

Juha Stenberg

# Puunkuorimakoneen terärungon 1-ruuviliitoksen kuormituskokeet

Metropolia Ammattikorkeakoulu  
Insinööri (AMK)  
Tuotesuunnittelu  
Insinööri työ  
17.4.2012

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Juha Stenberg Puunkuorimakoneen terärungon 1-ruuviliitoksen kuormitus- kokeet 78 sivua + 3 liitettä 17.4.2012
Tutkinto	Insinööri
Koulutusohjelma	Kone- ja tuotantotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Tuotesuunnittelu
Ohjaajat	Emeritusyliopettaja Aarno Ranta Yliopettaja Jyrki Kullaa
<p>Insinööriyössä selvitettiin, millä impulssimomentin arvolla rotaatiopuunkuorimakoneen M36*4-ruuvilla kiinnitetyn terärungon ja terälaipan välinen kitkaliitos luistaa.</p> <p>Käytössä oli kaksi eri terälaipan tyyppiä, joissa toisessa on tasomainen ja toisessa kovera otsapinta. M36*4-ruuvissa ja terälaipan ruuvireiässä esiintyvien jännitysten mittausten lisäksi ruuville haluttiin löytää sopiva kiristysmomentti. Mittaus tehtiin venymäliuskamittauksena. Kitkaliitoksen kiertymän mittaukseen käytettiin laseria. Kitkaliitosta kuormitettiin iskemällä heilurivasaralla terärungon kärkeen.</p> <p>Kokeiden aikana ilmeni, että terärungon koneistetuissa pinnoissa oli työstövirhe, joka aiheutti ruuvissa suurta taipumaa.</p> <p>Kokeiden tulosten perusteella koveralla terälaipalla saadaan tasaista terälaippaa parempi impulssimomentin sietokyky. Ruuvia avaavaan ja kiristävään suuntaan tehtyjen iskujen perusteella kitkaliitoksen pitävyyttä voidaan kasvattaa esimerkiksi M36*4-ruuvien kierteen kätisyyttä vaihtamalla.</p> <p>Tasaisen terälaipan pinnalla esiintynyt epäjatkuvuuskohta on saattanut vaikuttaa liitoksen impulssimomentin sietokykyyn heikentävästi.</p>	
Avainsanat	Kuorimakone, puunkuorimakone, venymäliuska, ruuviliitos, Wheatstone-silta, kitkaliitos

Author Title	Juha Stenberg Bolt Joint Impact Tests of a Rotor Debarker
Number of Pages Date	78 pages + 3 appendices 17 April 2012
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Mechanical and Production Engineering
Specialisation option	Product Design
Instructors	Aarno Ranta, Principal Lecturer Emeritus Jyrki Kullaa, Principal Lecturer
<p>The objective of the Bachelor's thesis was to research the behavior of the rotor debarker's M36*4 bolt joint under impacts. M36*4 bolt is used to fasten a tool arm to a flange of a tool shaft. The impacts were generated by hitting the tip of the tool arm with a large pendulum in a counterclockwise and clockwise direction.</p> <p>The tests were carried out with two different flanges: one with a planar and one with a concave surface. Strain gages were used on the M36*4 bolt and on a tool arm to measure stresses during the impacts. A small laser was used to detect any rotation between the flange and the tool arm.</p> <p>The results revealed that the flange with a concave surface had a better tolerance against impacts. The impacts made clockwise increased the joint tolerance also since the remaining torque of the M36*4 bolt, after it had been tightened, had a tendency to rotate tool arm counterclockwise.</p> <p>The irregularity found on a planar surfaced flange may have reduced its tolerance against impacts.</p>	
Keywords	Wheatstone Bridge, Debarker, Strain Gage, Bolt Joint

## Sisällys

<b>1 Johdanto</b>	3
<b>2 Työn lähtökohtia</b>	4
2.1 Roottorikuorimakone	4
2.2 Kitkaruuviliitoksen osat	6
<b>3 Venymäliuskamittaus</b>	9
3.1 Venymäliuska	9
3.1.1 Liuskatyytit	9
3.1.2 Folioliuskan toimintaperiaate	10
3.1.3 Liuskan valinta	12
3.2 Wheatstone-silta	13
<b>4 Mittausjärjestelmän suunnittelu ja valmistelut</b>	16
4.1 Venymäliuskojen kiinnitys- ja kytkentäsuunnitelma	16
4.2 Mittausjärjestelmän suunnittelu	20
4.2.1 M36*4-ruuvi	22
4.2.2 Terärunko	23
4.2.3 Terälaipat	24
4.2.4 Testauskehän kokoonpano	24
<b>5 Venymäliuskojen asennus</b>	26
5.1 Ruuvi	26
5.2 Terärunko	32
5.3 Täydennyssiltapalkki	35
<b>6 Kokoonpano</b>	37
6.1 Testauskehä	37
6.2 Mittauslaitteisto	40

<b>7</b>	<b>Mittaukset</b>	46
7.1	Ruuvi 1	46
7.2	Ruuvi 2	53
7.2.1	Iskut tasaisella terälaipalla ruuvia avaavaan suuntaan	57
7.2.2	Iskut tasaisella terälaipalla ruuvia kiristävään suuntaan	61
7.2.3	Iskut koveralla terälaipalla ruuvia avaavaan suuntaan	63
7.2.4	Iskut koveralla terälaipalla ruuvia kiristävään suuntaan	65
<b>8</b>	<b>Jälkikäsittely</b>	66
8.1	Datan esikäsittely	66
8.2	Laskukaavat	69
<b>9</b>	<b>Tulokset</b>	74
<b>10</b>	<b>Yhteenveto</b>	75
	<b>Lähteet</b>	78

## **Liitteet**

Liite 1. Ruuvin, terärungon ja testauskehän osien piirustukset

Liite 2. Ruuvin 1 kiristyskäyrät ennen terärungon korjausta

Liite 3. Numeeriset tulokset

## 1 Johdanto

Tämän insinööriyön tarkoituksena on selvittää Valon Koneen rakentaman Super-rotatiokuorimakoneen VK480S-7 terärungon 1-ruuviliitoksen käyttäytymistä iskumais-ten kuormitusten alaisena. Kyseistä konetta on rakennettu vain yksi kappale. Koeko-noon osia käytetään insinööriyön mittauskohteina.

Työssä tarkasteltiin ensisijaisesti sitä, millä iskuenergialla M36\*4-ruuvilla kiinnitetyn terärungon ja terälaipan välinen kitkaliitos alkaa luistaa. Kokeet tehtiin sekä tasaisella että koveralla terälaipalla. Tarkoituksena oli myös selvittää se, onko terälaippojen kitka-liitosten välillä eroa. Lisäksi ruuville haluttiin löytää sopiva kiristysmomentti ja mitata ruuviin syntyvät rasitukset iskujen yhteydessä. Kokeissa mitattiin myös terärungon ruu-vireiän tangentin suuntaisia jännityksiä.

Työ suoritettiin Metropolia Ammattikorkeakoulun energialaboratorion tiloissa. Mittaus tehtiin venymäliuskamittauksena. Laseria käytettiin terärungon ja terälaipan välisen kitkaliitoksen kiertymän mittaamiseen.

Työhön kuului mittausten lisäksi testauskokoontalon suunnittelu ja venymäliuska-teorian opiskelu. Mittauksia varten tehtiin Linux-pohjainen ohjelma venymäliuskamittausten tallentamiseksi osana Pasi Yrjölän insinööriyötä.

## 2 Työn lähtökohtia

Vuonna 1949 perustettu Valon Kone Oy on Lohjalla toimiva pk-yritys, joka on keskittynyt roottorikuorimakoneiden valmistukseen. Yritykseltä löytyy yli 30 kuorimakonemallia, joita on toimitettu 50 vuoden aikana yli 6000 kappaletta noin kahdeksaankymmeneen maahan. Valon Koneella on toimipaikkoja useassa maassa ympäri maailman.

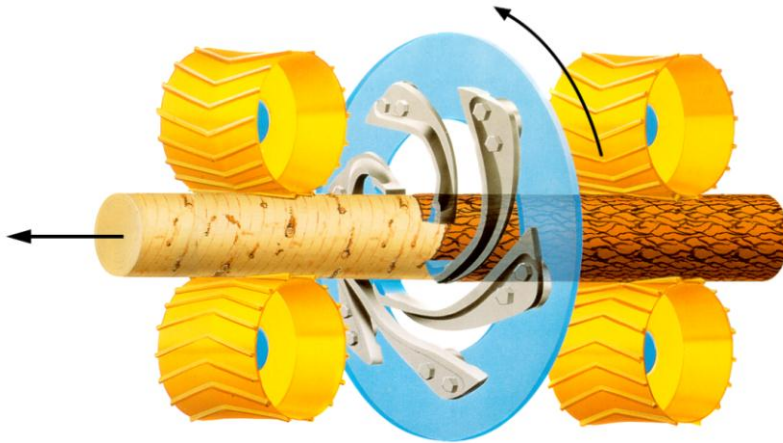
### 2.1 Roottorikuorimakone

Roottorikuorimakoneessa (kuvio 1) valssit kuljettavat puunrunkoa kuorintalinjalla eteenpäin, samalla kun roottoriin kiinnitetyt kuorintaterät kuorivat puuta pyörimällä suurella nopeudella puunrungon ympäri. Terien puunrunkoon kohdistamaa kuorintapainetta voidaan säätää kuoren kovuuden ja paksuuden sekä olosuhteiden mukaan.



Kuvio 1. Yksiroottorinen VK5068-kuorimakone [1].

Valon Koneen rotaatiokuorintakoneiden modulaarinen rakenne mahdollistaa nopean roottorin vaihdon muun muassa terien huoltotilanteessa. Koneita toimitetaan myös kaksiroottorisena (kaksi vastakkaisiin suuntiin pyörivää roottoria), jolloin saadaan parempi kuorintajälki. Lisävarusteena toimitetaan kuorintaroottorin (-roottorien) eteen asennettava redusointiroottori. Sen tarkoituksena on leikata suurten tukkien tyvilaajentumat pois. Kuviossa 2 näkyy yksimoduulisen roottorikuorimakoneen toimintaperiaate.



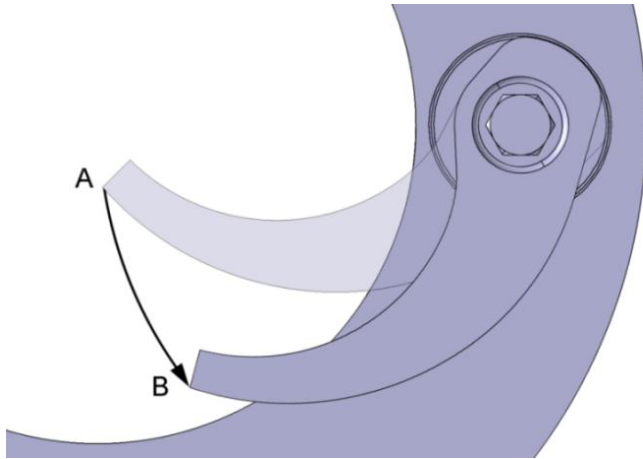
Kuvio 2. Yksimoduulisen roottorikuorimakoneen toimintaperiaate [1].

Terärunkoon syntyvät rasitukset ovat peräisin kahdesta erilaisesta kuormitusvaiheesta:

1. Terän päälleenousu. Terärungon kovera sisäreuna törmää tukkiin. Iskusta syntyy nousulovi, jota myöten terärunko liukuu puun pinnalle.
2. Terän kärki (teräpala) osuu puun epäjatkuvuuskohtaan (oksa tai muu sellainen).

Terien päälleenoususta aiheutuvia rasituksia voidaan vähentää, jos kuorinnassa olevat peräkkäiset tukit ajetaan päistään toisiinsa kiinni. Tällöin terät pääsevät siirtymään helposti rungolta toiselle.

Päälleenousussa terärunko kiertyy auki kohdasta A kohtaan B (kuvio 3) nousuloven ja roottorin pyörimisliikkeen yhteisvaikutuksesta. Teräpesä on kiinni jousimekanismissa, joka pitää terän asennossa A silloin, kun puuta ei kuorita.

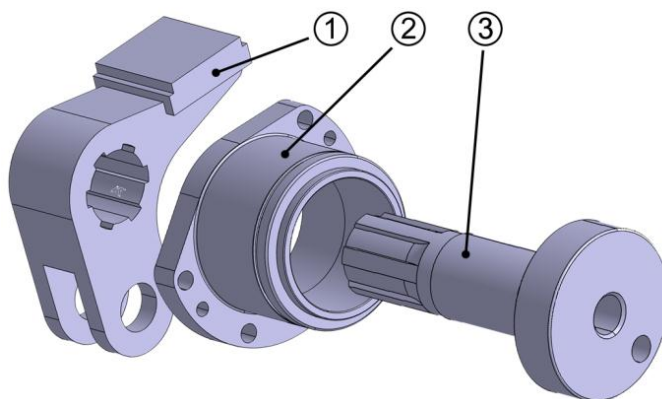


Kuvio 3. Terärungon liike terän noustessa kuorittavalle pinnalle. Puunrunгон liike on katsojaan päin.

Tapahtuma on hyvin nopea, ja sen aikana terärunkoon kohdistuu voimakas impulssimomentti. Tässä työssä pyritään selvittämään, millä impulssimomentilla terärungon ja terälaipan välinen kitkaliitos alkaa luistaa ja onko kahden terälaippamallin välillä (tasopinta ja kovera pinta) eroa kitkaliitoksen kiinnipysyvyyden kannalta.

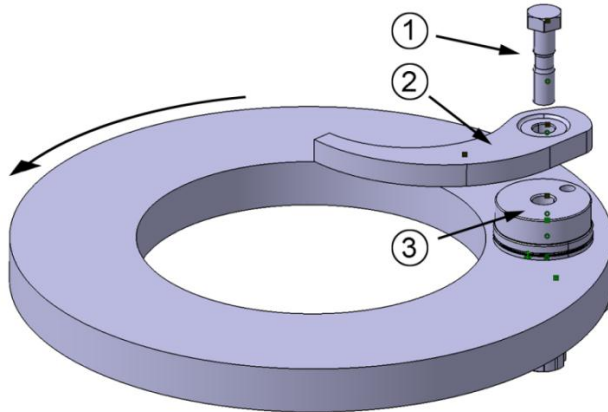
## 2.2 Kitkaruuviliitoksen osat

Tässä työssä käytetyssä kitkaruuviliitoksessa käytetään M36\*4-ruuvia, jolla terärunko kiinnitetään teräpesässä (kuvio 4) olevan teräkselin laippaan.



Kuvio 4. Teräpesän kokoonpano. 1. kampi, 2. terälaakeripesä ja 3. teräkseli, jonka päässä terälaippa.

Liitokseen kuuluu myös leikkaustappi, jonka tarkoituksena on estää liitoksen kiertyminen. Leikkaustappia ei käytetä kokeiden aikana. Kuviosta 5 selviää ruuvin, terärungon ja teräpesän kokoonpano roottorissa, johon on mallinnettu yksi kuorintaterän kokoonpano.



Kuvio 5. Roottorin kokoonpano. Vasemmalla oleva nuoli osoittaa roottorin pyörimissuunnan. 1. M36\*4-ruuvi, 2. terärunko (nousua ei mallinnettu) ja 3. teräpesässä kiinni oleva teräakselin laippa. Laipan reunassa oleva pienempi reikä on leikkaustapille, jota ei käytetä työn aikana.

Työnohjaajalta saatiin opastusta käytettävien venymäliuskojen määristä sekä tyypeistä. Suunnitelman mukaan ruuvin (kuvio 6) ohennuksen kohdalle tulee kaksi yksihilaista liuskaa ja kaksi kolmehilaista rusettiliuskaa. Ruuvin materiaalina on 34CrNiMo6.



Kuvio 6. Kokeissa käytettävä M36\*4-ruuvi.

Terärungon ruuvireikään on tarkoitus kiinnittää kolme yksihilaista luiskaa, joilla mitataan ruuvireiän pinnan tangentin suuntaisia venymiä. Terärunko näkyy kuviossa 7, josta voidaan myös havaita terärungon alapinnan nousu.



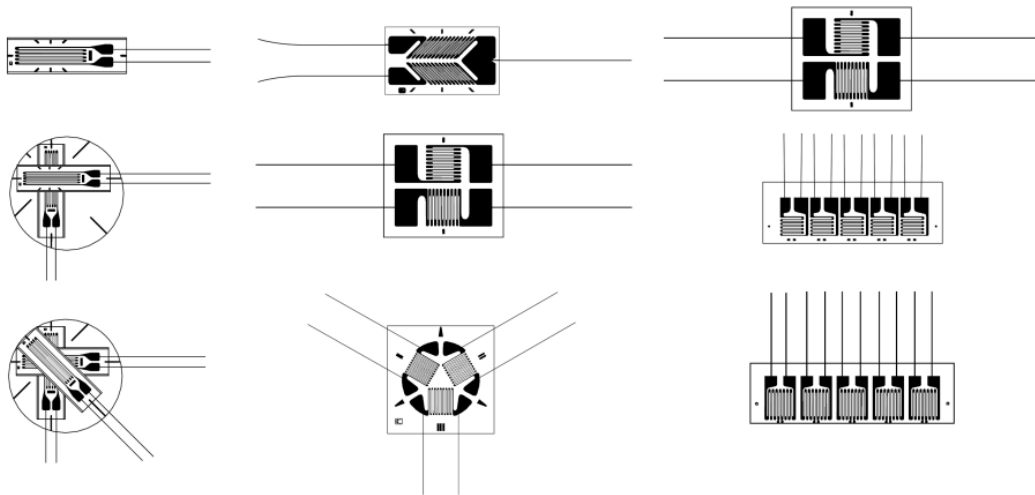
Kuvio 7. Terärunko.

### 3 Venymäliuskamittaus

#### 3.1 Venymäliuska

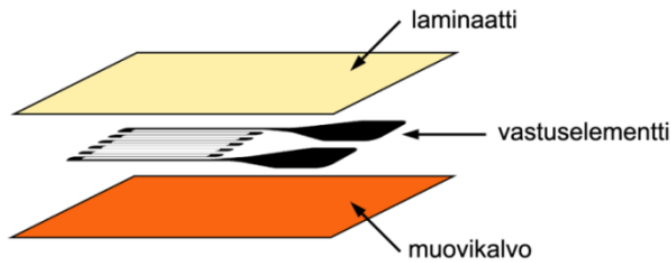
##### 3.1.1 Liuskatyytit

Venymäliuska on pitkä, ohut vastus jolla mitataan kappaleen pinnalla esiintyviä venymiä ja sitä kautta kappaleeseen kohdistuvia rasituksia. Vastuksena toimii liuskan tyyppistä riippuen joko foliokalvo, lanka tai puolijohde. Tässä työssä käytetään Kyowan yleiskäyttöön tarkoitettuja KFG-folioliuskoja (kuvio 8).



Kuvio 8. Folioliuskatyyppejä. Liuskat vasemmalla pystyrivillä ylhäältä alas lueteltuna: yksihilainen liuska, kaksihilainen 90° rusettiliuska, kolmihilainen 45° rusettiliuska. Alarivin keskellä on 120° rusetti.

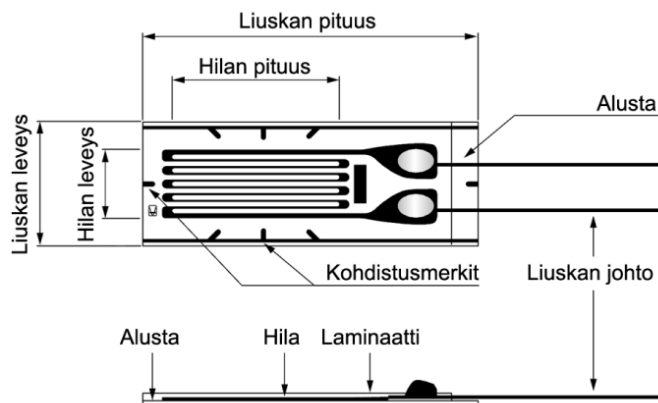
Venymäliuska valmistetaan kiinnittämällä muutaman mikrometrin paksuinen Cu-Ni-folio joustavalle ja sähköä eristävälle, noin 15  $\mu\text{m}$  paksulle kalvolle (kuvio 8). Liuskan vastuksena toimiva hila syövytetään Cu-Ni-folioon etsaamalla. Hilan päälle tulee ohut suojaava, muutaman  $\mu\text{m}$ :n paksuinen filmi. Kuviosta 9 voidaan nähdä valmiin venymäliuskan osien pääkomponentit.



Kuvio 9. Venymäliuskan pääkomponentit [3].

Yksihilaiset liuskat soveltuvat yksinkertaisten venymätilojen (yhdensuuntainen veto tai puristus) mittauksiin. Rusettiliuskoja, joita on saatavana kaksi- ja kolmihilaisina, käytetään tasojännitystilojen mittauksissa. Hilat sijaitsevat ruseteissa 45, 90 tai 120 asteen kulmassa toisiinsa nähden rusetin tyypistä riippuen.

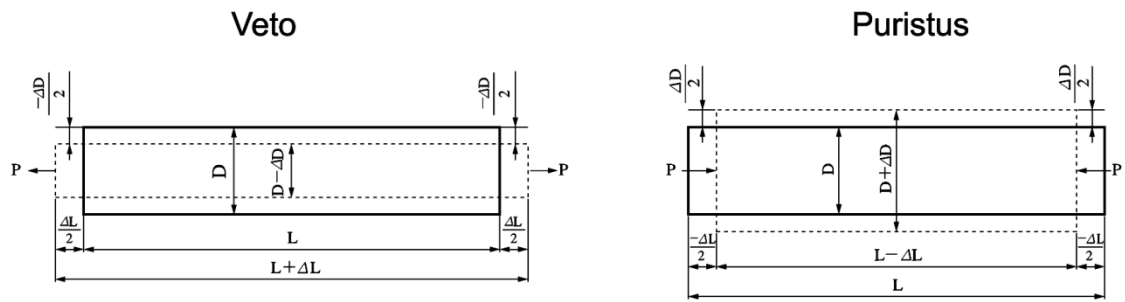
Liuskoja on saatavana vastusarvoilla 60  $\Omega$ , 120  $\Omega$ , 350  $\Omega$ , 500  $\Omega$  ja 1000  $\Omega$ . Yleisin käytetty vastusarvo on 120  $\Omega$ . Kuviosta 10 voidaan nähdä venymäliuskan osien nimet.



Kuvio 10. Venymäliuskan osien nimet [2].

### 3.1.2 Folioliuskan toimintaperiaate

Folioliuskan toiminta perustuu hilan vastusarvon pieniin muutoksiin liuskan pituuden muuttuessa. Kun liuskan vastus venyy  $\Delta L$ :n verran, pienenee vastaavasti sen leveys  $-\Delta D$ :n verran (kuvio 11) jolloin vastuksen poikkipinta-ala pienenee.



Kuvio 11. Vastuksen käyttäytyminen vedon ja puristuksen alaisena [2].

Venymäliuskamittauksessa käytettävän suhteellisen venymän suuremerkki on  $\varepsilon$  (strain). Kyseessä on paljas luku, joka ilmoittaa kappaleen pituuden muutoksen suhteessa kappaleen alkuperäiseen pituuteen. Tässä työssä käytetään merkintää  $\mu\varepsilon$  (mikrostrain), jolla tarkoitetaan kerrointa  $10^{-6}$ .

Kun vastusta venytetään, siihen syntyy venymä

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta L}{L}$$

$\Delta L$  on pituuden muutos

$L$  on alkuperäinen pituus

Vastuksen poikittaiseksi venymäksi eli kokoonpuristumaksi saadaan

$$\varepsilon_2 = \frac{-\Delta D}{D}$$

$\Delta D$  on poikittaismitan muutos

$D$  on alkuperäinen poikittaismitta

Poissonin luku  $\nu$  (Nu) ilmaisee suhteen poikittaisen ja pitkittäisen venymän välillä

$$\nu = \left| \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \right|$$

Vastuksen poikkileikkauspinta-alan muutokseksi saadaan

$$\frac{\Delta A}{A} = -2\nu \frac{\Delta L}{L}$$

$\Delta A$  on poikkileikkauspinta-alan muutos

$A$  on alkuperäinen poikkileikkauspinta-ala

Kun venymän lisäksi tiedetään mitattavan materiaalin kimmomoduuli  $E$ , saadaan jännitys  $\sigma$  Hooken lain mukaan

$$\sigma = E\varepsilon$$

Hooken laki on voimassa mitattavan materiaalin elastisella alueella. Mikäli myötöraja ylitetään, jää mitattavaan kappaleeseen pysyvä muodonmuutos, kun kuormittava voima poistetaan. KFG-liuskojen maksimivenymä on 3 ... 5 % (30 000 ... 50 000  $\mu\varepsilon$ ) jonka ylitys vioittaa liuskan käyttökelttomaksi.

Liuskavakio  $k$  määrittää venymäliuskan herkkyden. Liuskavakio saadaan yhtälöstä

$$k = \frac{\frac{\Delta\rho}{\rho}}{\frac{\Delta L}{L}} + 1 + 2\nu$$

$\Delta\rho$  on vastusmateriaalin ominaisresistanssin muutos

$\rho$  on vastusmateriaalin ominaisresistanssi

Folioliuskoilla  $k=2,0 \dots 2,2$ . Liuskan vastuksen suhteelliseen muutokseen vaikuttavat sekä liuskavakio että venymä:

$$\frac{\Delta R}{R} = k\varepsilon$$

### 3.1.3 Liuskan valinta

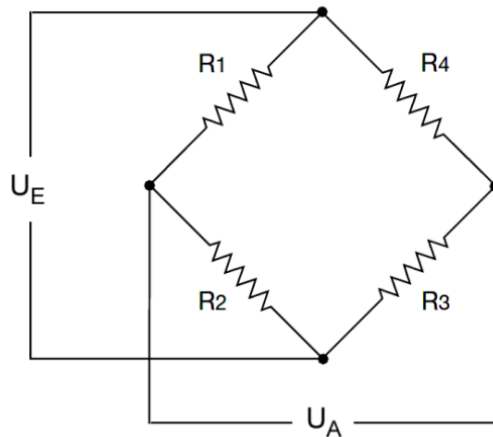
Folioliuskoja on saatavana lämpökompensoituna eri materiaaleille ja olosuhteisiin. Liuskaa valittaessa on tiedettävä mitattavan kohteen materiaali, jotta voidaan valita liuska, jolla on sama lämpölaajenemiskerroin. Tässä työssä käytettyjen Kyowan KFG-liuskojen käyttölämpötila-alue on  $-196 \text{ }^\circ\text{C} \dots 150 \text{ }^\circ\text{C}$ . Liuskan käyttölämpötila-alueeseen vaikuttaa liuskan lisäksi sen kiinnitykseen käytetyn liiman tyyppi.

Lisäksi on selvitettävä mittausalueen koko liuskan kiinnitystä ja mittausjohtojen vetoa varten ja mitattavaan kappaleeseen kohdistuvat rasitukset, jotta voidaan valita oikean kokoinen ja tyyppinen liuska.

Tässä työssä käytetään  $350 \text{ } \Omega$ :n yksihilaisia KFG-5-350-C1-11-liuskoja ja KFG-2-350-D17-11-rusettiliuskoja.

### 3.2 Wheatstone-silta

Wheatstone-silta on virtapiiri, jota käytetään venymäliuskoissa esiintyvien pienten vastusarvojen muutosten havainnointiin. Sillassa kaksi sarjaan kytkettyä vastusta on kytkettynä rinnan toisen, kahden sarjaan kytketyn vastuksen kanssa. Sillasta ulostuleva jännite luetaan kytkemällä navat molempien, sarjaan kytkettyjen vastusparien väliin (kuvio 12).



Kuvio 12. Wheatstone-silta.  $U_E$  on siltaan syötettävä jännite,  $U_A$  sillasta ulostuleva jännite. Sarjaan kytketyt vastukset  $R_1$  ja  $R_2$  kytketään rinnan sarjaan kytkettyjen vastusten  $R_3$  ja  $R_4$  kanssa.

Silltaan voidaan kytkeä venymäliuskoja kolmella eri tavalla:

- $\frac{1}{4}$ -silta (neljännessilta)
- $\frac{1}{2}$ -silta (puolisilta)
- $1/1$ -silta (kokosilta)

Neljännessillassa on yksi mittaava venymäliuska, puolisillassa kaksi. Kokosillassa käytetään neljää mittaavaa liuskaa.

Kirchhoffin II lain mukaan

$$U_E = I_A(R_1 + R_2) = I_B(R_3 + R_4)$$

$I_A$  on vastusten  $R_1$  ja  $R_2$  kautta kulkeva sähkövirta

$I_B$  on vastusten  $R_4$  ja  $R_3$  kautta kulkeva sähkövirta

Sillasta mitattava jännite (output)

$$U_A = I_B R_3 - I_A R_2$$

Yhdistetään kaavat ja ratkaistaan  $U_A$ :n suhteen

$$U_A = U_E \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}$$

$U_E$  on siltaan syötettävä jännite

Merkitään vastusmuutoksia  $\Delta R_i$ , kun  $i = 1 \dots 4$

$$U_A = U_E \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2} \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right)$$

Silta on tasapainossa eli  $U_A = 0$  kun

$$R_1 R_3 = R_2 R_4$$

Neljännessillat on täydennettävä kolmella ja puolisillat kahdella vastuksella. Vastuksina voidaan käyttää joko tarkkuusvastuksia tai venymäliuskoja. Venymäliuskoja täydennysvastuksina käytettäessä ne on liimattava kiinni kuormittamattomaan kappaleeseen joka on samaa materiaalia ja samassa lämpötilassa kuin mitattava kohde. Mikäli käytössä on venymäliuskamittaukseen tarkoitettu mittaustilasto, ovat sillan täydennysvastukset siinä yleensä sisäänrakennettuina.

Kun silta on kuormittamattomassa tilassa ja kaikkien neljän vastusten arvot ovat yhtä suuret, on sillan ulostulojännite 0 voltia. Käytännössä näin ei kuitenkaan tapahdu venymäliuskojen asennusvirheiden, johtimien ja juotosten virheiden takia. Yleisesti ottaen voidaan olettaa, että sillasta ulostuleva jännite kuormittamattomassa tilassa on kymmenesosamillivolttien tai millivolttien luokkaa siltaa syötettävän jännitteen suuruudesta riippuen. Tulostenkäsittelyssä sillan kuormittamaton jännite eli nollajännite toimii referenssijännitteenä.

Mittauksen herkkyyttä voidaan parantaa mittaavien liuskojen määrää kasvattamalla. Paras herkkyys saavutetaan kokosillalla, jolloin sillasta saatava jännite on nelinkertainen neljännessillatarkentään verrattuna. Jos mittaussysteemissä vallitsevan kohinan aiheuttaman jännitteen amplitudin voidaan olettaa olevan vakio, on sen suhteellinen osuus kokosillan mittaussignaalista pienempi kuin neljännessillalla. Nykyiset venymä-

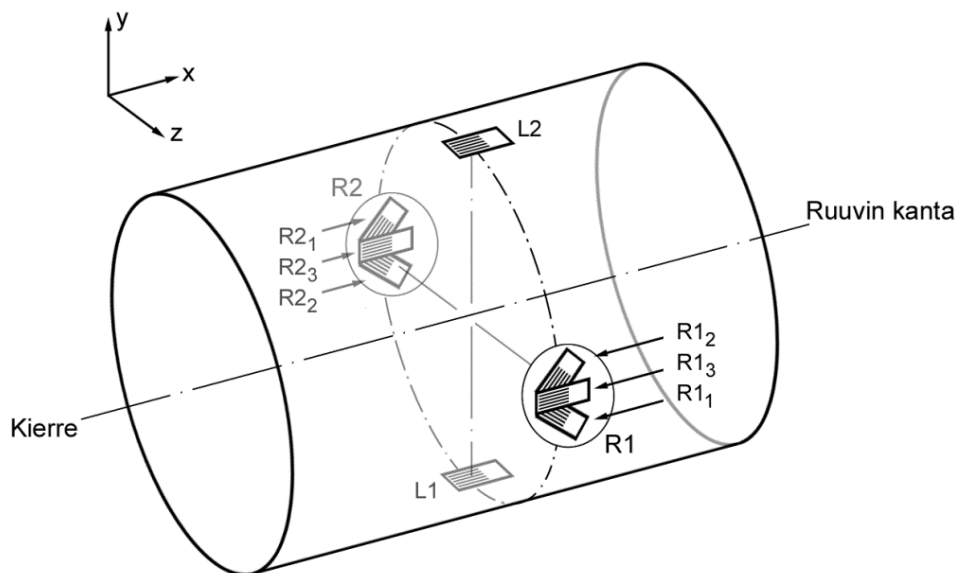
liuskat ovat joitakin poikkeuksia lukuun ottamatta SELCOM-tyyppisiä, lämpötilakompensoituja liuskoja [1, s. 13].

Suurin sallittu syöttöjännite 120  $\Omega$ :n liuskoille on 5 V ja 350  $\Omega$ :n liuskoille 14 V. Sillasta saatava ulostulojännite on suoraan verrannollinen siltaan syötettävän jännitteen suuruuteen, joten 350  $\Omega$ :n liuskoilla saadaan sillasta ulos 120  $\Omega$ :n liuskoja suurempi jännite. Tässä työssä käytettyjen 350  $\Omega$ :n liuskojen syöttöjännitteeksi valittiin 10 V.

## 4 Mittausjärjestelmän suunnittelu ja valmistelut

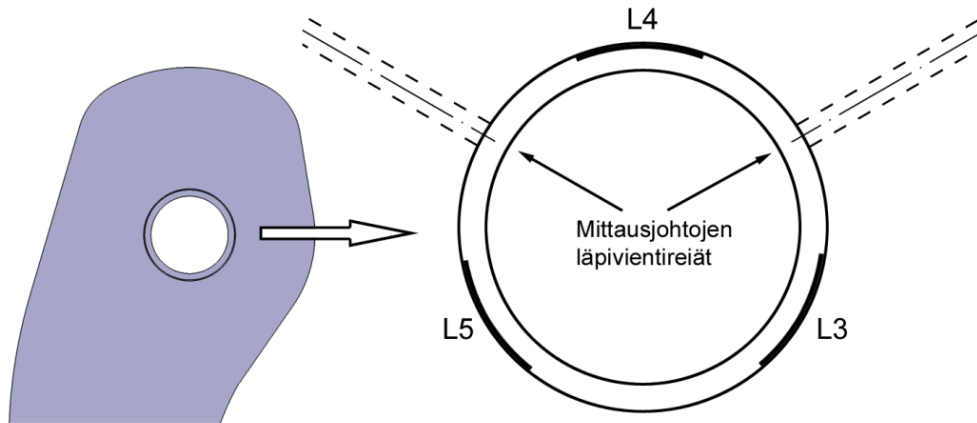
### 4.1 Venymäliuskojen kiinnitys- ja kytkentäsuunnitelma

M36\*4-ruuviin kiinnitettäville liuskoille tehtiin suunnitelma, jonka mukaan ruuvin vastakkaisille puolille, samaan tasoon tulisi kaksi kolmen hilan rusetta. Tämä on taso R1-R2. Toiseen tasoon, joka on kohtisuorassa tasoon R1-R2 nähden, tulisi kaksi yksihilais- ta liuskaa ruuvin vastakkaisille puolille. Tämä taso on L1-L2. Kuvio 13 nähdään suunnitelma ruuviin kiinnitettävistä liuskoista. Kuvaan merkityt alaindeksit toimivat ru- setissa olevien hilojen tunnisteenä.



Kuvio 13. Ruuviin kiinnitettävät liuskat.

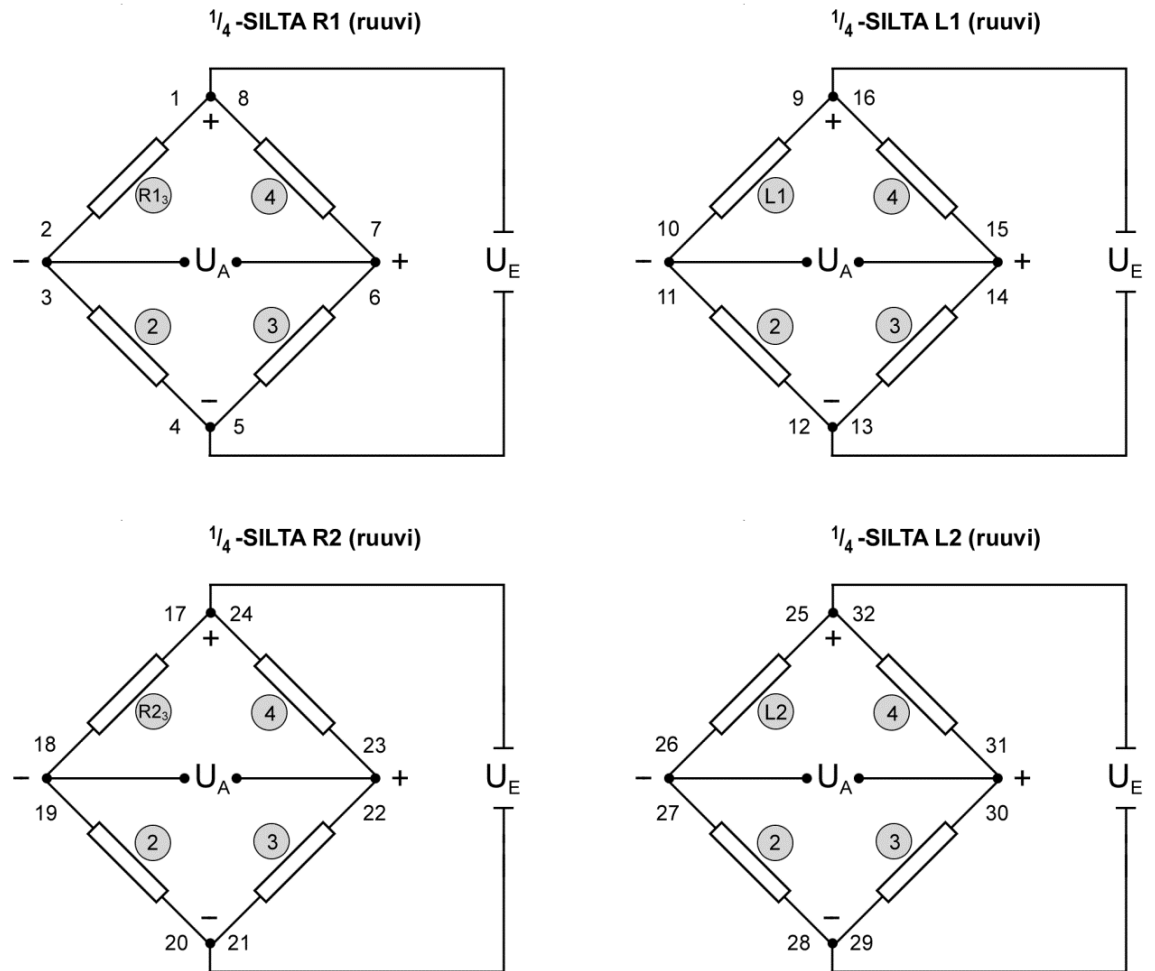
Terärungon ruuvireikään tehtävään uraan suunniteltiin kiinnitettäväksi kolme yksihilais- ta liuskaa 120 asteen välein, joilla mitataan reiän tangentin suuntaisia venymiä (kuvio 14). Liuskojen aseman terärungossa määrittäisi se, mihin kohtaan mittausjohtojen läpi- viennit terärungossa tehtäisiin.



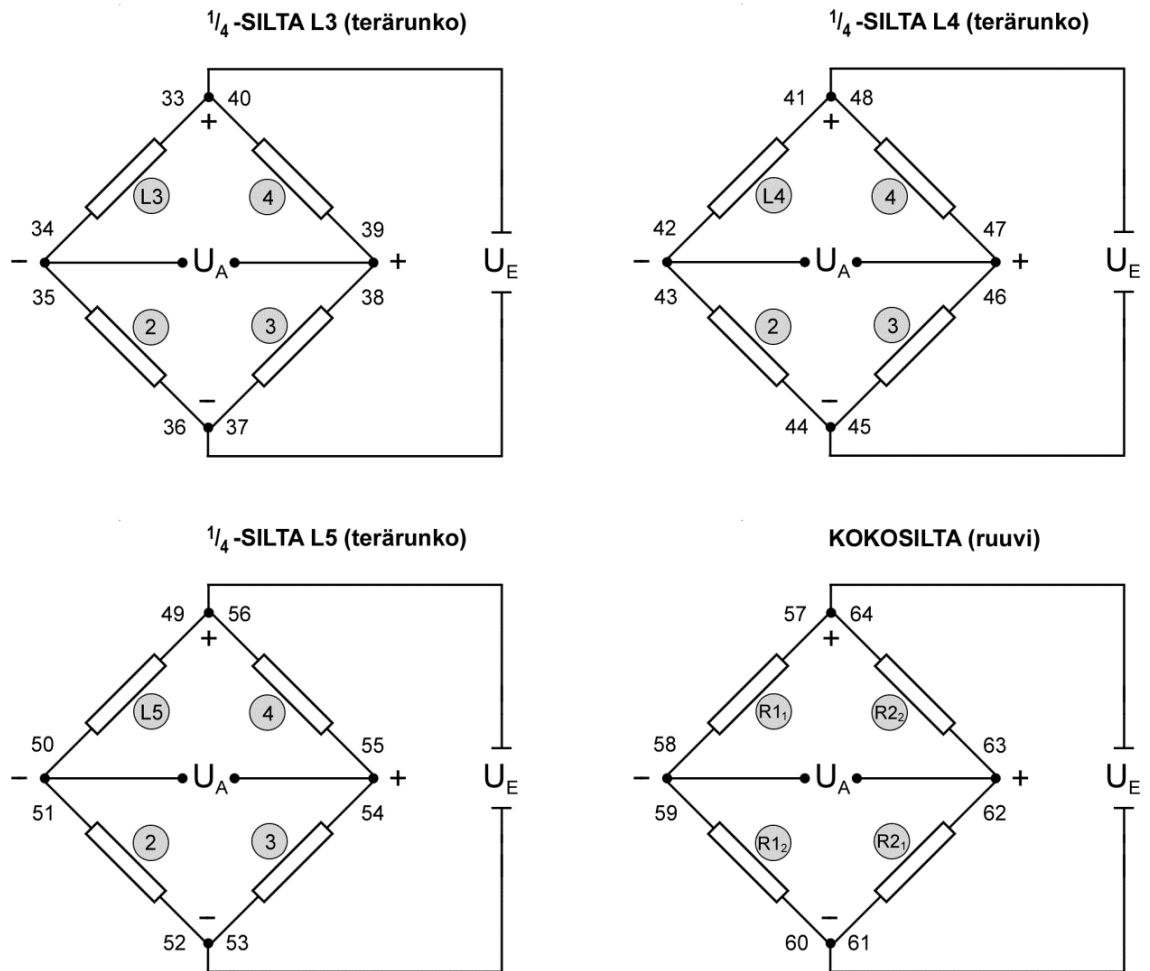
Kuvio 14. Terärungon ruuvireiän uraan kiinnitettävät liuskat. Terärungon kitkapinta osoittaa katsojaan päin.

Tämän jälkeen tehtiin suunnitelmat Wheatstone-siltakytkennöille. Suunnitelman mukaan neljännessiltoja tulisi olemaan seitsemän kappaletta ja kokosiltoja yksi. Kuvioissa 15 ja 16 harmaalla pohjalla olevat numerot ovat liuskojen tunnisteita. Numerot välillä 1 - 64 toimivat liuskoista lähtevien mittausjohtojen tunnisteina, joiden avulla johdot saadaan kytkettyä siltakytkentäsuunnitelman mukaisesti.  $U_E$  on siltaan syötettävä jännite ja  $U_A$  on sillan ulostulojännite.

Syöttö- ja lukujännitteen napaisuudet valittiin siten, että silloista ulostuleva jännitteen etumerkki noudattaa statiikan sääntöjä.

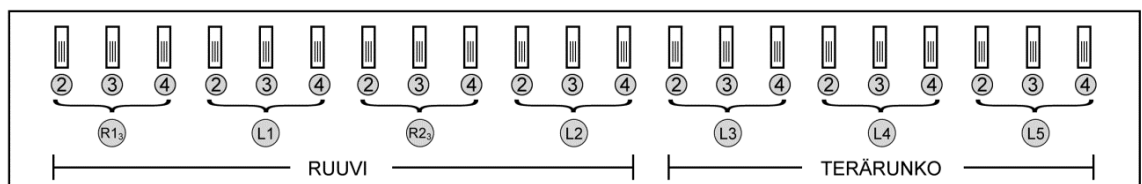


Kuvio 15. Kytentäkaaviosuunnitelma ruuvien neljännessilloille.



Kuvio 16. Kytentäkaaviosuunnitelma terärungon kolmelle neljännessillalle sekä ruuvin vääntömomenttia mittaavalle kokosillalle.

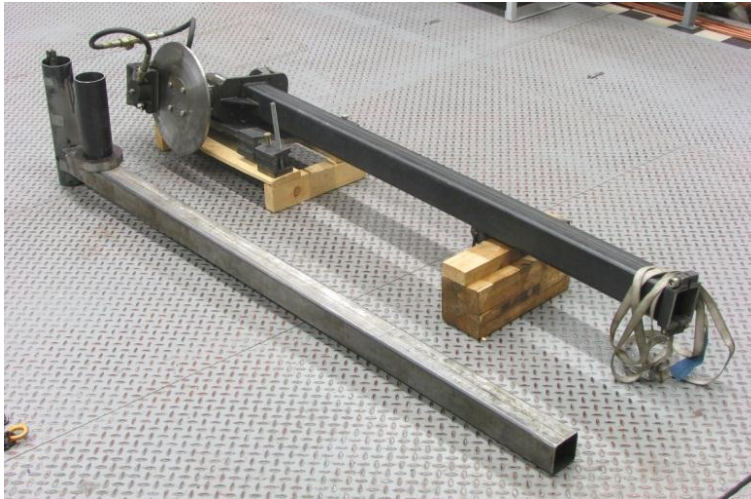
Täydennysiltapalkkiin liimataan 21 liuskaa, joilla täydennetään neljännessillat (kuvio 17).



Kuvio 17. Suunnitelma täydennysiltapalkille. Liuskat on ryhmitelty täydennettävän aktiiviliuskan mukaan.

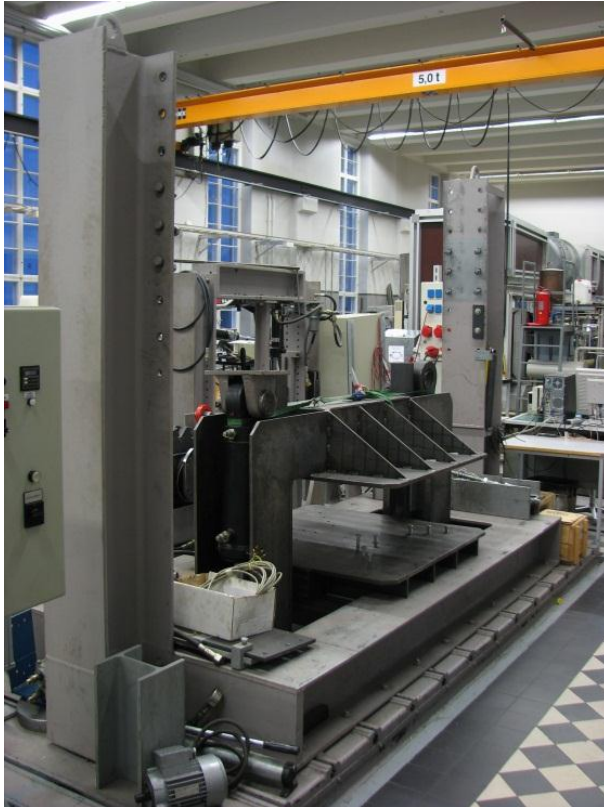
#### 4.2 Mittausjärjestelmän suunnittelu

Mittausjärjestelmän suunnittelu aloitettiin tutustumalla energialaboratorion tiloihin. Samalla tutustuttiin iskuvasaraan, jota käytetään terärungon kärkeen kohdistuvien iskujen antamiseen. Iskuvasarana oli tarkoitus käyttää aikaisemmin vastaaviin kokeisiin käytettyä kaksiosaista heiluria, jossa on hydraulinen levyjarru. Vasara, joka kiinnitetään energialaboratorion siltanosturin I-palkkiin, saatiin käyttöön koululta (kuvio 18).



Kuvio 18. Kahdesta osasta koostuva iskuvasara.

Testauskehä tulisi sijoittaa laboratoriossa siten, ettei se häiritse tarpeettomasti laboratorion muuta toimintaa. Kuviosta 19 voidaan nähdä tila, johon testauskehä sijoitetaan.



Kuvio 19. Testauskehän sijainti laboratoriossa.

Kun testauksen pääperiaatteet olivat selvät, aloitettiin testauskehän osien suunnittelu CATIAlla. Suunniteltavien osien lisäksi oli mallinnettava seuraavat, jo olemassa olevat kuorimakoneen osat, jotta testauskehän teräslevy ja siihen tuleva kokoonpano voitaisiin mitoittaa oikein:

- M36\*4-ruuvi
- terärunko
- teräakseli
- teräpesä
- kampi
- kaksi jousenpäätä (kammen lukitustangon pallonivelet)

Mallinnuksessa käytettiin hyväksi Valon Koneen piirustuksia. Lisäksi oli suunniteltava itse seuraavat osat:

- testauskehän 35mm teräslevy
- lukitustanko
- lukitusruuvi
- terärungon M36\*4-ruuvien kiristystuki
- jousenpään lukitusholkki
- iskuvasaran lisäpainot
- vasaran kierretappi voima-anturin kiinnitykseen
- peili
- peilialusta

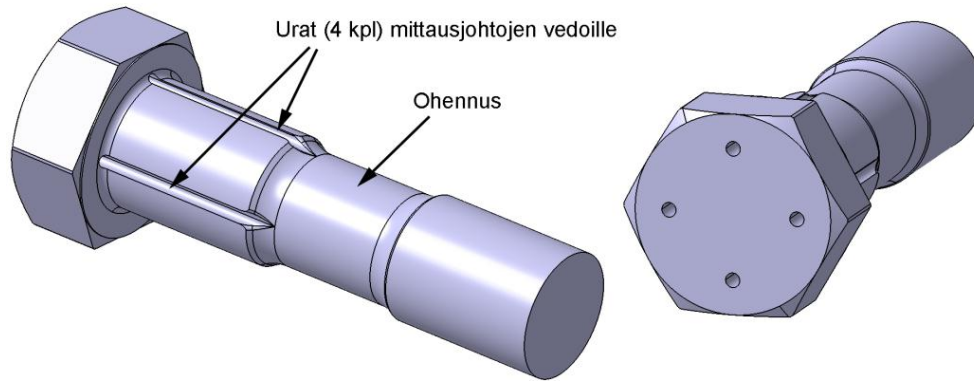
Suunniteltavien osien piirustukset lisäpainoja ja peiliä lukuun ottamatta löytyvät liitteestä 1.

Yksi kriittisimmistä suunnittelukohdista oli teräslevyssä oleva reikä, johon teräpesä asennetaan. Reiän paikka levyssä määrittäisi iskuvasaran heiluriradan sijainnin. M36\*4-ruuville ja terärungolle oli tehtävä muutossuunnitelmat venymäliuskoista lähtevien mittausjohtojen ulosvientiä varten.

#### 4.2.1 M36\*4-ruuvi

Ennen ruuvien muutosten suunnitelmien aloittamista oli tiedettävä käytettyjen mittausjohtojen määrä ja paksuus. Mittausjohtoiksi valittiin Kyowan vinyylipäällysteistä L-6-kaksoisjohtoa, jonka poikkileikkausmitat ovat 1x2 mm ja joita tarvitaan kahdeksan kappaletta (yksi johto hilaa kohden). Ruuvien varten päätettiin tehdä johtojen läpivientiä varten neljä, halkaisijaltaan 4 mm uraa, jotka jatkuisivat edelleen ruuvien kannan läpi halkaisijaltaan 4 mm reikänä. Näin jokaista kahden hilan mittausjohtoa varten saatiin tehtyä yksi läpivienti.

Urat ruuvien varressa suunniteltiin siten, että urien pohjat olisivat samalla säteen etäisyydellä kuin ruuvien ohennus. Kuvista 20 näkyy suunnitelma ruuvien muutostyölle (piirustus liitteessä 1).



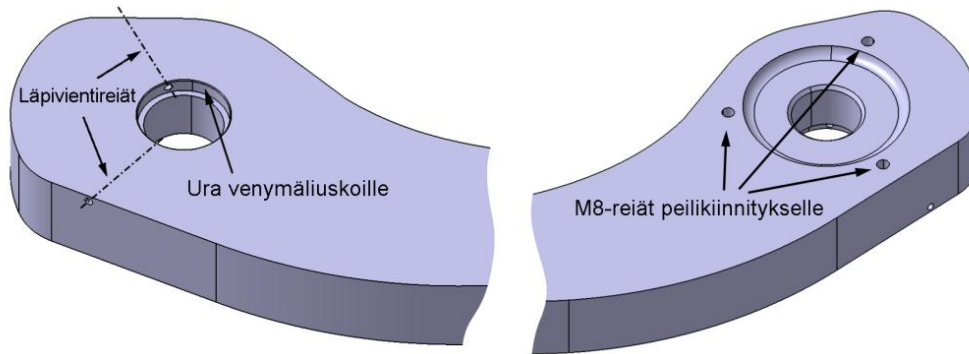
Kuvio 20. M36\*4-ruuvin muutostyön suunnitelma.

Lisäksi ruuvin kiristyksessä tarvittavaan mutterin hylsyyn suunniteltiin porattavaksi 8 mm:n reikä, jonka kautta ruuvin mittausjohdot saataisiin tuotua hylsystä ulos.

#### 4.2.2 Terärunko

Terärunkoon oli suunniteltava läpivienti kolmen yksihilaisen liuskan mittausjohtoja varten. Terärungon kitkapinnan tulisi olla ehyt, joten uran työstäminen ei tullut kysymykseen. Ainoaksi vaihtoehdoksi jäisi reikien tekeminen.

Suunnittelu aloitettiin paperille piirtäen sekä laskemalla, kuinka paljon tilaa liuskat, terminaalit ja mittausjohdot urassa vaatisivat. Ura suunniteltiin 3 mm syväksi ( $\varnothing$  43 mm) ja 7 mm leveäksi (kuvio 21), jolloin uran kehän pituudeksi tuli 135 mm. Liuskojen sijainnilla urassa ei ollut merkitystä, joten paikat mittausjohtojen läpivientireikiä varten ( $\varnothing$  4 mm) voitaisiin päättää vapaasti. Ratkaisuksi muodostuisi se, mikä olisi reikien porauksen kannalta sopiva ratkaisu. Lisäksi terärungon yläpinnalle suunniteltiin kolme M8-reikää peilin kiinnitykseen tarvittavia kierretankoja varten. Piirustukset terärungon muutostöille löytyvät liitteestä 1.



Kuvio 21. Terärungon ruuvireiän muutostyön suunnitelma venymäliuskoille ja laserin peilikiinnitykselle.

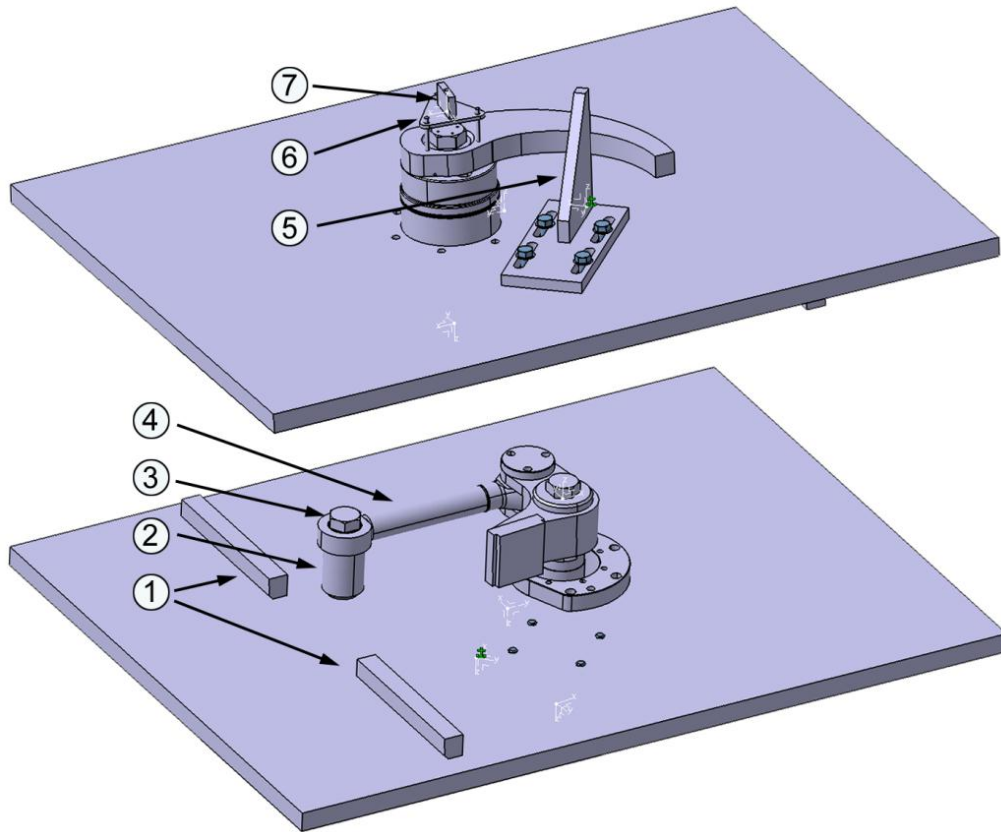
#### 4.2.3 Terälaipat

Kokeessa käytetystä kahdesta terälaipasta toiseen oli tehtävä kovera pinta Valon Koneelta saatujen mittojen mukaan. Terälaippa oli liian suuri työstettäväksi valmistustekniikan laboratoriossa, joten se oli lähetettävä Valon Koneelle. Tasainen terälaippa toimitettiin valmiiksi teräpesään kiinnitettynä. Työstettävä terälaippa oli erillisenä.

#### 4.2.4 Testauskehän kokoonpano

Kun kaikki komponentit oli saatu mallinnettua, saatiin testauskehän kokoonpano valmiiksi. Kuviossa 22 nähdään 1350x1000 mm teräslevyyn tehty kokoonpano, johon on numeroitu itse suunniteltavat osat seuraavasti:

- 1 liukeste
- 2 lukitusholkki
- 3 lukitusruuvi
- 4 lukitustanko
- 5 kiristystuki
- 6 peilin alusta
- 7 peili



Kuvio 22. Testauskehän kokoonpano.

Molemmat M36\*4-ruuvit, terärunko, peilin alusta ja voima-anturin kiinnitys heiluriin koneistettiin Metropolia Ammattikorkeakoulun valmistustekniikan laboratoriossa piirustusten mukaisesti. Teräslevy, lukitustanko, lukitusruuvi, kiristystuki, lukitusholkki ja iskuvasaran lisäpainot valmistettiin Lohjalla Valon Koneen tiloissa.

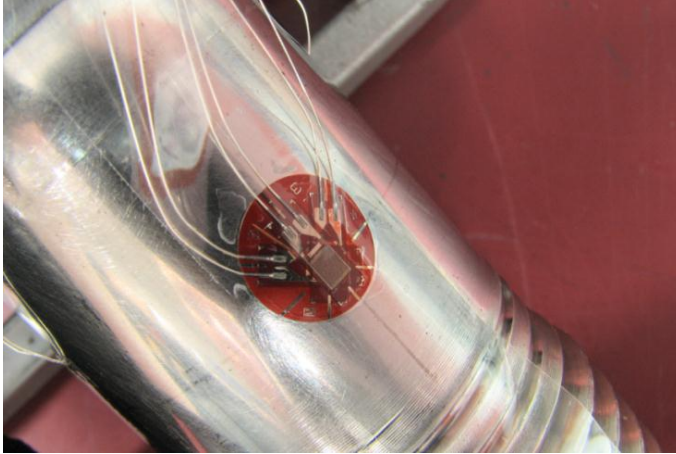
## 5 Venymäliuskojen asennus

### 5.1 Ruuvi

Työstöjäljet hiottiin pois ruuviin liimattavilta pinnoilta 240-karkeuksisella hiomapaperilla. Pinnat viimeisteltiin karkeudella 1000. Kaikki johdotusten lähellä olevat terävät kulmat ruuvin varressa ja kannassa pyöristettiin huolellisesti viilalla ja hiomapaperilla johdotimien kuorien vaurioitumisen välttämiseksi.

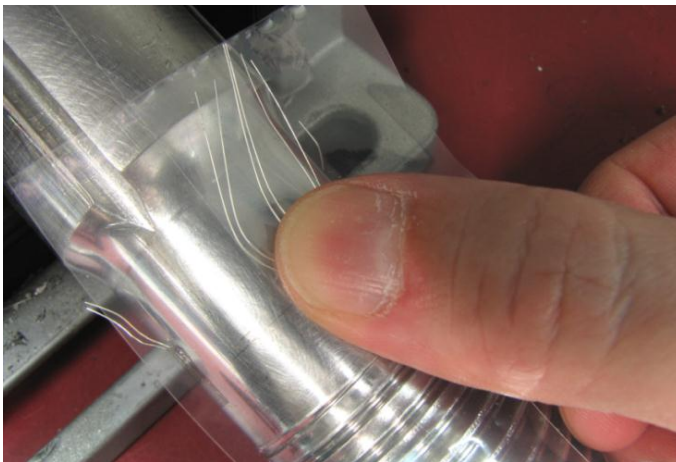
Ruuvin ohennukseen merkattiin liuskojen kohdistusmerkit kovalla lyijykynällä. Ruuvin ohennuksen kehäsuuntainen kohdistusviiva piirrettiin 72 mm:n etäisyydelle ruuvin kannan kosketuspinnasta valmistustekniikan laboratorion pyöriväalustaisella merkintäpöydällä. Akselin suuntaisten kohdistusviivojen merkintään käytettiin apuna suorakulmaa. Kun kaikki merkinnät oli tehty, liimattava pinta puhdistettiin huolellisesti asetonilla. Puhdistuksessa pinta pyyhitään asetoniin kostutetulla, puhtaalla paperipyyhkeellä yhdellä yhdensuuntaisella vedolla. Tämä toistetaan 4 - 5 kertaa, jossa jokaisella puhdistuskerralla otetaan käyttöön uusi, asetoniin kostutettu pyyhe. Pyyhittyyn pintaan ei saa koskea paljain käsin käsistä irtoavan rasvan takia, joka heikentää liuskan kiinnitykseen tarkoitettua liiman tarttuvuutta.

Liuskojen asennus aloitettiin liimaamalla yksihilaiset liuskat. Liuskojen kohdistukseen käytettiin apuna läpinäkyvää teippiä, joka asetettiin pöydälle liimapuoli ylöspäin. Liuska asetettiin varovasti teipin liimapinnalle pinsettien avulla liuskan liimattava puoli ylöspäin. Tämän jälkeen teippi liuskoineen vietiin asennettavaan kohtaan ja teippi painettiin ruuviin kiinni siten, että liuskojen kohdistusmerkit asettuivat tasan ruuvissa olevien kohdistusmerkkien kanssa (kuvio 23). Kun liuskan kohdistus oli varmistettu, teippiä vedettiin toisesta päästään irti ruuvista, kunnes liuskan liimattava pinta saatiin kokonaan näkyviin liiman lisäystä varten.



Kuvio 23. Liuska on testiasetettava ennen liuskan liimausta. Kuviossa näkyy kolmihilainen rusetti-liuska.

Liuskan pintaan lisättiin pisara Kyowan C-33-pikaliimaa, minkä jälkeen liuska teippeineen painettiin ruuviin kiinni. Liuskaa painettiin peukalolla voimakkaasti painaen 30 - 60 sekunnin ajan. Teipin ja peukalon välissä käytettiin polyeteenikalvoa, joka esti sekä liuskan että teipin reunoilta kiinnipainamisen yhteydessä pursuneen pikaliiman pääsyn sormiin (kuvio 24). Samanaikaisesti pinseteillä nostettiin johtoja ruuvipinnasta. Näin estettiin niiden liimaantuminen ruuvipintaan.



Kuvio 24. Liuskan liimaus. Liuskaa painetaan voimakkaasti liimattavaan alustaan kiinni 30 - 60 sekunnin ajan.

Tämän jälkeen polyeteenikalvo poistettiin ja liiman annettiin kovettua vielä minuutin, jonka jälkeen teippi poistettiin vetämällä sitä toisesta päästään irti liimattavan pinnan suuntaisesti. Liimauksen jälkeen liuskan hilojen vastusarvot sekä eristys ruuvista tarkistettiin yleismittarilla.

Liimausprosessi toistettiin kaikille ruuviin liimattaville liuskoille. Kun kaikki liuskat oli liimattu, liuskojen ympäriltä poistettiin ylimääräinen kuivunut liima terminaalien asennusta ja liuskojen suojausta varten raaputtamalla ja asetoniin kostutetulla pumpuli-puikolla.

Terminaaleina käytettiin Kyowan kooltaan 5x6 mm T-F7-liuskaterminaaleja. Terminaalit kiinnitettiin ruuviin pikaliimalla noin 2 mm:n etäisyydelle liuskojen reunasta Kyowan ohjeiden mukaisesti. Terminaalit alustettiin juotostinalla liuskajohtojen juotosta varten.

Liuskajohdot leikattiin sopivaan pituuteen ja ne juotettiin terminaaleihin sulattamalla terminaaleissa oleva juotostina. Liuskajohtoa ei vedetty liuskan ja terminalin välillä suoraksi, vaan se nostettiin hieman irti ruuvien pinnan läheisyydestä. Tällä tavoin saatiin varmistettua se, että liuskajohto ei joutuisi kosketukseen ruuvien kanssa, mikä maadoit-taisi hilan ja aiheuttaisi siten mittauksissa häiriöitä. Edellytys mittausten onnistumiselle on liuskojen eristys mitattavasta kohteesta. Kuviossa 25 näkyy terminaaleihin juotetut liuskajohdot.



Kuvio 25. Terminaaleihin juotetut liuskajohdot.

Tämän jälkeen hilojen vastusarvot ja eristys ruuvista tarkistettiin vielä kertaalleen. Edellä mainittu liuskojen ja terminaalien liimaus tehtiin myös toiselle, varalla olevalle M36\*4-ruuville.

Ennen mittausjohtojen asennusta oli selvítettävä, kuinka pitkiksi ne tulisi leikata. Energialaboratoriossa tehtyjen arvioiden mukaan johtimien pituudeksi katsottiin riittävän 2,50 m. Johtoja leikattiin 32 kappaletta.

Ennen johtimien juottamista ruuviin tehtiin suunnitelma siitä, minkä hilan mittausjohdot menisivät missäkin urassa. Mittausjohtojen juottaminen aloitettiin leikkaamalla johtojen päistä kuorta 3 mm:n matkalta ja alustamalla päät juotostinalla. Mittausjohdot juotettiin terminaaleihin sulattamalla johdoissa ja terminaaleissa oleva alustustina. Terminaaleista lähtevien mittausjohtojen lähtökulma mietittiin tarkoin, koska johdot oli saatava ruuvin varressa olevan uran sisäänmenoon jouhevasti. Tämä tuli käytännössä esille siten, että mittausjohtoparin toinen johto oli leikattava päästään toista johtoa muutamaa millimetriä lyhyemmäksi. Rusettiliuskan keskimmäisen, ruuvin akselin suuntaisen hilan kohdalla johtojen päiden leikkaaminen eripituisiksi oli edellytys mittausjohdon asettelun toimivuudelle (kuvio 26).



Kuvio 26. Rusettiliuskan keskimmäisen hilan mittausjohtoa aseteltiin ennen sen juottamista paikoilleen.

Kun kaikki mittausjohdot oli juotettu, kiinnitettiin niihin ruuvien kannan ulostulon kohdalle hilojen tunnistenumerot, joiden avulla mittausjohdoille voitaisiin antaa niille kuuluva juokseva numero siltakytkentäsuunnitelman mukaisesti (kuvio 15).

Tämän jälkeen tehtiin venymäliuskojen ja mittausjohtojen suojaukset. Suojaus tehtiin epoksiliimalla ja se toteutettiin pääsääntöisesti kahdessa eri vaiheessa: ensin suojattiin liuskat ja sen jälkeen mittausjohdot. Liimana käytettiin 15 minuutin pikaepoksiliimaa, jossa on n. 5 minuutin työskentelyaika.

Yksihilaiset liuskat suojattiin sekoittamalla liimaa yhdelle liuskan ja terminaalin muodostamalle alueelle kerrallaan. Rusettiliuskoille sekoitettiin liima erikseen sekä liuskan että terminaalin suojausta varten (kuvio 27). Suojauksen aikana oli huolehdittava siitä, että liima pääsi liuskoista terminaaleihin kulkevien liuskajohtojen alle, jolla varmistettiin niiden eristys ruuvista. Lopuksi tarkistettiin hilojen vastusarvot sekä niiden eristys ruuvista yleismittarilla.

Tämän jälkeen mittausjohdot merkittiin juoksevin numeroin siltakytkentäsuunnitelman mukaisesti (kuvio 15) kiinnittämällä niihin numeroidut teipinpalat.



Kuvio 27. Liuskat ja terminaalit suojattiin epoksiliimalla.

Ennen mittausjohtojen suojausta johdot oli liimattava pikaliimalla ruuvien pintaan kiinni. Pikaliimaa annosteltiin lisäämällä sitä pienen veitsenterän avulla. Liimaamalla mittausjohdot ruuvien pintaan kiinni varmistettiin se, etteivät mittausjohdot pääsisi nousemaan

irti ruvin pinnasta epoksisuojauksen aikana ja siten aiheuttamaan johtimenkuorien vaurioitumisen riskiä sekä asennuksen että kokeiden aikana. Lopuksi mittausjohdot peitettiin epoksiliimalla. Tämän jälkeen tarkistettiin hilojen vastusarvot ja eristys ruuvista (kuvio 28).



Kuvio 28. Hilojen eristys ruuvista tarkastettiin 200 M $\Omega$ :iin asti mittaavalla yleismittarilla.

Seuraavana oli vuorossa ruvin kannasta ulostulevien johtojen suojaus kannan ulostulon kohdalta. Halkaisijaltaan 5 mm kutistesukkaa leikattiin 20 mm:n pituiseksi palaksi ja se asennettiin ruvin kannan reikään siten, että siitä jäi näkyviin 5 - 10 mm. Kutistesukan ja mittausjohtojen väliseen tilaan pursotettiin silikonia. Liuskojen sijainnit ruuvissa merkittiin ruvin kantaan meismaamalla. Lopuksi mittausjohdot niputettiin siististi yhteen. Kuviossa 29 näkyy valmiiksi johdotettu ruuvi.

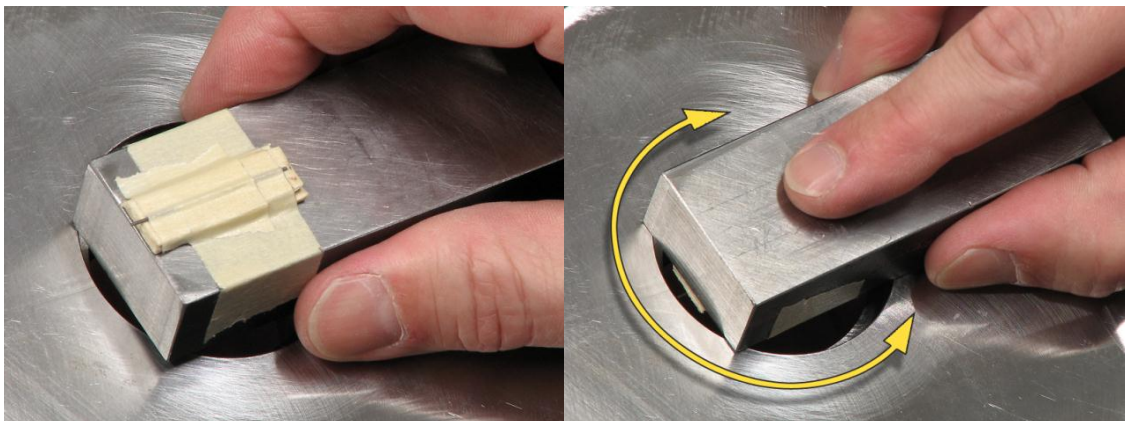


Kuvio 29. Valmis M36\*4-ruuvi.

## 5.2 Terärunko

Terärungon uran liimattava pinta hiottiin sileäksi koneistusjäljistä ja läpivientireikien reunat pyöristettiin.

Seuraavaksi piirrettiin terärungon ruuvireiän uraan kehän suuntainen kohdistusviiva yksihilaisia liuskoja varten. Apuna käytettiin pientä teräspalaa, johon oli teipattu pala 0,5 mm paksuista lyijytätekynän grafiittisauvaa n. 3 mm:n etäisyydelle teräspalan pinnasta (kuvio 30).



Kuvio 30. Ruuvireiän uran kehän suuntainen kohdistusviiva merkattiin teräspalaan kiinnitettyllä lyijytätekynän grafiitin palalla.

Tämän jälkeen uraan merkattiin ruuvireiän pituusakselin suuntaiset kohdistusmerkit. Apuna käytettiin teipinpalaa, johon oli ennalta merkitty paikat sekä kohdistusmerkeille että mittausjohtojen läpivientirei'ille. Teippi kohdistettiin uraan läpivientireikien kohdistusmerkkien avulla. Tällä tavoin ruuvireiän akselinsuuntaiset kohdistusmerkit liuskoille saatiin kohdallensa (kuvio 31).



Kuvio 31. Liuskojen kohdistusmerkit saatiin merkattua teipinpalan avulla.

Liuskojen asennusta varten terärunko kiinnitettiin kyljelleen puristimeen. Liuskat kiinnitettiin terärunkoon samoin kuin ruuveihin. Työtä hankaloitti se, että liimattava pinta oli ympyrän sisäpinnalla. Lisäksi uran pieni koko hankaloitti liuskan kiinnipainamista, mikä aiheutti ilman pääsyä liuskan alle. Liuskan kiinnipainamiseen otettiin apuun kertakäyttöisiä, vaahtomuovisia korvatulppia, joilla painetta saatiin levitettyä liuskan päälle tasaisemmin. Liimauksen jälkeen tarkistettiin hilojen vastusarvot ja eristys terärungosta.



Kuvio 32. Mittausjohtojen juottamista.

Tämän jälkeen kiinnitettiin liuskaterminaalit ja mittausjohdot. Helpoimmaksi tavaksi johtojen juottamiseen osoittautui kuvion 32 mukainen tapa, jossa mittausjohtoa ei tuotu läpivientireiästä, vaan se teipattiin ensin terärungon kylkeen kiinni juottamista varten. Kun molemmat johdonpäät oli saatu juotettua, mittausjohto vedettiin läpivientireiän kautta ja johtojen päät merkattiin siltakytkenäsuunnitelman mukaisesti (kuvio 16). Lopuksi liuskat suojattiin epoksiliimalla (kuvio 33).



Kuvio 33. Terärungon liuskan epoksisuojaus.

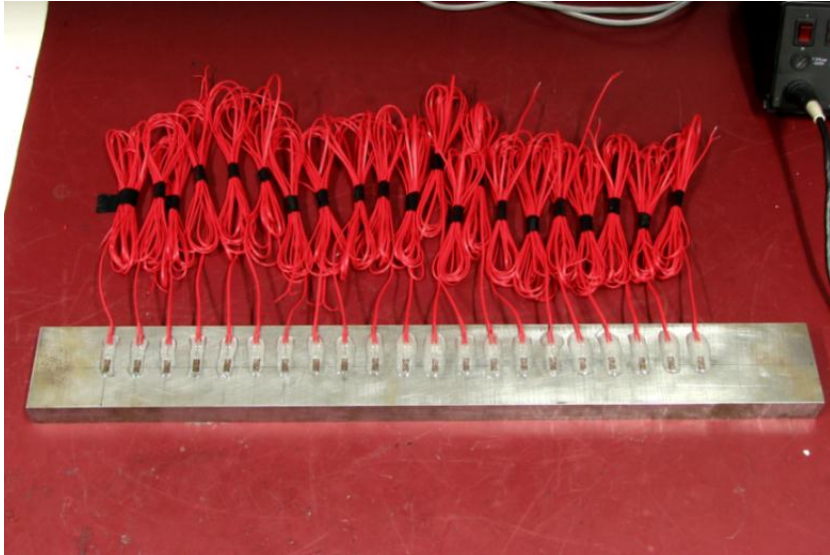
Hilojen vastusarvot ja eristys terärungosta tarkistettiin. Mittausjohdot suojattiin läpivientireikien ulostulon kohdalta kutistesukalla ja silikonilla. Valmiiksi johdotettu terärunko näkyy kuviossa 34.



Kuvio 34. Valmis terärunko.

### 5.3 Täydennyssiltapalkki

Täydennyssiltapalkkina käytettiin n. 500x80x20 mm kokoista teräspalkkia. Palkin liimatavasta pinnasta hiottiin pois ruoste ja pahimmat naarmut. Tämän jälkeen palkkiin merkittiin paikat 21 yksihilaiselle täydennyssiltavastukselle, joilla saatiin täydennettyä ruuvien ja terärungon neljännessiltaliuskat. Liuskoja lisättiin kolmesta eri paketista, ja niiden vastusarvo-, liuskavakio- ja toleranssitiedot sekä sijainnit palkissa merkattiin ylös. Terminaalien liimaus, liuskajohtojen vedot ja epoksisuojaus tehtiin samalla tavalla kuin M36\*4-ruuvissa. Liuskojen vastusarvot sekä eristys tarkistettiin jokaisen työvaiheen välillä. Liuskoista lähtevät mittausjohdot merkittiin siltakytkentäsuunnitelman mukaisesti (kuviot 15 ja 16). Jokaisen liuskan kohdalle merkittiin, mitä aktiiviliuskaa sillä täydennettiin, missä kyseinen liuska sijaitsee (ruuvi, terärunko) sekä mikä tulisi olemaan sen sijainti Wheatstone-sillassa (kuvio 17). Kuviossa 35 näkyy valmis täydennyssiltapalkki.



Kuvio 35. Kytentämerkintöjä vaille valmis oleva täydennyssiltapalkki.

## 6 Kokoonpano

### 6.1 Testauskehä

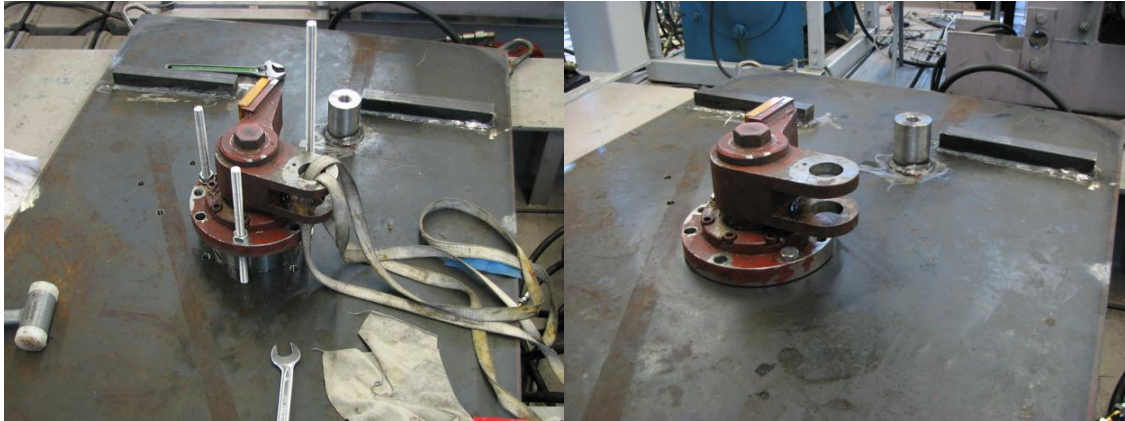
Teräslevy asennettiin kehään ylösalaisin teräpesän asennusta varten. Heti ensi yrittämällä havaittiin, että teräpesää ei saatu mahtumaan reikään. Levyn reikä oli mitoitettu Valon Koneen piirustusten mukaan välisovitteeksi.

Teräpesän asennusta päätettiin yrittää uudelleen työn ohjaajan kanssa. Koska teräpesää ei saatu reiästä läpi lyömällä, otettiin käyttöön kierretangot ja mutterit (kuvio 36), joilla pesä saataisiin painettua reikään. Reiän ja teräpesän väliset kontaktipinnat öljyttiin asennuksen helpottamiseksi.



Kuvio 36. Asennusvalmis teräpesä.

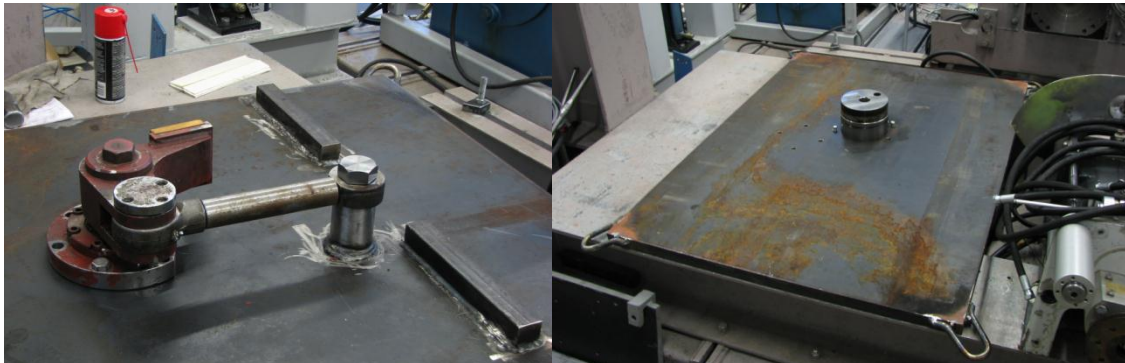
Asennus aloitettiin asettamalla teräpesä huolellisesti reiän kohdalle siltanosturin avulla. Teräpesän laipassa olevien reiät kohdistettiin teräslevyssä olevien reikien kanssa. Teräpesä painettiin reikään kiertämällä jokaista mutteria vuorotellen kierroksen kerrallaan. Teräpesän suoruutta reikään nähden tarkistettiin asennuksen aikana, tarpeelliset korjaukset tehtiin sivuilta suunnatuin iskuin. Menetelmä oli hyvin työläs ja aikaa vievä. Kuviossa 37 näkyy teräpesä asennuksen aikana.



Kuvio 37. Vasemmalla teräpesä asennuksen aikana, oikealla asennettuna.

Kun teräpesä oli asennettu, lisättiin kammien jousenpäät, lukitustanko ja sen lukitusruuvi (kuvio 38). Lukitusruuvi kiristettiin isoilla putkipihdeillä.

Teräslevy käännettiin oikein päin hihnan avulla, joka oli kiinnitetty levyn reunassa olevien lenkkien kautta siltanosturin koukkuun. Terärunko ja M36\*4-ruuvi kiinnitettiin terälaippaan tulevaa heilurivasaran pituuden säätöä varten.



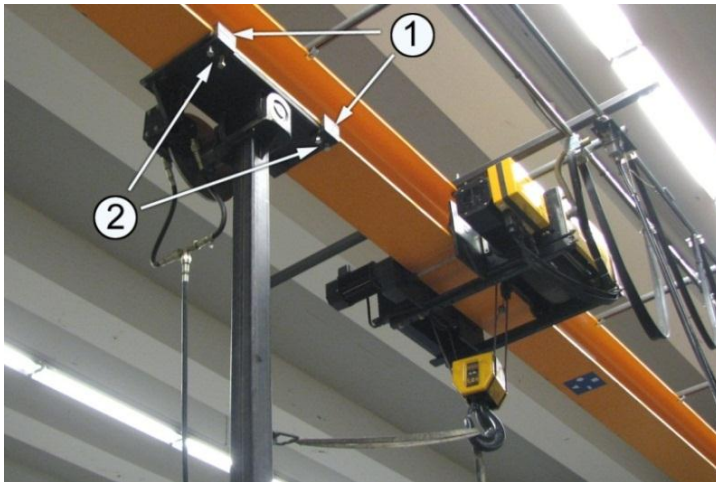
Kuvio 38. Vasemmalla kammien lukitusmekanismi asennettuna, oikealla levy käännettynä oikein päin.

Siltanosturi ajettiin laboratorioinsinöörin työhuoneen kohdalle, jonka katolta käsin heilurivasaran ylempi osa asennettiin palkkiin (kuvio 39). Vasaran kynnet laitettiin paikoilleen, mutta niiden ruuvit jätettiin kiristämättä, jotta vasaraa saatiin liikuteltua palkin suunnassa.



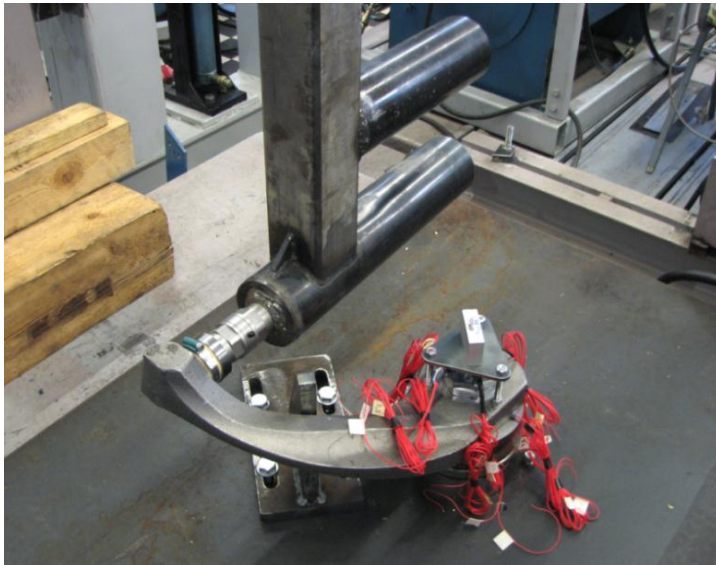
Kuvio 39. Vasaran asennus siltanosturin palkkiin.

Heiluri siirrettiin palkin keskelle ajamalla sitä päin nosturin nostoyksiköllä. Kuvio 40 voidaan nähdä heilurin kiinnitys ja siltanosturin nostoyksikkö.



Kuvio 40. Vasemmalla heiluri, oikealla siltanosturin nostoyksikkö. 1. irrotettavat kynnet ja 2. ruuvit, joilla heiluri lukitaan siltanosturin palkkiin.

Kun heiluri oli siirretty pois työhuoneen kohdalta, nosturi ajettiin laboratorion keskelle, jossa asennettiin heilurin alaosa. Tämän jälkeen heiluri siirrettiin testauskehän kohdalle heilurin pituuden loppusäätöä varten. Voima-anturi kiinnitettiin vasaran kärkeen ja heiluriradan suuntainen asema terärungon kärjen suhteen säädettiin kohdalleen. Kun asema oli saatu säädettyä, heilurin kynnen ruuvit kiristettiin. Kuviossa 41 näkyy valmis kokoonpano.



Kuvio 41. Säädetty heiluri.

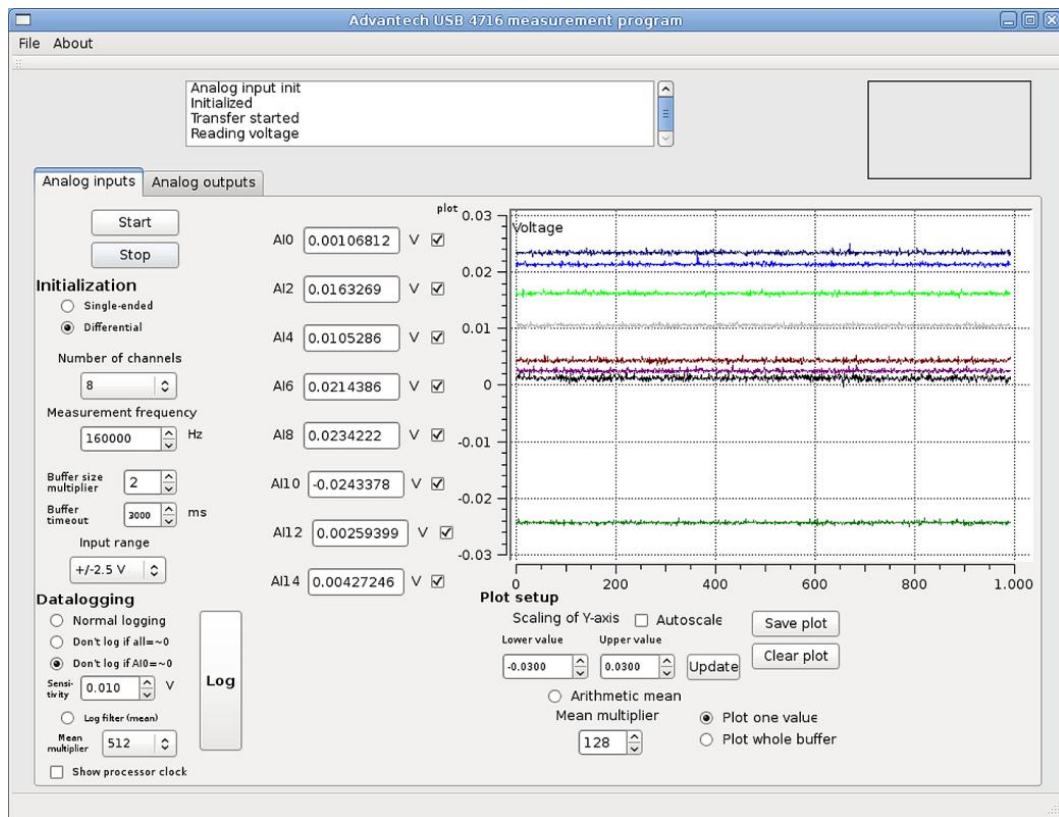
Heiluri kytkettiin hydraulikkajärjestelmään ja sen jarrun toimivuutta kokeiltiin. Havaittiin, että jarru ei päästänyt heti irti, vaan se laahasi jarrulevyä vasten. Koska ongelmasta ei päästy eroon ja heilurin poikkeuttaminen sellaisenaan ilman lisäpainoja ei tuottanut vaikeuksia, päätettiin ratkaisu vasaran heilahduskulman asettamiseksi siirtää myöhempään ajankohtaan.

## 6.2 Mittauslaitteisto

Mittauslaitteistona oli alun perin tarkoituksena käyttää National Instrumentsin laitteita ja LabView-mittausohjelmaa, joihin perehtyminen oli tämän työn ensimmäisiä opiskeltavia asioita. Laitteen koekäytössä ilmenneiden ratkaisemattomien ongelmien takia mittauksille ja tallennukselle oli etsittävä jokin toinen ratkaisu.

Mittaus- ja tallennusohjelmisto päätettiin toteuttaa automaatiotekniikan opiskelijoiden kanssa. Ohjelmiston suunnittelu aloitettiin perehdyttämällä neljän hengen ryhmä veynämaliuskamittauksen perusteisiin. Mittausta varten tehtiin alustava ohjelma, jota kehitettiin edelleen osana insinööriopiskelija Pasi Yrjölän insinööriyötä. Ensimmäinen ohjelmaversio saatiin käyttöön heti testauskehän kokoonpanon jälkeen. Ohjelmaa käytettiin alkuvaiheessa siinä olevan graafisen näytön perusteella siltakytkennän syöttö- sekä

lukujännitteen napaisuuden valitsemiseksi. Ohjelmasta löytyi riittävän monipuoliset säädöt (kuvio 42).



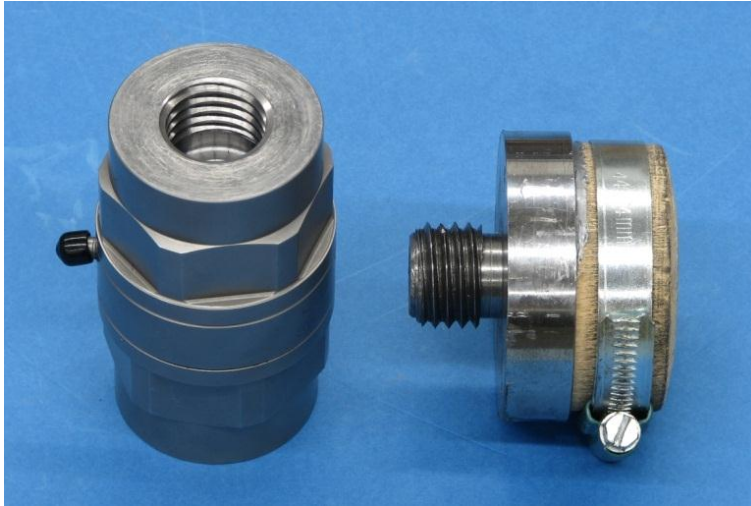
Kuvio 42. Mittausohjelma.

Mittausohjelman lisäksi mittauslaitteisto koostui seuraavista komponenteista:

- Kistler Kistler 9361AD -voima-anturi
- Advantech USB-4716 Portable Data Acquisition Module
- Voima-anturin vahvistin Kistler 5011
- Jännitelähde Protek 3003
- Melles Griot -laser.

Kistler 9361AD -voima-anturi

Kistler 9361AD -voima-anturia (mittausala  $\pm 60\,000$  N) käytetään iskuvasaran kärjessä iskuissa syntyneiden voimien mittaamiseen. Anturin päähän kiinnitetään puinen isku-kärki (kuvio 43).



Kuvio 43. Vasemmalla Kistler 9361AD -voima-anturi ja oikealla siihen kiinnitettävä puinen iskukärki.

#### Advantech USB-4716

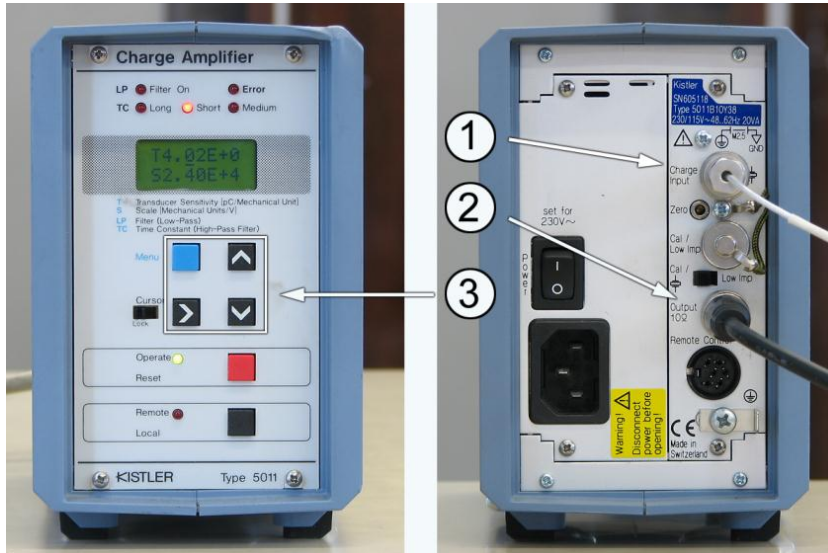
16-bittistä ja 16-kanavaista Advantech USB-4716 Portable Data Acquisition -moduulia (kuvio 44) käytetään venymäliuskasilloista ja Kistler 5011 -vahvistimen kautta saatavien signaalien keräämiseen ja syöttämiseen USB-portin kautta tietokoneelle. Moduulin näytteenottotaajuus on 200 kHz. Integraalikytkennässä käytettävien kanavien määrä putoaa kahdeksaan, jolloin näytteenottotaajuudeksi saadaan maksimissaan 25 kHz jokaista kanavaa kohden. Liuskoista ja Kistler 5011 -vahvistimesta tulevat mittausjohdot kytketään laitteen analogiliitintään (AI).



Kuvio 44. Advantech USB-4716 -moduuli. Työssä käytetyt AI-liitännät näkyvät laitteen takana.

Voima-anturin vahvistin Kistler 5011.

Kistler 9361AD -voima-anturista tuleva signaali vahvistetaan Kistler 5011 -vahvistimella (kuvio 45) Advantech USB-4716 -moduulia varten.



Kuvio 45. Kistler 5011 -vahvistin. 1. Kistler 9361AD -voima-anturista tuleva kaapeli, 2. vahvistimen ulostulo, joka kytketään Advantech USB-4716 -laitteeseen ja 3. säätönapaimet.

Vahvistimeen on asetettava käytettävän anturin herkkyys ja voima/jännite-suhde, jotka on kerrottu käytettävän anturin tiedoissa. Anturista tuleva kaapeli kytketään kohtaan "Charge Input". Etupaneelissa olevaan näyttöön asetetaan tarvittavat herkkyys- ja skaala-arvot. T on anturin herkkyys pC/mekaanista yksikköä kohden ja S on mekaanista yksikköä/voltti. T:lle syötettiin arvo 4,02 ja S:lle arvo 24 000, jolloin voima-anturista saatava jännitealue vahvistettuna on  $\pm 2,5$  V.

Vahvistimen ulostulokaapelin positiivinen ja negatiivinen napa haaroitettiin kahta Advantech USB-4716 -moduulia varten.

### Protek 3003 -jännitelähde

Protek 3003 -jännitelähdettä (kuvio 46) käytetään jännitteen syöttämiseen Wheatstone-silloille. Laitteen etupaneelista voidaan säätää laitteen antamaa jännitettä tai virtaa. Etupaneelissa on näytöt jännitteelle ja virralle.



Kuvio 46. Prottek 3003 -jännitelähde.

Prottek 3003 valittiin jännitelähteeksi, koska sen aiheuttama kohina oli kokeilluista jännitelähteistä vähäisintä. Laite on liitetty kytkentärimoihin (kuvio 46), joihin mittausjohdot kiinnitetään siltakytkentäsuunnitelman mukaisesti (kuviot 15 ja 16).

#### Melles Griot -laser

Melles Griot 1 mW 540 nm HeNe -laseria käytetään terärungon kiertymisen mittaamiseen (kuvio 58). Säde heijastetaan terärungon peilin kautta taululle, jossa säteen liikettä tarkastellaan.

Wheatstone-siltojen mittausjohdot kytkettiin mittausjärjestelmään (kuvio 47). Mitattavia kanavia oli yhdeksän kappaletta, joten datan tallennusta varten oli käyttöön otettava kaksi Advantech USB-4716 -moduulia ja kaksi tietokonetta. Ensimmäiseen moduuliin kytkettiin voima-anturi ja ruuvin neljä neljännessiltää, toiseen moduuliin voima-anturi, ruuvin vääntömomenttia mittaava kokosilta ja terärungon kolme neljännessiltää.

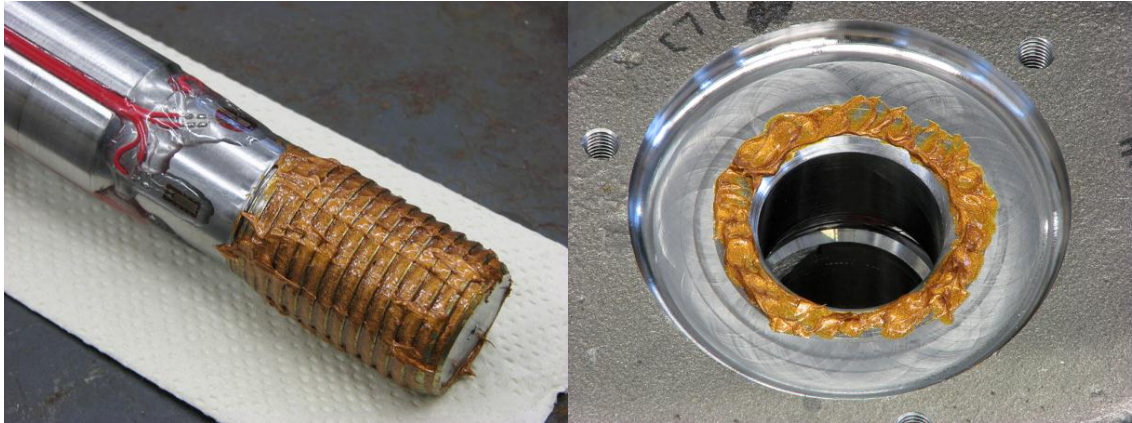


Kuvio 47. Mittauskoonpano yhdellä Advantech-moduulilla ja tietokoneella, joka oli käytössä työn myöhemmässä vaiheessa.

## 7 Mittaukset

### 7.1 Ruuvi 1

Ruuvien kierteet ja terärungon ruuvien kantaan koskettava pinta voideltiin kuparitahnalla (kuvio 48).



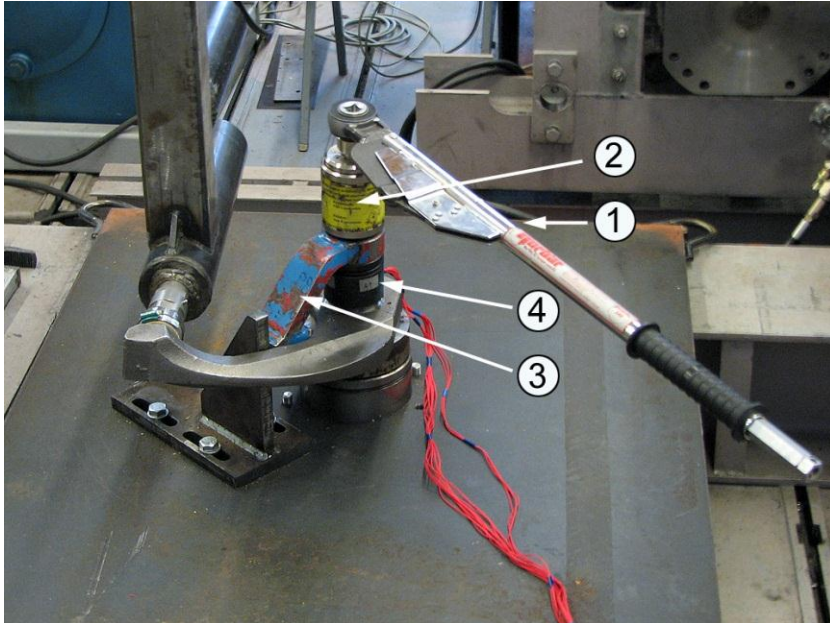
Kuvio 48. Voideltu ruuvi ja terärunko.

Ruuvien testikiristykset aloitettiin 150 Nm:n vääntimen kiristysmomentilla. Jatkossa käytetään seuraavia momenttikäsitteitä:

- käsikiristysmomentti so. vääntimen kiristysmomentti
- ruuvien kiristysmomentti so. 11-kertainen vääntimen kiristysmomentti

Kiristyksessä käytettiin seuraavia välineitä (kuvio 49):

- 1 Norbar-momentinväännin
- 2 momentinmuunnin (11-kertaistaa vääntimen momentin)
- 3 momentinmuuntimen vaste
- 4 ruuvien mutterin hylsy



Kuvio 49. Ruuvin kiristys.

Osoittautui, että kiristystuelle ei ollut käyttöä, koska momentinmuuntimen vaste ajoi saman asian.

Mittauslaitteiston tallennustoimintoa ei vielä käytetty, vaan venymäliuskoista saatavat tiedot luettiin mittausohjelman graafiselta näytöltä (kuvio 42).

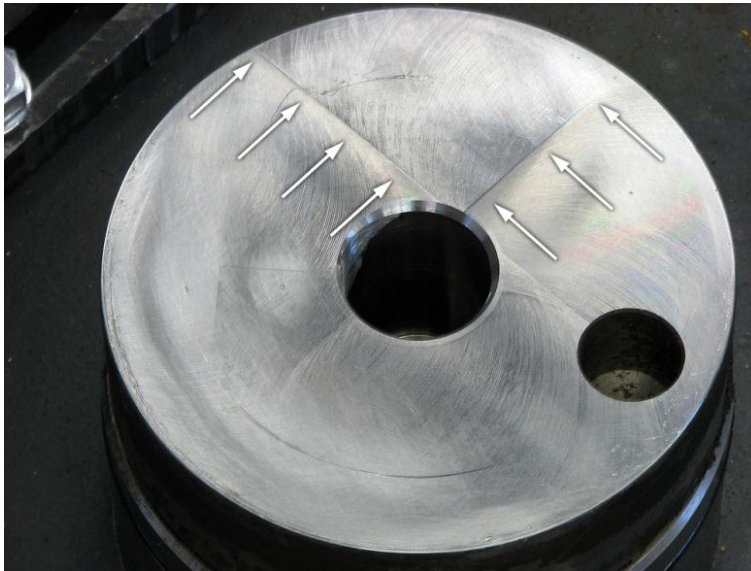
Ensimmäisten testikiristysten aikana huomattiin ruuvien akselin suuntaisten liuskojen kesken suuria venymäeroja. Muutaman testikiristuksen jälkeen päätettiin kokeilla, miten terärungon asema terälaipan suhteen vaikuttaisi ruuvien taipumaan. Ruuvia kiristettiin 150 Nm:n käsikiristysmomentilla ja neljällä terärungon eri asennolla terälaippaan nähden. Jokaisen kiristuksen jälkeen terärunkoa kierrettiin myötäpäivään silmämääräisesti 90 astetta, minkä jälkeen tehtiin uusi kiristys. Terärungon asento kuviossa 49 on 0 astetta.

Terärungon asento vaikutti paitsi taipuman suuruuteen, myös siihen, mitkä liuskoista antoivat suurimman ja mitkä pienimmän venymän. Terärungon asennolla 270 astetta saatiin ruuvien pituusakselin suuntaisten liuskojen välille suurimmat erot (venymät välillä 500 - 2600  $\mu\epsilon$ ). Venymäkäyristä oli selkeästi havaittavissa myös se, että osa liuskoista puristui voimakkaasti ruuvien kiristuksen alkuvaiheessa. Terärungon asennolla 90 astetta

liuskojen väliset erot olivat pienimmillään (venymät välillä 1600 - 2400  $\mu\epsilon$ ) (liite 2, kuvat 126 - 129).

Syy ruuvin voimakkaalle taipumiselle päätettiin selvittää.

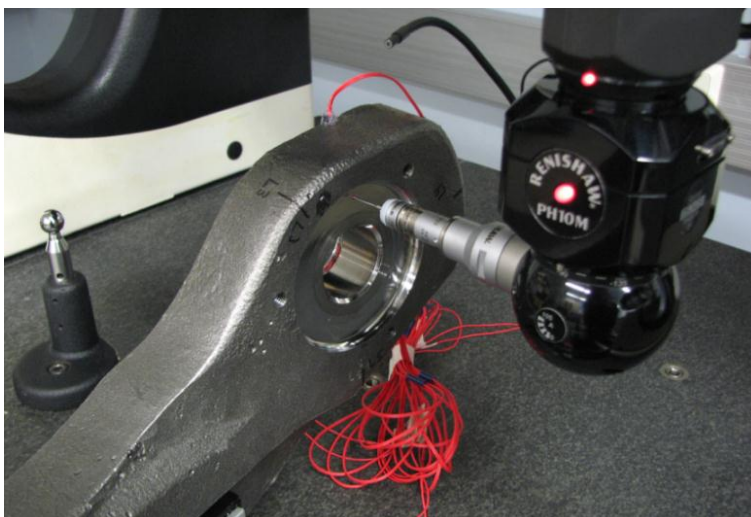
Ruuviliitos avattiin ja tarkistettiin. Terälaipan pinnalta löydettiin hienoa metallijauhetta, joka oli peräisin sekä terälaipan reunalla olevista epätasaisuuksista että pinnalla olevista naarmuista. Samalla havaittiin, että terälaipan pinnalla oli sormin tunnusteltavissa oleva alue, joka oli arviolta muutamaa kymmentä mikrometriä muuta pintaa korkeammalla (kuvio 50).



Kuvio 50. Terälaipan pinnalla muuta pintaa korkeammalla oleva alue.

Ruuviliitos ja kitkapinnat puhdistettiin. Liitoksen kierteet ja ruuvin kanta voideltiin kuparilahalla ja tehtiin kiristyskoe 250 Nm:n käsikiristysmomentilla (liite 2, kuvio 130). Havaittiin, että ruuvin pituusakselin suuntaista venymää mittaava liuskan R2 hila R2<sub>3</sub> saavutti arvon 5300  $\mu\epsilon$ , joka oli selvästi yli ruuvissa käytetyn materiaalin venymärajan, 3860  $\mu\epsilon$ . Kun ruuvi avattiin, oli kyseisessä liuskassa tapahtunut 1700  $\mu\epsilon$ :n suuruinen pysyvä venymä.

Ruuviliitos purettiin ja osat puhdistettiin. Ruuvi sekä terärunko vietiin mitattavaksi koulun valmistustekniikan laboratorion mittaushuoneeseen (kuvio 51).



Kuvio 51. Terärungon mittaus.

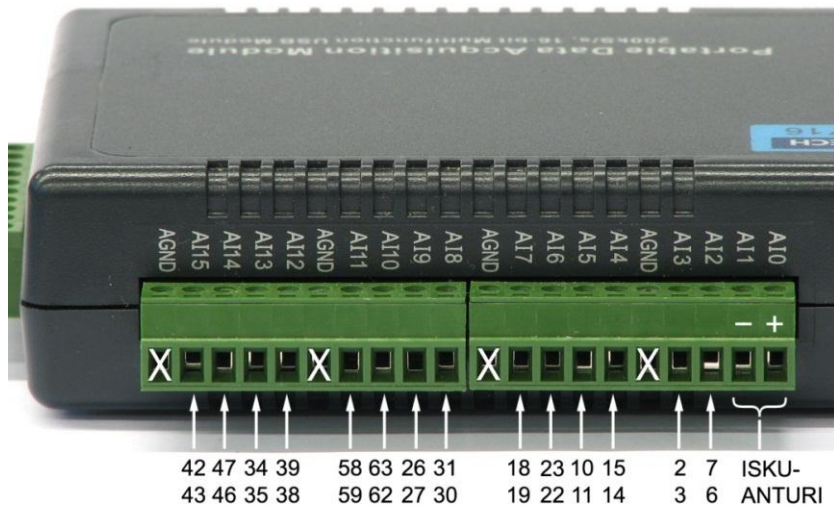
Mittaustuloksista kävi ilmi, että terärungon ruuvin kantaan koskettavan pinnan taso ja kitkapinnan taso eivät olleet yhdensuuntaisia. Terärunko vietiin Valon Koneelle korjattavaksi.

Ruuvi ja Valon Koneelta takaisin saatu korjattu terärunko kiinnitettiin voideltuina testauskehään testikiristyksiä varten. 200 Nm:n käsikiristysmomentilla tehdyssä kiristyksessä liuskojen venymät saivat arvoja 1500 - 2300  $\mu\epsilon$  (liite 2, kuvio 131). Ruuvien pituusakselin suuntaista venymää mittaavien liuskojen väliset erot olivat pienempiä ja maksimivenymä selvästi pienempi kuin ennen terärungon korjausta.

Koska käytettävä ruuvi oli ylittänyt 250 Nm:n kiristystestissä venymärajan, päätettiin varalla oleva M36\*4-ruuvi ottaa käyttöön luotettavien kiristystestien ja kuormituskokeiden varmistamiseksi. Ruuvissa oli liuskat ja terminaalit valmiiksi kiinnitettyinä, joten se oli enää johdotettava. L-6-johtoa ei löytynyt maahantuojalta hyllystä, vaan sitä oli tilattava tehtaalta kahden viikon toimitusajalla. Vararuuvien käyttöönottoon tuli siten lisäviivettä. Aika päätettiin käyttää testimittauksiin vanhalla ruuvilla siten, että vararuuvien ollessa käyttövalmis, mittausjärjestelmästä olisi ratkottuina kaikki ongelmat joihin kuului muun muassa voima-anturin liipaisuvarvon säädöt ja epävarmuudet sen toimivuudessa.

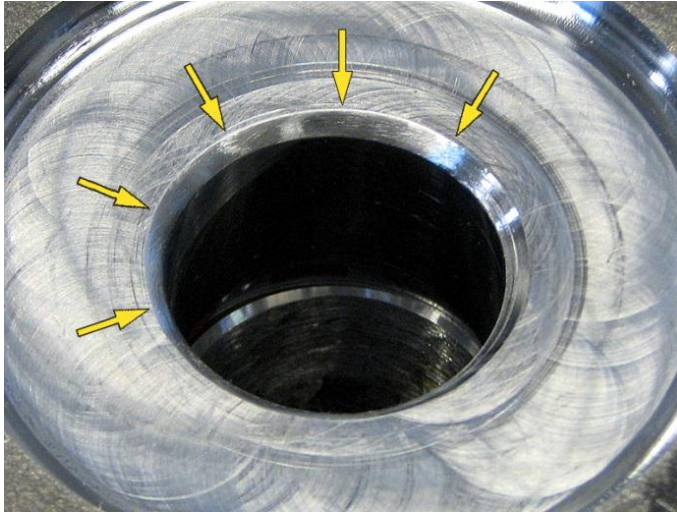
Mittauksia päätettiin jatkaa yhdellä Advantechin moduulilla. Koska yhdellä Advantech-moduulilla voitiin käyttää integraalimittauksessa vain kahdeksaa kanavaa, jätettiin yksi

terärungon kolmesta neljännessillasta (silta L5) kytkemättä. Dataa saataisiin siten tallennettua yhdellä pöytäkoneella ja samalla päästiin eroon kahden tietokoneen välisestä, jälkikäsitellyssä tapahtuvasta signaalin tahdistusongelmasta sekä siihen liittyvästä epävarmuudesta. Kuviossa 52 näkyy mittausjohtojen kytkennät yhdelle Advantech-laitteelle siltakytkentäsuunnitelman (kuviot 15 ja 16) mukaisesti.



Kuvio 52. Mittausjohtojen kytkentä Advantech-moduuliin.

Terärungon reiässä oleva viiste jäi Valon Koneella tehdyn korjauksen yhteydessä alimitaiseksi, mikä aiheutti painaumia ruuvien varren ja kannan väliseen 2 mm:n pyöristykseen. Viiste korjattiin porakoneeseen kiinnitettyllä hiomakivellä. Kuviossa 53 näkyy korjattu viiste.



Kuvio 53. Terärungon korjattu viiste.

Energiatekniikan laboratoriosta löytyi L-6-mittausjohtoa, jolla vararuuvi saataisiin johdotettua. Suunnitelmaa muutettiin sen verran, että vararuuvien johdotukseen ryhdyttiin mahdollisimman pian.

Testejä jatkettiin vanhalla, venymärajan ylittäneellä ruuvilla. Mittausohjelmiston keskiarvotus kytkettiin päälle, ja sen avulla käyrissä olevaa kohinaa saatiin pienennettyä. Keskiarvotuksessa saman liuskan mitatuista peräkkäisistä arvoista lasketaan keskiarvo.

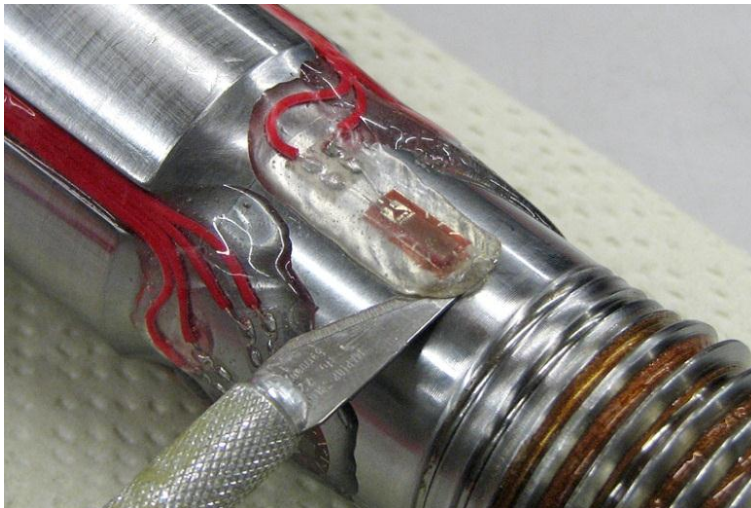
Kahdessa 250 Nm:n käsikiristysmomentilla tapahtuneessa kiristyksessä suurimmaksi ruuvien pituusakselin suuntaiseksi venymäksi saatiin molemmilla kiristyskerralla n. 3800  $\mu\epsilon$ . Jälkimmäisen 250 Nm:n kiristyksen jälkeen terärungon kärkeen lyötiin iskuvasaralla 10 koeiskua, minkä jälkeen pidettiin 10 - 20 minuutin tauko. Tauon jälkeen terärungon kärkeen annettiin vielä kolme iskua. Terärungon ja terälaipan välinen liitos liikahti kaikilla iskuilla. Tarkasteltaessa liuskoista saatavia käyriä havaittiin, että 10 - 20 minuuttia kestävän tauon aikana liuskan L1 venymä oli pienentynyt 1500  $\mu\epsilon$ :llä (liite 2, kuvio 132).

Ruuvi avattiin ja kiristettiin uudelleen 200 Nm:n käsikiristysmomentilla. Havaittiin, että liuskaan L1 ei syntynyt venymää niin paljoa kuin pitäisi. Tämän lisäksi liuskan L1 ja ruuvien vastakkaisella puolella sijaitsevan liuskan L2 käyrät menivät ristiin kiristyksen alkuvaiheessa, mitä ei ollut aikaisemmin tapahtunut (liite 2, kuvio 133). Päätelmä oli se, että liuskan L1 kiinnitys ruuvista olisi osittain peittänyt.

Seuraavaksi tehtiin testikiristys 300 Nm:n käsikiristysmomentilla työn ohjaajan kanssa. Ruuvien pituusakselin suuntainen venymä saavutti arvoja 5700 - 6100  $\mu\epsilon$  liuskoilla R1<sub>3</sub> ja L2. Liuska R2<sub>3</sub> sai arvon 4000  $\mu\epsilon$ . Liuska L1 sai kiristuksen alkuvaiheessa arvon 1100  $\mu\epsilon$ , minkä jälkeen venymä pieneni pudoten kiristuksen loppuvaiheessa kuormittamattomaan tilaan. Tämä ilmiö vahvisti sitä oletusta, että liuskan L1 liimaus olisi pettänyt.

Liuskan L1 vastusarvo sekä eristys ruuvista mitattiin. Arvoista ei löytynyt mitään poikkeavaa. Ruuviliitos päätettiin purkaa ruuvien tarkistusta varten.

Ruuvien tarkastuksessa havaittiin, että liuskan L1 suojaepoksi oli irronnut ruuvista, mikä oli helppo todentaa kiilaamalla veitsi kevyesti epoksin ja ruuvien väliin (kuvio 54). Epoksi oli irrotessaan vetänyt liuskan irti ruuvista.



Kuvio 54. Ruuvista irronnut liuska L1.

Epoksiliiman pääteltiin olevan epäluotettava liuskojen suojamateriaali sen irtoamisherkyyden takia. Varalla olevan ruuvien (ruuvi 2) suojaukseen tilattiin tarkoitukseen soveltuvaa Kyowan suojasilikonia.

## 7.2 Ruuvi 2

Ennen ruuvien 2 käyttöönottoa MathCad-ohjelmassa tehtiin laskelmat ruuvien oikean kiristysmomentin selvittämiseksi [5, s. 228 - 231].

Ruuvien kannalle ja kierteelle annettiin kitkakertoimet välillä 0,08 - 0,14. Tulosten perusteella ruuvien kiristyksessä saavutettaisiin jännityksiä, jotka olisivat 500 - 740 MPa, kun kiristyksessä käytettävä käsikiristysmomentti on 200 Nm. Oletuskitkakertoimeksi päätettiin valita 0,09, jolloin vertailujännitykseksi saatiin 680 MPa. Ruuvissa esiintyvän taipuman takia voitaisiin käytännössä odottaa jonkin verran suurempia jännityksiä.

Samalla laskettiin, kuinka suuria jännitteitä Wheatstone-silloista olisi odotettavissa kyseisellä oletuskitkakertoimella ja 200 Nm:n käsikiristysmomentilla.

Ruuvien 2 johdotukset ja johtojen läpivientien epoksisuojaukset saatiin valmiiksi. Terminaalit ja liuskat suojattiin Kyowan silikonilla (kuvio 55) ja liuskojen eristys ruuvista tarkistettiin. Terärungon ja -laipan kitkapinnoista hiottiin pois naarmuista aiheutuneet kohoumat 1000-karkeuksisella hiomapaperilla.



Kuvio 55. Kyowan silikonilla suojatut liuskat ja terminaalit.

Ruuvi ja terärunko asennettiin paikoilleen voideltuina ja johdot kytkettiin mittausjärjestelmään.

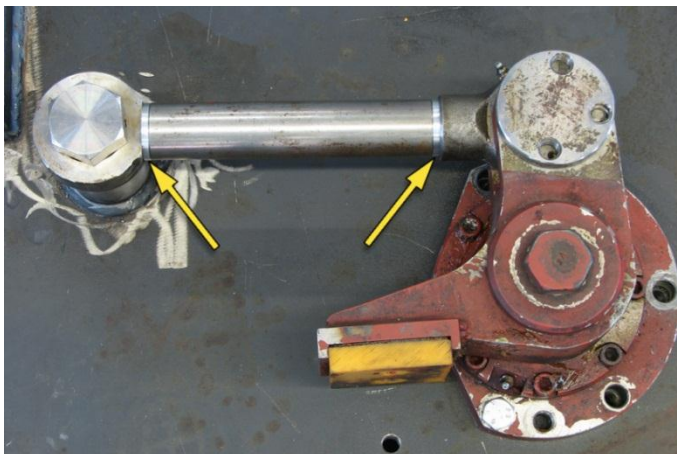
Tehtiin seuraavat kiristyskokeet:

- 10 kappaletta 100 Nm:n käsikiristysmomentilla
- 7 kappaletta 200 Nm:n käsikiristysmomentilla
- 8 kappaletta 200 Nm:n käsikiristysmomentilla

Kaikissa kiristyskokeissa ilmeni jälleen ruuvien voimakasta taipumaa. Kahdessa liuskassa ( $R1_3$  ja  $L1$ ) tapahtui puristumaa kiristuksen alkuvaiheessa. Suurimman venymän antaneessa liuskan  $R2$  hilassa  $R2_3$  tapahtui kiristyskokeiden aikana hieman alle 200  $\mu\epsilon$ :n verran nollapistesiirtymää. 200 Nm:n kiristyksissä terärungon ruuvireiän tangentiaalivenymiksi saatiin noin 350  $\mu\epsilon$  liuskalle  $L3$  ja noin 600  $\mu\epsilon$  liuskalle  $L4$ .

Mittausjohdot kytkettiin irti mittausjärjestelmästä ja ruuvi sekä terärunko irrotettiin teräpesästä ja koetila valmistettiin teräslevyn kääntöä varten. Tarkoituksena oli poistaa aikaisempien kokeiden aikana esille tullut väljyys, jonka epäiltiin olevan peräisin levyn alapuolella olevasta kammien lukitusjärjestelmässä sijaitsevasta lukitustangon ja jousenpäiden välisestä liitoksesta.

Alumiiniset aluslevyt, jotka asennettiin lukitustangon ja jousenpäiden väliin (kuvio 56), sorvattiin koulun valmistustekniikan laboratoriossa.



Kuvio 56. Kammien lukitusjärjestelmän alumiiniset aluslevyt.

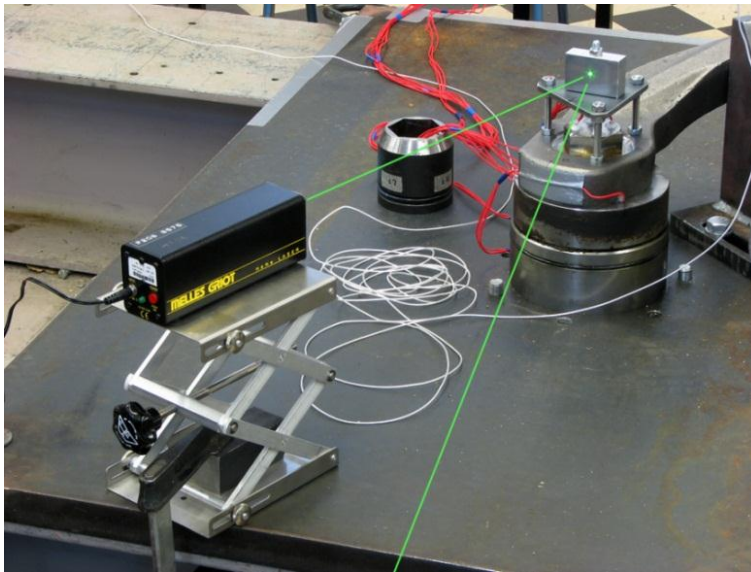
Aluslevyt osoittautuivat hieman ohuiksi, joten niitä oli paksunnettava alumiiniteipillä molemmin puolin. Aluslevyt asennettiin paikoilleen ja lukitusruuvi kiristettiin momentinmuuntimen avulla käyttämällä noin 50 Nm:n käsikiristysmomenttia (kuvio 57). Ruuvin kiristykseen tarvittavan käsikiristysmomentin perusteena käytettiin pallonivelen materiaalin oletettua 500 MPa:n myötörajaa sekä pallonivelen pienintä poikkileikkauspinta-alaa.



Kuvio 57. Hylsy, momentinmuunnin ja sen vaste asennettuna lukitusruuvin kiristystä varten.

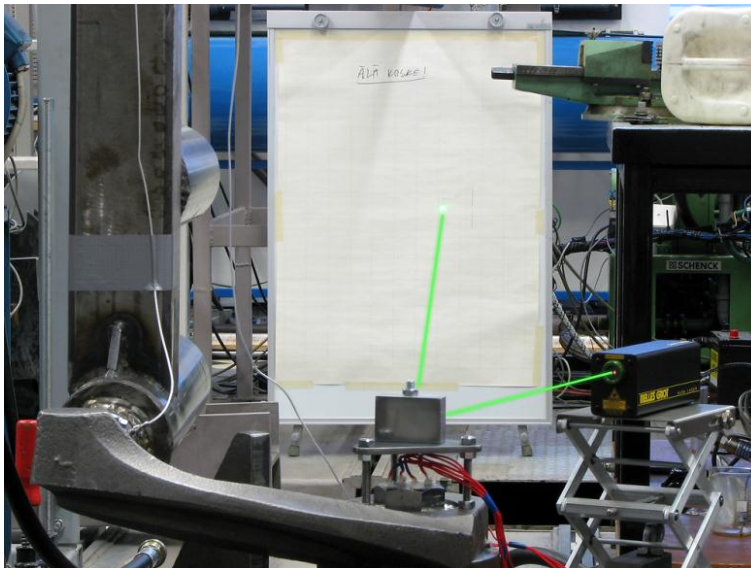
Teräslevy käännettiin oikein päin. Terärunko ja ruuvi kiinnitettiin teräpesään ja johdot kytkettiin mittausjärjestelmään. Ruuvi kiristettiin 100 Nm:n käsikiristysmomentilla ja systeemin väljyys tarkistettiin. Havaittiin, että lukitusmekanismin väljyyttä ei ollut saatu poistettua. Pääteltiin, että väljyys saattaisi olla peräisin teräakselin ja teräpesän välisestä laakeroinnista.

Laser kiinnitettiin kuormituskokeita varten pieneen saksinosturiin, joka puolestaan kiinnitettiin teräslevyn päälle puristimella (kuvio 58).



Kuvio 58. Saksinosturiin kiinnitetty laser.

Fläppitaulu (kuvio 59), johon säde heijastetaan, sijoitettiin 4,3 m:n päähän M36\*4-ruuvista. Työalue eristettiin ja varustettiin lasersäteestä varoittavin kyltein.



Kuvio 59. Fläppitaulu.

### 7.2.1 Iskut tasaisella terälaipalla ruuvia avaavaan suuntaan

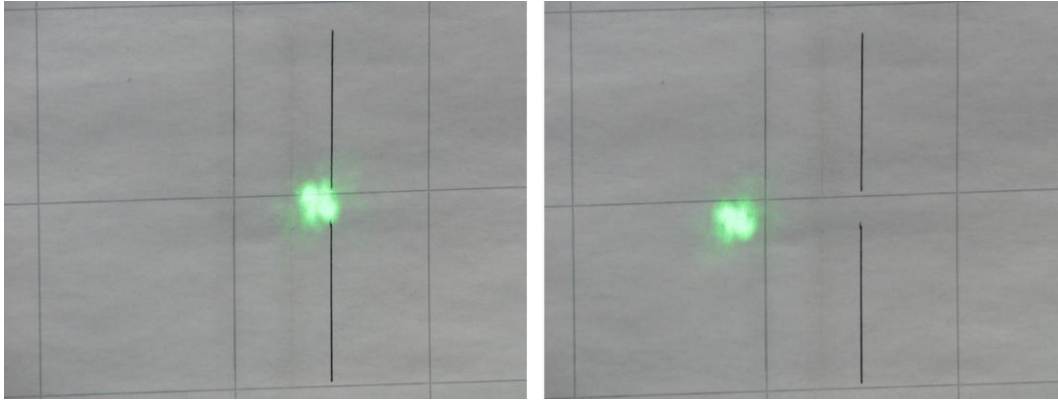
Koulun autolaboratoriosta saatiin käyttöön digitaalinen Wyler Clinotronic -kulmamittari (kuvio 60) iskuvasaran heilahduskulman mittaamiseksi. Mittari asetetaan heilurivarteen merkittyyn kohtaan ja heiluria poikkeutetaan työntämällä. Heilurista päästetään irti, kun haluttu kulma on saatu asetettua.



Kuvio 60. Clinotronic-kulmamittari. Mittarin tarkkuus on 1 kulmaminuutti.

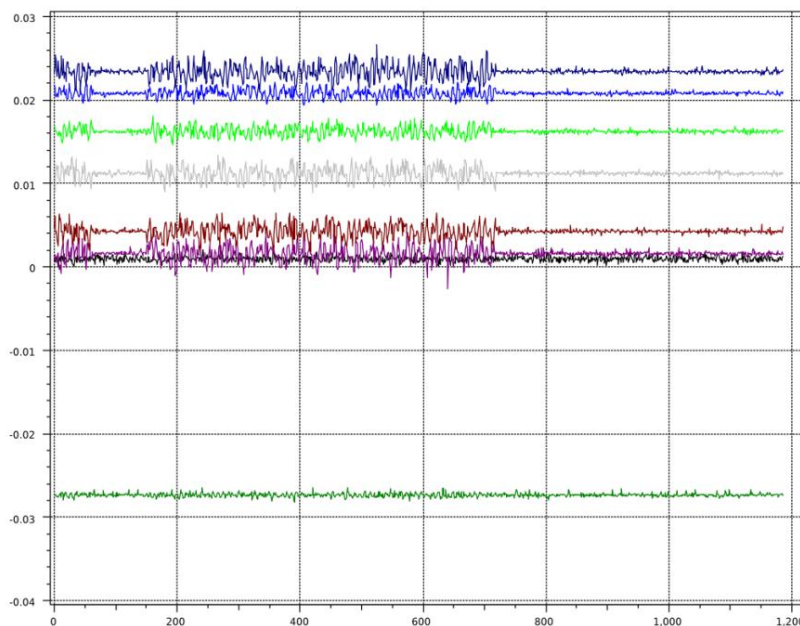
Ruuvi kiristettiin 200 Nm:n käsikiristysmomentilla. Ennen varsinaisia iskukokeita heilurilla tehtiin testi-iskuja, joiden tarkoituksena oli selvittää, millä heilahduskulmalla terärungon ja terälaipan välinen kitkaliitos luistaisi. Iskuja annettiin 4 - 10 asteen kulmilla puolen asteen välein, muutama isku jokaista heilahduskulmaa kohden. Liitoksessa havaittiin luistoa 8,5 asteen kulmalla. Ruuvien momenttia mittaavan kokosillan käyrässä havaittiin selkeä muutos -26 mV:stä -17 mV:iin asti. Taululle heijastunut säde siirtyi noin 40 mm.

Teräpesässä olevan väljyyden takia jokaisen iskun jälkeen oli huolehdittava siitä, että terärunkoa vedettiin voimakkaasti käsin iskun suuntaisesti. Tällä tavoin taululle heijastunut säde saatiin pidettyä kohdallaan, eikä väljyydestä syntynyt vapaa liike päässyt aiheuttamaan säteen luvussa virhettä (kuvio 61).



Kuvio 61. Kuviossa näkyy teräpesän väljyyden aiheuttama lasersäteen vapaa liike taululla. Taulun ruudukkoväli on 50 mm.

Mittaussignaalinassa havaittiin noin  $400 \mu\text{s}$ :n suuruista kohinaa (kuvio 62), jonka lähdettä ei pystytty paikantamaan. Häiriösignaali ajoittui enimmäkseen iltapäivään, joten mittaukset oli suoritettava ennen sitä. Mittaustapahtumaa pidettiin koko ajan silmällä häiriöiden varalta.



Kuvio 62. Kuviossa olevaa suurempiampitudisen häiriön aiheuttajaa ei voitu paikantaa.

Mittaushjelmaan asetettiin seuraavat parametrit iskukokeita varten:

- näytteenottotaajuus 160 000 Hz (20 000 Hz kanavaa kohden)
- luettava jännitealue  $\pm 2,5\text{V}$
- liipaisuvarvo voima-anturin kanavalle: 0,010 V

Ruuvi avattiin ja kiristettiin 200 Nm:n käsikiristysmomentilla iskukokeita varten, jotka aloitettiin 7,5 asteen heilahduskulmalla. Havaittiin, että liitos liikahti ensimmäisellä iskulla. Heilahduskulmaa vähennettiin 6 asteeseen, jolloin liikahtamista ei enää havaittu. Ruuvi avattiin ja kiristettiin uudelleen 200 Nm:n käsikiristysmomentilla. Taululle piirrettiin pystysuora 0-tilan referenssiiviiva (kuvio 61), jonka avulla liikahtaneen säteen kulkeuma matka voitaisiin mitata.

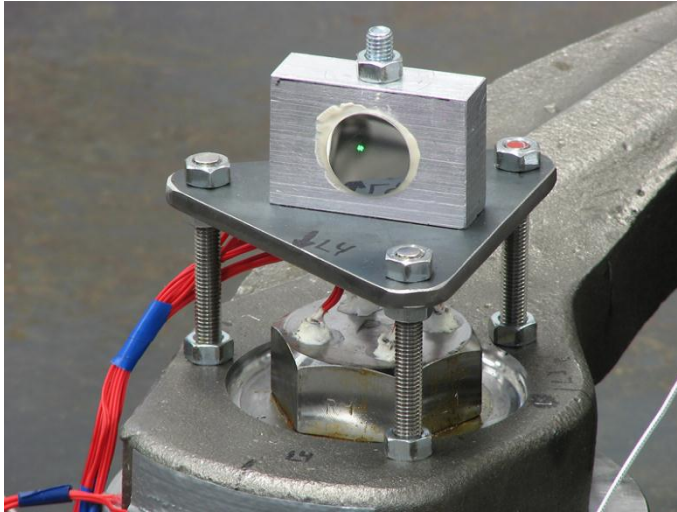
Iskukokeissa noudatettavat menettelytavat:

- 10 (tai jokin muu määrä, joka valitaan ennen iskukoesarjan aloittamista) onnistuneesti tallentunutta iskua jokaista heilurin kulma-asetusta kohden
- heilurin kulmaa lisätään 0,5 asteella jokaisen 10 iskusarjan (tai jonkin muun määrän) jälkeen
- edellä mainittuja toistetaan (niin kauan) kunnes kitkaliitos liikahtaa
- iskusarja viedään loppuun asti, vaikka liitos liikahtaisi jo ensimmäisellä iskulla.

Jokaisen iskun jälkeen tehtävät toimenpiteet:

- terärungon väljyys poistetaan vetämällä sitä iskun suuntaisesti
- liipaisu ja iskutapahtuma tarkistetaan Calc-ohjelmassa
- onnistunut iskutapahtuma tallennetaan nimeämällä se siten, että se olisi helpposti tunnistettavissa tulostenkäsittelyä varten
- taululle heijastuneesta säteestä otetaan valokuva
- säteen liikettä taululla ja ruuvin momenttia mittaavaa kokosillan käyrää tarkkailaan koko ajan siltä varalta, että pieniä muutoksia syntyy huomaamatta.

Iskukokeet aloitettiin 5 asteen kulmalla. 8 asteen iskukokeiden jälkeen terärungon alumiinisen peilin takapuolelle liimattiin ruostumattomasta teräksestä kiillotettu pala (kuvio 63), joka paransi taululle heijastuneen säteen kirkkautta.



Kuvio 63. Terärungon paranneltu peili.

Kokeita jatkettiin 8,5 asteella. Kitkaliitos liikahti heilurin 9,5 asteen poikkeutuksella iskusta 4 lähtien.

Mittausohjelmistossa ilmenneiden liipaisuongelmien takia osa iskuista ei joko tallentunut tai tallentui vajaasti. Koska vajaasti tallentuneet iskut hylättiin ja liipaisemattomista iskuista ei saatu mitään informaatiota, jouduttiin jokaista kymmentä onnistunutta tallennusta kohden tekemään 10 - 14 iskua. Tämä on huomioitu tuloksissa, joissa iskun numero kertoo iskun todellisen järjestysnumeron, ei onnistuneen iskun järjestysnumeroa.

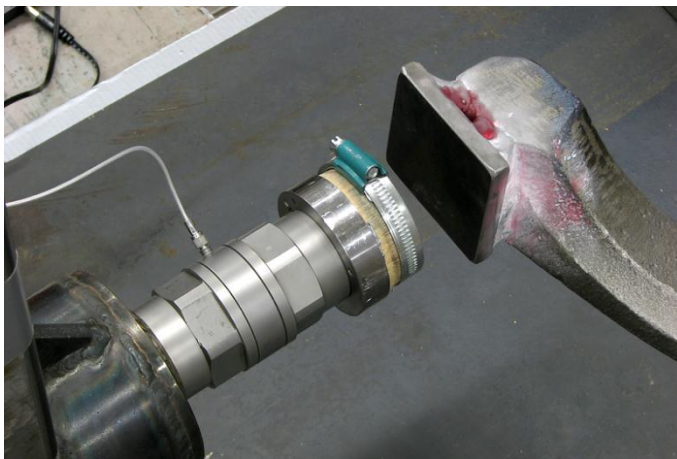
Edellä tehty iskukoe päätettiin toistaa uudelleen käyttämällä samaa menettelytapaa ja iskun jälkeisiä toimenpiteitä. Aloituskulmana oli 8,5 astetta. Liitos liikahti 10,5 asteen heilahduskulmalla iskusta 6 lähtien.

### 7.2.2 Iskut tasaisella terälaipalla ruuvia kiristävään suuntaan

Seuraavaksi oli vuorossa työnohjaajalta saadun ehdotuksen mukaan iskukokeet M36\*4-ruuvia kiristävään suuntaan, joita varten terärungon kärjen takapuolelle oli hitsattava teräslevyn pala samaan pystykulmaan etupuolen kanssa. Tällä tavoin voitaisiin varmistaa tulosten vertailukelpoisuus ja iskukärjen vahingoittumattomuus.

Mittausjohdot kytkettiin irti mittausjärjestelmästä. Terärunko ja ruuvi irrotettiin ja puhdistettiin. Terärunkoon merkittiin sen materiaali hitsauksessa tarvittavia lisäaineita varten.

Terärunkoon hitsatun levyn palot hiekkapuhallettiin puhtaiksi ja ne tarkistettiin tunkeumanesteellä halkeamien varalta. Kuviossa 64 näkyy terärunkoon hitsattu teräslevyn pala.



Kuvio 64. Terärungon kärkeen hitsattu teräslevyn pala.

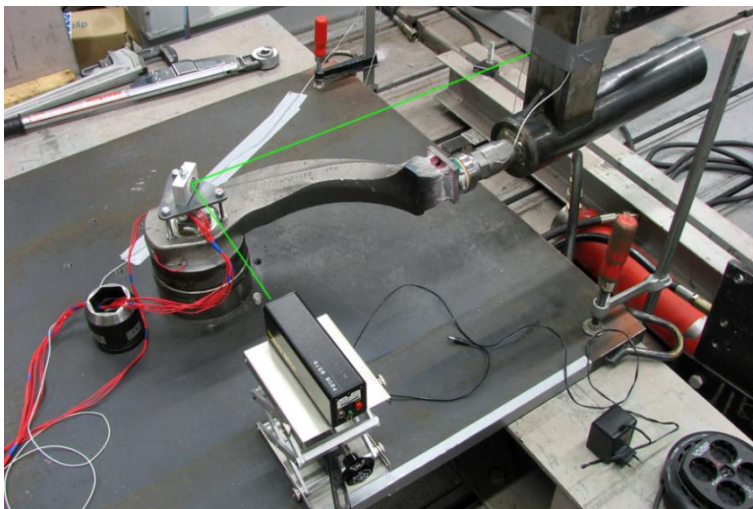
Terärunko ja ruuvi kiinnitettiin takaisin teräpesään ja johdot kytkettiin mittausjärjestelmään. Terärungon kärki asetettiin kohtaan, jossa teräslevyn pala on kohtisuorassa heilurirataan nähden. Lisäksi heiluria siirrettiin siltanosturin palkin suunnassa vetämällä sitä heilurin akselin ja siltanosturin nostoyksikön väliin kiinnitettyllä hihnalla (kuvio 65). Veto tapahtui antamalla sykäyksiä nosturin nostoyksiköllä, joka liikutti heiluria kerrallaan 10 - 20 cm:n matkan. Kuviossa 66 näkyy mittauskehän kokoonpano ruuvia kiristävään iskusuuntaan.



Kuvio 65. Heilurin vetämistä varten kiinnitetty hihna.

Mittausohjelmaan tehtiin päivitys, jonka tarkoituksena oli parantaa liipaisun luotettavuutta.

Ennen mittauksen aloittamista tehtiin iskutestejä. Iskuja annettiin 8 - 14 asteen kulmilla 1 asteen välein. Testeissä havaittiin, että kitkaliitoksen liikahtukseen tarvittava heilahduskulma oli varsin epämääräinen.



Kuvio 66. Iskukokeet ruuvia kiristävään suuntaan.

Iskukokeet aloitettiin 8 asteen kulmalla. Iskukoesarjaksi valittiin 8 onnistunutta iskua jokaista heilahduskulmaa kohden. Suurimmaksi iskukulmaksi saatiin 16 astetta, jossa ei havaittu selkeää säteen liikahtusta taululla eikä muutoksia ruuvien vääntömomenttia

mittaavassa kokosillassa. Työnohjaajalta saadun ohjeistuksen mukaan kokeita ruuvia kiristäväan suuntaan ei ollut enää tarvetta jatkaa. Mittausjohdot irrotettiin mittausjärjestelmästä, ruuviliitos purettiin ja puhdistettiin koveran terälaipan teräpesän vaihtoa varten.

### 7.2.3 Iskut koveralla terälaipalla ruuvia avaavaan suuntaan

Teräslevy käännettiin siltanosturin avulla ylösalaisin ja teräpesä irrotettiin. Teräslevyssä olevaa reikää suurennettiin hiomalaikalla koveran terälaipan teräpesän asennusta varten.

Koveran terälaipan teräpesä asennettiin levyyn. Pesästä puuttuva kambi saatiin tasaisen laipan teräpesästä. Lukitustangon lukitusruuvi kiristettiin n. 50 Nm:n käsikiristysmomentilla ja levy käännettiin oikein päin. Heiluri siirrettiin kohtaan, jossa sillä voitaisiin antaa iskuja ruuvia avaavaan suuntaan. Koveran terälaipan pinnalla olevat pienet epätasaisuudet hiottiin kevyesti 1000-karkeuksisella hiomapaperilla.

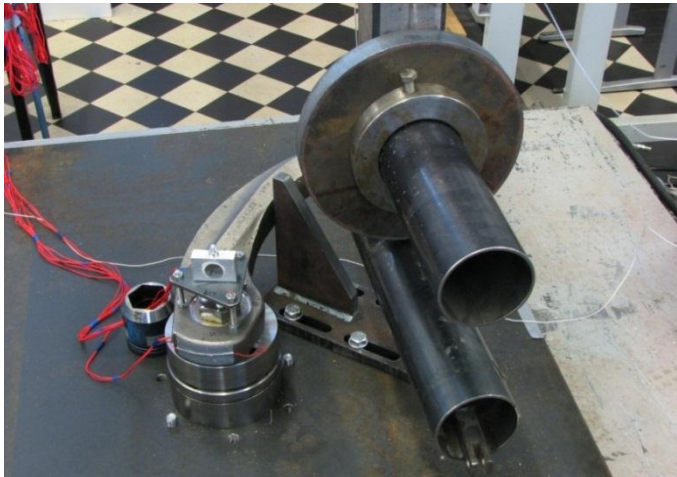
Ruuvi ja terärunko kiinnitettiin paikoilleen puhdistettuina ja voideltuina. Mittausjohdot kytkettiin mittausjärjestelmään.

Ruuville tehtiin kolme 200 Nm:n käsikiristysmomentin testikiristystä. Havaittiin, että ruuvien akselin suuntaista venymää mittaavien liuskojen välillä oli suurempia eroja kuin tasaisella terälaipalla. Terärungossa olevien, ruuvireiän tangentin suuntaista venymää mittaavien liuskojen venymiksi saatiin noin 1000  $\mu\epsilon$ . Ruuvien vääntömomenttia mittaavassa kokosillassa ei havaittu muutoksia edellisiin, tasaisella terälaipalla 200 Nm:n käsikiristysmomentilla tehtyihin kiristyksiin.

Ruuvi kiristettiin uudelleen 200 Nm:n käsikiristysmomentilla ja aloitettiin testi-iskut, joiden tarkoituksena oli hakea kulma jolla liitos luistaisi. Koeiskuja annettiin 8 - 17 asteen kulmilla asteen välein, kaksi iskua jokaiselle heilahduskulmalle. Liitoksessa ei havaittu kiertymää.

Iskuvasaraan päätettiin lisätä 14 kg:n lisäpaino (kuvio 67) ja liukurajan haku aloitettiin 12 asteen koeiskuilla. Kiertymistä tapahtui jonkin verran 12 asteen iskuilla ja se oli selkeämpää 15 ja 16 asteen kulmilla.

Iskukokeet päätettiin aloittaa 12 asteen heilahduskulmalla. Ruuviliitos avattiin ja kiristettiin 200 Nm:n käsikiristysmomentilla iskukokeita varten.



Kuvio 67. 14 kg:n lisäpaino kiinnitettynä heilurin ylempään vaakaputkeen.

Iskuissa noudatettiin samaa menettelytapaa kuin tasaisella terälaipalla, paitsi iskujen määrien suhteen (5 - 6 onnistuneesti tallentunutta iskuja). 12 asteen iskujen aikana ruuvien vääntömomenttia mittaavan kokosillan jännite pieneni 3 mV. Tästä huolimatta, ruuvia ei päätetty avata ja kiristää uudelleen, vaan kokeita jatkettiin 13 asteen iskuilla.

13 asteen kokeiden jälkeen ruuviliitos päätettiin avata ja kiristää jokaisen eri heilahduskulmalla tehdyn iskusarjan jälkeen. Tällä tavoin saatiin varmistettua iskukokeiden keskinäinen vertailukelpoisuus ruuvien kannassa olevan, kitkaliitoksen kiertoa helpottavan momentin suhteen. Iskukokeita tehtiin 15 asteen heilahduskulmaan asti, jossa tapahtui selkeää kitkaliitoksen kiertymistä.

Ruuviliitos avattiin ja terärunko ja heiluri siirrettiin kohtaan, jossa kokeita voitaisiin jatkaa ruuvia kiristävään suuntaan.

#### 7.2.4 Iskut koveralla terälaipalla ruuvia kiristävään suuntaan

Ruuvi kiristettiin 200 Nm:n käsikiristysmomentilla. Heilurijärjestelmään asennettiin toinen 14 kg:n lisäpaino. Iskutestit, joiden tarkoituksena oli haarukoida alue, jolla liitos pyrkii liukumaan, aloitettiin. Liitoksessa havaittiin pientä kiertymää 14 asteen heilahduskulmalla.

Iskutestien aikana huomattiin, että heilurin 30 kg:n lisäpaino raskautti sen poikkeuttamista yhdellä kädellä huomattavasti. Heilurin voima-anturin kiinnitettiin naru, jonka toinen pää sidottiin teräslevyä kiinni pitävään puristimeen. Narun pituutta säätelemällä heiluri saatiin poikkeutettua haluttuun kulmaan. Naru oli säädettävä jokaista kulmaasetusta varten, minkä takia painot oli poistettava heilurista säädön helpottamiseksi.

Ruuvi avattiin ja kiristettiin 200 Nm:n käsikiristysmomentilla. Iskukokeet päätettiin tehdä 12, 14, 16 ja 18 asteen heilahduskulmilla. Riittäväksi iskujen määräksi katsottiin viisi onnistunutta tallennusta jokaista heilahduskulmaa kohden. Ruuvien momentin muutosta havaittiin vasta 18 asteesta lähtien, joten iskukokeita päätettiin jatkaa 20 asteella. Ennen 20 asteen iskukokeita ruuvi avattiin ja kiristettiin 200 Nm:n käsikiristysmomentilla.

20 asteen iskukokeissa terärunkoon iskettiin 10 kertaa, joista 5 iskua tallentui onnistuneesti. Iskukokeet koveralla terälaipalla ruuvia kiristävään suuntaan katsottiin päättyneiksi.

## 8 Jälkikäsitteily

### 8.1 Datan esikäsitteily

Alustavaa tiedonkäsittelyä tehtiin mittausten aikana samalla Linux-pohjaisella tietokoneella, jota käytettiin mittauksissa. Mittausohjelma tallensi jokaisen ruuvin kiristys- ja iskutapahtuman omana tekstitiedostonaan, josta valittiin noin 100 millisekunnin edestä dataa (2000 riviä) Calc-ohjelmaan. Tämän jälkeen tarkistettiin mittausohjelman liipaisun toimivuus ja se, että koko iskutapahtuma oli tallentunut. Jokainen Calc-ohjelmaan siirretty isku tallennettiin omana tiedostonaan ja tiedostoja varten luotiin selkeä kansiorakenne.

Kokeiden jälkeen tiedonkäsittelyä jatkettiin Windows-pohjaisessa Excelissä. Ensimmäisenä oli korjattava kaikki skandaja sisältävät tiedostonimet, joita oli muutama sata kappaletta, koska ne eivät näkyneet Windows-järjestelmässä oikein.

Tasaisen terälaipan ruuvia avaavista iskuista valittavina oli 9,5 asteen ja 10,5 asteen iskukokeet, joissa molemmissa tapahtui kitkaliitoksen kiertymistä. Käsittelyyn päätettiin ottaa 10,5 asteen iskut. Ruuvia kiristävien iskujen kokeista otettiin käsittelyyn 16 asteen kokeet.

Kokeista, jotka tehtiin koveralla terälaipalla, otettiin käsittelyyn ruuvia avaavista iskuista 14 asteen iskut ja ruuvia kiristävästä iskuista 20 asteen iskut.

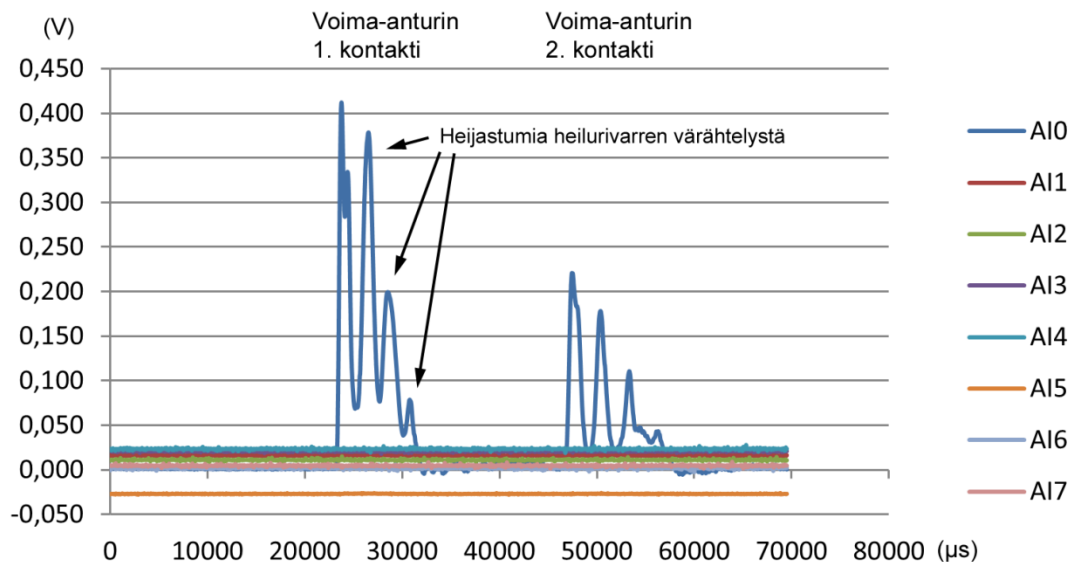
Calc-tiedostojen siirtämisessä Exceliin käytettiin hyväksi paste special -toimintoa, jossa jokaisen mitattavan kanavan informaatiolle luotiin oma sarake. Calc-ohjelman desimaalipisteet oli muutettava pilkuiksi, jotta Excel-ohjelma osaisi tulkita niitä oikein. Taulukossa 1 näkyy raakadataa Exceliin siirrettynä, jossa sarakkeet vasemmalta oikealle: aika mikrosekunteina, R1, L2, R2, L2, kokosilta, L3 ja L4.

Taulukko 1. Raakadataa Excelissä. Vasemmassa sarakkeessa on aika mikrosekunneina, muissa sarakkeissa jännite voltteina. AI0 - AI7 ovat mitattuja kanavia.

t(μs)	AI0	AI1	AI2	AI3	AI4	AI5	AI6	AI7
0	0,001755	0,016251	0,010910	0,020981	0,023727	-0,015106	0,002289	0,004807
48	0,000763	0,016251	0,010986	0,020676	0,023804	-0,015106	0,002060	0,005035
96	0,000076	0,016403	0,010910	0,020676	0,023346	-0,015106	0,002289	0,004959
144	0,001602	0,016403	0,011063	0,020676	0,023422	-0,014725	0,002365	0,004654
192	0,001068	0,016251	0,010834	0,020676	0,023651	-0,015259	0,002975	0,004959
240	0,001373	0,016480	0,010986	0,020599	0,023651	-0,015106	0,002213	0,005264
288	0,000916	0,016174	0,010986	0,020981	0,023422	-0,015183	0,002518	0,005417

Jokainen iskutapahtuma tallennettiin Excelissä omalle välilehdelle ja niistä luotiin käyrät.

Kuviosta 68 voidaan nähdä eräs iskutapahtuma. Kaksi useammasta huipusta muodostunutta käyrää (1. kontakti ja 2. kontakti) ovat syntyneet voima-anturin kosketuksesta terärungon kärkeen. Voima-anturi irtaantuu terärungosta kontaktin 1 ja 2 välillä. Ilmiön syvällisempi ymmärtäminen vaatii laajemmat tiedot värähtelymekaniikasta.



Kuvio 68. Raakadastasta saadut käyrät.

Suurin osa mittauskäyrästä ei sisältänyt 2. kontaktia, koska mittausohjelma lopetti tallennuksen, kun voima-anturista saatava jännite laski alle tietyn kynnyksarvon. Vaakasuorat käyrät välillä -0,050...0,050 V ovat Wheatstone-silloista saatuja arvoja.

Kun kitkaliitos liikahti, tulkittiin se tapahtuneeksi kontaktin 1 aikana. Väitteen perusteena on käytetty ruuvin vääntömomenttia mittaavan kokosillan muutoksia kontaktin 1 aikana ja sitä oletusta, että ruuvin kanta kiertyy aina terärungon mukana. Niissä tuloksissa, joihin oli tallentunut myös 2. kontakti, ei havaittu kokosillassa muutoksia kontaktin 2 aikana.

Kaikki ylimääräinen data poistettiin siten, että vain kontakti 1 jäi jäljelle. Tällä tavoin tutkittavaa tapahtumaa saatiin pienennettyä 100 - 180 millisekuntiin, joka vastaa 200 - 400 riviä dataa iskusuunnasta ja käytetystä terälaipasta riippuen. Ylimääräisen datan poiston aikana oli huolehdittava siitä, että taulukossa oleva aika (taulukko 1, vasen sarake) alkoi arvosta 0.

Tämän jälkeen Exceliin lisättiin kyseistä iskukoesarjaa edeltävä ruuvin kiristystapahtuma. Ruuvin kiristystapahtumasta luotiin käyrät ja kaikkien Wheatstone-siltojen kuormittamattomista jännitteistä tehtiin 40 - 50 peräkkäisen näytteen keskiarvotuksella 0-tilan referenssijännitteet.

Datan käsittelyä jatkettiin muodostamalla normaalivoimasta ja ruuvin taipumasta saadut siltajännitteet.

Neljän ¼-sillan keskiarvojännite eli ruuvin normaalivoimasta aiheutuva liuskajännite:

$$U_N = \frac{U_{R13} + U_{L1} + U_{R23} + U_{L2}}{4} \quad (1)$$

$U_{R13}$  on ¼-sillan R1<sub>3</sub> jännite

$U_{R23}$  on ¼-sillan R2<sub>3</sub> jännite

$U_{L1}$  on ¼-sillan L1 jännite

$U_{L2}$  on ¼-sillan L2 jännite

Ruuvin taipuman aiheuttama jännite liuskatasossa R1-R2:

$$U_{tR1-R2} = \frac{|U_{R13} - U_{R23}|}{2} \quad (2)$$

Ruuvin taipuman aiheuttama jännite liuskatasossa L1-L2:

$$U_{tL1-L2} = \frac{|U_{L1} - U_{L2}|}{2} \quad (3)$$

Ruuvien taipumasta aiheutuva resultanttijännite:

$$U_t = \sqrt{U_{tR1-R2}^2 + U_{tL1-L2}^2} \quad (4)$$

## 8.2 Laskukaavat

Tarkastellaan Wheatstone-siltayhtälöä.

$$U_A = \frac{1}{4} \cdot U_E \cdot k(\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (5)$$

1/4-siltakytkennässä aktiiviliuskan venymä edustaa yhtälössä termiä  $\varepsilon_1$ . Täydennysvas-  
tuksina toimivien liuskojen venymät  $\varepsilon_2$ ,  $\varepsilon_3$  ja  $\varepsilon_4$  saavat arvon 0, koska niihin ei kohdis-  
tu rasituksia. 1/4-sillan yhtälö supistuu muotoon

$$U_A = \frac{1}{4} \cdot U_E \cdot k \cdot \varepsilon_1 \quad (6)$$

$k$  on liuskavakio

Tämän jälkeen päästiin käsiksi ruuvien ja terärungon jännityksiin, venymiin, taivutus-  
momentteihin ja voimiin.

Ruuvien normaalivoiman aiheuttama venymä keskiarvojännitteen  $U_N$  (yhtälö 1) mukaan:

$$\varepsilon_N = \frac{4 \cdot U_N}{U_E \cdot k} \quad (7)$$

Ruuvien normaalijännitys:

$$\sigma_N = \varepsilon_N \cdot E \quad (8)$$

Ruuvien normaalivoima:

$$N = \sigma_N \cdot A \quad (9)$$

$A$  on ruuvien poikkipinta-ala liuskojen kohdalla

Ruuvien taipumasta aiheutuva venymä maksimaalisen taivutusmomentin tasossa:

$$\varepsilon_t = \frac{4 \cdot U_t}{U_E \cdot k} \quad (10)$$

Ruuvien taivutusjännitys:

$$\sigma_t = \varepsilon_t \cdot E \quad (11)$$

Ruuvien taivutusvastus:

$$W_t = \frac{\pi \cdot d^3}{32} \quad (12)$$

$d$  on ruuvien halkaisija liuskojen kohdalla

Ruuvien taivutusmomentti:

$$M_t = \sigma_t \cdot W_t \quad (13)$$

Lasketaan ruuvien maksiminormaalijännitys, joka saadaan yhdistämällä vedosta ja taivutuksesta syntyvät normaalijännitykset maksimaalisen taivutusmomentin tasossa:

$$\sigma_{max} = \sigma_N + \sigma_t \quad (14)$$

Terärungon ruuvireiän tangentialivenymä 1/4-sillalle L3:

$$\varepsilon_{tang L3} = \frac{4 \cdot U_{L3}}{U_E \cdot k} \quad (15)$$

$U_{L3}$  on 1/4-sillan L3 jännite

Terärungon ruuvireiän tangentialivenymä 1/4-sillalle L4:

$$\varepsilon_{tang L4} = \frac{4 \cdot U_{L4}}{U_E \cdot k} \quad (16)$$

$U_{L4}$  on 1/4-sillan L4 jännite

Terärungon ruuvireiän tangentin suuntainen jännitys liuskalle L3:

$$\sigma_{tang L3} = \varepsilon_{tang L3} \cdot E \quad (17)$$

Terärungon ruuvireiän tangentin suuntainen jännitys liuskalle L4:

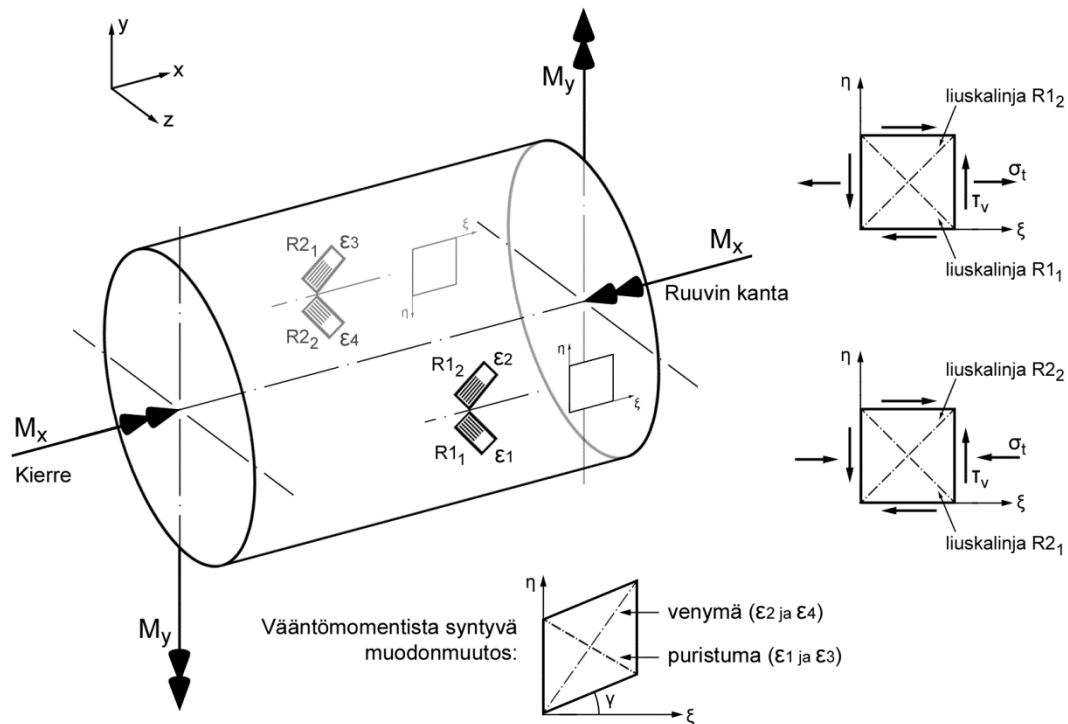
$$\sigma_{tang L4} = \varepsilon_{tang L4} \cdot E \quad (18)$$

Ruuvien vääntömomenttia mittaavassa kokosillassa kaikki vastukset mittaavat venymiä, joten voimassa on yhtälö

$$U_A = \frac{1}{4} \cdot U_E \cdot k(\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (19)$$

Tarkastellaan väännön ja taivutuksen aiheuttamaa muutosta jokaisessa liuskassa. Venymäalkion lävistäjät ovat samansuuntaisia ruuvissa olevien, kokosiltaan kytkettyjen liuskojen kanssa, joten ne kuvaavat suoraan liuskojen venymiä. Kun akseliin kohdistuu kuvion 69 mukainen vääntö, syntyy venymäalkioon liukukulma  $\gamma$ . Lävistäjien  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$ ,  $\varepsilon_3$

ja  $\varepsilon_4$  pituudet muuttuvat kuvion mukaisesti. Lisäksi liuskoihin  $R_{1_1}$  ja  $R_{1_2}$  syntyy venymää ja liuskoihin  $R_{2_1}$  ja  $R_{2_2}$  puristumaa y-akselin suhteen taivuttavasta voimasta.



Kuvio 69. Akseli väännön ja taivutuksen alaisena.

Kuvion 69 venymäalkioista voidaan havaita, että venymät  $\varepsilon_1$  sekä  $\varepsilon_3$  ovat negatiivisia ja venymät  $\varepsilon_2$  sekä  $\varepsilon_4$  positiivisia. Huomioidaan venymien etumerkit ja lisätään ne yhtälöön 19. Saadaan:

$$U_A = \frac{1}{4} \cdot U_E \cdot k [(-\varepsilon_1) - (\varepsilon_2) + (-\varepsilon_3) - (\varepsilon_4)] \quad (20)$$

Taivutuksen aiheuttamat venymät  $\varepsilon_{1_{My}}$  ja  $\varepsilon_{2_{My}}$  ovat positiivisia ja venymät  $\varepsilon_{3_{My}}$  ja  $\varepsilon_{4_{My}}$  negatiivisia. Lisätään ne yhtälöön 20:

$$U_A = \frac{1}{4} \cdot U_E \cdot k [(-\varepsilon_1 + \varepsilon_{1_{My}}) - (\varepsilon_2 + \varepsilon_{2_{My}}) + (-\varepsilon_3 - \varepsilon_{3_{My}}) - (\varepsilon_4 - \varepsilon_{4_{My}})] \quad (21)$$

Venymät  $\varepsilon_{1_{My}}$ ,  $\varepsilon_{2_{My}}$ ,  $\varepsilon_{3_{My}}$  ja  $\varepsilon_{4_{My}}$  ovat itseisarvoltaan yhtä suuret. Kokosillan kytkentä kompensoi taivutuksen vaikutusta, kohdistui taivuttava voima ruuviin yz-tasossa mistä suunnasta tahansa. Momentit supistuvat pois:

$$U_A = \frac{1}{4} \cdot U_E \cdot k (-\varepsilon_1 - \varepsilon_2 - \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (22)$$

Todetaan että  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \varepsilon_4 = 4\varepsilon = \sum_{i=1}^4 \varepsilon_i$ . Yhtälö supistuu muotoon

$$U_A = k \cdot (-\varepsilon) \cdot U_E \quad (23)$$

Vääntöjännitysytälö:

$$\tau = \frac{\varepsilon \cdot E}{(1+\nu)} \quad (24)$$

Vääntövastus:

$$W_V = \frac{\pi \cdot d^3}{16} \quad (25)$$

Vääntömomentin kaava:

$$T = \tau \cdot W_V \quad (26)$$

Yhdistetään yhtälöt 24 ja 26:

$$T = \frac{\varepsilon \cdot E \cdot W_V}{(1+\nu)} \quad (27)$$

Yhdistetään yhtälö 23 yhtälöön 27 ( $\varepsilon$ :sta otetaan itseisarvo):

$$T = \frac{U_A \cdot E \cdot W_V}{U_E \cdot k(1+\nu)} \quad (28)$$

Väännöstä aiheutuva leikkausjännitys:

$$\tau = \frac{T}{W_V} \quad (29)$$

Vertailujännitys (Von Mises):

$$\sigma_{vert} = \sqrt{\sigma_{max}^2 + 3 \cdot \tau^2} \quad (30)$$

Voima-anturin voima:

$$F_{anturi} = 24000 \cdot U_{anturi} \quad (31)$$

$U_{anturi}$  on voima-anturista saatava jännite

Kitkaliitoksen kiertymä:

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{x}{l_{\text{taulu}}}\right) \quad (32)$$

$\alpha$  on kitkaliitoksen kiertymä asteina

$x$  on säteen liikkuma matka taululla

$l_{\text{taulu}}$  on taulun kohtisuora etäisyys ruuvin pituusakselista

Lasersäteen liikkuma matka taululla mitattiin tulostetuista valokuvista, joissa taulun 50 mm:n ruudukko toimi referenssimittana.

Voima-anturin terärungon ruuviliitokseen kohdistama impulssimomentti:

$$M_{\text{imp}} = \int_0^t F_{\text{anturi}}(t) \cdot r \, dt \quad (33)$$

$r$  on iskuvasaran heiluriradan etäisyys ruuvin pituusakselista

$t$  on aika, jonka aikana liikahduksen katsotaan tapahtuneen

Liikahdukseen tarvittava impulssimomentti laskettiin sen momenttikäyrän pinta-alasta, jonka aikana liikahduksen katsottiin tapahtuneen. Liikahdus tapahtui tasaisella terälai-palla 1 - 2 millisekunnin aikana. Koveralla terälai-palla tapahtuva liikahdus oli epämää-räisempi ja liikkeen alkamis- ja loppumiskohta oli huomattavasti hankalampi määrittää, mikä johti suurempaan impulssimomentin arvoon. Kaikkiin impulssimomentin arvoihin on syytä suhtautua varauksin.

Impulssimomentti laskettiin MathCad-ohjelmassa muodostamalla ensin mittauspisteistä lineaarinen interpolaatiopolynomi Ispline-funktiolla ja sen jälkeen integroimalla sen ra-jaama pinta-ala.

## 9 Tulokset

Tuloksia ei voida näyttää; sisältää luottamuksellista tietoa.

## 10 Yhteenveto

Tämän insinööriyön tarkoituksena oli selvittää Valon Koneen rakentaman Super-rotatiokuorimakoneen VK480S-7 terärungon 1-ruuviliitoksen käyttäytymistä iskumais-ten kuormitusten alaisena. Kyseistä konetta on rakennettu vain yksi kappale. Koeko-noon osia käytettiin insinööriyön mittauskohteina.

Työssä tarkasteltiin ensisijaisesti sitä, millä iskuenergialla ruuvilla kiinnitetyn terärungon ja terälaipan välinen kitkaliitos alkaa luistaa. Kokeet tehtiin sekä tasaisella että koveral-la terälaipalla.

Mittaukset tehtiin venymäliuskoilla, joilla selvitettiin M36\*4-ruuvissa ja terärungon ruu-vireiässä esiintyvät jännitykset kuormituskokeiden aikana. Kuormituskokeiden lisäksi ruuville haluttiin löytää oikea kiristysmomentti ja selvittää kiristetyn ruuvin aiheuttamat terärungon ruuvireiän tangentiaali-jännitykset.

Kitkaliitoksen kiertymää mitattiin kuormituskokeiden aikana terärunkoon kiinnitetyllä peilillä, jonka kautta lasersäde heijastettiin fläppitaululle. Terärungon ja terälaipan vä-listä kitkaliitosta kuormitettiin lyömällä terärungon kärkeen siltanosturiin kiinnitetyllä heilurivasaralla sekä ruuvia avaavaan että ruuvia kiristävään suuntaan.

Työhön kuului mittausten lisäksi sekä kuormituskehän ja siihen tarvittavien lisäosien suunnittelu että mitattavien osien muutostöiden suunnitelmat venymäliuskojen asen-nusta varten.

Terärungon kiertymän mittaus esitettiin alun perin tehtäväksi venymäliuskamittaukse-na. Käytännöllisemmäksi tavaksi osoittautui kuitenkin mittaus laserilla, minkä ansiosta mittauslaitteistosta vapautui yksi kanava käyttöön terärunkoa varten.

Ensimmäisessä M36\*4-ruuvien kiristyskokeissa tuli esille ruuvien voimakasta taipumaa. Koulussa ja Valon Koneella tehtyjen mittausten perusteella terärungon kitkapinta ja ruuvien kantaan koskettava pinta eivät olleet yhdensuuntaisia. Terärunko korjattiin Va-lon Koneella. Tästä huolimatta ruuvien kiristyksissä esiintyi edelleen voimakasta taipu-maa, mikä oli voimakkainta koveralla terälaipalla.

Taipumasta johtuen ruuvissa 1 käytetty 250 Nm:n käsikiristysmomentti aiheutti ruuvimateriaalin myötörajan ylityksen pelkästään ruuvimateriaalista venymää mittaavilla liuskoilla. Ruuvilla 2 kiristysaikaan saatu vertailujännitys tasaisella terälaipalla ylitti suositellun 90 %:n myötörajan (vertailujännitykset noin 775 - 790 MPa) lievästi 200 Nm:n käsikiristysmomentilla. Koveralla terälaipalla vertailujännitykset olivat luokkaa 800 - 850 MPa.

Tulostenlaskentaan valittiin seuraavat iskukokeet:

- Tasainen terälaippa: 10,5 asteen iskut ruuvia avaavaan suuntaan
- Tasainen terälaippa: 16 asteen iskut ruuvia kiristävään suuntaan
- Kovera terälaippa: 14 asteen iskut ruuvia avaavaan suuntaan; heilurissa käytettiin 14 kg:n lisäpainoa
- Kovera terälaippa: 20 asteen iskut ruuvia kiristävään suuntaan; heilurissa käytettiin kahta 14 kg:n lisäpainoa

Tasaisella terälaipalla, iskettäessä ruuvia avaavaan suuntaan, kitkaliitoksen kiertymiseen tarvittavalla iskuenergialla oli selkeä kynnysarvo. Huomattavaa oli, että liitos ei liikahtanut heti ensimmäisellä iskulla, vaan iskuilla 6 - 10.

Liitoksen kiertymisen aiheuttavan kriittisen heilahduskulman määrittäminen oli koveralla terälaipalla huomattavasti vaikeampaa, koska pientä kiertymistä tapahtui myös tulostenkäsittelyyn valittuja kokeita pienemmillä heilahduskulmilla. Tulostenkäsittelyyn valittiin ne iskukokeet, joilla saavutettiin riittävän suuria muutoksia ruuvimateriaalin väntömomenttia mittaavassa kokosillassa.

Kitkaliitoksen kiertymiseen vaadittava impulssimomentti laskettiin tasaisella terälaipalla momenttikäyrän sen huipun rajaamasta pinta-alasta, jonka aikana liikahtuksen katsottiin tapahtuneen. Ajallisesti tämä vastaa noin 2000 mikrosekuntia ( $\mu\text{s}$ ). Todellisuudessa liikahtus tapahtui noin 1000  $\mu\text{s}$ :n aikana. 16 asteen kokeissa ruuvia kiristävään suuntaan kokeita ei jatkettu niin pitkälle, että liukumisraja olisi saavutettu, koska tässä vaiheessa oli selvää, että iskettäessä ruuvia kiristävään suuntaan, liitoksessa saavutetaan suurempi impulssimomentin sietokyky.

Koveran terälaipan iskukokeissa ruuvien vääntömomenttia mittaavan kokosillan perusteella liikeyhdistyksen alkamis- ja loppumiskohta oli vaikeampi määrittää. 14 asteen kokeissa ruuvia avaavaan suuntaan liikeyhdistyksen katsottiin tapahtuneen kerralla, mutta hieman pidemmällä aikavälillä kuin tasaisella terälaipalla. Koveralla terälaipalla tapahtui ruuvien vääntömomenttia mittaavan kokosillan perusteella enemmän materiaalin myötämistä, mikä hankaloitti osaltaan liikeyhdistyksen alku- ja loppumisajankohdan määrittelyä. Impulssimomentin laskemiseen käytettiin kahden ensimmäisen iskun aikana voima-anturin momenttikäyrän 2. huipun rajaamaa pinta-alaa. Loput impulssimomenteista laskettiin 1. huipusta.

Koveran terälaipan 20 asteen iskujen tuloksista ruuvia kiristävään suuntaan oli havaittavissa se, että liikeyhdistys ei tapahtunut kerralla, vaan se jakaantui kahteen osaan, joista jälkimmäinen oli selkein. Ensimmäinen, hyvin heikko liikeyhdistys, ajoittui voima-anturin momenttikäyrän ensimmäiselle huipulle. Näiden kahden liikeyhdistyksen välillä oli noin 3000 - 4000  $\mu$ s:n pituinen ajanjakso, jonka aikana ei havaittu kiertymistä. Impulssimomentti laskettiin kuitenkin ottamalla mukaan tämä 3000 - 4000  $\mu$ s:n pituinen ajanjakso, joka johti huomattavasti todellista suurempaan impulssimomentin arvoon.

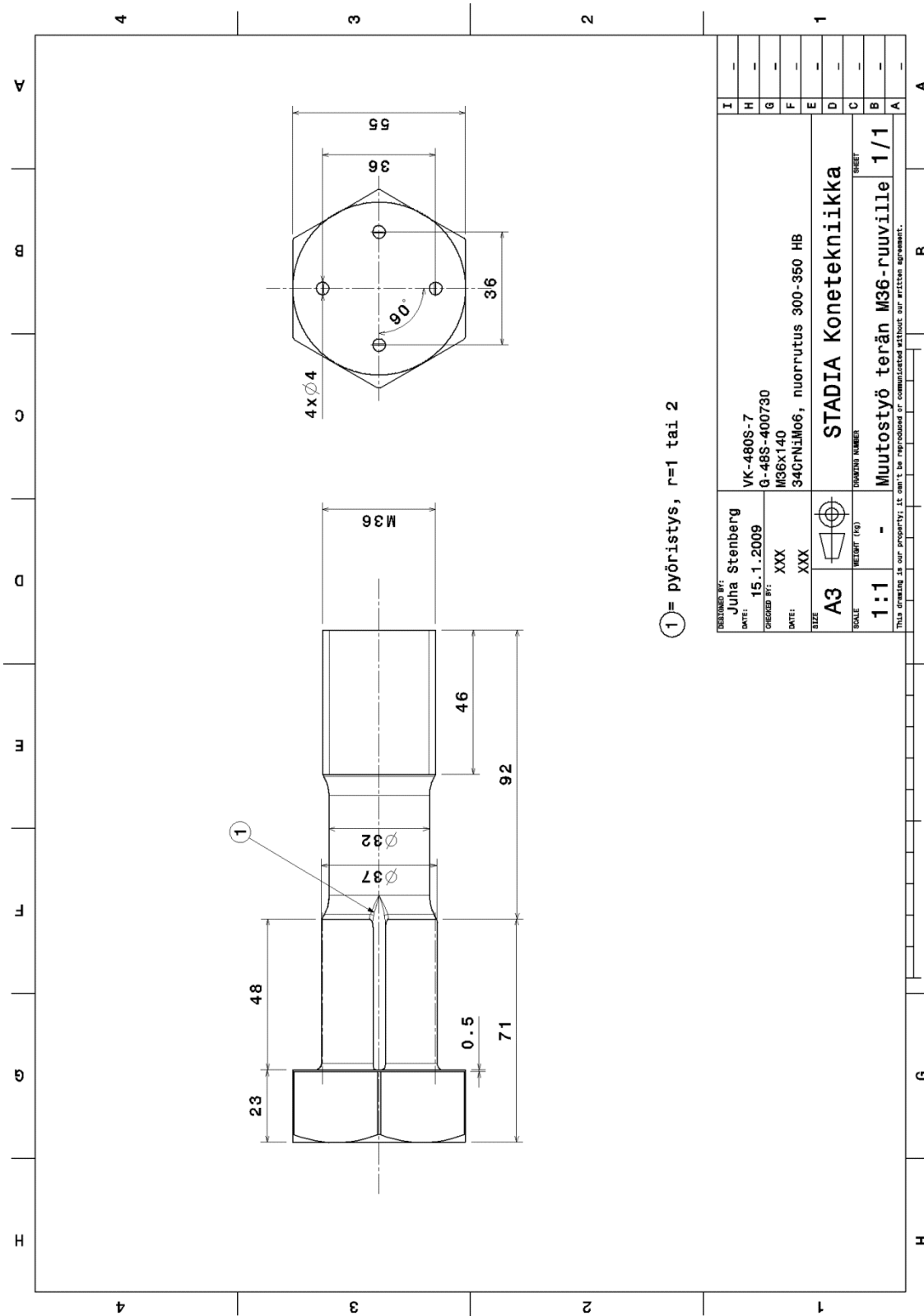
Tulosten perusteella koveralla terälaipalla saadaan tasaista terälaippaa parempi kitkaliitoksen pitävyys. Kiristetyn ruuvien kantaan jäävä vääntömomentti pyrkii osaltaan kiertämään kitkaliitosta, mikä madaltaa kriittiseen liukumisrajaan tarvittavaa impulssimomenttia, kun terärunkoon isketään ruuvia avaavaan suuntaan. Iskettäessä ruuvia kiristävään suuntaan on ruuvien kantaan jäävällä vääntömomentilla päinvastainen vaikutus. Mikäli liitoksen impulssimomentin sietokykyä halutaan kasvattaa, voidaan se tehdä esimerkiksi ruuvien kierteen kätisyttä vaihtamalla.

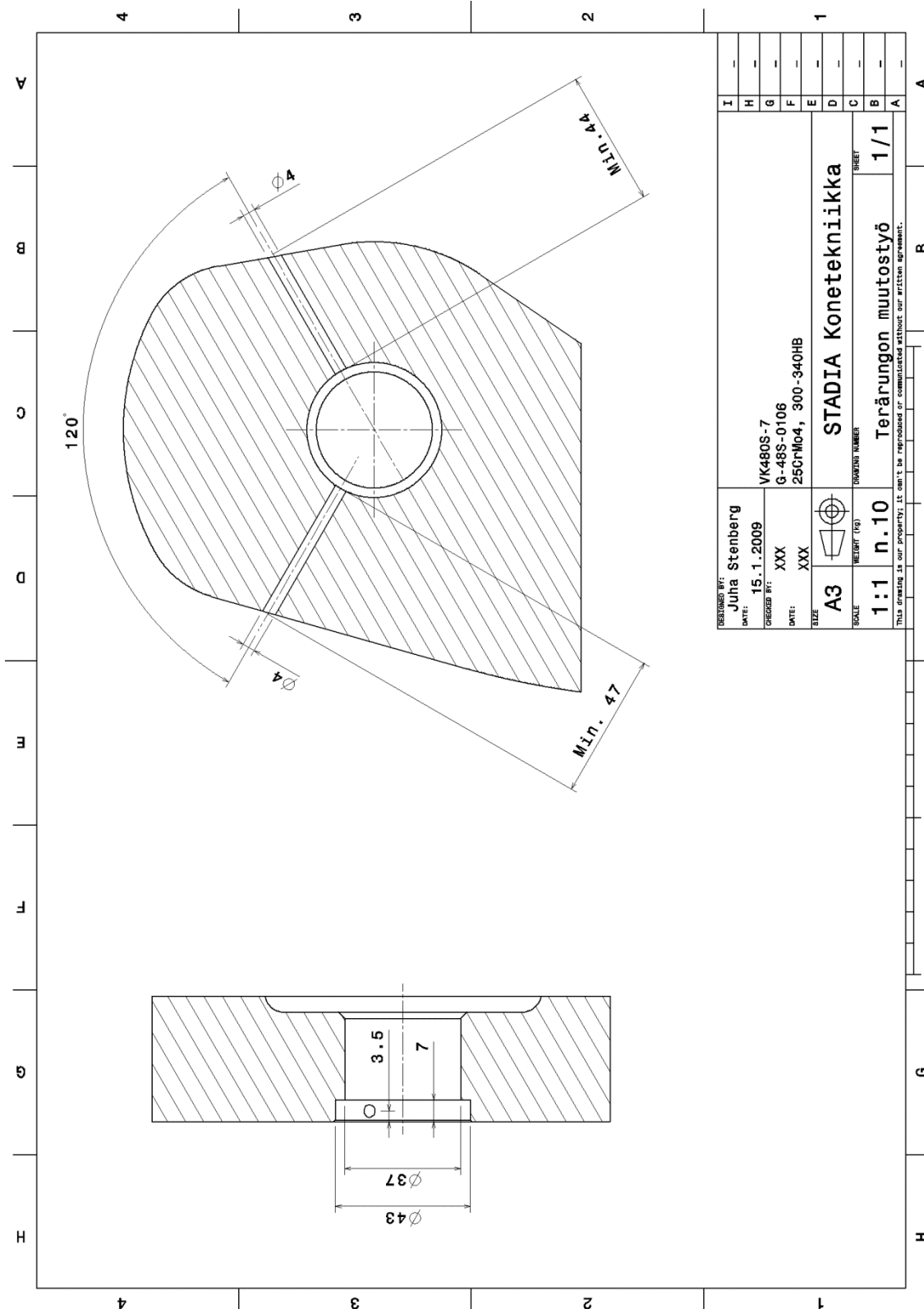
Terärungon ruuvireiän tangentiaalijännityksiksi saatiin koveralla terälaipalla tasaiseen terälaippaan verrattuna yli kaksi kertaa suurempia arvoja. Tämän lisäksi liuskojen väliset suhteelliset jännityserot olivat selvästi pienempiä kuin tasaisella terälaipalla, jossa laipan pinnalla, arviolta muutamaa kymmentä mikrometriä muuta pintaa korkeammalla oleva kohta on saattanut olla syynä suurille liuskojen välisille jännityseroille.

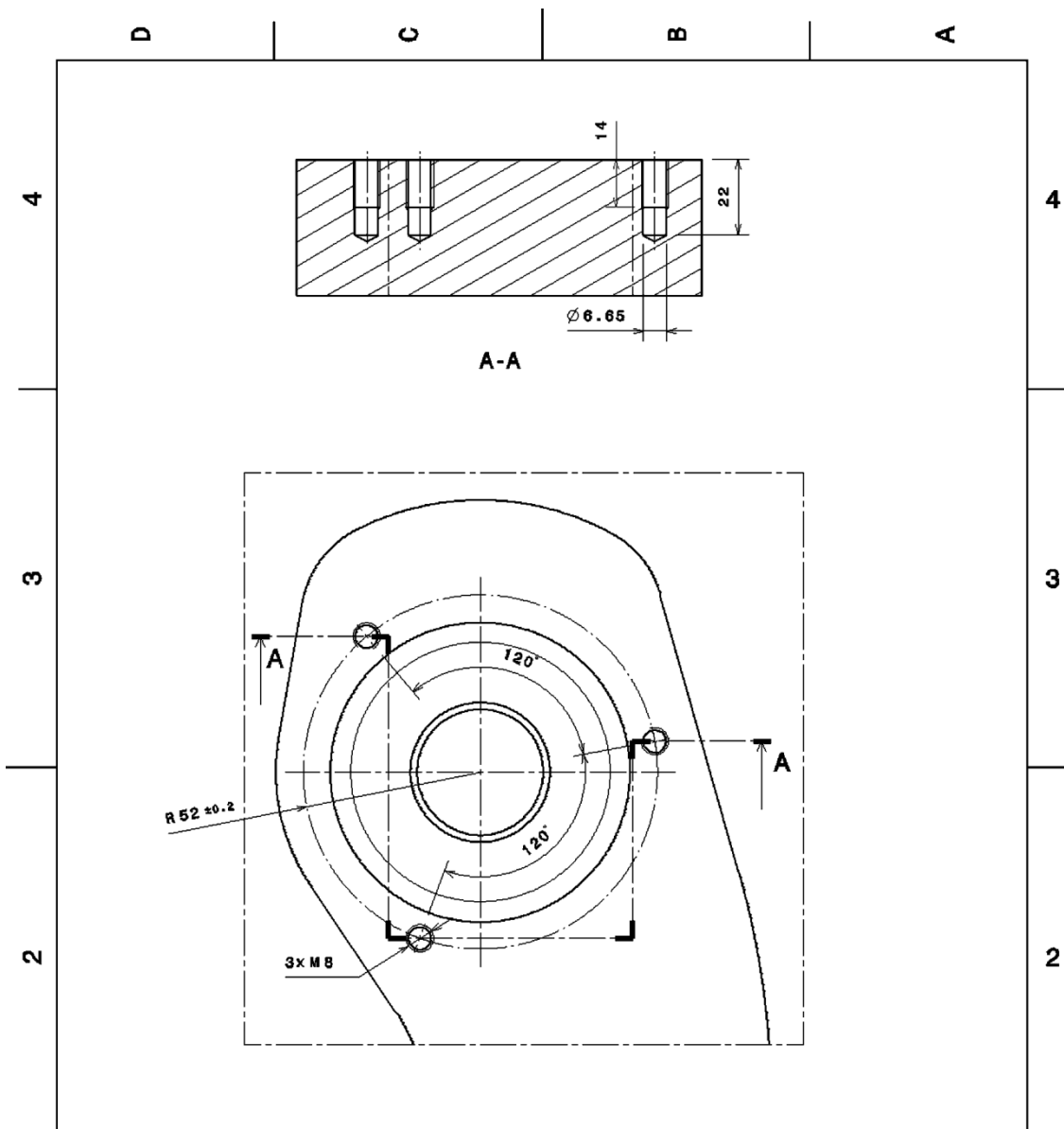
## Lähteet

- 1 Valon Koneen esite
- 2 Strain Gage instruction Manual. Moniste. Kyowa. Luettu 2009
- 3 How strain gages work? PDF-dokumentti. Kyowa. < <http://www.kyowa-ei.co.jp/english/products/gages/pdf/howsgw.pdf>> Luettu 2010
- 4 What is a strain gage? 2005. PDF-dokumentti. Kyowa. <<http://www.kyowa-ei.co.jp/english/pdf/whats.pdf>>. Maaliskuu 2005. Luettu 2010.
- 5 Airila, Ekman, Hautala ym. 1997, Koneenosien suunnittelu. WSOY

Ruuvín, terärungon ja testauskehän osien piirustukset



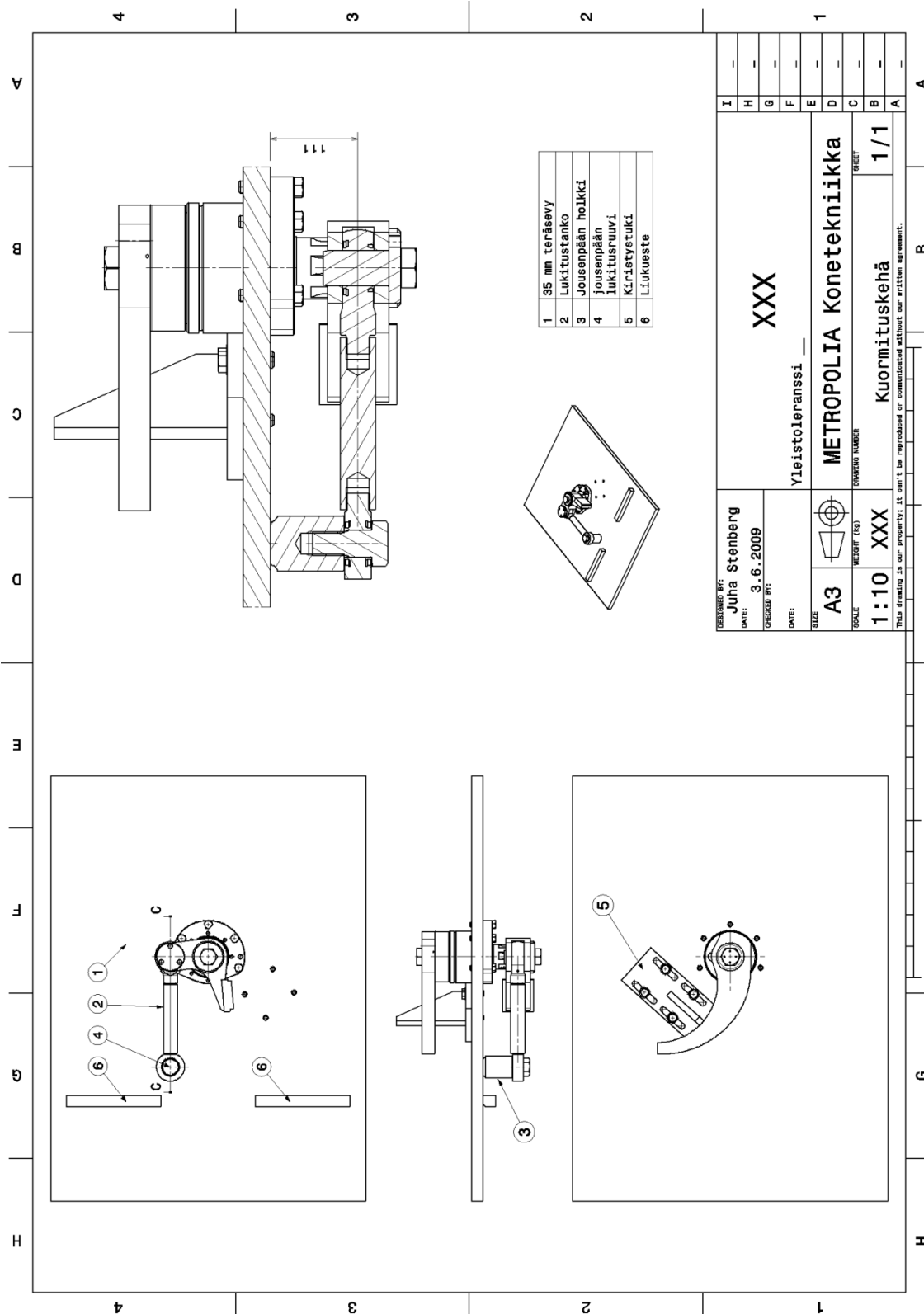


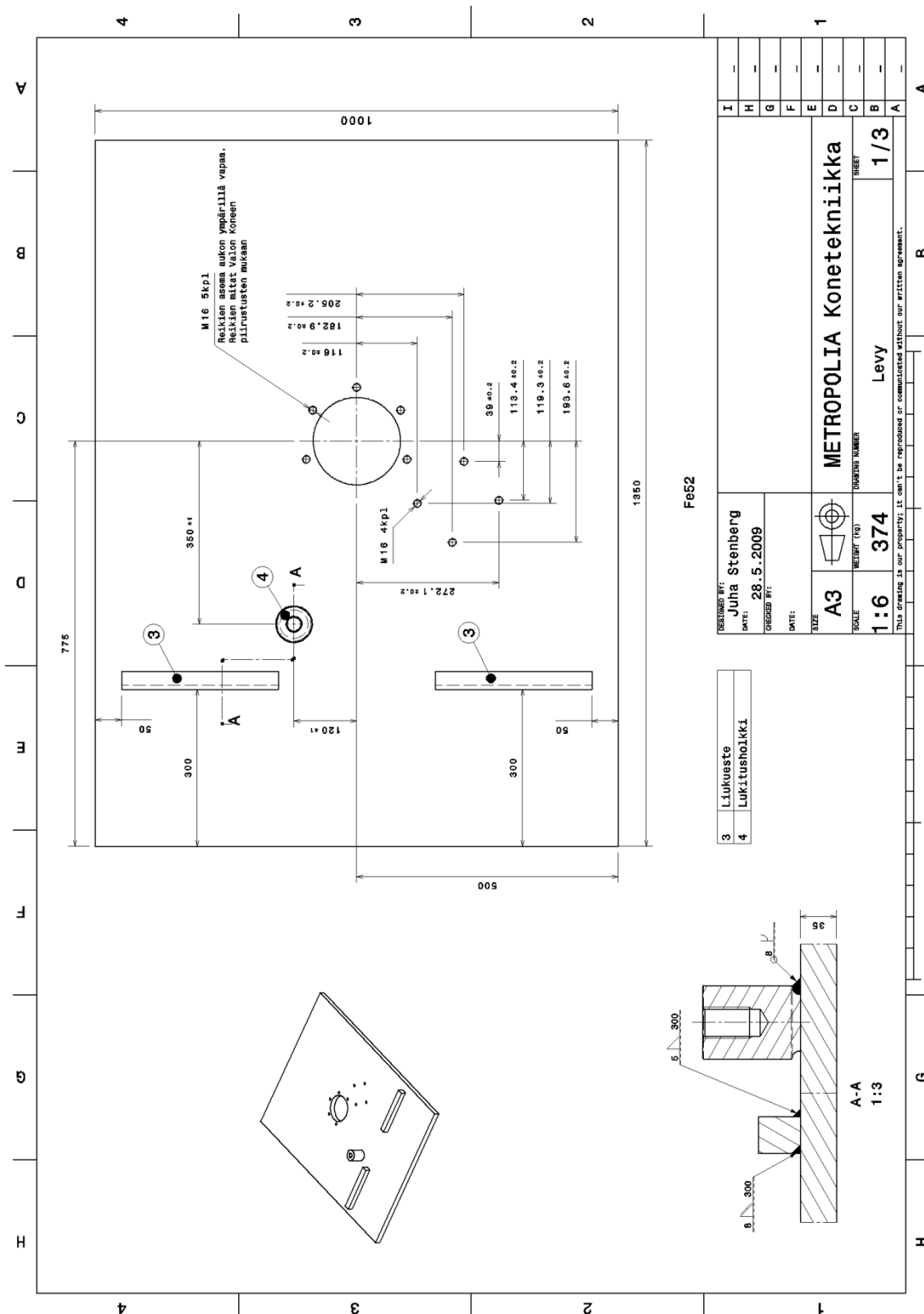


Osa	Piir.nro	Nimitys	Standardi	Muoto,Malli	Laatu	Kpl
DESIGNED BY:	m0501651					I -
DATE:	23.6.2009					H -
CHECKED BY:						G -
DATE:		Yleistoleranssi _				F -
SIZE	A4	STADIA Konetekniikka				E -
SCALE	2:3					
WEIGHT (kg)	12,04	DRAWING NUMBER		SHEET		C -
Peilikiinntyyksen ruuvireiät					1/1	B -
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.						A -

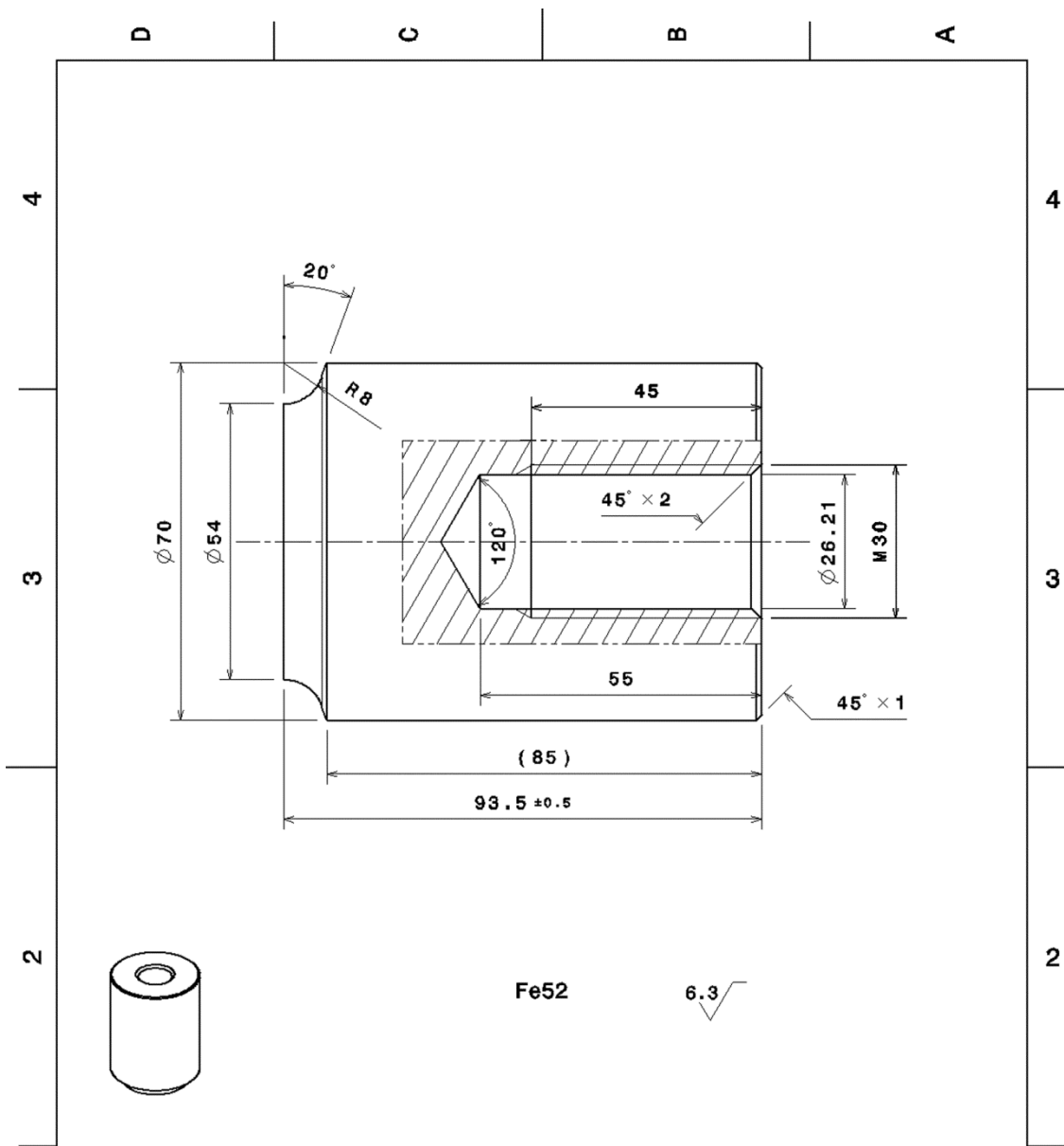
D

A



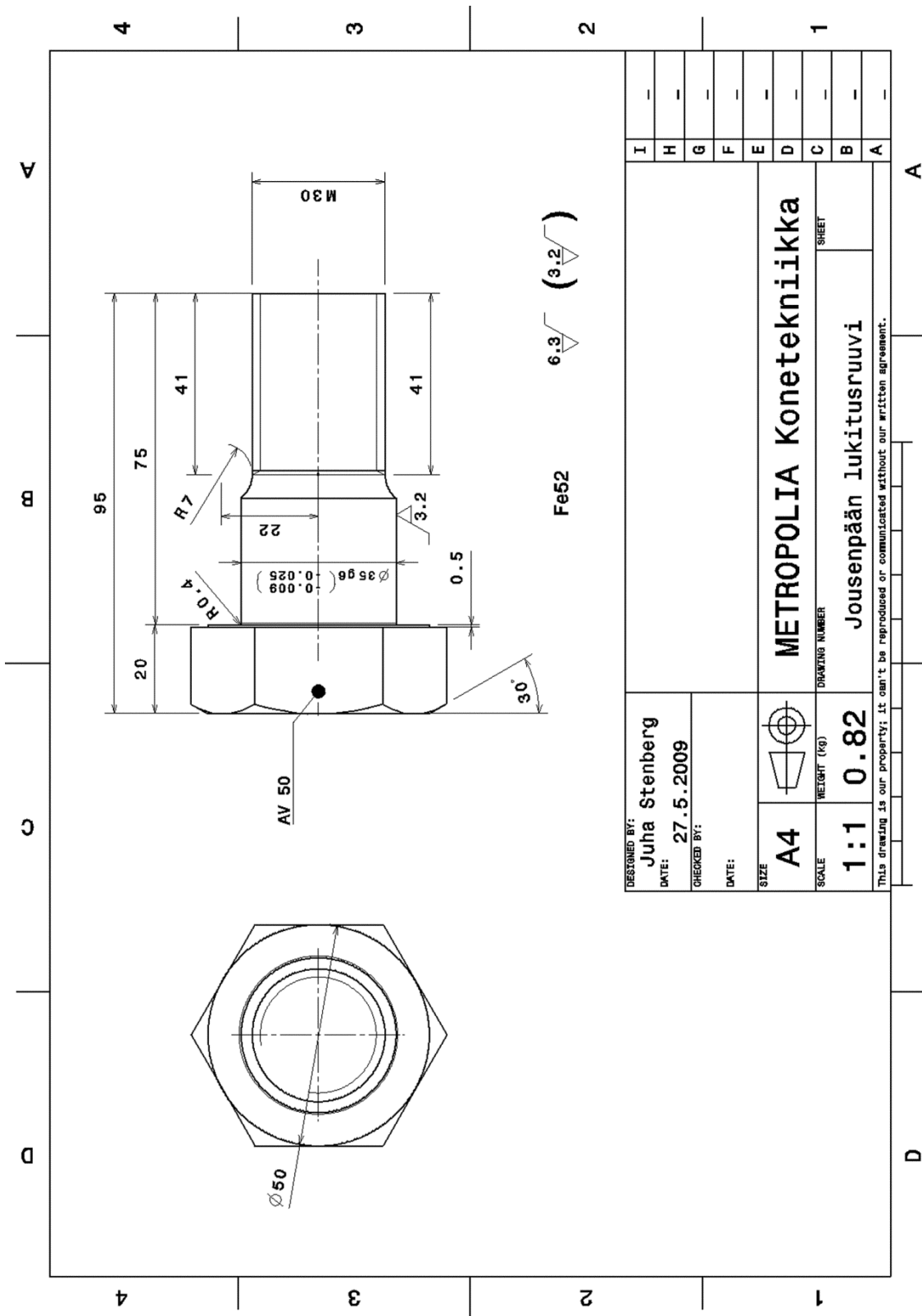


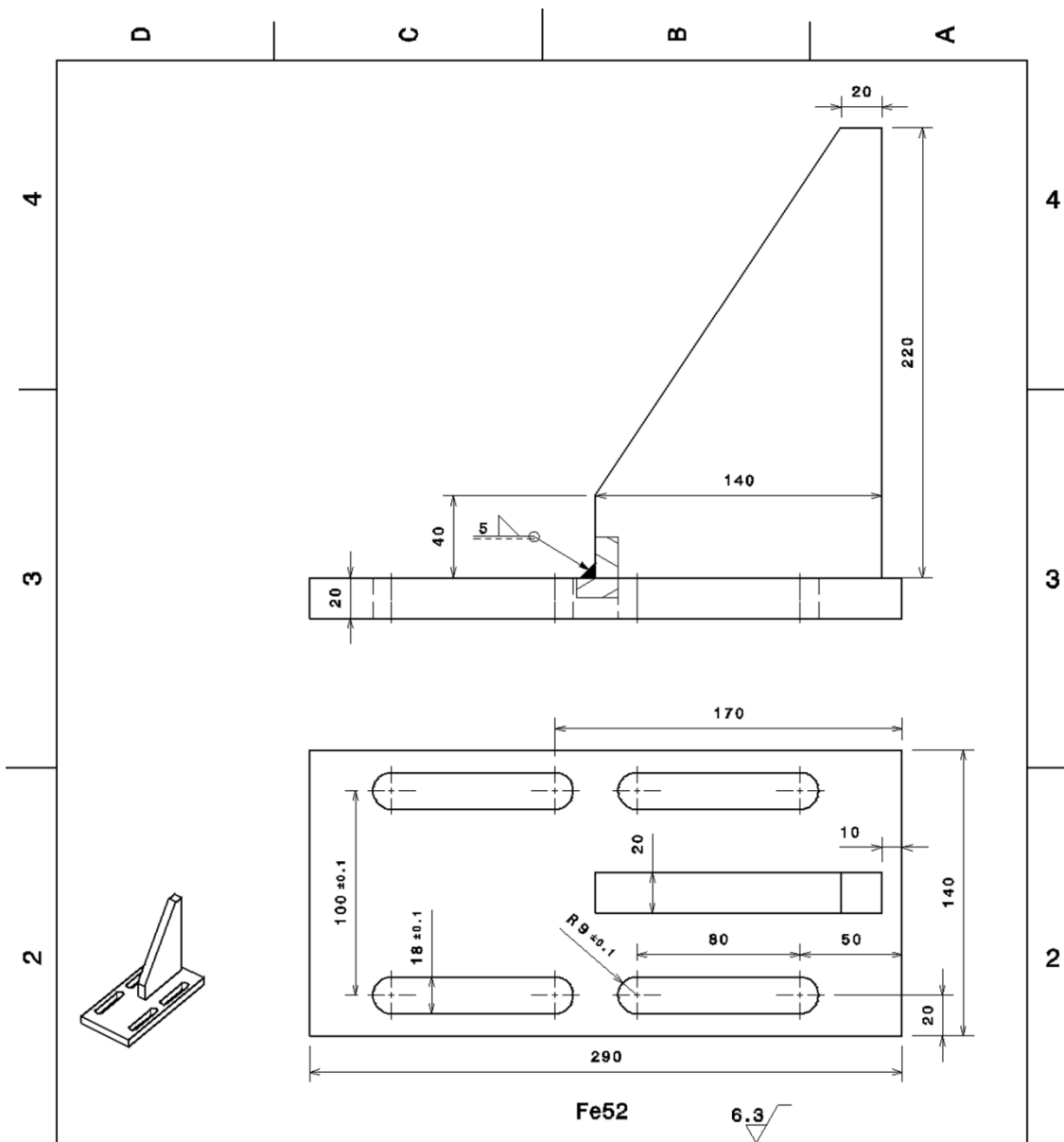




DESIGNED BY: <b>Juha Stenberg</b>				I	-
DATE: <b>27.5.2009</b>				H	-
CHECKED BY:				G	-
DATE:				F	-
SIZE		<b>METROPOLIA Konetekniikka</b>		E	-
<b>A4</b>				D	-
SCALE	WEIGHT (kg)	DRAWING NUMBER	SHEET	C	-
<b>1:1</b>	<b>3.4</b>	<b>Lukitusholkki</b>	<b>3/3</b>	B	-
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.					
				A	-

D A





DESIGNED BY:  
**Juha Stenberg**  
DATE:  
**28.5.2009**

CHECKED BY:  
DATE:

SIZE  
**A4**

SCALE  
**2:5**

WEIGHT (kg)  
**8,24**

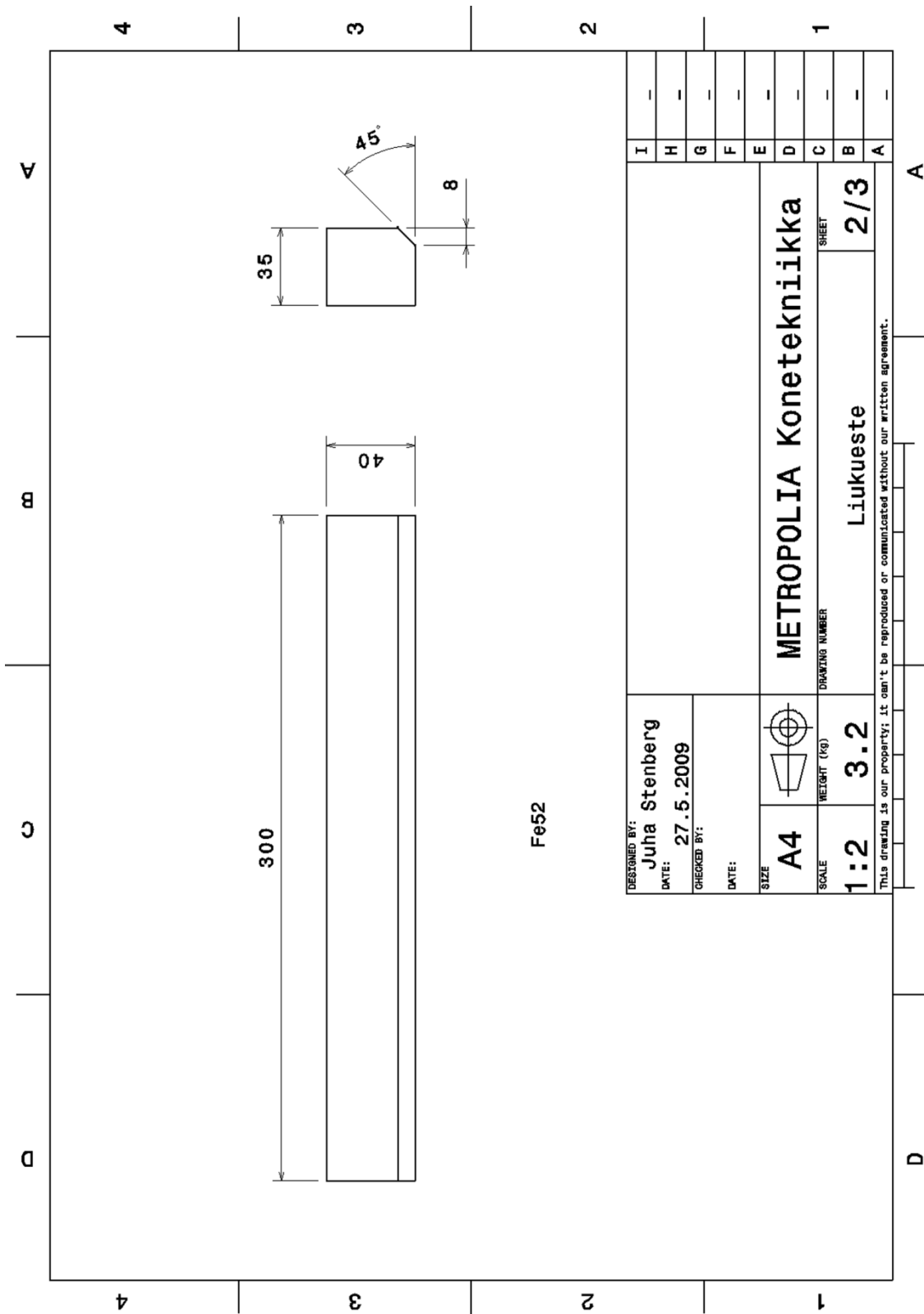
DRAWING NUMBER  
**METROPOLIA Konetekniikka**

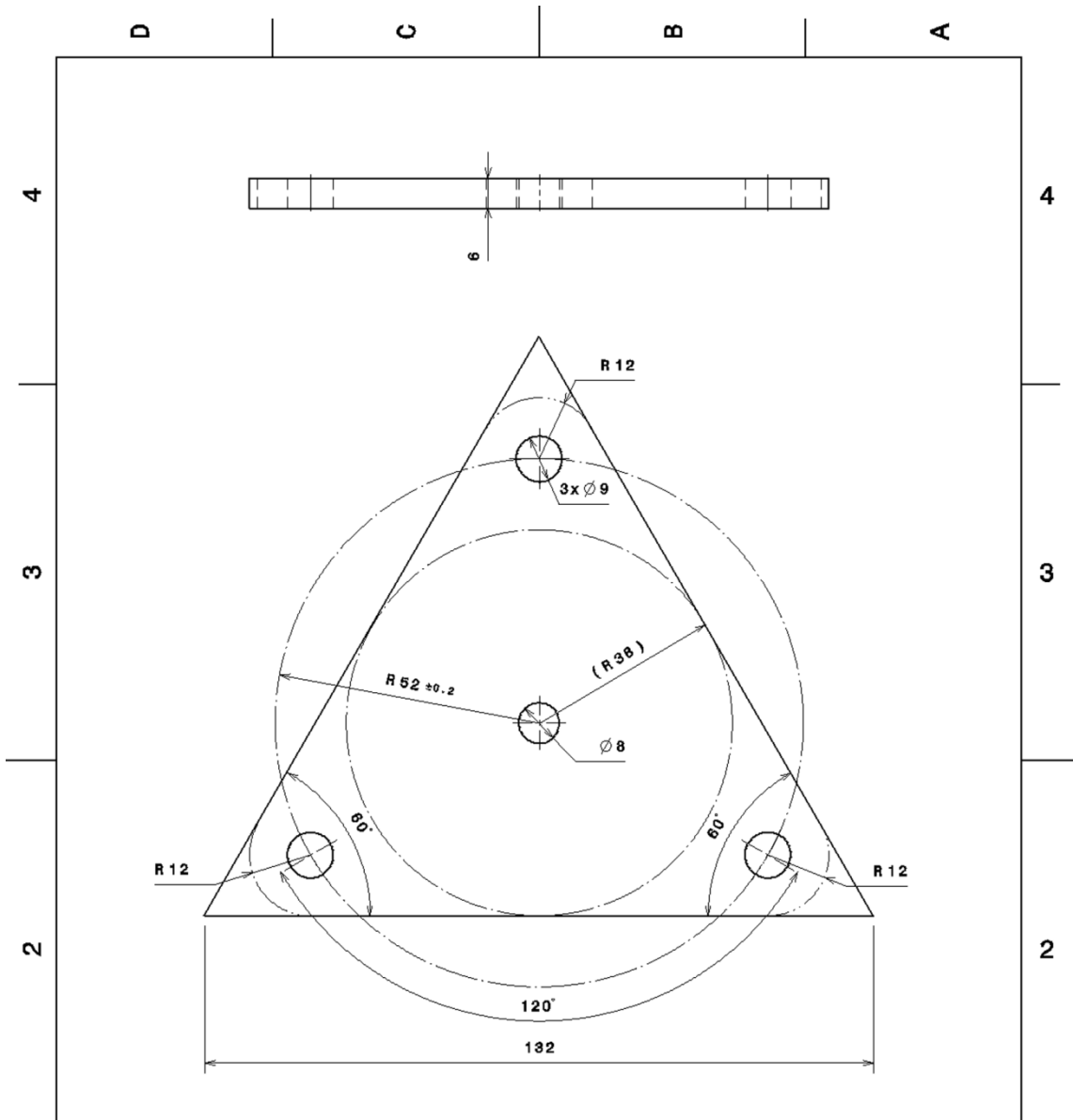
SHEET  
**Kiristystuki**

I	-
H	-
G	-
F	-
E	-
D	-
C	-
B	-
A	-

This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.

D A

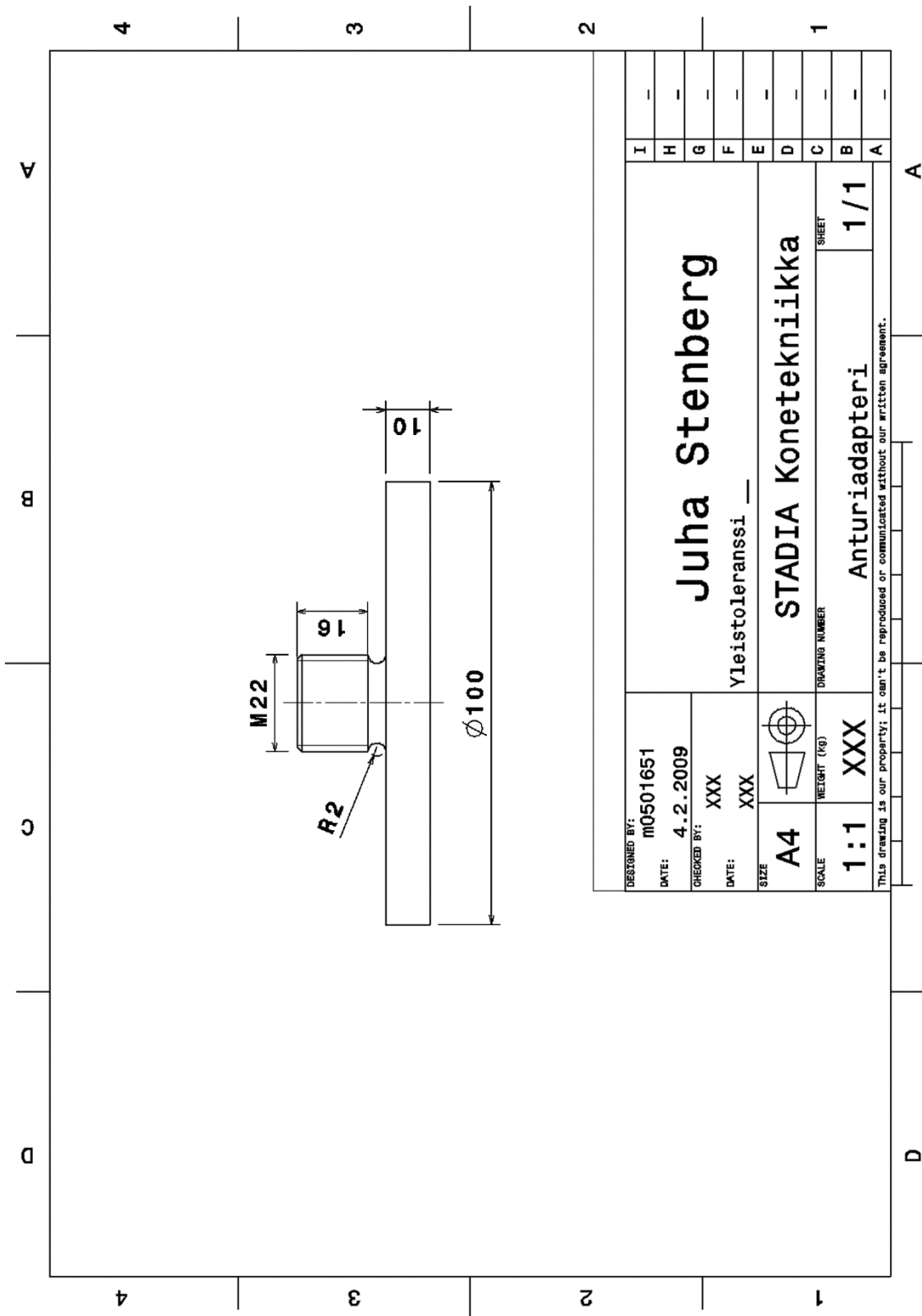




Osa	Piir.nro	Nimitys	Standardi	Muoto, Malli	Laatu	Kpl																		
DESIGNED BY: <b>Juha Stenberg</b>		Yleistoleranssi _	<table border="1"> <tr><td>I</td><td>-</td></tr> <tr><td>H</td><td>-</td></tr> <tr><td>G</td><td>-</td></tr> <tr><td>F</td><td>-</td></tr> <tr><td>E</td><td>-</td></tr> <tr><td>D</td><td>-</td></tr> <tr><td>C</td><td>-</td></tr> <tr><td>B</td><td>-</td></tr> <tr><td>A</td><td>-</td></tr> </table>				I	-	H	-	G	-	F	-	E	-	D	-	C	-	B	-	A	-
I	-																							
H	-																							
G	-																							
F	-																							
E	-																							
D	-																							
C	-																							
B	-																							
A	-																							
DATE: <b>17.6.2009</b>																								
CHECKED BY:																								
DATE:																								
SIZE <b>A4</b>		<b>STADIA Konetekniikka</b>		<b>1/1</b>																				
SCALE <b>1:1</b>	WEIGHT (kg) <b>0,28</b>																							
DRAWING NUMBER <b>Peilin alusta</b>		SHEET																						
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.																								

D

A



DESIGNED BY: m0501651	<b>Juha Stenberg</b>		I	-	
DATE: 4.2.2009			H	-	
CHECKED BY: XXX	Yleistoleranssi —		G	-	
DATE: XXX			F	-	
SIZE A4	<b>STADIA Konetekniikka</b>		E	-	
WEIGHT (kg)			D	-	
SCALE 1:1	Anturiadapteri		C	-	
DRAWING NUMBER			B	-	
		SHEET 1/1		A	-
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.					

## **Ruuvien 1 kiristyskäyrät ennen terärungon korjausta**

Tuloksia ei voida näyttää; sisältää luottamuksellista tietoa.

## **Numeeriset tulokset**

Tuloksia ei voida näyttää; sisältää luottamuksellista tietoa.