

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

LUT School of Energy Systems

LUT Kone

BK10A0401 Kandidaatintyö ja seminaari

VINOHITSIEN STAATTINEN LUJUUS ULTRALUJILLA TERÄKSILLÄ
INCLINED WELDMENT STATIC STRENGTH IN ULTRAHIGH STRENGTH STEELS

Lappeenranta 02.04.2015

Joel Salo

Työn ohjaaja: Professori Timo Björk

Työn tarkastajat: Timo Björk, Timo Nykänen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
LUT School of Technology
LUT Kone

Joel Salo

VINOHITSIEN STAATTINEN LUJUUS ULTRALUJILLA TERÄKSILLÄ

Kandidaatintyö

2015

37 sivua, 21 kuvaa, 6 taulukkoa ja 3 liitettä

Hakusanat: ultraluja teräs, vinohitsi, staattinen lujuus, S960 QC, UHHS, hitsaaminen

Ultralujien terästen käyttö yleistyy laajasti erilaisissa rakenteissa. Nykyaikaiset standardit ylittävät vain 700 MPa:liin asti vaikka nykyään on saatavilla reilusti yli 1000 MPa:n lujuusluokkien rakenneteräksiä. Ultralujia teräksiä hitsattaessa muodostuu muutosvyöhykkeelle (HAZ) pehmeä vyöhyke, jossa lujuus voi laskea. Tämän työn tarkoituksena on selvittää voidaanko pehmeän vyöhykkeen aiheuttama alilujuus ohittaa hitsaamalla liitos kulmaan. Kokeellisessa osuudessa tehdään vetokoe kulmille 0°, 20°, 30°, 45° ja 60° käyttäen materiaalia S960 QC. Liitoksesta tehdään myös yksinkertaistettu teoreettinen vertailujännityksen malli. Tutkimuksesta rajoitettiin pois työn laajuuden takia FEM-laskenta ja väsymistarkastelu. Teoreettisella mallilla kestävyudeksi huonoimmaksi saadaan 30° kulmalla ja paras tulos saadaan lähestyessä 90° kulmaa. Koetulokset antoivat seuraavanlaiset tulokset verrattuna materiaalin teoreettiseen kapasiteettiin: 0° -1.7 %, 20° - 3.8 %, 30° -6.4 %, 45° -6.6 % ja 60° +6.4 %. Paras kapasiteetti saatiin siis 60° kulmalla. Tutkimuksen tulosten perusteella ultralujilla teräksillä hitsaus tulisi suorittaa suurempaan kulmaan, esim. kokeessa käytetty 60°, jolloin liitoksesta ei tule kriittinen piste murtumalle. 45° ja pienemmillä kulmilla hitsistä tulee kriittinen ja etenkin 30° kulman hitsejä tulisi välttää. Tulosten perusteella kulman merkitys ei kuitenkaan ole suuri, alle 7 %.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

SYMBOLILUETTELO JA LYHENTEET

1	JOHDANTO	5
1.1	Tutkimusmenetelmät ja rajaus	5
1.2	Kirjallisuuskatsaus	6
2	TEORIA	9
3	KOKEELLINEN OSUUS	11
3.1	S960 QC-materiaalin kuvaus	11
3.1.1	S960 QC-teräksen hitsaaminen	12
3.2	Koekappaleet	13
3.3	Koejärjestely	15
4	TULOKSET	19
5	TULOSTEN TARKASTELU JA POHDINTA	24
5.1	Tulosten tarkastelu ja johtopäätökset	24
5.2	Pohdinta	27
6	YHTEENVETO	30
	LÄHTEET	31

LIITTEET

LIITE I: Teoreettisen vertailujännityksen laskenta

LIITE II: Voima-siirtymä kuvaajat testikappaleille

LIITE III: Käännetyn jännityksen vertailuluvun laskenta

SYMBOLILUETTELO JA LYHENTEET

A_5	murtovenymän nimellinen arvo [%]
A'	kappaleen hitsin suuntainen poikkipinta-ala [mm ²]
F_{mat}	Materiaalin teoreettisen kapasiteetin mukainen voima [N]
F_{max}	Koetuloksissa oleva maksimi voima [N]
$F_{y'}$	voima koekappaleen hitsiä kohtisuorasti [N]
$F_{x'}$	voima koekappaleen hitsin suuntaisesti [N]
HAZ	hitsausliitoksen muutosvyöhyke
MAG	Metal Active Gas welding
NDT	nondestructive testing
R_m	murtolujuus [MPa]
R_{eH}	myötölujuuden ylempi arvo [MPa]
R_{eL}	myötölujuuden alempi arvo [MPa]
$R_{p0,2}$	myötölujuuden arvo kun 0.2 % pysyvä venymä [MPa]
$t_{8/5}$	hitsausliitoksen jäähtymisaika 800 °C:sta 500 °C:een sularajalla [s]
α	hitsin suunta koekappaleen leveys suuntaan nähden [°]
ε	venymä [%]
σ_{vert}	vertailujännitys [MPa]
σ_{\perp}	hitsisauman kohtisuora normaalijännitys [MPa]
τ_{\parallel}	hitsisauman mukainen leikkausjännitys [MPa]

1 JOHDANTO

Tässä kandidaatintyössä tutkitaan ultralujien terästen vinojen päittäishitsien hitsauskulman vaikutusta lujuuteen käyttäen materiaalia S960 QC. Ultralujien materiaalin käyttö yleistyy, kun haluttua tehdä yhä keveämpiä rakenteita lujuudesta tinkimättä. Ultralujilla teräksillä kevyempiä rakenteita saadaan, koska teräksissä myötö- ja murtorajat ovat noin kahdesta kolmeen kertaan suurempia kuin tavallisilla rakenneteräksillä. Näitä rakenteita joudutaan usein liittämään toisiinsa hitsaamalla. Hitsauksessa tuotu energia aiheuttaa lämpötilan nousua ja laskua materiaalissa, mikä aiheuttaa erilaisia vyöhykkeitä, jota kutsutaan hitsausliitoksen muutosvyöhykkeeksi (HAZ). Ultralujilla teräksillä hitsauksessa ongelmaksi muodostuu pehmeä vyöhyke, jonka muutosvyöhykkeen alueella voi kovuus ja lujuus laskea. Tästä johtuen rikkoutuminen ei muodostu perusaineeseen vaan pehmeälle vyöhykkeelle hitsin viereen.

Ultralujien teräsrakenteiden tutkiminen on tärkeää, koska niiden käyttö yleistyy mutta standardit ylettävät vain 700 MPa:liin asti, vaikka nykyään on saatavilla reilusti yli 1000 MPa:n lujuusluokkien teräksiä.

1.1 Tutkimusmenetelmät ja rajaus

Tässä työssä tehdään kokeellinen tutkimus, joka on vetokoe S960 QC – materiaalista valmistetuille teräslevyille. Vetokoe suoritetaan viidelle eri hitsauskulmalle: 0°, 20°, 30°, 45° ja 60°. Näillä kulmilla yritetään optimoida vinohitsin kulma mahdollisimman kestäväksi. Hitsaus tapahtuu MAG-hitsausprosessilla käyttäen osaviistettyä V-railoa. Lisäksi tehdään hieman kirjallisuustutkimusta, jossa selvitetään millaisia tutkimuksia ultralujien terästen hitsauksesta on jo tehty. Aluksi työssä muodostetaan yksinkertainen teoreettinen malli vinohitseista. Sitten työssä käydään läpi perusteita materiaalista, koekappaleista ja vetokokeesta. Sitten esitetään saadut vetokokeen tulokset ja lopuksi on tulosten tarkastelua ja pohdintaa.

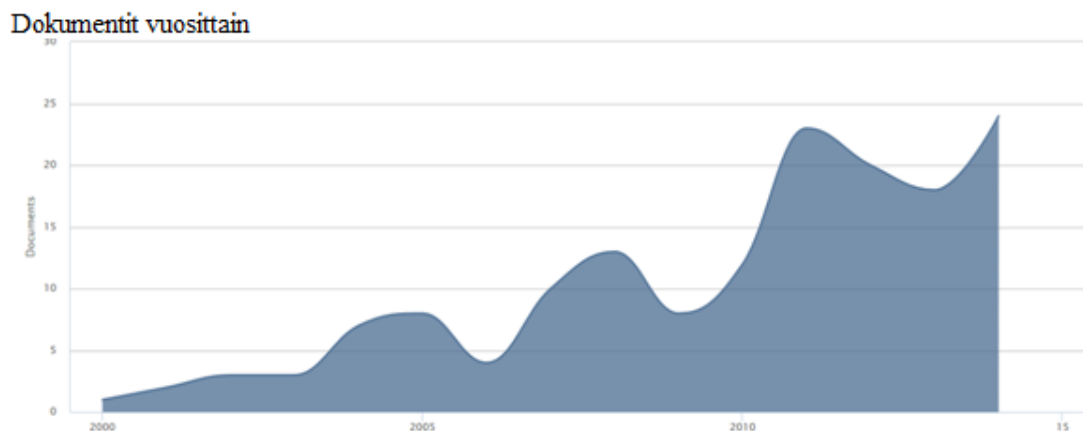
Vaikka väsymislujuus on tärkeä osa-alue ultralujilla teräksillä, ei tässä kandidaatintyössä työn laajuuden vuoksi siihen aiheeseen perehdytä. Lisäksi johtuen ultralujia teräksiä

hitasessa muodostuvan pehmentyneen alueen mallintamisen hankaluudesta olen päättänyt jättää FEM-mallintamisen pois tästä työstä.

Työn tavoitteena on selvittää, onko hitsaamisen kulmalla päittäisliitoksessa vaikutusta rakenteen lujuuteen. Tämän jälkeen tutkitaan onko mahdollista tavoitella parempaa staattista kestävyyttä rakenteelle hitsaamalla pitempää hitsiä, kun käytetään suurempaa hitsauskulmaa.

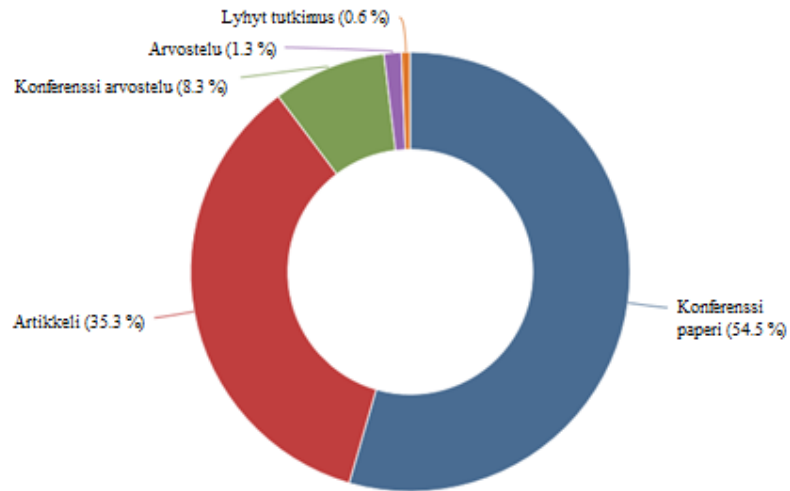
1.2 Kirjallisuuskatsaus

Ultralujia teräksiä on viimeaikoina aloitettu tutkimaan laajalti mm. väsymislujuuden ja pienahitsien osalta. Kuvassa 1 on esitetty SCOPUS-hakupalvelun ultralujiin teräksiin ja niiden hitsaukseen liittyvien dokumenttien määrät. Kuvassa näkyy kuinka dokumenttien määrä on ollut viimeaikoina kasvussa, samalla kuin valmistajat kehittävät uusia parempia ultralujia teräksiä. Varsinkin vuoden 2011 jälkeen on dokumentteja tehty huomattavasti aikaisempaa enemmän. Vuonna 2014 dokumentteja julkaistiin enemmän kuin minään aikaisempana vuonna, joten ultralujien terästen hitsaus vaikuttaa olevan kiinnostava aihepiiri tänä päivänä. SCOPUS-hakupalvelun dokumenteista 54,5 % on konferenssi papereita ja 35,5 % on artikkeleita. Loput 10 % dokumenteista on lähinnä arvosteluja muista dokumenteista.



Kuva 1. Ultralujiin teräksiin ja hitsaukseen liittyvien artikkeleiden määrät Scopus-palvelussa vuosilta 2000 – 2014 (mukaillen Scopus, 2014).

Dokumentti tyypit



Kuva 2. Dokumentit tyyppien mukaisesti (mukaillen Scopus, 2014).

Seuraavaksi on katsottu, että minkälaisia aiheita on jo tutkittu liittyen ultralujiin teräksiin ja hitsaukseen.

Eurokoodi 3:n 1993-1-8 ja lujille teräksille aina 700 MPa asti tehdyn lisäyksen 1993-1-12 mukaan läpihitsattu päittäisliitos mitoitetaan heikomman osan mukaan, jos vetokokeella voidaan mitata että liitos saavuttaa vähimmäismyötörajan ja vähimmäisvetomurtolujuuden mikä on perusaineelle määrätty (SFS-EN 1993-1-8, 2005, s.48). 1993-1-12 lisäyksessä lujemmilla materiaaleilla jos lisäaine on heikompaa kuin perusmateriaali, niin mitoitus pitäisi tehdä lisäaineen lujuuden mukaan (SFS-EN 1993-1-12, 2007, s.7-8). Standardi on voimassa kuitenkin vain 700 MPa asti, joten sitä ei tällä materiaalilla voida hyödyntää.

Tässä tutkimuksessa käytettävää S960 QC-materiaalia on tutkittu aikaisemminkin Lappeenrannan Teknisessä Yliopistossa. Timo Penttilä (2013) diplomityössään: Eri MAG-hitsausprosessien ja -parametrien vaikutus suurlujuusteräksestä valmistetun otsapienahitsin äärikestävyyteen, muodonmuutoskykyyn ja vauriomuotoon, on tutkinut S960 QC-materiaalin käyttäytymistä levyjen ristiliitosten pienahitseissa käyttäen erilaisia MAG-hitsaus menetelmiä. Penttilä (2013) havaitsi työssään ongelmaksi sularajavaurion pulssikaarella hitsatuissa koekappaleissa, sen sijaan pehmenneen vyöhykkeen vaurioituminen ei ollut ongelma. Penttilä (2013) esittää diplomityössään pienahitseissa

tasalujaan liitokseen ratkaisuksi monipalkkohitsausta ja K-railoa. (Penttilä, 2013, s. 112–113.)

Toinen Lappeenrannan Teknillisessä Yliopistossa tehty tutkimus S960 teräksestä on Björkin, Toivosen ja Nykäsen (2012) tekemä tutkimus: ”Capacity of fillet welded joints made of ultra-high strength steel” pienahitsien kapasiteetista. Siinä esille tuli lämmöntuonnin kontrolloinnin tärkeys hitsatessa ultralujia teräksiä sekä hitsausliitoksen muutosvyöhyke HAZ. (Björk, Toivanen & Nykänen, 2012, s. 71–84). LUT:ssa on myös tutkittu väsymiskestävyyttä ultralujalla teräksellä Optim 1100 QC, Nykäsen, Björkin ja Laitisen (2012) tutkimuksessa ”Fatigue strength prediction of ultra-high strength steel butt-welded joints”. Siinä tutkimuksessa on käytössä samanlainen teräs, kuin tässä työssä tutkittava Optim S960 QC, mutta hieman suuremmilla lujuusarvoilla. Tutkimuksessa havaittiin, että ultralujien terästen väsymislujuus on parempi kuin heikommilla materiaaleilla, jos hitsauksessa ei ole sattunut virheitä. Tutkimuksen mukaan etenkin halkeaman tapaisia hitsausvirheitä ei sallita lainkaan, väsymiskestävyyttä tavoiteltaessa. Lisäksi tutkimuksessa havaittiin ennalta arvioitujen väsymislujuuksien olevan 21.7 % - 25.9 % korkeampi, kuin mitä se oli kokeellisilla menetelmillä. (Nykänen, Björk & Laitinen, 2012, s. 469–482.)

Oulun yliopistossa on tutkittu lujien ja ultralujien terästen hitsauksen lujuutta tutkimalla HAZ-aluetta. Tutkimuksessa on vertailtu eri $t_{8/5}$ aikoja (hitsausliitoksen jäähtymisaika 800 °C:sta 500 °C:een sularajalla) kahdella offshore-teräksellä sekä Ruukin S960 QC teräksellä. Tutkimuksessa on etsitty optimi jäähtymisaikaa tekemällä kokeet 5, 10, 15 ja 20 sekunnilla. Lisäksi tutkimuksessa on tehty iskukoe -40 °C lämpötilassa. (Laitinen et al. 2013, s. 711–716.)

Monessa tutkimuksessa tuli esille HAZ ja lämmöntuonti, kun puhutaan ultralujista teräksistä ja hitsauksesta. Vaikuttaa siltä, että näillä materiaaleilla on hankalaa saada aikaiseksi tasaluja hitsisauma, koska hitsin rajaviivalle muodostuu pehmentynyt alue. Vinohitsien kulman optimoinnista päittäishitsissä staattisella kuormalla en löytänyt kirjallisuudessa mainintaa, joten tämä aihepiiri vaatii lisätutkimusta. Tämän tiedon puuttumiseen tässä työssä pyritään vastaamaan.

2 TEORIA

Teoreettinen kestävyys malleille lasketaan tässä työssä yksinkertaistettuna vertailujännityksen kautta yhtälöstä 1 (Valtanen, 2013, s. 487). Laskenta tehtiin Mathcad 15 – ohjelmalla, joka on esitettyinä liitteessä 1.

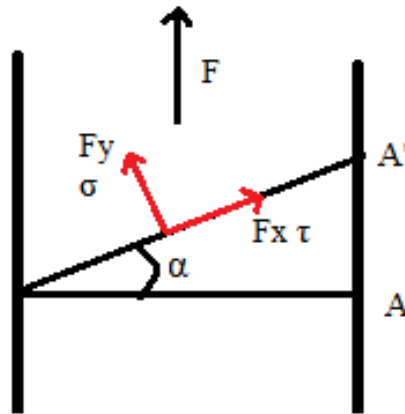
$$\sigma_{vert} = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 * \tau_{\parallel}^2} \quad (1)$$

$$\sigma_{\perp} = \frac{F_{y'}}{A'} = \frac{F * \cos \alpha}{A / \cos \alpha} = \sigma * \cos^2 \alpha \quad (2)$$

$$\tau_{\parallel} = \frac{F_{x'}}{A'} = \frac{F * \sin \alpha}{A / \cos \alpha} = \sigma * \sin \alpha * \cos \alpha \quad (3)$$

Yhtälössä 1 σ on kohtisuora normaalijännitys, joka saadaan yhtälöstä 2 ja τ on hitsisauman mukainen leikkausjännitys, joka saadaan yhtälöstä 3.

Yhtälössä 2 $F_{y'}$ on hitsisaumaa kohtisuoraan vaikuttava voima ja A' ovat hitsisauman kulman mukainen pinta-ala. Yhtälössä 3 $F_{x'}$ on hitsisauman mukainen voima. Molemmissa yhtälöissä σ on murtojännitys 1000 MPa. Kuvassa 3 on selvennetty merkintöjä.



Kuva 3 Selventävä kuva käytetyistä merkinnöistä.

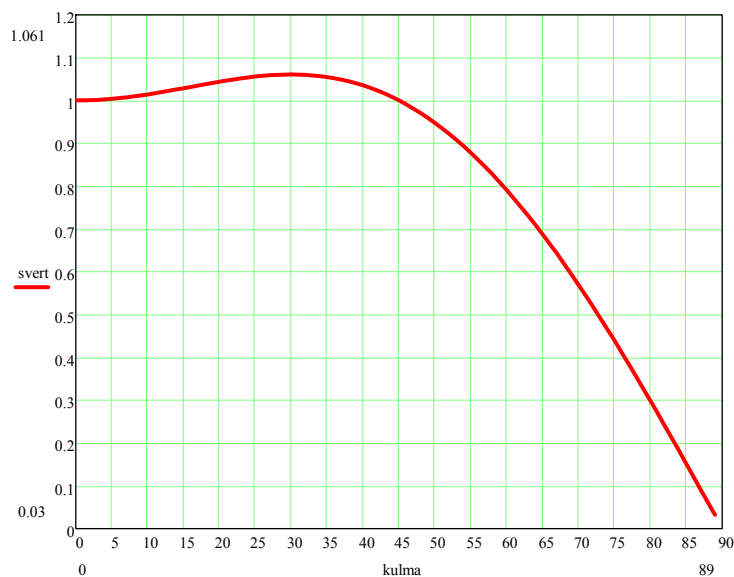
Tällä teorialla laskettuna on oheiseen taulukkoon 1 listattu vertailujännitykset kun kulmat ovat kokeellista osuutta vastaavat.

Taulukko 1. Vertailujännitykset eri hitsauskulmilla.

Kulma	0°	20°	30°	45°	60°
Vertailujännitys [MPa]	1000	1044	1061	1000	791

Tuloksissa murtorajana on käytetty 1000 MPa, jolloin tulosten 0° ja 45° kulmilla, kulmalla ei ole vaikutusta jännitykseen. 20° ja 30° kulmilla vertailuarvo on suurempi kuin murtoraja, joka tarkoittaa, että liitoksen jännitys on suurempi eli kappaleen voimankesto on heikompi. Ainoana kulmana 60° saa pienemmän vertailuarvon kuin murtoraja. Tämä tarkoittaa, että kappaleen jännitys hitsissä on pienempi kuin kohtisuora jännitys koekappaleessa.

Alla olevaan kuvaajaan 4 on piirretty vertailujännitykset kulmilla 0° - 90°. Siinä on käytetty kuorman aiheuttaman jännityksen kertoimena $\sigma = 1$. Tällöin 1 suuremmat arvot tarkoittavat suurempaa vertailujännitystä eli huonompaa kestoja ja pienemmät arvot sitä, että vertailujännitys hitsissä on pienempi kuin koekappaleen kohtisuora normaalijännitys.



Kuva 4. Yksinkertaistetun teorian antamat vertailujännitykset kulmilla 0°- 90°.

3 KOKEELLINEN OSUUS

Tutkimuksessa arvioidaan vinohitsien kulman vaikutusta, tekemällä koekappaleille vetokoe, josta saatavia tuloksia verrataan laskettuihin tuloksiin. Koekappaleita on 5 kappaletta, joista jokaiseen on hitsattu eri kulmaan hitsisauma. Koekappaleet ovat valmistettu S960 QC – materiaalista ja niistä muodostetaan vetokokeessa jännitys-venymä-piirros. Kaikki vetokokeet suoritettiin n. 20 °C huoneenlämmössä.

3.1 S960 QC-materiaalin kuvaus

Tutkimuksessa käytetään materiaalina Ruukin toimittamaa ultralujaa S960 QC -terästä, joka kuuluu Ruukin Optim QC rakenneteräksiin. S960 QC:n nimessä kirjaimet tarkoittavat sen ominaisuuksia ja rakennetta. S tarkoittaa rakenneterästä (Structural Steel), Q tarkoittaa karkaistua (Quenched) ja C tarkoittaa kylmämuovattavuutta (Special Cold Forming) (Ruukki, 2014a). Numerointi 960 tulee materiaalin myötölujuudesta, joka on nimensä mukaisesti 960 MPa. Materiaalin puolivalmisteet tehdään valssauslinjastolla, mikä tässä tutkimuksessa oli levyaihio. (Ruukki, 2014b). S960 QC esivalssaus tehdään austeniittialueella rekristallisaatiolämpötilan yläpuolella, minkä jälkeen tehdään valssaus lopulliseen paksuuteen rekristallisaatiolämpötilan alapuolella. Kun aihio on saatu valssattua haluttuun paksuuteen, se jäähdytetään vesijähdytyksellä. Tällöin saadaan materiaaliominaisuudet suoraan ilman erillisiä karkaisuvaiheita. (Kumpulainen, Tihinen & Laitinen, 2011, s.6-7.)

S960 QC-materiaalin mikrorakenne koostuu bainiittia ja martensiittia sisältävästä yhdistelmä rakenteesta (Ruukki, 2014b). Sen tarkemmat mekaaniset ominaisuudet ja kemiallinen koostumus on esitetty taulukoissa 2 ja 3.

Taulukko 2. Valmistajan ilmoittamat materiaalin S960 QC kemiallinen koostumus sulatusanalyysillä (Ruukki, 2014b).

Alkuaine	Hiili (C)	Pii (Si)	Mangaani (Mn)	Fosfori (P)	Rikki (S)	Titaani (Ti)
Pitoisuus %	0,11	0,25	1,20	0,020	0,010	0,070

Taulukko 3. Valmistajan ilmoittamat materiaalin S960 QC mekaaniset ominaisuudet ovat vähintään (Ruukki, 2014b)

Myötölujuus	Murtolujuus	Murtovenymä A ₅	Iskusitkeys pitkittäin, Charpy V	
R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	%	t [°C]	[J/cm ²]
960	1000	7	-40	34

Ultralujien rakenneterästen käyttökohteita on lueteltu seuraavassa Ruukin (2014b):

- ”Hyötyajoneuvojen runko- ja päälirakenteet
- Metsäkoneiden puomit
- Nosturien puomit ja muut nostolaitteet
- Kuormankäsittelylaitteet, tuenta- ja kiinnityslaitteet
- Syöttö- ja purkaussuppilot
- Kontit”.

Tällaisten ultralujien terästen käyttämisen etuna on se, että saadaan vaadittavat lujuusvaatimukset pienemmillä ainevahvuuksilla. Tällöin rakenne kevenee, mikä johtaa pienempiin kustannuksiin. Pienemmät ainevahvuudet johtavat pienempään a-mittaan, mikä johtaa pienempiin hitsauskustannuksiin. Kevyet rakenteet parantavat taloudellisuutta ja mahdollistavat puomien ja nostureiden kehittämisen pidemmälle. (Pettinen & Witting, 2014, s. 134.)

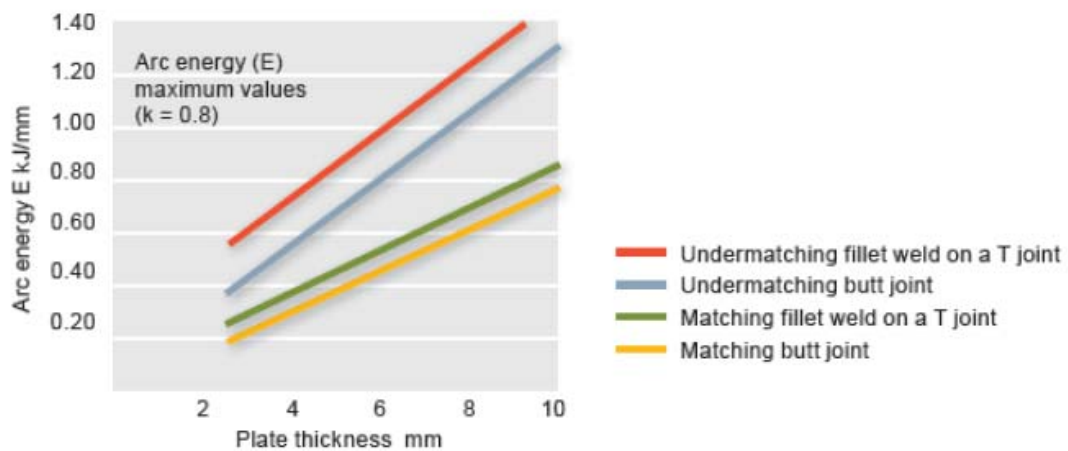
3.1.1 S960 QC-teräksen hitsaaminen

Ultralujien rakenneteräksien hitsattavuus on hyvä tavanomaisilla keinoilla, kunhan noudatetaan hitsausohjeita. S960 QC-materiaali ei tarvitse esilämmitystä hitsaamiseen. (Ruukki, 2014b, s. 3-4.)

S960 QC-materiaalin hitsattavuutta parantaa sen matala hiilipitoisuus ja matala seostusaste. Matala seostusaste johtaa siihen, että hitsiliitos ei karkene liiallisesti. Toisaalta hitsattaessa materiaaliin tuodaan lämpöä, joka aiheuttaa muutosvyöhykkeellä materiaalin pehmenemistä. Tämä on ongelma etenkin materiaaleilla, joiden mikrorakenne koostuu bainiitistä ja martensiitistä, koska ne ovat herkkiä valmistuksen jälkeisille lämpökäsittelyille. Hitsattaessa muutosvyöhykkeelle muodostuu aliluja pehmentynyt alue, jonka koko johtuu lämmöntonin suuruudesta. Kumpulaisen mukaan ”Alilujavyöhyke

syntyy osittaisen faasimuutoksen, karbidien palloutumisen ja päästymisen seurauksena”. Pehmentyneen alueen leveys tulisi pitää mahdollisimman pienenä verrattuna levyn paksuuteen, jotta hitsistä saataisiin tasaluja liitos. Suuri pehmentynyt alue johtaa alilujaan rakenteeseen. (Kumpulainen et al., 2011, s.7.)

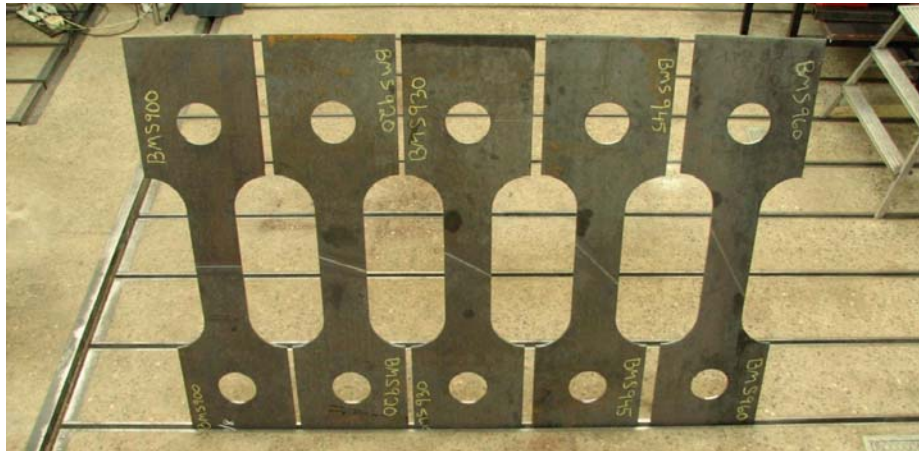
Jotta pehmentynyt alue saataisiin mahdollisimman pieneksi, tulee jäähtymisaika $t_{8/5}$ olla alle 4 sekuntia tasalujassa liitoksessa. Vastaavasti alilujille hitseille valmistaja suosittelee $t_{8/5}$ ajaksi alle 15 sekuntia. Kuvassa 5 on esitetty valmistajan antamia suosituksia lämmöntuonnille. (Ruukki, 2014b, s.4-5.)



Kuva 5. Ruukin antamat suositukset Optim QC rakenneterästen lämmöntuonnille (arc energy (E) maximum values = kaarienergia (E) maksimi arvot, undermatching fillet weld on a T joint = aliluja pienahitsi T liitoksessa, undermatching butt joint = aliluja päittäishitsi, matching fillet weld on a T joint = tasaluja pienahitsi T liitoksessa, matching butt joint = tasaluja päittäishitsi, arc energy = kaarienergia, plate thickness = levyn paksuus) (Ruukki, 2014b, s.5).

3.2 Koekappaleet

Koekappaleissa jokaisessa on eri kulmaan hitsattu MAG-hitsaus (Metal Active Gas) menetelmällä päittäisliitos. Koekappaleiden, jotka ovat esitetty kuvassa 6, päittäishitsit sijaitsevat aina koekappaleen keskellä. Käytetyt hitsauskulmat ovat 0°, 20°, 30°, 45° ja 60°.



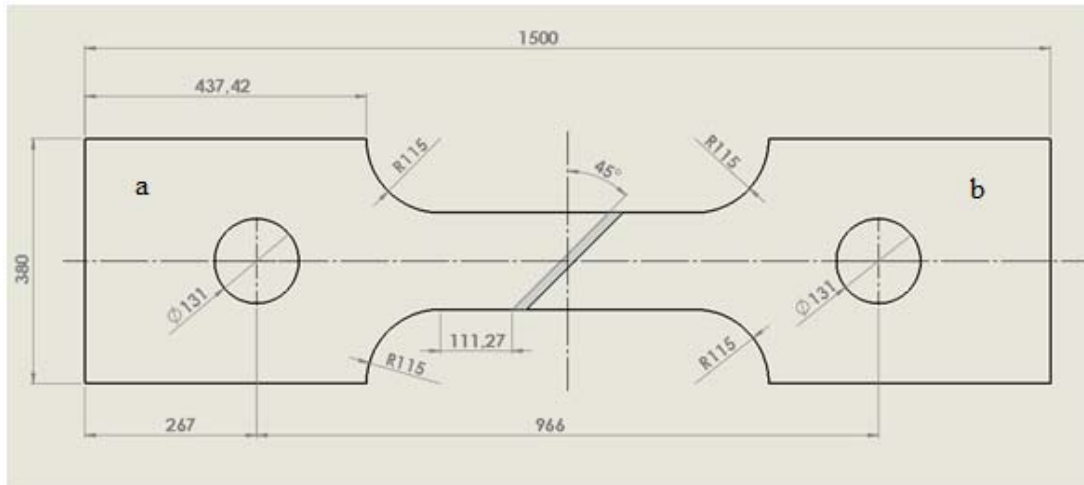
Kuva 6. Koekappaleet hitsauskulmilla: 0°, 20°, 30°, 45° ja 60°.

Hitsaus suoritetaan WPS-hitsausohjeen mukaisesti kolmella palolla, jotka olivat juuri-, piena- ja pintapalkot. Railomuoto on osaviistetty V-railo, jossa ilmarako ja juuripinnan korkeus on 2mm. Hitsauksessa käytetään 1,0 mm X96 lisäainetta ja 8 % CO₂ suojakaasua. Koekappaleissa on jätetty hitsauksen aloitukselle ja lopetukselle ylimääräiset ulokkeet, jolloin vältetään mahdollisilta hitsausvirheiltä itse koekappaleessa. Nämä ylimääräiset aloitus ja lopetuskohdat koneistetaan pois ennen varsinaista vetokoetta ja ne ovat esitetty kuvassa 7.



Kuva 7. Koekappaleen aloitus ja lopetus ulokkeet, joihin on hitsattu silloitus hitsit.

Levyn paksuudeksi on ilmoitettu 8mm. Ennen vetokoetta kappaleet mitataan. Alla olevassa kuvassa 8 on 2D piirros koekappaleiden päämitoista, kun hitsaus on tehty 45-asteen kulmaan.



Kuva 8. Koekappaleiden mitat.

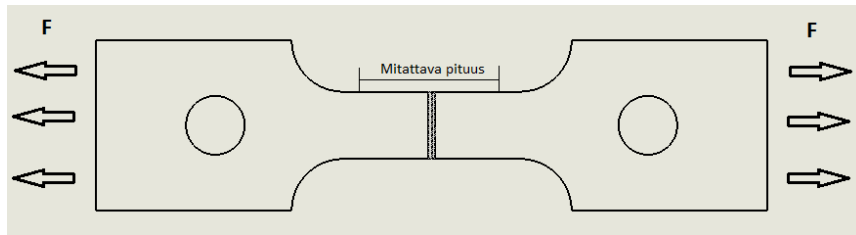
Taulukossa 4 on esitetty ennen vetokoetta mitatut mitat koekappaleista.

Taulukko 4 koekappaleiden mitat

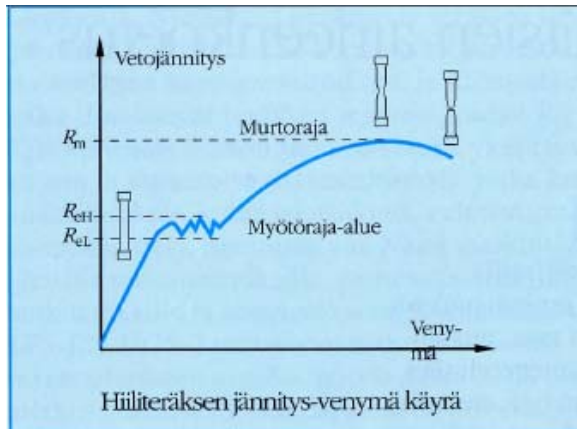
Koe kappale	Hitsi 0°	Hitsi 20°	Hitsi 30°	Hitsi 45°	Hitsi 60°
Leveys a	149.96	149.80	149.4	149.1	149.4
Leveys b	149.94	149.74	149.5	148.94	149.32
Paksuus a	8.04	8.03	8.02	8.02	8.01
Paksuus b	8.01	8.05	8.04	8.01	8.02

3.3 Koejärjestely

Tutkimuksessa vinohitsien lujuus testataan vetokokeella. Vetokokeessa määrätyn mittainen vetokoekappale kiinnitetään vetokoneeseen ja kappaletta vedetään kuvan 9 tavoin, kasvavalla voimalla, jolloin koekappale alkaa venyä. Kokeen aikana mitataan käytettävää voimaa ja materiaalin venymää. Tavallisesti venymää mitataan venymäliuskoilla, mutta tässä koejärjestelyssä käytettiin pääasiallisesti ARAMIS- laitteistoa vetokolaitteiston mittaaman siirtymän lisänä. Vetokokeessa tulokset piirretään kuvan 10 mukaisesti jännitys-venymä-piirroksen.



Kuva 9. Vetokokeen periaate.



Kuva 10. Jännitys-venymä-piirroksen mallikuva (Pettinen & Witting, 2014, s.30).

Murtorajan R_m ja myötörajan jännitykset saadaan kullakin voimalla yhtälöstä 4 (Pettinen & Witting, 2014, s.29–30).

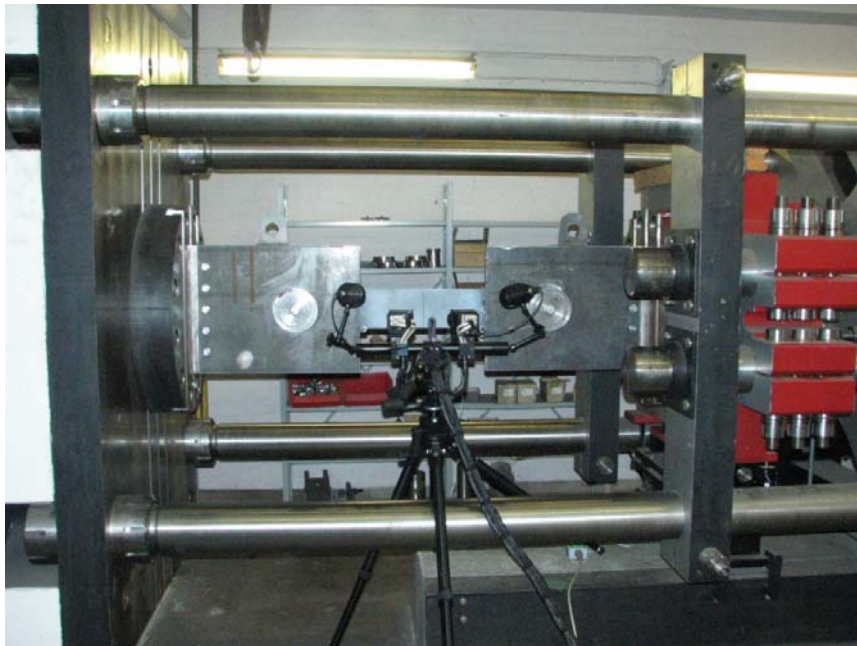
$$R_m = F/A \quad (4)$$

Yhtälössä (4) F on käytetty voima koekappaleen katketessa ja A on koekappaleen poikkipinta-ala ennen vetokoetta. Jännitys-venymä-käyrään muodostuu aluksi suora kimmoisa alue aina kimmorajaan asti. Tällä alueella venyminen on tapahtunut ilman pysyviä vaikutuksia eli voiman vaikutuksen loppuessa kappale palautuu entiseen muotoonsa. Kimmorajaa seuraa myötöraja, josta on käytössä useampia eri määritelmiä. Jos jännitys-venymä-piirros jää aaltoilemaan myötöraja-alueelle, voidaan käyttää ylempää arvoa R_{eH} tai alemmaa R_{eL} . Jos myötörajaa ei materiaaliominaisuuksista johtuen ole tarkasti määriteltävissä, voidaan käyttää 0,2 % venymärajaa $R_{p0,2}$. Kimmoisan alueen jälkeen alkaa plastinen alue, jossa tapahtuvat muodonmuutokset aiheuttavat pysyvää venymää voiman vaikutuksen loppuessa. Myötörajan jälkeen käyrä nousee maksimiarvoonsa, jota kutsutaan

murtorajaksi R_m . Murtorajan jälkeen kappale kuroutuu ja vetokoe loppuu, kun kappale katkeaa. (Pettinen & Witting, 2014, s.29–31.)

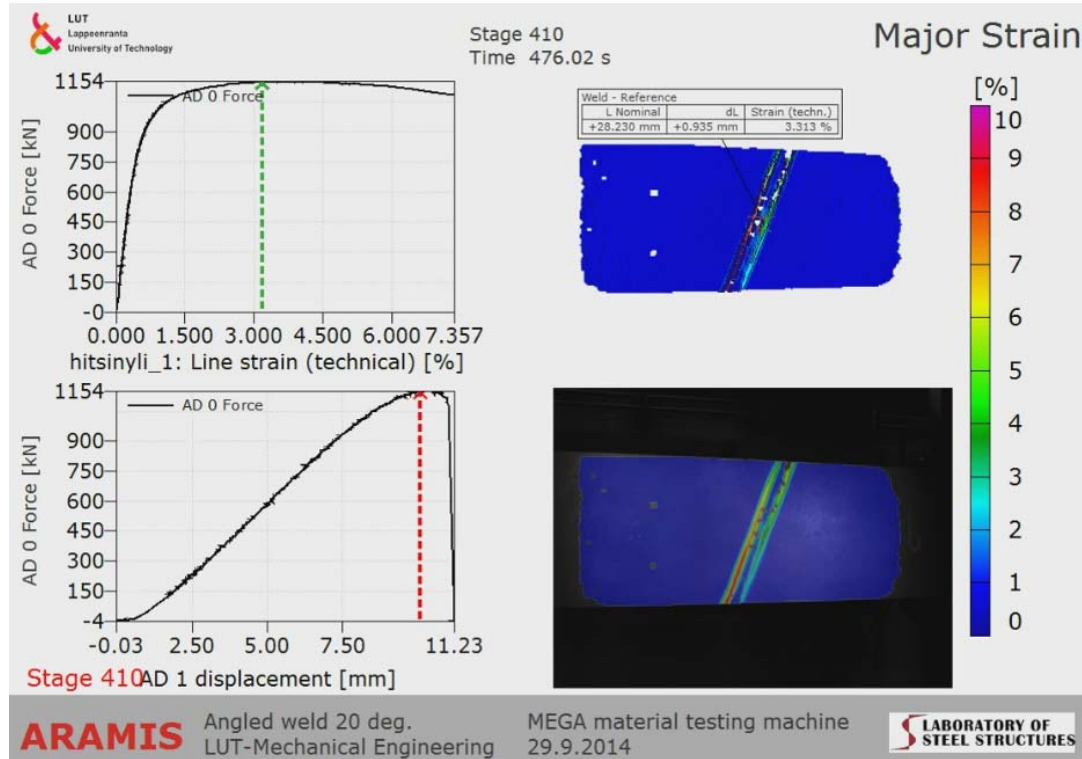
Vetokoe suoritettiin Lappeenrannan Teknillisen Yliopiston teräsrakenteiden laboratoriossa käyttämällä Megakehä nimistä vetokoelaitteistoa. Megakehä sisältää itsestään voima-anturoinnin ja siirtymän mittauksen. Kuvaajat vetokokeista tehtiin Megakehän anturoinnin perusteella. Yhdessä koekappaleessa käytettiin lisäksi venymäliuskaa, jota voidaan verrata muihin tuloksiin.

Lisänä käytettiin ARAMIS- laitteistoa, joka perustuu optiseen 3D-deformaatioanalyysiin. ARAMIS- laitteisto seuraa optisesti kahdella kameralla kappaleessa olevien pisteiden liikkumista ja päättelee siitä koekappaleessa esiintyviä siirtymiä ja venymiä. ARAMIS- laitteistolla saadaan tuotettua reaaliaikaista dataa, josta voidaan muodostaa video kappaleesta, jossa näkyy kappaleessa olevat venymät ja siirtymät. ARAMIS- laitteistoa pystyy lisäksi käyttämään 3D-muotojen koordinaattien määrittämiseen ja esim. FE-analyysi menetelmien todentamiseen. ARAMIS- laitteisto on esitetty yhdessä Megakehän kanssa kuvassa 11. (Cascade, 2014.)



Kuva 11. Kokeessa käytetyt Megakehä- ja ARAMIS- laitteistot.

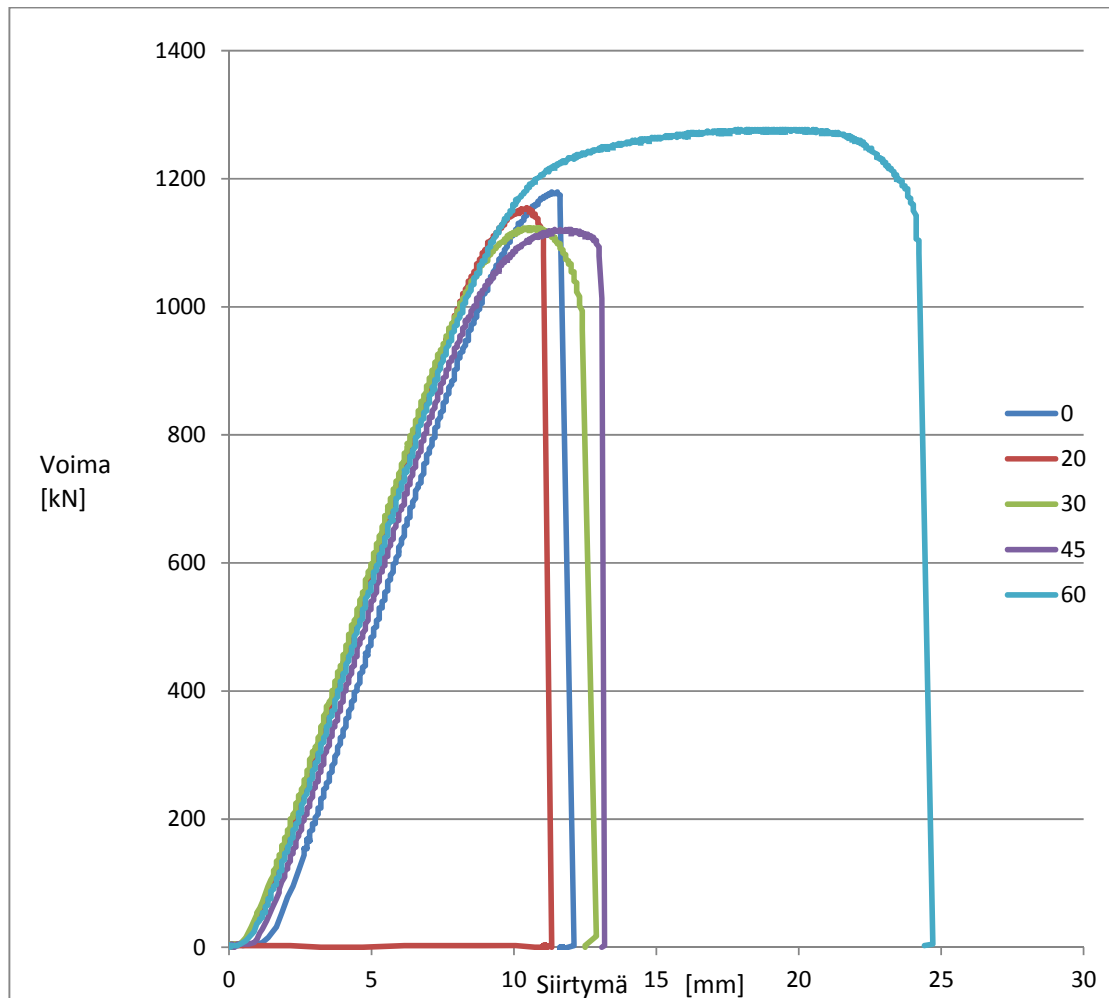
Koekappaleisiin ruiskutettiin valkoisia maalipisteitä, jotta ARAMIS- laitteisto saisi hyvät, kiinteät mittapisteet optiselle kuvauslaitteistolle. ARAMIS- laitteistolta data lähetettiin reaaliajassa tietokoneelle. Tietokoneella tuloksista luotiin video, jossa näkyy jännitys kuvaajat esitettynä kappaleen päällä sekä voima-venymä- ja voima-siirtymä- kuvaajat. Kuvassa 12 on otettu esimerkki kuva ARAMIS-laitteiston tuottamasta videosta.



Kuva 12. Esimerkki kuva videosta, kun koekappaleena 20° hitsikulma.

4 TULOKSET

Vetokokeiden voima-siirtymä-kuvaajat erikseen jokaisesta koekappaleesta on esitetty liitteessä 1. Kuvassa 13 on esitetty kaikkien koekappaleiden voima-siirtymä-kuvaajat samassa kuvaajassa. Tulosten tarkempi analysointi tapahtuu kappaleessa 5.



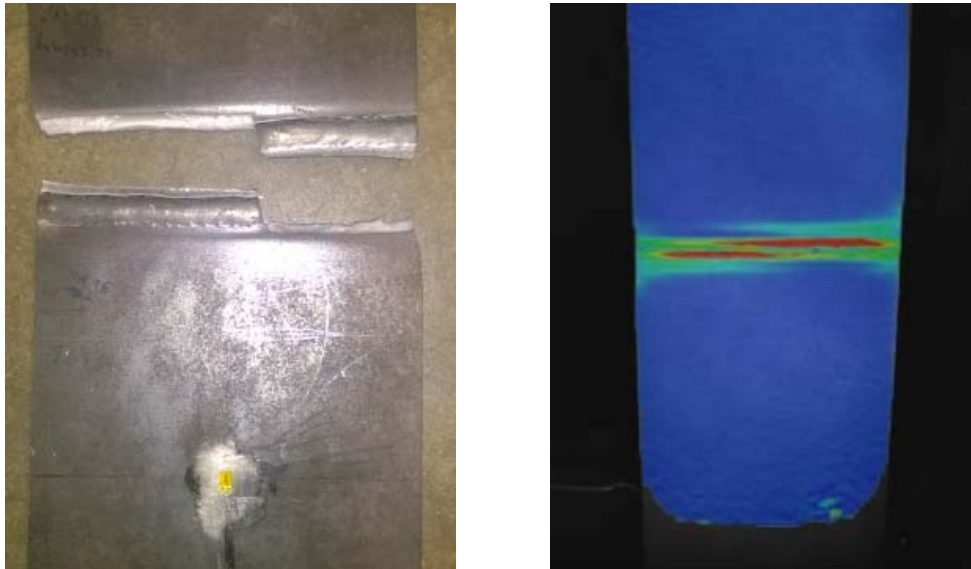
Kuva 13. Kuvassa on esitetty kaikkien koekappaleiden voima-siirtymä-kuvaajat.

Taulukkoon 5 on kerätty numeroita koekappaleiden tuloksista. Suurimmat voimat ja siirtymät ennen murtumaa ovat otettu Megakehän mittalaitteiden tuottamasta taulukosta ja ARAMIS-laitteiston murtovenymä on katsottu ARAMIS-laitteiston tuottamalta videolta.

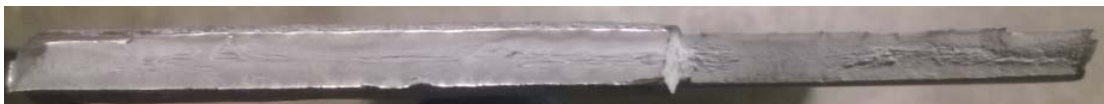
Taulukko 5. Vetokokeen tuloksia koekappaleista.

Hitsauskulma	0°	20	30	45	60
Voima ennen murtumaa [kN]	1179.2	1154.8	1123.0	1120.6	1276.9
Siirtymä ennen murtumaa [mm]	11.6	11.0	12.3	13.1	24.2
Murtovenymä [%] hitsissä (ARAMIS)	5.1	7.4	12.8	11.8	7.1

Kaikki muut koekappaleet murtoivat hitsinrajaviivasta paitsi koekappale, jossa hitsi oli 60° kulmassa. Niiden koekappaleiden, joiden hitsi murtuu hitsinrajaviivasta, kapasiteetti on pienempi kuin teoreettinen arvo materiaalille. Tämä viittaa siihen, että hitsi oli kriittinen kohta murtumalle. Sen sijaan 60° kulmalla oleva koekappale murtui hitsin poikki. Kappaleiden murtopinnat ja ARAMIS-laitteiston muodostamat jännityskuvaajat ovat esitetty alla olevissa kuvissa 14–20.



Kuva 14. Murtumisen sijainti sekä ARAMIS jännityskuvaaja hieman ennen murtumista, kun kulma on 0°.



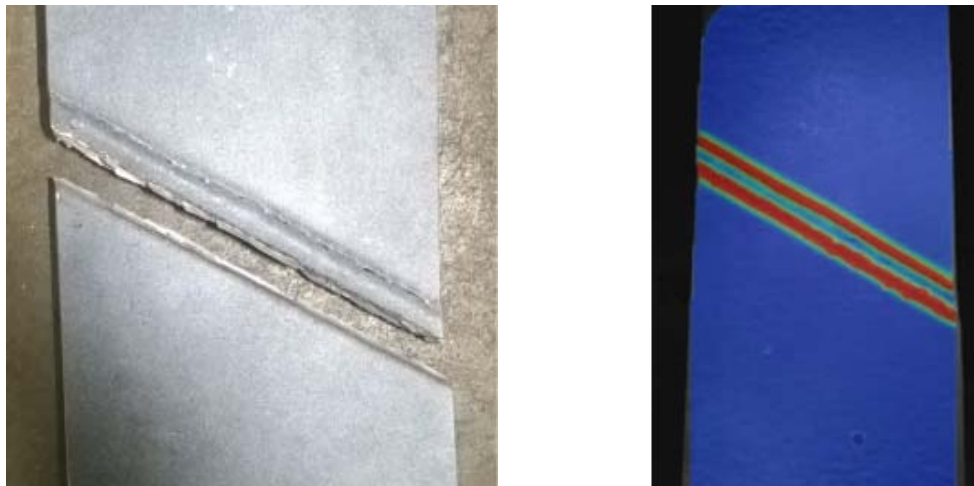
Kuva 15. 0° koekappaleen murtopinta.

0° koekappale murtui molemmilta puolilta hitsin rajaviivaa ja murtuma oli muodonmuutoskyvyltään heikko.



Kuva 16. Murtumisen sijainti sekä ARAMIS jännityskuvaaja hieman ennen murtumista, kun kulma on 20°.

20° koekappale murtui hitsin a-puolelta hitsin rajaviivasta. Murtuma oli muodonmuutoskyvyltään heikko.



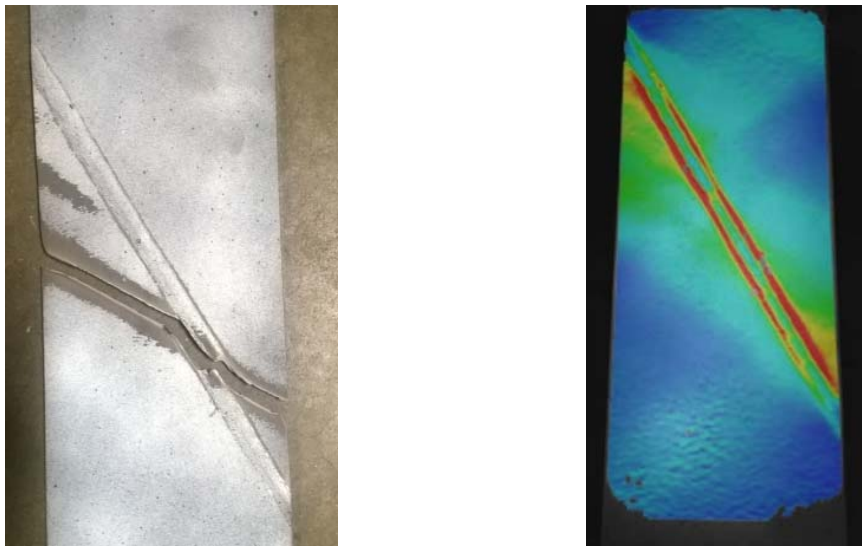
Kuva 17. Murtumisen sijainti sekä ARAMIS jännityskuvaaja hieman ennen murtumista, kun kulma on 30.

30° koekappale murtui a-puolelta hitsin rajaviivasta. Murtuma oli muodonmuutoskyvyltään heikko.



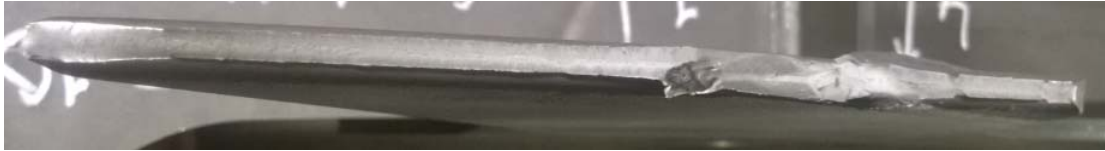
Kuva 18. Murtumisen sijainti sekä ARAMIS jännityskuvaaja hieman ennen murtumista, kun kulma on 45°.

45° koekappale murtui a-puolelta hitsin rajaviivasta. Murtuma oli muodonmuutoskyvyltään heikko.



Kuva 19. Murtumisen sijainti sekä ARAMIS jännityskuvaaja hieman ennen murtumista, kun kulma on 60°.

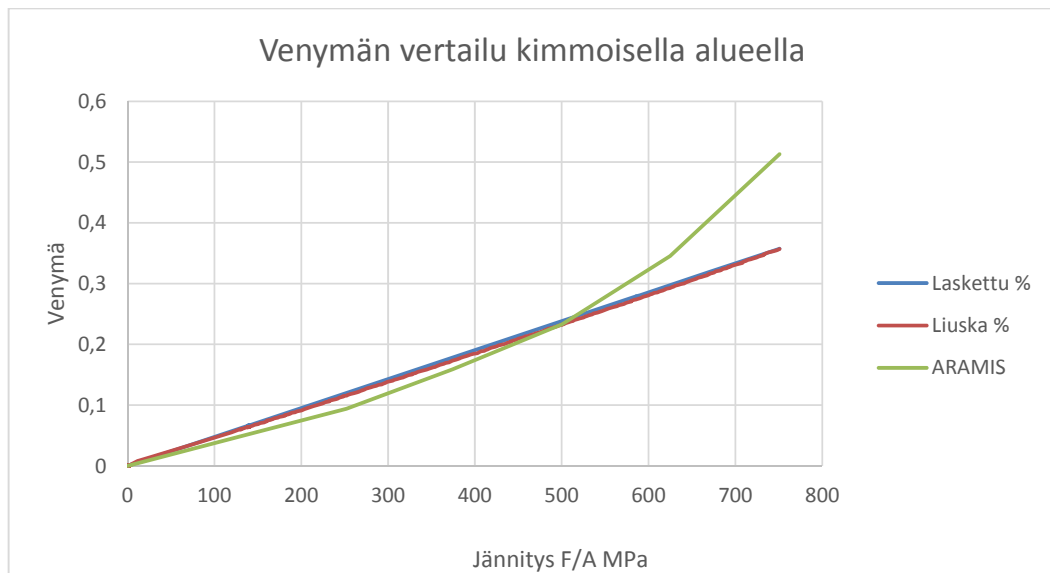
60° koekappale murtui a-puolelta hitsin poikki sen sijaan että se olisi mennyt hitsin rajaviivaa pitkin. Liitos oli muodonmuutoskykyinen, murtuma sitkeä ja sen murtopinta on esitetty kuvassa 20.



Kuva 20. 60° koekappaleen murtopinta.

Koekappaleella, jossa hitsikulma on 0°, käytettiin venymäliuskaa, jotta saataisiin vertailuarvo ARAMIS-laitteiston antamille tuloksille. Venymäliuska asetettiin mittauksen ajaksi alkamaan negatiivisista arvoista, jotta sillä saataisiin mahdollisimman suuri mittausalue. Venymäliuskan paikka on havaittavissa kuvassa 13 keltaisen pisteen kohdalla. Kuvassa 21 on esitetty venymäliuskan, ARAMIS-laitteiston sekä teoreettisen venymän arvoja samassa kuvaajassa. Teoreettinen venymäarvo ε on laskettu yhtälöstä 5, missä F on voima N, E on teräksen kimmokerroin 210 000 MPa ja A on poikkileikkauksen pinta-ala.

$$\varepsilon = \frac{F}{E * A} \quad (5)$$



Kuva 21. ARAMIS-laitteiston, venymäliuskan sekä laskennallisen venymän arvojen vertailu.

5 TULOSTEN TARKASTELU JA POHDINTA

Tämä kappale on jaettu kahteen osioon, ensin tarkastellaan saatuja tuloksia ja niistä tehtäviä johtopäätöksiä ja sitten on pohdintaa tulosten merkityksestä ja objektiivinen arvio tutkimuksen onnistumisesta. Pohdinnassa on lisäksi mietitty tähän tutkimukseen liittyviä kehitys mahdollisuuksia ja jatkotutkimuksen aiheita.

5.1 Tulosten tarkastelu ja johtopäätökset

Taulukossa 6 on esitetty vertailua hitsattujen koekappaleiden voiman kestosta verrattuna samankokoisen pelkän materiaalin teoreettiseen kestoan vedossa. Materiaalin kapasiteetti on laskettu aiemmin esitetyllä yhtälöllä 4. Jännityksen käännetty vertailuluku on laskettu yhtälöstä 1 saattamalla se muotoon:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sigma_{vert}^2}{(\cos \alpha)^4 + 3\left(\frac{\sin 2\alpha}{2}\right)^2}} \quad (6)$$

Yhtälössä 6 σ on käännetty jännityksen vertailuluku, joka kuvastaa kuinka paljon jännitystä rakenne kestää eli siinä suurempi luku on parempi. σ_{vert} on rakenteen murtoraja ja α on hitsin kulma. Käännetyn jännityksen vertailuluvun laskenta on esitetty liitteessä III. Materiaalin teoreettinen kapasiteetti F_{mat} on laskettu yhtälöstä 4. Vertailuluku F_{max}/F_{mat} on laskettu jakamalla kokeellinen maksimivoima ja muuttamalla tulos prosenteiksi. Käännetyn jännityksen vertailuluvun laskenta on esitetty liitteessä 3. Siinä jännitys kuvastaa liitoksen kapasiteettia ottaa vastaan jännitystä, eli suurempi luku tarkoittaa suurempaa kapasiteettia liitoksessa.

Taulukko 6. Koekappaleen maksimivoiman vertailua laskennalliseen materiaalin kapasiteettiin ja teoreettiseen käännettyyn jännityksen vertailulukuun.

	<i>Kokeellinen maksimivoima [kN] F_{max}</i>	<i>Vertailuluku F_{max}/F_{mat} [%]</i>	<i>Käännetty jännityksen vertailuluku [MPa]</i>
<i>Materiaalin teoreettinen kapasiteetti F_{mat}</i>	1200	100.0	1000
<i>Hitsi 0°</i>	1179.2	98.3	1000
<i>Hitsi 20°</i>	1154.79	96.2	978
<i>Hitsi 30°</i>	1123.05	93.6	943
<i>Hitsi 45°</i>	1120.61	93.4	1000
<i>Hitsi 60°</i>	1276.86	106.4	1265

8 mm ja 150 mm leveän S960 QC-materiaalin teoreettinen kapasiteetin on 1200 kN. 60° kulmalla varustettu koekappale pystyy ainoana vastaamaan tähän arvoon. Se kesti 1276,86 kN voiman, joka on 6.4 % enemmän kuin materiaalille ilmoitetun murtolujuuden mukainen teoreettinen arvo. Tämä voi johtua siitä että valmistaja on ilmoittanut materiaalin murtorajan pienellä varmuuskertoimella. Kaikki muut kulmat jäivät teoreettisesta arvosta 0° kulman ollessa lähimpänä. Suoran päittäishitsin jälkeen hitsikulman kasvaessa koekappaleiden voiman kesto heikkeni aina 45° asti. 45° kulma jää 6.6 % teoreettisesta arvosta, kun taas 30° jää 6.4 %, 20° 3.8 ja 0° 1.7 %. Teoreettinen laskenta malli seuraa koetuloksia kohtalaisesti. Teoreettinen malli antaa pienimmän käännetyin vertailujännityksen eli pienimmän voiman keston 30° kulmalla. Koetuloksissa huonoin tulos saatiin 45° kulmalla, mutta 30° oli vain hieman parempi. 20° kulma antaa niin teoreettisessa mallissa kuin koetuloksessa hieman vertailuarvoa pienemmän kapasiteetin. Nollakulmalla teoreettinen arvo antaa saman tuloksen hitsin kapasiteetille kuin materiaalille ilman hitsiä, koekappale antaa vain hieman pienemmän kapasiteetin, kuin teoreettinen kapasiteetti eli tämän seurauksena voidaan todeta, että hitsi heikentää liitosta vain hieman. Suurimman kapasiteetin molemmilla tapauksilla antaa 60° kulmalla hitsattu koekappale. Suurin ero teoreettisen mallin ja koekappaleiden välillä tapahtuu 45° kulmalla. Tällöin teoreettinen malli antaa saman tuloksen hitsinkapasiteetille kuin materiaalille ilman

hitsiä ja kulmalle 0° , mutta koekappaleissa 45° kulmalla saatiin kaikista pienin kapasiteetti. Aikaisemmin esitetty kuva 3 teoreettisesta mallista esittää, että hitsauksen kapasiteetin tulisi olla huonompi kulmilla $0 - 45$, jolloin se saa kaikista huonoimman tuloksen n. 30° kulmalla. Mutta hitsaus kulman kasvaessa yli 45° hitsauksen kapasiteetin pitäisi olla parempi kuin materiaalin kapasiteetti. Yksinkertaisen mallin mukaisesti kapasiteetti kasvaa, kun 30° kulma on ohitettu, lähestyessä hitsauskulmaa 90° .

Kuvasta 12 olevien käyrien perusteella materiaali käyttäytyy plastisella alueella muodonmuutoskyvyltään heikosti, ainakin pienillä hitsauskulmilla. Varsinkin koekappaleet joissa on 0° ja 20° kulma hitsauksessa, murtuu melkein heti kimmoisen alueen loputtua ilman myötäämistä eli heti plastisoitumisen jälkeen. Hitsin ollessa 30° koekappale käyttäytyy hieman sitkeämmin. 30° kulmalla virumisen vaihe on hieman suurempi kuin pienemmillä kulmilla. Myös 45° kulmalla hitsattu koekappale käyttäytyy sitkeämmin, kuin pienemmällä kulmilla olevat koekappaleet. Siinä on havaittavissa selkeä myötäämisen alue ennen murtumista. Suurimmalla eli 60° hitsikulmalla varustettu koekappaleessa on suurin ero kaikkiin muihin koekappaleisiin. Plastisoituneen alueen kesto 60° hitsikulmalla on paljon suurempi kuin millään pienemmällä hitsikulmilla olleissa koekappaleissa. 60° koekappale kestää venymää lähes kaksinkertaisesti verrattuna muihin ja materiaalin käyttäytyminen on muodonmuutoskyvyltään parempaa. Koekappaleiden murtumamekanismin päättelyminen murtopinnoista johtaa samanlaisiin johtopäätöksiin. Kuvissa 14 ja 19 on esitetty 0° ja 60° koekappaleiden murtopinnat. 0° koekappaleessa ei ole nähtävissä paljoa virumista, vaan se on murtunut lähes heti kimmoisen alueen jälkeen. Myös 20° , 30° ja 45° koekappaleiden murtopinnat ovat samantapaiset. Kuvassa 19 olevan 60° koekappaleen murtopinta on selkeästi murtumismekanismiltaan sitkeämpi. Koekappale on selkeästi kuroutunut ennen murtumistaan.

ARAMIS-laitteistolla mitattiin venymiä ja niiden avulla laskettiin paikallisia jännityksiä koekappaleissa. Murtovenymän arvot ARAMIS-laitteiston vaihtelevat 5.1 ja 12.8 % välillä koekappaleissa. Materiaalille ilmoitettu murtovenymä A_5 on 7 %. 30° ja 45° arvot ylittävät tämän arvon reilusti, kun 30° saa 12.8 % ja 45° 11.76 % venymän hitsissä. 60° antaa vain 7.14 % venymän hitsissä, mutta tulos johtuu siitä, kun ARAMIS-laitteisto lopetti mittauksen ennen koekappaleen murtumaa. Kuvassa 20 on esitetty venymän arvoja kimmoisella alueella. Tässä kuvaajassa on vertailtu laskennallista venymää, venymäliuskan

tulosta sekä ARAMIS-laitteiston tuloksia. Kuvaajasta nähdään, että venymäliuska antaa kimmoisella alueella hyvin samanlaiset tulokset, kuin laskennallinen venymä. ARAMIS-laitteisto antaa myös lähes samoja tuloksia kimmoisen alueen alkupuolella. Sen arvot ovat hieman pienemmät kuin liuskan ja laskennat arvot aina 500 MPa asti. Mutta mitä lähemmäksi plastista aluetta siirrytään sitä rajumman venymäarvon ARAMIS-laitteisto antaa. ARAMIS-laitteisto laskee ”true strain” arvoja, eli se ottaa huomioon poikkileikkauksen pienenemisen. Tällöin se antaa suurempia tuloksia kun poikkipinta-ala alkaa kuroutua. Venymäliuska mittaa tasaista todellista venymää koko vetokokeen ajalta, koska se on sijoitettu kurouma alueen ulkopuolelle. Laskennallinen arvo ei ota huomioon kuroumaa. Tästä johtuen ARAMIS-laitteisto antaa huomattavasti suurempia arvoja suuremmilla voimilla.

ARAMIS-laitteistolla muodostetut jännityskuvaajat, jotka ovat esitetty kuvissa 13, 15–18, vastaavat hyvin murtumisen sijaintia kaikissa muissa tapauksissa paitsi 60° koekappaleessa. Muissa koekappaleissa suurin jännitys sijaitsee juuri murtumisen kohdassa. Myös se, että kummalta puolelta hitsiä murtumisen tapahtuu, on havaittavissa suurempana jännityksen arvona. 60° koekappaleen tapauksessa ARAMIS-laitteisto antaa suurimman jännityksen muiden koekappaleiden mukaisesti hitsinrajaviivaan, mutta koekappale murtui hitsin poikki. Kuvassa 18 on havaittavissa vihreänä alueena oikea murtumissuunta, mutta se ei ole kuvan mukaan jännityksen huippukohta.

5.2 Pohdinta

Tehtävän ratkaisuun käytettyjen menetelmientulosten perusteella voidaan sanoa että hitsistä muodostui S960 QC-materiaalilla aliluja hitsikulmilla 0°, 20°, 30° ja 45°. Tällöin hitsi käyttäytyy muodonmuutoskyvyltään heikosti ja pehmeä alue selkeästi heikentää rakenteen kestoja. Hitsikulmalla 60° rakenteesta muodostui tasaluja ja pehmentynyt alue ei ollut kriittinen piste murtumalle. Tämä tarkoittaa, että päittäishitsaamisessa tulisi suosia suuria kulmia. Teoreettisen mallin mukaan tähän riittää että käytetään yli 45° kulmaa, mutta koejärjestelyn perusteella ei pystytä sitä vahvistamaan, sillä 45° kulmalla saatiin aliluja liitos ja ainoa yli 45° kulmalla ollut koekappale oli 60° kulma. Päittäisliitosta suunniteltaessa tulisi tulosten perusteella välttää hitsauskulmia jolloin $0^\circ < \alpha < 45^\circ$, koska tällöin liitos käyttäytyy alilujasti, joka voi johtaa rakenteen ennenaikaiseen rikkoutumiseen. Toisaalta kulman vaikutus oli koetuloksissa alle 7 %, joten kulman

vaikutus kestävyys ei ole kovin merkittävä. Vetokokeet tehtiin vain S960 QC-materiaalilla, mutta tulokset ovat yleistettävissä myös useimmille ultralujille teräksille, joilla pehmeä alue voi muodostua ongelmaksi hitsauksessa.

Hitsattaessa kulmaan se tarkoittaa $\frac{1}{\cos \alpha}$ verran pitempiä hitsisaumoja. Eli 60° kulmalla se tarkoittaa kaksi kertaa pitempiä saumoja kuin hitsattaisiin suoraan 0° kulmaan kappaleen yli. Tällä on suuri merkitys hitsausten kustannuksiin, koska hitsiainemäärä on suoraan verrannollinen hitsauksen pituudelle L ja hitsiainemäärä on suoraan verrannollinen hitsauskustannuksiin (Stenbacka, 2011, s. 90). Lisäksi tämä vaatii rakenteelta huomattavasti paljon enemmän pituussuunnassa tilaa. Hitsikulmalla hitsin korkeus tulee $\tan \alpha$ kertaa suuremmaksi kuin hitsattava leveys on. Eli 60° kulmalla tarvitaan hitsille noin 1.73 kertaisesti hitsattavan leveyteen verrattuna tilaa korkeussuunnassa. Tälle ei kaikissa rakenteissa ole välttämättä tilaa, joten on mahdollisesti mietittävä alilujan hitsin käyttämistä. Jos kustannuksista tai rakenteesta johtuen päittäisliitosta ei pystytä hitsaamaan suureen kulmaan, niin se tulisi tulosten perusteella tehdä 0° kulmaan. Tällöin on otettava huomioon hauraasti käyttäytyvä aliluja hitsi, joka oli tässä kokeessa 1.7 % huonompi kuin teoreettinen kapasiteetti ja 8.6 % huonompi kuin 60° kulmassa oleva hitsi. Yksi tällaisten vinohitsien sovelluskohde on puomien kiinnikkeet. Puomirakenteissa siirrytään käyttämään yleisesti lujia teräksiä ja niihin yleensä hitsataan kiinnikkeitä. Kiinnikkeen hitsaus tulisi suorittaa koetulosten perusteella 60° kulmaan, jotta välttyään alilujalta liitokselta.

Mielenkiintoista olisi tutkia, miten käyttäytyisi liitokset, jotka tehtäisiin suoran hitsin sijasta esim. V-muotoon. Tällöin saataisiin hitsattua suurempaan kulmaan ja vaadittaisiin puolta pienempi tila korkeussuunnassa, kuin suoraan hitsattaessa vastaavaan kulmaan. Tällaista hitsiä ei tässä koejärjestelyssä kuitenkaan tutkittu eli sellaisen muodon hyödyntäminen vaatisi lisätutkimuksia. Myös lisätutkimusta kaivattaisiin kulmille välille 45° ja 60°, sillä tällä välillä, jossain vaiheessa, liitos muuttuu alilujasta ylitilujaan ja mielenkiintoista olisi nähdä mikä on minimi kulma, jolloin saadaan aikaiseksi tasaluja liitos. Mitä pienemmällä kulmalla saadaan aikaiseksi tasaluja liitos, niin sitä pienemmäksi kustannukset muodostuvat valmistuksessa. Työn laajuuden perusteella tästä rajattiin pois FEM-laskenta. Tässä vaiheessa FEM-laskenta olisi hyvä työkalu erilaisten liitosmuotojen sekä eri kulmien tutkimiseen. Sillä voitaisiin tutkia ylimääräisiä kulmia ilman kalliita ja aikaa vieviä vetokokeita. Tämä olisikin yksi hyvä jatkotutkimuksen aihe, jos työtä

jatkettaisiin pidemmälle. Toinen jatkotutkimuksen aihe, joka tästä työstä rajattiin pois, on väsymislujuuden tarkastelu hitseille. Puomirakenteet, kuten esim. metsäkoneen puomit joutuvat väsyttävän kuorman vaikutukselle, joten sen tutkiminen olisi tärkeää.

Koejärjestelyssä suoritettiin vain yksi vetokoe jokaista kulmaa kohden, joten on mahdollista, että jokin koekappale on antanut virheellisen tuloksen. Koekappale, jonka hitsauskulma on 45° , olisi pitänyt kestää teoreettisen mallin mukaan yhtä hyvin vetoa kuin 0° kulmalla oleva koekappale. Kuitenkin 45° koekappaleen kapasiteetti oli koetuloksista huonoin. Tämä jättää syyn epäillä, että ko. koekappaleen kanssa on sattunut jonkinlainen virhe esim. hitsauksessa, joka johti heikompaan tulokseen. Lisäksi ARAMSIS-laitteisto lopetti mittaamisen 60° koekappaleen vetokokeen aikana ennen murtumista, joten sen antaman venymän arvoja ei voida pitää luotettavana. Lisäksi koejärjestelyssä olisi voitu tehdä referenssikoe, samanlaisella koekappaleen mitoilla, mutta ilman hitsiä. Tällöin olisi saatu varma S960 QC perusmateriaalin kapasiteetti, jota oltaisi voitu verrata hitsien tulokseen, sen sijaan, että käytettiin teoreettista kapasiteettia. Lisävarmuutta koetuloksiin oltaisi saatu, jos olisi käytetty useampia toistomääriä, yhden sijasta. Jos esim. jokaiselle hitsikulmalle oltaisi suoritettu 3 koevetoa, niin mahdolliset virheelliset koekappaleet olisivat tulleet esille. Myös perusteellinen NDT-tutkimus (nondestructive testing) jokaiselle koekappaleelle olisi tuonut mahdolliset virheet hitsauksissa esille. Aiempaa kirjallisuusmateriaalia ei ole käsillä, joten saatuja tuloksia ei voitu verrata niihin.

6 YHTEENVETO

Tässä työssä tutkittiin vinohitsien vaikutusta staattiseen vetokuormitukseen, kun käytetään ultralujaa terästä S960 QC. Ultralujilla teräksillä hitsaamisessa lämmöntuonti aiheuttaa muutosvyöhyke alueen, jonka pehmentynyt alue voi johtaa alilujaan liitokseen. Työssä tehtiin vetokoe ”Megakehä” nimisellä laitteella S960 QC-materiaalista valmistetuille levyille, joihin hitsattiin MAG-hitsausmenetelmällä 0° , 20° , 30° , 45° ja 60° kulmille. Kuormituksesta tehtiin myös yksinkertaistettu teoreettinen malli. Teoreettisella mallilla saatiin tuloksiksi, että vertailujännitys on suurempi 0° - 45° kulmilla, ja se saa suurimman arvonsa 30° kulmassa. Suurimmalla vertailujännityksen arvolla liitoksen kapasiteetti on heikoin. 45° kulman jälkeen vertailujännitys pienenee mentäessä kohti 90° kulmaa, eli liitoksen kapasiteetti kasvaa. Vetokoetuloksista muodostettiin Megakehän anturoinnin perusteella voima-siirtymä-kuvaajat jotka ovat esitetty jokaiselle koekappaleelle liitteessä II. Vetokokeet kuvattiin myös ARAMIS-laitteistolla, joka perustuu optiseen 3D-deformaatioanalyysiin.

Saatujen tulosten perusteella suurin kapasiteetti saavutettiin 60° kulmalla olevalla koekappaleella, jolla kapasiteetti oli 6.4 % suurempi kuin materiaalin teoreettinen kapasiteetti. Se kesti venymistä lähes kaksinkertaisesti, muihin koekappaleisiin verrattuna ja sen käyttäytyminen oli sitkeää. 60° kulmalla oleva koekappale myös murtui hitsin poikki, joten hitsi ei ollut kriittinen piste murtumiselle. Muilla koekappaleiden kulmilla murtuminen tapahtui hitsin rajaviivasta, jolloin voiman kesto jäi kaikilla koekappaleilla materiaalin teoreettisesta arvosta. 0° jäi 1.7 %, 20° 3.8 %, 30° 6.4 % ja 45° 6.6 %. Murtuma näillä kaikille koekappaleilla oli heikosti muodonmuutoskykyinen ja voima-siirtymä-kuvaajasta on havaittavissa, että murtuminen tapahtuu lähes heti plastisoitumisen jälkeen, eli hitsistä muodostui näillä kulmilla kriittinen piste murtumiselle. Hitsin kulman vaikutus on kuitenkin alle 7 % eli melko pieni. Sovelluskohteita tuloksille on esim. puomirakenteiden liitoksissa, mutta huomioon on otettava kulman mukaan kasvavat hitsauskustannukset ja suuremman kulman vaatima tila, jos halutaan tavoitella maksimaalista kestävyyttä. Tästä johtuen voi olla että on järkevämpää hitsata nolla kulmaan.

LÄHTEET

Björk, T., Toivonen, J. & Nykänen, T. 2012. Capacity of fillet welded joints made of ultra high-strength steel. *Welding in the World* Vol. 56, Iss. 3-4. s. 71-84.

Cascade, 2014. ARAMIS – Optista 3D-deformaatioanalyysia [verkkodokumentti]. [Viitattu 10.12.2014]. Saatavissa: <http://www.cascade.se/fi-fi/tuotteet/jarjestelmakatsaus/aramis-optista-3d-deformaatiomittausta>

Kumpulainen, J., Tihinen, S. & Laitinen, R. 2011. Ultralujien terästen hitsaus uusilla MAG-menetelmillä. *Hitsaustekniikka*, 2/2011. s. 6-12.

Laitinen, R., Porter, D., Karjalainen, L., Leiviskä, P. & Kömi, J. 2013. Physical Simulation for Evaluating Heat-Affected Zone Toughness of High and Ultra-High Strength Steels. *Proceedings of the 7th International Conference on Physical and Numerical Simulation of Materials Processing (ICPNS'13)*. s. 711-716.

Nykänen, T., Björk, T. & Laitinen, R. 2012. Fatigue strength prediction of ultra-high strength steel butt-welded joints. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol. 36, Iss. 6. s. 469-482.

Penttilä, T. 2013. Eri mag-hitsausprosessien ja -parametrien vaikutus suurlujuusteräksestä valmistetun otsapienenahitsin äärikestävyyteen, muodonmuutoskykyyn ja vauriomuotoon. *Lappeenrannan Teknillinen Yliopisto*. 116 s.

Pettinen, R. & Witting, L. 2014. *Hitsauksen materiaalioppi*. 4. painos. Helsinki. Suomen Hitsausteknillinen Yhdistys r.y. 304 s.

Ruukki. 2014a. Kuumavalssattujen terästen toimitustilat ja lyhenteet [Ruukin www-sivuilla]. [Viitattu 26.3.2014]. Saatavilla: <http://www.ruukki.fi/Tuotteet-jaratkaisut/Terastuotteet/Layer-pages/Kuumavalssattujen-terasten-toimitustilat-ja-lyhenteet>

Ruukki. 2014b. Optim QC Rakenneteräkset [verkkodokumentti]. [Viitattu 26.3.2014].
Saatavissa: <http://www.ruukki.fi/Tuotteet-ja-ratkaisut/Terastuotteet/Kuumavalssatut-terakset/Rakenneterakset/Optim-QC-rakenneterakset>. 6 s.

Scopus. 2014. Analyze search results [verkkodokumentti]. [Viitattu 16.12.2014].
Saatavissa:

http://www.scopus.com/term/analyzer.url?sid=4F8804995AAD819D17B389B8E701E07A.f594dyPDCy4K3aQHRor6A%3a1110&origin=resultslist&src=s&s=%28TITLE-ABS-KEY%28Ultra-high-strength+Steel+OR+UHSS%29+AND+TITLE-ABS-KEY%28weld*%29%29+AND+SUBJAREA%28MULT+OR+CENG+OR+CHEM+OR+COMP+OR+EART+OR+ENER+OR+ENGI+OR+ENVI+OR+MATE+OR+MATH+OR+PHYS%29&sort=cp-f&sdt=cl&sot=b&sl=174&count=184&analyzeResults=Analyze+results&cluster=scolang%2c%22English%22%2ct%2bscolang%2c%22English%22%2ct&txGid=351F0FBEBFAFE1A452308FCE107C5C7B.mw4ft95QGjz1tIFG9A1uw%3a6

SFS-EN 1993-1-8. 2005. Eurocode 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-8: liitosten mitoitus. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. 148 s.

SFS-EN 1993-1-12. 2007. Eurocode 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-12: laajennus teräslajeihin S700 asti. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. 11 s.

Stenbacka, N. 2011. Hitsaustalous ja tuottavuus. Helsinki: Eräsalon kirjapaino Oy. 159 s.

Valtanen, E. 2013. Tekniikan taulukkokirja. Jyväskylä: Genesis-Kirjat Oy. 1200 s.

Teoreettisen vertailujännityksen laskenta.

Murtoraja: $s := 1000$

Kulmat: $k_0 := 0 \cdot \frac{\pi}{180}$ $k_1 := 20 \cdot \frac{\pi}{180}$ $k_2 := 30 \cdot \frac{\pi}{180}$ $k_3 := 45 \cdot \frac{\pi}{180}$ $k_4 := 60 \cdot \frac{\pi}{180}$

Vertailujännityksen kaavat:

$\sigma_k := s \cdot (\cos(k))^2$ $\tau_y := s \cdot \frac{\sin(2 \cdot k)}{2}$ missä $\sin(x) \cdot \cos(x) = \sin(2x)/2$

$$\sigma_{\text{vert}} := \sqrt{\sigma_k^2 + 3 \cdot \tau_y^2}$$

$$\sigma_k = 1 \times 10^3 \quad \tau_y = 0$$

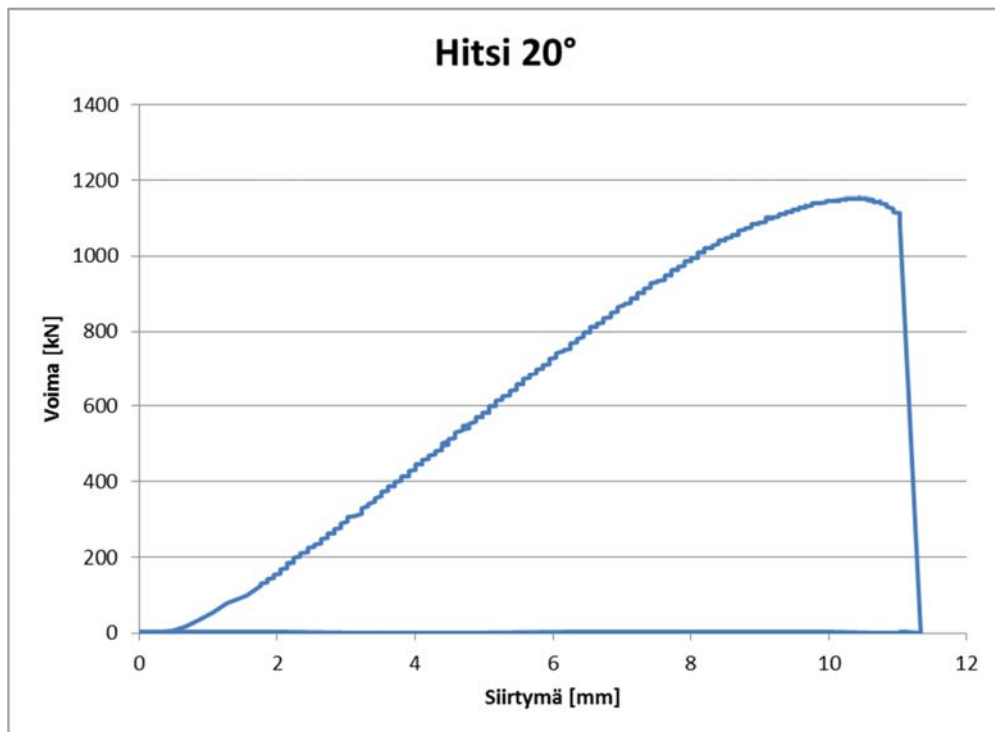
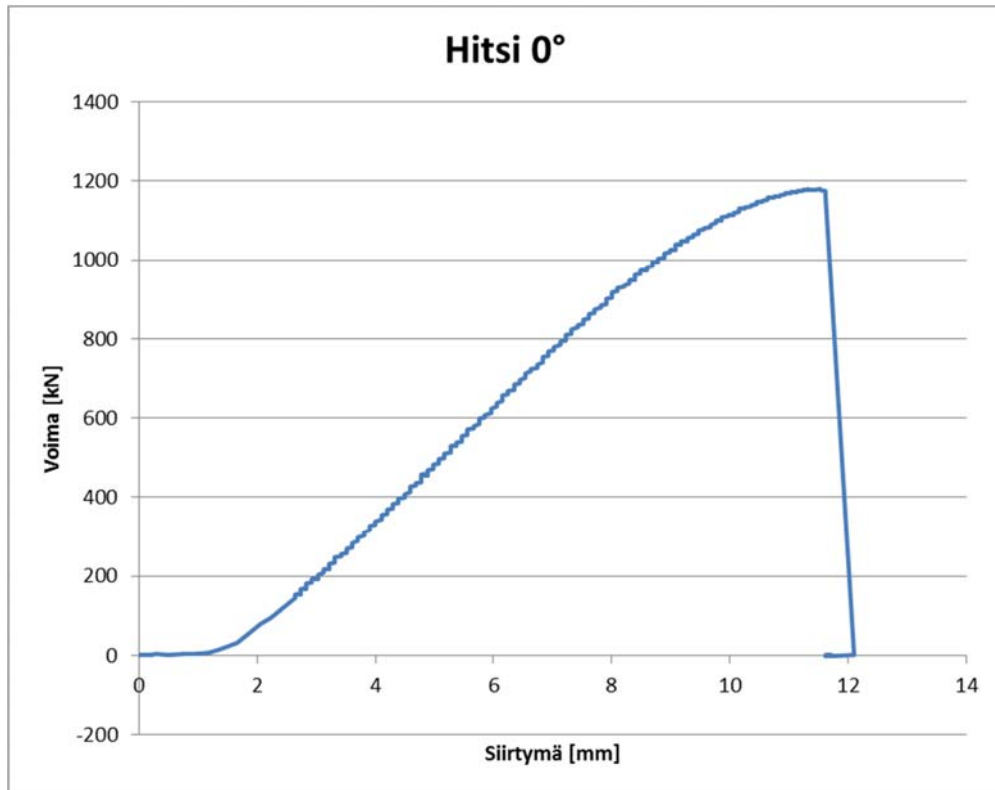
$$\sigma_{\text{vert}} = 1 \times 10^3$$

Kuvaajan piirtäminen kun $\sigma = 1$:

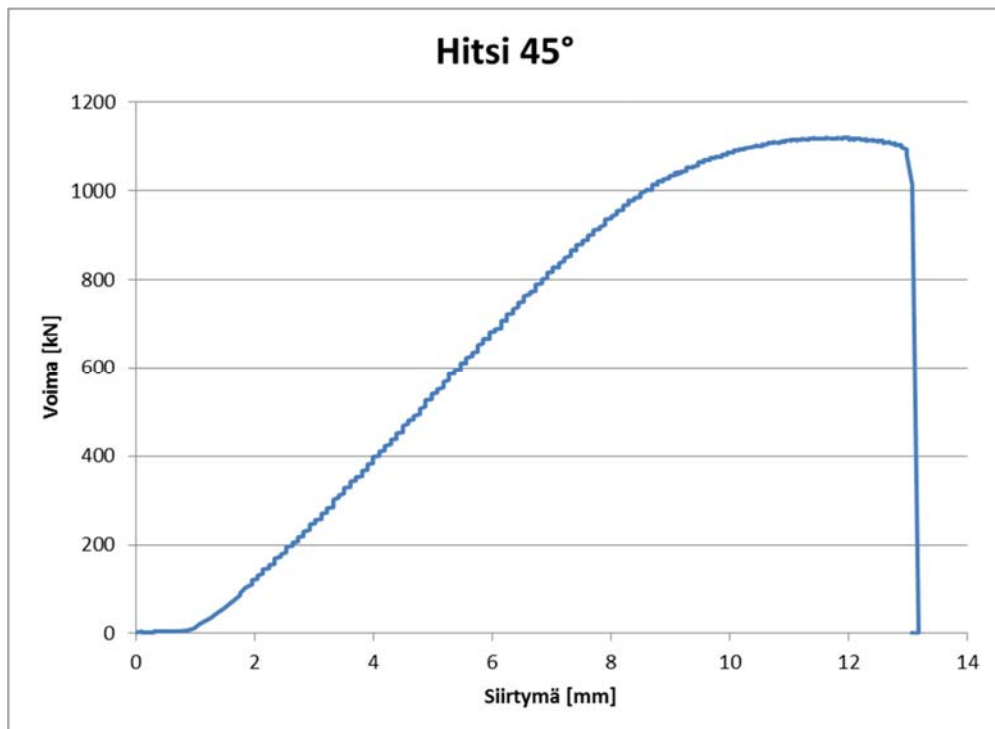
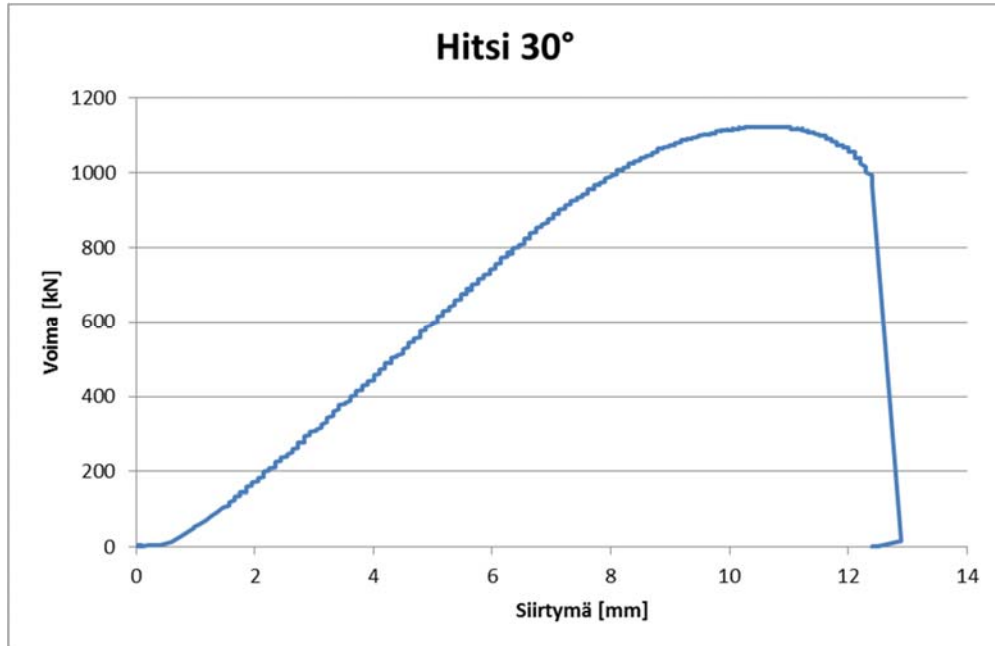
```
svert :=
| i ← 0
| while i < 90
|   | ki ← i ·  $\frac{\pi}{180}$ 
|   | si ← 1 · (cos(ki))2
|   |   sin(2 · ki)
|   | ti ← 1 ·  $\frac{\phantom{sin(2 \cdot k_i)}}{2}$ 
|   | i ← i + 1
|   | sve ←  $\sqrt{(s)^2 + 3 \cdot (t)^2}$ 
| sve
```

```
kulma :=
| i ← 0
| while i < 90
|   | ki ← i
|   | i ← i + 1
| k
```

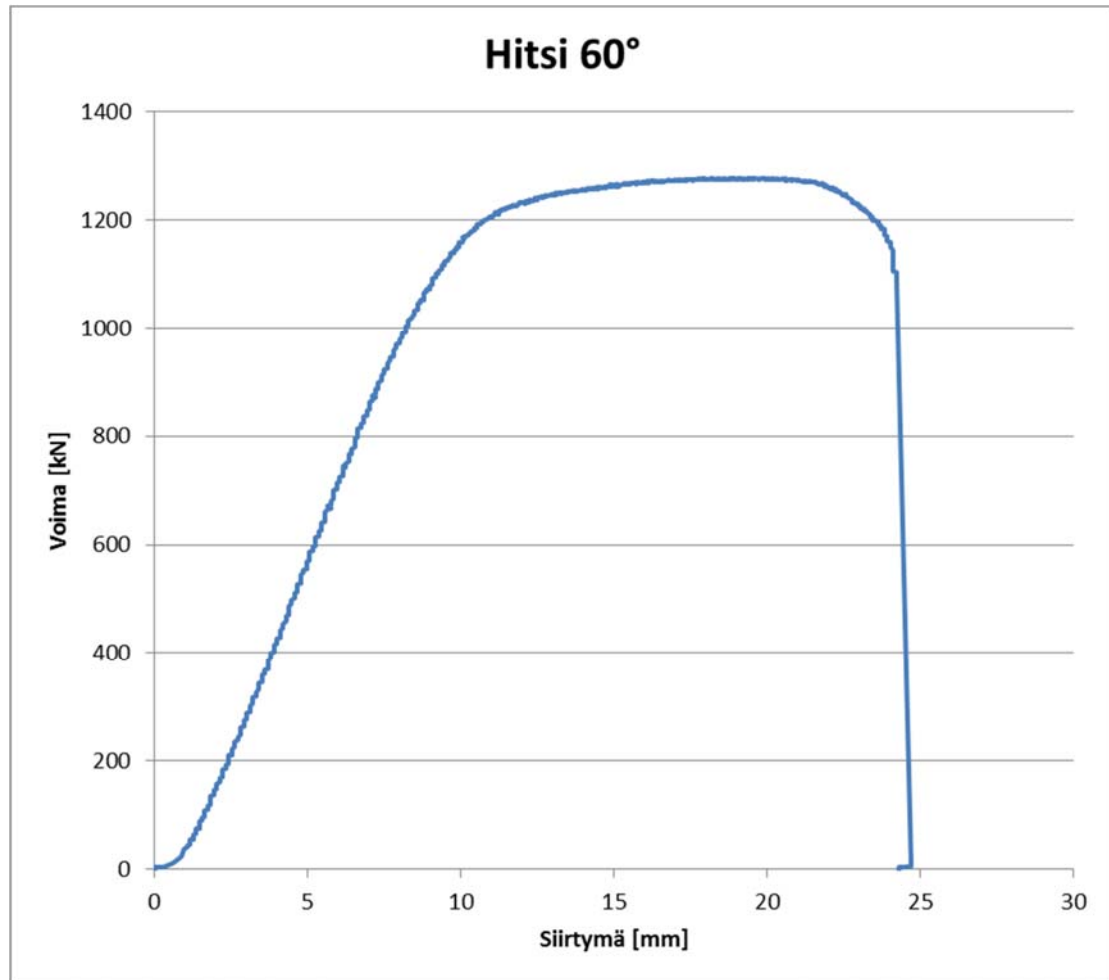
Voima-siirtymä kuvaajat testikappaleille.



Voima-siirtymä kuvaajat testikappaleille.



Voima-siirtymä kuvaajat testikappaleille.



Käännetyn jännityksen vertailuluvun laskenta:

Kulmat: $k_0 := 0 \cdot \frac{\pi}{180}$ $k_1 := 20 \cdot \frac{\pi}{180}$ $k_2 := 30 \cdot \frac{\pi}{180}$ $k_3 := 45 \cdot \frac{\pi}{180}$ $k_4 := 60 \cdot \frac{\pi}{180}$

$$\sigma_{\text{vert}} := \sqrt{\sigma_k^2 + 3 \cdot \tau_y^2} \quad \text{Jännityksen yksinkertaistettu yhtälö, jossa:}$$

$$\sigma_k := \sigma M \cdot (\cos(k))^2 \quad \tau_y := \sigma M \cdot \frac{\sin(2 \cdot k)}{2}$$

Jännityksen yksinkertaistetusta yhtälöstä saadaan σM ratkaistua:

$$\sigma V := 1000$$

$$\sigma M^2 := \frac{\sigma V^2}{(\cos(k))^4 + 3 \left(\frac{\sin(2 \cdot k)}{2} \right)^2}$$

$$\sigma M := \sqrt{\sigma M^2}$$

$$\sigma M = \begin{pmatrix} 1 \times 10^3 \\ 957.998 \\ 942.809 \\ 1 \times 10^3 \\ 1.265 \times 10^3 \end{pmatrix}$$