

# TERÄKSISTEN KERROSLEVYRAKENTEIDEN PITKITTÄISLIITOSTEN VÄSYMISLUJUUS

Kimmo Kotisalo

Rakenteiden Mekaniikka, Vol. 31  
Nrot 1-2, 1998, s. 15-31

## Tiivistelmä

*Artikkelissa käsitellään Teknillisen korkeakoulun laivalaboratoriossa tehtyä laivan kerroslevyrakenteisten kansien väsymislajuustutkimusta. Tutkimuksessa määritettiin elementtimenetelmää käyttäen rakenteen kriittisimmät pisteet ja valittiin liitostyyppit kokeellisesti testattavaksi. Kokeellisesti määritettiin kahden erityyppisen liitoksen SN-käyrät. Näitä SN-käyriä käyttäen laskettiin sovellusesimerkki, jossa määritettiin matkustajalaivan kerroslevyrakenteisten kansien väsymiseliniät.*

## Johdanto

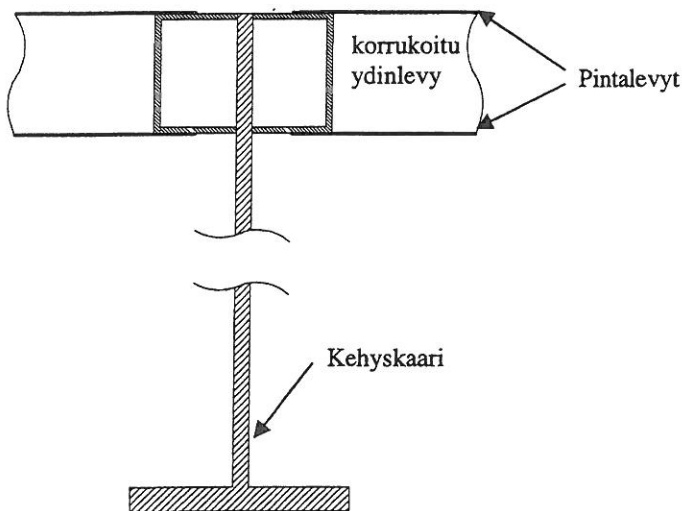
Laivojen rakenteisiin kohdistuvat keveysvaatimukset kasvavat jatkuvasti. Tämän vuoksi rakenteita on kehitettävä kuormia tehokkaammin kantaviksi. Eräs mahdollisuus rakenteiden lujuus- ja painosuhteen parantamiseksi on käyttää rakenteissa teräksisiä kerroslevyjä, joissa pintalevyjen väliin on kiinnitetty korrukoitu ydinlevy. Painon säästön kannalta merkittävimpiä kohteita laivoissa ovat luonnollisesti pinta-alaltaan suuret elementit, kuten kannet ja laipiot [1,2,3]. Matkustajalaivan kantta kuormittavat laivapalkin taipumasta aiheutuva pitkittäinen normaalijännitys sekä kannen pintaan kohdistuvasta kansikuormasta aiheutuvat jännitykset. Oikein mitoitetulle kerroslevylle nämä kuormat eivät aiheuta ongelmia, mutta kerroslevyjen liitoksille kylläkin. Erityisesti aalto- ja tyynenveden momentin kansiin aiheuttamat pitkittäiset normaalijännitykset aiheuttavat kerroslevyjen pitkittäisliitoksissa ongelmia.

## Kerroslevyjen pitkittäisliitokset

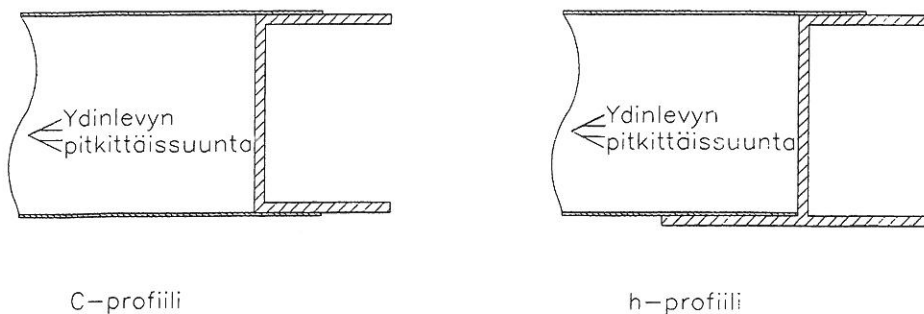
Tyypillinen kerroslevypaneelin ja kehyskaaren välinen liitos on esitty kuvassa 1. Kerroslevyn ja kerroslevypaneelin laitoja kiertävän profiilin ja ydinlevyn väliselle liitosalueelle syntyy varsin jyrkkä epäjatkuvuskohta, jossa kaikki liitoksen yli siirtyvät kuormat joutuvat kulkemaan ohuiden pintalevyjen kautta. Lisäksi tälle samalle alueelle

kasaantuvat kaikki mittaepätarkkuuksien vaikutukset. Edellämainituista syistä muodostuu kerroslevyrakenteen kriittisimmäksi mitoitustekijäksi paneelien pitkittäisliitosten väsymislujuus.

Tutkimuksessa vertailtiin kolmea erityyppistä kerroslevyjen liittämistapaa. Liitoksissa käytettiin kahta eri tyyppistä profiilia, jotka on esitetty kuvassa 2. Perustapauksena oli C-profiililiitos, jossa profiili oli kiinnitetty sekä pintalevyihin että ydinlevyn päätyyn. Tätä liitosta tutkittiin vain laskennallisesti, koska profiilin kiinnittäminen ydinlevyn päätyyn oli käytössä olein mittatarkkuuksin vaikeasti toteutettavissa. Sekä laskennallisesti että kokeellisesti tutkittiin liitoksia, joissa C-profiilia ei oltu kiinnitetty ydinlevvyyn. Tämän lisäksi C-profiilin muotoilua kehitettiin edelleen ja otettiin käyttöön ns. h-profiili, jota tutkittiin sekä laskennallisesti että kokeellisesti.



*Kuva 1: Tyypillinen kerroslevypaneelien ja kehyskaaren liitos.*

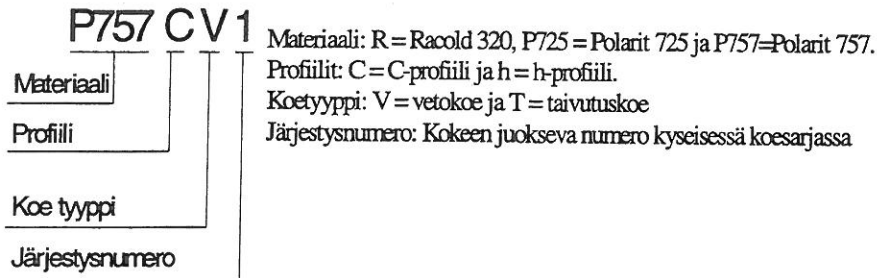


*Kuva 2: Tutkitut kerroslevyjen päittäisliitosten profiili-vaihtoehdot.*

## Koerakenteet

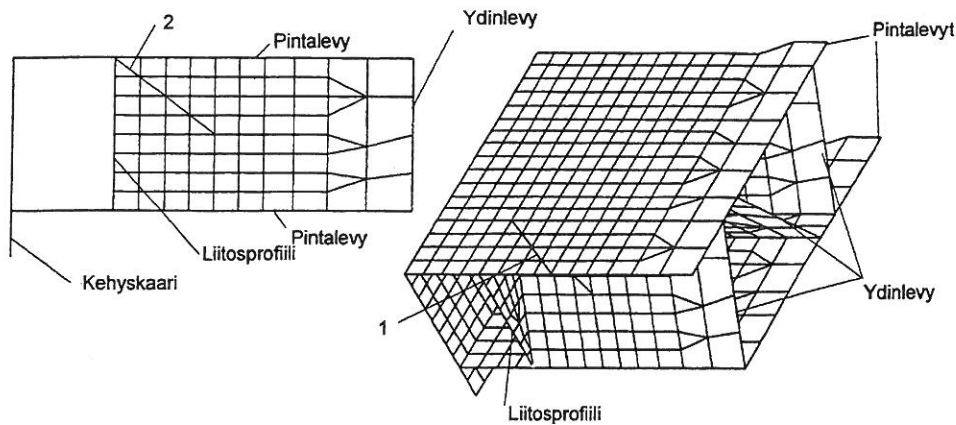
Tutkittu kerroslevyrakenne mitoitettiin kanteen kohdistuvien maksimikuormien perusteella. Mitoituksen lähtökohtana oli korvata perinteinen pitkittäin jäykistetty matkustaja-aluksen hyttikansi kerroslevyrakenteisella kannella. Kanteen oletettiin kohdistuvan 0.5 m vesipatsasta vastaava kansikuorma (5 kPa), sekä laivapalkin taipumasta aiheutuva normaalijännitys, jonka maksimiarvot ovat 170 MPa vetoa ja 70 MPa puristusta. Laivan kehyskaarivälin ollessa 2.9 m päädyttiin kerroslevyyn jonka korkeus on 60 mm ja pinta- ja ydinlevyt ovat 1 mm:n paksuiset.

Koerakenteita valmistettiin kolmesta eri materiaalista: Racold 320-teräksestä, Polarit 725-ruostumattomasta teräksestä ja Polarit 757-ruostumattomasta teräksestä. Racold 320-teräksestä ja Polarit 757-ruostumattomasta teräksestä valmistettiin sekä C- että h-tyyppisiä koerakenteita. Polarit 725 ruostumattomasta teräksestä valmistettiin ainoastaan C-tyypin koerakenteita. Koekappaleiden ja kokeiden nimeäminen on esitetty seuraavassa:



## Rakenteen analysointi elementtimenetelmällä

Kahden kehyskaaren väliin asennettavasta 2.9×6.0 m paneelistä mallinnettiin neljännes, johon otettiin mukaan myös puolet kehyskaaresta. Mallinnuksessa käytettiin parabolisia levyelementtejä. Kehyskaaren laippa mallinnettiin palkkielementein. Kuvassa 3 esitetty mallin tarkimmin mallinnettu alue.



*Kuva 3: Mallin tarkimmin mallinnettu alue. Tuloksia on tarkasteltu kuvaan merkityillä linjoilla 1 ja 2.*

### **Kuormitustapaukset**

Kullekin rakenteelle laskettiin kaksi kuormitustapausta, jotka olivat kolmipistetaivutus ja vetokuormitus. Kolmipistetaivutuksessa mallia kehyskaaresta kuormittava 50 N/m:n (paneelin leveysmetri) kuorma aiheuttaa pintalevyihin 0.45 MPa:n poimujen suuntaisen nimellisjännityksen. 500 kN/m (paneelin leveysmetri) vetokuorma vastaa pitkittäistä 140 MPa:n nimellisjännitystä.

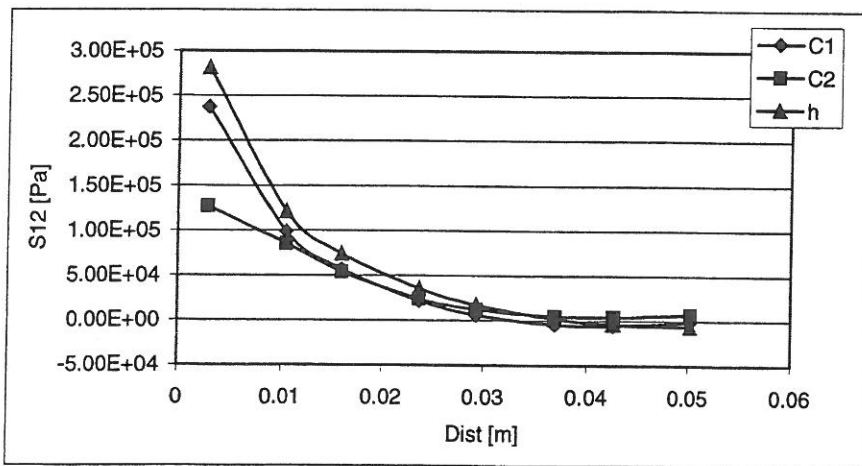
Kaikissa lasketuissa tapauksissa ydin- ja pintalevyjen maksimijännitykset sijaitsivat ydinlevyn poimun päädyn ja liitosprofiilin välisellä alueella. Jännitykset kohoavat lähestyttäessä ydinlevyn ja pintalevyn välistä hitsiä kuvassa 3 esitettyjä linjoja 1 ja 2 pitkin. Tämä ilmiö on erityisen voimakas rakenteessa, jossa ydinlevy ei ole kiinnitetty päädystään profiiliin.

### **Taivuttava kuorma**

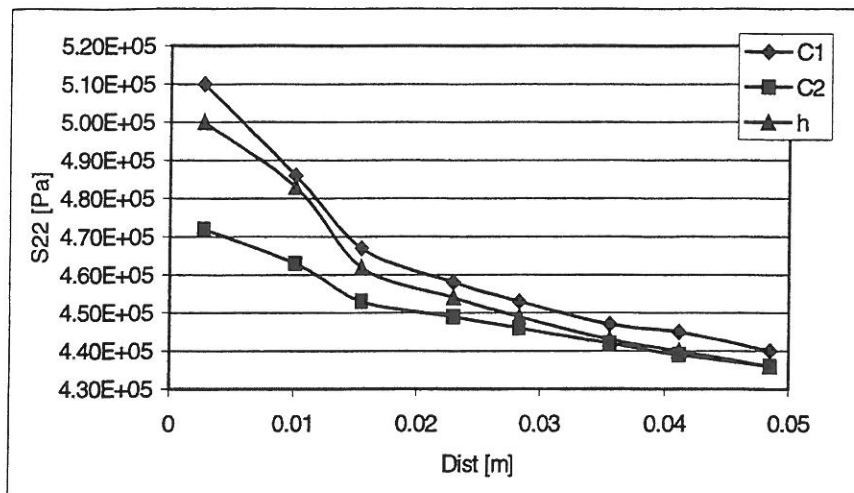
Eri rakennevaihtoehtojen välillä on ydinlevyn leikkausjännityksissä (S12) merkittäviä eroavuuksia ainoastaan ydinlevyn nurkkien alueella. Kerroslevyn alapinnan läheisyydessä h-profiili on luonnollisesti edullisin, mutta yläpinnan läheisyydessä h-profiilirakenteen jännitykset kasvavat suuremmiksi kuin C-profiilia käyttäen. C-profiilin tapauksessa voidaan ytimen kiinnittämisellä pienentää huippujännityksiä ydinlevyssä

noin 40 %, mutta jo noin 10 mm:n etäisyydellä nurkasta ovat jännityserot eri rakenteiden välillä olemattomia, kuten kuvasta 4 selviää.

Kuten kuvasta 5 ilmenee ei alapinnan tukemisella (h-profiili) ole puristuspuolen pintalevyn normaalijännityksiin (S22) juuri vaikutusta, kun taas ydinlevyn kiinnittämällä profiiliin (kuvaajassa C2) voidaan saavuttaa noin 15 % huippujännitysten lasku. Jännitysten pieneneminen pintalevyssä on kuitenkin rakenteen lujuuden kannalta merkittävämpää kuin jännitysten pieneneminen ydinlevyssä, koska jännitystaso ydinlevyssä on huomattavasti pintalevyn jännitystasoa matalampi. Näin ollen äärijuuressa kannalta rajoittavana tekijänä on puristuspuolen pintalevyn lommahtaminen. Jänneväliä (kehyskaariväliä) pienennettäessä kasvaa leikkauksen osuus taivutuksen osuuden pienentyessä kokonaiskuormasta, jolloin ytimen leikkauslommahtaminen saattaa tulla kysymykseen. On kuitenkin huomattava, että normaalisti rakennetta kuormittaa pinnalle jakautunut kuorma (ei kolmipistetaivutus), jolloin kehyskaarivälin pienentyessä pienenee myös yhdelle kaarivälille kohdistuva kuorma.



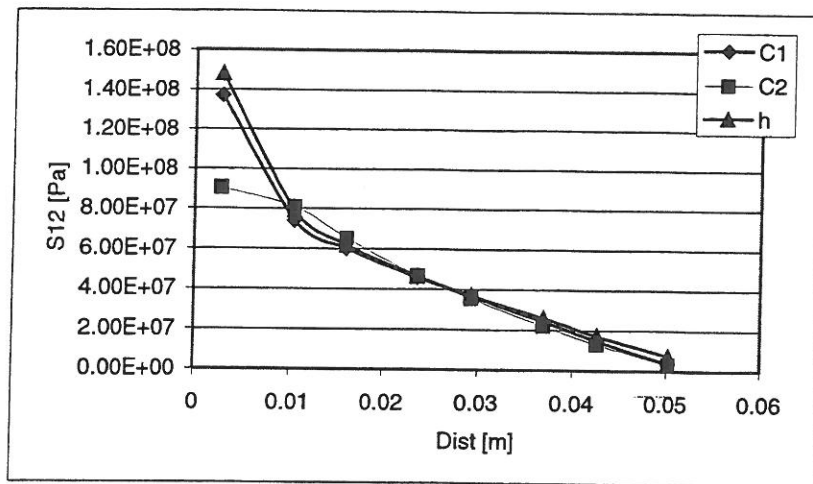
Kuva 4: Leikkausjännitys jakauma (S12) ydinlevyn linjalla 2, kun rakennetta kuormitetaan kehyskaaresta 20 N/m (kansipaneelin leveysmetri) taivuttavalla kuormalla. Kuvaajassa C1 on C-profiili irti ydinlevystä, C2 on C-profiili ja ydinlevy kiinnitetty ja h on h-profiilirakenne. Nollakohta ydinlevyn yläkulmassa.



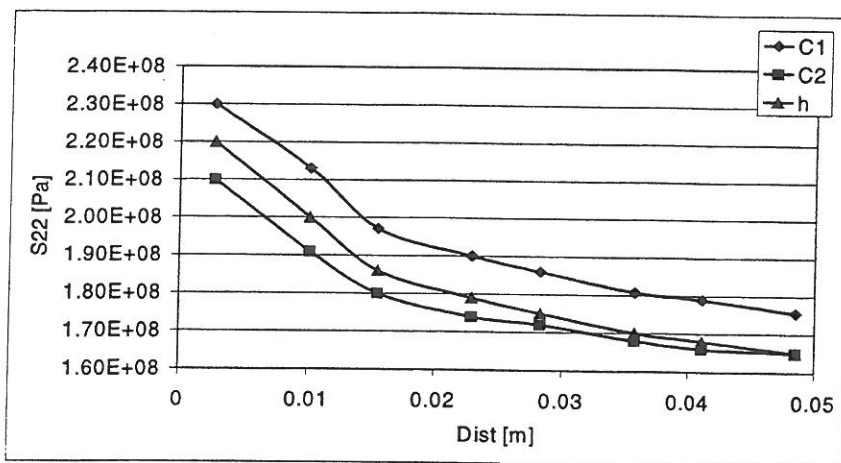
Kuva 5: Normaalijännitysjakuma ( $S_{22}$ ) yläpuolen (puristuspuolen) pintalevyssä linjalla 1, kun rakennetta kuormitetaan kehyskaaresta  $20 \text{ N/m}$  (kansipaneelin leveysmetri) taivuttavalla kuormalla. Kuvaajassa C1 on C-profiili irti ydinlevystä, C2 on C-profiili ja ydinlevy kiinnitetty ja h on h-profiilirakenne. Nollakohta poimunharjan ja profiilin nurkkapisteessä.

#### Vetokuormitus

Kuten kuvista 6 ja 7 on havaittavissa vetokuormituksen eri rakenneratkaisuihin aiheuttamat jännitystasot eroavat toisistaan ainoastaan kerroslevyn ja liitosprofiilin liitosalueella. Kerroslevyn alapinnan läheisyydessä h-profiilirakenne (kuvaajassa h) on ydinlevyn leikkausjännitysten kannalta edullisin. h-profiilirakenteen maksimileikkausjännitykset ovat alapinnalla noin 20 % pienemmät kuin rakenteen jossa C-profiili on kiinnitetty ydinlevyyn (kuvaajassa C2). Kerroslevyn yläpinnassa ovat h-profiilirakenteen leikkausjännitykset noin 25 % suuremmat kuin rakenteen jossa C-profiili on kiinnitetty ydinlevyyn. Yläpintalevyssä (puristuspuolen pintalevy) on rakenteen, jossa ydinlevy on kiinnitetty liitosprofiiliin, maksiminormaalijännitys noin 15 % pienempi kuin rakenteen, jossa liitosprofiili ja ydinlevy eivät ole kiinnitetty toisiinsa (kuvaajassa C1). h-profiilirakenteen jännitystaso ei juuri poikkea rakenteen, jossa C-profiili ja ydinlevy eivät ole kiinnitetty toisiinsa, jännitystasosta.



Kuva 6: Leikkausjännitys jakauma ( $S_{12}$ ) ydinlevyn linjalla 2, kun rakennetta kuormitetaan  $500 \text{ kN/m}$  (kansipaneelin leveysmetri) vetävällä kuormalla. Kuvaajassa C1 on C-profiili irti ydinlevystä, C2 on C-profiili ja ydinlevy kiinnitetty ja h on h-profiilirakenne. Nollakohta ydinlevyn yläkulmassa.

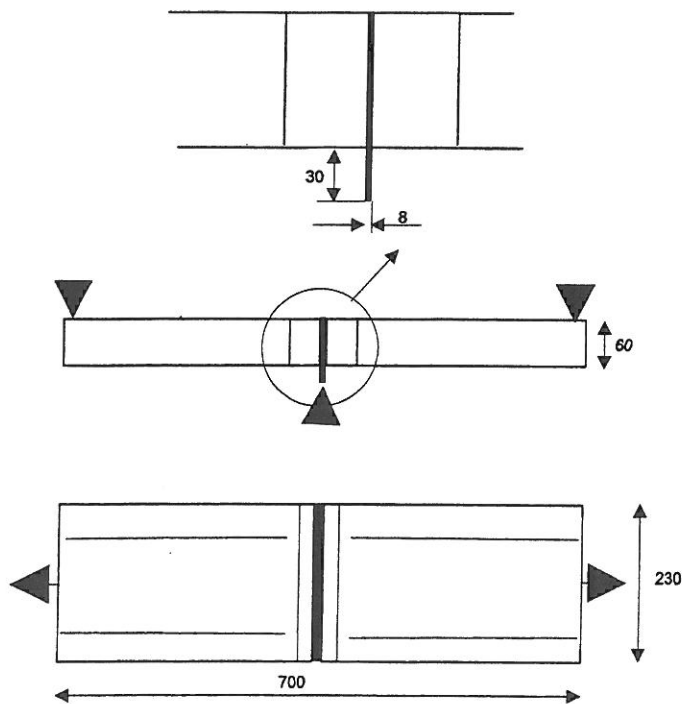


Kuva 7: Normaalijännitys jakauma ( $S_{22}$ ) yläpuolen pintalevyssä linjalla 1, kun rakennetta kuormitetaan  $500 \text{ kN/m}$  (kansipaneelin leveysmetri) vetävällä kuormalla. Kuvaajassa C1 on C-profiili irti ydinlevystä, C2 on C-profiili ja ydinlevy kiinnitetty ja h on h-profiilirakenne. Nollakohta poimunharjan ja profiilin nurkkapisteessä.

## Kuormituskokeet

Kokeellisesti määritettiin liitosten ääri- ja väsymislujuus. Kokeellisesti testattavat liitostyytit valittiin elementtimallinnuksen antamien tulosten sekä eri vaihtoehtojen käytännön toteuttavuuden perusteella. Elementtimenetelmällä tutkituista vaihtoehdoista jätettiin C-profiililiitos jossa ydinlevy on kiinnitetty liitosprofiiliin pois koeohjelmasta,

koska kyseisen rakenteen toteutus vaatii rakenteen valmistuksessa suurempaa mittatarkuutta mitä nyt oli käytettävissä. Sekä veto- että taivutuskokeissa käytettiin dimensioiltaan samanlaisia koekappaleita. Koekappaleiden dimensiot on esitetty kuvassa 8.



Kuva 8: Kokeissa käytettyjen koekappaleiden dimensiot. Kuvassa esitetty nuolin kuormien tuonti koekappaleisiin.

## Väsytykokeet

Väsytykokeilla määritettiin eri liittostyyppien SN-käyrät yhtälöstä

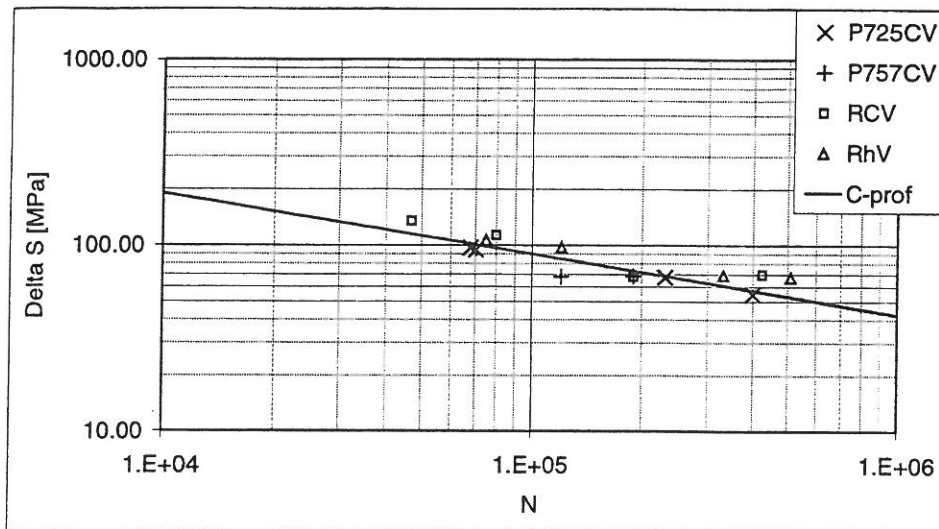
$$N = C \cdot S^{-m}, \quad (1)$$

missä  $N$  on rakenteen kestämiä toistojen määrä jännitystasolla  $S$ .  $C$  ja  $m$  ovat kullekin rakenteelle kokeellisesti määritettäviä vakioita. Väsytykokeet pyrittiin tekemään rajajännityssuhteen arvolla  $R=0$ , jolloin  $\sigma_{\min}=0$ . Jännityksen minimiarvoa  $\sigma_{\min}$  ei kuitenkaan voitu käytännössä laskea aivan nolnaan, koska tällöin olisi koekappaleeseen ja koelaitteistoon kohdistunut koelaitteistossa esiintyneistä välyksistä aiheutuneita iskumaisia kuormia. Koska lisäksi koelaitteiston ohjaus ei kyennyt pitämään jännitysamplitudia aivan vakiona, täytyi jännityksen minimiarvon tavoitteeksi asettaa noin 1-5 % kokeen jännitysamplitudin arvosta.



## Vetokokeet

Kuvassa 9 on esitetty vetokoekappaleiden väsytyiskoetulokset. C-profiililiitosten koetuloksiin on sovitettu SN-käyrä pienimmän neliösumman menetelmällä. Tämän koetuloksiin sovitetun SN-käyrän (yhtälö 1) m ja C kertoimiksi saatiin:  $m=3.07$  ja  $C=6.25 \cdot 10^{10}$ . Sovitetun SN-käyrän kulmakerroin (m-kerroin) on hyvin lähellä standardeissa yleisesti käytettävää arvoa  $m=3$ .

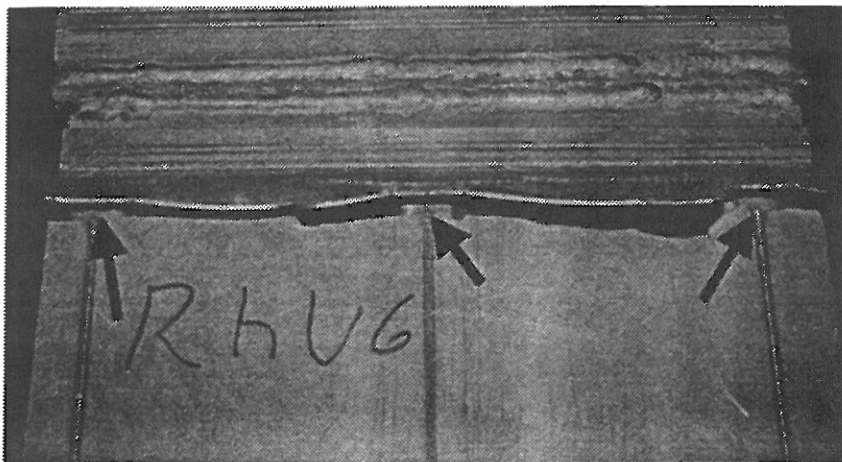


Kuva 9: Vetokoekappaleiden väsytyiskoetulokset, sekä C-profiililiitosten koetulosten perusteella määritetty SN-käyrä.

Koetulosten perusteella eivät C- ja h-profiilirakenteet eroa pitkittäisen väsyttävän kuormituksen kestossa toisistaan. Myöskin erot eri materiaalien välillä olivat hyvin pieniä. Tosin koesarjat olivat eri rakenne- ja materiaalivaihtoehtojen väliseen vertailuun liian suppeita.

Elementtimenetelmän perusteella pelkästään ydinlevyn ja liitosprofiilin yhteenkiinnittämisellä voitaisiin kriittisimmän pisteen (pintalevyssä ydinlevyn poimun kohdalla) jännityksiä pienentää noin 15 %. Olettaen rakenteen SN-käyrän kulmakertoimen  $m$  säilyvän muuttumattomana ydinlevyn ja liitosprofiilin kiinnittämisestä huolimatta saadaan SN-käyrän kertoimiksi  $m=3.07$  ja  $C=15 \cdot 10^{10}$ .

Koekappaleisiin syntyi vaurioita kahteen eri kohtaan. Joko koekappaleiden pintalevyjen ja päätyprofiilin välinen hitsi petti tai pintalevyyn syntyi murtuma ydinlevyn ja päätyprofiilin väliselle alueelle. Kaikissa tapauksissa, joissa koekappaleen päätyprofiilin ja pintalevyn välinen hitsisauma murtui, oli murtunut hitsi jollakin tavalla epäonnistunut, ts. hitsin tunkeuma oli jäänyt riittämättömäksi. Yleisin vaurio oli kuitenkin murtuma pintalevyssä ydinlevyn ja päätyprofiilin välisellä alueella. Säröt ydintyivät pintalevyssä ydinlevyn poimun päädyn kohdalle. Säröt etenivät kokeissa yleensä poikittaissuuntaan vapaassa levykentässä, kunnes jäljellä oleva pinta-ala oli liian pieni kantamaan asetettua kuormaa kuten kuvan 10 tapauksessa on käynyt. Joissain ruostumattomasta teräksestä valmistetuissa koekappaleissa säröt etenivät pinta-levyn ja päätyprofiilin välisen hitsin muutosvyöhykettä (HAZ) pitkin.

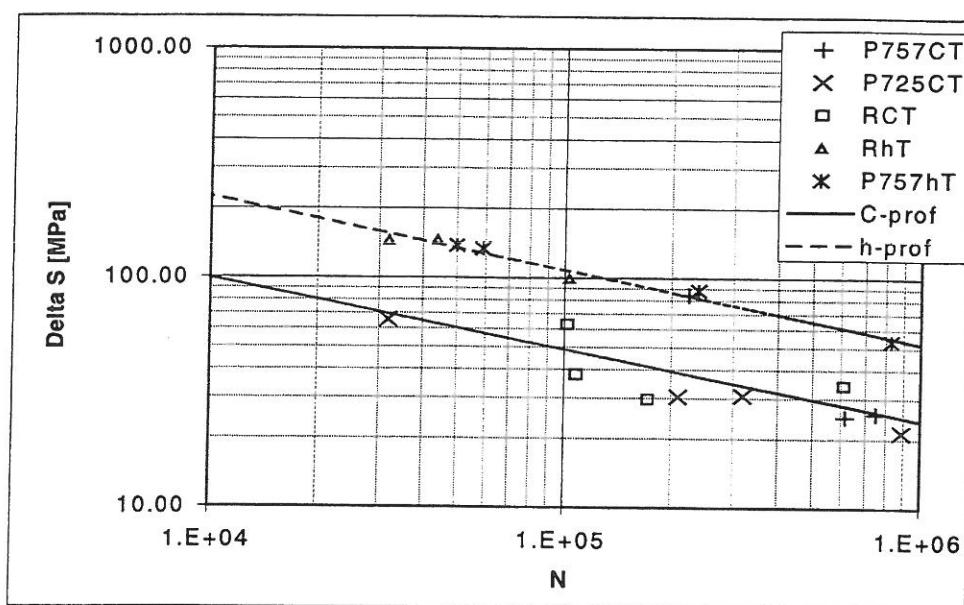


*Kuva 10: Tyypillinen väsytyksessä syntynyt vaurio. Särön ydintymispisteet merkitty nuolin.*

### Taivutuskokeet

Kuvassa 11 on esitetty taivutuskokeiden tulokset. C- ja h-profiilisten koekappaleiden sarjoihin on kumpaankin sovitettu SN-käyrät pienimmän neliösumman menetelmää käyttäen (C-prof ja h-prof). Näiden käyrien kertoimiksi saadaan C-profiililiitokselle  $m=3.24$  ,  $C=2.94 \cdot 10^{10}$  ja h-profiililiitokselle  $m=3.14$  ,  $C=24.79 \cdot 10^{10}$ . Vaikka väsymislukka jääkin taivutuskuorman alla alhaiseksi, on se laivan kansirakenteeseen riittävä, koska kansirakenteissa taivuttavat kuormat ovat tasoltaan pieniä ja luonteeltaan lähes staattisia.

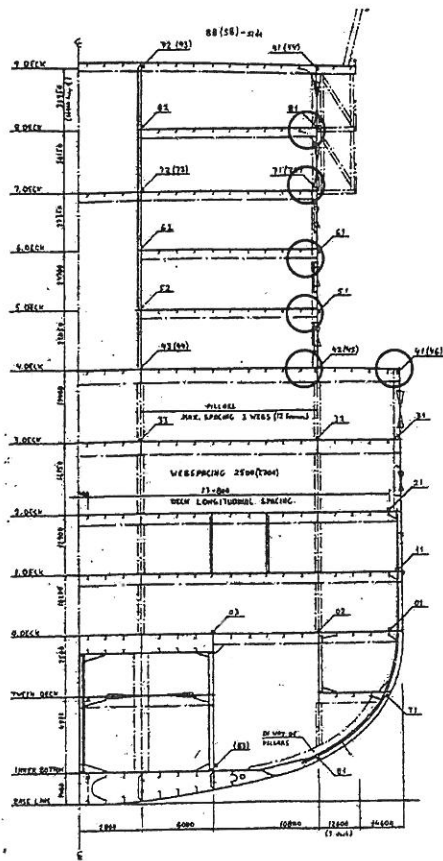
Taivutuskoekappaleisiin ensimmäiset vauriot syntyivät tyypillisesti pintalevyihin ydinlevyn poimujen päätyjen kohdille. Puristuspuolen pintalevyyn säröt ydintyivät ydinlevyn poimun kohdalle kuten vetokokeissakin. Vetopuolelle särö ydintyi samaan pisteeseen, tai vaihtoehtoisesti särö eteni vetopuolen pintalevyn ja ydinlevyn välisessä hitsisaumassa. Särön etenemistä hitsisaumassa esiintyi erityisesti niissä koekappaleissa, joissa vetopuolen pintalevyn ja ydinlevyn välinen hitsi oli epäonnistunut ydinlevyn päädyssä.



Kuva 11: Taivutuskokeiden tulokset sekä niihin sovitetut SN-käyrät.

## Sovellus kerroslevyjen käytöstä risteilylaivan kansirakenteessa

Laivaksi, jonka kansirakenteisiin kerroslevyrakennetta sovellettiin, valittiin risteilijä Royal Princess. Laiva on valmistettu Wärtsilän Helsingin telakalla vuonna 1983. Laivan pääkaari on esitetty kuvassa 12. Kukkanen & Kujala [2] esittävät kyseiselle laivalle stripmenetelmää käyttäen lasketun runkopalkin vasteen ja eri kansiin laivan elinaikana kohdistuvat kuormat. Näitä lähtötietoja, ja tässä tutkimuksessa kokeellisesti määritettyjä kerroslevyjen liitosten SN-käyriä käyttäen, määritettiin kerroslevyrakenteisten kansien väsymiseliniät.



Kuva 12: Royal Princess:n pääkaari. Kuvasta on ympyröity pisteet, joissa väsymiselinikä tarkastelut tehtiin.

### Lähtöarvot

Tässä tarkastelussa perinteinen kansirakenne korvattiin kansilla 4-8 kerroslevyrakenteella. Laskenta suoritettiin sisäkannen ja kansirakennuksen laidan kulmauksessa. Lisäksi kannella 4 laskenta suoritettiin sääkannen ja laidoituksen kulmauksessa. Tarkastelupisteet on merkitty kuvan 12 pääkaareen. Korvattaessa yhden kannen perinteinen rakenne kerroslevyrakenteella oletetaan, ettei laivan poikkileikkauksen jännitys jakauma muutu. Laivan poikkileikkauksen normaalijännitys jakaumana käytetään Holopaisen [3] esittämää epälineaarista jakaumaa. Jakauma on laskettu käyttäen SECPRO-elementtimallisuusohjelmaa. Epälineaarisen jännitys jakauman laskennassa on otettu huomioon taivutuksesta aiheutuvien jännitysten lisäksi leikkausjäntämän vaikutus. Laskennassa on myös huomioitu laivan suurten ikkunoiden vaikutus.

Laivan liikennöintialueina laskettiin kolme eri tapausta: Pohjois-Atlantti, Karibianmeri ja Karibianmeri & Pohjois-Atlantti. Kukkanen & Kujala [2] esittävät laskentapisteiden jännityskertymät Weibul-jakautumien (yhtälö 2) avulla.

$$P_s(S) = 1 - \exp\left\{- (\ln N) \cdot \left(\frac{S}{S_c}\right)^h\right\}, \quad (2)$$

missä  $P_s(S)$  on todennäköisyys, ettei jännitystasoa  $S$  ylitetä.  $S_c$  on taso joka ylitetään todennäköisyydellä  $10^{-8}$  sekä  $h$  on Weibul-muotoparametri.

Pohjois-Atlantin merenkäyntitilana on käytetty DNV:n [4] määrittelemää merenkäyntitilaa. Karibianmeren ja yhdistelmän Karibia & Pohjois-Atlantti merenkäyntitilat on määritetty GWS:n [5] mukaisesti. Laskennassa on laivan eliniäksi oletettu 20 vuotta, josta 15 % vietetään satamassa. Laivan nopeutena on käytetty 19 solmua. Aallokon ja laivan välisen kohtauskulman on oletettu jakautuneen tasaisesti kaikille kohtaamiskulmille.

Kukkanen & Kujala [2] esittävät kansien 4 ja 8 normaalijännityksen vaihteluvälit todennäköisyystasolla  $10^{-8}$  ja Weibul-jakautuman muotokertoimet. Kansien 5-7 normaalijännitysten vaihteluvälit todennäköisyystasolla  $10^{-8}$  on määritetty käyttäen Holopaisen [3] esittämää laivanrunkopalkin epälineaarista normaalijännitys jakaumaa. Tämän normaalijännitys jakauman ja rungon eri pisteiden normaalijännitysten todennäköisyysfunktioiden oletetaan käyttäytyvän toistensa suhteen lineaarisesti. Oletamus ei pidä täysin paikkaansa, mutta koska momentti y-akselin suhteen on määräävässä asemassa, ei näin meneteltäessä tehdä suurta virhettä. Kansilla 5-7 on käytetty lähteessä Kukkanen & Kujala [2] esittämiä Weibul-jakauman muotoparametrejä. Näin saadut jännityksen vaihteluvälit, jotka ylitetään todennäköisyydellä  $10^{-8}$  ja Weibul-jakauman muotoparametrit  $h$  on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1: Kansien elinikä laskettaessa käytetyt jännityksen vaihteluvälit  $\Delta\sigma$  [MPa] todennäköisyydellä  $10^{-8}$  ja Weibul-muotoparametrit  $h$ .

Pohjois-Atlanti			
	$\Delta\sigma$ [MPa]	$h$	
1	Kansi 4, runko	110.5	1.033
2	Kansi 4, kansirakennus	63.2	0.976
3	Kansi 5	79.4	0.972
4	Kansi 6	104.0	0.972
5	Kansi 7	129.3	0.972
6	Kansi 8	155.6	1.041
Pohjois-Atlanti & Karibiaanmeri			
1	Kansi 4, runko	101.2	0.970
2	Kansi 4, kansirakennus	55.7	0.948
3	Kansi 5	70.4	0.972
4	Kansi 6	92.5	0.972
5	Kansi 7	115.0	0.972
6	Kansi 8	137.9	0.954
Karibiaanmeri			
1	Kansi 4, runko	101.2	0.970
2	Kansi 4, kansirakennus	46.2	0.948
3	Kansi 5	54.9	0.972
4	Kansi 6	72.1	0.972
5	Kansi 7	89.4	0.972
6	Kansi 8	107.6	0.954

## Elinikäennuste

Kumulatiivisen vaurion syntyhetken määrittämiseen käytetään yleisesti Minerin hypoteesia (Miner's rule, Palmgren-Minerin teoria).

$$\eta = \sum_{i=1}^M \frac{n_i}{N_i}, \quad (3)$$

missä  $n_i$  on kuormitustoistojen lukumäärä vakiojännityksen vaihteluvälillä  $S$ . Tällä vaihteluvälillä tarvitaan  $N_i$  toistoa vaurion syntyyn.  $M$  on jännitysblokkien kokonaismäärä. Kuormitusjakauksen noudattaessa Weibul-jakaumaa (yhtälö 2) voidaan vauriosumma kirjoittaa muotoon [6]

$$\eta = \frac{N}{C} \cdot S_c^m \cdot (\ln N)^{-\frac{m}{h}} \cdot \Gamma\left(1 + \frac{m}{h}\right), \quad (4)$$

missä  $\Gamma\left(1 + \frac{m}{h}\right)$  on gamma-funktio arvolla  $1 + m/h$ .

Sijoittamalla tähän kuvassa 9 määritetyn SN-käyrän  $C$  ja  $m$  kertoimet sekä taulukossa 1 esitetyt jännityksen vaihteluvälit, saadaan vauriosumman arvo kun laiva on kohdannut

10<sup>8</sup> aaltoa. Olettaessa laivan kohtaavan tämän aaltomäärän 20 vuoden aikana, saadaan edelleen kansien väsymiseliniät laskettua. Näin saadut väsymiseliniät  $T_f$  ja vauriosummat kullekin kannelle on esitetty taulukossa 2.

*Taulukko 2: Kerroslevyrakenteisten kansien vauriosummat ja väsymiseliniät vuosina.*

Kansi	4		4		8		5		6		7	
	Runko		Kansirakennus		Kansirakennus		Kansirakennus		Kansirakennus		Kansirakennus	
	$\eta$	$T_f [a]$	$\eta$	$T_f [a]$	$\eta$	$T_f [a]$	$\eta$	$T_f [a]$	$\eta$	$T_f [a]$	$\eta$	$T_f [a]$
Pohjois-Atlanti	3.13	6.4	0.41	48.6	9.00	2.2	0.66	30.4	1.85	10.8	2.77	7.2
Pohjois-Atlanti & Karibianmeri	1.67	12.0	0.23	85.7	4.00	5.0	0.22	92.6	0.54	37.0	1.04	19.2
Karibianmeri	1.19	16.8	0.16	127.1	2.37	8.4	0.10	199.4	0.60	33.6	1.04	19.3

Kokeiden perusteella voidaan todeta, ettei kerroslevyrakenteiden pitkittäisliitosten väsymislujuus tällaisenaan ole riittävä. Väsymislujuus sallii kerroslevyjen käyttämisen ainoastaan laivan neutraaliakselin läheisyydessä. On kuitenkin huomattava, että näin suppeissa koesarjoissa jo yhden kokeen antama poikkeava tulos vaikuttaa lopputulokseen huomattavasti. Lisäksi on huomattava koekappaleiden varsin vaihteleva laatu.

Elementtimenetelmän perusteella normaalijännitykset pintalevyssä ydinlevyn poimun päädyn kohdalla pienenisivät 15 %, jos ydinlevy ja päätyprofiili voitaisiin kiinnittää toisiinsa. Taulukossa 3 on esitetty vauriosummat ja väsymiseliniät jos huippujännitykset pienenisivät 15 %. 15%:n lasku kriittisimmän alueen jännitystasossa mahdollistaisi liitosten käytön muulla paitsi laivan aivan ylimmillä kansilla.

*Taulukko 3: Kerroslevyrakenteisten kansien vauriosummat ja väsymiseliniät jos jännityskeskittymä pintalevyssä pienenesi 15%.*

Kansi	4		4		8		5		6		7	
	Runko		Kansirakennus		Kansirakennus		Kansirakennus		Kansirakennus		Kansirakennus	
	$\eta$	$T_f [a]$	$\eta$	$T_f [a]$	$\eta$	$T_f [a]$	$\eta$	$T_f [a]$	$\eta$	$T_f [a]$	$\eta$	$T_f [a]$
Pohjois-Atlanti	1.30	15.4	0.17	116.6	3.75	5.3	0.27	73.0	0.77	26.0	1.15	17.4
Pohjois-Atlanti & Karibianmeri	0.70	28.7	0.10	205.6	1.67	12.0	0.09	222.2	0.22	88.9	0.43	46.0
Karibianmeri	0.49	40.4	0.07	305.0	0.99	20.3	0.10	199.4	0.25	80.6	0.43	46.3

## **Yhteenveto**

Koetulosten perusteella tutkittujen liitosten väsymislujuus on tällaisenaan riittävä ainoastaan käytettäväksi laivan neutraaliakselin läisyydessä sijaitsevilla kansilla. Paneelin päätyprofiilin ja ydinlevyn yhteenkiinnittämisellä on saavutettavissa 15 %:n lasku maksimijännityksissä. Tällöin liitosten käyttö olisi kyseisessä laivassa mahdollista muulla paitsi aivan ylimmillä kansilla

Koekappaleissa olleiden muiden valmistusvirheiden ja mitta-epätarkkuuksien vaikutuksen suuruutta lopputuloksiin on vaikea arvioida. Todennäköisesti mittatarkan ja huolellisesti valmistetun kerroslevyn, jonka päätyprofiili ja ydinlevy on kiinnitetty yhteen, käyttö olisi mahdollista matkustajalaivojen sisäkansissa.

## **Lähteet**

- [1] Kujala, P., Metsä, A., Nallikari, M., All Metal Sandwich Panels for Ship Applications. Teknillinen korkeakoulu, laivalaboratorio, Otaniemi 1995, M-196. 65 s.
- [2] Kujala, P., Kotisalo, K., Teräskerroslevyrakenteen leikkaus- ja taivutusväsymiskokeet, Teknillinen korkeakoulu, laivalaboratorio, Otaniemi 1996, M-210. 33 s.
- [3] Kotisalo, K., Teräksisten kerroslevyrakenteiden pitkittäisliitosten väsymislujuus. Teknillinen korkeakoulu, laivalaboratorio, diplomityö, Otaniemi 1998. 84 s.
- [4] Kukkanen, T., Kujala, P., Fatigue Predictions of Cruising Ship in Different Environmental and Operational Conditions. Teknillinen korkeakoulu, laivalaboratorio, Otaniemi 1996. 34 s. ei julkaistu.
- [5] Holopainen, T., Normal stress distributions of passenger cruise liner. VTT Manufacturing Technology Maritime and Mechanical Engineering, Otaniemi 1996. Ei julkaistu.



- [6] Det Norske Veritas. Fatigue Assessment of Ship Structures. DNV Report No.93-0432. 1996.
- [7] GWS. Global wave statistics. British Maritime Technology Limited (BMT) 1986. 661 s.
- [8] Hughes, O., Ship Structural Design. The Society of Naval Architects and Marine Engineers, New Jersey 1983. 566 s.

Kimmo Kotisalo, DI  
Teknillinen korkeakoulu  
Laivalaboratorio  
PL 5300  
02015 TKK