

Dora Autio

LAIVAAN VAIKUTTAVAT VOIMAT JA VOIMIEN VAIKUTUSTEN  
ENNALTAEHKÄISY

Tuotantotalouden koulutusohjelma  
2014

# LAIVAAN VAIKUTTAVAT VOIMAT JA VOIMIEN VAIKUTUSTEN ENNALTAEHKÄISY

Autio, Dora  
Satakunnan ammattikorkeakoulu  
Tekniikka ja Merenkulku Rauma  
Tuotantotalouden koulutusohjelma  
Tammikuu 2014  
Yritys: Deltamarin Oy  
Ohjaaja: Kivi, Karri  
Sivumäärä: 40  
Liitteitä: 2

Asiasanat: voima, laivanrakennus, rahtilaivat, suunnittelu

---

Opinnäytetyön tarkoitus oli saada aikaan opas, jonka avulla voidaan kouluttaa yritykseen tulevia alalle uusia insinöörejä. Opinnäytetyö jakautuu kolmeen aiheeseen, voimiin jotka vaikuttavat alukseen, niiden vaikutuksiin ja vaikutusten ennaltaehkäisyyn. Lähteiden määrästä huomaa, että jos aiheesta haluaa saada kompaktin ja selvän kuvan muodostettua itselleen, se vaatii paljon lukemista. Sen vuoksi uskon että opinnäytetyöni tulee olemaan hyödyllinen.

Työ tehtiin toimeksiantajayrityksen tilauksesta, tavoitteena yritykseen tulevien uusien insinöörien koulutuksen helpottaminen. Toimeksiantajayritys on merenkulkualan suunnittelu ja konsultointiyritys. Yritykseen tuleville uusille työntekijöille koulutetaan ensimmäisten viikkojen aikana suunnitteluohjelmiston lisäksi perustiedot laivoista ja laivojen rakennuksesta kokonaisuutena. Tämä opas tulee tukemaan tuota koulutusprosessia.

Opinnäytetyön aiheen rajaus perustuu yrityksen toiveisiin katettavista aihealueista. Rajauksella pyrittiin keskittymään olennaisimpiin asioihin merenkulkualan suunnittelijan kannalta. Työ tehtiin puhtaasti kirjallisuustutkimuksena. Tavoitteen mukaisesti kerättiin saatavilla olevasta aineistosta oleellisin tieto yhteen selkeään pakettiin.

Työn tuloksena saatiin aikaan kompakti opas merenkulkualan suunnittelijalle. Kun opas on olemassa, sen avulla on helppo jatkaa muun koulutusmateriaalin tekemistä ja tulevaisuudessa kouluttaa asiaa uusille insinööreille. Opas tulee olemaan hyvä aloituspaketti, kun uusi suunnittelija haluaa ymmärtää miksi laivaan tarvitaan niin paljon erilaisia rakenteita.

# THE FORCES IMPACTING ON A SHIP AND HOW THEY CAN BE PREVENTED

Autio, Dora  
Satakunta University of Applied Sciences  
Technology and Maritime Management Rauma  
Degree Programme in Industrial Management  
January 2014  
Commissioned by Deltamarin Oy  
Supervisor: Kivi, Karri  
Number of pages: 40  
Appendices: 2

Keywords: power, shipbuilding, cargo ship, design

---

The purpose of this thesis was to accomplish a guide, with which new engineers beginning to work in the company can be trained. The thesis is based on three main categories: the forces impacting the vessel, the affects they cause and the prevention of the damages caused by the forces. One can see from the amount of the source materials that if you want to get a clear vision of the subject you have to study it quite a bit. That is why I think my thesis will be useful to the engineers reading it.

The thesis was done based on an order from the company, with a goal to ease the education of the new engineers coming to the company. The company is a maritime design and consultant office. The new employees are trained during the first weeks on employment how to use the design program and the basic information about vessels and shipbuilding in general. This guide will support the training process.

The thesis is limited by the needs of the company, and what they desired to be included in the guide. The subjects handled were chosen based on the ones most important to a maritime designer. The thesis is purely a literature study. The main goal was to collect the most relevant things to a compact guide.

The result of the work is a compact guide to a maritime designer. Now that the guide exists, it is easy to continue the making of the training material and in the future train the new workers about the subject. The guide will be a good starting package when a new designer wants to understand why so much steel structures are needed in a vessel.

## ALKUSANAT

Haluan kiittää kaikkia niitä, jotka ovat edesauttaneet työni valmistumista kannustamalla ja auttamalla. Erityiskiitokset haluan esittää ohjaajalleni Deltamarin Oy:ssä Juha Valtaselle sekä ohjaavalle opettajalleni Karri Kivelle.

Raumalla 15.12.2013

Dora Autio

# SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

TERMILUETTELO

1	JOHDANTO .....	8
1.1	Lähtökohdat .....	8
1.2	Tavoitteet .....	8
1.3	Aiheen rajaus .....	8
1.4	Yrityksen kuvaus.....	9
1.5	B.Delta37 –standardibulkkeri .....	9
2	LAIVAAN VAIKUTTAVAT VOIMAT .....	10
2.1	Globaalit voimat.....	11
2.1.1	Staattinen kuormitus.....	11
2.1.2	Dynaaminen kuormitus .....	14
2.2	Paikalliset voimat .....	16
3	VOIMIEN VAIKUTUSMUODOT.....	17
3.1	Pysyvä muodonmuutos.....	18
3.2	Väsytymismurtuma .....	18
3.3	Lommahdus .....	19
3.4	Haurasmurtuma.....	20
4	KOVAT PISTEET .....	21
5	LAIVAN RAKENTEIDEN LUOKITTELU.....	24
5.1	Primääriset rakenteet .....	25
5.2	Sekundääriset rakenteet .....	25
5.3	Tertiääriset rakenteet .....	26
6	ESIMERKKIRAKENTEITA .....	26
6.1	Kaksoispohja.....	26
6.2	Laipio.....	27
6.3	Kaari .....	27
7	JÄYKISTYSMENETELMÄT.....	29
7.1	Polviot.....	29
7.2	Muotoprofiilit.....	29
7.3	Poimutus.....	31
8	LUJUUSANALYYSI.....	32

8.1	Sääntöpohjainen laskenta .....	32
8.1.1	Yleistä .....	32
8.1.2	Esimerkki rungon vahvuuden laskennasta .....	33
8.2	Elementtimenetelmä.....	34
8.2.1	Mallista .....	34
8.2.2	Mallin luominen ja käyttö .....	35
8.2.3	Tulokset .....	37
8.3	Käsinlaskenta .....	39
9	YHTEENVETO .....	40
	LÄHTEET .....	41
	LIITTEET	

## TERMILUETTELO

BULKKERI	Irtolastialus, kuljettaa pakkaamatonta irtolastia, kuten hiiltä tai viljaa.
BASELINE	Kuvitteellinen linja, perusviiva, joka kulkee laivan kölin alimmassa kohdassa.
DWT	Dead weight tonnage, eli kuolleen painon vetoisuus
KAULUS	Kun esimerkiksi palkkiin tehdään reikä risteävää rakennetta varten, siihen tehdään myös kaulus sulkemaan aukko ja tukemaan rakennetta
KUOLLUT PAINO	tarkoittaa aluksen kantavuutta eli aluksen vesivarastojen, tarvikkeiden, polttoaineen, lastin ja henkilöiden yhteispaino
LAPIO	Aluksen runkoa vahvistava veden tai tulen pitävä seinä
MIESLUUKKU	Aukko levyssä, jotta ihmiset pääsevät liikkumaan
NEUTRAALIAKSELI	Akseli kulkee laivapalkin poikkileikkauksen kautta, pitkittäiset taivutusjännitykset ei vaikuta neutraaliakselilla
PERÄPEILI	Laivan ”peräseinä”, laivan takaa katsoen takalaita
PERÄPERPENDIKKELI	Luotiviiva laivan rungon peräosassa, jonka läpi peräsinakseli kulkee. Kulkee akseliston origossa.

# 1 JOHDANTO

## 1.1 Lähtökohdat

Tämä opinnäytetyö käsittelee laivaan vaikuttavia voimia ja niiden vaikutusten ennaltaehkäisyä. Työ käsittelee alustyyppiä, joka on Deltamarin Oy:n kehittämää B. Delta37 -standardibulkerikonsepti. Suurin painoarvo työssä tulee kohdistumaan voimien vaikutuksia ennaltaehkäiseville toimille, jotka suunnitteluvaiheessa voidaan tehdä. Työn aihe muotoutui laivaan vaikuttavien voimien ympärille yrityksen tilauksesta. Toimeksiantajalla on tarve koulutusmateriaalille, jonka avulla uusille työntekijöille voisi selkeyttää laivansuunnittelun taustateoriaa. Tavoite on, että opinnäytetyöstä tulee opas, jota voidaan käyttää koulutuksen tukena. Opas voidaan jakaa uusille työntekijöille.

Aloitin kesällä 2013 yrityksessä kesätyöntekijänä ja syksyllä oli aika aloittaa opinnäytetyön tekeminen. Kun aloitin runkosuunnittelijana, erilaisia faktoja siitä miksi mikään kohta laivassa tehdään tietyllä tavalla tuli pikkuhiljaa ja kokonaiskuva jäi epäselväksi. Työssä on tarkoitus selvittää mitkä ovat ne voimat ja voimien aiheuttajat, jotka ovat laivaan rakennettavien tukirakenteiden tarpeen takana.

## 1.2 Tavoitteet

Työn tavoitteena on laatia yksinkertainen opas laivaan vaikuttavista voimista ja niiden vaikutusten ennaltaehkäisystä. Oppaan kohdeyleisö on merenkulkualan suunnittelutoimistossa työskentelevät uudet työntekijät. Tavoitteena on että työ selkeyttää uudelle työntekijälle laivan suunnittelun taustoja ja auttaa ymmärtämään minkälaisiin olosuhteisiin laivoja suunnitellaan.

## 1.3 Aiheen rajaus

Laivaan vaikuttavien voimien osalta työ painottaa globaaleja voimia, ja ennaltaehkäisevät toimet keskittyvät myös niihin. Rajaan työn aihetta voimien vaikutusten en-

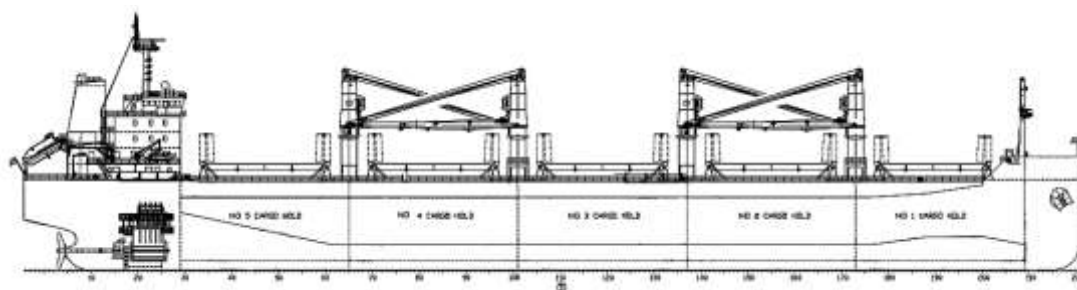


naltaehkäisyn osalta niihin toimiin, jotka pystytään tekemään laivan suunnitteluvaiheessa. Suunnitteluperusteiden lisäksi löytyvät ne valmistustekniset toimet, jotka toteutetaan laivaa rakennettaessa telakalla. Kun työssä käsitellään laivaa, tarkoitetaan sillä Deltamarin Oy:n B. Delta37 -standardibulkkeria.

#### 1.4 Yrityksen kuvaus

Toimeksiantaja yritys on Suomessa ja ulkomailla toimiva meriteknologia-alan suunnittelu- ja insinööritoimisto. Elomarin-nimisen yrityksen perusti ryhmä meriteknologia-alan suunnittelijoita ja insinöörejä vuonna 1990. Jo vuotta myöhemmin yrityksen nimeksi vaihdettiin Deltamarin. Yrityksen pääkonttori sijaitsee Raisiossa ja alakonttorit Raumalla ja Helsingissä. Suomen lisäksi yrityksellä on konttorit muun muassa Kiinassa, Puolassa ja Brasiliassa. Yrityksen toimenkuvaan kuuluvat konsultointi-, suunnittelu- ja projektitehtävät pienistä kehitystehtävistä laajoihin projekteihin meriteollisuuden alalla. Projektien kirjo vaihtelee pienistä tutkimusveneistä valtamerillä kulkeviin rahtilaivoihin. Vuoden 2013 alussa valtaosa yrityksen osakkeista siirtyi Singaporen pörssiin listautuneen AVIC International Investments Limited -yrityksen omistukseen. Yrityksessä työskentelee noin 400 henkeä, joista noin 250 Suomessa. Deltamarin Oy:n toimitusjohtaja on Mika Laurilehto ja yrityksen liikevaihto on viime vuosina ollut noin 25 miljoonaa. (Deltamarin Oy www-sivut 2013)

#### 1.5 B.Delta37 –standardibulkkeri



Kuva 1. B.Delta37 - standardibulkkeri (Deltamarin 2013)

Bulkkerien standardoimisella pyritään siihen, että saataisiin asiakkaalle taloudellisesti halvempi alus, joka tuottaa enemmän. Standardisarjan alukset on suunniteltu kuluttamaan vähemmän ja kuljettamaan enemmän kuormaa suhteessa kokoonsa. Alukset on suunniteltu uusimpien standardien mukaan, jonka ansiosta laivan valmistusvaiheessa säästetään materiaalia ja työvoimaa. Deltamarin on tuottanut B.Delta -sarjan, johon kuuluu B.Delta37 (Handysize), B.Delta64 (Supramax) ja B.Delta82 (Kamsar-max). Uusin alus sarjassa on B.Delta43. Alukset eroavat toisistaan nopeudessa ja lastinkantokyvyssä. Sarjan alusten strategiset tiedot löytyvät liitteestä 1. B.Delta37 on sarjan pienin alus. Siitä löytyy 5 lastiruuma ja 4 nosturia. Se on suunniteltu kuljettamaan irtolastia, joka voi koostua esimerkiksi hiilestä, rautamalmista, jyvistä tai teräskeloista. (Deltamarin Oy www-sivut 2013)

Pituus (LOA)	179,99m
Leveys	30,00m
Syvyys	15,00m
Syväys	9,5m
Deadweight	35 000/45 000tonnia
Lastiruuman tilavuus	50 000m <sup>3</sup>
Nopeus	14solmua

Taulukko 1. B.Delta37 strategiset luvut (Deltamarin Oy www-sivut 2013)

## 2 LAIVAAN VAIKUTTAVAT VOIMAT

Laivaan vaikuttavat voimat voidaan jakaa globaaleihin ja paikallisiin voimiin. Globaalit voimat vaikuttavat laaja-alaisesti koko laivaan ja paikalliset voimat vaikuttavat vain johonkin alueeseen laivassa. Voimat voidaan edelleen jakaa staattisiin ja dynaamisiin voimiin. Staattinen kuormitus on ajasta riippumaton tai muuttuu hyvin hitaasti, kun taas dynaaminen kuormitus vaihtelee ajan mukaan ja vaihtelu voi olla hyvinkin nopeaa. (Pennala, E. 2004, 11)

## 2.1 Globaalit voimat

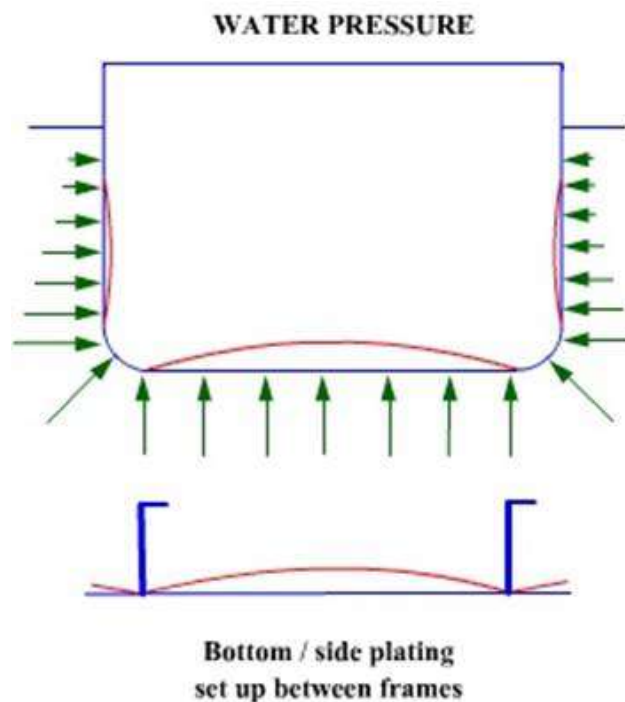
Voimat, jotka luokitellaan globaaleiksi voimiksi, vaikuttavat välillisesti tai välittömästi koko laivaan.

### 2.1.1 Staattinen kuormitus

Laivan staattinen kuormitus koostuu neljästä vaikuttavasta voimasta, kuolleesta painosta, nosteesta, leikkausvoimista ja tyynenveden taivutusmomentista.

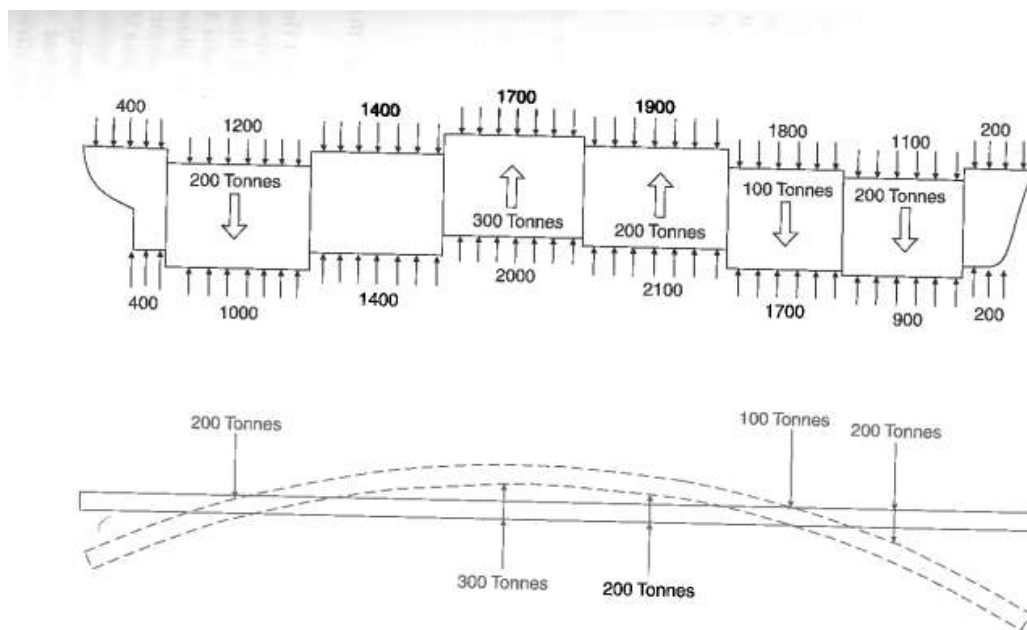
Merenkulussa kuollut paino tarkoittaa laivan kantavuutta, eli sitä massan määrää mitä laiva pystyy turvallisesti kuljettamaan. Se massa koostuu lastista, polttoaineesta, puhtaasta ja painolastivedestä, varustelusta sekä laivalla olevista ihmisistä, henkilökunnasta ja matkustajista. (Kuljetusopas www-sivut 2013) Bulkkerin vetoisuus vaihtelee minibulkkerin (24 000dwt) ja maailman suurimman bulkkerin (300 000dwt) välillä (Bulkcarrierguide www-sivut 2013). Laivaa lastatessa pyritään takamaan staattinen tasapaino, jolloin laivan liikkeet eivät vaikuta tasapainoon sen toimintaa haittaavasti. Kuollut paino vaikuttaa laivan syväykseen ja painaa laivaa alaspäin.

Noste on hydrostaattisen paineen aiheuttama voima, joka johtuu paineen suuruuden vaihtelusta kappaleen eri pinnoilla. Noste perustuu Arkhimedeeseen lakiin, jonka mukaan osittain tai kokonaan upotettuun kappaleeseen kohdistuu ylöspäin vaikuttava voima. Noste on suuruudeltaan yhtä suuri kuin sen kappaleen syrjäyttämän nestemäärän massa, mutta vaikutussuunta kuitenkin vastakkainen eli kohtisuoraan ylöspäin. Vedenpaineen aiheuttama noste, vaikuttaa erilailla laivan eri kohtiin johtuen laivan vedenalaisen osan muodosta. Noste vaikuttaa kuitenkin staattisesti laivaan aina siitä lähtien kun se rakennusvaiheessa ensimmäisen kerran lasketaan veteen. Nosteen voima painaa laivan pintoja sisäänpäin, aiheuttaen taipumista laivan tukirakenteiden välissä. (Hatakka, Saari, Sirviö, Viiri & Yrjänäinen 2007, 80–81)



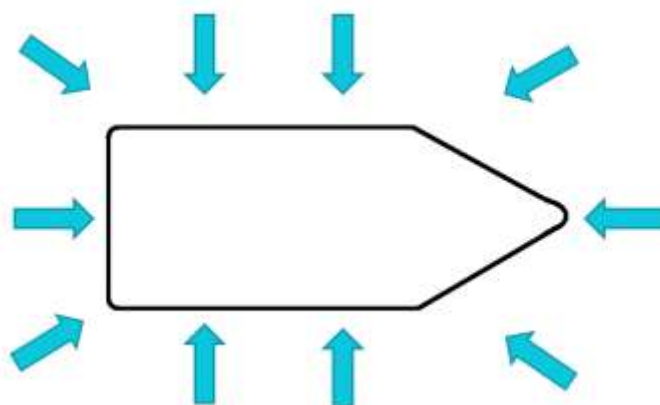
Kuva 2. Nosteen vaikutus laivan runkoon (The Nautical site www-sivut 2013)

Laivaa lastattaessa tai sen ollessa tyhjiällä se pyritään tasapainottamaan. Kuitenkin jokaiseen laivan osaan vaikuttaa jokin resultanttivoima ylös tai alaspäin johtuen laivan nosteen tai massan aiheuttaman voiman ylijäämästä. Nämä eri osien resultanttivoimat aiheuttavat vertikaalisia leikkausvoimia laivan runkoon. Kuvassa x näytetään lastattu laiva ja sen alla palkki johon vaikuttavat samat voimat kun laivaan. Laivaan alhaalta päin vaikuttavat voimanuolet kuvaavat veden aiheuttamaa nostetta. Ylhäältä päin vaikuttavat voimat kuvaavat alaspäin vaikuttavia voimia, kuten laivan ja sen lastin massa. Paksummilla nuolilla on kuvattu resultanttivoima niissä kohdissa, jossa noste ja massa ovat erisuuret. Eri osastojen välisten resultanttivoimien väliset erot aiheuttavat laivaan leikkausjännitystä. (Eyres 2007, 59)



Kuva 3. Laivaan vaikuttava leikkausjännitys (Eyres 2007,60)

Tyynenveden taivutusmomentti vaikuttaa paikoillaan olevaan laivaan tyynessä vedessä. Teoreettisessa tilanteessa aluksella on yhdenmukainen läpileikkaus ja paino on jakautunut tasaisesti kautta laivan. Tyynenveden momentin vaikuttaessa kaikille voimille löytyy yhtä suuri vastavoima, joka vaikuttaa samalla suuruudella vastakkaiseen suuntaan. Tyynenvedenmomentti ei aiheuta laivaan siis minkäänlaisia ulkoisia resultanttivoimia. Harvoin laivan massa kuitenkin on tasaisesti jakautunut, johtuen lastista ja laivan rakenteesta. (Eyres 2007,60)

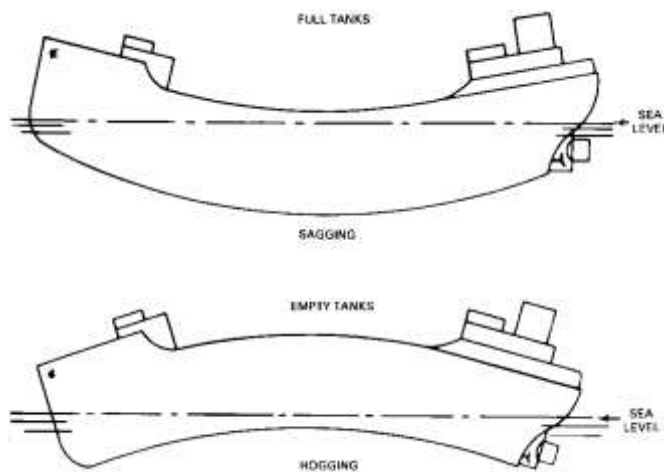


Kuva 4. Tyynenvedenmomentti

### 2.1.2 Dynaaminen kuormitus

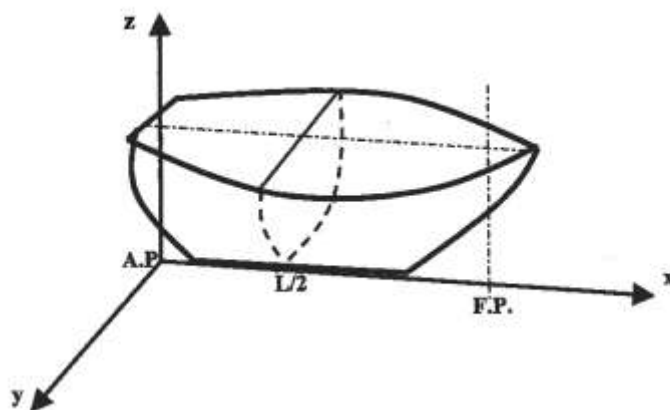
Hydrodynaaminen kuormitus aiheutuu vaihtelevista kuormittavista tekijöistä, kuten aallokosta ja tuulesta. Laivaan vaikuttavien voimien tarkastelun perustana pidetään säännöllistä pieniamplitudista sinimuotoista aallokkoa. Dynaaminen kuormitus koostuu taivutusmomentista, akselien ympäri vaikuttavista momenteista ja akselien suuntaisista liikkeistä.

Aaltomomentti johtuu veden painekentän muuttumisesta laivan rungon pintaa vasten. Aluksen ollessa merellä se kohtaa suuria vedenpaineen aiheuttamia voimia, jotka aiheutuvat aallokosta ja sen korkeuden vaihtelusta. Laivan ulkokuori liikkuu palkeiden tavoin sisään ja ulos (panting), johtuen vaihtelevasta paineesta joka kohdistuu laivan rungon perään ja keulaan aallokossa. Sagging-tilanteessa jokin voima nostaa aluksen perää ja keulaa ylöspäin. Tämä voi johtua esimerkiksi aallokosta, jolloin perä ja keula ovat aallonharjoilla ja keskikohta ”roikkuu” aaltojen välissä. Toinen vaihtoehto on että tilanne johtuu väärin sijoitellusta lastista, joka aiheuttaa paineen keskittymisen laivan keskikohtaan. Sagging-tilanteessa laivan keskikohta notkahtaa, jolloin laivan pohjarakenteisiin kohdistuu veto ja kansirakenteet painuvat kasaan. Hogging-tilanne on edellisen vastakohta, jolloin laivan keskikohta nousee ylöspäin. Tilanne voi johtua laivan keskikohdalla olevasta aallonharjasta tai laivan massan jakautumisesta laivan keulaan ja perään. Tilanteessa voima painaa aluksen keskikohtaa ylöspäin, jolloin perä ja keula painuvat alaspäin. Tällöin laivan keskikohdassa kansirakenteisiin kohdistuu vetojännitystä ja pohjan rakenteet painuvat kasaan. (The Nautical cite www-sivut 2013)



Kuva 5. Sagging- ja hogging- tilanteet (Global Security www-sivut 2013)

Laiva rakentuu 3-uloitteisen akseliston ympärille, ja myös laivaan vaikuttavien voimien vaikutussuunnat ilmoitetaan akselien suhteen. Laivan origo sijoittuu laivan perään laivan peräsimen kohdalta kohtisuoraan kulkevan linjan ja laivan perusviivan kohtaamispisteeseen. X-akseli on vaakasuora akseli perästä kohti nokkaa, y-akseli kulkee laivan poikki ja z-akseli pystysuunnassa. (Alanko 2006)

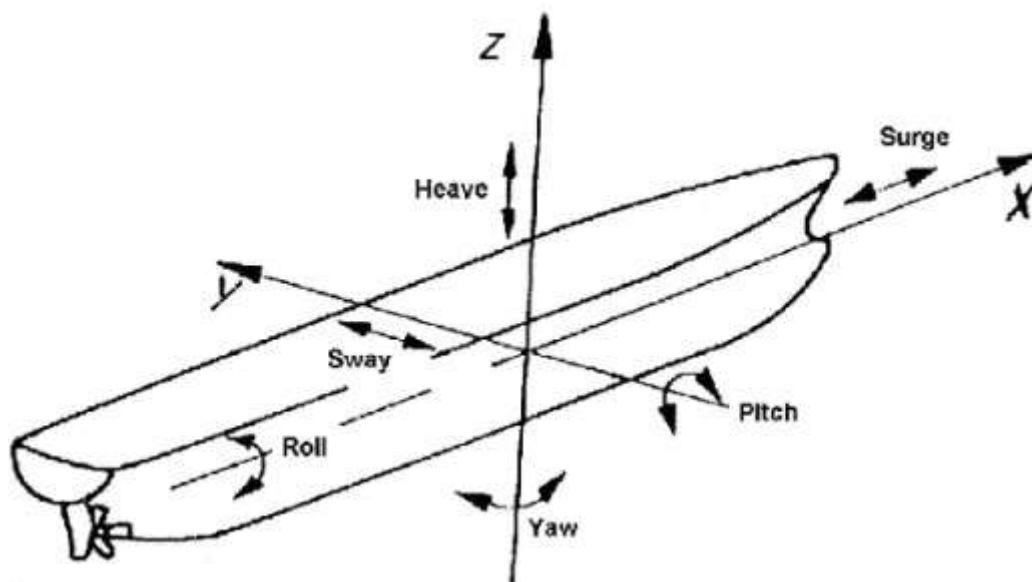


Kuva 6. Laivan akselit (Alanko 2006)

Laivan akselivoimat jakautuvat transaktioliikkeistä syntyviin voimiin ja akselien ympäri kiertuviin momentteihin. Translaatioliikkeistä johtuvan x-akselin suuntaisen voiman aiheuttaa eteen tai taaksepäin kiihtyily (surging). Sivuitainen y-akselin suuntainen liike huojunta (swaying), liikuttaa alusta sivuttain johtuen esimerkiksi tuulesta tai aallokosta. Z-akselin suuntainen kohoilu (heaving) vie laivaa ylös alas veden pinnan liikkeiden mukana. Pituusakselilla (x) vaikuttaa myös toinen voima, kiertyminen (torsion). Kun alus kulkee aallokossa 45 asteen kulmassa aaltoon nähden, sen runkoon kohdistuu kiertäviä voimia. Nämä voimat pyrkivät kiertämään alusta pituusakselinsa ympäri. Kiertävän voiman vaikutukset ovat lähes merkityksettömiä pienemmillä aluksilla. Aluksilla, joilla on erityisen pitkiä tai leveitä aukkoja kansissa, vaikutukset ovat huomattavia. (Remote Measurement & Research Co. www-sivut 2013)

Akselien ympäri tapahtuvista liikkeistä x-akselin ympäri kiertävä liike on laivan keinumista (rolling). Keinumista lisää kova aallokko, varsinkin jos laiva kulkee aaltojen suuntaisesti. Y-akselin ympäri vaikuttavia liike ovat laivan kallistuminen pituus-suunnassa (pitching). Laiva kallistuu pituus-suunnassa kulkiessaan aaltoja vasten. Kun alus kulkee kovassa aallokossa, laivan keula nousee ylös ja sen keulaan kohdis-

tuu kova hakkaava voima, jyskintä (pounding), keulan rakenteiden iskeytyessä uusiin aaltoihin. Z-akselin ympäri tapahtuva liike, mutkailu (yawing), johtuu siitä että laivaa on käytännössä mahdotonta ohjata täysin suoraan. Teoriassa laivaa ohjataan suoraan, kuitenkin todellisuudessa laivan reitti mutkittelee johtuen laivan liikkeistä veden mukana. (Remote Measurement & Research Co. www-sivut 2013)



Kuva 7. Akseliensuuntaiset voimat (Remote Measurement & Research Co. www-sivut 2013)

## 2.2 Paikalliset voimat

Paikalliset voimat vaikuttavat johonkin alueeseen laivassa. Alue voi olla hyvinkin pieni ja vaikutus paikallinen tai vaihtoehtoisesti paikallinen voima voi olla niin suuri että se vaikuttaa isompaan alueeseen laivassa. Paikallisia voimia ovat esimerkiksi kannella olevat rakenteet, kannelle kertyvät vesipatsaat ja värähtelyt.

Kannella olevat rakenteet aiheuttavat laivan runkoon suuria paikallisia voimia. Suurimpia rakenteita ovat esimerkiksi kannella olevat nosturit, joita esimerkki aluksessamme on neljä. Nosturi itsessään aiheuttaa runkoon rasitusta ja rasituksen määrä moninkertaistuu kun nosturia käytetään lastauksessa. Kovassa merenkäynnissä vesi pääsee nousemaan kannelle. Vesipatsaat aiheuttavat kanteen iskeytyessään hetkellisesti suuria paikallisia voimia.



Laivan värähtelyt voidaan jakaa kolmeen ryhmään, rungon, akselin ja varusteiden värähtelyyn. Tässä työssä keskitymme laivan runkoon, ja sen värähtelyihin. Laivan rungon värähtelyt voidaan edelleen jakaa laivapalkin, kansirakennuksen ja kaksois-pohjan värähtelyihin. Myös aiemmassa kappaleessa mainitut sagging- ja hogging-tilanteet ovat eräänlaisia värähtelyn ilmenemismuotoja. (Räisänen 1997, 14-7)

Potkuriheräte on yleisin värähtelyn aiheuttaja laivassa. Se johtuu potkurin työskente-lystä epätasaisessa vanavedessä. Potkuriakselin kautta välittyvät hydrodynaamiset voimat aiheuttavat akseliin työntö- ja vääntömomentin vaihteluita ja taivutusmo-mentteja. Toinen potkurin aiheuttaman värähtelyn muoto on suoraan laivan runkoon vaikuttavat, potkurin lapojen aiheuttamat painekuormat. Potkuri aiheuttaa pyöries-sään ympärilleen kavitaatiota eli alipainetta. Suuri paine-ero aiheuttaa runkoon suu-rempiä voimia. Tästä syystä potkuri pyritään valmistamaan niin, että sen aiheuttama kavitaatio on mahdollisimman pieni. (Räisänen 1997, 14-7)

Aallokon heräte on toinen värähtelyn aiheuttaja aluksella. Aallokko vaikuttaa yleensä vain laivan rungon alimpiin osiin. Aallokon aiheuttama värähtely voidaan jakaa springing- ja whipping-värähtelyyn. Ensiksi mainittu vaikuttaa koko laivaan ja joh-tuu aallokon, jossa laiva on, taajuuden ja laivapalkin alimman ominaistajuuden osumisesta lähekkäin. Whipping-värähtely johtuu laivan keulan paineen vaihtelusta. Paineen vaihtelu johtuu keulan kohtaamista aalloista ja keulan rakenteiden tärähte-lystä sen iskeytyessä aaltoihin. Kolmas värähtelyn muoto on jäiden aiheuttama vä-rähtely. Aluksen edetessä jäissä, sen synnyttämät värähtelyt aiheuttavat väsymisvau-rioita aluksen runkoon. (Räisänen 1997, 14-7)

### 3 VOIMIEN VAIKUTUSMUODOT

Laivaan vaikuttavat voimat aiheuttavat kappaleisiin jännitystä, joka aiheuttaa erilai-sia muodonmuutoksia ja murtumia. Tässä kappaleessa kerrotaan lyhyesti voimien eri vaikutusmuodoista. Näiden voimien vaikutuksia pyritään minimoimaan erilaisilla toimenpiteillä, mutta aina tapahtuu jonkinlaista epämuodostumaa voimien vaikutuk-

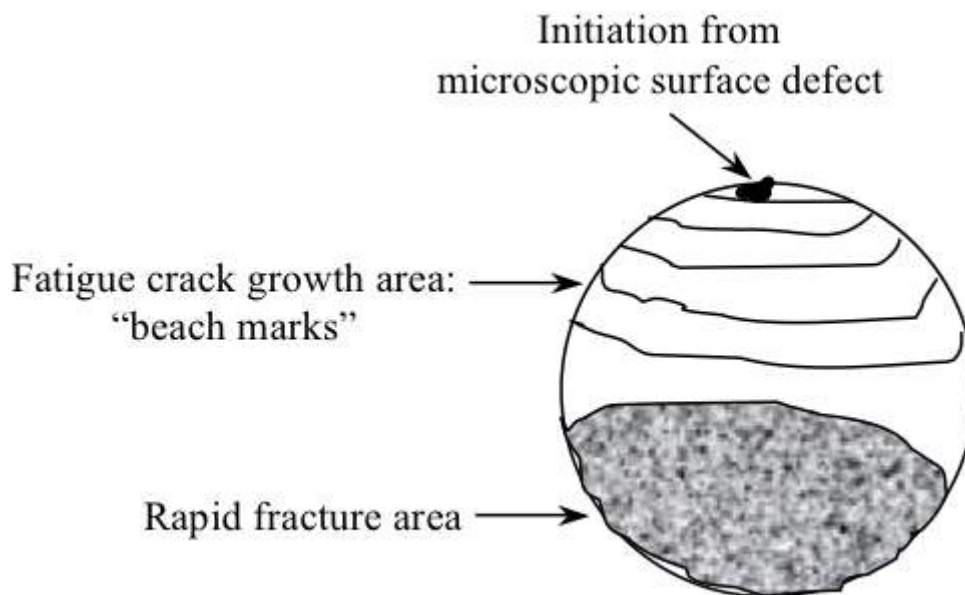
sen takia. Laivassa tapahtuvat muodonmuutokset voidaan karkeasti jakaa neljään pääryhmään materiaalin väsymismuodon mukaan.

### 3.1 Pysyvä muodonmuutos

Metalliin voi muodostua pysyvä muodonmuutos kun siinä esiintyvä jännitys ylittää materiaalin myötörajan. Plastisoituessaan kappale venyy ja lopulta materiaali saavuttaa murtumispisteensä. (Isotalus 2013) Plastisoituminen sinällään ei aiheuta laivassa suuria ongelmia, koska plastisoitunut kappale kestää vielä. Vasta kun kappaleen rasitus ylittää murtumisrajan se lommahtaa. (Lietepohja 2013)

### 3.2 Väsymismurtuma

Laivapalkkiin kohdistuvan aaltomomentin muutokset aiheuttavat rakenteissa väsymismurtumia. Väsymismurtuma ei esiinny välittömästi, vaan sitä tarkasteltaessa tulee ottaa huomioon koko rasitushistoria. (Isotalus 2013) Toisin kun haurasmurtuma, väsymismurtuma (fatigue failure) ilmenee pikkuhiljaa ja voi viedä vuosia ennen kuin se ilmenee. Väsymismurtuma esiintyy paikoissa, jotka altistuvat suhteellisen pienille voimille toistuvasti. Toistokertoja voi olla useita kymmeniä tuhansia ennen kuin kappaleen väsymismurtuma ilmenee. Väsymismurtuman alettua se voi laajentua vuosien mittaan, kunnes sen kantokyky vähenee tasolle jossa se ei enää kestä sille kohdistettua painetta. Väsymismurtumia esiintyy rakenteiden epäjatkuvuus pisteissä, terävissä kulmissa ja niin sanotuissa ”kovissa pisteissä”. (Eyres 2007, 67)



Kuva 8. Väsymismurtuma esimerkiksi pilarissa (Emerging Engineering group www-sivut 2013)

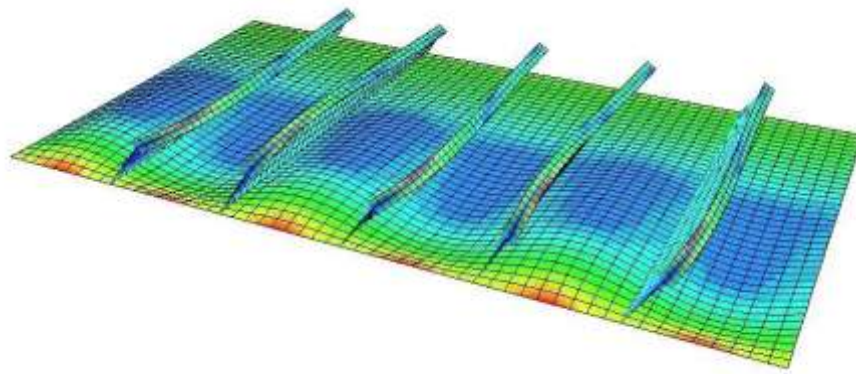
Kuvassa 8 näytetään poikkileikkauskuvaa, joka voisi olla esimerkiksi pilari. Ylimpänä on nuolella osoitettu mikroskooppisen pieni alkupiste. Keskimmäinen nuoli osoittaa hitaan etenemisen vaiheita. Viivat ovat murtuman etenemisvaiheita. Viimeinen nuoli osoittaa alueen, jolla murtuma on edennyt nopeasti ja lopulta pilari on mennyt poikki.

Kova piste on sellainen kohta rakenteessa, jossa paine ei pääse siirtymään eteenpäin vaan kohdistuu johonkin tiettyyn kohtaan, joka murtuu. Kovia pisteitä muodostuu laivan rakenteisiin esimerkiksi polvioiden ja laipoiden yhtymäkohdissa tai väärin sijoitettujen reikien ympäristössä. (Ship Structure Committee www-sivut 2013) Väsymismurtumia pystytään estämään pitämällä huolta että kappaleen geometria on kunnossa.

### 3.3 Lommahdus

Kaikki kappaleet ovat teoreettisesti suoria ja yhtäjaksoisia. Kuitenkin kaikissa kappaleissa on jonkinlaisia epäjatkuvuuskohtia. Tällaiset kohdat altistavat kappaleen lommahdukselle. Lommahdus voi saada alkunsa esimerkiksi pilarissa siihen kohdistu-

neesta kovemmassa iskusta. (Lietepohja 2013) Kun tekniikan kehittymisen myötä myös laivojen koot kasvavat, lommahdus (buckling) materiaalin heikentymismuotona on yleistynyt. Paineen alaisen kappaleen lommahdus voi ilmetä huomattavasti pienemmän paineen alla kuin mikä on kappaleen taipumisvastus. Kuormitus, jonka vaikutuksen alaisena lommahdus tapahtuu, on rakenteiden muodon ja kimmokertoimen yhteissumma, eikä niinkään suoran materiaalin vahvuudesta aiheutuvaa. Hyvä esimerkki materiaalin lommahduksesta on pilarin pettäminen puristusvoiman alaisena. Jäykistetyille levykentälle lasketaan myös oma lommahdusarvo, joka riippuu materiaalin vahvuudesta, tukemattomien alueiden mitoista, reunojen tukemisesta ja materiaalin kimmokertoimesta. Toisin kun pilari, levykenttä ei välttämättä romahda, vaan siinä voi esiintyä taipumista, joka suoristuu takaisin alkuperäiseen muotoonsa kuormituksen poistuttua. Taipunut levykenttä voi murtua, jos sen kuormitus ylittää kappaleen kestämän murtumispisteen. (Eyres 2007, 70) Erinomainen esimerkki lommahduksesta on juomatölkki, joka kestää kun ihminen seisoo päällä. Kuitenkin kun tölkin kylkeen osuu pienikin voima, se aiheuttaa lommahduksen, eikä tölkki kestä enää ihmisen massaa.

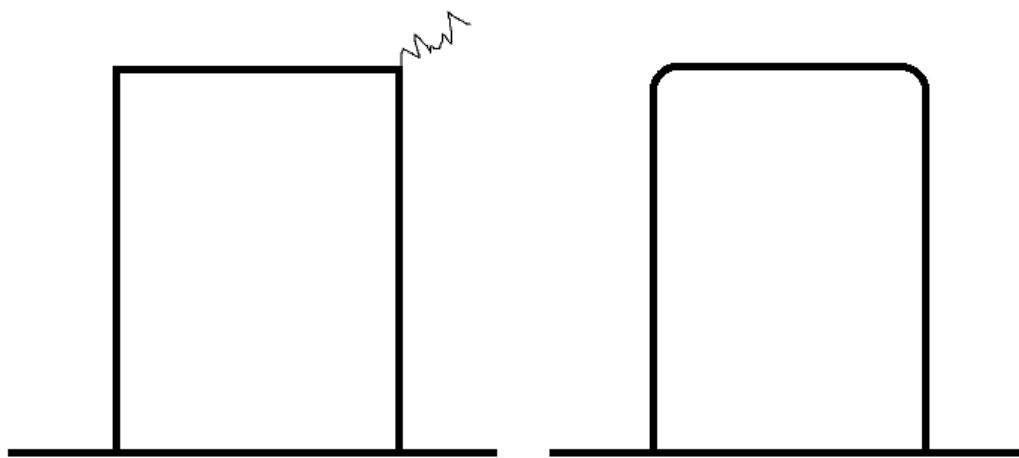


Kuva 9. Lommahtanut levykenttä (Isotalus 2013)

### 3.4 Haurasmurtuma

Haurasmurtumia esiintyy materiaalissa, joka on yleisesti ottaen elastista ja jossa harvoin näkyy epämuodostumaa ennen murtumista. Murtuma ilmestyy äkkiä, eikä laivan välttämättä tarvitse olla kovan paineen alla tuona aikana. Haurasmurtumat ovat yleisiä kohdissa jossa on teräväkulmaisia lovia tai esiintyy vetojännitystä. Terävien

kulmien välttämiseksi esimerkiksi oviaukkojen kulmat pyöristetään jollain säteellä. Paksut levykappaleet ovat alttiimpia haurasmurtumille kuin ohuet. (Eyres 2007, 67) Haurasmurtuman esiintymiseen vaikuttavat materiaalin lämpötila, materiaalivahvuus ja kuormitusnopeus. Murtuma alkaa pistemäisestä esiintymästä, joka voi olla esimerkiksi alkusärö, joka johtuu rakennevirheestä. Materiaalin haurasmurtumalujuus voidaan tarkistaa iskutkeys-kokeella. (Isotalus 2013) Haurasmurtuma johtuu yleensä kappaleen kylmä- tai kuumahauraudesta. Esimerkiksi kappale voi kuumahaurastua hitsauksen aiheuttaman kuumuuden takia. Haurasmurtumia esiintyi ennen paljon, mutta nykyään riskit ovat tiedossa ja murtumien esiintyminen harvinaista. (Lietepohja 2013)

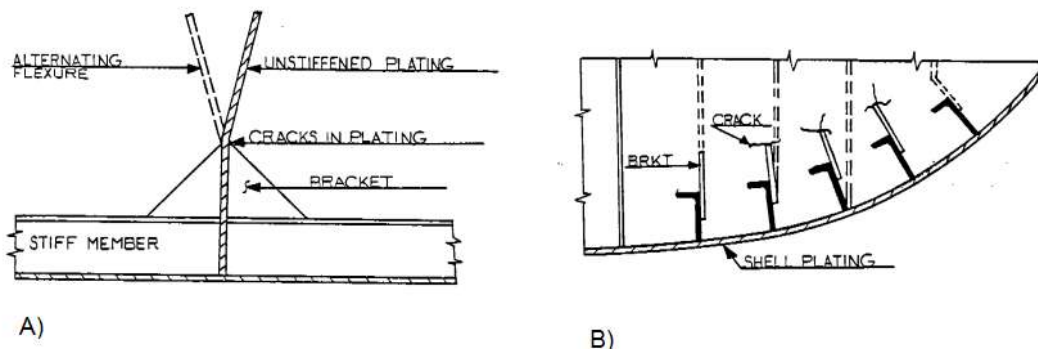


Kuva 10. Esimerkki haurasmurtuman välttämisestä oviaukon kulmat pyöristämällä

#### 4 KOVAT PISTEET

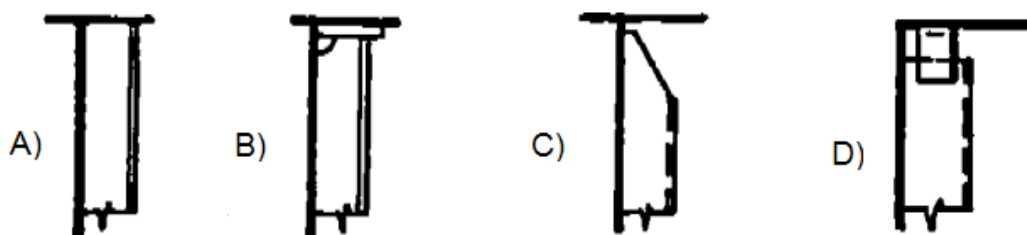
Kovia pisteitä esiintyy pääosin materiaalien epäjatkuvuuskohdissa. Piste syntyy jos kappaleeseen vaikuttava voima ei pääse siirtymään rakenteiden kautta eteenpäin, vaan voima kohdistuu johonkin pisteeseen. Epäjatkuvuuskohtia muodostavat muun muassa rakenteissa olevat aukot ja tukirakenteiden aiheuttamat kovat pisteet kuten kuvassa 11 kohta A, jossa polviot tukevat laipiota, mutta vain tiettyyn pisteeseen asti. Tämän pisteen yläpuolella laipio pääsee taipumaan ja polvion ylänurkkaan muodostuu kova piste. Rakenteiden epäjatkuvuuskohdat aiheuttavat myös kovia pisteitä, kuva 11 kohta B. Kuvassa laidan jäykistäjiä on tuettu polvioilla, jotka kuitenkin päätty-

vät paneelin pinnalla. Laidan jäykkäjästä siirtyvä voima ei pääse siirtymään eteenpäin vaan aiheuttaa kovan pisteen.



Kuva 11. Esimerkkejä kovista pisteistä rakenteissa (Shipstructure www-sivut 2013)

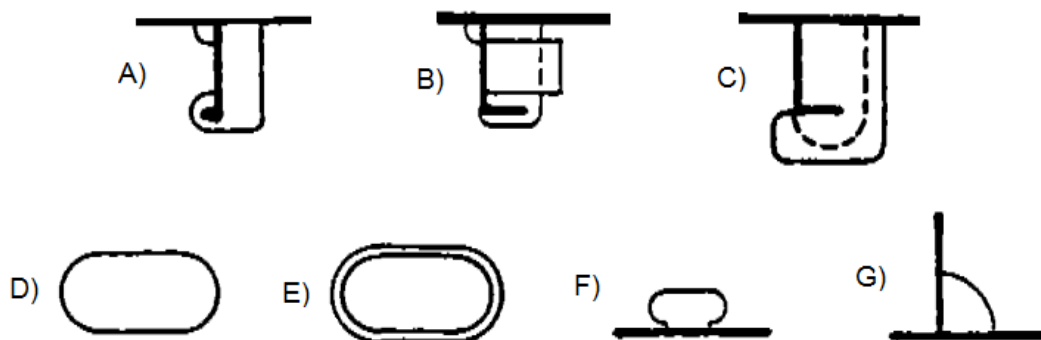
Rakenteiden päättymiskohtia ovat palkkien ja jäykistäjien päät. Tällaisissa tapauksissa syntyy kova piste, jos päitä ei ole tuettu tai kappaleen päätä ei ole suunniteltu jakamaan voimia eteenpäin. Jos palkin pää loppuu ”ilmaan”, siihen lisätään usein polvio, joka yhdistää palkin pään seuraavaan rakenteeseen. Jäykistäjiä on monen tyyppisiä, joita lisätietoa löytyy kappaleesta 7.2. Jäykistäjien pää voi olla suoraan yhteydessä seuraavaan levyyn (A) tai se voidaan muokata kestävämmän voimia paremmin esimerkiksi laittamalla tukilevy jäykistäjän pään ja päässä olevan levyn väliin (B). Muita vaihtoehtoja on pään muodon muuntaminen viistoksi tai ylimääräisen kiinnityspannan lisääminen rakenteeseen (D). (Shipstructure Committee www-sivut 2013)



Kuva 12. Jäykistäjien kovien pisteiden välttäminen (Ship Structure Committee www-sivut 2013)

Rakenteisiin tehdään valmistusvaiheessa kahden tyyppisiä aukkoja, jotka mahdollistavat ihmisten ja aineiden kulkemisen tilasta toiseen tai antavat tilaa hitsaussaumoille tai risteäville rakenteille. Risteäviä rakenteita ovat erilaiset tukirakenteet, kuten palkit ja jäykisteet. Erilaisista jäykisteistä kerrotaan kappaleessa 7. Ihmisiä varten tehtyjä

aukkoja ovat esimerkiksi ovet, ikkunat ja miesluukut. Muita reikiä rakenteessa ovat rakenteiden keventämiseksi tehdyt aukot, vedenpoistoa varten tehdyt aukot ja esimerkiksi levyjen kulmien pyöristykset, että hitsausseama mahtuu väliin. Lisäksi rakenteisiin tehdään reikiä putkille ja sähköjohdoille. Aukot voidaan tukea jättämällä ne avonaisiksi tai sulkemalla ne kauluslaatoilla. Ei-tiiviit kauluslaatat tukevat lävistettyä levyä. Tiiviit kauluslaatat tekevät lävistetystä levystä vesitiiviin, jos on kyseessä esimerkiksi vesitankki. Kauluksia voidaan tehdä myös esimerkiksi miesluukkuihin, jos ne sijaitsevat rakenteellisesti kriittisellä alueella, jossa on esimerkiksi paljon tärinää. Aukkoihin ei pääse muodostumaan kovia pisteitä, jos vältetään muita reikiä läpivientien lähellä ja jäykistäjät on asianmukaisesti tuettu leikkausvoimia vastaan. Aukkojen reunat pyöristetään aina, ettei kulmiin pääse muodostumaan kovia pisteitä. (Ship Structure Committee www-sivut 2013)



Kuva 13. Aukot rakenteessa (Ship Structure Committee www-sivut 2013)

- A) Avonainen reikä risteävälle rakenteelle
- B) Kauluslaatta risteävän rakenteen aukossa
- C) Vesitiivis kauluslaatta risteävän rakenteen aukossa
- D) Miesluukku
- E) Miesluukku, jossa rakennetta tukeva kaulus
- F) Aukko valumisvesiä varten
- G) Paneelin kulman pyöristys

Kolmas epäjatkuvuuskohta ovat polviot ja jäykisteet, joita lisätään rakenteisiin antamaan tukea isommille rakenteille. Polvioiden lisäksi muita tukirakenteita ovat jäykisteet, joilla jäykistetään paneelit kovan rasituksen alla olevissa kohdissa. Tukiraken-

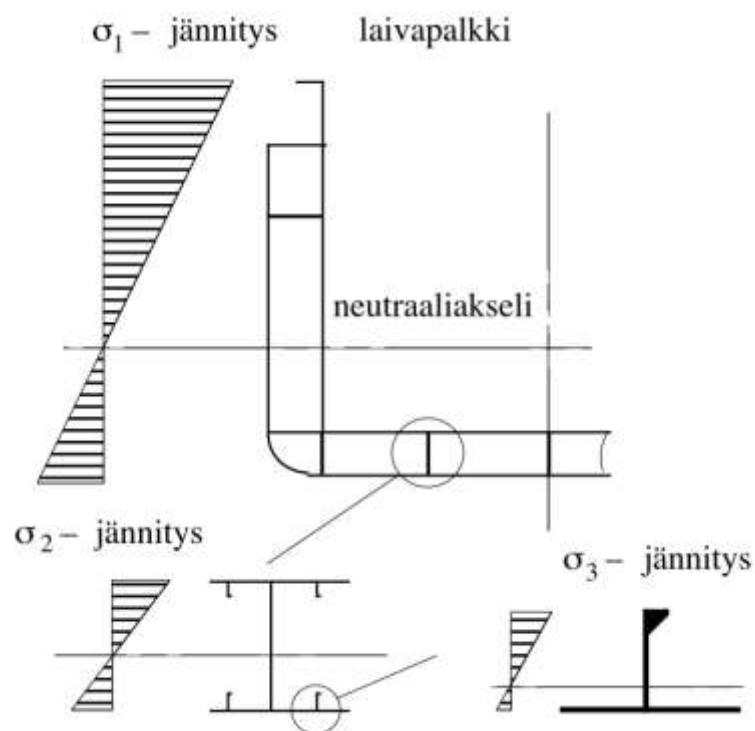
teista kerrotaan tarkemmin kappaleessa 8. (Ship Structure Committee www-sivut 2013)

Muita epäjatkuvuuskohtia ovat muun muassa kohdat reelingissä, jossa laidan ja kannen rakenteet kohtaavat.

Kovat pisteet voidaan luokitella 12 ryhmään, sen mukaan missä ne esiintyvät. Kuvat ryhmistä löytyvät liitteestä 2.

## 5 LAIVAN RAKENTEIDEN LUOKITTELU

Kun laivaa mitoitetaan, sen rakenne jaetaan kolmeen ryhmään, lujuuslaskennallisen tärkeyden mukaan.



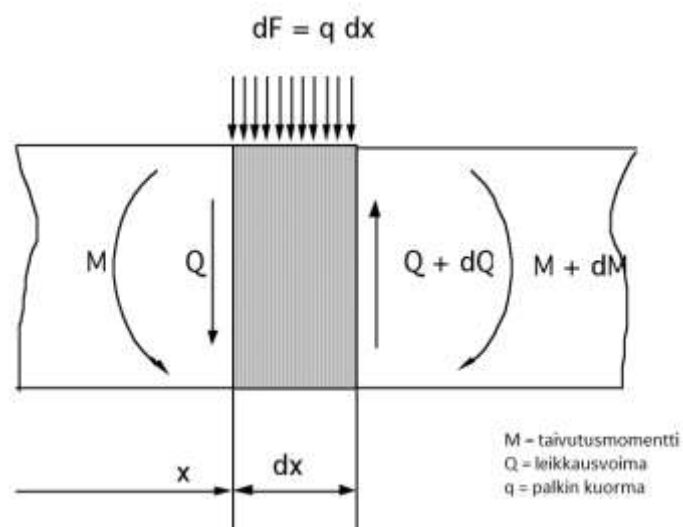
Kuva 14. Laivan rakennehierarkia (Varsta)



## 5.1 Primääriset rakenteet

Laivan primäärinen rakenne on laivapalkki (shipbeam). Rakenne on primäärinen siksi, että jos se vaurioituu kokonaisuutena, se on laivan kannalta katastrofi. (Lietepohja 2013) Primäärinen rakenne koostuu päärakenne-elementeistä, joita ovat sivu- ja pohjalaidoitus, kannet, mukaan lukien laivapalkin lujuskansi sekä poikittaiset ja pitkittäiset laipiot. Primääristä rakennetta kuormittaa laivan oma paino, uppouman nostovoima ja aallot. (Varsta)

Laivapalkki nimitys tulee siitä, että laivan lujuuslaskentaa tehtäessä laiva nähdään suorakaiteen muotoisena palkkina. Näin eri voimien vaikutukset on helppo havainnollistaa vaikutuksina palkkiin. Palkkiteorian mukaan poikkileikkaustasot säilyvät tasoina ja poikkileikkauksen rakenne-elementtien suhteellinen venymä on verrannollinen sen etäisyyteen neutraaliakselista, jossa venymä on nolla. Laivapalkin rakenteet muodostavat suljettuja osastoja. Suljettujen osastojen avulla pystytään rajaamaan onnettomuuksien vaikutukset kuten tulipalon tai veden eteneminen laivan poikki.



Kuva 15. Laivapalkki (Varsta)

## 5.2 Sekundääriset rakenteet

Sekundääriset rakenteet muodostuvat laivan kaarijärjestelmästä ja kaksoispohjasta. Laivan runko perustuu pitkittäiselle tai poikittaiselle kaarijärjestelmälle. Kun aluksen pituus ylittää 120 metriä, laivaan suositellaan pitkittäistä kaarijärjestelmää. Pitkittäi-

nen kaarijärjestelmä laskee kaaret alkaen roottorin akselista plus- ja miinus kaarina. Pluskaaret etenevät kohti keulaa ja miinuskaaret kohti perälaipiota. (Aalto yliopiston Noppa-portaalin www-sivut 2013)

Lopun sekundäärisistä rakenteista muodostaa kaksoispohja. Kaksoispohja vaaditaan nykyään kaikissa uusissa laivoissa. Kaksoispohjan minimikorkeus määrittyy luokituslaitoksen mukaan. Korkeus voi kuitenkin olla suurempi, jos kaksoispohjan väliin on tarkoitus sijoittaa tankkeja esimerkiksi pilssivesiä varten. (Eyres 2007, 163)

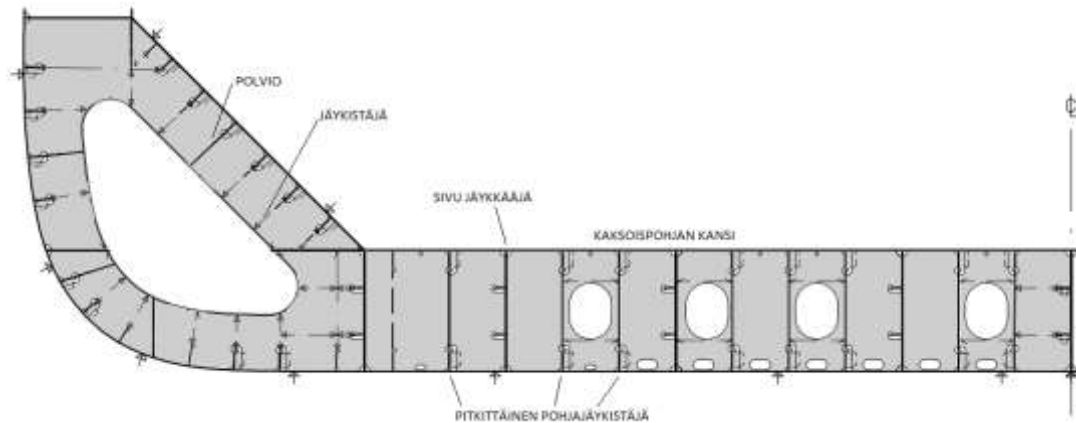
### 5.3 Tertiäriset rakenteet

Lujuuslaskennallisesti kolmannen rakenneryhmän muodostavat jäykistetyt levykentät. Tällaisia ovat mm. laipiot ja kannet. Tertiäriset rakenteet voidaan jäykistää kahdella tapaa, erillisillä jäykisteillä tai poimuttamalla teräkseen jäykistäviä muotoja.

## 6 ESIMERKKIRAKENTEITA

### 6.1 Kaksoispohja

Kaksoispohja koostuu pitkittäisestä tai poikittaisesta kaarijärjestelmästä. Irtolasialuksissa on pitkittäinen kaarijärjestelmä, paitsi konehuoneessa johon tehdään poikittainen kaarijärjestelmä lisätuen aikaansaamiseksi. Bulkkerin kaksoispohjaan sijoitetaan suuri osa laivan pilssivesitankeista ja putket kulkevat kaksoispohjaan jäävän tyhjää tilaa hyödyntäen kaksoispohjan välissä. Kaksoispohjan levyihin laitetaan vahvat jäykisteet johtuen massasta, jota tuetaan. Kaksoispohja on nykyään pakollinen turvallisuussyistä. Pohja muodostaa suljettuja tankkeja, joten vaikka laita tai pohja vaurioituisi, kaksoispohjan tankit voivat täyttyä ilman että merivesi pääsee laivan sisempiin rakenteisiin. (Eyres 2007, 163)



Kuva 16. Kaksoispohjan rakenne

## 6.2 Laipio

Laipioiksi kutsutaan laivan rakenteissa olevia seiniä. Laipiot voivat olla joko pitkittäin tai poikittain laivan rakenteissa. Poikittaiset laipiot sijaitsevat aina suoraan kaarien kohdalla ja näistä tärkeimpiä ovat peräsoppi-, konehuoneen keula- ja keulasoppilaipio. Tärkeimpien laipioiden sijoittelu riippuu laivan pituudesta ja konehuoneen keulalaipion osalta koneiden teho. Keulasoppilaipiota kutsutaan myös yhteentörmäyslaipioksi, ja sen paikka on määritelty tarkasti luokituslaitoksen säännöissä. Luokituslaitos määrää myös kaarille sijoittuvien laipioiden yhteismäärän. Esimerkki laivan tapauksessa poikittaisia laipioita on 6. (Alanko 2007, VII-5)

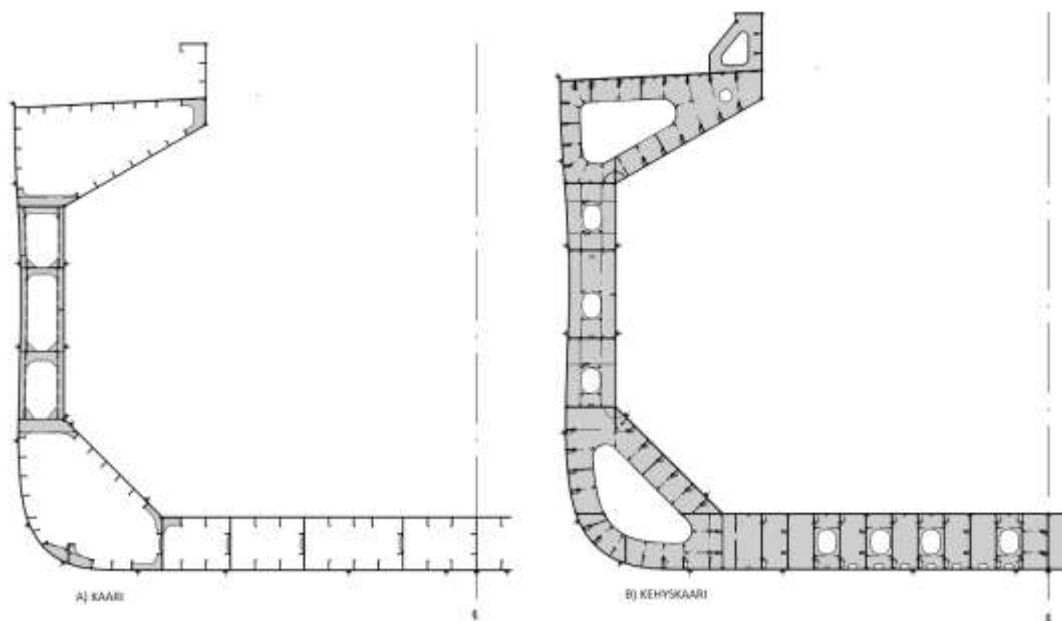
Laipioita rakennetaan laivaan irtolastialusten tapauksessa tankkien, lastiruumien ja muiden tilojen seiniksi. Laipion vahvuus määrittyy sen sijoituspaikan mukaan. Kansimökissä laipioiden vahvuudet ovat huomattavasti ohuempia kuin esimerkiksi laivan keulan keulasoppilaipio. Laipio voi olla tasainen levy, johon lisätään jäykisteitä tai se voidaan poimuttaa. Poimutuksesta lisää kappaleessa 8.3.

## 6.3 Kaari

Laivassa käytetään joko poikittaista tai pitkittäistä kaarijärjestelmää. Kaikissa laivoissa on yleensä poikittaiset kaaret perässä ja keulassa. Lyhyissä laivoissa käytetään poikittaista kaarijärjestelmää kautta laivan, mutta pitkissä laivoissa käytetään pitkittä-

täistä kaarijärjestelmää. Poikittainen kaari tarkoittaa että kaaren rakenteet sijoittuu x-akselin suuntaisille tasoille. Pitkittäisessä kaarijärjestelmässä kaaret sijoittuvat y-akselin suuntaiseen tasoon. Pitkittäisessä järjestelmässä 0-kaari on peräperpendikkelin kohdalla. Kaarten numerointi kasvaa kohti keulaa. Peräperpendikkelistä katsoen laivan perällä olevat kaaret ovat negatiivisia. Käsitellyssä esimerkissä, B.Delta37 -laivassa, on yli 200 kaarta. Kaarien merkitseminen kuviin tapahtuu niin sanotun ”kaaritikon”, johon on numeroitu joka viides kaari. ”Kaaritikku” sijoitetaan kaikkiin kuviin, josta kaaret näkyvät, esimerkkeinä kansien ja pitkittäisten leikkausten kuvat.

u Laivan kaarien välinen etäisyys riippuu käsiteltävän aluksen pituudesta, pienillä aluksilla etäisyys voi olla 600-700mm, kun taas isoilla laivoilla sama mitta voi olla 900-1000mm. Esimerkkialuksessamme kaariväli on noin 800mm. Laivan kaaret jaetaan kahden tyyppisiin kaariin, tavallisiin ja kehyskaariin. Kehyskaarten tehtävä on siirtää voimien aiheuttamat kuormat levykentästä kansiin ja laipioihin. Keskimäärin kehyskaaria on kaikista kaarista noin joka kolmas. (Alanko, J. 2007)

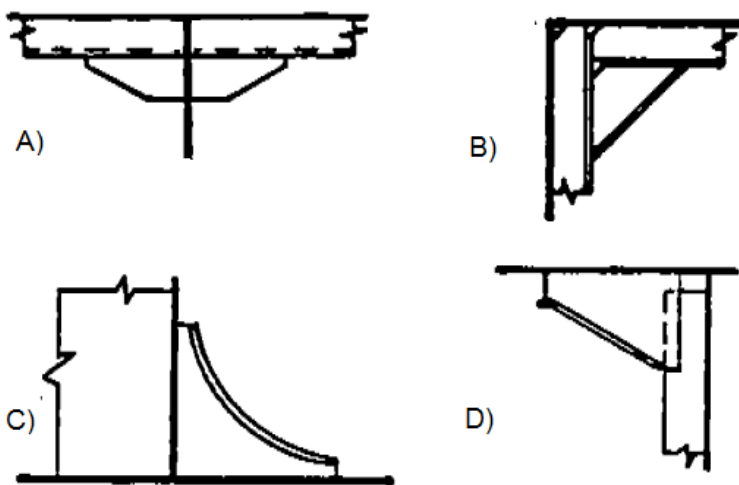


Kuva 17. Kaari vs. kehyskaari

## 7 JÄYKISTYSMENETELMÄT

### 7.1 Polviot

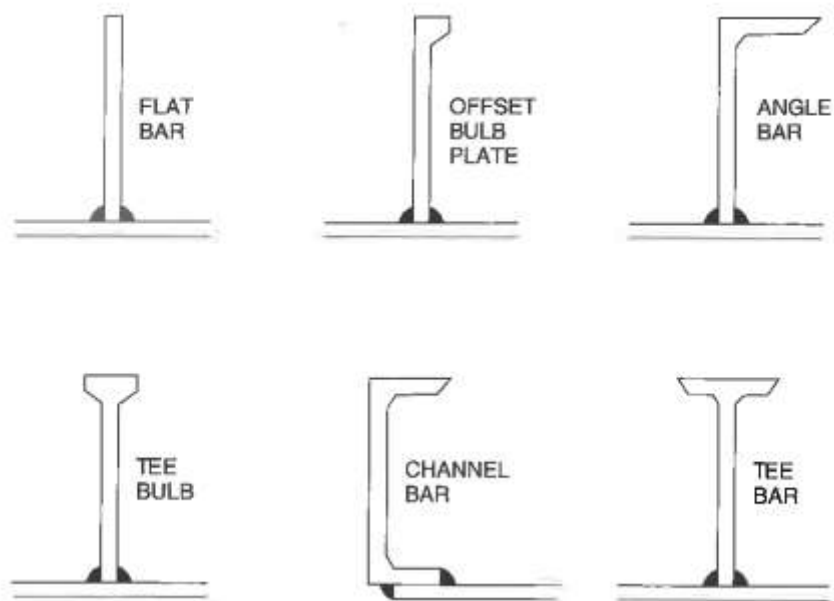
Polvioita sijoitetaan rakenteisiin kahdenlaisissa tarkoituksissa. Ensimmäinen on palkkien tukirakenteet. Palkkeihin tulevat polviot voidaan edelleen jakaa neljään ryhmään sen mukaan mihin ne sijoitetaan. Ensimmäinen ryhmä ovat rakenteellisesti jatkuvat kohdat (A), jossa rakenne jatkuu yhtäläisenä, mutta joudutaan katkaisemaan esimerkiksi risteävän rakenteen takia. Toinen on suorakulma (B), esimerkiksi kahden palkin tai palkin ja laipion välinen kulma, johon tarvitaan joko suora tai kaareva reunainen tukirakenne. Luukkujen reunoihin tarvitaan myös polvioita (C). Viimeinen polvioiden sijoituspaikka on palkkien päät (D). Toinen polviotyyppi, englanniksi tripping bracket, sijoitetaan rakenteeseen ehkäisemään lommahduksia tai rakenteiden kaatumista. (Ship Structure Committee www-sivut 2013)



Kuva 18. Polviot (Ship Structure Committee www-sivut 2013)

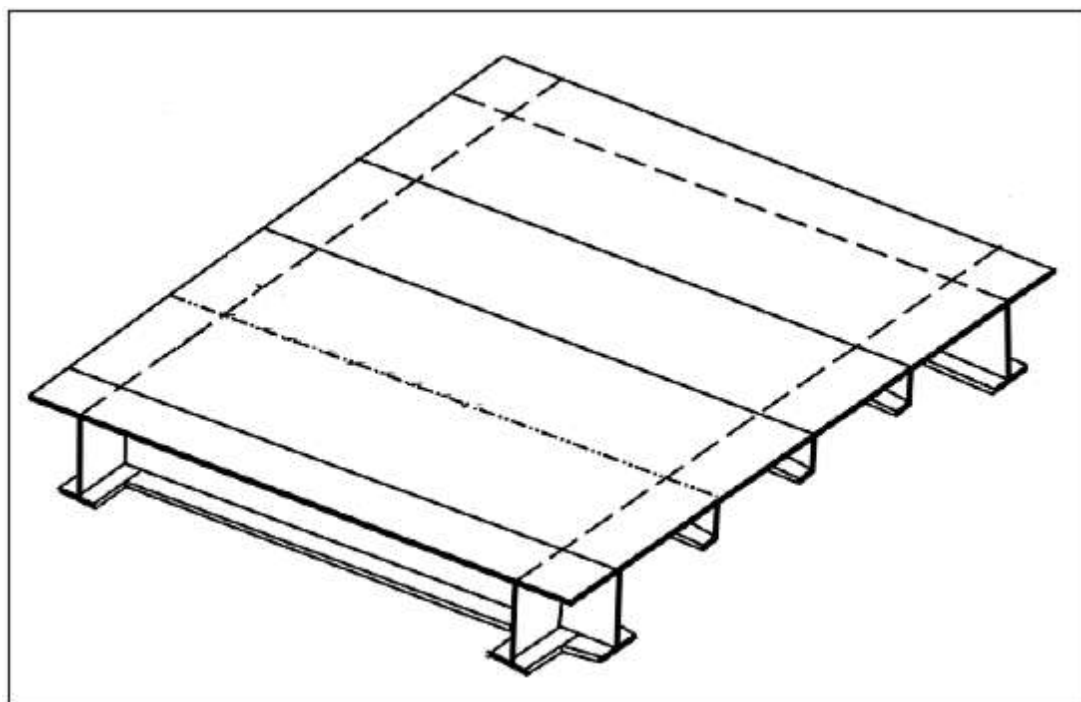
### 7.2 Muotoprofiilit

Muotoprofiileita laivassa ovat erilaiset jäykisteet. Yleisimpiä profiileita ovat latta-rauta (flat bar), bulbirauta (offset bulb plate) ja t-palkki (tee bar). Profiilin malli valitaan aina käyttökohteen mukaan. Muotoprofiileilla saadaan vältettyä kovien pisteiden muodostumista ja niiden avulla pystytään vähentämään laipioiden lommahtamista.



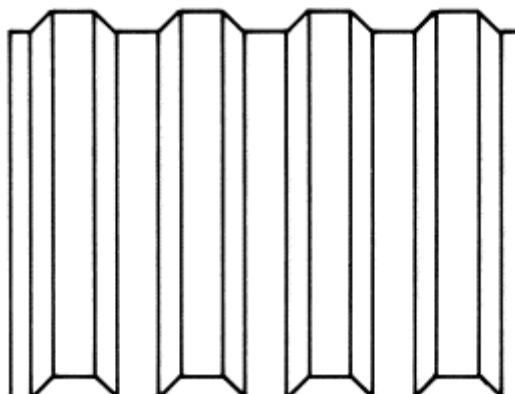
Kuva 19. Muotoprofiilit (Eyres 2007, 46)

Alla olevasta kuvasta nähdään tyypillinen muotoprofiileiden käyttökohde. Kyseessä on pieni osa kantta tai laipiota, joka on tuettu tässä tapauksessa kahdenlaisilla profiileilla. Tasaisin välimatkoin sijoitetaan tukevampaa profiilia, tässä tapauksessa t-palkkia, jota on kappaleen reunoilla ja näiden väliin laitetaan kevyempää bulbirautaa.



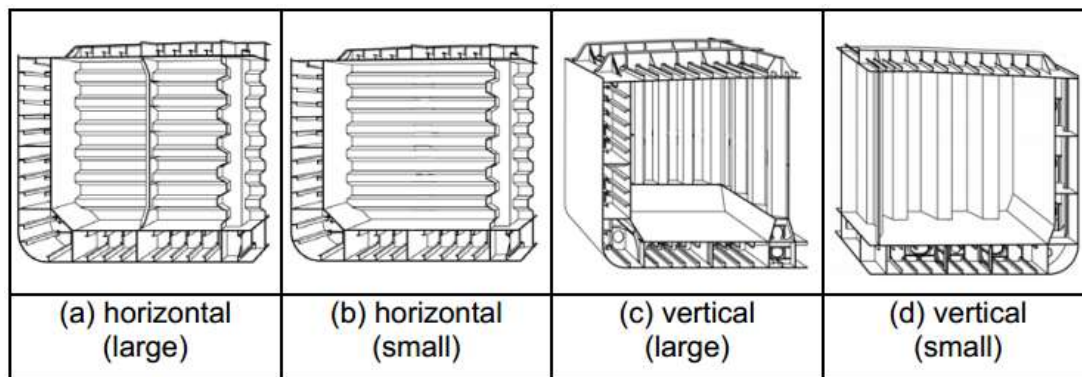
Kuva 20. Tuettu laipio

### 7.3 Poimutus



Kuva 21. Poimutettu laipio

Poimutettu laipio (corrugated bulkhead) on yksi tapa tehdä alukseen laipioita. Kun laipio poimutetaan alla olevan kuvan mallin mukaisesti, siihen ei tarvitse lisätä jäykistäjiä, vaan poimutus tekee rakenteesta tukevan. Poimutetut laipiot voidaan jakaa karkeasti vaaka- ja pystysuoraan poimutettuihin laipioihin. Kun poimutetun laipion kasvaa isoissa aluksissa, voidaan laipion tueksi tehdä pystysuoria tukirakenteita. Tämä vähentää vaakasuoraan poimutetun laipion taipumista. Poimutus tuo rakenteisiin omat haasteensa. Tasainen laipio voidaan tukea yksinkertaisilla polvioilla, eikä se tarvitse erityistä tukea ala- tai yläpuolella oleviin rakenteisiin. Poimutettu laipio aiheuttaa risteäviin rakenteisiin erilaisia kovia pisteitä kun poimutuksen nurkkiin pääsee syntymään kovia pisteitä. Tällainen laipio tarvitsee siis tuekseen paksumpaa levyä tai lisäpolvioita, voimien vaikutusten ennaltaehkäisemiseksi. (Ipen www-sivut viitattu 29.11.2013)



Kuva 22. Vaihtoehtoisia malleja poimutetun laipion käytöstä (Ipen www-sivut Viitattu 29.11.2013)

## 8 LUJUUSANALYYSI

Lujuusanalyysi perustuu lujuusoppiin. ”Lujuusopissa pyritään selvittämään:

- Kappaleeseen vaikuttavien kuormien aiheuttamat muodonmuutosten ja jännitysten jakautumat kappaleessa
- Muodonmuutosten ja jännitysten väliset yhteydet
- Ne kuormitukset jota kappale kestää” (Pennala, E. 2004, 9) Lujuusopin perusteet Otatieto Oy 1994)

### 8.1 Sääntöpohjainen laskenta

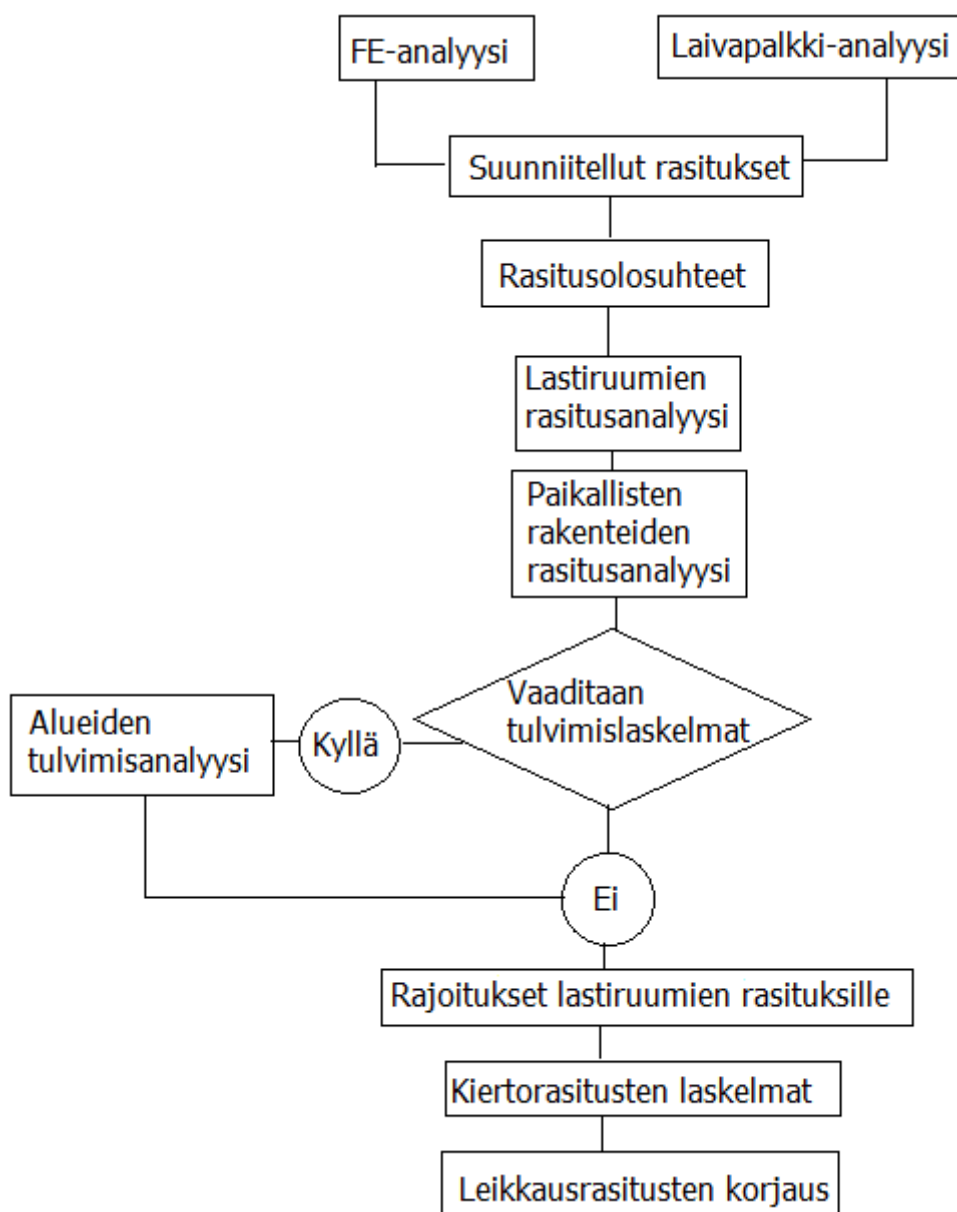
#### 8.1.1 Yleistä

Kun työskennellään yhteistyössä luokituslaitoksen kanssa, kaikkiin mittoihin ja laskelmiin löytyy tarkat määritelmät joita tulee noudattaa. Sääntöpohjainen laskenta perustuu sen luokituslaitoksen sääntöihin, jonka kanssa kyseinen projekti toteutetaan. Tästä syystä jokainen projekti on erilainen. Säännöt riippuvat myös laivan mallista ja tulevasta operointialueesta. Luokituslaitoksen säännöt määrittelevät muun muassa eri alueille minimiarvot levyjen paksuuksille ja näiden pakolliset korroosiovarat. Luokituslaitoksen laskennat perustuvat tarkoille ohjeille, joista ainakin osa löytyy internetistä.



Luokituslaitoksen laskentamallit perustuvat yleisille malleille laivan rakenteiden rasituksesta erilaisissa lastitilanteissa. Erilaisia lastitilanteita ovat esimerkiksi se ovatko eri tankit täynnä vai tyhjiä. Mallit perustuvat aluksen suunnitellulle kuormaukselle ja sen vaikutuksille laivan rakenteisiin.

### 8.1.2 Esimerkki rungon vahvuuden laskennasta



Kuva 23. Luokituslaitoksen laskentavaiheet (Exchange DNV www-sivut 2013)

Kuvasta 23 nähdään erään luokituslaitoksen malli siitä mitä vaiheita laskennassa voidaan toteuttaa, vaiheiden valinta riippuu toteutettavasta laskentamallista. Kuva on lainattu luokituslaitoksen yleisistä ohjeista irtolastialuksen rungon lujuusanalyysille. Kyseisessä kohdassa on käsitelty siis vain rungon lujuusanalyysi. Jokaiselle laivan alueelle löytyy omat ohjeistuksensa. Kohdassa kaksi käsitellään suunnitelmien mukaiset rasitukset. Kolmas kohta käsittelee erilaisia tilanteita tankkien täytön osalta. Ratkaisevaa on minkälaiset voimat alukseen kohdistuvat jos tietyllä alueella on kaikki tankit täynnä ja toisella alueella vain esimerkiksi pilssivesi tankit. Kohta neljä käsittelee lastiruumien alueen rasituksia. Viidennessä kohdassa käsitellään paikallisia rasituksia ja niiden vaikutuksia. Kohdassa kuusi käsitellään tulvimistilanteita, esimerkiksi silloin kun laivan laita tai kaksoispohja pääsee vaurioitumaan. Kohta seitsemän määrittelee lastiruumien lastaus rajat, määrittellen sen kuinka paljon mihinkin ruumaan voi lastia laittaa. Kahdeksas kappale käsittelee vääntövoimien vaikutusta laivan runkoon. Viimeinen kohta koskee leikkausvoimia ja niiden vaikutuksia. (Exchange DNV www-sivut 2013)

## 8.2 Elementtimenetelmä

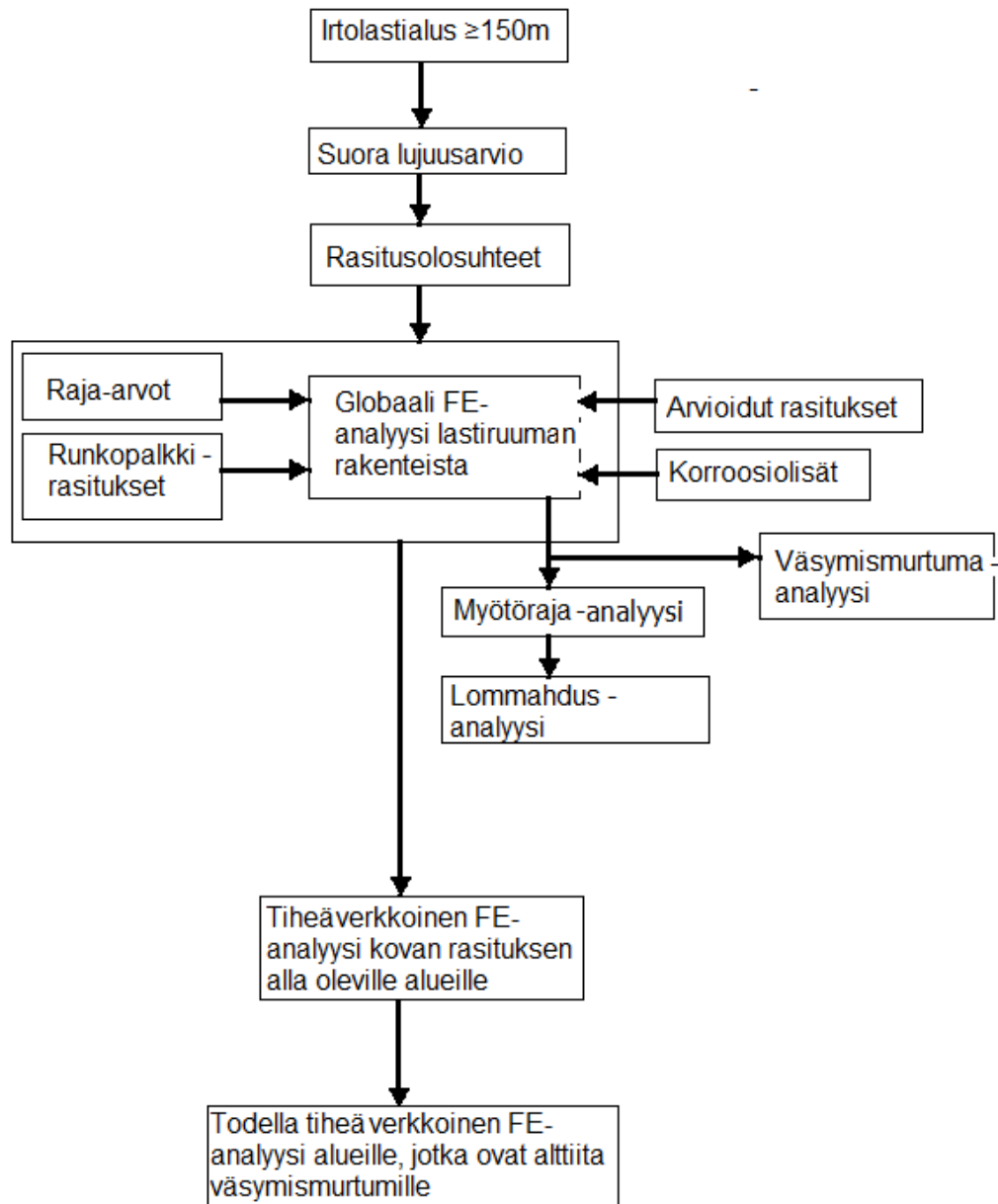
### 8.2.1 Mallista

FEM, eli Finite Element method, on simuloitu malli todellisesta tilanteesta, joka perustuu elementtiverkkoon. Verkon voi laatia kokonaisesta laivasta tai esimerkiksi yhdestä laipiosta tai jäykkääjästä. Menetelmällä käsiteltävät olemassa olevat kappaleet jaetaan pienempiin osiin, elementteihin. Elementtiverkko muistuttaa ruudukkoa, jossa elementtien väleihin muodostuu solmukohtia. Elementtejä tarkastelemalla saadaan tarkempaa tietoa tietyn kohdan käyttäytymistä rasitustilanteessa. Elementtiverkkoja on kahden tasoisia, koko laivan kattava harvempi verkko ja paikallistason tiheämpiä verkkoja. Koko laivan mallin avulla määritetään muun muassa laivapalkin pitkittäislujuus ja voimien kulkeutuminen laivan rakenteissa. Paikallisesti kohdenne- tuissa malleissa tarkastellaan tiettyjen rakenteiden kriittisiä kuormituksia. (Puurula 2009)

FE-malli perustuu laivasta tehtävään malliin, joka sisältää oleellimmat rakenteet ja niissä olevat aukot. FE-analyysi tulee suorittaa kaikille aluksille, joilla on yli 150 metriä pituutta. On olemassa kolmentasoista FEM-laskentaa. Ensimmäinen on globaalin tason analyysi, joka analysoi globaalia kestävyyttä primäärisissä tukevissa rakenteissa. Toinen taso on paikallisen tason analyysi, joka suoritetaan alueilla joilla on yksinkertaisella verkolla. Kovien pisteiden analyysi on FE-menetelmän kolmas taso, jolla lasketaan rasituksia ja rasitusten keskittymispisteitä tarkalla verkolla. Kovien pisteiden analyysin avulla tarkastellaan mm. väsymiskestävyyttä. (Veristar www-sivut viitattu 5.11.2013, s.323)

### 8.2.2 Mallin luominen ja käyttö

Kuvassa 24 on esitetty FE-menetelmän vaiheet. Kaiken lähtökohtana on yli 150m pitkä irtolastialus, johon tehdään ensimmäisenä suora lujuusarvio. Rasitusolosuhteet tulee ottaa huomioon analyysiä tehdessä, sillä laivan kulkureittien sää- ja jääolosuhteet vaikuttavat laivan rakenteisiin tarvittavaan lujuuteen huomattavasti. Globaalin analyysin lähtökohtana ovat erilaiset raja-arvot ja runkopalkin arvioidut rasitukset kuolleesta painosta ja muista vaikuttavista voimista. Globaalin analyysin lisäksi suoritetaan tiheämpiverkkoiset paikalliset FE-analyysit niillä alueilla, joilla on suuremmat rasitukset.



Kuva 24. FE -mallin vaiheet

Elementtimenetelmää voidaan käyttää viiva- ja pintarakenteiden lujuusanalyysiin. Viivarakenteissa elementtiverkko muodostuu viivoista ja niiden välisistä solmukohtista kun taas pintarakenteet malli rakentuu joko neli- tai kolmikulmaisista elementeistä, mallinnettavan alueen mukaan.

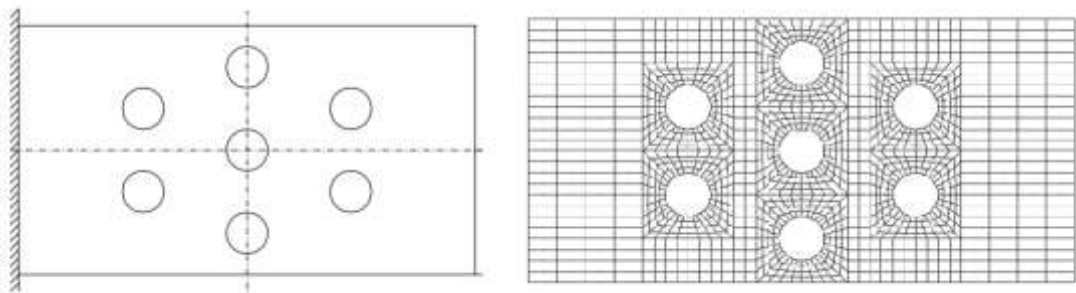
Alla olevassa kuvassa 25 on vasemmalla mallinnettu tuettu taso ja sen kiinnityspisteet. Oikealla on samasta kuvasta tehty elementtimalli, jossa viivat kuvaavat elementtejä ja pisteet solmukohtia. Mitä tarkempi malli kappaleesta halutaan, sitä tiheäm-

pään sijoitellaan solmukohtia. Minimimäärä solmukohtia saadaan sijoittamalla solmut vain kappaleiden päättymispisteisiin. (Digma www-sivut. Viitattu 6.11.2013) Kuvan esimerkissä täytyy siis olla minimissään 12 solmukohtaa, kaksi jokaista kuutta kappaletta kohden.



Kuva 25. Viivarakenne (Digma www-sivut. Viitattu 6.11.2013)

Alla oleva vasemmanpuoleinen kuva näyttää vasemmalta sivultaan kiinnitettyä pintaa, jossa on ympyrän muotoisia aukkoja. Oikealla on samasta pinnasta tehty elementtiverkosto. Verkostossa on käytetty neliskanttisia elementtejä ja verkko on tiheämpi reikien ympäristössä. Aukot muodostavat pintaan lovivaikutuksen, jolloin siihen tulee ehjää pintaa suurempi normaalijännitys. Elementtiverkoston solmupisteet ovat elementtien kulmissa. (Digma www-sivut. Viitattu 6.11.2013)

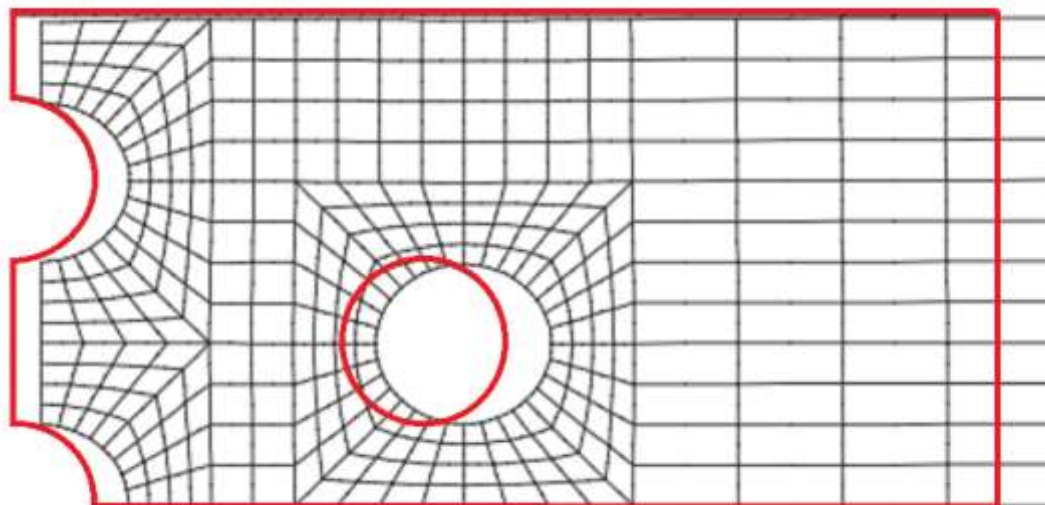


Kuva 26. Pintarakenne (Digma www-sivut. Viitattu 6.11.2013)

### 8.2.3 Tulokset

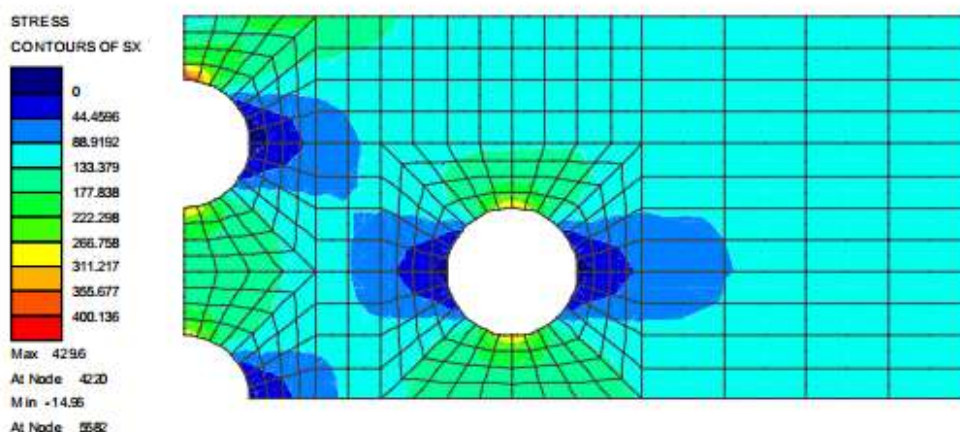
FE-mallin tulokset ovat solmukohtien siirtymät ja elementtien rasituskuvat. Kuva 27 on suurennettu kuva tasopinnan keskilinjan oikealta puolelta. Siinä nähdään kuinka rasitus on aiheuttanut kappaleen solmukohtiin siirtymiä. Alkuperäisen muodon ulko-reunat näkyvät kuvassa punaisella, kun taas rasittunut muoto on harmaalla. Vasemmassa reunassa oleva aukko on hyvä esimerkki muodonmuutoksesta, alkuperäinen muoto oli ympyrä, kun taas rasittuneen kappaleen aukko on elliptinen. Keskellä oleva ympyrä on muuttanut paikkaansa huomattavasti rasituksen alaisena. Koska kysei-

nen kappale on kiinnitetty vain vasemmasta reunasta, rasituksen vaikutukset kasvavat mitä kauemmas kiinnityskohdasta edetään.



Kuva 27. Siirtymä (Digma www-sivut. Viitattu 6.11.2013)

Kuvassa 28 on esitetty levyyn kohdistuneet rasitukset. Keltaisen ja punaiset sävyt osoittavat kohtia, joihin rasitus vaikuttaa eniten. Sinisen sävyt taas ovat kohtia johon rasitus ei vaikuta yhtä merkittävästi. Värisävyt auttavat hahmottamaan rasituksen vaikutuksia ja tukevat rakenteet voidaan suunnitella tukeman kriittisiä kohtia rakenteissa.

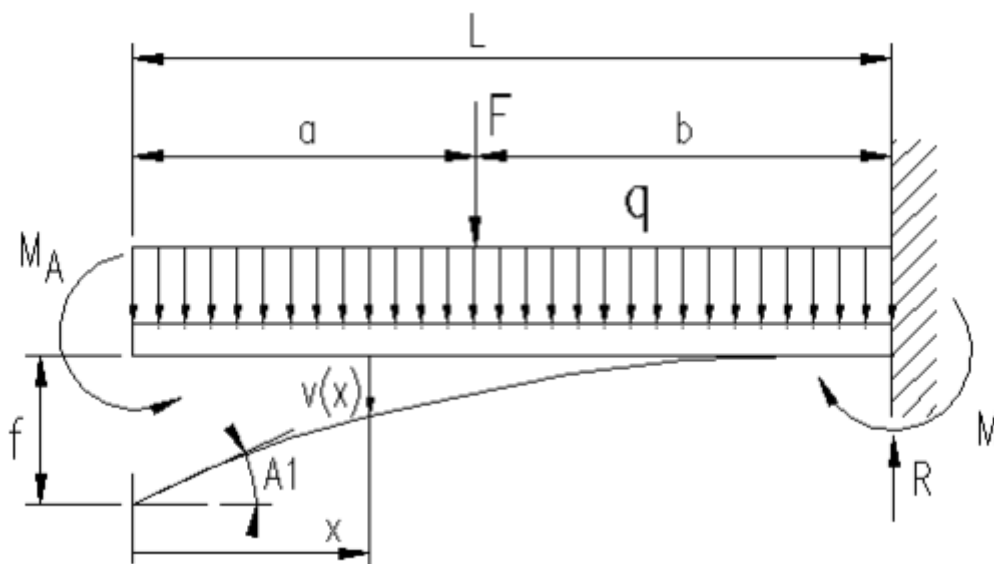


Kuva 28. Jännitysten tasa-arvokäyrästä (Digma www-sivut. Viitattu 6.11.2013)

### 8.3 Käsinlaskenta

Käsinlaskenta tapahtuu nimensä mukaisesti käsin, perinteisesti kynän ja paperin avulla. Laskentamenetelmä on hidas ja työläs työmenetelmä, mutta ennen nykyisen muotoisten tietokoneohjelmien kehittämistä se oli ainoa tapa laskea jännityksiä. Laskentatapa perustuu siihen, että jokaista kappaletta käsitellään palkkiteorian kautta. Laskennan edellytyksenä on että tiedetään kuinka kappale on kiinnittynyt ympäristöönsä, ja laivan tapauksessa kappale voi olla joko kiinnittynyt molemmista päistä, tai vain toisesta päästä. Toinen edellytys laskennalle on että tiedetään millaiset voimat vaikuttavat kappaleeseen, millä etäisyydellä kappaleen kiinnityspisteistä ja kuinka suurella voimalla. Laskentatapaa pystyy käyttämään kuka vaan, sillä se noudattaa momenttilaskennan perusteita.

Alla olevassa kuvassa on näytetty toisesta päästä tuettu palkkirakenne. Käsinlaskentaa helpottaa, kun tilanteesta tekee havainne kuvan kuten alla oleva. Tällainen rakenne laivassa voisi olla esimerkiksi kansimökin ympäri tehtävät parvekkeet. Parvekkeiden tukemiseksi suoran levyn alle rakennetaan jäykistäjiä ja polvioita tukemaan rakennetta.



Kuva 29. Yhdestä päästä kiinnitetyn kappaleen malli (Lamek Finland Oy [www-sivut](http://www.lamek.fi). Viitattu 21.11.2013)

	Yleinen malli	Laivan parveke
L	Kappaleen kokonaispituus	Parvekkeen leveys
F	Pistevoima	Esim. parvekkeen reunassa oleva kaide
q	Tasainen kuorma	Parvekkeen muodostavan levyn massa
R	Päässä olevan tuen ylöspäin vaikuttava tukivoima	Tukirakenne on kansimökin seinä, johon parveke on kiinnitetty ja se tukee parveketta pysymään ylhäällä
M	Tuen aiheuttama ylöspäin suuntautuva momentti	Seinän aiheuttama tuki aiheuttaa momentin, joka tukee parveketta taipumiselta tiettyyn massaansa asti.
MA	Pistemomentti kappaleen päässä	Parvekkeen kokonaismassan aiheuttama momentti
f	Taipuneen kappaleen poikkeama korkeussuunnassa, alkuperäisestä asennosta	Kuinka paljon parveke taipuu alaspäin, jos sitä ei tueta alapuolelta
A1	Taipumisen aiheuttama kulma	Kulma, mihin asentoon parvekkeen levy taipuu

## 9 YHTEENVETO

Tavoitteenani oli laatia aiheesta opas, joka olisi tarpeeksi yksinkertainen että alaa tuntematon sitä ymmärtää. Olen koko työn ajan tarkastellut käsiteltäviä asioita siitä näkökulmasta, mikä kaikki oli minulle uutta kun tuotantotalouden insinööriopiskelijana, ilman minkäänlaista kokemusta laivoista, pääsin työskentelemään runkosuunnittelijana. Työhön sisällytettäviä aihealueita lähdin miettimään siltä kantilta, mitä olisin itse halunnut tietää ja mitkä aiheet liittyvät loogisiin kokonaisuuksiin. Työtä rajaamalla olen saanut nostettua esille oleellimmat asiat laivasuunnittelijan näkökulmasta. On väistämätön fakta että aiheesta olisi voinut kirjoittaa romaanin jos toisenkin, mutta halusin pitää työn tiiviinä. Tiedän kokemuksesta että jos käteen annetaan liian paksu opus, lukeminen jää helposti selailuksi.



## LÄHTEET

### Kirjalähteet:

Alanko, J. 2007. Laivan yleissuunnittelu. Turku: Karhukopio

Eyres, D.J. 2007. Ship Construction. Amsterdam: Butterworth-Heinemann

Hatakka, J., Saari, H., Sirviö, J., Viiri, J. & Yrjänäinen, S. 2007. Physica 4. Liikkeen lait. WSOY

Pennala, E. 1994. Lujuusopin perusteet. Otatieto Oy

Räisänen, P. (toim.) 1997, Laivatekniikka, Modernin laivanrakennuksen käsikirja. Gummerus **Jyväskylä**

### Internetlähteet:

Aalto yliopiston Noppa-portaalin www-sivut. Viitattu 17.9.2013.  
<https://noppa.aalto.fi>

Bulkcarrierguide www-sivut. Viitattu 4.10.2013. <http://www.bulkcarrierguide.com>

Cmap www-sivut. Viitattu 9.9.2013.

Deltamarin Oy www-sivut. Viitattu 24.9.2013. <http://www.deltamarin.com>

Det Norske Veritas www-sivut. Viitattu 25.9.2013. <http://www.dnv.fi>

Digma www-sivut. Viitattu 6.11.2013. <http://www2.amk.fi/digma.fi/>

Emerging Engineering group blogi. Viitattu 18.12.2013  
<http://emergingengineeringgroupm.blogspot.fi>

Exchange DNV www-sivut. Viitattu 19.12.2013 <https://exchange.dnv.com/>

Global Security www-sivut. Viitattu 10.09.2013. <http://www.globalsecurity.org>

Ipen www-sivut. Viitattu 29.11.2013. <http://www.ipen.org.br>

Kuljetusopas www-sivut. Viitattu 4.10.2013. <http://www.kuljetusopas.com>

Lamek Finland Oy www-sivut. Viitattu 21.11.2013.  
[http://www.lamek.fi/Palkki\\_1.html](http://www.lamek.fi/Palkki_1.html)

Remote Measurement & Research Co. www-sivut. Viitattu 09.09.2013.  
<http://www.rmrco.com>

Ship Structural Committee www-sivut. Viitattu 29.11.2013  
<http://www.shipstructure.org/pdf/331.pdf>

The Nautical citen www-sivut. Viitattu 9.9.2013. <http://www.thenauticalcite.com>

Valuatlas www-sivut. Viitattu 25.9.2013. <http://www.valuatlas.fi/>

Veristar www-sivut. Viitattu 5.11.2013. <http://www.veristar.com>

Esitelmät ja luennot:

Alanko, J. 2006. Brief introduction to ships -koulutus Deltamarin Oy:n uusille työntekijöille 7.5.2013

Isotalus, J. 2013. Laivan staattinen ja dynaaminen kuormitus I. Luento WinNovan Laivanrakennuksen erikoisammattitutkinnon koulutuksessa 6.6.2013.

Varsta, P. Laivasuunnittelun perusteet

Opinnäytetyöt:

Puurula, J. 2009. Hyttikäytävien välisen kannaksen rakenteen mallintaminen risteilylaivan FE-analyysissä. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu. Viitattu 6.11.2013.  
[http://www.aeronautics.hut.fi/edu/theses/full\\_thesis/Puurula\\_Jussi\\_2009.pdf](http://www.aeronautics.hut.fi/edu/theses/full_thesis/Puurula_Jussi_2009.pdf)

Haastattelut:

Matti Lietepohjan haastattelu Deltamarin Oy:ssä 3.10.2013







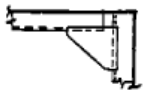
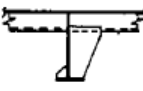




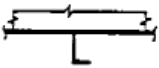

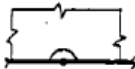
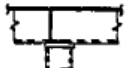
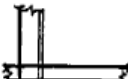
	Max DWT	DFOC (ME)*	Speed	The B.Delta series of Deltamarin
<b>B.DELTA25</b>	28 000 t	16.6 mt	14 kn	
<b>B.DELTA37</b>	40 700 t	17.6 mt	14 kn	
<b>B.DELTA43</b>	43 000 t	17.8 mt	14 kn	
<b>B.DELTA64</b>	63 700 t	24.1 mt	14.5 kn	
<b>B.DELTA82</b>	82 000 t	26.8 mt	14.5 kn	
<b>B.DELTA210</b>	210 000 t	45.0 mt	14.5 kn	

FIGURE 2-13

DETAIL FAMILY		TYPICAL DETAILS SURVEYED		TYPICAL CONFIGURATION
NO.	FAMILY NAME	FUNCTION - PROVIDES:		
1	BEAM BRACKETS	END CONSTRAINT FOR FRAMING		
2	TRIPPING BRACKETS	LATERAL SUPPORT		
8	STIFFENER CLEARANCE CUTOUTS	FOR PASSING ONE MEMBER THROUGH ANOTHER AND A SHEAR CONNECTION		
3	NON-TIGHT COLLARS	SHEAR CONNECTION FOR CONTINUOUS FRAMING		
4	TIGHT COLLARS	SAME AS #3 AND A TIGHT PENETRATED PLATE		
5	GUNWALE CONNECTIONS	CONNECTION OF STRENGTH DECK TO SIDE SHELL		
6	KNIFE EDGE CROSSING	NO USEFUL FUNCTION (A PROBLEM TO AVOID)		
9	STRUCTURAL DECK CUTS	PASSAGE THROUGH DECKS FOR ACCESS, TANK CLEANING, PIPING, CABLES, ETC.		
7	MISCELLANEOUS CUTOUTS	HOLES FOR ACCESS, DRAINAGE, EASE OF FABRICATION, CABLEWAYS, PIPES, AIR HOLES, ETC.		
10	STANCHION ENDS	LOAD PATH BETWEEN STANCHION AND DECK		
11	STIFFENER ENDS	DESIGNED END RESTRAINT FOR LOAD CARRYING MEMBERS		
12	PANEL STIFFENERS	STABILITY TO PLATING		