

Opinnäytetyö (AMK)

Kone- ja tuotantotekniikka

TUTES12

2016 | 42

Jussi Ali-Laurila

# T-PALKIN VALMISTUSTEKNIIKAN KEHITYS JA VERTAILU

OPINNÄYTETYÖ (AMK) | TIIVISTELMÄ

TURUN AMMATTIKORKEAKOULU

Kone- ja tuotantotekniikka

Syyskuu 2016 | 42

Paavo Riski, Tuomo Rautava

Ali-Laurila Jussi

## T-PALKIN VALMISTUSTEKNIIKAN KEHITYS JA VERTAILU

Työssä mitattiin kahden identtisen suurlohkon yksittäisten T-palkkien suoruutta ja niiden eroja toisiinsa. Tämän jälkeen kahdella eri uumalevyn muodolla valmistettujen lohkojen T-palkkeja vertailtiin paremman valmistusmenetelmän löytämiseksi.

Työn tarkoituksena oli todentaa teoreettisesti laskettuja ja tietokonemallinnettuja T-palkin hitsausdeformaatioita. Tarkoituksena oli selvittää mitat, joilla saadaan kaareviksi leikattujen uumalevyjen hitsauksessa syntyvät muodonmuutokset suoristamaan valmiit T-palkit. Tällöin palkkeja ei tarvitse erikseen suoristaa.

Mittauksessa T-palkin uumalevyn molemmista vapaista kulmista 100 mm alaspäin pingotettiin lanka. Suorasta langasta mitattiin uumalevyn reunaan eromitta. Mittaustuloksesta vähennettiin langan mitta uumalevyn reunaan (100 mm). Näin tuloksista saatiin helpommin eroteltua, kumpaan suuntaan T-palkki on kaareutunut.

Eromitan ollessa 0 mm on palkki täysin suora, mikä on tavoite. Eromitan ollessa positiivinen on T-palkki taipunut päistään katsottuna laippalevyä kohti. Kun eromitta on negatiivinen, on T-palkki taipunut päistään laippalevystä pois päin.

Mittaukset suoritettiin loka- joulukuussa 2015, ja palkkeja seurattiin tuotannossa keväälle 2016. Tutkimuksessa selvisi, että joidenkin kokoluokkien T-palkit olivat keskimäärin suurempia kaarevan uumalevyn valmistustapaa käytettäessä. Uumalevyn kaarevuutta saadaan näiden mittausten perusteella muokattua jatkossa ja aiheesta tulee tehdä uusia tutkimuksia.

ASIASANAT:

T-palkki, hitsaus, valmistus, laivanrakennus.

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Mechanical and Production Engineering | Production engineering

2016 | 42

Jussi Ali-Laurila

## DEVELOPMENT AND COMPARISON OF T-BEAM MANUFACTURING METHODS

In this thesis two identical grandblock's were manufactured. Every individual T-beam's curvature was measured. After T-beams were measured, the comparison of two different web plate shapes was done in order to find better manufacturing method. The goal of this thesis is to authenticate theoretical calculations and computer analysis of T-beams welding deformations. In order to find optimal curvature of the web plate. Optimal curvature is the same amount, but in opposite direction of welding deformation.

Measurements were done by attaching string to each end of T-beam by 100 mm of T-beams web plate's free end. Measurements were taken between the string and web-plates edge. When 100 mm, which was the distance from edge of web, was deducted from measurement, the deviation measure was easier to identify in which direction the T-beam was curved. When the deviation measure is 0 mm the T-beam is straight. When deviation measure is positive, the T-beam has curved towards flange plate from its ends. When the deviation measure is negative, the T-beam has curved away from flange from its ends.

Measurements were done October - December 2015. Manufactured T-beams were followed through entire shipbuilding process until summer 2016. In this thesis came out that some of the T-beams were straighter using method of curved web plate. Curvature of the web needs more studying and more test series. It seems that there is no optimal curvature for every thickness of T-beams.

### KEYWORDS:

T-beam, welding, manufacturing, shipbuilding

# SISÄLTÖ

|   |           |
|---|-----------|
| <b>SANASTO JA LYHENTEET</b>                               | <b>7</b>  |
| <b>1 JOHDANTO</b>   | <b>1</b>  |
| 1.1 Työn tausta ja tavoitteet                             | 1         |
| 1.2 Turun telakka ja historia                             | 1         |
| <b>2 T-PALKKI JA T-PALKIN VALMISTUS</b>                   | <b>3</b>  |
| 2.1 Teräslaatu AH36                                       | 4         |
| 2.2 T-palkkien valmistus Turun telakalla                  | 6         |
| 2.3 Plasmaleikkauskone                                    | 8         |
| 2.4 Jauhekaarihitsaus                                     | 8         |
| 2.5 Jauhekaarihitsauskone                                 | 10        |
| 2.6 T-palkin hitsausmuodonmuutosten mallinnus             | 12        |
| 2.7 Hitsausaineet   | 14        |
| 2.8 Hitsauslanka  | 14        |
| 2.9 Hitsausjauhe  | 14        |
| 2.10 Lämmöntuonti   | 15        |
| 2.11 Mekaaninen oikaisu                                   | 16        |
| 2.12 Mekaaninen oikaisukone                               | 17        |
| 2.13 Lämmöllä oikominen                                   | 19        |
| 2.14 Kuumennuslaitteet                                    | 20        |
| 2.15 Käytännön koejärjestelyt                             | 21        |
| 2.16 Hitsausvirta   | 22        |
| 2.17 Hitsausjännite                                       | 22        |
| 2.18 Hitsausnopeus  | 23        |
| <b>3 KÄYTETYT MITTALAITTEET JA NIDEN MITTATARKKUUS</b>    | <b>24</b> |
| 3.1 Rullamitat  | 24        |
| 3.2 Sähkön mittalaitteet ja niiden mittatarkkuus          | 25        |
| 3.3 A-mitan mittalaitteet                                 | 26        |
| 3.4 Hitsausparametrit                                     | 27        |
| <b>4 T-PALKKIEN VERTAILU LOHKO- JA SUURLOHKOVAIHEESSA</b> | <b>28</b> |
| 4.1 T-palkkien a-mitan tarkkailu                          | 29        |

|   |           |
|---|-----------|
| 4.2 Mittaukset suurlohkovaiheessa   | 30        |
| <b>5 MITTAUSTULOSTEN TULKINTA JA PÄÄTELMÄT</b>  | <b>32</b> |
| 5.1 Kaikkien testisarjan T-palkkien mittaustulokset.  | 33        |
| 5.2 Pituussuuntaiset jäykkäajat poistettu tuloksista  | 35        |
| 5.3 7790 mm pituusluokka  | 37        |
| 5.4 6930 mm pituusluokka  | 39        |
| 5.5 11290 mm ja 11910 mm pituiset palkit. Käytetään tavallisesti pituussuuntaisina jäykkäajina. | 40        |
| <b>6 YHTEENVETO</b>   | <b>42</b> |
| <b>LÄHTEET</b>  | <b>43</b> |
| <b>LIITTEET</b>   | <b>44</b> |

## LIITTEET

|  |
|--|
| Liite 1. Deformaation laskennan ja FEM analyysin kuvaus    |
| Liite 2. Hitsausohje (WPS). T-palkkien hitsaus.            |
| Liite 3. Finite analysis of T-girder w elding deformations |
| Liite 4. Raakalevyn nestauskuva                            |
| Liite 5. Jännite- ja virtamittarin tarkkuus                |

## KAAVAT

|  |    |
|--|----|
| Kaava 1. Okerblomin kaava.....                       | 12 |
| Kaava 2. Hitsausenergia T-palkkien hitsauksessa..... | 15 |
| Kaava 3. Lämmöntuonti T-palkkien hitsauksessa.....   | 15 |

## KUVAT

|  |    |
|--|----|
| Kuva 1. Kaavio telakan historiasta.....            | 2  |
| Kuva 2. T-palkin osat .....                        | 3  |
| Kuva 3. AH36:n mekaaniset ominaisuudet.....        | 44 |
| Kuva 4. AH36:n koostumus .....                     | 44 |
| Kuva 5. AH36:n ominaisuudet eri lämpötiloissa..... | 55 |

|  |      |
|--|------|
| Kuva 6. Magneettinosturi .....   | 66   |
| Kuva 7. Aluekartta, T-palkkien valmistus.....                            | 77   |
| Kuva 8. T-palkin hitsausdeformaation teoreettisen laskennan vaiheet..... | 1313 |
| Kuva 9. T-palkin taipuma välittömästi hitsauksen jälkeen.....            | 13   |
| Kuva 10. Palkin mekaaninen oikaisu .....                                 | 1818 |
| Kuva 11. Mittausmenetelmä .....  | 2121 |
| Kuva 12. Todellisen hitsausjännitteen mittauksen demonstroitinta. ....   | 22   |
| Kuva 13. Kuljetusnopeuden mittaaminen.....                               | 23   |
| Kuva 14. Mittalaite mittaa a-mitan hitsin reunasta.....                  | 2626 |
| Kuva 15. Kannen alapuolisen a-mitan mittaustapa.....                     | 2626 |
| Kuva 16. Mittalaite, joka mittaa a-mitan hitsin keskeltä.....            | 2727 |
| Kuva 17. Kääntökuva .....  | 2828 |
| Kuva 18. Kannen alapuoli .....   | 3030 |
| Kuva 19. Rihtauksen jälkiä.....  | 3131 |
| Kuva 20. T-palkin kaartuma .....   | 3232 |

## KUVIOT

|   |    |
|---|----|
| Kuvio 1. Kaikkien testisarjan T-palkkien mittaustulokset lohkoittain. ....            | 33 |
| Kuvio 2. Kaikkien testisarjan T-palkkien mittaustulokset suurlohkoittain. ....        | 34 |
| Kuvio 3. Pituussuuntaiset jäykkääjät poistettu. Mittaustulokset lohkoittain. ....     | 35 |
| Kuvio 4. Pituussuuntaiset jäykkääjät poistettu. Mittaustulokset suurlohkoittain. .... | 36 |
| Kuvio 5. Pituusluokka 7795 mm. Mittaustulokset lohkoittain. ....                      | 37 |
| Kuvio 6. Pituusluokka 7795 mm. Mittaustulokset lohkoittain. ....                      | 38 |
| Kuvio 7. Pituusluokka 6930 mm. Mittaustulokset suurlohkoittain. ....                  | 39 |
| Kuvio 8. Pituussuuntaiset jäykkääjät. Mittaustulokset lohkoittain. ....               | 40 |
| Kuvio 9. Pituussuuntaiset jäykkääjät. Mittaustulokset suurlohkoittain. ....           | 41 |

## TAULUKOT

|  |    |
|--|----|
| Taulukko 1. Hitsausparametrit. ....  | 16 |
| Taulukko 2. Mittanauhan toleranssit. (Hultafors 2016).....                               | 24 |
| Taulukko 3. T-palkkien jauhekaarihitsauksessa mitatut a-mitan poikkeamat.....            | 29 |
| Taulukko 4. Kaikkien testisarjan T-palkkien mittaustulokset lohkoittain. ....            | 33 |
| Taulukko 5. Kaikkien testisarjan T-palkkien mittaustulokset suurlohkoittain. ....        | 34 |
| Taulukko 6. Pituussuuntaiset jäykkääjät poistettu. Mittaustulokset lohkoittain. ....     | 35 |
| Taulukko 7. Pituussuuntaiset jäykkääjät poistettu. Mittaustulokset suurlohkoittain. .... | 35 |
| Taulukko 8. Pituusluokka 7795 mm. Mittaustulokset lohkoittain. ....                      | 37 |
| Taulukko 9. Pituusluokka 7795 mm. Mittaustulokset suurlohkoittain. ....                  | 37 |
| Taulukko 10. Pituusluokka 6930 mm. Mittaustulokset lohkoittain. ....                     | 39 |
| Taulukko 11. Pituussuuntaiset jäykkääjät. Mittaustulokset lohkoittain. ....              | 40 |
| Taulukko 12. Pituussuuntaiset jäykkääjät. Mittaustulokset suurlohkoittain. ....          | 40 |

## SANASTO JA LYHENTEET

|                       |   |
|-----------------------|---|
| Hitsipalko            | Hitsaustulos joka muodostuu yhdellä kerralla hitsattaessa työ-kappaleen päästä päähän.  |
| Rihtaus               | Kappaleen oikaiseminen pelkän lämpöenergian avulla.   |
| Hitsausenergia E      | Kaarienergia.   |
| Lämmöntuonti Q        | Terminen hyötysuhde x Hitsausenergia.   |
| Terminen hyötysuhde k | Terminen hyötysuhde ottaa huomioon ympäristöön siirtyvät lämpöhäviöt. Jauhekaarihitsauksessa terminen hyötysuhde on 1, SFS-EN 1011-1 standardin mukaan. |
| Eng                   | Englanniksi.  |
| ROPAX                 | Roll-on/Roll-off passenger.   |
| Enint                 | Enintään.   |
| FEM                   | Finite Element Method.  |
| CNC                   | Computer Numerical Control.   |
| ASTM                  | American Society of the International Association for Testing and Materials.  |
| SAW                   | Submerged Arc Welding.  |
| MIG                   | Metal Inert Gas.  |
| MAG                   | Metal Active Gas.   |

# 1 JOHDANTO

## 1.1 Työn tausta ja tavoitteet

Tämän työn tavoitteena on tarkastella teoreettisilla laskelmilla ja tietokonemallinnuksilla suunniteltuja hitsausdeformaatioita jauhekaarhitsatuissa T-palkeissa. Tarkoituksena on kehittää Meyer Turku Oy:n telakan T-palkkien valmistusta. T-palkit ovat olennainen osa nykyaikaisen laivan rakennetta.

T-palkkeja hitsataan koneellisesti jauhekaarhitsausmenetelmällä. Hitsauksen lämpö aiheuttaa metallissa pysyviä muodonmuutoksia, deformaatiota. Deformaatioita joudutaan jälkikäteen oikaisemaan lämpöä ja mekaanista voimaa käyttäen. Tämä aiheuttaa ylimääräistä muokkausta T-palkkeihin ja on tuotannollisesti sekä rakenteen lujuuden kannalta huonontava tekijä.

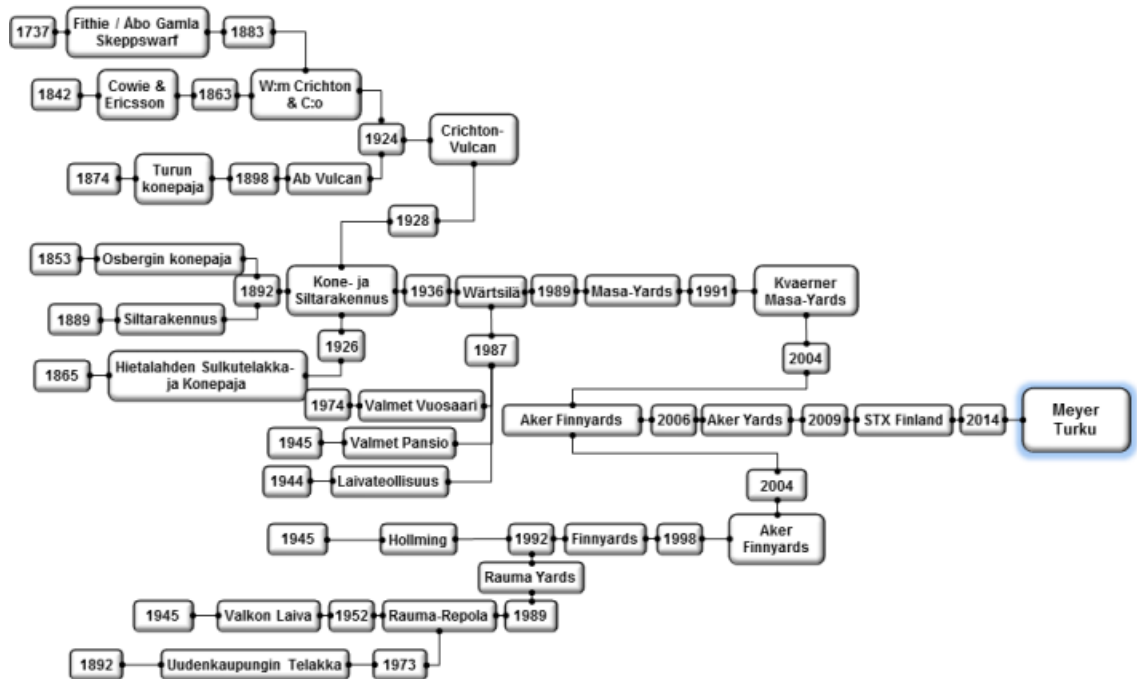
Jos deformaatiot otetaan huomioon jo suunnittelussa, on mahdollista valmistaa suurempia rakenteita. Teoreettiset deformaatiot mallinnettiin FEM-simulaatiolla. Tarkoituksena on selvittää tietokonemallinnuksen todenmukaisuus. Käytännössä tämä toteutetaan mittaamalla valmiiden T-palkkien profiilin vertikaalisen deformaation määrä useasta pisteestä. Mittapisteet yhdistämällä saadaan selville deformaation karkea muoto.

Työssä paneudutaan ensin itse telakan toimintaan, sen jälkeen materiaaliin, T-palkkeihin ja niiden valmistukseen. Mittaustapa ja käytetyt mittavälineet, sekä koko mittausprosessi esitellään tämän jälkeen. Mittaustulokset taulukoidaan ja analysoidaan graafisesti ja niiden perusteella tehdään päätelmät testin onnistumisesta ja palkkien jauhekaarhitsauksen jatkokehittämisestä.

## 1.2 Turun telakka ja historia

Vuonna 1737 kaksi liikemiestä, Esaias Wechter ja Heinrich Remgean aloittivat Turussa puisten alusten rakentamisen.





Kuva 1. Kaavio telakan historiasta (Timeline of Meyer Turku's history 2016).

Telakan historian vaiheita.

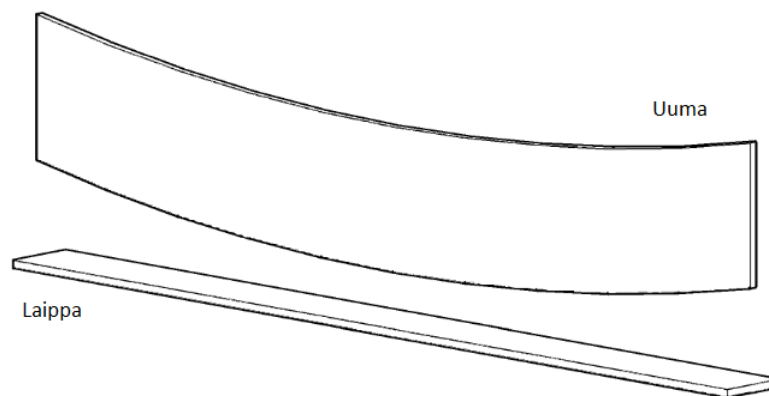
Sandviken telakka rakennettiin Helsinkiin 1865 ja Vulcan telakka rakennettiin Turkuun 1898. Turun telakka yhdistyi Vulcan Ab:n kanssa vuonna 1936. Vuonna 1936 Wärtsilä osti Turussa sijaitseva Vulcanin ja Helsingissä sijaitsevan Sandviken telakat. Laivateollisuus-telakka perustettiin Turkuun 1945 Suomen johtavien laivanrakentajien toimesta. Vuonna 1973 Valmet osti Turun telakan. Vuonna 1986 Wärtsilä ja Valmet päättivät yhdistää laivanrakennustoimintansa. 1989 Yhtiö jatkoi uudella nimellä Aker-MasaYards. Vuodesta 1991 alkaen telakka oli osittain Norjalaisen Kvaerner ASA yhtiön omistuksessa aina vuoteen 2002 asti, jolloin Aker ja Kvaerner yhdistyivät Aker Kvaerner Yardsiksi. Vuonna 2004 Aker yhdistyi suomalaisten telakoiden kanssa Aker Finnyardsiksi. Vuonna 2008 Korealainen STX Shipbuilding yhtiö osti telakan ja yhtiön Suomen toiminnot nimettiin STX Finlandiksi. Vuonna 2014 Turun telakan osti Saksalainen perheyritys Meyer Werft. Vuonna 2016 Meyer Turun telakka on erikoistunut matkustaja alusten, autolauttojen ja teknisesti vaativien vesikulkuneuvojen valmistukseen sekä off shore -projekteihin. Turun telakka työllistää suoraan n.1400 henkeä ja välillisesti meriklusterin kautta yli 40 000 henkeä. Telakka-alueen kokonaisala on 144 hehtaaria, josta 14,5 hehtaaria on rakennettu. Meyer Turun telakalla on käytössä 365 m x 80 m kokoinen kuivatelakka 600 tonnin pukkinosturilla. (Timeline of Meyer Turku's history 2016.)

## 2 T-PALKKI JA T-PALKIN VALMISTUS

T-palkki on T:n poikkileikkauksen omaava rakennuselementti. Telakalla T-palkit valmistetaan jauhekaarihitsaamalla. T-palkkeja voidaan myös valmistaa esimerkiksi kuuma-valssaus ja pursotustekniikoilla. Laivanrakennuksessa käytetään paljon erilaisen profiilin ja ainevahvuuden omaavia T-palkkeja, joten valmistus hitsaamalla on joustavin tapa tuottaa eri kokoisia T-palkkeja laivanrakennuksen tarpeisiin.

Uumalevy (englanniksi *w eb*) on T-palkin pystysuora jäsen. Uumalevyssä on tavallisesti läpivienti- ja kevennysaukkoja.

Laippalevy (englanniksi *flange*) on T-palkin vaakasuora jäsen.



Kuva 2. T-palkin osat.

Laippa ja uumalevyt liitetään toisiinsa, jolloin ne muodostavan T-kirjaimen mallisen poikkileikkauksen.

## 2.1 Teräslaatu AH36

AH36 on korkealujuuksinen laivanrakennuksen perusteräs. Kaikki testin palkit valmistettiin AH36:sta. Kuvissa 3 ja 4 on taulukoitu materiaalin ominaisuuksia. Kuvassa 2 on lueteltu materiaalin mekaanisia ominaisuuksia. Kuvassa 3 on materiaalin koostumus painoprosentteina. Seosaineet ja niiden määrä vaikuttavat suuresti metallin ominaisuuksiin.

Table 3. Mechanical properties, ASTM A36 carbon steel.

| Mechanical properties                            |                                   |
|--|-----------------------------------|
| Tensile strength, ultimate, $\sigma_u$           | 400–550 MPa                       |
| Tensile strength, yield, $\sigma_y$              | 250 MPa                           |
| Elongation at break (in 200 mm)                  | 20.0%                             |
| Elongation at break (in 50 mm)                   | 23.0%                             |
| Modulus of elasticity, E                         | 200 GPa                           |
| Bulk modulus (typical for steel)                 | 140 GPa                           |
| Poissons ratio, $\nu$                            | 0.260                             |
| Shear modulus, G                                 | 79.3 GPa                          |
| Melting temperature: $T_m$                       | 1517 °C                           |
| Density: $\gamma$                                | $7.86 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ |
| Total volume heat capacity $c\gamma$             | $5.07 \text{ J cm}^2 \text{ K}$   |
| Thermal expansion ratio: $b$                     | $0.01 \text{ 1/}^\circ\text{C}$   |
| Thermal conductivity: $\lambda$                  | $0.38 \text{ W/(cmK)}$            |
| Thermal diffusivity: $\kappa = \lambda/c \gamma$ | $0.08 \text{ cm}^2/\text{s}$      |

Kuva 3. AH36:n mekaaniset ominaisuudet. (Carlos Guedes Soares, T.A. Santos, 2015, 524.)

Table 2. Chemical Composition, ASTM A36 carbon steel.

| Element        | Content     |
|----------------|-------------|
| Carbon, C      | 0.25–0.290% |
| Copper, Cu     | 0.20%       |
| Iron, Fe       | 98.0%       |
| Manganese, Mn  | 1.03%       |
| Phosphorous, P | 0.040%      |
| Silicon, Si    | 0.280%      |
| Sulphur, S     | 0.050%      |

Kuva 4. AH36:n koostumus. (Carlos Guedes Soares, T.A. Santos, 2015, 524.)

Table 1. Temperature-dependent material properties, ASTM A36 carbon steel (Chang & Teng, 2004).

| $T$<br>[°C] | $C$<br>[J/Kg°C] | $K$<br>[W/m°C] | $A$<br>[μm/m°C] | $\sigma_y$<br>[MPa] | $E$<br>[GPa] |
|-------------|-----------------|----------------|-----------------|---------------------|--------------|
| 20          | 450             | 51             | 11,2            | 380                 | 210          |
| 100         | 475             | 50             | 11,8            | 340                 | 195          |
| 210         | 530             | 49             | 12,4            | 320                 | 195          |
| 330         | 560             | 46             | 13,1            | 262                 | 185          |
| 420         | 630             | 41             | 13,6            | 190                 | 168          |
| 540         | 720             | 38             | 14,1            | 145                 | 118          |
| 660         | 830             | 34             | 14,6            | 75                  | 52           |
| 780         | 910             | 28             | 14,6            | 40                  | 12           |
| 985         | 1055            | 25             | 14,6            | 38                  | 11.8         |
| 1320        | 2000            | 32             | 14,6            | 28                  | 10.4         |
| 1420        | 2100            | 42             | 14,6            | 25                  | 10.2         |
| 1500        | 2150            | 42             | 14,6            | 20                  | 10           |

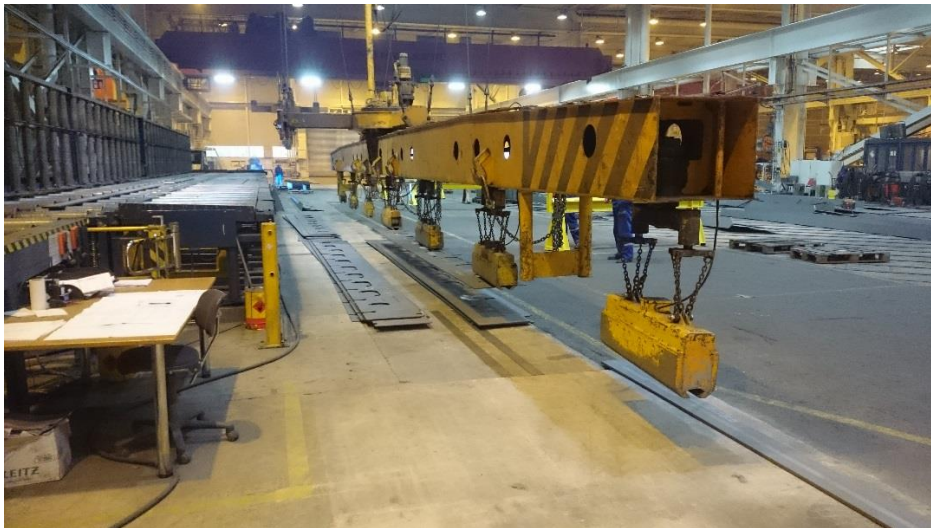
Kuva 5. AH36:n ominaisuuksia eri lämpötiloissa. (Carlos Guedes Soares, T.A. Santos, 2015, 524.)

## 2.2 T-palkkien valmistus Turun telakalla

Levyt toimitetaan rautateitse ja maanteitse telakan ulkovarastoon. Ennen levyn ottamista valmistukseen se otetaan esikäsitteilylinjalle, jossa levytavara hiekkapuhalletaan ja maalataan pohjamaalilla. Pohjamaalauksen jälkeen levyt leikataan muotoonsa CNC-vesiplasmakoneella. Plasmakone maalaa myös osa-numeron leikatuille osille. Leikatut uumalevyt liikutellaan magneettinostureilla asennusportaalille.

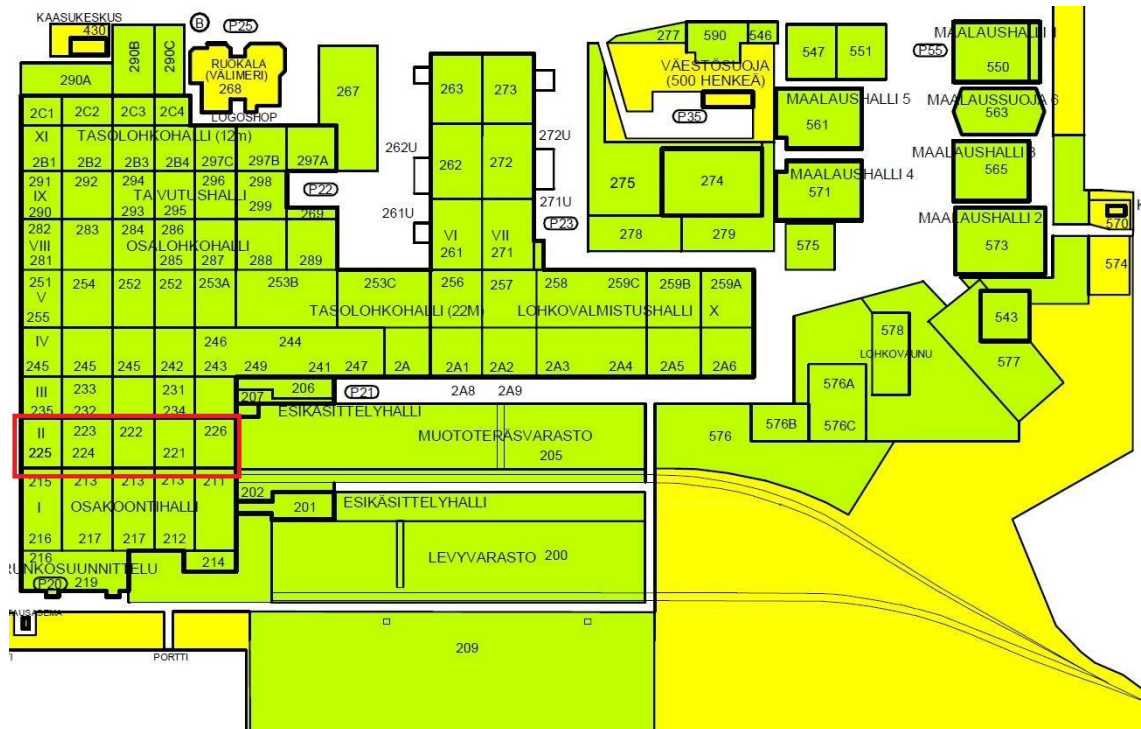
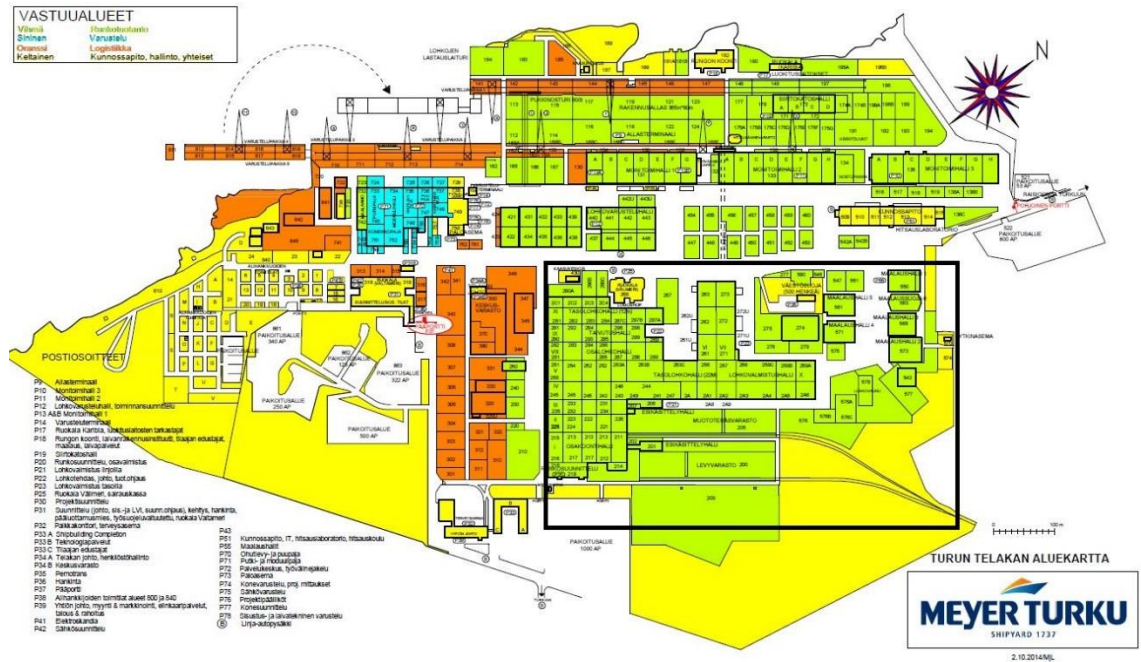
Muotoraudat saapuvat telakalle rautateitse ja maanteitse. Ennen käyttöä muotoraudat hiekkapuhalletaan ja pohjamaalataan. Ennen hitsausta hiekkapuhalletaan liitoskohdat puhtaaksi tarvittavalta alueelta. Poltetut muotoraudat siirretään asennusportaalille.

Laippa ja uumalevyt liitetään yhteen asennusportaalilla, jonka jälkeen ne jauhekaari- ja viimeistelyhitsataan T-palkiksi. Hitsauksen jälkeen suoritetaan mahdollinen hionta. Oikaisija tarkastaa valmiin T-palkin suoruuden ja oikaisee palkin tarvittaessa käyttäen mekaanista voimaa ja/tai lämpöenergiaa. Jälkeenpäin mahdollisesti asennettavat muotoraudat hitsataan paikalleen, minkä jälkeen suoritetaan hionta puhdistusasteen mukaan. Valmiit T-palkit lavoitetaan seuraavaan käyttökohteeseensa kuljetusta varten. Nosturinkuljettajan on mahdollista ajaa magneettinosturia nosturin kiinteästä ohjaamosta käsin tai langattomalla kauko-ohjaimella.



Kuva 6. Magneettinosturi.

T-palkkien valmistus tapahtuu karttaan merkityllä alueella.



Kuva 7. Aluekartta, T-palkkien valmistus (Meyer Turku 2016)

### 2.3 Plasmaleikkauskone

Uumalevyt leikataan esikäsitellystä raakalevystä CNC-ohjatulla vesiplasmaleikkurilla valmiiksi muotoonsa. Niihin tulee läpivienti- ja kevennysaukkoja. Plasmaleikkauskone myös tulostaa uumalevyyn osanumeron.

### 2.4 Jauhekaarihitsaus

Jauhekaarihitsauksessa on joukko tärkeitä parametrejä, jotka vaikuttavat hitsaustulokseen. T-palkin hitsaussovelluksessa tärkeimpiä parametrejä ovat hitsausvirta, kaarijännite, hisausnopeus, lankahalkaisija, virtalaji ja virran napaisuus, vapaalangan etäisyys ja asento, jauhetyyppi ja jauhekerroksen paksuus.

Jauhekaarihitsaus on kaarihitsausta, jossa valokaari palaa hitsauslangan ja työkappaleen välissä hitsausjauheen alla. Hitsausjauhe suojaa hitsaustapahtuman ympäröivältä ilmalta. Osa jauheesta sulaa ja muodostaa hitsin päälle kuonakerroksen, joka myöhemmin poistetaan.

Valokaari ei ole näkyvä kuten muissa prosesseissa, vaan palaa piilossa jauheen alla. Tästä syystä jauhekaarihitsauksessa ei synny lämpö- ja valosäteilyä eikä hitsaussavuja, mikä tekee siitä työympäristön kannalta edullisen hitsausprosessin. Englanninkielinen nimitys on Submerged Arc Welding, jonka alkukirjaimista tulee paljon käytetty lyhenne SAW.

Hitsausaineet ovat hitsauslanka ja hitsausjauhe. Hitsauslangat ovat paksuja lisäainelankoja, joiden yleisin halkaisija on 4,0 mm, mutta jauhekaarihitsauksessa käytetään myös tätä ohuempia ja paksumpia lankoja. Hitsausjauheet ovat raemaisia, sulavia ja mineraalista ja metallista alkuperää olevia tuotteita, joita on kemialliselta koostumukseltaan erilaisia.

Jauhekaarihitsauksen etuina on suuri tehokkuus (hitsiaineentuotto), suuri tunkeuma, työympäristöystävällisyys, tunteettomuus vedolle ja tuulelle sekä pitkäikäiset ja toimintavarmat laitteet. Hitsiaineentuotto on tyypillisesti 6 — 2 kg/h, jolla tarkoitetaan kaariaikatunnissa sulatettua lisäainemäärää. Erilaisissa suurtehojauhekaariprosesseissa se on kor-

keimmillaan kymmeniä kiloja tunnissa. Käyttöalue alkaa noin 5 mm:n aineenpaksuudesta lähtien. Jauhekaarihitsaus on lähes poikkeuksetta mekanisoitua hitsausta. Jauhekaarihitsauksesta on kehitetty monia erilaisia muunnelmia, mm tandem-hitsaus, kaksoislankahitsaus, metallijauheen syöttö ja kapearailohitsaus. Tehokkaana hitsausprosessina jauhekaarihitsausta käytetään paljon lähinnä keskiraskaassa ja raskaassa konepajateollisuudessa ja laivanrakennuksessa. Kattila-, säiliö- ja paineastiavalmistuksessa sitä käytetään mm. lieriöiden kehä- ja pituushitseihin sekä ulkopuolisena että sisäpuolisena hitsauksena. Suuret palkit ja putket valmistetaan myös jauhekaarihitsauksella. Jauhekaarihitsaus soveltuu hyvin useimpien terästen hitsaukseen. Erilaisia hitsattavia teräksiä ovat mm. seostamattomat, hienorae-, kuumalujat, lujat ja ruostumattomat teräkset. (ESAB 2016.)



## 2.5 Jauhekaarihitsauskone

Jahekaarihitsauskoneen merkki on Gränges.

Käyttötarkoitus on T- ja L-palkkien valmistaminen raakalevyistä, jatketuista levyaihi-  
oista, valssatuista sekä jatketuista lattarautoista ja plasmaleikkuukoneilta tulevista  
uumalevyistä.

Palkinhitsauskoneen asettamat tekniset rajoitukset:

- |                                 |                                       |
|---------------------------------|---------------------------------------|
| - palkin pituus                 | 2300 — 22000 mm                       |
| - palkin uuman korkeus          | 300 — 1500 mm                         |
| - suositeltu maksimikorkeus     | 1000 mm                               |
| - palkin laipan leveys          | 100 — 300 mm                          |
| - uuman paksuus                 | 5 — 40 mm                             |
| - laipan paksuus                | 8 — 45 mm                             |
| - hitsatun palkin maksimi paino | 7 t, erikoisjärjestelyin enint. 25 t. |

Hitsausasema:

- automaattinen jauhekaarihitsaus
- kaksoislankahitsaus Tw in arc (Kaksi hitsauslankaa yhdestä suuttimesta ja niihin johde-  
taan hitsausvirta samasta virtalähteestä.) (HNu, Meyer Turku, Runkosuunnittelijan ko-  
nekirja, 2012.)

Palkinhitsauskoneen toiminnan kannalta huomioitavia seikkoja:

- palkin yläreunan mittapoikkeama enint.100 mm (“loiva alamäki”)
- jatketuilla lattatangoilla ei sallittu aineenvahvuuseroja
- jatkettut lattatangot (suositus) saman levyiset (Voidaan kuitenkin hitsata erilevyisiä, vain jos mahdollisuus ajaa leveämpi latta edellä).

Toleranssit, uuman kohdistus laippaan:

- keskisyys 1 mm
- uumalevyn pään etäisyys 1 mm

(HNu, Meyer Turku, Runkosuunnittelijan konekirja, 2012.).

Aloitus- ja lopetuspäihin jää 500 mm hitsattavaksi käsin, jäykkääjän molemmin puolin. T-palkkien päät hitsataan MAG-hitsauksena metallitäytelangalla ESAB 14.12  $\varnothing$  1,2 mm.

## 2.6 T-palkin hitsausmuodonmuutosten mallinnus

Kun kahta metallikappaletta hitsataan yhteen, metalli kutistuu jäähtyessään hitsaus-  
saumaa kohti.

Kaava 1. Okerblomin kaava.

$$\varepsilon_L = \frac{\delta_L}{L} = \frac{A_T \cdot t}{A} = 0.335 \frac{q \cdot \alpha}{A \cdot v_w \cdot c\gamma}$$

Okerblomin (1955) kaava kuvaa kappaleen kutistumasta aiheutuvaa kuormitusta. Kaa-  
vassa:

$L$  on hitsaussauman pituus

$\delta_L$  on hitsauksesta aiheutuva pituussuuntainen kutistuma

$A_T$  on lämpötilan aiheuttama voima

$t$  on levyn paksuus

$A$  on kappaleen poikkileikkauksen pinta-ala

$q$  on hitsauksesta aiheutuva lämpöenergia

$\alpha$  on lämpölaajenemiskerroin

$v_w$  on hitsausnopeus

$c\gamma$  on kappaleen kokonais lämpökapasiteetti.

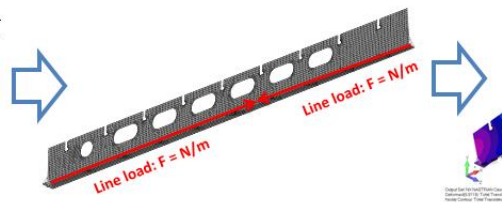
Okerblomin mallissa hitsaus tapahtuu samanaikaisesti koko liitoksen pituudelta ja kaava  
kuvaa nopeaa lämmöntuontia. Tämän takia T-palkin laskennassa saattaa ilmetä, virheitä  
joita kokeessa pyrittiin havaitsemaan.

Kun pituussuuntainen kutistuman aiheuttama voima on laskettu, siirretään se tietoko-  
neella mallinnettuun T-palkkiin hitsaussauman kohdalle. Mikäli pituuskutistumasta ai-  
heutunut jännitys on sama kuin laskettu, mallinnuksesta havaitaan oikean kokoinen de-  
formaatio, joka voidaan teoriassa kumota päinvastaisella uumalevyn kaarevuudella.

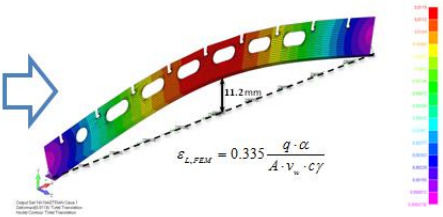
**1. stage:** longitudinal strain is calculated from Okerblom (1955) formula.

$$\varepsilon_L = 0.335 \frac{q \cdot \alpha}{A \cdot v_w \cdot c \gamma}$$

**2. stage:** FE-model of T-girder is created and line load at the location of fillet weld is applied.



**3. stage:** If the longitudinal strain is the same as calculated from formula, bending deformation due to welding is obtained.



Kuva 8. T-palkin hitsausdeformaation teoreettisen laskennan vaiheet. Avin (2016) kirjoittamassa materiaalissa (Hashemzadeh, M., Garbatov, Y. & Guedes Soares, C. 2014. Analysis of butt-weld induced distortion accounting for the welding sequences and weld toe geometry. Maritime Technology and Engineering. Taylor & Francis, pp. 523–533)



Kuva 9. T-palkin taipuma välittömästi hitsauksen jälkeen.

Hitsauksen jälkeen T-palkki muuttaa muotoaan jäähtyessään ympäröivään lämpötilaan. Kun lämpötila on kauttaaltaan sama kuin ympäristössä, on palkki saavuttanut lopullisen muotonsa.

## 2.7 Hitsausaineet

Hitsausaineita ovat hitsauslisäaine ja hitsausapuaine. Jauhekaarihitsauksessa hitsausaineiden valinta on nimenomaan lanka/jauhe-yhdistelmän valintaa. Hitsausaineiden hyväksymiset ovat aina yhdistelmäkohtaisia eikä pelkällä langalla tai jauheella ole hyväksyntää erikseen. (Lepola 2002, 86)

## 2.8 Hitsauslanka

Hitsauslankojen halkaisijat ovat standardisoitu standardissa SFS-EN 759. Yleisimmät langat ovat halkaisijoiltaan 2,0, 2,5, 3,0, 4,0, 5,0 ja 6 mm, joista yleisin on 4 mm. Kokoluokan 2,0 ja 2,5 lankojen käyttö on myös yleistä. Lankaa on saatavilla erikokoisissa keloissa, kiepeissä ja myös tynnyreissä. Pakkausmerkinnässä ovat lueteltuna valmistaja, tuotenimi, langanhalkaisija, kelapaino, sulatusnumero, valmistusnumero ja luokittelumerkinnät (Lepola 2002, 86.)

Hitsausaineet toimitetaan keskusvarastoon yleensä ESAB. Hitsausainevaraston lämpötilaa ja kosteutta valvotaan.

Hitsauslisäaineena T-palkeissa käytetään ESAB OK AUTROD 12.22 2x2 mm lankaa.

## 2.9 Hitsausjauhe

Hitsausjauhe muodostaa sulaessaan kuonaa, jolla on suuri vaikutus hitsin kemialliseen koostumukseen ja ominaisuuksiin. Jauheen sulamislämpötila on hieman perusaineen sulamislämpötilaa alempi. Hitsausaine sulaessaan muodostaa kaariontelon, joka parantaa sähkönjohtavuutta, suojaa metallia atmosfääriltä, hidastaa hitsin jäähtymistä ja vaikuttaa metallurgisesti hitsiaineeseen. Hitsausjauheen raekoko on tavallisesti 0,2 – 1,6 mm. Hitsausjauheilla kaarihitsaukseen on eurooppalainen standardi SFS-EN 760. T-palkkien hitsauksessa käytetään ESAB OK FLUX 10.71 -hitsausjauhetta.

## 2.10 Lämmöntuonti

Lämmöntuonti on oleellisin hitsausparametri joka vaikuttaa hitsausdeformaation syntymiseen. Hitsausenergia lasketaan jakamalla lämmitysteho hitsausnopeudella. Lämmitysteho on hitsausjännitteen ja käytettävän virran tulo.

$$Q = \frac{I (A) \times U (V)}{v \left( \frac{mm}{s} \right) \times 1000} = kJ/mm$$

Kaava 2. Hitsausenergia T-palkkien hitsauksessa. (Guedas Soares & T.A. Santos (Eds) 2015, 526)

Kaavassa

|     |                |
|-----|----------------|
| $Q$ | lämmöntuonti   |
| $I$ | hitsausvirta   |
| $U$ | hitsausjännite |
| $v$ | hitsausnopeus  |

$$E = k \times \frac{I (A) \times U (V)}{v \left( \frac{mm}{s} \right) \times 1000} = kJ/mm$$

Kaava 3. Lämmöntuonti T-palkkien hitsauksessa. (Suomen Hitsausteknillinen Yhdistys ry. 2016).

Kaavassa  $k$  on lämmöntuonnin hyötysuhde, joka on jauhekaarihitsauksessa 1.

$$E = 1 \times \frac{685 A \times 26,5 V}{22,5 \frac{mm}{s} \times 1000} = 0,807 kJ/mm$$

$E$  on lämmöntuonti.

Taulukko 1. Hitsausparametrit.

|                   | Jännite V | Virta A | Kuljetusnopeus m/s |
|-------------------|-----------|---------|--------------------|
| <b>Asetusarvo</b> | 27,9      | 656     | 0,00225            |
| <b>Mitattu</b>    | 26,5      | 685     | 0,00225            |

### 2.11 Mekaaninen oikaisu

Mekaaninen oikaisu perustuu ulkoisella voimalla taivuttamalla rakennetta päinvastaiseen suuntaan kuin mihin epäsuotuisa muodonmuutos on tapahtunut.

Oikaistaessa rakenteen pintakerrokset joutuvat joko venymään tai puristumaan enemmän kuin rakenteen keskiosa. Rakennetta painetaan, kunnes saavutetaan raaka-aineen myötöraja, jolloin pintakerrokset alkavat antaa periksi. Tällöin pintakerroksissa tapahtuu plastista muokkautumista. Plastinen muokkautuminen etenee kappaleen keskiosassa olevaa neutraaliakselia kohti, jossa raaka-aine muokkautuu elastisesti.

Ulkoisen voiman lakattua vaikuttamasta neutraaliakselille muodostuneen elastisen muodonmuutosvyöhykkeen jännitykset pyrkivät palauttamaan kappaletta takaisin alkuperäiseen muotoonsa. Tämä ei kuitenkaan enää onnistu, koska ulkoisen ja sisäisen pinnan plastiset muodonmuutokset estävät sen. Palautumista tapahtuu aina kuitenkin siinä määrin kuin raaka-aineen sisäinen tasapaino vaatii. Ääritapauksissa koko kappaleen materiaali on plastisoitunutta, jos suoritetaan ylitaivutus, jossa rakennetta taivutetaan yli halutun lopputuloksen.

Taivutuksen lakattua raaka-aine palautuu sisäisten jännityksien voimasta. Oikaistu kappale jää tämän jälkeen jäännösjännitystilaan, mikä ei ole haitaksi, koska kappale on sisäisesti tasapainossa. (Pertti Lepola, Matti Makkonen 2005, 367-368.)

## 2.12 Mekaaninen oikaisukone

Tekniset tiedot:

Maksimissaan läpi menevät profiilit:

|                                     |                         |
|-------------------------------------|-------------------------|
| - pyöröraudat                       | 400 mm                  |
| - nelikulmaudat                     | 300 × 300 mm            |
| - lattaraudat                       | 735 × 70 mm             |
| - T-raudat                          | 760/25 mm × 250/35 mm   |
| - kulmaudat                         | 775/11,5 mm × 200/25 mm |
| - Holland-profiilit                 | 430 mm                  |
| - U-palkit                          | 400 mm                  |
| - H-palkit                          | 400 mm                  |
| - profiilin pituus enint.           | 22000 mm                |
| - rullaston leveys                  | 1250 mm                 |
| - tavoitteellinen suoruustoleranssi | 2 mm.                   |





Kuva 10. Palkin mekaaninen oikaisu. (Meyer Turku, 2012 Runkosuunnittelijan konekirja)

Palkki oikaistaan silmämääräisesti, puristamalla uumasta ja vetämällä tai työntämällä erisuuntiin liikkuvia hydraulisia puskimia (Markku Laikkanen, 2008.)

## 2.13 Lämmöllä oikominen

Lämmöllä eli kuumilla oikaisu perustuu siihen, että terästä kuumennettaessa paikallisesti se pyrkii siltä osalta laajenemaan. Ympärillä oleva kylmempi teräs vastustaa tätä laajenemista, jolloin kuumennettu teräs alkaa tyssääntyä ja aineeseen syntyy voimakasta puristusjännitystä. Jäähtyessään teräs pyrkii kutistumaan, mutta kylmempi osuus ympärillä pyrkii estämään tämänkin ja aiheuttaa jäähtyvään kohtaan hyvin voimakkaan vetojännityksen.

Lämmitettäessä perusainetta on lämpötila nostettava niin korkeaksi, että saavutetaan käsiteltävän teräksen myötöraja. Tämä saadaan aikaiseksi jatkamalla teräksen kuumennusta, kunnes jännitykset lisääntyvät siten, että ne vastaavat myötörajan arvoja, jolloin alkaa tyssääntymisvaihe.

Käytännössä terästä lämmitettäessä on mentävä hieman yli myötörajan ylittämiseen tarvittavan lämpötilan, jotta syntyy pysyviä muodonmuutoksia. Käytännössä käytetään usein lämpötiloja 650—800 °C. Finempikin lämpötila riittää laskennallisesti oikaisuun, n. 300—400 °C, mutta joillakin teräksillä on taipumusta kyseisessä lämpötilassa vanhenemisesta johtuvaan haurauteen.

Kuumia käytettäessä on huomioitava levyn vahvuus, suurilla ainevahvuuksilla saattaa ilmetä kulmavetäytymän tapainen ilmiö, koska levy ei lämpene kokonaan, vain sen pinta kutistuu. Saattaa tapahtua ”ylioikaisu”, koska pinnan tyssääntyminen on voimakasta.

Kuumilla oikomisen jälkeen teräksessä on tapahtunut mikrorakenteen muutoksia ja siinä vallitsee syntyneiden jäännösjännitysten muodostama tasapaino. Jos kappaletta kuumennetaan tämän jälkeen, laukaistaan samalla nämä jäännösjännitykset ja kappale kokee uudelleen muodonmuutoksen. (Pertti Lepola, Matti Makkonen 2005, 368.)

## 2.14 Kuumennuslaitteet

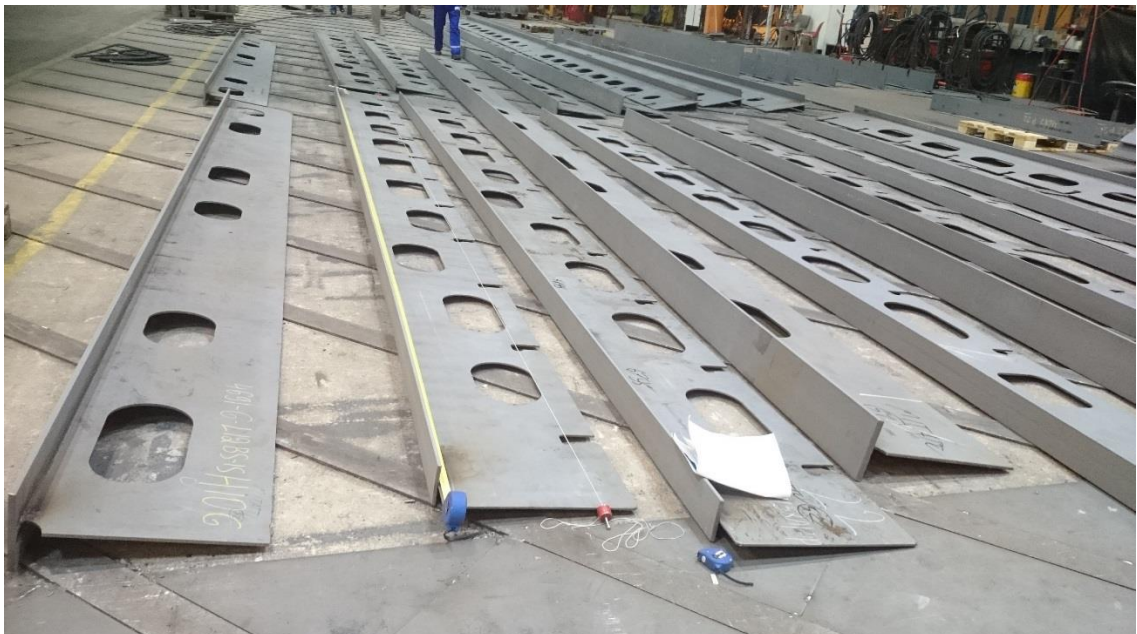
Yleisin kuumaokaisun lämmityslaite on happi-asetyleenipoltin, jossa liekin korkein lämpötila on noin 3000 °C. Työskentelyssä käytettävä polttimen suuruus määräytyy oikaistavan materiaalin seinämän vahvuudesta ja oikaistavasta rakenteesta, käytettävä liekki-tyyppi on joko happivoittoinen tai neutraali. Pienimmissä kohteissa normaalisti käytettävän yhden polttimen sijasta voidaan poltinosia asentaa rinnakkain siten, että samalla voidaan viivakuumennustekniikkaa käyttämällä kuumentaa leveämmältä alueelta.

Happi-asetyleeniliekkin lisäksi käytössä on plasma-, induktio- ja kaarikuumennuslaitteita. Teräsrakenteiden yhteydessä on kuitenkin ylivoimaisesti käytetyin happi-asetyleenilaitteisto. Induktiokuumennuksen etuna on tarkka lämpötilan-säätö, kun taas kaarikuumennuksen haittana on hiilen tuonti kuumentettavaan kohtaan ja plasmalla laitteiston kalteus. (Pertti Lepola, Matti Makkonen 2005, 368.)

Levy ja palkkirakenteita oikaistaan pääasiassa rihtaamalla kolmihaaraisella happi-asetyleenipolttimella osatuotannossa, lohkovaiheessa sekä laivassa. Tarvittaessa myös nestekaasupoltinta käytetään lämmitykseen, kun tarvitaan tasaisemmin lämpöä suurelle alalle, esimerkiksi kansilevylle.

## 2.15 Käytännön koejärjestelyt

Hitsatun T-palkin annettiin jäähtyä 30 minuutin ajan. Tämä jäähtymisaika varmisti, että palkki oli saavuttanut ympäristöä vastaavan lämpötilan ja näin lopullisen muotonsa. Kun palkki oli jäähtynyt, merkattiin suorakulmaa ja rullamittaa apuna käyttäen referenssimerkit molempiin päihin. Referenssimerkit sijaitsivat 100 mm uumalevyn reunasta. Merkkien kohdalle pingotettiin uumalevyn päästä päähän linjalanka magneettien avulla, jolloin lanka oli 100 mm etäisyydellä uumalevyn reunasta. Palkin kaarevuus mitattiin eromitana uumalevyn vapaan reunan suhteen pingotettuun linjalankaan seuraavasti: 1000 mm alkupäästä, 1/4, 1/2, 3/4 ja 1000 mm loppupäästä. Mittaukset suoritettiin rullamittalla.



Kuva 11. Mittausmenetelmä

Deformaatio selvitettiin mittaamalla langan ja uumalevyn vapaan reunan etäisyyttä palkin eri kohdissa.

## 2.16 Hitsausvirta

Todellinen hitsausvirta todennettiin pihtimittarilla (Hioki 3285) mittaamalla molempien hitsauselektrodien läpi yhteensä kulkeva virta T-palkin hitsauksen aikana.

## 2.17 Hitsausjännite

Todellinen hitsausjännite mitattiin yleismittarilla (Hioki 3285). Toinen mittapää asetettiin hitsattavaa kappaletta vasten ja toinen hitsaussuutinta vasten.

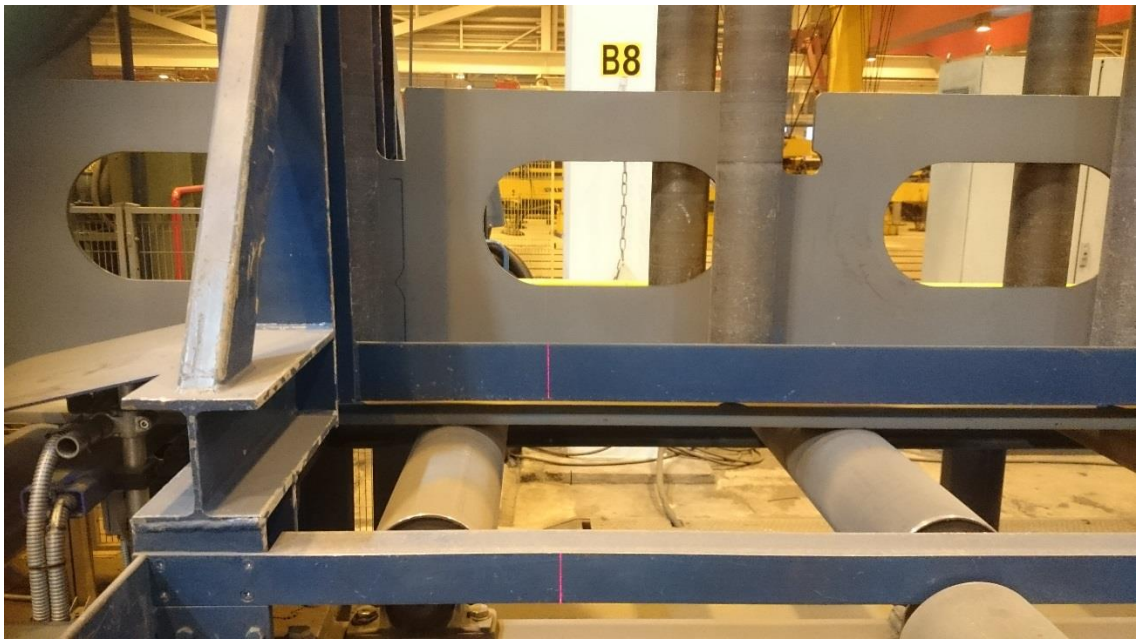


Kuva 12. Todellisen hitsausjännitteen mittauksen demonstrointi.

Kuvasta poiketen todellinen hitsausjännite mitattiin T-palkkia hitsatessa.

## 2.18 Hitsausnopeus

Hitsausnopeus todennettiin merkitsemällä uumalevyyn rullamitan ja tussin avulla merkit 1000 mm toisistaan. Jauhekaarihitsauskoneen runkoon kiinnitettiin magneettikiinnityksellä laservalo, joka piirsi pystysuoran viivan hitsautuessaan kuvasta katsoen vasemmalle ohikulkevaan uumalevyyn. Metrin hitsausmatkaan kulunut aika kelloitettiin älypuhelimien sekuntikellosovelluksella.



Kuva 13. Kuljetusnopeuden mittaaminen.

Laservalo piirtää pystysuoran viivan merkiksi hitsautuessaan ohikulkevaan T-palkkiin.

## 3 KÄYTETYT MITTALAITTEET JA NIIDEN MITTATARKKUUS

### 3.1 Rullamitat

Rullamittojen mittaustarkkuutta mitataan EU-mittatoleranssiluokilla. Toleranssiluokkia on kaksi, I ja II. Tarkkuus on standardissa mitattu +20 °C lämpötilassa ja 50 N jännitysvoimalla.

Taulukko 2. Mittanauhan toleranssit. (Hultafors 2016).

#### TERÄSMITTANAUHOJEN TUOTANTOTOLERANSSIT

| Kokonaispituus(m) | Luokka I (mm) | Luokka II (mm) |
|-------------------|---------------|----------------|
| 2                 | ± 0.3         | ± 0.7          |
| 3                 | ± 0.4         | ± 0.9          |
| 5                 | ± 0.6         | ± 1.3          |
| 8                 | ± 0.9         | ± 1.9          |
| 10                | ± 1.1         | ± 2.3          |
| 15                | ± 1.6         | ± 3.3          |
| 20                | ± 2.1         | ± 4.3          |
| 25                | ± 2.6         | ± 5.3          |
| 30                | ± 3.1         | ± 6.3          |
| 50                | ± 5.1         | ± 10.3         |
| 100               | ± 10.1        | ± 20.3         |

Mittauksissa käytettiin kahta erikokoista Bernerin valmistamaa rullamittaa, joiden mittatarkkuus on luokkaa II.

3 metrin mitan mittatarkkuus on +-0,9 mm, jolloin mittanauhan leveys 16 mm.

8 metrin mitan mittatarkkuus on +-1,9 mm, jolloin mittanauhan leveys 25 mm.

### 3.2 Sähkön mittalaitteet ja niiden mittatarkkuus

Jännite- ja virtamittauksissa käytettiin Hioko 3285 mittaria.

Jännitemittauksen tarkkuus on  $\pm 1.0\% + 3$  lukuarvoa.

Mittaustuloksen resoluutio on 0,01 V

Virtamittauksen tarkkuus on  $\pm 1.3\% + 3$  lukuarvoa.

Mittaustuloksen resoluutio on 0,1 A



### 3.3 A-mitan mittalaitteet

Tämä a-mitan mittalaite mittaa hitsin todellisen a-mitan hitsauspalon reunasta. Tätä mittalaitetta käytetään jos palko on tasa-, tai kupuhitsi. Tätä mittalaitetta käytettiin kannen alapuolisten hitsausliitosten a-mitan mittauksissa.



Kuva 14. Mittalaite mittaa a-mitan hitsin reunasta.



Kuva 15. Kannen alapuolisen a-mitan mittaustapa.

Keski a-mitan mittalaite mittaa hitsin todellisen a-mitan sen ollessa tasa- tai kouruhitsi. Tätä mittalaitetta käytettiin T-palkkien a-mitan mittauksissa.



Kuva 16. Mittalaite, joka mittaa a-mitan hitsin keskeltä.

### 3.4 Hitsausparametrit

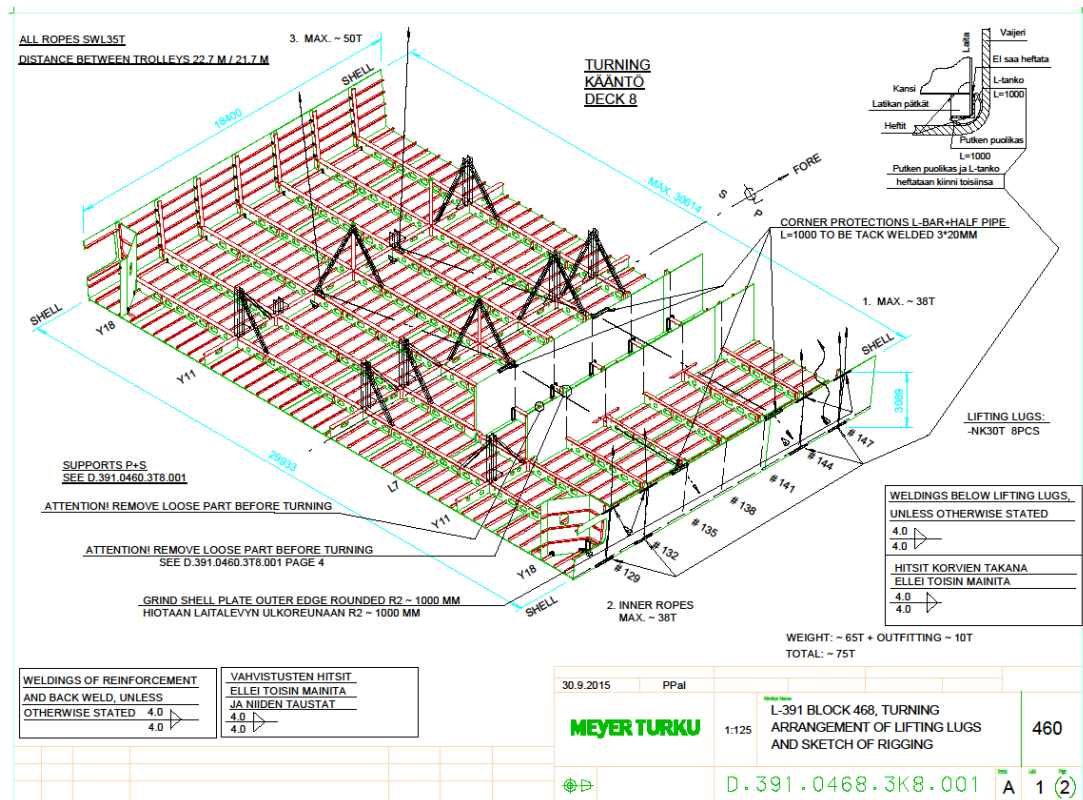
Hitsausjännitteen mittausarvo vaihteli hitsauksen aikana 0,5 V suuntaansa. Hitsausjännite mitattiin mittarin keskiarvonmittaustoiminnolla.

Hitsausvirran mittausarvo vaihteli hitsauksen aikana noin 10 A suuntaansa. Hitsausvirta mitattiin mittarin keskiarvonmittaustoiminnolla.

Kuljetusnopeuden virhetarkastelussa tulee ottaa huomioon, että matka mitattiin rullamitalilla (mittatarkkuus  $\pm 0,9$  mm) ja aika sekuntikellolla. Hitsausnopeuden ollessa kohtuullisen suuri 22,5 mm/s ei mittatarkkuudesta tule huomattavaa epätarkkuutta.

## 4 T-PALKKIEN VERTAILU LOHKO- JA SUURLOHKOVAIHEESSA

T-palkkien mittausten valmistuttua palkit etenivät tuotantoketjussa lohkonkoonti-vaiheeseen, jossa palkit hitsattiin kiinni kansiin. Lohkot kootaan hitsaamalla käsin. Lohkot yhdistetään suurlohkoksi, joka siirretään altaaseen ja liitetään kiinni laivaan.



Kuva 17. Kääntökuva.

#### 4.1 T-palkkien a-mitan tarkkailu

T-palkkien valmistuksessa tarkkailtiin myös uumalevyn ja laippalevyn välistä hitsausliitosta. Hitsausliitoksen paksuutta tarkkailtiin silmämääräisesti koko mitaltaan sekä kaikkien kaarevuuden mittapisteitten kohdalta keski a-mitan mittalaitteella. Mittalaitteella mitattiin hitsausseaman keskeltä, koska hitsausseama oli muodoltaan jouheva kouruhitsi. Mittauksissa pyrittiin valvomaan, etteivät hitsausparametrit muuttuneet testisarjan aikana. Hitsausparametrien muutokset vaikuttaisivat lämmöntuontiin, joka vaikuttaa palkin deformaatioon. Jos a-mitta muuttuisi selkeästi, lämmöntuonti muuttaisi deformaatiota.

Taulukko 3. T-palkkien jauhekaarhitsauksessa mitatut a-mitan poikkeamat.

| A-mitan poikkeamat T-palkeissa | Poikkeamien lukumäärä |
|--------------------------------|-----------------------|
| 4681 Testilohko                | 19                    |
| 4691 Testilohko                | 4                     |
| 4781 Referenssilohko           | 7                     |
| 4791 Referenssilohko           | 4                     |

Voimme havaita taulukosta 4, että ensimmäisen Testilohkon (4681) T-palkeissa a-mitan poikkeamia oli huomattavasti enemmän, yhteensä 19 kappaletta. Seuraavissa lohkoissa poikkeamia oli vähemmän. Tämä voi johtua inhimillisistä tekijöistä. Hitsaajat tiesivät palkkien olleen testisarjaa, jossa tarkkailtiin palkkien suoruutta ja a-mittaa. Yksiselitteistä syytä tälle ei kuitenkaan pystytä toteamaan. Poikkeavana mittana pidettiin kaikkia mitattuja arvoja, jotka poikkesivat 4 mm a-mitasta mittaustarkkuudella  $\pm 0,5$  mm. Kaikki mitatut a-mitat olivat kuitenkin käypiä ja hitsausohjeen mukaisia.

#### 4.2 Mittaukset suurlohkovaiheessa

Suurlohkovaiheessa mitattiin kannen alapuolisen T-palkin ja kannen liitoshitsi. Tämä pienaliitos hitsattiin käsin MAG-hitsauksena. T-palkkien mittauksessa piirrettyjen merkien kohdalta otettiin kannen alapuolisen a-mitan mittauspisteet. Mittauksessa käytettiin a-mitan mittalaitetta. A-mitta mitattiin hitsausliitoksen reunasta, koska hitsi oli pääosin muodoltaan kupuhitsi.



Kuva 18. Kannen alapuoli.

Kuvassa 18 on kannen ja T-palkin hitsausliitoksen a-mitta mitattiin suurlohkonkoontivaiheessa.

Kansien tasomaisuutta tarkasteltiin sekä silmämääräisesti että mittaamalla. Silmämääräinen tarkastelu suoritettiin arvioimalla rihtausjälkien määrää, mutta tällä tavoin ei saatu selkeää käsitystä lohkojen ja testilohkojen eroista. Tässä vaiheessa tuotantoa kannen tasomaisuuteen vaikuttavia muuttujia on tullut niin paljon, ettei tästä saatu selkeitä tuloksia.



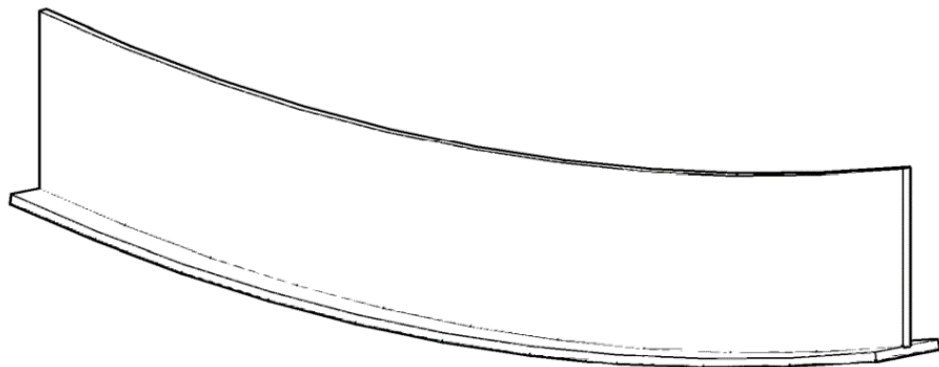
Kuva 19. Rihtauksen jälkiä.

Kuvassa 19 on kolmihaaraisen rihtauspolttimen jälkiä suurlohkon kansirakenteessa.

## 5 MITTAUSTULOSTEN TULKINTA JA PÄÄTELMÄT

Eromitalla tarkoitetaan uumalevyn vapaana olevan reunan mittaa verrattuna T-palkkiin pingotettuun referenssilankaan. Uumalevyn molemmista vapaista kulmista 100 mm alaspäin pingotettiin lanka. Suorasta langasta mitataan eromittaa uumalevyn reunaan. Eromitan mittaustuloksesta vähennettiin langan mitta uumalevyn reunaan (100 mm). Näin saatiin helpommin eroteltua, kumpaan suuntaan T-palkki on kaareutunut.

Eromitan ollessa 0 mm, on palkki täysin suora, tämä on testin tavoite. Eromitan ollessa positiivinen, on T-palkki taipunut päistään katsottuna uumalevyä kohti. Jos eromitta on negatiivinen, on T-palkki taipunut päistään uumalevystä poispäin.



Kuva 20. T-palkin kaartuma

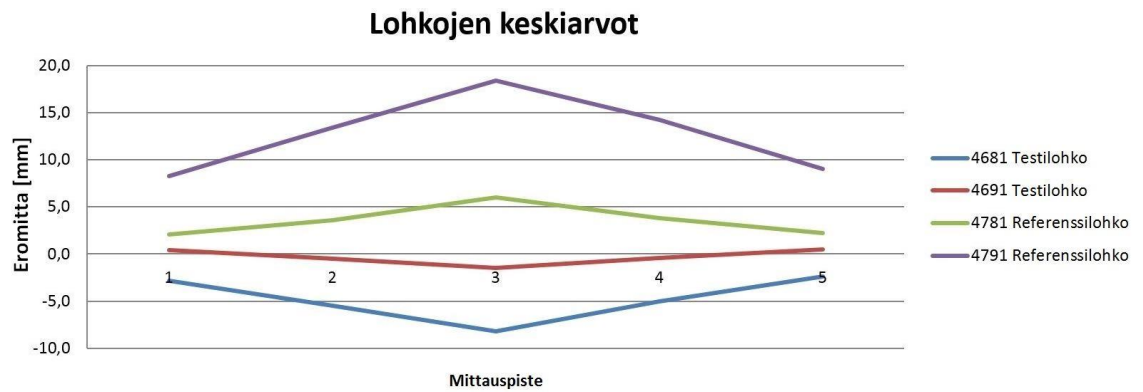
Kuvassa 20 on havainnollistettu taipumaa. Eromitan ollessa negatiivinen T-palkki kaartunut päistään laippalevystä poispäin. Tätä virhettä kutsutaan ”keinutuolin jalaksi”.

### 5.1 Kaikkien testisarjan T-palkkien mittaustulokset.

Kuvioissa lohkojen ja suurlohkojen eromitan funktio suhteessa mittauspisteeseen.

Taulukko 4. Kaikkien testisarjan T-palkkien mittaustulokset lohkoittain.

|                             |      |      |      |      |      |
|-----------------------------|------|------|------|------|------|
| <b>4681 Testilohko</b>      | -2,8 | -5,5 | -8,2 | -5,0 | -2,4 |
| <b>4691 Testilohko</b>      | 0,4  | -0,5 | -1,5 | -0,4 | 0,5  |
| <b>4781 Referenssilohko</b> | 2,1  | 3,6  | 6,0  | 3,8  | 2,2  |
| <b>4791 Referenssilohko</b> | 8,3  | 13,4 | 18,4 | 14,2 | 9,0  |

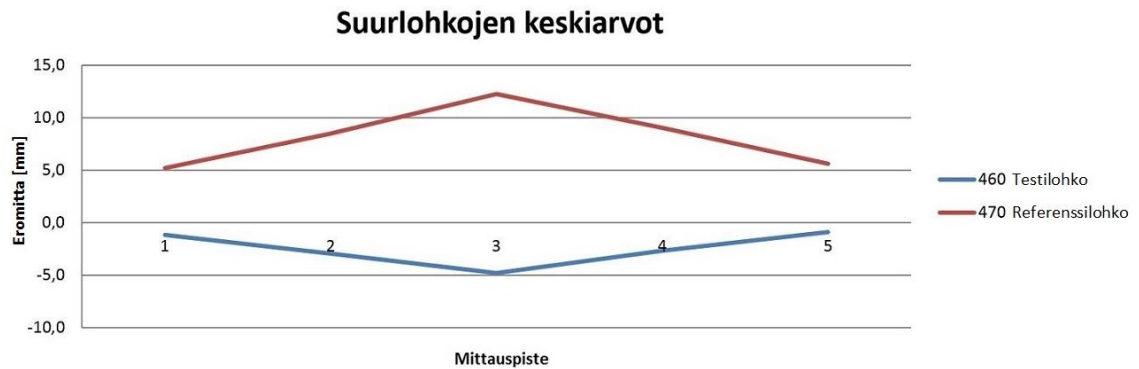


Kuvio 1. Kaikkien testisarjan T-palkkien mittaustulokset lohkoittain.



Taulukko 5. Kaikkien testisarjan T-palkkien mittaustulokset suurlohkoittain.

| Keskiarvot suurlohkoittain (mm) | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    |
|---------------------------------|------|------|------|------|------|
| <b>460 Testisuurlohko</b>       | -1,2 | -3,0 | -4,9 | -2,7 | -1,0 |
| <b>470 Referenssisuurlohko</b>  | 5,2  | 8,5  | 12,2 | 9,0  | 5,6  |



Kuvio 2. Kaikkien testisarjan T-palkkien mittaustulokset suurlohkoittain.

Kaikkia lohkojen keskiarvoja tarkasteltaessa kuviosta 1, voidaan havaita, että kaarevalla uumalevyllä valmistetut T-palkit, lohkoissa 4681 ja 4691, taipuivat toiseen suuntaan kuin suoralla uumalevyllä valmistetut. Koesarja oli keskiarvoltaan suurempi kuin perinteisellä menetelmällä valmistettu referenssisarja. Tulokset olivat johdonmukaisia ja deformaatio oli lineaarista. Kaikkia suurlohkojen T-palkkien keskiarvoja tarkasteltaessa kuviosta 2, voidaan havaita T-palkkien erot kaikkien testissä mitattujen T-palkkien osalta. Suurlohko 460:n kaarevilla uumalevyillä, suurlohko 470:n suorilla uumalevyillä. T-palkin kaarevuudet ovat lineaarisia kaarevuuden suunnasta riippumatta.

## 5.2 Pituussuuntaiset jäykkäajat poistettu tuloksista

Taulukko 6. Pituussuuntaiset jäykkäajat poistettu. Mittaustulokset lohkoittain.

| Keskiarvot lohkoittain (mm) | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    |
|-----------------------------|------|------|------|------|------|
| 4681 Testilohko             | -2,7 | -5,1 | -7,6 | -4,4 | -2,3 |
| 4691 Testilohko             | 0,7  | 0,3  | -0,3 | 0,4  | 0,7  |
| 4781 Referenssilohko        | 2,1  | 3,4  | 6,0  | 3,7  | 2,3  |
| 4791 Referenssilohko        | 8,1  | 13,9 | 19,1 | 14,7 | 9,4  |



Kuvio 3. Pituussuuntaiset jäykkäajat poistettu. Mittaustulokset lohkoittain.

Taulukko 7. Pituussuuntaiset jäykkäajat poistettu. Mittaustulokset suurlohkoittain.

| Keskiarvot suurlohkoittain (mm) | 1    | 2    | 3     | 4    | 5    |
|---------------------------------|------|------|-------|------|------|
| 460 Testisuurlohko              | -1,0 | -2,4 | -3,95 | -2,0 | -0,8 |
| 470 Referenssisuurlohko         | 5,1  | 8,65 | 12,55 | 9,2  | 5,85 |



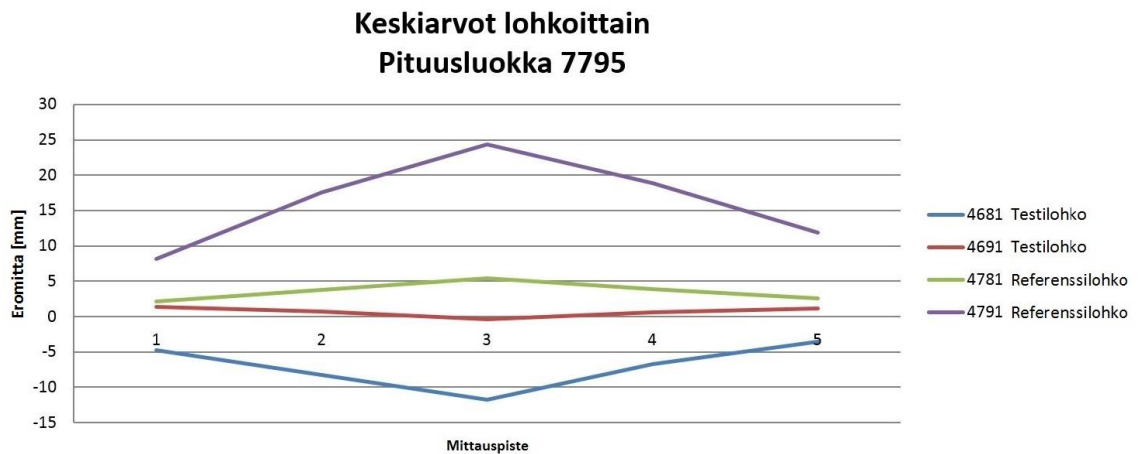
Kuvio 4. Pituussuuntaiset jäykkäajat poistettu. Mittaustulokset suurlohkoittain.

Kun tuloksista poistetaan pisimmät 11 m:n mittaiset T-palkit, joita tavallisesti käytetään pituussuuntaisina jäykkäajinä, jotka eivät tarvitse kaarevaa uumalevyä vaan käytännössä hitsautuvat suoriksi perinteisellä suoran uumalevyn valmistusmenetelmällä, päästään kuviossa 3 tarkastelemaan testi- ja referenssisarjojen eroja tarkemmin. Referenssi- ja testisarjan T-palkit kaartuivat eri suuntiin. Taipumat ovat lineaarisia. Tavoitteena on valmistaa suorja palkkeja ja tasomaisia rakenteita. Eromitta oli testisarjassa pienempi verrattuna perinteiseen menetelmään, joten voidaan todeta, että jo tällaisenaan valmistettuna T-palkkien valmistustarkkuus (suoruus) parani. Hypoteesina voidaan myös todeta, että testisarjaan valittu uumalevyn kaarevuus oli liian suuri. Koska palkit kaartuivat toiseen suuntaan verrattuna referenssisarjaan, uumalevyjen kaarevuutta vähentämällä palkeista tulee suurempia. Kuitenkaan tämän testin perusteella ei ole varmaa, että kaarevalla valmistusmenetelmällä kaikenkokoiset T-palkit ovat yksiselitteisesti suurempia. Näiden tuloksien pohjalta voidaan pitää jatkotutkimusta korjatulla uumalevyn kaarevuudella perusteltuna.

## 5.3 7795 mm pituusluokka

Taulukko 8. Pituusluokka 7795 mm. Mittaustulokset lohkoittain.

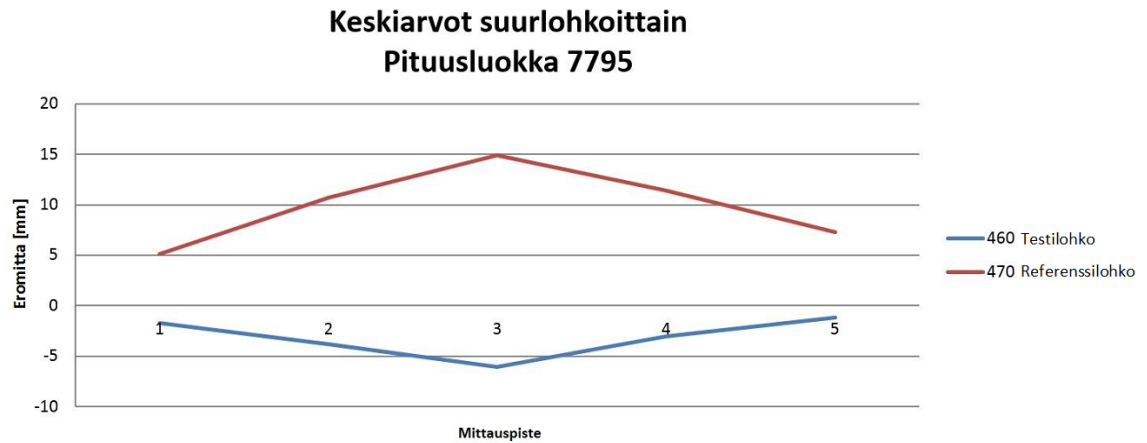
| Keskiarvot lohkoittain (mm) | 1    | 2    | 3     | 4    | 5    |
|-----------------------------|------|------|-------|------|------|
| <b>4681 Testilohko</b>      | -4,8 | -8,3 | -11,8 | -6,7 | -3,5 |
| <b>4691 Testilohko</b>      | 1,4  | 0,7  | -0,4  | 0,6  | 1,1  |
| <b>4781 Referenssilohko</b> | 2,1  | 3,8  | 5,4   | 3,9  | 2,6  |
| <b>4791 Referenssilohko</b> | 8,2  | 17,6 | 24,4  | 18,9 | 11,9 |



Kuvio 5. Pituusluokka 7795 mm. Mittaustulokset lohkoittain.

Taulukko 9. Pituusluokka 7795 mm. Mittaustulokset suurlohkoittain.

| Keskiarvot suurlohkoittain (mm) | 1    | 2    | 3    | 4     | 5    |
|---------------------------------|------|------|------|-------|------|
| <b>460 Testilohko</b>           | -1,7 | -3,8 | -6,1 | -3,05 | -1,2 |
| <b>470 Referenssilohko</b>      | 5,15 | 10,7 | 14,9 | 11,4  | 7,25 |



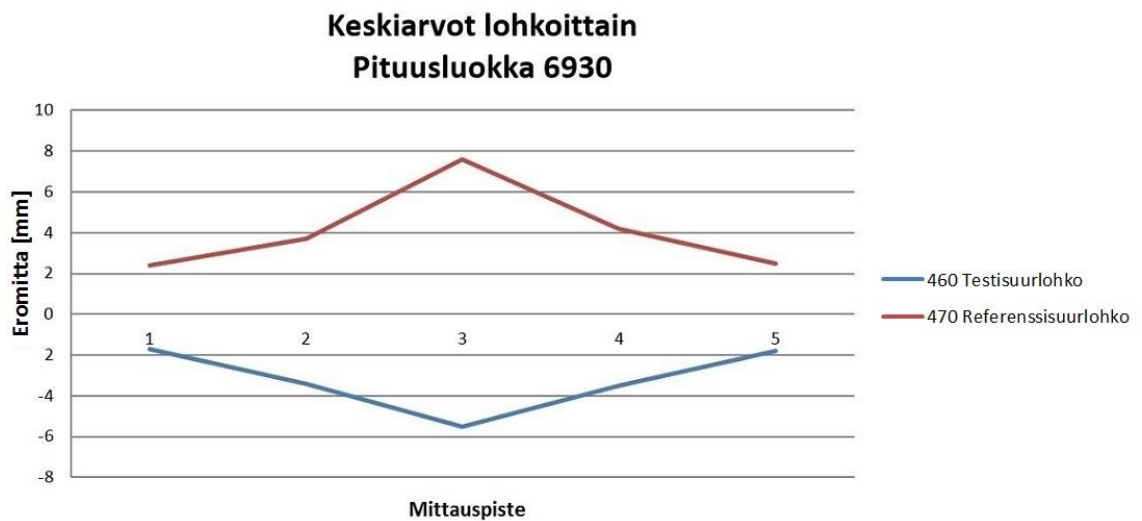
Kuvio 6. Pituusluokka 7795 mm. Mittaustulokset lohkoittain.

Tarkasteltaessa 7790 mm mittaluokan T-palkkeja lohkoittain eriteltyinä kuviosta 5, havaitaan kaarevan uumalevyn T-palkkien kaartuneen päistään laippalevyä kohti. Kaarevuus on 7795 mm mittaluokan palkeissa lineaarista. Tarkasteltaessa 7790 mm mittaluokan T-palkkeja suurlohkoittain eriteltyinä kuviosta 6, voidaan havaita kaarevalla uumalevyllä valmistettujen, käyrä 460, T-palkkien kaartuneen eri suuntaan suoran uumalevyn tekniikalla, käyrä 470, valmistettuihin nähden. Eromitta oli kaarevan uumalevyn menetelmällä pienempi, käyrä 460, verrattuna perinteiseen menetelmään, käyrä 470, joten voidaan todeta, että jo tällaisenaan valmistettuna T-palkkien suoruuks parani suoralla uumalevyllä valmistettuihin nähden.

## 5.4 6930 mm pituusluokka

Taulukko 10. Pituusluokka 6930 mm. Mittaustulokset lohkoittain.

| Keskiarvot suurlohkoittain (mm) | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    |
|---------------------------------|------|------|------|------|------|
| <b>4681 Testilohko</b>          | -1,7 | -3,4 | -5,5 | -3,5 | -1,8 |
| <b>4781 Referenssilohko</b>     | 2,4  | 3,7  | 7,6  | 4,2  | 2,5  |



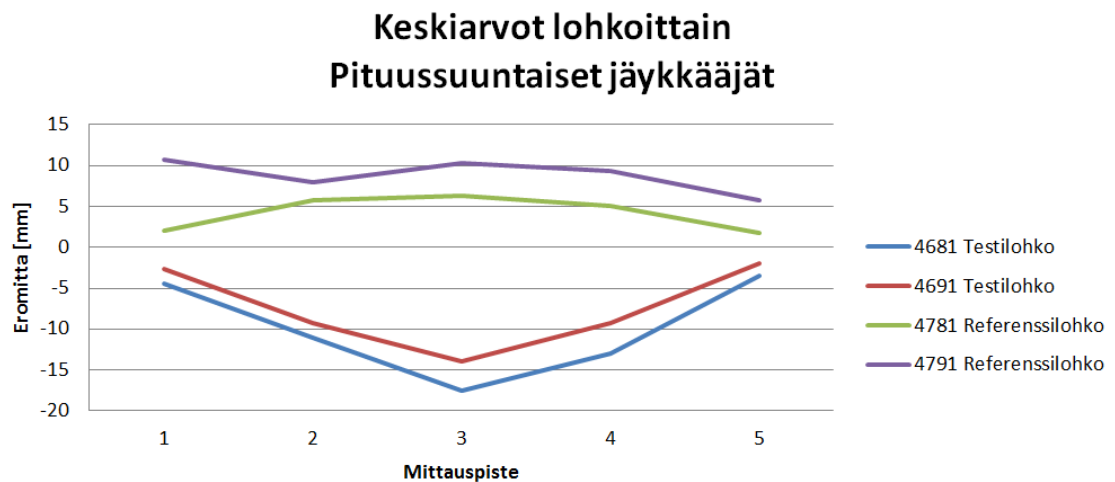
Kuvio 7. Pituusluokka 6930 mm. Mittaustulokset suurlohkoittain.

Mittaluokan 6930 mm T-palkkeja oli testisarjassa vain kahdessa lohossa. Muista mittaluokista poiketen deformaatio ei näissä ollut lineaarista, vaan palkin keskikohta deformoitui testisarjassa enemmän kuin palkkien päät. Tämä saattaa johtua suurempiin testipalkkeihin nähden pienemmästä ainevahvuudesta ja suhteellisesti suuremmista läpivienti- ja kevennysaukoista. Testin pohjalta voidaan todeta, että kaarevan uumalevyn valmistustavalla, käyrä 4681, T-palkeista saadaan suurempia.

5.5 11290 mm ja 11910 mm pituiset palkit. Käytetään tavallisesti pituussuuntaisina jäykkäinä.

Taulukko 11. Pituussuuntaiset jäykkäajat. Mittaustulokset lohkoittain.

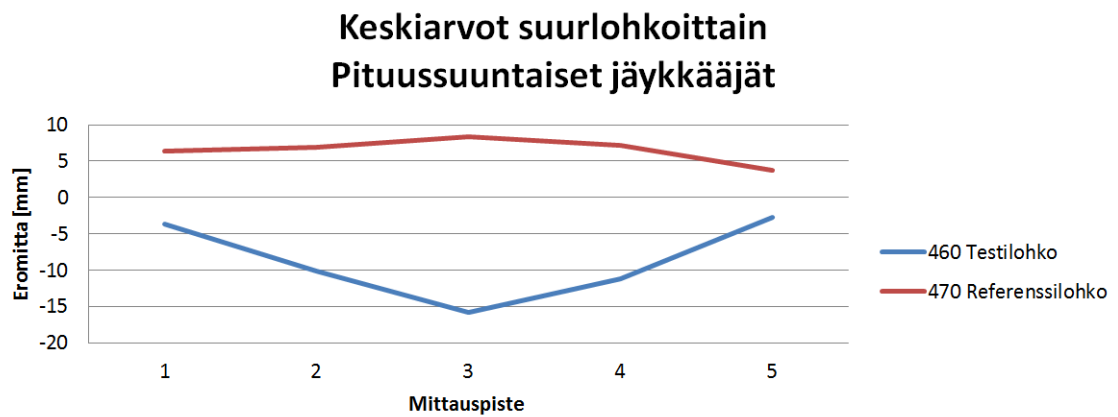
| Keskiarvot lohkoittain (mm) | 1    | 2    | 3     | 4    | 5    |
|-----------------------------|------|------|-------|------|------|
| <b>4681 Testilohko</b>      | -4,5 | -11  | -17,5 | -13  | -3,5 |
| <b>4691 Testilohko</b>      | -2,7 | -9,3 | -14   | -9,3 | -2,0 |
| <b>4781 Referenssilohko</b> | 2,0  | 5,7  | 6,3   | 5,0  | 1,7  |
| <b>4791 Referenssilohko</b> | 10,7 | 8,0  | 10,3  | 9,3  | 5,7  |



Kuvio 8. Pituussuuntaiset jäykkäajat. Mittaustulokset lohkoittain.

Taulukko 12. Pituussuuntaiset jäykkäajat. Mittaustulokset suurlohkoittain.

| Keskiarvot suurlohkoittain (mm) | 1    | 2      | 3      | 4      | 5     |
|---------------------------------|------|--------|--------|--------|-------|
| <b>460 Testisuurlohko</b>       | -3,6 | -10,15 | -15,75 | -11,15 | -2,75 |
| <b>470 Referenssuurlohko</b>    | 6,35 | 6,85   | 8,3    | 7,15   | 3,7   |



Kuvio 9. Pituussuuntaiset jäykkäajat. Mittaustulokset suurlohkoittain.

Testin suurimpia T-palkkeja valmistettaessa ei ole tarpeen käyttää kaarevan uumalevyn menetelmää. T-palkin materiaalivahvuudesta ja laipan sekä uumalevyn suuremmasta koosta johtuen palkki on jäykempi, mikä vastustaa hitsausdeformaatiota ja hitsauslämpö pääsee jakautumaan suuremmalle massalle. Näin suoran uumalevyn valmistusmenetelmällä T-palkit ovat suoria jäähtyttyään.



## 6 YHTEENVETO

Tämän työn tavoitteena on tarkastella hitsausdeformaatioita jauhekaarihitsuissa T-palkkeissa. Tarkoituksena on kehittää Meyer Turku Oy:n telakan T-palkkien valmistusta. T-palkkeja hitsataan koneellisesti jauhekaarihitsausmenetelmällä. Hitsauksen lämpö aiheuttaa metallissa pysyviä muodonmuutoksia, deformaatiota.

Jos deformaatiot otetaan huomioon jo suunnittelussa, on mahdollista valmistaa suurempia rakenteita. Teoreettiset deformaatiot mallinnettiin FEM-simulaatiolla. Tarkoituksena on selvittää tietokonemallinnuksen todenmukaisuus. Käytännössä tämä toteutetaan mittaamalla valmiiden T-palkkien profiilin vertikaalisen deformaation määrä useasta pisteestä. Mittapisteet yhdistämällä saadaan selville deformaation määrä, ja karkea sen muoto.

Tästä sarjakoollisesti suhteellisen pienestä testistä saadut tulokset olivat johdonmukaisia. Vastaavan testin teettämistä korjatulla uumalevyn kaarevuudella voidaan pitää perusteltuna. T-palkkien valmistustarkkuus vaikuttaa suoraan koko laivanrakennusprosessiin, sen tarkkuuteen ja tehokkuuteen. Suuremmilla T-palkeilla voidaan helpottaa lohkojen valmistusta ja ainakin teoriassa vähentää rihtaustarvetta. Kun laivan teräsrakenteita rihdataan vähemmän, myös epäsuotuisia lämmityksestä johtuvia jäännösjäännityksiä jää rakenteisiin vähemmän. Mittausmenetelmä oli toimiva ja riittävä mittatarkkuus saavutettiin. Mittaukset sujuivat pääosin hyvin tuotannon aikana ylimääräisenä valmistuksen välivaiheena. Toista koesarjaa ajatellen käytännön mittausmenetelmää tulisi kehittää ergonomisemmaksi sarjakoon mahdollisesti kasvaessa suuremmaksi, ja se tulisi suorittaa työpöydällä hallin lattian sijasta. Valmistamisen kannalta ei ole suurta eroa kaarevan tai suoran uumalevyn käsittelyssä, tai hitsauksessa. Suurin potentiaalinen ongelmakohta on jauhekaarihitsauskoneen käytössä, jossa voi ilmetä ongelmia vectorullien kanssa. Myös uumalevyn kaarevuus on niin pieni, ettei sitä havaitse silmällä helposti.

## LÄHTEET

ESAB 2016. ESABIN OSAAMISKESKUS, Jauhekaarihitsaus. Viitattu 29.4.2016. <http://www.esab.fi/fi/fi/education/blog/jauhekaarihitsaus.cfm>.

Hashemzadeh, M., Garbatov, Y. & Guedes Soares, C. 2014. Analysis of butt-weld induced distortion accounting for the welding sequences and weld toe geometry. Maritime Technology and Engineering. Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-02727-5.

Hultafors 2016. Teräsmittanauhojen tuotantotoleranssit. Viitattu 26.4.2016. <http://www.hultafors.fi/tuotetietoa/tarkat-mittanauha>

Laukkanen Markku, 2008, Lohkotehdas menetelmäkuvaus, Turku jäykkäävien koonti Grängesillä.

Lepola Pertti, Matti Makkonen 2005. Hitsaustekniikat ja teräsrakenteet Kustantaja: Werner Söderström Osakeyhtiö 1. painos, 2005 ISBN 951-0-32254-7

Meyer Turku. Runkosuunnittelijan konekirja, 2012.

Meyer Turku 2016. Timeline of Meyer Turku's history 2016. Viitattu 26.4.2016. [http://www.meyerturku.fi/en/meyerturku\\_com/shipyard/company/company\\_history/timeline\\_of\\_meyer\\_turku\\_s\\_history/timeline\\_of\\_meyer\\_turku\\_s\\_history.jsp](http://www.meyerturku.fi/en/meyerturku_com/shipyard/company/company_history/timeline_of_meyer_turku_s_history/timeline_of_meyer_turku_s_history.jsp).

SFS-EN 1011-1

Soares Guedas & T.A. Santos (Eds) 2015. Maritime Technology and Engineering. Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-02727-5.

Suomen Hitsausteknillinen Yhdistys ry. (SHY) 2016. Viitattu 26.4.2016 [http://www.shy-hitsaus.net/portals/shy/iBooklet/2007/ht\\_2\\_07/index.html#/10/](http://www.shy-hitsaus.net/portals/shy/iBooklet/2007/ht_2_07/index.html#/10/).

## LIITTEET

Liite 1. Deformaation laskennan ja FEM analyysin kuvaus.

### Prediction of bending deformation due to welding by using simplified finite element analysis

When two plates are welded together, shrinkage along the welding direction occurs, which can cause significant bending distortions, see Figure 1. Nowadays finite element (FE) analysis can be done to predict such welding distortions, for example it has been used by Chang, Hashemzadeh, Garbatov, Guedes Soares. Typically the FE-model is created by eight-node three-dimensional brick elements, which is analysed using nonlinear transient thermal analysis with a moving heat source. Such approach seems to be accurate but it is very time consuming and computationally extremely expensive to use. Especially in ship building field, where different T-girders are hundreds and design time is very limited. Therefore analytical methods seem more attractive in practice.

Longitudinal shrinkage strain can be calculated using Okerblom (1955) formulae:

$$\varepsilon_L = \frac{\delta_L}{L} = \frac{A_T \cdot t}{A} = 0.335 \frac{q \cdot \alpha}{A \cdot v_w \cdot c\gamma}, \text{ where} \quad (1)$$

$L$  is the plate length,  $\delta_L$  is longitudinal shrinkage due to welding,  $A_T$  is thermal impulse force,  $t$  is thickness of plate,  $A$  is cross-sectional area,  $q$  is specific heat input,  $\alpha$  is thermal expansion,  $v_w$  is speed of welding and  $c\gamma$  is total volume heat capacity. The Okerblom (1955) calculation model assumes that the weld is deposited simultaneously over the whole length and it is valid for fast moving heat sources. Therefore for long T-girders the method can cause some errors.

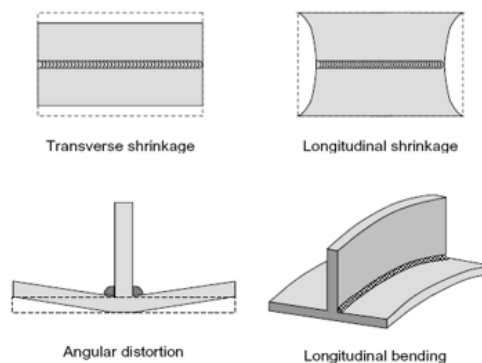
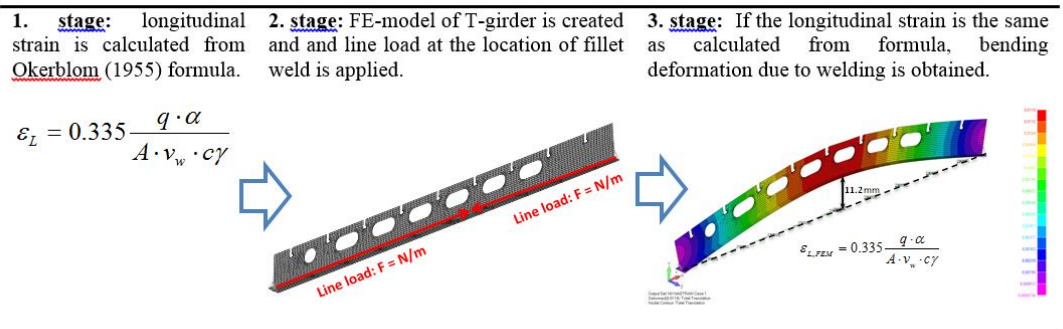


Figure 1: Typical welding distortions

Next stage is to evaluate T-girder bending deformations from longitudinal strain. For that, finite element (FE) model of T-girder is created using shell elements and line load at the location of fillet weld is applied. Line load value is chosen so that it will create similar longitudinal strain as it was calculated from the Okerblom (1955) formula. The flowchart of the process is shown in **Virhe. Viitteen lähde ei löytynyt.** and the target is to simulate longitudinal shrinkage effects. The FE analysis is carried out using NX Nastran 7.1 software with FEMAP 10.3. The calculation time of typical case is about 1 minute.



**Figure 2: Flowchart of prediction of bending deformation due to welding**

This hybrid method is applied for various T-girders of typical RoPax ship. The calculated maximum bending deformation due to welding for transversal girders are shown in Table 1 and for longitudinal girders in

Table 2. Compare to longitudinal girders, transversal girders has lots of different pipe and stiffener openings, which make it theoretically more difficult to predict.

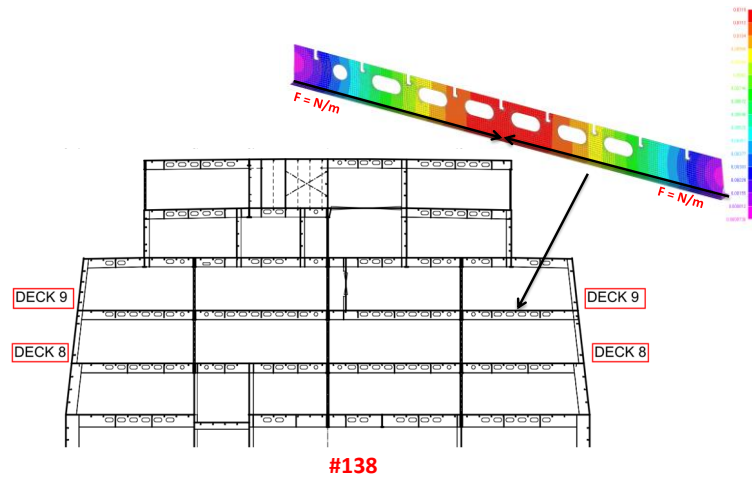


Figure 2: Develop hybrid method is applied for various T-girders of typical RoPax ship

Table 1: Transversal girders maximum bending deformation due to welding

| DECK 8 #138      | L [MM] | GIRDER TYPE        | MAX WELDING DEFORMATION [MM] |
|------------------|--------|--------------------|------------------------------|
| FROM S ... -7800 | 6540   | T550X10 + FB250X20 | 12                           |
| FROM -7800 ... 0 | 7800   | T550X10 + FB250X20 | 18                           |
| FROM 0 ... 7800  | 7800   | T550X10 + FB250X20 | 19                           |
| FROM 7800 ... P  | 6540   | T550X9 + FB200X20  | 12                           |

| <b>DECK 9 #138</b> | L [MM] | GIRDER TYPE      | MAX WELDING DEFORMATION<br>[MM] |
|--------------------|--------|------------------|---------------------------------|
| FROM S ... -7800   | 6500   | T520X7+ FB120X10 | 18                              |
| FROM -7800 ... 0   | 7800   | T520X7+ FB120X10 | 31                              |
| FROM 0 ... 7800    | 7800   | T520X7+ FB120X10 | 28                              |
| FROM 7800 ... P    | 6500   | T520X7+ FB120X10 | 18                              |

**Table 2: Longitudinal girders maximum bending deformation due to welding ‘**

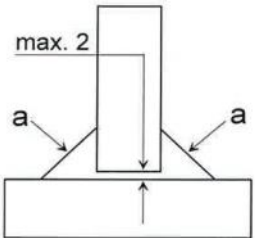
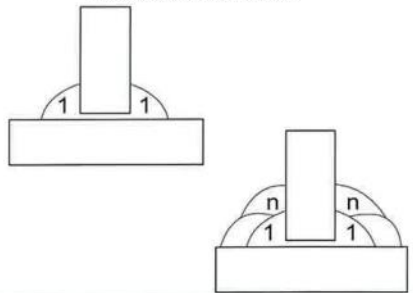
| <b>DECK 9</b>    |       |                              |
|------------------|-------|------------------------------|
| GIRDER TYPE      | L [M] | MAX WELDING DEFORMATION [MM] |
| T520X8+ FB200X15 | 11.9  | 35                           |
| T520X8+ FB200X15 | 6.5   | 7                            |

| <b>DECK 8</b>    |       |                              |
|------------------|-------|------------------------------|
| GIRDER TYPE      | L [M] | MAX WELDING DEFORMATION [MM] |
| T550X9+ FB200X20 | 11.9  | 30                           |
| T550X9+ FB200X20 | 6.5   | 6                            |

## REFERENCES

- Chang, P.H. & Teng, T.I. 2004. numerical and experimental investigations on the residual stresses of the butt-welded joints. *Computational Materials Science*, 29, 511–522.
- Hashemzadeh, M., Garbatov, Y. & Guedes Soares, C. 2014. Analysis of butt-weld induced distortion accounting for the welding sequences and weld toe geometry. *Maritime Technology and Engineering*. Taylor & Francis, pp. 523–533
- Okerblom, N.O. 1955. *The Calculations of Deformations of Welded Metal Structures*, London, HUSO.

## Liite 2. Hitsausohje (WPS). T-palkkien hitsaus.

| MEYER TURKU<br>SHIPYARD 1937  |                    | HITSAUSOHJE (WPS)<br>WELDING PROCEDURE SPECIFICATION                                |   |  |                         | WPS 291<br>Rev. 0<br>4.11.2005   |   |   |   |                                       |
|---|--------------------|---|---|--|-------------------------|--|---|---|---|---------------------------------------|
| Hitsausprosessi<br>Welding Process <b>123 JAUHEKAARIHITSAUS - SAW (TWIN ARC)</b><br>Menetelmäkoee<br>WPQR 38, 39, 40, 9411A, 9724 |                    | Lisäaine / Consumable<br><b>ESAB OK AUTROD 12.22</b><br><b>+ ESAB OK FLUX 10.71</b> |   | EN Luokitus / Classification<br>S 38 4 AB S2Si<br>A<br>S A AB 1 67 AC H5<br>A  |                         | Indeks / Index<br>A<br>A   |   |   |   |                                       |
| Vaatimukset<br>Requirements <b>SFS-EN ISO 15614-1, DNV</b><br>Hitsausasento<br>Welding position <b>PB</b>                         |                    | Suojakaasu<br>Shielding gas -   |   | Kaasun virtaus<br>Gas flow - l/min   |                         | A-mitta /<br>Throat<br>Yksipalkko /<br>Single pass 3 - 5 mm<br>Palkin paksuus /<br>Monipalkko /<br>Multi pass > 5 mm                                   |   |   |   |                                       |
| Hitsausasento<br>Welding position <b>PB</b>   |                    | Juurituki<br>Backing -  |   | Juurijauhe<br>Root flux -  |                         | Esilämmitys /<br>Preheating / moisture removal 5 °C<br>Väli-palkkolämpötila<br>Interpass Temp. max. 150 °C   |   |   |   |                                       |
| Railionvalmistus / Groove preparation -   |                    | Juuren avaus / Root gouging -   |   | Muita tietoja /<br>Other info / Tungsten elektrode / Type / Size -   |                         | Poittimen kulma ja sivuttaisliike /<br>Torch angle and weaving<br>Palkko/Bead T (työntö/push)<br>Kulma/Angle Sivuttaisliike /<br>V (veto/pull) Weaving |   |   |   |                                       |
| Liitoksen kuva/ Joint design<br>               |                    |   |   | Hitsausjärjestys/Welding Sequences<br> |                         |  |   |   |   |                                       |
| Asento/ Position  | Palkko<br>Bead No. | Lisäaine-<br>indeksi<br>Filler Metal<br>Index                                       | Puikon/<br>langan halk.<br>Electrode/<br>Wire diam. | Virta<br>Current<br>A  | Jännite<br>Voltage<br>V | Napaisuus<br>Polarity<br>AC/DC   | Langan syöttö-<br>nopeus /<br>Wire feed<br>speed<br>m/min | Vapaalan-<br>kapitus<br>Stick-out<br>length<br>mm | Kuljetus-<br>nopeus<br>Travel speed<br>cm/min | Hitsausenergia<br>Arc energy<br>kJ/cm |
| a=3<br>1. puoli<br>2. puoli<br>a=3,5<br>a=4,5   | 1                  | A   | 2x2   | 770±50   | 26±2                    | DC+  | -   | 25  | 150±15  | 8±1                                   |
|   | 1                  | A   | 2x2   | 620±50   | 26±2                    | DC+  | -   | 25  | 150±15  | 6,5±1                                 |
| MONTA PALKKOA, a>5 mm   | 1                  | A   | 2x2   | 700±70   | 26±2                    | DC+  | -   | 15-25   | 140±10  | 8±1                                   |
|   | 1                  | A   | 2x2   | 700±70   | 26±2                    | DC+  | -   | 15-25   | 100±10  | 11±1                                  |
|   | 1                  | A   | 2x2   | 850±80   | 26±2                    | DC+  | -   | 15-25   | 110±20  | 13±3                                  |
|   | 2-n                | A   | 2x2   | 750±70   | 28±2                    | DC+  | -   | 15-25   | 100±20  | 14±3                                  |

Valmistaja / Manufacturer  
Kari Laiho  
AFY

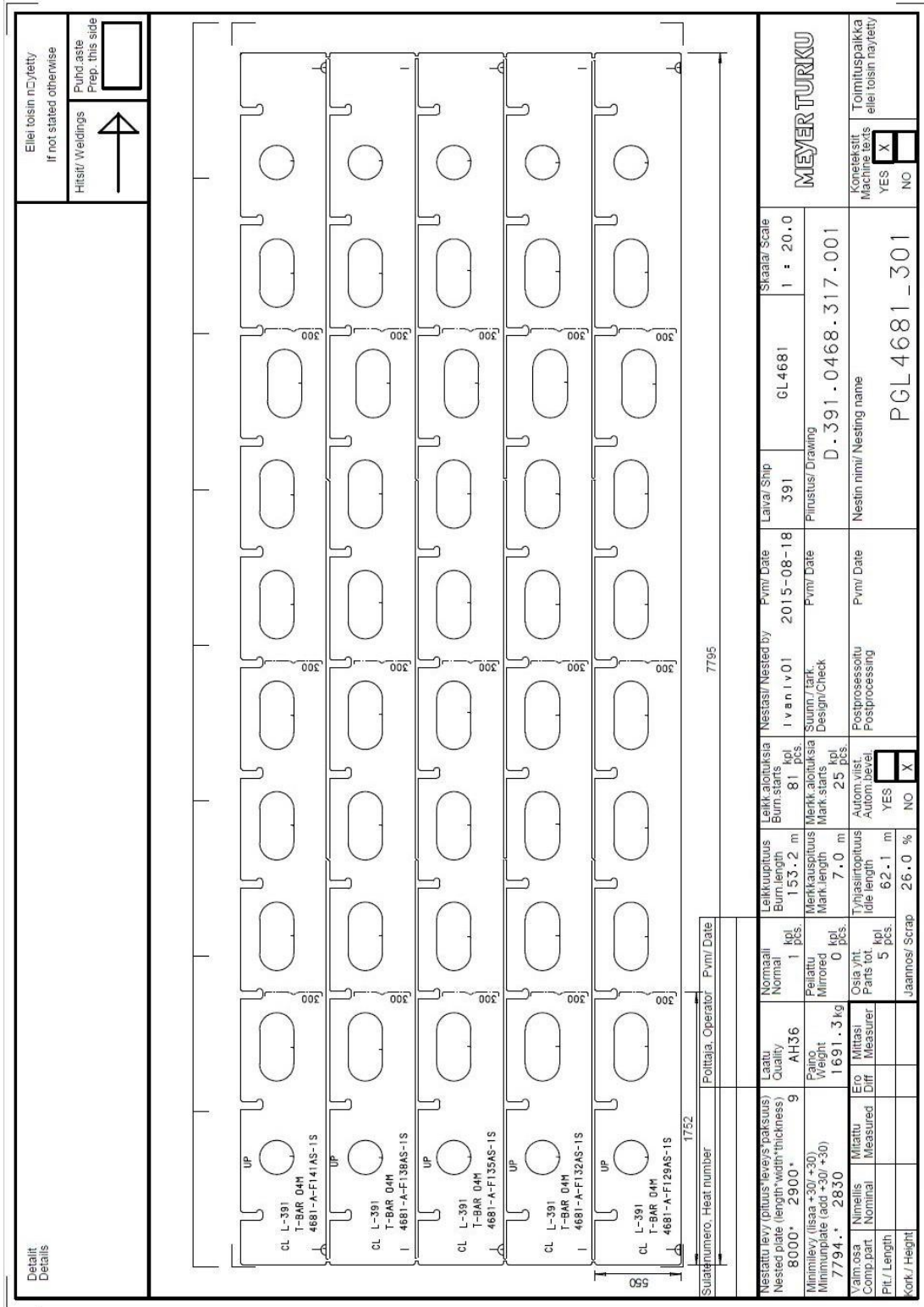
WPS compiled by:  
Tommi Tahlinen  
Polartest Oy

**POLARTEST OY**  
Metallilaboratorio



Liite 3. Raakalevyn nestauskuva.

NS. Polttokartta plasmaleikkurille uumalevyjen leikkuuseen.



## Liite 4. Jännite- ja virtamittarin mittatarkkuudet.

**3.1 Measurement Specifications**

|  |  |
|--|--|
| Temperature and humidity for guaranteed accuracy | 23°C ± 5°C (73°F ± 9°F),<br>80% RH or less |
|--|--|

|                      |   |
|----------------------|---|
| Applicable standards | Safety:   |
|                      | EN61010-1:2001  |
|                      | Voltage input: Pollution level 2, measurement category III (expected transient overvoltage: 6000 V) |
|                      | EN61010-031:2002  |
|                      | EN61010-2-032:2002  |
|                      | Type A current sensor   |
|                      | EN60529:1991 IP40 (protected against access to hazardous parts with a wire)                         |
|                      | EMC:  |
|                      | EN61326:1997+A1:1998+A2:2001 +A3:2003   |
|                      | EN61000-3-2:2000<br>EN61000-3-3:1995+A1:2001  |

**3.1.2 Voltage Measurement Specifications**

## ○ Voltage display accuracy

## ① DC voltage V (mean value)

| Range (Accuracy Range) | Resolution | DC                  |
|------------------------|------------|---------------------|
| 30V (3.00~30.00V)      | 0.01V      | ± (1.0%rdg. +3dgt.) |
| 300V (30.0~300.0V)     | 0.1V       | ± (1.0%rdg. +3dgt.) |
| 600V (60.0~600V)       | 1V         | ± (1.0%rdg. +3dgt.) |

## ① DC voltage V peak (wave peak value)

| Range (Accuracy Range) | Resolution | DC                  |
|------------------------|------------|---------------------|
| 30V (3.0~75.0V)        | 0.1V       | ± (1.0%rdg. +7dgt.) |
| 300V (30~750V)         | 1V         | ± (1.0%rdg. +7dgt.) |
| 600V (60~1000V)        | 1V         | ± (1.0%rdg. +7dgt.) |

**3.1.1 Current Measurement Specifications**

## ○ Current display accuracy

## ① DC current A (mean value)

| Range (Accuracy Range) | Resolution | DC                  |
|------------------------|------------|---------------------|
| 200A (10.0~200.0A)     | 0.1A       | ± (1.3%rdg. +3dgt.) |
| 2000A (100~2000A)      | 1A         | ± (1.3%rdg. +3dgt.) |

## ○ Output accuracy

## ① DC current A (mean value)

| Range (Accuracy Range) | MON      | DC                |
|------------------------|----------|-------------------|
| 200A (10.0~200.0A)     | 1V/f. s. | ± (1.3%rdg. +5mV) |
| 2000A (100~2000A)      | 1V/f. s. | ± (1.3%rdg. +5mV) |