



PERÄVAUNUN RUNGON RASITUS- MITTAUKSET

Jyky V52-T0 puutavaraperävaunu

Kalle Seppälä

Opinnäytetyö
Joulukuu 2014
Auto- ja kuljetustekniikan
koulutusohjelma
Auto- ja työkonetekniikka

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Auto- ja kuljetustekniikan koulutusohjelma
Auto- ja työkonetekniikka

KALLE SEPPÄLÄ:

Perävaunun rungon rasiusmittaukset
Jyki V52-T0 puutavaraperävaunu

Opinnäytetyö 60 sivua, joista liitteitä 8 sivua
Joulukuu 2014

Tämän työn tarkoituksena oli suunnitella ja toteuttaa Jyki Oy:lle ajonaikaiset jännitys- mittaukset viisiakselisen puutavaraperävaunun rungon kriittisille kohdille. Tavoitteena oli, että tuloksia päästään vertailemaan VTT:n vuonna 1996 toteuttamien vastaavan mittauksen tulosten kanssa, jotta voidaan päätellä, onko nykyinen perävaunun runkorakenne riittävän kestävä. Mittaukset toteutettiin venymäliuska-antureilla sekä mobiililla mittauslaitteistolla, johon suunniteltiin ja kirjoitettiin Labview-ohjelmointikielellä mittausohjelmisto juuri kyseistä mittausta varten. Mittauslaitteisto asennettiin normaalissa ajossa olevaan asiakasyrityksen kiinteärunkoiseen perävaunuun viiden päivän ajaksi ja tämän jälkeen poistettiin sekä analysoitiin kerätyt tulokset.

Mittaukset epäonnistuivat datan tallennuksen suhteen, sillä tallennusvälineenä käytetyn muistitikun tiedostorakenne oli pirstaloitunut. Erityistyökaluilla data saatiin kuitenkin analysoitavaksi, mutta tallentunut data oli osin ristiriitaista, sillä kolmannen akselin kiinnityskohdan edessä ollut anturi antoi suurempia arvoja kuin verrokkina toimineet anturit. Yksiselitteistä syytä näille ongelmille ei pystytty määrittämään. Taivutusjännitystä mitanneet anturit antoivat samaa suuruusluokkaa olevia tuloksia VTT:n vastaavaan mittaukseen verratessa, joten niitä voitiin pitää jossain määrin luotettavina.

Jotta tämän työn tuloksia voidaan paremmin arvioida, tulisi vastaava mittaus toteuttaa uudestaan etenkin ristiriitaisia tuloksia tuottaneiden antureiden osalta. Tässä työssä esitettyjen taivutusjännityskuvaajien avulla voitiin kuitenkin analysoida, miten puutavaraperävaunun runko käyttäytyy eri ajotilanteissa ja kuormaus- sekä purkaustilanteiden aikana. Työn loppuun on kerätty mittausten aikana tulleet ajatukset, joiden avulla seuraavasta vastaavanlaisesta mittauksesta saadaan luotettava.

Kaikki numeraaliset- sekä kuvaajamuodossa liitteenä olevat mittaustulokset ovat luotamuksellisia ja ne on erillisen sopimuksen myötä määrätty salassa pidettäviksi. Tämä on julkinen versio opinnäytetyöstä. VTT:n tutkimusselostuksen käyttöön lähteenä on kysytty lupa.

ABSTRACT

Tampereen Ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Automobile and Transport Engineering
Automobile and Industrial Vehicle Engineering

KALLE SEPPÄLÄ:
Trailer frame stress measurements
Jyki V52-T0 timber trailer

Bachelor's thesis 60 pages, appendices 8 pages
December 2014

The subject of this thesis was to design and implement frame stress measurements for the critical design spots of a five axle timber trailer. The thesis was done for Jyki Oy. The aim was that it would be possible to compare results with the results from the similar measurements that were done by VTT in the year 1996. This would allow concluding, whether the frame structure currently in use in the trailers is durable enough. The measurements were carried out with strain gage sensors and mobile measuring equipment to which a suitable measurement program was written and created with Labview coding language. The measuring equipment was installed in a fixed frame timber trailer which was owned by Jykin customer company and was used in a normal daily operation. The measurement took place for five days and after that the equipment was removed and the results analyzed.

The measurements failed regarding the saving of data, because the file structure of the memory stick used for saving the data was corrupted. With special data tools it was however possible to extract the data from the memory stick for analysis, but the data acquired was partly incoherent. It was found that one of the strain gage sensors in front of the installing point for third axle measured constantly greater values than those sensors that were used for reference in front of other axle installation points. There were no single causes for either of these problems to be found. The strain gages that measured bending stress produced results that were in the same category with the results that VTT had in their report, so it was justified to take these results as somewhat reliable.

In order to better evaluate the results of this thesis, this measurement would have to be repeated; especially regarding the results that were incoherent. With the bending stress graphs attached with this thesis it is however possible to analyze how the frame of the timber trailer behaves during driving and under loading or unloading operations. All the thoughts that had risen while doing the measurements and writing this thesis have been summed up in the last chapter so that it would be possible to recreate the measurements with results that would be reliable and accurate.

The measurement results in number and graph form attached to this thesis are considered to be of sensitive nature and they are not to be published. This is a public version of the thesis.

Keywords: timber trailer, stress, measurement, strain gage, labview, frame

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
2	TEORIA	9
2.1	Tieliikennelain mukaiset uudet kokonaismassat ajoneuvoyhdistelmille	9
2.2	Venymäliuskamittaus.....	10
2.2.1	Eri venymäliuskatyypit ja niiden rakenne.....	10
2.2.2	Metallisen venymäliuskan toimintaperiaate.....	14
2.2.3	Sovellukset ja mittaaminen	16
3	MITTAUKSET	21
3.1	Mittauskohteiden valinta.....	21
3.2	Mittausvälineet.....	23
3.2.1	Fyysinen laitteisto	23
3.2.2	Ohjelmisto.....	26
3.3	Mittauksen valmistelu.....	30
3.4	Mittauksen toteutus.....	36
4	TULOKSET	37
4.1	Datan purkaminen.....	37
4.2	Jousenkorvien jännitykset.....	38
4.3	Perävaunun etuosan rungon taivutusjännitys.....	40
5	VIRHEARVIOINTI	42
5.1	Venymäliuska-anturit.....	42
5.2	Liitos	43
5.3	Mittausohjelma	43
5.4	Mittausympäristö	45
6	JOHTOPÄÄTÖKSET	48
6.1	Mittaustulokset.....	48
6.2	Parannusehdotukset	49
	LÄHTEET.....	51
	LIITTEET	52
	Liite 1. Mittausperävaunun V52-T0 mittapiirustus sekä venymäliuskojen sijainnit.....	52
	Liite 2. Venymäliuskamittausta varten rakennetun Labview-ohjelmiston eri tilat	53
	Liite 3. Antureiden asennuspöytäkirja.....	57
	Liite 4. Mittauksen aikana täytetty pöytäkirja.....	59

ERITYISSANASTO

ilmajousitus	etenkin raskaassa kalustossa käytetty jousitusyyppi, jonka jousto perustuu ilmalla täytettyihin kumipalkeisiin
mekaaninen jousitus	raskaassa kalustossa tarkoittaa teräksisten lehtijousien muodostamia jousipakkoja, joissa jousto tapahtuu metallin oman materiaalijouaston avulla
teli	useamman akselin muodostama akseliryhmä
V42-T0	neliakselinen, kahdella teliryhmällä varustettu kiinteärunkoinen puutavaraperävaunu
V52-T0	viisiakselinen, kahdella teliryhmällä varustettu kiinteärunkoinen puutavaraperävaunu, kaksi akselia edessä ja kolme takana

1 JOHDANTO

Tämä työ on tehty Jyky Oy:lle, joka on noin 90 henkilöä työllistävä raskaiden ajoneuvojen perävaunuja valmistava konepajayritys Längelmäellä. Työn avulla pyrittiin selvittämään, miten yrityksen viimeisimmän puutavaraperävaunumallin (mallimerkintä V52-T0, 2013) rungon rasitukset eroavat aikaisemmin käytössä olleen neliakselisen rungon rasituksista (V42-T0). Mittaukselle syntyi tarve, kun Suomessa siirryttiin vuonna 2013 entistä raskaampiin kokonaismassoihin tieliikenteen kuljetuksissa valtioneuvoston asetuksen (407/2013) mukaisesti (Valtioneuvosto 2013). Tämän myötä tuli useimpiin ole-massa oleviin sekä ajoneuvoihin että perävaunuihin lisätä akseli, jotta suurin sallittu 9-akselisen yhdistelmän kokonaispaino, 76 000 kg, voitaisiin täysimääräisenä hyödyntää.

Aikaisemmat perävaunut on suunniteltu pienempiä, 60 000 kg:n kokonaispainoja ajatellen ja runkorakenne on myös suuremman kokonaispainon omaavissa perävaunuissa pysynyt pääpiirteittäin samana. Kuitenkin vaunun rungon pituuden pysyessä lähes samana, jää telien välissä oleva pitkittäissuuntainen vapaa tila aiempaa lyhyemmäksi, jolloin samalla myös runkorakenteesta tulee jäykempi. Lisäksi aiemmin V42-T0-puutavaravaunun takateli on toteutettu harvalla rakenteella (kuva 1), jolloin runko on myös telin kohdalta päässyt hieman elämään. Uudessa viisiakselisessa mallissa vaunun takapäässä on kolmiakselinen telirakenne (kuva 2), jolloin akseleiden välillä on vain n. 1,3 metriä (aiemmassa harvassa telissä hieman yli 1,8 m), eli vaunun takapäältä tulee erittäin kiertojäykkä.



KUVA 1. V42-T0 -puutavaraperävaunu harvalla takatelillä (Kuva: Jyki Oy)

Jyki Oy on aiemmin ennen neliakselisen V42-T0 -mallin ottamista tuotantoon teettänyt VTT:llä venymäliuskamittaukset sekä FEM-simulaatiot runkomallista, joka selvitysten jälkeen otettiin tuotantoon vuonna 1997 (VTT valmistustekniikka: Bäckström, M. 1997). Tämän työn tarkoituksena oli tehdä mittauksia osittain samoista kohdista kuin vanhassa tutkimuksessa, mutta ennen kaikkea saada ajantasaista dataa dynaamisista kuormituksista liittyen nykyään tuotannossa olevaan viisiakseliseen puutavaraperävaunuun (kuva 2).

Johtuen kokonaispainojen korottamisen nopeasta aikataulusta, tuli useille asiakkaille tarve asentuttaa vanhoihin neliakselisiin perävaunuihinsa viides akseli, jolloin he saavat suuremmat sallitut painot käyttöönsä. Kuitenkin vanhojen perävaunujen runkorakenne on alun perin suunniteltu neliakseliseksi ja muun muassa rungon poikkipalkkien sijaintia joudutaan muuttamaan lisäakselia asennettaessa. Optimaalista sijaintia ja määrää poikkipalkeille ei kuitenkaan tiedetä, sillä aiemmin mainituista syistä johtuen runkorakenne jäykistyy lisäakselin myötä, jolloin poikkipalkkien määrää tulisi mahdollisuuksien mukaan vähentää ja niiden keskinäisiä etäisyyksiä kasvattaa. Viisiakselisen V52-T0-vaunun mittaus on kuitenkin toteutettu uudesta asti viisiakseliseksi suunnitellulle vau-

nulle eikä jälkeensä telitetyille, sillä nämä tapaukset ovat aina hieman kompromisseja, koska niitä ei ole uudesta lähtien suunniteltu raskaammille painoille.



KUVA 2. V52-T0 -puutavaraperävaunu tiheällä takatelillä (Kuva: Kalle Seppälä 2014)

Ristiriitaa uusien vaunujen suunnittelussa aiheuttaa se, että rungon riittävän kestävyys- ja kestävyyden lisäksi perävaunun tulisi olla omapainoltaan mahdollisimman kevyt, jotta hyötykuormaa saataisiin paljon. Puutavaraperävaunun käyttöympäristön luonteeseen kuuluu kuitenkin se, että rungon kiertymä voi olla epätasaisissa olosuhteissa ajettaessa useita kymmeniä asteita (Sokka 2014) vaunun kulkusuunnassa, jolloin rakenteen tulee olla elastinen ja sallia nämä kiertymät rikkoutumatta. Lisäksi runkopalkkiin kohdistuvat kuormat ovat esimerkiksi umpikoriin verrattuna enemmän pistemäisiä, sillä puutavaran tuentaan käytettävä karikkapankko tukeutuu suoraan runkopalkin yläpintaan muodosta-vaan lattateräkseen aiheuttaen tälle vääntöä perävaunun heilahdellessa.

2 TEORIA

2.1 Tieliikennelain mukaiset uudet kokonaismassat ajoneuvoyhdistelmille

Pääasiassa metsäteollisuuden tarpeista valtioneuvosto lähti selvittämään, olisiko Suomessa mahdollista siirtyä liikennöimään aikaisempaa suuremmilla kokonaismassoilla sekä entistä korkeammilla yhdistelmillä. Valtioneuvoston säätämän asetuksen (407/2013) mukaisesti päätettiin sekä ajoneuvojen- että perävaunujen massoja sekä vapaakorkeuksia korottaa vuonna 2013 oheisen taulukon mukaisesti (taulukko 1).

TAULUKKO 1. Valtioneuvoston asetuksen (407/2013) mukaiset kokonaispainot sekä korkeudet ajoneuvoyhdistelmille (Valtioneuvosto 2013)

Akseleiden määrä	Ennen 6/2013	6/2013 eteenpäin
7	60 t	60 t (64 t siirtymäajan vuoteen 2018)
8	60 t	64 t tai 68 t (yhdistelmä pari-pyörillä)
9	60 t	69 t tai 76 t (yhdistelmä pari-pyörillä)
Ajoneuvon vapaakorkeus	4,20 m	4,40 m

Käytännössä tämä asetus tarkoittaa sitä, että täysiä kokonaispainoja hyödyntävän yhdistelmän tulee koostua esimerkiksi neliakselisesta vetoautosta sekä viisiakselisesta varsinaisesta perävaunusta, ja paripyöräisenä (kuva 3).











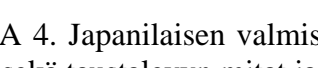


KUVA 3. Uusien kokonaispainojen mukainen puutavarayhdistelmä (Kuva: Kalle Sepälä 2014)

2.2 Venymäliuskamittaus

2.2.1 Eri venymäliuskatyypit ja niiden rakenne

Venymäliuska on rakenteeltaan ohut, tyypillisesti noin 20 x 20 x 1,5 mm kooltaan oleva sähköä johtavasta mittaushilasta sekä hilan taustalevystä koostuva komponentti (kuva 4). Itse mittaushilan osuus liuskan koosta on vain muutamia millimetrejä ja usein johdin on poimutettu kulkemaan s-muodossa liuskan tasossa, yhden hilan osan leveyden ollessa vain joitain millimetrin kymmenyksiä ja paksuuden millimetrin sadasosia (HBM: Hoffmann, K. 2012, 7).

	WFLA-3-350-11-1L		WFLA-6-11 -17 -23	-1L	6	2.2	25.0	11.0	1.5	120
	WFLA-3-11-1L	90° 2-element Cross Stacked type	WFCA-3-11 -17 -23	-3L	3	1.7	19.0	16.0	1.5	120
	WFLA-3-11-1L	45°/90° 3-element Rosette Stacked type	WFCA-6-11 -17 -23	-5L	6	2.3	25.0	21.0	1.5	120
	WFLA-3-11-1L	45°/90° 3-element Rosette (G.F. 2.1 approx.) 2-wire system	WFRA-3-11 -17 -23		3	1.7	19.0	16.0	1.5	120
	WFLA-3-11-1L	Single element 3-wire system	WFLA-3-11 -17 -23		3	1.7	17.0	8.0	1.5	120
	WFLA-3-11-1L	90° 2-element Cross Stacked type	WFCA-3-11 -17 -23	-3LT	3	1.7	19.0	16.0	1.5	120
	WFLA-3-11-1L	45°/90° 3-element Rosette Stacked type	WFCA-6-11 -17 -23	-6LT	6	2.3	25.0	21.0	1.5	120
	WFLA-3-11-1L	45°/90° 3-element Rosette (G.F. 2.1 approx.) 3-wire system	WFRA-3-11 -17 -23		3	1.7	19.0	16.0	1.5	120
	WFLA-3-11-1L	Single element 3-wire system	WFLA-3-11 -17 -23		3	1.7	17.0	8.0	1.5	120
	WFLA-3-11-1L	90° 2-element Cross Stacked type	WFCA-3-11 -17 -23	-3LT	3	1.7	19.0	16.0	1.5	120
	WFLA-3-11-1L	45°/90° 3-element Rosette Stacked type	WFCA-6-11 -17 -23	-6LT	6	2.3	25.0	21.0	1.5	120

KUVA 4. Japanilaisen valmistajan eri venymäliuskamalleja, pystysarakkeissa mittaushilan sekä taustalevyn mitat ja liuskan vastusarvo (Tokyo Sokki Kenkyujo 2008)

Liuskoja on kahta eri päätyyppiä: puolijohdeliuskoja sekä metalliliuskoja. Puolijohdeliuskoja ei yleisesti käytetä kokeelliseen rasituksen mittaukseen monista eri syistä (HBM: Hoffmann, K. 2012, 8):

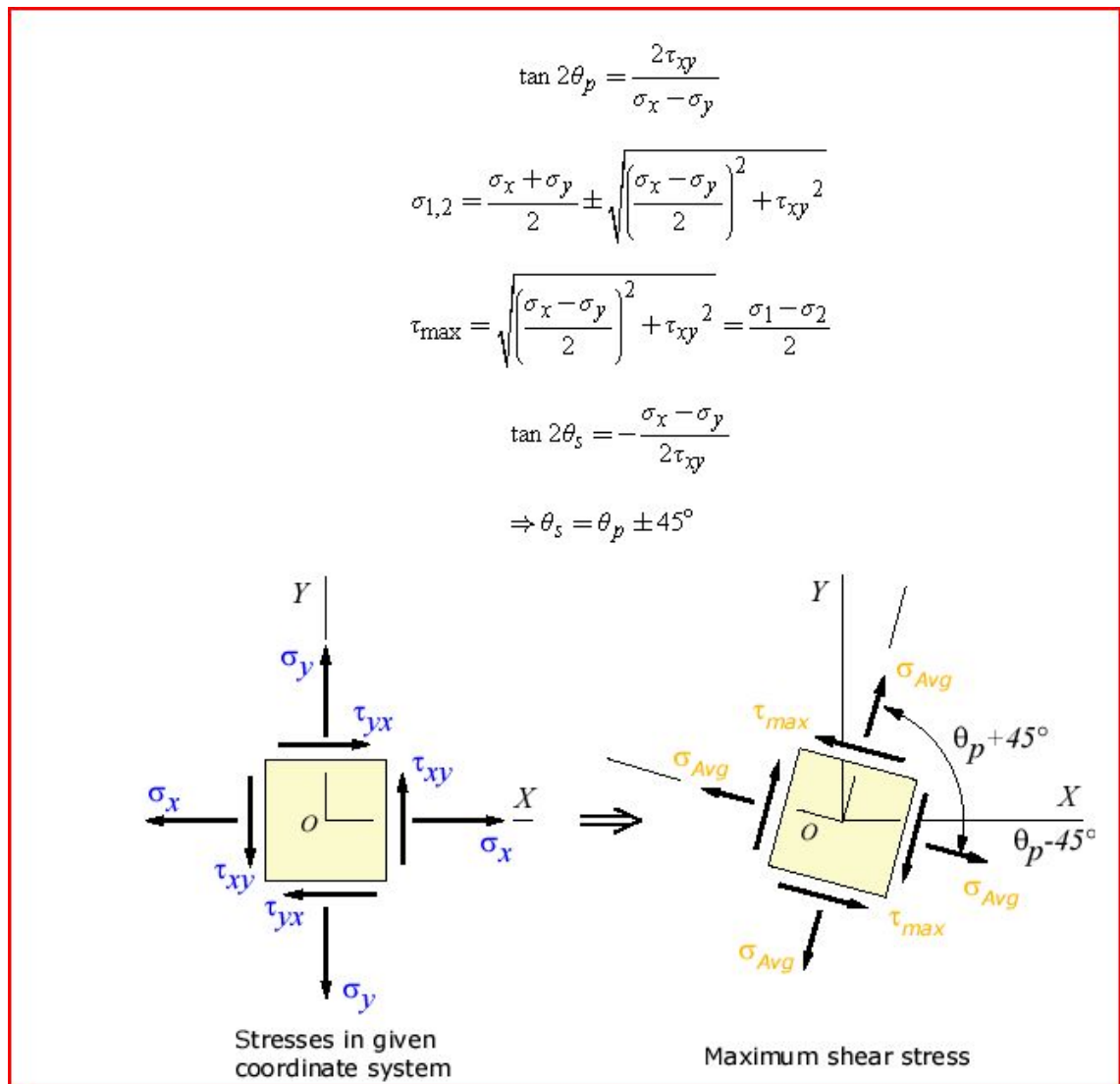
1. Kalliimpi hinta kuin metalliliuskoilla
2. Epälineaarinen käytös mittausalueella vaatii mittalaitteilta erittäin tarkkaa virheen kompensointia
3. Puolijohdemateriaalit ovat hauraampia käsitellä kuin metalliliuskat
4. Puolijohdeliuskat ovat herkempiä lämpötilasta johtuvalle virheelle

Yllä mainittujen lisäksi on olemassa muitakin erityyppisiä venymäliuskoja, esimerkiksi höyrystämällä valmistetut ohutkalvoliuskat tai pietsosähköiseen ilmiöön perustuvat

venymäliuskat, mutta näiden muiden harvinaisempien liuskatyypin käyttö rajoittuu erikoistarpeisiin, kuten erittäin korkeisiin lämpötiloihin tai muuntajien valmistukseen tai sitten ne on havaittu käytännössä huonommiksi ja hylätty kokonaan (HBM: Hoffmann, K. 2012, 8-11).

Jatkossa tässä työssä tullaan keskittymään metallisten venymäliuskojen ominaisuuksiin, sillä ne ovat kokeellisissa mittauksissa yleisimpiä ja niitä myös tässä työssä käytettiin.

Metalliset venymäliuskat jakautuvat lineaariliuskoihin, jotka ovat yksinkertaisesti yksi liuska, ja Rosette-liuskoihin (kuva 4, alin), joissa on kolme liuskaa päällekkäin tietyssä kulmassa - yleisimmät Rosette-liuskan kulma-arvot ovat 0° , 45° ja 90° tai 0° , 60° ja 120° (HBM: Hoffmann, K. 2012, 45). Rosette-liuskojen etu on se, että mittaamalla samassa pisteessä kolmen eri tiedetyn suunnan jännitys, saadaan tuon pisteen pääjännitykset sekä niiden suunnat laskettua seuraavasti (kuva 5).



KUVA 5. Pääjännityksien ja niiden suuntien määrittäminen, kun tiedetään kahden kohtisuoran suunnan jännitykset ja niitä leikkaava jännitys (<http://www.efunda.com>)

2.2.2 Metallisen venymäliuskan toimintaperiaate

Liuskan toiminta perustuu sähköä johtavien materiaalien ominaisuuteen muuttua vastusarvoaan mekaanisen kuormituksen seurauksena, jonka esittivät ensimmäisenä brittiläiset tiedemiehet Wheatstone sekä Thomson (kaava 1):

$$\frac{dR}{R_0} = \varepsilon(1 + 2\nu) + \frac{dQ}{Q} \quad (\text{KAAVA 1})$$

Missä R_0 = alkuperäinen resistanssi (Ω)

ε = venymä (m)

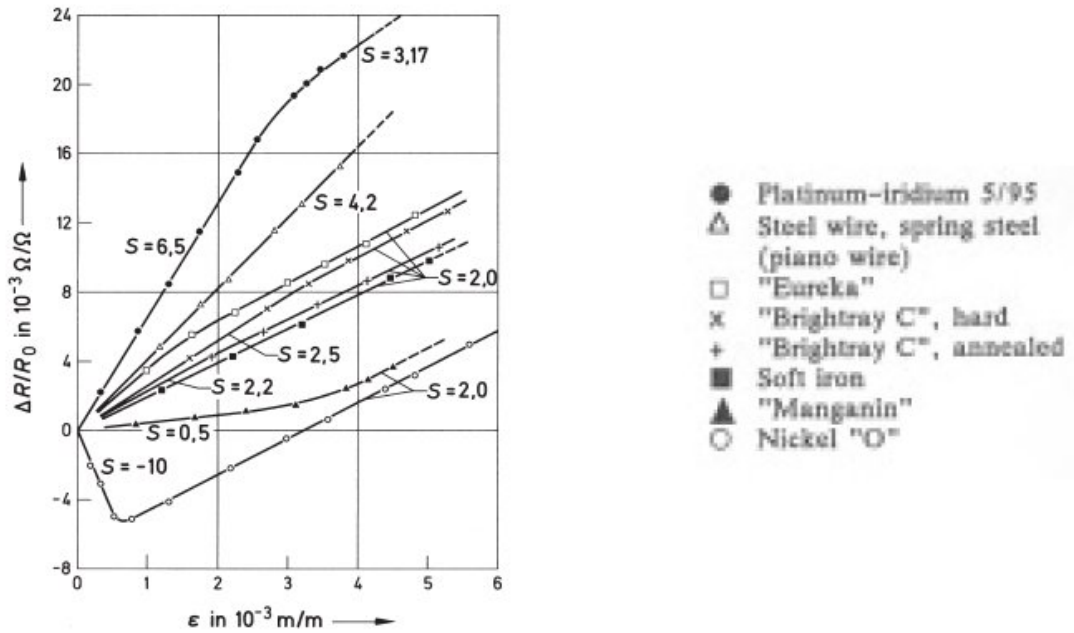
ν = Poissonin vakio

Q = resistiivisyys (Ω/m)

Yllä olevassa kaavassa yhtälön oikean puolen ensimmäinen osuus koostuu mekaanisen rasituksen aiheuttamasta geometrisesta muodonmuutoksesta, johon havaitaan materiaalin Poissonin vakion vaikuttavan, ja jälkimmäinen termi puolestaan rasituksen aiheuttamasta mikrotason muutoksista rakenteen resistiivisyydessä (HBM: Hoffmann, K. 2012, 12-13). Kaavaa (kaava 1) voidaan edelleen jalostaa merkitsemällä kirjaimella S suhteellisen resistanssin muutoksen suhdetta venymään seuraavasti (kaava 2):

$$S = \frac{\Delta R / R_0}{\Delta l / l_0} = \frac{\Delta R / R_0}{\varepsilon} \quad (\text{KAAVA 2})$$

Tämän kaavan avulla laadittavalla S (slope, kulmakerroin)-käyrällä voidaan asettaa eri materiaalit paremmuusjärjestykseen sen osalta, miten hyvin ne kykenevät eliminoimaan mikrorakenteen muutoksesta johtuvan resistanssin muutoksen, kuten kaavassa (1) esitettiin. Kokeellisesti on havaittu, että tietyillä jännitustasoilla sellaisten käyrien kulmakerroin muuttuu, joiden kulmakerroin on ollut kokeen lähtötilanteessakin muu kuin 2 (kuva 6). Kulmakertoimen muutos tapahtuu materiaalista riippuen eri jännitustasoilla, mutta aina kuitenkin siinä vaiheessa, kun siirrytään elastisesta muodonmuutoksesta plastisen muodonmuutoksen puolelle (HBM: Hoffmann, K. 2012, 13-14).



KUVA 6. Eri materiaalien S-käyriä (Bertodo 1959)

Mikäli oletetaan, että plastisen muodonmuutoksen alueella Poissonin vakio pysyy arvossa $\nu = 0,5$ vakiotilavuudella, niin kaavan (kaava 1) geometrisen muodonmuutoksen osasta voidaan ratkaista

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \varepsilon(1 + 2 \cdot 0,5) = 2\varepsilon \quad (\text{KAAVA 3})$$

Kun liikutaan plastisen muodonmuutoksen alueella, menee mikrorakenteen muutoksen osa yhtälöstä nollassi. Edellä mainittua yhtälöä tarkastellen havaitaan, että liuskojen valmistuksessa erityisen houkuttelevia materiaaleja ovat ne, joiden S-käyrä on mahdollisimman lähellä arvoa $2 \Omega/m$ koko elastisen alueen matkalla (HBM: Hoffmann, K. 2012, 13-14). S-arvosta käytetään käytännön sovelluksissa englanninkielistä gage factor (GF) -merkintää, joka on venymäliuskapakkauksissa aina joka erän kohdalla ilmoitettu (kuva 7).

TYPE		WFLA-6-11-3LT	
LOT NO.	A515717	GAUGE LENGTH	6 mm
GAUGE FACTOR		2.10	±1 %
GAUGE RESISTANCE	120 ± 0.5 Ω	QUANTITY	10
TEMP. COMPENSATION FOR	11 × 10 ⁻⁶ /°C	TEST CONDITION	23°C 50%RH
TRANSVERSE SENSITIVITY	-0.1 %	BATCH NO.	ML20R
LEAD WIRES			
7/0.12 3W 3m			

KUVA 7. Esimerkki venymäliuskapakkauksen merkinnöistä; S-arvo (GF) kerrottuna kolmannella rivillä (Kuva: Kalle Seppälä 2014)

Venymäliuskan toimintaperiaate olettaa, että mitattavan kappaleen jännitykset siirtyvät täysimääräisenä kappaleesta liuskaan; tämä edellyttää erittäin tiivistä liitosta liuskan ja kappaleen välillä. Käytännössä kokeellisia mittauksia tehtäessä liuskat kiinnitetään yleensä aina liimaamalla mittauskohteeseen. Erityistapauksissa on saatavissa myös hitsattavia tai kappaleen sisään valmistusvaiheessa valettavia liuskoja (HBM: Hoffmann, K. 2012, 12).

Venymämittausta valmisteltaessa nykyisin on saatavissa valmiiksi eri materiaaleille lämpötilakompensoituja liuskoja. Esimerkkinä oheisessa kuvassa (kuva 7) venymäliuskat on kompensoitu teräksen lämpölaajenemiskertoimelle, joka on $11 \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$.

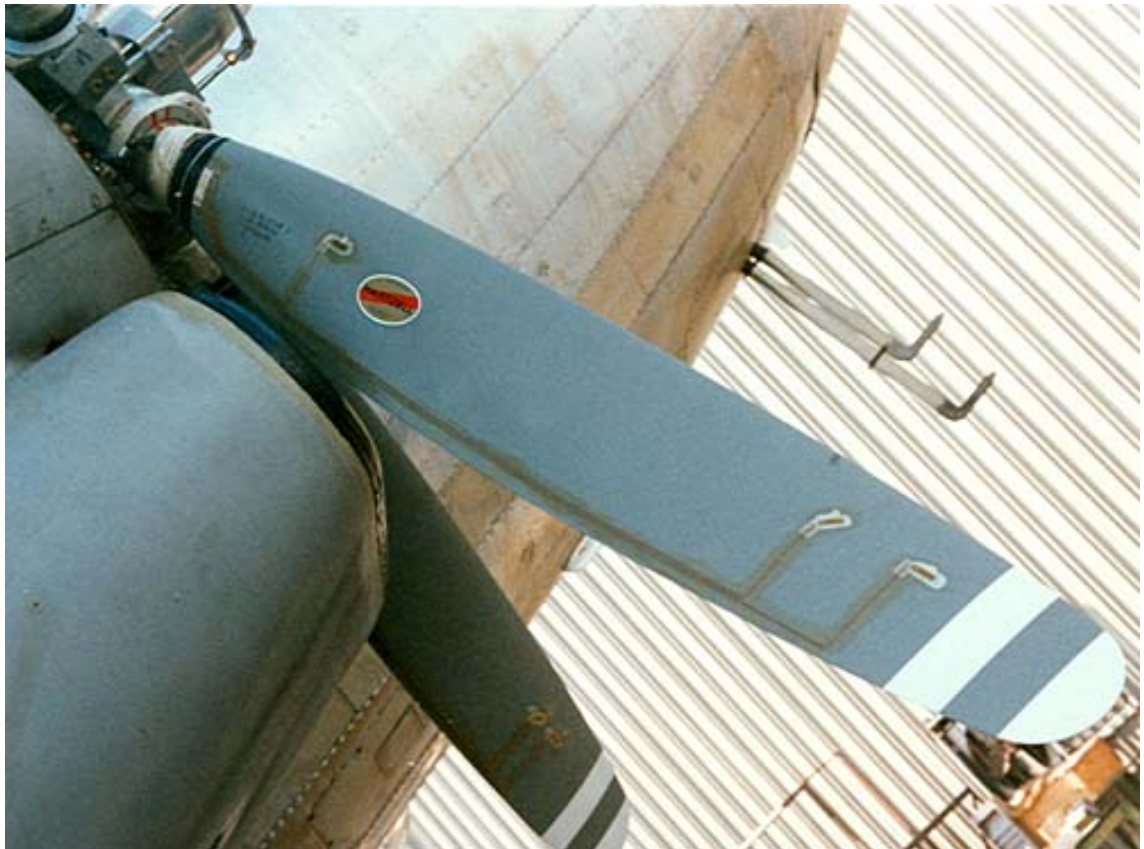
2.2.3 Sovellukset ja mittaaminen

Venymäliuskamittausten tärkein sovellusalue on mitattavan kappaleen hetkellisen jännityksen määrittäminen. Hooken lain (kaava 4) mukaan voidaan kappaleen venymän ja jännityksen välille vetää yhtäläisyys ja täten hyödyntää venymäliuskaa jännityksen mittaauksessa.

$$\sigma = E\varepsilon \quad (\text{KAAVA 4})$$

missä σ = kappaleen jännitys (N/m²)
 E = kappaleen kimmokerroin (N/m²)
 ε = kappaleen venymä (dimensioton)

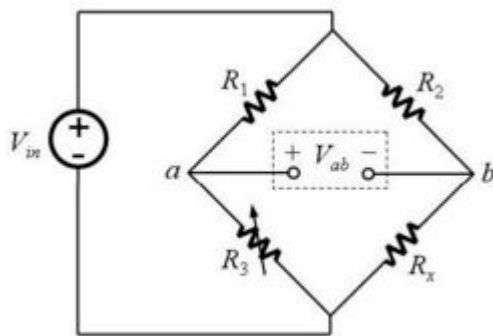
Liuskoilla mittaaminen alkoi yleistyä Yhdysvalloissa 1930-luvun lopussa etenkin lentokoneiteollisuuden tarpeisiin, kun valmistusmenetelmiä oli saatu kehitettyä, jotta liuskojen koko ja käytännöllisyys tulivat tarkoituksenmukaisemmiksi (HBM: Hoffmann, K. 2012, 3-6). Nykyisin sovellukset ovat hyvin moninaisia ja monesti liuskamittaukset täydentävät tai luovat pohjaa 3D-ohjelmistoilla suoritettaville simulaatioille. Etenkin nykyaikainen varmuuslukuihin perustuva suunnittelu asettaa vaatimuksia sille, että osataan ennustaa tarkasti, mikä tietyn materiaalin tai liitoksen käyttöikä on. Simulaatio-ohjelmistot kehittyvät jatkuvasti, mutta todellista tietoa käyttöympäristöistä sekä niiden dynaamisista kuormituksista ei simulaatioiden avulla kuitenkaan saada. Tällöin venymäliuskamittaukset ovat ainoa vaihtoehto kappaleen jännitysvaihteluiden tutkimiseen (kuva 8).



KUVA 8. Venymäliuskoja asennettuna lentokoneen potkuriin värinän aiheuttamien jännitysten tutkimista varten (<http://www.airplanetest.com>).

Myös Jyki Oy:n toimialalla käytännön tilanteissa ilmenevät jännitystilat ovat hyvin moninaisia; mikäli kuljettaja on pakotettu ahtaalla metsäautotiellä vetämään lastattua perävaunua ojan ylitse, saattaa rungon jännitystila kohota hetkellisesti erittäin suureksi, mitä ei pystytä varmasti simulaatio-ohjelmistojen avulla ennakoimaan. Myös lastaustekniikat ratkaisevat, sillä tukkipuuta ajettaessa perävaunuun tulee kaksi kuuden metrin puutavararippua, kun taas lyhyempää kolmen metrin puuta ajettaessa tulevat nippujen päät eri kohdille perävaunua. Tämä taas muuttaa kuormatun perävaunun rungon kiertojäykkyyttä pituussuunnassa olennaisesti.

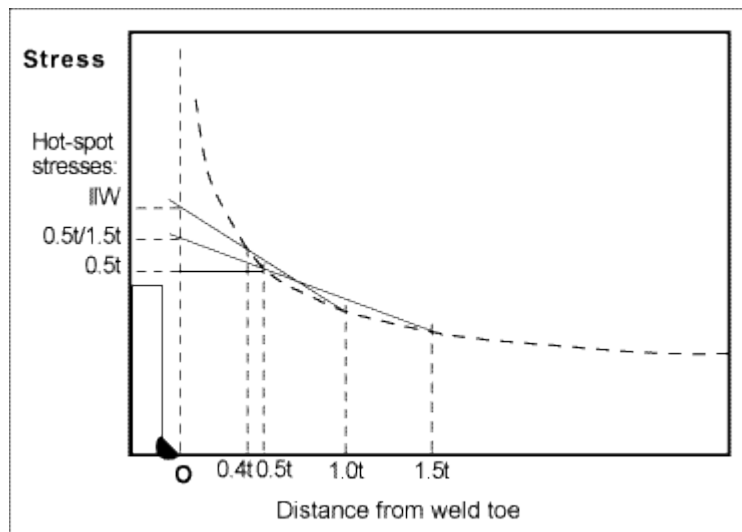
Koska liuskan sisällä tapahtuvat venymän ja myös resistanssin muutokset ovat erittäin pieniä, tarvitsee liuska tuekseen mittausrakenteiston, joka mahdollistaa signaalin luotettavan tulkinnan. Käytännössä tämä tarkoittaa järjestelmää, jossa venymäliuska-anturi on kytketty siten, että se muodostaa Wheatstonen sillan kolmen muun anturin kanssa (kuva 9). Sillan toiminta perustuu siihen, että kaikilla sillan neljällä vastuksella, tai vastuksena toimivalla venymäliuskalla, on sama vastusarvo. Tällöin aktiivisen liuskan R_3 vastusarvon muuttuessa, muuttuu myös sillan pisteiden a - b väliltä mitattava jännite, kun virtalähde V_{in} syöttää jatkuvasti piiriin tasaista jännitettä. Sillassa voi olla kytkettynä 1, 2 tai 4 venymäliuskaa, jolloin ne vastaavasti tunnetaan nimillä *quarter bridge*, *half bridge* ja *full bridge*.



KUVA 9. Wheatstonen sillan toimintaperiaate (<http://openwetware.org>)

Sillalta tuleva jännitesignaali pitää vielä vahvistaa, sillä alkuperäinen signaali on erittäin heikko. Yleisimmin venymämittauksiin käytetyissä mittalaitteissa on sekä siltaan jännitettä syöttävä piiri, mahdollisesti sillan kokonaiseksi täydentävät vastukset sekä lopuksi signaalivahvistin lopullisen signaalin saamiseksi.

Mikäli halutaan määrittää hitsatun rakenteen väsymiskestävyys, voidaan yhtenä menetelmänä käyttää rakenteellisen jännityksen menetelmää, josta käytetään myös termiä hot spot -menetelmä. Menetelmä perustuu siihen, että ensin selvitetään tutkittavaan kohtaan rakenteessa tietyllä ajan hetkellä syntyvä jännityksen vaihtelu ja tämän jälkeen arvioidaan rakenteen väsymisluokka kirjallisuuden avulla. Hot spot -jännitys saadaan ekstrapoloitua hitsisauman kohdalle, sekä samalla eliminoidua hitsisauman reunan jännityshuippua vääristävä lovisaikutus, mittaamalla hitsisaumaa vasten kohtisuora jännitys kahdella eri etäisyydellä kuvan (kuva 10) mukaisesti.



KUVA 10. Hot spot -jännityksen mittausetäisyydet hitsisauman reunasta (<http://www.twi-global.com>)

Tästä edelleen käytetään sopivilla korjauskertoimilla korjattuja Wöhler-käyriä rakenteen odotettavissa olevan kestoajan arviointiin. Seuraavaa yhtälöä (kaava 5) hyödyntäen saadaan selville vakioamplitudinen jännityksen vaihteluväli, joka on särönkasvulain mukaan ekvivalentti vaihtuva-amplitudiselle kuormitukselle rakenteen väsymisen suhteen (VTT valmistustekniikka: Bäckström, M. 1997, 11):

$$\Delta\sigma_{ekv} = \sqrt[m]{\frac{\sum(n_i \cdot \Delta\sigma_i^m)}{N_d}} \quad (\text{KAAVA 5})$$

missä $\Delta\sigma_{ekv}$ = hot spot -jännityksen vaihteluväli tasolla i (MPa)

n_i = luokiteltujen jännitysten vaihteluvälien lukumäärä tasolla i

N_d = referenssiyksikkö; tässä tapauksessa yksikkönä ajokilometrit (km)

m = referenssikäyränä käytetyn hot spot -käyrän kulmakerroin

Ekvivalentti jännitysvaihtelu lasketaan usein standardin SFS 2378 mukaisesti viittä miljoonaa sykliä kohden, mutta tämän tapaisen ajoneuvorakenteen ollessa kyseessä ei sykliä kohden laskettu arvo anna havainnollista kuvaa jännitysvaihtelusta. Tämän vuoksi yllä olevassa kaavassa käytetäänkin referenssiyksikkönä ajokilometrien määrää kullakin analyysivälillä (VTT valmistustekniikka: Bäckström, M. 1997, 11).

Kun on saatu halutulla ajovälillä selville ekvivalenttiset jännitysvaihtelut, voidaan arvioida mitatun liitoksen kestoikä. Hitsausliitosten kestoian arviointiin voidaan käyttää kokeellisesti mitattuja Wöhlerin käyriä, joiden avulla voidaan hyödyntää seuraavaa kaavaa kestoian laskemiseen (kaava 6) (VTT valmistustekniikka: Bäckström, M. 1997, 11):

$$N = \frac{C}{\Delta\sigma^m} \quad (\text{KAAVA 6})$$

missä N = kestoikäennuste (kaavaa 5 käytettäessä km)

C, m = kokeellisesti määritetyt käyräparametreja, jotka ovat kyseisille teräslaaduille omansa

3 MITTAUKSET

3.1 Mittauskohteiden valinta

Uutta mittausta suunniteltaessa käytettiin referenssinä VTT:n vanhaa mittausta ja pohdittiin yhdessä Jykin suunnitteluosaston kanssa, mitä kohteita halutaan mitata. VTT toteutti mittauksen kahdessa osassa, joissa ensimmäisessä ajatettiin lastattu perävaunu hallituissa olosuhteissa itse valmistetun korokkeen päälle toispuoleisesti, jotta saatiin runkoon haluttu kiertymä aikaiseksi (VTT valmistustekniikka: Bäckström, M. 1997, 7-8). Uusissa mittauksissa ei kuitenkaan tähän lähdetty, sillä haluttiin lähinnä tietoa siitä, millaisia kuormituksia oikeissa käyttötilanteissa syntyy.

Liuskojen kiinnityskohteiksi päätettiin valita vaunun takatelin jousenkorvat, jotka kiinnittyvät pitkän runkopalkin alapuolelle hitsillä (kuva 11). Tämän lisäksi haluttiin mitata kuulakehän jälkeen sijaitsevan rungon kaulan kohdalta taivutusjännitystä. Näiden mittauskohteiden valinta edellytti taivutukselle kahta liuskaa sekä mitattavien jousenkorvien kohdalle yhtä liuskaa. Koska kuitenkin haluttiin määrittää hot spot -jännitys jousenkorvan hitsisauman kohdalla, tuli kestävyuden kannalta kriittisimpään eli takatelin etumaiseen jousenkorvaan hitsisaumasta kohtisuoraan sijoittaa kaksi liuskaa hieman etäälle toisistaan, jotta saadaan ekstrapoloitua jännitysmaksimi sauman kohdalle (TWI Limited: Maddox, S. J. 2001). Mittauskohteet on esitetty merkittyinä tämän työn lopussa liitteenä olevassa perävaunun mittapiirustuksessa (Liite 1).



KUVA 11. Takatelin etummaisen akselin jousen korva (Kuva: Kalle Seppälä 2014)

Mittauksen kohteeksi valikoitui Jykin vuonna 2013 valmistama ilmajousitettu kiinteärunkoinen puutavaraperävaunu, Jykin mallimerkinnältään V52-T0 (kuva 12). Ilmajousitettu perävaunu otettiin kohteeksi siksi, että nykyisin suurin osa, arviolta noin 70 %, uusista puutavaraperävaunuista valmistetaan ilmajousisena. Ilmajousien etuna on se, että ne kykenevät tasaamaan teliakseleiden välillä kuormaa perinteistä mekaanista jousitusta paremmin ja täten se ei rasita jousituksen tukipisteitä niin paljon kuin mekaaninen jousitus. Perävaunun pituus oli 10,2 metriä ja akseliväli etuakseliston keskeltä takatelin keskelle 6,6 metriä. Rungossa tämä tarkoittaa sitä, että kun ilmajousisessa perävaunussa saman telin akseleiden väli on 1310 mm, jää perävaunun etutelin takimmaisen ja takatelin etummaisen akselin välille tyhjää tilaa 4,6 metriä.



KUVA 12. Mittauskohde; Jyki V52-T0 2013 (Kuva: Kalle Seppälä 2014)

3.2 Mittausvälineet

3.2.1 Fyysinen laitteisto

Mittausvälineiden osalta vanhoista mittauksista ei suoraan voitu ottaa mallia, sillä tuolloin tietotekniikka oli vielä kehittymättömämpää ja silloiset mittaukset olikin tehty johtamalla venymäliuskasignaalit vahvistimen kautta analogianauhurille (VTT valmistustekniikka: Bäckström, M. 1997, 5-7). Käytetyt venymäliuskatyypit olivat kuitenkin samoja, joita on edelleen saatavilla esimerkiksi HBM:ltä.

Tarvittavaa välineistöä selvitetessä asetti mittauksen luonne muutamia vaatimuksia:

1. Mittalaitteen pitää kyetä toimimaan itsenäisesti kiinni perävaunussa muutaman päivän ajan
2. Mittalaitteen tulee soveltua ”ulkoilmaan”, eli se ei saa olla kovin herkkä tärinälle, pölylle tai kosteudelle

3. Laitteessa tulee olla akku tai sen tulee kyetä toimimaan 24 voltin jännitteellä perävaunun sähköjärjestelmästä.

Tampereen ammattikorkeakoulun välineistöstä löydettiin mittauksiin soveltuva laite; Natinal Instruments cRio 9022 (kuva 13), jossa oli kiinni kahdeksanpaikkainen cRio 9114-laajennusmoduuli (kuva 14). 9022-mittalaitteeseen hankittiin venymäliuskamittauksiin tehty 9235-mittauskortti, jonka avulla saatiin enintään kahdeksan neljännessilta-liuskaa kytkettyä mittauksen ajaksi (kuva 15). Koska työssä mitattiin hitsisaumoja vasten kohtisuoria jännitystiloja sekä taivutusjännitystä, neljännessillat katsottiin riittäviksi tarkkuudeltaan mittauksen toteuttamiseen.



KUVA 13. National Instruments cRio 9022 -mittalaite (<http://www.ni.com>)



KUVA 14. National Instruments cRio 9114 -laajennusmoduuli (<http://www.ni.com>)



KUVA 15. National Instrument 9235 quarter bridge -mittauskortti (<http://www.ni.com>)

Venymäliuskat tilattiin suomalaisen Elkome-yrityksen verkkokaupasta ja ne olivat japanilaisen Tokio Sokki Kenkyujo -yrityksen valmistamia. Näihin liuskoihin päädyttiin siksi, että heiltä oli mahdollista tilata liuskoja, jotka olivat valmiiksi johdotettu sekä myös sääsuojattuja. Tutkittiin myös HBM-yrityksen liuskavalikoimaa, joita VTT hyödynsi omassa mittauksessaan vuonna 1996, mutta hankkimalla valmiiksi johdotetut ja suojatut liuskat pystyttiin minimoimaan muutama mahdollisen mittausvirheen syntykohta eli liuskojen liittäminen johdotukseen, johdotuksen valinta sekä liuskojen suojaaminen ympäristön vaikutuksilta. Venymäliuskoiksi päädyttiin tilaamaan 10 kappaleen paketeissa taulukossa (taulukko 2) esitetyt liuskatyypit.

TAULUKKO 2. Mittausta varten Elkome Oy:n verkkokaupasta tilatut venymäliuskatyyppit

Valmistajan tunnus	Venymäliuskan tyyppi	Vastus (Ω)	Johtimien määrä ja pituus
WFLA-6-11-3LT	Lineaariliuska	120	3 kpl, 3 m
WFLA-6-11-5LT	Lineaariliuska	120	3 kpl, 5 m
WFRA-6-11-3LT	Rosette-liuska	120	3 kpl, 3 m

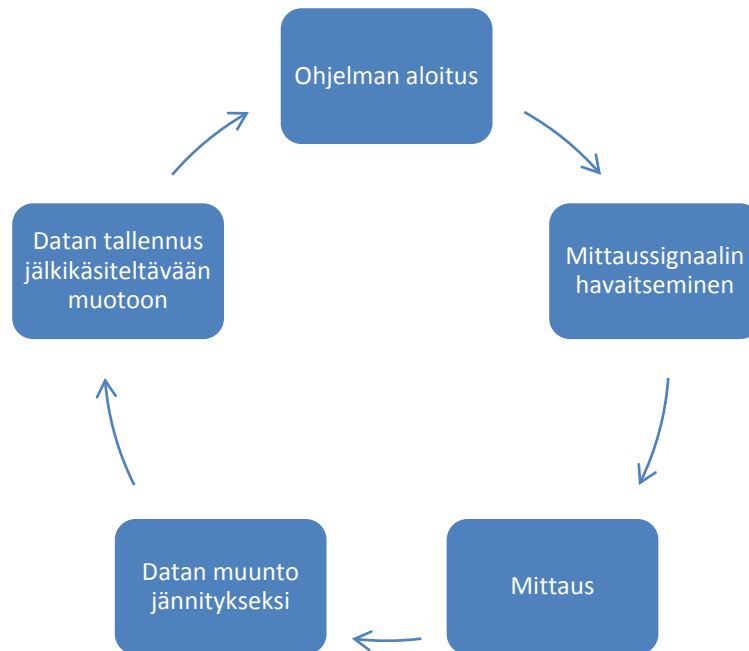
Lineaariliuska neljännessillalla sopi mittaustarkoituksiin siksi, että kriittiset kohteet, joita haluttiin mitata, olivat jo tiedossa. Tällöin riitti, että mitattiin kohtisuoraan hitsisaumaan kohdistuvaa jännitystä ja ekstrapoloitiin tästä todellinen hitsisauman kohdalle syntyvä jännitys kuvan (kuva 10) mukaisesti. Haluttaessa rosette-liuskan avulla voitiin saada pääjännitykset tietyssä kohdassa selville, joten niiden hankkiminen oli perusteltua siltä osin. Kaikki liuskat olivat Tokio Sokki Kenkyujo -yrityksen tehtaalla suojaamia, mikä tarkoitti sitä, että itse liuskaelementti oli läpinäkyvän silikonin tms. sisällä ollen alapinnastaan kuitenkin paljaana kiinnitystä varten. 120 ohmin resistanssi liuskoihin valittiin siksi, että se on laajimmin mittauksissa käytetty venymäliuskan resistanssiarvo ja myös siksi, että aikaisemmassa mittauksessa VTT käytti tämän resistanssin omaavia liuska-antureita (VTT valmistustekniikka: Bäckström, M. 1997, Liite 3). Elkome Oy toimitti myös saman valmistajan liiman, joka on erityisesti tarkoitettu venymäliuskojen asennukseen metallipinnoille.

3.2.2 Ohjelmisto

Työn suorittaja ei ollut aiemmin tutustunut National Instrumentsin laitteistoihin, joten ensimmäisenä varmistettiin, että oppilaitokselta lainatun tietokoneen ohjelmistot toimivat yhteen cRio-mittalaitteiston kanssa. Tähän saatiin arvokasta apua Mikko Vaaralalta, joka konsultoi työn alkuvaiheessa kertoen Labview-ohjelmoinnin perusteista ja näyttäen esimerkkiä itsenäisen venymämittauksen koodin kirjoittamisesta.

Ohjelmiston kehitystä aloitettaessa mietittiin, mitä ohjelmistolla halutaan tehdä. Labview-ohjelmointikieli on todella monipuolinen ja esteeksi kunnollisen ohjelmiston kehittämiseksi muodostuikin rajallinen aika sekä opinnäytetyön tekijän puutteellinen ko-

kemus Labview'n käytöstä. Tämän vuoksi päädyttiin siihen, että data tyydytään ainoastaan ottamaan mittalaitteella talteen sellaisessa muodossa, että sitä voidaan helposti tarkastella tai käsitellä jälkeinpäin mittausten jo ollessa ohi. Ohjelmiston kehittämisestä laadittiin oheinen kaavio (kuvio 1).



KUVIO 1. Mittalaitteen ohjelmistolta vaadittavat tehtävät

Kaaviota lähdettiin jalostamaan koodaamalla mittauskoodi Labview'n avulla ja se ladattiin cRio-laitteistoon tarkoituksena, että kun mittalaite saa virtaa, mittaus käynnistyy ilman tarvetta olla yhteydessä mittalaitteeseen tietokoneen avulla. Ohjelmiston sisältö päätettiin kirjoittaa englanniksi, sillä tällöin mahdollisten ongelmatilanteiden syntyessä apua olisi helppo kysyä esimerkiksi National Instrumentsin keskustelusivuilta. Ohjelmisto toteutettiin niin sanottuna state machine -koodina, joka tarkoittaa, että ohjelmisto käy läpi eri tiloja ja riippuen tilojen statuksesta siirtyy seuraavaan tilaan tai pysyy samassa tilassa. Näitä tiloja ohjelmistoon koodattiin seuraavassa olevan taulukon (taulukko 3) mukaisesti.

TAULUKKO 3. Mittalaitteeseen kirjoitetun ohjelman eri toimintatilat

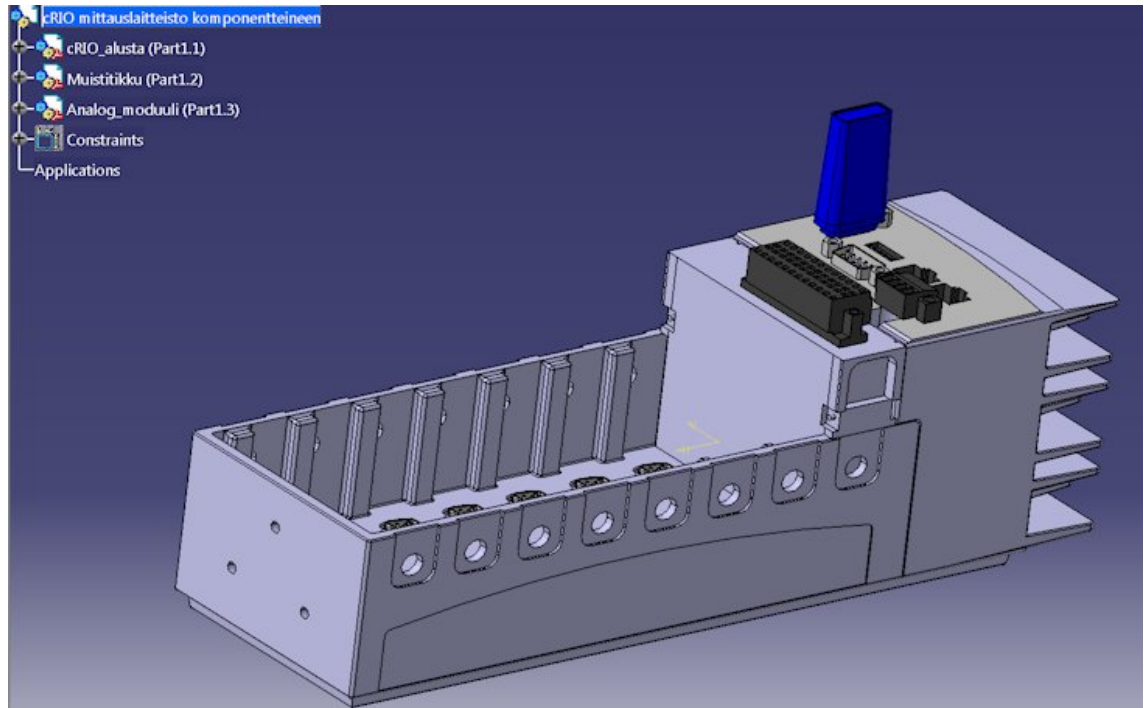
Sijainti koodissa	Määrittys	Tehtävä	Seuraava tila
1.	init (default)	Tarkkailla, onko mittalaitteen ”pause”-katkaisija käännetty ja alustaa mittaus	2. tai 5. tai pysyy 1.
2.	presence detection	Tarkkailla, ylittääkö antureilta tuleva signaali määritellyn rajan	3. tai 5. tai pysyy 2.
3.	measure	Mitata anturisignaaleita, muuntaa ne jännityksiksi sekä kirjoittaa taulukkomuotoon	4. tai 5. tai pysyy 3. viiden sekunnin ajan
4.	write measurement data	Kirjoittaa 5 sekunnin mittausjakson Excel-tilukoksi muistitikulle	5. tai 1.
5.	error handler	Poistaa ohjelmistossa syntyneet virhetilat	1. tai 2. tai 3. tai 4.

Labview-ohjelman etuna on myös se, että se sallii ohjelmoijan rakentaa ohjelmaan erillisen käyttöliittymän, jonka avulla ohjelman toimintaa voi simuloida ennen sen ajamista itse mittalaitteeseen. Tätä ominaisuutta hyödynnettiin ja etupaneeliin koodattiin muun muassa mahdollisuus vaihtaa moduulin liuskalle syöttämää jännitettä tai liuskaantureiden johtimien resistanssia. Rakennetun mittausohjelmiston eri tiloista sekä käyttöliittymästä löytyy kuvat tämän työn liitteistä (Liite 2). Mittaussignaalin näytteenottoaajuudeksi valittiin 10 hZ sillä perusteella, että aiemmin oli tiedossa, että ajoneuvon rungon ja korin ominaistaajuus on noin 1 hZ ja nyrkkisääntönä käytetään 10-kertaista näytteenottotaajuutta (Institute of Environmental Sciences: Himelblau, Harry; PierSol, Allan G.; James, H. Wise; Grundvig, Max R.; ei pvm, 231 - 233).

Ohjelman valmistuttua kytkettiin mittalaitteeseen yksi testiliuska kiinni ja käytettiin ohjelmaa siten, että mittalaite oli yhteydessä tietokoneeseen. Täten pystyttiin varmistamaan siitä, että liuska-anturia taivuteltaessa myös ohjelman tallentama jännitys muuttui vastaavasti. Labview-ohjelmistossa on myös tila, jonka avulla pystyy seuraamaan käynnissä olevan ohjelman etenemistä hidastettuna - tätä ominaisuutta hyödynnettiin, kun haluttiin varmistua siitä, että eri välivaiheissa tallentuvat lukuarvot ovat realistisia ja aiottuja.

3.3 Mittauksen valmistelu

CRio-mittalaitteesta moduuleineen laadittiin 3D-malli, jonka avulla pystyttiin ennalta mallintamaan mahdollisia sopivia asennuspaikkoja perävaunun rungossa. Mallia hyödynnettiin, kun valittiin mittalaitteelle sopivaa asennuskoteloä (kuva 16).



KUVA 16. Mittalaitteesta laadittu 3D-malli (Kuva: Kalle Seppälä 2014)

Aluksi harkittiin, että mittalaitteelle olisi tehty kokonaan uusi kotelo, sillä Jyki Oy on konepajayritys ja materiaalit sekä valmistusmenetelmät löytyvät yrityksestä. Päädyttiin kuitenkin soveltamaan Jykin varaosamyymälästä löydettyä Transcomponent Oy:n valmistamaa henkilöauton perävaunun työkalulaatikkoa, joka oli hieman iso, mutta kuitenkin vesitiivis sekä tarpeeksi kevyt tarkoitukseen (kuva 17). Laatikoon porattiin pohjaan kiinnitysreiät mittalaitteelle sekä kaksi viiden millin vesireikää pohjaan, jotta laatikkoon mahdollisesti pääsevä kosteus pääsisi pois. Lopuksi laatikon molempiin pätyihin porattiin yläosaan läpivientireiät venymäliuska-antureiden johdotuksen läpivientää varten.



KUVA 17. Mittalaitteen asennuslaatikko (<http://www.transcomponent.fi>)

Mittalaite toimii 12 - 24 voltin jännitealueella, joten se soveltui erinomaisesti kytkettäväksi mitattavan perävaunun sähköjärjestelmään pysäköintivalojen johdotukseen, vaikka mittalaitteessa itsessään ei akkua ollutkaan. Aluksi suunniteltiin, että mittalaitteisto olisi kytketty perävaunuun, jossa olisi ollut saatavilla erillinen parkkivalojärjestelmä akkuineen, mutta tälle ei nähty tarvetta. Käytännössä aina, kun perävaunun parkkivaloille ei tule virtaa - eli tässä tapauksessa mittalaite ei mittaa -, ei rungonkaan suhteen tapahdu mitään rasituksen muutoksia. Ainoa tilanne, jossa mainittavia rasituksia voisi ilman perävaunun valokytkentää tapahtua, on tilanne, jossa perävaunuun siirtokuormataan puuta vetoautosta perävaunun ollessa irrallaan. Tässäkin tapauksessa suurimmat rasitukset kuitenkin syntyvät vasta kuorman jo ollessa kuormattuna ja lähdettäessä perävaunun kanssa ajamaan, jolloin siis myös mittalaite jo mittaa. Tässä yhteydessä havaittiin myös, että taulukossa (taulukko 3) esitetty ”presence detection”-ohjelmaosio jää käytännössä tarpeettomaksi, sillä perävaunun liikkeessä haluttiin kaikki data talteen. Lisäksi etukäteen olisi ollut hankala arvioida, minkä suuruiseksi kyseinen mittauksen aloituskynnys olisi asetettu realististen tulosten varmistamiseksi.

Venymäliuskojen asennus perävaunuun aloitettiin yhteistyössä Jykin asentajien kanssa näyttämällä liuskoille halutut paikat. Tämän jälkeen liuskojen paikat (Liite 1) hiottiin maalista puhtaaksi jättäen metallin pinta hieman karheaksi, kuten liuskojen asennus-suosituksissa kehoitetaan (Vishay Measurements Group Educational Program 2001, 19). Hiotut kohdat puhdistettiin orgaanisella puhdistusaineella, tässä tapauksessa Wurthin puhdistussprayllä, huolellisesti (kuva 11). Tässä vaiheessa myös liuskojen johdotuksiin merkittiin maalarinteipillä liuskan aiottu anturointi mittalaitteella, jotta sekaannuksilta kytkentävaiheessa vältyttäisiin.

Puhdistettuihin asennuskohtiin tehtiin tussilla suuntamerkinät liuskojen kohdistamisen helpottamiseksi. Tässä vaiheessa liuska poistettiin muovipakkauksestaan ja varottiin koskemasta liuskan alapinnalle. Itse liuskan asennus suoritettiin suojahansikkaat kädessä, jotta liuskoihin ei pääsisi sormista rasvaa tai muita epäpuhtauksia vääristämään mitaustuloksia. Liuskan alapinnalle levitettiin tippa CN-liimaa, jonka jälkeen liuska painettiin kohdistusmerkkien avustuksella tiukasti asennuskohtaa vasten ja jatkettiin painamista noin minuutin verran. Tuotetiedoista saatiin, että kyseisen liiman kuivumisaika on maksimissaan minuutin, joten tämän jälkeen liitos oli valmis (Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd. ei pvm).

Oikean puolen takatelin etummaisen akselin jousen korvan eteen asennettiin kaksi liuskaa, kuten aiemmin mainittu (3.1). Näiden liuskojen asennuksessa jouduttiin kuitenkin tekemään kompromissi, sillä hot spot -jännityksen määrittämisessä on yleisimmin käytetty kahta eri variaatiota; liuskat etäisyydellä 0,4t ja 1,0t tai 0,5t ja 1,5t mitattavasta kohteesta t:n ollessa asennuspinnan ainevahvuus (kuva 10). Johtuen mittauksessa käytettävien liuskojen sääsuojauksesta, liuskojen asennuskoko oli niin suuri, ettei niitä pystytty asentamaan yllä esitetyllä tavalla. Hitsausaumaa lähempi liuska asennettiin nyt 7,5 mm:n etäisyydelle, joka 12 mm:n paksuisessa runkopalkin alalatasissa tarkoittaa 0,625t. Taaempi liuska puolestaan asennettiin etäisyydelle 1,0t eli 12 mm hitsisaumasta, mutta osittain ensimmäisen liuskan vierelle, sillä jälleen liuskan suojaus rajoitti asennuskohdetta (kuva 18).

Toiselle teliakselille sekä vasemmalle puolelle ensimmäistä takatelin akselia asennettiin yksi liuska kumpaankin niin lähelle jousen korvan hitsisaumaa, kuin mahdollista. Tämä tarkoitti samaa arvoa 0,625t eli 7,5 mm:n etäisyyttä. Käyttämällä samaa asennusetäisyyttä voitiin jatkossa ainakin jossain määrin vertailla tuloksia eri antureiden kesken ja eliminoida karkeimmat mittausvirheet pois.



KUVA 18. Takatelin ensimmäisen akselin hot spot -jännitystä mittaavat liuskat (Kuva: Kalle Seppälä 2014)

Perävaunun kaulan kohta on vaunun runkorakenteen kannalta kriittisin osa, sillä siinä kohdassa vaunun runkopalkki on pystysuunnassa matala. Koska haluttiin mitata runkopalkin taivutusta vaunun ajosuunnan vasen-oikea -akselin ympäri, haluttiin venymäliuskat asentaa vaunun kaulalle palkin ylälatan yläpuolelle sekä alalatan alapuolelle. Käytännössä heti törmättiin ongelmiin, sillä puutavaraperävaunun pankkorakenne on suunniteltu liukumaan liukupalojen päällä runkopalkin ylälatkaa vasten, joten sinne ylempää liuskaa ei voitu sijoittaa. Myös alapuolisen liuskan sijoitus koettiin riskialttiiksi, sillä kulumajäljistä päätellen etutelin lokasuoja kulkee käänöksissä niin läheltä haluttua liuskan asennuspaikkaa, että todennäköisesti se olisi vienyt liuskan mukanaan.

Edellä esitettyjen asioiden vuoksi taivutusta mittaavat liuskat päätettiin asentaa runkopalkin ylälatan alapinnalle sekä alalatan yläpinnalle ylhäältä katsoen samalle kohtaa (kuva 19 ja kuva 20). Tällä tavalla saatiin liuskat halutulle kohdalle vaunussa, mutta maksimitaivutusjännitystä ei saatu. Vaunun runkopalkin rakenteesta oli kuitenkin otettu mitat, joten saatuja tuloksia voitiin jälkikäteen ekstrapoloida maksimitaivutusjännityksen arvioimiseksi (kuva 21). Kaikkien antureiden asennuspöytäkirja sekä niiden numerointi löytyy raportin liitteistä (Liite 3).

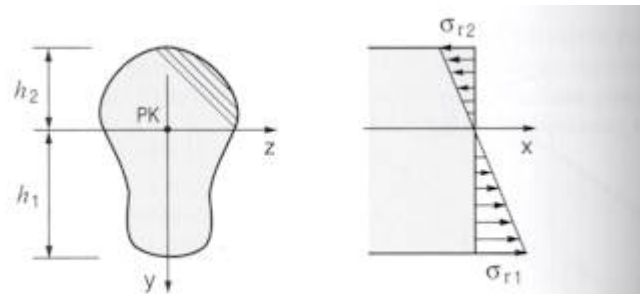


KUVA 19. Runkopalkin taivutusta mittaava alempi venymäliuska (Kuva: Kalle Seppälä 2014)

Liuskojen asennuksen jälkeen vedettiin antureiden johdotus mittalaitteen asennuslaatikon sisään, kytkettiin liuskat mittakorttiin, mittakortti mittalaitteeseen sekä tiivistettiin johdotuksien läpivientireiät Sikaflex-massalla vesitiiveyden takaamiseksi. Tämän jälkeen kytkettiin mittalaitteelle virta, otettiin mittalaitteeseen yhteys tietokoneella ja nollattiin kaikkien antureiden signaali niin lähelle nollaa MPa:ta kuin mahdollista. Lopuksi vielä käytettiin mittalaitetta hetki, irrotettiin USB-tikku ja testattiin, että data tallentuu oikeansuuruisena ja halutussa taulukkomuodossa. Lisäksi kirjattiin vielä ylös mittalaitteen kellon ero ohjelmoinnissa käytettyyn tietokoneeseen, koska kelloja ei onnistuttu synkronoimaan samaan aikaan.



KUVA 20. Runkopalkin taivutusta mittaava ylempi venymäliuska (Kuva: Kalle Seppälä 2014)



Kuva 1 Poikkileikkauksen reunajännitykset puhtaassa taivutuksessa

KUVA 21. Puhtaan taivutusjännityksen muodostuminen taivutuskeskiön ympärille (Salmi 2010, 178)

3.4 Mittauksen toteutus

Mittalaitteet asennettiin perävaunuun 12.9.2014 ja laitteiden oli tarkoitus antaa olla suorittamassa mittausta viikon ajan. Laitteita poistamaan mentäessä havaittiin kuitenkin, että mittalaitteen päällä sijainnut USB-tikku oli hypännyt pois liittimestään. Tämän takia mittaus käynnistettiin uudestaan ja varmistettiin tikun pysyminen paikoillaan teipin avulla. Uusi mittaus aloitettiin 19.9.2014 ja mittalaite poistettiin 22.9.2014. Tänä aikana mittalaite keräsi USB-muistitikulle Excel-muotoista jännitysdataa aikaleimalla varustettuna. Jotta dataa päästäisiin jotenkin analysoimaan, annettiin yhdistelmän kuljettajalle mittausten ajaksi mukaan liitteen (Liite 4) mukainen mittauspöytäkirja, josta ilmenee perävaunun kulloinenkin massa tietyllä ajanhetkellä. Puutavarayhdistelmä oli varustettu kuormainvaa'alla, joten perävaunun tarkka massa saatiin tietoon välittömästi kuormauksen jälkeen.

4 TULOKSET

4.1 Datan purkaminen

Mittausdata oli ohjelmoitu tallentumaan muistitikulle Excel-taulukkomuodossa aikaleiman kanssa jokaisesta kuudesta mittauspisteestä. Mittaustapahtuma oli kuitenkin jossain vaiheessa häiriintynyt, sillä datan tallennukseen käytetty USB-tikku oli korruptoitunut ja tietokoneeseen asettaessa vaati formatointia. Data saatiin tikulta kuitenkin palautettua kokeilemalla eri palautusohjelmia, joista Minitoolin Power Data Recovery onnistui saamaan tiedot esiin. Labview-ohjelmiston tallentamat tiedostonimet olivat hävinneet, mutta data saatiin aikajärjestykseen taulukkodataan tallentuneiden aikaleimojen avulla. Alkuperäisesti mittausdata piti tallentaa neljän päivän ajalta 19.9 – 22.9.2014, mutta samasta syystä kuin edellä mainitut ongelmat oli myös datan tallentaminen pysähtynyt 20. päivän iltana, kun yhdistelmä oli jäänyt viikkotauolle seisomaan. Täten mittausdata oli käytössä 19.9 – 20.9.2014 väliseltä ajalta, mikä käsitti täytetyn mittauspöytäkirjan mukaan (Liite 4) yhdeksän ajettua kuormaa.

Mittausdata oli myös suuruuslukemiltaan epäloogista, sillä ainoastaan toisen 3. akselin jousenkorvan jännitystä mittaavista antureista, AI0, lukemat olivat positiivisia; muut jousenkorvien anturit olivat tallentaneet negatiivisia lukemia, joiden suuruusluokka oli kaiken lisäksi erittäin suuri. Syytä tähän ei löydetty, sillä mittausta valmistellessa kaikkien antureiden signaalit nollattiin ja ennen perävaunuun asentamista liuskojen toiminta varmennettiin kokeellisesti (3.3). Tilanne ratkaistiin siten, että ensimmäisen mittauspisteen datan kohdalla kaikki kanavat nollattiin Excelissä manuaalisesti lisäämällä tai vähentämällä mitattua arvoa kyseisen tuloksen verran. Tämän jälkeen kaikkien muiden paitsi AI0-kanavan jännitykset liikkuivat järkevissä suuruusluokissa ja mittauspisteiden keskinäiset vaihtelut eivät olleet kohtuuttoman suuria.

Aikajärjestykseen asettamisen jälkeen perävaunun 3. akselin oikean puoleisten jousenkorvien kahden anturin data ekstrapoloitiin jousen korvalla sijainneelle hitsisaumalle kuvan (kuva 10) mukaisesti ja laadittiin tästä oma sarakkeensa. Lineaarinen ekstrapolointi tehtiin käyttämällä tiedettyjä AI0- sekä AI1-antureiden etäisyyksiä hitsisaumasta sekä näissä kullakin hetkellä esiintyneitä jännityksiä; tällöin määritettiin suoran yhtälön mukaisesti kulmakerroin jännityksen nousulle käyttämällä molempien anturien arvoja

sekä määritettiin jännitys nollaetäisyydellä hitsisaumasta, kun antureiden asennusetaisyydet hitsisaumasta olivat tiedossa.

Yllä selvitetystä hitsisauman jännityksestä laadittiin edelleen koko mittausdatan osalta Rainflow-menetelmää mukaileva kuvaaja, joka kuvaa jännitysheilahdusten suuruutta kahden peräkkäisen mittauspisteen välillä ja niiden lukumäärää mittausdatan koko ajalta - eräänlainen jännitysspektri. Hitsisauman jännitysdata jaettiin 2,3 MPa:n suuruisiin lohkoihin, joissa jännitysheilahdusten lukumäärä laskettiin kuvaajaan. 2,3 MPa:n jakoväliä käytettiin siksi, että VTT:n mittaus oli toteutettu pääosin samalla jakovälillä, jolloin tulosten vertailu oli jossain määrin mahdollista. Käyttämällä edellä selvitettyä menetelmää saatiin selville se, missä suuruusluokassa jännityksien vaihtelut milläkin ajojaksolla liikkuvat.

Seuraavaksi siirrettiin kuvaajamuotoon kaikkien kolmen jousen korvan edessä sijainneiden anturien Rainflow-kuvaajat, jotta voitiin suorittaa kohdassa (3.3) mainittu vertailu eri jännitysarvojen kesken. Ideaalitapauksessa ajateltiin, että 3. akselin oikean- sekä vasemmanpuoleiset anturit, AI0 ja AI3, näyttäisivät melko lailla yhteneviä heilahdusvaihteluita eikä 4. akselin anturin AI2 tulisi poiketa näistä myöskään suuresti. Datasta laadittiin myös taulukon havainnollistamiseksi jännityskertymäkuvaajat, jotka normaalissa ajotilanteessa muodostivat normaalijakauman mukaisen jakauman yleisimmän esiintyneen jännitysluokan ympärille.

Lopuksi käsiteltiin vielä taivutusjännitykset kuvaajamuotoon antureilta AI4 sekä AI5. Näiden antureiden osalta oletus oli, että jännityskäyrät kulkevat melko lailla symmetrisesti nollajännityksen ylä- sekä alapuolella jokaisessa mittauspisteessä.

4.2 Jousenkorvien jännitykset

Ekstrapoloidun jännityksen osalta mittaukset epäonnistuivat, sillä havaittiin, että jännityksien suuruudet olivat jatkuvasti korkealla ja maksimiarvoksi saatiin niin suuria arvoja, että ne eivät käytännössä ole mahdollisia. Epäkohdat havaittiin myös kun tutkittiin tarkemmin taulukkomuotoon koottuja jännitysarvoja mittauspisteissä; järjestäen kaikissa mittausjaksoissa toinen 3. akselin hitsisaumalle ekstrapoloitavaa jännitystä mittaavista antureista – AI0 – sai suurempia jännityslukemia kuin kaksi muuta anturia eri jousen-

korvien edessä. Tämä on erikoista, sillä ohjelmallisesti kaikkien mittauskanavien mittaukset oli toteutettu samalla kaavalla, anturit olivat samantyyppisiä, asennettu samoin päin jousenkorvien eteen sekä johtimien kytkennät mittalaitteen mittakortilla olivat samoissa porteissa.

Neutraalissa ajotilanteessa (tasaisella nopeudella tapahtuva liikkuminen vakiomassalla) tulisi Rainflow-kuvaajan saada jännitysvaihteluita ainoastaan melko alhaisella jännitysalueella, mikä myös monen kuvaajan kohdalla oli hyvin nähtävissä. Kuvaajiin pyrittiin ottamaan noin 10 000 mittauspistettä, mikä ajallisesti tarkoitti 30 – 40 minuutin jaksoa. Käytännössä tälle ajalle saattoi mahtua siis niin tyhjänä ajamista, metsässä liikkumista, kuormaamista kuin myös kuormattuna ajamista. Kuormattuna suurin rasitus kohdistuu 3. akselin jousenkorvaan, sillä kuten kohdassa (1) todettu, tämän akselin edessä on vapaata tilaa ennen perävaunun 2. akselia, joka tarkoittaa sitä, että tältä väliltä runko pääsee taipumaan vapaasti köyrylle alaspäin kuorman vaikutuksesta; tästä syystä uusien puutavaraperävaunujen rungot on tehtaalla esikäyrästetty hieman kaarelle, jotta kuorman vaikutusta saadaan minimoitua. Perävaunua kääntäessä kohdistuu edelleen kolmannen akselin kiinnityskohtaan runkoon rasituksia, sillä kaikkien akseleiden ollessa maassa, sijaitsee perävaunun takapäin kääntökeskiö neljännen akselin kohdalla.

Eri jousenkorvien jännityksiä vertailtaessa on havaittavissa, että 3. akselin vasemman jousenkorvan anturi saa järjestäen korkeampia jännityskertymiä kuin muut kaksi anturia. Tämä ei ole selitettävissä muuten kuin liuska-anturien keskinäisillä asennuseroilla, sillä 3. akselin oikeanpuoleisen jousenkorvan eteen asennettu AIO-anturi oli asennettu hieman vinoon ja lisäksi antureiden keskinäiset etäisyydet hitsisaumoista saattavat erota hieman.

Tarkoituksena oli määrittää kolmannen akselin jousenkorvan hitsisaumalle Wöhlerkäyrän mukainen kestoikäennuste kaavojen (kaava 5 ja kaava 6) perusteella, mutta johdettujen mitattujen jännitysten epäloogisuudesta sekä siitä, että osa mittaustuloksista puuttui eikä tämän vuoksi todellista ajettua kilometrimäärää voitu tietää, olisi kaavan käyttäminen antanut liian epäluotettavia tuloksia. Tämän lisäksi koska datasta puuttui mittaussiviltä muutamien minuuttien pätkiä, vääristyivät kahden peräkkäisen mittauspisteen keskinäiset jännityserot kohtuuttoman paljon, jolloin lasketun kestoajan virhemarginaalin arvioiminen olisi ollut mahdotonta.

4.3 Perävaunun etuosan rungon taivutusjännitys

Taivutusjännitystä analysoitiin muodostamalla koko mittauksen ajalta kuvaaja, jossa sekä alemman- että ylemmän runkopalkin lattateräksen anturit näkyivät omina käyrinä. Kuvaajasta havaittiin, että taivutusjännitystä mittaavien anturien asennus onnistui ilmeisen hyvin, sillä kuvaajat vastasivat hyvin toisiaan toisen käyrän kulkiessa negatiivisella puolella peilikuvana. Tuloksia väärästi alaspäin kohdassa (3.3) mainittu asennuspaikka, mikä tarkoitti sitä, että todellisuudessa esiintyneitä maksimijännityksiä ei kuvaajan perusteella voitu suoraan nähdä. Lineaarisen ekstrapoloinnin avulla voitiin kuitenkin arvioida, minkä suuruisia todelliset jännitykset olivat runkopalkin ylä- ja alalatan pinnoilla.

Taivutusjännityksen arvoista havaittiin myös, että taivutuskeskiö ei sijainnut kuvan (kuva 21) mukaisesti aivan symmetrisesti antureiden puolivälissä, sillä yläpuolella sijainneelle anturille kehittyi suurempia jännityksiä kuin alapuoliselle anturille. Taivutuskeskiön epäsymmetrinen sijainti selittyi sillä, että runkopalkin ylälatalla on 10 mm paksu kun taas alalatta on 12 mm paksu. Perävaunun ollessa kuormattuna taipui runkopalkki sivusta katsottuna U-muotoon, jolloin liuskat puolestaan taipuivat eri päin riippuen siitä, olivatko ne asennettu ala- vai ylälatan pinnalle. Tässä mittauksessa johdotus oli kytketty siten, että runkopalkin taipuessa kuormattuna alapuolinen anturi näytti negatiivista jännitystä ja yläpuolinen puolestaan positiivista lukemaa.

Tarkastelemalla taivutusjännityksestä laadittua kuvaajaa nähtiin selvästi kohdat, joissa perävaunu on ollut suuremman jännityksen alaisena eli kuormattuna. Kuvaajasta luettuna voitiin, tulkintatavasta riippuen, havaita seitsemän tai kahdeksan jaksoa, joissa rasitus oli suurempi. Tässä oli kuitenkin ristiriita mittauspöytäkirjan (Liite 4) kanssa, josta laskettuna 19. ja 20. päivän aikana ajettiin yhdeksän kuormaa. Tarkkoja kohtia oli vaikea todentaa, sillä kuten aikaisemmin jo todettu, mittausdatasta puuttui osa, jolloin myös mittauksen alkupään data saattoi olla puutteellista. Lisäksi vertailtaessa taivutusdatan aikaleimoja mittauspöytäkirjan merkintöihin ei muistiin kirjattu 1h 38 min aikaero tuntunut sopivan kuvaajan rasituskohtiin.

Kuvaajia tarkemmin analysoimalla nähtiin, kuinka perävaunu käyttäytyy eri ajotilanteiden sekä lastaus- ja purkaustilanteiden aikana. Suomessa kuljetettava puutavara on yleis-

simmin joko 3- tai 6-metristä, jolloin perävaunuun mahtuu joko kolme tai kaksi puutavarannippua. Mittausperävaunu oli varustettu siirtopankoilla, joten kuormaus alkaa aina siten, että takapäin pankot ajetaan hydraulisesti vaunun etupäähän nosturin ulottuville (kuva 22). Tällöin etummaisista kuormauksista olevista pankeista on hyvin lähellä (noin 1 metri) mittauskohtaa ja suurin osa takimmaisesta puutavarannipusta on akseleiden välisellä kohdalla runkoa kuormauksen ajan. Taivutusjännityskuvaajasta siirtopankkoperävaunun puutavarannipun sijainti voidaan havaita selvästi jännitysviivojen sijainneista ja suunnista.



KUVA 22. Siirtopankkoperävaunun takimmainen nippu ajettuna eteen kuormausasentoon (Kuva: Kalle Seppälä 2005)

5 VIRHEARVIOINTI

5.1 Venymäliuska-anturit

Kerätyn mittausdatan virheen suuruusluokan arviointi oli monista syistä hankalaa. Akseleiden jousenkorvien edestä mitatut jännitykset tehtiin keskenään vertailukelpoisiksi kohdassa (4.1) mainitulla Excel-nollauksella, mutta silti AIO-kanavan jännitys poikkesi muista kahdesta kanavasta. Voidaankin kohtuullisella todennäköisyydellä olettaa, että juuri 3. akselin oikeanpuoleisen jousenkorvan etupuolella sijainnut AIO-anturi on antanut vääränsuuruista mittausdataa, sillä toiset kaksi anturia mittasivat keskenään paremmin yhteneviä tuloksia. Työssä referenssinä käytetty VTT:n tutkimus tuotti jännitysvaihteluita, jotka ovat kyllä samaa suuruusluokkaa tässä työssä mitattujen tulosten kanssa, mutta kuitenkin huomattavasti pienempi kuin mittaustulosten loppuvaiheessa ilmenneet epäluonnollisen suuret jännitykset. Taivutusjännityksen osalta jännitykset ovat hyvin linjassa VTT:n aikaisemman tutkimuksen tulosten kanssa.

Kaikkien mittauksessa käytettyjen antureiden virheisiin vaikuttaa se, että asennus jouduttiin tekemään tavallisessa hallissa ilman kunnan mahdollisuutta paikoittaa antureita tarkasti ennen asennusta. Tämän vuoksi anturit asennettiin silmämääräisesti ja niin tarkasti sekä mitoiltaan että suunniltaan, kuin se vain suorakulman sekä työntömitan avulla oli mahdollista. Taivutusjännityksen liuska-anturit AI4 ja AI5 saatiin erittäin hyvin kohdakkain toiselta sivultaan, sillä niiden asennuskohdassa runkopalkin hitsisaumat on hitsattu hitsausrobotin avulla ja tällöin sauman reunaan kohtisuoraan asennettaessa voitiin olla varmoja siitä, että liuskojen sivusuuntaiset etäisyydet vaunun keskilinjasta ovat hyvin lähellä toisiaan. Sen sijaan vaunun pitkittäissuunnassa liuskat jouduttiin asentamaan silmämääräisesti ja lisäksi haasteena oli alalatan yläpintaan kiinnitetyn AI5-liuskan kohdalla se, että liuska tuli asentaa mahdollisimman lähelle etutelin takaa alkavaa alaspäin pokattua osuutta, mutta kuitenkin siten että se on edelleen tasaisen latan osuudella. Tuloksia tarkastellessa voidaan todeta, että tässä onnistuttiin hyvin, sillä ylä- ja alapuoleisen anturin käyrät seuraavat hyvin toisiaan peilikuvina.

Hot spot -jännityksen määrittämiseen käytetyt AIO- ja AI1-anturit jouduttiin suuren sääsuojauksensa vuoksi asentamaan rinnakkain, mikä ei ollut optimaalinen tilanne. Mikäli mittaus olisi suoritettu ns. ketjuliuskan avulla, olisivat liuskat olleet samalla linjalla pe-

räkkäin hitsisaumasta katsoen. Lisäksi kaikki perävaunun jousenkorvat oli hitsattu runkopalkkiin manuaalisesti, minkä vuoksi saumojen koossa sekä tasaisuuksissa oli suuria eroja. Tämä vaikutti osittain siihen, kuinka lähelle itse jousenkorvan reunaa liuska pystyttiin asentamaan, sillä liuska oli kuitenkin asennettava hitsisaumaan kiinni.

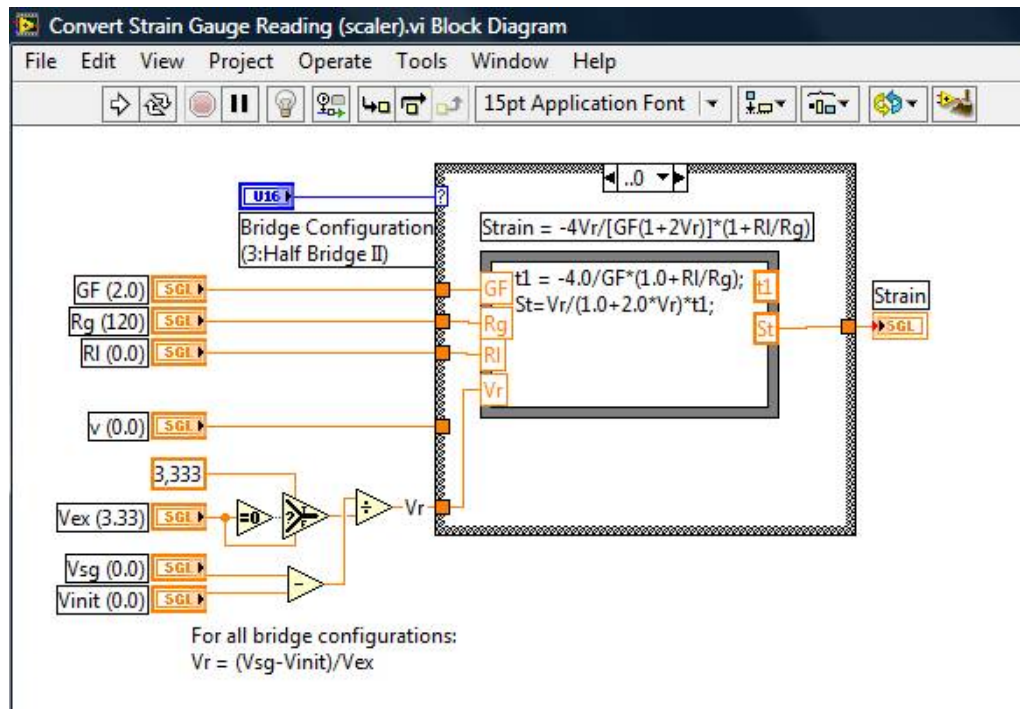
5.2 Liitos

Liuskat oli liimattu perävaunuun liuskavalmistajan maahantuojan suosittelemalla liimalla, jota siveltiin erittäin ohut kerros keskelle liuskan alapintaa. Kaikkien liuskojen käsittely paketista poistamisen jälkeen tapahtui suojakäsineiden kanssa ja liuskat pyrittiin heti paketista ottamisen jälkeen liimaamaan mittaustaipaikkaansa; tällä eliminoitiin sormista mahdollisesti tulevat rasvatahrat mittauspinnalle sekä asennusympäristön lika, joka saattaisi myös haitata mittausten luotettavuutta.

Kuten kohdassa (2.2.2) esitettiin, olettaa venymäliuskojen teoria liuskan kiinnityksen alustaansa olevan häviötöntä. Käytännössä liimausten onnistumista ei voitu todentaa, mutta asennuksissa noudatettiin valmistajan ohjeita niin liimakerroksen paksuuden, kuivumisajan kuin asennushetken puristuksenkin suhteen. On siis syytä olettaa, että liima-liitokset olivat mittausrvirheen kannalta merkityksettömiä.

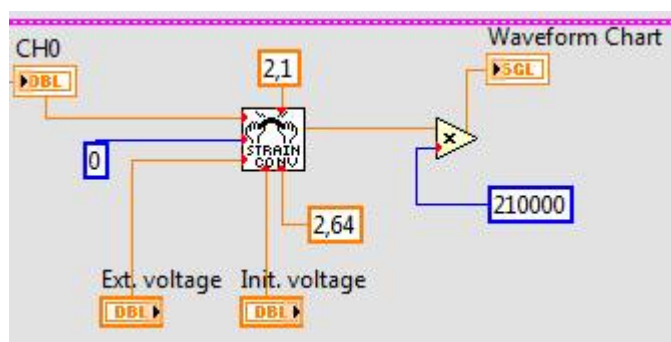
5.3 Mittausohjelma

Mittausohjelmaa koodatessa käytettiin liuskan mittaustiedon muuntamiseksi jännitysmuotoon National Instrumentsin omaa, jo valmiina Labview-ohjelmassa olemassa ollutta, muunnoskoodia. Tähän muunnosohjelmaan voitiin itse mittaushjelmistoa koodatessa määrittää sopivat arvot. Kuten ohessa olevassa kuviossa (kuvio 2) on esitetty, muunnosohjelmasta valittiin mittauksissa käytetty siltatyypin ($1/4$ silta, "0"), liuskan S-arvo (GF), siltakytkennän vastusarvo (R_g), liuskan johtimien aiheuttama vastus (RI), liuskalle syötettävän jännitteen arvo (V_{ex}), sekä muut häviöt huomioon ottava liuskan alkujännite lepotilassa (V_{init}). Käytetyssä siltakytkennän tyyppissä ei tarvinnut ottaa huomioon Poissonin vakion vaikutusta (ν), kuten laatikon sisällä olevasta matematiikkayhtälöstä havaitaan.



KUVIO 2. Labview-ohjelman oma muunnosohjelma, joka muuntaa venymäliuskan jännitteen venymäksi

Johtuen pitkälle valmiiksi määritellyistä matemaattisista funktioista ja valmistajien ilmoittamista arvoista, ei mittausohjelman tuottamassa datassa arvioida olevan virheen mahdollisuutta, sillä ohjelman toimintaa simuloitiin ennen käyttöönottoa kuten kohdassa (3.2.2) kerrottiin. Kuvasta (kuvio 3) ilmenee periaate, kuinka ohjelmistossa oli annettu mittauksen aikana käytettävät parametrit. Muunnosohjelma antaa ulos venymäarvon, joka kaavassa (4) esitetyn Hookeen lain mukaisesti saadaan muunnettua jännitykseksi kertomalla materiaalin kimmomoduulilla. Simuloinnin aikana tapahtumien havainnollistamiseksi tämä jännitysarvo oli johdettu näytettäväksi kuvaajaan, joka päivittyi vastavasti liuskaa taivuteltaessa.



KUVIO 3. Testijakson simuloinnissa käytetty muunnosohjelman kytkentä, joka muuntaa liuskalta tulevan jännitteen arvon jännityslukemaksi ja piirtää siitä kuvaajan.

Datan tallennus oli mittausohjelmistossa laadittu siten, että mittalaite tallensi omaan työmuistiinsa mittausarvoja viiden sekunnin ajan (50 arvoa), jonka jälkeen se kirjoitti nämä arvot USB-muistitikulle ja aloitti uusien arvojen keräämisen. USB-kirjoitusvaiheessa ohjelman tuli skannata muistitikku läpi ja mikäli aiempia tietoja löytyi, joko kirjoittaa aiemman tiedoston jatkeeksi tai vaihtoehtoisesti aloittaa uusi tiedosto, mikäli vanha oli kooltaan yli määritetyn rajan. Ongelmaksi muodostui se, että mikäli mittalaitteen virta katkesi juuri tallennushetkellä muistitikulle, korruptoitui muistitikun data. Tämä johtui luultavasti siitä, että muistitikku noudattaa Windowsin hakemistorakennetta ja tällöin hakemistorakenne pirstaloituu, eikä muistitikku enää näy tietokoneelle oikein, vaikka data sen sisällä tallessa olikin.

Ennen mittausta oltiin siinä käsityksessä, että mittalaite ei toimiakseen vaatisi hakemistorakennetta tikulta, sillä koska kyseessä on koodaamalla tehty ohjelma, se osaa ”pakottaa” datan käskettyyn kohteeseen sekä myös paikallistaa aiemman datan sieltä. Tämä oletus voidaan jossain määrin osoittaa paikkansa pitäväksi, sillä dataa oli kuitenkin tallentunut kahden vuorokauden mittausjaksolta, vaikka tallennus oletettavasti oli välillä keskeytynyt virtakatkoksen vuoksi.

5.4 Mittausympäristö

Mittalaitteet kiinnitettiin vaunussa niin suojaisaan paikkaan, kun se johdotuksen ja tilan puolesta oli mahdollista. Laitteen asennuslaatikko oli asennettu kiinteällä pulttikiinnityksellä vaunun runkopalkkiin ja myös itse laite oli laatikossa kiinteästi. Tästä johtuen mittalaitteeseen kohdistui suuria kiihtyvyyksiä sekä värinää. Kuitenkin mittausdatasta voidaan havaita, että laite on mitannut pitkiä ajanjaksoja yhtäjaksoisesti eikä voida olettaa, että se olisi värinän vuoksi katkaissut mittatapahtumaa missään vaiheessa.

Antureiden johdotus laitteen asennuslaatikkoon oli tuotu sisään molemmista päädyistä ja nämä läpiviennit oli lopuksi tiivistetty tiivistysmassan avulla. Laatikon pohjaan oli kuitenkin tehty kaksi reikää, jotta sisälle mahdollisesti joutuva tai kondensoituva kosteus pääsisi myös pois. Mittalaitteen todettiin jo simulointien aikana tuottavan melko paljon lämpöä, että se omalta osaltaan edesauttaa kosteuden haihtumista. Toisaalta mittauksissa käytetty asennuslaatikko oli mittalaitetta huomattavasti isompi (kuva 24). Lait-

teistoa poistettaessa ja laatikko avattaessa nähtiin kuitenkin, että kotelo oli tiivis ja mittalaite sekä sen ympäristö puhtaita roskista sekä kuivia.



KUVA 23. Mittalaite asennettuna paikoilleen johdotukset kytkettyinä ja johtojen läpiviennit tiivistettyinä (Kuva: Kalle Seppälä 2014)

Johdotus oli antureissa jo valmiina, mutta johtuen pitkistä kontaktipinnoista kytkentäpäässä, lyhennettiin kontaktipintoja ennen asennusta. Tämän jälkeen työnnettäessä johtimet mittalaitteen mittauskorttiin johdin painui sisään kokonaan kontaktipintojensa osalta ja näkyviin jäi ainoastaan johtimen suojattu osa. Samoin mittalaitteelle virtajohdinta kytkettäessä otettiin tarvittava virta suoraan perävaunun jakorasian vapaalta virtanastalta, jolloin saatiin virtakaapeli tulemaan suojattuna jakorasian sisältä mittalaitteelle asti. Virtajohdin kytkettiin mittalaitteen päällä liittimeen, joka ruuvattiin kahdella ruuvilla kiinni mittalaitteeseen tiiviin kontaktin varmistamiseksi. Lopuksi testattiin vielä, että mittalaite varmasti saa virran kytkennän kautta syöttämällä irrallaan olevalle perävaunulle virtaa valopistokkeen kautta ja tarkistamalla USB-tikulle tallentunut data tämän jälkeen tietokoneella.

Mittausjakson aikana oli yöpakkasia, jotka osaltaan saattoivat vaikuttaa mittauslaitteiston toimintaan. National Instruments ilmoittaa cRio 9022 -mittalaitteen toimintalämpötila-alueeksi $-20\text{ °C} - 50\text{ °C}$ ja mittalaitteeseen liitetyn mittauskorttien asennuskaukalon toimintalämpötila-alueeksi $-40\text{ °} - 70\text{ °C}$. Vastaava lämpötila-alue ilmoitetaan myös 9235-mittauskortille. Tämän lisäksi liuska-anturit oli sääsuojattu jo tehtaalla, joten voidaan olettaa, että lämpötilalla ei ole ollut mittausten luotettavuuteen mainittavaa vaikutusta.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

6.1 Mittaustulokset

Jousenkorvien jännityksien osalta mittaustuloksien katsottiin olevan epäluotettavia, sillä kolmen eri kohdan antureiden tulokset poikkesivat toisistaan niin paljon. Tämä virhe johtuu todennäköisesti joko antureiden asennuksessa tapahtuneesta suunta-, pinnan puhkaus- tai liitosvirheestä tai sitten mittalaitteeseen rakennetun ohjelmiston systemaattisesta virheestä. Juurikin mittalaitteelta saatu alkuperäisten jännitysarvojen suuruus viittaisi siihen, että itse ohjelman koodissa on ollut jokin virhe. Toisaalta mikäli koodissa olisi ollut virhe, olisi virheen kuulunut olla joka mittauskanavan kohdalla, sillä kaikkien kuuden anturin koodi oli identtistä. Täten tällä oletetulla koodin virheellä ei voida selittää sitä, miksi osa kanavista tuotti jatkuvasti positiivisia ja toiset kanavat negatiivisia arvoja.

Taivutusjännityksen kohdalla voitiin jännityskuvaajasta selvästi nähdä, kuinka perävauunun rungon jännitys käyttäytyy eri tilanteissa. Lisäksi kuten kohdassa (5.1) on analysoitu, ovat tulokset samassa suuruusluokassa VTT:n aiemman mittauksen kanssa. Kuitenkin on vaikeaa asettaa näillekään tuloksille kovin suurta painoarvoa, kun ottaa huomioon tavan, jolla mittausdata jouduttiin ”nollaamaan” jälkikäteen sekä sen, että jousenkorvien jännitysarvot eivät silti muuttuneet täysin realistisiksi.

Olisikin tärkeää toistaa mittaukset samalla laitteistolla vastaavista mittauskohdista siten, että datan tallennus saadaan ennen mittauksia luotettavaksi. Mittauksen toistamiseen on esitetty huomioon otettavia asioita seuraavassa kappaleessa (6.2).

6.2 Parannusehdotukset

Tässä työssä toteutettu mittaus on periaatteeltaan toimiva ja oikein toteutettu. Mittauksia valmistellessa oli käytettävissä rajallinen aika sekä osaaminen mittausohjelmiston koodaamiseen Labview-ohjelmalla, joten ohjelmiston toiminnallisuus jäi erittäin yksinkertaiseksi. Vastaavaa mittausta toteutettaessa on ensiarvoisen tärkeää, että mittausten valmisteluun varataan riittävä aika mittauslaitteiston toimivuuden tarkastamiseen eri tilanteissa. Ehdotuksena seuraavaan mittaukseen on, että tutustuminen Labview-ohjelmistoon sekä mittauksessa käytettävään välineistöön pääsisi alkamaan 2–3 kuukautta ennen varsinaisia mittauksia. Labview-koodilla on mahdollista toteuttaa paljon erilaisia toiminnallisuuksia ja tässä mittauksessa käytettyä ohjelmistoa tulisikin edelleen kehittää siten, että pelkän raakadatan sijaan mittauslaitteisto laatisi tässä työssä esitetynlaiset kuvaajat sekä diagrammit itsenäisesti ja tallentaisi nämä tavallisten mittaustulosten kanssa USB-muistitikulle. Kun edellä esitetty toiminnallisuus on koodattu, voitaisiin mittalaite kytkeä jatkuvalla virralle ilman signaalin tason tunnistusta, sillä erittäin suureksi kasvava mittaustulosten määrä ei aiheuttaisi ongelmia, kun data olisi jo valmiiksi analysoitavassa muodossa. Mittausohjelmaan on mahdollista laatia myös tietynsuuruinen kynnyks, jonka ylittyessä mittaus käynnistyy, mutta tässä ongelmana on se, että haluttu kynnyksen suuruus pitäisi päättää sitä välttämättä tietämättä. Tällöin kaavassa (5) esitetty kestoikäennuste saattaisi vääristyä, sillä kaikkein pienimmät jännityksen vaihtelut jäisivät pois tuloksista.

Jotta tämän mittauksen tuloksia voisi pitää vertailukohtina uuteen mittaukseen, tulisi ensimmäisenä suorittaa tässä mittauksessa käytetyn mittausohjelmiston ja liuska-anturin kanssa vetokoe. Liuska tulisi liimata vetokoelaitteeseen CN-liimalla ja liiman kuivuttua kalibroida Labview-ohjelmistolla näyttämään nollan MPa:n jännitystä. Tämän jälkeen liuskaa tulisi kuormittaa vetokoelaitteen avulla tietyllä voimalla ja tarkastaa, ovatko liuskalle muodostuvat jännitykset linjassa vetokoelaitteen vetovoiman kanssa. Mikäli eroavaisuuksia havaitaan, tulee ohjelmisto tarkistaa varsinkin ohjelmistojen muunnoskohdan (kuvio 2 ja kuvio 3) osalta.

Kun ohjelmisto sekä liuska-antureiden toimivuus on saatu testattua ja datan tallennusmuoto koodattua mittausohjelmistoon oikein, tulisi suorittaa testimittaus yhden tai kahden venymäliuskan kanssa siten, että laitteisto on asennettuna oikeaan perävaunuun ja perävaunua liikutellaan hallitusti esimerkiksi tehdasalueella. Mikäli tulokset edelleen ovat yhtäpitäviä vetokokeessa kalibroitujen kanssa, voidaan laitteisto asentaa varsinaiseen mitattavaan perävaunuun.

Lopulliseen mittauskohteeseen asennettaessa parhaan asennustuloksen takaamiseksi liuskat tulisi olla mahdollista kiinnittää alhaalta päin hyvässä valaistuksessa; käytännössä huoltohallin asennusmontussa työskennellen. Asennuksen suorittajina tulisi olla kaksi henkilöä jotta liuskojen keskikohtien etäisyys saadaan luotettavasti mitattua kohdalleen hitsisaumasta. Lisäksi mittalaite tulisi vaimentaa jostain liitoksestaan kumityynyjen avulla suurimpien tärähtelyiden vaimentamiseksi. Asennuksen valmistuttua perävaunua tulisi liikuttaa koetarkoituksessa hieman ja analysoida tallentunut data, jotta voidaan varmistua mittalaitteiston asennuksen onnistumisesta.

Kiteytettynä tämän työn toistaminen onnistuneesti vaatii:

- 1) Huolellista perehtymistä teoriaan
- 2) Labview-ohjelmoinnin hyvää osaamista
- 3) Antureiden kalibrointia vetokokeen avulla ennen varsinaisia mittauksia
- 4) Vähintään kahden kuukauden valmistautumisaikaa mittalaitteiston asennukseen
- 5) Laitteiston asentamista paikassa, jossa se on mahdollista suorittaa perävaunun alla työskennellen ja kahden ihmisen yhteistyönä
- 6) Asennetun laitteiston toimivuuden testaamista ennen lopullisia mittauksia.

LÄHTEET

Bertodo, R. "Development of High-temperature Strain Gauges ." Teoksessa *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Vol. 173, No. 23*, 605-616. Lontoo, 1959.

HBM: Hoffmann, K. *An Introduction to Stress Analysis and Transducer Design using Strain Gauges*. HBM, 2012.

Institute of Environmental Sciences: Himmelblau, Harry; PierSol, Allan G.; James, H. Wise; Grundvig, Max R.; "NASA." <http://trs-new.jpl.nasa.gov/dspace/bitstream/2014/33780/1/94-0509.pdf> (haettu 16. 11 2014).

Salmi, Tapio. *Lujuusoppi*. Tampere: Pressus, 2010.

Sokka, Jouko, haastattelu, haastattelijana Kalle Seppälä. *Suunnittelija, Jyky Oy* (1. 8 2014).

Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd. *Strain gauge adhesives*. http://www.tml.jp/e/product/strain_gauge/adhesives_list/index.html (haettu 16. 9 2014).

Tokyo Sokki Kenkyujo. "Elkome Systems Oy." 10. 3 2008. <http://www.elkome.fi> (haettu 22. 7 2014).

TWI Limited: Maddox, S. J. *Recommended Hot-Spot Stress Design S-N Curves for Fatigue Assessment of FPSOs*. 22. 6 2001. <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/recommended-hot-spot-stress-design-s-n-curves-for-fatigue-assessment-of-fpsos-june-2001/> (haettu 15. 9 2014).

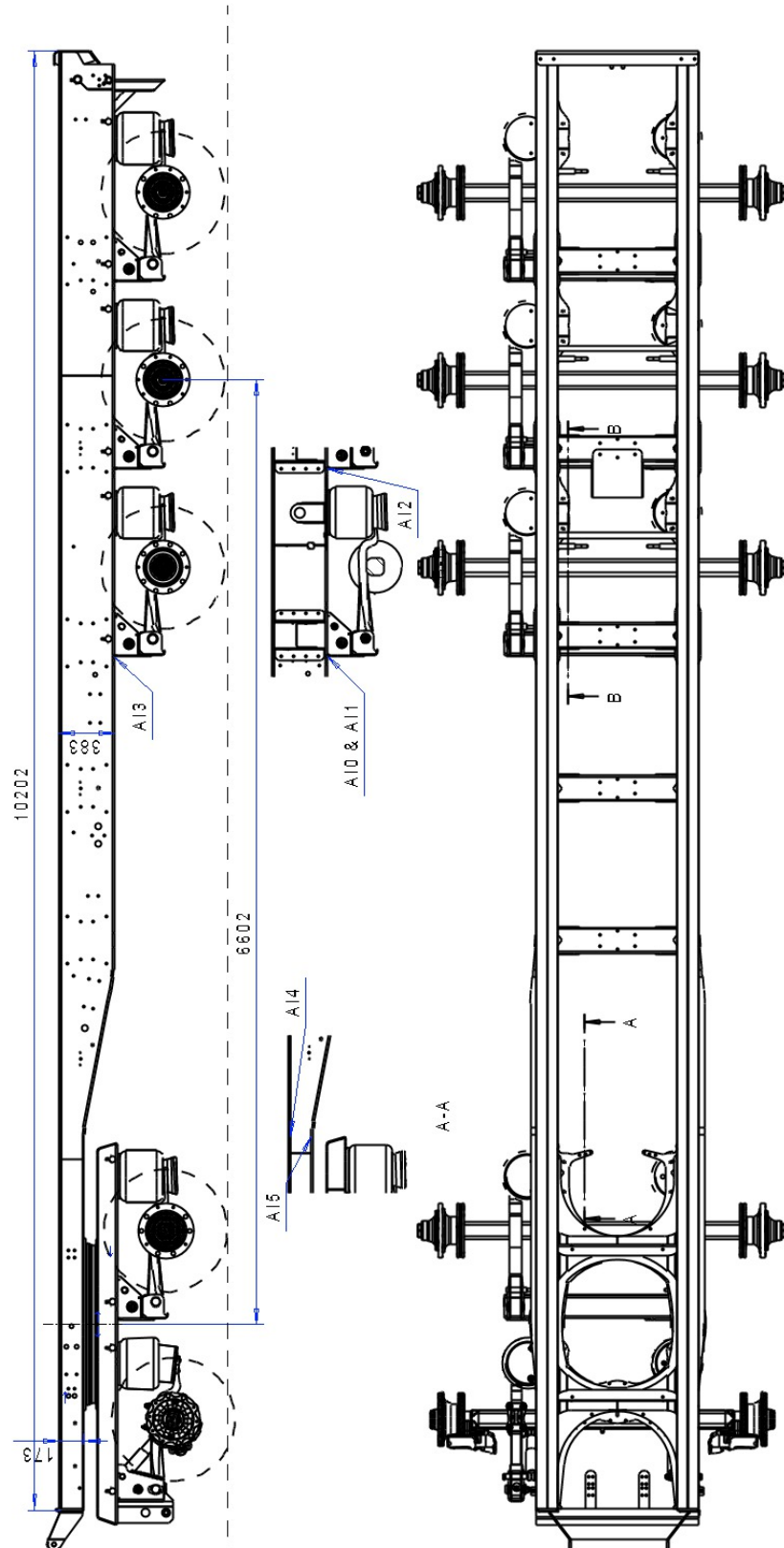
Valtioneuvosto. "FINLEX." *Valtioneuvoston asetus ajoneuvojen käytöstä tiellä annetun asetuksen muuttamisesta* . 6. 6 2013. <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2013/20130407> (haettu 14. 7 2014).

Vishay Measurements Group Educational Program. "Howard R. Hughes College of Engineering." 17. 9 2001. http://www.egr.unlv.edu/~bj/MEG_302L_web/Student_strain_gage_Manual-001.PDF (haettu 16. 9 2014).

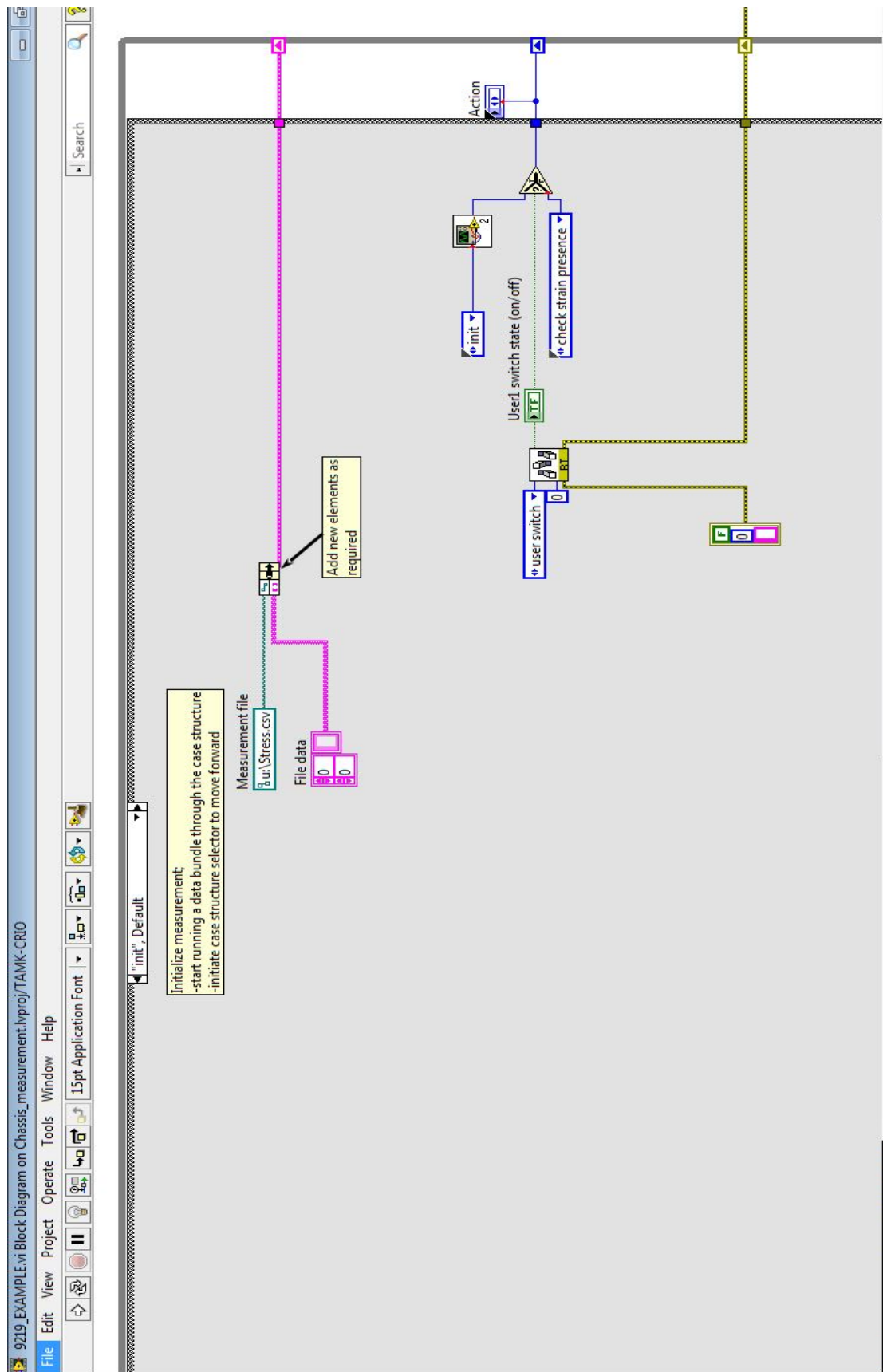
VTT valmistustekniikka: Bäckström, M. *Jyky V42-T0 Suomi -96 puutavaraperävaunun kenttämittaukset*. Espoo: VTT valmistustekniikka, 1997.

LIITTEET

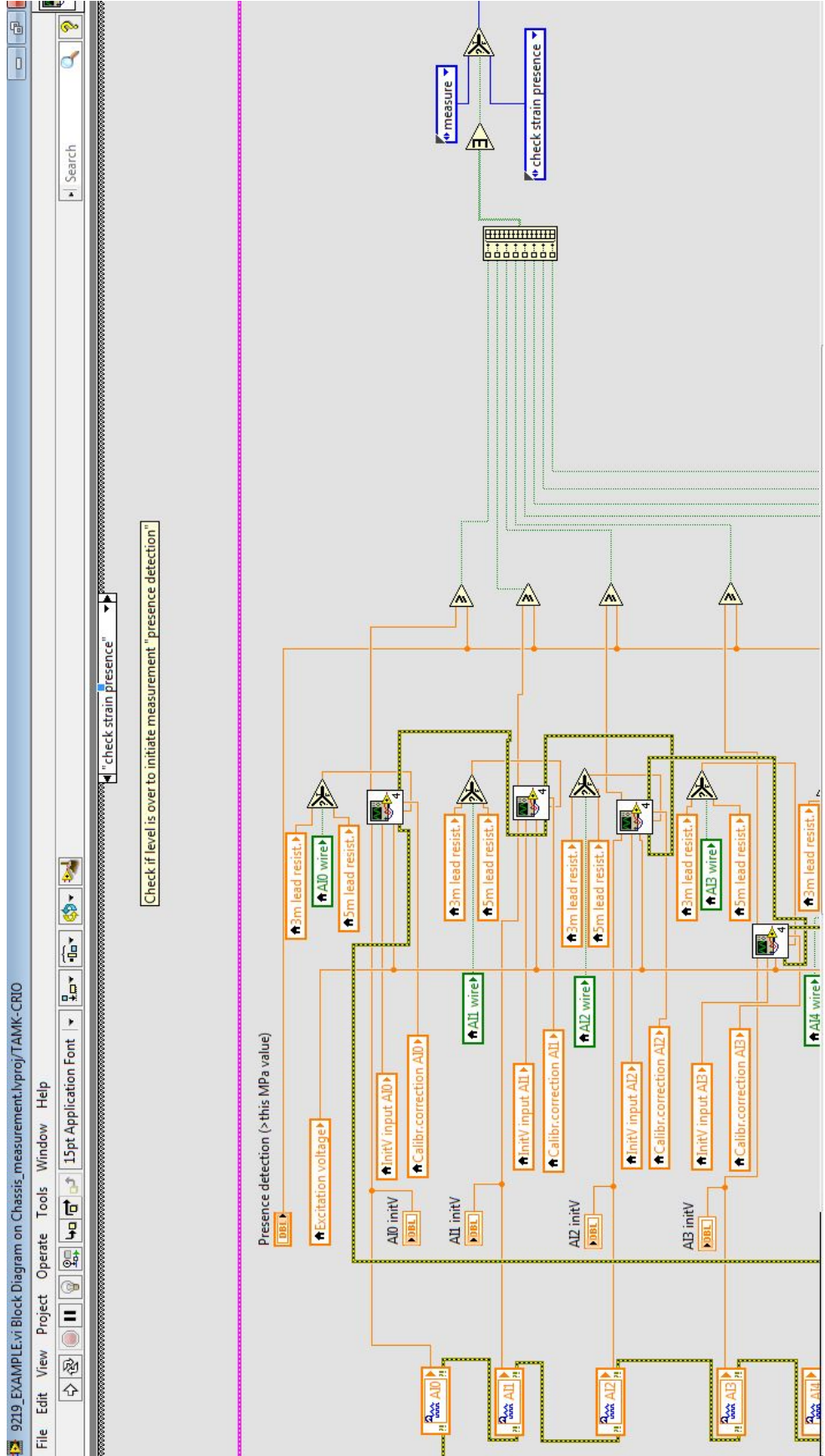
Liite 1. Mittausperävaunun V52-T0 mittapiirustus sekä venymäliuskojen sijainnit



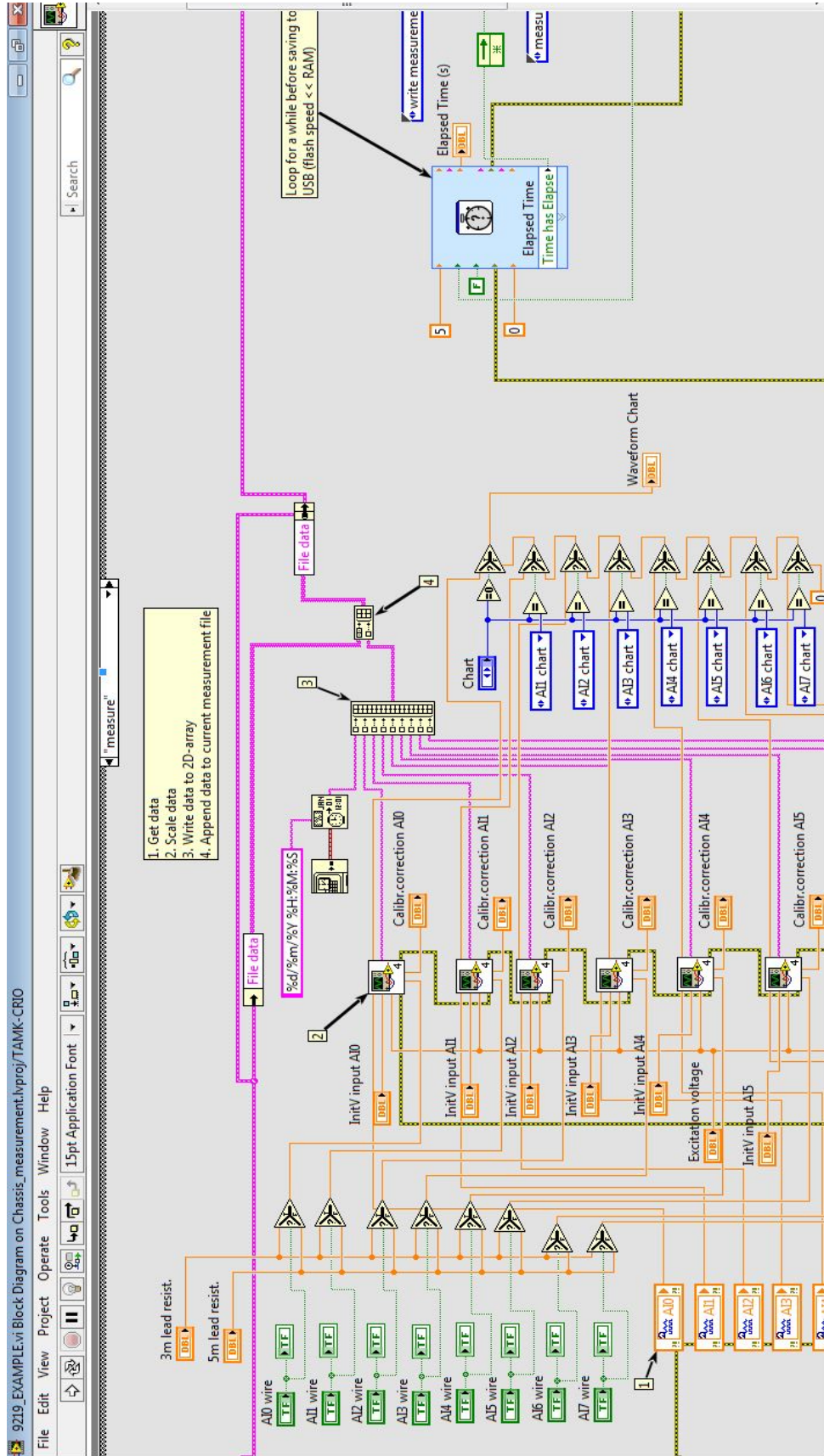
Liite 2. Venymäliuskamittausta varten rakennetun Labview-ohjelmiston eri tilat 1(4)

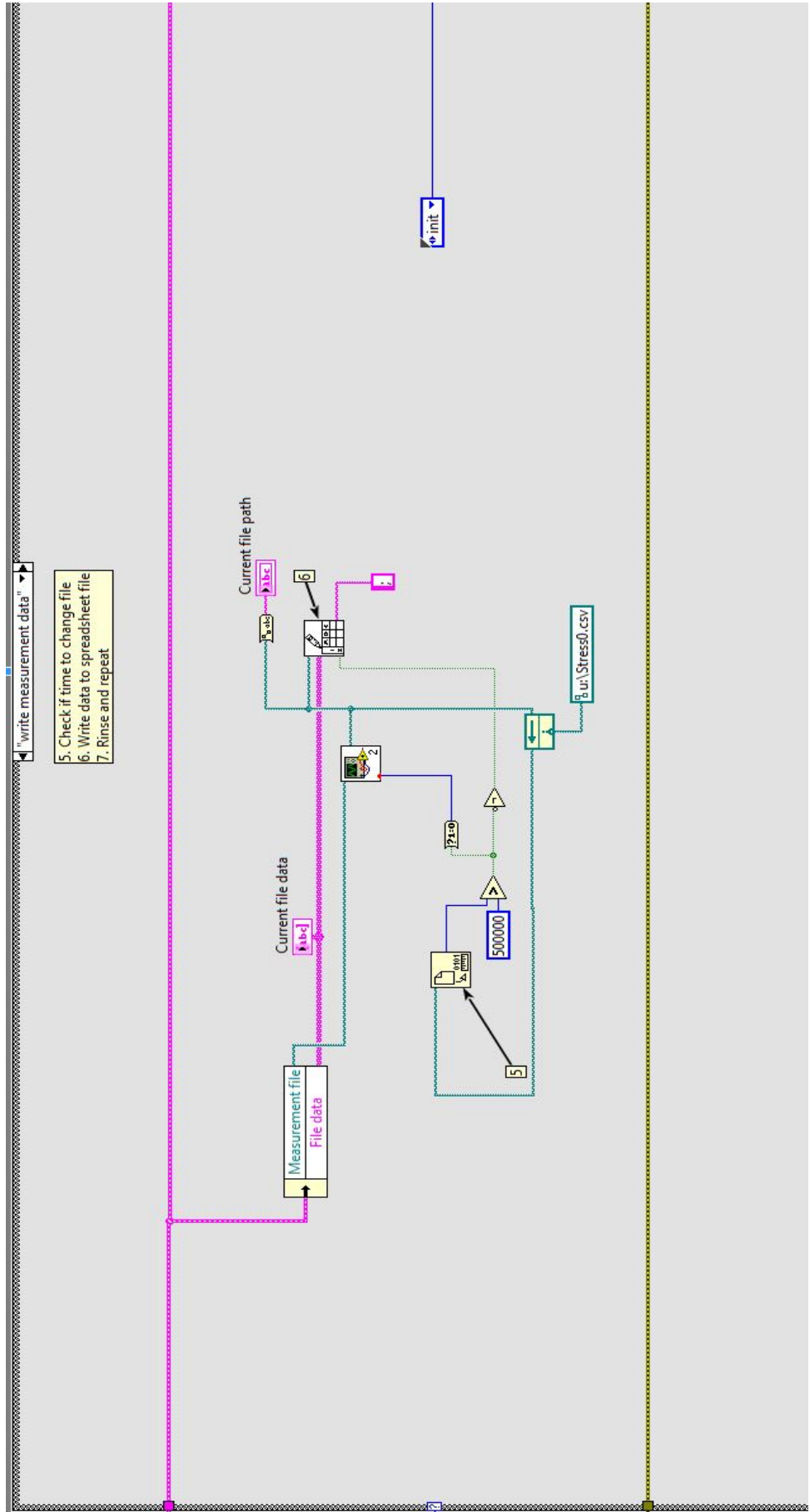


(jatkuu)



(jatkuu)





Venymäliuskat kytketty seuraavasti mittalaitteen mittakorttiin 9235:

-AI0 3 m johtimilla oleva 120 ohm neljännessilta oikean puolen takatelin etummaisen akselin kiinnityskorvan hitsaussauman etupuolella runkopalkin alalatan alapinnalla vaunun ajosuunnan suuntaisesti liuskan keskikohdan ollessa 12 mm hitsisauman etureunasta eteenpäin (vaunun ajosuuntaan). Alalatan keskikohdalla (75 mm molempiin suuntiin).

-AI1 3 m johtimilla oleva 120 ohm neljännessilta oikean puolen takatelin etummaisen akselin kiinnityskorvan hitsaussauman etupuolella runkopalkin alalatan alapinnalla vaunun ajosuunnan suuntaisesti liuskan keskikohdan ollessa 7,5 mm hitsisauman etureunasta eteenpäin (vaunun ajosuuntaan). Liuskojen AI0 ja AI1 ero sivusuunnassa (koh-tisuoraan vaunun ajosuuntaa) on 12 mm liuskan AI1 ollessa ulompana renkaan puolella. Liuskan AI0 asennus hieman vinossa vaunun ajosuuntaan nähden.

-AI2 5 m johtimilla oleva 120 ohm neljännessilta oikean puolen takatelin keskimmäisen akselin kiinnityskorvan hitsaussauman etupuolella runkopalkin alalatan alapinnalla vaunun ajosuunnan suuntaisesti liuskan keskikohdan ollessa 7,5 mm hitsisauman etureunasta eteenpäin (vaunun ajosuuntaan). Sivusuunnassa sijaintia ei päästy tarkasti määrittämään ahtaan sijainnin vuoksi.

-AI3 5 m johtimilla oleva 120 ohm neljännessilta vasemman puolen takatelin etummaisen akselin kiinnityskorvan hitsaussauman etupuolella runkopalkin alalatan alapinnalla vaunun ajosuunnan suuntaisesti liuskan keskikohdan ollessa 7,5 mm hitsisauman etureunasta eteenpäin (vaunun ajosuuntaan). Sivusuunnassa 68 mm alalatan sisäreunasta ulos renkaaseen päin (75 mm ollessa keskilinja).

(jatkuu)

-AI4 3 m johtimilla oleva 120 ohm neljännessilta oikean puolen runkopalkin ylälatan alapinnalla vaunun ajosuunnan suuntaisesti liuskan keskikohdan ollessa juuri vaunun kaulaosuuden suoristumiskohdasta eteenpäin (vaunun ajosuuntaan) keulan matalan pokkauksen kohdalla kääntökehän keskeltä noin 1320 mm taaksepäin vaunun ajosuunnassa. Sivusuunnassa asennus liuskan keskikohdan ollessa 61 mm runkopalkin alalatan sisäisivusta ulospäin renkaan puolelle. Runkopalkin alalatan leveys tässä kohdalla 190 mm uumalevyn ollessa 112 mm:n etäisyydellä alalatan ulkoreunasta sisäänpäin.

-AI5 3 m johtimilla oleva 120 ohm neljännessilta oikean puolen runkopalkin alalatan yläpinnalla vaunun ajosuunnan suuntaisesti liuskan keskikohdan ollessa juuri vaunun kaulaosuuden suoristumiskohdasta eteenpäin (vaunun ajosuuntaan) keulan matalan pokkauksen kohdalla kääntökehän keskeltä noin 1320 mm taaksepäin vaunun ajosuunnassa. Sivusuunnassa asennus liuskan keskikohdan ollessa 61 mm runkopalkin alalatan sisäisivusta ulospäin renkaan puolelle. Runkopalkin alalatan leveys tässä kohdalla 190 mm uumalevyn ollessa 112 mm:n etäisyydellä alalatan ulkoreunasta sisäänpäin. Liuskojen AI4 ja AI5 välinen pystysuuntainen etäisyys 146 mm, yläpuolella ylälatan paksuus 10 mm ja alapuolella alalatan paksuus 12 mm.

Liite 4. Mittauksen aikana täytetty pöytäkirja

Venymäliuskamittaukset V52-T0, P. Saarinen

Liite

Sivu:

Pvm	Klo	Kuormaus? (osa/X)	Purkaus? (X)	Perävaunun massa (kg)
19.9.2014	09.19	20.30		
	11.37		12,05	46,5 ton
	13.30			
	16.28		16,38	47,2 ton
	19.00	19,35		
	21.16		21,20	47,7 t
	22.45	23,57		
20.9.14	00.65		00,20	42 t
	02.50	08,20		
	04.25		04,45	44,4 t
	05.40	06,10		
	07.40		08,05	45,4 t
	09.07	09,46		
	10.48		11,06	46,1 t
	12.11	12,52		
	13.52		14,15	46,2 t
	15.58	16,38		
	17.30	18,55	17,55	45,3 t
22.09.2014	05.09	05,35		
	07.25		07,40	44,6 t
	17.05	17,45		
	18.20		18,45	47,2 t
	20.40	21,20		
	22.20		22,40	46,2 t
	23.45	00,30	23,40	
23.9	01.40		01,55	46,3 t
	03.05	03,45	0	
	04.45		05,00	43,1 t
	07.35	08,45	47,54	43,6 t
	11.04		13,08	47,5 t
	16.00	16,45		
	18.27		18,45	48,2 t

KILOMETRI
ALIJÄSA
12233
109115

JYKI
JYKI GROUP