

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Teknillinen tiedekunta

Konetekniikan koulutusohjelma

BK10A0401 Kandidaatintyö ja seminaari

HENKILÖNOSTIMEN PUOMIN ÄÄRILUJUUS
EXTREME STRENGTH OF A PERSON LIFTER'S BOOM

Lappeenrannassa 23.12.2012

Markus Wilén

0326107

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

1	JOHDANTO	4
2	RAKENTEEN MITOITUSKRITEERIT	5
2.1	Plastisuus	5
2.2	Hitsien väsyminen.....	5
2.2.1	Rakenteen kuormitus	6
2.2.2	Rakenteen epäjatkuvuuskohtat.....	7
2.2.3	Rakenteellisen jännityksen menetelmä.....	7
2.3	Haurasmurtuma.....	8
2.4	Jäykkyys.....	9
2.5	Lommahdus	10
3	PUOMIN ÄÄRILUJUUS	12
3.1	Yleistä kokeesta	12
3.2	Koejärjestelyt.....	13
3.2.1	Kuormitustapaus 1	13
3.2.2	Kuormitustapaus 2	15
3.2.3	Venymäanturit	16
3.3	Tulokset	17
3.3.1	Kuormitustapaus 1	18
3.3.2	Kuormitustapaus 2	23
4	JOHTOPÄÄTÖKSET	29
	LÄHTEET	31

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Δ		Jännityksien ääriarvojen vaihteluväli
σ	[MPa]	Jännitys
σ_{prim}	[MPa]	Primaarijännitys
σ_{sek}	[MPa]	Sekundaarijännitys
f_{yd}	[MPa]	Materiaalin myötölujuus
f_y	[MPa]	Materiaalin myötölujuus
$a_{cr,y}$	[mm]	Myötötilaa vastaava kriittinen särökoko
K_{IC}		Materiaalin murtositkeys
Y(a)		Särön muodon kerroin
E	[MPa]	Materiaalin kimmokerroin
ε		Materiaalin venymä
$\sigma_{cr,p}$	[MPa]	Levyn kriittinen lommahdusjännitys
ν		Suppeumaluku
t	[mm]	Levyn paksuus
b	[mm]	levyn leveys
k_{σ}		Lommahduskerroin
IIW		International Institute of Welding
FEM		Finite Element Method

1 JOHDANTO

Tämän kandidaatintyön aiheena oli varmistua ultralujasta teräksestä valmistetun henkilönostimen puomin äärijuuudesta. Henkilönostimen puomin käyttökohteena on palo- ja pelastuskäyttö. Puomin profiilit oli suunniteltu aiemmin diplomityönä ja nyt tarkoituksena oli tehdä jatkotutkimus Lappeenrannan teknillisen yliopiston Teräsrakenteiden laboratoriossa, jotta varmistuttaisiin puomin lujuudesta. Puomin valmistuksessa käytettiin ultralujaa Rautaruukin Optim 960 QCW terästä, mistä ei aiemmin kyseistä konstruktiota ole rakennettu.

Työn päätavoitteena oli tehdä luottamuksellinen tutkimusraportti työn teettäjälle ja analysoida tulokset. Tässä kandidaatintyössä on rajattu osa testien tuloksista pois, osittain myös työn laajuuden perusteella.

Tämän työn teoriaosuudessa käsitellään yleisesti asioita, jotka ovat kriittisiä puomin mitoituksessa. Näistä on käsitelty yleisesti hitsin väsymiseen vaikuttavia tekijöitä, haurasmurtuma, lommahdus ja plastisuus. Tämän jälkeen on esitelty laboratoriokokeiden koejärjestelyt ja niiden tulokset. Osaa laboratoriokokeiden tuloksista vertaillaan analyyttisen ratkaisun ja FEM-laskennan avulla saatuihin arvoihin vaurioista. Näistä vaurioista kriittisimpänä pidetään profiilin levykentän lommahdusta. Työn lopussa on summattu tulokset ja puomin vauriot yhteenvedon muodossa, jotta varmistuttaisiin puomin kestävydestä.

2 RAKENTEEN MITOITUSKRITEERIT

Hitsatun rakenteen väsyminen on hyvin tärkeä mitoituskriteeri koko rakenteen käyttöiän ja turvallisuuden kannalta. Vauriomekanismeista on kuvailtu haurasmurtuma, lommahdus ja plastisuus. Näistä vaarallisin on haurasmurtuma, koska silloin särö etenee materiaalissa suurella nopeudella ilman plastista muodonmuutosta. Lisäksi on esitelty materiaalin jäykkyys.

2.1 Plastisuus

Plastisoituminen kuuluu rakenneanalyysin murtorajatiloihin, missä ei itsessään tapahdu murtumista tai särön kasvua, vaan rakenteeseen tulee plastisia muodonmuutoksia, jotka vaurioittavat sitä. Rakenteen kuormitustilanne aiheuttaa materiaaliin plastisen rajatilan, jolloin rakenne tai vain osa siitä ajautuu kyseiseen rajatilaan. Tällöin materiaali alkaa myödetä ja rakenteen plastinen muodonmuutos kasvaa. (Niemi 2003, s. 14)

Plastinen muodonmuutos tapahtuu, kun rakenteessa vaikuttava jännitys saavuttaa materiaalin myötörajan, jonka jälkeinen myötääminen on plastista muodonmuutosta. Jopa pieni myötörajan ylitys jännityksessä aiheuttaa rakenteeseen pysyviä muodonmuutoksia. (Hibbeler 2005, s. 88)

Plastisen muodonmuutoksen erona kimmoiseen muodonmuutokseen on se, että kuorman poistossa plastisen osan muodonmuutos ei palaudu. Tällöin rakenteeseen jää pysyviä muodonmuutoksia. (Dowling 2007, s. 3)

2.2 Hitsien väsyminen

Rakenteiden väsymismitoitus on hyvin tärkeä aihe-alue, koska noin 80-90% rakennevaurioista, mitkä johtavat murtumiseen, aiheutuvat materiaalin väsymisestä. Erityinen vaara piilee hitsatuissa rakenteissa, koska ne väsyvät huomattavasti helpommin kuin hitsaamattomat rakenteet. Hitsattujen rakenteiden väsymismitoitus onkin koneenrakennuksen alueella tärkeä mitoituskriteeri, koska koneenrakennuksessa käytetään paljon hitsattuja rakenteita. Hobbacherin (2008) IIW julkaisu ja Eurocode 3:n standardi

ovat hyviä ohjeita perustaitojen avuksi hitsien väsymismitoitukseen. Väsymiseen vaikuttaa rakenteen kuormat ja epäjatkuvuuskohdat. Hitsatun rakenteen väsymiseen ei siis vaikuta teräksen lujuus, ellei rakenteen alkusäröjä voida eliminoida. Tämä johtuu siitä, että säröt kasvavat kaikissa teräksissä suunnilleen samalla nopeudella, eikä myötörajalalla ole siihen merkitystä. Väsymiskestävyyden arviointiin on myös eri menetelmiä. (Niemi s. 92, 95)

2.2.1 Rakenteen kuormitus

Hitsatun rakenteen suunnittelussa on tärkeää arvioida kuormituksen tyyppi, koska se vaikuttaa suoraan rakenteen kestävyyskykyyn. Kuormitus voi olla vakioamplitudista, eli kuormanvaihtelu ja keskijännitys pysyvät samana koko kuormitusjakson ajan. Kuormitus voi olla myös muuttuva-amplitudista, jolloin kuormitusjakson aikana rakenteeseen tulee erisuuruisia kuormanvaihteluita. Puomiin voi tulla myös eri kuormituksia käyttöolosuhteista riippuen, näitä kuormituksia ovat mm:

- taakan suuruuden vaihtelu henkilön kanssa
- henkilön ja suihkun sijainti puomiin nähden
- puomin asentojen vaihtelu
- rakenteen kiihdytykset ja jarrutukset
- alustan epätasaisuudet kuljetuksen aikana
- vesisuihkun suunta ja tuulikuormat
- lämpöjännitykset

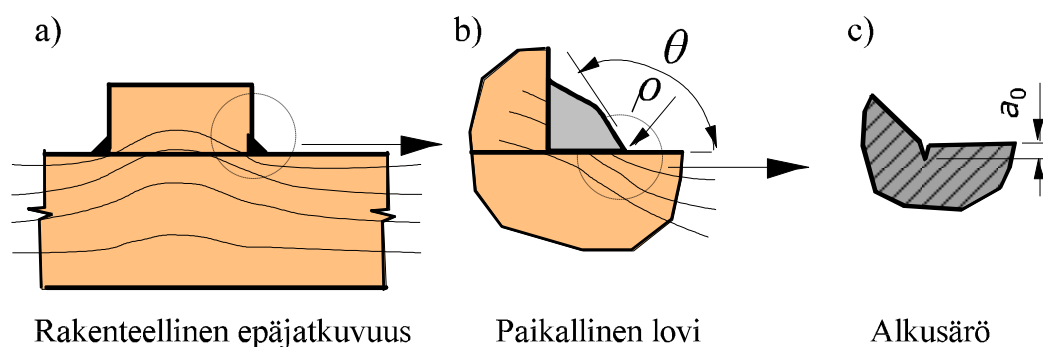
Koska hitsausjännitykset pitävät rakenteen jännitystä korkeana, niin kuormituksen keskijännityksellä ei ole niin suurta merkitystä matala lujuuksisilla teräksillä, vaan merkittävä on suurimman ja pienimmän kuormituksen erotuksen suuruus. (Niemi 2003, s. 92)

Kuten edellä todettiin, niin useimmiten kuormitus ei ole vakioamplitudista, vaan muuttuva-amplitudista. Kuormituksella on suuri vaikutus hitsatun rakenteen kestoikään ja sen laskennassa tulisi muuttuva-amplitudinen kuormitus muuttua ekvivalentiksi jännitysvaihteluksi. Tämä onnistuu rainflow-menetelmällä, jolloin muuttuva-amplitudinen kuormitus jaetaan yksittäisiin kuormitusheilahduksiin. Rainflow-menetelmällä tutkitaan

nimenomaan kuormituksen ääriarvoja ja niiden esiintymisjärjestystä. Tällöin muuttuva-amplitudinen kuormitus saadaan muunnettua laskennallisesti ekvivalentiksi vakio-amplitudiseksi. (Hobbacher 2008, s. 110; Niemi 2003, s. 93; Pennala 2002, s. 364)

2.2.2 Rakenteen epäjatkuvuuskohdat

Rakenteen epäjatkuvuuskohdat ovat kriittisiä särön syntymiskohtia, joista särö useimmiten lähtee kasvamaan. Todennäköisesti näin tapahtuu hitsin rajaviivalta, josta särö etenee itse perusaineeseen ja synnyttää murtuman. Jos hitsi on mitoitettu väärin tai sen laatu ei ole vaadittua, niin särö voi silloin lähteä etenemään hitsiaineen läpi juurenpuolelta. Kuvassa 1 on esitetty rakenteellisen epäjatkuvuuden eri tasot.



Kuva 1. Epäjatkuvuuskohdat. (Niemi 2003, s. 94)

Kuvassa 1 havainnollistetaan epäjatkuvuuden kerroksellisuutta, jolloin kaikkien kohtien vaikutukset vaikuttavat särön syntymiseen särön ydintymiskohdassa. (Niemi 2003, s. 94)

2.2.3 Rakenteellisen jännityksen menetelmä

Rakenteellisen jännityksen menetelmä on yksi neljästä menetelmästä määrittää hitsin kestoikä. Muita menetelmiä ovat nimellisen jännityksen menetelmä, tehollisen lovijännityksen menetelmä ja murtumismekaniikka. Rakenteellisen jännityksen menetelmää voidaan kutsua myös hot spot -menetelmäksi, missä tarkastellaan hot spot -jännitystä hitsin rajaviivalla. Hot spot -jännitys vaikuttaa levyn pinnalla kohtisuorasti hitsin rajaviivaan. Tämä menetelmä pitää siis sisällään kalvojännityksen ja sekundaarijännitysten

vaikutuksen hitsin rajaviivalla, mutta ei ota huomioon loven vaikutusta. (Niemi 2003, s. 95, 99)

Eurocode 3 ja IIW antavat omat suositukset hot spot -jännityksen SN-käyriin ja FAT luokkiin. Tämä menetelmä soveltuu yleisesti, jos särön oletetaan kasvavan nimenomaisesti hitsin rajaviivalta. (Niemi 2003, s. 99-100)

2.3 Haurasmurtuma

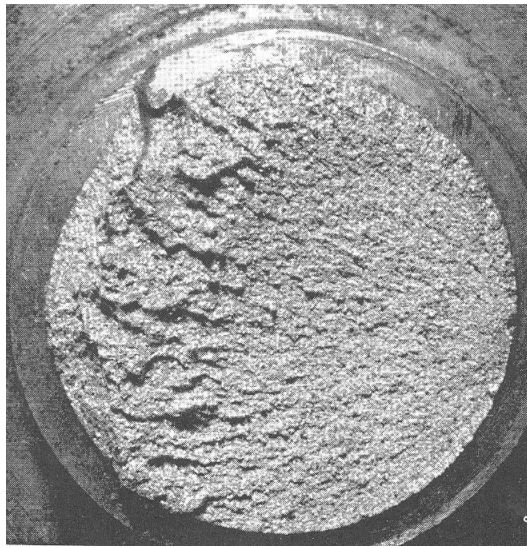
Haurasmurtuma on kenties vaarallisin eri murtumistyypeistä, koska se lähtee etenemään alkusäröstä nopeasti heikointa mikrorakennetta pitkin ilman suurta plastista muodonmuutosta. Särön etenemistä ohjaa myös toisena tekijänä jännitysintensiiviteetti. Paikallinen plastinen muodonmuutos kuitenkin aiheuttaa sen, että mikrosärö ydintyy joko raerajoihin tai kiteisiin, joiden hilatasoja pitkin murtuma etenee jopa rakenteen läpi. Haurasmurtuman tyypillinen alalaji on lohkomurtuma, joka muodostuu, kun murtuma etenee kiteiden läpi. Toinen alalaji on raerajamurtuma. Murtumassa ei tapahdu kuormien uudelleen jakautumista, vaan haurasmurtuman suuri etenemisnopeus johtuu siitä, että materiaalista vapautuu kimmoenergiaa. (Björk 2011; Pennala 2002, s. 367-368)

Materiaalin haurasmurtumaan vaikuttaa yleisesti materiaalin ominaisuudet kuten sitkeys, lujuus ja mikrorakenne. Materiaalin käyttötilalla on myös vaikutusta murtumiseen, kuten myös kuormituksen tyypillä ja nopeudella, sekä hitsauksesta jääneillä jäännösjännityksillä. Materiaalin geometria vaikuttaa myös ja kriittisin tekijä on särö, mistä murtuma lähtee etenemään. Myötötilaa vastaava kriittinen särökoko voidaan määrittää yhtälöstä 1.

$$a_{cr,y} = \frac{1}{\pi Y(a)} \frac{K_{IC}^2}{f_y^2} \quad (1)$$

, missä $a_{cr,y}$ on myötötilaa vastaava kriittinen särökoko, K_{IC} materiaalin murtositkeys, $Y(a)$ on särön muodon kerroin ja f_y materiaalin myötölujuus. (Björk 2011)

Kuvassa 2 on esitetty haurasmurtuman murtopinnan, jonka voi helposti tunnistaa.



Kuva 2. Haurasmurtuman poikkipinta. (Björk 2011)

Murtopinnasta on nähtävissä, että murtuma on lohkomainen, siinä ei ole poikkipintakuroumaa ja murtuman lähtökohta on nuolimainen. (Björk 2011)

2.4 Jäykkyys

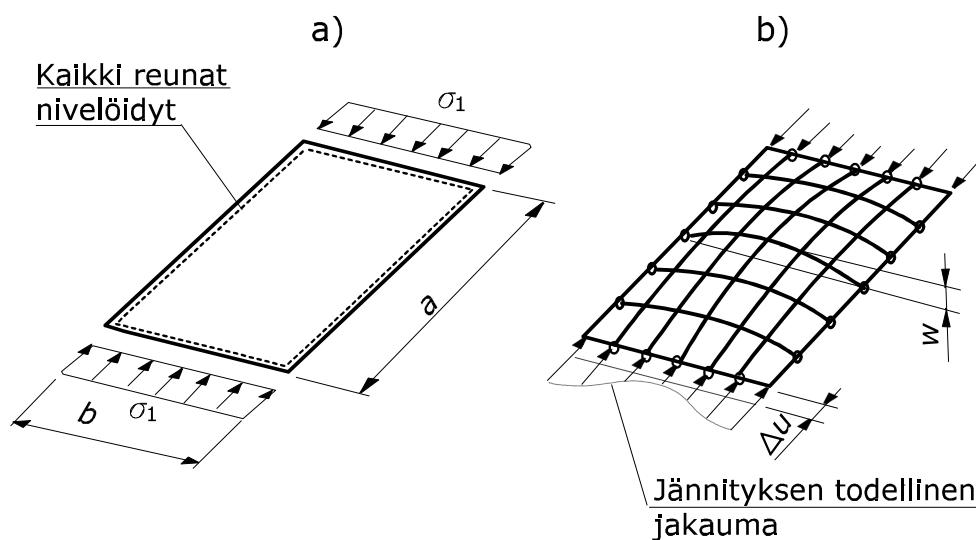
Vuonna 1676 Robert Hooke huomasi, että jännityksellä ja venymällä on lineaarinen suhde toisiinsa nähdessä kimmoisella alueella, kun jännitystä lisää, niin venymä kasvaa. Tätä suhdetta kuvataan kimmokertoimella, joka Hooken lain mukaisesti voidaan määrittää yhtälön 2 avulla.

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2)$$

missä σ on jännitys (MPa), E on materiaalin kimmokerroin ja ε on materiaalin kimmoisen venymä (mm). Kimmokerroin on suure, joka nimenomaan kuvaa materiaalin kimmoisuutta ja muotojäykkyyttä. Materiaalin venymä ja taipuma ovat riippuvaisia kappaleen jäykkyydestä eli kimmokertoimen ja jäyhyyden tulosta, mikä saadaan laskettua yhtälöstä 2. (Hibbeler 2005, s. 94; Pennala 2002, s. 25; Suoranta 2007; Valtanen s. 441, 475)

2.5 Lommahdus

Lommahdus johtuu puristusjännityksestä, jolloin se ilmiönä heikentää rakenteen kestävyyttä. Lommahduksen aiheuttajana on puristusjännitys, mikä on otettava huomioon mitoituskriteerinä. Rakenteen levykentät, jotka ovat puristusjännityksen vaikutuksen alaisena, voivat lommahtaa. Levykentän lommahtaminen on havainnollistettu kuvassa 3. (Niemi 2003, s. 17)



Kuva 3. Lommahduksen perustapaus. (Niemi 2003, s. 17)

Kuvan 3 a) levyyn vaikuttaa puristusjännitys σ_1 ja b)-kohdassa levykenttä on lommahtanut. (Niemi 2003, s. 17)

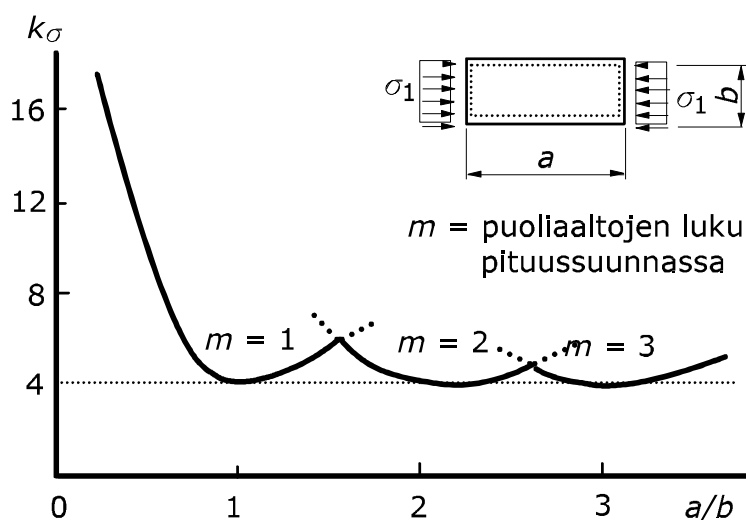
Lommahduksessa rakenneosat jaetaan neljään eri poikkileikkausluokkaan, määräytyen levykenttien b/t suhteista. Tässä on esitetty poikkileikkausluokka 3, koska tutkimuksen kohteena olleen puomin profiili mitoitettiin sen mukaan. (Niemi 2003 s. 17)

Poikkileikkausluokka 3 on puolikomakti, jolloin puristusjännityksen maksimi arvo saa saavuttaa materiaalin myötöluuden f_y . (Niemi 2003 s. 21)

Levyn kriittinen lommahdusjännitys voidaan ratkaista yhtälön 3 mukaisesti.

$$\sigma_{cr,p} = k_{\sigma} * \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} * \frac{t^2}{b^2} \quad (3)$$

, missä $\sigma_{cr,p}$ on levyn kriittinen lommahdusjännitys, E on materiaalin kimmomoduuli, ν on suppeumaluku, t on levyn paksuus, b on levyn leveys ja k_{σ} on lommahduskerroin. Lommahduskerroin määräytyy levyn sivusuhteesta a/b , mikä on esitetty kuvassa 4. (Niemi 2003, s. 18)



Kuva 4. Lommahduskerroimen ja levyn muotosuhteen välinen yhteys. (Niemi 2003, s. 18)

3 PUOMIN ÄÄRILUJUUS

Tutkimuksen tarkoituksena oli varmistua henkilönostimen puomin lujuudesta, joka oltiin suunniteltu vuonna 2008. Puomi profiilien materiaalina oli suorakarkaistu ultraluja säänkestävä rakenneteräs S960QCW, teräksen myötölujuus on 960 MPa, murtolujuus 1000 MPa ja kimmokerroin 210 GPa. (Kinnunen 2008, s. 10)

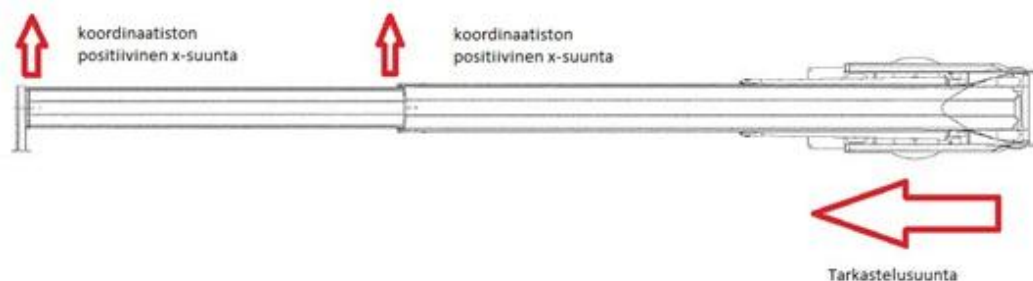
Puomin jalustan ja sylinterien korvakkeiden materiaalina oli S650MC, minkä myötölujuus on 650 MPa, murtolujuus 700 MPa ja kimmokerroin 210 GPa.

Tuloksissa viitataan FEM-laskelmiin, jotka työnteettävä oli tehnyt puomista ennen kuormituskokeita.

3.1 Yleistä kokeesta

Kuormituskokeiden tarkoituksena oli varmistua puomin kestävydestä ja äärijuuudesta. Työn tilaaja toimitti valmiit osat laboratorioon. Testit suoritettiin juuri tähän suunnitellulla testilaitteistolla.

Tutkimuksessa puomia tarkastellaan siten, että katsoja on jalustan päädystä. Kuvissa 5 ja 6 on esitetty sekä katsomissuunta, että koordinaatisto, missä tarkastellaan puomin siirtymiä.



Kuva 5. Kuva puomista ylhäältäpäin. Positiivinen x-suunta.



Kuva 6. Kuva puomista sivultapäin. Positiivinen y-suunta.

Tässä työssä esitellään vain kaksi viimeisintä kuormitustapausta, joissa saatiin pysyviä muodonmuutoksia aikaan. Ensimmäisissä kuormituskokeissa tarkasteltiin vain nimellisten korikuormien vaikutusta puomiin.

3.2 Koejärjestelyt

Molemmissa esitetyissä kokeissa siirtymä-antureiden paikat ja tyypit pysyivät samoina kuten myös venymäantureiden paikat ja tyypit. Molemmista kuormitustapauksista esitellään koejärjestelyt ja venymäanturit käsitellään omana aihe-alueenaan.

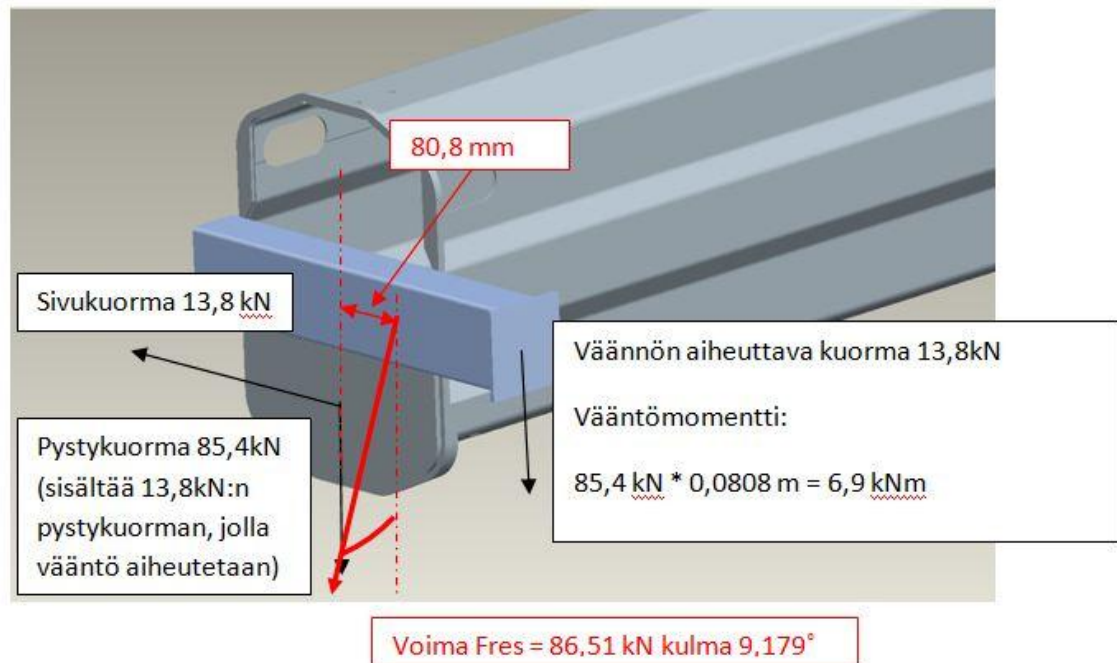
Kokeissa tarkasteltiin puomin pysty- ja sivusiirtymiä, sekä toisen että ensimmäisen jakson päädyistä. Siirtymien tarkastelu kohdat käyvät ilmi myös liitteestä 1. Liitteessä 1 on myös esitetty venymäantureiden paikat.

Kaikissa kuormitustapauksissa käytettiin samaa voima-anturia, joka oli: Interface 1020 AF 2500LBS. Lisäksi ennen jokaista kuormitustapausta sekä venymäantureiden että siirtymäantureiden mittausta asetettiin alkavan nollassa.

3.2.1 Kuormitustapaus 1

Ensimmäisen kuormitustapauksen tarkoitus oli saada varmuus FEM-laskelmissa arvioituun sylinterien korvakkeiden lommahtamiseen. Kuvassa 7 on esitetty kuormitustapauksen

kuormitussuunnitelma. Pystysiirtymiä mitattiin puomin molemmilta puolilta, jotta pystyttäisiin määrittämään vääntömomentin aiheuttama kiertymä.



Kuva 7. Kuormitussuunnitelma.

Kuvassa 7 näkyvä yhdistelmäkuormitus koostui seuraavasti: taivutus alas 85,4 kN + taivutus sivulle 13,8 kN + vääntö 12 kN kuvan 3 mukaisesti. Kuormitustapauksessa 3 puomia kuormitettiin resultanttivoiman maksimi arvolla 86,7 kN. Kuvasta 8 huomataan, että voima ei vaikuta x-akselilla profiilin keskellä, vaan 80,8 mm negatiiviseen x-suuntaan. Resultanttivoima oli 9,2° puomin y-suuntaan nähden. Lisäksi kuormittava resultanttivoima oli asetettu suoraan kulmaan (90°) puomin pituusakseliin nähden. Kuvassa 8 esitetään vielä kuormitustapauksen koejärjestelyt.



Kuva 8. Kuormitustapaus 1, koejärjestelyt.

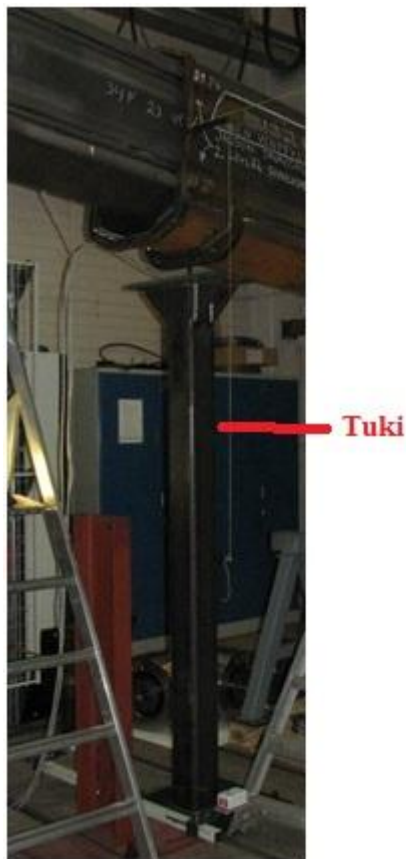
Siirtymien mittauksessa käytetyt anturit:

- Toisen jakson pystysiirtymä oikea: Uni Measure P510-40
- Toisen jakson pystysiirtymä vasen: Uni Measure P510-40
- Toisen jakson sivusiirtymä: Uni Measure P510-40
- Ensimmäisen jakson pystysiirtymä oikea: Uni Measure P510-40
- Ensimmäisen jakson pystysiirtymä vasen: Uni Measure P510-40
- Ensimmäisen jakson sivusiirtymä: ASm WS10-1000-R1K-L10

3.2.2 Kuormitustapaus 2

Viimeinen kuormitustapaus oli samanlainen kuin edellinen, mutta voiman suuntaa muutettiin. Voima vaikutti edelleen samassa pisteessä 80,8 mm negatiiviseen x-suuntaan, kuten edellisessä kuormitustapauksessa, mutta voima asetettiin nyt kohtisuorasti y-suuntaan ja suorassa kulmassa x-akseliin nähden. Koska edellisessä kuormitustapauksessa saavutettiin jalustaan pysyviä muodonmuutoksia, niin ensimmäisen jakson päähän

jouduttiin rakentamaan tuki, jotta saavutettaisiin kriittinen kantokyky toisen jakson profiilissa. Tuki ja sen paikka käyvät ilmi kuvasta 9. Siirtymä-anturit ja niiden paikat olivat samat kuin edellisessä kuormitustapauksessa.



Kuva 9. Kuormitustapaus 2. Tuki 1. jakson päässä.

3.2.3 Venymäanturit

Puomiin asetettiin venymäantureita, joiden avulla voidaan määrittää puomissa vaikuttavat jännitykset. Venymäantureiden paikat on esitetty liitteessä 1.

Jokaisessa kokeessa käytettiin samoja venymäantureita ja niiden paikat pysyivät samana. Anturit olivat HBM:n valmistamia ja taulukosta 1 käy ilmi antureiden tyytit ja niiden k-arvot. Venymäanturit 9, 10a ja 10b olivat hot-spot antureita, jotka olivat sijoitettu rakenteellisiin epäjatkuvuuskohtiin.

Taulukko 1. Venymäantureiden tyypit ja k-arvot.

Liuska	Tyyppi	k-arvo
J2_2	0,6/120 LY 41	1,75
5a	3/120 XY 91	1,97
5b	3/120 XY 92	1,97
9	0,6/120 LY 41	1,75
10a	0,6/120 LY 41	1,75
10b	0,6/120 LY 41	1,75
11	0,6/120 LY 41	1,75
12	0,6/120 LY 41	1,75
15	3/120 XY 41	2,02

3.3 Tulokset

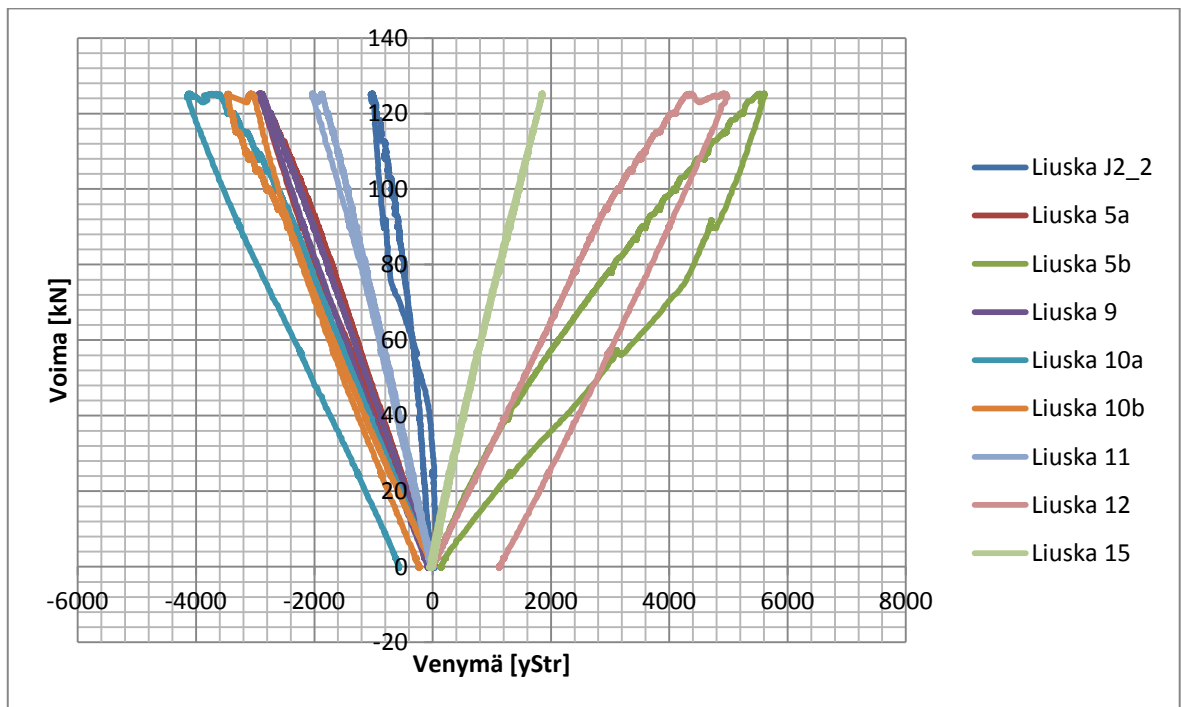
Molemmissa kuormitustapauksissa saavutettiin ennakoitua tulokset, joten voidaan todeta, että kokeet onnistuivat erinomaisesti.

Kokeissa ei pystytä vertaamaan hot-spot venymäantureita 9, 10a ja 10b:tä, koska viimeisessä kuormitustapauksessa ensimmäisen jakson alle rakennetusta tuesta johtuen kyseisiin antureihin ei enää kohdistunut jännitystä.

Molemmissa kuormitustapauksissa käsitellään vain yksiakiaalista venymätilaa, joten venymäantureiden tulos voidaan kertoa suoraan 0,21:llä, jolloin saadaan jännitys MPa:na. Kerroin 0,21 tulee aiemmin esitetystä yhtälöstä 2, missä kimmokertoimen arvo 210 GPa muunnetaan μPa :ksi.

3.3.1 Kuormitustapaus 1

Ensimmäisessä kuormitustapauksessa kuormitettiin puomia, kunnes sylinterien korvakkeet lommahtivat 125 kN resultanttivoimalla. Puomin jalustaan syntyi myös muita lommahduksen muodonmuutoksia. Tällöin jalustassa oli puristusjäännitystä, joka käy ilmi kuvasta 10, missä on esitetty venymät.



Kuva 10. Kuormitustapaus 1. Venymä - voima kuvaaja.

Kuvasta 10 huomataan, että esimerkiksi anturin 10a (lähellä lommahduskohtaa) venymän ja voiman suhde alkaa muuttua jo alle 100 kN:n kohdalla epälineaariseksi. Lommahduksen tapahtuessa 125 kN:n resultanttivoimalla anturissa 10a venymä oli $-4116 \mu\text{Str}$ ja anturissa 10b $-3066 \mu\text{Str}$. Myös anturi 12 käyttäytyy samankaltaisesti kuin anturit 10a ja 10b, mutta sen maksimi venymä kokeen aikana oli $4937 \mu\text{Str}$. Antureista J2_2, 12 ja 5 voidaan huomata, että puomiin jäi jäännösvenymiä kuormituksen poistamisen jälkeen.

Hot-spot antureihin 10a ja 10b venymä aiheutuu resultanttivoiman interaktiosta x- ja y-suuntaan. Anturin 9 venymä muodostuu vain y-suuntaisesta resultanttivoiman komponentista, jonka voi todeta ensimmäisen kuormitustapauksen perusteella.

Seuraavaksi on eroteltu maksimikuormalla resultanttivoiman x- ja y-suuntaiset komponentit. $F_{\max} = 125 \text{ kN}$, voiman kulma $\alpha = 9,2^\circ$.

$$F_x = F_{\max} * \sin\alpha = 125 \text{ kN} * \sin(9,2^\circ) = 20 \text{ kN}$$

$$F_y = F_{\max} * \cos\alpha = 125 \text{ kN} * \cos(9,2^\circ) = 123 \text{ kN}$$

Tällöin anturiin 9 kohdistuvan venymän aiheuttaa voiman F_y -komponentti.

Liitettä 1 tarkastellessa huomataan, että anturi 10b on rakenteellisesti epäjatkuva kohdassa eli hitsin nurkassa. Näin ollen voidaan olettaa, että jännitys sillä alueella olisi suurempi. Kuvasta 22 kuitenkin huomataan, että alemmilla kuormituksilla nimenomaan anturin 10b venymä hitsin nurkassa on jopa hieman suurempi kuin anturin 10a. Mutta suuremmilla kuormituksilla anturi 10a on korvakkeen levyssä kiinni, minkä tuntumassa venymät kasvavat huomattavasti enemmän kuin anturin 10b hitsin nurkassa. Lisäksi poikittainen jäykiste, minkä hitsin nurkassa anturi 10b sijaitsee, tukee korvakkeen yläosaa sen verran hyvin, että vain korvakkeen alaosa pyrkii myötämään.

Kuvasta 11 näkyy kun sylinterien korvakkeiden lommahtaminen kuormituksen ollessa 125 kN.



Kuva 11. Kuormitustapaus 1. Sylinterien korvakkeiden lommahdus.

Korvakkeen myötöraja 650 MPa saavutettiin jo hieman ennen 110 kN:n kuormitusta, jolloin korvakkeet alkoivat myödetä ja lähestyä toisiaan. Taulukossa 2 on esitetty, miten kuvassa 11 näkyvät korvakkeet lähenivät toisiaan.

Taulukko 2. Korvakkeiden välinen etäisyys.

Voima [kN]	korvakkeiden väli [mm]
95	484
100	485
105	486
109	482
110	482
115	481
120	480
125	475
125 lommahduksen jälkeen	451

Taulukosta 2 huomataan, että korvakkeet lähenivät toisiaan jo aiemmilla voimilla, eritoten 105 kN:n ja 109 kN:n välillä ne lähenivät toisiaan 4 mm. Tämä kertoo siitä, että puristusjännitys nousi tällä välillä korvakkeissa jo yli myötörajan ja materiaali alkoi myödetä. Kriittisin muutos tapahtui 120 kN:n ja 125 kN:n kohdalla, jolloin tapahtui jo selvästi silminnähtävä lommahdus, eli saavutettiin korvakkeiden kriittinen lommahdusjännitys. Lommahduksen myötä voidaan todeta, että stabiilius on korvakkeiden kannalta kriittisempi kuin myötääminen. Vaikka puomi oli mitoitettu poikkileikkausluokka 3:n mukaisesti, jolloin puristusjännityksen suurin arvo olisi sama kuin materiaalin myötölujuus, niin tuloksista voidaan selvästi päätellä, että todellinen kriittinen puristusjännityksen arvo on suurempi kuin materiaalin myötölujuus.

Anturit 10a ja 10b ovat samassa levyssä kiinnitettynä, missä lommahdus tapahtui. Aluksi lommahdusta on varmasti pyrkinyt estämään kuvassa 11 näkyvä poikkipalkki, mikä on jäykistänyt rakennetta. FEM-laskelma ennustaa lommahduskohdan aivan eri paikkaan, missä se oikeasti tapahtui. Ennen lommahdusta sylinterien korvakkeet pyrkivät lähenemään toisiaan, mikä on esitetty taulukossa 2. Laskelmat myös näyttivät jännityksen olevan lommahduksessa vain 164 MPa, mikä on todellisuudessa ollut suurempi. Ilman

poikittaista jäykistepalkkia, korvakkeet olisivat varmasti pyrkineet lähenemään toisiaan jo alemmilla kuormituksilla.

Jalustan muissa mitoissa ei tapahtunut yhtä suurta muutosta kuormituksen kasvaessa, mutta kuvista 12 ja 13 käy ilmi, mitä pysyviä muodonmuutoksia jalustassa tapahtui plastisoitumisen myötä.



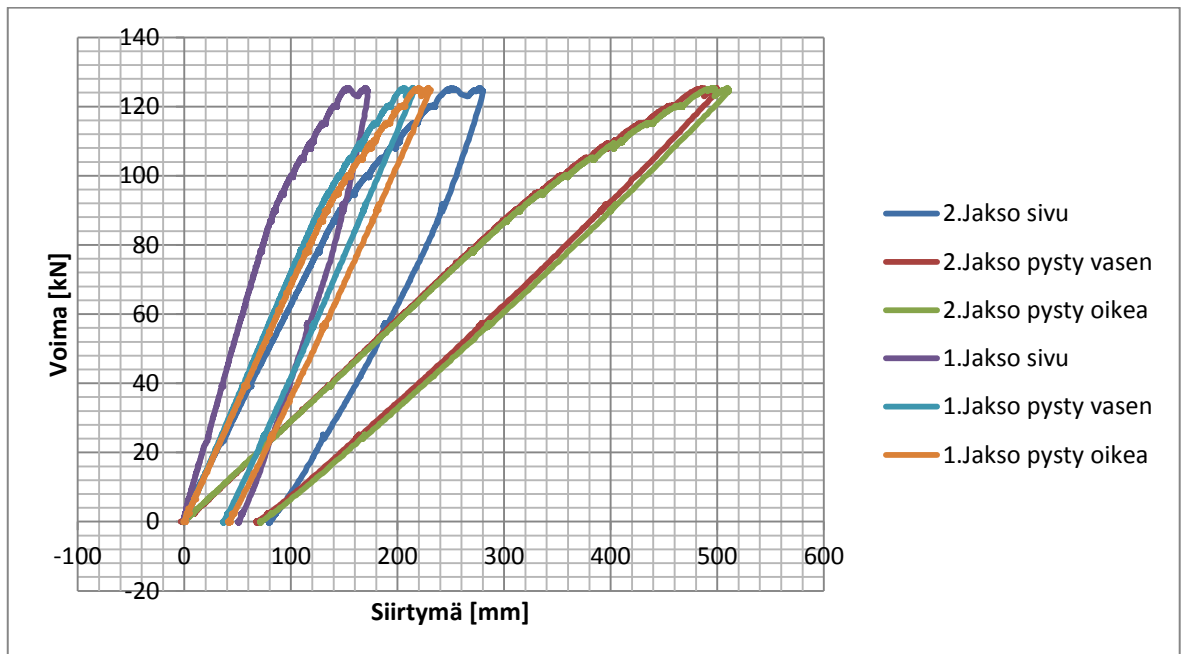
Kuva 12. Kuormitustapaus 1. Puomin jalustan muodonmuutos.

Kuten kuvasta käy ilmi, niin jalustan sivuseinämä on myös plastisoitumisesta johtuen kaareutunut pysyvästi. Kuvassa 13 on esitetty, miten jalustan sisällä olevan jäykistelevy käyttäytyi.



Kuva 13. Kuormitustapaus 1. Jalustan jäykisteen lommoutuminen.

Kuvasta 13 huomattiin venymien kuvaajissa epälineaaraisuus, kun myötöraja oli ylitetty. Sama ilmiö havaitaan siirtymien kuvaajissa kuvassa 14.



Kuva 14. Kuormitustapaus 1. Siirtymä - voima kuvaaja.

Kuvasta havaitaan, että kuorman poistamisen jälkeen puomissa on tapahtunut huomattava määrä plastisoitumisesta johtuvia pysyviä muodonmuutoksia. Kuten venymien kuvaajassa,

niin myös siirtymissä voidaan havaita, että puomin rakenne alkoi myödetä jalustasta ja molemmista jaksoista noin 110 kN:n kohdalla.

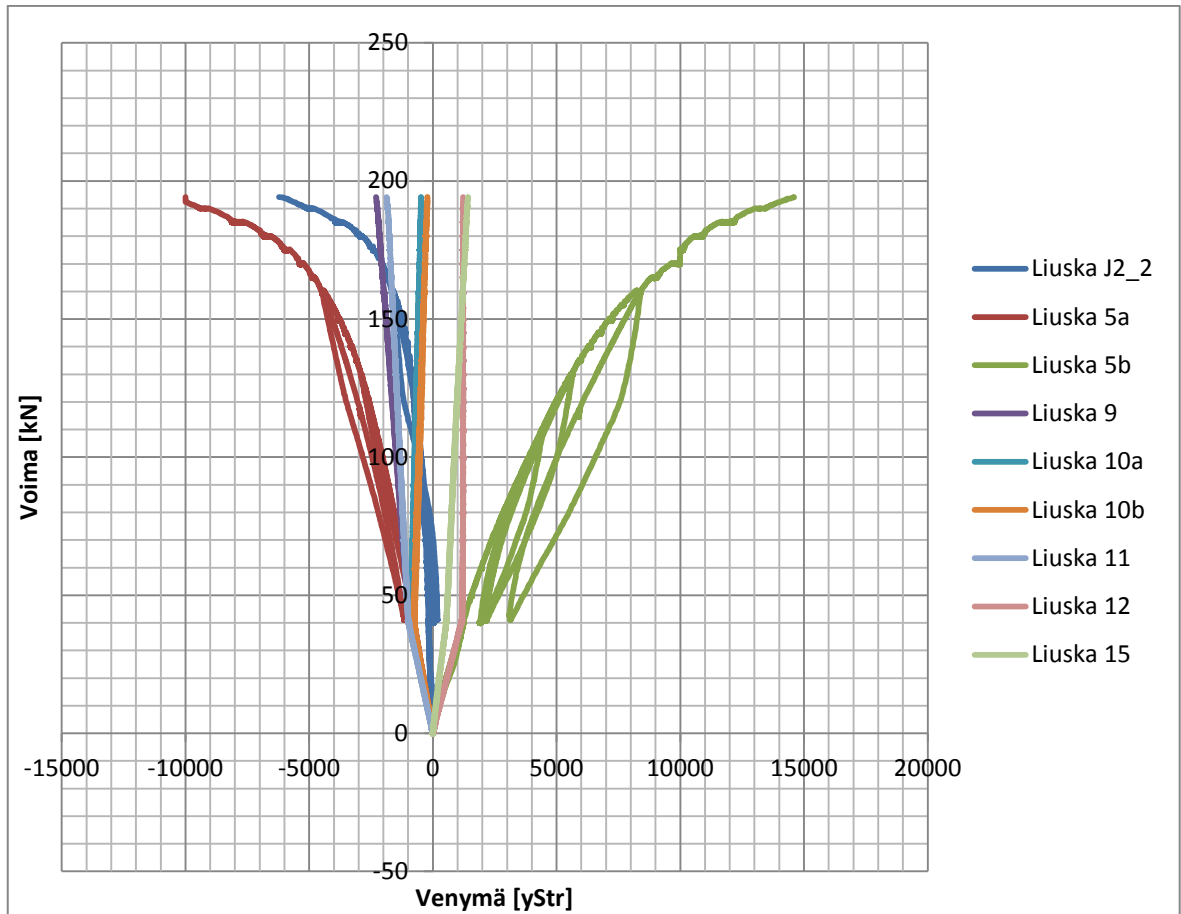
Vaikka puomia kuormitettiin kuvan 7 mukaisella yhdistelmäkuormituksella, mihin sisältyi myös vääntömomenttia, niin puomiin ei synny kiertymää. Tämä johtuu siitä, että puomin jaksojen käyristyminen pituusakselin suunnassa on estetty. Tämän huomaa hyvin, kun tarkastelee kuvan 14 toisen jakson pystysiirtymän käyriä, jotka ovat melkein päällekkäin toisiinsa nähden. Lisäksi yhdistelmäkuormituksesta johtuen puomiin aiheutuu myös sivusuuntaisia siirtymiä sisältäen pysyviä muodonmuutoksia.

Kuormituskokeesta voidaan todeta, että henkilönostimen puomin jalusta ja sylinterien korvakkeet ovat rakenteen heikoin kohta. Tämä loogisesti aiheutuu siitä, että materiaalina on käytetty Rautaruukin S650MC levyä. Jalustan rakenteeseen saataisiin varmasti lisää jäykkyyttä lisäämällä jäykisteitä rakenteeseen tai tekemällä jalustan rakenne lujemmasta materiaalista.

3.3.2 Kuormitustapaus 2

Kuormitustapauksen tavoitteena oli saada toisen jakson profiili lommahtamaan, kuten FEM-laskelmissa oli osoitettu. Tämän takia ensimmäisen jakson alle valmistettiin tuki, mikä käy ilmi aiemmin esitetyissä koejärjestelyissä. Tämä tuki rakennettiin jakson alle, jotta se estäisi puomin jalustaan kohdistuvat rasitukset ja koska jalustaan oli saatu jo aiemmassa kuormitustapauksessa pysyviä muodonmuutoksia.

Toisen jakson profiilissa saatiin tapahtumaan lommahdus kun kuormittava voima oli noin 194 kN. Tutkitaan ensin kuvassa 15 esitettyjä venymiä, joiden kautta saadaan jännitykset selville.



Kuva 15. Kuormitustapaus 2. Venymä - voima kuvaaja.

Kuvasta 15 huomataan, että käyrien muoto muuttuu noin 40 kN:n kohdalla, tämä johtuu ensimmäisen jakson alla olleesta tuennasta. Kun kuorma laskettiin välillä kokonaan pois, huomattiin, että puomi otti kiinni ja irtosi tuennasta aina 40 kN kuormituksen kohdalla. Tästä johtuen venymäanturit, jotka olivat tuennan jalustan puolella, eivät 40 kN:n jälkeen reagoineet, koska muutoksia venymissä ei siellä enää tapahtunut. Myös tämän takia hot-spot antureita ei voida verta edelliseen kuormitustapaukseen.

Venymäantureiden kuvaajasta kuvassa 15 nähdään selkeästi, että lineaarinen käyrä muuttuu epälineaariseksi noin 160 kN:n kohdalla, kun rakenne alkaa myödätä. Kuvan selkeyttämiseksi siitä on jätetty pois vaurion jälkeiset venymät, koska lommahduksen myötä osa antureista hajosi ja voima pieneni lommahduksen myötä rajusti. Lisäksi kuvasta huomataan, että puomiin on syntynyt jo ennen maksimikuormitusta pysyviä muodonmuutoksia. Tämä huomataan siitä, että kun voimaa laskettiin välillä alaspäin, niin

venymä ei enää palaudu lähtöpisteeseen eli kyseiseen kohtaan jäi pysyviä muodonmuutoksia.

Vauriohetkellä anturin J2_2 venymä on $-6216 \mu\text{Str}$, anturissa 5a (pitkittäin puomin pituusakseliin nähden) $-10000 \mu\text{Str}$ ja anturissa 5b (poikittain puomin pituusakseliin nähden) $14600 \mu\text{Str}$. Lisäksi liitteestä 1 selviää, että anturit 5a ja 5b ovat puomin liukupalojen kohdalla.

Kaikki kriittisen alueen jännitykset, jotka saatiin venymäantureista ylittivät materiaalin myötörajan 960 MPa huomattavasti, minkä jälkeen venymä ei enää kasva lineaarisessa suhteessa voimaan. Vauriona tapahtui siis kuvan 16 mukainen lommahdus toisen jakson profiilin alapuolen levykentässä. Kuormituksesta johtuen puomin profiilin neutraaliakselin alapuolelle syntyy puristusjännitys ja neutraaliakselin yläpuolelle vetojännitys. Lommahduskentän tukimomentti pullautti myös profiilin molempien puolien uumia ulospäin.



Kuva 16. Kuormitustapaus 2. Lommahdus.

Kuvasta 16 nähdään lommahduksen muoto ja paikka. Lisäksi havaitaan, että toisen jakson profiilin sivu on kiinni ensimmäisen jakson profiilissa. Profiilit menivät toisiinsa kiinni voimalla 185 kN . Tämä on vaikuttanut huomattavasti puomin alalaidan levykentässä

oleviin jännityksiin. Samaisesta kuvasta voidaan myös todeta, että niin sanottua "snap trough"-ilmiötä ei tapahdu, milloin lommo olisi edennyt profiilissa kulman yli. Tämä ei tapahtunut, koska kulma on suunniteltu riittävän suureksi, jolloin lommo ei pääse etenemään levykentästä toiseen samanlaisena.

Koska venymäanturit 5a ja 5b olivat sijoitettu alalaipan vinonlevykyntän pyöristyksiin, ne eivät anna suoraan tasaisen levykyntän jännitystä lommahdushetkellä. Näissä molemmissa levykyntissä voidaan kuitenkin suorittaa kriittinen lommahdusjännitys analyttisellä ratkaisulla.

Ensimmäiseksi määritetään kuvan 4 mukaisesti lommahduskerroin k_{σ} . Lommahduskerroin saadaan selvittämällä m eli puoliaaltojen lukumäärä levykyntän pituussuunnassa.

$$m = \frac{a}{b} = 36$$

Samaisesta kuvasta kuitenkin huomataan, että puoliaaltojen lukumäärästä riippuen lommahduskerroin $k_{\sigma} = 4$, jota käytetään seuraavassa laskussa.

Tämän jälkeen saadaan laskettua kriittinen lommahdusjännitys σ_{cr} käyttämällä aiemmin esitettyä yhtälöä numero 3. Tällöin alalaipan σ_{cr} on 392 MPa, joten kriittisen lommahdusjännityksen arvo on pieni kyseisessä levykyntässä. Seuraavaksi lasketaan saman yhtälön avulla alalaipan vinolevykyntä, minkä pyöristyksessä oli asetettu venymäanturit 5a ja 5b. Kyseisen levykyntän kriittiseksi lommahdusjännitykseksi saadaan 1239 MPa.

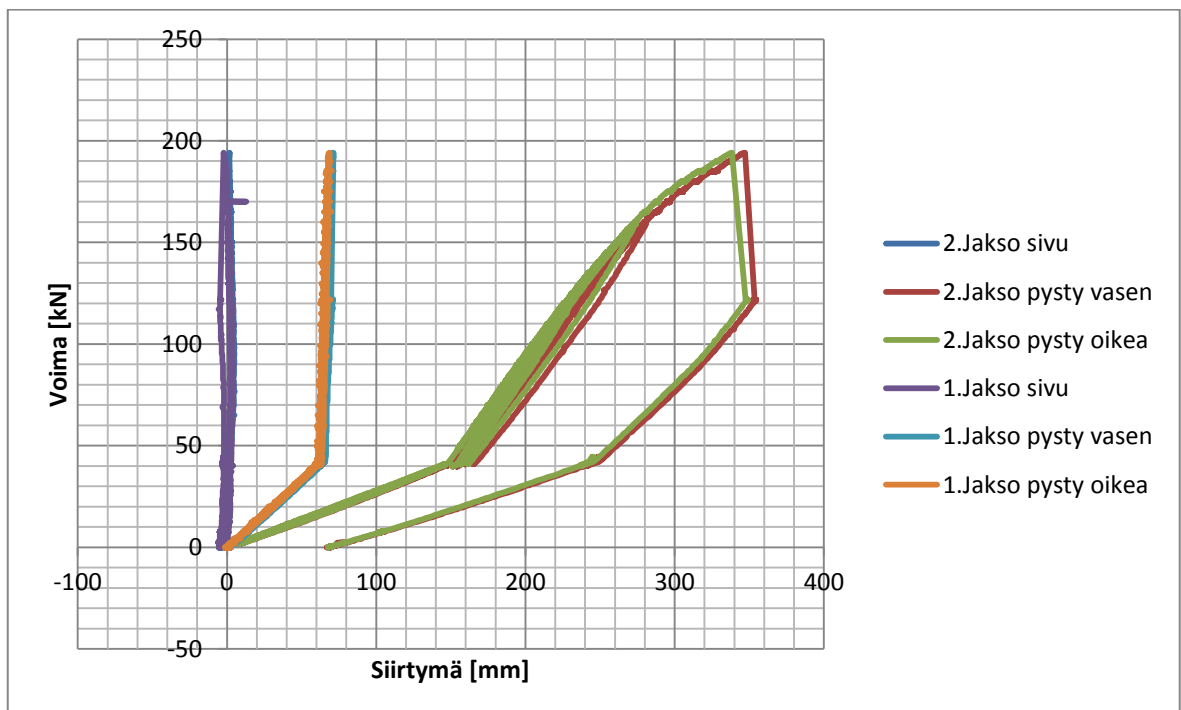
Tulosten lisäksi voidaan ajatella, että puomin liukupalat ovat tukeneet nimenomaisesti alalaipan molempia levykyntiä, koska kuvan 28 kuvaajasta huomataan, että anturi 5a saavutti puristusjännityksen arvon -1239 MPa jo noin 170 -175 kN voiman välillä.

Kuten edellisessä kuormitustapauksessa todettiin, kriittinen puristusjännitys oli todellisuudessa suurempi kuin mitoitettu. Sama havainto pätee tähän kuormitustapaukseen. Puomi alkoi selvästi myödetä ennen lommahdusta. Puomi on suunnitteluvaiheessa laskettu

kokonaisuutena, eli vierekkäisten levykenttien geometrian ja jännityksen vaikutus on otettu huomioon tarkasteltavan levykentän kestävydessä.

FEM-laskelmat ennustivat juuri samaan pyörityksen kohtaan, missä anturi 5a oli jännitystä noin 400-480 MPa. Voidaan todeta, että alin lommahdusmuoto tapahtuu kyseisellä jännityksellä. Kuormitusta ei tosin voida täysin verrata, koska laskelmissa oli käytetty puomissa neljää jaksoa, kun taas laboratoriokokeissa puomi oli vain kahden jakson mittainen. Laskelmissa ei varmaan ole otettu huomioon, että toinen jakso tukeutui ensimmäisen jakson uumaan kiinni. Tukeutumisen myötä reunaehdot ovat muuttuneet, minkä seurauksena jännitykset ovat lisääntyneet ja jakautuneet uudelleen. Tästä voidaan todeta, että FEM-laskelmat vastaavat hyvin alinta lommahdusmuotoa, mutta eivät ota huomioon muuttuneita reunaehtoja. Lopullinen stabiiliuden menettäminen kuitenkin tapahtui 194 kN:n kuormituksella.

Kuten edellisissä kuormitustapauksissa, puomista tarkkailtiin myös siirtymiä, jotka on esitetty kuvassa 17.



Kuva 17. Kuormitustapaus 2. Siirtymä - voima kuvaaja.

Kuvassa 17 havaitaan toisen jakson pystysiirtymistä plastisoituminen, kuten kuvassa 15 esitetystä venymä - voima kuvaajasta. Kuvasta 17 on havaittavissa, että sivusiirtymiä ei synny juuri ollenkaan, koska voima oli suoraan alaspäin 80,8 mm puomin keskilinjalta. Profiilin kiertyminen on vähäistä estetystä väännöstä johtuen. Pystysiirtymien kuvaajan muuttuminen 40 kN:n kohdalla johtuu ensimmäisen jakson päädyn alla olleesta tuesta.

Lopullisen vaurion jälkeen pysyvät muodonmuutokset vaikuttivat eniten toisen jakson pystysiirtymiin. Kuorman poiston jälkeen pysyviä muodonmuutoksia jäi noin 70 mm. Tästä huomataan, että kyseessä olleella lujalla teräksellä on hyvä plastisoitumisen sietokyky alemmilla kuormilla, mutta suuremmilla kuormituksilla puomiin jää huomattavia merkkejä plastisoitumisesta.

4 JOHTOPÄÄTÖKSET

Kokeet olivat onnistuneet ja saatiin varmuus puomin kestävydestä kuormitustilanteissa. Kuormituskokeista saatiin arvokasta tietoa kenttämittausten ja FEM-laskelmien rinnalle. Vaikka teoriaosuudessa esiteltiin myös haurasmurtuma ja hitsien väsyminen, niin esimerkiksi hitsien tarkempaa väsymistarkastelua ei näiden kokeiden perusteella pystytä määrittelemään. Tietysti puomin tulevia käyttötilanteita ja sen kuormittavia liikkeitä on vaikea arvioida, koska puomi on palo- ja pelastuskäytössä.

Kuormitustapaukset 1. ja 2. suoritettiin ylikuormituksella, jotta nähtäisiin tarkemmin vauriomuodot. FEM-laskelmien perusteella tiedettiin mitä odottaa, eli ensimmäisessä kuormitustapauksessa jalusta ja sylinterien korvakkeet myötäsivät ennen lopullista lommahdusta. Kokeessa tapahtuneen lommahduksen aiheuttamat siirtymät eivät olleet niin suuria, että se olisi merkittävästi vaikuttanut koko puomin rakenteen stabiiliuteen.

Ensimmäisen kuormitustapauksen jälkeen jouduttiin rakentamaan tuki ensimmäisen jakson alle, jotta saataisiin kuormitus kohdistettua paremmin toiseen jaksoon, missä oli odotettavissa myöskin lommahtaminen. Lommahduksen alin muoto ja jännitys vastasi hyvin FEM-laskelmissa saatuja tuloksia. Lisäksi selvisi puomin käyttäytyminen suuremmilla kuormituksilla, esimerkiksi, miten toisen jakson profiilin uumat pullistuivat ja tukeutuivat ensimmäisen jakson uumiin. Lopuksi saatiin toiseen jaksoon selvä lommahdus, jolloin puomi menetti stabiiliutensa.

Vaikka puomia kuormitettiin molemmissa tapauksissa yhdistelmäkuormituksella, kiertymä jäi pieneksi. Molemmissa kuormituksissa suurista jännityksistä johtuen puomiin syntyi plastisoitumisen myötä pysyviä muodonmuutoksia, vaikka niitä kaikkia ei silmämääräisesti havainnutkaan. Tietysti lommahdukset olivat hyvinkin selvästi havaittavissa kokeiden jälkeen samoin kuin ensimmäisen kuormitustapauksen pysyvät muodonmuutokset jalustassa.

Näin ollen voidaan todeta, että nimellisillä korikuormilla puomi kestää kiertymättä tai menettämättä stabiiliuttaan. Jos puomilta halutaan tulevaisuudessa suurempia korikuormia,

niin jalustan konstruktioita olisi suunniteltava uudelleen. Se voitaisiin rakentaa lujemmasta materiaalista tai suunnitella lisää jäykisteitä jalustan runkoon.

LÄHTEET

Björk, T. 2011. Luentomoniste, Teräsrakenteet I. Lappeenranta: LUT Digipaino

Dowling, O. E. 2007. Mechanical behavior of materials. Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue. 3.painos. Upper Saddle River, New Jersey: Pearson Prentice Hall. 912 s. ISBN 0 - 13 - 186312 - 6.

Hibbeler, R. C. 2005. Mechanics of Materials. 2.painos. Singapore: Pearson Prentice Hall. 870 s. ISBN 0 - 13 - 186 - 638 - 9.

Hobbacher, A. 2003. Recommendations for fatigue design of welded joints and components. IIW-document. XII-1965-03/XV-1127-03. 73 s.

Kinnunen, O. 2008. Diplomityö, Ultralujasta teräksestä valmistetun henkilönostimen teleskooppipuomin kehittäminen. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 81 s.

Niemi, E. 2003. Levyrakenteiden suunnittelu. Helsinki: Teknologiatieto Teknova. 136 s. ISBN 951 - 817 - 813 - 5.

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

Suoranta, R. 2007. Luentomoniste, Materiaalivalinnan ja valmistustekniikan peruskurssi. Lappeenranta: LUT Digipaino

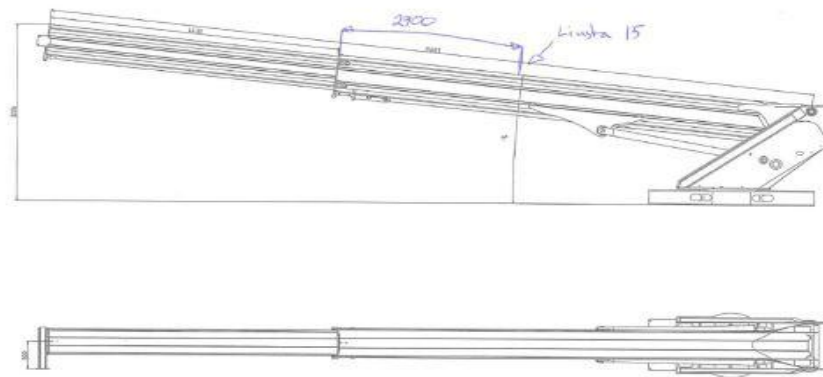
Valtanen, E. 2009. Tekniikan taulukkokirja. 17.painos. Mikkeli: Genesis-Kirjat Oy. 1100 s. ISBN 978 - 952 - 9867 - 34 - 9.

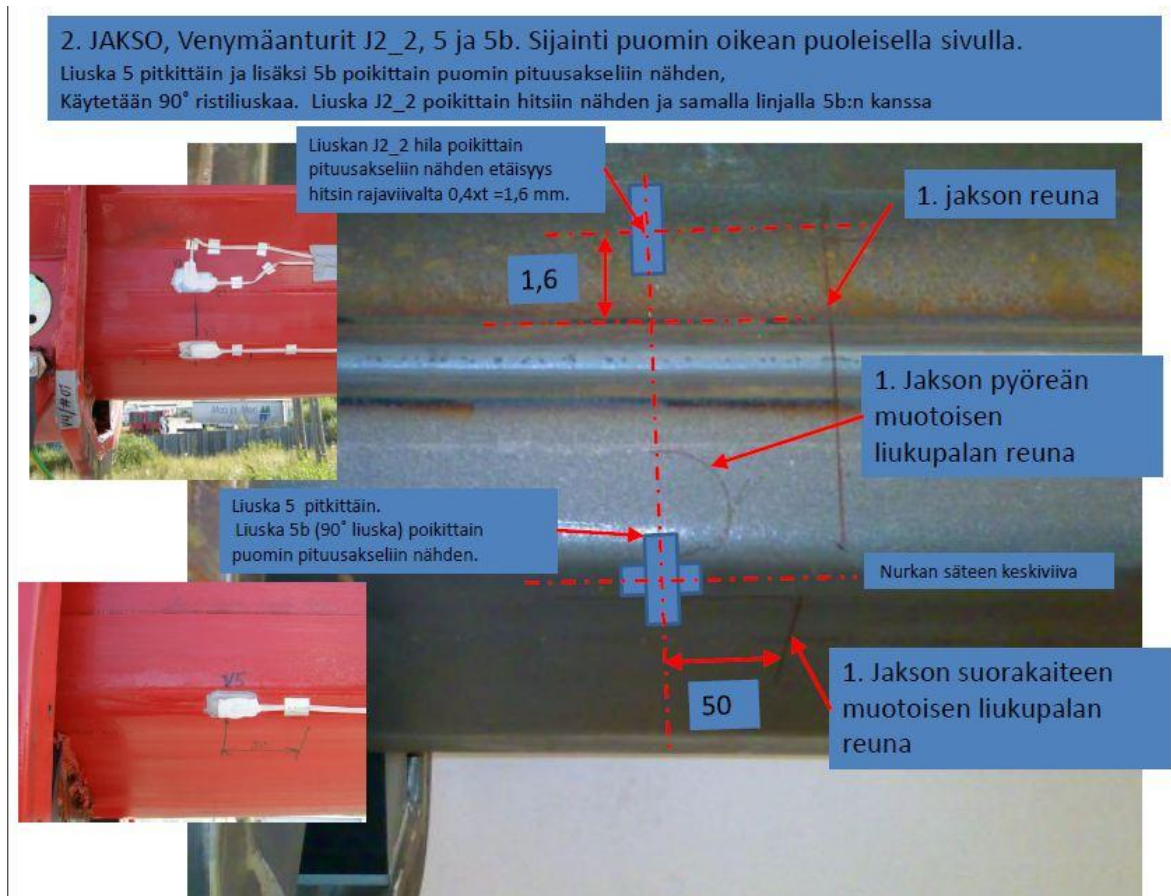
Nostinauton varsiston laboratoriomittaukset

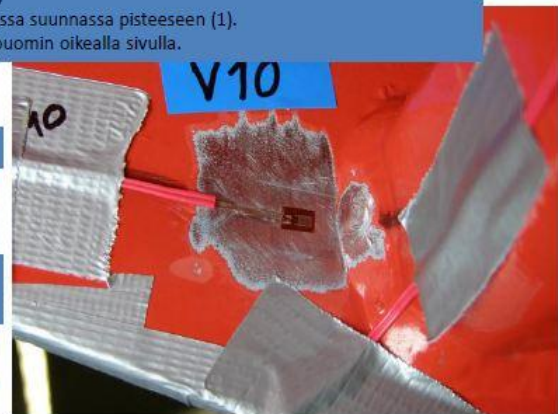
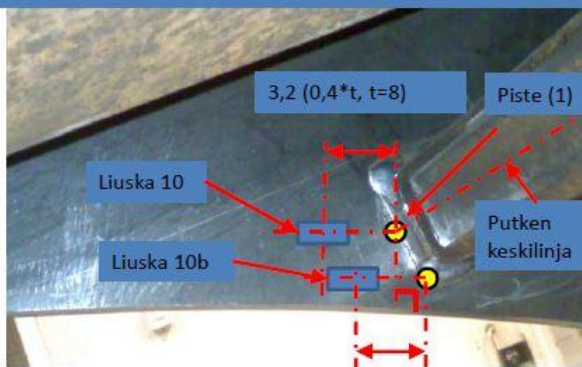
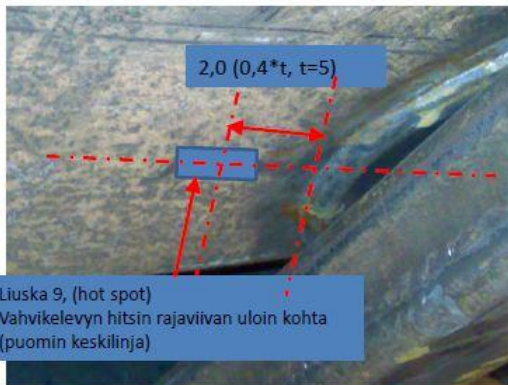
LUT Metalli, Teräsrakenteiden laboratorio

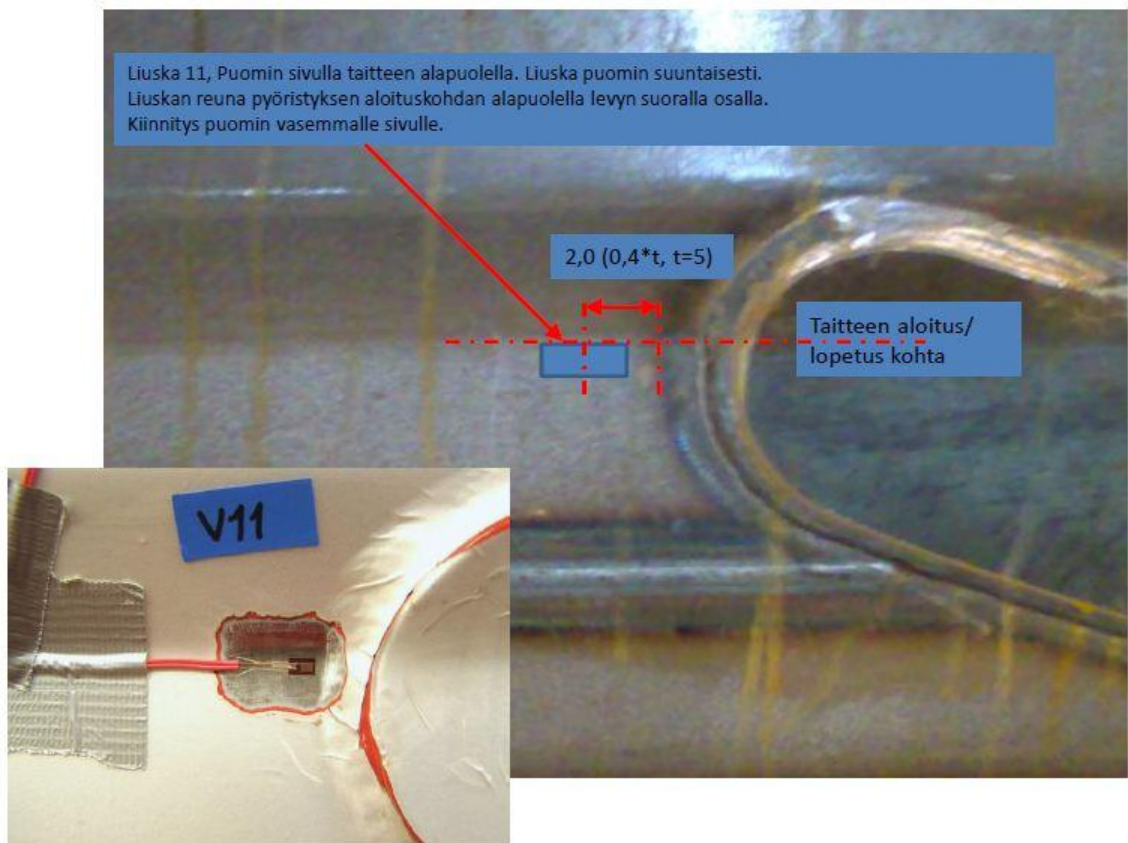
Mitattavia suureita yhteensä 14 kpl
- Venymäantureita (liuskoja) yhteensä 9 kpl
- Siirtymäantureita 4 kpl
- Voima-antureita 1 kpl

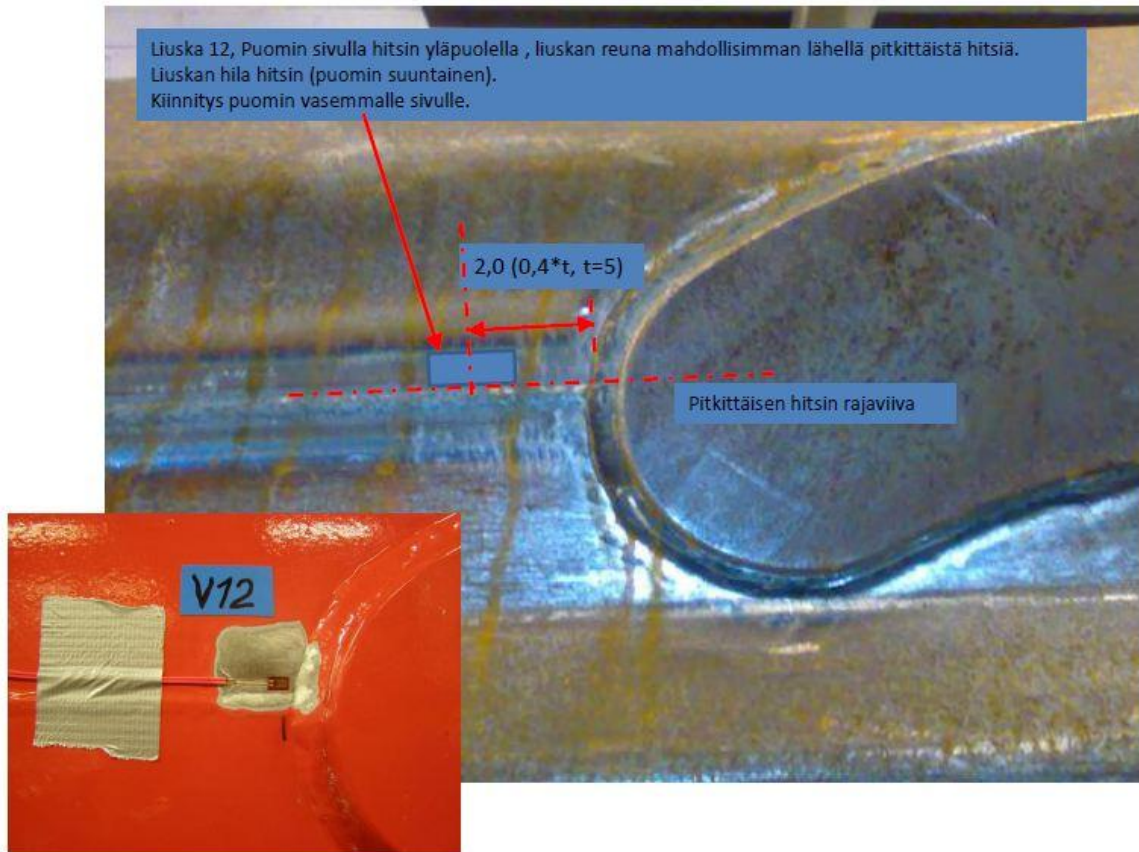
Kenttämittauksen liuskoja V1-V4, V6-V8, paineantureita V13 ja V14 ei asenneta laboratoriomittauksiin.



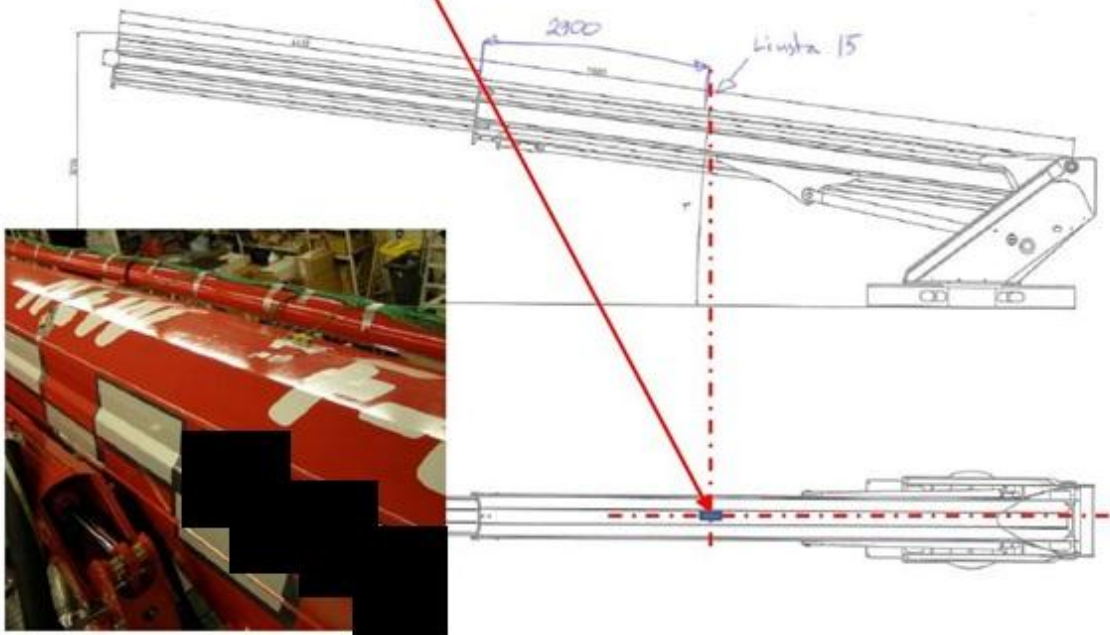








Liiska 15, Puomin ylälaipassa keskellä puomia.
Liiskan hila hitsin (puomin suuntainen).
Etäisyys 1. jakson päästä 2900 mm



Siirtymäantureiden sijoitus, 4 kpl, suurin siirtymä n. 500-600 mm puomin päässä.

