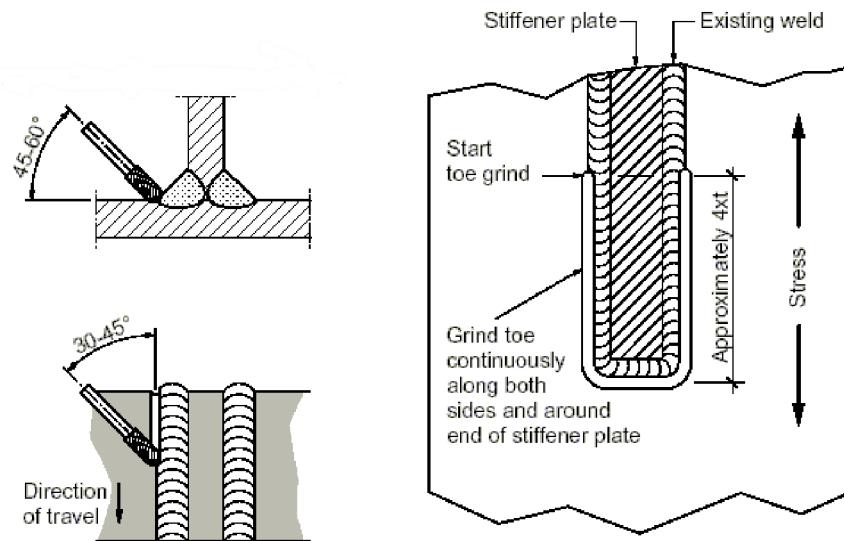
### 3.1.1.1 Koneviilaus

Koneviilauksessa poistetaan pneumaattista, hydraulista tai sähköistä koneviilaa (kuva 7) käyttäen materiaalia rajaviivalta pyrkien näin poistamaan mahdolliset viat. Samalla jännityskonsentraatio pienenee. Viilan pyörimisnopeus on 15000–40000 r/min ja viilat ovat yleensä kartion, pallon tai puolipallon muotoisia. Käsitelyn tehokkuuden kannalta on merkittävää, että kaikki reunahaavat ja kuonansulkeumat saadaan hiottua pois. Tämän vuoksi materiaalia pitää poistaa rajaviivalta vähintään 0,5 mm, mutta ei kuitenkaan enempää kuin 2,0 mm tai 7 % levynpaksuudesta [29]. Kovin ohuille levyille menetelmää ei kannata käyttää, sillä hionnan seurauksena saattaa ohuen levyn paksuus pienentyä suhteellisesti liikaa, jolloin myös liitoksen staattinen kestävyys saattaa heikentyä.



Kuva 7. Pneumaattinen koneviila ja viiloja. [29]

Koneviilaus suoritetaan kuvan 8 mukaisesti. Viilausnopeus voi olla noin 1 m/h. Prosessi on kuitenkin meluisaa ja operaattorilla täytyy olla riittävä suojavarustus sinkoilevia kuumia ja teräviä hiukkasia vastaan. Viilat myös kuluvat ja ne pitää vaihtaa säännöllisin väliajoin, mikä lisää kustannuksia. Viilattujen hitsien tarkastuksen tulisi sisältää ainakin hitsin juuren säteen ja poistetun materiaalin syvyyden tarkastuksen. Pelkän rajaviivan alueen viilauksella saavutetaan pienempi parannus väsymislujuuteen kuin koko hitsiprofiilin viilauksella, mutta näin menetellen kustannussäästö on merkittävä. Liitoksen tyypistä riippuen menetelmällä saavutetaan 50–200 %:n parannus väsymislujuuteen [28]. IIW:n (International Institute of Welding) suosituksissa [30] koneviilatun liitoksen väsymislujuutta saadaan korottaa matalalujuuksisilla teräksillä ( $f_y \leq 355$ ) kertoimella 1,3 ja korkeamman myötölujuuden omaavilla teräksillä ( $f_y > 355$ ) kertoimella 1,5 joi-takin poikkeuksia lukuun ottamatta.



Kuva 8. Koneviilauksen suoritus [29].

### 3.1.1.2 Laikkahionta

Laikkahionta voidaan suorittaa tavallisella suurinopeuksisella kulmahiomakoneella – joko pneumaattisella tai sähköisellä. Menetelmään pätevät samat säännöt poistettavan materiaalin määrään nähden kuin koneviilauksessakin. Laikkahionta on nopeampaa kuin koneviilauksella (n. 2 m/h) ja siten myös halvempaa, mutta kokematon operaattori voi helposti poistaa materiaalia liikaa. Lisäksi menetelmässä syntyy helposti hitsin suuntaisia uurteita, jotka ovat erityisen alttiita väsymiselle. Tähän seikkaan on siis kiinnitettävä erityistä huomiota työtä suoritettaessa. Menetelmällä saavutetaan hieman pienempi parannus väsymislujuuteen kuin koneviilauksella, noin 20–50 %.

### 3.1.1.3 Vesisuihkuhionta

Vesisuihkumenetelmässä muotoillaan rajaviivaa aivan kuten koneviilauksessakin. Menetelmässä hitsiä käsitellään korkeapaineisella vesisuihkulla, johon on sekoitettu lisäksi kuluttavia hiukkasia. Hiukkaset kuluttavat materiaalia poistaen rajaviivalla olevat virheet. Vaikutus on siis samanlainen kuin edellä esitellyissä koneviilauksessa ja laikkahionnassa.

Vesisuihkuhionnan käsittelyjäljelle voidaan asettaa samat vaatimukset kuin koneviilauksellekin. Materiaalia tulee poistaa riittävästi, jotta rajaviivan virheet saataisiin poistettua. Toisaalta liikaa ei saa poistaa. Menetelmä on varsin nopea; sillä voidaan saavuttaa jopa niinkin suuri käsittelynopeus kuin 20–46 m/h [28] eli nopeus voi olla noin 10–20-kertainen verrattuna muihin hiontamenetelmiin. Suuri suoritusnopeus edellyttää operaattorin hyvää kouluttamista, sillä materiaalia saattaa helposti poistua liikaa varsin lyhyessä ajassa.

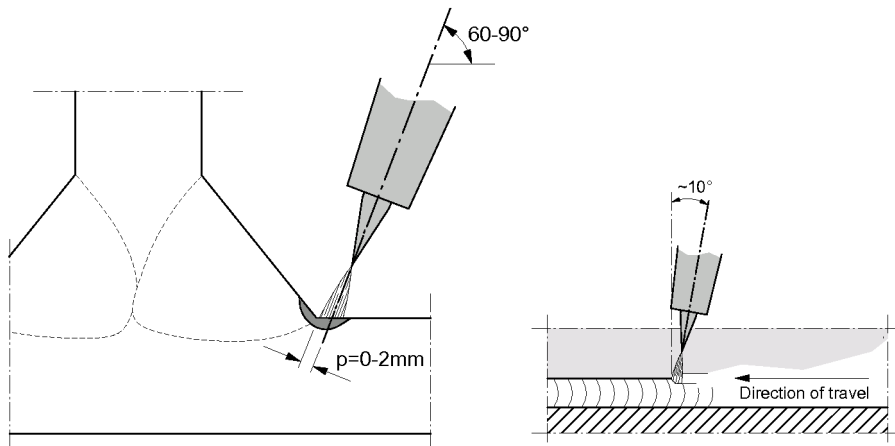
### 3.1.2 Uudelleensulatusmenetelmät

Uudelleensulatusmenetelmillä sulatetaan hitsin rajaviivalla olevat alkusäröt pois ja samalla hitsin liittymistä perusaineeseen voidaan muotoilla juohevammaksi. Juohevampi muoto puolestaan pienentää jännityskonsentraatiota, jolloin särön ydintyminen vaikeutuu.

#### 3.1.2.1 TIG-käsittely

TIG-käsittely suoritetaan kuvan 9 mukaisesti kuljettamalla elektrodiä 60–90 asteen kulmassa levyyn nähden. Käytettäväksi laitteistoksi käy tavallinen TIG-hitsauslaitteisto.

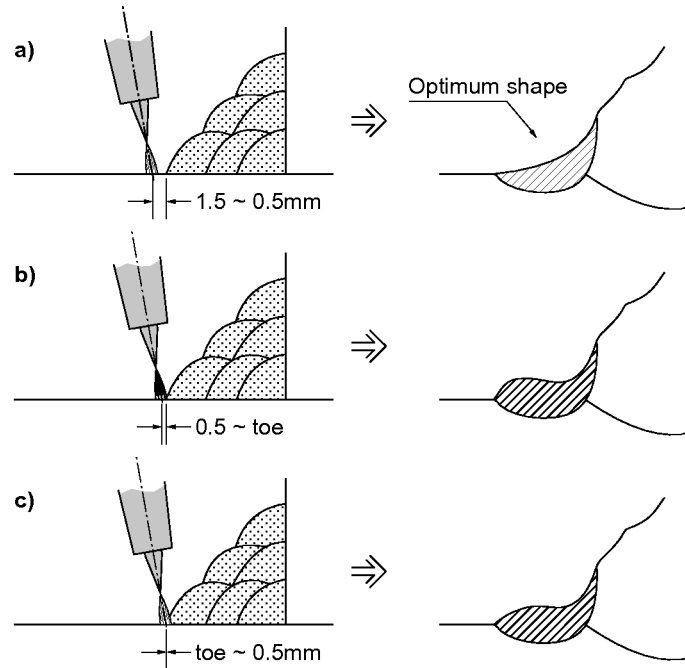
Vanhemmilla C–Mn-teräksillä, joilla on suhteellisen suuri hiilipitoisuus, käsittely saattaa aiheuttaa liiallisen kovuuden nousun HAZ-vyöhykkeellä. Tätä voidaan pienentää tekemällä toinen käsittelykerta hitsin rajaviivan alueelle, jolloin päästään hyväksyttävään kovuustasoon (esim. offshore-rakenteissa 300 HV). Toinen käsittely myös parantaa hieman hitsin ja peruslevyn liittymägeometriaa, mutta loppujen lopuksi toinen käsittelykerta lisää kustannuksia verrattuna yhteen käsittelykertaan [28].



Kuva 9. TIG-käsittelyn suoritus [29].

TIG-käsittelyn hyvä onnistuminen vaatii operaattorilta hyvän ammattitaidon ja vaatii myös, että prosessiparametrit, kuten esim. hitsausvirta, kuljetusnopeus ja suojakaasun virtaus ovat kohdallaan. Myös hitsin ja levyn puhtaus on tärkeää. Tärkeää on myös huomata, että elektrodin pää tulee olla puhdas ja terävä. Epäpuhtaudet ja pyörästynyt elektrodin pää nimittäin aiheuttavat huokosten muodostumista sulatettuun kohtaan.

Valokaaren kohdistus on myös tärkeää. Jos valokaari kohdistetaan liian lähelle rajaviivaa, tai jopa hitsin päälle, aiheuttaa tämä sulan valumisen, mikä synnyttää uuden jyrkän rajaviivan liittymän (kuva 10 b ja c). Valokaaren sytytys ja sammutus kannattaa aina tehdä hitsiaineen puolelta [29].



Kuva 10. Valokaaren kohdistamisen vaikutus syntyvään profiilimuotoon [29][31].

Polttimen kuljetusnopeus on tyypillisesti noin 80–160 mm/min (4,8–9,6 m/h). Todellinen käsittelynopeus esikäsittelyineen ja asetteluineen lienee noin puolet tästä. TIG-käsittelyn katsotaan parantavan väsymislujuutta noin 50 % [28]. IIW:n suosituksissa väsymislujuutta saadaan korottaa koneviilauksen tavoin.

### 3.1.2.2 Plasmakäsittely

Plasmakäsittely on samantyyppinen kuin TIG-käsittelykin. Oleellisin ero on lämmöntuonnissa, joka plasmakäsittelyllä on noin kaksinkertainen TIG-käsittelyyn verrattuna. Korkeampi lämmöntuonti aiheuttaa suuremman sulavyöhykkeen syntymisen, minkä seurauksena saadaan juohevampi rajaviivan geometria. Myös valokaaren kohdistamisen vaikutus on tällöin pienempi. Käsittelynopeutta voidaan nostaa suuremman lämmöntuonnin takia.

Plasmakäsitteltyjen hitsien väsymislajuuden on todettu yleisesti ottaen olevan suurempi kuin TIG-käsitteltyjen erityisesti lujilla teräksillä. Sekä TIG-käsittely että plasmakäsittely ovat verrattain halpoja menetelmiä, mutta raskas ja kömpelö laitteisto ja luoksepäästävyys saattaa rajoittaa näiden menetelmien käyttöä.

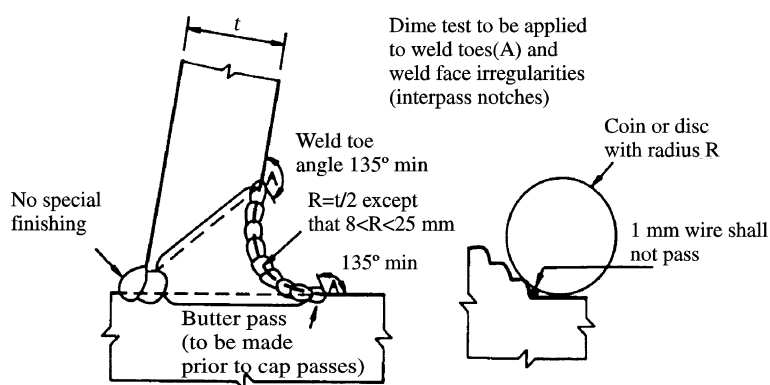
### 3.1.3 Erikoishitsausmenetelmät

Erikoishitsausmenetelmät eivät ole varsinaisesti jälkikäsittelymenetelmiä, sillä ne liittyvät osaksi itse hitsausprosessiin ja yrittävät eliminoida kallista jälkikäsittelyä. Näiden menetelmien päämääränä on tuottaa parempi hitsin muoto ja siten pienentää jännityskonsentraatiota hitsin rajaviivalla.

### 3.1.3.1 Hitsiprofiilin kontrollointi

Hitsiprofiilin kontrollointia on sovellettu lähinnä paksujen levyjen monipalkko-hitseihin. Tällöin kyse on oikeastaan oikean hitsausjärjestyksen noudattamisesta. Parhaimmaksi on osoittautunut kuvassa 11 esitetty hitsausjärjestys, joka on peräisin AWS:n normistosta. Tässä menetelmässä hitsataan ensin pohjapalot. Tämän jälkeen hitsataan rajaviivalle tuleva palko neitseelliseen peruslevyyn siten, että se ei kosketa ollenkaan aiemmin hitsattuihin palkoihin. Lopuksi hitsi täytetään siten, että hitsin muoto tulee mahdollisimman juohevaksi. Hitsin muoto rajaviivalla voidaan tarkistaa kuvan 11 mukaisella yksinkertaisella ”kolikkotestillä”. Jos hitsi ei läpäise testiä, voidaan suorittaa vielä parannushionta rajaviivan alueella.

Menetellen edellä esitetyllä tavalla rajaviivalla olevien virheiden määrä vähenee ja rajaviivan lovijännityskonsentraatio pienenee. Tyypillinen parannus jännityskonsentraatiokertoimeen on arvoista 3,3–5,1 arvoihin 1,36–1,56 [28]. Lisäksi rajaviivan hitsaamisen jälkeen hitsattavat täyttöpalkot saavat aikaan sen, että rajaviivan kovuus pienenee ja aiempien palkojen aiheuttamat jäännösjännitykset päästävät. Menetelmällä saavutetaan noin 25–30 %:n parannus väsymislujuuteen tapauksessa, jossa levyyn on liitetty poikittainen ripa ja levyä kuormitetaan taivutuskuormalla.



Kuva 11. Hitsiprofiilin kontrollointi ja kolikkotestin suoritus AWS:n mukaan [32].

### 3.1.3.2 Erikoiselektrodit

Erikoiselektrodeilla voidaan parantaa tavallisin menetelmin hitsattujen hitsien väsymiskestävyyttä. Tällöin hitsin rajaviivalle hitsataan erikoiselektrodilla ylimääräinen palko, joka saa aikaan juohevan liittymisen perusaineeseen. Näitä erikoiselektrodeja on kehitetty mm. Japanissa. Juoheva liittyminen pienentää rajaviivan jännityskonsentraatiokerrointa. Parhaat tulokset on saavutettu lujilla teräksillä, joiden lujuus on luokkaa 500–800 MPa. Menetelmällä on saavutettu parannusta jännityskonsentraatiokertoimeen suurin piirtein arvosta 2,8 arvoon 1,3 ja toisaalta väsymislujuuteen miljoonan syklin kohdalla likimain arvosta 100 MPa arvoon 170 MPa [28].

### 3.1.4 Kaarijuottomenetelmät

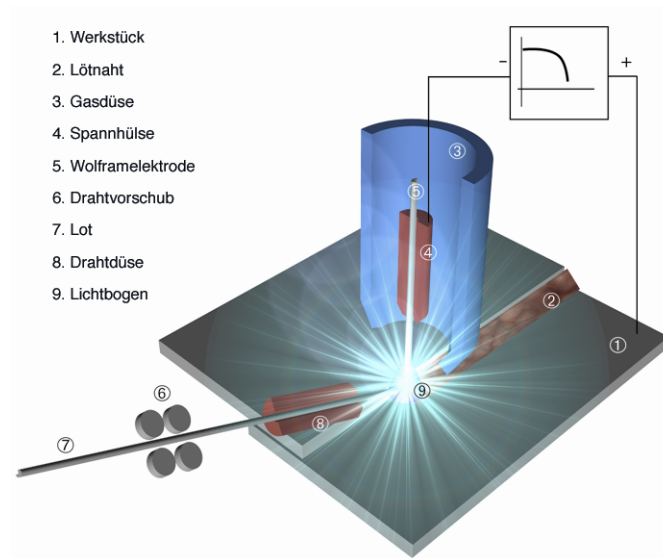
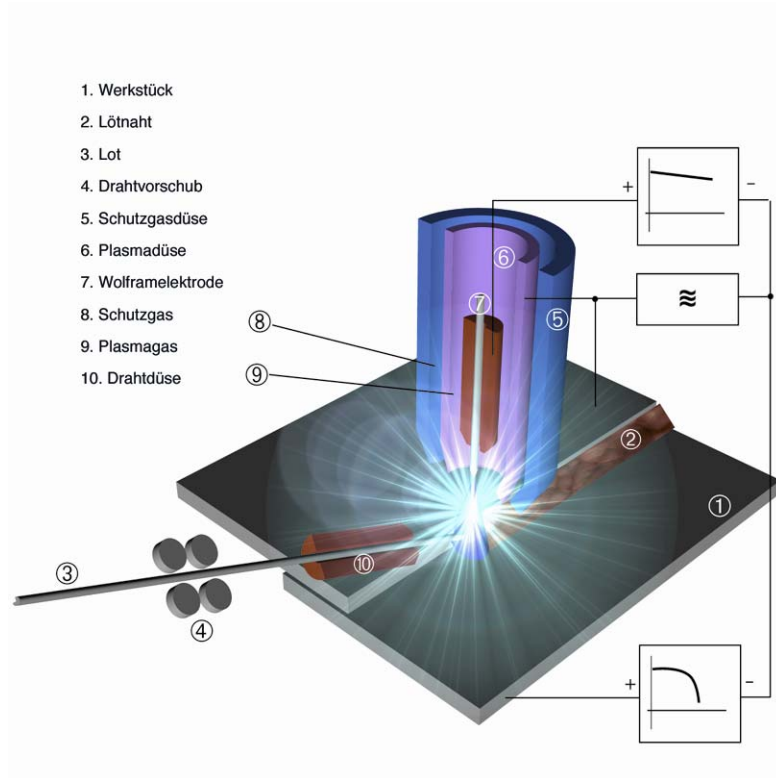
Kaarijuottomenetelmiä ovat mm. MIG- ja MAG-juotto, plasmajuotto ja TIG-juotto. Kaikki tässä luetellut kaarijuottomenetelmät ovat peruseriaatteeltaan melko samanlaisia. Oleellisimpana erona toisiinsa nähden on lähinnä tapa, jolla lisäaine sulatetaan. Menetelmät ovat siis oikeastaan toistensa variantteja. Lisäksi voitaisiin vielä mainita samankaltaisuutensa vuoksi laserjuotto, jossa lisäaine sulatetaan lasersäteen avulla.

MIG- ja MAG-juottoa on edellä esitelty varsin laajasti. Menetelmän käyttöä väsymiskestävyyden parantamiseen ei ole missään raportoitu, eikä myöskään väsytyскоetuloiksi ole juuri saatavilla, joten menetelmän väsymiskestoa parantavasta vaikutuksesta ei ole tietoa. Tässä tutkimuksessa olikin tarkoituksena tuottaa väsytyскоetuloiksi tätä aspektia silmällä pitäen.

Kaarijuottomenetelmien väsymiskestoa parantava vaikutus on samankaltainen kuin erikoiselektrodeillakin. Toisaalta menetelmää voidaan käyttää liittämiseen pelkästäänkin ja siten saavuttaa hyvä väsymiskestävyys. Haittana vain on ainakin tällä hetkellä lisäaineen kallis hinta, joka usein on rajoittava tekijä. Silloin kun kaarijuottomenetelmiä käytetään väsymiskestävyyden parantamiseksi, juotetaan tavallisin menetelmin hitsatun hitsin rajaviivalle ylimääräinen palko. Juotettaessa rajaviiva hieman sulaa (tähän voidaan vaikuttaa sopivalla lämmöntuonnilla), jolloin siinä olevat mahdolliset pienet viat saadaan poistettua. Koska käytetyn lisäaineen sulamispiste on alempi kuin teräksen, ei ainakaan rajaviivalla yleensä tapahdu perusaineen sulamista, jolloin myöskään ei synny alkusäröjä ja näin väsymiskestävyys paranee. Juoton onnistuessa kunnolla saadaan myös kohtalaisen juoheva liittyminen perusaineeseen.

Menetelmän haittapuolena on ainakin tällä hetkellä epätietoisuus siitä, miten kuparipohjaisen lisäaineen taipumus tunkeutua raerajoille vaikuttaa käytännön rakenteissa. Ainakin ruostumattomilla teräksillä taipumus saattaa saada aikaan juotosvikoja, kuten edellä todettiin.

Plasma- ja TIG-juotto ovat periaatteeltaan varsin samanlaisia kuin MIG/MAG-juotto (kuva 12). Molemmissa menetelmissä lisäaine tuodaan valokaareen ulkopuolelta erona MIG/MAG-juottoon. Lisäainelankaan (tai lisäainetankoon) ei siis johdeta virtaa. Plasmajuotto kehitettiin autoteollisuudessa, koska ei oltu täysin tyytyväisiä MIG/MAG-juoton ulkonäköisiin laatutekijöihin, mikä aiheutti ylimääräistä työtä. Plasmajuoton avulla juotoksen ulkonäköä saatiin paremmaksi. Tämä puolestaan vähensi jälkikäsitelyä ja sitä myötä paransi läpimenoaikaa [7]. Parempi ulkonäkö antaisi viitteitä siitä, että myös väsymiskestävyys saattaa parantua.



Kuva 12. Plasma- ja TIG-juoton periaate. [20]. Ylhäällä plasmajuotto ja alhaalla TIG-juotto

## 3.2 Jäännösjännityksiin perustuvat menetelmät

Jäännösjännitysmenetelmillä vaikutetaan hitsin rajaviivalla olevaan jäännösjännitystilaan. Materiaalin pintakerrosta mekaanisesti kylmämuokkaamalla saadaan pinnalle aikaiseksi puristusjäännösjännitys, joka estää särön avautumisen, jolloin tehollinen jännitysheilahdus pienenee. Hitsauksessa syntyneitä jäännösjännityksiä voidaan myös pienentää sopivalla lämpökäsittelyllä. Tällöinkin saadaan aikaan puristusjäännösjännitystila ja puristuspuolella tapahtuvat jännitysheilahdukset eivät enää toimi tehollisina.

### 3.2.1 Mekaaniset menetelmät

#### 3.2.1.1 Vasarointimenetelmät

Vasarointimenetelmillä muokataan materiaalin pintaa plastisesti käyttäen sopivaa työkalua tai pieniä metallikuulia. Tästä aiheutuu materiaalin pinnalle myötörajan suuruusluokkaa oleva puristusjännitystila. Tämän vuoksi on odotettavissa, että lujilla teräksillä saavutetaan suurin hyöty. Vasarointimenetelmiä on useita, hieman toisistaan poikkeavia variaatioita. Kuitenkin kaikki menetelmät ovat peruseriänteeltään samanlaisia. Eroja on lähinnä itse työkaluissa, joilla muokaus suoritetaan.

##### 3.2.1.1.1 Kuulapuhallus

Kuulapuhallus on samanlainen prosessi kuin hiekkapuhallus, mutta hiekan tilalla vain on valurauta- tai teräskuulia. Kuulien nopeus on 40–60 m/s, jolloin ne aiheuttavat rajaviivan alueelle pistemäisiä iskuja, joiden vaikutuksesta pinta plastisoituu aiheuttaen jäännösjännitystilan, joka on noin 70–80 % materiaalin myötörajasta. Tyypillinen kuulan koko on 0,2–1,0 mm. Myös keraamisia kuulia voidaan käyttää, jos käsiteltävä materiaali ei kärsi ferriittisiä aineita.

Kuulapuhallusta kontrolloidaan kahdella parametrilla: kattavuus ja Almen-intensiteetti. Kattavuus tarkistetaan suurennuslasilla, jonka suurennus on kymmenkertainen. Silloin kun kuulien synnyttämät kuopat peittävät koko käsitellyn alueen koskettaen toinen toisiaan, on kattavuus 100 %. Toistamalla sama käsittely saadaan 200 %:n kattavuus jne. Kuulapuhalluksen intensiteetti kuvaa pinnan plastisoitumisen syvyyttä ja se mitataan Almen-liuskoilla, jotka kiinnitetään kappaleen pinnalle ja altistetaan intensiteetiltään samanlaiselle puhallukselle. Liuskat taipuvat sitä enemmän mitä enemmän materiaalia muokataan.

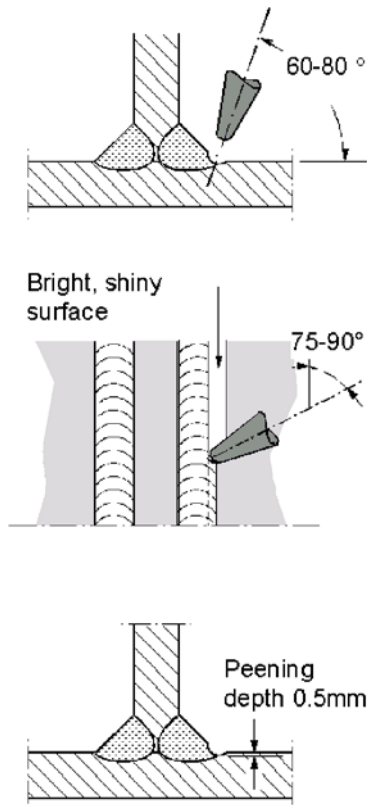
Kuulapuhalluksen on raportoitu parantavan esimerkiksi lujuudeltaan 260–390 MPa olevasta materiaalista tehtyjen pitkittäisten kiinnitysliitosten väsymislujuutta noin 33 %, kun taas lujemmasta materiaalista tehtynä (730–820 MPa) parannus oli 70 % [28].



### 3.2.1.1.2 Vasarointi

Vasaroinnissa hitsin rajaviivaa muokataan voimakkailla mekaanisilla iskuilla, jotka aikaansaavat materiaalin voimakkaan muokkautumisen. Vasarointi parantaa väsymiskestävyyttä enemmän kuin kuulapuhallus tai neulavasarointi johtuen suuresta kylmämuokkauksesta, jonka ansiosta puristusalue ulottuu levyssä syvemmälle. Vasarointi myös muokkaa rajaviivan geometriaa edullisemmaksi, jolloin jännityskonsentraatio pienenee.

Vasarointi suoritetaan pneumaattisella tai hydraulisella vasaralla, jonka iskutiheys on 25–100 iskua/s. Iskunenergia on tyypillisesti 5–15 joulea. Vasaran paino on yleensä 1–3,5 kg. Vasarassa käytetään pituudeltaan 100–200 mm:n karkaistuja teriä, joissa on lähes puolipallonmuotoinen halkaisijaltaan 6–18 mm oleva pää. Vasarointi tulisi tehdä kuvan 13 osoittamalla tavalla kuljettamalla vasaraa noin 45°:een kulmassa peruslevyyn nähden ja lähes kohtisuorassa kuljetussuuntaa vastaan. Syntyvän uran tulee olla vähintään 0,3 mm syvä, mielellään 0,5 mm [29].



Kuva 13. Vasaroinnin suoritus [29]

Menetelmän on raportoitu parantavan joissakin tapauksissa väsymiskestävyyttä niin paljon, että hitsi ei enää ole kriittinen kohta, vaan väsyminen tapahtuu itse perusmateriaalissa, hitsin alueen ulkopuolelta [28]. IIW:n suosituksissa vasarointi liitos voidaan korottaa nimellisten jännitysten mukaan suunniteltaessa luokkaan FAT 125, jos alkuperäinen luokka on FAT 90 tai alle sen. Rakenteellisen hot spot -jännityksen perusteella suunniteltaessa voidaan käyttää materiaalin suunnittelukäyrää, eli FAT 160 kulmakertoimella  $m = 5$ . Tätä saa suosituksen mukaan soveltaa pienaliitoksille, mutta ei päittäisliitoksille.

### 3.2.1.1.3 Neulavasarointi

Neulavasarointi on samantapainen tekniikka kuin vasarointikin. Ero on siinä, että yksi kiinteä kärki on korvattu neulanipulla. Neulojen halkaisija on noin 2 mm ja niiden päät on pyöristetty. Työstö suoritetaan samalla tavalla kuin vasaroinnissa. Menetelmästä saatavan hyödyn on havaittu olevan hieman vähäisempi kuin vasaroinnilla, IIW-suosituksissa neulavasaroinnilla työstetyn liitoksen kohdalla voidaan toimia samoin kuin vasaroidun.

### 3.2.1.1.4 Ultraäänivasarointi (UIT)

UIT-teknologia perustuu venäläisen tutkijan Statnikovin työhön. Ensimmäinen menetelmän sovellus otettiin käyttöön entisen Neuvostoliiton ydinsukellusveneohjelmassa 1972. Menetelmää sovellettiin mm. sukellusveneen rungon väsymiskestävyyden parantamiseen. Nykyään menetelmä on käytössä mm. ilmailu-, auto- ja rautatieliikenteessä.

Menetelmän ero muihin vasarointimenetelmiin nähden on se, että laite toimii suurella taajuudella (27 kHz), jolloin menetelmä on periaatteessa hiljaisempi kuin muut vasaroinnit. Samoin tärinä on vähäisempää. Väsymiskestävyyden paraneminen perustuu samaan ilmiöön kuin vasaroinnillakin. LTY:ssä on tutkittu tätä menetelmää melko paljon ja tehty suurehko määrä väsytykokeita. Vuoden 2002 lopulla saatiin päätökseen kolmivuotinen projekti, jonka tuloksia on esitetty lähteessä [33]. Tässä tutkimuksessa saatiin erilaisissa tapauksissa karakteristiselle väsymislukalle parannuskertoimeksi 1,26–1,85 verrattuna normaaliin hitsattuun tilaan (as-welded).

### 3.2.1.2 Ylikuormitusmenetelmät

Ylikuormitusmenetelmät perustuvat korkean kuormituksen aiheuttamiin paikallisiin plastisiin muodonmuutoksiin, jotka aiheuttavat puristusjännitystilan.

#### 3.2.1.2.1 Esiylikuormitus

Esiylikuormituksessa rakennetta kuormitetaan niin paljon, että hitsin rajaviivalla tapahtuu suuren vetojännityksen ansiosta plastista muodonmuutosta. Muu ympäröivä rakenne on kuitenkin kimmoisessa tilassa. Kun kuorma poistetaan, syntyy plastisoituneelle alueelle kimmoisten muodonmuutosten palautuessa puristusjännitystilaa. Mikäli ylikuorma ei ollut riittävän suuri aikaansaamaan puristusjännitystilaa, ainakin hitsausjäännösjännitykset pienenevät. Joissakin tapauksissa tällainen ylikuormitus tehdään rakennetta käyttöön otettaessa. Esimerkkeinä mainittakoon koeponnistettavat paineastiat ja koekuormitettavat sillat.

#### 3.2.1.2.2 Paikallinen puristus

Paikallisessa puristuksessa väsymiselle alttiille kohdalle kohdistetaan voimakas levyn paksuussuuntainen puristus, joka saa aikaan plastista muodonmuutosta. Kun kuorma poistetaan, jää puristettuun kohtaan puristuksen puolella oleva jäännösjännitystilaa. Tyypillinen puristimen halkaisija on 45 mm ja tyypillinen pu-

ristuma 0,18 mm. Menetelmän on raportoitu parantavan pitkittäisiä pienahitsejä käsittävien liitosten väsymisrajaa 70–100 % [28].

### **3.2.2 Jännityksen poistoon perustuvat menetelmät**

#### **3.2.2.1 Myöstökäsittely**

Myöstön eli jännitysten poistohehkutuksen tarkoituksena on pienentää hitsien aiheuttamia sisäisiä vetojännityksiä. Myöstöhehkutuksessa kappaleen lämpötilä nostetaan niin korkeaksi, että materiaalin myötöraja alenee, jolloin kappaleen sisäiset jännitykset laukeavat plastisten muodonmuutosten takia. Jotta ei synnyisi uusia jäännösjännityksiä, pitää kappale jäähdyttää mahdollisimman hitaasti. Teräksellä hehkutuslämpötila on teräksen laadusta ja kappaleen geometriasta riippuen 500–600 °C.

Monimutkaisissa kappaleissa lämpötilan muutokset saattavat tapahtua eri tahtiin eri osissa, mikä saattaa aiheuttaa uusia jäännösjännityksiä. Termomekaanisesti valssatuilla teräksillä puolestaan tulee ottaa huomioon lämpökäsittelyn aiheuttama lujuuden lasku.

#### **3.2.2.2 Värähtelykäsittely**

Värähtelykäsittelyssä jäännösjännitykset pyritään laukaisemaan täristämällä rakennetta sen ominaistuuksilla. Värähtelyn synnyttämät jännitykset aiheuttavat epäjatkuvuuskohdissa paikallista plastisoitumista, jota kautta jäännösjännitykset laukeavat. Menetelmän tehoa hitsatuille rakenteille ei ole osoitettu. Tämä tekniikka saattaa myös syödä huomattavan osan rakenteen kestoikästä [28].

#### **3.2.2.3 Pistekuumennus**

Pistekuumennuksessa rakennetta kuumennetaan paikallisesti esimerkiksi kaasuliekillä, jolloin kuumennettu alue laajetessaan aikaansaa ympäröivän alueen tyssääntymisen. Alueen jäähtyessä ja kutistuessa syntyy jäännösjännitystila, joka on alueen säteen suunnassa vetoa ja tangentin suunnassa puristusta. Sijoittamalla kuumennuskohta sopivan paikkaan saadaan väsymiselle kriittisen kohdan alueelle puristusjäännösjännitys, joka estää särön avautumista.

#### **3.2.2.4 Gunnertin menetelmä**

Gunnertin menetelmä on myös lämpökäsittelymenetelmä, joka perustuu paikalliseen lämmittämiseen. Tässä menetelmässä kuumennuspisteen tarkka sijointuvaatimus on eliminoitu pois. Menetelmässä lämmitetään hitsin rajaviiva niin korkeaan lämpötilaan, että saadaan aikaan plastinen deformaatio. Tämän jälkeen pinta jäähdytetään nopeasti vesisuihkulla. Erilaiset jäähdytysnopeudet saavat aikaan puristusjäännösjännityksen pintakerroksiin.


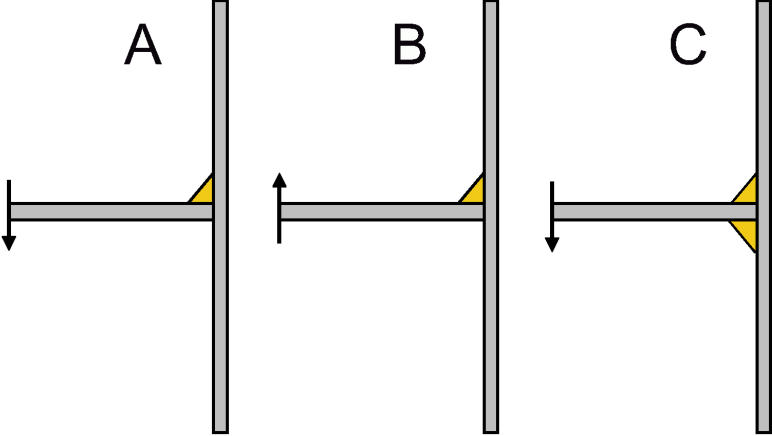
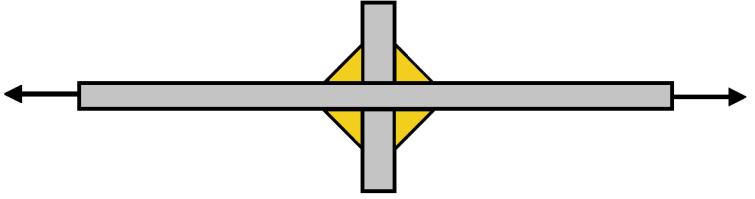
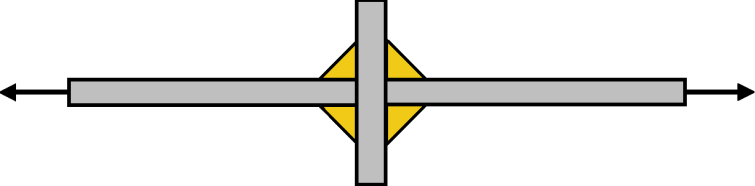
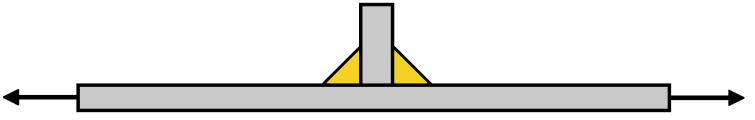
### **3.2.2.5 Räjähdekäsittely**

Tässä menetelmässä rakenteeseen aiheutetaan voimakas paineaalto räjähteen avulla. Paineaalto aiheuttaa epäjatkuvuuskohdissa paikallista plastisoitumista, jonka seurauksena vetojännitykset laukeavat. Räjähteenä käytetään muoviräjähdettä tai räjähtävää sytytyslankaa. Käsittelyn onnistumista on hyvin vaikea kontrolloida ja räjähteen käyttö vaatii painekammion tai jonkun muun räjäytykseen sopivan alueen.

## 4 SUORITETUT VÄSYMYSKOKEET

MIG-juotettujen liitosten väsymiskestävyyttä tutkittiin viidessä erilaisessa päätapauksessa (taulukko 2). Taulukon kolmessa viimeisessä tapauksessa ajatuksena oli tutkia, voiko menetelmää käyttää väsymiskestävyyden parantamiseen. Kaikkiaan kokeita tehtiin 63 kpl mukaan lukien kaksi pelkälle perusaineelle tehtyä koetta.

Taulukko 2. Väsytyiskoetapaukset

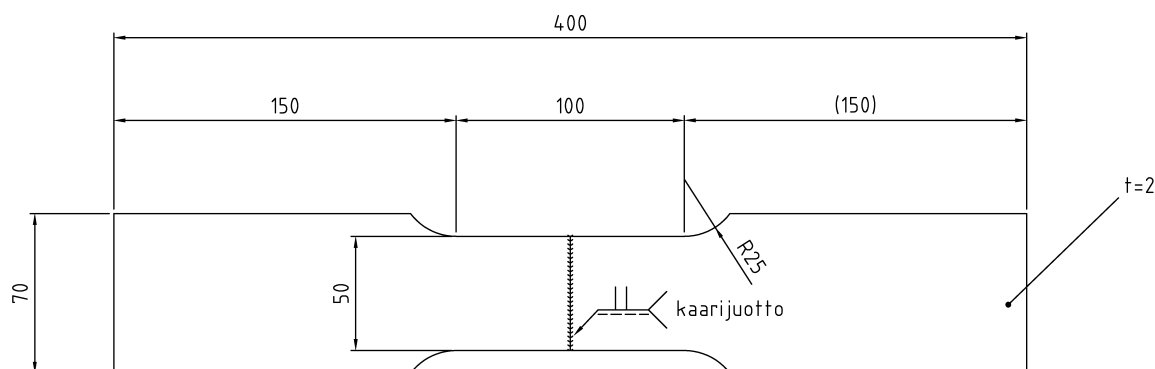
Tapaus	Kuvaus	Lkm
	Päittäisliitos	8
	Taivutus, voima eri suuntiin	3×8
	X-liitos, voimaa kantamaton. •MIG-juotto •MAG + MIG-juotto rajaviivalle	2×3
	X-liitos, voimaa kantava	3
	Poikittainen voimaa kantamaton. •MIG-juotto •MAG + MIG-juotto rajaviivalle	2×10

## 4.1 Päittäisliitoksen väsytykokeet

Päittäisliitosten väsytykokeita tehtiin kaikkiaan kahdeksan kappaletta. Lisäaineena käytettiin alumiinipronssia CuAl8 (OK Autrod 19.40) ja suojakaasuna Argonia. Koesauvat juotettiin LTY:n hitsaustekniikan laboratoriossa käyttäen pulsikaarta.

### 4.1.1 Koekappaleet

Koekappaleet olivat mitoiltaan kuvan 14 mukaisia.



Kuva 14. MIG-juotettujen päittäisliitosten koekappaleiden mitat.

Koekappaleista mitattiin niiden paksuus ja leveys sekä epäkeskisyys ja kulmavirhe. Nämä on esitetty liitteessä 1. Koekappaleiden kulmavirhe oli aika pieni, suurimmillaan alle puoli astetta. Epäkeskisyys sen sijaan oli joissakin tapauksissa varsin suuri, jopa noin 0,3t. Lisäksi havaittiin, että epäkeskisyys saattoi olla koekappaleen toisessa reunassa erimerkkinen kuin toisessa reunassa.

Kaikissa koekappaleissa oli keskilinjalla, noin levyn paksuuden päässä rajaviivalta, yksi venymäliuska, jolla mitattiin venymää koko kokeen ajan. Venymäliuska pyrittiin sijoittamaan sille puolelle, jossa epäkeskisyyden ja kulmavirheen vaikutus olivat samansuuntaisia.

### 4.1.2 Materiaalit

Koekappaleiden materiaalina oli tavanomainen kuumavalssattu rakenneteräs S235JRG2, jonka kemiallinen koostumus ja mekaaniset ominaisuudet on esitetty taulukoissa 3 ja 4.

Taulukko 3. S235JRG2 kemiallinen koostumus [%].

C	Si	Mn	P	S	Al	Nb	V	N	Mo	Cu	Cr	Ni
0,07	0,01	0,30	0,010	0,013	0,037	0,000	0,003	0,007	0,003	0,026	0,02	0,04

Taulukko 4. S235JRG2 mekaaniset ominaisuudet.

$R_{eh}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$A_5$ [%]
283	389	42

### 4.1.3 Koejärjestelyt

Koekappaleet kiinnitettiin 100 kN:n väsytykseen jäykähköillä kiinnittimillä, jolloin osa kulmavirheestä oikeni. Kehän kuormitus sylinterin päässä oli voimaanturi, jolla mitattiin voimaa koko kokeen ajan. Voiman, sylinterin siirtymän ja venymäliuskan minimi- ja maksimiarvot rekisteröitiin ja tallennettiin datatiedostoon viiden minuutin välein. Voimatietoja ja mitattuja poikkileikkaustietoja käyttäen voitiin laskea nimellinen jännitysvaihtelu ja venymäliuskan venymätiedoista puolestaan voitiin laskea jännitysvaihtelu liuskan kohdalla. Tämä vastaa likimain paikallista nimellistä jännitysvaihtelua (jossa epäkeskisyyden ja kulmavirheen aiheuttama lisä on otettu huomioon) eron ollessa noin kaksi prosenttia.

### 4.1.4 Tulokset

Koesarjan tulokset on esitetty taulukossa 5. Taulukon termien laskentaperusteet esitetään myöhemmin tulosten tarkastelu -osiossa. Kokeet suoritettiin  $R$ -arvolla  $R = 0,1$  nimelliseen jännitykseen nähden.

$\Delta\sigma_{nim}$	nimellinen jännitysvaihtelu
$\Delta\sigma_L$	venymäliuskan perusteella määritetty jännitysvaihtelu
$N$	kestoikä
FAT	väsymislukka
RO	run-out-koe, väsytykseen keskeytetty

Taulukko 5. MIG-juotettujen päittäisliitosten väsytykset. FAT laskettu käyttäen kulmakertoimen arvoa  $m = 3$ .  $R = 0,1$ .

Koekpl	$\Delta\sigma_{nim}$ [MPa]	$\Delta\sigma_L$ [MPa]	$N$	FAT nim.	FAT liuska	Huom
1	154	215	720333	110	153	
2	89	123	4895222	–	–	RO
3	125	190	5189344	–	–	RO
4	178	250	358434	100	141	
5	159	212	561048	104	139	
6	144	222	1903441	142	218	
7	168	221	293867	89	117	Juuren puoli
8	134	225	633101	91	153	

## 4.2 Voimaa kantavan T-liitoksen taivutusväsytykokeet

T-liitoskokeita tehtiin kolme erilaista sarjaa, kussakin kahdeksan koetta. Lisäaineena käytettiin tässäkin tapauksessa alumiinipronssia CuAl8 (OK Autrod 19.40) ja suojakaasuna Argonia. Koekappaleet valmistettiin LTY:n hitsaustekniikan laboratoriossa.

### 4.2.1 Koetapaukset

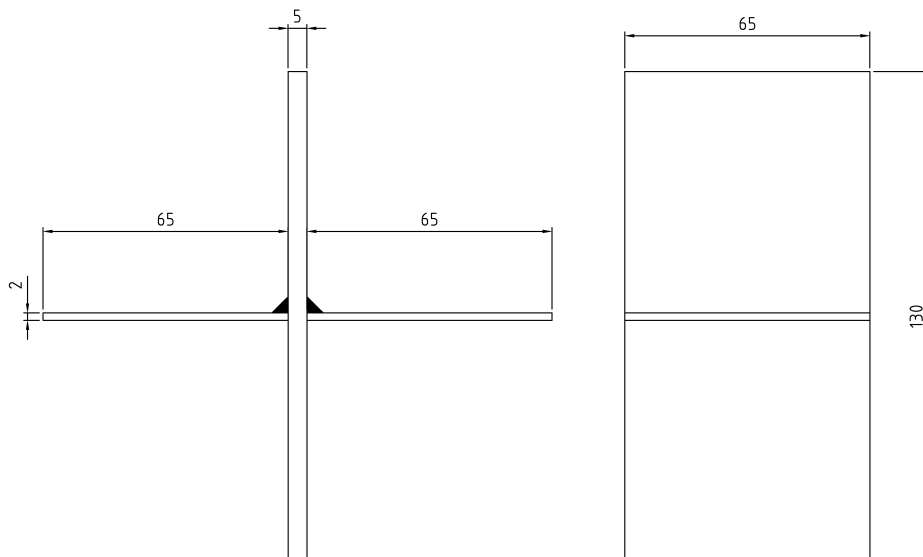
Koetapauksina oli taulukon 2 rivin 2 mukaisesti kolme erilaista variaatiota:

- yksi pieni, voiman suunta siten, että väsyminen tapahtuu rajaviivalta, A
- yksi pieni, voiman suunta siten, että väsyminen tapahtuu juuren puolelta, B
- kaksi pientä, C

Huomattakoon, että tapauksen B mukaista rakennetta ei saisi suunnitella. Joskus kuitenkin tulee eteen tilanteita, jolloin tätä ei voi välttää (esimerkiksi valmistusteknisistä syistä), joten tapaus otettiin mukaan. Tähän vaikutti lisäksi se, että tapauksen tutkimiseen oli tiettyjä intressejä teollisuuden puolella ja kyseinen tapaus esiintyy eräissä käytännön rakenteissa.

### 4.2.2 Koekappaleet

Koekappaleet olivat kuvan 15 mukaisia. Alun perin ajatuksena oli, että testattaisiin juuri taulukossa 2 olevan kuvan mukainen tapaus, mutta tällöin ongelmaksi muodostui se, että voimat olivat liian pienet käytetylle kuormituskehälle. Niinpä päädyttiin laittamaan kaksi liitosta rinnan, jolloin saatiin kuvan 15 mukainen koekappale.



Kuva 15. MIG-juotettujen taivutuskoekappaleiden mitat.

Kustakin koekappaleesta mitattiin taivutettavan osan leveys ja paksuus, rajaviivan etäisyys, liuskojen paikat ja tuen paikka asennettaessa kuormituskehään (liite 2).



Koekappaleissa oli molemmilla puolilla (leveysuunnassa keskiviivalla) venymäliuska noin 10 mm:n päässä rajaviivalta, joka oli suurin piirtein rajaviivan ja tuen puoliväli. Liuskojen tuloksia käytettiin tukivoimien määrittämiseen ja sitä kautta rajaviivalla olevan jännityksen määrittämiseen tapauksissa A ja C sekä pienen a-mittaa vastaavan poikkileikkauksen taivutusjännityksen laskemiseen tapauksessa B.

### 4.2.3 Materiaalit

Koekappaleiden osien materiaalina oli kuumavalssattu rakenneteräs S355K2G3. Taulukossa 6 on esitetty materiaalien kemialliset koostumukset ja taulukossa 7 puolestaan mekaaniset ominaisuudet.

Taulukko 6. MIG-juotettujen taivutuskoekappaleiden osissa käytetyn materiaalin S355K2G3 kemialliset koostumukset [%].

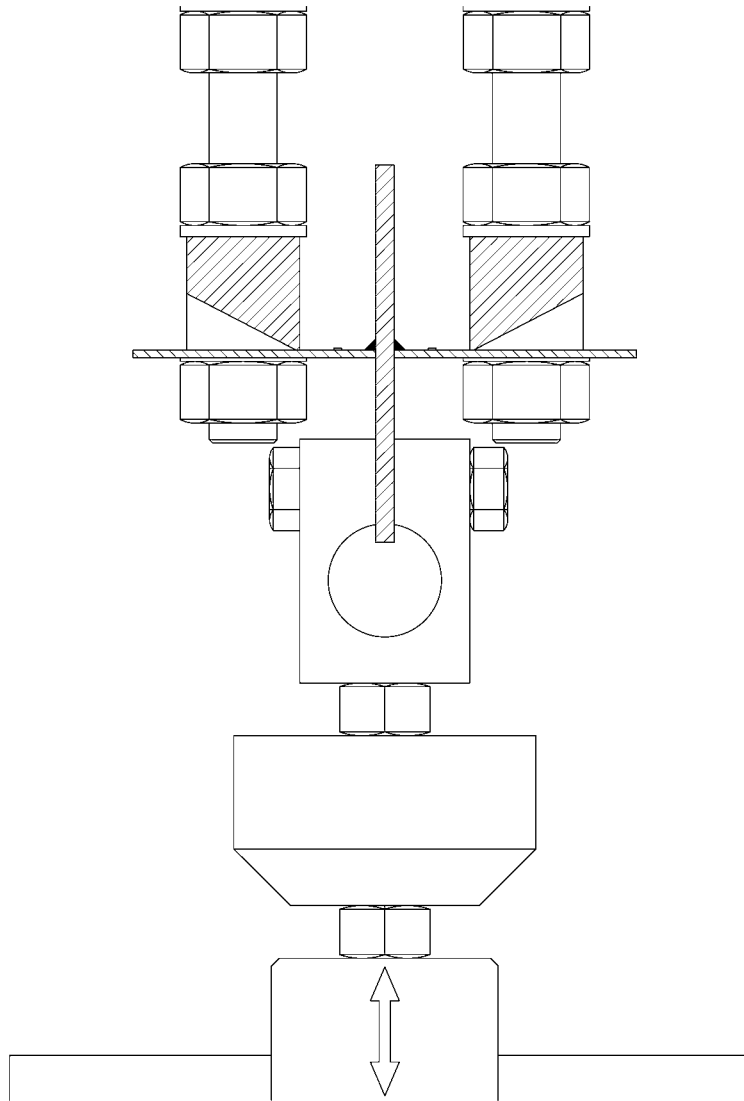
t	C	Si	Mn	P	S	Al	Nb	V	Cu	Cr	Ni	Mo
2	0,13	0,20	1,47	0,020	0,009	0,038	0,007	0,007	0,008	0,02	0,03	0,001
5	0,15	0,19	1,49	0,012	0,006	0,035	0,007	0,009	0,010	0,02	0,04	0,005

Taulukko 7. S355K2G3 mekaaniset ominaisuudet.

t [mm]	$R_{eh}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$A_5$ [%]
2	476	554	27
5	385	522	25

### 4.2.4 Koejärjestelyt

Koekappaleiden kiinnittämistä varten suunniteltiin ja valmistettiin kiinnitin ja tukipalat. Kuvassa 16 on esitetty koejärjestelyn periaate ja kuvassa 17 näkyy koejärjestely itse kuormituskehällä. Voima- ja venymäliuskadata (minimi- ja maksimiarvot) talletettiin viiden minuutin välein datatiedostoon.



Kuva 16. Koejärjestelyjen periaatekuva.



Kuva 17. MIG-juotettujen taivutuskokeiden koejärjestely.

#### 4.2.5 Tulokset

Tapausten A ja C koetulokset on esitetty taulukossa 8 ja tapauksen B koetulokset taulukossa 9. Taulukon termien laskentaperusteet esitetään myöhemmin tulosten tarkastelu -osiossa. Suurimmalle osalle koekappaleista kestoikä voitiin määrittää molemmille puolille, koska koe ei pysähtynyt toisen puolen rikkoontuessa (merkinnät L1 ja L2 koekappaleen nimessä). Ilmeisesti kehän ohjaus ei pysynyt kunnolla mukana voimien ollessa aika pienet ja taajuus luokkaa 10 Hz. Kestoiät määritettiin voiman ja venymäliuskan ajan funktiona piirretyistä kuvaajista käytetyn ajan ja taajuuden perusteella.

$\Delta\sigma_{nim}$  nimellinen jännitysvaihtelu  
 $\Delta\sigma_a$  pienen nimellinen taivutusjännitysvaihtelu a-mitan perusteella laskettuna  
 $N$  kestoikä  
 FAT väsymislukka  
 RO run-out-koe, väsytyksko kekeytetty

Taulukko 8. Sarjojen A ja C koetulokset.  $R = 0,1$ .

Koekappale	$\Delta\sigma_{nim}$	$N$	FAT $m = 3$	FAT $m = 5$	Huom
A1	170	5196768	–	–	RO
A2	211	6985367	–	–	RO
A3L2	228	1522000	208	216	
A3L1	276	2656000	303	292	
A4	299	5099317	–	–	RO
A5	297	1233000	253	270	
A6L2	304	1718000	289	295	
A6L1	229	2020000	230	229	
A7	223	5314695	–	–	RO
A8L1	252	1138000	209	225	
A8L2	285	1181000	239	257	
C1L1	264	4493000	346	310	
C1L2	266	4928000	359	319	
C2	277	5476599	–	–	RO
C3L1	321	3576000	390	361	
C3L2	318	3576000	386	357	
C4	207	5407148	–	–	RO
C5L1	304	2445000	325	316	
C5L2	279	2126000	285	282	
C6L1	267	927000	207	229	
C6L2	285	1196000	240	257	
C7	274	5330128	–	–	RO
C8	247	6815619	–	–	RO

Taulukko 9. Koesarjan B tulokset.  $R = 0,1$ 

Koekappale	$\Delta\sigma_a$	$N$	FAT $m = 3$	Huom
B1	36	10279000	–	RO
B2	138	5110000	–	RO
B3L1	140	1087000	114	
B3L2	177	531000	114	
B4L1	107	2675000	118	
B4L2	138	1290000	119	
B5L1	112	7078000	–	RO
B5L2	179	758000	130	
B6L1	141	4455000	184	
B6L2	161	870000	122	
B7L1	156	626000	106	
B7L2	163	553000	106	
B8L1	122	1756000	117	
B8L2	164	2026000	165	

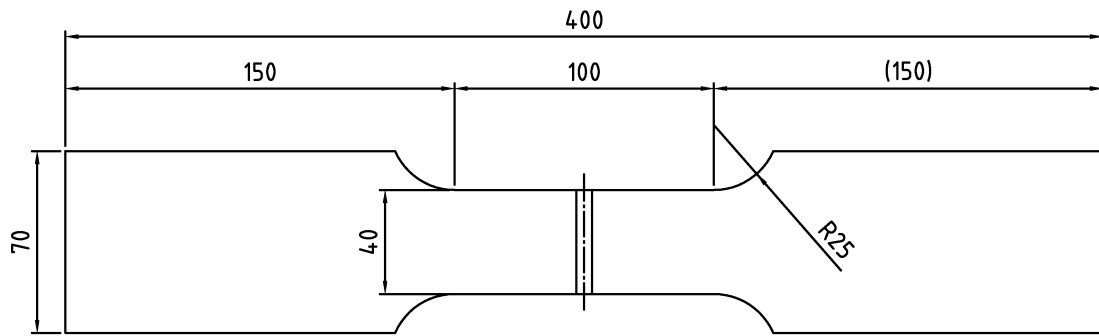
### 4.3 Ristiliitoksen väsytykokeet

Ristiliitosten väsytykokeissa kaksi sarjaa oli taulukon 2 mukaisesti voimaa kantamattomalle liitokselle (B1 ja B2) ja yksi sarja voimaa kantavalle liitokselle (B3). Voimaa kantamattomissa tapauksissa toisessa käytettiin pelkkää MIG-juottoa ja toisessa perinteisesti MAG-menetelmällä hitsatun pienen rajaviivalle lisättiin MIG-juottamalla toinen palko, jolloin MIG-juoton siis ajateltiin toimivan väsymiskestävyyden parantamismenetelmänä. Nämä kokeet olivat ensimmäiset aiheesta tehdyt ja niiden tarkoitus oli toimia pilottikokeina. Tämän vuoksi koesarja oli varsin suppea, vain kolme koetta tapausta kohden. Näiden kokeiden tulokset antoivatkin kimmokkeen tutkia asiaa lisäkokein.

Koesauvat valmistettiin LTY:n hitsaustekniikan laboratoriossa robotilla. Lisäaineena käytettiin MIG-juoton osalta alumiinipronssia CuAl8 (OK Autrod 19.40) ja MAG-hitsauksen osalta yleisesti käytettyä lisäainetta OK Autrod 12.51. MIG-juoton suojakaasuna käytettiin Argonia.

#### 4.3.1 Koekappaleet

Koekappaleiden mitat olivat kuvan 18 mukaisia. Rivan paksuus oli sama kuin sauvan (5 mm) ja korkeus 25 mm. Koekappaleista mitattiin niiden paksuus ja leveys (liite 3) sekä epäkeskisyys (sarja B3) ja kulmavirhe. Mitatut epäkeskisyydet ja kulmavirheet on esitetty taulukossa 10.



Kuva 18. Ristiliitoskoekappaleiden koesauvojen päämitat.

Taulukko 10. Mitatut kulmavirheet  $\alpha$  [°] ja epäkeskisyydet  $e$  [mm].

	Koekappale								
	B1/1	B1/2	B1/3	B2/1	B2/2	B2/3	B3/1	B3/2	B3/3
$\alpha$	–	0,69	0,42	0,61	0,38	1,07	3,60	3,83	4,12
$e$	–	–	–	–	–	–	0,1	3,1	1,0

Kaikissa koekappaleissa oli venymäliuskat keskilinjalla, noin levyn paksuuden päässä rajaviivalta. Liuskat oli sijoitettu sille puolelle, jossa epäkeskisyyden ja kulmavirheen vaikutus oli samansuuntainen (sarja B3). Sarjoissa B1 ja B2 liuskat olivat sillä puolella, jossa kulmavirhe aiheutti jännityksen kasvua.

#### 4.3.2 Materiaalit

Koekappaleiden materiaalina oli kuumavalssattu rakenneteräs S355K2G3. Materiaali oli samaa kuin taivutuskokeissa käytetty 5 mm:n materiaali, joten materiaalin kemiallinen koostumus ja mekaaniset ominaisuudet on esitetty taulukoissa 6 ja 7.

#### 4.3.3 Koejärjestelyt

Tämän koesarjan koejärjestelyt olivat paljolti kappaleessa 4.1.3 kuvatun kaltaiset. Koekappaleiden kulmavirhe pyrki oikeenomaan kiinnitettäessä. Varsinkin sarjassa B3 tästä oli se haitta, että jännitystaso nousi jo kiinnitettäessä varsin korkealle. Tästä syystä jännitysvaihtelu jäi joissakin tapauksissa varsin matalaksi, koska ei haluttu ylittää perusmateriaalin myötörajaa. Tämä siksi, koska käytetyn alumiinipronssin myötölujuus on jonkin verran alempi kuin perusmateriaalin myötöraja, eikä ensimmäisten kokeiden kyseessä ollessa ollut kovinkaan tarkkaa käsitystä siitä, miten tämä tulee käyttäytymään.

#### 4.3.4 Tulokset

Ristiliitosten väsytyksokeiden tulokset on esitetty taulukossa 11. Suureiden laskeminen on esitetty myöhemmin tulosten tarkastelu -osiossa. Kokeet suoritettiin nimellisen jännityksen suhteen tarkastellen  $R$ -arvolla 0,1.

$\Delta\sigma_{nim}$	nimellinen jännitysvaihtelu
$\Delta\sigma_{pnm}$	paikallinen nimellinen jännitysvaihtelu ( $\alpha$ :n ja $e$ :n vaikutus otettu huomioon, ekstrapoloitu venymäliuskan perusteella rajaviivalle)
$N$	kestoikä
FAT	väsymisloukka
RO	run-out-koe, väsytykskoe keskeytetty

Taulukko 11. Ristiliitosten väsymiskokeiden tulokset.

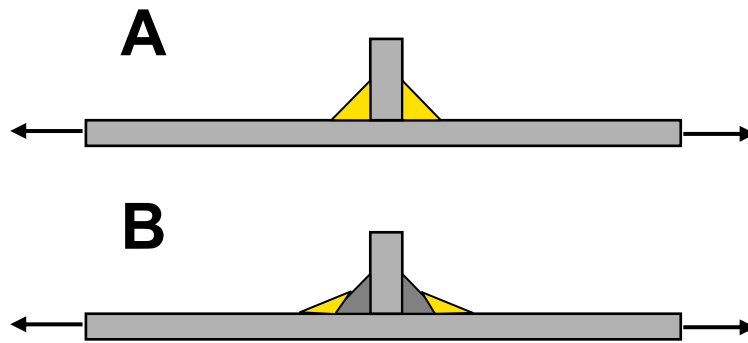
Koekpl	$\Delta\sigma_{nim}$ [MPa]	$\Delta\sigma_{pnm}$ [MPa]	$N$	FAT $m = 3$		FAT $m = 5$		Huom
				nim.	pnm.	nim.	pnm.	
B1/1	150	179	3650775	184	219	170	202	
B1/2	252	284	236638	123	139	164	185	
B1/3	201	218	1542042	184	200	191	207	
B2/1	150	176	3645809	184	214	169	198	
B2/2	252	301	6500607	–	–	–	–	RO
B2/3	198	213	5292759	–	–	–	–	RO
B3/1	121	175	534943	78	113	93	134	
B3/2	42	128	6090692	–	–	–	–	RO
B3/3	100	227	6634621	–	–	–	–	RO

#### 4.4 Voimaa kantamattoman, poikittaisen kiinnitysliitoksen vetoväsytykset

Näissä kokeissa suurin kiinnostuksen kohde oli se, voisiko MIG-juottamista käyttää väsymiskestävyyden parantamismenetelmänä. Koska perusaine ei MIG-juotettaessa periaatteessa sula (varsinkin pienen rajaviivan kohdalla), voisi otaksua, että MIG-juotetun pienen väsymiskestävyys on kohtalaisen hyvä. Tällöinhän rajaviivalla ei pitäisi olla juurikaan reunahaavoja, joista väsyminen alkaa.

##### 4.4.1 Tutkitut tapaukset

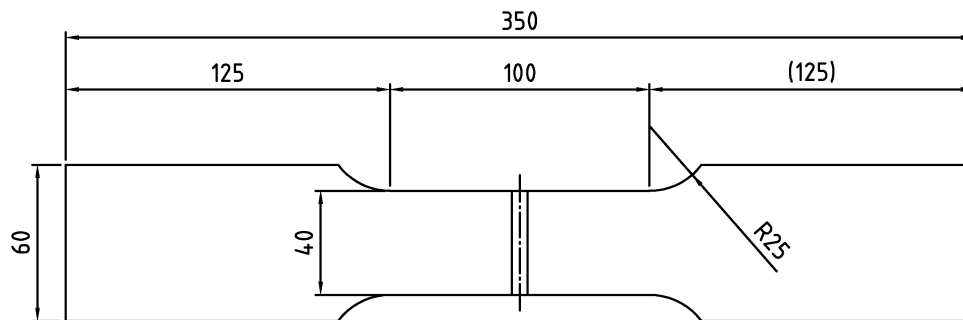
Suoritetuissa kokeissa tutkittiin kaksi tapausta (kuva 19). Tapauksessa A liitos oli tehty käyttäen pelkästään MIG-juottoa ja tapauksessa B perinteisen MAG-hitsaamalla tehdyn pienen rajaviivalle lisättiin MIG-juottaen toinen palko. Kumpikin sarja käsitti kymmenen koesauvaa. Lisäaineina käytettiin alumiinipronssia CuAl8 (OK Autrod 19.40) ja MAG-hitsauksessa lisäainetta OK Autrod 12.51. MIG-juottamisessa suojakaavana oli Argon. Lisäksi tässä yhteydessä tehtiin kaksi koetta pelkälle perusaineelle (sarja C) käyttäen samaa materiaalia ja koesauvan mittoja kuin sarjoissa A ja B.



Kuva 19. Tutkittujen tapausten periaatekuva.

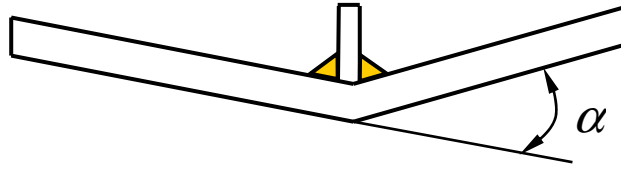
#### 4.4.2 Koekappaleet

Koesauvojen mitat olivat kuvan 20 mukaiset. Sauvojen hitsaus ja MIG-juotto tehtiin LTY:n hitsaustekniikan laboratoriossa robotilla. Ensin alkuun MIG-juottoa yritettiin tehdä tavalliselle S355-luokan RAEX-teräkselle, mutta jostain selvittämättömäksi jääneestä syystä ei saatu aikaan kunnollista jälkeä. Tämä aiheutti melkoisesti päänvaivaa, sillä aiemmin tehdyt esitestit oikeiden parametrien löytämiseksi olivat onnistuneet varsin hyvin. Sitten huomattiin, että aiemmissa testeissä käytetty materiaali olikin ns. laserleikkauslaatua. Tähän materiaaliin juotto onnistui hyvin. Yksi selitys ilmiölle saattaa olla se, että tämä laatu oli peitattua levyä. Asiaa ei sitten kuitenkaan selvitelty tarkemmin. Sama syy saattaa olla syynä siihen, että muissa aiemmin tutkituissa koesarjoissa aikaan saatu juotoksen jälki ei ollut kovin siistin näköistä.



Kuva 20. Voimaa kantamattoman liitoksen väsytyksokoesauvojen mitat.

Koekappaleisiin syntyi juoton ja hitsauksen yhteydessä melko paljon kulmavirhettä, joka mitattiin. Mittaustapa ja -tulokset on esitetty liitteessä 4, samoin kuin koesauvojen mitatut leveydet ja paksuudet. Sarjan A kappaleissa virhe oli välillä 2,10–3,13 astetta jakaantuen siten, että puolet kappaleista oli luokkaa kaksi astetta ja toinen puoli noin kolme astetta. Sarjan B kappaleet jakautuivat samalla tavoin kulmavirheen ollessa 1,31–4,23 astetta. Puolet sarjan B kappaleista sisälsi virhettä alle kaksi astetta ja toinen puoli 3,8–4,2 astetta. Kulmavirheen määrittely näkyy kuvassa 21 ja kunkin koekappaleen kulmavirhe taulukossa 12.



Kuva 21. Kulmavirheen määrittely.

Taulukko 12. Koekappaleista mitatut kulmavirheet. Kulma  $\alpha$  asteina.

Sarja	Koekappaleen numero, $\alpha$									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	3,01	2,34	2,10	3,06	2,21	3,13	2,25	3,05	2,22	3,13
B	3,88	3,03	4,11	4,23	4,03	1,98	1,63	1,88	1,49	1,31

#### 4.4.3 Materiaalit

Koesauvojen materiaali oli siis lujuuskuokaltaan S355-tasoista kuumavalsattua terästä, joka oli tarkoitettu erityisesti laser- ja plasmaleikkaukseen. Kyseinen materiaali oli peitattua. Taulukossa 13 on esitetty käytetyn materiaalin kemiallinen koostumus ja taulukossa 14 mekaaniset ominaisuudet.

Taulukko 13. RAEX 355MC Laser kemiallinen koostumus [%].

C	Si	Mn	P	S	Al	Nb	V
0,06	0,01	0,52	0,008	0,006	0,037	0,019	0,004

Taulukko 14. RAEX 355MC Laser mekaaniset ominaisuudet.

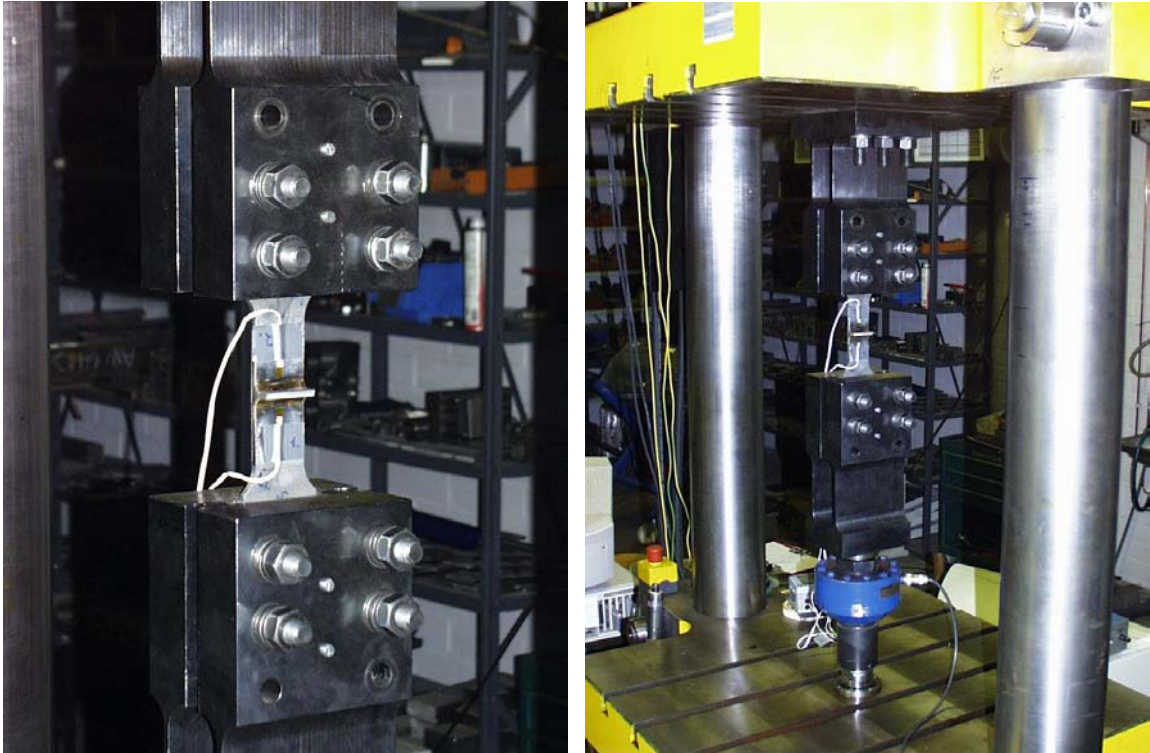
$R_{eh}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$A_5$ [%]
369	445	35

#### 4.4.4 Koejärjestelyt

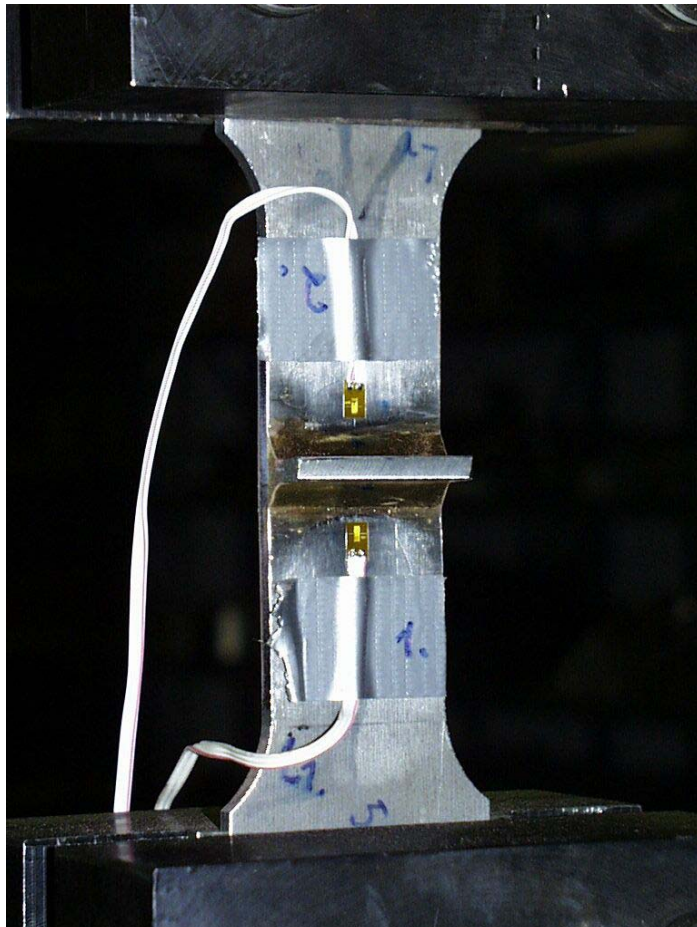
Kokeet tehtiin LTY:n teräsrakennelaboratoriossa sen omilla laitteilla. Koejärjestely oli kuvan 22 mukainen. Koekappale kiinnitettiin väsytykseen kiinnityslukoihin, jotka ovat taivutuksen suhteen melko jäykkiä. Kulmavirheen aiheuttamaa kiinnitysvaiheen taivutusmomenttia eliminoitiin siten, että koesauvoja oikaistiin kavennuksen aloituskohdasta. Näin itse kulmavirhe jäi rakenteeseen, mutta kiinnitys ei juuri aiheuttanut jännitystä koesauvaan. Ilman oikaisua kiinnitys olisi aiheuttanut huomattavan, jopa lähellä myötörajaa olevan jännityksen pienen alueelle. Taivutuksen vaikutus tulee helposti varsin suureksi näin ohuessa levyssä.

Kahteen ensimmäiseen sarjan A koekappaleeseen laitettiin venymäliuskat rivan molemmalle puolelle (kuva 23). Koska näiden todettiin näyttävän varsin samaa venymätasoa, loppuihin koesauvoihin laitettiin vain yksi liuska. Liuska sijoitettiin levyn paksuuden päähän rajaviivasta. Sarjassa C oli venymäliuskat sauvan molemmin puolin. Kokeet suoritettiin 5 Hz:n taajuudella  $R$ -arvolla 0,1.





Kuva 22. Koejärjestely.



Kuva 23. Koekappaleen A1 venymäliuskat.

#### 4.4.5 Tulokset

Kokeiden jännitysvaihtelutaso pyrittiin valitsemaan siten, että rikkoontuminen tapahtuu alueella alle  $2 \cdot 10^6$  sykliä. Kokeiden katkaisurajana pidettiin  $5 \cdot 10^6$  sykliä. Kokeissa oli vaikeuksia saada tuloksia välille  $10^6$ – $2 \cdot 10^6$  sykliä; koekappale yleensä kesti joko alle miljoona sykliä tai sitten yli viisi miljoonaa. Yli viisi miljoonaa kestäneitä kokeita jatkettiin rikkoontumiseen asti nostamalla kuormitus-tasoa. Sarjan A koekappale A4 tuhoutui ennenaikaisesti kuormituskehän käyttövirheen takia. Taulukossa 15 on esitetty kaikkien koesarjojen tulokset. Koekappaleiden väsymislukka on laskettu kulmakertoimen arvoilla  $m = 3$  ja  $m = 5$ . Kertoimen arvo  $m = 5$  vastaa perusaineelle yleensä käytettyä kulmakerrointa. Sarjan C koesauvat rikkoontuivat molemmat kiinnityksestä, eikä kavennuksen kohdalla, joten niiden osalta tulos on suuntaa antava. Sarjan C tulokset on kuitenkin laskettu kavennuksen poikkileikkauksen perusteella. Liitteessä 5 on myös esitetty nämä tulokset ja näiden lisäksi joitakin lisätietoja, kuten esimerkiksi venymäliuskojen venymävaihtelut ja niiden perusteella lasketut jännitysvaihtelut liuskan kohdalla. Liitteessä on myös esitetty rikkoontuiko koesauva liuskan puolelta, vai siltä puolelta, jossa sitä ei ollut.

$\Delta\sigma_{nim}$	nimellinen jännitysvaihtelu
$\Delta\sigma_{pnm}$	paikallinen nimellinen jännitysvaihtelu ( $\alpha$ :n ja $e$ :n vaikutus otettu huomioon, ekstrapoloitu venymäliuskan perusteella rajaviivalle)
$N$	kestoikä
FAT	väsymislukokka
RO	run-out-koe, väsytykskoe keskeytetty

Taulukko 15. Voimaa kantamattoman, poikittaisen kiinnitysliitoksen väsytykskoetulokset.  $R = 0,1$ .

Koekpl	$\Delta\sigma_{nim}$ [MPa]	$\Delta\sigma_{pnm}$ [MPa]	$N$	FAT $m = 3$		FAT $m = 5$		Huom
				nim.	pnm.	nim.	pnm.	
A1	165	290	299720	88	154	113	198	
A2	98	162	5718810	–	–	–	–	RO
A3	125	200	5135883	–	–	–	–	RO
A4	150	260	421708	–	–	–	–	käyttövirhe
A5	153	240	4997198	–	–	–	–	RO
A6	171	297	391526	99	172	123	214	
A7	160	249	5272916	–	–	–	–	RO
A8	161	278	883395	123	212	137	236	
A9	202	316	247352	101	157	133	208	
A10	149	258	5280942	–	–	–	–	RO
A2-C	165	275	395928	96	160	119	199	A2 jatko
A3-C	170	270	1350872	149	237	157	250	A3 jatko
A5-C	197	308	240057	97	152	129	202	A5 jatko
A7-C	199	310	271165	102	159	133	208	A7 jatko
A10-C	169	291	643636	116	199	135	232	A10 jatko
B1	164	322	329747	90	177	114	225	
B2	150	297	1370974	132	262	139	275	
B3	136	280	919320	105	216	116	240	
B4	125	239	1403198	111	212	116	223	
B5	108	208	5308690	–	–	–	–	RO
B6	199	317	438656	120	191	147	234	
B7	182	259	875891	138	197	154	220	
B8	150	220	5740030	–	–	–	–	RO
B9	166	250	5348182	–	–	–	–	RO
B10	175	246	2769832	195	274	187	263	
B5-C	142	275	232167	69	134	92	179	B5 jatko
B8-C	172	252	534942	111	162	132	194	B8 jatko
B9-C	186	281	625217	126	191	147	223	B9 jatko
C1	294	–	1708752	279	–	285	–	rikki kiinn.
C2	224	–	6764669	336	–	286	–	rikki kiinn.

## 5 TULOSTEN TARKASTELUA

Tässä osiossa esitetään mm. koetulostaulukoissa esiintyvien suureiden laskentaperusteet ja tarkastellaan koetuloksia eri tavoin. Osa esitetyistä laskentaperusteista on yleisiä, mutta osa on sovellettavissa vain tässä työssä esiintyviin tapauksiin. Tämä pätee varsinkin erilaisten kertoimien määrittelyn kohdalla. Toki niitä voidaan soveltaa harkintaa käyttäen muihinkin tapauksiin.

### 5.1 Tuloksissa esiintyvien suureiden laskenta

#### 5.1.1 Eri jännityssuureet ja niiden laskeminen

Tuloksissa esiintyy paljon erilaisia jännityssuureita. Tässä on esitetty niiden laskenta. Yleisesti tunnettuja yhtälöitä ei kuitenkaan selitellä sen tarkemmin.

##### 5.1.1.1 Nimellinen jännitys

Nimellinen jännitys tarkoittaa tässä yhteydessä yksinkertaisella palkkiteorialla laskettua jännitystä. Aksiaalisessa vedossa nimellinen jännitys lasketaan yhtälöstä (1) ja taivutuksessa yhtälöstä (2).

$$\sigma_{\text{nim}} = \frac{F}{A} \quad (1)$$

$$\sigma_{\text{nim}} = \frac{M}{W} \quad (2)$$

Jännitysvaihtelu on maksimi- ja minimijännityksen erotus. Tämä pätee myös kaikkiin myöhempänä esitettäviin eri jännityssuureisiin.

$$\Delta\sigma = \sigma_{\text{max}} - \sigma_{\text{min}} \quad (3)$$

Poikkipinta-alan tai taivutusvastuksen pysyessä vakiona voidaan nimelliset jännitysvaihtelut laskea voiman tai momentin vaihteluista ( $\Delta F$ ,  $\Delta M$ ).

$$\Delta\sigma_{\text{n,nim}} = \frac{\Delta F}{A}, \quad \Delta\sigma_{\text{b,nim}} = \frac{\Delta M}{W} \quad (4)$$

##### 5.1.1.2 Paikallinen nimellinen jännitys

Paikallinen nimellinen jännitys on lähteen [30] mukaan nimellinen jännitys, joka sisältää makrogeometriset efektit, paikallisen kuorman vaikutuksen sekä epäkeskisyyksistä ja kulmavirheistä tulevat efektit, mutta joka ei sisällä itse liitoksen aiheuttamaa jännityskeskittymää. Tässä työssä epäkeskisyydet ja kulmavirheet sisällytettiin tähän suureeseen. Tällöin paikallinen nimellinen jännitys voidaan laskea yhtälöstä (5)

$$\sigma_{\text{pnim}} = k_m \sigma_{\text{nim}}, \quad (5)$$

missä  $k_m$  on jännityksen suurennuskerroin johtuen epäkeskisyydestä tai kulma-  
virheestä tai näiden yhteisvaikutuksesta. Paikallinen nimellinen jännitys määri-  
tettiin tässä tutkimuksessa yleensä venymäliuskan antaman jännitysarvon pe-  
rusteella käyttäen yhtälöä (6)

$$\sigma_{\text{pnim}} = k_L \sigma_L, \quad (6)$$

missä  $k_L$  on ekstrapolointikerroin ja  $\sigma_L$  on venymäliuskan venymästä laskettu  
jännitys (nämä esitetään myöhemmin).

### 5.1.1.3 Venymäliuskan perusteella määritetty jännitys

Tässä työssä käytettiin vain yksihilaisia venymäliuskoja, koska tutkituissa ta-  
pauksissa jännitystila otaksuttiin liuskan sijoituskohdissa ainakin likimain yksi-  
akseliseksi. Tällöin venymäliuskan venymästä voidaan laskea jännitys yksin-  
kertaisesti Hooken lakia käyttäen

$$\sigma_L = E\varepsilon, \quad (7)$$

missä  $E$  on kimmokerroin ja  $\varepsilon$  liuskan venymä. Yleensä erilaisten ripojen koh-  
dilla poikittainen kuroutuma on vähän estetty. Tällöin yhtä hilaa käytettäessä  
saadaan liian pieni venymän arvo. Jos kuroutuminen on kokonaan estetty, voi-  
daan käyttää yhtälöä (8).

$$\sigma_L = \frac{E\varepsilon}{1-\nu^2} \quad (8)$$

Teräksellä Poissonin vakiolle käytetään yleisesti arvoa  $\nu = 0,3$ , jolloin yhtälön  
(8) antama arvo on noin kymmenen prosenttia suurempi kuin yhtälön (7) an-  
tama arvo. Suunnittelussa onkin siten turvallista otaksua kuroutuma täysin es-  
tetyksi, koska saadaan konservatiivisia arvoja. Tutkimustyössä, jolloin määrite-  
tään kestävyyskokeellisesti, on puolestaan turvallista käyttää yhtälöä (7),  
jolloin tulokset ovat varmalla puolella.

Yleensä kuroutuminen ei ole kuitenkaan kokonaan estetty, vaan vain osittain.  
Tällöin voidaan tarvittaessa käyttää rusettiliuskaa ja ottaa kuroutumisen huo-  
mioon. Esimerkiksi normaaleissa tasojaännitystapauksissa voidaan 90°:n ruse-  
tilla mitata päävenymät  $\varepsilon_1$  ja  $\varepsilon_2$  (edellyttäen että päävenymien suunta tiedetään)  
ja laskea suurempi pääjännitys yhtälön (9) avulla.

$$\sigma_1 = E\varepsilon_1 \frac{1 + \nu \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}}{1 - \nu^2} \quad (9)$$

### 5.1.1.4 Rakenteellinen hot spot -jännitys

Rakenteellinen hot spot -jännitys (rakenteellinen jännitys hot spot -kohdassa) sisältää lähteen [30] mukaan myös liitoksen aiheuttaman jännityskeskittymän, mutta ei hitsin lovivaikutusta eikä epälineaarista jännityshuippua. Usein käytetään myös nimitystä ”geometrisen jännitys”. Tämä voidaan laskea yhtälöstä

$$\sigma_{hs} = k_s \sigma_{pnim}, \quad (10)$$

missä  $k_s$  on rakenteellinen jännityskonsentraatiokerroin. Kerroin voidaan määrittää monin eri tavoin – esimerkiksi FE-analyysin avulla, mittaamalla venymän gradientti kahdella tai kolmella venymäliuskalla ja ekstrapoloimalla tulos rajaviivalle tai sitten käyttäen parametrisiä kerroinyhtälöitä. Lähteissä [30], [34] ja [35] on esitetty tätä asiaa varsin kattavasti, joten tässä ei puututa siihen enempää.

Tämän tutkimuksen kaikki rakenteet olivat sellaisia, joihin ei synny kovinkaan suurta  $k_s$ -kerrointa (jos ollenkaan), joten päädyttiin käyttämään pelkästään paikallista nimellistä jännitystä. Epäkeskisyyden ja varsinkin kulmavirheen vaikutus on paljon suurempi. Esimerkiksi poikittaisen voimaa kantamattoman liitoksen tapauksessa  $k_s$ -kerroin olisi lähteen [34] mukaan suurimmillaan noin 1,03.

### 5.1.2 Kerroinyhtälöt

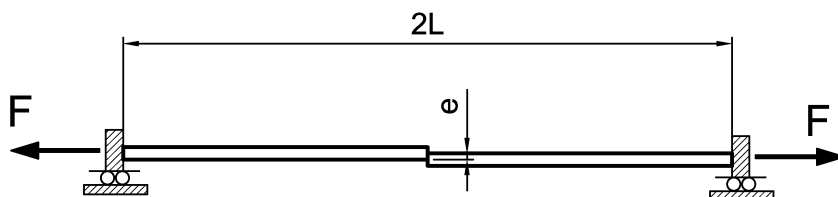
Tässä esitetään työssä käytettyjen eri kertoimien laskenta. Käytettyjä kertoimia ovat pääasiassa kulmavirheen ja aksiaalisen sovitusrvirheen vaikutuksen huomioon ottamiseksi käytetyt kertoimet. Lisäksi laskettiin kertoimet, joiden avulla venymäliuskan perusteella laskettu jännitys liuskan kohdalla voitiin ekstrapoloida rajaviivalle paikalliseksi nimelliseksi jännitykseksi.

#### 5.1.2.1 Aksiaalinen sovitusrvirhe

Tämä kuvan 24 mukainen aksiaalinen sovitusrvirhe esiintyi tutkimuksen kohteina olevista tapauksista päittäisliitoksissa ja voimaa kantavissa ristiliitoksissa. Esimerkiksi lähteessä [34] on esitetty useita eri tapauksia ja yhtälöt niiden laskemiseksi. Tässä työssä käytettiin yhtälöä (11).

$$k_{m,e} = 1 + \frac{3e}{t} \quad (11)$$

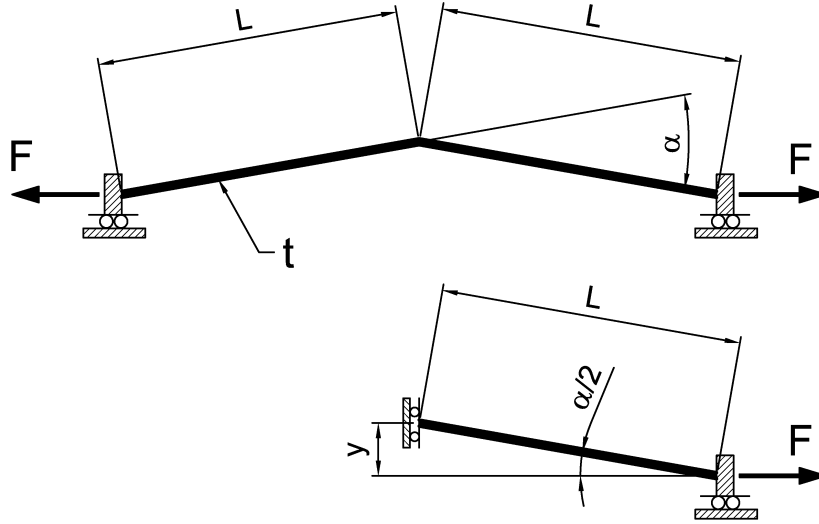
Yhtälössä (11)  $e$  on epäkeskisyyden ja  $t$  levyn paksuus. Tähän yhtälöön päästään helposti soveltamalla perinteistä palkkiteoriaa kuvan 24 mukaiseen rakenteeseen.



Kuva 24. Aksiaalinen sovitusrvirhe.

### 5.1.2.2 Kulmavirhe

Kulmavirhettä esiintyi kaikissa aksiaalisesti kuormitetuissa tapauksissa. Osassa tapauksissa sitä ei otettu pienenä huomioon, mutta varsinkin ristiliitoksissa ja poikittaisissa voimaa kantamattomissa liitoksissa kulmavirheen vaikutus oli varsin suuri ja niinpä päädyttiin tarkastelemaan sen vaikutusta tuloksiin. Kuvassa 25 on esitetty tutkituissa koesauvoissa olevan kulmavirheen periaatteellinen kuva. Koska sauvat olivat symmetrisiä, voidaan tarkastella tästä vain puolikasta kuvan 25 mukaisesti.



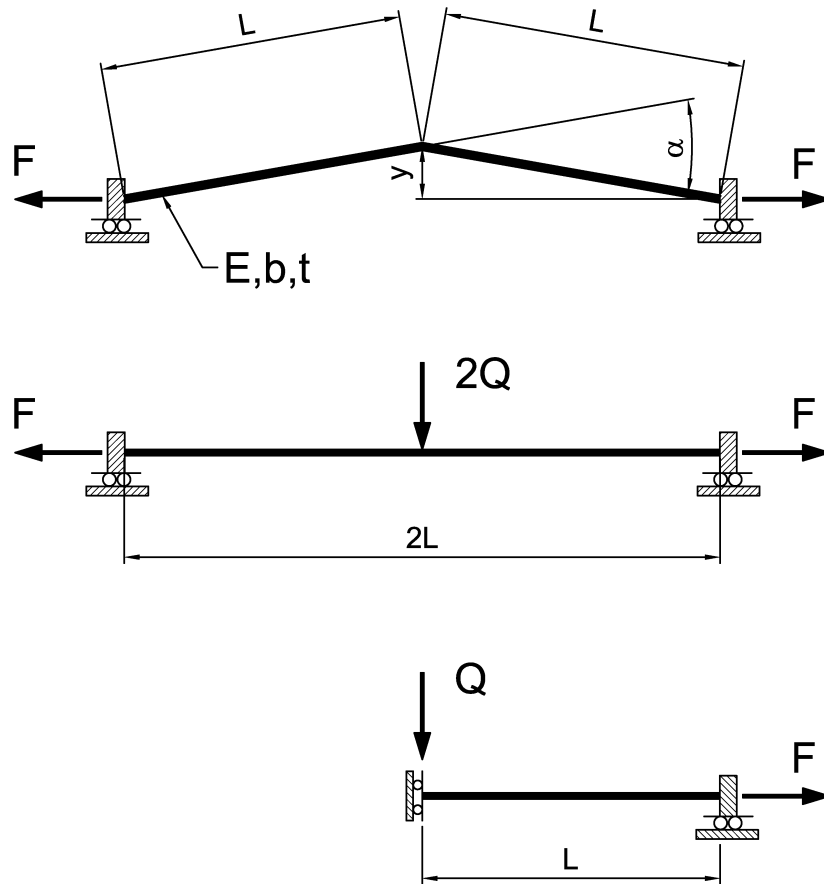
Kuva 25. Koesauvassa olevan kulmavirheen periaatekuva.

Tälle tapaukselle voidaan johtaa esimerkiksi elementtimenetelmällä palkkielementtiä käyttäen (liite 6) yhtälön (12) mukainen  $k_{m,\alpha}$ -kerroin.

$$k_{m,\alpha} = 1 + \frac{3y}{t} \quad (12)$$

Yhtälössä (12)  $t$  on levyn paksuus ja  $y = L \cdot \sin(\alpha/2)$ . Tätä yhtälöä voidaan käyttää hyväksi suunnittelutöissä sen ollessa varsinkin ohuilla levynpaksuuksilla konservatiivinen. Ohuilla levynpaksuuksilla koesauvan oikeeneminen vetävän voiman vaikutuksesta on melko suurta, mikä pienentää kerrointa. Tässä tutkimuksessa käytetyt levynpaksuudet olivat suurimmillaan viisi millimetriä, joten oli tarvetta ottaa tämä ilmiö huomioon muuttamalla  $k_m$ -kerrointa hieman. Rakenne voidaan kuvan 26 mukaisesti idealisoida taivutetuksi ja vedetyksi sauvaksi, jonka taipumalle  $v$  voidaan kirjoittaa differentiaaliyhtälö.

$$v'''' - \frac{F}{EI}v'' = 0 \quad (13)$$



Kuva 26. Kulmavirheellisen rakenteen idealisointi taivutetuksi ja vedetyksi sauvaksi.

Ratkaisemalla yhtälö (13) saadaan poikkeuttavan voiman  $Q$  kohdalla olevalle taivutusmomentille  $M$  määritettyä yhtälö, joka sijoitettuna jännityksen palkkiteorian mukaiseen yhtälöön  $\sigma = F/A + M/W$  antaa yhtälön (14) mukaisen  $k_m$ -kertoimen.

$$k_{m,\alpha} = 1 + \frac{3y \tanh(\beta)}{t \beta} \quad (14)$$

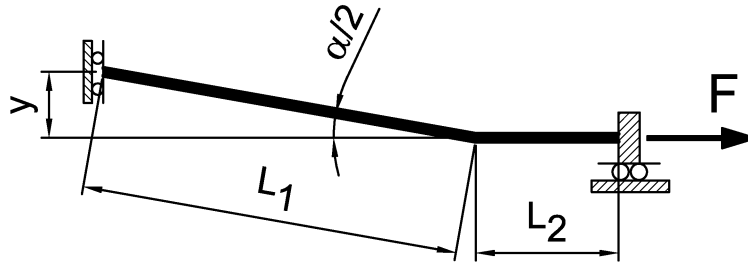
Yhtälössä (14)  $y$  ja  $t$  ovat samat kuin yhtälössä (12). Tekijä  $\beta$  saadaan yhtälöstä (15).

$$\beta = \frac{L}{t} \sqrt{\frac{3\sigma_{nim}}{E}} \quad (15)$$

Yhtälössä (14) termin  $\tanh(\beta)/\beta$  voidaan katsoa ottavan vetävän voiman vaikutuksen huomioon ja se on aina pienempi kuin yksi. Tällöin onkin yleensä konservatiivista olla ottamatta termiä huomioon. Liitteessä 7 on esitetty tarkemmin differentiaaliyhtälön ratkaiseminen ja tämän kertoimen johto.

Voimaa kantamattoman poikittaisen rivin tapauksessa koesauvoja oikaistiin kavennuksen kohdalta, jotta kiinnityksen aiheuttama alkujännitys saataisiin eliminoitua. Itse koesauva kuitenkin kiinnitettiin väsytykskehän kiinnitysleukoihin kauempaa kuin taitekohta, jolloin rakenne oli periaatteessa kuvan 27 mukainen.





Kuva 27. Oikaistun koesauvan periaatekuva.

Jos momenttivarren  $y$  laskemiseksi käytettäisiin pituutta  $L_1$  (vastaa kuvan 25 mukaista rakennetta), olisi yhtälön (12) mukaista kerrointa sovellettaessa jännityksen arvo liian pieni. Toisaalta jos käytettäisiin yhdistettyä pituutta, tulisi  $y$  liian suureksi ja sitä kautta myös  $k_m$  liian suureksi. Elementtimenetelmää käyttäen (palkkielementti, liite 8) saadaan  $k_m$ -kertoimelle yhtälö (16).

$$k_{m,\alpha} = 1 + \lambda \frac{3y}{t} \quad (16)$$

Kerroin  $\lambda$  on tavallaan pituuden korjauskerroin, joka ottaa huomioon muuttuneesta pituudesta aiheutuvan taivutusjäykkyyden muutoksen ja se voidaan laskea yhtälöstä (17). Momenttivarsi  $y = L_1 \sin(\alpha/2)$ .

$$\lambda = \left( 1 + \frac{L_2}{L_1 + L_2} \right) \quad (17)$$

Yhtälö (16) ei ota vielä huomioon yhtälön (14) mukaista vetävän voiman oikaisevaa vaikutusta ja on siten konservatiivinen. Kuitenkin jos yhtälöissä (14) ja (15) käytettäisiin pituutta  $L_1 + L_2$ , saataisiin liian suuri kertoimen  $k_m$  arvo. Toisaalta saadaan liian pieni arvo, jos pitäydytään pelkästään pituudessa  $L_1$  (siis sama tapaus kuin kuvassa 25). Tässä tapauksessa sovellettiin korjauskerrointa  $\lambda$  myös yhtälöihin (14) ja (15) korvaamalla pituus  $L$  pituudella  $\lambda L_1$ , jolloin saatiin yhtälö (18).

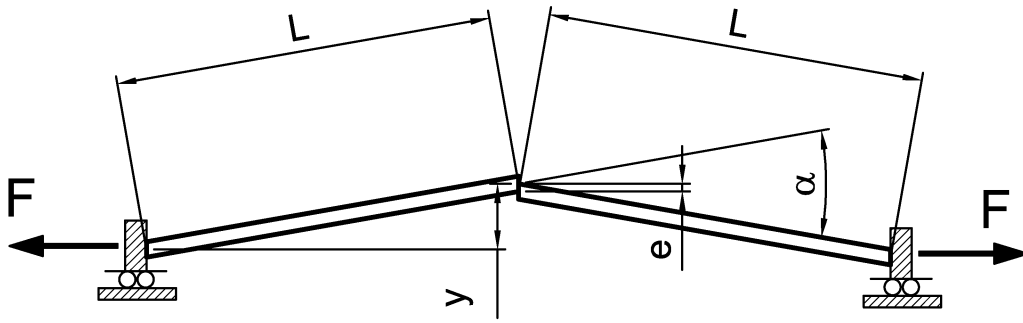
$$k_{m,\alpha} = 1 + \frac{3y}{t} \frac{\tanh(\lambda\beta)}{\beta} \quad (18)$$

Momenttivarsi  $y$  lasketaan kuten yhtälön (16) tapauksessa.

### 5.1.2.3 Aksiaalisen sovitusrvirheen ja kulmavirheen yhteisvaikutus

Aksiaalisen sovitusrvirheen ja kulmavirheen (kuva 28) yhteisvaikutus voidaan ottaa huomioon yhtälön (19) avulla.

$$k_{m,e\alpha} = k_{m,e} + k_{m,\alpha} - 1 \quad (19)$$



Kuva 28. Aksiaalinen sovitusvirhe ja kulmavirhe

#### 5.1.2.4 Venymäliuskan jännityksen ekstrapolointikerroin epäkeskisyyttä, kulmavirhettä tai molempia sisältävissä tapauksissa

Koska kaikissa koekappaleissa käytettiin venymäliuskoja tulosten kontrolloimiseksi (ei luotettu pelkästään voiman näyttöön), on kätevämpää käyttää venymäliuskan tietoja hyväksi määrittäessä paikallista nimellistä jännitystä. Tällä tavoin esimerkiksi todelliset reunaehdot (esim. kiinnitys) tulevat automaattisesti mukaan tulokseen. Venymäliuskaa ei kuitenkaan voi laittaa rajaviivalle, joten venymäliuskan näyttämän perusteella laskettu jännityksen arvo täytyy jollain tapaa ekstrapoloida rajaviivalle. Yksi mahdollinen keino on käyttää FE-analyysiä ja tällä tavoin määrittää kerroin  $k_L$ . Tämä vaatisi kuitenkin mallin jokaiselle koekappaleelle, ellei sitten käytetä jotain keskimääräistä arvoa epäkeskisyydelle tai kulmavirheelle. FE-analyysistä saatava tulos on kuitenkin osaavan analyysoijan kyseessä ollessa tarkin, mihin laskennallisin keinoin päästään.

Tässä tutkimuksessa kuitenkin päädyttiin käyttämään edellä esitettyjä  $k_m$ -kertoimia ja tavanomaista palkkiteorian mukaisia tuloksia  $k_L$ -kertoimen määrittämiseksi. Lähtökohdana oli koesauvan jännityksen  $\sigma(x)$  laskeminen venymäliuskan kohdalla (liuska matkan  $x$  päässä rajaviivasta) palkkiteorian avulla. Tällöin ekstrapolointikerroin voidaan laskea yhtälöstä (20).

$$k_L = \frac{\sigma(0)}{\sigma(x)} = \frac{k_m \sigma_{nim}}{\sigma(x)} \quad (20)$$

Kuvan 24 mukaisessa rakenteessa (aksiaalinen sovitusvirhe) voidaan rajaviivalta matkan  $x$  päässä olevan liuskan kohdalla oleva jännitys laskea yhtälöstä (21).

$$\sigma(x) = \left( 1 + \frac{3e}{t} \left( 1 - \frac{3x}{2L} \right) \right) \sigma_{nim} = k_{m,ex} \sigma_{nim} \quad (21)$$

Liuskan ekstrapolointikerroin on silloin

$$k_{L,e}(x) = \frac{k_{m,e}}{k_{m,ex}} = 1 + \frac{9ex}{2tL + 6eL - 9ex} \quad (22)$$

Kuvan 26 tapauksessa (kulmavirhe) differentiaaliyhtälön ratkaisusta saadaan taivutusmomentille (liite 7) lauseke, joka puolestaan voidaan muuntaa yhtälön (23) mukaiseen muotoon.

$$M_{\alpha}(x) = \frac{Fy}{2\beta} ((\tanh(\beta)\cosh(\kappa x) - \sinh(\kappa x))) \quad (23)$$

Termeillä  $\beta$  ja  $\kappa$  on yhtälön (24) mukainen yhteys.

$$\kappa = \frac{2\beta}{L} = \frac{2}{t} \sqrt{\frac{3\sigma_{nim}}{E}} \quad (24)$$

Näin ollen tässä tapauksessa liuskan kohdalla (kohdassa  $x$ ) olevaksi jännitykseksi saadaan yhtälön (25) mukainen jännitys.

$$\sigma(x) = \left( 1 + \frac{3y}{t\beta} (\tanh(\beta)\cosh(\kappa x) - \sinh(\kappa x)) \right) \sigma_{nim} = k_{m,\alpha x} \sigma_{nim} \quad (25)$$

Ottaen huomioon yhtälöt (14) ja (20) saadaan ekstrapolointikertoimeksi

$$k_{L,\alpha}(x) = \frac{\beta t + 3y \tanh(\beta)}{\beta t + 3y (\tanh(\beta)\cosh(\kappa x) - \sinh(\kappa x))}. \quad (26)$$

Kuvan 27 mukaisessa tapauksessa (taitettu rakenne, kulmavirhe) jännitys kohdassa  $x$  saadaan yhtälöstä (27) ja ekstrapolointikerroin yhtälöstä (28) soveltaen kerrointa  $\lambda$ . Termien  $y$  ja  $\beta$  laskemisessa käytetään pituutta  $L_1$ .

$$\sigma(x) = \left( 1 + \frac{3y}{t\beta} (\tanh(\lambda\beta)\cosh(\kappa x) - \sinh(\kappa x)) \right) \sigma_{nim} \quad (27)$$

$$k_{L,\alpha}(x) = \frac{\beta t + 3y \tanh(\lambda\beta)}{\beta t + 3y (\tanh(\lambda\beta)\cosh(\kappa x) - \sinh(\kappa x))} \quad (28)$$

Aksiaalisen sovituserheen ja kulmavirheen yhteisvaikutus voidaan ekstrapolointikertoimessa  $k_L$  ottaa huomioon siten, että lasketaan kertoimien  $k_{m,e}$  ja  $k_{m,\alpha}$  avulla yhtälöstä (19) kerroin  $k_{m,e\alpha}$  ja vastaavasti kertoimien  $k_{m,ex}$  ja  $k_{m,\alpha x}$  avulla kerroin  $k_{m,e\alpha x}$ . Tällöin  $k_{L,e\alpha}$  saadaan näiden suhteesta, yhtälö (29).

$$k_{L,e\alpha}(x) = \frac{k_{m,e\alpha}}{k_{m,e\alpha x}} = \frac{k_{m,e} + k_{m,\alpha} - 1}{k_{m,ex} + k_{m,\alpha x} - 1} \quad (29)$$

Sijoittamalla eri  $k$ -kertoimet tämä voidaan esittää myös yhtälön (30) muodossa (kuvan 28 mukainen rakenne).

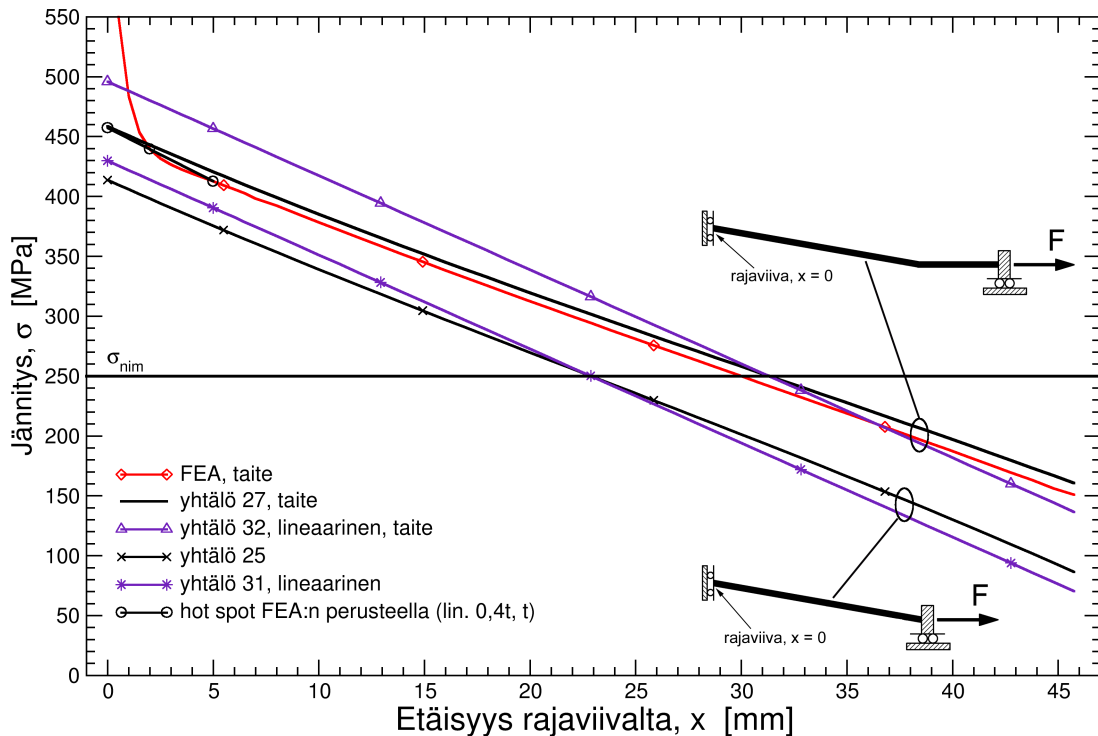
$$k_{L,e\alpha}(x) = \frac{t\beta + 3e\beta + 3y \tanh(\beta)}{\beta t + 3e\beta \left( 1 - \frac{3x}{2L} \right) + 3y (\tanh(\beta)\cosh(\kappa x) - \sinh(\kappa x))} \quad (30)$$

### 5.1.2.5 Eri kulmavirhetapausten vertailua

Kuvassa 29 on piirretty jännitys matkan  $x$  funktiona sekä taittamattomalle koesauvalle että taitetulle koesauvalle laskien jännitys eri edellä esitetyillä tavoilla. Silloin kun oikeeneminen otetaan huomioon, käytetään yhtälöä (25) tapaukselle, jossa ei ole taitetta ja yhtälöä (27) tapaukselle, jossa taite on. Jos oikeenemista ei oteta huomioon, lasketaan jännitys taittamattomalle sauvalle yhtälöstä (31) ja taitetulle sauvalle yhtälöstä (32).

$$\sigma(x) = \left( 1 + \frac{3y}{t} \left( 1 - \frac{2x}{L} \right) \right) \sigma_{nim} \quad (31)$$

$$\sigma(x) = \left( 1 + \frac{3y}{t} \left( \lambda - \frac{2x}{L_1} \right) \right) \sigma_{nim} \quad (32)$$



Kuva 29. Kulmavirheellisen koesauvan jännitys eri malleilla laskien.  $L = L_1 = 45,76$  mm,  $L_2 = 26,7$  mm,  $t = 5$  mm,  $\alpha = 3,00^\circ$ ,  $\sigma_{nim} = 250$  MPa.

Kuvassa 29 on myös esitetty vertailun vuoksi FE-analyysin perusteella piirretty käyrä. Mallina oli tasomalli, johon oli mallinnettu koesauvan puolikas käyttäen  $a$ -mitalle arvoa  $a = 3$  mm. Elementteinä olivat nelisolmuiset tasovenymä-elementit ja laskenta suoritettiin geometrisesti epälineaarisisena. Muutoin elementtimalli vastasi analyttisten yhtälöiden mallia. Havaitaan, että yhtälön (27) ja FE-analyysin ero on venymäliuskan kohdalla ( $x = t$ ) varsin pieni, noin kaksi prosenttia. Ero johtuu pääasiassa siitä, että FEA-tuloksessa on mukana geometrinen epälinearisuus ja leikkausmuodonmuutos, kun taas yhtälö (27) ei niitä ota huomioon. FEA-käyrästä hot spot -pisteistä ekstrapoloitu tulos on käytännöllisesti katsoen sama kuin yhtälön (27) antama tulos. Kauempana ero hieman kasvaa ollen toisessa päässä ( $x = L_1$ ) noin kuusi prosenttia. Jos oikeene-

mista ei oteta huomioon (yhtälö (32)), saadaan noin yhdeksän prosenttia suu-  
rempi tulos paikalliselle nimelliselle jännitykselle  $\sigma_{pnim}$  verrattuna yhtälön (27)  
antamaan tulokseen.

### 5.1.3 S–N-käyrän määrittäminen

Väsytyiskoetulokset piirretään yleensä kaksoislogaritmiseen ( $\log_{10}$ ) asteikkoon,  
jolloin koetuloksia voidaan kuvata kohtalaisen hyvin yhtälöllä (33)

$$C = \Delta\sigma^m N, \quad (33)$$

missä  $C$  on väsymiskapasiteetti,  $\Delta\sigma$  jännitysvaihtelu,  $m$  suoran kulmakerroin ja  
 $N$  kestoikä. Kuvaajaa kutsutaan myös Wöhler-käyräksi. Kulmakertoimen arvo  
 $m = 3$  on osoittautunut hitsatuille rakenteille ominaiseksi arvoksi. Perusaineelle  
puolestaan käytetään kertoimen arvoa  $m = 5$ . Kerroin voidaan määrittää myös  
sovittamalla. Esimerkiksi lähteessä [30] on annettu ohjeet tämän tekemiseksi  
lineaarista regressiota käyttäen. Sovitus tapahtuu käyttäen hyväksi logaritmien  
ominaisuutta. Ottamalla yhtälön (33) molemmilta puolilta logaritmi ja vaihtamalla  
järjestystä saadaan yhtälö (34), joka kuvaa logaritmisella asteikolla suoraa (on  
siis muotoa  $y = b - mx$ ).

$$\log(N) = \log(C) - m \cdot \log(\Delta\sigma) \quad (34)$$

Sovittaminen onnistuu kätevästi myös esimerkiksi MathCAD-ohjelmalla slope-  
funktioita käyttäen (kerroin saadaan yhtälöllä  $m = -\text{slope}(\log(\Delta\sigma), \log(N))$ , missä  
 $\Delta\sigma$  ja  $N$  ovat vektoreita, jotka sisältävät koedatan).

S–N-käyrään liittyvä oleellinen termi on väsymisluokka FAT, joka kertoo kahden  
miljoonan kuormanvaihdon kohdalla väsymislujuuden, ts. jännitysvaihtelun, jolla  
kestoikä on  $2 \cdot 10^6$ . Väsymisluokka voidaan siis laskea yhtälöstä (33) antaen  
 $N$ :lle arvoksi  $2 \cdot 10^6$  ja ratkaisemalla  $\Delta\sigma$ , mikäli väsymiskapasiteetti  $C$  tunnetaan.  
Yksittäisille kokeille voidaan väsymisluokka laskea yhtälöstä (35), jos kulma-  
kerroin ensin kiinnitetään (esim.  $m = 3$ ).

$$FAT = \Delta\sigma \cdot \sqrt[m]{\frac{N}{2 \cdot 10^6}} \quad (35)$$

#### 5.1.3.1 Keskimääräisen väsymisluokan laskeminen

Keskimääräinen väsymisluokka voidaan laskea keskimääräisen väsymiskapa-  
siteetin  $C_m$  avulla yhtälöstä (36).

$$FAT_m = \sqrt[m]{\frac{C_m}{2 \cdot 10^6}} \quad (36)$$

Keskimääräinen väsymiskapasiteetti puolestaan voidaan laskea esimerkiksi yh-  
tälöstä (37)

$$C_m = 10^{\bar{N}_{\log} + m \bar{\Delta\sigma}_{\log}}, \quad (37)$$

missä

$\bar{N}_{\log}$  on kestoikien 10-kantaisten logaritmien keskiarvo,  $\frac{1}{n} \sum \log(N_i)$

$\bar{\Delta\sigma}_{\log}$  on jännitysvaihtelujen 10-kantaisten logaritmien keskiarvo,  $\frac{1}{n} \sum \log(\Delta\sigma_i)$

$m$  S–N-käyrän kulmakerroin

### 5.1.3.2 Karakteristisen väsymislukon laskeminen

Suunnittelua varten keskimääräisiin arvoihin tarvitaan turvamarginaalia. Näitä ”pienennettyjä” arvoja kutsutaan karakteristisiksi arvoiksi. Karakteristiset arvot ovat periaatteessa arvoja, joilla on 95 %:n selviytymistodennäköisyys (5 %:n todennäköisyys vaurioon) ja joihin liittyy keskiarvon ja keskihajonnan kaksipuolinen 75 %:n luotettavuusväli [30]. Karakteristinen arvo voidaan silloin laskea yhtälöstä (38).

$$x_k = x_m - k \cdot s \quad (38)$$

Termi  $x_m$  on keskiarvo ja  $s$  on keskihajonta. Ottaen huomioon, että keskiarvon todennäköisyysjakauma noudattaa  $t$ -jakaumaa ja varianssin todennäköisyysjakauma  $\chi^2$ -jakaumaa voidaan kerroin  $k$  laskea yleisesti yhtälöstä (39).

$$k = \frac{t_{(0,875;n-1)}}{\sqrt{n}} + \Phi_{0,95}^{-1} \cdot \sqrt{\frac{n-1}{\chi_{(0,875;n-1)}^2}} \quad (39)$$

Yhtälön (39) merkinnät:

- $t$  yksipuolinen  $t$ -jakautuma todennäköisyydelle  $p = 0,875$  vapausaste-luvulla  $n-1$
- $n$  testidatan lukumäärä
- $\Phi$  Gaussin normaalijakautuman tiheysfunktio 95 %:n ylittymistoden-näköisyydellä (yläindeksi  $-1$  tarkoittaa käänteisfunktioita)
- $\chi^2$   $\chi^2$ -jakautuma todennäköisyydelle  $p = 0,875$  vapausasteluvulla  $n-1$

Jos testidata voidaan muiden testien perusteella otaksua normaalijakautuneeksi tai jos koekappaleiden lukumäärä on suuri, voidaan  $\chi^2$ -jakauma jättää pois ja laskea kerroin  $k$  yhtälöstä (40), jota käytettiin tässä työssä.

$$k = \frac{t_{(0,875;n-1)}}{\sqrt{n}} + \Phi_{0,95}^{-1} = \frac{t_{(0,875;n-1)}}{\sqrt{n}} + 1,645 \quad (40)$$

Karakteristinen väsymiskapasiteetti voidaan laskea yhtälöstä (41).

$$C_k = 10^{\log(C_m) - k \cdot s} \quad (41)$$

Keskihajonta lasketaan tunnetusti yhtälöstä (42). Nyt vain käytetään väsymiskapasiteetin logaritmeja.

$$s = \sqrt{\frac{\sum (\log(C_m) - \log(C_i))^2}{n-1}} \quad (42)$$

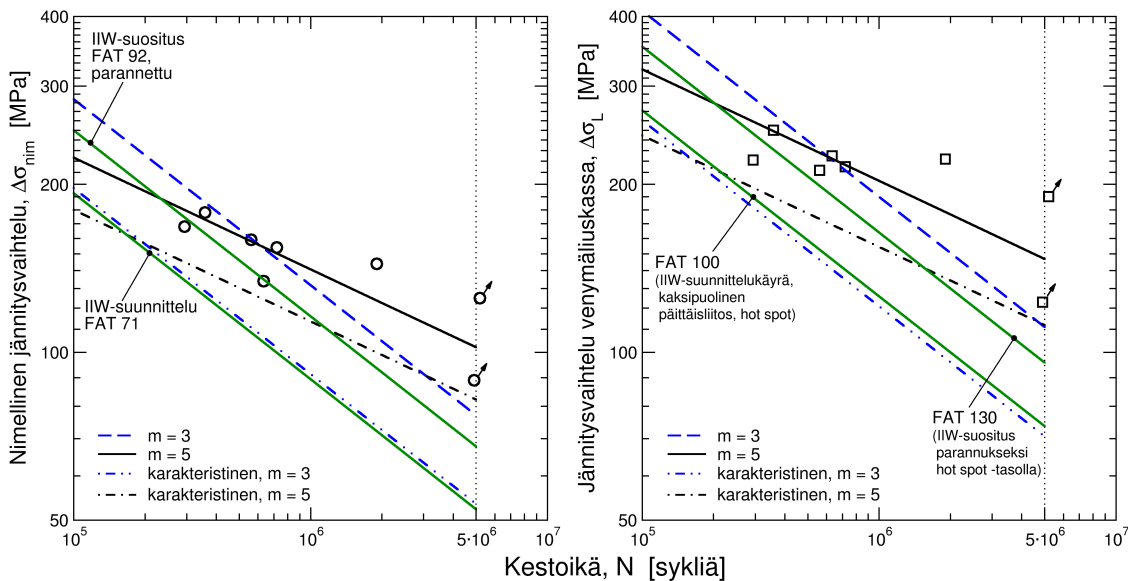
Karakteristinen väsymislukka saadaan lopulta yhtälöstä (43).

$$FAT_k = FAT = m \sqrt{\frac{C_k}{2 \cdot 10^6}} \quad (43)$$

## 5.2 Päittäisliitokset

Päittäisliitosten tuloksissa käytettiin suoraan venymäliuskojen arvoista laskettuja jännityksiä nimellisten jännitysten lisäksi, koska kulmavirheet ja epäkeskisyydet olivat melko pienet;  $k_L$ -kerroin oli luokkaa 1,02. Toisaalta koekappaleiden epäkeskisyys vaihteli leveyden matkalla siten, että toisessa reunassa epäkeskisyys saattoi olla jopa erimerkkinen. Tällaista koesauvaa kuormitettaessa aksiaalisella vedolla syntyy siihen momenttipari (bimomentti), joka pyrkii vääntämään sauvaa pituusakselin ympäri. Tästä johtuen rajaviivalla oleva jännitys on jonkin verran epämääräinen, minkä takia päädyttiin käyttämään liuskan perusteella laskettuja arvoja. Näin menetellen tulos on kuitenkin tässä tapauksessa varmalla puolella.

Kuvassa 30 on esitetty tämän koesarjan väsytyiskoetulokset sekä nimellisen että venymäliuskoihin perustuvan jännityksen mukaan ja koetulosten perusteella lasketut S–N-käyrät kulmakertoimilla  $m = 3$  ja  $m = 5$ .



Kuva 30. MIG-juotettujen päittäisliitosten väsytyiskoetulokset.

Vasemmanpuoleiseen kuvaan on myös piirretty IIW:n suunnittelukäyrä [30] yksipuoliselle päittäisliitokselle hitsatussa tilassa (FAT 71, jos juuri tarkastettu NDT:llä) ja IIW:n suositus silloin, kun hitsi on parannettu jollain IIW:n suosittamalla parannusmenetelmällä. Oikeanpuoleiseen kuvaan on puolestaan piirretty vastaavat käyrät kaksipuoliselle päittäisliitokselle hot spot -tasolla (yksipuoliselle ei suositusta ole). Koetulosten tilastollisen analyysin tulokset on esitetty taulukossa 16.

Nimellisten jännitysten tapauksessa koetulosten karakteristinen arvo kulmakertoimen arvolla  $m = 3$  menee hitusen IIW-suunnittelukäyrän yläpuolelle. Näyttää myös siltä, että kulmakerroin  $m = 5$  soveltuu paremmin koedataan kuin kerroin  $m = 3$ . Sovitus antoi kulmakertoimiksi  $m = 4,25$  (nimellinen) ja  $m = 3,57$  (liuska). Datapisteitä on kuitenkin varsin vähän, joten on syytä käyttää kiinnitettyä kulmakerrointa. Näin ollen näyttäisi siltä, että tapauksen väsymiskestävyys on nimellisten jännitysten perusteella tarkasteltuna ainakin yhtä hyvä kuin vastaavan hitsatun, jos sovelletaan kulmakerrointa  $m = 3$ . Venymäliuskan arvojen perusteella tarkasteltuna kulmakerroin  $m = 3$  antaa hieman pienemmän karakteristisen väsymislukun kuin mitä IIW-suunnittelukäyrä. Sovellettaessa kerrointa  $m = 5$ , saadaan karakteristiseksi väsymislukoksi kuitenkin vähän parempi kuin IIW:n parannelulle hitsille antama väsymislukka.

Ohuehkoilla levyillä MIG-juotettu päittäisliitos on siis tämän koeaineiston perusteella tarkasteltuna vähintään yhtä hyvä kuin vastaava hitsattu päittäisliitos. MIG-juotossa tämä liitostyyppi on jonkin verran sensitiivinen ilmaraon vaihtelulle, joten valmistuksessa tulisi olla huolellinen. Joskus saattaa nimittäin käydä niin, että koko railopinta ei kostu kunnolla ja juotos jää vajaaksi. Tällöin liitoksen väsymiskestävyys ei ole välttämättä kovin hyvä (ei myöskään staattinen kestävyys, mikäli virhe on suurehko). Tällainen ilmiö havaittiin koesarjan yhdessä koesauvassa, jolloin väsyminen tapahtui juuren puolelta. Rikkoontuneessa koesauvassa oli selkeästi nähtävissä se, että lisäaine ei ollut eräin osin ottanut kunnolla kiinni koko levyn paksuudelta. Tämän tyyppisissä koesauvoissa voi käydä myös niin, että sauva rikkoontuu keskeltä juotosta. Tämä herättää tietenkin kysymyksen: Mikä on juotteen väsymislujuus suhteessa perusaineen väsymislujuteen? Tämän koeaineiston perusteella ei vielä pysty tähän kysymykseen vastaamaan. Kuitenkin valtaosa koesauvoista rikkoontui rajaviivalta, joten liitos käyttäytynee vastaavan hitsatun liitoksen tavoin.

Taulukko 16. MIG-juotetun päittäisliitoksen koedatan tilastollisen analyysin tulokset.

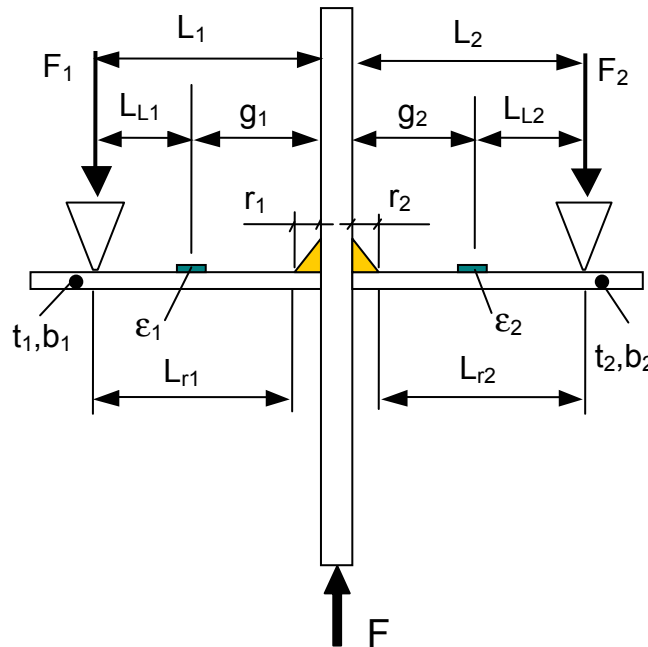
Jännityslaji	$n$	$m$	$C_m$	FAT <sub><math>m</math></sub>	$s$	$C_k$	FAT <sub><math>k</math></sub>
Nimellinen	6	3	$2,29 \cdot 10^{12}$	105	0,219	$7,64 \cdot 10^{11}$	73
		5	$5,54 \cdot 10^{16}$	123	0,215	$1,89 \cdot 10^{16}$	99
		4,25	$1,26 \cdot 10^{15}$	118	0,212	$4,36 \cdot 10^{14}$	92
Liuska	6	3	$6,84 \cdot 10^{12}$	151	0,270	$1,77 \cdot 10^{12}$	96
		5	$3,43 \cdot 10^{17}$	176	0,272	$8,75 \cdot 10^{16}$	134
		3,57	$1,46 \cdot 10^{14}$	160	0,270	$3,77 \cdot 10^{13}$	110



### 5.3 Voimaa kantavan T-liitoksen taivutusväsytykokeet

Voimaa kantavan T-liitoksen kokeissa oli ongelmia lähinnä siinä, että tarvittavat voimat olivat varsin pieniä ohuen materiaalin vuoksi. Ongelmaksi muodostui oikeastaan käytetyn väsytykkehän ohjaus, sillä minimivoima oli niin pieni, että se pyrki ajoittain hieman vaeltamaan. Tarvittavaa voimaa yritettiin kasvattaa laittamalla kaksi koekappaletta rinnan (kuvat 16 ja 17). Näin tehden kuviteltiin, että kehä pysähtyisi kun toinen puoliskoista rikki, sillä kehää ohjattiin voimaohjauksella. Näin ei kuitenkaan käynyt, vaan ainoastaan kuormat muuttuivat ja koe jatkui kunnes toinenkin puolisko meni rikki, ellei sitten tullut run-out-tulos. Katkaisurajana pidettiin  $5 \cdot 10^6$  sykliä. Näin ollen joissakin tapauksissa saatiin kaksi koetulosta kerralla. Mukaan otettiin ne jatkuneet kokeet, joissa venymäliuskan venymävaihtelu ei oleellisesti muuttunut toisen kappaleen rikkumisen jälkeen. Koska tuloksia talletettiin datatiedoston viiden minuutin välein, voitiin näiden tietojen perusteella laskea kestoikä ensiksi rikkuneelle kappaleelle. Kestoikä katsottiin kohdasta, jossa tapahtui oleellinen muutos venymäliuskan arvossa tai voimassa. Venymäliuska mittasi periaatteessa nimellistä jännitystä ja sitä kautta tukivoimaa, joten puolisko katsottiin rikkuneeksi kun venymän arvo oli pudonnut noin puoleen, ellei muuta selkeää kohtaa ollut havaittavissa.

Nimelliset jännitykset sarjoissa A ja C laskettiin venymäliuskojen arvojen perusteella ekstrapoloimalla ne rajaviivalle lineaarisesti tukietäisyyden ja liuskan etäisyyden (kuva 31) perusteella. Tällöin venymäliuskan venymästä saatiin nimellinen jännitys yhtälön (44) mukaisesti.

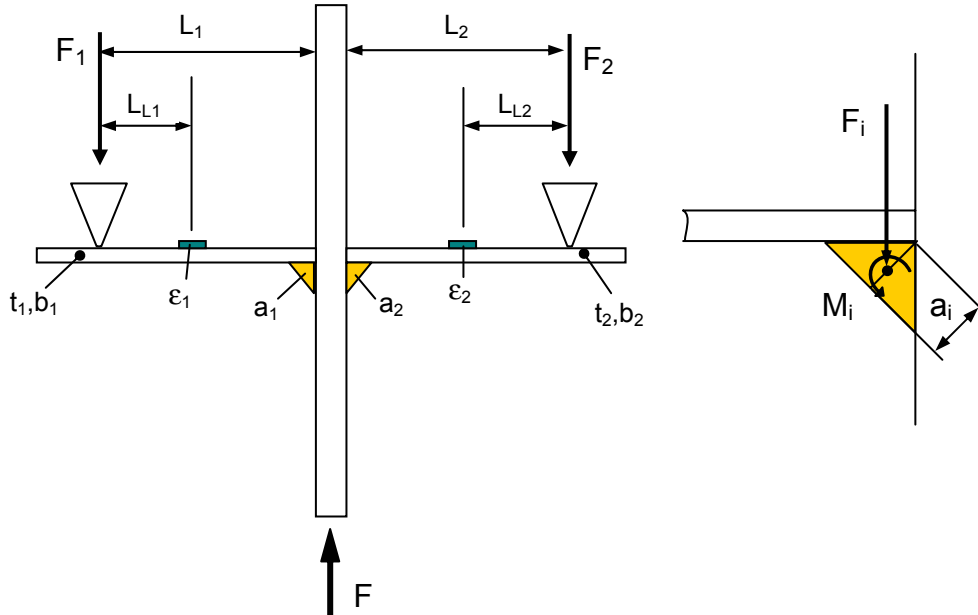


Kuva 31. Taivutetun koesauvan mittojen merkinnät.

$$\Delta\sigma_{nim,i} = E\Delta\varepsilon_i \frac{L_{ri}}{L_{Li}}, \quad i = 1,2 \quad (44)$$

Sarjan B osalta meneteltiin vastaavalla tavalla, mutta jännitykseksi määritettiin pienen a-mittaa vastaavan poikkileikkauksen taivutusjännitys. Tämä siksi, että

a-mitta saattoi olla jopa suurempi kuin levyn paksuus, jolloin levyn paksuuden käyttäminen nimellisen jännityksen määrittämiseksi olisi johtanut suureen hajontaan ja kovin suuriin jännitysarvoihin. Pienen a-mittaa vastaavan poikkileikkauksen nimellinen taivutusjännitys laskettiin yhtälöstä (45) käyttäen kuvan 32 mukaisia geometriatietoja ja venymäliuskasta saatua venymän arvoa.



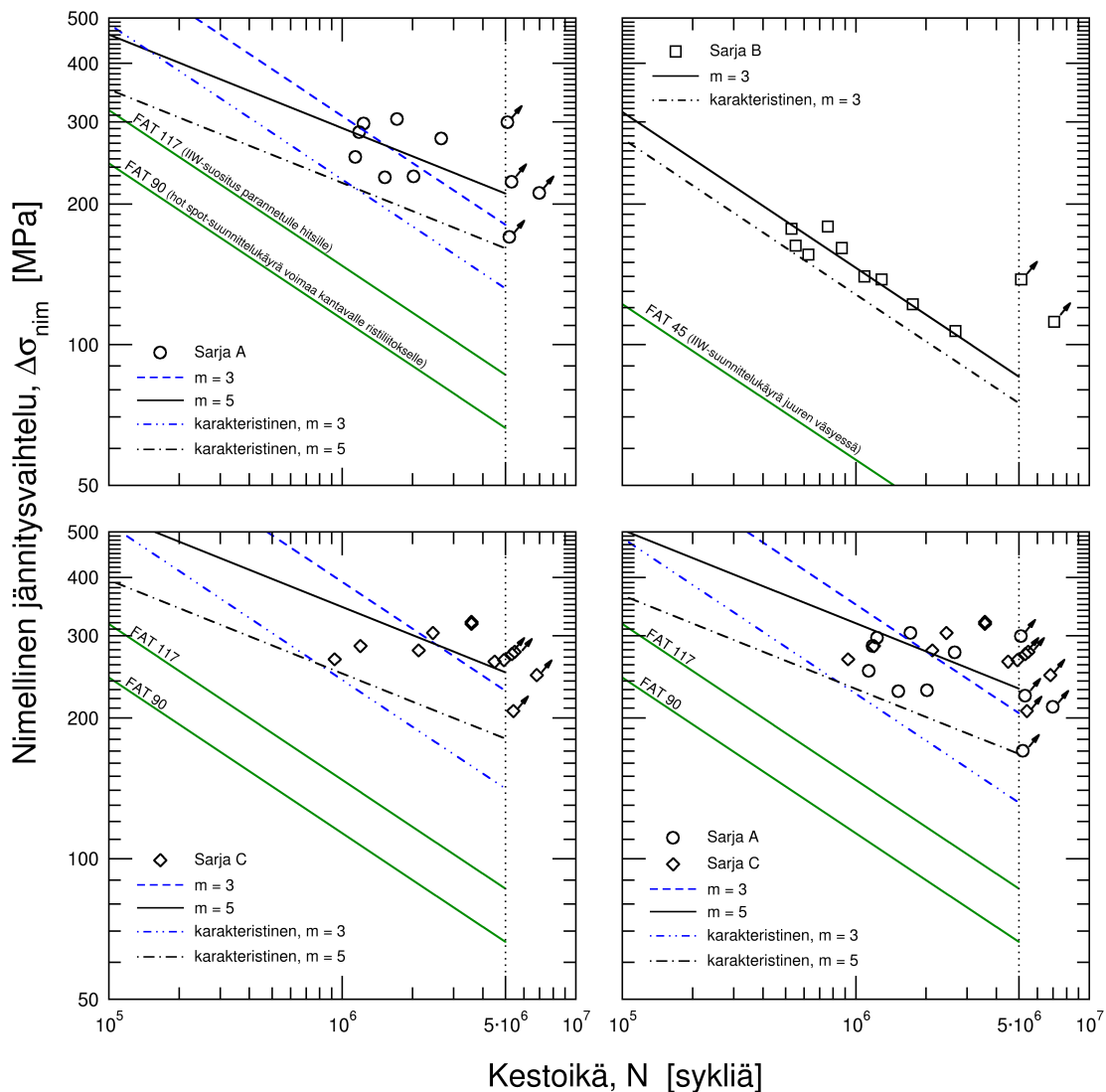
Kuva 32. Pienen a-mittaa vastaavan poikkileikkauksen taivutusjännityksen laskemisessa tarvittavat suureet sarjassa B.

$$\Delta\sigma_{ai} = \frac{\Delta M_i}{W_{ai}} = E\Delta\varepsilon_i \frac{t_i^2}{a_i^2} \frac{L_i - \frac{\sqrt{2}}{4} a_i}{L_{Li}}, \quad i = 1, 2 \quad (45)$$

Kuvassa 33 on esitetty kokeiden tulokset ja niihin sovitetut S–N-käyrät kiinniteillä kulmakertoimen arvoilla  $m = 3$  ja  $m = 5$ . Lisäksi on piirretty IIW:n suunnittelukäyrät ja suositukset parannetuille hitseille. IIW:n suosituksissa ei ole tämän tyyppistä taivutustapausta suoraan nimellisille jännityksille, joten tässä tapauksessa sovellettiin hot spot -tason suunnittelukäyrää, koska nyt nimellinen jännitys ja rakenteellinen hot spot -jännitys ovat käytännöllisesti katsoen samat. Hot spot -tason suunnittelukäyrässä ei erotella tuleeko jännitys taivutuksesta vai aksiaalisesta vedosta. Sarjojen tilastollisten analyysien tulokset on esitetty taukossa 17.

Sarja B oli erityyppinen kuin sarjat A ja C, koska tässä kuormitus oli siihen suuntaan, että väsyminen tapahtui juuren puolelta. Sarjan B kulmakerroin näyttää noudattavan hyvin arvoa  $m = 3$ . Koetulokset ovat myös hyviä, jos niitä verrataan juuren puolelta väsyvän pienen suunnittelukäyrään FAT 45. Koesarjan karakteristinen väsymislukka on 127 % tätä suurempi. Ilmeisestikin juottaminen on onnistunut hyvin siinä suhteessa, että juureen ei ole tullut mainittavia vikoja.

Sarjoissa A ja C sen sijaan hajonta on varsin suurta ja lineaarinen regressio ei anna järkevää sovitusta. Näin ollen  $m$ -arvo pitää laittaa kiinteäksi. Kerroin  $m = 5$  näyttäisi sopivan hieman paremmin kuin  $m = 3$ . Koska rajaviivalle ei MIG-juotossa juuri tule alkusäröjä, lienee käyttäytyminen enemmän perusaineen kaltaista. Näin ollen tämäkin puoltaa kertoimen  $m = 5$  käyttöä. Kuvasta 33 nähdään myös, että jännitysarvot ovat varsin korkeita, eli koekappaleiden väsymiskestävyys oli hyvä. Tässä suhteessa kokeissa olikin ongelmia, koska materiaalin myötöraja alkoi rajoittaa maksimijännityksen suuruutta. Sarjoissa A ja C kulmakerrointa  $m = 5$  käytettäessä karakteristinen väsymisluokka on reilusti suurempi kuin IIW-suositus parannelulle hitsille (samoin on laita myös kertoimella  $m = 3$ ). Suunnitteluarvoon nähden näissä koesarjoissa saavutettiin noin 110 % suurempi karakteristinen väsymisluokka. Kuorman ollessa taivutusta saadaan joskus parempia väsymiskestävyksiä kuin sen ollessa vetoa. Esimerkiksi LiHAVaisen suorittamissa kokeissa [33] UIT-käsitellyillä koesauvoilla taivutustapaus antoi noin 27 % suuremman karakteristisen väsymisluokan kuin veto.



Kuva 33. MIG-juotettujen taivutuskoekappaleiden väsytykskokeiden tulokset. Sarjassa A yksi pienen, kuormitus siten, että väsyminen tapahtuu rajaviivalta. Sarjassa B kuormitus siten, että väsyminen tapahtuu juuren puolelta. Sarjassa C kaksipuolinen pienen.

Osa sarjan C tuloksista lienee liian hyviä johtuen siitä, että alapuolella ollut pieni oli a-mitaltaan suurempi kuin yläpuolinen. Tällöin taivutusta vastustava todellinen poikkileikkaus yläpuolisen pienen rajaviivalla on suurempi kuin mitä laskelmissa on otaksuttu ja siten myös jännitystaso alhaisempi. Tämä lienee myös syynä siihen, että sovituksessa saatiin negatiivinen kulmakerroin, mikä ei tietenkään ole lainkaan järkevä tulos. Sarjalla A tätä ongelmaa ei kuitenkaan ollut, joten voidaan sanoa, että tämän tapauksen väsymislujuus on varsin korkea.

Taulukko 17. MIG-juotettujen taivutuskoekappaleiden koedatan tilastollisen analyysin tulokset. Sarja AC tarkoittaa sarjojen A ja C unionia.

Sarja	$n$	$m$	$C_m$	$FAT_m$	$s$	$C_k$	$FAT_k$
A	7	3	$2,94 \cdot 10^{13}$	245	0,192	$1,15 \cdot 10^{13}$	179
		5	$2,08 \cdot 10^{18}$	253	0,276	$5,38 \cdot 10^{17}$	193
		0,36	$1,15 \cdot 10^7$	134	0,135	$5,93 \cdot 10^6$	21
B	9	3	$3,12 \cdot 10^{12}$	116	0,083	$2,11 \cdot 10^{12}$	102
		2,99	$2,98 \cdot 10^{12}$	116	0,083	$2,01 \cdot 10^{12}$	102
C	8	3	$5,97 \cdot 10^{13}$	310	0,301	$1,41 \cdot 10^{13}$	192
		5	$4,93 \cdot 10^{18}$	301	0,341	$9,57 \cdot 10^{17}$	217
		-1,25	–	–	–	–	–
AC	15	3	$4,29 \cdot 10^{13}$	278	0,294	$1,14 \cdot 10^{13}$	179
		5	$3,29 \cdot 10^{18}$	277	0,358	$6,57 \cdot 10^{17}$	201
		-1,07	–	–	–	–	–

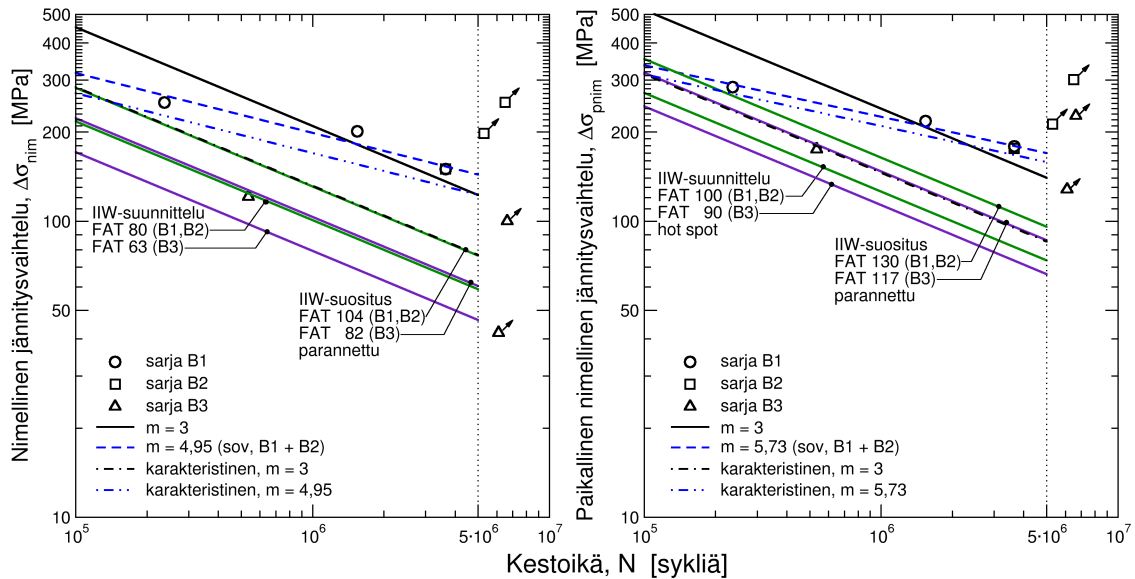
## 5.4 Ristiliitoksen väsytykokeet

Ristiliituskokeet olivat ensimmäiset aiheesta suoritettut kokeet ja niiden olikin tarkoitus olla pilottikokeita. Niinpä koesarjat olivat pieniä. Tulokset rohkaisivat kuitenkin tutkimaan aihetta lisää. Tässä oli juuri tarkoituksena tarkastella, so- piiko MIG-juotto väsymiskestävyyden parantamismenetelmäksi.

Koesauvoissa oli sarjoissa B1 ja B2 jonkin verran kulmavirhettä. Sarjassa B3 (voimaa kantava) tilanne oli sama, mutta sauvoissa oli myös epäkeskisyyttä. Kulmavirheen ja epäkeskisyyden vaikutus nimelliseen jännitykseen nähden oli melko suuri (jossakin tapauksessa jopa yli kaksinkertainen), joten koetulokset esitetään kuvassa 34 sekä nimellisen että paikallisen nimellisen jännityksen perusteella. Paikallinen nimellinen jännitys ekstrapoloitiin venymäliuskan antamasta arvosta edellä esitettyjä ekstrapolointikertoimia hyväksi käyttäen raja- viivalle paikalliseksi nimelliseksi jännitykseksi.

Kuvaan 34 on myös piirretty keskimääräiset ja sovitettut S–N-käyrät sekä vas- taavien tapausten IIW-suunnittelukäyrät ja -suositukset parannelulle hitsille. Taulukossa 18 on tilastollisen analyysin tulokset. Sovituksessa oli mukana vain sarjat B1 ja B2 yhdistettynä. Havaitaan taaskin, että kerroin  $m = 5$  näyttää sopi- van paremmin kuin  $m = 3$  (vaikka kerrointa  $m = 5$  ei ole piirretty kuvaan, voi- daan tämä päätellä sovitettujen kertoimien käyrien perusteella). Toisaalta data- pisteiden lukumäärä on niin pieni, että on syytä käyttää kiinnitettyä kulma- kerrointa. Kulmakerrointa  $m = 5$  tukee lisäksi sovituksesta saadut lähellä sitä olevat arvot.

Edelleen havaitaan, että väsymiskestävyys näyttää olevan aika paljon suurempi kuin vastaavan tapauksen IIW-suositus, varsinkin jos sovelletaan kulmakerointia  $m = 5$ . Parannus on tässä tapauksessa 77 % verrattuna hot spot -tason suunnittelukäyrään ja 85 % nimellisten jännitysten mukaan tarkasteltuna. Sarjan B3 yksi rikki saatu koekappale näyttää asettuvan suurin piirtein parannetun hitsin suosituskäyrälle. Toisaalta run-out-tuloksia saatiin myös suuremmilla jännitystasoilla, joten tässäkin tapauksessa väsymiskestävyys lienee ainakin yhtä hyvä.



Kuva 34. Ristiliitosten väsymiskoetulokset. Sarja B1 voimaa kantamaton, pelkkä MIG-juotto. Sarja B2 voimaa kantamaton, MAG-hitsaus alla ja MIG-juotto rajaviivalla. Sarja B3 voimaa kantava, pelkkä MIG-juotto.

Taulukko 18. MIG-juotettujen ristiliitosten koedatan tilastollisen analyysin tulokset. Sarjat B1 ja B2 on tässä yhdistetty.

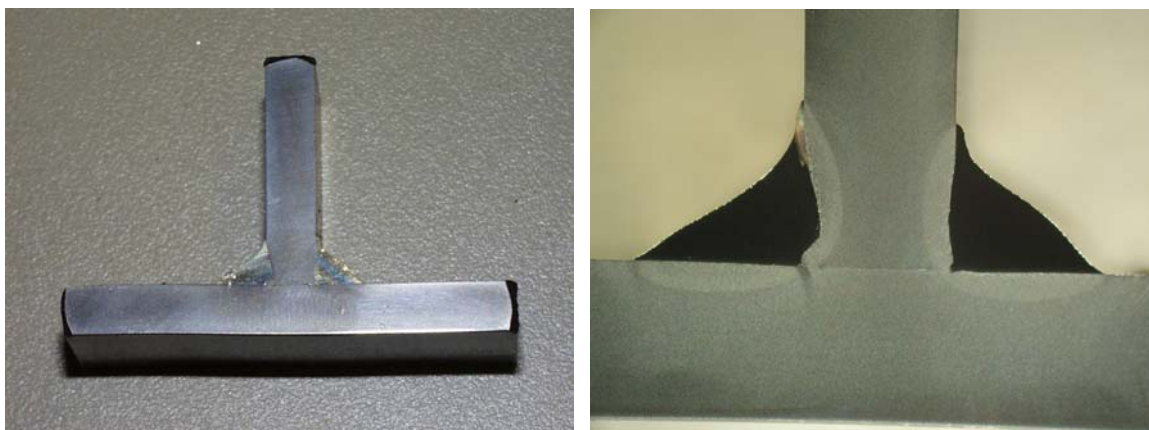
Jännityslaji	$n$	$m$	$C_m$	$FAT_m$	$s$	$C_k$	$FAT_k$
Nimellinen	4	3	$9,21 \cdot 10^{12}$	166	0,257	$2,28 \cdot 10^{12}$	104
		5	$3,11 \cdot 10^{17}$	173	0,144	$1,42 \cdot 10^{17}$	148
Paik. nim.	4	4,95	$2,40 \cdot 10^{17}$	173	0,144	$1,10 \cdot 10^{17}$	148
		3	$1,38 \cdot 10^{13}$	190	0,275	$3,10 \cdot 10^{12}$	116
Paik. nim.	4	5	$6,09 \cdot 10^{17}$	198	0,103	$3,48 \cdot 10^{17}$	177
		5,73	$3,05 \cdot 10^{19}$	200	0,074	$2,03 \cdot 10^{19}$	186

## 5.5 Voimaa kantamattoman, poikittaisen kiinnitysliitoksen vetoväsytyksokeet

Nämä kokeet päätettiin tehdä ristiliitostokokeiden tulosten rohkaisemana. Ajatuksena oli ensinnäkin tehdä suurempi koesarja ja toisaalta katsoa miten pelkästään MIG-juotettu liitos suhtautuu tapaukseen, jossa tavanomaisen hitsin rajaviivalle on lisätty ylimääräinen MIG-juotettu palko, jolloin MIG-juottoa käytetään

väsymiskestävyyden parantamismenetelmänä. Pelkkää MIG-juottoa käyttäen tehtyjen liitosten väsytestoetulokset lisäksi palvelevat itse menetelmän väsymiskestävyyden tutkimusta. Tämän tutkimuksen aikana kävi nimittäin ilmi, että julkaistuja tuloksia aiheesta ei ole mainittavasti saatavilla.

Kuvassa 35 on pelkkää MIG-juottoa käyttäen tehty liitos eräästä sarjan A koesauva-aihiosta leikattuna. Hyvin onnistunut juotos on siistin näköinen. Perusaine ei ole rajaviivalla sulanut yhtään eikä mitään rajaviivan alkusäröjä ole havaittavissa tarkemminkin tutkien. Lämpöä on kuitenkin tuotu niin paljon, että vasemman pienen juuren puolella perusaineen sulamista on tapahtunut.



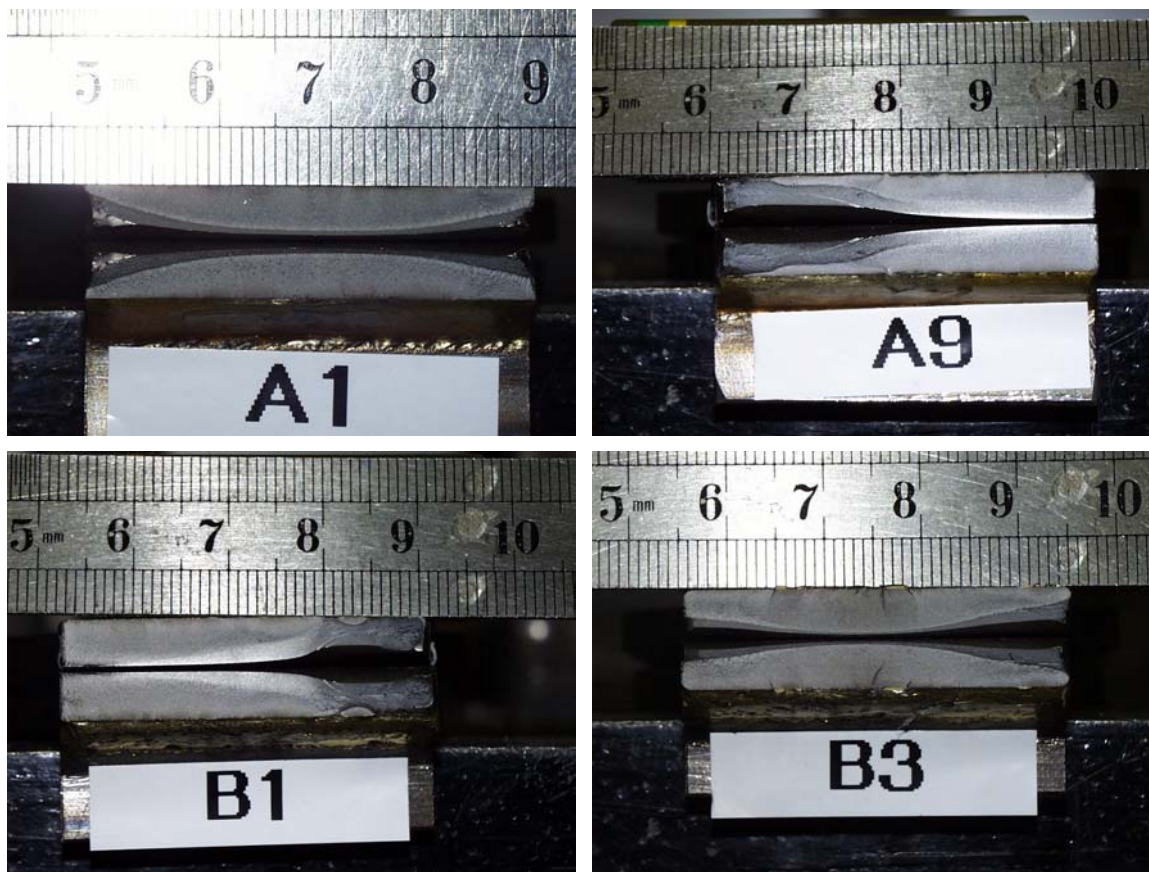
Kuva 35. MIG-juotettu voimaa kantamaton poikittainen kiinnityслиitos. Oikealla näkyy selkeästi, että rajaviivalla ei ole tapahtunut perusaineen sulamista. Juuren puolella sen sijaan näin on tapahtunut.

Kuvassa 36 puolestaan on eräästä sarjan B koesauva-aihiosta leikattu liitos. Alumiinipronssilisäaine näkyy kuvassa mustana. Tässäkään tapauksessa rajaviivalla ei ole tapahtunut mitään sulamista. Juuren puolella sen sijaan näin on käynyt, mikä entisestään parantaa tilannetta, koska tällöin hitsatessa hitsin rajaviivalle tulleet pienet alkusäröt häviävät, kuten tapahtuu esimerkiksi TIG-käsittelyssä.



Kuva 36. Liitos, jossa MAG-hitsin rajaviivalle on lisätty MIG-juottamalla ylimääräinen palko. Rajaviivalla ei näy perusaineen sulamista. Hitsin rajaviivalla on sen sijaan sulamista tapahtunut.

Kuvassa 37 on vielä esitetty muutama tyypillinen murtumapinta. Väsyminen tapahtui aina juotoksen rajaviivalta. Särö ydintyi välillä keskelle ja välillä vähän reunemmaksi.



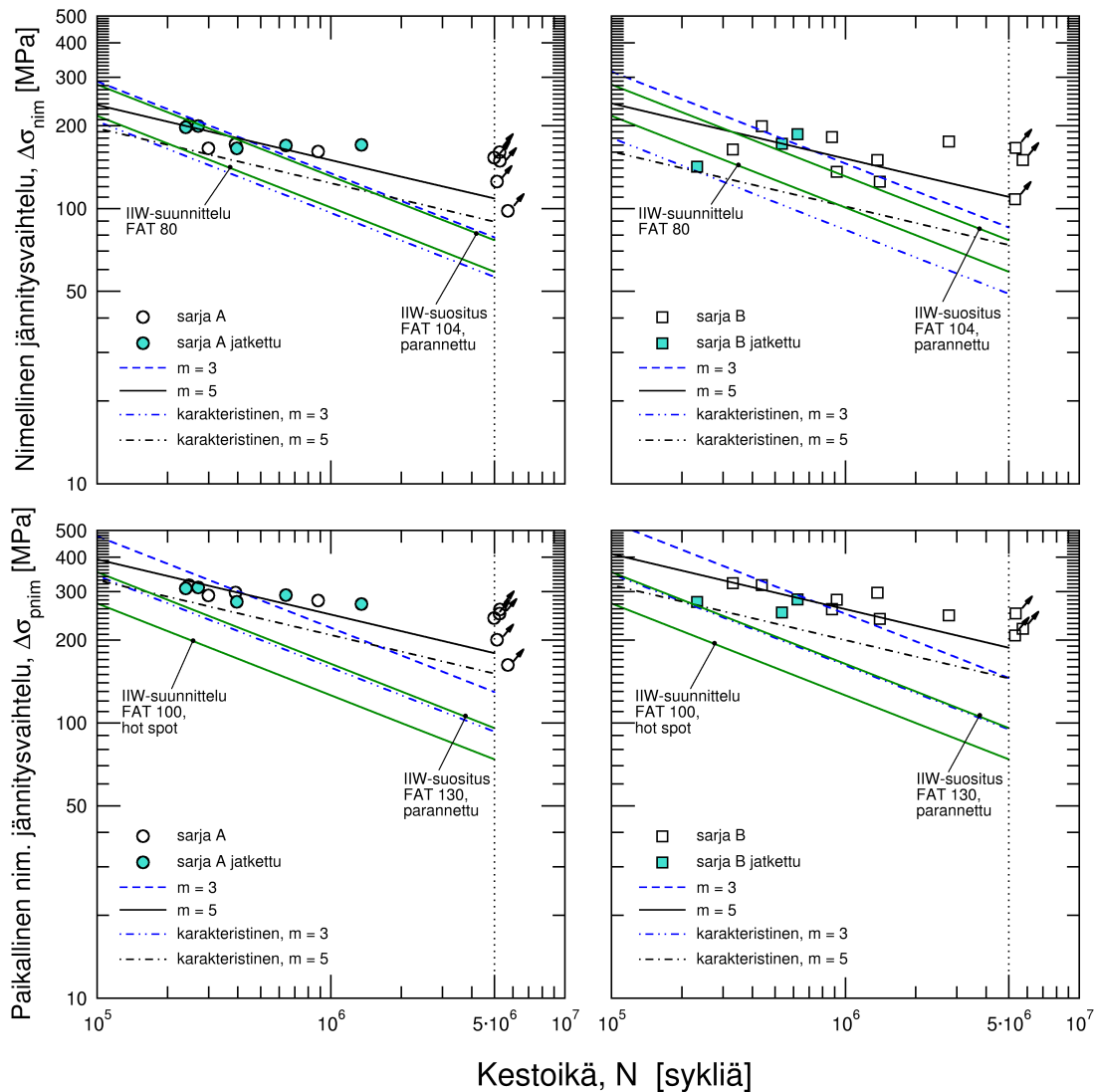
Kuva 37. Tyypillisiä rikkoontuneen sauvan murtopintoja kokeen jälkeen.

Koesauvoissa oli aika paljon kulmavirhettä, joka ohuehkon levyn kyseessä ollen vaikutti rajaviivan jännitystasoon paljon. Venymäliuskan näyttämä jännitystaso liuskan kohdalla oli keskimäärin yli puolitoistakertainen ja rajaviivalla vielä suurempi, sillä  $k_L$ -kertoimet olivat keskimäärin noin 1,07–1,1. Niinpä tulokset taas esitetään sekä nimellisen jännityksen perusteella että paikallisen nimellisen jännityksen perusteella. Tulokset sarjoille A ja B on esitetty kuvissa 38 ja 39. Tilastollisten analyysien tulokset on esitetty taulukossa 19.

Kuvassa 38 sarjan A nimellisiä jännityksiä käyttäen laadittu karakteristinen S–N-käyrä kulmakertoimella  $m = 3$  näyttää jäävän aavistuksen verran alemmaksi kuin IIW:n suunnittelukäyrä ja sarjan B vielä jonkin verran enemmän. Tässä täytyy kuitenkin muistaa se, että IIW:n käyrä sisältää kulmavirhettä vähemmän kuin tässä testatut koekappaleet, jotka sisälsivät sitä keskimäärin  $k_m = 1,65$  verran (sarjojen yhteinen keskiarvo  $k_{m,m} = 1,67$  ja mediaani  $k_{m,med} = 1,63$ ). Näin ollen näitä sarjoja tulisi verrata kahta tai kolmea luokkaa alempaan käyrään, jos otaksutaan, että IIW:n suunnittelukäyrä sisältää kulmavirhettä  $k_m = 1,2$  verran [30]. Kulmavirheen vaikutus riippuu aineenvahvuudesta ja useimmat tämän tyyppiset kokeet suoritetaan hieman paksummilla levyillä.

Kulmakerroin  $m = 5$  näyttää sopivan nimellisten jännitysten mukaiseen koedataan paremmin kuin kerroin  $m = 3$ . Tällöin molempien sarjojen karakteristinen väsymislukka on parempi kuin suunnittelukäyrän mukainen väsymislukka ollen sarjalla A 35 % korkeampi ja sarjalla B noin 11 %. Sarjan B hajonta on hieman suurempi kuin sarjan A, minkä takia sarjan B väsymislukka on alempi.

Tarkasteltaessa tuloksia paikallisen nimellisen jännityksen mukaan esitettynä on kiinteilläkin kertoimilla sovitetut karakteristiset käyrät IIW:n suunnittelukäyrää ylempänä. Kerroin  $m = 5$  näyttää sopivan koetuloksiin paremmin kuin kerroin  $m = 3$ . Kuitenkin jopa kertoimella  $m = 3$  karakteristinen väsymislukka on tässä tapauksessa lähes sama kuin IIW-suositus parannetuille hitseille, jolloin parannus olisi siis 30 %. Kerrointa  $m = 5$  sovellettaessa parannus on suunnittelukäyrään verrattuna sarjassa A 81 % ja sarjassa B 74 %.

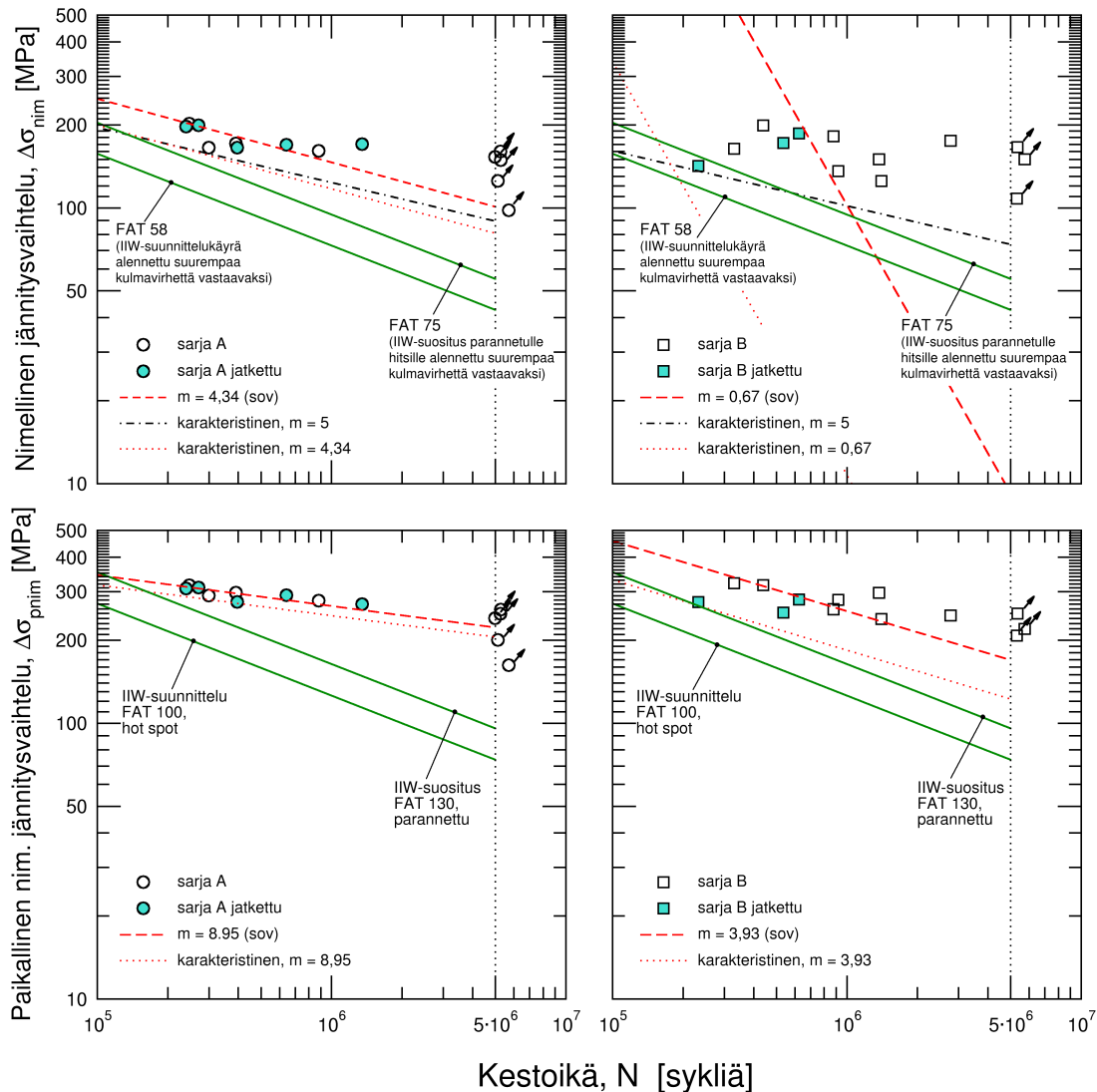


Kuva 38. MIG-juotettujen voimaa kantamattomien liitosten väsytkoetulokset. Ylärivillä nimellisen jännityksen mukaan ja alarivillä paikallisen nimellisen jännityksen mukaan. Testidataan on sovitettu kiinteät kertoimet  $m = 5$  ja  $m = 3$ . Sarjassa A pelkkä MIG-juotto ja sarjassa B alla MAG-hitsaus ja rajaviivalla MIG-juotto.

Kuvassa 39 on esitetty samat tulokset, mutta S–N-käyrät on esitetty sovitettujen kulmakertoimien mukaan laskien. Kuvaan on myös piirretty nimellisten jännitysten tapauksessa redusoidut suunnittelu- ja suosituskäyrät. Näitä käyriä on laskettu suhteessa 1,2/1,65, jolloin ne vastaavat koedatan suurempaa kulmavirhettä. Tällöin nähdään, että nimellisilläkin jännityksillä parannus suunnittelukäyrään nähden on huomattava, ja karakteristinen väsymislukka on korkeampi kuin suositus parannetulle hitsille. Redusoituun suunnittelukäyrään verrattuna



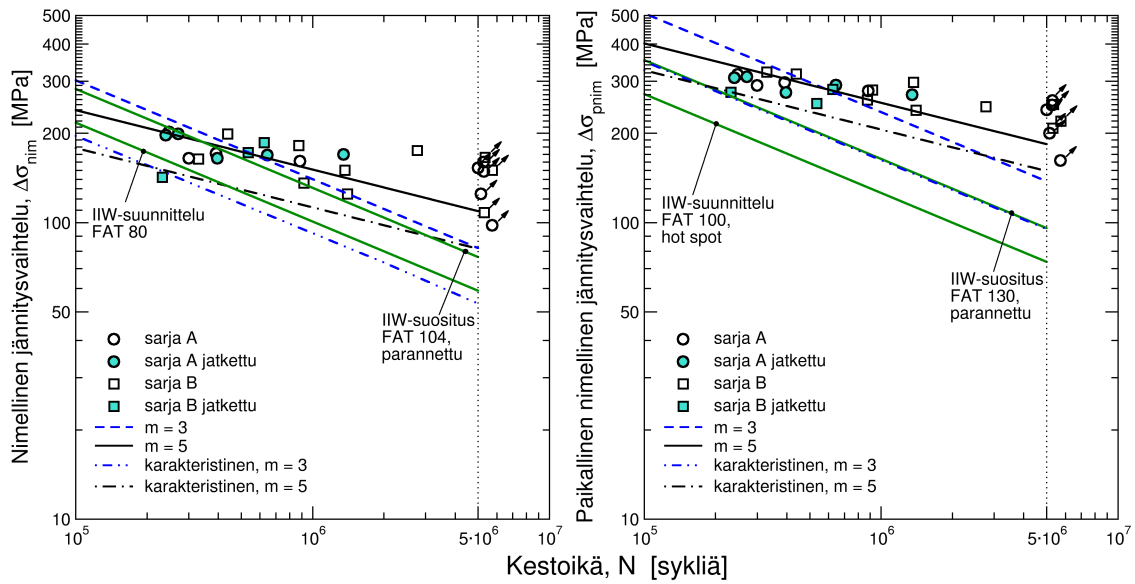
sarjan A karakteristinen väsymislukka on 86 % korkeampi ja sarjan B puolestaan 53 % ( $m = 5$ ).



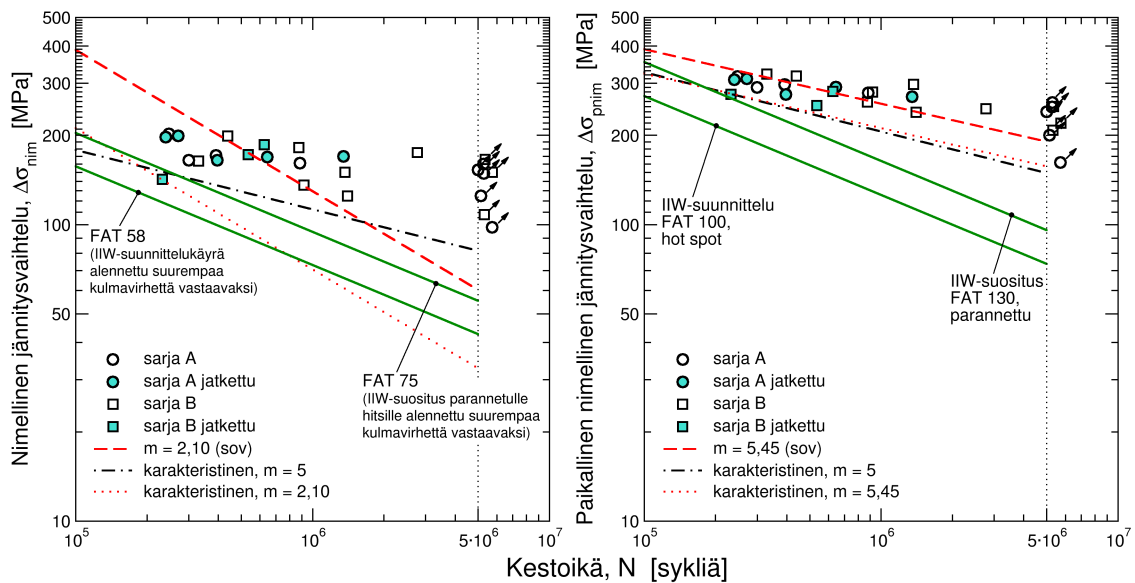
Kuva 39. MIG-juotettujen voimaa kantamattomien liitosten väsytyскоetulokset. Ylärivillä nimellisen jännityksen mukaan ja alarivillä paikallisen nimellisen jännityksen mukaan. Sovitetut  $m$ -kertoimet. Sarjassa A pelkkä MIG-juotto ja sarjassa B alla MAG-hitsaus ja rajaviivalla MIG-juotto.

Sarjassa B nimellisten jännitysten tapauksessa ei sovitusta näytä antavan lainkaan järkevää tulosta. Näin tapahtuu joskus käytettäessä lineaarista regressiota kulmakertoimen sovituksessa varsinkin silloin, jos kulmakertoimen kaltevuus on loiva tai koedata on muuten jakautunut siten, että selkeää korrelaatiota ei logaritmisissa arvoissa ole. Sovituksessa nimittäin  $\log(N)$  on muuttujana  $y$  ja  $\log(\Delta\sigma)$  muuttujana  $x$ . Sarjassa B yksi hyvä koetulos saa aikaan sen, että koedata näyttää olevan aika vaakasuorassa asennossa.

Paikallisia nimellisiä jännityksiä käytettäessä sen sijaan hajonta on pienempää ja sovituskkin näyttää antavan järkevän näköisen tuloksen. Sovitetun kulmakertoimen perusteella esitetty karakteristinen käyrä on IIV:n suunnittelukäyrän yläpuolella ja toisaalta sarjalla A suora on huomattavasti loivempi.



Kuva 40. MIG-juotettujen voimaa kantamattomien liitosten väsytyскоетulokset. Molemmat sarjat A ja B yhdessä. Kiinteät  $m$ -kertoimet. Sarjassa A pelkkä MIG-juotto ja sarjassa B alla MAG-hittaus ja rajaviivalla MIG-juotto.



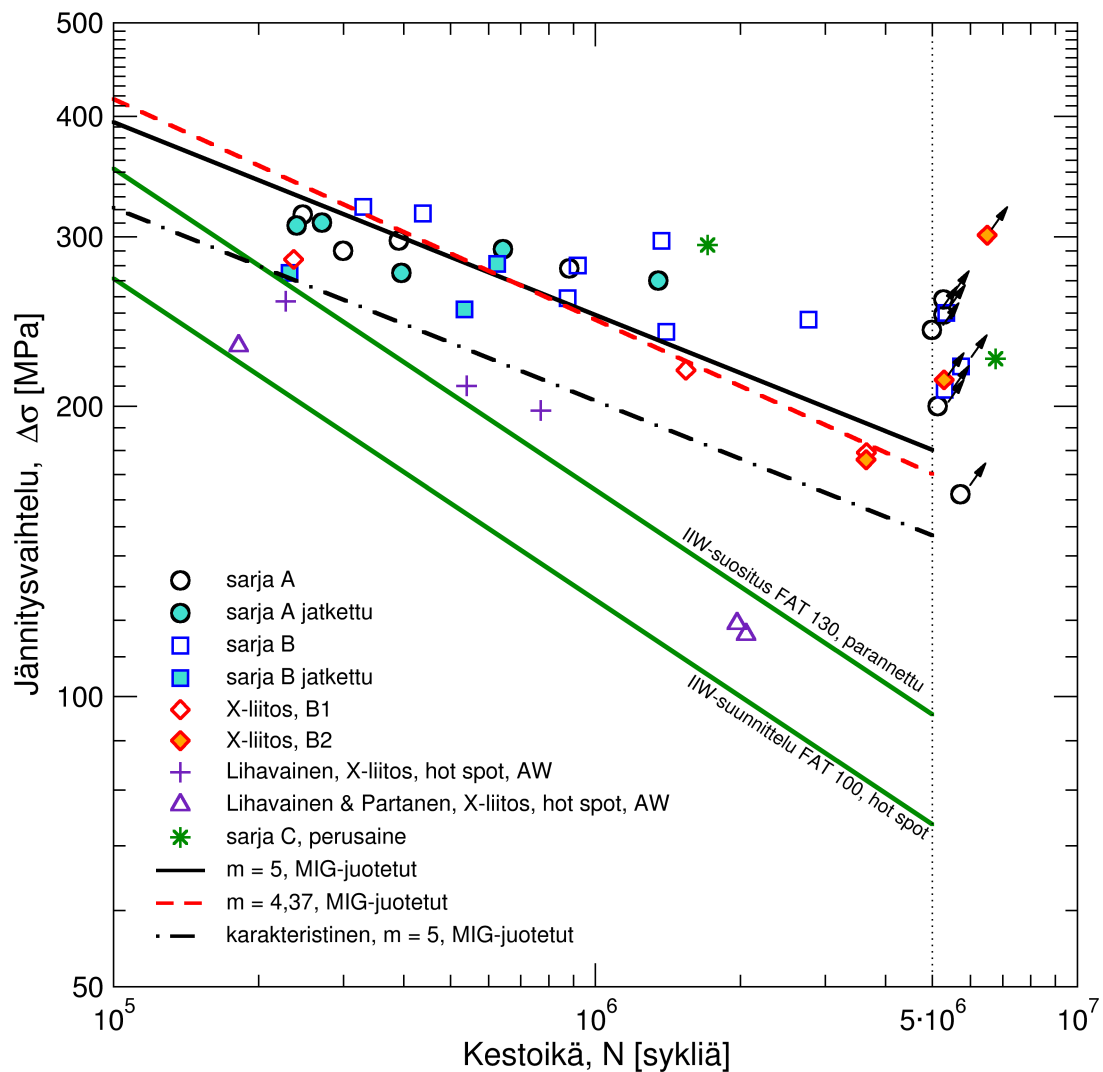
Kuva 41. MIG-juotettujen voimaa kantamattomien liitosten väsytyскоетulokset. Molemmat sarjat A ja B yhdessä. Sovitetut  $m$ -kertoimet. Sarjassa A pelkkä MIG-juotto ja sarjassa B alla MAG-hittaus ja rajaviivalla MIG-juotto.

Kuvissa 40 ja 41 on puolestaan esitetty molemmat koesarjat yhdessä ja niihin sovitetut S–N-käyrät. Nimellisten jännitysten mukaan tuloksia esittäessä karakteristinen käyrä jää jonkin verran IIW-suunnittelukäyrän alapuolelle. Tässä pätee sama, mikä jo edellä todettiin koedataan sisältyvän kulmavirheen suuruudesta. Samoin sovitettu kulmakerroin jää kovin pieneksi, eikä ole järkevän suuruinen.

Esitettäessä tulokset paikallisen nimellisen jännityksen perusteella, jolloin siis kulmavirheen vaikutus on poistettu, näyttää kulmakerroin  $m = 5$  sopivan hyvin

koedataan. Sovituskin antaa arvoksi  $m = 5,45$ . Molemmat sarjat ovat varsin samankaltaisia, joten yhdistettynä saadaan jo sen verran koepisteitä, että sovituskin voi pitää kohtuullisen luotettavana.

Kuvassa 42 on vielä esitetty kooste, jossa on mukana myös ristiliitosten koedata ja muutama LTY:ssä tehty vastaavan tyyppisen tapauksen koetuloks. MIG-juotetut liitokset näyttävät kestävän paremmin kuin tässä datassa olevat hitsatut tapaukset. Kuvassa on esitetty myös kaksi pelkälle perusaineelle tehdyn koeken tulosta. Kulmakerroin  $m = 5$  näyttää sopivan koetuloksiin hyvin. MIG-juotettujen liitosten karakteristinen väsymislukka näyttää olevan selkeästi korkeampi kuin IIW:n suositus parannelle hitsille. Suunnittelukäyrään verrattaessa parannus on 77 %.



Kuva 42. MIG-juotettujen ristiliitosten ja voimaa kantamattomien liitosten tulokset koottuna yhteen vertailudatan kanssa. Jännitysvaihtelu on nimellinen paikallinen jännitysvaihtelu tai vertailudatan osalta hot spot -jännitys. Kolmiolla merkityt pisteet ovat lähteestä [36]. IIW-käyrien kulmakerroin  $m = 3$ .

Taulukko 19. MIG-juotettujen voimaa kantamattomien poikittaisten kiinnitysliitosten koedatan tilastollisten analyysien tulokset. Sarja AB tarkoittaa sarjojen A ja B unionia ja sarja ABX tarkoittaa sarjaa, jossa edellisen lisäksi myös sarjat B1 ja B2 ovat mukana.

	Sarja	$n$	$m$	$C_m$	$FAT_m$	$s$	$C_k$	$FAT_k$
nimellinen jännitys	A	9	3	$2,42 \cdot 10^{12}$	107	0,210	$8,97 \cdot 10^{11}$	77
			5	$7,58 \cdot 10^{16}$	131	0,204	$2,88 \cdot 10^{16}$	108
			4,34	$2,46 \cdot 10^{15}$	125	0,203	$9,42 \cdot 10^{14}$	100
	B	10	3	$3,11 \cdot 10^{12}$	116	0,356	$5,88 \cdot 10^{11}$	66
			5	$8,10 \cdot 10^{16}$	132	0,429	$1,09 \cdot 10^{16}$	89
			0,67	$2,20 \cdot 10^7$	36	0,321	$4,90 \cdot 10^6$	4
	AB	19	3	$2,76 \cdot 10^{12}$	111	0,293	$7,57 \cdot 10^{11}$	72
			5	$7,85 \cdot 10^{16}$	131	0,333	$1,81 \cdot 10^{16}$	98
			2,10	$2,69 \cdot 10^{10}$	93	0,288	$7,53 \cdot 10^9$	51
paikallinen nimellinen jännitys	A	9	3	$1,09 \cdot 10^{13}$	176	0,211	$4,01 \cdot 10^{12}$	126
			5	$9,29 \cdot 10^{17}$	215	0,181	$3,94 \cdot 10^{17}$	181
			8,95	$5,15 \cdot 10^{27}$	246	0,154	$2,49 \cdot 10^{27}$	227
	B	10	3	$1,54 \cdot 10^{13}$	198	0,276	$4,24 \cdot 10^{12}$	128
			5	$1,17 \cdot 10^{18}$	226	0,277	$3,20 \cdot 10^{17}$	174
			3,93	$2,89 \cdot 10^{15}$	214	0,272	$8,07 \cdot 10^{14}$	154
	AB	19	3	$1,31 \cdot 10^{13}$	187	0,252	$4,29 \cdot 10^{12}$	129
			5	$1,05 \cdot 10^{18}$	221	0,235	$3,71 \cdot 10^{17}$	179
			5,45	$1,32 \cdot 10^{19}$	225	0,235	$4,68 \cdot 10^{18}$	186
	ABX	23	3	$1,32 \cdot 10^{13}$	188	0,250	$4,44 \cdot 10^{12}$	130
			5	$9,54 \cdot 10^{17}$	217	0,235	$3,43 \cdot 10^{17}$	177
			4,37	$2,79 \cdot 10^{16}$	210	0,231	$1,02 \cdot 10^{16}$	167

## 6 JOHTOPÄÄTÖKSET

MIG-juotetuilla liitoksilla näyttää olevan varsin hyvä väsymiskestävyys varsinkin tutkitussa taivutustapauksessa ja voimaa kantamattomassa poikittaisessa ripaliitostapauksessa. Pelkästään MIG-juottaen tehdyt liitokset olivat väsymiskestävyydeltään suurin piirtein samanlaisia kuin jälkikäsittelemielessä MAG-hitsauksen päälle tehdyt tapaukset. Ero oli noin neljä prosenttia karakteristisessa väsymisluokassa kulmakertoimella  $m = 5$  pelkän MIG-juoton eduksi. Kummankin edeltä mainitun tapauksen väsymislujuus näyttää olevan 70–80 % parempi kuin vastaavan hitsatun rakenteen väsymislujuus verrattuna IIW:n hot spot -tason suunnittelukäyrään. Päittäisliitokset näyttävät myös olevan parempia tai ainakin vähintään yhtä hyviä (riippuen sovellettavasta kulmakertoimen arvosta) kuin vastaavat hitsatut päittäisliitokset verrattaessa tuloksia IIW:n suunnittelukäyriin.

MIG-juotettujen koesauvojen koedata näyttää noudattavan paremmin S–N-käyrän kulmakerrointa  $m = 5$  kuin tavanomaista hitsatulle rakenteelle käytettävää kerrointa  $m = 3$ . Liitos toiminee tällöin enemmän perusaineen kaltaisesti, jolloin särön ydintymisvaihe on pidempi kuin vastaavan hitsatun tapauksen.

Osassa koesauvoja (ristiliitos ja voimaa kantamaton poikittainen kiinnitysliitos) kulmavirhe oli aika suuri aiheuttaen rajaviivalle paikallisen nimellisen jännityksen, joka oli keskimäriin 1,65-kertainen verrattuna nimelliseen jännitykseen (joissakin tapauksissa jopa kaksinkertainen). Tämä on varsin paljon, sillä esimerkiksi IIW:n S–N-suunnittelukäyrä sisältää vastaavilla liitoksilla kulmavirhettä  $k_m = 1,2$  verran. Päittäisliitoksilla IIW:n suunnittelukäyrät sisältävät kulma- ja muita virheitä  $k_m = 1,3$  verran ja ristiliitoksilla  $k_m = 1,45$  verran. Tässä tutkimuksessa kulmavirheellä oli selkeä korrelaatio väsymisluokkaan, mikäli käytettiin nimellisiä jännityksiä.

Lineaarinen regressio ei aina anna järkeviä tuloksia sovitettaessa koedataa kulmakertoimen  $m$  määrittämiseksi. Tämä tuli esiin varsinkin taivutetuilla koe-kappaleilla, joissa tulosten hajonta oli suurta. Samoin tämä tuli esille voimaa kantamattomien liitosten sovituksessa silloin, kun käytettiin nimellisiä jännityksiä.

Tämän tutkimuksen koetulokset antavat selviä viitteitä siitä, että menetelmä voisi toimia yhtenä varteenotettavana väsymiskestävyuden parantamiskeinona. Vaaditaan kuitenkin vielä lisätutkimuksia, jotta menetelmää voisi soveltaa luotavaisin mielin tuotantokäyttöön parantamismenetelmänä. Vaihtoehtoisena liittämismenetelmänä sitä jo jonkin verran tuotantokäytössä esiintyykin.

## 7 JATKOTUTKIMUKSEN TARVE

Tämä tutkimus ei antanut vastatusta kaikkiin ennen sitä ja sen kuluessa esiin nousseisiin kysymyksiin. Esimerkiksi lisätutkimuksien tulisi selvittää, onko kupari-pohjaista lisäainetta käytettäessä kuparin raerajalle tunkeutuminen ongelma, mikäli MIG-juottoa käytettäisiin väsymiskestävyyden parantamiskeinona. Tässä yhteydessä suoritetuissa kokeissa ei ongelmaa näyttänyt olevan, mutta on vielä avoin kysymys, miten asian laita on todellisissa rakenteissa, joissa hitsauksen aiheuttamat jäännösjännitykset ovat suurempia.

Edelleen selvittämättömäksi jäänyt asia on se, miksi MIG-juotto onnistui kunnolla laserleikkaukseen tarkoitettulla levyllä, mutta ei tavallisella levyllä. Voiko menetelmää käyttää väsymiskestävyyden parantamiskeinona materiaalin ollessa yleisesti käytettyä perusterästä, jos ei aikaan saada kunnollista jälkeä ja juohevaa liittymistä perusaineeseen? Toisaalta osassa kokeita juotoksen laatu ei ollut kovinkaan hyvän näköistä, mutta silti väsymiskestävyys oli aika hyvä. Lisäksi vastausta kaivataan siihen, miten juottaminen saadaan onnistumaan kunnolla tavalliseen perusteräkkeen.

Tässä tutkimuksessa käytetyt aineenvahvuudet olivat ohuita. Tästä johtuen taitavuuden osuus jännityksissä oli huomattavan suuri, joskus jopa puolet lopullisesta paikallisesta nimellisestä jännitystasosta. Lisätutkimuksien tulisi selvittää, saadaanko paksummilla aineenvahvuuksilla samansuuntaiset tulokset. Tällöin kyseeseen tulisi lähinnä MIG-juoton käyttö parantamismenetelmänä, koska pelkkänä hyvän väsymiskestävyyden omaavana liittämismenetelmänä se ei välttämättä ole paksulla levyillä kovin taloudellinen.

Voimaa kantavilla liitoksilla juotoksen lujuus on staattisin kokein ohuilla levyillä osoitettu riittäväksi perusaineeseen nähden ainakin tavanomaisen lujuuden omaavilla teräksillä. Väsymiskestävyydestä sen sijaan ei vielä ole riittävästi tietoa. Mielenkiintoinen kysymys tässä on se, väsykö voimaa kantava päittäisliitos aina rajaviivalta eli perusaineen puolelta vai käykö siten, että toisinaan väsyminen tapahtuu itse juotoksessa. Todennäköistä on, että joskus näin käy, sillä varsinkin sinkittyjä levyjä juotettaessa saattaa helposti tulla huokosia yms. Tosin sama tilanne on tavanomaisesti hitsatulla liitoksellakin. Näin ollen tulisi selvittää, onko MIG-juotettu voimaa kantava liitos alttiimpi väsymään ”keskeltä juotosta” kuin tavanomainen hitsi.

Lopuksi tarvetta olisi myös tehdä lisäkokeita tässä tutkimuksessa olleilla tapauksilla, varsinkin ristiliitosten ja voimaa kantamattomien poikittaisten pienaliitosten tapauksissa, jotta saataisiin kattavampi aineisto ja parempi varmuus menetelmän soveltumisesta ehdotettuun käyttötarkoitukseen.

## LÄHDELUETTELO

- [1] Raekorpi, P. Vaihtoehtona kaarijuotto sinkittyjen levyjen hitsaukseen. Valokaari 2/2000, s. 5–7.
- [2] Garriott, F.E. Versatile filler alloy. Welding Journal, vol. 48, no. 8. 1969, s. 648–659.
- [3] Birchfield, J.R. Automakers move to robots and automatic operations. Welding Design and Fabrication, vol. 57, no. 10, 1984, s. 41–48.
- [4] Grycko, M.J. GMA braze welds put wrecked cars back on the road. Welding Design and Fabrication, vol. 58, no. 2, 1985, s. 52–53, 55.
- [5] Jaguar Cars LTD. The XJ40, Jaguar's stylish winner for the 1990's. Welding & Metal Fabrication, vol. 54, no. 7, 1986, s. 302, 304, 306–307, 310.
- [6] Weber, M. Die neuzeitliche Karosseriefertigung mit Robotern. Schweißen und Schneiden, vol. 40, no. 9, 1988, s. 450–453.
- [7] Hughes, R.V., Dryburgh, G., Garbett, S. Plasma braze welding in auto-body production at Jaguar Cars. Welding & Metal Fabrication, vol. 63, no. 3, 1995, s. 110–111.
- [8] Dilthey, U., Bachem, H. MSG-Löten von verzinkten und legierten Stählen als alternative Fügetechnik im Fahrzeugbau. DVS Berichte no. 209. Welding and cutting 2000, Proceedings, Nürnberg, 27–29 September, 2000, s. 211–215.
- [9] Brazing instead of welding [verkkodokumentti]. Itävalta: Fronius International GmbH, Fronius Weld & Vision, 7<sup>th</sup> edition, March 2001 [viitattu 2002-09-30]. Saatavissa: [http://www.fronius.com/weld.vision/march2001/loeten\\_statt\\_schweissen\\_ww\\_golf.htm](http://www.fronius.com/weld.vision/march2001/loeten_statt_schweissen_ww_golf.htm).
- [10] Perhoniemi, P., Koskinen, A., Kotamies, J. MIG-juoton käyttö kolariautojen korjauksessa. Hitsaustekniikka 4/2002, s. 15–18.
- [11] Hackl, H. MIG brazing of galvanised light-gauge sheets. Welding Review International, vol. 15, no. 4, 1996, s. 122–123.
- [12] Lahnsteiner, R., Hackl, H. MIG-Löten von verzinkten Dünnsblechen. DVS Berichte no. 186. Welding and cutting '97, Proceedings, Essen, 10–12 September 1997, s. 221–224.
- [13] Ebbinghaus, M., Hackl, H., Lahnsteiner, R. MIG-Brazing of galvanized sheet metals and profiles. IIW Doc. XII-1501-97, San Francisco, 1997, 17 s.
- [14] Hackl, H. MIG-Löten von verzinkten Dünnsblechen und Profilen. Schweißen und Schneiden, vol. 50, no. 6, 1998, s. 351–354.
- [15] Leino, K. Kaarijuotto – vaihtoehto sinkittyjen ohutlevyjen hitsaukselle. Hitsaustekniikka 5/1996, s. 33–35.
- [16] Leino, K., Hiltunen, E. MIG-juotto haastaa hitsauksen. Hitsaustekniikka 1/2001, s. 12–17.

- [17] Gärtner, W. MIG brazing of galvanised light-gauge sheets [verkkodokumentti]. Itävalta: Fronius International GmbH, Fronius Weld & Vision, 4<sup>th</sup> edition, September 1999 [viitattu 2002-09-30]. Saatavissa: [http://www.fronius.com/weld.vision/september1999/mig\\_brazing.htm](http://www.fronius.com/weld.vision/september1999/mig_brazing.htm)
- [18] A flexible joining process made possible by high-tech MIG-brazing [verkkodokumentti]. Itävalta: Fronius International GmbH, Fronius Weld & Vision, 6<sup>th</sup> edition, October 2000 [viitattu 2002-06-13]. Saatavissa: [http://www.fronius.com/weld.vision/october2000/mig\\_loeten.htm](http://www.fronius.com/weld.vision/october2000/mig_loeten.htm).
- [19] Rohde, H., Katic, J., Paschold, R. ESAB pulsed gas-shielded metal arc brazing of surface-coated sheets. Svetsaren, no. 3, 2000, s. 20–23.
- [20] MIG WELD GmbH Deutschland. Ihr Schlüssel zum Perfekten Schweißen von Alu- und Kupferlegierungen, Produktkatalog, 2001, 36 s.
- [21] Herold, H., Streitenberger, M., Zwickert, H. MIG-Lötverbindungen – Besonderheiten und Eigenschaften. DVS Berichte no. 204. Welding and cutting '99, Proceedings, Weimer, 15–17 September, 1999, s. 173–182.
- [22] White, D., Jones, J. Process Modeling with Neural Networks for Pulsed GMAW Braze Welds. JOM, vol. 49, no. 9, 1997, s. 49–53.
- [23] Frings, A., Stöckel, S. Vollmechanisches Metall-Inertgashartlöten von feuerverzinktem Feinblech aus Stahl. Schweißen und Schneiden, vol. 32, no. 12, 1986, s. 624–629.
- [24] Korhonen et al. Kaarijuoton sovellukset ohutlevytuotteiden valmistuksessa – Työhygienia: ilman epäpuhtaudet, melu, säteily. Lappeenrannan alue-työterveyslaitos, projektiraportti. Lappeenranta, 2000, 45 s + liitt. 77 s.
- [25] Frings, A., Stöckel, S. Vollmechanisches Metall-Inertgashartlöten von feuraluminiertem Feinblech aus Stahl. Schweißen und Schneiden, vol. 41, no. 11, 1989, s. 577–583.
- [26] Joseph, A. et al. Variable Polarity Improves Weld Brazing of Galvanized Sheet. Welding Journal, October, 2001, s. 36–40.
- [27] Haagensen, P. J. Improving the fatigue strength of welded joints. In: Almar-Naess, A. (toim.) Fatigue Handbook. Offshore steel structures, Tapir 1985, s. 259–289.
- [28] Kirkhope, K. J. et al. Weld detail fatigue life improvement technologies. Part 1: review, Marine Structures, vol. 12, no. 6, 1999, s. 447–474.
- [29] Haagensen, P. J., Maddox, S. J. IIW recommendations on post weld improvement of steel and aluminium structures. IIW document XIII-1815-00, revised 13 June 2002, 42 s.
- [30] Hobbacher, A. Recommendations for fatigue design of welded joints and components. IIW document XIII-1965-03 / XV-1127-03, update February 2003, draft for development, 141 s.
- [31] Kado, S. et al. Influence of the conditions in TIG dressing on the fatigue strength in welded high tensile strength steels. IIW document XIII-771-75, 1975.
- [32] American Welding Society. Structural welding — steels code. AWS D1.1, Miami, Florida, 1996.



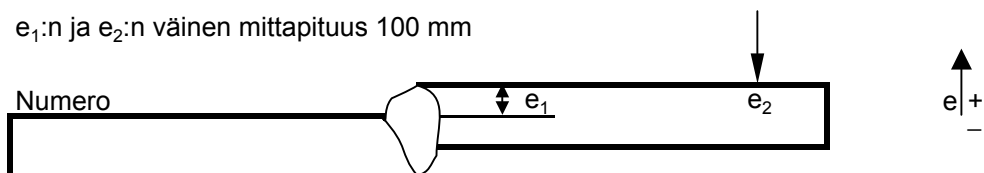
- [33] Lihavainen, V-M. Fatigue strength of welded joints improved by ultrasonic impact treatment. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, konetekniikan osasto, tutkimusraportti 35, Lappeenranta 2002. ISBN 951-764-704-2, ISSN 0787-5169.
- [34] Niemi, E. et al. Väsymättömän hitsausliitoksen suunnittelu. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, konetekniikan osasto, konstruktitekniikan laitos. Lappeenranta 1998, 149 s.
- [35] Niemi, E. Structural hot spot stress approach to fatigue analysis of welded components. Designers guide. IIW document XIII-1819-00/XV-1090-01, final draft subject to editorial amendments, May 2003, 49 s.
- [36] Lihavainen, V-M, Partanen T. Experimental determination of fatigue strength of dynamically loaded welded joints. IIW document XIII-1843-00 / XV-1062-00, 2000, 13 s.

## LIITTEET

- Liite 1. MIG-juotettujen päittäisliitoskoekappaleiden mittaus- ja poikkileikkaustiedot.
- Liite 2. MIG-juotettujen taivutuskoekappaleiden mittaus- ja poikkileikkaustiedot
- Liite 3. MIG-juotettujen ristiliitoskoekappaleiden mittaus- ja poikkileikkaustiedot
- Liite 4. MIG-juotettujen voimaa kantamattomien poikittaisten pienaliitoskoesauvojen mittaus- ja poikkileikkaustiedot
- Liite 5. MIG-juotettujen voimaa kantamattomien poikittaisten pienaliitosten koetulosten kooste.
- Liite 6. Kulmavirheen aiheuttaman jännityksen suurennuskertoimen  $k_{m,\alpha}$  johtaminen elementtimenetelmällä palkkielementtiä käyttäen.
- Liite 7. Kulmavirheen aiheuttaman jännityksen suurennuskertoimen  $k_{m,\alpha}$  johtaminen taivutetun ja vedetyn sauvan differentiaaliyhtälöstä.
- Liite 8. Kulmavirheen aiheuttaman jännityksen suurennuskertoimen  $k_{m,\alpha}$  johtaminen elementtimenetelmällä palkkielementtiä käyttäen. Taitetun rakenteen tapaus.

## MIG-juotettujen päittäisliitoskoesauvojen mitat

Sauva	Mittaus- kohta	Paksuus t [mm]	Leveys b [mm]	Ristikkäisyys ja kulmavirhe			Poikkip.ala A [mm <sup>2</sup> ]
				e <sub>1</sub> [mm]	e <sub>2</sub> [mm]	alfa [aste]	
1	1	2,03	49,7	0,4	0,8	0,229	100,6
	2	2,03	49,65	0,2	0,8	0,344	
	ka	<b>2,03</b>	<b>49,675</b>		Keskeltä		
	3	2,02	49,7				
	4	2,02	49,65				
	ka	<b>2,02</b>	<b>49,675</b>				
2	1	2,03	49,7	0,15	0,3	0,086	100,9
	2	2,03	49,65	0,2	0,4	0,115	
	ka	<b>2,03</b>	<b>49,675</b>	0,15	Keskeltä		
	3	2,03	49,7				
	4	2,03	49,7				
	ka	<b>2,03</b>	<b>49,7</b>				
3	1	2,03	49,75	0,2	0,4	0,115	101,1
	2	2,03	49,7	0,4	0,6	0,115	
	ka	<b>2,03</b>	<b>49,725</b>	0,3	0,5	0,115	
	3	2,04	49,7				
	4	2,03	49,75				
	ka	<b>2,035</b>	<b>49,725</b>				
4	1	2,04	49,8	0,45	0,35	-0,057	101,3
	2	2,04	49,75	0,1	0	-0,057	
	ka	<b>2,04</b>	<b>49,775</b>	0,35	0,2	-0,086	
	3	2,03	49,75				
	4	2,03	49,8				
	ka	<b>2,03</b>	<b>49,775</b>				
5	1	2,04	49,8	0,3	0,5	0,115	101,2
	2	2,03	49,8	-0,6	0,1	0,401	
	ka	<b>2,035</b>	<b>49,8</b>	0	0,3	0,172	
	3	2,03	49,8				
	4	2,03	49,8				
	ka	<b>2,03</b>	<b>49,8</b>				
6	1	2,03	49,7	0,1	0,6	0,286	101,1
	2	2,03	49,7	-0,4	0,1	0,286	
	ka	<b>2,03</b>	<b>49,7</b>	-0,2	0,1	0,172	
	3	2,04	49,7				
	4	2,04	49,7				
	ka	<b>2,04</b>	<b>49,7</b>				
7	1	2,04	49,7	0,3	0,25	-0,029	101,1
	2	2,03	49,65	0,2	-0,1	-0,172	
	ka	<b>2,035</b>	<b>49,675</b>	0,2	0,1	-0,057	
	3	2,03	49,7				
	4	2,04	49,7				
	ka	<b>2,035</b>	<b>49,7</b>				
8	1	2,04	49,65	0,25	1,1	0,487	101,0
	2	2,04	49,65	0,7	1,4	0,401	
	ka	<b>2,04</b>	<b>49,65</b>	0,5	1,3	0,458	
	3	2,03	49,7				
	4	2,02	49,7				
	ka	<b>2,025</b>	<b>49,7</b>				

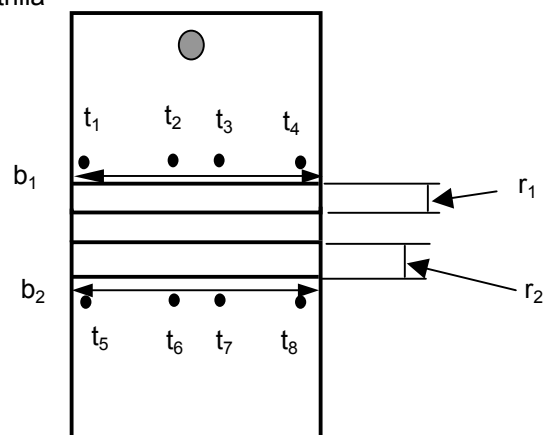
e<sub>1</sub>:n ja e<sub>2</sub>:n väinen mittapituus 100 mm

## MIG-juotettujen taivutuskoekappaleiden mittaustietoja

Koekpl	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>	t <sub>4</sub>	t <sub>5</sub>	t <sub>6</sub>	t <sub>7</sub>	t <sub>8</sub>	r <sub>1</sub>	r <sub>2</sub>		
<b>A1</b>	64,9	64,8	2,01	2,01	2,00	2,00	1,98	2,02	1,99	1,99	5,2	4,0		
<b>A2</b>	64,7	64,5	2,02	1,99	1,98	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	4,2	6,0		
<b>A3</b>	63,9	63,8	1,99	1,98	1,99	1,98	2,00	2,00	2,01	2,01	4,1	5,5		
<b>A4</b>	64,3	64,2	1,98	1,99	1,98	1,98	1,98	1,98	1,98	1,99	4,0	4,6		
<b>A5</b>	65,1	65,3	2,00	1,99	2,01	2,00	2,01	2,00	2,00	2,00	3,5	4,7		
<b>A6</b>	66,9	66,8	2,02	2,03	2,04	2,03	2,02	2,03	2,02	2,02	5,2	3,8		
<b>A7</b>	64,0	63,9	2,00	2,00	2,01	2,01	1,98	2,01	2,00	1,99	6,0	4,2		
<b>A8</b>	63,3	63,4	2,01	2,01	2,02	2,01	1,99	2,00	2,00	2,00	6,9	5,9		
											r <sub>1</sub>	r <sub>2</sub>	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>
<b>B1</b>	63,3	63,2	2,00	2,00	2,00	2,00	1,99	1,99	2,00	2,01	2,6	5,8	2,7	3,2
<b>B2</b>	65,7	65,5	2,00	2,00	2,00	1,99	2,01	2,00	2,00	1,99	5,2	6,4	2,1	2,5
<b>B3</b>	63,2	63,6	2,00	2,01	2,02	2,02	2,01	2,01	2,01	2,01	4,2	2,6	2,8	2,5
<b>B4</b>	64,4	64,0	2,02	2,02	2,02	2,02	1,99	1,99	1,99	2,00	5,5	5,2	2,6	2,6
<b>B5</b>	63,3	63,1	1,99	2,00	2,00	1,99	2,02	2,01	2,02	2,01	4,5	5,2	3,1	2,5
<b>B6</b>	64,5	64,3	2,02	2,01	2,01	2,01	2,00	2,00	2,00	2,00	5,0	4,7	2,9	2,4
<b>B7</b>	64,2	64,1	2,00	2,01	2,01	2,01	2,01	2,00	2,01	2,00	7,2	6,8	2,7	2,6
<b>B8</b>	63,4	63,4	2,00	2,01	2,01	2,00	1,99	1,99	2,00	2,00	3,4	5,5	2,7	2,8
											r <sub>1</sub>	r <sub>2</sub>	r <sub>3</sub>	r <sub>4</sub>
<b>C1</b>	65,4	65,3	2,06	2,01	2,00	2,03	2,02	2,03	2,00	2,00	6,0	5,2	6,0	3,4
<b>C2</b>	65,0	65,0	2,00	2,00	2,00	2,01	2,01	2,01	2,01	2,00	3,1	4,2	5,5	6,0
<b>C3</b>	63,5	63,4	2,01	2,00	1,95	1,95	1,95	1,98	1,98	1,99	3,8	3,8	5,1	5,4
<b>C4</b>	64,7	64,4	2,00	2,00	2,00	2,00	1,99	2,00	2,00	2,01	4,8	4,6	3,0	3,5
<b>C5</b>	64,3	64,3	2,02	2,03	2,00	2,01	2,02	2,03	2,03	2,02	5,1	6,5	3,7	3,1
<b>C6</b>	64,3	64,4	1,99	2,02	2,00	2,00	2,02	2,02	2,01	2,01	5,0	6,5	3,9	4,3
<b>C7</b>	65,0	65,0	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	4,7	4,9	3,1	3,5
<b>C8</b>	64,4	64,4	2,01	2,01	2,00	2,01	2,01	2,01	2,01	2,01	5,2	6,6	3,8	3,7

Yksiköt millimetrejä

b:t mitattu työntömitalla, t:t mikrometrillä

r<sub>3</sub> on r<sub>1</sub>:n vastakkaisella puolellar<sub>4</sub> on r<sub>2</sub>:n vastakkaisella puolella

## MIG-juotettujen taivutuskoekappaleiden poikkileikkaussuureita

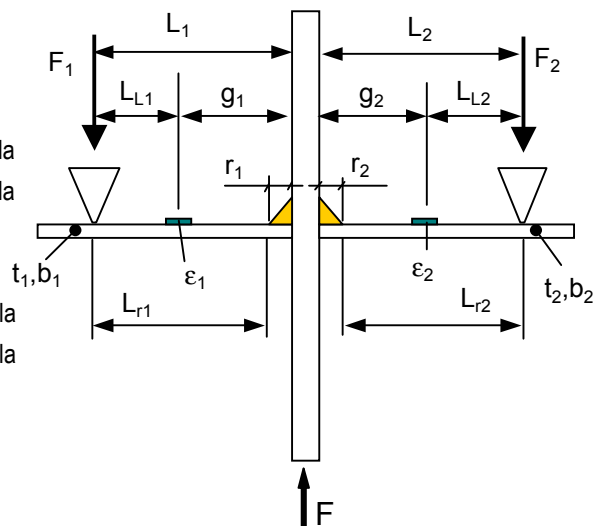
Koekpl	b <sub>1</sub> [mm]	b <sub>2</sub> [mm]	t <sub>1</sub> [mm]	t <sub>2</sub> [mm]	A <sub>1</sub> [mm <sup>2</sup> ]	A <sub>2</sub> [mm <sup>2</sup> ]	I <sub>1</sub> [mm <sup>4</sup> ]	I <sub>2</sub> [mm <sup>4</sup> ]	W <sub>1</sub> [mm <sup>3</sup> ]	W <sub>2</sub> [mm <sup>3</sup> ]
<b>A1</b>	64,9	64,8	2,01	2,00	130,4	129,6	43,9	43,2	43,7	43,2
<b>A2</b>	64,7	64,5	2,00	2,00	129,4	129,0	43,1	43,0	43,1	43,0
<b>A3</b>	63,9	63,8	1,99	2,01	127,2	128,2	42,0	43,2	42,2	43,0
<b>A4</b>	64,3	64,2	1,98	1,98	127,3	127,1	41,6	41,5	42,0	41,9
<b>A5</b>	65,1	65,3	2,00	2,00	130,2	130,6	43,4	43,5	43,4	43,5
<b>A6</b>	66,9	66,8	2,03	2,02	135,8	134,9	46,6	45,9	45,9	45,4
<b>A7</b>	64,0	63,9	2,01	2,00	128,6	127,8	43,3	42,6	43,1	42,6
<b>A8</b>	63,3	63,4	2,01	2,00	127,2	126,8	42,8	42,3	42,6	42,3
<b>B1</b>	63,3	63,2	2,00	2,00	126,6	126,4	42,2	42,1	42,2	42,1
<b>B2</b>	65,7	65,5	2,00	2,00	131,4	131,0	43,8	43,7	43,8	43,7
<b>B3</b>	63,2	63,6	2,01	2,01	127,0	127,8	42,8	43,0	42,6	42,8
<b>B4</b>	64,4	64,0	2,02	1,99	130,1	127,4	44,2	42,0	43,8	42,2
<b>B5</b>	63,3	63,1	2,00	2,02	126,6	127,5	42,2	43,3	42,2	42,9
<b>B6</b>	64,5	64,3	2,01	2,00	129,6	128,6	43,6	42,9	43,4	42,9
<b>B7</b>	64,2	64,1	2,01	2,01	129,0	128,8	43,4	43,4	43,2	43,2
<b>B8</b>	63,4	63,4	2,01	2,00	127,4	126,8	42,9	42,3	42,7	42,3
<b>C1</b>	65,4	65,3	2,03	2,01	132,8	131,3	45,6	44,2	44,9	44,0
<b>C2</b>	65,0	65,0	2,00	2,01	130,0	130,7	43,3	44,0	43,3	43,8
<b>C3</b>	63,5	63,4	1,98	1,98	125,7	125,5	41,1	41,0	41,5	41,4
<b>C4</b>	64,7	64,4	2,00	2,00	129,4	128,8	43,1	42,9	43,1	42,9
<b>C5</b>	64,3	64,3	2,02	2,03	129,9	130,5	44,2	44,8	43,7	44,2
<b>C6</b>	64,3	64,4	2,00	2,02	128,6	130,1	42,9	44,2	42,9	43,8
<b>C7</b>	65,0	65,0	2,00	2,00	130,0	130,0	43,3	43,3	43,3	43,3
<b>C8</b>	64,4	64,4	2,01	2,01	129,4	129,4	43,6	43,6	43,4	43,4

t<sub>1</sub> ja t<sub>2</sub> ovat mitattujen paksuuksien kahteen desimaaliin pyöristetyt keskiarvot

## MIG-juotettujen taivutuskoekappaleiden venymäliuskojen paikat ja tukietäisyydet

Koekpl	L <sub>1</sub> [mm]	L <sub>2</sub> [mm]	g <sub>1</sub> [mm]	g <sub>2</sub> [mm]	r <sub>1</sub> [mm]	r <sub>2</sub> [mm]	L <sub>L1</sub> [mm]	L <sub>L2</sub> [mm]	L <sub>r1</sub> [mm]	L <sub>r2</sub> [mm]
A1	19,9	20,8	7,8	7,3	5,2	4,0	12,1	13,5	14,7	16,8
A2	20,4	19,5	6,8	7,9	4,2	6,0	13,6	11,6	16,2	13,5
A3	20,7	19,9	7,5	7,0	4,1	5,5	13,2	12,9	16,6	14,4
A4	21,1	19,6	6,0	7,5	4,0	4,6	15,1	12,1	17,1	15,0
A5	21,1	20,0	7,5	6,0	3,5	4,7	13,6	14,0	17,6	15,3
A6	21,1	20,1	8,5	8,3	5,2	3,8	12,6	11,8	15,9	16,3
A7	21,0	20,1	9,0	6,1	6,0	4,2	12,0	14,0	15,0	15,9
A8	21,2	20,1	8,7	8,0	6,9	5,9	12,5	12,1	14,3	14,2
B1	22,2	20,3	7,5	8,4	2,6	5,8	14,7	11,9	19,6	14,5
B2	19,1	21,7	10,0	10,0	5,2	6,4	9,1	11,7	13,9	15,3
B3	21,8	20,2	9,7	10,0	4,2	2,6	12,1	10,2	17,6	17,6
B4	21,3	20,5	10,3	10,0	5,5	5,2	11,0	10,5	15,8	15,3
B5	21,3	20,3	10,0	10,0	4,5	5,2	11,3	10,3	16,8	15,1
B6	22,2	20,1	10,6	10,2	5,0	4,7	11,6	9,9	17,2	15,4
B7	20,0	21,0	10,5	10,0	7,2	6,8	9,5	11,0	12,8	14,2
B8	19,9	21,1	10,3	10,4	3,4	5,5	9,6	10,7	16,5	15,6
C1	20,0	20,4	10,0	10,0	6,0	5,2	10,0	10,4	14,0	15,2
C2	20,1	21,0	10,3	10,4	3,1	4,2	9,8	10,6	17,0	16,8
C3	20,2	21,0	10,0	10,0	3,8	3,8	10,2	11,0	16,4	17,2
C4	20,4	20,7	10,3	10,5	4,8	4,6	10,1	10,2	15,6	16,1
C5	20,2	20,8	10,2	10,0	5,1	6,5	10,0	10,8	15,1	14,3
C6	20,5	20,7	10,3	10,6	5,0	6,5	10,2	10,1	15,5	14,2
C7	20,4	21,2	9,9	9,9	4,7	4,9	10,5	11,3	15,7	16,3
C8	21,0	20,1	9,7	9,7	5,2	6,6	11,3	10,4	15,8	13,5

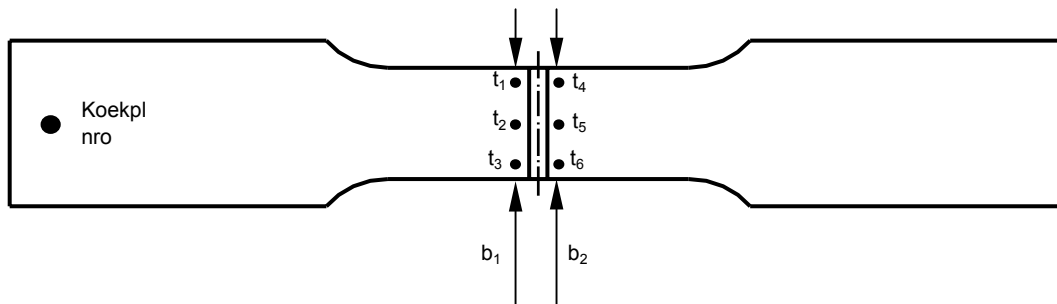
- L<sub>1</sub> tukiväli liuskan L1 puolella  
 L<sub>2</sub> tukiväli liuskan L2 puolella  
 g<sub>1</sub> liuskan L1 etäisyys pystyivasta  
 g<sub>2</sub> liuskan L2 etäisyys pystyivasta  
 r<sub>1</sub> rajaviivan etäisyys pystyivasta liuskan L1 puolella  
 r<sub>2</sub> rajaviivan etäisyys pystyivasta liuskan L2 puolella  
 L<sub>L1</sub> liuskan L1 etäisyys tuesta  
 L<sub>L2</sub> liuskan L2 etäisyys tuesta  
 L<sub>r1</sub> hitsin rajaviivan etäisyys tuesta liuskan L1 puolella  
 L<sub>r2</sub> hitsin rajaviivan etäisyys tuesta liuskan L2 puolella



## MIG-juotetut X-liitokset

Koesauvojen leveydet, paksuudet ja poikkipinta-alat

Koekpl	t <sub>1</sub> [mm]	t <sub>2</sub> [mm]	t <sub>3</sub> [mm]	t <sub>4</sub> [mm]	t <sub>5</sub> [mm]	t <sub>6</sub> [mm]	b <sub>1</sub> [mm]	b <sub>2</sub> [mm]
B1/1	4,94	4,96	4,97	4,98	4,94	4,97	39,8	39,8
B1/2	4,92	4,92	4,93	4,93	4,93	4,95	39,8	39,8
B1/3	4,92	4,90	4,90	4,92	4,92	4,90	39,7	39,7
B2/1	4,96	4,96	4,97	4,99	4,98	4,96	39,6	39,6
B2/2	4,96	4,96	4,96	4,96	4,96	4,97	39,9	39,7
B2/3	4,98	4,96	4,96	4,99	4,96	4,97	39,7	39,8
B3/1	4,95	4,97	4,97	4,96	4,98	4,97	40,1	40,1
B3/2	4,95	4,95	4,95	4,95	4,94	4,95	39,9	39,9
B3/3	4,97	4,98	4,95	4,97	4,96	4,94	39,8	39,8



## Poikkipinta-alat

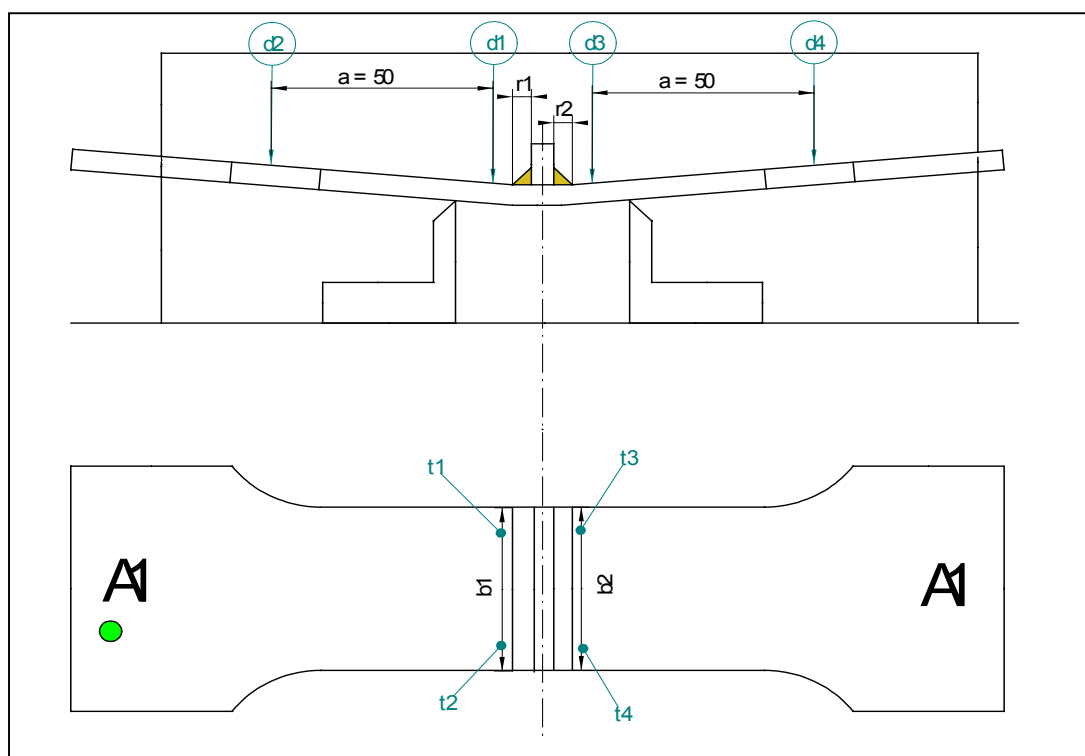
Koekpl	A <sub>1</sub> [mm <sup>2</sup> ]	A <sub>2</sub> [mm <sup>2</sup> ]	Ka [mm <sup>2</sup> ]
B1/1	197,3	197,5	197,4
B1/2	195,9	196,5	196,2
B1/3	194,8	195,1	194,9
B2/1	196,5	197,1	196,8
B2/2	197,9	197,0	197,5
B2/3	197,2	197,9	197,6
B3/1	199,0	199,3	199,2
B3/2	197,5	197,4	197,4
B3/3	197,7	197,3	197,5

$$A_1 = \text{average}(t_1-t_3) \cdot b_1$$

$$A_2 = \text{average}(t_4-t_6) \cdot b_2$$

## MIG-juotettu voimaa kantamaton poikittainen pienaliitos. Geometrian mittaust

Koekpl	Paksuus				Leveys		Kulmavirhe				Rajaviiva	
	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>	t <sub>4</sub>	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	d <sub>3</sub>	d <sub>4</sub>	r <sub>1</sub>	r <sub>2</sub>
A1	4,98	4,98	4,98	4,97	40,20	40,10	0,00	0,88	-0,05	0,91	5,1	5,0
A2	4,98	4,98	4,97	4,97	40,20	40,25	0,00	1,06	-0,05	0,93	5,1	5,1
A3	4,96	4,97	4,96	4,97	40,00	40,00	0,00	0,95	0,04	0,92	5,0	5,1
A4	4,94	4,95	4,95	4,98	39,90	39,90	0,00	1,39	-0,01	1,27	5,0	4,9
A5	4,97	4,96	4,96	4,96	39,90	39,90	0,00	1,03	0,00	0,90	5,1	5,1
A6	4,97	4,98	4,96	4,96	39,85	39,85	0,00	1,39	0,06	1,40	5,0	5,0
A7	4,98	4,97	4,96	4,96	40,05	40,10	0,00	1,03	0,03	0,96	4,8	5,0
A8	4,97	4,97	4,96	4,96	40,00	40,00	0,00	1,33	-0,02	1,31	4,5	4,9
A9	4,95	4,96	4,96	4,96	40,00	40,00	0,00	1,02	0,00	0,92	5,0	5,0
A10	4,95	4,97	4,95	4,96	39,95	39,95	0,04	1,39	0,00	1,38	5,5	5,2
B1	4,97	4,97	4,97	4,95	39,85	39,85	0,00	1,78	-0,08	1,53	9,0	9,5
B2	4,97	4,98	4,99	4,98	39,85	39,85	0,00	1,03	0,07	1,68	8,5	9,1
B3	4,95	4,96	4,95	4,95	39,80	39,85	0,00	2,06	0,08	1,61	9,1	9,3
B4	4,96	4,97	4,96	4,96	39,90	39,90	0,00	1,76	-0,01	1,92	8,0	9,6
B5	4,96	4,98	4,98	4,96	39,85	39,80	0,00	1,71	-0,08	1,73	7,8	10,8
B6	4,98	4,98	4,99	4,97	39,90	39,90	0,00	0,88	0,05	0,90	8,5	10,5
B7	4,98	4,99	5,00	4,98	39,80	39,95	0,00	0,87	0,00	0,55	8,6	9,4
B8	4,97	4,96	4,97	4,97	39,85	39,85	0,00	0,75	-0,09	0,80	7,5	11,1
B9	4,97	4,98	4,98	4,98	39,85	39,90	0,00	0,82	0,03	0,51	8,4	9,5
B10	4,96	4,97	4,97	4,97	39,85	39,85	0,00	0,62	-0,01	0,51	8,0	9,6
C1	4,99	4,99	4,99	4,99	40,00	40,00	-	-	-	-	-	-
C2	4,98	4,98	4,98	4,98	40,25	40,25	-	-	-	-	-	-





## MIG-juotettu voimaa kantamaton poikittainen pienaliitos. Poikkipinta-alat

Koekpl	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A
<b>A1</b>	200,20	199,50	199,85
<b>A2</b>	200,20	200,04	200,12
<b>A3</b>	198,60	198,60	198,60
<b>A4</b>	197,31	198,10	197,70
<b>A5</b>	198,10	197,90	198,00
<b>A6</b>	198,25	197,66	197,95
<b>A7</b>	199,25	198,90	199,07
<b>A8</b>	198,80	198,40	198,60
<b>A9</b>	198,20	198,40	198,30
<b>A10</b>	198,15	197,95	198,05
<hr/>			
<b>B1</b>	198,05	197,66	197,86
<b>B2</b>	198,25	198,65	198,45
<b>B3</b>	197,21	197,26	197,23
<b>B4</b>	198,10	197,90	198,00
<b>B5</b>	198,05	197,81	197,93
<b>B6</b>	198,70	198,70	198,70
<b>B7</b>	198,40	199,35	198,88
<b>B8</b>	197,86	198,05	197,95
<b>B9</b>	198,25	198,70	198,48
<b>B10</b>	197,86	198,05	197,95
<hr/>			
<b>C1</b>	199,60	199,60	199,60
<b>C2</b>	200,45	200,45	200,45

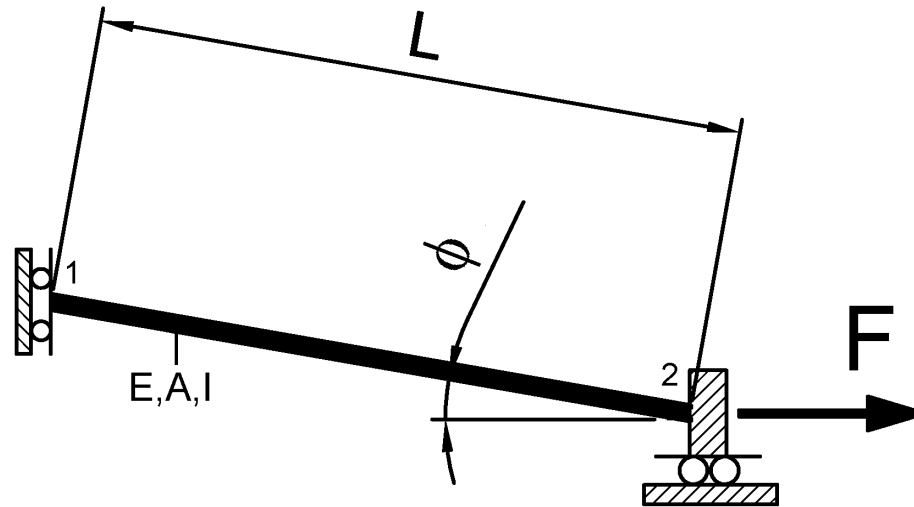
### MIG-juotetun voimaa kantamattoman poikittaisen pienaliitoksen väsytykskoekiden tulokset

Koekpl	N	Nimellinen		Venymäliuska		Rajaviiva	FAT, m=3			FAT, m=5			Huomautukset	Vaurio- puoli
		$\Delta F$ kN	$\Delta\sigma_{nim}$ MPa	$\Delta\varepsilon_L$ $\mu Str$	$\Delta\sigma_L$ MPa	$\Delta\sigma_{pnim}$ MPa	nim. MPa	liuska MPa	pnim. MPa	nim. MPa	liuska MPa	pnim. MPa		
<b>A1</b>	299 720	33,0	165	1269	266	290	88	141	154	113	182	198		L2
<b>A2</b>	5 718 810	19,6	98	717	151	162	-	-	-	-	-	-	ei rikkunut	-
<b>A3</b>	5 135 883	24,9	125	888	186	200	-	-	-	-	-	-	ei rikkunut	-
<b>A4</b>	421 708	29,7	150	1135	238	260	-	-	-	-	-	-	käyttövirhe	-
<b>A5</b>	4 997 198	30,3	153	1062	223	240	-	-	-	-	-	-	ei rikkunut	-
<b>A6</b>	391 526	33,9	171	1294	272	297	99	158	172	123	196	214		TP
<b>A7</b>	5 272 916	32,0	160	1105	232	249	-	-	-	-	-	-	ei rikkunut	-
<b>A8</b>	883 395	32,0	161	1215	255	278	123	194	212	137	217	236		LP
<b>A9</b>	247 352	40,0	202	1401	294	316	101	146	157	133	194	208		LP
<b>A10</b>	5 280 942	29,6	149	1126	236	258	-	-	-	-	-	-	ei rikkunut	-
<b>A2-C</b>	395 928	33,1	165	1215	255	275	96	149	160	119	184	199	A2 jatko	L1
<b>A3-C</b>	1 350 872	33,9	170	1202	252	270	149	221	237	157	233	250	A3 jatko	TP
<b>A5-C</b>	240 057	39,0	197	1364	286	308	97	141	152	129	187	202	A5 jatko	LP
<b>A7-C</b>	271 165	39,7	199	1371	288	310	102	148	159	133	193	208	A7 jatko	LP
<b>A10-C</b>	643 636	33,4	169	1269	266	291	116	182	199	135	212	232	A10 jatko	TP
<b>B1</b>	329 747	32,5	164	1385	291	322	90	160	177	114	203	225		LP
<b>B2</b>	1 370 974	29,7	150	1293	272	297	132	240	262	139	252	275		TP
<b>B3</b>	919 320	26,9	136	1202	252	280	105	194	216	116	216	240		LP
<b>B4</b>	1 403 198	24,7	125	1023	215	239	111	191	212	116	200	223		TP
<b>B5</b>	5 308 690	21,3	108	895	188	208	-	-	-	-	-	-	ei rikkunut	-
<b>B6</b>	438 656	39,6	199	1408	296	317	120	179	191	147	219	234		TP
<b>B7</b>	875 891	36,2	182	1162	244	259	138	185	197	154	207	220		TP
<b>B8</b>	5 740 030	29,7	150	980	206	220	-	-	-	-	-	-	ei rikkunut	-
<b>B9</b>	5 348 182	32,9	166	1127	237	250	-	-	-	-	-	-	ei rikkunut	-
<b>B10</b>	2 769 832	34,6	175	1115	234	246	195	261	274	187	250	263		LP
<b>B5-C</b>	232 167	28,1	142	1180	248	275	69	121	134	92	161	179	B5 jatko	TP
<b>B8-C</b>	534 942	34,1	172	1123	236	252	111	152	162	132	181	194	B8 jatko	TP
<b>B9-C</b>	625 217	37,0	186	1265	266	281	126	181	191	147	211	223	B9 jatko	LP
<b>C1</b>	1 708 752	58,75	294	1358	285	-	279	270	-	285	276	-	Rikki kiinnityksestä	
<b>C2</b>	6 764 669	44,9	224	1035	217	-	336	326	-	286	277	-	Rikki kiinnityksestä	

LP= Venymäliuskan puoli

TP = Toinen puoli (ei venymäliuskaa)

Jännityksen suurennuskertoimen  $k_m$  johtaminen elementtimenetelmällä palkkielementtiä käyttäen.



Elementin jäykkymatriisi

$$\mathbf{K}_e = \frac{E \cdot I}{L^3} \begin{pmatrix} \frac{A \cdot L^2}{I} & 0 & 0 & -\frac{A \cdot L^2}{I} & 0 & 0 \\ 0 & 12 & 6 \cdot L & 0 & -12 & 6 \cdot L \\ 0 & 6 \cdot L & 4 \cdot L^2 & 0 & -6 \cdot L & 2 \cdot L^2 \\ -\frac{A \cdot L^2}{I} & 0 & 0 & \frac{A \cdot L^2}{I} & 0 & 0 \\ 0 & -12 & -6 \cdot L & 0 & 12 & -6 \cdot L \\ 0 & 6 \cdot L & 2 \cdot L^2 & 0 & -6 \cdot L & 4 \cdot L^2 \end{pmatrix}$$

Voimavektori

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} F_{x1} \\ F_{y1} \\ M_1 \\ F_{x2} \\ F_{y2} \\ M_2 \end{pmatrix}$$

Transformaatiomatriisi

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} \cos(\phi) & \sin(\phi) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sin(\phi) & \cos(\phi) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos(\phi) & \sin(\phi) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\sin(\phi) & \cos(\phi) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Elementin jäykkymatriisi globaalissa koordinaatistossa  $\mathbf{K} = \mathbf{T}^T \mathbf{K}_e \mathbf{T}$

$$\mathbf{K} = \frac{E \cdot I}{L^3} \cdot \begin{pmatrix} \cos(\phi) & \sin(\phi) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sin(\phi) & \cos(\phi) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos(\phi) & \sin(\phi) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\sin(\phi) & \cos(\phi) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}^T \cdot \begin{pmatrix} \frac{A \cdot L^2}{I} & 0 & 0 & -\frac{A \cdot L^2}{I} & 0 & 0 \\ 0 & 12 & 6 \cdot L & 0 & -12 & 6 \cdot L \\ 0 & 6 \cdot L & 4 \cdot L^2 & 0 & -6 \cdot L & 2 \cdot L^2 \\ -\frac{A \cdot L^2}{I} & 0 & 0 & \frac{A \cdot L^2}{I} & 0 & 0 \\ 0 & -12 & -6 \cdot L & 0 & 12 & -6 \cdot L \\ 0 & 6 \cdot L & 2 \cdot L^2 & 0 & -6 \cdot L & 4 \cdot L^2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos(\phi) & \sin(\phi) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sin(\phi) & \cos(\phi) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos(\phi) & \sin(\phi) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\sin(\phi) & \cos(\phi) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Kertomalla saadaan

$$\mathbf{K} = \frac{E \cdot I}{L^3} \cdot \begin{bmatrix} \frac{(A \cdot L^2 \cdot \cos(\phi)^2 + 12 \cdot I - 12 \cdot \cos(\phi)^2 \cdot I)}{I} & \sin(\phi) \cdot \cos(\phi) \cdot \frac{(A \cdot L^2 - 12 \cdot I)}{I} & -6 \cdot \sin(\phi) \cdot L & -\frac{(A \cdot L^2 \cdot \cos(\phi)^2 + 12 \cdot I - 12 \cdot \cos(\phi)^2 \cdot I)}{I} & -\sin(\phi) \cdot \cos(\phi) \cdot \frac{(A \cdot L^2 - 12 \cdot I)}{I} & -6 \cdot \sin(\phi) \cdot L \\ \sin(\phi) \cdot \cos(\phi) \cdot \frac{(A \cdot L^2 - 12 \cdot I)}{I} & \frac{-(-A \cdot L^2 + A \cdot L^2 \cdot \cos(\phi)^2 - 12 \cdot \cos(\phi)^2 \cdot I)}{I} & 6 \cdot \cos(\phi) \cdot L & -\sin(\phi) \cdot \cos(\phi) \cdot \frac{(A \cdot L^2 - 12 \cdot I)}{I} & \frac{(-A \cdot L^2 + A \cdot L^2 \cdot \cos(\phi)^2 - 12 \cdot \cos(\phi)^2 \cdot I)}{I} & 6 \cdot \cos(\phi) \cdot L \\ -6 \cdot \sin(\phi) \cdot L & 6 \cdot \cos(\phi) \cdot L & 4 \cdot L^2 & 6 \cdot \sin(\phi) \cdot L & -6 \cdot \cos(\phi) \cdot L & 2 \cdot L^2 \\ -\frac{(A \cdot L^2 \cdot \cos(\phi)^2 + 12 \cdot I - 12 \cdot \cos(\phi)^2 \cdot I)}{I} & -\sin(\phi) \cdot \cos(\phi) \cdot \frac{(A \cdot L^2 - 12 \cdot I)}{I} & 6 \cdot \sin(\phi) \cdot L & \frac{(A \cdot L^2 \cdot \cos(\phi)^2 + 12 \cdot I - 12 \cdot \cos(\phi)^2 \cdot I)}{I} & \sin(\phi) \cdot \cos(\phi) \cdot \frac{(A \cdot L^2 - 12 \cdot I)}{I} & 6 \cdot \sin(\phi) \cdot L \\ -\sin(\phi) \cdot \cos(\phi) \cdot \frac{(A \cdot L^2 - 12 \cdot I)}{I} & \frac{(-A \cdot L^2 + A \cdot L^2 \cdot \cos(\phi)^2 - 12 \cdot \cos(\phi)^2 \cdot I)}{I} & -6 \cdot \cos(\phi) \cdot L & \sin(\phi) \cdot \cos(\phi) \cdot \frac{(A \cdot L^2 - 12 \cdot I)}{I} & \frac{-(-A \cdot L^2 + A \cdot L^2 \cdot \cos(\phi)^2 - 12 \cdot \cos(\phi)^2 \cdot I)}{I} & -6 \cdot \cos(\phi) \cdot L \\ -6 \cdot \sin(\phi) \cdot L & 6 \cdot \cos(\phi) \cdot L & 2 \cdot L^2 & 6 \cdot \sin(\phi) \cdot L & -6 \cdot \cos(\phi) \cdot L & 4 \cdot L^2 \end{bmatrix}$$

Reunaehtojen perusteella poistetaan globaalista jäykkymatriisista rivit ja sarakkeet 1, 3, 5 ja 6. Voimavektorista poistetaan myös samat rivit. Siirtymävektori saadaan kertomalla globaalien jäykkymatriisin kääntematriisi voimavektorilla.

$$\mathbf{U} = \mathbf{K}^{-1} \cdot \mathbf{F}$$

$$\frac{E \cdot I}{L^3} \begin{bmatrix} \frac{-(-A \cdot L^2 + \cos(\phi)^2 \cdot A \cdot L^2 - 12 \cdot l \cdot \cos(\phi)^2 \cdot l)}{l} & -\sin(\phi) \cdot \cos(\phi) \cdot \frac{(A \cdot L^2 - 12 \cdot l)}{l} \\ -\sin(\phi) \cdot \cos(\phi) \cdot \frac{(A \cdot L^2 - 12 \cdot l)}{l} & \frac{(\cos(\phi)^2 \cdot A \cdot L^2 + 12 \cdot l - 12 \cdot l \cdot \cos(\phi)^2 \cdot l)}{l} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ F \end{pmatrix} \text{ simplify} \rightarrow \begin{bmatrix} \frac{-1}{12} \cdot \sin(\phi) \cdot \cos(\phi) \cdot (-A \cdot L^2 + 12 \cdot l) \cdot L \cdot \frac{F}{(E \cdot A \cdot I)} \\ \frac{1}{12} \cdot (A \cdot L^2 - \cos(\phi)^2 \cdot A \cdot L^2 + 12 \cdot l \cdot \cos(\phi)^2 \cdot l) \cdot L \cdot \frac{F}{(E \cdot A \cdot I)} \end{bmatrix} \begin{matrix} v_1 \\ u_2 \end{matrix}$$

Kertomalla globaali jäykkymatriisi siirtymävektorilla saadaan elementin voimat globaalkoordinaatistossa (tukivoimat). Termi EI supistuu tässä tapauksessa pois.

**F = K · U**

$$\frac{1}{L^3} \begin{bmatrix} \frac{(A \cdot L^2 \cdot \cos(\phi)^2 + 12 \cdot l - 12 \cdot \cos(\phi)^2 \cdot l)}{l} & \sin(\phi) \cdot \cos(\phi) \cdot \frac{(A \cdot L^2 - 12 \cdot l)}{l} & -6 \cdot \sin(\phi) \cdot L & \frac{-(A \cdot L^2 \cdot \cos(\phi)^2 + 12 \cdot l - 12 \cdot \cos(\phi)^2 \cdot l)}{l} & -\sin(\phi) \cdot \cos(\phi) \cdot \frac{(A \cdot L^2 - 12 \cdot l)}{l} & -6 \cdot \sin(\phi) \cdot L \\ \sin(\phi) \cdot \cos(\phi) \cdot \frac{(A \cdot L^2 - 12 \cdot l)}{l} & \frac{-(-A \cdot L^2 + A \cdot L^2 \cdot \cos(\phi)^2 - 12 \cdot \cos(\phi)^2 \cdot l)}{l} & 6 \cdot \cos(\phi) \cdot L & -\sin(\phi) \cdot \cos(\phi) \cdot \frac{(A \cdot L^2 - 12 \cdot l)}{l} & \frac{(-A \cdot L^2 + A \cdot L^2 \cdot \cos(\phi)^2 - 12 \cdot \cos(\phi)^2 \cdot l)}{l} & 6 \cdot \cos(\phi) \cdot L \\ -6 \cdot \sin(\phi) \cdot L & 6 \cdot \cos(\phi) \cdot L & 4 \cdot L^2 & 6 \cdot \sin(\phi) \cdot L & -6 \cdot \cos(\phi) \cdot L & 2 \cdot L^2 \\ \frac{-(A \cdot L^2 \cdot \cos(\phi)^2 + 12 \cdot l - 12 \cdot \cos(\phi)^2 \cdot l)}{l} & -\sin(\phi) \cdot \cos(\phi) \cdot \frac{(A \cdot L^2 - 12 \cdot l)}{l} & 6 \cdot \sin(\phi) \cdot L & \frac{(A \cdot L^2 \cdot \cos(\phi)^2 + 12 \cdot l - 12 \cdot \cos(\phi)^2 \cdot l)}{l} & \sin(\phi) \cdot \cos(\phi) \cdot \frac{(A \cdot L^2 - 12 \cdot l)}{l} & 6 \cdot \sin(\phi) \cdot L \\ -\sin(\phi) \cdot \cos(\phi) \cdot \frac{(A \cdot L^2 - 12 \cdot l)}{l} & \frac{(-A \cdot L^2 + A \cdot L^2 \cdot \cos(\phi)^2 - 12 \cdot \cos(\phi)^2 \cdot l)}{l} & -6 \cdot \cos(\phi) \cdot L & \sin(\phi) \cdot \cos(\phi) \cdot \frac{(A \cdot L^2 - 12 \cdot l)}{l} & \frac{-(-A \cdot L^2 + A \cdot L^2 \cdot \cos(\phi)^2 - 12 \cdot \cos(\phi)^2 \cdot l)}{l} & -6 \cdot \cos(\phi) \cdot L \\ -6 \cdot \sin(\phi) \cdot L & 6 \cdot \cos(\phi) \cdot L & 2 \cdot L^2 & 6 \cdot \sin(\phi) \cdot L & -6 \cdot \cos(\phi) \cdot L & 4 \cdot L^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{-F \cdot L}{12 \cdot A} \cdot \sin(\phi) \cdot \cos(\phi) \cdot (-A \cdot L^2 + 12 \cdot l) \\ 0 \\ \frac{F \cdot L}{12 \cdot A} \cdot (A \cdot L^2 - \cos(\phi)^2 \cdot A \cdot L^2 + 12 \cdot l \cdot \cos(\phi)^2 \cdot l) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Tulokseksi tulee

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} -F \\ 0 \\ \frac{1}{2} \cdot \sin(\phi) \cdot F \cdot L \\ F \\ 0 \\ \frac{1}{2} \cdot \sin(\phi) \cdot F \cdot L \end{pmatrix}$$

Taivutusmomentti on siis  $\frac{1}{2} \cdot \sin(\phi) \cdot F \cdot L$  Merkitsemällä  $y = L \cdot \sin(\phi)$  saadaan  $M = \frac{F}{2} \cdot y$

Paikallinen nimellinen jännitys on  $\sigma_{pnim} = \sigma_n + \sigma_b = \frac{N}{A} + \frac{M}{W} = \frac{F \cdot \cos(\phi)}{A} + \frac{6 \cdot F \cdot y}{2 \cdot b \cdot t^2} = \frac{F}{A} \cdot \left( \cos(\phi) + \frac{3 \cdot y}{t} \right)$

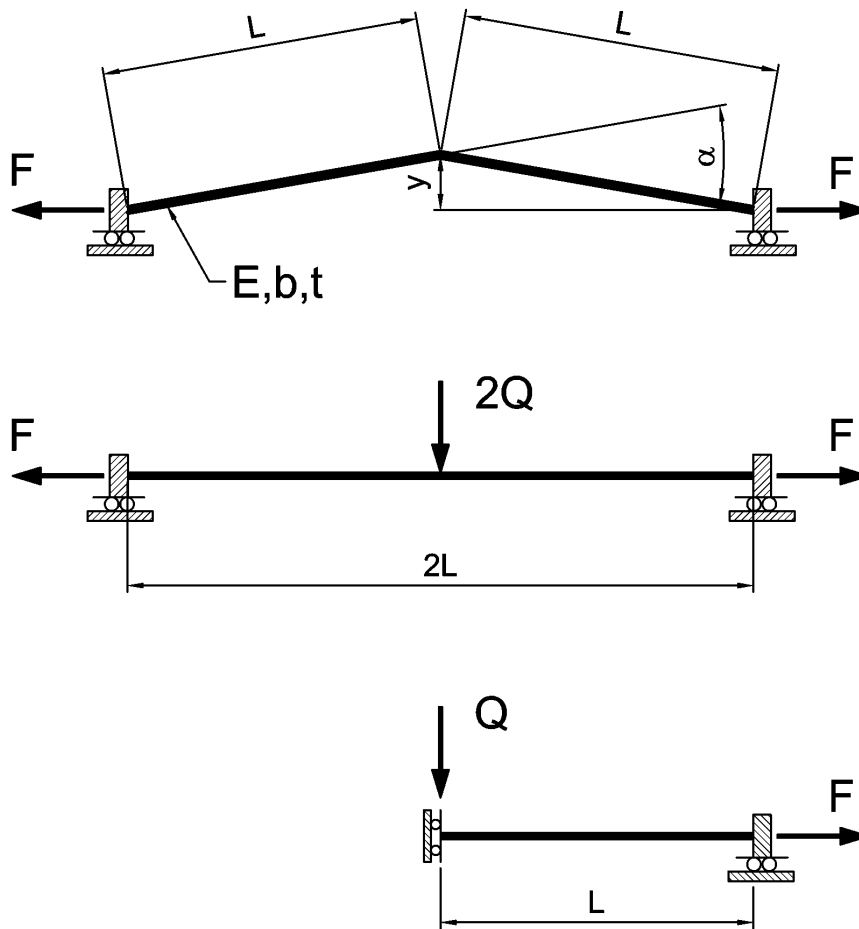
Jännityksen suurennuskerroin  $k_m = \frac{\sigma_{pnim}}{\sigma_{nim}} \quad \sigma_{nim} = \frac{F}{A}$  joten saadaan  $k_m = \cos(\phi) + \frac{3 \cdot y}{t}$

Geometrisesti epälineaarista käyttäytymistä ei ole otettu tässä huomioon.

Kulman  $\phi$  ollessa pieni on sen kosini likimain yksi, jolloin voidaan kirjoittaa:

$$k_m = 1 + \frac{3 \cdot y}{t}$$

## Kulmavirheen aiheuttaman $k_m$ -kertoimen johtaminen taivutetun ja vedetyn palkin differentiaaliyhtälöstä



Puolisko yllä olevan kuvan mukaisesta jäykästi päistä tuetusta taivutetusta ja vedetystä palkista

Differentiaaliyhtälö 
$$v'''' - \frac{F}{EI}v'' = 0$$

Merkitään  $\kappa^2 = \frac{F}{EI}$  jolloin differentiaaliyhtälö saadaan muotoon 
$$v'''' - \kappa^2 v'' = 0$$

Karakteristinen yhtälö on  $r^4 - \kappa^2 r^2 = 0$  Tämän ratkaisut ovat 
$$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \kappa \\ -\kappa \end{pmatrix}$$

Differentiaaliyhtälön ratkaisu on silloin muotoa

$$y = C_1 e^{\kappa x} + C_2 e^{-\kappa x} + (C_3 x + C_4) e^{0x}$$

Reunaehdot:

$$v'(0) = 0 \quad v'(L) = 0$$

$$v''''(0) = \frac{Q}{EI} \quad v(L) = 0$$

Sijoitetaan reunaehdot, jolloin saadaan yhtälöt:

$$\left( C_1 e^{\kappa x} + C_2 e^{-\kappa x} + C_3 x + C_4 \right) \text{ substitute, } x = L \rightarrow C_1 \exp(\kappa L) + C_2 \exp(-\kappa L) + C_3 L + C_4$$

$$\frac{d}{dx} \left( C_1 e^{\kappa x} + C_2 e^{-\kappa x} + C_3 x + C_4 \right) \text{ substitute, } x = 0 \rightarrow C_1 \kappa - C_2 \kappa + C_3$$

$$\frac{d}{dx} \left( C_1 e^{\kappa x} + C_2 e^{-\kappa x} + C_3 x + C_4 \right) \text{ substitute, } x = L \rightarrow C_1 \kappa \exp(\kappa L) - C_2 \kappa \exp(-\kappa L) + C_3$$

$$\frac{d^3}{dx^3} \left( C_1 e^{\kappa x} + C_2 e^{-\kappa x} + C_3 x + C_4 \right) \text{ substitute, } x = 0 \rightarrow C_1 \kappa^3 - C_2 \kappa^3$$

Ratkaistaan kertoimet  $C_1, C_2, C_3$  ja  $C_4$ :

Given

$$C_1 \exp(\kappa L) + C_2 \exp(-\kappa L) + C_3 L + C_4 = 0 \quad C_1 \kappa - C_2 \kappa + C_3 = 0$$

$$C_1 \kappa \exp(\kappa L) - C_2 \kappa \exp(-\kappa L) + C_3 = 0 \quad C_1 \kappa^3 - C_2 \kappa^3 = \frac{Q}{EI}$$

$$\text{Find}(C_1, C_2, C_3, C_4) \text{ simplify} \rightarrow \left[ \begin{array}{c} \frac{Q}{\kappa^3 EI (\exp(-\kappa L) + 1)} \exp(-\kappa L) \\ \frac{-Q}{\kappa^3 EI (\exp(-\kappa L) + 1)} \\ \frac{-Q}{EI \kappa^2} \\ Q \frac{(-1 + \exp(-\kappa L) + L \exp(-\kappa L) \kappa + \kappa L)}{\kappa^3 EI (\exp(-\kappa L) + 1)} \end{array} \right] \text{ Vasemmalla siis kertoimet } C_1-C_4 \text{ ylhäältä alaspäin lukien}$$

$$\text{Merkitään } a = \kappa L (\exp(\kappa L) + 1) \quad c = EI \kappa^2 \quad d = -\exp(\kappa L) + 1 + \kappa L + L \exp(\kappa L)$$

Sijoitetaan kertoimet differentiaaliyhtälöön, jolloin saadaan taipumaviivan yhtälö

$$C_1 e^{\kappa x} + C_2 e^{-\kappa x} + (C_3 x + C_4) \left| \begin{array}{l} \text{substitute, } C_1 = \frac{Q}{a} \\ \text{substitute, } C_2 = \frac{-Q}{a} \exp(\kappa L) \\ \text{substitute, } C_3 = \frac{-Q}{c} \\ \text{substitute, } C_4 = Q \frac{d}{a} \\ \text{simplify} \end{array} \right. \rightarrow -Q \frac{[-\exp(\kappa x) c + \exp[-\kappa(-L+x)] c + x a - (a c)]}{(a c)}$$

Taipumaviivan toinen derivaatta on  $-M(x)/EI$ , josta saadaan momentiksi

$$-EI \frac{d^2}{dx^2} Q \frac{-\exp(\kappa x) c + \exp[-\kappa(-L+x)] c + x a - d c}{a c} \text{ simplify } \rightarrow -EI Q \kappa^2 \frac{[\exp(\kappa x) - \exp[-\kappa(-L+x)]]}{a}$$

$$-EI Q \kappa^2 \frac{[\exp(\kappa x) - \exp[-\kappa(-L+x)]]}{a} \left| \begin{array}{l} \text{substitute, } a = c\kappa(\exp(\kappa L) + 1) \\ \text{substitute, } c = EI\kappa^2 \end{array} \right. \rightarrow \frac{-Q}{\kappa} \frac{[\exp(\kappa x) - \exp[-\kappa(-L+x)]]}{(\exp(\kappa L) + 1)}$$

$$M(x) = \frac{Q}{\kappa} \frac{e^{-\kappa(x-L)} - e^{\kappa x}}{e^{\kappa L} + 1}$$

Momentin derivaatta ja sen nollakohta:

$$\frac{d}{dx} \frac{Q}{\kappa} \frac{e^{-\kappa(x-L)} - e^{\kappa x}}{e^{\kappa L} + 1} \rightarrow \frac{Q}{\kappa} \frac{[-\kappa \exp[-\kappa(-L+x)] - \kappa \exp(\kappa x)]}{(\exp(\kappa L) + 1)} \text{ solve, } x \rightarrow \frac{1}{2} \frac{(\kappa L + i\pi)}{\kappa}$$

Ei reaali juuria  $\rightarrow$  momentin ääriarvot päissä eli kun  $x = 0$  ja  $x = L$

Momentin arvot päissä:

$$\frac{Q}{\kappa} \frac{e^{-\kappa(x-L)} - e^{\kappa x}}{e^{\kappa L} + 1} \text{ substitute, } x = 0 \rightarrow \frac{Q}{\kappa} \frac{(\exp(\kappa L) - 1)}{(\exp(\kappa L) + 1)}$$

$$\frac{Q}{\kappa} \frac{e^{-\kappa(x-L)} - e^{\kappa x}}{e^{\kappa L} + 1} \text{ substitute, } x = L \rightarrow \frac{Q}{\kappa} \frac{(1 - \exp(\kappa L))}{(\exp(\kappa L) + 1)}$$

Muutetaan "mukavampaan" muotoon, tapaus  $M(0)$ :

$$M(0) = \frac{Q}{\kappa} \frac{e^{\kappa L} - 1}{e^{\kappa L} + 1} = \frac{Q}{\kappa} \frac{\left( \frac{e^{\frac{\kappa L}{2}} - e^{-\frac{\kappa L}{2}}}{e^{\frac{\kappa L}{2}} + e^{-\frac{\kappa L}{2}}} \right) e^{\frac{\kappa L}{2}}}{\left( \frac{e^{\frac{\kappa L}{2}} - e^{-\frac{\kappa L}{2}}}{e^{\frac{\kappa L}{2}} + e^{-\frac{\kappa L}{2}}} \right) e^{\frac{\kappa L}{2}}} = \frac{Q}{\kappa} \tanh\left(\frac{\kappa L}{2}\right)$$

Vastaavasti tapaus  $M(L)$ :

$$M(L) = -\frac{Q}{\kappa} \frac{e^{\kappa L} - 1}{e^{\kappa L} + 1} = -\frac{Q}{\kappa} \frac{\left( \frac{e^{\frac{\kappa L}{2}} - e^{-\frac{\kappa L}{2}}}{e^{\frac{\kappa L}{2}} + e^{-\frac{\kappa L}{2}}} \right) e^{\frac{\kappa L}{2}}}{\left( \frac{e^{\frac{\kappa L}{2}} - e^{-\frac{\kappa L}{2}}}{e^{\frac{\kappa L}{2}} + e^{-\frac{\kappa L}{2}}} \right) e^{\frac{\kappa L}{2}}} = -\frac{Q}{\kappa} \tanh\left(\frac{\kappa L}{2}\right)$$



Muokataan  $\kappa$ -termiä siten, että se lausutaan jännityksen avulla

$$\kappa = \sqrt{\frac{F}{EI}} \left\{ \begin{array}{l} \text{substitute, } I = \frac{bt^3}{12} \\ \text{substitute, } F = \sigma_{nim} bt \rightarrow \kappa = 2\sqrt{3} \left[ \frac{\sigma_{nim}}{t^2 E} \right] \left( \frac{1}{2} \right) \\ \text{simplify} \end{array} \right.$$

Merkitään  $\beta = \frac{\kappa L}{2}$  sijoittamalla  $\kappa$  saadaan  $\beta = \frac{L}{t} \sqrt{\frac{3\sigma_{nim}}{E}}$

Päiden momentiksi saadaan siten  $M(0) = -M(L) = M = QL \frac{\tanh(\beta)}{2\beta}$

Otaksutaan kulma  $\alpha$  pieneksi, jolloin  $\cos(\alpha/2)$  on likimain 1. Tällöin saadaan poikkeuttavaksi voimaksi

$Q = F \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)$  Sijoitetaan momentin yhtälöön:

$$M = F \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) L \frac{\tanh(\beta)}{2\beta} \text{ substitute, } L = \frac{y}{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \rightarrow M = \frac{1}{2} F y \frac{\tanh(\beta)}{\beta}$$

$$\sigma_{pnim} = \frac{F}{A} + \frac{M}{W} = \frac{F}{A} + \frac{\frac{1}{2} F y \frac{\tanh(\beta)}{\beta}}{\frac{bt^2}{6}}$$

$$\sigma_{pnim} = \frac{F}{A} + \frac{\frac{1}{2} F y \frac{\tanh(\beta)}{\beta}}{\frac{bt^2}{6}} \left\{ \begin{array}{l} \text{substitute, } A = bt \\ \text{substitute, } F = \sigma_{nim} bt \rightarrow \sigma_{pnim} = \left( 1 + \frac{3}{t} y \frac{\tanh(\beta)}{\beta} \right) \sigma_{nim} \\ \text{collect, } \sigma_{nim} \end{array} \right.$$

$\sigma_{pnim} = k_m \sigma_{nim}$  Siis  $k_m = 1 + \frac{3y}{t} \frac{\tanh(\beta)}{\beta}$

Pätevyysalue  $\frac{L}{t} \geq 5$  johtuen palkkiteorian pätevyys ehdosta (leikkausmuodonmuutosta ei ole otettu huomioon).

Termi  $\tanh(\beta)/\beta$  ottaa siis huomioon vedon aiheuttaman oikenemisen. Se on aina pienempi kuin yksi, joten laittamalla se arvoon 1 saadaan konservatiivinen tulos. Tällöin  $k_m$ :n arvoksi tulee sama kuin tapauksessa, jossa oikenemistä ei ole otettu huomioon. Tämä tulos voidaan johtaa esimerkiksi elementtimenetelmällä palkkielementin avulla.

Differentiaaliyhtälöstä laskettu taivutusmomentti voidaan esittää myös hyperbolisten funktioiden avulla:

$$M(x) = \frac{Q}{\kappa} \frac{e^{-\kappa(x-L)} - e^{\kappa x}}{e^{\kappa L} + 1} \quad \text{Sijoitetaan} \quad \kappa L = 2\beta$$

$$M(x) = \frac{Q}{\kappa} \frac{e^{2\beta - \kappa x} - e^{\kappa x}}{e^{2\beta} + 1} = \frac{Q}{\kappa} \frac{[e^{2(\beta - \kappa x)} - 1]e^{\kappa x}}{e^{2\beta} + 1} = \frac{Q}{\kappa} \frac{[e^{\beta - \kappa x} - e^{-(\beta - \kappa x)}]e^{\beta - \kappa x} e^{\kappa x}}{(e^{\beta} + e^{-\beta})e^{\beta}}$$

Nyt voidaan käyttää hyperbolisia funktioita:

$$M(x) = \frac{Q}{\kappa} \frac{2 \sinh(\beta - \kappa x) e^{\beta - \kappa x} e^{\kappa x}}{2 \cosh(\beta) e^{\beta}} = \frac{Q}{\kappa} \frac{\sinh(\beta - \kappa x) e^{\beta} e^{-\kappa x} e^{\kappa x}}{\cosh(\beta) e^{\beta}} = \frac{Q}{\kappa} \frac{\sinh(\beta - \kappa x)}{\cosh(\beta)}$$

Edelleen ilman summatermiä hyperbolisen funktion sisällä:

$$M(x) = \frac{Q}{\kappa} \frac{\sinh(\beta) \cosh(\kappa x) - \cosh(\beta) \sinh(\kappa x)}{\cosh(\beta)}$$

Sieventämällä tämä saadaan taivutusmomentille lauseke:

$$M(x) = \frac{Q}{\kappa} (\tanh(\beta) \cosh(\kappa x) - \sinh(\kappa x))$$

Vaihtoehtoinen muoto saadaan, kun sijoitetaan termin  $Q/\kappa$  tilalle:

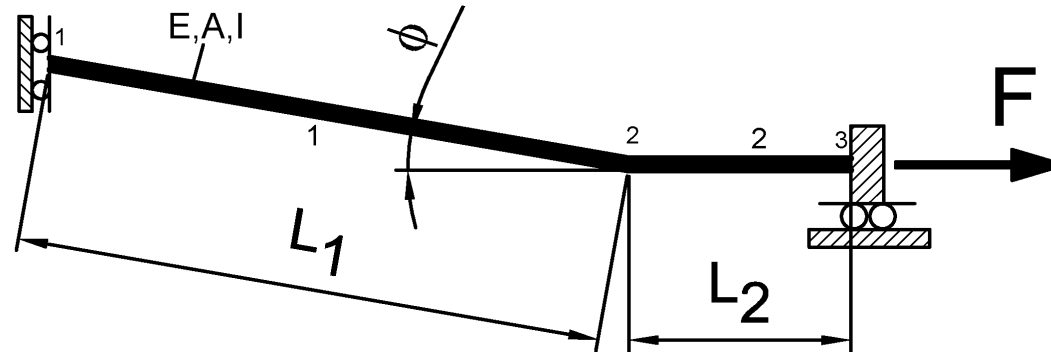
$$Q = F \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad \kappa = \frac{2\beta}{L}$$

$$M(x) = \frac{F \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) L}{2\beta} (\tanh(\beta) \cosh(\kappa x) - \sinh(\kappa x))$$

Ja edelleen sijoittamalla  $y = L \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)$

$$M(x) = \frac{F y}{2\beta} (\tanh(\beta) \cosh(\kappa x) - \sinh(\kappa x))$$

## Jännityksen suurennuskertoimen $k_m$ johtaminen taitetulle rakenteelle elementti-menetelmällä palkkielementtiä käyttäen.



Rakenne koostuu kuvan mukaisesti kahdesta palkkielementistä, joiden pituudet  $L_1$  ja  $L_2$ . Kummallakin elementillä samat materiaali- ja geometriset ominaisuudet.

Elementin jäykkysmatriisi (pituus  $L$ )

Voimavektori

Transformaatiomatriisi

$$K_e = \frac{E \cdot I}{L^3} \begin{pmatrix} \frac{A \cdot L^2}{I} & 0 & 0 & -\frac{A \cdot L^2}{I} & 0 & 0 \\ 0 & 12 & 6 \cdot L & 0 & -12 & 6 \cdot L \\ 0 & 6 \cdot L & 4 \cdot L^2 & 0 & -6 \cdot L & 2 \cdot L^2 \\ -\frac{A \cdot L^2}{I} & 0 & 0 & \frac{A \cdot L^2}{I} & 0 & 0 \\ 0 & -12 & -6 \cdot L & 0 & 12 & -6 \cdot L \\ 0 & 6 \cdot L & 2 \cdot L^2 & 0 & -6 \cdot L & 4 \cdot L^2 \end{pmatrix}$$

$$F = \begin{pmatrix} F_{x1} \\ F_{y1} \\ M_1 \\ F_{x2} \\ F_{y2} \\ M_2 \end{pmatrix}$$

$$T = \begin{pmatrix} \cos(\phi) & \sin(\phi) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sin(\phi) & \cos(\phi) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos(\phi) & \sin(\phi) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\sin(\phi) & \cos(\phi) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Elementin jäykkymatriisi globaalissa koordinaatistossa

$$\mathbf{K}_{eg} = \mathbf{T}^T \mathbf{K}_e \mathbf{T}$$

$$\mathbf{K}_{eg} = E \cdot I \cdot \begin{pmatrix} \cos(\phi) & \sin(\phi) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sin(\phi) & \cos(\phi) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos(\phi) & \sin(\phi) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\sin(\phi) & \cos(\phi) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} \frac{A}{(L \cdot I)} & 0 & 0 & \frac{-A}{(L \cdot I)} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12}{L^3} & \frac{6}{L^2} & 0 & \frac{-12}{L^3} & \frac{6}{L^2} \\ 0 & \frac{6}{L^2} & \frac{4}{L} & 0 & \frac{-6}{L^2} & \frac{2}{L} \\ \frac{-A}{(L \cdot I)} & 0 & 0 & \frac{A}{(L \cdot I)} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-12}{L^3} & \frac{-6}{L^2} & 0 & \frac{12}{L^3} & \frac{-6}{L^2} \\ 0 & \frac{6}{L^2} & \frac{2}{L} & 0 & \frac{-6}{L^2} & \frac{4}{L} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos(\phi) & \sin(\phi) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sin(\phi) & \cos(\phi) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos(\phi) & \sin(\phi) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\sin(\phi) & \cos(\phi) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{K}_{eg} = E \cdot I \cdot \begin{bmatrix} \cos(\phi)^2 \cdot \frac{A}{(L \cdot I)} + 12 \cdot \frac{\sin(\phi)^2}{L^3} & \sin(\phi) \cdot \cos(\phi) \cdot \frac{(A \cdot L^2 - 12 \cdot I)}{(L^3 \cdot I)} & -6 \cdot \frac{\sin(\phi)}{L^2} & -\cos(\phi)^2 \cdot \frac{A}{(L \cdot I)} - 12 \cdot \frac{\sin(\phi)^2}{L^3} & -\sin(\phi) \cdot \cos(\phi) \cdot \frac{(A \cdot L^2 - 12 \cdot I)}{(L^3 \cdot I)} & -6 \cdot \frac{\sin(\phi)}{L^2} \\ \sin(\phi) \cdot \cos(\phi) \cdot \frac{(A \cdot L^2 - 12 \cdot I)}{(L^3 \cdot I)} & \sin(\phi)^2 \cdot \frac{A}{(L \cdot I)} + 12 \cdot \frac{\cos(\phi)^2}{L^3} & 6 \cdot \frac{\cos(\phi)}{L^2} & -\sin(\phi) \cdot \cos(\phi) \cdot \frac{(A \cdot L^2 - 12 \cdot I)}{(L^3 \cdot I)} & -\sin(\phi)^2 \cdot \frac{A}{(L \cdot I)} - 12 \cdot \frac{\cos(\phi)^2}{L^3} & 6 \cdot \frac{\cos(\phi)}{L^2} \\ -6 \cdot \frac{\sin(\phi)}{L^2} & 6 \cdot \frac{\cos(\phi)}{L^2} & \frac{4}{L} & 6 \cdot \frac{\sin(\phi)}{L^2} & -6 \cdot \frac{\cos(\phi)}{L^2} & \frac{2}{L} \\ -\cos(\phi)^2 \cdot \frac{A}{(L \cdot I)} - 12 \cdot \frac{\sin(\phi)^2}{L^3} & -\sin(\phi) \cdot \cos(\phi) \cdot \frac{(A \cdot L^2 - 12 \cdot I)}{(L^3 \cdot I)} & 6 \cdot \frac{\sin(\phi)}{L^2} & \cos(\phi)^2 \cdot \frac{A}{(L \cdot I)} + 12 \cdot \frac{\sin(\phi)^2}{L^3} & \sin(\phi) \cdot \cos(\phi) \cdot \frac{(A \cdot L^2 - 12 \cdot I)}{(L^3 \cdot I)} & 6 \cdot \frac{\sin(\phi)}{L^2} \\ -\sin(\phi) \cdot \cos(\phi) \cdot \frac{(A \cdot L^2 - 12 \cdot I)}{(L^3 \cdot I)} & -\sin(\phi)^2 \cdot \frac{A}{(L \cdot I)} - 12 \cdot \frac{\cos(\phi)^2}{L^3} & -6 \cdot \frac{\cos(\phi)}{L^2} & \sin(\phi) \cdot \cos(\phi) \cdot \frac{(A \cdot L^2 - 12 \cdot I)}{(L^3 \cdot I)} & \sin(\phi)^2 \cdot \frac{A}{(L \cdot I)} + 12 \cdot \frac{\cos(\phi)^2}{L^3} & -6 \cdot \frac{\cos(\phi)}{L^2} \\ -6 \cdot \frac{\sin(\phi)}{L^2} & 6 \cdot \frac{\cos(\phi)}{L^2} & \frac{2}{L} & 6 \cdot \frac{\sin(\phi)}{L^2} & -6 \cdot \frac{\cos(\phi)}{L^2} & \frac{4}{L} \end{bmatrix}$$

Rakenteen globaali jäykkyyismatriisi (elementille 2 ei tarvita transformaatiota, koska se on globaalin koordinaatiston suuntainen)

$$\mathbf{K} = \mathbf{E} \cdot \mathbf{I} \cdot \begin{bmatrix}
 \cos(\phi)^2 \cdot \frac{A}{(L_1 \cdot I)} + 12 \cdot \frac{\sin(\phi)^2}{L_1^3} & \sin(\phi) \cdot \cos(\phi) \cdot \frac{(A \cdot L_1^2 - 12 \cdot I)}{(L_1^3 \cdot I)} & -6 \cdot \frac{\sin(\phi)}{L_1^2} & -\cos(\phi)^2 \cdot \frac{A}{(L_1 \cdot I)} - 12 \cdot \frac{\sin(\phi)^2}{L_1^3} & -\sin(\phi) \cdot \cos(\phi) \cdot \frac{(A \cdot L_1^2 - 12 \cdot I)}{(L_1^3 \cdot I)} & -6 \cdot \frac{\sin(\phi)}{L_1^2} & 0 & 0 & 0 \\
 \sin(\phi) \cdot \cos(\phi) \cdot \frac{(A \cdot L_1^2 - 12 \cdot I)}{(L_1^3 \cdot I)} & \sin(\phi)^2 \cdot \frac{A}{(L_1 \cdot I)} + 12 \cdot \frac{\cos(\phi)^2}{L_1^3} & 6 \cdot \frac{\cos(\phi)}{L_1^2} & -\sin(\phi) \cdot \cos(\phi) \cdot \frac{(A \cdot L_1^2 - 12 \cdot I)}{(L_1^3 \cdot I)} & -\sin(\phi)^2 \cdot \frac{A}{(L_1 \cdot I)} - 12 \cdot \frac{\cos(\phi)^2}{L_1^3} & 6 \cdot \frac{\cos(\phi)}{L_1^2} & 0 & 0 & 0 \\
 -6 \cdot \frac{\sin(\phi)}{L_1^2} & 6 \cdot \frac{\cos(\phi)}{L_1^2} & \frac{4}{L_1} & 6 \cdot \frac{\sin(\phi)}{L_1^2} & -6 \cdot \frac{\cos(\phi)}{L_1^2} & \frac{2}{L_1} & 0 & 0 & 0 \\
 -\cos(\phi)^2 \cdot \frac{A}{(L_1 \cdot I)} - 12 \cdot \frac{\sin(\phi)^2}{L_1^3} & -\sin(\phi) \cdot \cos(\phi) \cdot \frac{(A \cdot L_1^2 - 12 \cdot I)}{(L_1^3 \cdot I)} & 6 \cdot \frac{\sin(\phi)}{L_1^2} & \cos(\phi)^2 \cdot \frac{A}{(L_1 \cdot I)} + 12 \cdot \frac{\sin(\phi)^2}{L_1^3} + \frac{A}{(L_2 \cdot I)} & \sin(\phi) \cdot \cos(\phi) \cdot \frac{(A \cdot L_1^2 - 12 \cdot I)}{(L_1^3 \cdot I)} & 6 \cdot \frac{\sin(\phi)}{L_1^2} & \frac{-A}{(L_2 \cdot I)} & 0 & 0 \\
 -\sin(\phi) \cdot \cos(\phi) \cdot \frac{(A \cdot L_1^2 - 12 \cdot I)}{(L_1^3 \cdot I)} & -\sin(\phi)^2 \cdot \frac{A}{(L_1 \cdot I)} - 12 \cdot \frac{\cos(\phi)^2}{L_1^3} & -6 \cdot \frac{\cos(\phi)}{L_1^2} & \sin(\phi) \cdot \cos(\phi) \cdot \frac{(A \cdot L_1^2 - 12 \cdot I)}{(L_1^3 \cdot I)} & \sin(\phi)^2 \cdot \frac{A}{(L_1 \cdot I)} + 12 \cdot \frac{\cos(\phi)^2}{L_1^3} + \frac{12}{L_2^3} & -6 \cdot \frac{\cos(\phi)}{L_1^2} + \frac{6}{L_2^2} & 0 & \frac{-12}{L_2^3} & \frac{6}{L_2^2} \\
 -6 \cdot \frac{\sin(\phi)}{L_1^2} & 6 \cdot \frac{\cos(\phi)}{L_1^2} & \frac{2}{L_1} & 6 \cdot \frac{\sin(\phi)}{L_1^2} & -6 \cdot \frac{\cos(\phi)}{L_1^2} + \frac{6}{L_2^2} & \frac{4}{L_1} + \frac{4}{L_2} & 0 & \frac{-6}{L_2^2} & \frac{2}{L_2} \\
 0 & 0 & 0 & \frac{-A}{(L_2 \cdot I)} & 0 & 0 & \frac{A}{(L_2 \cdot I)} & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-12}{L_2^3} & \frac{-6}{L_2^2} & 0 & \frac{12}{L_2^3} & \frac{-6}{L_2^2} \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{6}{L_2^2} & \frac{2}{L_2} & 0 & \frac{-6}{L_2^2} & \frac{4}{L_2}
 \end{bmatrix}$$

Nollataan rivit ja sarakkeet 1, 3, 8 ja 9 sekä asetetaan näiden diagonaalitermit ykkösiksi (reunaehdot). Kerrotaan käänteismatriisi voimavektorilla.  $\mathbf{U} = \mathbf{K}^{-1} \cdot \mathbf{F}$

$$\mathbf{U} = E \cdot I \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sin(\phi)^2 \cdot \frac{A}{(L_1 \cdot I)} + 12 \cdot \frac{\cos(\phi)^2}{L_1^3} & 0 & -\sin(\phi) \cdot \cos(\phi) \cdot \frac{(A \cdot L_1^2 - 12 \cdot I)}{(L_1^3 \cdot I)} & -\sin(\phi)^2 \cdot \frac{A}{(L_1 \cdot I)} - 12 \cdot \frac{\cos(\phi)^2}{L_1^3} & 6 \cdot \frac{\cos(\phi)}{L_1^2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\sin(\phi) \cdot \cos(\phi) \cdot \frac{(A \cdot L_1^2 - 12 \cdot I)}{(L_1^3 \cdot I)} & 0 & \cos(\phi)^2 \cdot \frac{A}{(L_1 \cdot I)} + 12 \cdot \frac{\sin(\phi)^2}{L_1^3} + \frac{A}{(L_2 \cdot I)} & \sin(\phi) \cdot \cos(\phi) \cdot \frac{(A \cdot L_1^2 - 12 \cdot I)}{(L_1^3 \cdot I)} & 6 \cdot \frac{\sin(\phi)}{L_1^2} & \frac{-A}{(L_2 \cdot I)} & 0 & 0 \\ 0 & -\sin(\phi)^2 \cdot \frac{A}{(L_1 \cdot I)} - 12 \cdot \frac{\cos(\phi)^2}{L_1^3} & 0 & \sin(\phi) \cdot \cos(\phi) \cdot \frac{(A \cdot L_1^2 - 12 \cdot I)}{(L_1^3 \cdot I)} & \sin(\phi)^2 \cdot \frac{A}{(L_1 \cdot I)} + 12 \cdot \frac{\cos(\phi)^2}{L_1^3} + \frac{12}{L_2^3} & -6 \cdot \frac{\cos(\phi)}{L_1^2} + \frac{6}{L_2^2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 6 \cdot \frac{\cos(\phi)}{L_1^2} & 0 & 6 \cdot \frac{\sin(\phi)}{L_1^2} & -6 \cdot \frac{\cos(\phi)}{L_1^2} + \frac{6}{L_2^2} & \frac{4}{L_1} + \frac{4}{L_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{-A}{(L_2 \cdot I)} & 0 & 0 & \frac{A}{(L_2 \cdot I)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ F \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Saadetaan tulokseksi solmujen siirtymät **U**.

$$\mathbf{U} = \frac{1}{E \cdot I} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{12} \cdot \sin(\phi) \cdot L_1 \cdot F \cdot \frac{\left(-12 \cos(\phi) \cdot L_1 \cdot l + \cos(\phi) \cdot A \cdot L_1^3 + 3 \cdot L_1 \cdot L_2^2 \cdot A - 12 \cos(\phi) \cdot L_2 \cdot l + 4 \cdot \cos(\phi) \cdot L_2 \cdot A \cdot L_1^2\right)}{\left[A \cdot (L_2 + L_1)\right]} \\ 0 \\ \frac{-1}{12} \cdot L_1 \cdot F \cdot \frac{\left(-4 \cdot A \cdot L_1^2 \cdot L_2 + 4 \cdot \cos(\phi)^2 \cdot A \cdot L_1^2 \cdot L_2 - A \cdot L_1^3 + \cos(\phi)^2 \cdot A \cdot L_1^3 - 12 \cos(\phi)^2 \cdot l \cdot L_2 - 12 \cos(\phi)^2 \cdot l \cdot L_1\right)}{\left[A \cdot (L_2 + L_1)\right]} \\ \frac{1}{4} \cdot L_2^2 \cdot L_1^2 \cdot \sin(\phi) \cdot \frac{F}{(L_2 + L_1)} \\ \frac{-1}{2} \cdot L_2 \cdot L_1^2 \cdot \sin(\phi) \cdot \frac{F}{(L_2 + L_1)} \\ \frac{1}{12} \cdot F \cdot \frac{\left(12 \cdot L_2 \cdot \cos(\phi)^2 \cdot l \cdot L_1 + 12 \cos(\phi)^2 \cdot l \cdot L_1^2 + 12 \cdot l \cdot L_2^2 + 12 \cdot L_1 \cdot l \cdot L_2 + L_1^4 \cdot A - \cos(\phi)^2 \cdot A \cdot L_1^4 + 4 \cdot A \cdot L_1^3 \cdot L_2 - 4 \cdot \cos(\phi)^2 \cdot A \cdot L_1^3 \cdot L_2\right)}{\left[A \cdot (L_2 + L_1)\right]} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Kerrotaan globaali jäykkymatriisi siirtymävektorilla, niin saadaan reaktiovoimat (elementin päässä tuella) globaalikoordinaatistossa. Termi  $EI$  supistuu tässä tapauksessa pois. Matriisien tulo on tässä jätetty liika tilaa vievänä pois, koska ne esiintyvät edellä.

**K · U = F** Tulokseksi saadaan

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} -F \\ 0 \\ \frac{1}{2} \cdot \sin(\phi) \cdot F \cdot L_1 \cdot \frac{(2 \cdot L_2 + L_1)}{(L_2 + L_1)} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ F \\ 0 \\ \frac{1}{2} \cdot L_1^2 \cdot \sin(\phi) \cdot \frac{F}{(L_2 + L_1)} \end{bmatrix}$$

Taivutusmomentit tuella ovat siis  $M_1 = \frac{1}{2} \cdot \sin(\phi) \cdot F \cdot L_1 \cdot \left(1 + \frac{L_2}{L_1 + L_2}\right)$       $M_2 = \frac{1}{2} \cdot \sin(\phi) \cdot F \cdot L_1 \cdot \frac{L_1}{L_1 + L_2}$

Merkitään  $y = \sin(\phi) \cdot L$       $M_1 = \frac{1}{2} \cdot F \cdot y \cdot \left(1 + \frac{L_2}{L_1 + L_2}\right)$       $M_2 = \frac{1}{2} \cdot F \cdot y \cdot \frac{L_1}{L_1 + L_2}$

$$\sigma_{pnim} = \frac{N}{A} + \frac{M_1}{W} = \frac{F \cdot \cos(\phi)}{A} + \frac{\frac{1}{2} \cdot F \cdot y \cdot \left(1 + \frac{L_2}{L_1 + L_2}\right)}{\frac{t^2}{6}} = \frac{F}{A} \cdot \left[\cos(\phi) + \frac{3 \cdot y \cdot \left(1 + \frac{L_2}{L_1 + L_2}\right)}{t}\right] \quad (A = 1 \cdot t) \quad \sigma_{nim} = \frac{F}{A} \quad k_m = \frac{\sigma_{pnim}}{\sigma_{nim}} \quad \text{eli} \quad k_m = \cos(\phi) + \frac{3 \cdot y}{t} \cdot \left(1 + \frac{L_2}{L_1 + L_2}\right)$$

Kun kulma  $\phi$  on pieni, sen kosini on likimain yksi eli

$$k_m = 1 + \frac{3 \cdot y}{t} \cdot \left(1 + \frac{L_2}{L_1 + L_2}\right) = 1 + \lambda \cdot \frac{3y}{t}$$

Elementtien päiden voimat elementtikoordinaatistossa saadaan kertomalla elementin jäykkymatriisi transformaatiomatriisilla ja elementtiin liittyvien solmujen solmusiirtymävektorilla

$$\mathbf{F}_e = \mathbf{K}_e \cdot \mathbf{T} \cdot \mathbf{U}_e$$

Elementti 1

$$\frac{1}{L_1^3} \begin{pmatrix} \frac{A \cdot L_1^2}{I} & 0 & 0 & -\frac{A \cdot L_1^2}{I} & 0 & 0 \\ 0 & 12 & 6 \cdot L_1 & 0 & -12 & 6 \cdot L_1 \\ 0 & 6 \cdot L_1 & 4 \cdot L_1^2 & 0 & -6 \cdot L_1 & 2 \cdot L_1^2 \\ -\frac{A \cdot L_1^2}{I} & 0 & 0 & \frac{A \cdot L_1^2}{I} & 0 & 0 \\ 0 & -12 & -6 \cdot L_1 & 0 & 12 & -6 \cdot L_1 \\ 0 & 6 \cdot L_1 & 2 \cdot L_1^2 & 0 & -6 \cdot L_1 & 4 \cdot L_1^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(\phi) & \sin(\phi) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sin(\phi) & \cos(\phi) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos(\phi) & \sin(\phi) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\sin(\phi) & \cos(\phi) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{1}{12} \cdot \sin(\phi) \cdot L_1 \cdot F \cdot \frac{\left(-12 \cos(\phi) \cdot L_1 \cdot I + \cos(\phi) \cdot A \cdot L_1^3 + 3 \cdot L_1 \cdot L_2^2 \cdot A - 12 \cos(\phi) \cdot L_2 \cdot I + 4 \cdot \cos(\phi) \cdot L_2 \cdot A \cdot L_1^2\right)}{\left[A \cdot (L_2 + L_1)\right]} \\ 0 \\ -\frac{1}{12} \cdot L_1 \cdot F \cdot \frac{\left(-4 \cdot A \cdot L_1^2 \cdot L_2 + 4 \cdot \cos(\phi)^2 \cdot A \cdot L_1^2 \cdot L_2 - A \cdot L_1^3 + \cos(\phi)^2 \cdot A \cdot L_1^3 - 12 \cos(\phi)^2 \cdot I \cdot L_2 - 12 \cos(\phi)^2 \cdot I \cdot L_1\right)}{\left[A \cdot (L_2 + L_1)\right]} \\ \frac{1}{4} \cdot L_2^2 \cdot L_1^2 \cdot \sin(\phi) \cdot \frac{F}{(L_2 + L_1)} \\ -\frac{1}{2} \cdot L_2 \cdot L_1^2 \cdot \sin(\phi) \cdot \frac{F}{(L_2 + L_1)} \end{pmatrix} \xrightarrow{\text{simplify}} \begin{pmatrix} -\cos(\phi) \cdot F \\ \sin(\phi) \cdot F \\ \frac{1}{2} \cdot \sin(\phi) \cdot F \cdot L_1 \cdot \frac{(2 \cdot L_2 + L_1)}{(L_2 + L_1)} \\ \cos(\phi) \cdot F \\ -\sin(\phi) \cdot F \\ \frac{1}{2} \cdot \sin(\phi) \cdot F \cdot \frac{L_1^2}{(L_2 + L_1)} \end{pmatrix}$$

Elementti 2

$$\frac{1}{L_2^3} \begin{pmatrix} \frac{A \cdot L_2^2}{I} & 0 & 0 & -\frac{A \cdot L_2^2}{I} & 0 & 0 \\ 0 & 12 & 6 \cdot L_2 & 0 & -12 & 6 \cdot L_2 \\ 0 & 6 \cdot L_2 & 4 \cdot L_2^2 & 0 & -6 \cdot L_2 & 2 \cdot L_2^2 \\ -\frac{A \cdot L_2^2}{I} & 0 & 0 & \frac{A \cdot L_2^2}{I} & 0 & 0 \\ 0 & -12 & -6 \cdot L_2 & 0 & 12 & -6 \cdot L_2 \\ 0 & 6 \cdot L_2 & 2 \cdot L_2^2 & 0 & -6 \cdot L_2 & 4 \cdot L_2^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -\frac{1}{12} \cdot L_1 \cdot F \cdot \frac{\left(-4 \cdot A \cdot L_1^2 \cdot L_2 + 4 \cdot \cos(\phi)^2 \cdot A \cdot L_1^2 \cdot L_2 - A \cdot L_1^3 + \cos(\phi)^2 \cdot A \cdot L_1^3 - 12 \cos(\phi)^2 \cdot I \cdot L_2 - 12 \cos(\phi)^2 \cdot I \cdot L_1\right)}{\left[A \cdot (L_2 + L_1)\right]} \\ \frac{1}{4} \cdot L_2^2 \cdot L_1^2 \cdot \sin(\phi) \cdot \frac{F}{(L_2 + L_1)} \\ -\frac{1}{2} \cdot L_2 \cdot L_1^2 \cdot \sin(\phi) \cdot \frac{F}{(L_2 + L_1)} \\ \frac{1}{12} \cdot F \cdot \frac{\left(12 \cdot L_2 \cos(\phi)^2 \cdot I \cdot L_1 + 12 \cos(\phi)^2 \cdot I \cdot L_1^2 + 12 \cdot I \cdot L_2^2 + 12 \cdot L_1 \cdot I \cdot L_2 + L_1^4 \cdot A - \cos(\phi)^2 \cdot A \cdot L_1^4 + 4 \cdot A \cdot L_1^3 \cdot L_2 - 4 \cos(\phi)^2 \cdot A \cdot L_1^3 \cdot L_2\right)}{\left[A \cdot (L_2 + L_1)\right]} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \xrightarrow{\text{simplify}} \begin{pmatrix} -F \\ 0 \\ -\frac{1}{2} \cdot \sin(\phi) \cdot F \cdot \frac{L_1^2}{(L_2 + L_1)} \\ F \\ 0 \\ \frac{1}{2} \cdot \sin(\phi) \cdot F \cdot \frac{L_1^2}{(L_2 + L_1)} \end{pmatrix}$$