LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Teknillinen tiedekunta

LUT Kone

Konstruktiotekniikan koulutusohjelma

Markus Wilén

PITUUSSUUNNASSA HITSATUN RAKENNEPUTKEN VÄSYMISLUJUUS HF – HITSAUSTA KÄYTETTÄESSÄ

Työn tarkastajat: Professori Timo Björk
TkT Timo Nykänen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

Teknillinen tiedekunta

LUT Kone

Markus Wilén

Pituussuunnassa hitsatun rakenneputken väsymislujuus HF –hitsausta käytettäessä

Diplomityö

2014

61 sivua, 33 kuvaa, 6 taulukkoa ja 7 liitettä

Tarkastajat: Professori Timo Björk

TkT Timo Nykänen

Hakusanat: HF –hitsi, väsymislujuus, suurtaajuushitsaus, rakenneputket

Tässä diplomityössä määritettiin pituussuunnassa hitsatun rakenneputken väsymislujuus HF –hitsausta käytettäessä. Työn tavoitteena oli vertailla eri jälkikäsittelyjen ja kahden eri materiaalin vaikutusta väsymislujuuteen. Materiaaleina kokeissa oli Ruukki double grade ja Optim 700 Plus MH. Eurokoodi 3 ja IIW määrittelee kiinnityshitseille väsymiskestävyysluokaksi 125-140, kun SN -käyrän kaltevuus, m = 3. Koetuloksia vertailtiin näihin valmiiksi määriteltyihin väsymiskestävyysluokkiin.

Ruukki Metals Oy toimitti koemateriaalin kahdenlaisia väsytyskokeita varten, joiden avulla väsymislujuus voitiin määrittää. Ensimmäinen koe suoritettiin värähtelyllä hyödyntäen rakenneputken ominaistaajuutta, jolloin kuormituksen rajajännityssuhde on -1. Toinen väsytyskoe suoritettiin rakenneputkista leikatuille väsytyssauvoille, missä pituussuuntainen HF –hitsi on keskellä sauvaa. Tämä väsytyskoe suoritettiin vetotykytyksellä rajajännityssuhteella 0,1.

Väsytyskokeissa havaittiin, että kiinnityshitsi täyttää sille asetetut vaatimukset, koska murtumat tapahtuivat perusaineesta. Tällöin koetuloksia vertaillaan Eurokoodi 3:n perusaineen väsymisluokkaan 160, SN -käyrän kaltevuudella m = 5. Kaikkien koetulosten väsymiskestävyysluokan keskiarvoksi saatiin 185 95 %:n todennäköisyydellä. Tutkimuksessa saatiin arvokasta tietoa kahden eri materiaalin väsymislujuudesta. Materiaalilla ei kuitenkaan havaittu vaikutusta lujuuteen. Eri jälkikäsittelyt eli juuren puolen metallipurseen höyläys tai pituussuuntaisen hitsisauman hehkutus eivät vaikuttaneet väsymislujuuteen. Kokeissa väsymismurtuma ydintyi rakenneputken pinnalta olevista alkuvioista, joten putkien käsittelyä valmistuksen jälkeen voitaisiin parantaa.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology

LUT School of Technology

Mechanical Engineering

Markus Wilén

Fatigue strength assessment of longitudinally HF –welded square hollow sections

Master's Thesis

2014

61 pages, 33 pictures, 6 tables and 7 appendixes

Examiners: Professor Timo Björk

D.Sc (Tech.) Timo Nykänen

Keywords: HF –weld, fatigue strength, high frequency welding, square hollow sections

In this thesis the purpose was to determine the fatigue strength of longitudinally HF –welded square hollow sections. Two different materials' and post-processing's effect on fatigue strength was examined. Materials under examination were Ruukki double grade and Optim 700 Plus MH. Eurocode 3's and IIW's assessment of fatigue class with SN-curve's slope $m = 3$ for fixing welds are 125-140. The results are compared to these current fatigue classes.

Ruukki Metals Oy delivered the test material for fatigue tests. The fatigue strength was examined by two different kinds of tests. The first test series accomplished with vibration, using nominal frequency of structure beam with stress ratio -1. In second test series the fatigue sticks cut from the structure beam and loaded by tension. The stress ratio was 0.1 and longitudinal weld was in the middle of the stick.

Based on results, the fixing weld fulfils the demands because crack propagation began from the base material. Because of that, results have to be compared to fatigue class 160 by Eurocode 3. In this case the slope of SN-curve is 5. The average fatigue class of the results is 185, with 95 % probability. Tests indicate that there is no difference between materials. Examined post-processing does not have effect on strength. Post-processing under examination was reduced residual stresses and removed extruded metal from the inner side of the beam. According to test the crack propagation begins from defects on the beam's outer surface. This shows that the post-treatment after beam's production could be improved.

SISÄLTÖ

1 JOHDANTO 8

2 TAVOITE JA TAUSTA 9

2.1 Kiinnitysliitos 9

2.2 Väsymislujuus 11

2.3 Väsymismurtuma 13

3 MATERIAALIT JA MENETELMÄT 16

3.1 Rakenneputkien valmistus 16

3.2 Mitatut poikkipintasuureet 20

3.3 Mitatut nimelliset lujuusarvot 20

3.3.1 Kovuus 20

3.3.2 Vetokoe 21

3.4 Jäännösjännitykset 22

3.4.1 Jäännösjännityksien mittaaminen 22

3.4.2 Jäännösjännityksien tarkastelu väsymiskestävyydessä 25

4 VÄSYTYSKOKEET 27

4.1 Värähtely $R = -1$ 30

4.2 Vetotykytys $R = 0{,}1$ 33

5 KOETULOKSET 37

5.1 Värähtelykokeiden tulokset 37

5.2 Vetotykytyskokeiden tulokset 37

6 TULOSTEN TARKASTELU 39

6.1 Murtopinnat 40

6.1.1 Värähtely 40

6.1.2 Vetotykytys 46

6.2 Rakenneputkien ominaisuuksien ja materiaalien erot 50

6.3 Kuormituksen tehollisuus 52
7 JATKOTUTKIMUKSET 56
8 JOHTOPÄÄTÖKSET 57
LÄHTEET 59

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

E	Materiaalin kimmokerroin	[MPa]
e	Etäisyys neutraaliakselilta	[mm]
e_1	Etäisyys neutraaliakselilta rakenneputken alapintaan	[mm]
e_2	Etäisyys neutraaliakselilta rakenneputken yläpintaan	[mm]
f_y	Materiaalin myötölujuus	[Mpa]
f_u	Materiaalin murtolujuus	[MPa]
$\mathrm{FAT}_{50\%}$	Väsymiskestävyysluokka	[MPa]
$\mathrm{FAT}_{95\%}$	Karakteristinen väsymiskestävyysluokka	[MPa]
I	Rakenneputken poikkileikkauksen neliömomentti	[mm^4]
L	Palkin pituus	[m]
$M_{\max}$	Maksimi momentti	[Nm]
$M(x)$	Särön kohdalla vaikuttava momentti	[Nm]
m	SN –käyrän kulmakerroin	
N_f	Vaurioon johtaneiden kuormanvaihtojen lukumäärä	
n	Kuormanvaihtojen lukumäärä	
q	Tasaisesti jakautunut kuorma	[N/m]
R	Rajajännityssuhde	
r	Kaarevuussäde	[mm]
x	Särön etäisyys tuennasta	[m]
x_1	Tuennan etäisyys putken vasemmasta päästä	[mm]
x_2	Tuennan etäisyys putken oikeasta päästä	[mm]
x_3	Särön sijainti putken vasemmasta päästä	[mm]
x_4	Vastusvenymäanturin sijainti putken leveyssuunnassa	[mm]
$\Delta\sigma$	Jännitysvaihtelu	[MPa]
$\Delta\sigma_{\mathrm{ekv}}$	Ekvivalentti jännitysvaihtelu	[MPa]
ε	Venymä	[microstrain]
σ	Jännitys	[MPa]
$\sigma_{\max}$	Kuormituksen maksimi jännitys	[MPa]
$\sigma_{\min}$	Kuormituksen minimi jännitys	[MPa]
$\sigma_{\parallel}$	Sekundaarinen aksiaalijännitys	[MPa]
$\tau_{\parallel}$	Pituussuuntainen leikkausjännitys	[MPa]

Lyhenteet

DG	Ruukki double grade
FAT	Fatigue class, väsymiskestävyysluokka
FIMECC	Finnish Metals and Engineering Competence Cluster Ltd
HF	High frequency, suurtaajuus
Optim	Optim 700 Plus MH

1 JOHDANTO

Teräsrakenteissa tulee ottaa huomioon myös väsymisilmiö staattisen mitoituksen rinnalla, koska 80-90 % rakenteiden murtumisesta johtuu kyseisestä ilmiöstä. (Niemi 2003, s.92) Hitsattujen teräsrakenteiden murtuminen aiheutuu särönkasvuilmiöstä, jolloin särö ydintyy alkuvioista. Valmistusvaiheessa syntyviä alkuvikoja pyritään eliminoimaan väsymiskestoiän kasvattamiseksi. Kun valmistusvaiheessa syntyneet alkuviat ovat kasvaneet riittävän isoiksi, jolloin rakenteella on suuri murtumismahdollisuus, niin rakenteen käyttöikä on lopussa. (Niemi & Kemppi 1993, s. 229) Tämän vuoksi on tärkeätä tutkia rakenneputkien väsymiskestävyyttä, koska niitä käytetään myös väsytyskuormitetuissa teräsrakenteissa. Tällöin voidaan varmistaa, ettei itse rakenneputken kiinnitysliitos ole kriittisempi kuin muut liitokset teräsrakenteessa.

Tämä diplomityö tehtiin Lappeenrannan teknillisen yliopiston teräsrakenteiden laboratoriossa osana FIMECC:n Light -projektia. Työssä tutkitaan Ruukki Metals Oy:n erikoislujaa Optim 700 Plus MH ja Ruukki double grade rakenneputkien kiinnitysliitosten väsymiskestävyyttä. Aiempaa tutkimustyötä juuri rakenneputkien pituussuuntaisesta kiinnitysliitoksesta ei löydy, joten tutkimustyön tulokset ovat merkittäviä tulevaisuuden kannalta.

Teräsrakenteiden väsymismitoituksessa ollaan jatkuvasti menossa kehityksessä eteenpäin erityisesti tutkimustyön kautta. Yleisesti päteviä ohjeita mitoitukseen antaa Eurocode 3 standardi ja IIW:n suositukset.

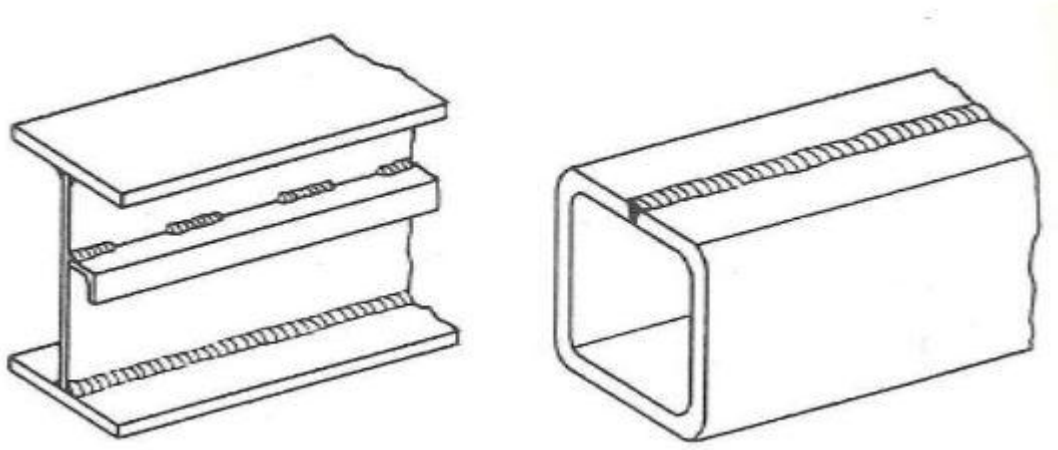
2 TAVOITE JA TAUSTA

Tämän diplomityön tavoitteena on määrittää väsymiskestävyysluokka eli FAT –luokka rakenneputken kiinnitysliitokselle. Osana tavoitetta on myös vertailla kahden eri materiaalin välisiä eroja, sekä jäännösjännityksien vaikutusta liitoksen väsymiskestävyyteen. Tutkimuksen väsytyskokeissa käytetään kahta eri rajajännityssuhdetta, jotta tuloksia pystyttäisiin verifioimaan. Ennen tutkimuksen tekemistä tulee myös perehtyä kiinnitysliitoksiin ja mitä nykyiset suositukset ja standardit sanovat tällä hetkellä kiinnitysliitosten väsymiskestävyysluokista.

2.1 Kiinnitysliitos

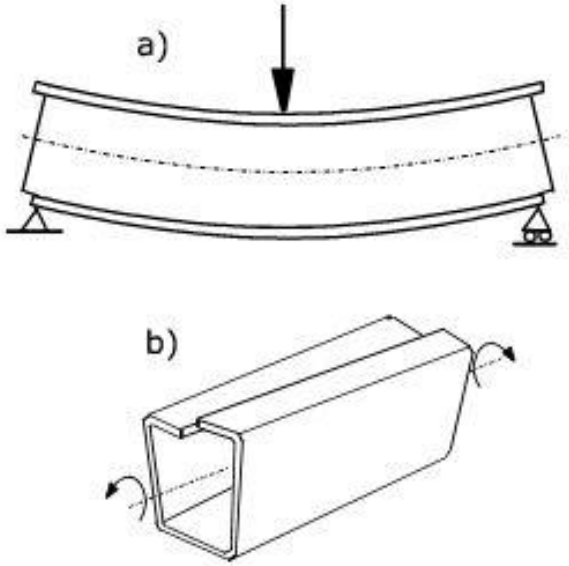
Teräsrakenteissa käytetään eri tarkoituksiin neljää eri liitostyyppiä: voima-, kiinnitys-, varusteluhitsi ja sideliitos. Tässä tutkimuksessa liitokset ovat sideliitoksia, kokeiden kuormitustapauksien vuoksi. Kokeissa liitokseen kohdistuu vain sekundaarinen aksiaalijännitys, eikä ollenkaan primaarista kuormaa. Sekundaarinen kuorma on kuitenkin kriittinen myös kiinnitysliitoksen väsymisessä, joten tässä tutkimuksessa käsitellään kiinnityshitsin väsymistä sisältäen molemmat liitostyypit. (Niemi 2003, s. 64)

Kiinnitysliitosta käytetään yleisesti levykenttien yhteen liittämiseen, esimerkiksi kotelopalkki tai kylmämuovattu rakenneputki. Kuvassa 1 esitetään esimerkkejä kiinnityshitseistä, jotka ovat yleisesti koko rakenteen pituisia. (Niemi 2003, s. 62)



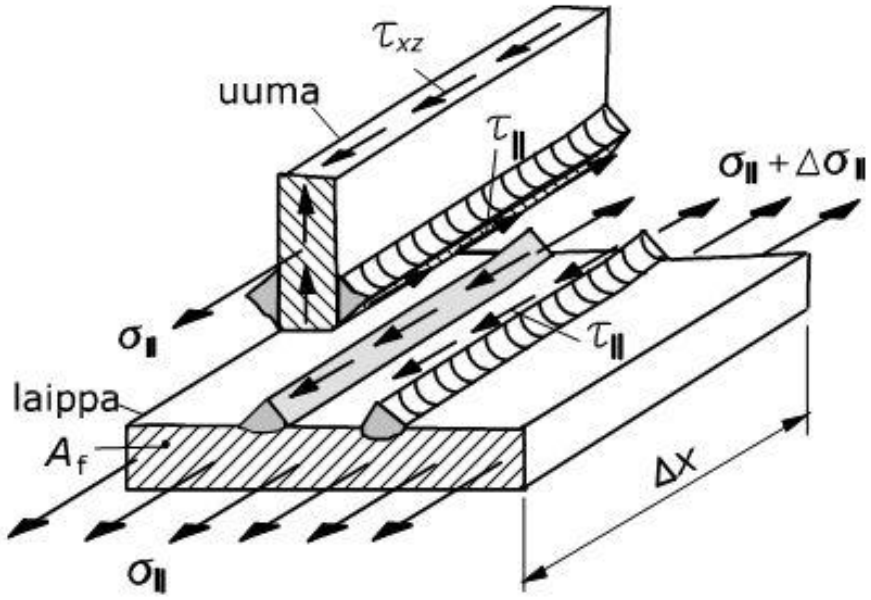
Kuva 1. Kiinnitysliitoksia. (Niemi & Kemppi 1993, s. 18)

Kiinnitysliitos on tärkeä rakenneputken kestävyyden kannalta, koska kiinnityshitsin puuttuessa profiilin poikkileikkauksen levykentät pääsisivät liukumaan kuvan 2 mukaisesti. Lisäksi rakenneputken jäykkyys on huomattavasti parempi kiinnityshitsin ansiosta, ilman hitsiä se olisi kuin avoin profiili. (Niemi 2003, s. 63)



Kuva 2. Kiinnityshitsien puuttumisesta aiheutuvat liukumat. (Niemi 2003, s. 63)

Rakenneputken kiinnityshitsiin syntyy pituussuuntaisia leikkausjännityksiä, $\tau_{\parallel}$ estettyjen liukumien vuoksi kuvan kuormitustapauksessa. Nämä leikkausjännitykset ovat primaarisia jännityksiä. Kuvassa 3 esitetään kiinnityshitsiin syntyvät jännitykset. (Niemi 2003, s. 63)



Kuva 3. Kiinnityshitsissä syntyvät jännitykset. (Niemi 2003, s. 63)

Kuvassa 3 näkyvien leikkausjännityksien lisäksi hitsiin muodostuu sekundaarisia aksiaalijännityksiä, $\sigma_{\parallel}$, jotka ovat väsymisen kannalta kriittisiä. Nämä sekundaariset aksiaalijännitykset väsyttävät rakennetta tutkimuksen kokeissa ja primaarinen leikkausjännitys on kuormituksessa nolla. (Niemi 2003, s. 63)

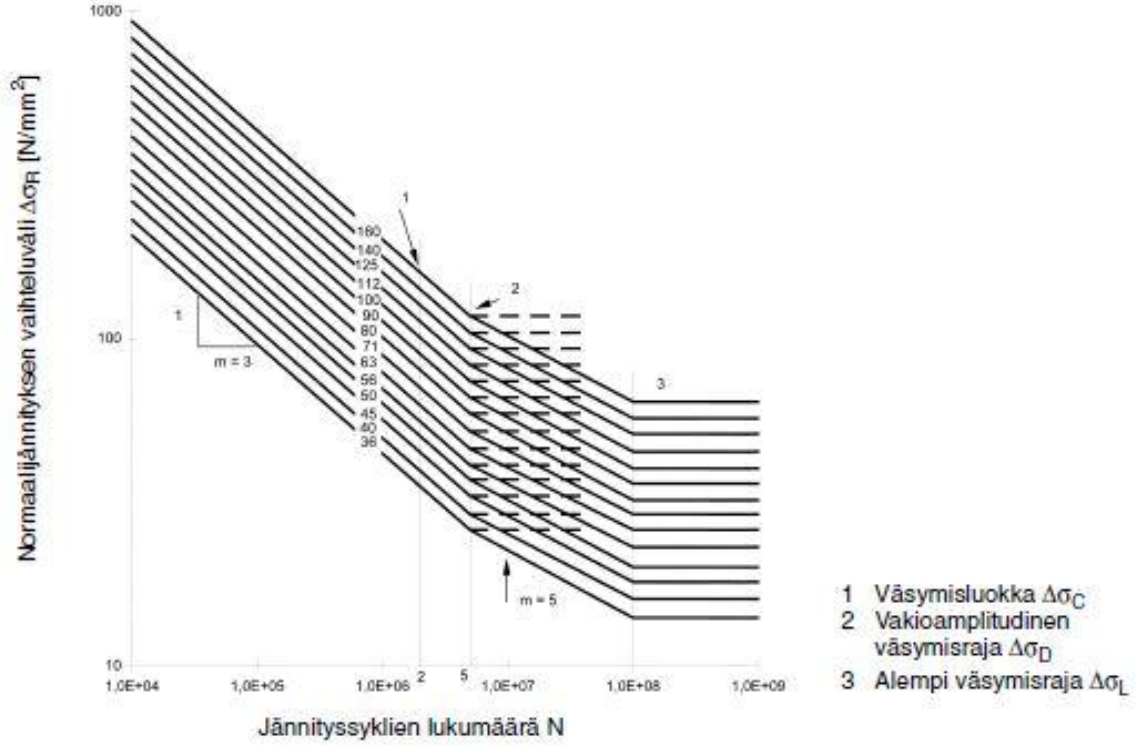
Kuten aiemmin todettiin, niin kiinnityshitsit ovat yleisesti yhtä pitkiä kuin rakenne, joka liitetään. Tällöin hitsien pituudet voivat olla pitkiä, jolloin niitä ei tarvitse mitoittaa tasalujiksi. Lisäksi kiinnityshitsiin kohdistuvat kuormat ovat yleensä helposti laskettavissa.

2.2 Väsymislujuus

Yleisesti hitsattujen rakenteiden ja myös rakenneputkien elinikä on rajallinen. Vaikka rakenteet kestävätkin staattisen kuormituksen, niin rakenteiden elinikää rajoittaa särönkasvuna ilmenevä väsyminen, joka aiheutuu vaihtelevasta kuormituksesta. (Niemi & Kemppi 1993, s. 229)

Väsymiskestävyysluokkia käytetään rakenteen kestoiän määrittämisessä. Luokat kertovat, kuinka monta kuormanvaihtoa kyseinen liitos kestää tietyllä jännitysvaihtelulla. Väsymiskestävyysluokat on määritelty kokeellisesti ja IIW:n julkaisu sekä Eurocode 3 ovat määritelleet valmiit luokat yleisimmille liitoksille. Yleisesti luokat esitetään SN -käyrien

(jännitys-kestoikä-käyrä) avulla. Kuvassa 4 esitetään Eurocode 3:n mukaiset SN -käyrät vakio-amplitudiselle kuormitukselle. (SFS-EN 1993-1-9 s. 14-15)



Kuva 4. Vakioamplitudisen kuormituksen SN -käyrä (SFS-EN 1993-1-9 s.15)

Kuvan 4 kuvaajassa vaaka-akselilla on kuormanvaihtojen lukumäärä ja pystyakselilla jännitysvaihteluväli. Kuvaajassa logaritmiselle asteikolle piirretyt käyrät vastaavat eri väsymiskestävyysluokkia. Kuvaajassa on referenssipiste $2 \cdot 10^6$ murtumiseen johtavien kuormanvaihtojen kohdalla, jolloin käyrän leikkauspiste kertoo väsymiskestävyysluokan FAT –arvon. (SFS-EN 1993-1-9, s. 15)

Työn tavoitteen mukaisesti FAT –luokka voidaan määrittää kokeellisesti joko vakio- tai vaihtuva-amplitudisella kuormituksella. FAT –luokka voidaan määrittää kaavan 1 avulla, kun tiedetään kuormitus ja murtumiseen johtavien kuormanvaihtojen lukumäärä.

$$\mathrm{FAT}_{50\%} = \Delta\sigma_{\mathrm{ekv}} \cdot \sqrt[m]{\frac{N_{\mathrm{f}}}{2 \cdot 10^6}} \qquad (1)$$

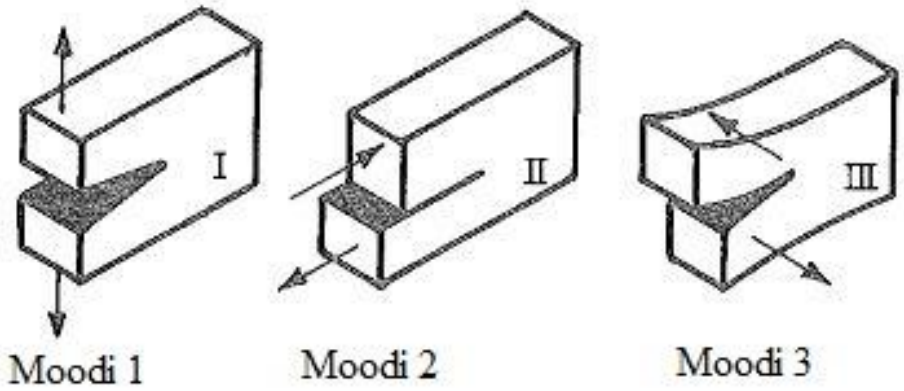
missä $\Delta\sigma_{ekv}$ on väsytyskokeen kuormituksen ekvivalentti jännitysvaihtelu MPa, N_f on vaurioon johtaneiden kuormanvaihtojen lukumäärä ja m on SN-käyrän käyrän kaltevuus. (SFS-EN 1993-1-9 s.15)

Sekä IIW:n suositus että Eurocode 3 määrittelee kiinnityshitseille väsymisluokaksi 125-140, kun m = 3. EC3:n mukaan rakenneputken kiinnityshitsille voidaan taata väsymisluokaksi 140, jos se on hitsattu automatisoidusti ilman aloitus- tai lopetuskohtia ja seinämänpaksuus on alle 12,5 mm. (SFS-EN 1993-1-9 s.21-22) (Hobbacher 2013, s. 54-55)

2.3 Väsymismurtuma

Väsymismurtuma koostuu särön ydintymis- ja kasvuvaiheesta. Jos materiaalissa ei ole valmiiksi alkusäröä, niin pintakerroksessa tapahtuvan vaihtoplastisoitumisen vuoksi tällaiseen kohtaan ydintyy särö. Yleisesti särö ydintyy helpommin alkuvikojen kohtaan, jolloin vaihtoplastisoituminen saa aikaan selvän särön. Ydintymisvaiheen päättymistä ei ole selkeästi määritelty, mutta sen voidaan katsoa päättyneen kun kappaleessa on selvästi havaittava särö tai kun särön etenemisteoria alkaa päteä. (Niemi & Kemppi 1993, s. 236-237)

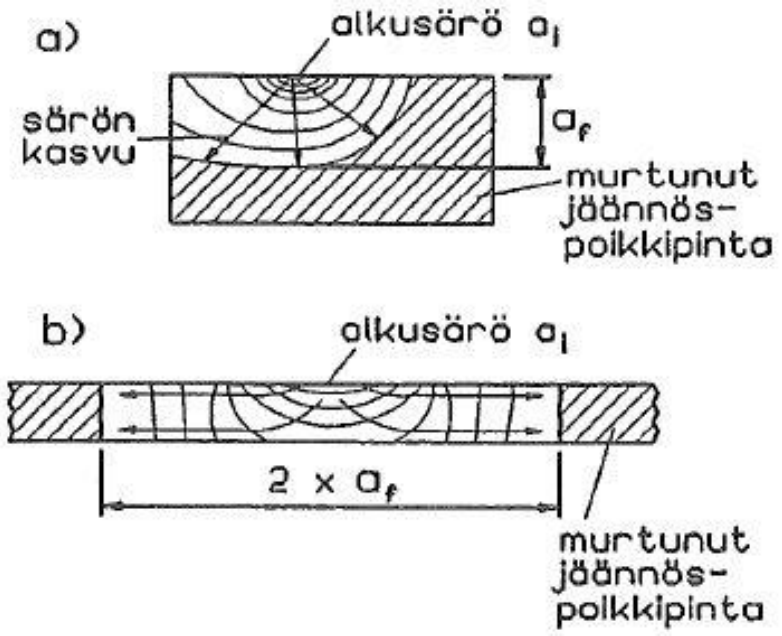
Särön kasvuvaihe johtaa tyypillisesti väsymismurtumaan. Kasvuvaihe on samankaltainen kuin ydintymisvaihe, mutta plastista muokkautumista särön pohjalla tapahtuu vähemmän. (Niemi & Kemppi 1993, s. 237-238) Särön kasvuvaiheessa on kolme eri särönkuormitus moodia, jotka vaikuttavat särön kasvunopeuteen. Moodit kuormittavat säröä eri tavoilla, jolloin säröjen siirtymät ovat erilaisia keskenään. Kuvassa 5 esitetään eri moodit. (Bannatine et al. 1990, s. 90-91)



Kuva 5. Särönkuormitus moodit. (Bannatine et al. 1990, s. 91)

Kuvan 5 ensimmäinen moodi on yleisin säröä kuormittava tapaus, myös tämän tutkimuksen väsytyskokeissa kyseessä oli ensimmäinen moodi. Tällöin yleensä taivutuksesta aiheutuva kuormitus pyrkii avaamaan säröä kuvan 5 mukaisesti. Toisessa moodissa särön pinnat liukuvat toisiaan vasten. Kolmas moodi on yhdistelmä kahdesta ensimmäisestä, jolloin särön pinnat liukuvat toisiaan vasten vaakasuunnassa ja avautuvat samalla moodin 1 kaltaisesti. (Bannatine et al. 1990, s. 90-91)

Lopullinen väsymismurtuma tapahtuu kun ydintynyt särö kasvaa niin pitkäksi, että se murtuu suurimman hetkellisen rasituksen takia. Kuvassa 6 esitetään tyypillisen väsymismurtuman kuva. (Niemi & Kemppi 1993, s. 238)



Kuva 6. Väsymismurtuman poikkileikkauksia. (Niemi & Kemppi 1993, s. 238)

Kuvan 6 a-kohdassa kyseessä on kompakti poikkileikkaus, jolloin särön kasvu vaiheen jälkeen jäännöspoikkipinta murtuu. Kohdassa b särö kasvaa ensin elliptisesti poikkipinnan paksuuden yli, jonka jälkeen särö kasvaa levyn suuntaisesti molempiin suuntiin. (Niemi & Kemppi 1993, s. 238)

Väsymismurtuman havaitseminen erikoislujissa teräksissä on haastavaa, sillä väsymissärön kasvuvaihe voi jäädä hyvinkin pieneksi, koska sen murtovenymä on pienempi kuin matalamman lujuuden teräksillä. Sitkeämmillä rakenneteräksillä väsymissärö voidaan havaita helpommin sen pituudesta johtuen ja näin ollen välttää loppumurtuma. Sitkeämmät materiaalit pystyvät vastustamaan väsymismurtumaa paremmin, jolloin väsymissärö voi kasvaa pidemmäksi aiheuttamatta lopullista murtumaa. (Niemi & Kemppi 1993, s. 238)

3 MATERIAALIT JA MENETELMÄT

Ruukki Metals Oy toimitti tutkimukseen liittyen Ruukki double grade ja Optim 700 Plus MH teräksistä valmistettua rakenneputkea. Materiaalina DG on Ruukki Metals Oy:n kehittämä teräslaatu, missä yhdistetään kahden teräslaadun parhaat ominaisuudet. DG:ssä saavutetaan korkeammat lujuusominaisuudet kuin normaalilla S355 rakenneteräksellä, mutta yhdistetyn laadun käyttöominaisuudet ovat kuitenkin paremmat kuin S420 laadulla. (Ruukki 2010) Ruukin Optim 700 Plus MH on lujaa rakenneterästä, millä on erinomainen käytettävyys ja hyvät hitsausominaisuudet. (Ruukki 2013)

Taulukossa 1 on Ruukki Metals Oy:n lupaamat mekaaniset ominaisuudet testattaville materiaaleille.

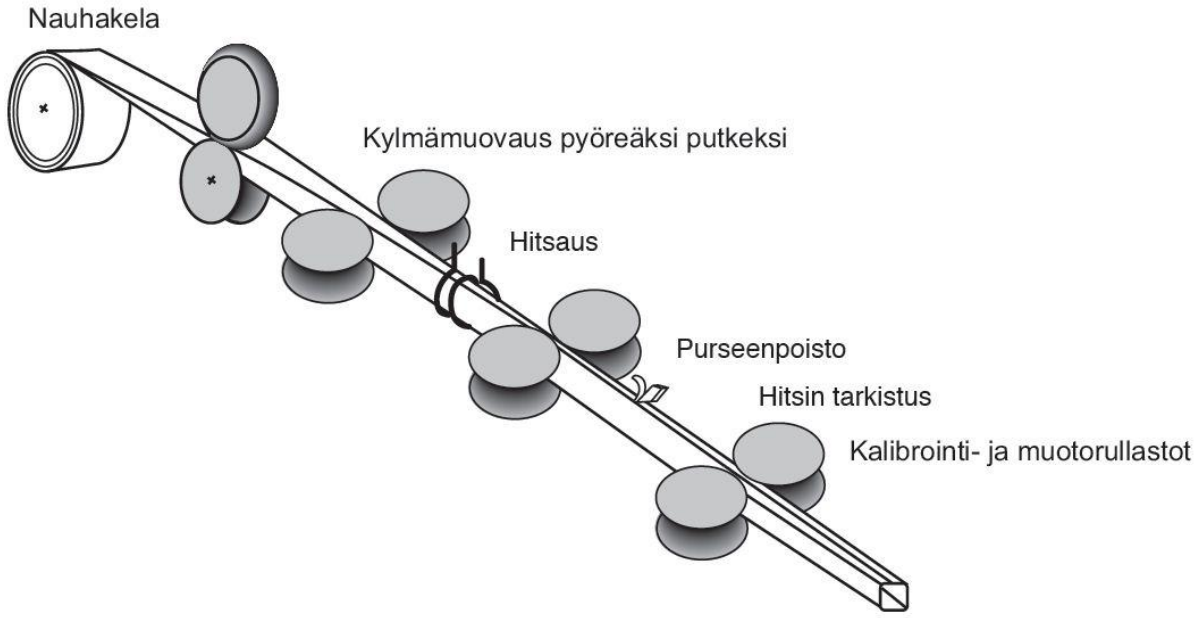
Taulukko 1. Materiaaliominaisuudet

Materiaali	Myötölujuus, f_y [MPa]	Murtolujuus, f_u [MPa]
Optim 700 Plus MH	700	750
Ruukki double grade	420	500 - 630

Taulukossa 1 esitetyt materiaaliominaisuudet ovat yleisesti Ruukki Metals Oy:n lupaamia minimiarvoja. Kaikkien testattujen rakenneputkien sulatusanalyysi ja vetokoetulokset esitetään liitteessä 1. Testattavien rakenneputkien nippunumerot, mitat ja jälkikäsittelyt esitetään myöhemmin taulukossa 2.

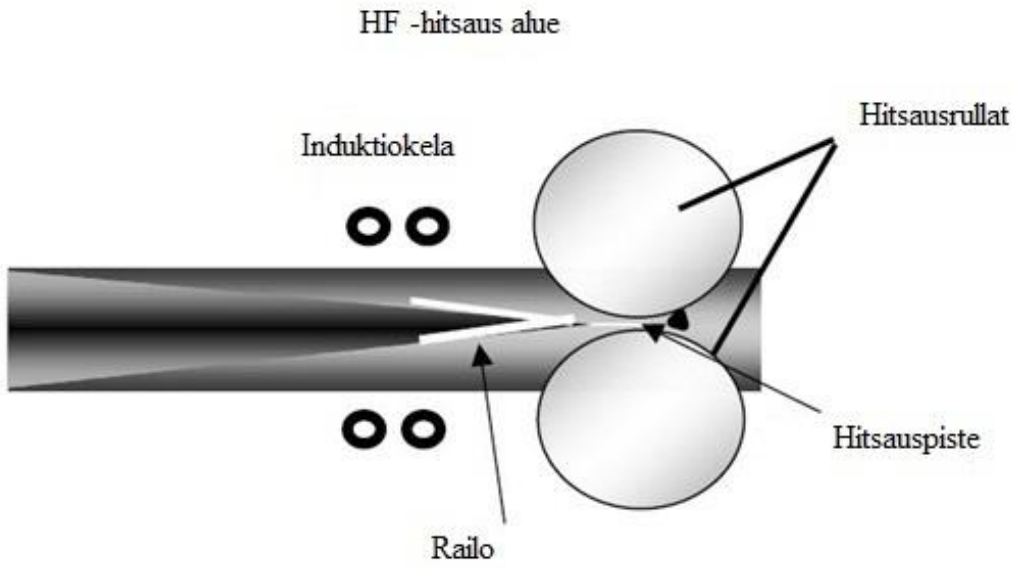
3.1 Rakenneputkien valmistus

Rakenneputket valmistetaan muovaamalla valmiiksi määrämittoihin leikatusta teräsnauhasta. Muovausprosessissa teräsnauha rullataan auki, jonka jälkeen nauhaa muovataan kylmämuovauksella lähemmäksi lopullista muotoa, jotta aihio on valmis pituussuuntaiseen hitsaukseen. Kuvassa 7 esitetään pituussaumahitsattujen rakenneputkien valmistusperiaate. (Ruukki 2012, s. 15-16)



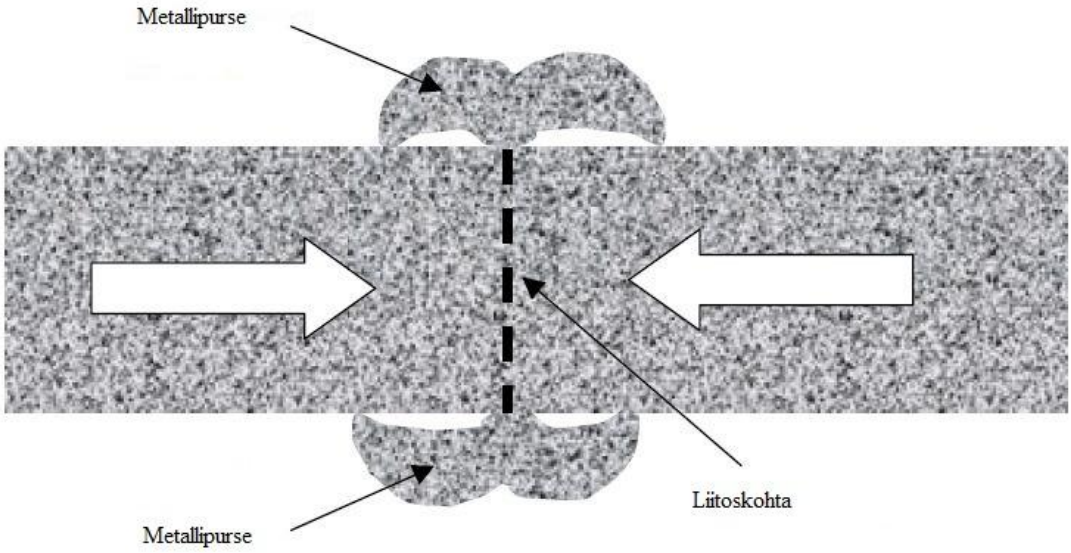
Kuva 7. Pituussaumahitsattujen rakenneputkien valmistusperiaate kylmämuovaamalla. (Ruukki 2012, s. 16)

Suurtaajuushitsausprosessi on tehokkain ja nopein rakenneputkien pituussuuntaisen hitsin valmistamiseen. Rakenneputken hitsausvaiheessa putki on muotoiltu jo sylinterimäiseksi, jolloin se kulkee kylmämuovausprosessissa induktiokelan lävitse. Induktiokelan ympärillä vaikuttaa magneettikenttä, jolloin rakenneputken reunat kuumenevat ja kuvassa 7 näkyvät rullat puristavat sauman kiinni. (Nichols 1999, s.1, Ruukki 2012, s. 16) Suurtaajuushitsauksen magneettikenttä aiheutetaan käyttämällä hyvin korkeaa taajuutta esimerkiksi 400 kHz, jolloin pituussuuntaisen hitsin hitsausnopeus on 30-100 m/min. (Weman 2012, s. 128)



Kuva 8. HF –hitsaus alue. (Nichols 1999, s. 1)

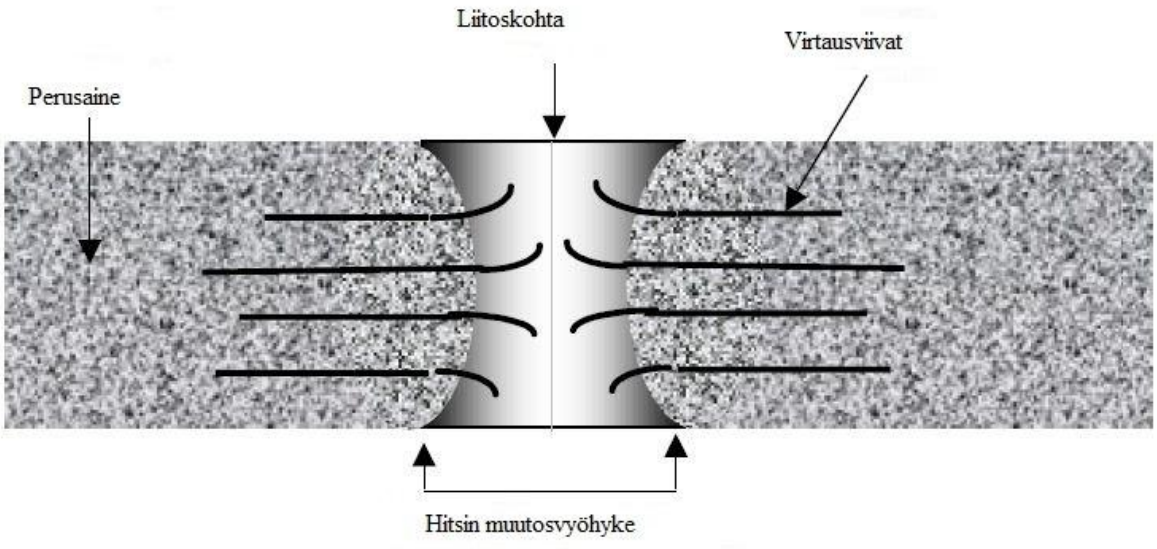
Kuvassa 8 puristavien rullien myötä hitsausprosessissa ei tarvitse käyttää lisäainetta. Jos prosessi sujuu oikeaoppisesti, niin sula ja hapettunut metalli pursuaa liitoksen ulkopuolelle, kuten kuvassa 9 esitetään. (Nichols 1999, s.1)



Kuva 9. HF –hitsin liitoskohta. (Nichols 1999, s. 2)

Kuvassa 9 näkyvä metallipurse höylätään valmistusprosessin yhteydessä pois rakenneputken ulkopinnalta, mutta myös sisäpuolinen purse voidaan höylätä pois, kuten osasta kokeiden putkista oli poistettu. (Ruukki 2012, s. 16)

Kuvassa 10 esitettään suurtaajuushitsin muutosvyöhyke, joka muistuttaa tiimalasin muotoa. Tämä muoto aiheutuu siitä, että hitsauksessa vain aihion reunat kuumenevat. (Nichols 1999, s.1)



Kuva 10. HF –hitsin HAZ. (Nichols 1999, s. 2)

Hitsauksen aikana hiili pyrkii erkanemaan kohti aihion kuumia reunoja ja jää niin sanotusti jumiin reunan tuntumaan hitsin jäähtyessä. Tämän ilmiön seurauksena hitsin muutosvyöhyke on yleisesti tummempi kuin itse perusmetalli. Tällöin liitoksen keskikohdille jää hyvin vähän hiilipitoisuutta, mikä voidaan havaita sen vaaleammasta sävystä kuten kuvassa 10. (Nichols 1999, s.1)

Kuvassa 7 esitettiin rakenneputken valmistusprosessi, missä yläpuolen purseen poiston jälkeen hitsi tarkastetaan jatkuvatoimisella pyörrevirta- tai ultraäänitarkastuksella. Valmistusprosessin viimeisessä vaiheessa kalibroidaan putken halkaisija ja muotorullaston avulla rakenneputken poikkileikkaus viimeistellään halutuksi. (Ruukki 2012, s. 16)

3.2 Mitatut poikkipintasuureet

Jokaisesta testattavasta rakenneputkesta mitattiin poikkileikkauksen mitat. Mittaukset suoritettiin standardin SFS-EN 10219-2 mukaisesti, käyttämällä työntömittaa, syvyystyöntömittaa ja mikrometriä. Poikkileikkauksien mitat esitetään liitteessä 2.

3.3 Mitatut nimelliset lujuusarvot

Rakenneputkille suoritettiin sekä kovuusmittaukset että vetokokeet. Jokaisesta nipusta otettiin yksi koekappale kumpaakin testiä varten.

3.3.1 Kovuus

Kovuusmittaukset suoritettiin Vickers:n kovuuskokeella (tässä tapauksessa HV5 koe), jolloin mitattavaa kappaletta painettiin pyramidin muotoisella timantilla 10-15 s 5 kN:n voimalla. Kappaleen kuormittamisen jälkeen mittalaite ilmoitti kovuusarvon, jonka jälkeen mitattiin pyramidin muotoisen painauman lävistäjät. (Lepola & Makkonen 2007, s. 53-54)

Jokaisesta nipusta otettiin yhdestä putkesta kovuusmittaus ainevahvuuden keskeltä HF – hitsin yli. Lisäksi jokaisesta kovuusmittauksesta otettiin hiekuva, missä näkyy mittauspisteet. Kovuuksista voidaan myös havaita pituussuuntaisen hitsin hehkutus. Hehkutetussa rakenneputkessa kovuus hitsin yli on tasaisempi kuin hehkuttamattomilla. Tästä voidaan todeta, että hehkutus pehmentää jonkin verran hitsialueen kovuutta. Hiekuvat ja kuvaajat kovuuksista esitetään liitteessä 3. Kuvaajissa pystyakselilla on kovuus HV5 arvoina ja samalla akselilla on kovuusmittauksen lävistäjä [μm]. Vaaka-akselilla esitetään mittauspisteet, jotka näkyvät hiekuvissa. Mittaukset suoritettiin 0,5 mm:n välein.

3.3.2 Vetokoe

Vetokokeet tehtiin Ruukki Metals Oy:n tutkimuskeskuksessa standardin SFS-EN ISO 6892-1 mukaisesti, jotta varmistuttiin itse pituussuuntaisen hitsin äärikestävyydestä. Koesauvat leikattiin siten, että kiinnityshitsi on vetokoesauvan pituussuuntaisesti keskellä sauvaa, kuten kuvassa 11.

Kuva 11. Vetokoesauva HF8.

Kuvan 11 mukaiset vetokoesauvat leikattiin keskenään eri ominaisuuksilla olevista rakenneputkista. Vetokokeiden myötä varmistuttiin itse pituussuuntaisen hitsin sekä myötö- että murtolujuudesta. Vetokokeiden tulokset esitetään liitteessä 4.

Pituussuuntaisen hitsin vetokokeiden ja materiaalien aineistotodistuksien välillä löytyy eniten eroja sekä myötö- että murtolujuudesta. Pituussuuntaisten hitsien murtovenymä näyttäisi olevan hieman perusaineen arvoa pienempi. Tuloksia tarkastelemalla nähdään, että vetokoekappaleiden murtovenymä on riippuvainen sekä rakenneputken sisäpuoleisen purseen höyläämisestä että pituussuuntaisen hitsin hehkutuksesta. Yleisesti ottaen höylätyillä ja hehkutetuilla kappaleilla on parempi pituussuuntaisen hitsin murtovenymä kuin höyläämättömillä tai hehkuttamattomilla.

3.4 Jäännösjännitykset

Jäännösjännitykset ovat sekundaarisia jännityksiä, jotka ovat rakenneputkissa valmistusprosessin jäljeltä. Rakenneputkiin syntyy jäännösjännityksiä valmistusprosessissa kylmämuovauksesta ja suurtaajuushitsauksesta. Kylmämuovauksessa osa rakenteesta ajautuu plastiselle alueelle, jolloin rakenteeseen jää pysyviä muodonmuutoksia. Suurtaajuushitsauksessa kuumennetaan vain liitettävät reunat, jolloin kuumat reunat pyrkivät laajenemaan ja muu kylmä rakenne pyrkii estämään kuuman alueen laajenemista. Kuuma alue pyrkii jäähtymisen myötä kutistumaan, jolloin hitsaamaton alue pyrkii taasen estämään kyseisen kutistumisen. Vaikka hitsaamaton rakenne pyrkii vastustamaan kutistuman, niin kuumalla vyöhykkeellä tapahtuu kutistumista plastisena venymänä. Putken jäähdyttyä ympäröivään lämpötilaan rakenteessa vallitsee yleisesti vetojännitys hitsissä ja aivan sen viereisellä alueella. (Niemi & Kemppi 1993 s. 167-168)

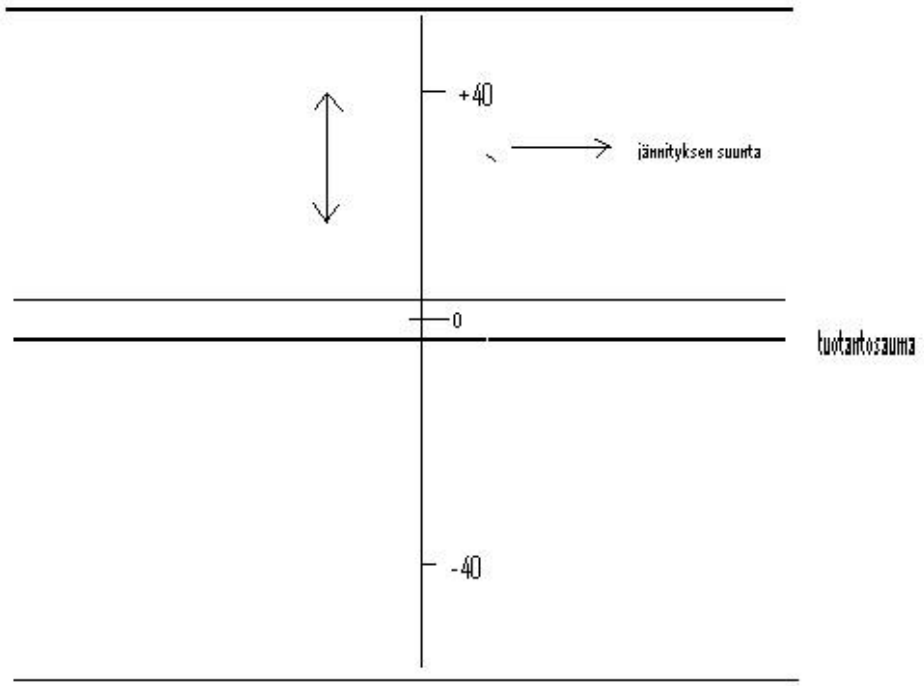
Jäännösjännitystilalla on vaikutus väsymiskestävyyteen, koska se vaikuttaa kuormituksen keskijännitykseen. (Dowling 2013, s.446) Erityisesti puristuspuolella olevat jäännösjännitykset ovat hyödyllisiä väsymiskestoiän kannalta, koska väsymissärön on vaikeampi kasvaa puristusjännityksen alaisuudessa. (Pan et al. 2012, s.1)

Jäännösjännityksiä voidaan normalisoida hitsisauman alueelta rakenneputken valmistusprosessin yhteydessä, missä neljän valmistuslinjastoon integroidun induktiokelan avulla sauman lämpötila nostetaan noin 960 asteeseen austeniittiselle alueelle. (Minkkinen 2013, Törmälehto 2013) Tällöin rakenneputken jäännösjännitysjakaumaa saadaan muokattu juuri hitsisauman alueelta, jolloin haitalliset suuret vetojännitykset saadaan minimoitua.

3.4.1 Jäännösjännityksien mittaaminen

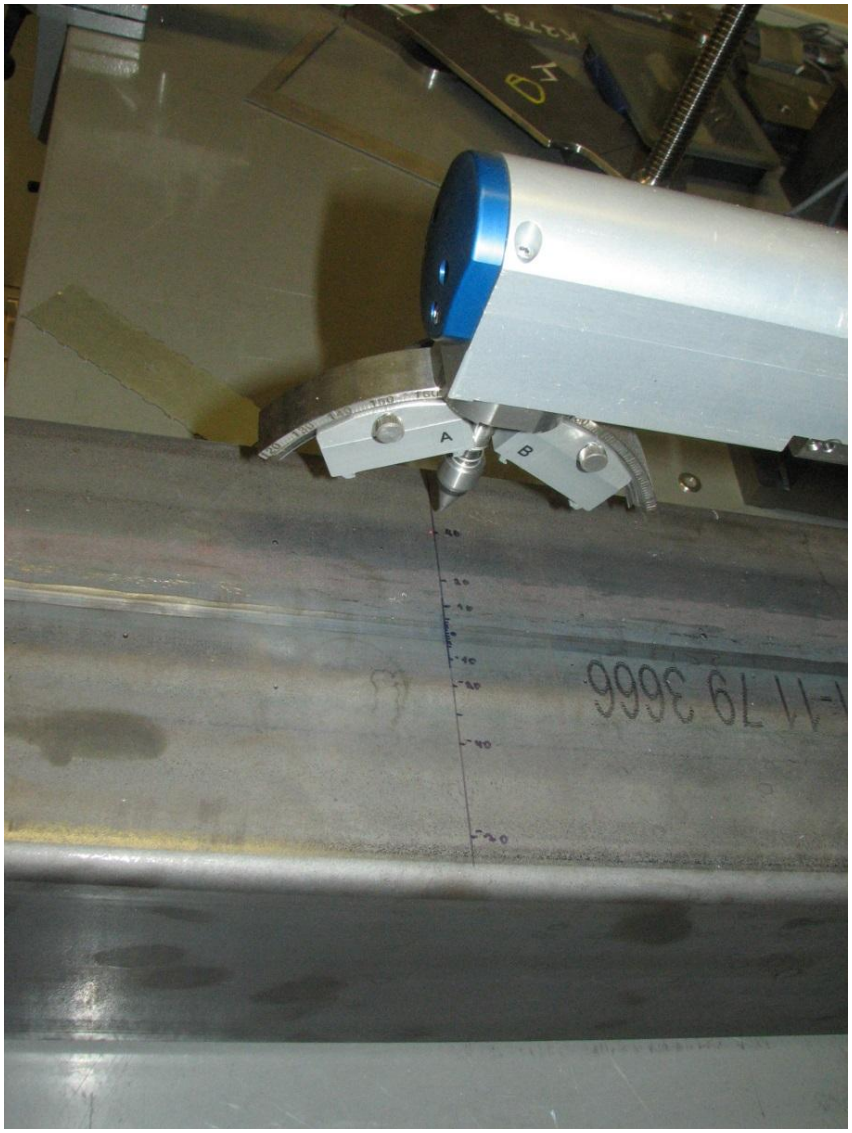
Jäännösjännityksien mittaamisessa käytettiin röntgendiffraktiomenetelmää, jolloin jäännösjännitykset saatiin mitattua putkesta itse materiaalia rikkomatta. Menetelmä perustuu röntgensäteen heijastumiseen takaisin materiaalista. Jokaisesta mittauspisteestä suoritettiin mittaus kolme kertaa suuntaa vaihtamalla. Tällöin yhden mittauspisteen jäännösjännityksen arvo saatiin määritettyä mittausten keskiarvolla.

Jäännösjännitykset mitattiin keskenään erilaisista rakenneputkista, eli ei jokaisesta testatusta putkesta. Testattavasta putkesta leikattiin yhden metrin pituinen kappale, mistä suoritettiin jäännösjännityksien mittaaminen. Jokaisesta putkityypistä suoritettiin yksi tiheä mittaus ja muista samaa geometriaa olevista putkista harvempi mittaus. Kuvassa 12 esitetään mittauksen positiivinen ja negatiivinen suunta tuotantosaumaan nähden, mittausprosessi havainnollistetaan kuvassa 13.



Kuva 12. Jäännösjännityksien mittauspisteiden havainnollistaminen.

Kuvassa 12 esitetään tuotantosauman keskellä oleva nollapiste, mistä mittaus suoritetaan ylöspäin positiiviseen suuntaan ja alaspäin negatiiviseen suuntaan. Rakenneputkessa oleva pituussuuntainen hitsi ei ollut yleensä putken keskellä, kuten kuvasta 13 havaitaan.



Kuva 13. Jäännösjännityksien mittaus röntgendiffraktiomenetelmällä.

Kuvassa 13 näkyy jäännösjännityksien mittaus röntgendiffraktiolla. Mittauksen jälkeen mitatuista putkista leikattiin väsytyskoesauvat R = 0,1 kokeita varten. Myös väsytyssauvoista mitattiin jäännösjännitykset muutamasta pisteestä, jotta nähtiin leikkauksen vaikutus jäännösjännitystilaan.

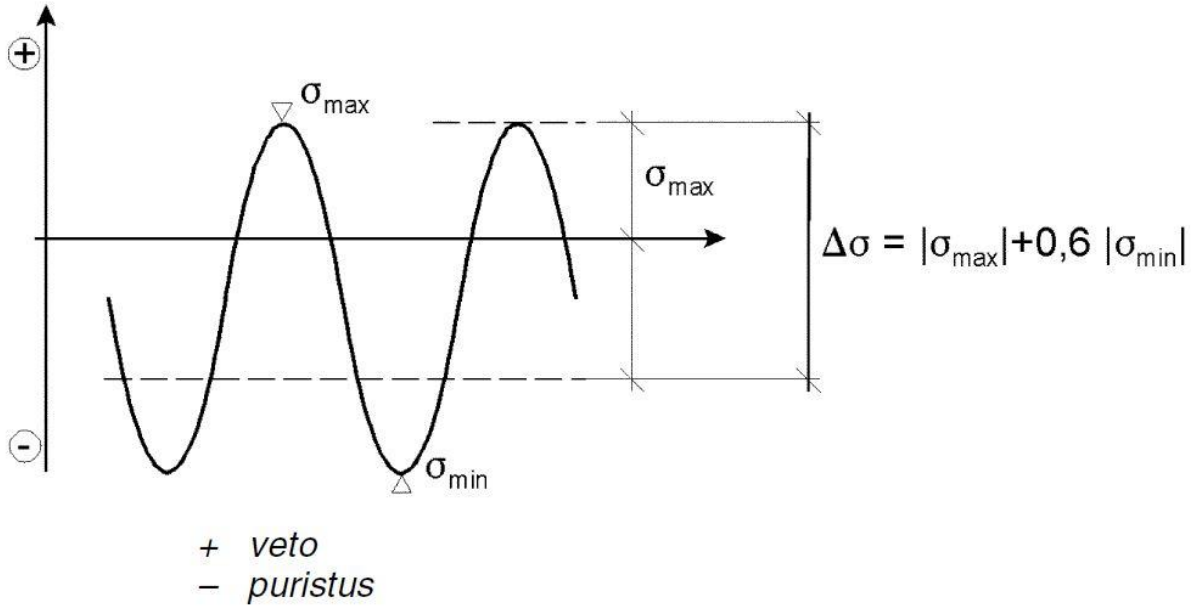
Jäännösjännitysjakaumat esitetään liitteessä 5, missä kuvaajissa vaaka-akselilla on mittauspisteet putken leveyssuunnassa ja pystyakselilla jäännösjännitys. Lisäksi taulukosta 2 käy ilmi, mille rakenneputkille suoritettiin pituussuuntainen hitsisauman hehkutus. Liitteen 5 jakaumista havaitaan, että hehkutetuissa rakenneputkissa jäännösjännitys hitsin alueella on lähellä nollaa, jolloin vain taivutuksesta aiheutuva jännitys kuormittaa putkea

kyseisellä alueella. Sekä hehkutetuissa että hehkuttamattomissa rakenneputkissa on kuitenkin vetojäännösjännityksiä, jotka edesauttavat särön kasvua.

3.4.2 Jäännösjännityksien tarkastelu väsymiskestävyydessä

Hehkutettujen rakenneputkien väsymiskestävyyden määrittämisessä tulee tarkastella rakenneputken jäännösjännitystilaa, koska EC3:n ja IIW:n julkaisuissa esitettyjen FAT – luokkien oletetaan sisältävän korkeat jäännösjännitykset. Hehkutuksen tulisi vaikuttaa positiivisesti värähtelykokeiden koetuloksiin.

Jäännösjännityksien poiston vaikutus voidaan huomioida joko EC3:n tai IIW:n ohjeiden mukaisesti. Ohjeet toimivat värähtelykokeeseen, koska rajajännityssuhteen tulee olla pienempi kuin nolla ja hitsatusta osasta on jäännösjännitykset redusoitu. EC3 esittää tavan, missä jännitysvaihteluväliä laskiessa jännityksen minimistä otetaan huomioon vain tietty osa kuvan 14 mukaisesti. (SFS-EN 1993-1-9, s.18)



Kuva 14. Muunnettu jännitysvaihteluväli hitsatuille rakenneyksityiskohdille, joista jäännösjännitykset on poistettu. (SFS-EN 1993-1-9, s.18)

Kuvan 14 mukaisesti jännitysvaihteluväli voidaan laskea kaavan 2 mukaisesti ottaen huomioon 60 % jännitysvaihtelun minimi arvosta. (SFS-EN 1993-1-9, s.18)

$$\Delta\sigma = |\sigma_{max}| + 0{,}6\,|\sigma_{min}| \quad (2)$$

missä $\Delta\sigma$ on jännitysvaiheluväli [MPa], σ_{max} on maksimi jännitys [MPa] ja σ_{min} on minimi jännitys [MPa]. (SFS-EN 1993-1-9, s.18)

Vaihtoehtona EC3:n määrittelemälle redusoinnille voidaan käyttää IIW:n suosituksen tapauksia 1 tai 2. Tällöin hehkutettujen rakenneputkien osalta koetulokset voidaan muuntaa vastaamaan julkaisuissa määriteltyjä FAT –luokkia. IIW:n ensimmäisessä tapauksessa kokeen $\Delta\sigma_{ekv}$ voidaan jakaa 1,6:lla, jos jäännösjännitykset rakenneputkessa ovat pienempiä kuin $0{,}2f_y$. Toisessa tapauksessa ekvivalentti jännitysvaihtelu voida jakaa 1,3:lla, jos kyseessä on ohutseinämäinen yksinkertainen rakenne, joka sisältää lyhyitä hitsejä. Vaikka testattavissa rakenneputkissa sideliitos on koko rakenteen pituinen, niin myös tapausta 2 voidaan käyttää. Täten tuloksien tarkastelussa voidaan vertailla IIW:n molempien tapauksien ja EC3:n tapauksen mukaisesti redusoituja koetuloksia keskenään. (Hobbacher 2013, s. 80)

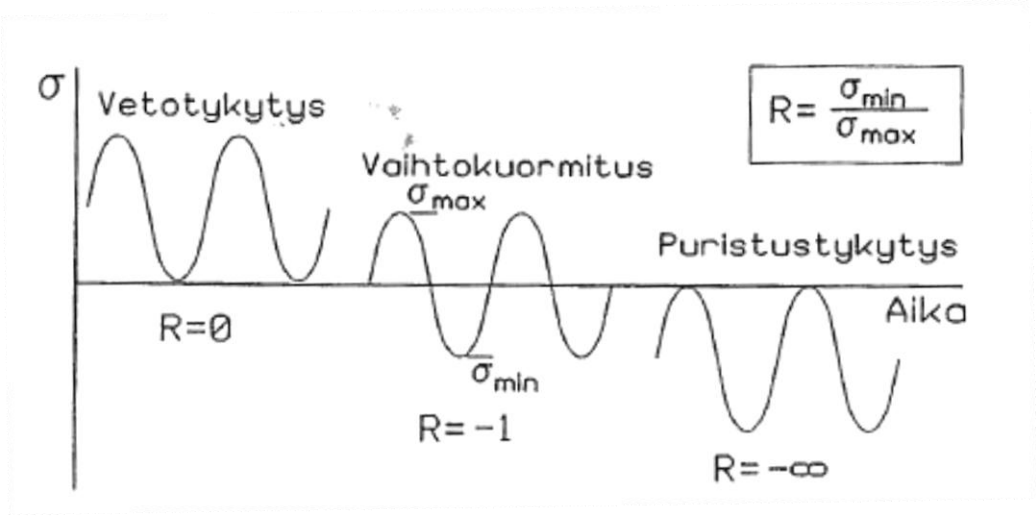
4 VÄSYTYSKOKEET

Rakenneputkien HF –hitsien väsymislujuuden määrittämiseksi järjestettiin väsytyskokeet, joiden myötä saatiin määritettyä jokaiselle kokeelle väsymisluokka. Kokeiden tavoitteena oli saada aikaan kiinnityshitsin paksuuden yli kasvanut väsymissärö, kohtisuorasti pituussuuntaista hitsiä vastaan. Tällöin poikkileikkauksen jäykkyys pienenee ja se käyttäytyy kuin avoin profiili. Kokeet toteutettiin Lappeenrannan teknillisen yliopiston Teräsrakenteiden laboratoriossa käyttäen kahta erilaista kuormitustapausta, jolloin tuloksia voitiin verifioida paremmin. Ensimmäisessä kuormitustapauksessa hyödynnettiin rakenneputken ominaistaajuutta värähtelyn muodossa. Tällöin putken toiseen päähän asennettiin epäkeskomoottori, jota ohjattiin taajuuden perusteella. Toiset kokeet suoritettiin siten, että rakenneputkesta leikattiin väsytyskoesauva, jota kuormitettiin vetotykytyksellä.

Itse kokeiden rajajännityssuhteet olivat keskenään eriävät. Rajajännityksien suhde voidaan laskea kaavan 3 perusteella. (Niemi & Kemppi 1993, s. 239-240)

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \tag{3}$$

missä $\sigma_{\min}$ on kuormituksen minimi jännitys ja $\sigma_{\max}$ kuormituksen maksimi jännitys. Rajajännityksellä on osuutta särön etenemiseen kyseisissä kuormitustapauksissa, koska kuormituksen lähestyessä minimi jännitystä särön pinnat painuvat vastakkain eli sulkeutuvat. Särön kasvussa särön kärjessä tapahtuu plastista muokkautumista, mutta särön sulkeutuessa plastinen muokkautuminen vähenee. Kuvassa 15 esitetään eri rajajännityssuhteita. (Niemi & Kemppi 1993, s. 239-240)



Kuva 15. Rajajännityssuhteita. (Niemi & Kemppi 1993, s. 240)

Kuvasta 15 nähdään vakioamplitudisen jännityksen kuvaajat. Värähdyttämällä tehdyissä kokeissa rajajännitysten suhde oli -1 eli kyseessä oli vaihtokuormitus, kun väsytyssauvoille tehdyissä rajajännityssuhde oli 0,1, jolloin kyseessä oli vetotykytys. (Niemi & Kemppi 1993, s. 240)

Molemmissa väsytyskokeissa käytettiin vastusvenymäantureita venymien mittaamiseen. Vastusvenymäanturien toiminta perustuu vastuksen muutokseen rakenteen venymien suhteen.

Kokeissa kappaleita kuormitettiin joko taivutuksella tai vedolla, jolloin kyseessä oli aksiaalinen jännitystila. Tällöin kokeissa mitatut venymät voitiin muuntaa Hooken lain avulla (kaava 4) jännitykseksi [MPa]. (Pennala 2002, s. 25)

$$\sigma = E\varepsilon \tag{4}$$

missä σ on vastusvenymäanturin venymää vastaava jännitys, E on materiaalin kimmokerroin ja ε liuskan venymän arvo. (Pennala 2002, s. 25) Laskuissa käytetään teräksen kimmokertoimen arvoa 210 GPa.

Taulukossa 2 esitetään koematriisi, mistä käy myös ilmi sekä värähtely että vetotykytys kokeiden putkien tunnisteet. Lisäksi taulukossa on vetokokeen tunnisteet.

Taulukko 2. Koematriisi.

Mitat	Laatu	Hehkutus	Höyläys	Nippunumero	Värähtely	Vetotykytys	Vetokoe
150*150*4	S420MH/S355J2H	EI	EI	79152752	RR_HF12 RR_HF13	V7	HF7
150*150*4	S420MH/S355J2H	EI	EI	19505437	RR_HF16 RR_HF17	V9	HF9
150*150*4	S420MH/S355J2H	EI	KYLLÄ	79155899	RR_HF7 RR_HF8	V5	HF5
150*150*4	S420MH/S355J2H	KYLLÄ	EI	79152754	RR_HF14 RR_HF15	V8	HF8
150*150*4	S420MH/S355J2H	KYLLÄ	KYLLÄ	79155897	RR_HF6 RR_HF9	V4	HF4
160*160*4	OPTIM 700 PLUS MH	KYLLÄ	KYLLÄ	79152747	RR_HF3 RR_HF5	V1	HF1
160*160*4	OPTIM 700 PLUS MH	KYLLÄ	EI	79152749	RR_HF2 RR_HF4	V3	HF3
120*120*4	OPTIM 700 PLUS MH	EI	EI	1002799393	RR_HF10 RR_HF11	V6	HF6

Koematriisi koostui kahdesta eri materiaalista eri ominaisuuksilla taulukon 2 mukaisesti. DG materiaalista valmistettuja putkia pystyttiin testaamaan laajasti eri ominaisuuksilla. Lisäksi RR_HF16 ja RR_HF17 kokeet suoritettiin suoraan tehtaalta saapuneesta rakenneputkesta, jolloin korroosion vaikutusta väsymiskestävyyteen voitiin minimoida. Optimin tapauksessa jouduttiin tyytymään kapeampaan koematriisiin. Pituussuuntaisen hitsin hehkutusta ei voitu vertailla samalla geometrialla, mutta geometrian vaikutus väsymiskestävyyteen oli minimaalinen.

Väsytyskokeissa ei koejärjestelyistä johtuen pystytty takaamaan muuttumatonta jännitysvaihtelua. Lisäksi särön kasvu aiheutti muutoksia testattavan rakenteen venymiin. Tästä johtuen ennen $FAT_{50\%}$:n laskemista laskettiin ekvivalentti jännitysvaihtelu $\Delta\sigma_{ekv}$ kokeen kuormitushistorian perusteella. Ekvivalentti jännitysvaihtelu laskettiin kaavan 5 mukaisesti.

$$\Delta\sigma_{\text{ekv}} = \sqrt[m]{\frac{\sum (n_i * \Delta\sigma_i^m)}{N_{ref}}} \tag{5}$$

missä N_{ref} on kokeen kuormanvaihtojen kokonaismäärä, n_i on minuutin aikana esiintyneiden kuormanvaihtojen lukumäärä, $\Delta\sigma_i$ on minuutin aikana esiintynyt maksimi jännitysvaihtelu [MPa] ja m on SN -käyrän kaltevuus. (Niemi 2003, s. 96)

Testattavien kappaleiden määrän vähyydestä johtuen voidaan FAT –luokalle antaa vain 50%:n varmuus. 95%:n varmuus eli karakteristinen väsymisluokka voidaan laskea tilastollisen todennäköisyyden perusteella. Testattavien kappaleiden väsymiskestävyyden voidaan olettaa olevan normaalijakautunut, jolloin $FAT_{50\%}$ arvo voidaan muuntaa $FAT_{95\%}$:n varmuudeksi käyttämällä varmuuskerrointa. Muunto kaava esitetään yhtälössä 6. (Radaj 2006, s.18-20)

$$FAT_{50\%} = \frac{FAT_{95\%}}{10^{-2*0,0688}} => FAT_{95\%} = FAT_{50\%} * 0,7285 \quad (6)$$

missä $FAT_{50\%}$ on keskimääräinen väsymisluokka [MPa] ja $FAT_{95\%}$ on karakteristinen väsymisluokka [MPa]. (Radaj 2006, s.18-20)

4.1 Värähtely $R = -1$

Kokeissa hyödynnettiin testattavan rakenneputken ominaistaajuutta, mikä selvitettiin vapaan kappaleen värähtelyanalyysin avulla. Ominaismuotona käytettiin ensimmäistä muotoa jäykän kappaleen ominaismuotojen jälkeen, jolloin rakenneputkessa vaikuttaa vain yksi puoliaalto, joka saa aikaan taivutusjännityksen putkeen. Täten saatiin valittua rakenneputkelle sopiva pituus, jotta se sopisi sekä laboratorioon pituuden puolesta että epäkeskomoottorin ominaisuuksiin, jotka esitetään taulukossa 3.

Taulukko 3. Epäkeskomoottorin ominaisuudet (Erka 2012)

Työmomentti [Kgcm]		**Keskipakovoima [Kg]**		**Paino [Kg]**		**Teho [Kw]**	
50Hz	**60Hz**	**50Hz**	**60Hz**	**50Hz**	**60Hz**	**50Hz**	**60Hz**
10,27	7,38	530	534	15,8		0,50	0,58

Taulukossa 3 esitetään arvot kahdella eri taajuudella, koska värähtelyn taajuus vaikuttaa moottorin mekaanisiin ominaisuuksiin. Moottorin kierrosnopeus on 3000 rpm.

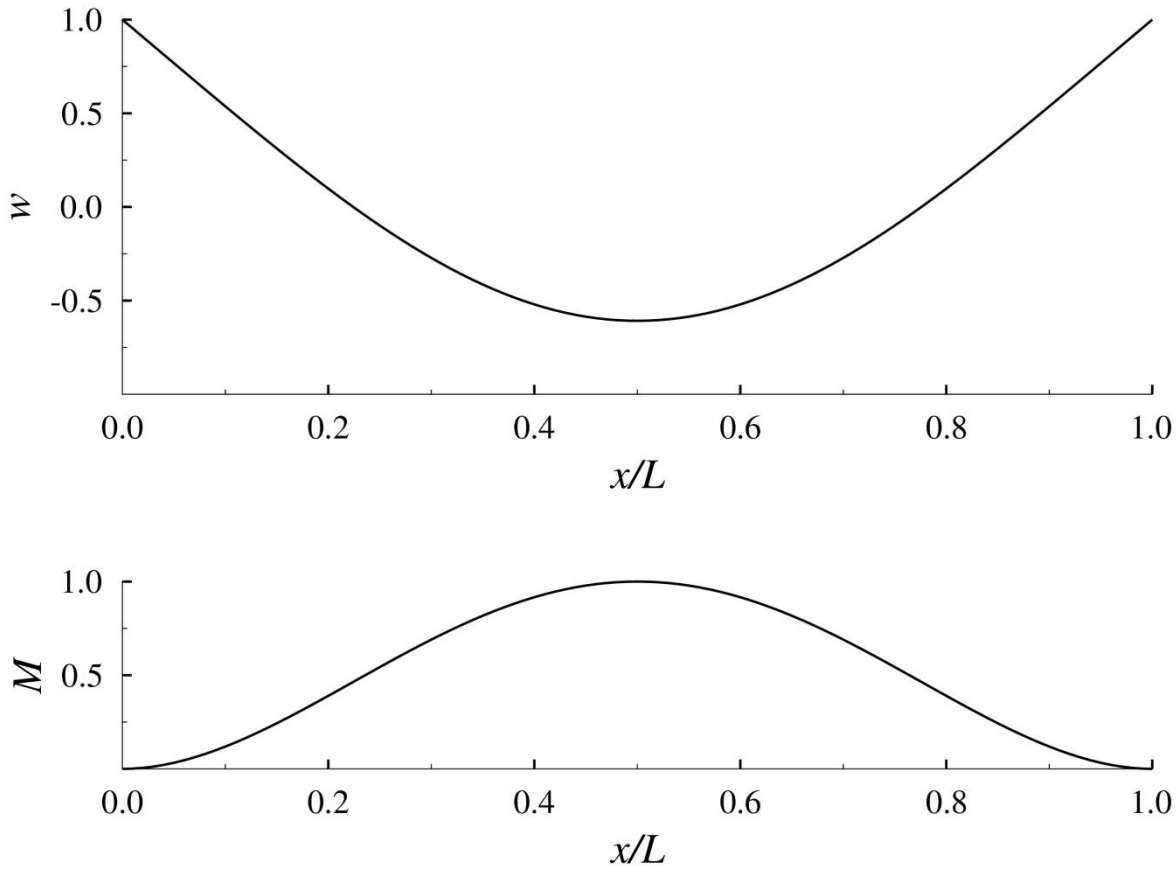
Koejärjestelyistä aiheutui jonkin verran vaimennusta järjestelmään, mutta tällöin epäkeskomoottorin ohjaustaajuus oli ominaistaajuutta hieman suurempi. Lisäksi värähtelyn myötä järjestelmä ja putki lämpenivät, jolloin taajuutta säädettiin suuremmaksi. Kuvassa 16 esitetään yleinen koejärjestely värähtelykokeista.

Kuva 16. Värähtelykokeiden koejärjestelyt.

Kuvassa 16 näkyy, että rakenneputki roikkui vapaasti kuminauhojen varassa värähtelyaallon nollapisteeseen kiinnitettynä, missä ei ole dynaamisia siirtymiä. Täten aallon keskikohta rakenneputken keskikohdassa, mistä mitattiin venymiä. Vastusvenymäanturi tallensi minuutin välein venymän maksimi ja minimi arvon, jonka avulla laskettiin palkin ekvivalentti jännitysvaihtelu. Lisäksi kokeissa käytettiin erillistä laskuria kuormanvaihdoille.

Värähtelykokeissa murtumat tapahtuivat muualla putken pituussuunnassa kuin keskellä vastusvenymäanturin kohdalla. Tällöin tulee jännitysvaihtelu laskea murtumisen kohdalla, jotta saadaan todellisempi koetulos kuin käyttämällä anturin lukemaan perustuvaa jännitysvaihtelua.

Jännitysvaihtelu murtumisen kohdalla voidaan laskea käyttämällä momentinsiirtoa. Kuvassa 17 esitetään vapaasti tuetun palkin alin ominaismuoto ja sitä vastaava momenttijakauma. (Rao 2004, s. 613)



Kuva 17. Vapaasti tuetun palkin alin ominaismuoto ja sitä vastaava momenttijakauma. (Rao 2004, s. 613)

Vapaan putken alimman ominaismuodon oletetaan olevan värähtelykokeessa kuvan 17 mukainen, jolloin kiinnitys kohdat ovat nollapisteiden kohdalla ylemmässä kuvaajassa. Kokeessa moottorin paino siirtää putken vasemman pään puoleista kiinnitystä hieman verrattuna homogeenisen palkin ratkaisuun, mutta se ei vaikuta kriittisesti ominaismuotoon

ja momenttijakaumaan. Kuvan 17 mukainen alin ominaismuoto putken pituuden suhteen voidaan laskea kaavalla 7. (Rao 2004, s. 613)

$$w_1(x) = C_1 \left[\cosh(\beta_1 x) + \cos(\beta_1 x) - \frac{\cosh(\beta_1 L) - \cos(\beta_1 L)}{\sinh(\beta_1 L) - \sin(\beta_1 L)} \left(\sinh(\beta_1 x) + \sin(\beta_1 x) \right) \right] \quad (7)$$

missä C_1 on 0,5, $\beta_1 L$ = 4,7304074 ja L on putken pituus. Alinta ominaismuotoa vastaava momenttijakauma voidaan laskea kaavalla 8, mikä esitetään kokonaisuudessaan kaavassa 9 (Rao 2004, s. 613)

$$M(x) = EIw_1''(x) \quad (8)$$

$$M(x) = EIC_1 \left[\beta_1^2 \cosh(\beta_1 x) - \beta_1^2 \cos(\beta_1 x) + \frac{\cosh(\beta_1 L) - \cos(\beta_1 L)}{\sinh(\beta_1 L) - \sin(\beta_1 L)} \left(\beta_1^2 \sin(\beta_1 x) - \beta_1^2 \sinh(\beta_1 x) \right) \right] \quad (9)$$

missä E on materiaalin kimmokerroin ja I on poikkileikkauksen neliömomentti. (Rao 2004, s. 613)

Alimpaa ominaismuotoa vastaavan momenttijakauman perusteella voidaan kaavan 9 avulla laskea ekvivalentti jännitysvaihtelu särön kohdalla.

$$\Delta\sigma_{\text{ekv, särö}} = \frac{\Delta M_{\text{ekv, särö}}}{\Delta M_{\text{ekv, anturi}}} \Delta\sigma_{\text{ekv, anturi}} = \frac{M(x_3)}{M\left(\frac{L}{2}\right)} \Delta\sigma_{\text{ekv, anturi}} \quad (9)$$

missä $\Delta\sigma_{\text{ekv, anturi}}$ on kokeen ekvivalentti jännitysvaihtelu laskettuna kaavalla 5 anturin lukemiin perustuen, $M(x_3)$ on momentti särön kohdalla, x_3 on särön etäisyys putken vasemmasta päästä ja $M(L/2)$ on momentti anturin kohdalla.

4.2 Vetotykytys R = 0,1

Vetotykytyksellä suoritettiin väsytyskokeet rakenneputkesta leikatuille väsytyssauvoille. Rakenneputken pituussuuntainen kiinnityshitsi oli väsytyssauvan keskellä, jolloin koejärjestelyillä saatiin kuormitettua hitsiä pituussuuntaisesti. Värähtelykokeiden perusteella laskettiin samansuuruinen jännitysvaihtelu, joka kohdistuu väsytyssauvan

keskiosaan, jotta vetokuormitus osattaisiin mitoittaa oikein. Väsytyssauva asetettiin väsytyskehään pystysuorasti kiinnitysleukojen väliin kuvassa 18 näkyvällä tavalla.

Kuva 18. Vetotykytys

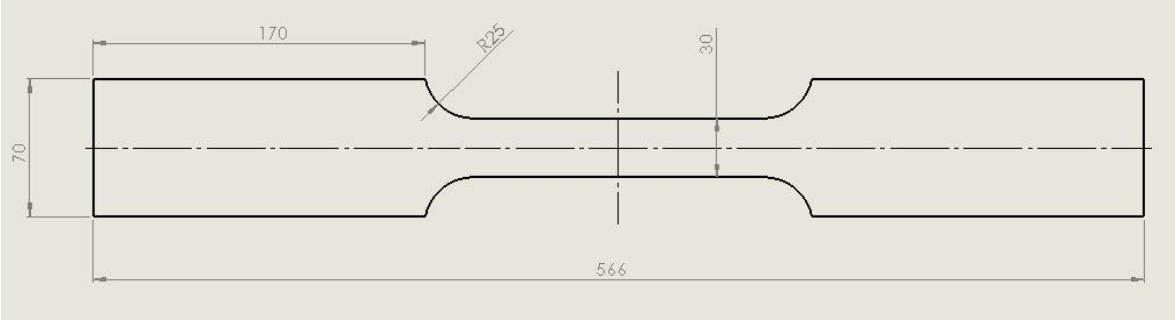
Kuvassa 18 näkyy sininen voima-anturi, jonka alapuolella olevalla sylinterillä aiheutettiin vetokuormitus sauvaan. Sauvaa kuormitettiin vetotykytyksellä, jonka rajajännityssuhde oli 0,1, jolloin F_{min} on $0{,}1 \cdot F_{max}$. Väsytyssauvat olivat suorassa kuormituskehällä, jolloin niihin kohdistui aksiaalinen vetokuormitus. Kuvassa 19 esitetään kuva väsytyssauvasta ja vastusvenymäanturin sijainnista.

Kuva 19. Väsytyssauva V4.

Vastusvenymäanturit oli sijoitettu kuvan 19 mukaisesti hitsin rajaviivalle keskelle väsytyssauvaa pituussuunnassa. Ensimmäisissä kokeissa käytettiin kahta vastusvenymäanturia, jotta voitiin tarkastella kiinnityksestä aiheutuva kuormitus. Anturit olivat täsmälleen samassa kohdassa sauvaa sekä yläpinnalla että juuren puolella.

Yleisesti mittalaitteisto oli samanlainen kuin värähtelykokeissa, eli venymien mittauksen lisäksi mitataan maksimi ja minimi voimaa sekä kuormanvaihtojen lukumäärää erillisellä laskurilla.

Kaikki väsytyssauvat leikataan laser-teknologiaa käyttämällä, jonka jälkeen ne koneistettiin lopullisiin mittoihin kuormituskehän kiinnityksiä varten. Koneistamisen lisäksi väsytyssauvat reunat hiottiin ja kiillotettiin sauvan jokaiselta reunalta. Hionta ja kiillotus tehtiin, ettei leikattuun reunaan ydinny alkusäröä, vaan yritettiin saada särö ydintymään muualta. Kuvassa 20 esitetään väsytyssauvan lopulliset mitat.



Kuva 20. Väsytyssauvojen lopulliset mitat.

Vaikka kuvan 20 mukaiset väsytyssauvat leikattiin käyttämällä laseria, niin rakenneputkien jäännösjännityksien myötä sauvat kaareutuivat leikkauksen yhteydessä. Tämä aiheutti virhettä leikattujen väsytyssauvojen mittoihin. Taulukossa 4 esitetään väsytyssauvojen kaarevuussäteet.

Taulukko 4.

Väsytyssauva	*r* [mm]
V3	1518
V4	3311
V5	1773
V6	1305
V7	1934
V8	3953
V9	2017

Taulukossa 4 on mitatut kaarevuussäteet väsytyssauvoista leikkauksen jälkeen. Mitatuista säteistä nähdään, että sauvat ovat kaareutuneet paljon leikkauksen yhteydessä. Väsytyssauvan V1 kaarevuutta ei mitattu, koska se ehdittiin väsyttämään ennen mittauksia.

5 KOETULOKSET

Tuloksissa esitetään koetulokset sekä värähtelystä että vetotykytyksestä. Kokeiden perusteella saatiin tietoon rakenneputken ja väsytyssauvojen murtumiseen johtavien kuormitussyklien määrä ja vastusvenymäanturin mittausten perusteella saadaan määritettyä $\Delta\sigma_{ekv}$ kaavalla 5. Tämän jälkeen voidaan määrittää $FAT_{50\%}$ ja $FAT_{95\%}$ käyttämällä aiemmin esitettyjä kaavoja 1 ja 6. Kaavoissa käytetään *m*:n arvoa 5, koska pituussuuntainen sideliitos on muodoltaan jouheva ja särön kasvussa on mukana ydintymisaika, jolloin särö ensin ydintyy ennen kasvuvaihetta alkuvioista huolimatta.

5.1 Värähtelykokeiden tulokset

Värähtelykokeiden tulokset esitetään taulukoituna liitteessä 7. $FAT_{50\%}$ ja $FAT_{95\%}$ tulokset ovat myös taulukoituina liitteessä. Taulukossa on laskettu tulokset käyttäen $\Delta\sigma_{ekv}$:na vastusvenymäanturin tallentamaa dataa. Missään kokeessa murtuminen ei tapahtunut anturin, eli maksimi jännityksen kohdalta, joten kaavoja 7-9 käyttämällä jännitys määritettiin murtumisen kohdalta. Myös jännityksen siirrolla lasketut tulokset esitetään liitteessä 7. Tällöin väsymislujuus on alempi kuin maksimi jännitysvaihtelulla laskettuna, mutta se antaa todellisemman tuloksen liitoksen väsymislujuudesta.

Lisäksi Optim materiaalin putkille taulukossa esitetään jäännösjännitysten poiston vaikutus käyttämällä EC3:n ja IIW:n ohjeita. Jäännösjännitysten poiston vaikutusta ei tarkastella DG materiaalin putkilla, koska säröt eivät ydintyneet ylälaipan puolelle. Värähtelykokeiden, kiinnitysten, venymäanturin ja pääsärön sijainnit esitetään liitteessä 6.

5.2 Vetotykytyskokeiden tulokset

Vetotykytyskokeiden tulokset esitetään taulukoituna liitteessä 7. Väsytyssauvoilla tehtyjen kokeiden perusteella varmistuttiin värähtelykokeiden tuloksista ja tarkasteltiin värähtelykokeiden kuormituksen tehollisuutta.

Väsytyssauvojen jäännösjännitystila oli erilainen kuin kokonaisessa rakenneputkessa, koska laserleikkauksen ja koneistuksen vaikutuksesta sauvan jännitystila muuttui. Yleisesti sauvan leikkauksessa jäännösjännitystila muuttui alkuperäisestä pienemmäksi, jopa osittain puristukseksi. Kun sauvasta koneistettiin materiaalia pois, niin jäännösjännitykset nousivat

hieman suuremmiksi kuin ennen koneistusta. Jäännösjännitysjakaumat olivat kuitenkin keskenään samankaltaisia kaikkien kolmen mittauksen kesken. Jakaumat esitetään alkuperäisten jakaumien kanssa samoissa kuvaajissa liitteessä 5.

Sauvojen leikkauksesta aiheutunut kaareutuminen vaikuttaa myös jännitystilan muuttumiseen, kun se kiinnitettiin kuormituskehän kiinnityksiin. Tämän vuoksi ensimmäisiin sauvoihin asennettiin kaksi vastusvenymäanturia, jolloin nähdään kiinnityksestä aiheutuneet venymät sauvassa. Kaikissa kiinnityksissä venymät olivat saman suuruisia keskenään eli n. ± 1000 μStr. Sauvan hitsin puolella vetoa ja juuren puolella puristusta. Koetulokset laskettiin käyttämällä vastusvenymäanturi 1:n lukemaa, joka oli asennettu kuvan 19 mukaisesti sauvan pinnalle.

6 TULOSTEN TARKASTELU

Liitteen 7 mukaisia tuloksia tarkastellessa havaitaan, että väsymislujuus rakenneputkien kiinnityshitsillä on erinomainen. Molemmissa kokeissa säröt ydintyivät perusaineessa olevista alkuvioista, eikä rakenneputken kiinnityshitsistä. Tällöin laskennassa käytettiin *m*:n arvoa 5, jolloin tuloksia verrataan perusaineen väsymisluokkaan 160. $FAT_{95\%}$:n tulokset ylittävät EC3:n mukaisen perusaineen 160:n rajan paria poikkeusta lukuun ottamatta.

Väsytyskokeissa murtuneiden rakenneputkien murtopinnoista havaittiin, että kaikki säröt ovat ydintyneet putken ulkopinnalta, eikä juuren puolelta. Liitteen 3 hiekuvissa näkyy, että höyläämättömissä rakenneputkissa HF –hitsatun pituussuuntaisen kiinnityshitsin juuren puolella on epäjatkuvuuskohta. Juuren puolen muodon vuoksi olettamuksena oli, että säröt ydintyisivät juuren puolelta.

Värähtelykokeissa venymiä mitattiin putken ulkopinnalta, minkä vuoksi tulee tarkastella, venymien pienenemistä juuren puolella. Tällöin venymät pienenevät putken seinämävahvuuden aiheuttaman reunaetäisyysmuutoksen verran. Taulukossa 5 esitetään prosenttiosuuksina, paljonko jännitysvaihtelu on rakenneputken seinämäpaksuuden sisäpuolella juuren puolen purseen kohdalla. Vaikka taulukossa esitetään prosenttiosuudet jännitysvaihtelusta, niin samat osuudet pätevät myös venymille, kuten kaava 5 aiemmin osoittaa.

Taulukko 5. Prosenttiosuudet rakenneputken pinnalla olevasta jännitysvaihtelusta.

Putki	% $\Delta\sigma_{ekv}$:sta
DG 150x150x4	96 %
Optim 160x160x4	95 %
Optim 120x120x4	93 %

Taulukosta 5 havaitaan, että jännitysvaihtelu on hyvin lähelle vastusvenymäanturin mittaamaa lukemaa. Kuitenkaan juuren puolelta ydintyneitä säröjä ei havaittu ollenkaan värähtelykokeissa. Tästä voidaan päätellä, että väsymisen aiheuttaneet alkuviat

rakenneputken pinnalla olivat kriittisempiä kuin HF –hitsin juuren puoleinen purse. Prosenttiosuudet on laskettu käyttämällä kaavaa 10.

$$\frac{e_1}{e_2} \tag{10}$$

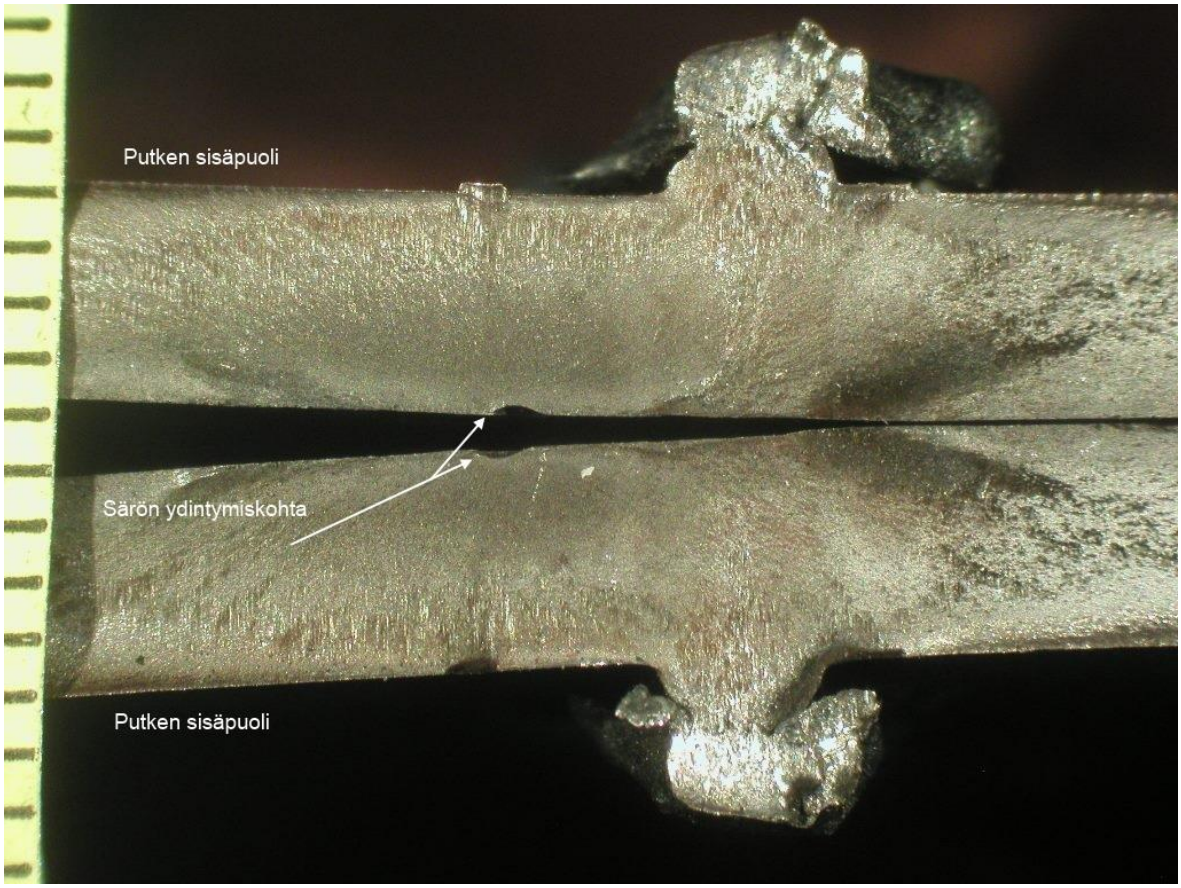
missä e_1 on etäisyys rakenneputken poikkileikkauksen neutraaliakselilta rakenneputken seinämänpaksuuden alapintaan ja e_2 etäisyys neutraaliakselilta putken seinämänpaksuuden yläpintaan.

6.1 Murtopinnat

Molempien väsytyskoetyyppien jokainen murtopinta leikattiin koekappaleesta irti, jolloin saatiin murtopinta kokonaisuudessaan näkyviin. Murtopintoja tarkastellessa huomattiin, että kaikki murtumaan johtaneet säröt olivat ydintyneet rakenneputken pinnalla olevista alkuvioista. Yleisesti rakenneputkien alkuviat syntyivät kolhuista tai ruostumisesta.

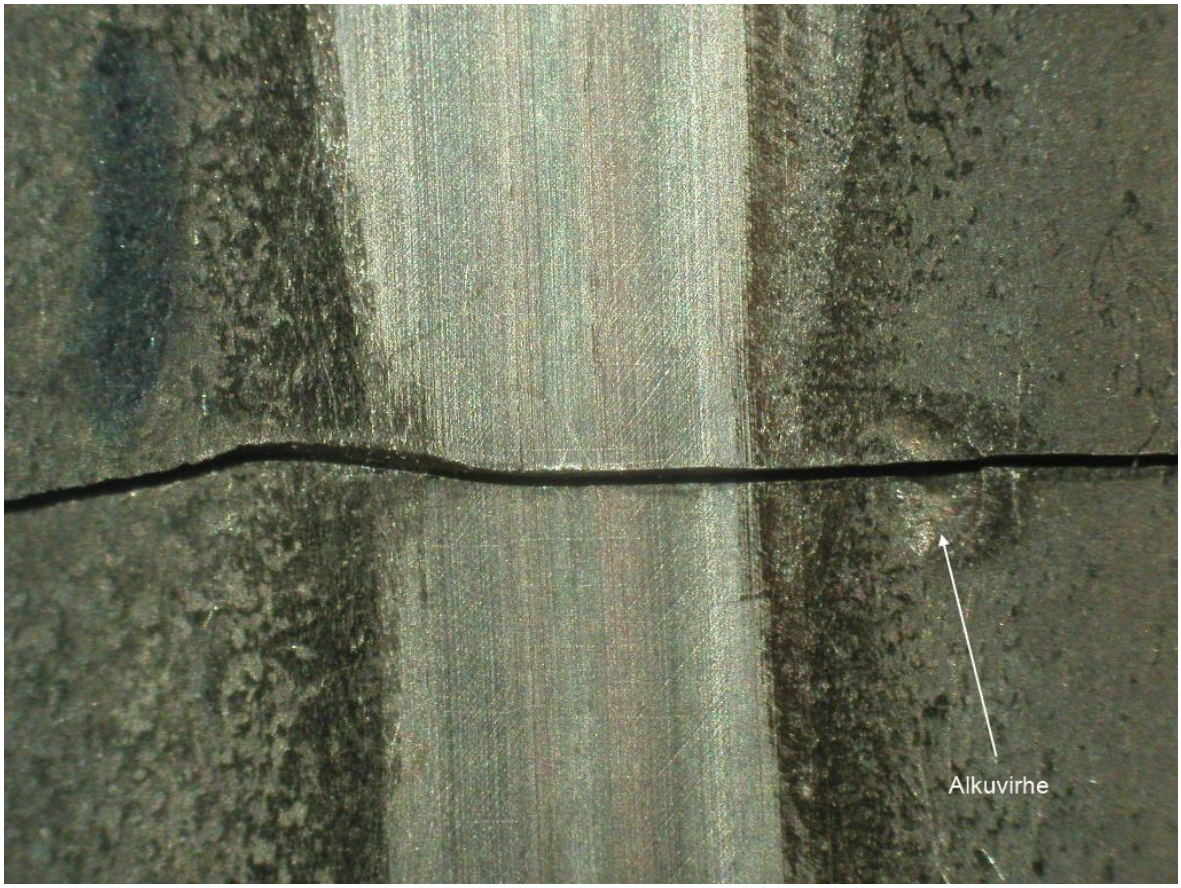
6.1.1 Värähtely

Jokainen murtopinta valokuvattiin, mutta tyypillisimmistä tapauksista otettiin makrokuvat mikroskooppia käyttämällä. Kuvassa 21 esitetään RR_HF4 testin murtopinta ja kuvassa 22 sama murtopinta putken ylälaipan puolelta kuvattuna. Kokeessa käytettiin Optim 700 Plus MH 160x160x4 rakenneputkea, joka oli hehkutettu, mutta ilman sisäpuoleista höyläystä.



Kuva 21. RR_HF4 testin murtopinta.

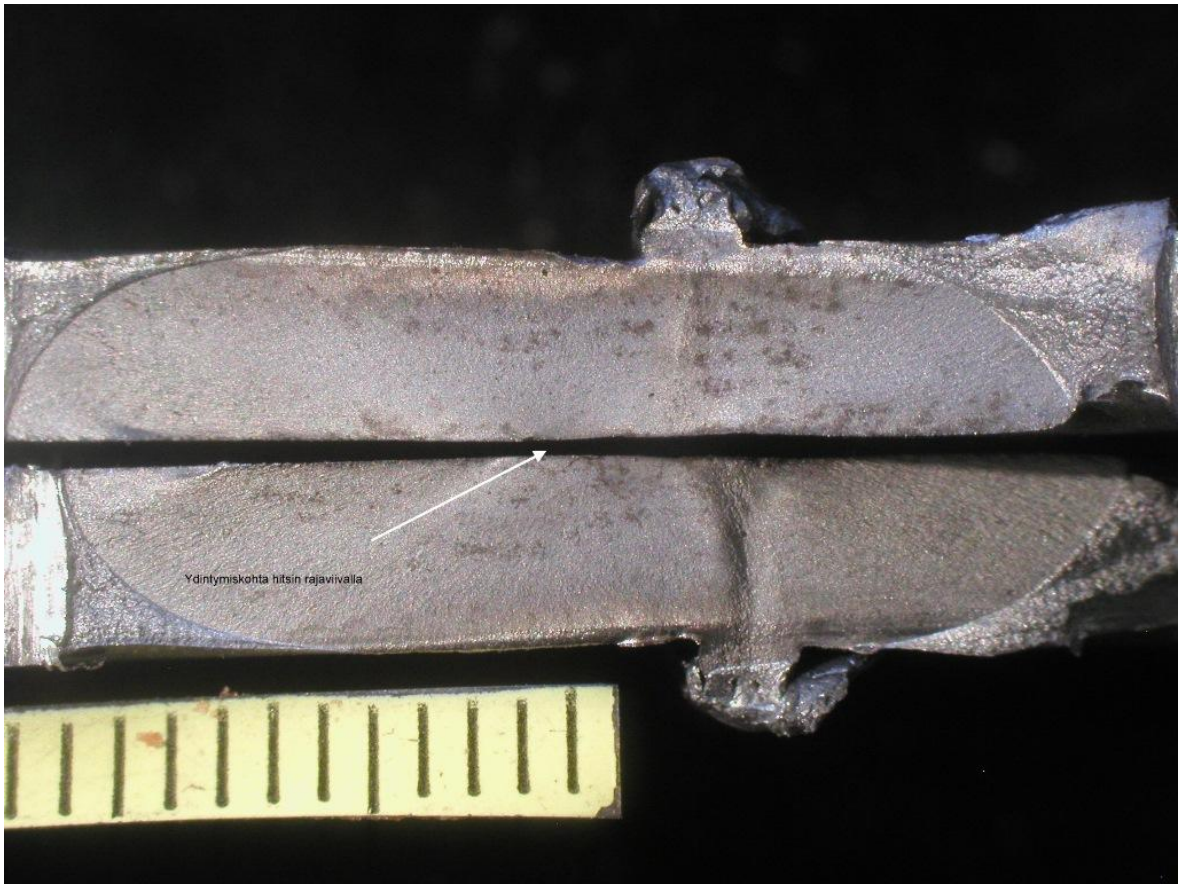
Kuvasta 21 on havaittavissa särön ydintymiskohta ja kasvualue, mikä on merkitty valkoisella nuolella. Särö on ensin kasvanut sekä putken paksuussuunnassa, että leveyssuunnassa ennen lopullista murtumaa. Kuvassa 22 esitetään väsymismurtuma ylhäältäpäin kuvattuna, mistä voidaan havaita paremmin alkuvika.



Kuva 22. RR_HF4 testin murtopinta ylhäältäpäin.

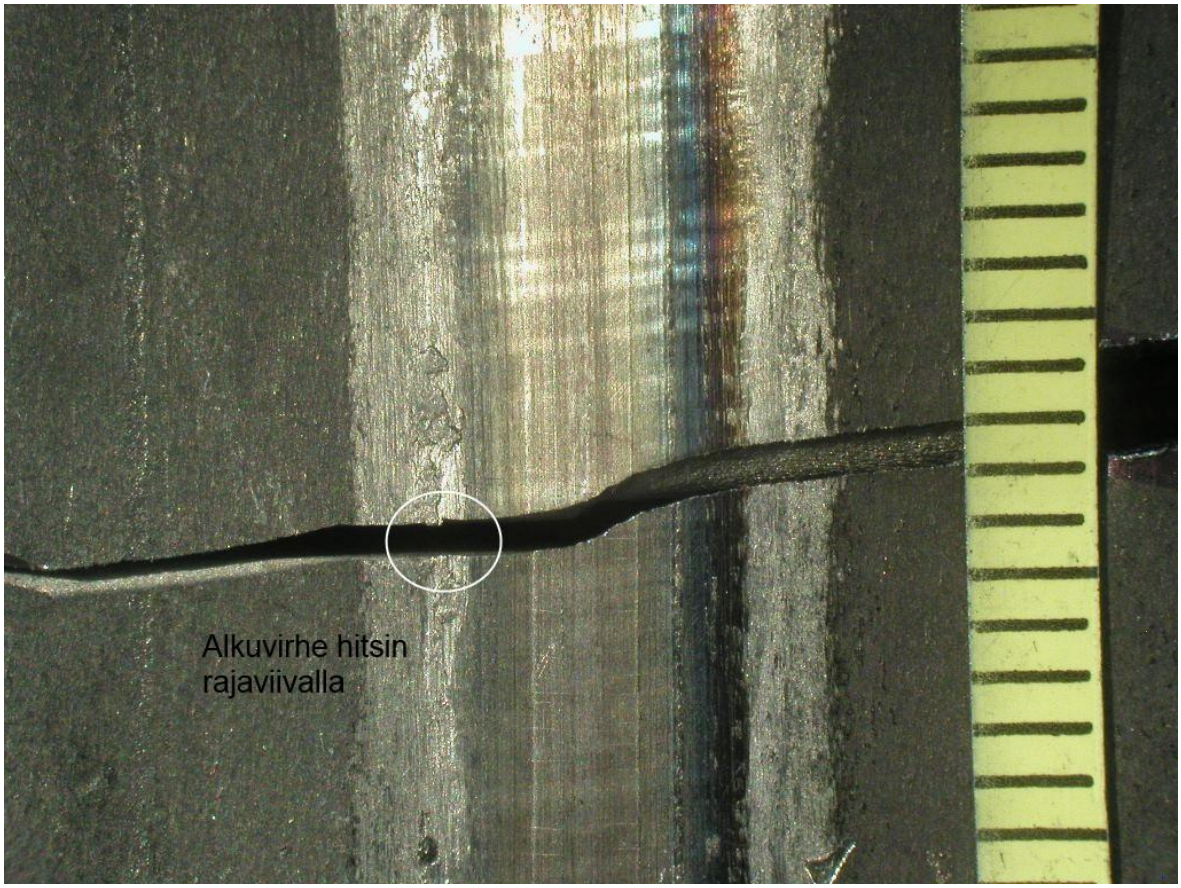
Kuvassa 22 näkyy RR_HF4 testin murtopinta putken ulkopinnalta kuvattuna, missä alkuvika on voinut aiheutua kolhusta. Kyseisen testin putkessa ei myöskään ollut käytetty sisäpuoleista höyläystä, joten särö olisi voinut ydintyä myös juuren puolelta, mutta kuvan 22 mukainen alkuvika oli kuitenkin kriittisempi.

Kuvassa 23 esitetään RR_HF11 murtopinta ja kuvassa 24 murtopinta ylhäältä kuvattuna. Kokeessa käytettiin Optim 700 Plus MH 120x120x4 rakenneputkea, mikä ei ollut hehkutettu, tai höylätty sisäpuolelta.



Kuva 23. RR_HF11 testin murtopinta.

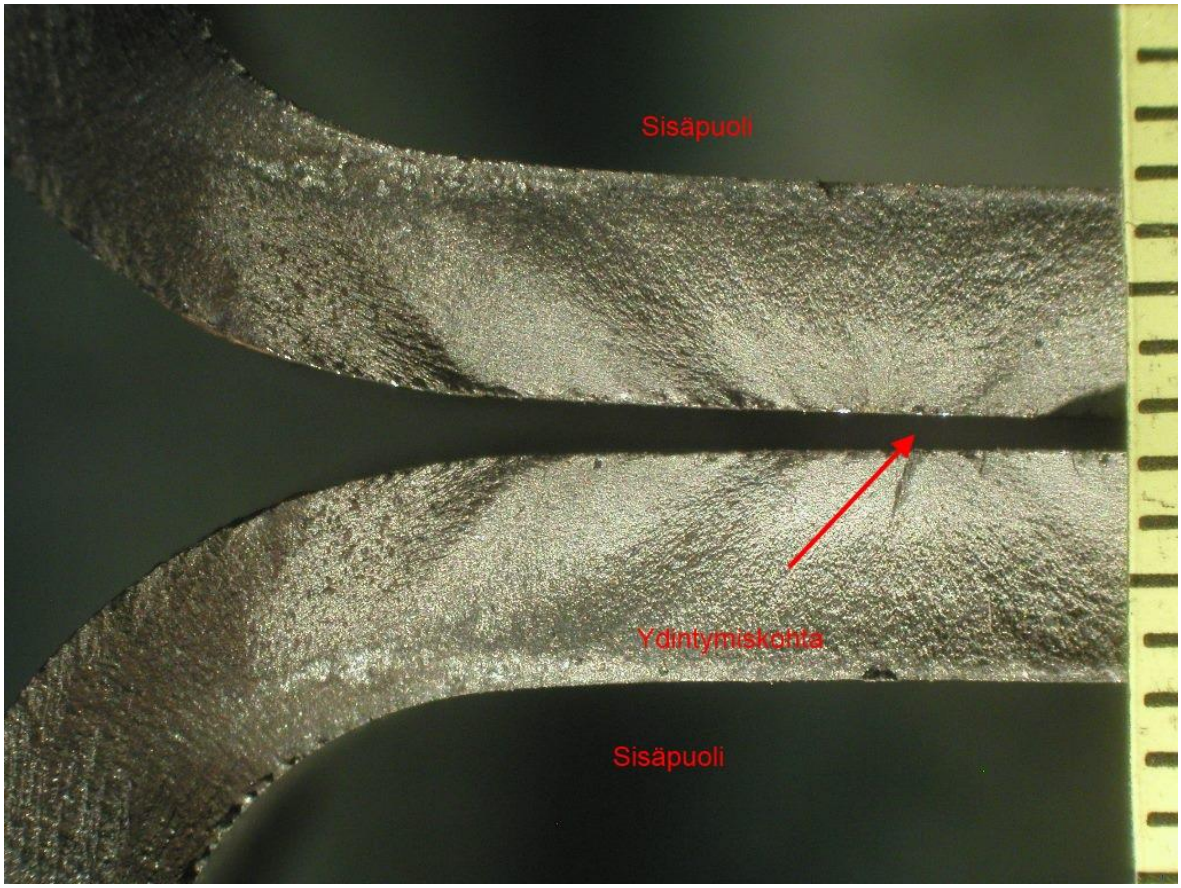
Kuvan 23 murtopinnasta havaitaan, että väsymismurtuma on ydintynyt aivan hitsin vieressä olevasta kriittisimmästä alkuviasta. Kuvasta havaitaan selkeä ellipsin muoto särönkasvuvaiheessa. Ydintymisvaiheen jälkeen särö on kasvanut ensin paksuuden yli, jonka jälkeen se on jatkanut kasvuaan sivuttaissuunnassa ennen lopullista murtumista. Kuten RR_HF4 kokeessa, särö ei ydintynyt juurenpuolelta.



Kuva 24. RR_HF11 kokeen murtopinta ylhäältä.

Kuvassa 24 näkyy selvä epäjatkuvuuskohta hitsin rajaviivalla, mistä väsymissärö on ydintynyt. Muualla rakenneputkessa oli kuitenkin kolhuja, mistä väsymissärö olisi voinut ydintyä, mutta rajaviivan epäjatkuvuuskohta oli kriittinen. Ydintymiskohdan alueella näkyy röpelöistä pintaa HF –hitsin rajaviivalla. Joko metallipurse on levinnyt ja kiinnittynyt rajaviivan tuntumaan, mitä aluetta ei varsinaisesti höylätä. Höylä on voinut olla myös kulunut, minkä vuoksi rajaviiva on kuvan 24 mukainen.

Seuraavaksi esitetään yleinen murtopinta 150x150x4 DG:stä kuvissa 25 ja 26. Yleisesti kokeissa olleiden DG:n murtumat ydintyivät korroosiosta aiheutuneista alkuvioista. Suurin osa testatuista DG:stä murtui rakenneputken alalaipasta, koska ylälaippa putsattiin ruosteesta vastusvenymäanturin kiinnittämiseksi. Koska ylälaippa oli putsattu putken keskialueelta, niin se sisälsi huomattavasti vähemmän alkuvikoja kuin alalaippa, joka oli ruosteen peitossa. Tällöin ruostuneella alueella oli enemmän alkuvikoja, mistä särö ydintyi.



Kuva 25. RR_HF6 kokeen murtopinta rakenneputken alalaipan ulkopinnalla.

Kuvasta 25 on havaittavissa elliptinen harmaa alue, joka on särönkasvu vaihetta. Muu tummempi alue on jäännösmurtumaa, joka on tapahtunut rakenneputken nurkan yli hetkellisen suurimman kuormituksen takia. Vaikka väsymismurtuminen tapahtui rakenneputken alapuolelta, niin väsymiskestävyys kyseisellä putkella ei eroa muiden kokeiden tuloksista. Kuvassa 26 esitetään kuva putken alkuviasta.

Kuva 26. RR_HF6 kokeen murtopinta päältä päin.

Kuvasta 26 näkyy selkeä alkuvika, mikä on aiheutunut korroosiosta. Kaikki DG:t käyttäytyivät samankaltaisesti, eli murtuminen tapahtui joko ala- tai ylälaipan nurkista, mutta alkuviaksi löytyi aina korroosion vaikutus. Murtumisien sijainnista johtuen ei pystytä vertailemaan hehkutuksen tai höyläyksen vaikutusta väsymiskestävyyteen.

6.1.2 Vetotykytys

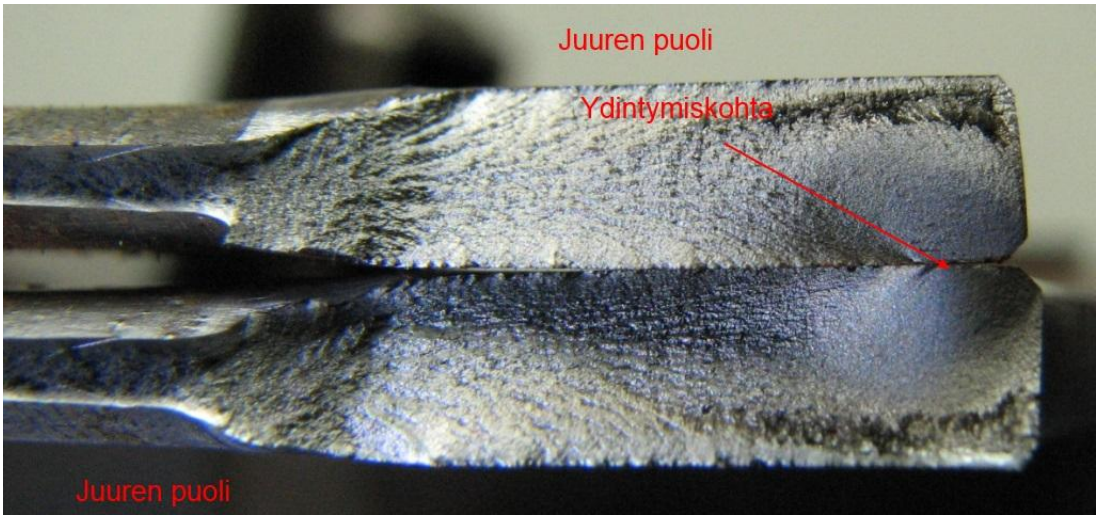
Myös vetotykytyksellä väsytettyjen sauvojen säröt ydintyivät putken ulkopinnalta (ylälaippa värähtelykokeissa), missä oli vastusvenymäanturi kuvan 19 mukaisesti

Vaikka väsytyssauvojen koosta johtuen alkuvikoja on vähemmän kuin pitkissä kokonaisissa rakenneputkissa, niin silti säröt ydintyivät vetotykytyksessä alkuvioista. Yleisimpiä vikoja olivat naarmut ja kolhaisujen aiheuttamat montut. Säröt ydintyivät lähelle sauvan pyöristettyä osiota kuvan 27 mukaisesti. Yhdessä kokeessa murtuminen tapahtui lähempänä sauvan keskikohtaa. Liitteessä 7 esitetään tulosten yhteydessä murtumiskohta.

Kuva 27. Murtunut väsytyssauva V1.

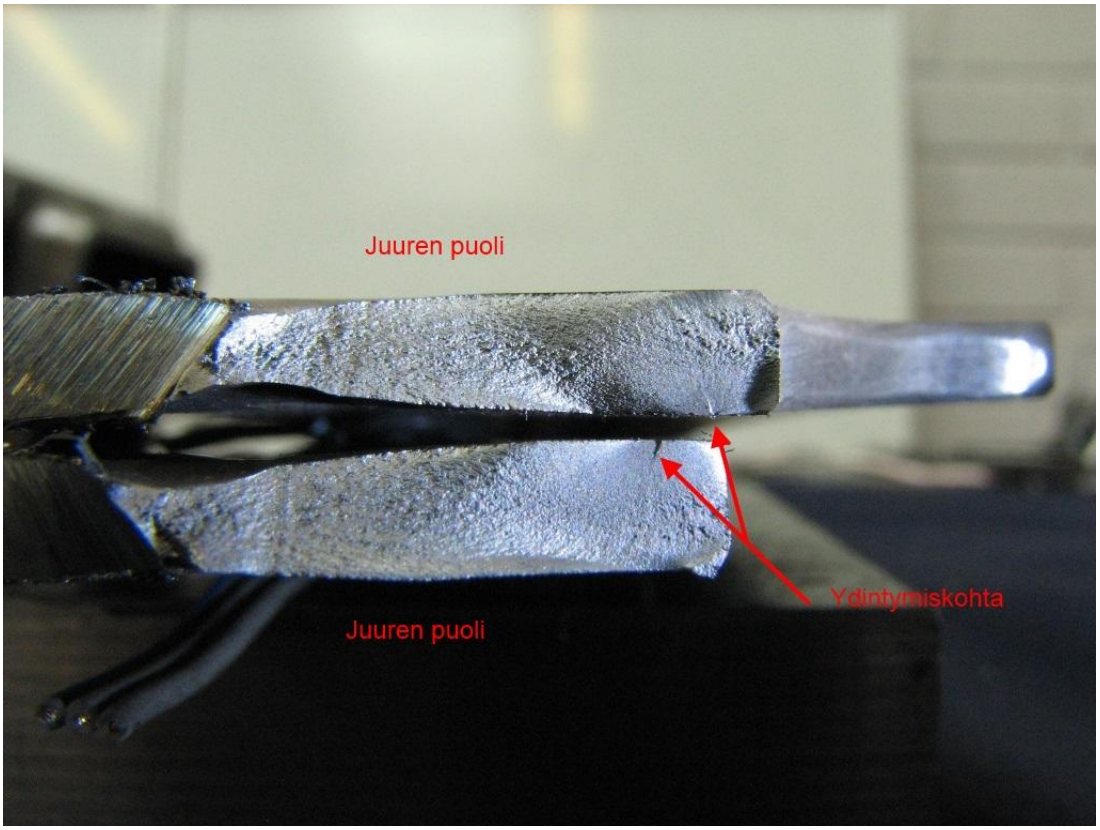
Koska sauvat olivat kaareutuneita leikkauksen jälkeen, niin niitä ei saatu kiinnitettyä eksaktisti suoraan kiinnitysleukoihin. Kiinnityksestä johtuen sauvan pintapuoli altistuu kiinnitys vaiheessa vedolle ja juurenpuoli puristukselle. Tästä johtuen vastusvenymäanturin puolella vaikuttaa jo suuri vetojännitys, jolloin kuormitus lisää vetojännitystä. Tästä johtuen säröt ydintyivät kyseiseltä puolelta, missä oli vetojännitys n. 210 MPa, kiinnityksen jäljiltä.

Yleisesti väsytyssauvojen murtopinnat olivat samanlaisia keskenään, eli väsymissäröt ydyintyivät läheltä sauvan pyöristystä. Kuvassa 28 esitetään kokeen V5 murtopinta.



Kuva 28. Väsytyssauvan V5 murtopinta.

Kuvasta 28 näkyy särön ydintymiskohta ja särön kasvualue hyvin. Särö on ensin kasvanut sekä sivu- että paksuussuunnassa väsytyssauvassa. Vaaleampi alue lähempänä sauvan keskiosaa on jäännösmurtopintaa. Yleisesti kaikki säröt ydintyivät hyvin läheltä sauvan reunaa alkuvioista ja murtuivat samankaltaisesti. Kuvassa 29 esitetään sauvan V1 murtopinta ja kuvassa 30 murtopinta ylhäältä kuvattuna.



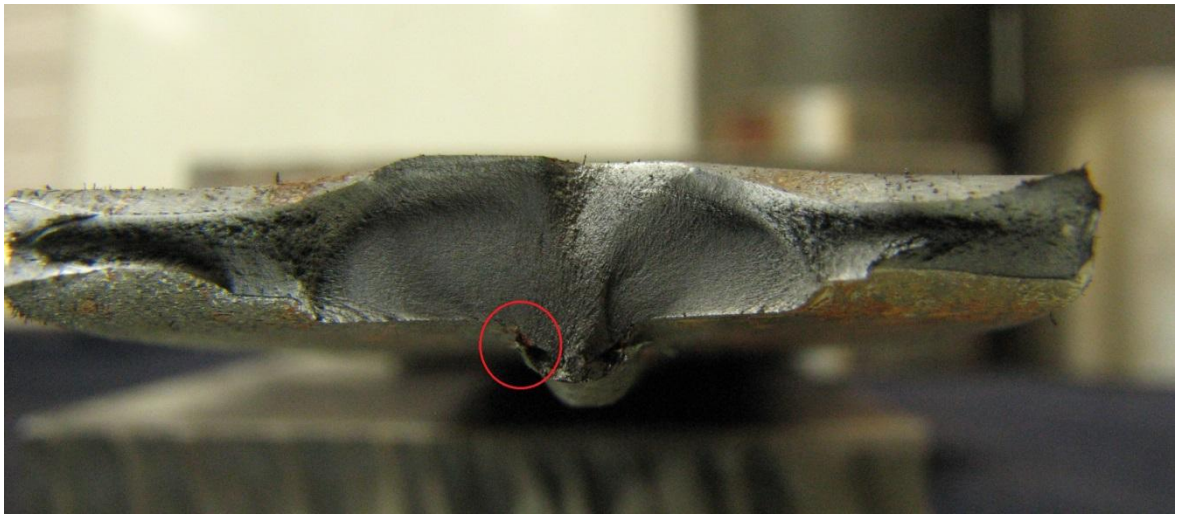
Kuva 29. Väsytyssauvan V1 murtopinta.

Kuvaan 29 on merkitty punaisella nuolella selvästi havaittavat särön ydintymiskohdat. Kuten kappaleessa V5 särö on ensin kasvanut sekä paksuus että sivu suunnassa ennen murtumista.

Kuva 30. Väsytyssauvan V1 murtopinta ylhäältä.

Kuvasta 30 havaitaan selvästi naarmuja sauvan pinnalla, mistä särö ydintyi. Naarmut ovat havaittavissa punaisen ympyrän sisäpuolella. Kyseessä oli tyypillinen alkuvika, mistä useimmat murtumat johtuivat.

Yleisesti väsytyssauvat murtuivat putken ulkopinnan puolella olevista alkuvioista, paitsi vetotykytyskokeessa V8, minkä materiaalina oli DG. Kokeessa saavutettiin juurenpuolelta ydintynyt särö, kuvassa 31 esitetään murtopinta.



Kuva 31. Väsytyssauvan V8 murtopinta.

Kuvasta 31 nähdään, että punaisen ympyrän sisällä näkyy juurenpuolen purseessa selvä ruostetäplä, mistä särö on ydintynyt. Tässä tapauksessa ruostuminen oli kriittinen väsymisen aiheuttaja, eikä höyläämätön juuren puoleinen metallipurse. Kuitenkin alkuvika oli selvästi havaittavissa kuvasta 31, joten juuren puolen pursetta ei voida pitää kriittisenä. Särö on kasvanut ensin sekä sivu että paksuus suunnassa ennen jäännösmurtumaa, kuten aiemmissa väsytyskokeissa.

Poikkeavaa sauvan V8 murtumisessa oli sen murtuminen lähempänä sauvan keskikohtaa, eikä pyöristyksen alueelta, kuten muissa. Kuvassa 32 esitetään väsytyssauvan V8 murtopinta ylhäältä kuvattuna.

Kuva 32. Väsytyssauvan V8 murtopinta ylhäältä.

Kuvasta 32 havaitaan, että murtuminen tapahtui sauvan pituussuuntaisen keskipisteen ja pyöristyksen puolivälistä. Tähän vaikutti myös se, että pyöristyksen alue kiillotettiin ennen koetta, ettei särö ydintyisi kyseiseltä alueelta. Tällöin putkessa olevat alkuviat toimivat särön ydintymiskohtina, kuten värähtelykokeissa. Tässä kokeessa ruoste oli juuren puolella kriittinen, niin samanlaisia vikoja on varmasti useissa putkissa, mutta eivät sattuneet testeissä koesauvan alueelle. Vetotykytys- ja värähtelykokeiden perusteella voidaan todeta, että juuren puolen purse ei ole kriittinen rakenneputkien pituussuuntaisen HF –hitsin väsymiskestävyyden kannalta.

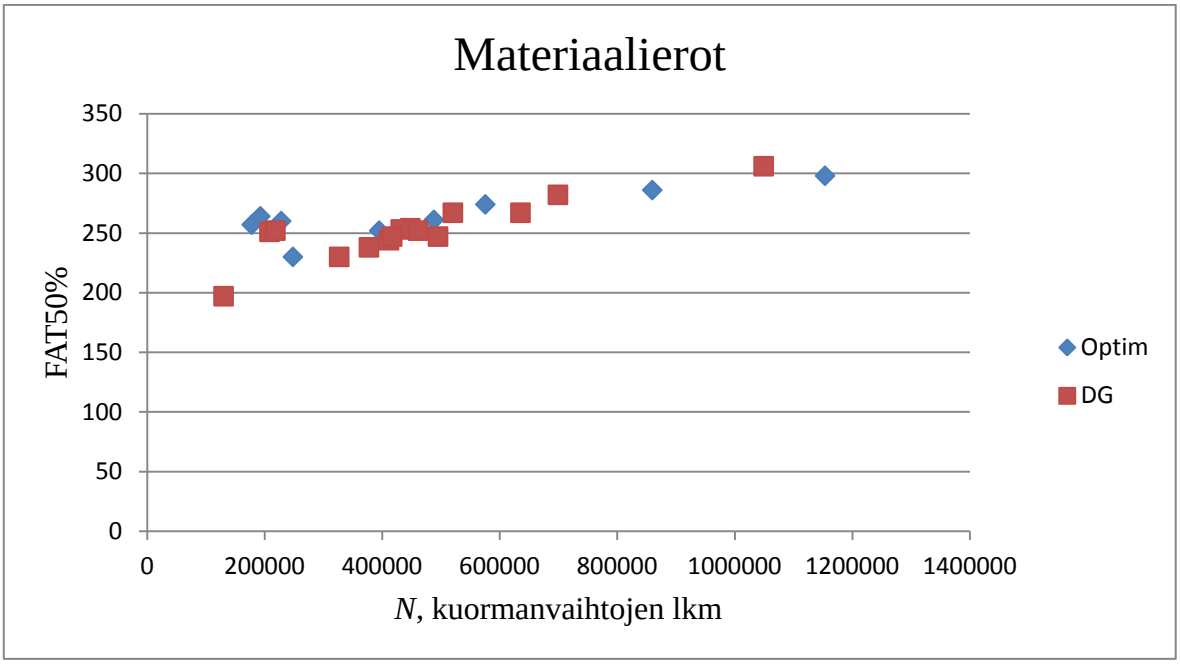
6.2 Rakenneputkien ominaisuuksien ja materiaalien erot

Kahdesta eri teräksestä valmistettuja rakenneputkia testattiin eri ominaisuuksilla taulukon 2 mukaisesti. Värähtelykokeissa testituloksia voitiin vertailla keskenään eri ominaisuuksien välillä. Vetotykytyskokeilla pystyttiin verifioimaan värähtelykokeiden kuormituksen tehollisuutta ja tuloksia. Koska sauvojen leikkauksessa ja koneistuksessa jäännösjännitystila on lauennut, niin putkien eri ominaisuuksia ei voida vertailla kokeiden välillä.

Rakenneputken tuotantosauman sisäpuoleisella höyläyksellä ei ole merkitystä putken väsymislujuuteen, koska säröt ydintyivät putken pinnalta alkuvioista. Vaikka taivutusjännitys alenee vain vähän juuren puolella putken pintaan verrattuna taulukon 5 mukaisesti, minkäänlaista vauriota ei havaittu juuren puolella. Vaikka vetotykytyskokeessa V8 särö ydintyi juuren puolelta, kyseessä oli korroosion aiheuttama alkuvika, millä ei ollut vaikutusta juuren puolella olevan purseen epäjatkuvuuskohtaan.

Jäännösjännityksien vaikutusta voidaan vertailla parhaiten Optim:n kohdalla. Vertailu hieman kärsii, koska hehkuttamattomat Optim:t olivat eri dimensioilla. Kuitenkaan eroa ei syntynyt hehkutuksesta tai mittojen erilaisuudesta. Lisäksi säröt eivät ydintyneet jokaisessa testissä hitsin rajaviivalta, vaan ydintymiset tapahtuivat kauempana hitsistä, jolloin hehkutuksen rooli väheni entisestään. Liitteestä 5 käy ilmi, että hehkutetuissa tapauksissa jäännösjännitys on pienempi vain kiinnityshitsin alueella, jolloin kauempana vaikuttaa kuitenkin suurempi vetojännitys. Poikkeuksena on kuitenkin kaksi ensimmäistä testiä, joilla on korkein väsymiskestävyysluokka, mutta tämä johtuu ensimmäisten kokeiden toteutuksesta. DG:n putkilla jäännösjännitysten vaikutusta ei pysty vertailemaan, koska putket murtuivat alalaipan puolelta, mistä jäännösjännitystilaa ei mitattu.

Vaikka DG:stä valmistetut rakenneputket olivat ruostuneita, väsymislujuudessa ei löydy eroja Optimiin verrattuna. Kuvassa 33 esitetään väsytyskokeiden tulokset datapisteinä materiaaleittain.



Kuva 33 Materiaalierot.

Kuvan 33 kuvaajassa vaaka-akselilla on kokeen kuormanvaihtojen lukumäärä ja pystyakselilla kokeen perusteella laskettu $FAT_{50\%}$. Molemmissa materiaaleissa on mukana sekä värähtely- että vetotykytyskokeiden tulokset. Värähtelyn tuloksissa on laskettu puristuspuolelta 60 % jännitysvaihteluun.

Muutamia poikkeuksia lukuun ottamatta selviä eroja ei kuvan 33 kuvaajasta ole havaittavissa. DG- putkien väsymislujuuden hajonta on vähäisempi, kun taas Optimin väsymislujuudessa hajonta on suurempi, koska niitä testattiin vähemmän. Vaikka Optim teräksen putket eivät olleet ruostuneita, väsymislujuus on ruostuneemman DG teräksen kanssa samaa luokkaa. Tällöin perusaineen väsymisluokka 160 näyttää pätevän molempiin materiaaleihin, vaikka Optimin pinnan laatu oli huomattavasti parempi. Kuvaajan perusteella voidaan todeta, ettei materiaalien välillä ole eroa, joten väsymislujuuteen näyttäisi näissä kuormitustapauksissa vaikuttavan ainoastaan alkuviat.

6.3 Kuormituksen tehollisuus

Vetotykytyskokeiden tarkoituksena oli varmistua kiinnityshitsin väsymislujuudesta, mutta samalla myös värähtelykokeiden kuormituksen tehollisuudesta. Värähtelykokeissa hehkutettujen rakenneputkien väsymislujuutta voidaan redusoida, kun kuormituksen rajajännityssuhde on -1. Tällöin väsymislujuus alenee, jos puristuspuolen kuormitus ei ole

kokonaan tehollista. Liitteessä 7 esitetyissä tuloksissa huomataan, että värähtelykokeiden $FAT_{50\%}$ arvot ovat huomattavasti suurempia kuin vetotykytyskokeiden arvot. Kun vertaillaan Optim- laadusta valmistettujen rakenneputkien EC3:n ja IIW:n 2. tapauksen mukaisesti redusoituja $FAT_{50\%}$ arvoja, voidaan havaita, että arvot korreloivat keskenään.

IIW ei määrittele julkaisussaan paljonko toisen tapauksen kuormituksessa on puristuspuolelta tehollista, mutta EC3:n mukaisesti kuormituksen puristuspuolelta on 60 % tehollista. Tämän vuoksi tulisi suosia EC3:n standardin määritelmää. Liitteen tuloksissa redusointi on tehty vain hehkutettujen rakenneputkien osalta, joihin säröt ovat syntyneet putken hitsin puolelle. Suurin osa DG materiaalin putkista murtui alalaipasta, koska kyseistä aluetta ei putsattu ruosteesta. Tällöin ylälaipan pinnanlaatu parani, jonka vuoksi särö ydintyi ruosteiselta alueelta. Tämän vuoksi DG materiaalilla testattujen putkien $FAT_{50\%}$ arvot ovat parempia, mutta kun niille tehdään EC3:n mukainen redusointi, niin tulokset korreloisivat vetotykytyskokeiden tuloksien kanssa. Tämä osoittaa sen, että molempien materiaalien kohdalla värähtelykokeessa puristuspuolelta 60 % on tehollista.

Vetotykytyskokeissa jäännösjännitykset olivat lauenneet värähtelykokeisiin verrattuna. Lisäksi sauvan taivutus suoraksi vaikutti sen jännitystila. Kun sauva asennettiin kuormituskehälle, se ei kuitenkaan ole täysin suora, vaan tekee pienen mutkan toisen kiinnitysleuan kohdalla, mihin syntyy jännityskeskittymä. Tällöin tiettyyn kohtaan syntyy ennen varsinaista kuormitusta suurempi vetojännitys, joka vaikuttaa jännitysvaihtelun tehollisuuteen. Toisaalta värähtelykokeissa oli myös särön ydintymisalueilla suuremmat vetojännitykset, joka vaikuttaa yhdessä kokeen nimellisen kuormituksen kanssa.

Tuloksista voidaan päätellä, että värähtelykokeissa kuormitus ei ollut täysin tehollista, vaan puristuspuolelta tulisi tarkastella vain 60 % vaihtelusta. Tämän huomion vuoksi jokaisen värähtelykokeen tulosta tulisi redusoida, vaikka rakenneputkea ei olisi hehkutettu tai se olisi murtunut alalaipasta, koska kuormitus oli täysin samanlainen sekä putken ylä- että alapuolella. Seuraavassa taulukossa 6 esitetään $FAT_{50\%}$ ja $FAT_{95\%}$ molemmista väsytyskokeista. Värähtelykokeiden tuloksissa $\Delta\sigma_{ekv}$:n laskennassa σ_{min}:stä otettiin laskentaan vain 60 %.

Taulukko 6. Muunnetut FAT –luokat.

KOE	$FAT_{50\%}$	$FAT_{95\%}$
RR_HF2	286	208
RR_HF3	298	217
RR_HF4	274	200
RR_HF5	261	190
RR_HF6	244	178
RR_HF7	247	180
RR_HF8	267	194
RR_HF9	247	180
RR_HF10	252	183
RR_HF11	230	168
RR_HF12	212	154
RR_HF13	230	167
RR_HF14	238	173
RR_HF15	252	184
RR_HF16	253	184
RR_HF17	267	194
V1	260	189
V3	257	187
V4	251	183
V5	254	185
V6	264	192
V7	197	143
V8	282	205
V9	306	223

Taulukosta havaitaan, värähtelykokeiden tulokset, jotka ovat redusoitu EC3:n mukaisesti, vastaavat vetotykytyskokeiden tuloksia. Näin ollen taulukon 6 mukaisia $FAT_{95\%}$ tuloksia voidaan pitää lopullisina, koska niissä on otettu huomioon murtumisen sijainti ja kuormituksen tehollisuus. Kaikkien kokeiden $FAT_{95\%}$ keskiarvo on 185, värähtelykokeiden $FAT_{95\%}$ keskiarvo 184 ja vetotykytyskokeiden 188. Keskiarvoista havaitaan, että kaikki ovat yli EC3:n suositteleman perusaineen väsymiskestävyysluokan 160. Taulukosta 6

kuitenkin havaitaan, että kaksi koetulosta eivät ylitä väsymisluokkaa 160. Tämä kuitenkin selittyy kokeiden hajonnalla.

7 JATKOTUTKIMUKSET

Työssä testattiin laajasti eri ominaisuuksilla olevia rakenneputkia kahden materiaalin kesken. Optim:n kohdalla jouduttiin tyytymään eri dimensioilla olevaan hehkuttamattomaan rakenneputkeen, joten tulevaisuudessa voitaisiin testata samoilla dimensioilla olevaa putkea kuin hehkutetut.

Työn aikataulun vuoksi 10 mm:n seinämänpaksuudella oleva Ruukki double grade teräksestä valmistettu rakenneputki jouduttiin jättämään pois työstä. Kyseiset putket tullaan testaamaan tulevaisuudessa Teräsrakenteiden laboratoriossa samoilla menetelmillä. Haasteena kyseisten putkien kohdalla on niiden paino. Värähtelykokeessa putken tulisi olla vähintään 5 m pitkä, jotta nykyisellä epäkeskomoottorilla pystyttäisiin aiheuttamaan ominaistaajuus putkelle. Ensimmäiseksi kyseistä putkea testattiin nelipistetaivutuksella, jonka ongelmana oli väsytyskokeen pitkäkestoisuus ja painimien kontakti putkeen, mikä aiheutti säröt kappaleeseen.

Teräsrakenteissa ollaan yhä enemmän siirtymässä ultralujiin teräksiin, jotka tuovat keveyttä rakenteille. Tämän takia olisi hyvä testata myös kyseisiä teräslaatuja mielenkiinnon vuoksi. Tämä tutkimus kuitenkin osoitti, että DG:n ja erikoislujan Optimin välillä ei ole eroja, mutta ultralujat teräkset ovat kuitenkin oma alueensa.

DG:stä voidaan todeta, että testatut putket olivat ruostuneita, mikä alensi niiden väsymiskestävyyttä. Tulevaisuudessa voidaan myös selvittää kyseisen materiaalin väsymislujuus ilman korroosion vaikutusta.

8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tutkimuksessa saatiin arvokasta tietoa rakenneputkien väsymiskestävyydestä ja eritoten juuren puolen metallipurseen vaikutuksesta kiinnityshitsin väsymiskestävyyteen. Aluksi epäilyt olivatkin, että väsytyskokeissa särö ydintyy juuren puolen purseeseen, koska siellä sijaitsee epäjatkuvuuskohta. Näin ei kuitenkaan tapahtunut, vaan säröt ydintyivät putken pinnalla olevista alkuvioista. Pinnalla olevat alkuviat ovat kriittisempiä kuin itse purse, joten sen sisäpuoleisella höyläämisellä ei ole vaikutusta väsymiskestävyyteen. Värähtelykokeissa olisi ilmennyt juuren puolen väsyminen, jos se olisi ollut kriittinen, koska jännitys pienenee vain 4-7 % putken pintaan nähden. Koetulosten perusteella näillä laaduilla ei ole perusteltua höylätä sisäpuoleista pursetta pois, ellei käyttökohde sitä erityisesti vaadi esimerkiksi visuaalisuuden vuoksi.

Koska alkuviat olivat kriittisiä, rakenneputkien jälkikäsittelyyn tulee kiinnittää erityistä huomiota. Putkien pinnat voivat vaurioitua esimerkiksi kuljetuksen tai varastoinnin aikana. Kuitenkaan nämä alkuviat eivät vaikuttaneet negatiivisesti rakenneputkien väsymiskestävyyteen. Lisäksi putken valmistusprosessissa tulee tarkkailla putken ulkopuolista höyläystä, sillä terä kuluu ajan myötä, jolloin se tylsänä voi pomppia höyläyksen aikana jättäen epäjatkuvuuskohtia kiinnityshitsin alueelle.

Koetulokset eivät osoittaneet eroa materiaalien välillä, vaikka osa kokeiden putkista olivat pahasti ruostuneita. Itse materiaali ei koetulosten perusteella vaikuta väsymiskestävyyteen. Tosin materiaalia valittaessa tulee tarkastella sen mekaanisia ominaisuuksia ja käyttökohteen asettamia vaatimuksia.

Jäännösjännityksien poistolla ei havaittu olevan vaikutusta väsymislujuuteen. Hehkutuksen vaikutusta pystyttiin arvioimaan värähtelykokeiden perusteella, koska rakenneputken jäännösjännitystila laukeaa väsytyssauvojen leikkauksen yhteydessä. Värähtelykokeissa säröt ydintyvät alkuvioista, jotka olivat kauempana pituussuuntaisesta hitsistä rakenneputken leveyssuunnassa.

Liitteessä 5 esitettyjen jäännösjännityksien kuvaajista voidaan havaita, että hehkutus on tapahtunut putken leveyssuunnassa vain hitsin alueelle. Alkuviat, joista säröt ydintyivät olivat putken leveyssuunnassa kauempana hitsistä. Tällöin kuvaajien mukaisesti kauempana hitsistä vaikutti suuret vetojäännösjännitykset, minkä vuoksi liitteen 7 tuloksissa esitetyt IIW:n ja EC3:n mukainen jännitysvaihtelun redusointi ei toimi tässä tapauksessa.

Myöskään hehkuttamattomissa rakenneputkissa ei havaittu itse kiinnityshitsin alueella ydintyneitä säröjä, joten jäännösjännityksien poistolla ei ole vaikutusta väsymislujuuteen näiden kokeiden perusteella.

Kun värähtelykokeiden tuloksia vertailtiin vetotykytyskokeisiin, huomattiin että tulokset eivät täysin vastaa toisiaan. Tietysti tämä johtuu myös jäännösjännitysten laukeamisesta, mutta myös värähtelykokeiden kuormituksen tehollisuudesta. Käyttämällä EC3:n tai IIW:n toisen tapauksen mukaisia jännitysvaihtelun redusointeja tulokset saadaan vastaamaan toisiaan. Tässä työssä kuitenkin käytetään standardin mukaista redusointia, jolloin $\Delta\sigma_{ekv}$:n laskennassa σ_{min}:stä huomioidaan vain 60 % laskentaan.

Koetulokset ylittivät EC3:n määrittelemän FAT –luokan 160 kahta poikkeuksesta lukuun ottamatta. Yleisesti tulosten keskiarvo on korkeampi, joten huonommat tulokset johtuivat vain hajonnasta. Tutkimuksen perusteella voidaan todeta, että Ruukki Metals Oy:n valmistamien rakenneputkien HF –hitsatun kiinnityshitsin ja perusaineen väsymislujuus täyttää sille asetetut vaatimukset.

LÄHTEET

Bannatine, J. A., Comer, J. J., Handrock, J. L. 1990. Fundamentals of metal fatigue analysis. New Jersey: Prentice-Hall, Inc. 273 s. ISBN: 0-13-340191-X

Dowling, N. E. 2013. Mechanical Behavior of Materials, Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue. Fourth edition. Harlow: Pearson Education Limited. 953 s. ISBN 978-0-13-139506-0

Erka, 2012. MVE – Vakio tärymoottorit. [verkkodokumentti]. [Viitattu 3.7.2013]. Saatavilla http://www.erka.fi/pages/pdf/MVE_3000_3600rpm.pdf

Farajian, M., Barsoum, Z., Weich, I., Nitschke-Page, T. 2012. A Literature Survey on Residual Stress Related Fatigue Strength Improvement Techniques for Welded Components and Structures. IIW-document. XII-WG6-008-12. 16 s.

Hobbacher, A. 2013. Recommendations for fatigue design of welded joints and components. IIW-document. XII-2151r4-07. 163 s.

Lepola, P., Makkonen, M. 2007. Materiaalit ja niiden käyttö. 3.-5. painos. Werner Söderström Osakeyhtiö. 314 s.

Minkkinen, Jussi. HF-hitsiä [yksityinen sähköpostiviesti]. Vastaanottajat: Markus Wilén. Lähetetty 15.4.2013 klo 13.17 (GMT +0200).

Minkkinen, Jussi. [yksityinen puhelinkeskustelu]. 2.5.2013 klo 13.42

Niemi, E. 2003. Levyrakenteiden suunnittelu, Tekninen tiedotus 2/2003, Kerava: Teknologia teollisuus. 136 s. ISBN 951-817-813-5

Niemi, E., Kemppi, J. 1993. Hitsatun rakenteen suunnittelun perusteet, Helsinki: Painatuskeskus Oy. 337 s. ISBN 951-37-1115-3

Nichols, R. K. 1999. Common HF Welding Defects, East haven CT: Thermatool Corp. 11 s.

Pan, L., Athreya, B. P., Forck, J. A., Huang, W., Zhang, L., Hong, T., Li, W., Ulrich, W., Mach, J. C. 2012. Welding Residual Stress Impact on Fatigue Life of a Welded Structure. IIW-document. XIII-2420-12.

Pennala, E. 2002. Lujuusopin perusteet. 11. muuttumaton painos. Helsinki: Hakapaino Oy. 400 s. ISBN: 951-672-297-0

Radaj, D., Sonsino, C. M., Fricke, W. 2006. Fatigue assessment of welded joints by local approaches. Second edition. Woodhead Publishing Limited. 639 s. ISBN: 978-1-85573-948-2

Rao, S. S. 2004. Mechanical Vibrations. Fourth edition. Hoboken, Prentice Hall. 1084 s. ISBN: 978-0-130-489876-6

Ruukki. 2010. Uutta teräsrakentamiseen Ruukki double grade S420MH / S355J2H SHS [verkkodokumentti]. [Viitattu 24.6.2013]. Saatavilla http://www.ruukki.fi/~/media/Finland/Files/Terastuotteet/Putket%20ja%20profiilit%20esitteet/Ruukki-Uutta-ter%C3%A4srakentamiseen-Ruukki-double-grade-S420MH_S355J2H-SHS.pdf

Ruukki. 2012. Rakenneputket EN 1993 –käsikirja 2012. Keuruu: Otavan Kirjapaino Oy. 688 s. ISBN: 978-952-5010-51-0

Ruukki 2013. Ruukin lujia ja kulutusta kestäviä erikoisteräksiä nyt putkina ja rakenneputkina [lehdistötiedote]. [Viitattu 24.6.2013]. Saatavilla http://www.ruukki.fi/Uutiset-ja-tapahtumat/Uutisarkisto/2013/Ruukin-lujia-ja-kulutusta-kestavia-erikoisteraksia-nyt-putkina-ja-rakenneputkina

SFS-EN 1993-1-9. 1993 Eurocode 3: Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-9: Väsyminen. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS. 41 s.

Törmälehto, Arto. Rakenneputken hehkutus [yksityinen sähköpostiviesti]. Vastaanottajat: Markus Wilén. Lähetetty 16.4.2013 klo 13.46 (GMT +0200).

Valtanen, E.2009. Tekniikan taulukkokirja. Mikkeli: Genesis-Kirjat Oy. 1100 s. ISBN: 978-952-9867-34-9

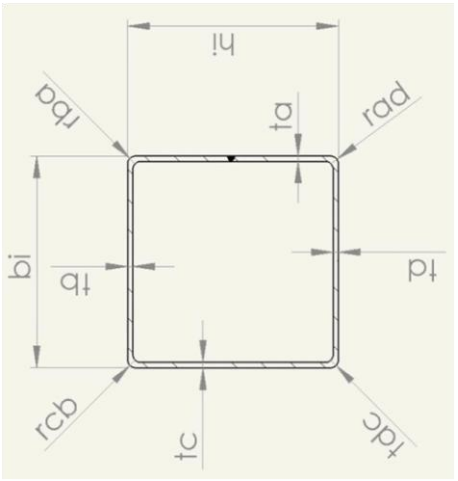
Weman, K. 2012. Welding processes handbook, Cornwall: Woodhead Publishing Limited. 270 s. ISBN 978-0-85709-510-7

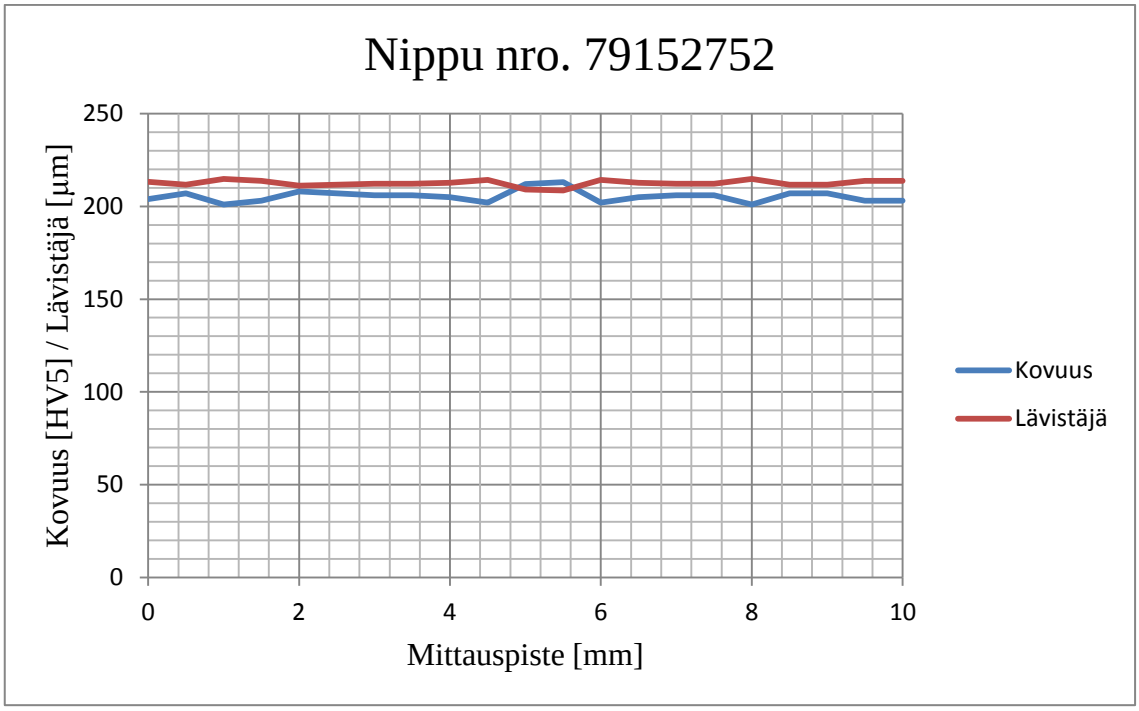
LIITE 1. Aineistotodistukset

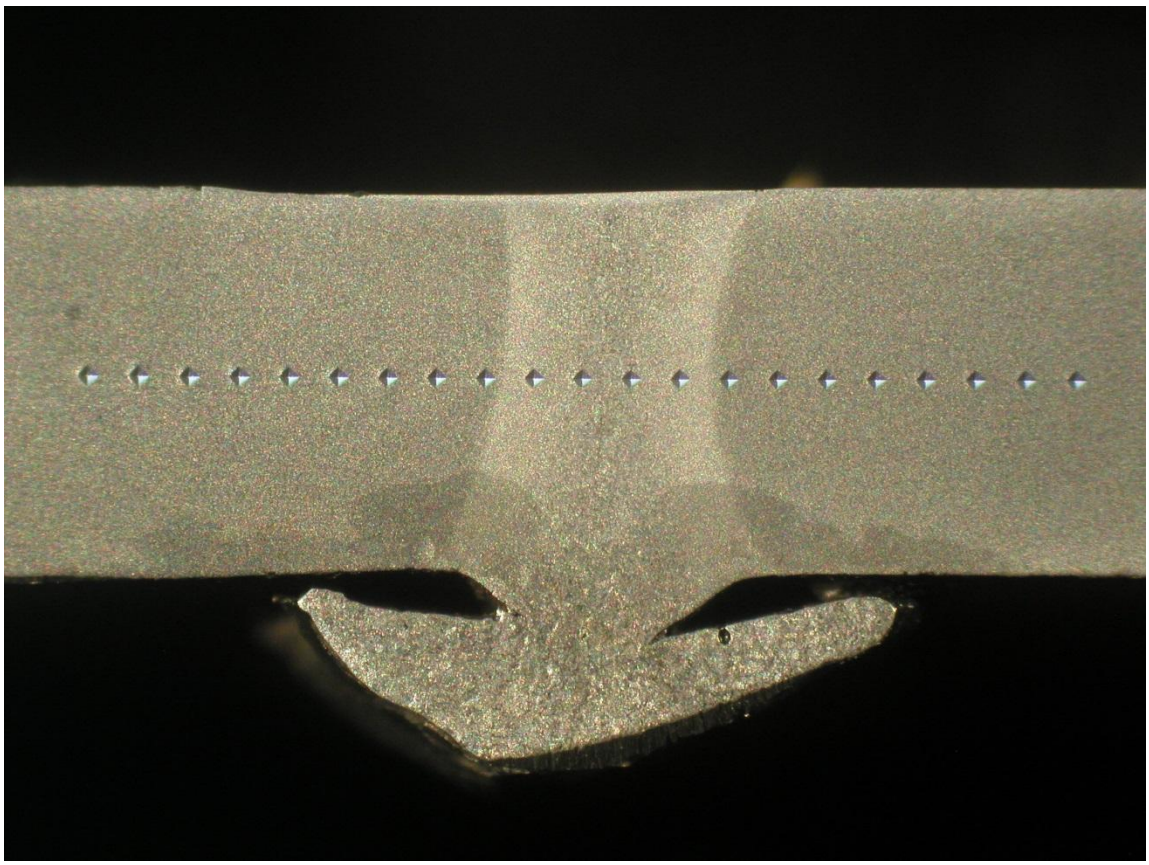
		Sulatusanalyysi %																	f_y	f_u	A5
Nippunro	Sulatusnro	CEV	C	Si	Mn	P	S	Al	Nb	V	Cu	Cr	N	Ti	Mo	No	B	MPa	MPa	%
79155897	55171	0,27	0,06	0,18	1,19	0,010	0,004	0,032	0,037	0,009	0,019	0,05	0,004	0,013	0,010	0,041	0,0003	486	567	26
79155899	55171	0,27	0,06	0,18	1,19	0,010	0,004	0,032	0,037	0,009	0,019	0,05	0,004	0,013	0,010	0,041	0,0003	486	567	26
79152752	47785	0,27	0,06	0,17	1,19	0,009	0,003	0,032	0,037	0,009	0,021	0,045	0,006	0,016	0,005	0,042	0,0001	472	559	29
79152754	47785	0,27	0,06	0,17	1,19	0,009	0,003	0,032	0,037	0,009	0,021	0,045	0,006	0,016	0,005	0,042	0,0001	472	559	29
19505437	68908	0,27	0,06	0,21	1,20	0,015	0,005	0,032	0,037	0,009	0,016	0,054	0,005	0,015	0,004	0,034	0,0003	481	568	28
79152749	56620	0,33	0,06	0,45	1,44	0,010	0,001	0,030	0,050	0,044	0,184	0,042	0,006	0,097	0,006	0,038	0,0005	768	861	14
79152747	56620	0,33	0,06	0,45	1,44	0,010	0,001	0,030	0,050	0,044	0,184	0,042	0,006	0,097	0,006	0,038	0,0005	768	861	14
1002799393	63459	0,33	0,05	0,438	1,44	0,007	0,002	0,028	0,053	0,045	0,195	0,055	0,005	0,098	0,010	0,046	0,0002	836	861	13

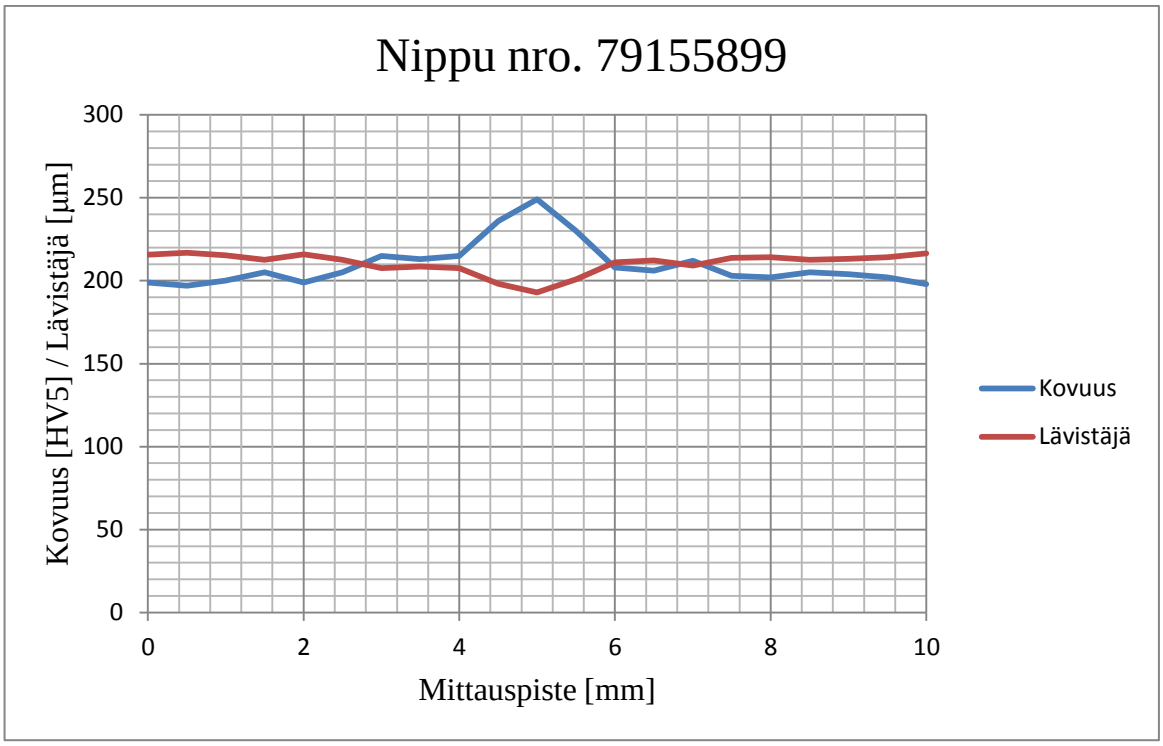
LIITE 2. Rakenneputkien mitat

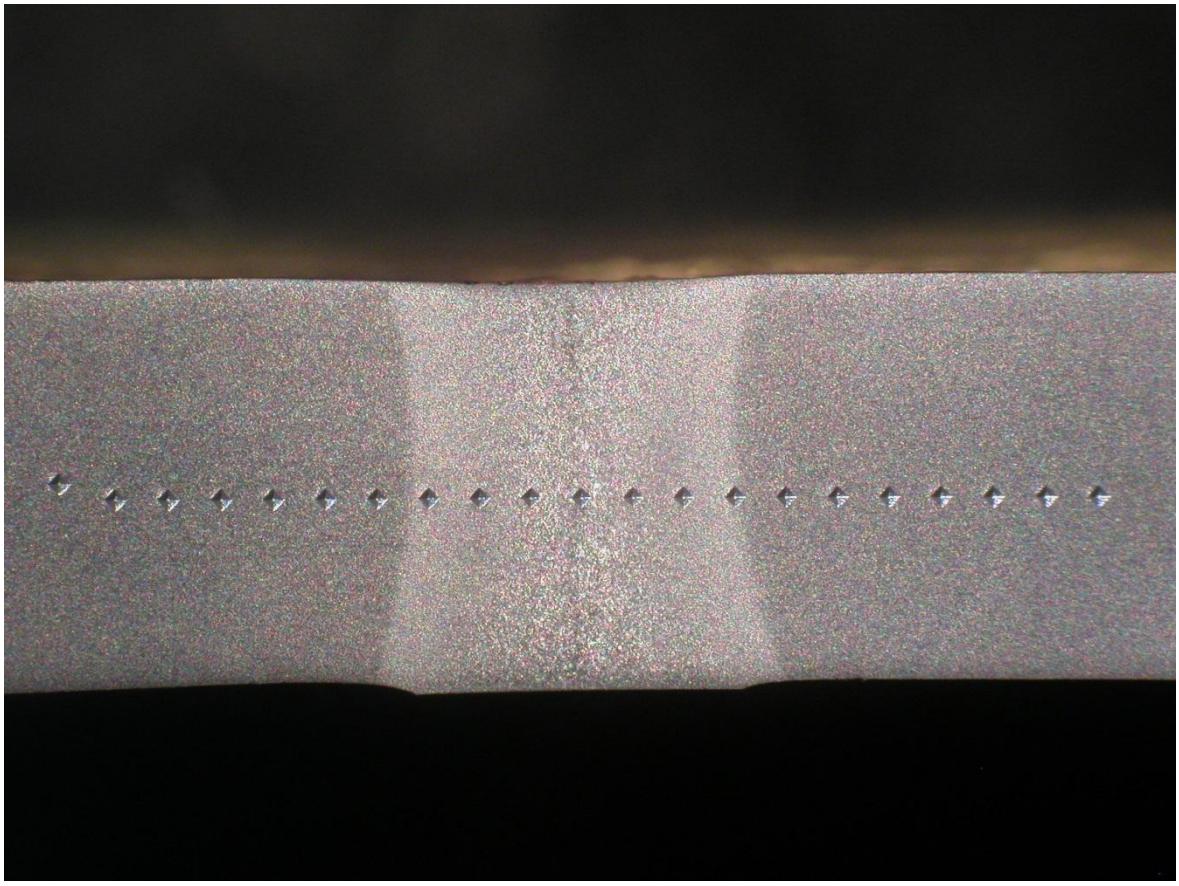
Testi ID	Nippu nro.	$b_i \times h_i \times t_i$	r_{ba}	r_{cb}	r_{dc}	r_{ad}	t_a	t_b	t_c	t_d
RR_HF2	79152749	160,3 x 160,0 x 4,05	9,17	8,33	8,33	7,48	4,03	4,06	4,09	4,00
RR_HF3	79152747	160,4 x 160,5 x4,00	8,72	8,21	9,49	8,69	3,95	3,97	4,05	4,03
RR_HF4	79152749	160,3 x 160,3 x 4,20	7,70	7,56	8,69	8,93	4,24	4,05	4,22	4,29
RR_HF5	79152747	160,1 x 160,0 x 4,06	9,90	9,90	11,83	9,66	4,07	4,07	4,12	3,99
RR_HF6	79155897	150,1 x 150,2 x 4,15	8,55	9,17	10,26	9,03	4,27	4,04	4,30	3,97
RR_HF7	79155899	150,4 x 150,6 x 4,10	8,69	8,69	10,26	9,66	4,04	4,12	4,23	4,00
RR_HF8	79155899	150,2 x 150,5 x 4,06	10,38	9,17	9,90	9,73	4,05	3,99	4,15	4,04
RR_HF9	79155897	160,1 x 160,0 x 4,05	10,02	10,09	11,83	12,07	4,20	3,97	4,00	4,04
RR_HF10	1002799393	120,6 x 120,7 x 3,96	9,97	8,28	8,33	7,97	3,98	3,95	3,96	3,93
RR_HF11	102799393	120,6 x 120,8 x 4,00	9,78	8,57	7,97	7,97	3,88	4,16	4,00	3,98
RR_HF12	79152752	150,7 x 150,1 x 4,00	10,68	10,02	9,54	9,90	4,01	3,99	4,02	4,00
RR_HF13	79152752	150,2 x 150,6 x 4,00	10,26	9,54	11,95	10,62	4,03	3,98	4,02	4,00
RR_HF14	79152754	150,2 x 150,8 x 4,03	8,93	9,05	9,90	10,21	4,06	4,00	4,07	3,99
RR_HF15	79415754	150,0 x 150,8 x 4,01	9,05	10,26	8,45	8,93	4,00	3,97	4,06	4,00
RR_HF16	19505437	149,8 x 150,0 x 4,00	9,05	7,36	10,62	9,42	4,02	3,99	4,00	3,99
RR_HF17	19505437	149,7 x 149,8 x 4,01	9,66	10,26	7,73	9,05	4,04	4,00	4,04	3,97

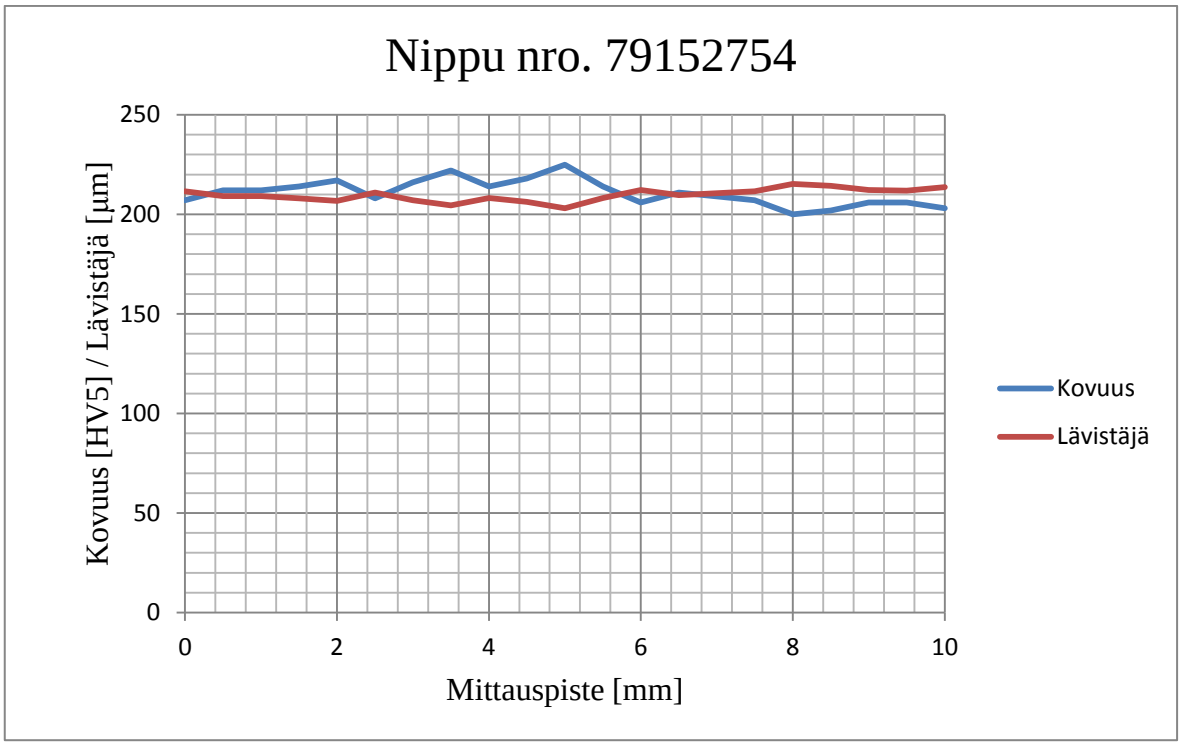


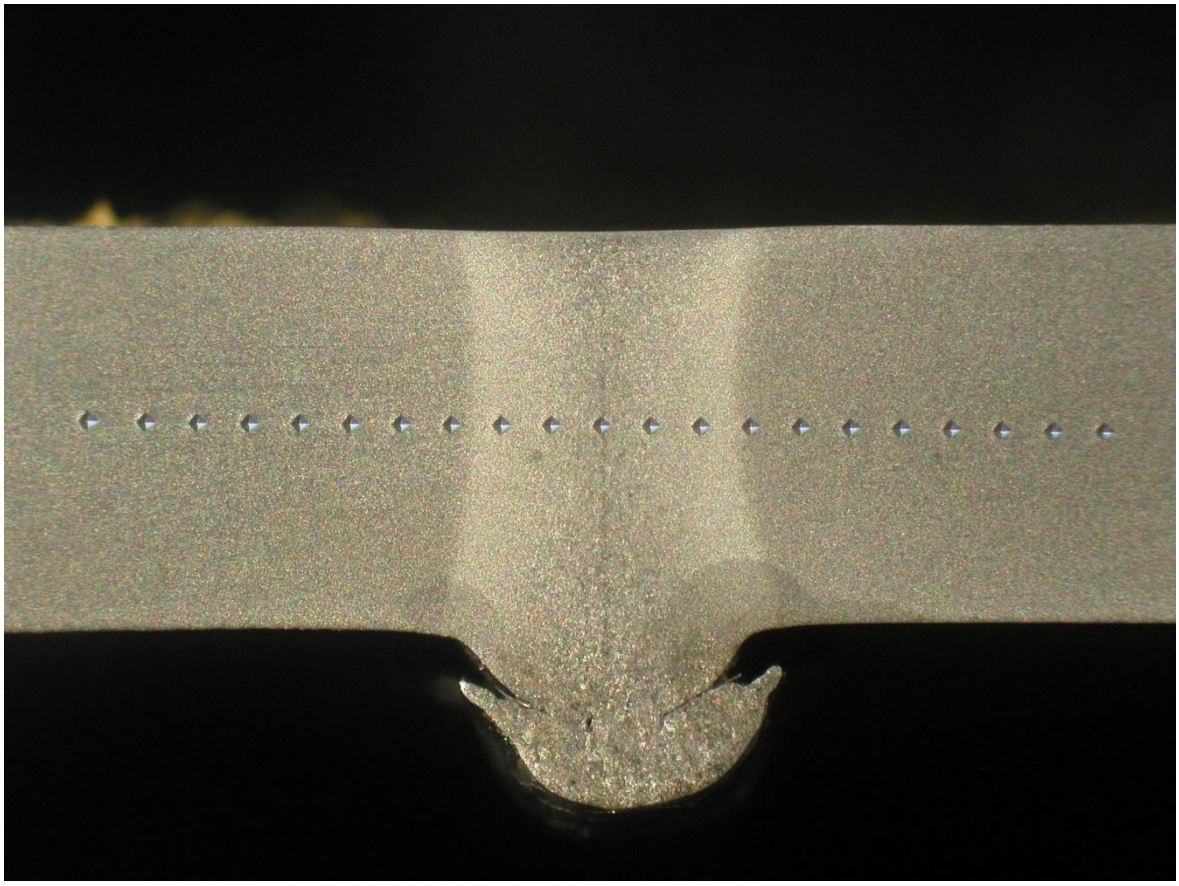

Nippu nro. 79152752
Kovuus [HV5] / Lävistäjä [µm]
250
200
150
100
50
0
0
2
4
6
8
10
Mittauspiste [mm]
Kovuus
Lävistäjä

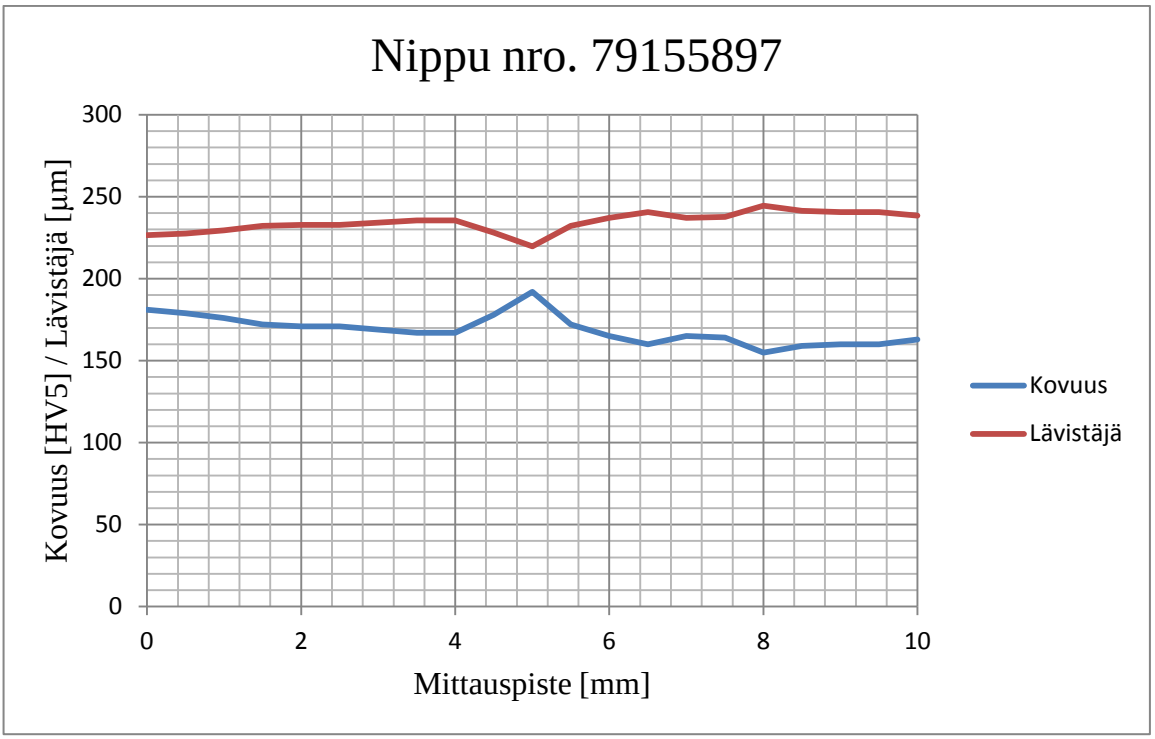


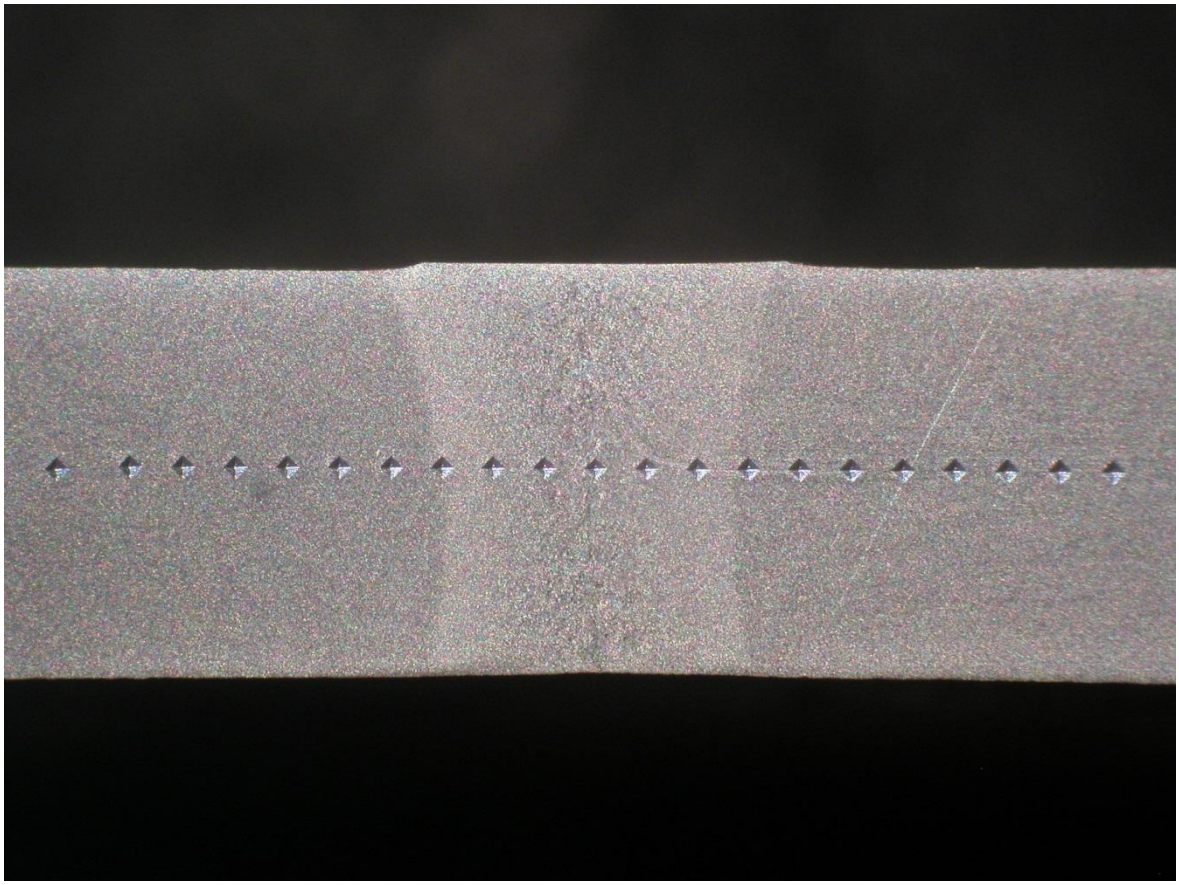

Nippu nro. 79155899
Kovuus [HV5] / Lävistäjä [µm]
300
250
200
150
100
50
0
0
2
4
6
8
10
Mittauspiste [mm]
Kovuus
Lävistäjä

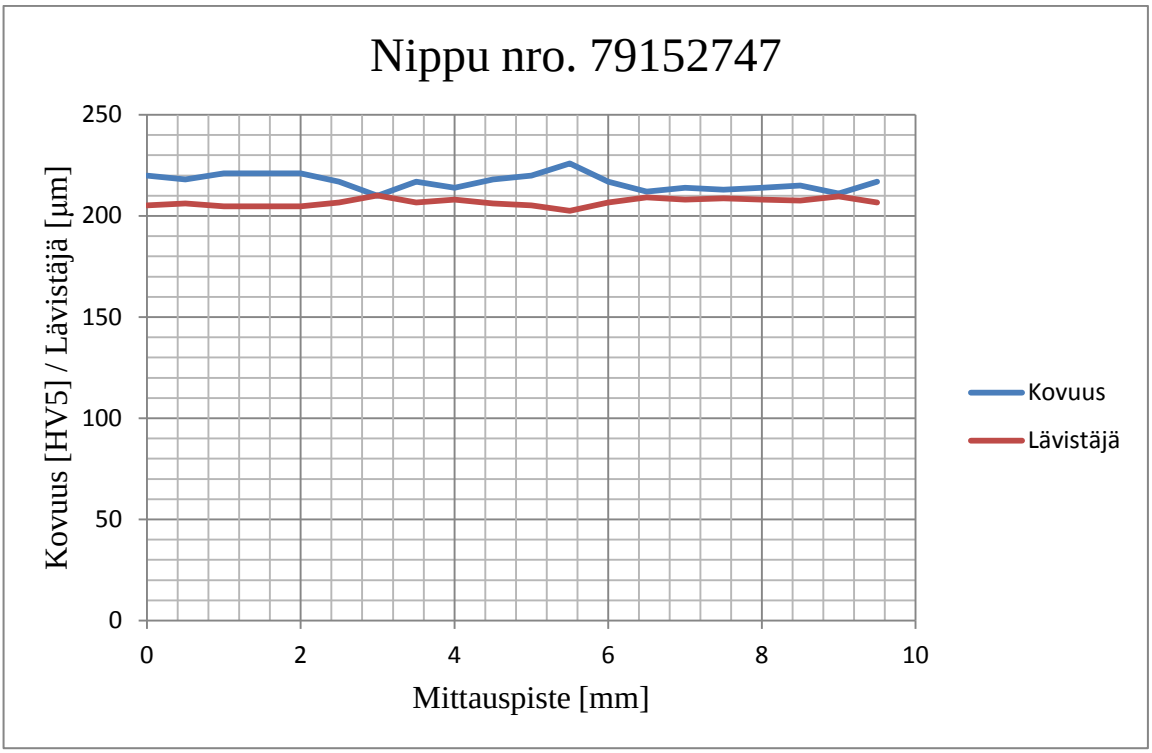


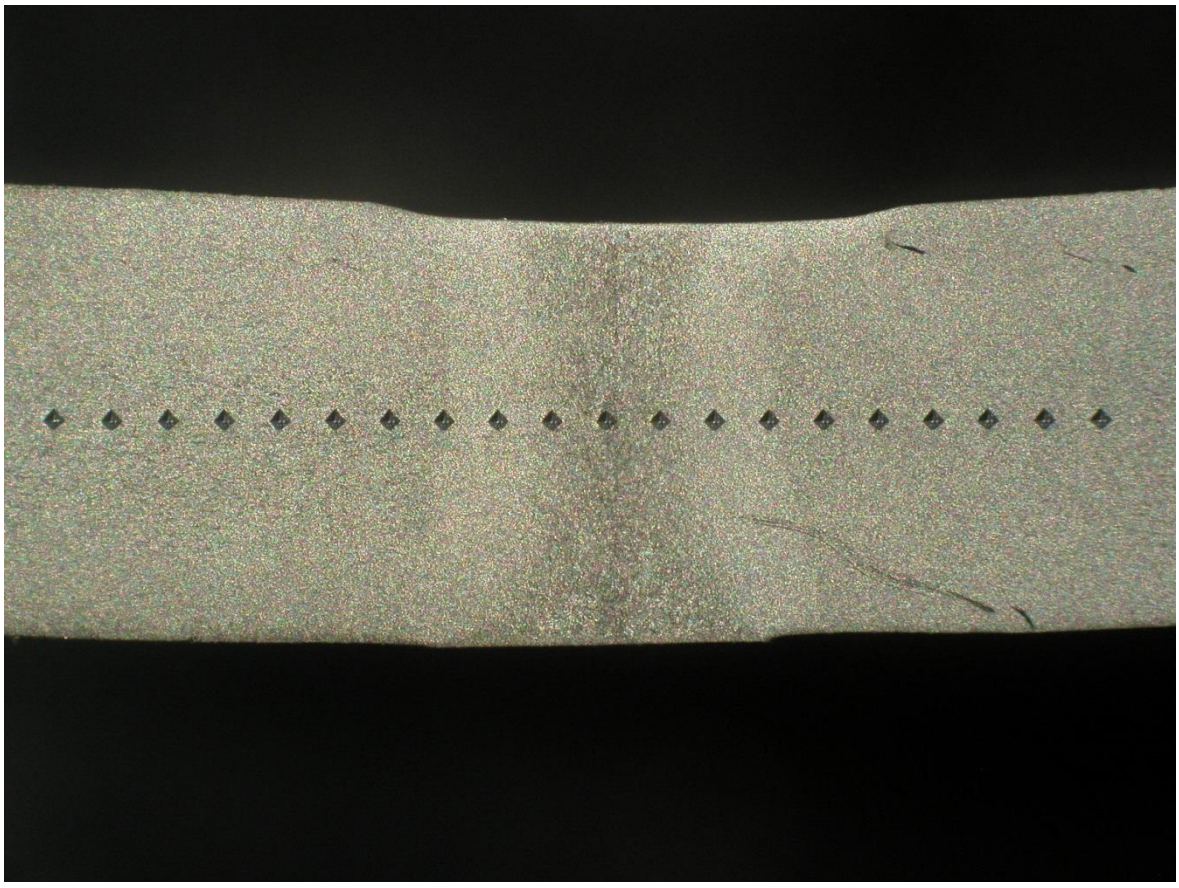

Nippu nro. 79152754
Kovuus [HV5] / Lävistäjä [µm]
250
200
150
100
50
0
0
2
4
6
8
10
Mittauspiste [mm]
Kovuus
Lävistäjä

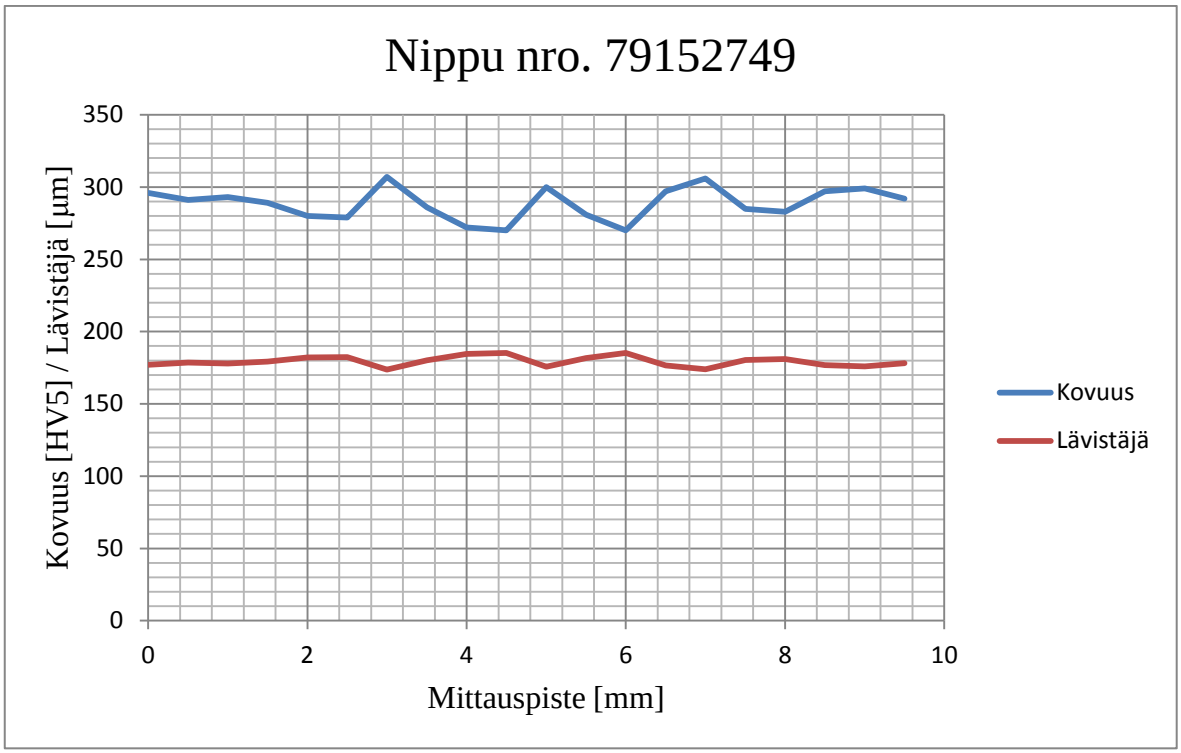


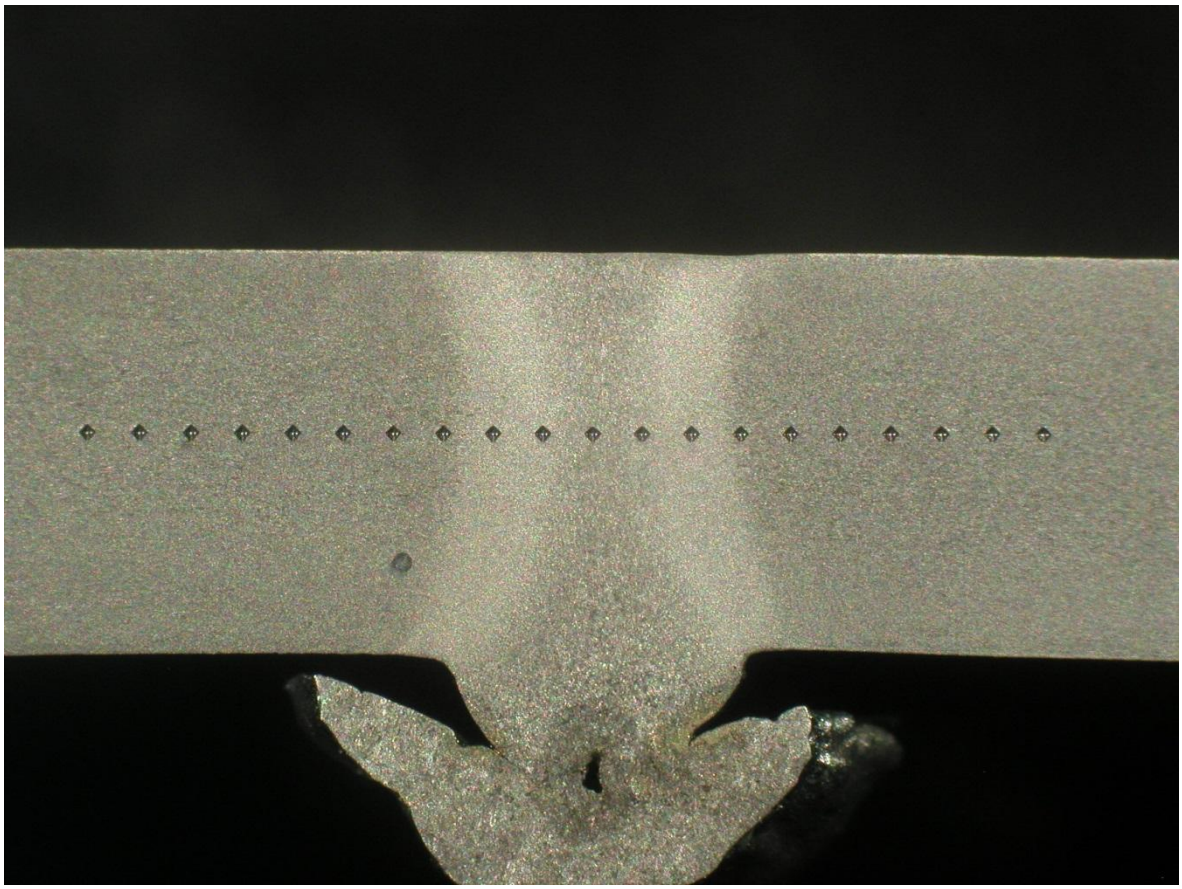

Nippu nro. 79155897
Kovuus [HV5] / Lävistäjä [µm]
300
250
200
150
100
50
0
0
2
4
6
8
10
Mittauspiste [mm]
Kovuus
Lävistäjä

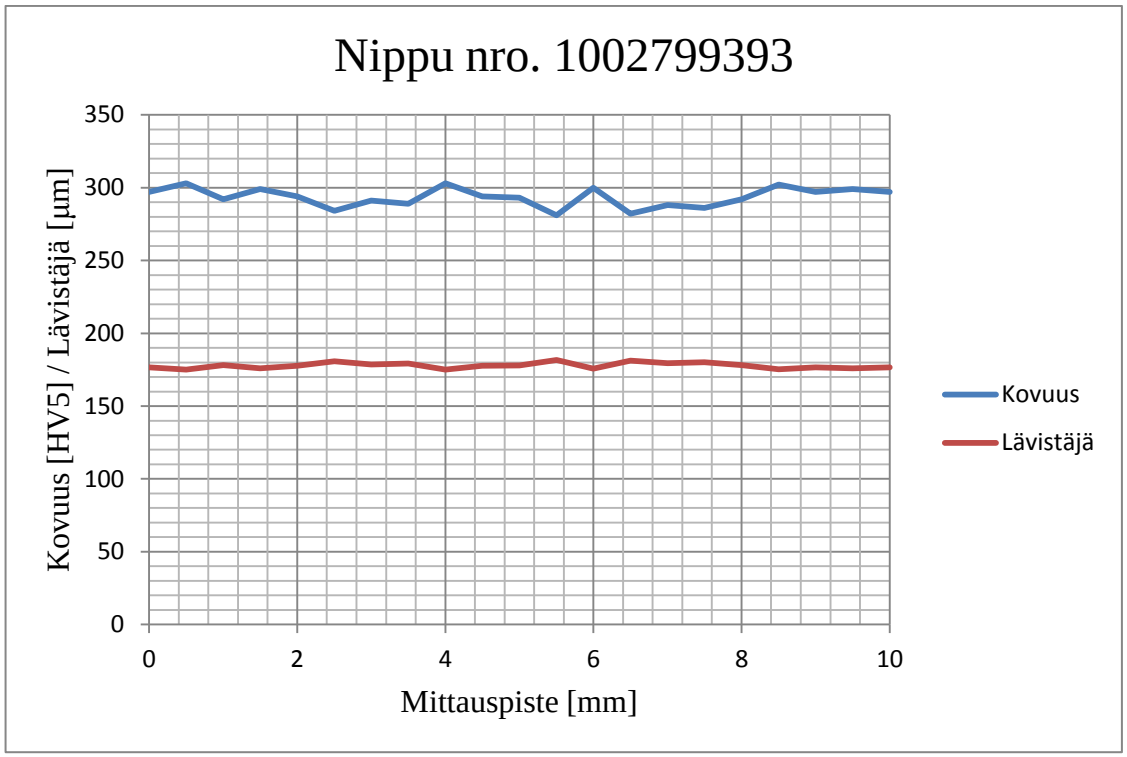


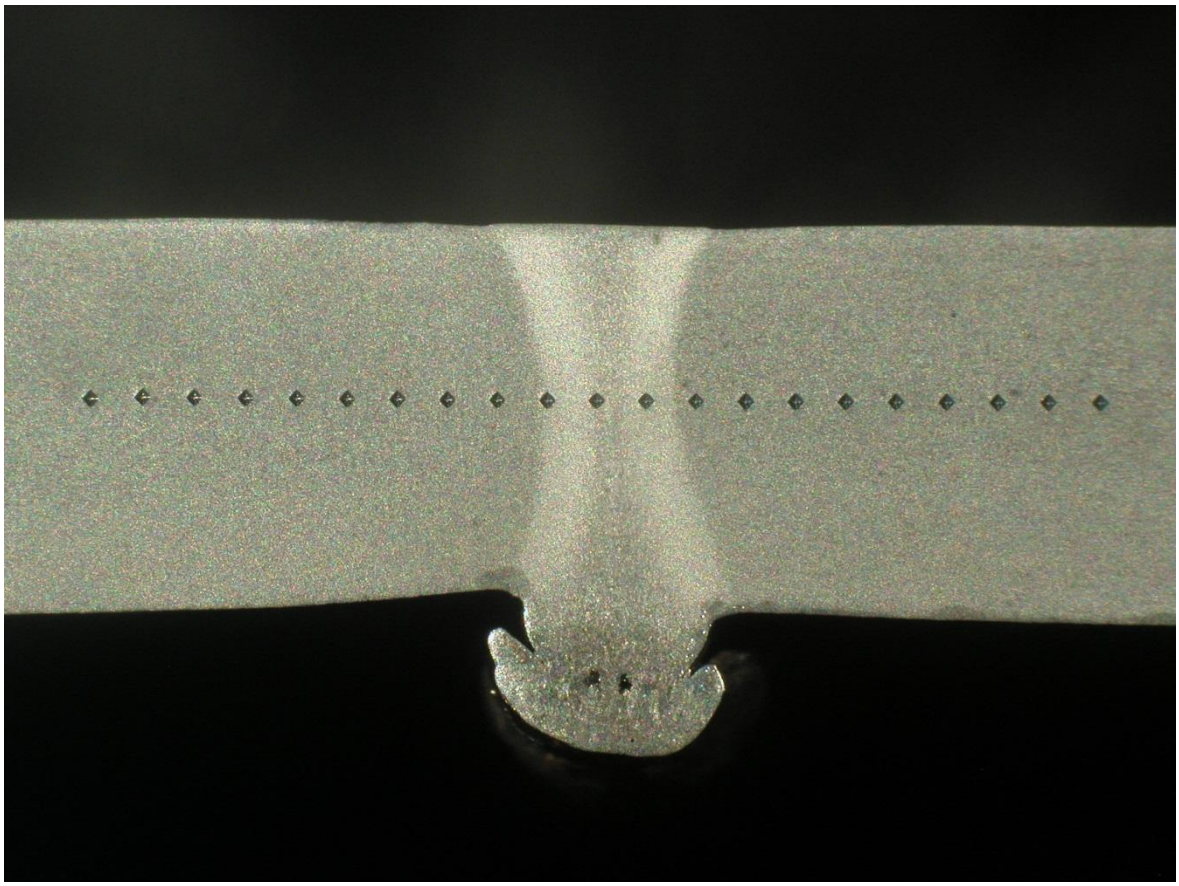

Nippu nro. 79152747
Kovuus [HV5] / Lävistäjä [µm]
250
200
150
100
50
0
0
2
4
6
8
10
Mittauspiste [mm]
Kovuus
Lävistäjä

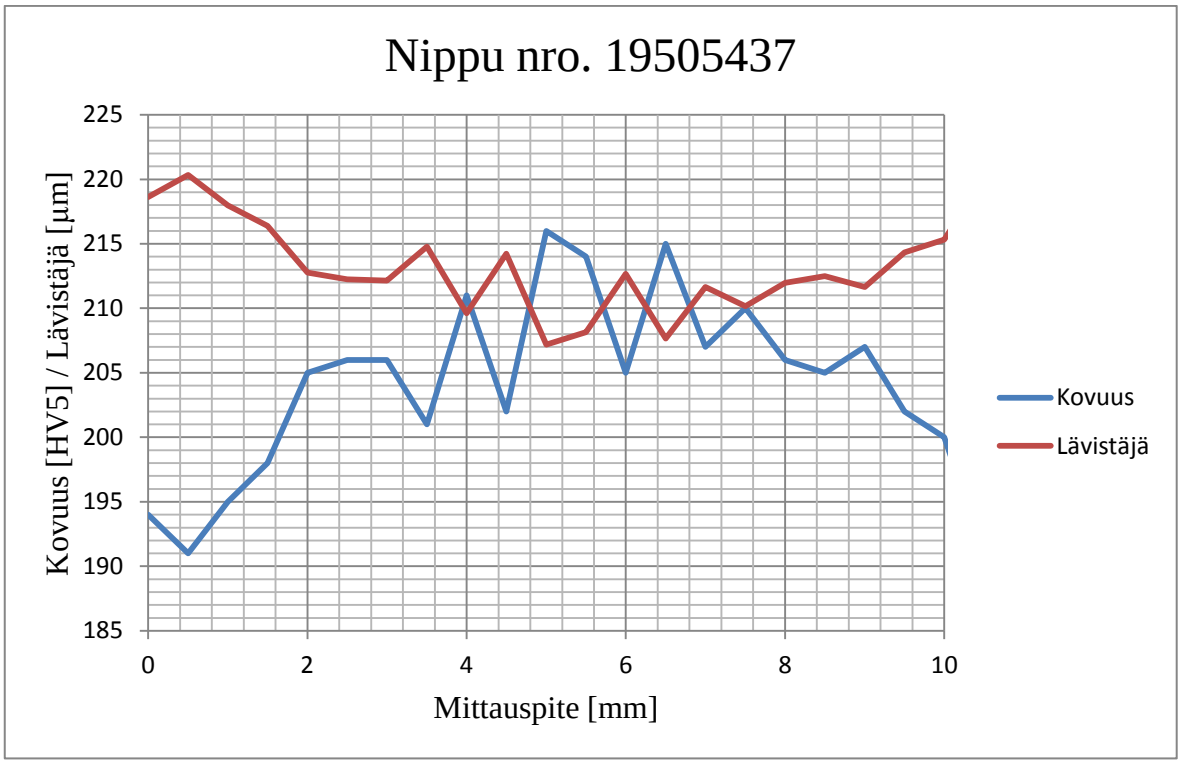


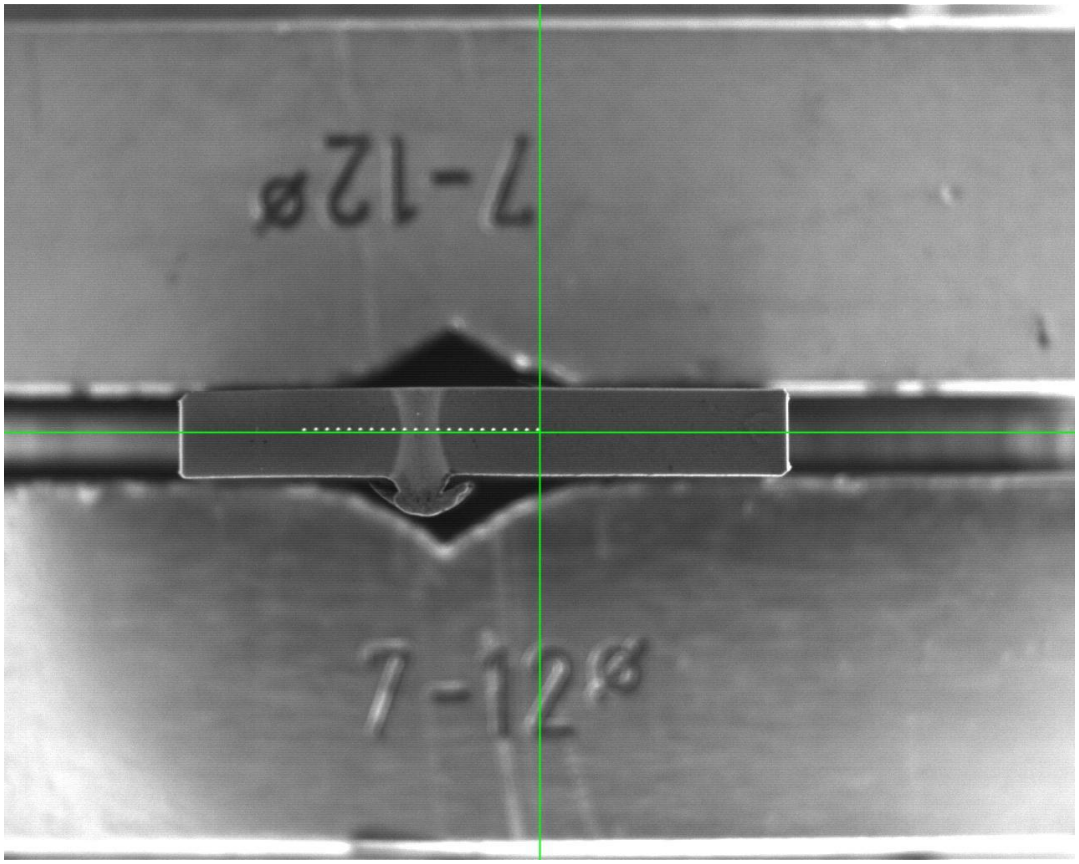

Nippu nro. 79152749
Kovuus [HV5] / Lävistäjä [µm]
350
300
250
200
150
100
50
0
0
2
4
6
8
10
Mittauspiste [mm]
Kovuus
Lävistäjä




Nippu nro. 1002799393
Kovuus [HV5] / Lävistäjä [µm]
350
300
250
200
150
100
50
0
0
2
4
6
8
10
Mittauspiste [mm]
Kovuus
Lävistäjä

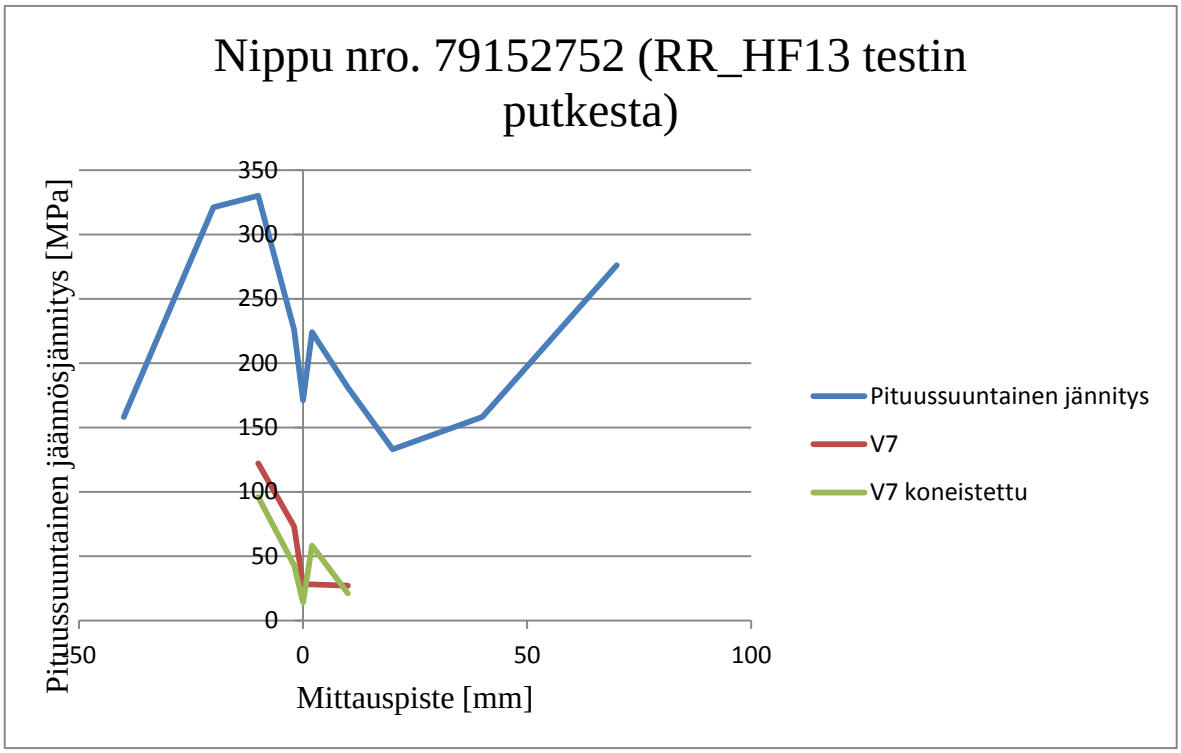


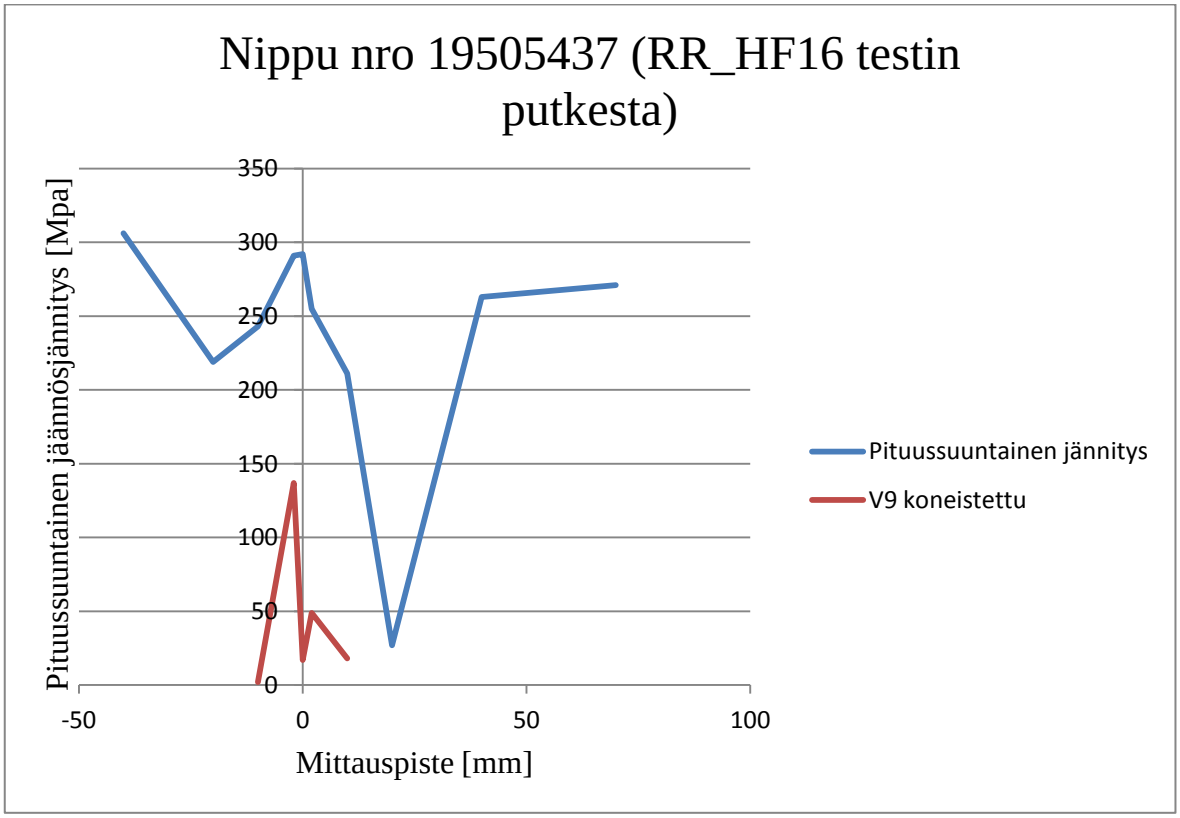

Nippu nro. 19505437
Kovuus [HV5] / Lävistäjä [µm]
225
220
215
210
205
200
195
190
185
0
2
4
6
8
10
Mittauspite [mm]
Kovuus
Lävistäjä

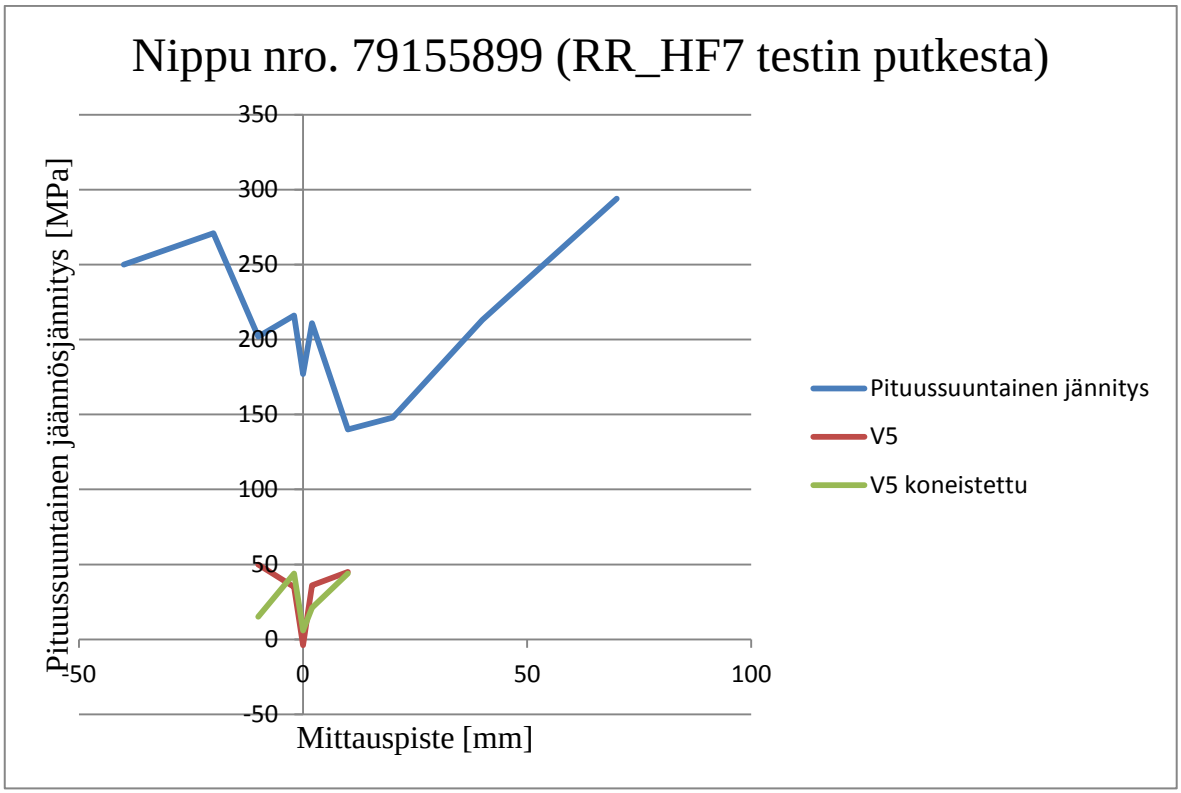

ø21-7
7-12ø

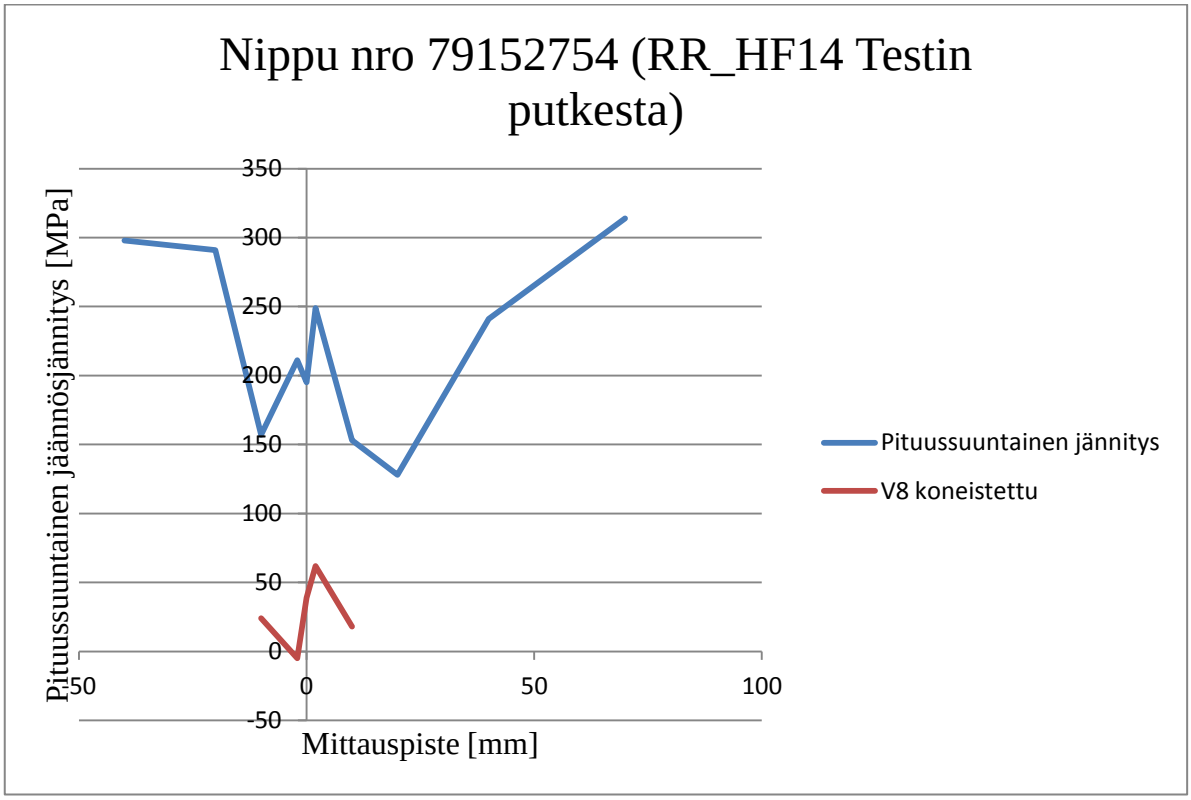
LIITE 4. Vetokokeet

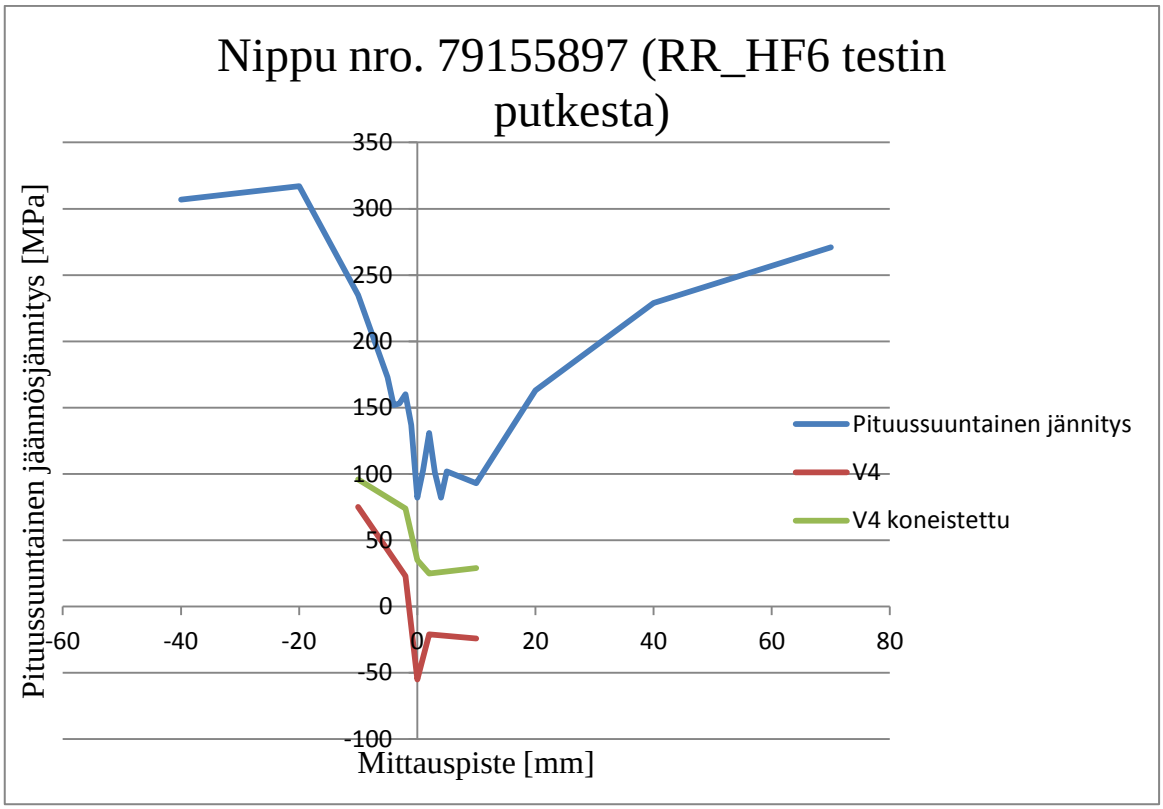
Näyte	**L_c**	**A_{avg}**	**t_{avg}**	**w_{avg}**	**ReH**	**ReL**	**Rp0,2**	**Rm**	**A%**	**A80**	**Agt**	**Ag**	**E**	**°**	**N**
ID	mm	mm^2	mm	mm	MPa	MPa	MPa	MPa	%	%	%	%	MPa	deg	
HF1	90	43,37	3,84	12,09	0	0	650	717	17,4	11,2	6,2	5,8	178441	0	0,06
HF3	90	48,60	3,99	12,18	0	0	876	958	9,3	4,9	1,0	0,7	548543	0	****
HF4	90	49,05	4,06	12,09	0	0	447	531	23,7	15	10,2	9,9	202369	0	0,082
HF5	90	49,97	4,21	11,86	0	0	594	651	13,9	7,6	3,3	2,9	188507	0	****
HF6	90	47,49	4,03	11,78	0	0	804	914	10,3	5,5	2,3	1,9	525710	0	****
HF7	90	47,66	3,93	12,12	0	0	626	690	12,6	7,3	2,4	2,2	276948	0	****
HF8	90	47,01	4,05	11,61	0	0	606	670	14,2	8,3	3,5	3,2	221212	0	****
HF9	90	46,07	3,99	11,54	0	0	602	677	15,7	8,9	2,8	2,5	218409	0	****

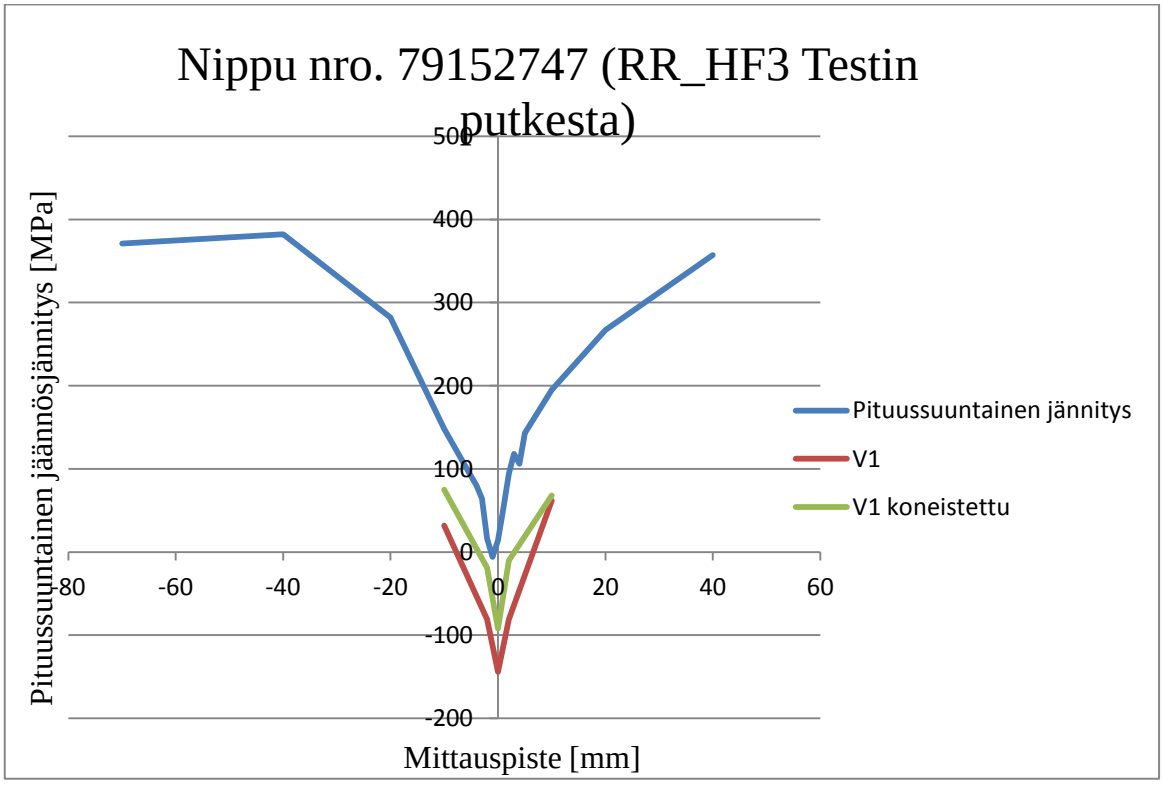

Nippu nro. 79152752 (RR_HF13 testin putkesta)
Pituussuuntainen jäännösjännitys [MPa]
350
300
250
200
150
100
50
0
-50
0
50
100
Mittauspiste [mm]
Pituussuuntainen jännitys
V7
V7 koneistettu

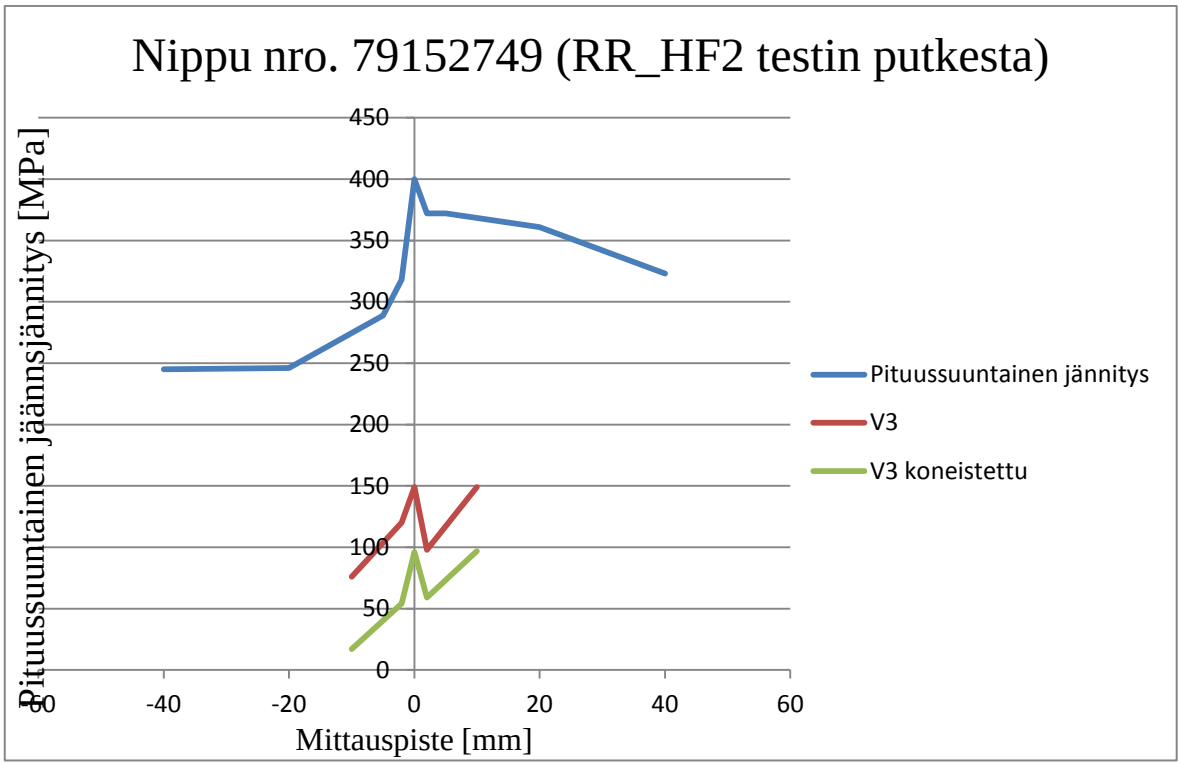

Nippu nro 19505437 (RR_HF16 testin putkesta)
Pituussuuntainen jäännösjännitys [Mpa]
350
300
250
200
150
100
50
0
-50
0
50
100
Mittauspiste [mm]
Pituussuuntainen jännitys
V9 koneistettu

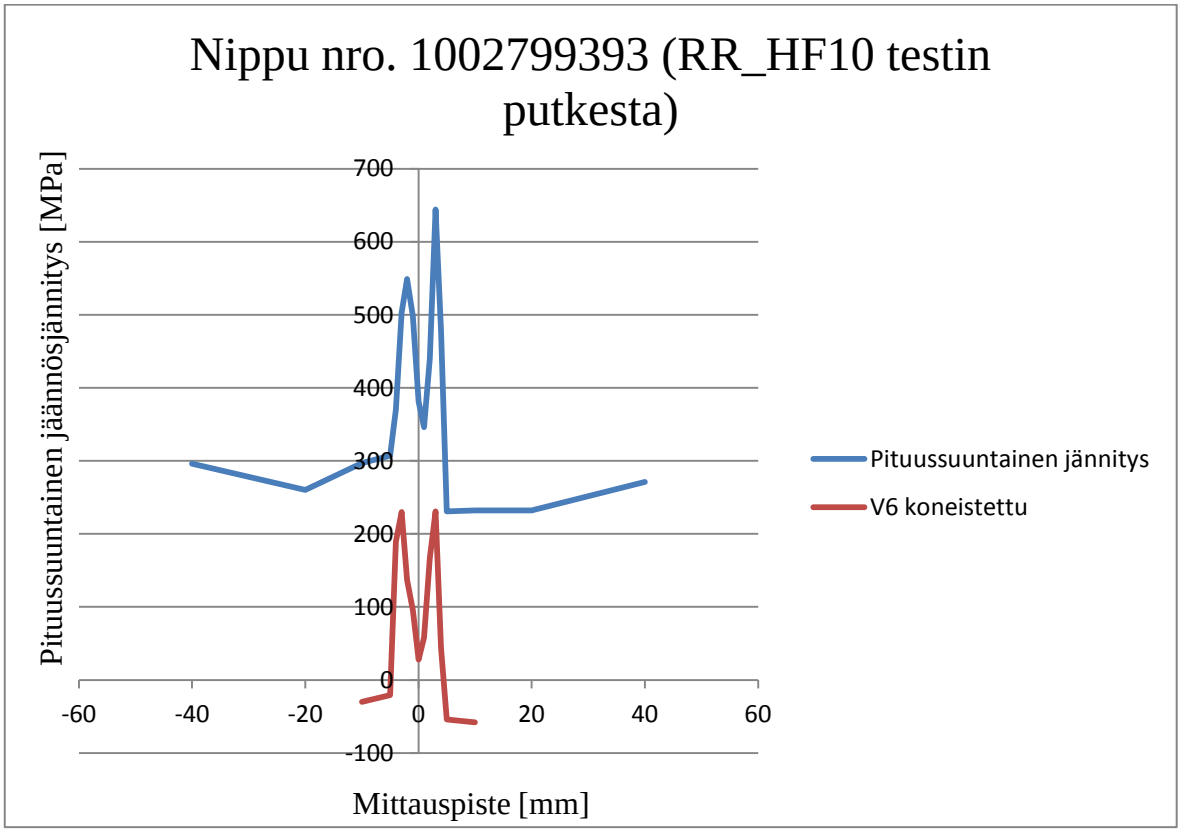

Nippu nro. 79155899 (RR_HF7 testin putkesta)
Pituussuuntainen jäännösjännitys [MPa]
350
300
250
200
150
100
50
0
-50
-50
0
50
100
Mittauspiste [mm]
Pituussuuntainen jännitys
V5
V5 koneistettu


Nippu nro 79152754 (RR_HF14 Testin putkesta)
Pituussuuntainen jäännösjännitys [MPa]
350
300
250
200
150
100
50
0
-50
-50
0
50
100
Mittauspiste [mm]
Pituussuuntainen jännitys
V8 koneistettu

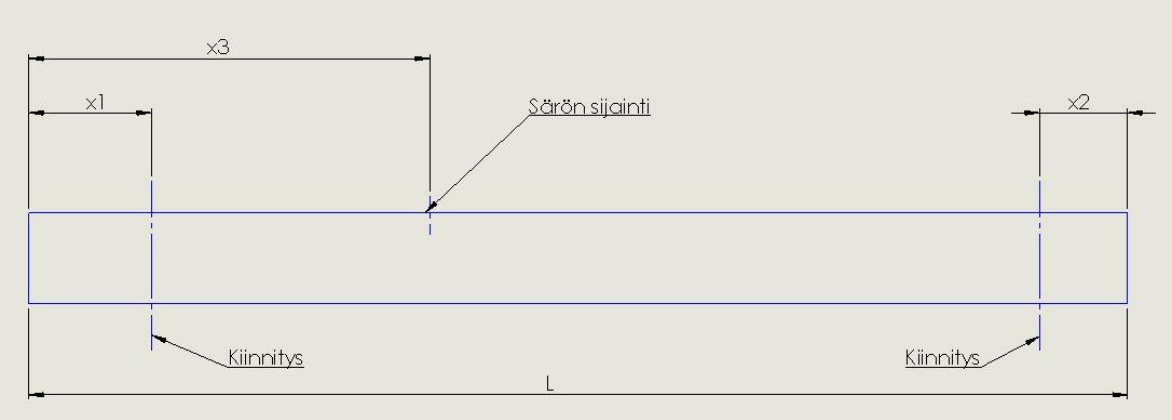

Nippu nro. 79155897 (RR_HF6 testin putkesta)
Pituussuuntainen jäännösjännitys [MPa]
350
300
250
200
150
100
50
0
-50
-100
-60
-40
-20
0
20
40
60
80
Mittauspiste [mm]
Pituussuuntainen jännitys
V4
V4 koneistettu

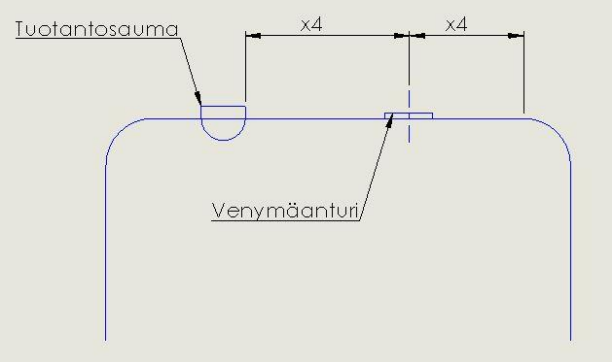

Nippu nro. 79152747 (RR_HF3 Testin putkesta)
Pituussuuntainen jäännösjännitys [MPa]
500
400
300
200
100
0
-100
-200
-80
-60
-40
-20
0
20
40
60
Mittauspiste [mm]
Pituussuuntainen jännitys
V1
V1 koneistettu


Nippu nro. 79152749 (RR_HF2 testin putkesta)
Pituussuuntainen jäännsjännitys [MPa]
450
400
350
300
250
200
150
100
50
0
-60
-40
-20
0
20
40
60
Mittauspiste [mm]
Pituussuuntainen jännitys
V3
V3 koneistettu


Nippu nro. 1002799393 (RR_HF10 testin putkesta)
Pituussuuntainen jäännösjännitys [MPa]
700
600
500
400
300
200
100
0
-100
-60
-40
-20
0
20
40
60
Mittauspiste [mm]
Pituussuuntainen jännitys
V6 koneistettu

LIITE 6. Värähtelykokeiden yhteenveto





Koe ID	l [mm]	x_1 [mm]	x_2 [mm]	x_3 [mm]	särön pituus [mm]	x_4 [mm]
RR_HF2	4500	870	1040	2333	72	59
RR_HF3	4500	870	1040	1962	125	45,7
RR_HF4	5000	995	1085	2170	95	55
RR_HF5	4500	870	1035	2630	50	35
RR_HF6	5000	1040	1130	2240	208	43
RR_HF7	5000	1020	1100	2436	61	41
RR_HF8	5000	1020	1130	2478	126	40,5
RR_HF9	5000	1020	1130	2502	134	41,5
RR_HF10	4500	870	1040	2597	44	25,2
RR_HF11	4500	870	1040	2090	20	25
RR_HF12	5000	1020	1130	2230	68	45
RR_HF13	5000	1020	1120	2652	61	45
RR_HF14	5000	1020	1120	2188	127	40
RR_HF15	5000	1020	1135	2560	29	40
RR_HF16	5000	1020	1135	2354	112	43
RR_HF17	5000	1025	1145	3135	140	43

Testi	Syklit, N	$\Delta\sigma_{ekv}$	$FAT_{50\%}$	$FAT_{95\%}$	$FAT_{50\%}$ EC3	$FAT_{50\%}$ IIW 1	$FAT_{50\%}$ IIW 2	$\Delta\sigma_{ekv}$ särön alue	$FAT_{50\%}$ säröt	$FAT_{95\%}$ säröt
RR_HF2	859 709	425	358	260	286	223	275	423	358	261
RR_HF3	1 153 732	417	373	271	298	233	286	402	373	272
RR_HF4	575 509	441	344	250	275	215	264	424	343	250
RR_HF5	487 908	434	327	238	261	204	251	407	327	238
RR_HF10	394 891	436	315	229	-	-	-	414	315	229
RR_HF11	247 992	438	288	209	-	-	-	433	288	210

Testi	Syklit, N	$\Delta\sigma_{ekv}$	$FAT_{50\%}$	$FAT_{95\%}$	$\Delta\sigma_{ekv\ särön\ alue}$	$FAT_{50\%\ särö}$	$FAT_{95\%\ särö}$	Vaurio
RR_HF6	411 624	421	306	222	411	306	223	alalaippa
RR_HF7	495 018	409	309	225	408	309	225	ylälaippa
RR_HF8	522 695	437	334	243	436	334	243	alalaippa
RR_HF9	416 946	424	310	225	423	309	225	alalaippa
RR_HF12	218 141	414	265	193	403	265	193	alalaippa
RR_HF13	326 738	414	288	209	410	288	209	nurkka A-B
RR_HF14	377 448	417	298	217	403	298	217	alalaippa
RR_HF15	461 225	424	316	230	423	316	230	nurkka C-B
RR_HF16	461 530	426	317	231	422	317	231	nurkka B-C
RR_HF17	635 335	421	334	243	365	334	243	nurkka C-D

Testi	Syklit, N	$\Delta\sigma_{ekv}$	$FAT_{50\%}$	$FAT_{95\%}$	Vaurio
V1	228 042	402	260	189	ala pyöristys
V3	177 782	418	257	187	ylä pyöristys
V4	208 157	395	251	183	ylä pyöristys
V5	447 763	343	254	185	ylä pyöristys
V6	192 535	423	264	192	ylä pyöristys
V7	129 953	342	197	143	ylä pyöristys
V8	699 112	349	282	205	n. sauvan keskellä
V9	1 049 274	349	306	223	ylä pyöristys