

SUPPLEMENT No. 513

*Kleimola Matti:*

Laskelmat ESTONIAN keulavisiirin lukituslaitteiden kuormituksista.

Espoo 1997.

*Kleimola Matti:*

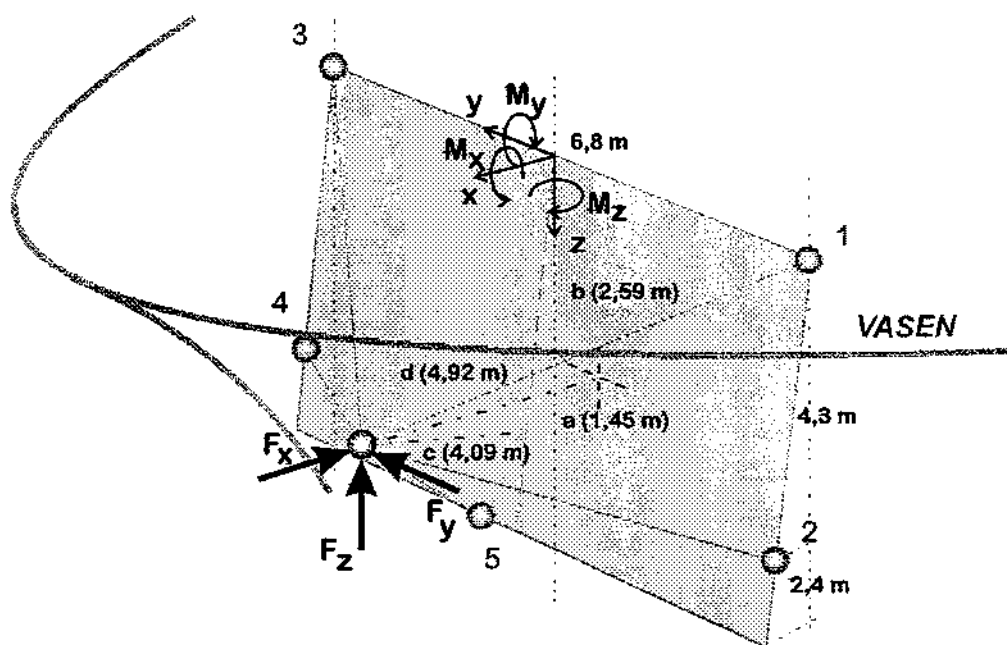
Calculations of the loadings on MV ESTONIA's  
bow visor locking devices.

Espoo 1997

## LASKELMAT ESTONIAN KEULAVISIIRIN LUKITUSLAITTEIDEN KUORMITUKSISTA

### 1. Lähtöarvot

Estonian keulavisiirin kiinnityssaranoiden ja lukituslaitteiden kiinnityspisteet on esitetty alla olevassa kaaviossa. Kiinnityspisteitä on kaikkiaan 5; kaksi saranaa on ylhäällä ja kolme lukkoa alhaalla.



Visiiriä kuormittavan resultantin  $F_{res}$  koordinaatit ovat:

$$\begin{array}{ll} a = 1,45 \text{ m (y-aks.)} & c = 4,09 \text{ m (res. et. tasosta 1,2,3,4)} \\ b = 2,59 \text{ m (z-aks.)} & d = 4,92 \text{ m (x-aks.)} \end{array}$$

Aaltokuormituksen suuruus on määritetty mallikokeiden pohjalta (SSPA) ja niiden mukaan visiiriin vaikuttavien momenttien ja voimien suhteet ovat:  $M_x/M_y = 0,25$ ,  $M_z/M_y = 0,08$  ja  $F_x/F_z = 1$ .

Kaikki visiiriin vaikuttavat voimat ja momentit voidaan esittää visiiriä avaavan momentin  $M_y$  avulla ratkaisemalla yhtälöryhmä (1).

$$\begin{cases} M_x = F_z \cdot y - F_y \cdot z \\ M_y = F_z \cdot x - F_x \cdot z \\ M_z = F_y \cdot x - F_x \cdot y \end{cases} \quad (1)$$

Kun yhtälöryhmään sijoitetaan edellä annetut momenttien suhteet sekä resultantin paikkakoordinaatit, saadaan

$$\begin{cases} F_x = 0,43 \cdot M_y = 0,69 \cdot F_{res} \\ F_z = 0,43 \cdot M_y = 0,69 \cdot F_{res} \\ F_y = 0,14 \cdot M_y = 0,23 \cdot F_{res} \\ F_{res} = 0,62 \cdot M_y \end{cases} \quad (2)$$

Visiirin omapaino  $G_v$  on 0,55 MN ja sen vaikutuspiste on aluksen keskiviivalla etäisyydellä 4,9 m yz-tasosta. Visiirin omapaino aikaansaa sekä suorat tukireaktiot kiinnityspisteihin että momentin y-akselin ympäri. Vaikutukset summataan aaltokuormituslaskelmien yhteydessä.

## 2. Kuormituksen jako kiinnityspisteisiin

Aaltokuormitusresultantin komponentit  $F_x$ ,  $F_y$  ja  $F_z$  aikaansaavat tyypillisiä veto-puristusrasituksia ja leikkausvoimia visiirin kiinnityspisteisiin. Visiiri kiinnittyy laivaan kahdella saranalla, kahdella sivulukolla ja yhdellä pohjalukolla. Rakenne on staattisesti epämääräinen ts. analyttisin menetelmin kiinnityskohtien kuormituksia ei voida laskea täysin eksaktisti, vaan on suoritettava likimääräistyksiä.

### *Visiiriä kuormittavien voimien tarkastelu*

- $F_x$  on visiiriä sulkeva voima ja se kuormittaa epäsymmetrisesti suoraan laivan pituusakselin suuntaisesti. Voima synnyttää kaikkiin kiinnityspisteisiin puristusjännityksen (epäsymmetrisyydestä johtuen vasemmalle puolelle hiukan suuremmat kuin oikealle puolelle).
- $F_z$  synnyttää kaikkiin lukituspisteisiin leikkausvoiman z-akselin suunnassa ja tämä leikkausvoima ilmenee z-akselin suuntaisena vetona kaikissa kiinnityspisteissä. Suurin kuormitus on vasemmassa sivulukossa ja vasemmassa saranassa.  $F_z$  aikaansaa myös visiiriä avaavan momentin, jolloin sivulukkoihin ja pohjalukkoon syntyy veto-kuormitus. Ylhäällä oleviin saranoihin kehittyy puristuskuormitus ja visiiriä sulkeva voima. Kokonaisvaikutus on epäsymmetrinen siten, että vasen sivulukko ja pohjalukko kuormittuvat eniten.
- $F_y$  synnyttää leikkausvoimia saranoihin ja lukituslaitteisiin.  $F_y$  pyrkii myös avaamaan visiirin vasemman puoleiselta reunalta synnyttämällä

kiertomomentin z-akselin ympäri. Vetokuormitus on suurin vasemmassa sivulukossa ja -saranassa. Oikeanpuoleisiin saranoihin syntyy puristusjännitys. Pohjalukossa vetokuormitus jää vähäiseksi.

- Visiirin oma paino  $G_v$  siirtyy suoraan leikkausvoimana kiinnityspisteille. Lisäksi se aiheuttaa momentin y-akselin ympäri siten, että lukituslaitteisiin kohdistuu puristus- ja saranoihin vetorasitukset.

Kiinnityspisteiden kokonaisrasitus lasketaan yhdistämällä superpositioperiaatteen mukaan aaltokuormitusresultantin voimakomponentit ja resultantin synnyttämien momenttien tukireaktiot kussakin kiinnityspisteessä.

### 3. Voimien suora jako kiinnityspisteille

Jaetaan aluksi  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  ja  $G_v$  viidelle kiinnityspisteelle tasakuormina ja muodostetaan niille resultantit (epäsymmetria ja momenttivaikutukset otetaan huomioon myöhemmin). Laskelmissa käytetään aaltokuormitusresultantin jakoa  $F_x=F_z=0,69 F_{res}$ ,  $F_y=0,23 F_{res}$  ja visiirin suhteutettua painoa  $G_v=0,10 F_{res}$ .

Laivan keulaan vaikuttava aaltokuormitus  $F_x$  arvioidaan jakautuvan tasan kaikille kiinnityspisteille.

$$F'_{1,2,3,4,5x} = -\frac{1}{5} \cdot F_x = -0,14 \cdot F_{res} \quad (3)$$

Sivuaallokon vaikutuksesta syntyy visiiriin sivuttaisvoima  $F_y$ .

$$F'_{1,2,3,4,5y} = \frac{1}{5} \cdot F_y = 0,045 \cdot F_{res} \quad (4)$$

Pystyakselin suuntainen voima  $F_z$  synnyttää tukireaktion jokaiseen kiinnityspisteeseen. Voima jaetaan tasan kaikille kiinnityspisteille.

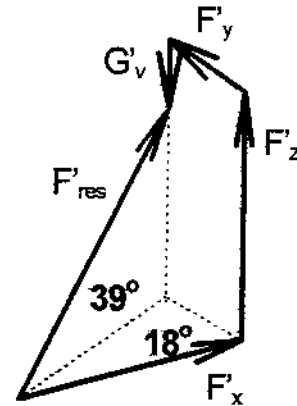
$$F'_{1,2,3,4,5z} = -\frac{1}{5} \cdot F_z = -0,14 \cdot F_{res} \quad (5)$$

Visiirin painosta syntyy kiinnityspisteisiin suora kuormitus.

$$G'_{1,2,3,4,5z} = \frac{1}{5} \cdot G_v = 0,02 \cdot F_{res} \quad (6)$$

Saranoihin ja lukituslaitteisiin vaikuttavat resultanttivoimat lasketaan yhtälöistä (3), (4), (5) ja (6), jolloin voimien yhteisvaikutus määräytyy vektorisummana. Jokaisessa kiinnityspisteessä resultanttikuormitus on yhtäsuuri ja suunnaltaan sama.

- $F'_{1,2,3,4,6res} = 0,19 F_{res}$

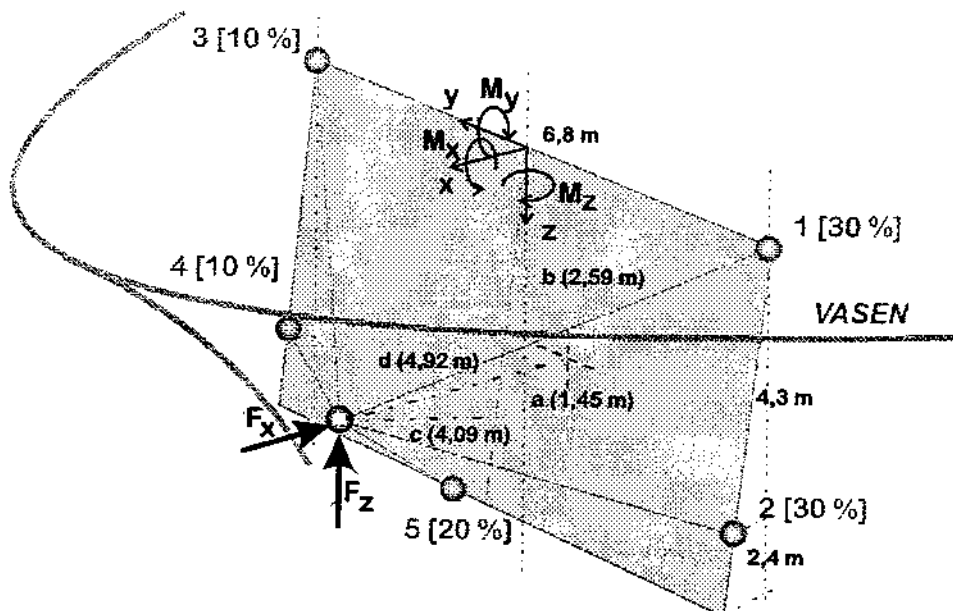


Jokaisen kiinnityspisteen resultantti suuntautuu taakse ja ylös. Kuormitus on visiiriä sulkeva.

#### 4. Kuormituksen epäsymmetria ja momenttivaikutukset

##### *Resultanttikuormituksen epäkeskeinen sijainti*

Aaltokuormituksen epäsymmetria jaetaan saranoille ja lukituspisteille tasapainoehdojen perusteella siten, että ensin jaetaan visiiriin vaikuttavan voimakomponentin  $F_x$  kuormitus peikästään saranoille (1,3) ja sivulukoille (2,4). Tasapainoehdosta seuraa, että saranat kantavat kuormasta yhteensä 40 % ja lukot 60 % ja että visiirin vasen reuna kuormittuu 70 % ja oikea reuna 30 %. Pohjalukon voidaan arvioida tasaavan sivulukkojen kuormitusta siten, että lukituslaitteet ottavat edelleen 60 % kuormituksesta  $F_x$ . Tasajaon asemesta saadaan kiinnityspisteiden kuormitusjako alla olevan kuvion mukaiseksi.



Pystysuuntainen voimakomponentti  $F_z$  on tasapainossa saman ehdon mukaan kuin x-akselin suuntainen resultantti  $F_x$ . Sivusuuntainen resultanttivoi-

ma  $F_y$  suuntautuu hyvällä tarkkuudella kiinnityspisteiden painopisteen kautta ja se voidaan jakaa kiinnityspisteille tasajaolla.

Kiinnityspisteiden resultanttikuormat voidaan nyt tarkentaa edellä kuvattujen tasapainoehtojen avulla, jolloin saadaan

- $F'_{1res} = 0,29 F_{res}$
- $F'_{2res} = 0,29 F_{res}$
- $F'_{3res} = 0,10 F_{res}$
- $F'_{4res} = 0,10 F_{res}$
- $F'_{5res} = 0,19 F_{res}$

(7)

### **Visiiriin vaikuttavien momenttien tarkastelu**

Voimien  $F_y$ ,  $F_z$  ja  $G_v$  momentit tasapainotetaan ja otetaan erikseen huomioon kiinnityspisteiden reaktivoimina. Sivuaallokon synnyttämä ja visiiriä avaava momentti ( $F_y \cdot c$ ) välittyy nurkkapisteiden (1, 2) ja (3, 4) muodostamana momenttiparina saranoihin ja sivulukkoihin. Pohjalukkoon ei synny merkittäviä reaktivoimia, koska se on laivan keskilinjan vieressä (0,4 m). Se voidaan jättää huomioon ottamatta.

*Sivuttaisvoima  $F_y$ :*

Lasketaan momenttitasapaino pysty akselin suhteen (suunta  $15^\circ$  z-akselin suunnasta):

$$F''_{1x} \cdot 3,4 + F''_{2x} \cdot 3,4 + F''_{3x} \cdot 3,4 + F''_{4x} \cdot 3,4 - F_y \cdot c = 0 \quad (8)$$

missä  $F''_{1x}$ ,  $F''_{2x}$ ,  $F''_{3x}$  ja  $F''_{4x}$  merkitään yhtä suuriksi ja  $c$  on 4,09 m.

- $F''_{1,2,x} = 0,30 \cdot F_y = 0,07 \cdot F_{res} = -F''_{3,4,x}$  (9)

*Vertikaalikuorma  $F_z$ :*

Voima muodostaa visiiriä avaavan kiertomomentin ( $F_z \cdot d$ ) sijaitessaan kiinnitystason edessä etäisyydellä  $d$  (4,92 m) y-akselista. Momentti välittyy pisteryhmien (1, 3) ja (2, 4, 5) voimaparina saranoihin ja lukituslaitteisiin.

Momenttitasapaino lasketaan y-akselin suhteen (ks. kuva sivulla 1):

$$F'''_{2x} \cdot 4,45 + F'''_{4x} \cdot 4,45 + F'''_{5x} \cdot (4,45 + 2,48) - F_z \cdot d = 0 \quad (10)$$

missä  $F'''_{2x}$ ,  $F'''_{4x}$  ja  $F'''_{5x}$  merkitään yhtä suuriksi ja  $d$  saa arvon 4,92 m

- $F'''_{2,4,5x} = 0,31 \cdot F_z = 0,21 \cdot F_{res}$  ja (11)

- $F'''_{1,3x} = -\frac{3}{2} \cdot F'''_{2,4,5x} = -0,32 \cdot F_{res}$  (12)

Visiirin paino  $G_v$ :

Visiirin omapainon ( $G_v$ ) momenttivaikutus lasketaan y-akselin suhteen yhtälön (10) tapaisesti. Vaikutusetäisyys y-akselista on 4,9 m.

$$G''_{2x} \cdot 4,45 + G''_{4x} \cdot 4,45 + G''_{5x} \cdot (4,45 + 2,48) + G_v \cdot 4,9 = 0 \quad (13)$$

missä  $G''_{2x}$ ,  $G''_{4x}$  ja  $G''_{5x}$  merkitään yhtä suuriksi.

$$\bullet \quad G''_{2,4,5x} = -0,31 \cdot G_v = -0,03 \cdot F_{res} \quad \text{ja} \quad (14)$$

$$\bullet \quad G''_{1,3x} = \frac{3}{2} \cdot G''_{2,4,5x} = 0,05 \cdot F_{res} \quad (15)$$

## 5. Kiinnityspisteiden resultanttikuormitukset

Seuraavaksi yhdistetään kiinnityspisteittäin vaikuttavat suorat reaktivoimat ja aaltokuormitusresultantin momenttien tukireaktiot. Kiinnityspisteihin vaikuttava resultanttikuormitus muodostetaan neljän voimakomponentin yhteisvaikutuksena.

**Vasen sarana (piste 1):**

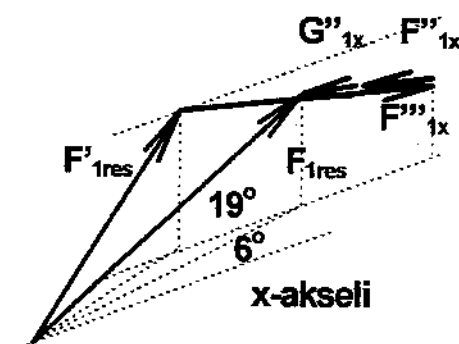
$$F'_{1res} = 0,29 \cdot F_{res} \quad (41^\circ / 15^\circ \text{ taakse})$$

$$F''_{1x} = 0,07 \cdot F_{res} \quad (15^\circ \text{ eteen})$$

$$F'''_{1x} = -0,32 \cdot F_{res} \quad (-15^\circ \text{ taakse})$$

$$G''_{1x} = 0,05 \cdot F_{res} \quad (15^\circ \text{ eteen})$$

- $F_{1res} = 0,43 F_{res}$
- $(19^\circ / 6^\circ \text{ taakse} - \text{ylös} - \text{oikealle})$



**Vasen sivulukko (piste 2):**

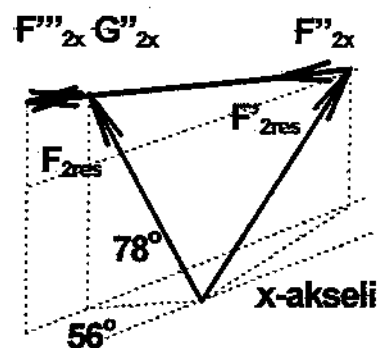
$$F'_{2res} = 0,29 \cdot F_{res} \quad (41^\circ / 15^\circ \text{ taakse})$$

$$F''_{2x} = 0,07 \cdot F_{res} \quad (15^\circ \text{ eteen})$$

$$F'''_{2x} = 0,21 \cdot F_{res} \quad (15^\circ \text{ eteen})$$

$$G''_{2x} = -0,03 \cdot F_{res} \quad (-15^\circ \text{ taakse})$$

- $F_{2res} = 0,26 F_{res}$
- $(78^\circ / 56^\circ \text{ eteen} - \text{ylös} - \text{oikealle})$



**Oikea sarana (piste 3):**

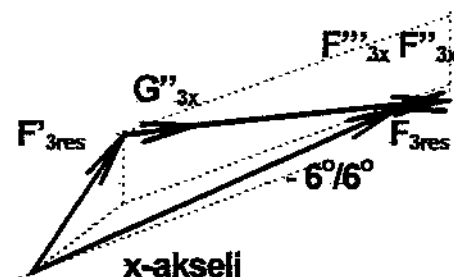
$$F'_{3res} = -0,10 \cdot F_{res} \text{ (30}^\circ / 33^\circ \text{ taakse)}$$

$$F''_{3x} = -0,07 \cdot F_{res} \text{ (-15}^\circ \text{ taakse)}$$

$$F'''_{3x} = -0,32 \cdot F_{res} \text{ (-15}^\circ \text{ taakse)}$$

$$G''_{3x} = 0,05 \cdot F_{res} \text{ (15}^\circ \text{ eteen)}$$

- $F_{3res} = 0,40 F_{res}$
- $(-6^\circ/6^\circ \text{ taakse - alas - oikealle})$



**Oikea sivulukko (piste 4):**

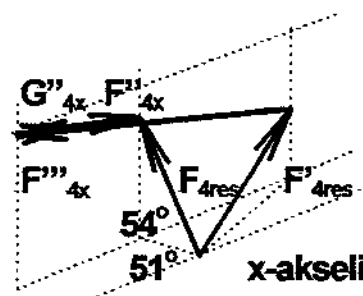
$$F'_{4res} = 0,10 \cdot F_{res} \text{ (30}^\circ / 33^\circ \text{ taakse)}$$

$$F''_{4x} = -0,07 \cdot F_{res} \text{ (-15}^\circ \text{ taakse)}$$

$$F'''_{4x} = 0,21 \cdot F_{res} \text{ (15}^\circ \text{ eteen)}$$

$$G''_{4x} = -0,03 \cdot F_{res} \text{ (-15}^\circ \text{ taakse)}$$

- $F_{4res} = 0,10 F_{res}$
- $(54^\circ/51^\circ \text{ eteen - ylös - oikealle})$



**Pohjalukko (piste 5):**

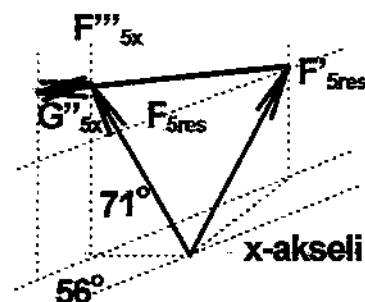
$$F'_{5res} = 0,14 \cdot F_{res} \text{ (39}^\circ / 18^\circ \text{ taakse)}$$

$$F''_{5x} = 0 \cdot F_{res} = 0$$

$$F'''_{5x} = 0,21 \cdot F_{res} \text{ (15}^\circ \text{ eteen)}$$

$$G''_{5x} = -0,03 \cdot F_{res} \text{ (-15}^\circ \text{ taakse)}$$

- $F_{5res} = 0,18 F_{res}$
- $(71^\circ/56^\circ \text{ eteen - ylös - oikealle})$





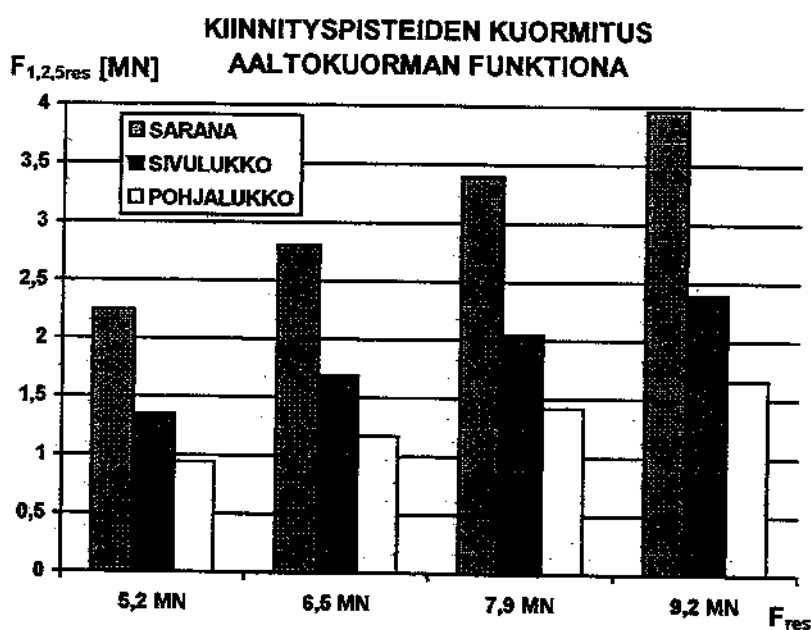
## 6. Laskentatulosten analysointi

Saranoille kohdistuu suurimmat kuormitukset. Esimerkiksi aaltokuormitusresultantti  $F_{res} = 5,55$  MN (vastaten avaavaa momenttia  $M_y = 9,13$  MNm) kehittää vasempaan saranaan  $0,43 F_{res} = 2,39$  MN:n suuruisen kokonaiskuormituksen. Kuormitustyyppi on puristava ja rakenteen kannalta suhteellisen vaaraton, vaikka onkin väsyttävä. Pystysuuntaisen komponentin suuruus on  $0,14 F_{res}$  eli  $0,78$  MN.

Kaikissa lukituslaitteissa esiintyy visiiriä avaavien ja leikkaavien voimien yhdistelmä. Kuormituskuvio on siten oleellisesti erilainen kuin saranoissa. Vasemman sivulukon yhdistetty kuormitus  $0,26 F_{res}$  on suurin vedon ja leikkausvoiman yhdistelmä. Jos käytetään edellä mainittua aaltokuormitusresultantin arvoa  $5,55$  MN, saadaan sivulukon kuormitukseksi  $0,26 F_{res} = 1,44$  MN. Vertailuna todettakoon, että pohjalukon kuormitus on yli 30 % pienempi. Oikea sivulukko kuormittuu vähiten. Sen kuormitus on 60 % pienempi kuin vasemman sivulukon kuormitus.

Jos arvioidaan visiirin liiketilaa resultanttivoimien valossa, voidaan tehdä seuraavia johtopäätöksiä:

- visiirin vasemmat kiinnityspisteet ja pohjalukko kuormittuvat voimakkaasti pysty akselin suuntaisesti,
- vasemmassa reunassa syntyy pysty akselin suuntaisia siirtymiä,
- vasempaan sivulukkoon kohdistuu vaarallisin vedon ja leikkausvoiman yhdistelmä ja se vaurioituu ensimmäisenä kiinnityspisteiden ollessa tasavahvoja vedon suhteen.



Laskentatulosten herkkyyttä voidaan tarkastella resultantin vaikutuspisteen siirrolla. Oletetaan että vaikutuspisteen z-koordinaatti saa arvon 2,79 m (+ 20 cm), jolloin x-koordinaatti saa arvon 5,12 m (+ 20 cm). Resultantin y-koordinaatti saa arvon 1,48 m (+ 3 cm). Vaikutukset ovat seuraavat:

- Suorien x-akselin suuntaisten tukireaktioiden muutos vaikutuspisteen z-koordinaatin kasvun seurauksena lisää vasemman sivulukon ja pohjalukon puristavaa kuormitusta noin 2 %.
- Sivuttaisvoiman  $F_y$  ja nostavan voiman  $F_z$  vaikutusetäisyyden kasvu (+ 20 cm) lisää avaavista momenteista johtuvia vetokuormituksia vasemmassa sivulukossa 7 % ja pohjalukossa 4 %.
- Sivulukon ja pohjalukon resultanttikuormitus ei oleellisesti muutu edellä kuvatun vaikutuspisteen muutoksen seurauksena..

Laskenta on suoritettu vektorilaskentaa hyväksi käyttäen. Koska kyseessä on avaruuskuormitustila, ei kiinnityspisteiden rasituksia voida esittää yhdellä lausekkeella. Likimääräismenettelyihin joudutaan siitä syystä, että rakenne on staattisesti epämääräinen.

## 7. Vaurion etenemisjärjestys

Laskettujen kuormitusten pohjalta voidaan ennakoida visiirin kuormituspisteiden irtoamisjärjestystä. Jos otaksutaan vasemman sivulukon murtuvan ensimmäisenä, jakautuu vasemman laidan kuormitukset pääosin pohjalukolle ja vasemmalle saranalle.

**Vasen sarana (piste 1):**

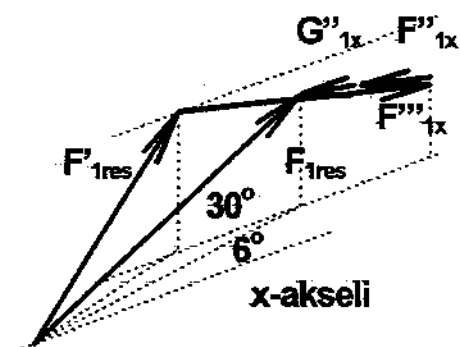
$$F'_{1res} = 0,42 \cdot F_{res}$$

$$F''_{1x} = 0,14 \cdot F_{res}$$

$$F'''_{1x} = -0,32 \cdot F_{res}$$

$$G''_{1x} = 0,05 \cdot F_{res}$$

- $F_{1res} = 0,50 F_{res}$
- (30°/6° taakse - ylös - oikealle)



**Pohjalukko (piste 5):**

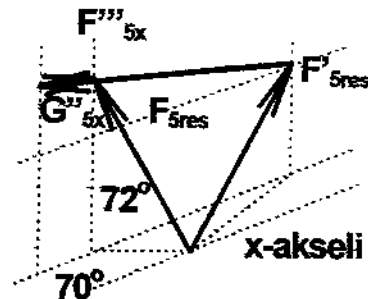
$$F'_{5res} = 0,34 \cdot F_{res}$$

$$F''_{5x} = 0 \cdot F_{res} = 0$$

$$F'''_{5x} = 0,32 \cdot F_{res}$$

$$G''_{5x} = -0,045 \cdot F_{res}$$

- $F_{5res} = 0,31 F_{res}$
- (72°/70° eteen - ylös - oikealle)



Vasemman saranan resultanttikuormitus kasvaa noin  $0,07 F_{res}$  eli 16 %. Ylöspäin suuntautuvan komponentin suuruus on  $0,25 F_{res}$ . Pohjalukon kuormitus lisääntyy  $0,13 F_{res}$  eli 72 %.

Pohjalukon kuormituksen nousu vasemman sivulukon murtumisen jälkeen on progressiivinen.

Vaurion todennäköinen kulku on seuraava: **sivulukko - pohjalukko - vasen sarana**.

**KÄYTETYT LÄHTEET**

Neuvottelut TkT Klaus Rahkan ja TkT Tuomo Karppisen kanssa  
Teknillisiä kysymyksiä käsittelevä osaraportti ro-ro-matkustaja-alus mv Estonian kaatumisesta Itämerellä 28.9.1994  
Laivan keulan konstruktiokuvat  
Keskeneräiset tekniset raportit visiirin kuormituslaskelmista

SUPPLEMENT No. 514

*Kleimola Matti:*

Laskelmat ESTONIAN keulavisiirin lukituslaitteiden  
kuormituksista (2. raportti).

Espoo 1997.

*Kleimola Matti:*

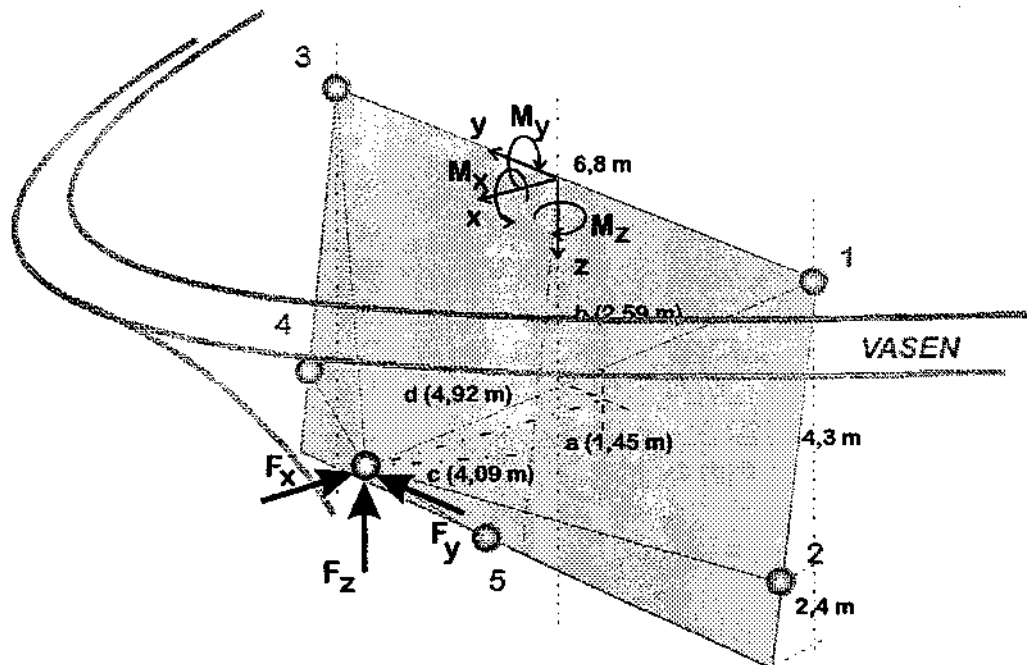
Calculations of the loadings on MV ESTONIA's  
bow visor locking devices. 2nd Report.

Espoo 1997.

## LASKELMAT ESTONIAN KEULAVISIIRIN LUKITUSLAITTEIDEN KUORMITUKSISTA (2. raportti)

### 1. Lähtöarvot

Estonian keulavisiirin kiinnityssaranoiden ja lukituslaitteiden kiinnityspisteet on esitetty alla olevassa kaaviossa. Kiinnityspisteitä on kaikkiaan 5; kaksi saranaa on ylhäällä ja kolme lukkoa alhaalla.



Kaikki visiiriin vaikuttavat voimat ja momentit voidaan esittää yhtälöryhmän (1) avulla.

$$\begin{cases} M_x = F_z \cdot y - F_y \cdot z \\ M_y = F_z \cdot x - F_x \cdot z \\ M_z = F_y \cdot x - F_x \cdot y \end{cases} \quad (1)$$

Yhtälöryhmästä on ratkaistavissa visiiriin vaikuttavien voimakomponenttien ja momenttien keskinäiset suhteet eliminoimalla tuntemattomat suureet x, y ja z (resultantin vaikutuspisteen koordinaatit). Tällöin saadaan tulos

$$\bullet \quad F_x \cdot M_x - F_y \cdot M_y + F_z \cdot M_z = 0 \quad (2)$$

Mallikokeiden pohjalta (SSPA) on osoitettu, että visiiriin kohdistuva vertikaalikuormitus ja laivan pituusakselin suuntainen aaltokuormitus ovat yhtäsuuret eli  $F_x/F_z = 1$ . Tästä seuraa edelleen

$$\bullet \quad \frac{F_y}{F_x} = \frac{F_y}{F_z} = \frac{M_x + M_z}{M_y} \quad (3)$$

Mallikoetuloksia voidaan tarkastella ehtojen (2) ja (3) avulla.

KUORMITUS [MN/MNm]	A	B	C	D	E
$F_r$	3,9	5,2	6,5	7,9	9,2
$F_x$	-2,7	-3,6	-4,5	-5,4	-6,3
$F_y$	0,6	1,0	1,5	2,0	2,5
$F_z$	-2,7	-3,6	-4,5	-5,4	-6,3
$M_x$	0,6	1,7	3,1	5,0	7,4
$M_y$	4,0	7,5	11,3	15,5	20,0
$M_z$	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
$F_y / F_x$	0,22	0,28	0,33	0,37	0,40
$F_x / F_r$	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69
$F_y / F_r$	0,15	0,19	0,23	0,25	0,27
$M_x / M_y$	0,15	0,23	0,27	0,32	0,37
$M_z / M_y$	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
$(M_x + M_z) / M_y$	0,27	0,36	0,41	0,45	0,49
* $M_x / M_y$	0,10	0,14	0,20	0,24	0,27
* $M_x$	0,39	1,08	2,27	3,74	5,44

Taulukosta voidaan havaita, että  $F_y / F_x$  on keskimäärin 20 % suurempi kuin  $(M_x + M_z) / M_y$ . Ero voi johtua siitä, että  $M_x$  ja/tai  $M_z$  on määritetty liian suureksi tai  $M_y$  liian pieneksi. Laivan pituusakselin (x-akseli) ympäri kiertävä momentti  $M_x$  kasvaa lukuarvoltaan voimakkaasti. Jos momentin  $M_x$  suhteellinen arvo \*  $M_x / M_y$  pienenee tasolle 0,10 - 0,27, toteutuu ehto kauttaaltaan. Käytännössä tällä erolla on varsin pieni merkitys visiirin kiinnityspisteiden rasitusten arvioinnissa.

Visiiriin vaikuttavan resultanttivoiman koordinaattiakselien suuntaiset voimakomponentit voidaan esittää niinkään momenttien ja vaikutuspisteen koordinaattien avulla yhtälöistä (1) ja (3).

$$\begin{cases} F_x = \frac{M_y}{x-z} = 0,69 \cdot F_{res} \\ F_z = \frac{M_y}{x-z} = 0,69 \cdot F_{res} \\ F_y = \frac{M_x + M_z}{x-z} = (0,15 \dots 0,27) \cdot F_{res} \end{cases} \quad (4)$$

Visiiriä kuormittavan resultantin  $F_{res}$  koordinaatit  $xz$ -tasossa voidaan hakea vaikutussuoralta  $z = x - (M_y/F_x)$ .

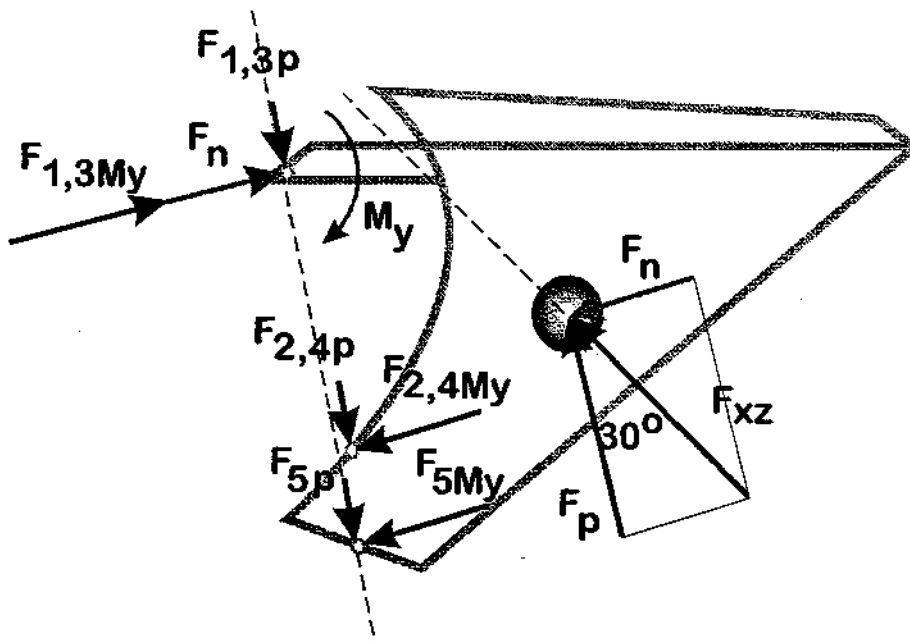
Visiirin omapaino  $G_v$  on 0,55 MN ja sen vaikutuspiste on aluksen keskiviivalla etäisyydellä 4,9 m  $yz$ -tasosta. Visiirin omapaino aikaansaa sekä suorat tukireaktiot kiinnityspisteisiin että momentin  $y$ -akselin ympäri.

Lukituslaitteisiin syntyvät kuormitukset lasketaan em. taulukon kuormitusvaihtoehdolle C.

## 2. Momenttien ja voimien aiheuttamat tukireaktiot

*Avaava momentti  $M_y$ :*

Avaava momentti syntyy voimien  $F_x$  ja  $F_z$  vaikutuksesta ja välittyy kiinnityspisteiden (1, 3) ja (2, 4, 5) kautta aluksen runkoon. Saranaoihin (1, 3) muodostuu puristusrasitus ja lukituslaitteisiin (2, 4, 5) vetokuormitus.



Momenttitasapaino lasketaan  $y$ -akselin suhteen (ks. myös kuva sivulla 1):

$$F_{2My} \cdot 4,45 + F_{4My} \cdot 4,45 + F_{5My} \cdot (4,45 + 2,48) - M_y = 0 \quad (5)$$

missä  $F_{2My}$ ,  $F_{4My}$  ja  $F_{5My}$  merkitään yhtä suuriksi

- $F_{2,4,5My} = 0,063 \cdot M_y$  ja (6)

- $F_{1,3My} = -\frac{3}{2} \cdot F_{2,4,5My} = -0,095 \cdot M_y$  (7)

Voimien  $F_x$  ja  $F_z$  muodostama resultantti  $F_{xz}$  jaetaan kiinnityspisteiden muodostaman tason suuntaiseen komponenttiin  $F_p$  ja kohtisuoraan komponenttiin  $F_n$ . Tason suuntainen komponentti jaetaan tasan viidelle kiinnityspisteelle. Tasoa vastaan kohtisuora komponentti siirretään y-akselille.

- $F_{xz} = 0,69\sqrt{2} \cdot F_{res} = 0,98F_{res}$  (8)

- $F_n = \frac{1}{2}F_{xz} = 0,49F_{res}$  (9)

- $F_p = \frac{1}{2}\sqrt{3}F_{xz} = 0,85F_{res}$  (10)

- $F_{1,2,3,4,5p} = \frac{1}{5}F_p = 0,17F_{res}$  (11)

*Kiertomomentti  $M_x$ :*

Kiertomomentti välittyy kiinnityspisteiden (1, 2, 3, 4, 5) leikkausvoimien kautta aluksen runkoon. Jos oletetaan, että koko kiertomomentti välittyy tasan jokaiselle kiinnityspisteelle, saadaan seuraava tasapainoehto:

$$F_{2y} \cdot 4,3 + F_{4y} \cdot 4,3 + F_{5y} \cdot (4,3 + 2,4) - M_x = 0 \quad (12)$$

missä  $F_{2y}$ ,  $F_{4y}$  ja  $F_{5y}$  merkitään yhtä suuriksi

- $F_{2,4,5y} = 0,065 \cdot M_x$  ja (13)

- $F_{1,3y} = \frac{3}{2} \cdot F_{2,4,5y} = 0,098 \cdot M_x$  (14)

Kiertomomentin synnyttämä kiinnityspisteiden leikkauskuormitus jää alhaiseksi. Kuormitusvaihtoehdossa C lukituslaitteiden kuormitus on noin 0,2 MN. Lisäksi visiirin sarvet ottavat ainakin osan leikkauskuormasta. Kiertomomentin vaikutus voidaan jättää huomioonottamatta.

*Murtomomentti  $M_z$ :*

Visiiriä pysty akselin ympäri avaava momentti tasapainottuu sivulukkojen ja kansisaranoiden kautta. Vasemmanpuoleisiin kiinnityslaitteisiin syntyy vetorasitus ja oikeanpuoleisiin puristusrasitus:



$$F_{1x} \cdot 3,4 + F_{2x} \cdot 3,4 + F_{3x} \cdot 3,4 + F_{4x} \cdot 3,4 - M_z = 0 \quad (15)$$

missä  $F_{1,2,3,4x}$  merkitään yhtä suureksi

$$\bullet \quad F_{1,2x} = 0,048 \cdot M_z \quad (16)$$

Murtomomentin vaikutus jää myös vähäiseksi. Kuormitusvaihtoehdossa C vasemmanpuoleisten lukituslaitteiden vetokuormituslisäksi saadaan 0,07 MN. Pohjalukkoon murtomomentti ei muodosta merkittävää lisäkuormitusta, koska se on kiertoakselin (z-akseli) vieressä.

*Visiirin paino  $G_v$ :*

Visiirin omapainon ( $G_v$ ) reaktiovaikutus lasketaan y-akselin suhteen. Vaikutusetäisyys y-akselista on 4,9 m.

$$G_{2x} \cdot 4,45 + G_{4x} \cdot 4,45 + G_{5x} \cdot (4,45 + 2,48) - G_v \cdot 4,9 = 0 \quad (17)$$

missä  $G_{2x}$ ,  $G_{4x}$  ja  $G_{5x}$  merkitään yhtä suuriksi.

$$\bullet \quad G_{2,4,5x} = -0,31 \cdot G_v = -0,17 \text{ MN} \quad \text{ja} \quad (18)$$

$$\bullet \quad G_{1,3x} = \frac{3}{2} \cdot G_{2,4,5x} = 0,26 \text{ MN} \quad (19)$$

Visiirin paino aikaansaa myös leikkausvoiman kiinnityspisteille ja se voidaan jakaa tasan. Leikkausvoimasta aiheutuu 0,11 MN vertikaalisuuntainen kuormitus jokaiseen kiinnityspisteeseen.

### 3. Kiinnityspisteiden resultanttikuormitukset

Lasketaan kiinnityspisteiden resultanttikuormitukset aaltokuormitustapaukselle C ja jätetään  $M_x$ ,  $M_z$  ja  $G_v$  huomioonottamatta.

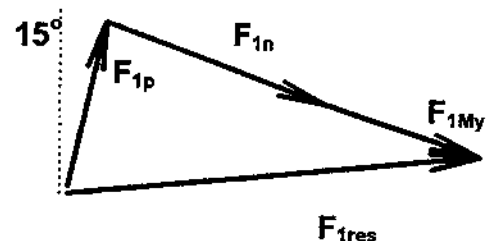
*Vasen sarana (piste 1):*

$$F_{1n} = 0,25 \cdot F_{res} = 1,63 \text{ MN}$$

$$F_{1p} = 0,17 \cdot F_{res} = 1,11 \text{ MN}$$

$$F_{1My} = 0,095 \cdot M_y = 1,07 \text{ MN}$$

- $F_{1res} = 2,92 \text{ MN}$
- ( $7^\circ$  taakse - ylös)

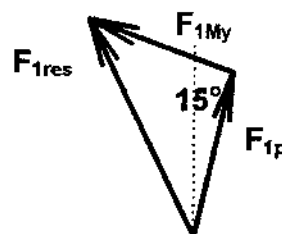


**Vasen sivulukko (piste 2):**

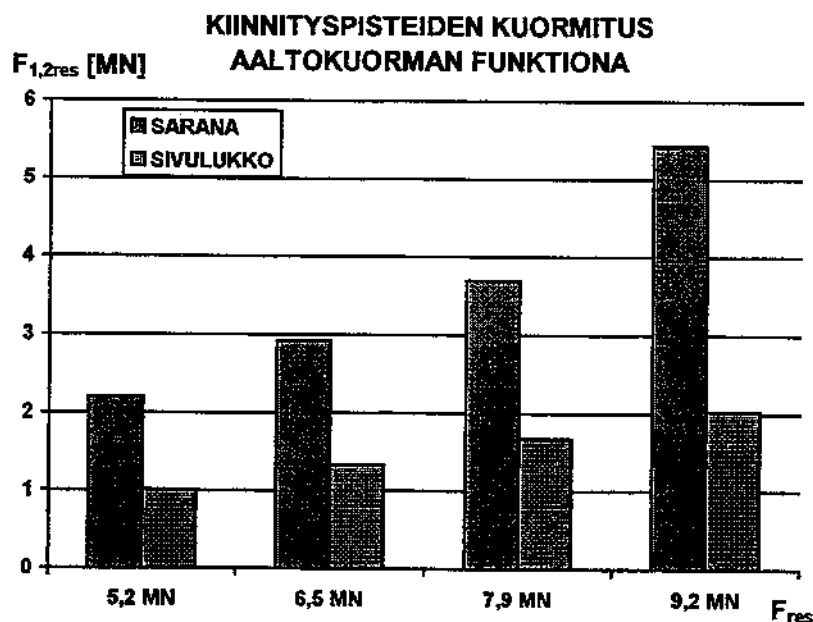
$$F_{2p} = 0,17 \cdot F_{res} = 1,11 \text{ MN}$$

$$F_{1My} = 0,063 \cdot M_y = 0,71 \text{ MN}$$

- $F_{2res} = 1,33 \text{ MN}$
- (72° eteen - ylös)

**4. Laskentatulosten analysointi**

Kiinnityspisteiden kuormitukset laivan vasemmalla ja oikealla puolella ovat tässä laskentaesimerkissä yhtä suuret johtuen siitä, että momentit  $M_x$  ja  $M_z$  jätettiin huomioonottamatta. Erityisesti  $M_z$  aiheuttaa sen, että vasemman puolen kiinnityslaitteet kuormittuvat lisää vetojännityksistä ja oikean puolen sarana ja lukko puristusrasituksesta.



Tämänkin tarkastelutavan pohjalta voidaan todeta, että vasen sivulukko on rakenteen heikoin kohta

**SUPPLEMENT No. 515**

*Niemi Erkki:*

**Upper Bound Estimation on the Ultimate Load Capacity  
of the Atlantic Lock.**

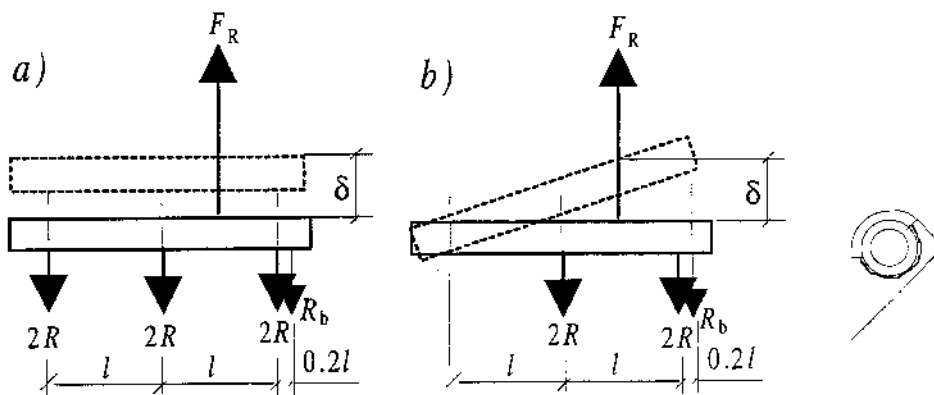
**Lappeenranta University of Technology.**

**Lappeenranta 1997.**

Prof. Erkki Niemi  
 Lappeenranta University of Technology  
 P.O.Box 20  
 FIN-53851 Lappeenranta  
 FINLAND

## UPPER BOUND ESTIMATION ON THE ULTIMATE LOAD CAPACITY OF THE ATLANTIC LOCK

Fig. 1 shows two alternative failure mechanisms. The ultimate load,  $F_R$ , is resolved based on principles of plastic theory. Each lug is assumed to resist the deformation developing a total resistance of  $2R$ . The resistance value  $R$  is formed by flow load of the rim cross-section, in addition to the ultimate fracture load of two  $90^\circ$  fillet welds. The fracture load of the two starboard bracket welds is denoted  $R_b$ .



**Fig. 1** Two alternative mechanisms. In case a) all three lugs are assumed as load-bearing but the static equilibrium condition is violated. In case b) the static equilibrium is maintained.

The plastic theory says that by setting the outer work and the inner work equal, an upper bound solution for load  $F_R$  is obtained. Of all possible mechanisms the lowest load capacity solution is the best one.

$$\text{Case a)} \quad F_R \cdot \delta = 2R \cdot (\delta + \delta + \delta) + R_b \delta \Rightarrow F_R = 6R + R_b$$

$$\text{Case b)} \quad F_R \cdot \delta = 2R \cdot \left( \frac{2}{3} \delta + \frac{4}{3} \delta \right) + R_b \cdot 1.47 \delta \Rightarrow F_R = 4R + 1.47R_b$$

**Prediction of the capacity of the test structures studied at the University of Hamburg**

Rim capacity:  $R_1 = 15 \cdot 36 \cdot \frac{250 + 417}{2} = 180000 \text{ N}$  (for one cross-section)

Lug weld capacity ( $a = 3.9 \text{ mm}$ ):

$$R_2 = a \cdot \pi \cdot r \cdot \frac{f_u}{\beta \sqrt{3}} = 3.9 \cdot \pi \cdot 64 \cdot \frac{450}{0.8 \cdot 1.73} = 255000 \text{ N}$$

Total capacity corresponding to one rim cross-section:

$$R = 180 + 255 = 435 \text{ kN}$$

Capacity bracket welds:

$$R_b = a \cdot l \cdot \frac{f_u}{\beta \sqrt{2}} = 3.9 \cdot 2 \cdot 65 \cdot \frac{450}{0.8 \cdot 1.41} = 202000 \text{ N}$$

Predicted ultimate capacity of the test structure:

$$F_R = 4 \cdot 435 + 1.47 \cdot 202 \text{ kN} = \underline{2037 \text{ kN}} (= 208 \text{ tons})$$

The calculation is based on following assumptions:

- The measured weld hardness of 330 HV corresponds to a flow stress of  $450 \text{ N/mm}^2$  of the weld metal
- The weld throat  $a = 3.9 \text{ mm}$  has been measured from the test structure
- The welds fracture at a deformation of about 1 - 2 mm
- The rim cross section develops a flow stress equal to average of yield and ultimate strengths at the moment of weld fracture
- The circular weld is mainly loaded in shear, hence square root 3
- The bracket weld is transversally loaded, hence square root 2.
- The rotation of the pin does not develop any bending stresses in the lugs and brackets due to the fact that they are already yielding.
- The rotation of the pin does not develop any moments in the mating lug because it is also yielding at the same loads.

The actual capacity of the tested lock structure was 2040 kN. Thus, the calculation model is shown to be valid.

### **Assessment of the average weld throat thickness of the Atlantic lock of Estonia**

These calculations are based on the following assumptions:

- An actual capacity of 1500 kN of the Atlantic lock has been obtained based on the deformation of the mating lug.
- The rim has the same strength values as in the test structure.
- The flow stress of if the weld material is  $368 \text{ N/mm}^2$  due to the lower hardness of 270 HV compared to the hardness of 330 HV of the test structure.

$$R = 180 \text{ kN} + \frac{a}{3.9} \cdot \frac{368}{450} \cdot 255 \text{ kN} = 180 \text{ kN} + 53.48a \text{ kN}$$

$$R_b = \frac{a}{3.9} \cdot \frac{368}{450} \cdot 202 \text{ kN} = 42.38a \text{ kN}$$

$$F_R = 4R + 1.47R_b = 1500 \text{ kN}$$

$$\Rightarrow \underline{a = 3.04 \text{ mm}}$$

### Design capacity according to Eurocode 3

The design capacity according to Eurocode 3 of a properly welded structure is much lower than the predictions made using the above assumptions. The rims are assumed to develop a stress equal to yield stress over 1.1, and the welds must be calculated using the nominal ultimate strength of the base material over 1.25. This yields a design capacity of 1740 kN when the weld throat is  $a = 5 \text{ mm}$  as it should have been.