

KARELIA-AMMATTIKORKEAKOULU  
Kone- ja tuotantotekniikka

Paavo Turunen  
PUUTAVARAKOURAN HITSISAUMAN VÄSYMISLUJUUDEN  
TARKASTELU

Opinnäytetyö  
Kesäkuu 2017



**OPINNÄYTETYÖ**  
**Kesäkuu 2017**  
**Kone- ja tuotantotekniikan**  
**koulutusohjelma**

Karjalankatu 3  
FI 80200 JOENSUU  
p. (013) 260 6800 p. (013) 260 6906

Tekijä  
Paavo Turunen

Nimeke  
Puutavarakouran hitsisauman väsymislujuuden tarkastelu

Toimeksiantaja  
Outokummun Metalli Oy

Tiivistelmä

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena tarkastella Outokummun Metalli Oy:n Vahva C36 puutavarakouran hitsisauman väsymislujutta ja vertailla eri hitsaustapojen vaikutusta hitsisauman väsymislujuteen.

Työ koostuu puutavarakourasta tehdystä 3D-mallilla tehtyjen FEM-simulaatioiden tuloksien tarkastelusta, väsytyksen tehdyistä väsytyksokeista, venymäliuskamittauksesta ja venymäliuskamittauksen ja FEM-simulaatioiden tuloksien vertailusta väsytyksen testauksen ja simulaatioiden yhteneväisyyden todistamiseksi. Työssä painottui rakenteen murtavan kriittisen kuorman etsiminen simulaatioiden avulla sekä väsytyksen tehtävät testit.

Tuloksissa näkyy simulaation vastaavan todellisuutta, mutta myös simulaatioiden vajavaisuus kaikkien yksityiskohtien huomioon ottamisen suhteen. Hitsien käyttäytyminen väsytyksessä on johdonmukaista, mutta ei välttämättä vastaa täysin todellista käytössä syntyvää rasiitusta.

Kieli  
suomi

Sivuja 41  
Liitteet 10  
Liitesivumäärä 10

Asiasanat  
hitsaus, hitsi, väsyminen,



**THESIS**  
**June 2017**  
**Degree Programme in Mechanical and  
Production Engineering**  
Karjalankatu 3  
80220 JOENSUU  
FINLAND  
p. (013) 260 6800 p. (013) 260 6906

Author  
Paavo Turunen

Title  
Fatigue Analysis for a Weld of a Log Grapple

Commissioned by  
Outokummun Metalli Oy

Abstract

The subject of the thesis was to analyze the fatigue resistance of a weld of a VAHVA C36 log grapple manufactured by Outokummun Metalli Oy and to compare the fatigue resistance of different weld designs.

The thesis consists of modelling the weld on to a 3D model of the grapple, using FEM analysis to identify the critical strain that causes the grapple to break, fatigue tests of the grapple, strain gauge measurement and the comparison of the strain gauge data and the FEM analysis to confirm the simulations accuracy. The focus of the thesis is on finding the critical fatigue strain that breaks the grapple and the actual fatigue tests.

The results show similarities between the simulation and real-life behavior. The difficulty to simulate a real-life situation and the differences caused by this can be seen in the results as well. The welded components behave as expected in the fatigue tests, but the tests themselves do not necessarily portray a real-life situation in its full complexity.

Language

Finnish

Pages 41

Appendices 10

Pages of Appendices 10

Keywords

welding, weld, fatigue

# Sisältö

Tiivistelmä

Abstract

1	Johdanto .....	5
1.1	Outokummun Metalli Oy .....	5
1.2	Opinnäytetyö ja sen tavoitteet.....	5
2	Hitsaaminen .....	6
2.1	Hitsaus.....	6
2.2	Hitsisaumojen väsyminen .....	8
2.2.1	Hitsin murtuminen väsytyksessä.....	8
2.2.2	Hitsien vaikutus rakenteeseen .....	10
2.2.3	Hitsisauman väsymislujuuden parantaminen.....	16
2.3	Rakenteen jännityksien tarkastelu hitsin synnyttämässä epäjatkuvuuskohdissa .....	22
2.3.1	Nimellinen jännitys.....	22
2.3.2	Hot spot -jännitys .....	24
2.3.3	Lovikohdan huippujännitys .....	26
2.4	Hitsin FEM-mallinnus tehollinen lovivaikutus menetelmällä .....	27
3	Puutavarakouran hitsisauman väsymislujuuden tarkastelu.....	28
3.1	Hitsisauman mallinnus ja FEM analyysi.....	28
3.2	Väsytestaus.....	29
4	Pohdinta.....	39
	Lähdeluettelo .....	41
	Liitteet	

# 1 Johdanto

## 1.1 Outokummun Metalli Oy

Outokummun Metalli on 1980 perustettu 76 henkilöä työllistävä metsänkorjuulaitteiden valmistaja. Outokummun Metalli valmistaa John Deere ja Waratah -tuotemerkeillä myytäviä harvesteripäiden runkoja ja niiden varaosia. Harvesteripäiden lisäksi Outokummun Metalli Oy valmistaa VAHVA-tuotteita, Vahva-kahmarit (rotaattorimallit) sopivat mm. pyöreän puun, hakkuutähteiden ja kantojen sekä kierätysteollisuuden materiaalien käsittelyyn. VAHVA-kahmareita myy Koneosapalvelu. Outokummun Metallin Pohjois-Karjalassa Outokummussa sijaitsevassa tehtaassa harvesteripäiden rungot tehdään valmiiksi hitsauksen, koneistuksen, maalauksen ja kokoonpanon osalta. [1,2]

## 1.2 Opinnäytetyö ja sen tavoitteet



Kuvio 1. Vahva C36 puutavarakahmari. [3]

Tarkasteltavana oli Outokummun Metallin kuviossa 1 näkyvä Vahva C36 puuta-varakahmari. Tasakärkisillä kahmareilla nostetaan pinottua ainespuuta kuljetusauton kyytiin. Kahmari toimii yhdellä sylinterillä, joka liikuttaa molempia leukoja, kahdella erikoislujasta teräksestä valmistetulla reaktiotangolla varmistetaan tasainen ja symmetrinen liike. Rungon symmetrinen kehämäinen rakenne ja taivutetut erikoislujasta teräksestä valmistetut leuat tekevät kahmarista erittäin kestävä. [3]

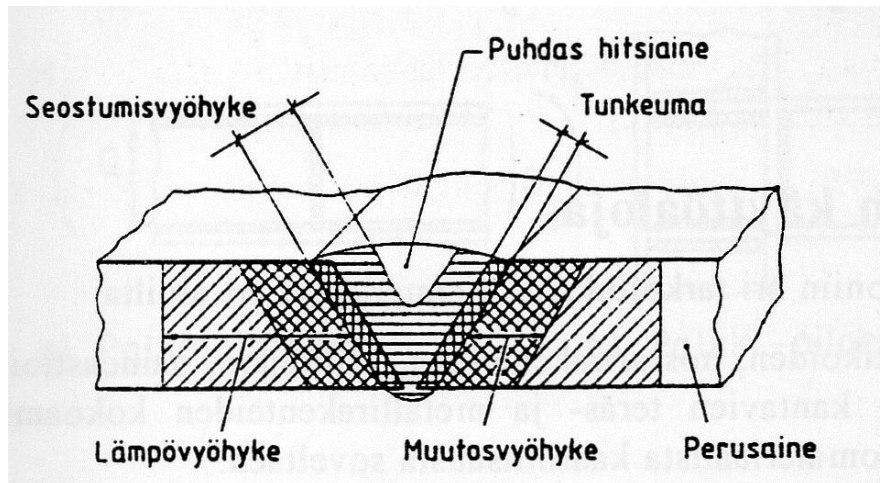
Työn tavoitteena oli tunnistaa kahmarin päätylevyn päätyhitsin rikkova kriittinen jännitys ja testata eri hitsaustapoja väsymiskestävyyden parantamiseksi. Työ koostuu hitsisauman 3D-mallinnuksesta Outokummun Metallilta saatuun kahmarin 3D-malliin, FEM – analyysistä sekä väsytystesteistä. Ensimmäinen väsytystesti venymäliuskoitettiin simulaation ja testien yhteneväisyyden todistamiseksi.

## **2 Hitsaaminen**

### **2.1 Hitsaus**

Hitsaaminen on kahden tai useamman kiinteän kappaleen liittämistä toisiinsa lämmön avulla. Metallikappaleita liitetään käyttämällä lämpöä sulattamaan metallia tai lämmittämään metallia juuri sulamispisteen alapuolelle. Sulahitsauksessa metallikappaleet sulavat ja liittyvät toisiinsa. Hitsauksessa voidaan käyttää lisäainetta, joka sulaa myös. Puristushitsauksessa kappaleet lämmitetään korkeaan lämpötilaan mutta ei sulateta. Lämmenneet ja pehmenneet kappaleet liitetään sitten yhteen puristamalla. [4]

Kuviossa 2 näkyy hitsausliitokseen lämpöjaksojen seurauksena syntyvät vyöhykkeet. Lämpövyöhykkeellä lämpötila on ollut hitsauksen seurauksena työlämpötilaa korkeampi. Muutosvyöhykkeellä hitsaus on aiheuttanut kiderakenteen muutoksia. Hitsiaine on yhteisnimitys sulassa tilassa olleelle aineelle. Osa hitsiaineesta on puhdasta perusainetta, osa puhdasta lisäainetta. Seostumisvyöhykkeellä perus- ja lisäaine ovat seostuneet.



Kuvio 2. Hitsausliitoksen vyöhykkeet. [4]

Hitsauksessa kappaleisiin syntyy nopeiden lämpötilanmuutoksien aiheuttamia materiaaliominaisuuksien muutoksia sekä jännitystiloja. Lämpötilamuutokset ja jännitystilat aiheuttavat hitsattavassa kokonaisuudessa myös ei-toivottuja muodonmuutoksia. Hitsausaumassa olevan materiaalin sulan luonteen vuoksi hitsausaumaan ja sen läheisyyteen syntyy myös makrogeometrisia epäjatkuvuuskoh-  
tia.

Teräsrakenteisiin voi syntyä erilaisia sisäisiä jännitystiloja käsittely- ja valmistusvaiheissa. Nämä ilman ulkoista kuormitusta esiintyvät jännitykset ovat sekundaarisia. Niitä voi syntyä epätasaisen jäähtymisen seurauksena, epätasaisen kuumentamisen seurauksena esimerkiksi polttoleikattaessa tai hitsattaessa, kiderakenteen paikallisen tilavuuden kasvun seurauksena austeniitin hajautuessa matalissa lämpötiloissa esimerkiksi lujien terästen (esimerkiksi tässä kahmarissa käytetyn korkealujuusteräksen) hitsauksessa tai kylmämuovauksen yhteydessä. [4]

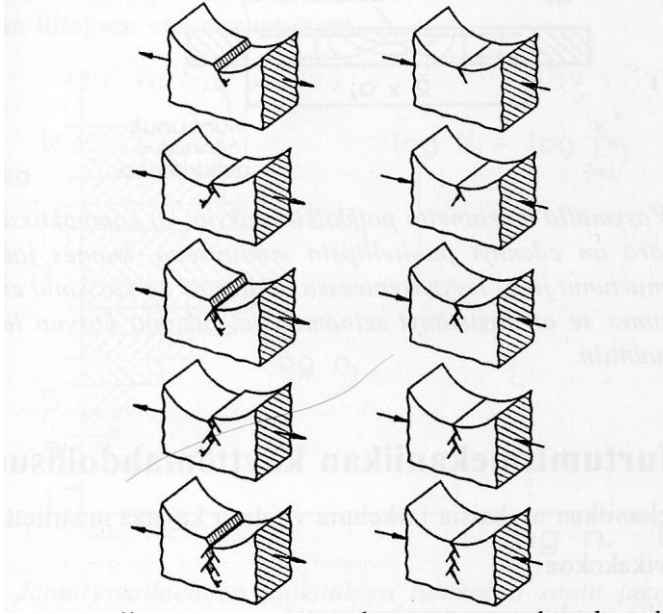
## **2.2 Hitsisaumojen väsyminen**

### **2.2.1 Hitsin murtuminen väsytyksessä**

Hitsin murtuminen väsytyksessä johtuu hitsauksessa syntyneiden alkusäröjen ydintymisestä ja laajenemisesta vaihtelevan kuormituksen johdosta. Hitsissä esiintyvä särönkasvuilmio koostuu kolmesta vaiheesta: särön ydintymisestä, kasvuvaiheesta ja jäännöspoikkipinnan murtumisesta. Väsymisvaurio muodostuu yleensä jännityskeskittymän kohdalle jääneen alkusäröstä. [4,6]

Kuviossa 3 näkyy periaatteellinen esitys särön ydintymisestä. Kun loven pohjalle syntyvä huippujännitys ylittää myötörajan kaksinkertaisesti, syntyy loven pohjalle aineen pintakerrokseen vaihtoplastisoitumista, eli edestakaista myötämistä. Vetovaiheen aikana liukuminen paljastaa uutta metallipintaa ympäristön vaikutuksille alttiiksi ja puristuksen aikana tilanne ei palaudu enää täysin ennalleen. Seuraavassa vetovaiheessa ympäristön hapettama kohta murtuu ja uusi liukuminen tapahtuu. Vaihtokuormituksessa nämä vaiheet toistuvat, kunnes pintaan on syntynyt särö ja ydintyminen on tapahtunut. Ydintymisen loppumisen ja särön etenemisen toisistaan tarkasti erottaminen on kuitenkin vaikeasta määriteltävissä. Ydintymisellä voidaan tarkoittaa vaihetta, jossa pintaan on syntynyt selvä makroskooppinen särö. Jälkikäsittelemättömiä hitsattuja rakenteita tutkittaessa yleinen mielipide on, että varsinaista ydintymisvaihetta ei ole. Tällaisten rakenteiden väsyminen katsotaan olevan alusta alkaen hitsin rajaviivalla olevien alkusäröjen etenemistä. [4,5]





Kuvio 3. Periaatteellinen särön eteneminen, joka johtuu loven pohjaan vaikuttavasta vaihtoplastisoitumisesta. [4]

Särön kasvuvaiheessa särön kärjessä tapahtumaketju pysyy hyvin samanlaisena kuin ydintymisvaiheessa. Erona on nyt plastisesti muokkautuvan alueen pienuus verrattuna särön syvyyteen. Murtumisessa särö on edennyt niin syväälle, että jäännöspoikkileikkaus ei enää kestä kuormituksen tuottamaa hetkellistä suurinta jännitystä. Erikoislujissa hauraissa teräksissä särön etenemisvaihe voi jäädä jopa huomaamattoman pieneksi. Sitkeissä rakenneteräksissä väsymisen aiheuttama särö voi olla jopa kymmeniä senttejä. Sitkeästä teräksestä tehdyt rakenteet ovat siis turvallisempia, koska väsymissärö voidaan huomata ennen rakenteen murtumista.

Hitsattuun rakenteeseen vaikuttavaa sen käytön aikana erilaisia särönkasvuilmiöitä, jotka rajoittavat rakenteen käyttöikä. Nämä ilmiöt eivät välttämättä luo uusia säröjä, vaan kasvattavat jo olemassa olevia alkusäröjä, joita on syntynyt valmistuksessa tai käytössä. Erilaiset geometriset epäjatkuvuuskohdat ja muut hitsausvirheet ovat yleinen hitsausrakenteille ominainen ongelma. Huolellistikin valmistetussa hitsausrakenteessa on todennäköisesti alkusäröjä, jotka ydintyessään heikentävät rakenteen kestävyttä ja näin vähentävät elinikää hitsaamattomaan

rakenteeseen verrattuna. Rakenteen elinikä on lopussa, kun säröt ovat kasvanneet niin isoiksi, että syntyy murtumavaara tai rakenne on muuten käyttökelvoton. [4,5]

## 2.2.2 Hitsien vaikutus rakenteeseen

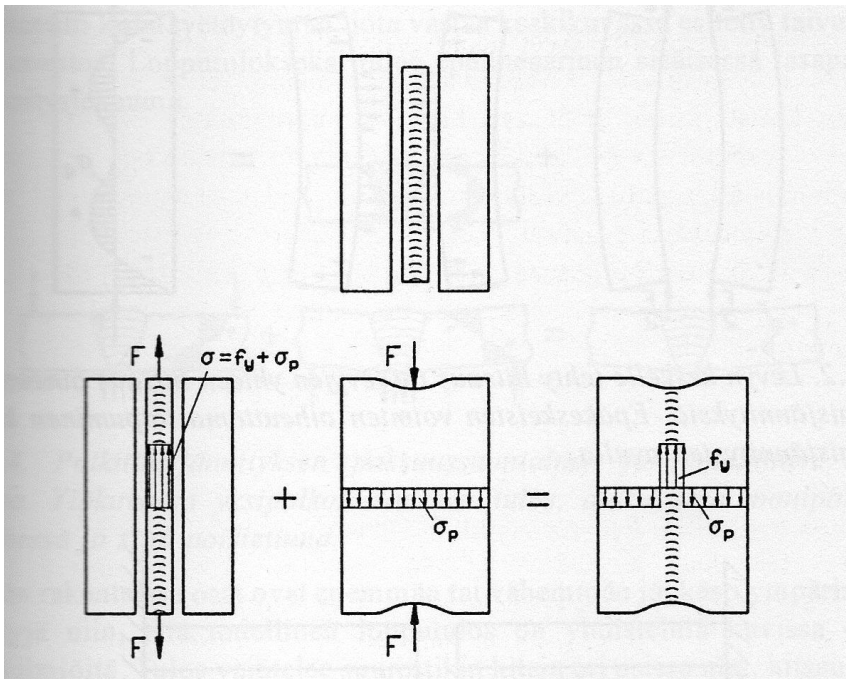
### Sisäiset jännitykset

Hitsausliitoksen väsymiskestävyyttä tarkastellessa yksi tärkeimpiä huomioon otettavia seikkoja ovat hitsauksessa syntyneet jäännösjännitykset. Hitsaustapahtuma synnyttää materiaaliin hitsisauman kohdalle ja sen välittömään ympäristöön suuria lämpötilan muutoksia ja siitä johtuvia muodonmuutoksia, jotka voivat synnyttää jännitystiloja. Sulavyöhykkeellä hitsatessa tapahtuva tapahtumakulku on seuraavanlainen: nopea kuumentuminen ja lämpölaajeneminen heikentävät rakenteellista lujuutta, kiderakenne muuttuu austeniitiksi.

Hitsaustapahtumassa aine lämpenee epätasaisesti, mikä aiheuttaa sen, että kuumemmat kohdat pyrkivät laajenemaan suuremmiksi kuin viileämpi lähialue. Tästä syntyy jännityksiä, kuumiin kohtiin puristusta ja kylmiin vetoa. Hitsin kuumentama alue on yleensä pieni suhteessa koko rakenteeseen ja sen myötölujuus on alentunut, joten hitsisauman kuumentama alue tyssääntyy helposti. Jopa niin alhainen lämpötilan nousu kuin 100 °C voi aiheuttaa Fe360 teräkseen syntyvän kuumen pisteen tyssääntymisen. Tyssääntyneet alueet pyrkivät jäähtyessään kutistumaan kuumentumista edeltävää tilaa pienempään mittaan. Vähemmän lämmentyneet ja hitsin vaikuttamattomat alueet, jotka ovat säilyttäneen kimmoisuutensa pyrkivät estämään tyssääntyneen alueen kutistumisen. Tämä aiheuttaa vetojännitystä erityisesti hitsin pituussuunnassa. Osa tyssääntymisestä venyy plastisesti pienentäen vetojännitystä. [4]

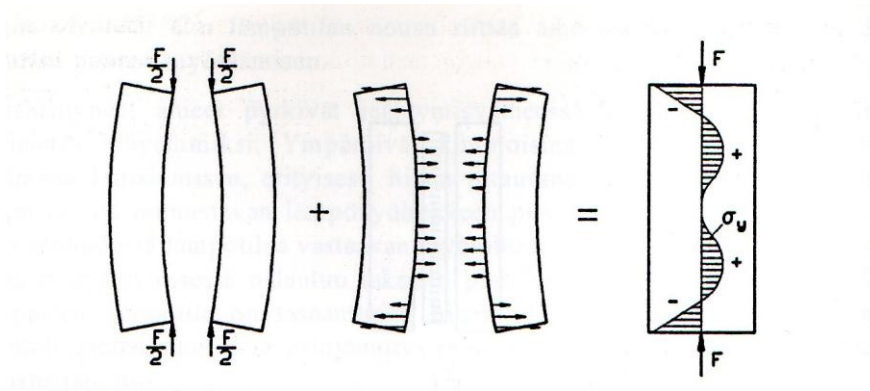
Kuviossa 4 havainnollistetaan hitsin pituussuuntaisen jännityksen syntymistä kahta levyä toisiinsa liittäessä. Ylhäällä keskellä on havainnollistettuna levyjen välissä hitsisauma lämpövyöhykkeineen. Kutistuttuaan se on alkuperäisiä levyjä lyhyempi, kun levyt säilyttävät alkuperäisen pituutensa. Jotta levyt voitaisiin liittää

yhteen, täytyy hitsisauman venyä tilapäisesti voiman  $F$  verran. Koska kuormittamattomaan rakenteeseen ei kohdistu  $F$  vertaisia voimia, on  $F$  kumottava voimaa  $F$  vastaavalla puristuksella. Muualla levyssä vaikuttaa puristus, jonka keskimääräisen arvon määrittää levyn poikkipinta-ala  $A$  kaavassa  $F/A$ . [4]



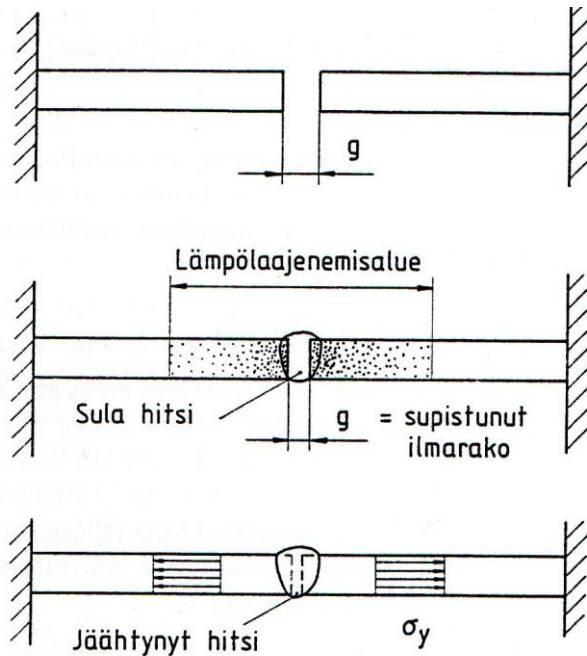
Kuvio 4. Hitsin pituussuuntaisen jännityksen syntyminen. [4]

Kuviossa 5 esijännitys  $F/2$  taivuttaa levyjä kaareviksi. Jotta ne voitaisiin liittää yhteen, on ne taivutettava takaisin suoriksi keskikuvan mukaisilla kuormituksilla. Tästä syntyy hitsin kohdalla vaikuttava jännitys  $\sigma_y$ , joka on rakenteen keskellä vetoa ja päissä puristusta. [4]



Kuvio 5. Hitsin poikittaissuuntaisen jännityksen syntyminen esijännityksen alaisiin kappaleisiin. [4]

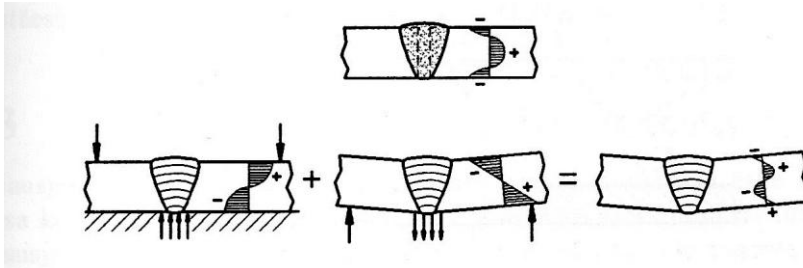
Lämmön johdosta syntyvät muodonmuutokset aiheuttavat hitsisaumaan myös poikittaisjännityksiä. Kuviossa 6 näkyy jäykän tuennan synnyttämä poikittaisjännitys. Kun kuvan kaksi tankoa hitsataan yhteen, hitsin lämpö laajentaa tankoja pienentäen niiden välistä rako. Tässä vaiheessa itse hitsillä ei ole lujuutta sen ollessa sulassa tilassa. Kun hitsi jäähtyessään saavuttaa jonkinasteisen lujuuden, jäähtymisen aiheuttama kutistuminen aiheuttaa jännityksen  $\sigma_y$ . Sen suuruus riippuu tankojen ja tuentojen jäykkyydestä sekä hitsauksessa syntyneen lämmön määrästä. Hyvin jäykät ja korkealla lämmöllä hitsatut rakenteet voivat jäähtyessään synnyttää jopa myötörajan ylittäviä jännityksiä.



Kuvio 6. Hitsin poikittaissuuntaisen jännityksen syntyminen kutistumisen eston seurauksena. [4]

Hitsin synnyttämät jännitykset eivät yleensä jakaannu tasaisesti paksuussuuntaisesti. Kuviossa 7 keskellä ylhäällä näkyvässä yksipalkohitsissä pintakerrokset jäätyvät ensimmäisinä. Pintaosien jo saavuttaessa jonkinasteisen lujuuden on keskiosa vielä kuumaa ja pehmeää. Kun pehmeä sisäosa pyrkii kutistumaan, se yrittää vetää myös jo lujaa pintaa sisäänpäin aiheuttaen vetojännitystä.

Kuviossa 7 alarivi näyttää monipalkohitsin ensin kiinnittimessä ja sitten poistettuna. Monipalkohitsissä juuren puoleinen palko on jo viileä ja luja kun pintapalko aloittaa jäähtymisensä. Jos kappaleiden kiinnitys estää kulmamuodonmuutoksen, voi pintapalko jäähtyessään aiheuttaa kuviossa 7 vasemmalla näkyvän tilanteen. Jos rakenne poistetaan kiinnityksestään, hitsissä oleva momentti aiheuttaa keskimmäisen kuvan mukaisen kulmavetäymän. Lopputuloksena on epälineaarinen sisäisessä tasapainossa oleva jännitysjaakauma. Hyvin paksuissa levyissä voi syntyä myös jännityksiä myös paksuussuunnassa. Tällöin jäännös-jännitystila on kolmiakselinen. [4]

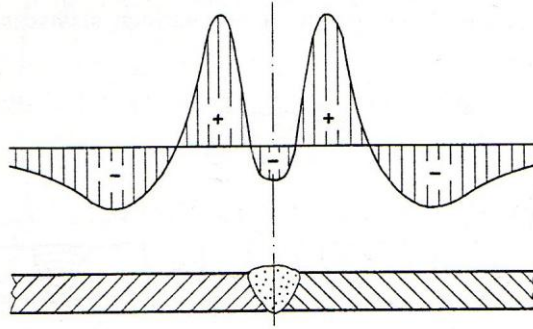


Kuvio 7. Poikittaisjännityksen paksuussuuntainen jakautuminen. [4]

### Kiderakenteen muutos

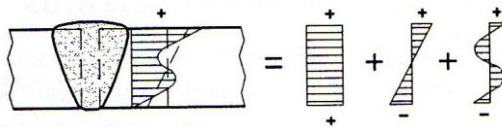
Hitsin lämmön aiheuttamat tilavuusmuutokset eivät rajoitu vain rakenteellisiin muutoksiin. Hitsatessa rakenteen kiderakenne muuttuu ja aiheuttaa tilavuuden muutoksia. Yleisesti käytettäviä rakenneteräksiä hitsatessa austeniitin hajautuminen ferriitiksi, bainiitiksi jne. tapahtuu korkeissa lämpötiloissa aineen ollessa pehmeää. Tällainen tilavuuden kasvu johtaa tyssäntymiseen ilman huomattavia jännityksiä. Jännitykset syntyvät vasta rakenteen jäähtyessä ja kutistuessa.

Korkealujuusteräksiä hitsatessa austeniitti hajautuu paljon matalammassa lämpötilassa, aineen ollessa vielä melko lujaa. Tällöin hitsiin syntyy sen hetkisen myötölujuuden suuruinen puristusjännitys, jonka suuruus pienenee hitsin jäähtyessä ja kutistuessa. Kiderakenteen muutoksen aiheuttama jännitystila voi vaikuttaa lähes yhtä paljon kuin lämpölaajenemisen aiheuttama, joten korkealujuuste-rästen jännitystilat voivat poiketa suuresti yleisempien terästen jännitystiloista. Yleisesti voidaan sanoa hitsin keskellä olevan pituussuuntaisen normaalijännityksen voivan olla pieni, vaikka muutosvyöhykkeellä esiintyy suuri vetojännitys. [4]



Kuvio 8. Korkealujuusteräksen pituussuuntainen jännitys hitsin kohdalla voi jäädä pieneksi. [4]

Hitsausjännitysten vaarallisuutta arvioidessa eri jakaumatyypit tulee erotella. Kuviossa 9 näkyvät tasaisesti jakautunut kalvojännitys, lineaarinen taivutusjännitys ja epälineaarinen sisäisesti tasapainoinen jännityshuippu. Kalvojännitys muodostaa rakenteen läpi kulkevan sisäisesti tasapainoisen voimajärjestelmän, joka ei laukea helposti säröistä. Kalvojännitys luo särö kärkeen säröä kasvattamaan pyrkivän jännitysintensiiteetin. Näin ollen, kalvojännitykset ovat kriittisiä haurasmurtuman, jännityskorroosion ja väsymisen kannalta.



Kuvio 9. Hitsausjännitysten alalajit. [4]

Taivutusosuus on tasapainossa lähiympäristön kanssa. Särön kasvaessa se laukeaa vähitellen. Jännityshuippu on itserajoittuva aineen myötäessä tai särön kasvaessa. Tämäkin jännityslaji alentaa väsymisrajaa ja päästää liikkeelle jännityskorroosion aiheuttaman särönkasvun. [4]

### 2.2.3 Hitsisauman väsymislujuuden parantaminen

Hitsisaumojen väsymiskestävyyttä voidaan parantaa jälkikäsitteilyillä tai järjestelyillä itse hitsauksen aikana. Liitosten väsymisominaisuuksien parantaminen voi kasvattaa valmistuskustannuksia, mutta väsymisominaisuuksia parantamalla voidaan myös saavuttaa säästöjä materiaalikustannuksissa. Hitsauksessa syntyviä jännityksiä ja muodonmuutoksia voidaan pienentää pienentämällä hitsejä. Tämä vähentää hitseihin tuotavaa lämpöenergiaa ja siten lämpölaajenemista. Myös käyttämällä katkohitsiä yhden jatkuvan hitsin sijaan voidaan hitsiin tuotavan lämpöenergian määrää vähentää. Katkohitsiä harkitessa täytyy kuitenkin kiinnitettävä huomiota korroosiovaaraan ja mahdolliseen väsymiskestävyyden väheneemiseen. Katkohitsi voi synnyttää rajavyöhykkeen kriittiselle paikalle, joka jatkuvalla hitsillä olisi kestävämpi.

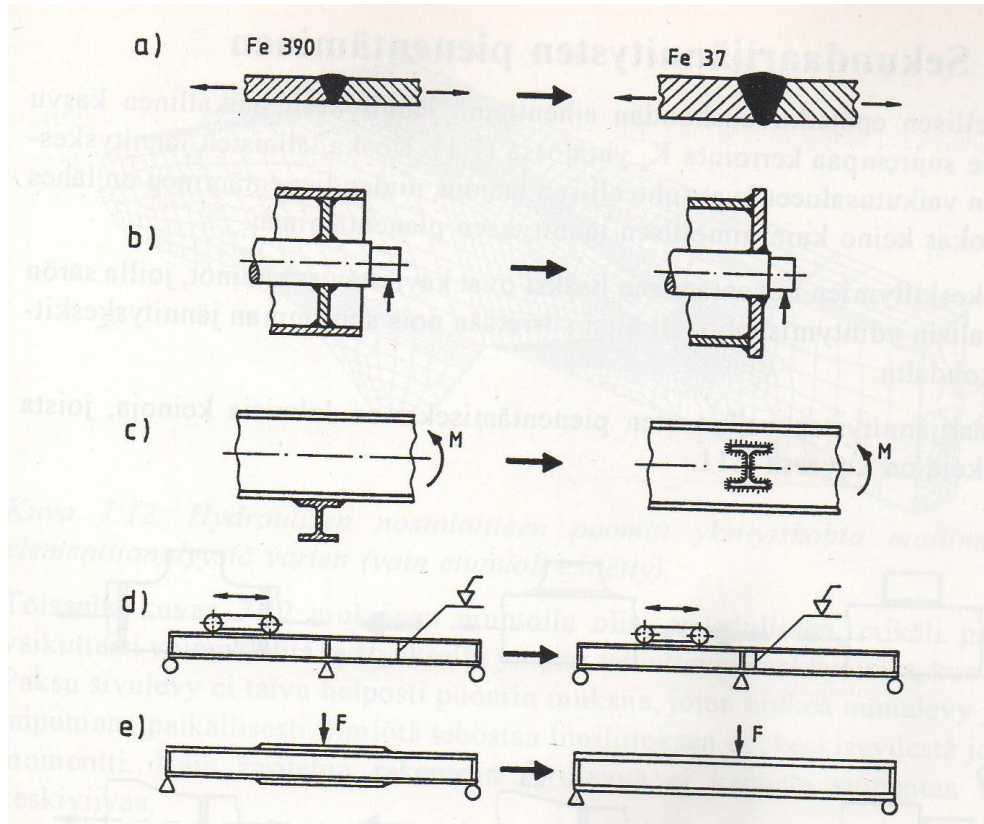
Hitsattaviin kappaleisiin syntyviä muodonmuutoksia, etenkin kulmavetäytymää voi vähentää kiinnittämällä ne tukevasti hitsauksen ajaksi. Tällöin kuuma hitsi ei voi kutistuessaan siirtää hitsattuja osia vaan joutuu itse myötämään. Jäähdyttyään hitsi on kuitenkin jo niin luja, että muodonmuutoksia ei voi estää kokonaan. Irrotettaessa kappaleessa olevat hitsausjännitykset laukeavat ja luovat kappaleeseen kimmoisia muodonmuutoksia. Kokonaisuudonmuutos jää kuitenkin pienemmäksi verrattuna kiinnittämättömään kappaleeseen. Hitsiin tuotavaa energiaa voi kontrolloida myös hitsausjärjestystä muuttamalla niin, että hitsin lämpötila pysyy kauttaaltaan mahdollisimman yhteneväisenä.

Myöstö on tunnetuin menetelmä hitsausjännitysten vähentämiseksi. Väsymispauksia käsitellessä myöstö tuottaa suurimmat hyödyt rakenteissa, joissa esiintyy suurelta osin puristustyytystä.

Kuviossa 10 näkyvässä kohdassa a nimellistä jännitystä vähennetään valitsemalla vähemmän luja aine ja suurempi paksuus. Kohdassa b pienennetään ja uudelleen muotoillaan hitsattu momenttivarsi. Kohdassa c hitsausliitos siirretään

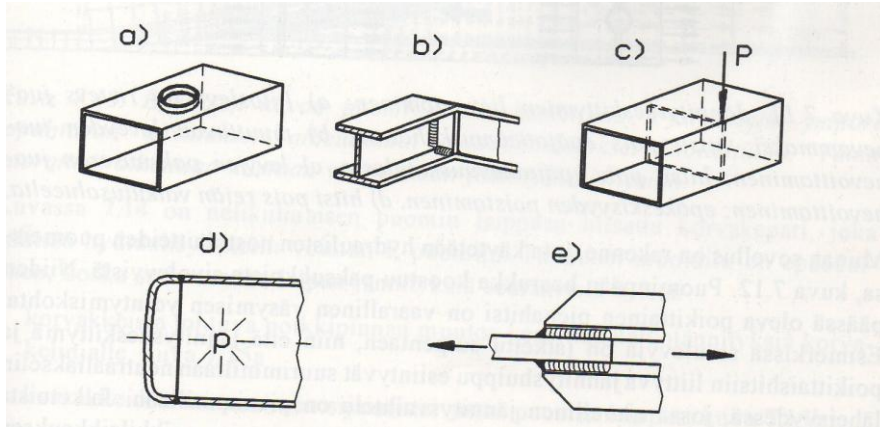


palkin neutraaliakselille momentin aiheuttamien jännitysten minimoimiseksi hitsissä. Kohdassa d jatkuvassa palkissa oleva asennuskatkos siirretään pienimmän momenttivaihtelun kohdalle. Kohdassa e vältetään lisälamellien lisäys ja niiden päätekohtien aiheuttama geometrinen epäjatkuvuuskohta valitsemalla palkille tarpeeksi vahva poikkileikkaus. [4,5]



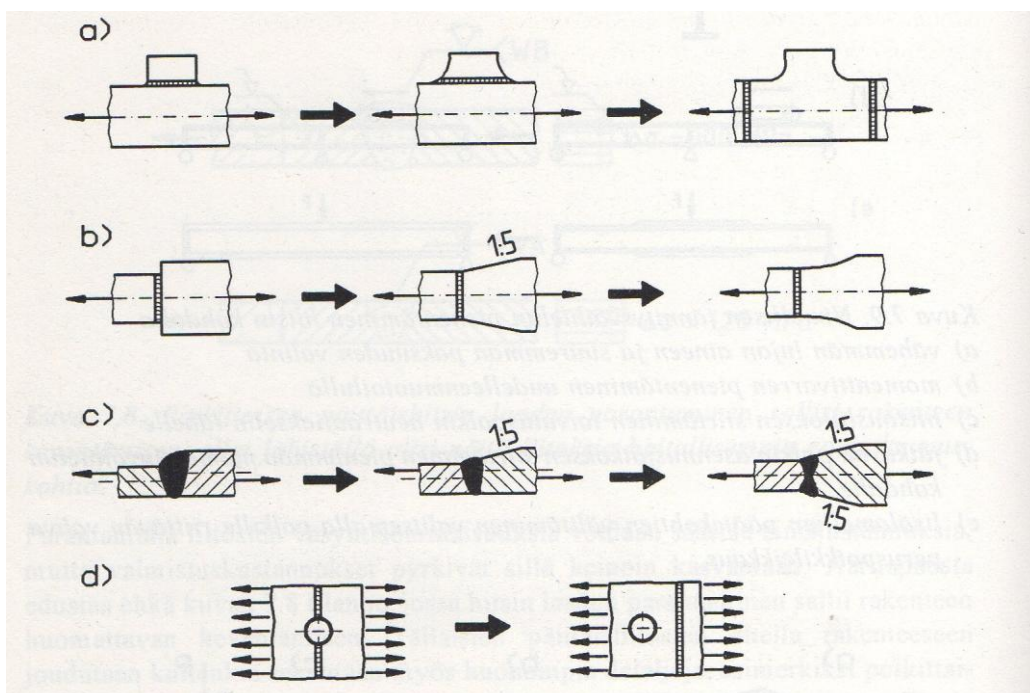
Kuvio 10. Tapoja vähentää nimellisiä jännitysvaihteluja hitsin kohdalla. [4]

Kuviossa 11 näkyvässä kohdassa a rakenteessa oleva aukko vahvistetaan. Kohdassa b taitteet tuetaan jäykisteillä. Kohdassa c vinoutuminen estetään jäykistämällä rakenne. Kohdassa d paineastian hitsi siirretään pois häiriöjännityksen alueelta ja näin vähennetään hitsiin vaikuttavia jännitystiloja. Kohdassa e vetojännityksen alaiset limittäisliitokset on suunniteltu symmetrisiksi. [4,5]



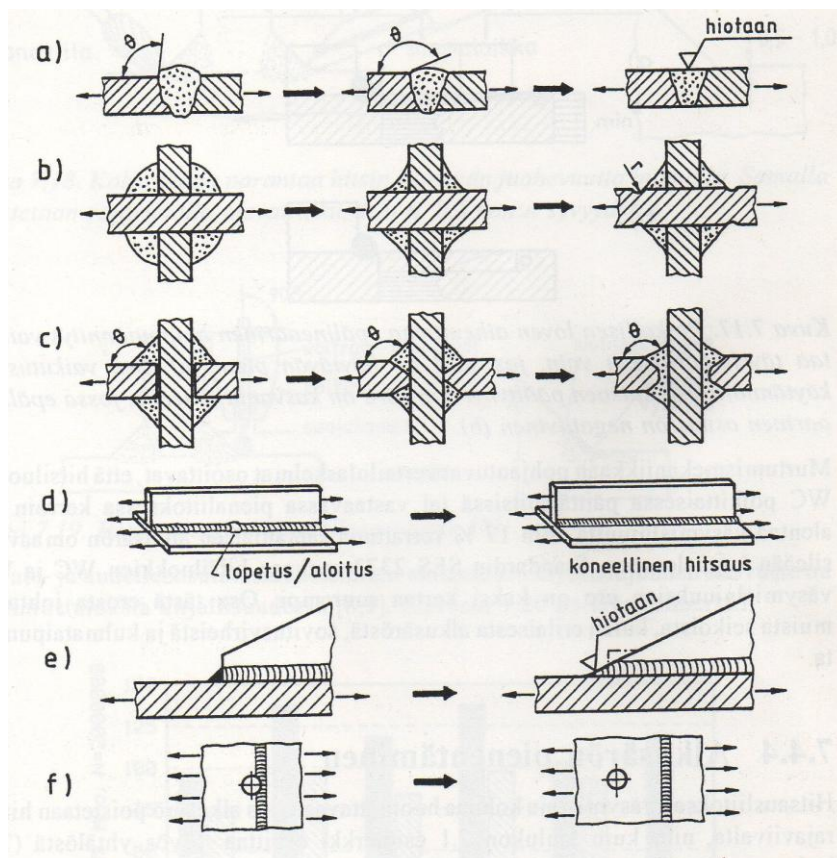
Kuvio 11. Keinoja makrogeometristen vaikutusten pienentämiseen. [4]

Rakenteellisten epäjatkuvuuskohtien aiheuttamien paikallisten korkeiden jännitysten lieventäminen on tehokas keino parantaa rakenteiden väsymiskestävyyttä. Särön todennäköisimmän ydintymiskohdan eli hitsin siirtäminen pois suurimman jännityskeskittymän vaikutusalueelta tuottaa huomattavaa kestoajan kasvua. Kuviossa 12 näkyvässä kohdassa a liitosta muutetaan jouhevammaksi ja hitsi siirretään pois epäjatkuvuuskohdan vaikutusalueelta. Kohdassa b) leveyden muutos jouhevoitetaan ja hitsi siirretään tasaleveälle alueelle. Kohdassa c liitettävien levyjen paksuusero jouhevoitetaan ja epäkeskisyys poistetaan. Kohdassa d hitsi siirretään pois reiän synnyttämien jännityskeskittymien vaikutusalueelta. [4,5]



Kuva 12. Jännityskeskittymien lieventäminen. [4]

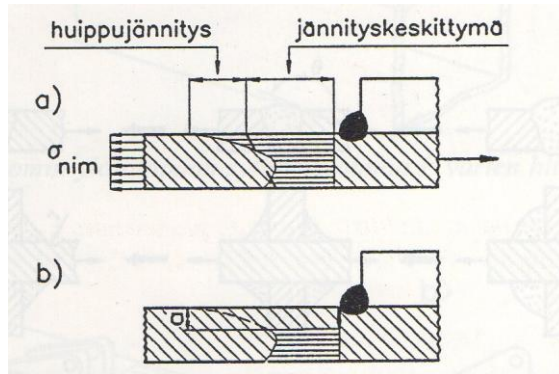
Hitsisauman synnyttämien jännityshuippujen suuruutta voi vähentää parantamalla hitsin kuvun ja rakenteen pinnan liittymän jouhevuutta lisäämällä. Jouhevuus paranee käyttämällä suurta liittymäkulmaa, suurta pyöristyskulmaa ja eliminoimalla hitsin rajaviivan reunahaavat. Kuviossa 13 näkyvässä kohdassa a hitsin kupu tehdään pieneksi ja jouhevaksi. Kohdassa b käytetään pieniä ja koveria hitsejä suurien ja kuperien sijaan ja tehdään rajaviivalle pyöristys. Kohdassa c kantavat pienahitsien sijaan käytetään jouhevammin liittyviksi K-hitseiksi. Kohdassa d muutetaan käsin hitsattu pitkittäishitsi tasalaatuisemmaksi koneelliseksi. Kohdassa e rivan pääty hiotaan jouhevammaksi. Kohdassa f siirretään ruuvinreikä ja hitsi erilleen. [4]



Kuvio 13. Lovivaikutusten lieventäminen. [4]

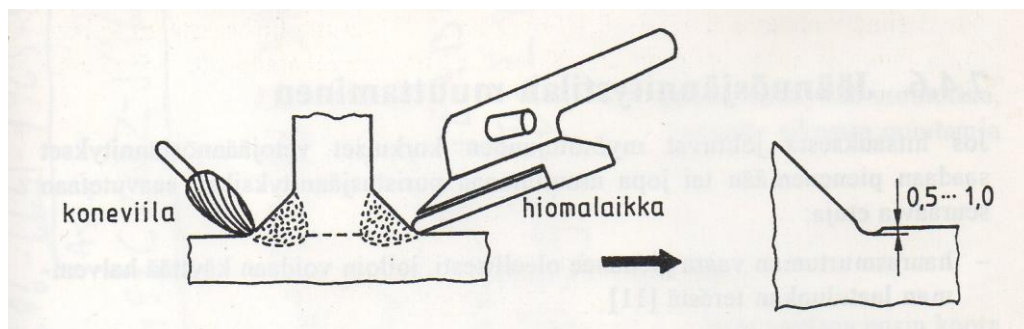
Kuviossa 14 näkyvä loven aiheuttama epälineaarinen huippujännitys vaikuttaa täysimääräisesti vain, jos hitsin reunaviivalla oleva särö on häviävän pieni (kuvio

14, kohta a). Huippujännityksen vaikutuksen voi katsoa päättyneen särön kasvetua alueelle jossa epälineaarinen osuus on negatiivinen. [4]



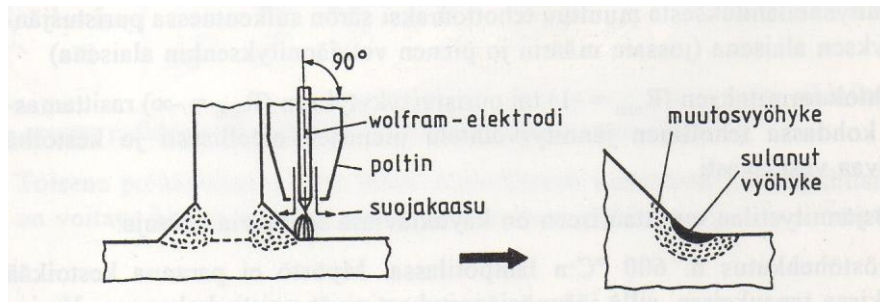
Kuvio 14. Paikallisesta lovesta johtuva epälineaarinen huippujännitys. [4]

Alkusärön poistaminen vaikuttaa rakenteen kestoikään sekä väsymisrajaan. Alkusärö voidaan poistaa hiomalla. Hionta on kuitenkin kallein särön poistotapa, joten sen soveltuvuus rajoittuu pieniin käsittelyalueisiin kuten hitsin päätteeseen. Kuviossa 15 näkyy kaksi erilaista hiontatapaa, joilla parannetaan hitsin jouhevutta ja samalla poistetaan alkusäröt 0,5-1,0 mm syvyydeltä. [4]



Kuvio 15. Alkusärön poisto hiomalla. [4]

Taloudellisempi alkusärön poisto menetelmä on hitsin rajaviiva-alueen uudelleensulatus. Hitaan ja roiskeettoman sulatuksen aikana oksidit ja muut sulkeumat poistuvat rajaviivalta. Sulatus aiheuttaa suuren pyöristyssäteen. Kuviossa 16 näkyy TIG-menetelmä uudelleensulatus. [4]



Kuvio 16. Alkusärön poisto sulattamalla. [4]

Hitsauksesta aiheutuvien vetojäännösjännitysten pienentäminen tai muuttaminen puristusjännitykseksi, jos mahdollista, johtaa rakenteen väsymiskestävyyden paranemiseen. Tällöin haurasmurtumisen vaara pienenee ja voidaan käyttää halvempaa terästä. Myös vaihtosuuntaisen kuormituksen tai puristustykytyksen alaisessa kohdassa todellinen jännitysvaihtelu pienenee ja kestoikä pitenee. Jos jännitysheilahduksesta osa muuttuu tehottomaksi särön sulkeutuessa, särön kasvunopeus hidastuu ja täten kestoikä kasvaa.

Jäännösjännitystilaa voi muuttaa myöstöhehkuksella (ei poista kaikkia jännityksiä ja on kallis keino), ylikuormittamalla vetojännityksellä sitkeän käyttäytymisen takaavassa korkeassa lämpötilassa (kuormitus aiheuttaa loven pohjalle plastista venymistä ja kuormituksen poistuessa loven pohjalle jää puristusjäännösjännitystä), tuottamalla puristusjäännösjännitystä mekaanisesti hitsin rajaviivalle (esimerkiksi vasartamalla tai kuulapuhaltamalla) tai tuottamalla puristusjännitys loven kohdalle kuumentamalla ja tuottamalla vetojännitystä epäjatkuvuuskohdan viereen.

Jäännösjännitystilan muuttamiseen tähtäävät keinot aiheuttavat suurimmat muutokset kestävydessä sellaisissa rakenteissa, joissa jännitysvaihtelu on pientä. Suurilla jännitysvaihteluilla jäännösjännitykset tapaavat laueta ilman myöstöäkin. Tämän takia myös keinotekoisesti tuotetun puristusjännitystilän säilyminen suurien jännitysvaihteluiden rasittamissa rakenteissa on epävarmaa. [4]

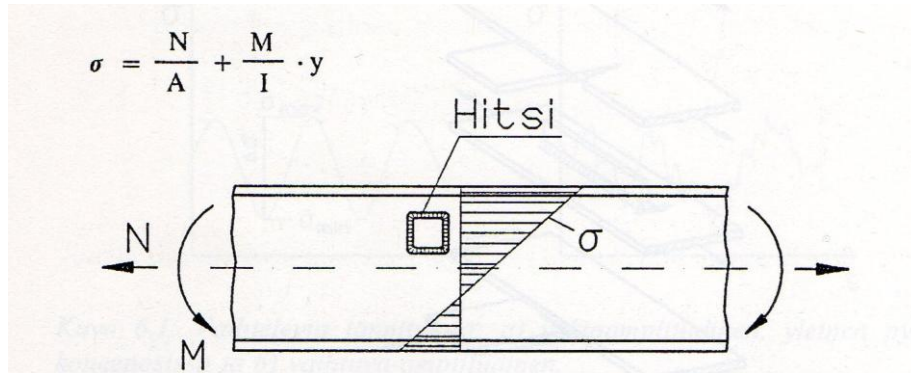
## **2.3 Rakenteen jännityksien tarkastelu hitsin synnyttämässä epäjatkuvuuskohdissa**

Väsymismurtumista voi ilmetä rakenteissa, vaikka nimellisjännitykset olisivat huomattavasti myötörajan alapuolella. Nimellisjännityksiä käsitellessä ei kuitenkaan oteta huomioon paikallisia jännityskeskittymiä. Rakenteen geometriset epäjatkuvuuskohdat, lovet ja mikrorakenteen viat voivat aiheuttaa hyvin paikallista jännityksen kasvua. Näiden erilaisten epäjatkuvuuskohtien vaikutusta voidaan tarkastella erottelemalla erityyppiset jännityksen tasot. [4, 5]

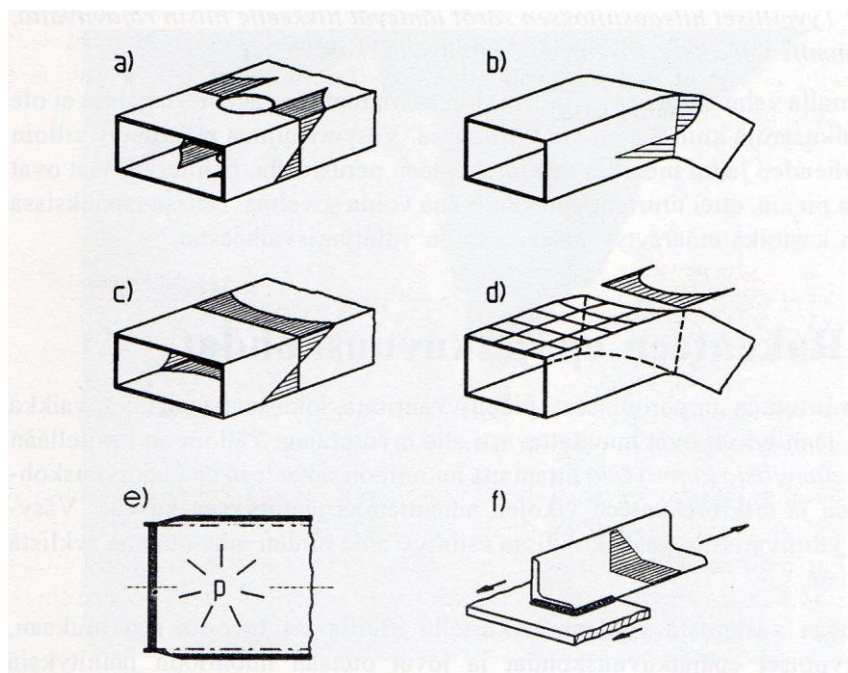
### **2.3.1 Nimellinen jännitys**

Yleisesti puhuttaessa nimellisestä jännityksestä, sillä tarkoitetaan tavallisilla palkkikaavoilla laskettua jännitystä. Kuvio 17 nimellinen jännitys lasketaan ottamatta huomioon hitsatun lapun epäjatkuvuuskohdan aiheuttamaa häiriötä jännitystilassa.

Monimutkaisempien levyrakenteiden nimellisjännitysten laskeminen on monimutkaisempaa kuin kuvion 17 tapauksessa. Näiden tapausten erilaiset makrogeometriset epäjatkuvuudet aiheuttavat suuria muutoksi jännitysjakaumaan. Kuviossa 18 näkyvässä kohdassa a näkyvä suuri aukko aiheuttaa jännitystilan muutoksia ulkohalkaisijallaan. Kohdassa b käyrä palkki aiheuttaa jännityksen epälineaarisen jakautumisen. Kohdassa c näkyy leikkausviive leveässä laipassa. Kohdassa d näkyy laippojen taipuminen kohti neutraaliakselia. Kohta e esittää sylinterikuoren häiriöjännityksiä ja kohta f limittäisliitoksen aiheuttamaa taivutusta sauvassa. [4]

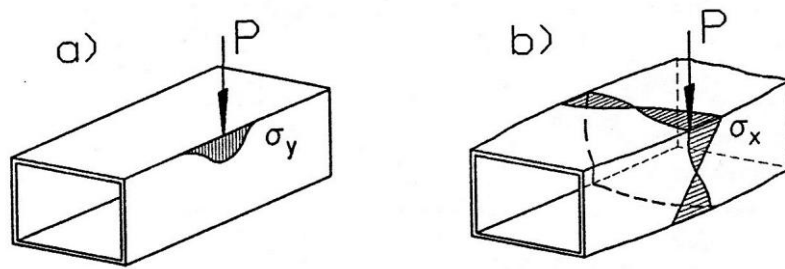


Kuvio 17. Palkin uuman vedon ja momentin aiheuttama nimellinen jännitys. [4]

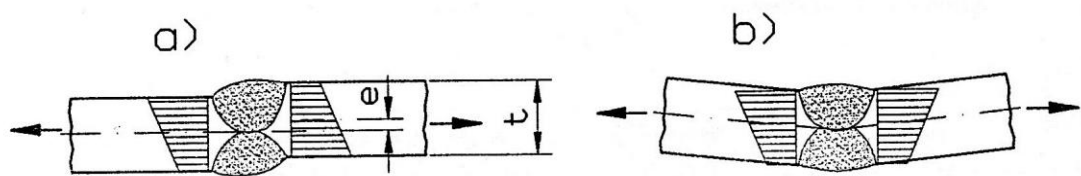


Kuvio 18. Erilaisten makrogeometristen epäjatkuvuuskohtien vaikutuksia rakenteosien nimellisiin jännityksiin. [4]

Rakenteen kuormituskohtien ja tukireaktioiden läheisyydessä esiintyy paikallisia erisuuntaisia kuvion 19 mukaisia jännityksiä. Valmistuksen yhteydessä syntyneet virheet aiheuttavat sekundäärisiä kuvion 20 mukaisia taivutusjännityksiä. Kohta a esittää sovitusrakenteen synnyttämää muutosta jännitysjaikautuksessa poikittaisen hitsin luona. Kohdassa b on esitettyä kulmavetäytymisen aiheuttama muutos jännitysjaikautuksessa poikittaisen hitsin luona. Valmistusvirheiden huomioon ottaminen voi olla vaikeaa. Hitsiliitosten väsymislujuuudet on määritelty nimellisinä jännityksinä testisauvoissa, joissa on hyvin vähän valmistusvirheitä. [4]



Kuvio 19. Kuormituskohdan paikallisia jännityksiä. [4]

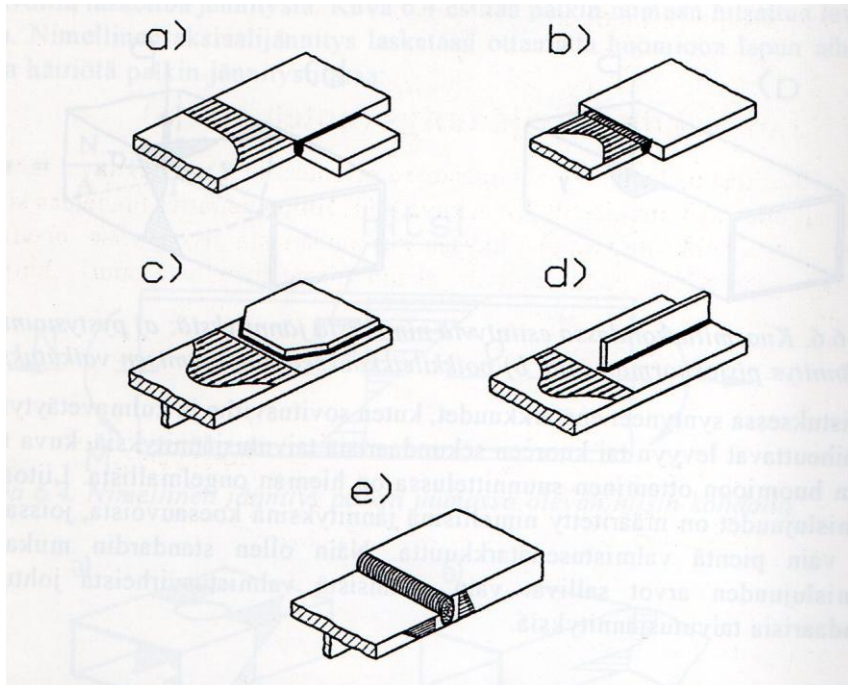


Kuvio 20. Hitsausvirheiden aiheuttamia jännitystilän jakauman muutoksia. [4]

### 2.3.2 Hot spot -jännitys

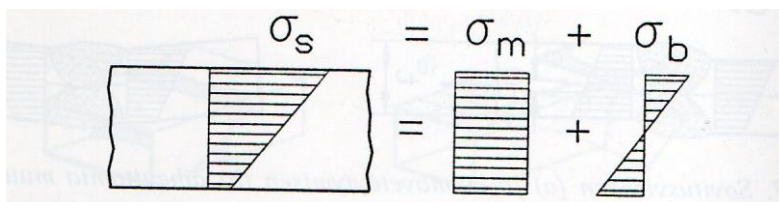
Kuvassa 21 näkyy tyypillisimpiä hitsatuissa rakenteissa esiintyviä epäjatkuvuuskohtia. Näissä tapauksissa puhutaan rakenteellisista jännityksistä. Rakenteellisella jännityksellä tarkoitetaan levymäisessä osassa esiintyvää jännitystä, joka koostuu kalvojännityksestä ja levyn taivutusjännityksestä (kuvio 21). [4]





Kuvio 21. Rakenteellisiä epäjatkuvuuskohtia jännityskeskittymiseen. [4]

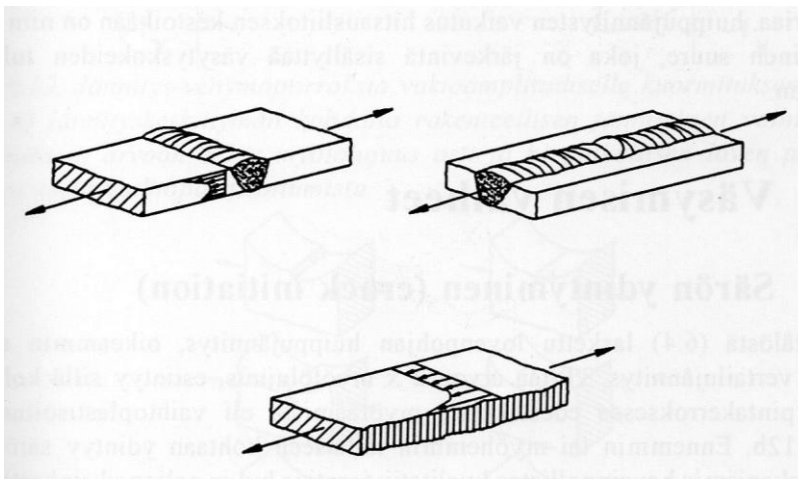
Rakenteellinen epäjatkuvuuskohta aiheuttaa laaja-alaisen jännityskeskittymän, mutta ei kuitenkaan yhtä laajan kuin rakenteen makrogeometria. Kuvio 22 näyttää jännityskeskittymän oletetun lineaarisen jakauman. Säröt syntyvät usein jännityskeskittymässä sijaitsevan hitsin rajaviivalle. Rakenteellisen jännityksen arvo tässä kriittisessä kohdassa on nimeltään hot spot- jännitys. [4]



Kuvio 22. Rakenteellisen jännityksen koostuminen kalvo- ja taivutusjännityksestä. [4]

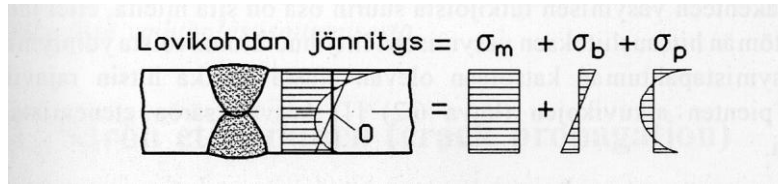
### 2.3.3 Lovikohdan huippujännitys

Kuviossa 23 näkyy erilaisia paikallisia lovia, jotka aiheuttavat pinnan lähellä vaikuttavia huippujännityksiä. Lovivaikutus ei kasvata jännityksen keskimääräistä arvoa, vaan aiheuttaa epälineaarisen jakauman, joka luo huippujännityksen pintaan. Vasemmassa kuvassa kuvataan hitsin juuren lovivaikutus. Oikealla huippujännitys syntyy hitsin suomaisuuteen. Keskellä alhaalla näkyy polttoleikkauksen jäljiltä jääneen suomuisen pinnan vaikutus. [4]



Kuvio 23. Erilaisia huippujännityksiä aiheuttavia lovia. [4]

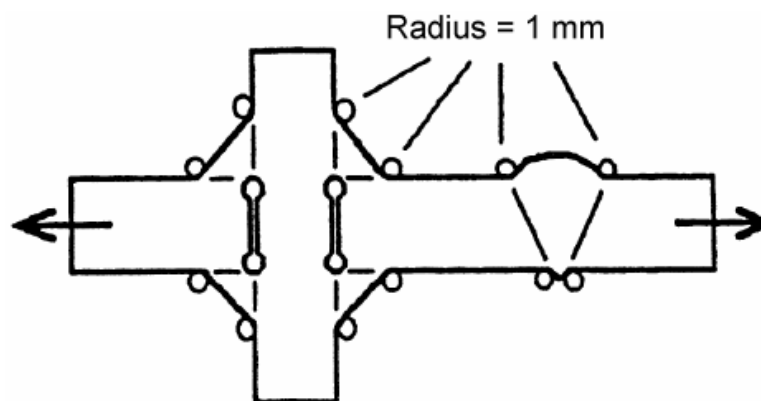
Jännityskeskittymä eroaa usein selkeästi huippujännityksestä, mutta esimerkiksi levyssä olevan reiän vaikutuksen määrittäminen voi olla hankalaa. Suuren reiän vaikutus on jännityskeskittymä ja pieni reikä, jonka aiheuttama jakauma on samaa luokkaa kuin hitsin kupu, aiheuttaa huippujännityksen. Huippujännityksen mittaaminen rajaviivalta ei ole käytännöllisesti mahdollista. Elementtilaskennan käyttö huippujännitysten laskennassa on vaikeaa. Huippujännitys on vaikea enustaa etukäteen, koska hitsin kuvun ja rajaviivan todellinen geometria voi poiketa paljonkin teoreettisista malleista. Huippujännitysten vaikutus hitsausliitosten väsymiskestävyyteen on parasta sisällyttää tulosten hajontaan. [4]



Kuvio 24. Huippujännitys on paikallisen loven aiheuttaman jännitys jakauman epälineaarinen osuus. [4]

## 2.4 Hitsin FEM-mallinnus tehollisella lovivaikutusmenetelmällä

Väsymisvaurio muodostuu yleensä jännityskeskittymän kohdalle. Tehollisella lovivaikutuksella viitataan kokonaisjännitykseen loven juuressa. FEM-analyysia varten hitsin epäsäännöllinen muoto mallinnetaan idealisoituna kuten kuviossa 25. Hitsien mallinnus FEM-analyysia varten on hyvin idealisoitua ja yksinkertaistettua. Tämän takia täysin todellisuutta vastaavan tuloksen saaminen on vaikeaa. [7]



Kuvio 25. Hitsejä mallintaessa käytettävät juuripyöritykset ja ilmaraot. [6]

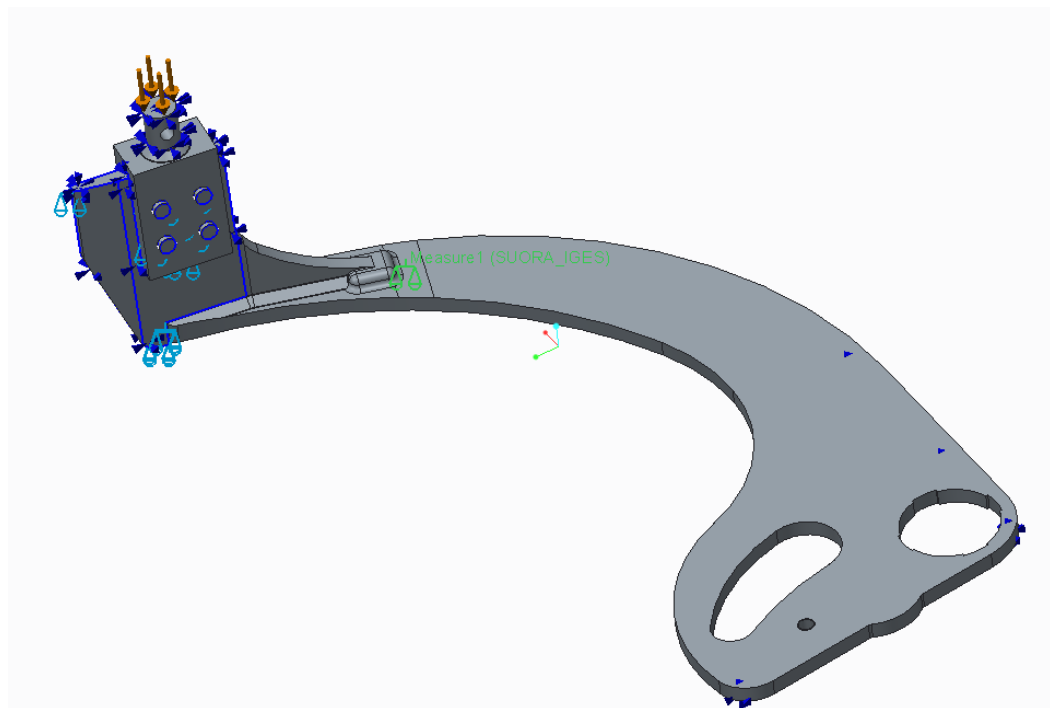
Kuviossa 25 näkyvät pyöritykset voi tehdä joko lisäämällä tai poistamalla materiaalia. 1 mm pyöritys on havaittu tuottavan luotettavia tuloksia. Pienillä ainevahvuuksilla materiaalin poistaminen voi heikentää rakennetta ja tuottaa epärealistisiä tuloksia. Menetelmä sopii skenaarioihin, joissa väsymissärön uskotaan

alkavan hitsin juuresta tai sen rajapinnasta. Menetelmää ei voi käyttää skenaarioissa, joissa hitsiin kohdistuu samansuuntaisia voimia. Menetelmä on todettu toimivaksi vain tilanteissa, joissa levyn paksuus on suurempi kuin 5 mm. [6,7]

### 3 Puutavarakouran hitsisauman väsymislujouden tarkastelu

#### 3.1 Hitsisauman mallinnus ja FEM analyysi

Outokummun Metalli Oy toimitti kouran 3D-mallin, johon mallinnettiin hitsi rikkinneiden kappaleiden mukaan. Kappaletta yksinkertaistettiin poistamalla ylimääräiset yksityiskohdat, jotka olivat simulaation kannalta tarpeettomia. Verkotusta tihennettiin IIW:n suosituksia mukailien, tietokoneen muistin ja prosessointitehon puitteissa. Hitsin juuressa verkotus tihennettiin 0,5 millimetriin. Simulaatioissa etsittiin kouran väsymisen kannalta kriittisin rasitus vaihtamalla kouraan vaikuttavien voimien suuntia ja suuruuksia.



Kuvio 26. Yksinkertaistettu koemalli ja kiinnike. Kiinnike oli mukana vain sen käyttäytymisen ja keston varmistamiseksi.

Simulaatioissa lähdettiin liikkeelle alun perin oikeassa käytössä oletettavasti syntyvien kuormitusten mallintamisesta ja vertailusta. Kouraa kuormitettiin pakkosiirtymillä, vääntäen, kiertäen, pitkittäin, sivuttain sekä erilaisilla yhdistelmillä. Tarkasteltavan hitsin kohdalle syntyivät suurimmat jännitykset, kun kouraa kuormitettiin sekä pitkittäin että sivuttain. Työkäytössä pitkittäiskuormitus syntyisi puulastista, joka pyrki taivuttamaan kaarevan kouran suoraksi. Sivuttaiskuormitus syntyisi lastatun kouran liikuttamisesta aiheutuvasta heilumisesta. Tällaisen yhdistetyn kuormituksen tuottaminen väsytysspenkissä osoittautui kuitenkin mahdottomaksi. Sivuttaiskuormitus osoittautui hitsin kestävyuden kannalta kriittisemmäksi, joten väsytysspenkissä käytettiin vain sivuttaiskuormitusta. Kuviossa 26 näkyy mallinnettuna koekappale, kiinnike ja testissä käytettävän kuorman suunta keltaisilla nuolilla.

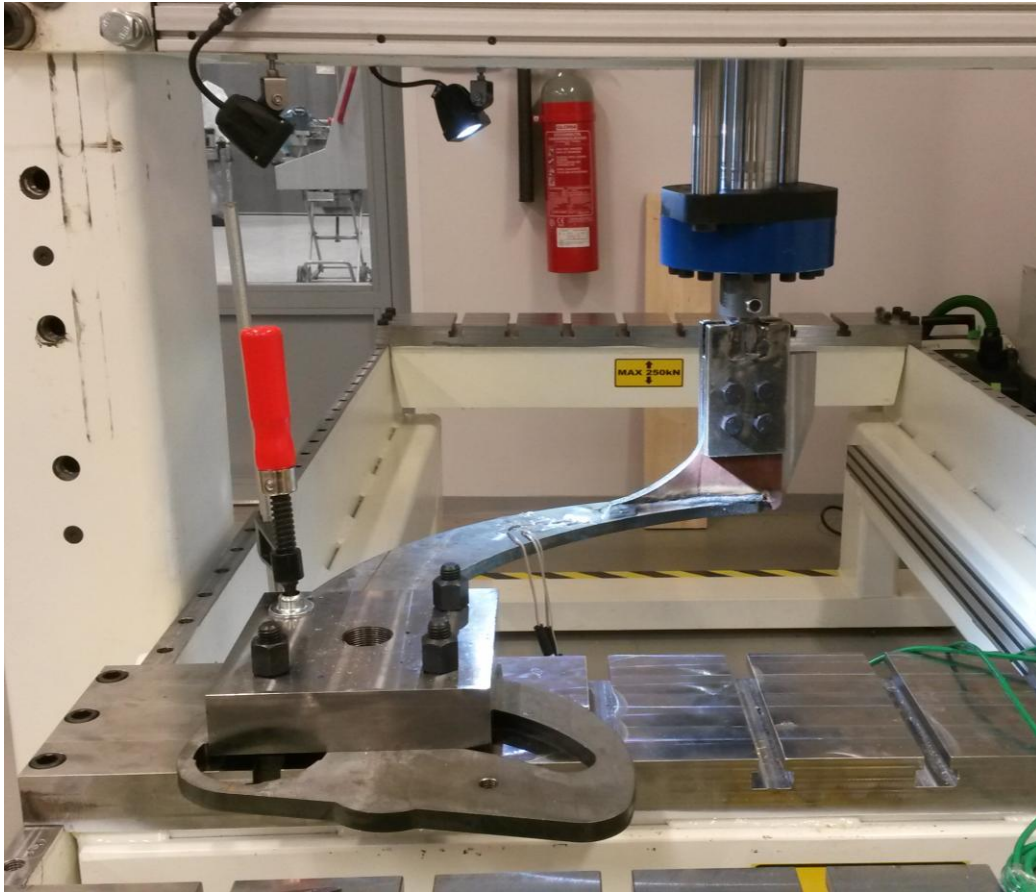
### **3.2 Väsytestaus**

Väsytestaus toteutettiin AMT Systemsin valmistamalla 500 kN väsytysspenkillä ammattikorkeakoulun tiloissa. Testi oli vakiovoimainen (6 kN) ja sille asetettiin liikkeen ylä- ja alarajaksi 50 mm. Yhteensä 6 koekappaletta väsyttiin rikki. Ensimmäinen koekappale venymäliuskoitettiin kuvion 27 mukaisesti simulaation todentamiseksi. Ensimmäiset venymäliuskamittaukset ja FEM-analyysit eivät tuottaneet samanlaisia tuloksia. Sekä vertailujännitys että siirtymä olivat poikkeavia. Väsytysspenkissä syntyneen siirtymän mukaan tehty simulaatio, jossa kuorma korvattiin testin siirtymän mukaisella pakkosiirtymällä, tuotti hyvin yhteneväiset tulokset. Tuloksista tärkeimmät otokset on esitettyä liitteissä 1 - 10. Näiden tulosten pohjalta valittiin kuormaksi 6 kN, alustavan 4 kN sijaan. Ensimmäisen kappaleen täydellistä dataa ei ole, sillä mittauslaitteisto oli sammunut kappaleen särkevän testin aikana. Korvaava kappale tehtiin ja siitä saatu data on esiteltyä.



Kuvio 27. Kouran 1 venymäliuskoitus. Hitsissä monipalkohitsi päätylevyn päädyssä.

Kuviossa 28 näkyy kiinnitys, jonka sijainti pyrittiin saamaan mahdollisimman lähelle kouran hitsattujen tukikolmioiden sijaintia. Tällä tavalla saatiin kouran käyttäytyminen muistuttamaan kokonaista kouraa. Sylinterin päässä olevassa kiinnikkeessä oli hieman välystä. Tämän takia pystyliike ei ollut täysin puhdasta ja koura pystyi taipumaan hieman.



Kuvio 28. Testausjärjestely.

Kourissa 1, 2 ja 6 särö syntyi sisäkaaren polttoleikkauksesta syntyneen pinta-suomun pohjalle. Särö eteni hitsin poikki kouran sisäpuolta pitkin ja levittäytyi myös kouran ulkopuoliselle pinnalle. Polttoleikkauspinnan pinnanlaadun parantaminen pidentäisi käyttöikä



Kuvio 29. Koura 2. Päätyhitsi jatkettu pidemmälle jouhevuuden parantamiseksi.



Kuvio 30. Koura 2 murtuneena.

Kourissa 3 ja 4 (kuviot 31, 32, ja 33) ei ollut monipalkohitsiä päätylevyn päädysssä. Näiden testikourien särö syntyi päätylevyn päätyyn hitsin päälle, koska hitsi ei pystynyt kestäämään sivuttaisliikkeestä syntyvää kuormitusta.





Kuvio 31. Koura 3. Hitsin juuri siirretty pois kriittisimmältä paikalta, pääty auki.



Kuvio 32. Koura 3 murtuneena.

Kouran 3 testi oli päättynyt, kun sylinterin raja-arvoksi asetettu liikemäärä oli saavutettu, mutta koura 3 oli yhä yhtenäinen vaikkakin vain nimellisesti. Osat olivat kiinni hyvin pienellä kaistalla perusainetta. Kouran käyttöikä oli ohi.



Kuvio 33. Koura 4 murtuneena. Kourassa 4 pääty oli hitsattu ympäri, mutta siitä puuttui monipalkohitsi.



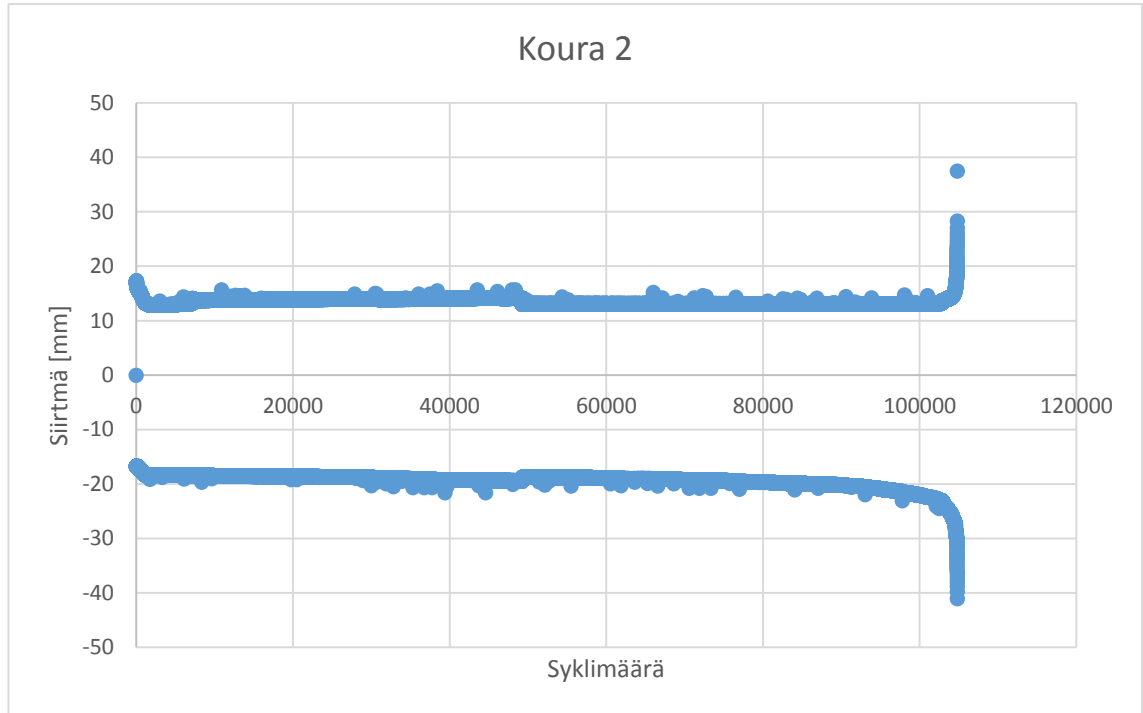
Kuvio 34. Koura 5. Monipalkohitsi päädyssä. Alkuperäisten, käytössä murtuneiden koekappaleiden mukainen reunaetäisyys.

Kourassa 5 (kuvio 34) itse hitsi osoittautui kestäväksi, mutta reunaetäisyys osoittautui riittämättömäksi. Muutosvyöhyke kattaa koko reuna-alueen. Lämmön vaikutuksesta johtuen materiaali on perusainetta hauraampaa.

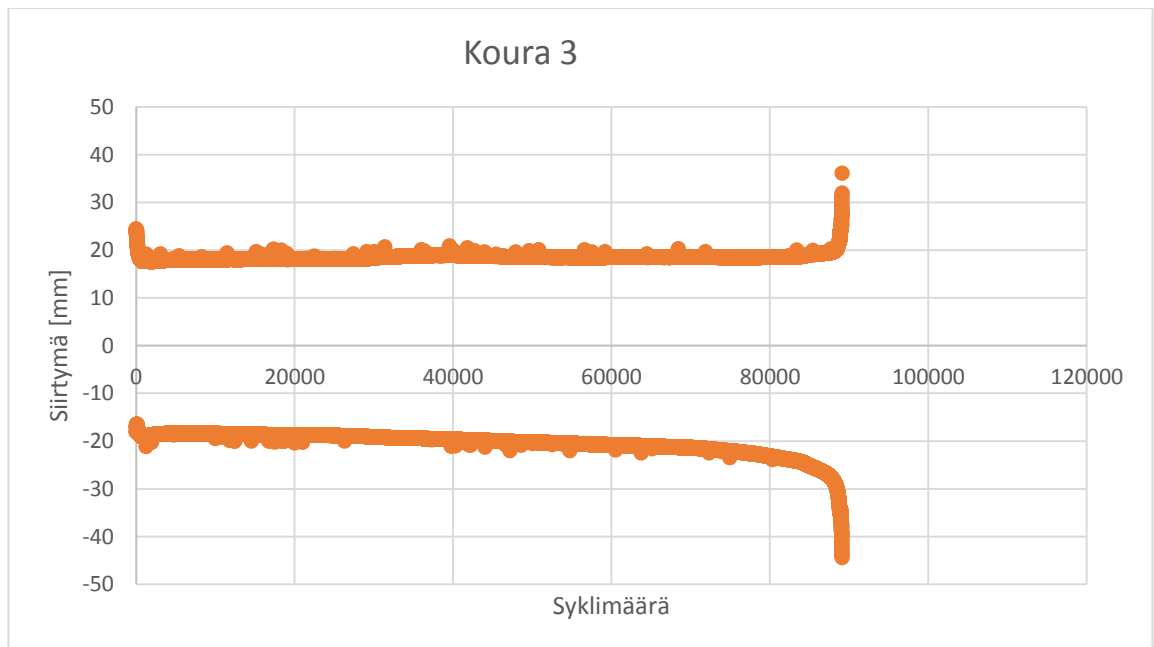


Kuvio 35. Koura 6. Monipalkohitsi päädyssä. Kasvatettu reunaetäisyys.

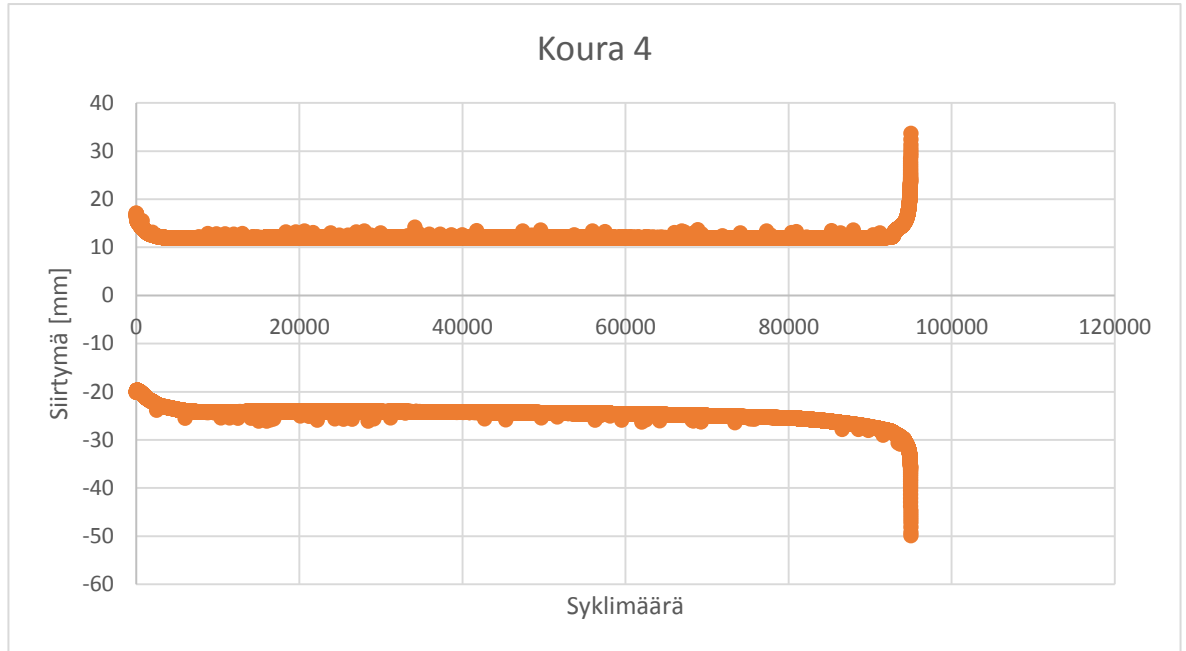
Kuvioissa 36, 37, 38, 39 ja 40 nähdään väsytestestien tulokset kourittain. Pystyakselilla on liikkeen pituus ja vaaka-akselilla syklien määrä on kuvattuna. Erot pystyliikkeessä selittyvät sauman jäykkyyden eroilla. Jäykkyyseroja syntyi sekä päätyhitsin rakenteen erosta, että jossain määrin myös hitsin laatueroista. Hitsit olivat käsinhitsattuja, joten hitseissä voi olettaa olleen laatueroja, vaikka silminnähtäviä hitsausvirheitä ei juuri ollut. Lopun muutos liikkeen pituudessa on särön viimeinen nopea laajeneminen jäännöspinta-alan pienentyessä.



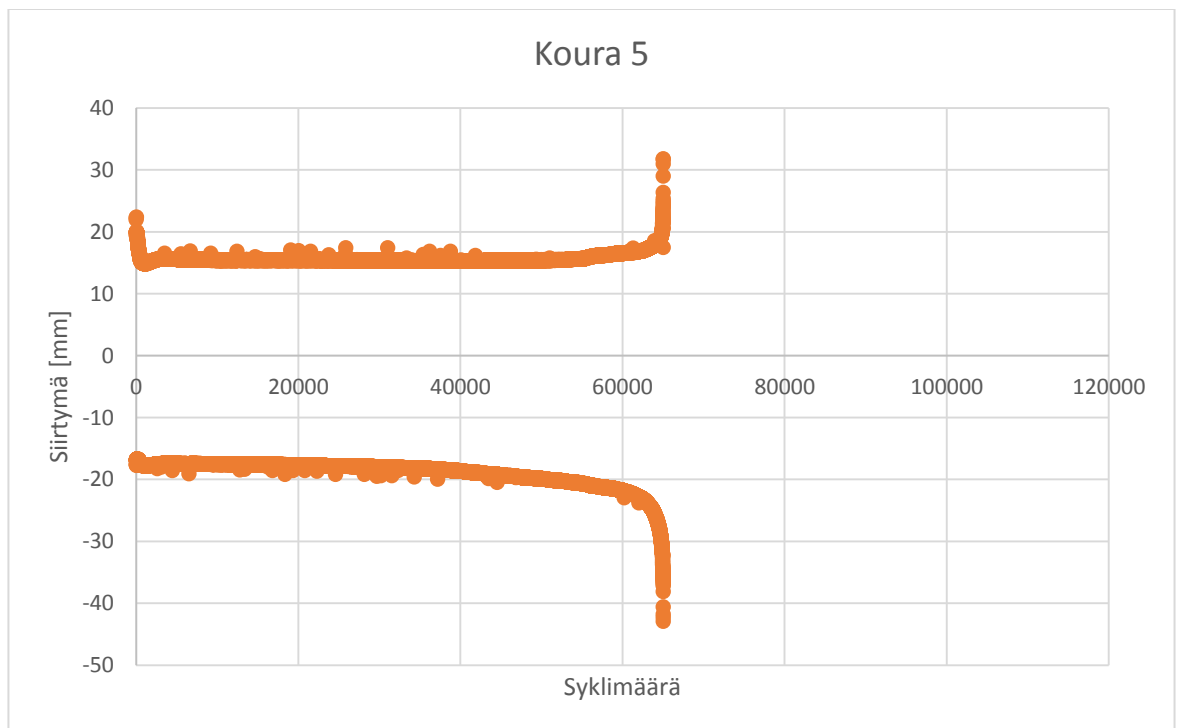
Kuvio 36. Koura 2 6 kN väsytestauksen tulokset.



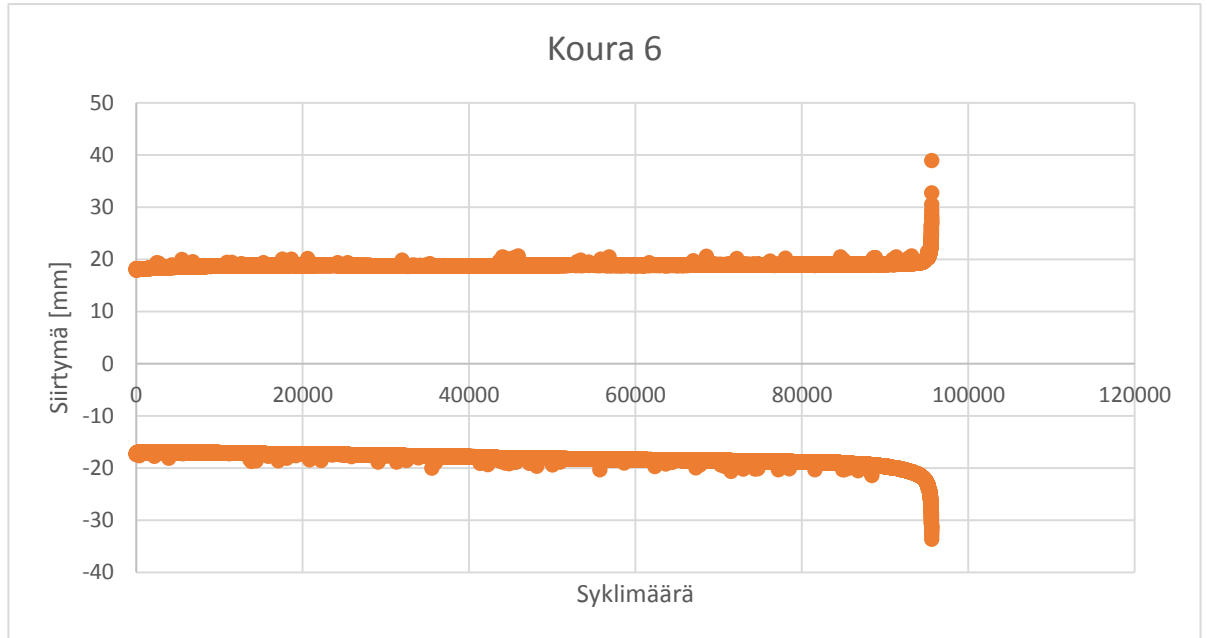
Kuvio 37. Koura 3 6 kN väsytestauksen tulokset.



Kuvio 38. Koura 4 6 kN väsytestauksen tulokset.

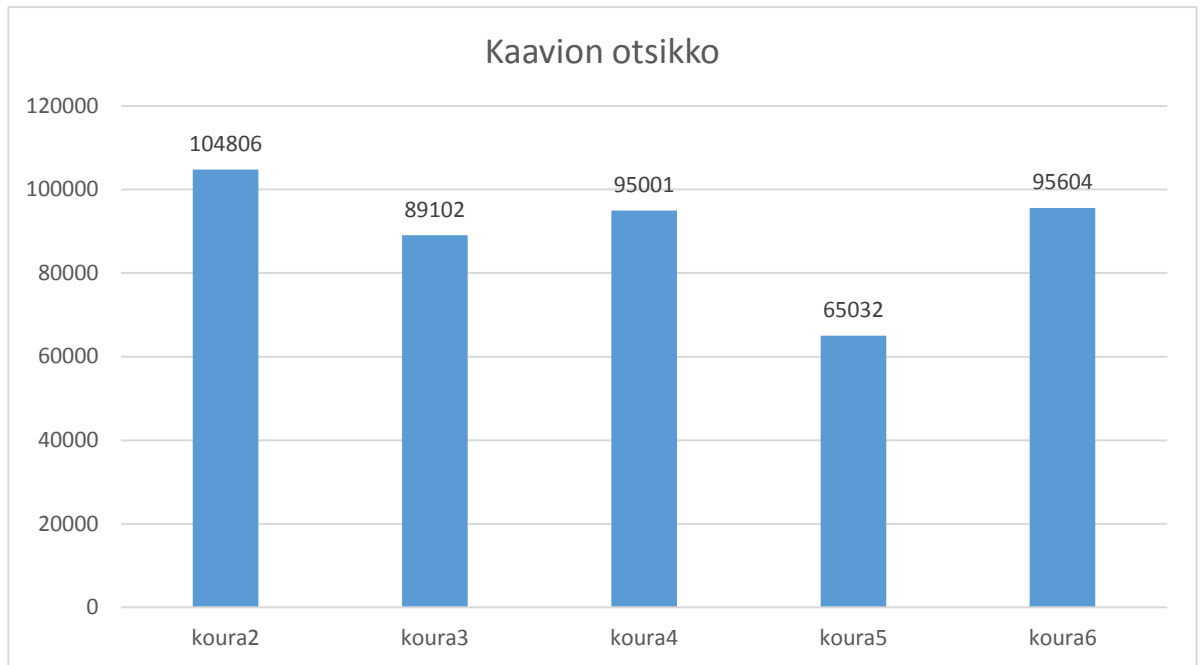


Kuvio 39. Koura 5 6 kN väsytestauksen tulokset.



Kuvio 40. Kourra 6 6 kN väsytestauksen tulokset.

Kuviossa 41 tulokset näkyvät vierekkäin vertailua varten. Kuviosta 41 näkyy alkyperäisen kouran hitsin (koura 5) heikkous suhteessa muihin vaihtoehtoihin. Jo pelkkä reunaetäisyyden kasvattaminen (koura 6) tuotti huomattavan kestävyuden kasvun. Koura 2 osoittautui kuitenkin kestävimmäksi. Kourassa 2 yhdistyy riittävä reunaetäisyys, jouheva hitsisauma sekä tarpeeksi kestävä päätyhiksi. Noin 10% ero (kuvio 41) parhaiden tulosten välillä on kuitenkin parhaimmillaankin vain suuntaa-antava. Kuten mainittu, hitsit ovat käsinhitsattuja, joten yksittäisten kappaleiden hitsin laadun välillä voi olla suuriakin eroja. Tarkempia tuloksia saataisiin kasvattamalla otosta.



Kuvio 41. Eri kourien kestävät syklimäärät.

## 4 Pohdinta

Työn tuloksena saatiin vertailukelpoisia tuloksia eri tavalla tehtyjen hitsisaumojen väsytykestävyydestä puutavarakouran käytössä syntyvän kriittisimmän kuormituksen suhteen. Näillä tuloksilla voidaan parantaa kouran väsytykestävyyttä. Tulokset ovat kuitenkin vain suuntaa antavia. Ensinnäkin testauksessa käytetty kuormitus ei vastaa täysin käytössä syntyvää kuormitusta. Toiseksi, hitsausvirheiden ja materiaalivirheiden aiheuttamien poikkeamien eliminoimiseksi täytyisi tehdä useita kokeita samantlaisilla hitsisaumoilla.

FEM-analyysi tehollisella lovivaikutusmenetelmällä osoittautui varsin paikkansa pitäväksi ja soveltuvaksi hitsien tarkasteluun. Analyysia varten tehtävä 3D-mallinnus osoittautui oppimiskokemukseksi oletetun helppoutensa sijaan. FEM-analyysien arvot ja venymäliuskamittaukset erosivat toisistaan jonkin verran. Tämä johtui todennäköisesti simulaation jäykkyydestä verrattuna testitilanteessa

havaittuun välykseen kiinnikkeessä, joka aiheutti nivelen, jonka suhteen testi-koura pystyi liikkumaan. Liike oli pieni, mutta tarpeeksi selittääkseen tuloksien erot.

Testipenkki oli uusi ja sen käytöstä oli vähän kokemusta. Testejä tehdessä esiintyi ominaisuuksia, jotka hankaloittivat testien tekemistä. AMT Systems antoi tukea näissä tilanteissa ja tulevia testejä varten nämä ongelmatilanteet ja ratkaisut on käyty läpi, jotta tulevat testaajat voivat välttää nämä ongelmat.

Oma osaamiseni ja tietoni hitsien väsymisestä, hitsien väsymisen tarkastelusta Creo Simulate-ohjelmistolla ja siihen liittyvien mallinusten tekeminen Creo Parametric-ohjelmistolla ovat syventyneet huomattavasti verrattuna tietotasoon ennen opinnäytetyön tekemistä. Myös väsytestaus sekä väsytsvaurioiden tulkitseminen tuli tutuksi useita rikki väsyneitä kappaleita tutkaillessa.

Testausta kannattaisi jatkaa isommalla koekappale määrällä hitsausvirheiden vaikutusten eliminoimiseksi tuloksista. Myöskin erilaisia jälkikäsittelemenetelmiä ja niiden vaikutusta kappaleen väsymiskestävyyteen kannattaisi tutkia. Simulaatiossa kriittiseksi osoittautuneen kuormituksen toinen komponentti eli pitkittäis-suunnassa vaikuttavan voiman vaikutus kannattaisi myös tutkia sekä jos mahdollista, kuormien yhdistetty vaikutus kappaleeseen. Yhdistetyn kuormituksen aiheuttaminen kappaleeseen ei kuitenkaan onnistuisi ilman siihen tarkoitukseen suunniteltua kiinnikettä, eikä ole varmaa onnistuisiko se käytössä olleella väsytyksenkillä.



## Lähdeluettelo

1. Outokummun Metalli Oy. 2017. Internet sivusto <http://www.outokummun-metalli.fi/tuotteet>
2. Outokummun Metalli Oy. 2017. Internet sivusto <http://www.outokummun-metalli.fi/yritys>
3. Koneosapalvelu Oy. 2017. Internet sivusto. <http://www.koneosapalvelu.fi/tuotteet/vahva-kahmarit-kuormainkourat-2/c-mallit>
4. Niemi E. & Kemppi J. 1993. Hitsatun rakenteen suunnittelun perusteet. Helsinki: Painatuskeskus Oy
5. Härkönen T & Tervola T. 1993. Lujat hitsattavat teräkset. Helsinki: Tammer Paino Oy
6. Hobbacher, A. Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components. IIW document IIW-1823-07 ex XIII-2151r4-07/XV-1254r4-07. 2008.
7. Polom, J. 2014. Structural Analysis of Welded Connections Using Creo Simulate. Unclassified, U.S. Army TARDEC.

## Liitteet

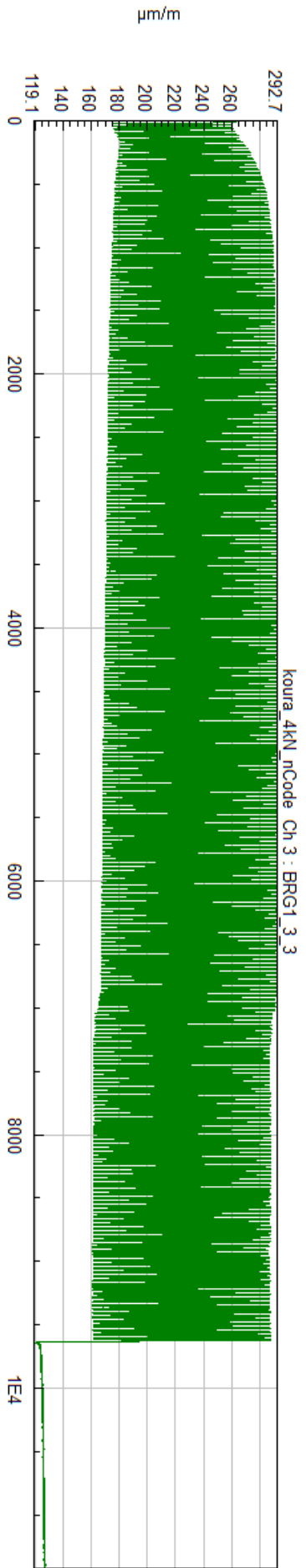
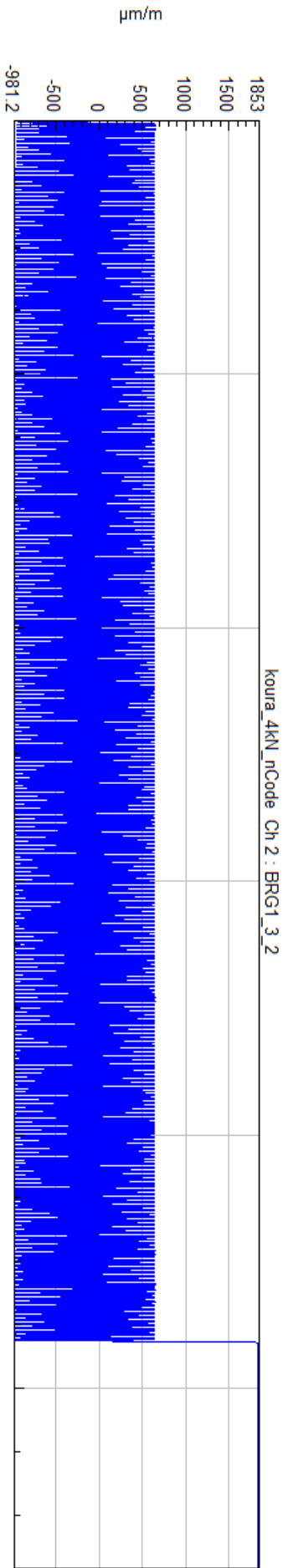
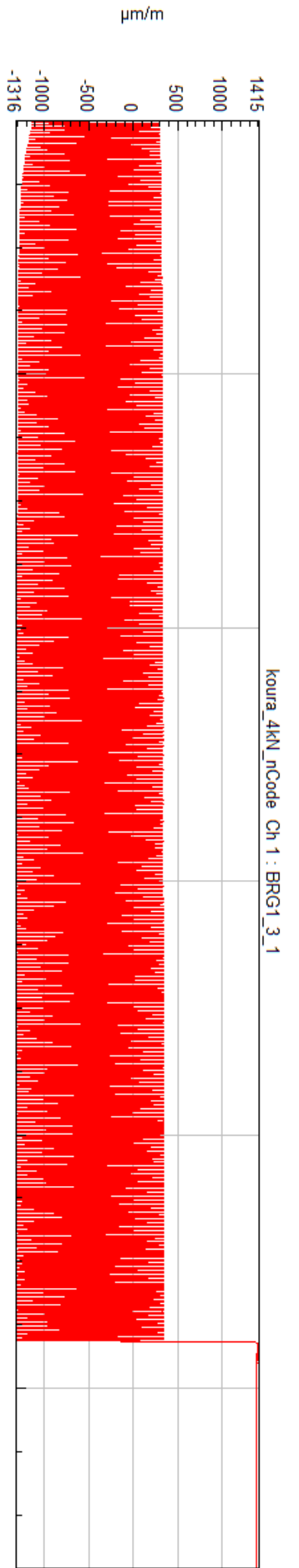
- 1 Venymäliuskadata, von Mises vertailujännitys 4 kN testissä
- 2 Venymäliuskadata, venymät 4 kN testissä
- 3 Venymäliuskadata, von Mises vertailujännitys 6 kN testissä
- 4 Venymäliuskadata, venymät 6 kN testissä
- 5 FEM-analyysi, 4 kN kuormalla simuloitu siirtymä
- 6 FEM-analyysi, 4 kN kuormalla simuloitu von Mises vertailujännitys
- 7 FEM-analyysi, 4 kN testistä saadulla todellisella siirtymällä simuloitu von Mises vertailujännitys
- 8 FEM-analyysi, 6 kN kuormalla simuloitu siirtymä
- 9 FEM-analyysi, 6 kN kuormalla simuloitu von Mises vertailujännitys
- 10 FEM-analyysi, 6 kN testistä saadulla todellisella siirtymällä simuloitu von Mises vertailujännitys

Graphical Editor XY Display

koura\_4kN\_nCode\_Ch 1 : Von Mises Stress (Rosette Ch. 1.2.3) : Stress

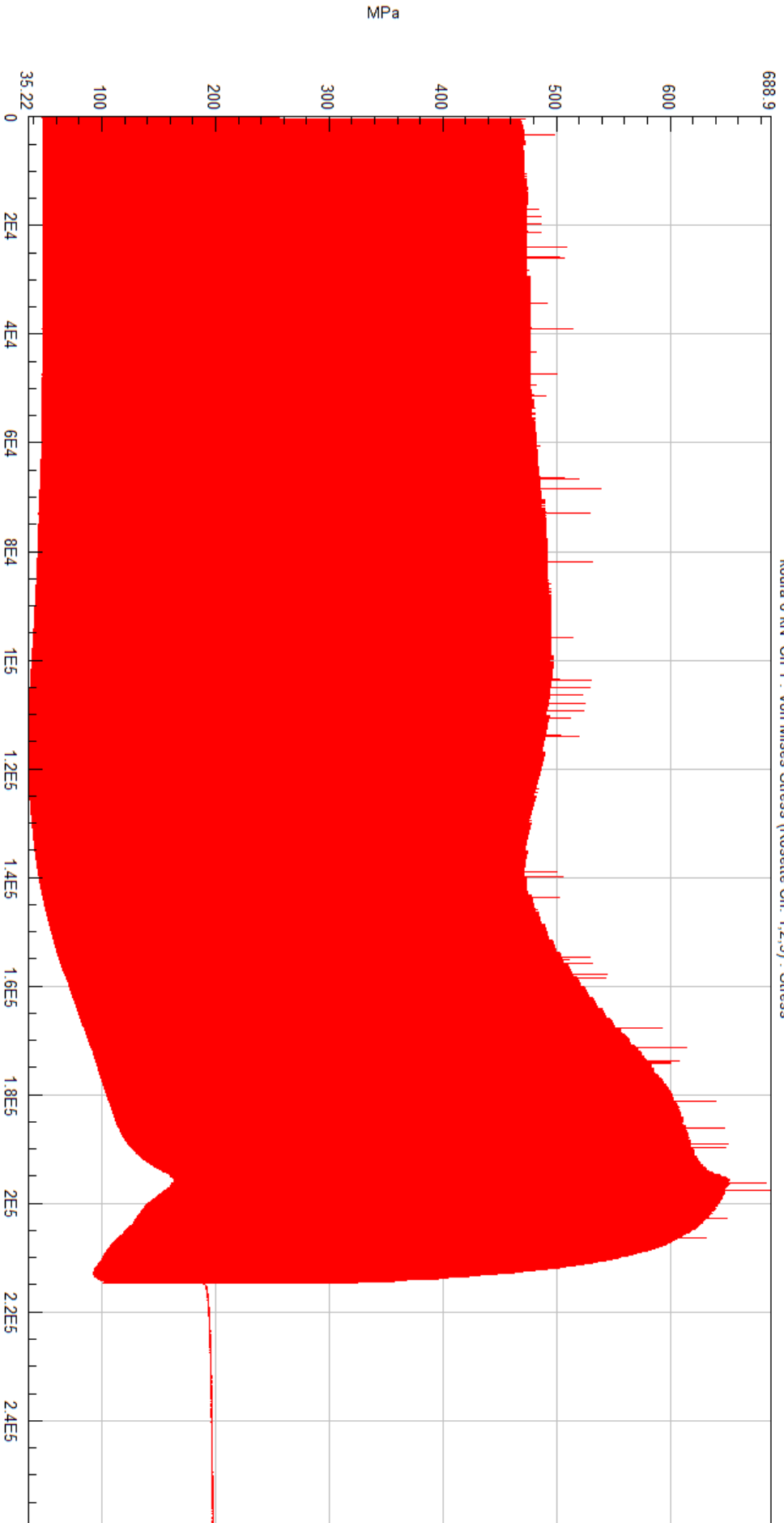


Graphical Editor XY Display

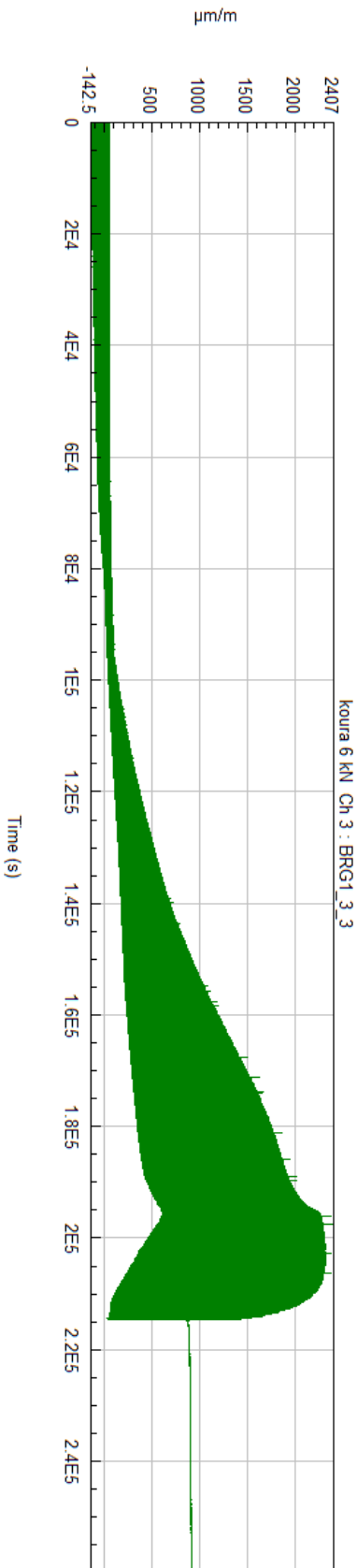
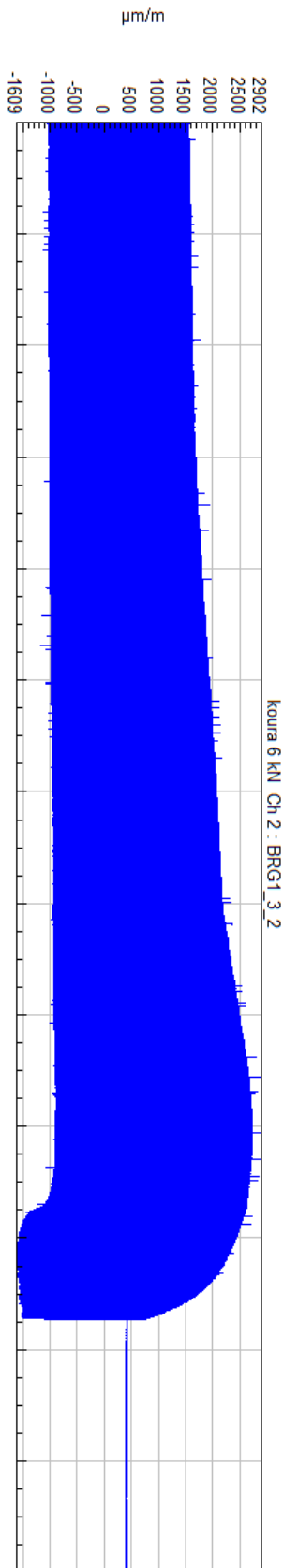
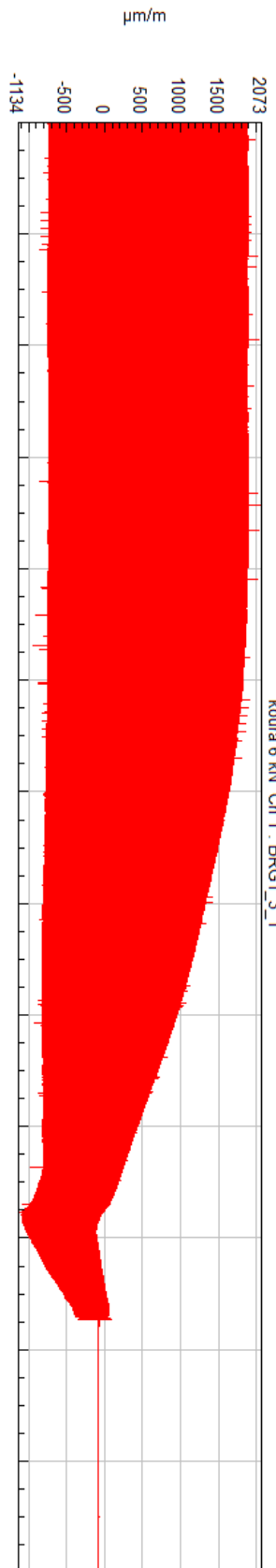


Graphical Editor XY Display

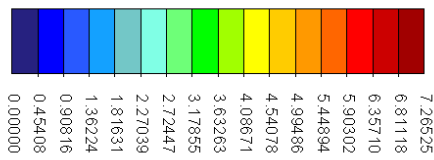
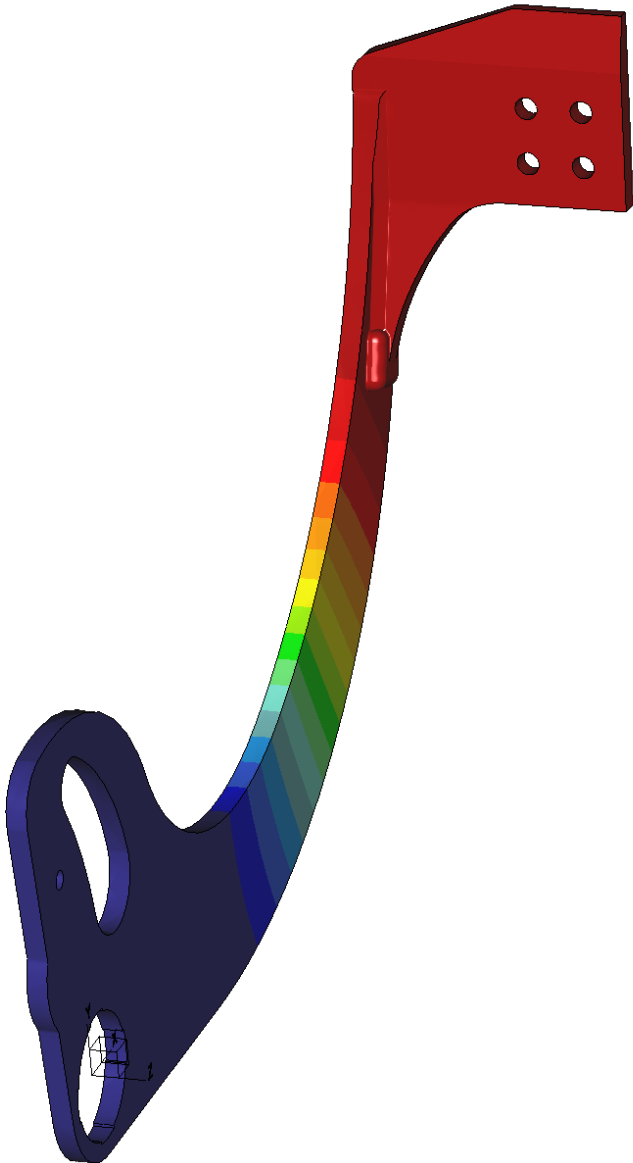
koura 6 kN Ch 1 : Von Mises Stress (Rosette Ch. 1,2,3) : Stress



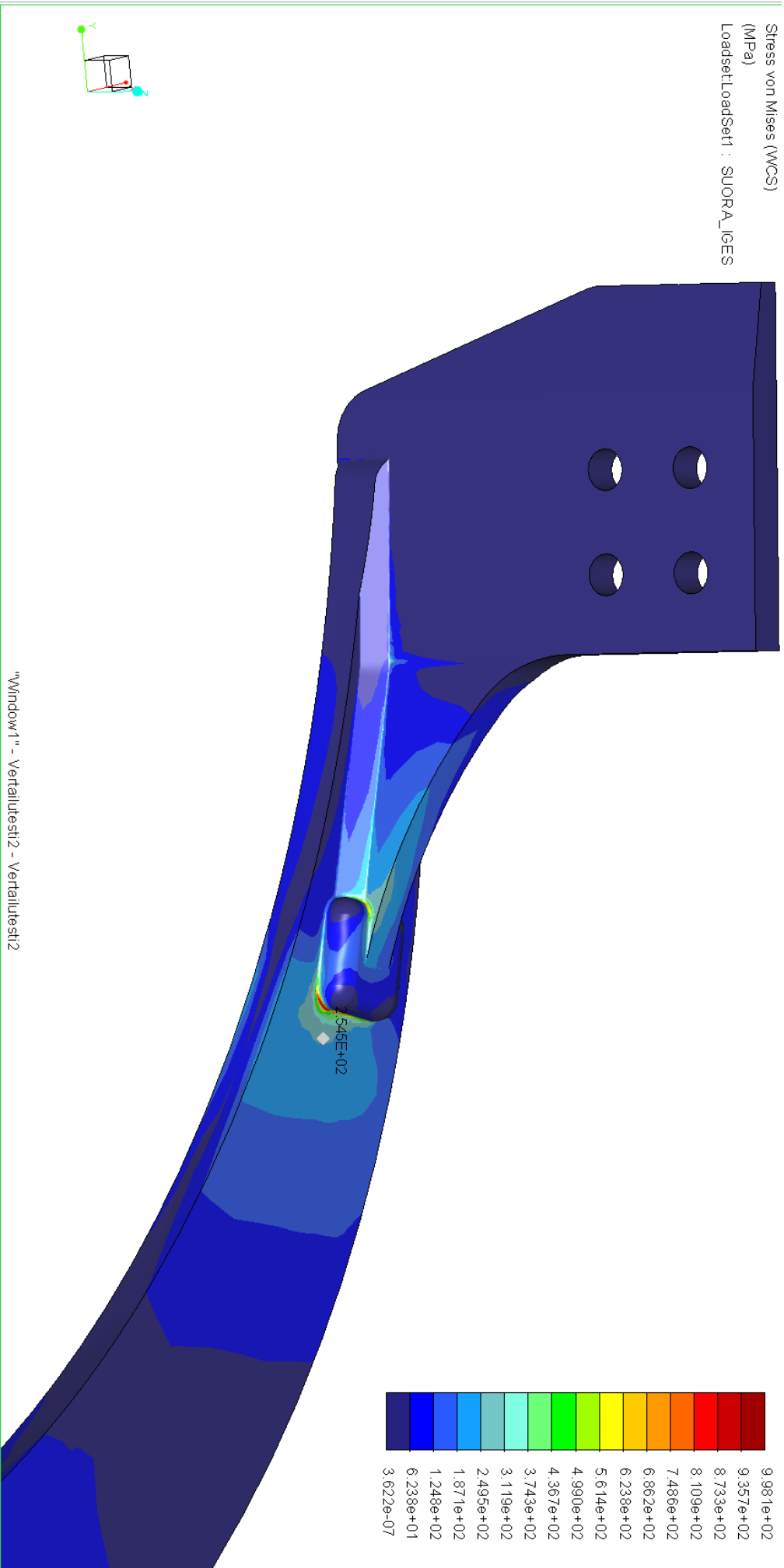
Graphical Editor XY Display



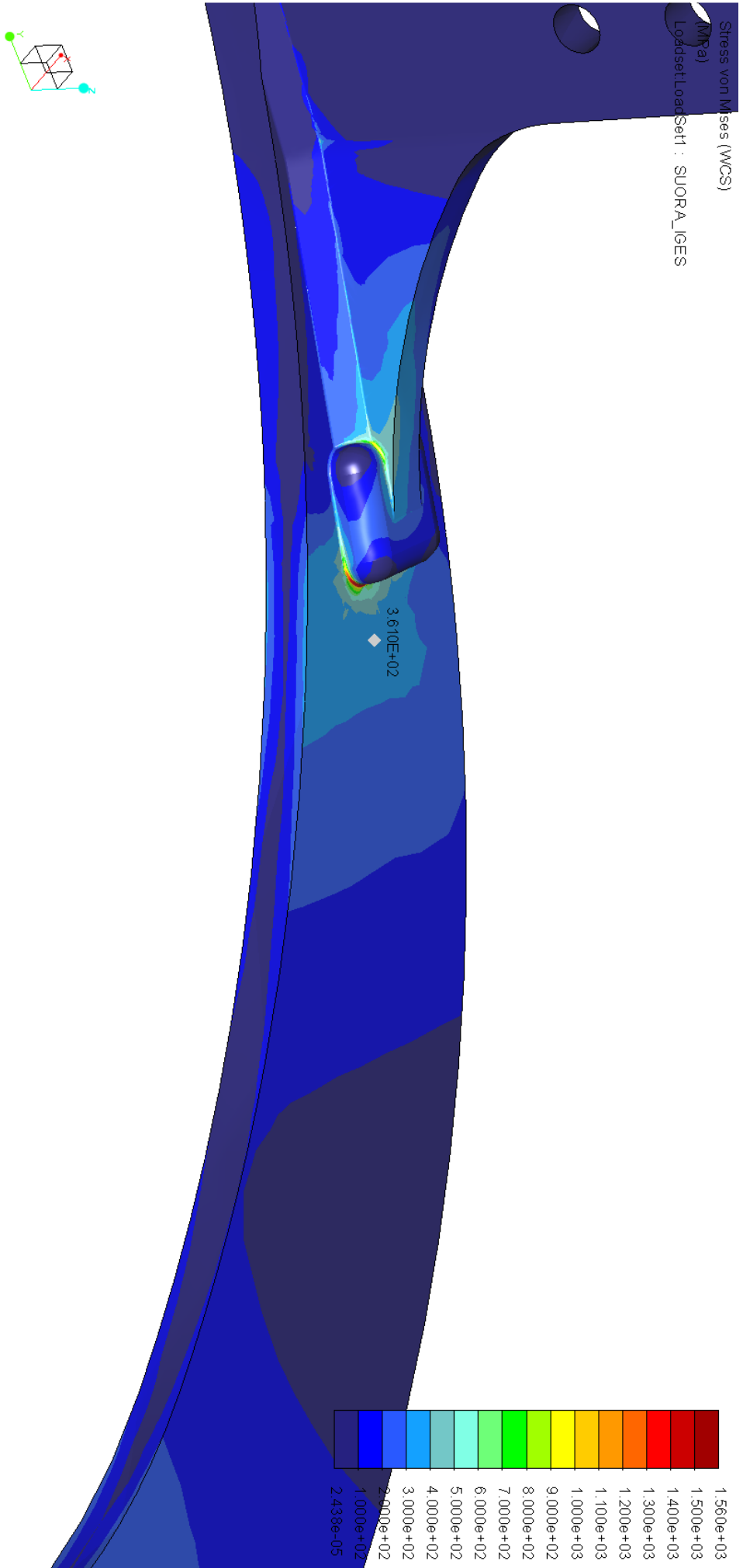
Displacement Mag (WCS)  
(mm)  
Max Disp 7.2653E+00  
Loadset: LoadSet1 : SUORA\_LIGES



"Window1" - VertailuTest2 - VertailuTest2

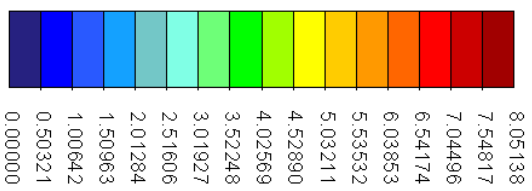
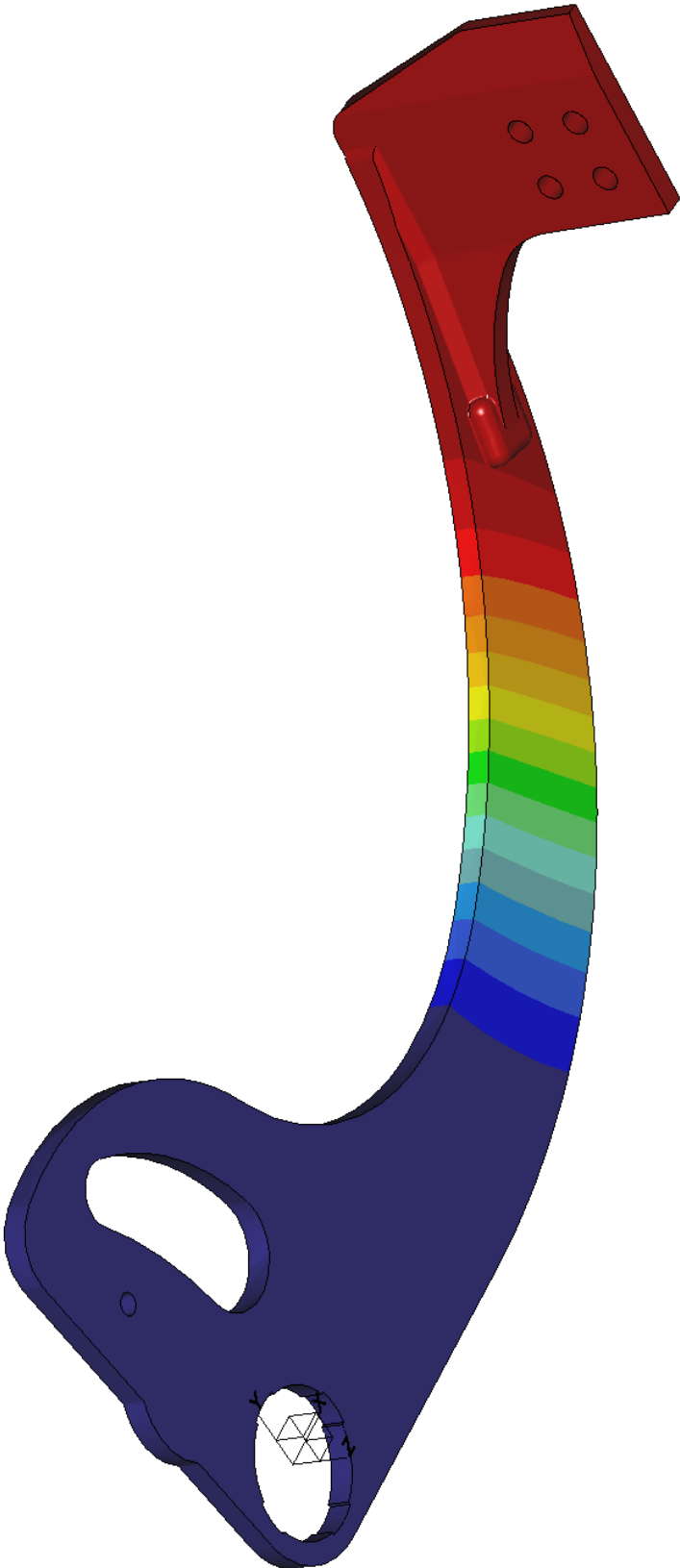
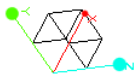






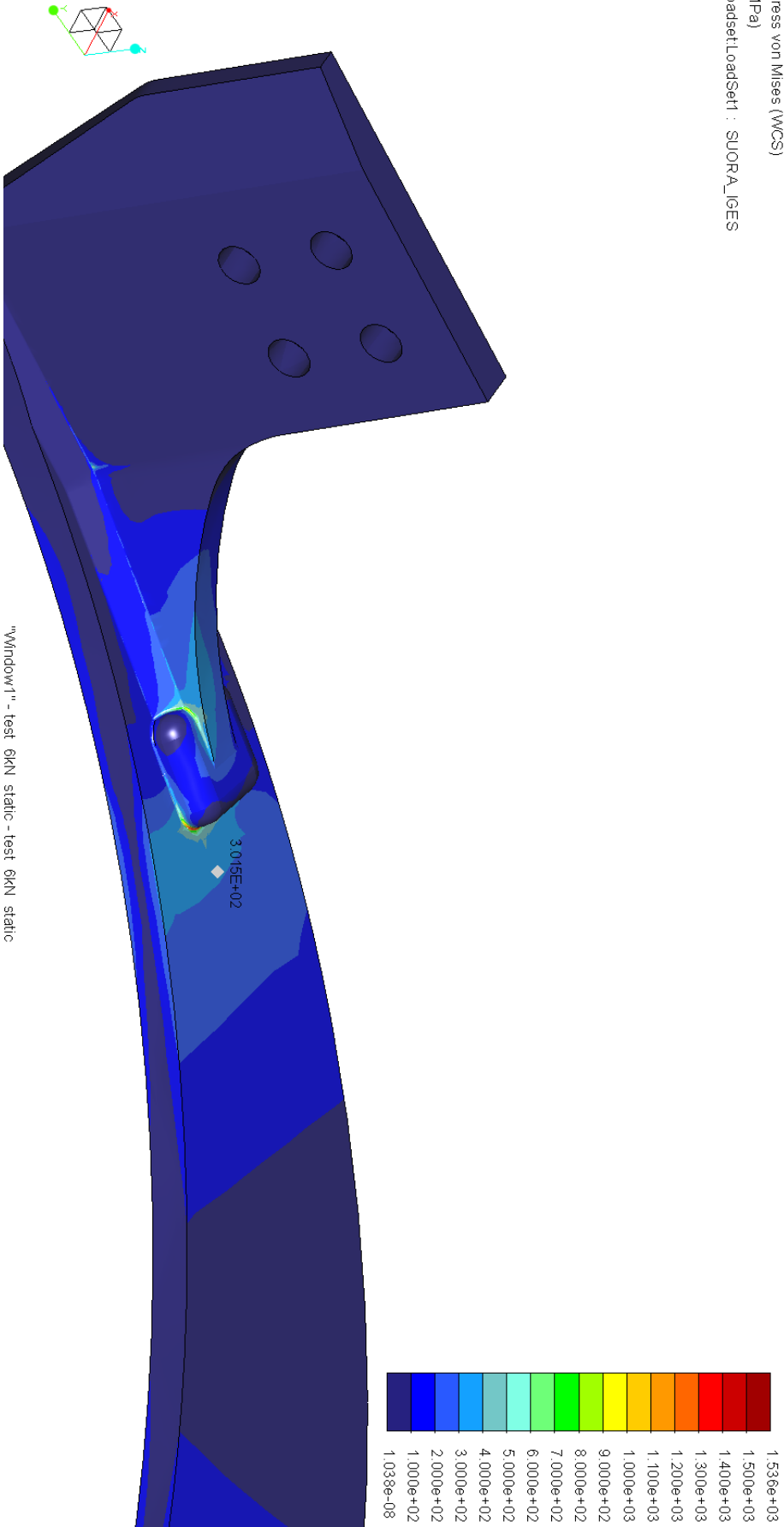
"Window 1" - pakkosiirt\_vert - pakkosiirt\_vert

Displacement Mag (WCS)  
(mm)  
Max Disp: 8.0514E+00  
Loadset: LoadSet1 : SUORA\_IGES

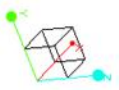


"Window1" - test\_6kN\_static - test\_6kN\_static

Stress von Mises (WCS)  
(MPa)  
Loadset: LoadSet1 : SUORA\_I9ES



Stress von Mises (WCS)  
(MPa)  
LoadsetLoadSet1 : SUORA\_IGES



"Window1" - pakko\_siirtyama\_15mm - pakko\_siirtyama\_15mm

2.888e+03
2.705e+03
2.525e+03
2.345e+03
2.164e+03
1.984e+03
1.804e+03
1.623e+03
1.443e+03
1.263e+03
1.082e+03
9.018e+02
7.215e+02
5.411e+02
3.607e+02
1.804e+02
1.458e-05

6.050E+02