

Opinnäytetyö (AMK)  
Kone- ja tuotantotekniikka  
Laiva- ja venetekniikka  
2015

Ilmari Korpi

# ERIKOISLUJIEN TERÄSTEN KÄYTTÖ LAIVAN JÄÄVAHVISTUKSESSA



TURUN AMMATTIKORKEAKOULU  
TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

OPINNÄYTETYÖ (AMK) | TIIVISTELMÄ

TURUN AMMATTIKORKEAKOULU

Kone- ja tuotantotekniikka | Laiva- ja venetekniikka

2015 | 23

Ohjaaja(t): Harri Eronen, Project manager, ILS  
Lauri Kosomaa

Ilmari Korpi

## ERIKOISLUJIEN TERÄSTEN KÄYTTÖ LAIVAN JÄÄVAHVISTUKSESSA

Tämän työn tarkoituksena oli selvittää kuinka lujuudeltaan erilaisten terästen käyttö jäävahvistetun laivan rungossa vaikuttaa sen taloudellisuuteen ja suoritusarvoihin.

Työssä tutkittiin kolmella eri teräslaadulla miten niiden käyttö laivan jäävyöhykkeessä vaikuttaa laivan rakenteiden mitoitukseen. Rakenteet mitoitettiin Det Norse Veritas-luokituslaitoksen mitoitusohjeiden mukaan. Samalla tarkasteltiin miten eri teräslaadut vaikuttavat laivan painoon, suoritusarvoihin ja taloudellisuuteen. Esimerkkilaivana käytettiin vartiolaivaa, jonka jääluokka on 1A.

Työn tuloksena huomattiin, että erikoislujien terästen käyttö paransi laivan suorituskykyä alensi hinaustehoa 1,3 %–2,1 % ja alensi materiaalikustannuksia jäävyöhykkeen alueella 13 %.

ASIASANAT:

laivarakennus, teräsrakenteet, nopeus, energiatehokkuus, jääluokitus

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Mechanical and productional engineering | Naval Architect

2015 | 23

Instructor(s): Harri Eronen, Project manager, ILS Oy  
Lauri Kosomaa

Ilmari Korpi

## APPLICATIONS OF HIGH STRENGTH STEELS IN SHIP'S ICE STRENGTHENING

The goal of this study was to determine how using different kinds of steels in ice strengthened ship's hull affects in its economic efficiency and performance.

In the study was examined how using three different kind of steels in ship's icebelt affect structural design. Structures were designed according to Det Norske Veritas classification society rules. At the same time was studied how different kind of steels affect ship's weight, performance and economic efficiency. Calculations were done for a patrol ship with ice class 1A.

As result was noticed that using high strength steels improved ship's performance by reducing towing power by 1,3 % - 2,1 % and reduced material expenses in ice belt by 13 %.

### KEYWORDS:

shipbuilding, steel structures, speed, energy efficiency, ice class

# SISÄLTÖ

<b>LYHENTEET</b>	<b>6</b>
<b>1 JOHDANTO</b>	<b>7</b>
<b>2 ERIKOISLUJAT TERÄKSET</b>	<b>8</b>
2.1 Yleistä erikoislujista teräksistä	8
2.2 Erikoislujien terästen valmistus	8
2.3 Erikoislujien terästen käyttö laivoissa	9
<b>3 JÄÄVAHVISTUS</b>	<b>11</b>
3.1 Yleistä jääluokkamääräyksistä	11
3.2 Suomalaiset jääluokkamääräykset	11
3.3 Jäävahvistus laivan rungossa	12
3.3.1 Korroosio	13
3.4 Koneiston jäävahvistus	14
<b>4 PAINON VAIKUTUS LAIVAAN</b>	<b>15</b>
4.1 Vaikutus vastukseen ja tehontarpeeseen	15
4.2 Rakenteet ja rakennuskustannukset	16
4.3 Vakavuus	16
<b>5 LUJUDELTAAN ERILAISTEN TERÄSTEN EROT</b>	<b>17</b>
5.1 Rakenteiden mitoitus DNV:n sääntöjen mukaan	17
5.2 Painolaskut	19
5.3 Painon vaikutus vastukseen ja tehontarpeeseen	20
5.4 Rakennekustannukset	21
5.5 Polttoainekustannukset	22
<b>6 JOHTOPÄÄTÖKSET</b>	<b>23</b>

## KUVAT

Kuva 1. DNV:n vaatimat seossuhteet erikoislujalle teräkselle (DNV Rules for Ships July 2007 Pt. 2 Ch. 2 Sec. 1 – page 14).	9
Kuva 2. Esimerkki tyypillisistä rakenteista jäävahvistetun laivan rungossa	13
Kuva 3. Kaaren ja laidoituksen mitoitus Nauticus Hull-ohjelmalla	18
Kuva 4. Tyypillinen kaari eri teräslaaduilla	18

## KUVIOT

Kuvio 1. Levypaksuus teräksen myötörajan funktiona	10
--	----

## TAULUKOT

Taulukko 1. Jäävahvistuksen painolisäys (Alanko 2007, X-12)	12
Taulukko 2. Painolaskujen yhteenveto	19
Taulukko 3. Hinausteho paljaalle rungolle eri nopeuksilla ja uppoumilla	21
Taulukko 4. Materiaalikustannukset	21
Taulukko 5. Polttoainekustannukset vuosittain	22
Taulukko 6. Yhteenveto terästen vaikutuksista	23



# 1 JOHDANTO

Markkinoilla on ollut kysyntää yhä nopeammille jäissä kulkeville aluksille. Tämän työn tavoitteena on selvittää, onko erikoislujien terästen käyttö laivan jäävahvistuksessa taloudellisesti kannattavaa.

Työssä on esitetty asiat, jotka vaikuttavat jäävahvistukseen ja miten jäävahvistus vaikuttaa laivaan. Lisäksi työssä mitoitettiin esimerkkilaivan jäävyöhyke kolmella lujuudeltaan erilaisella teräksellä Det Norske Veritas-luokituslaitoksen mitoitushjeiden mukaan. Lisäksi tutkittiin miten terästen muuttaminen vaikuttaa laivan painoon, hintaan, suoritusarvoihin ja käyttökustannuksiin.

Työ tehtiin ILS Oy:n toimeksiantona. ILS Oy on vuonna 1988 perustettu insinööritoimisto, jonka pääkonttori on Turussa. ILS Oy on erikoistunut jäissä kulkevien alusten suunnitteluun.

## 2 ERIKOISLUJAT TERÄKSET

### 2.1 Yleistä erikoislujista teräksistä

Perinteisillä lujilla teräksillä on ollut suhteellisen huonot hitsattavuus- ja muovattavuusominaisuudet. Uudet laivanrakennuksessa käytettävät lujat teräkset ovat termomekaanisesti käsiteltyjä HSLA-teräksiä. Kun teräksiä on kehitetty, tiettyjä mekaanisia koostumuksia on korostettu kemiallisen koostumuksen sijaan. Teräksiltä on vaadittu hyvää hitsattavuutta, hyviä lujuusominaisuuksia, varmuutta hausrasmurtumaa vastaan ja hyvä väsymislujuus. Erikoislujia rakenneteräksiä on olemassa laaja valikoima eri käyttötarkoituksiin. Erikoislujien rakenneterästen myötöraja vaihtelee 350...2100 N/mm<sup>2</sup> välillä. (Valorinta 1982, 162.)

### 2.2 Erikoislujien terästen valmistus

Kappale voidaan muovata kuumamuovauksessa pientä voimaa käyttäen. Tämä kuitenkin johtaa teräksessä suureen raekokoon. Suuri raekoko heikentää teräksen lujuutta ja iskusitkeyttä. Karkearakeisuutta poistetaan erillisellä lämpökäsittelyllä. Jos halutaan hyvää lujuutta ja sitkeyttä, on käytettävä nuorrutusta ja seostettuja teräksiä. (Niinimäki 1993, 98).

Edellä mainittujen haittojen vähentämiseksi on kehitetty termomekaanisia käsittelyjä. Termomekaanisissa käsittelyissä on yhdistetty teräksen muokkaus sekä lämpökäsittely. Menetelmässä sovelletaan faasimuutosten ja muiden sisäisten ilmiöiden oikea-aikaista niveltämistä lämpötilan, muokkauksen ja muokkausasteen mukaan. Tämä lujittaa ja sitkistää terästä hiilipitoisuutta lisäämättä, ei vaadi erillistä normalisointia tai nuorrutusta sekä samalla parantaa hitsattavuutta ja muovattavuutta. Lujemmat teräkset sallivat pienemmät ainevahvuudet, jolloin hitsaustyö vähenee. Niukasti seostetuilla teräksillä on myös pieni tarve esilämmitykselle, mikä helpottaa hitsaamista. Termomekaanisilla menetelmillä pyritään pienentämään teräksen raekokoa, joka parantaa teräksen lujuutta ja iskusitkeyttä. (Niinimäki 1993, 98–99).

Kun teräksiä valmistetaan termomekaanisesti, on hallittava lähtölämpötila, valssausvaiheiden lämpötilat, muokkausaste eri valssausvaiheissa, jäähtytynopeus ja jäähtytyksen alku- ja loppulämpötilat. Termomekaanisesti valssattujen terästen yleisiä käyttökohteita ovat laivat, öljynporauslautat, rakennusten rungot, isot kaasuputkistot, sillat, kulkuvälineet ym. (Niinimäki 1993, 98–100).

### 2.3 Erikoislujien terästen käyttö laivoissa

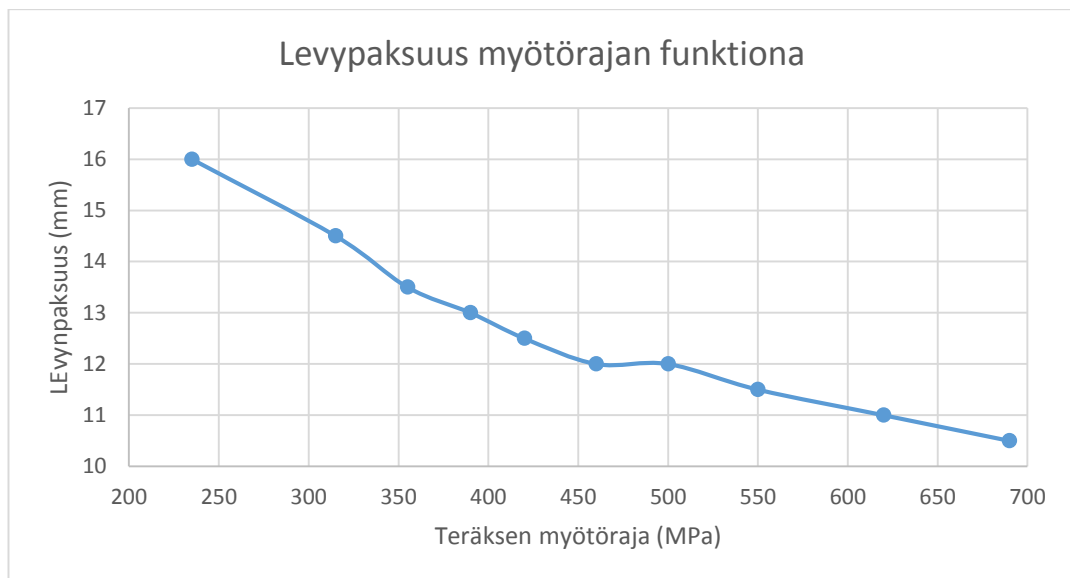
Laivoissa yleisimpiä lujien terästen käyttökohteita ovat rakenteet laidoituksessa ja pohjarakenteissa. Kun käytetään lujia teräksiä, voidaan pienentää levynpaksuuksia ja profiilien kokoja. Luokituslaitokset asettavat laivoissa käytettäville teräksille omia vaatimuksiaan. Terästen on täytettävä mekaaniset ominaisuudet kuten myötöraja, murtolujuus ja iskutitkeysämpötila. Teräksille on asetettu tarkat kemiallisen koostumuksen rajat. Kuvassa 1 on DNV:n vaatimat seossuhteet erikoislujalle teräkselle.

Grade	C	Si	Mn	P	S	Cr <sup>2)</sup>	Mo <sup>2)</sup>	Ni <sup>2)</sup>	Cu <sup>2)</sup>	Al <sup>3) 4)</sup>	Nb <sup>4)</sup>	V <sup>4)</sup>	Ti <sup>4)</sup>	N
Grade A of all strength levels	0.21	0.10 to 0.55	1.70	0.035	0.035	0.20	0.08	0.40	0.35	Min. 0.020	0.02 to 0.05	0.05 to 0.10	0.007 to 0.05	-
Grades D and E of all strength levels	0.20	0.10 to 0.55	1.70	0.030	0.030	0.20	0.08	0.40	0.35	Min. 0.020	0.02 to 0.05	0.05 to 0.10	0.007 to 0.05	-
Grade F of all strength levels	0.18	0.10 to 0.55	1.60	0.025	0.025	0.20	0.08	0.80	0.35	Min. 0.020	0.02 to 0.05	0.05 to 0.10	0.007 to 0.05	0.009 <sup>5)</sup>

1) Composition in percentage mass by mass maximum unless shown as a range or as a minimum.  
2) The limits given do not apply when elements are intentionally added.  
3) Total content. Acid soluble content, if determined instead, shall be minimum 0.015%.  
4) The steel shall contain Al, Nb, V or Ti, either singly or in any combination. When used singly, the steel shall contain the specified minimum content of the element. When Al and Nb are used in combination, the minimum total Al content shall be 0.015% and the minimum Nb content shall be 0.010%. When Al and V are used in combination, the minimum total Al content shall be 0.015% and the minimum V content shall be 0.030%. The total content of Nb+V+Ti shall not exceed 0.12%.  
5) 0.012% if Al is present.  
6) Extra high strength steel grade NV 47 for Hull Structural Application in Container Ships is defined in Classification Notes No. 30.10

Kuva 1. DNV:n vaatimat seossuhteet erikoislujalle teräkselle (DNV Rules for Ships July 2007 Pt. 2 Ch. 2 Sec. 1 – page 14).

Kuviossa 1. on esitetty esimerkkilaivalle DNV:n jässäännöllä levynpaksuus teräksen myötörajan funktiona (Rules for Ships, January 2012 Pt. 5 Ch. 1 Sec. 3 – Page 21). Laivan jääluokka on 1A ja kaariväli 600 mm.



Kuvio 1. Levypaksuus teräksen myötörajan funktiona

## 3 JÄÄVAHVISTUS

### 3.1 Yleistä jääluokkamääräyksistä

Luokituslaitokset antavat jäissä kulkeville aluksille mitoitusmääräykset sen mukaan miten laivan on toimittava jäissä. Viranomaisillakin on omia mitoitusmääräyksiä laivoille. Tällaisia ovat esimerkiksi Suomen ja Ruotsin merenkulkulaitokset ja Kanadan rannikkovartiosto. Jääluokat tulevat merkitseviksi siinä vaiheessa kun jokin viranomainen niitä vaatii tai laivan omistaja haluaa saada tietyn jääluokituksen. Suomessa ja Ruotsissa on käytäntönä antaa merialueille liikennerajoituksia minimijääluokan ja kuolleen painon suhteen. Venäläiset vaativat kuolleen painon sijaan minimitehon. (Riskä, 2001.) Suomessa väylämaksun määrä saadaan kertomalla aluksen nettovetoisuus yksikköhinnalla. Lasti- ja matkustajaluksille on säädetty jääluokan perusteella määräytyvä yksikköhinta. Risteily- ja suurnopeusaluksille on säädetty jääluokasta riippumattomat kiinteät yksikköhinnat. (Tulli 2014.)

### 3.2 Suomalaiset jääluokkamääräykset

Ensimmäiset suomalaiset jääluokkamääräykset tulivat voimaan vuonna 1890 sisältäen vaatimuksia vain varustelusta ja yleisjärjestelystä. Vuonna 1920 säännöt vaativat laidoituslevyn paksuntamista 45 %, välikaarten asentamista sekä pitkitäisjäykkääjäväliä 1,8 m. Vuonna 1932 asetettiin kolme eri jääluokka: 1C, 1B ja 1A. Vuonna 1971 sääntöuudistukset perustuivat suureen aineistoon jäävaurioista. Säännöissä oli kolme osaa: laivan tehovaatimus, rungon lujuusvaatimus sekä potkurin ja potkuriakseliston lujuusvaatimukset. Vuonna 1985 uusittiin vuoden 1971 jääsääntöjen runkoa koskevat kohdat. Suurin uudistus oli siirtyminen suoraan elastiseen mitoitukseen ja kuorman todenmukainen määrittely. (Riskä, 2001.)

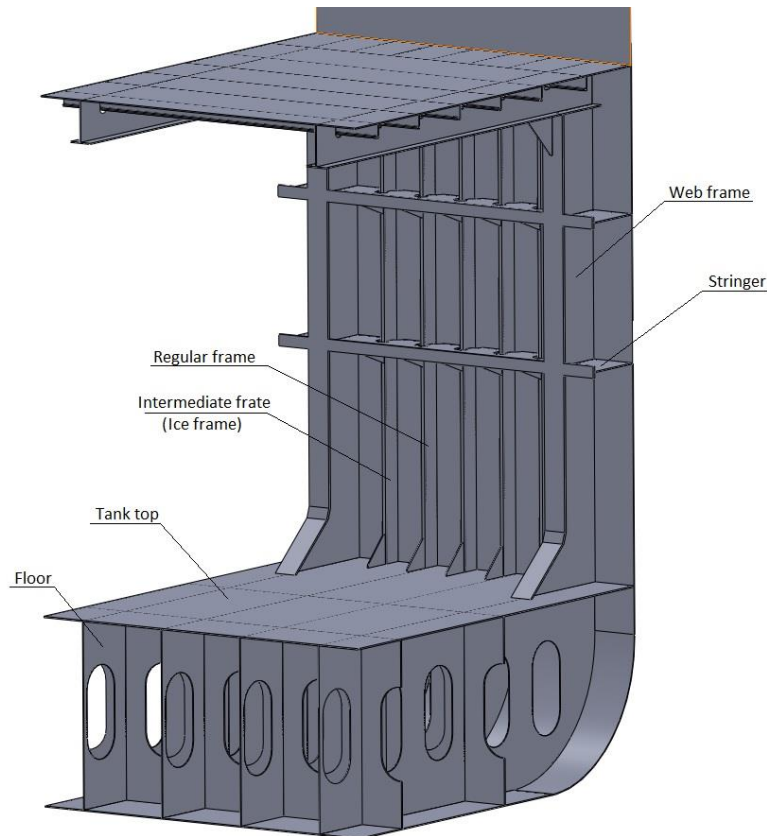
### 3.3 Jäävahvistus laivan rungossa

Kun laivan runkoa suunnitellaan, lähtötiedoissa on otettava huomioon millaisissa jääoloissa laivan on tarkoitus toimia. Alukselle määritetään jäävyöhyke perään, keskilaivaan ja keulaan. Jäävyöhyke on yleisesti suurin sallittu kesälastivesiviiva ja pienin painolastivesiviiva. Jäävyöhykkeessä olevat rakenteet on vahvistettava ja jääkaaret on asennettava. Jääkaaret voivat olla joko poikittaisia tai pitkittäisiä. Poikittaiset kaaret ovat suositeltavia, koska silloin kuormat jakautuvat useammalle osalle, kuin pitkittäisiä kaaria käytettäessä. Lisäksi on lisättävä jääjäykkäjäät ja vahvistettava laitalevyt ja kehyskaaret. Jos jääsäännöt antavat rakenteille pienemmät vaatimukset kuin muut luokan säännöt, niin rakenteet on mitoitettava aina suuremman vaatimuksen antavan säännön mukaan. (Arkke, 47–49.)

Jäävahvistus lisää huomattavasti laivan rungon painoa. Karkeasti eri jääluokille lisäys on seuraavan taulukon 1. mukainen:

Taulukko 1. Jäävahvistuksen painolisäys (Alanko 2007, X-12)

1A Super	8...10 %
1A	6...8 %
1B	3...4 %
1C	1...2 %



Kuva 2. esimerkki tyypillisistä rakenteista jäävahvistetun laivan rungossa

### 3.3.1 Korroosio

Jään hankauksen takia jäissä kulkevat laivat tarvitsevat erityistä huomiota korroosiosuojaukseen. Laidoituslevyn kulumisen keulassa jäävyöalueella on 0,2 mm – 0,3 mm vuodessa 1A ja 1A super luokassa. Jäänmurtajilla kuluminen on 0,4 mm – 0,5 mm tai enemmän. Kulumisen nopeus riippuu teräslaadusta ja jääpaineesta. (Tsoy 1999, 13.) Korroosiosuojaus vaikuttaa laivan elinikään ja suorituskykyyn. Rungon pinnan laatu jäävyön alueella vaikuttaa oleellisesti jään ja rungon väliseen kitkaan. Kitkavastuksen osuus on 30 % - 50 % jäävastuksesta.

Laivoissa kulumisongelma tämä on ratkaistu lisäämällä rakenteisiin korroosiovara ja käyttämällä jääloihin tarkoitettua maalia kuten Inerta 160. Jäänmurtajissa on käytetty jäävyön alueella compound levyä. Compound levyssä on noin 2 mm paksu pinta ruostumatonta terästä laivateräksen päällä. Inerta 160 kestää

paremmin jään hankausta kuin perinteiset maalit ja sillä on hyvä pinnanlaatu. Inerta 160 on noin kaksi kertaa kalliimpi kuin perinteiset maalit. Kustannuksia arvioitaessa tulee ottaa huomioon, että perinteinen maali pitää uusia kokonaan jääkauden jälkeen. Noin 50% alueista, jotka on maalattu Inerta 160:llä, pitää uusia 4-5 vuoden jälkeen. Compund levy on huomattavan kallista, mutta ei vaadi korjausta tai uusimista koko laivan elinkaaren aikana. (ICETECH '94.)

Korroosiovara vaihtelee luokituslaitoksesta riippuen. Suomalais-ruotsalaiset jääsäännöt vaativat 2 mm paksun korroosiovaralisäyksen laitalevyyn paksuuteen. Venäjän rekisterissä korroosiolisän mitoitus määräytyy laivan jääluokan ja eliniän mukaan. Laivan rungossa oleva suojaava kerros vaikuttaa myös korroosiolisän määrään.

### 3.4 Koneiston jäävahvistus

Perinteisessä laivassa konetehtoon vaikuttavat erityisesti hydrodynaamiset ilmiöt. Jäissä kulkevissa aluksissa hallitsevia tekijöitä ovat jään rikkominen ja jääkappaleiden siirtely. Jääluokkamääräyksissä vaaditaan alukselta tietty minimikonetehto, joka on riippuvainen aluksen jääluokasta, uppoumasta, leveydestä, potkurityypistä, keulan geometriasta ja siitä, onko alus varustettu bulbilla vai ei.

Jäissä kulkevien alusten potkurit ja akseli on myös vahvistettava. Potkuria vahvistetaan kasvattamalla lavan paksuutta.

Jäävahvistus vaikuttaa myös laivan peräsin- ja ohjailujärjestelyihin. Ohjailukoneisto mitoitetaan luokan sääntöjen mukaan jääsäännöstä saadulla nopeudella. Mikäli aluksen suurin palvelunopeus on suurempi kuin jääsäännöstä tuleva, niin sitä käytetään. (TRAFI, 23.)

Laivan jäähdytysjärjestelmä on suunniteltava niin, että jäähdytysveden saanti on taattu jäissä operoitaessa. Tähän tarkoitukseen on asennettava vähintään yksi jääkaivo. Jääkaivo on sijoitettava mahdollisimman lähellä keskilinjaa ja perään, jos mahdollista. (TRAFI, 43-44.)

## 4 PAINON VAIKUTUS LAIVAAN

Kun laivaa suunnitellaan, laivan oman painon ja painopisteen laskenta on eräs tärkeimmistä huomioon otettavista asioista. Laivanrakennussopimuksessa laivan kantavuus eli kuollut paino on yksi pääasioista. Jo suunnittelun alkuvaiheessa, ennen sopimusta, laivan päämitat ja kustannukset määritetään tarkasti. Päämittojen muuttaminen myöhemmin on erittäin vaikeata ja kallista. Kevytpainolla tarkoitetaan laivan omaa painoa, johon kuuluvat laivan rakenteet ja komponentit. Kuollut paino on laivan kantavuus. Kantavuuteen kuuluvat polttoaineet, muonat, miehistö, matkustajat jne. Jos kevytpaino kasvaa, kuollut paino vastaavasti vähenee. Tällöin telakka joutuu maksamaan sakkoa ja jos hylkyraja ylityy, tilaajan ei ole pakko ottaa laivaa vastaan.

### 4.1 Vaikutus vastukseen ja tehontarpeeseen

Muutokset laivan uppoumassa vaikuttavat oleellisesti laivan vastukseen ja tehontarpeeseen. Uppouman muutokset näkyvät suoraan laivan syvyyden ja märkäpinta-alan muutoksena. Märkäpinta-ala muuttuu karkeasti seuraavan kaavan mukaan:

$$A_{uusi} = \left( \frac{\Delta_{uusi}}{\Delta_{vanha}} \right)^{\frac{2}{3}} \times A_{vanha}$$

Märkäpinta-alan muutos vaikuttaa laivan rungon kitkavastukseen. Mitä suurempi märkäpinta-ala, sitä suurempi kitkavastus. Uppouman muutokset vaikuttavat myös laivan aaltovastukseen.

Laivan painon lisäksi, myös painopisteen muutokset vaikuttavat laivan suorituskykyyn. Jos laivan pitkittäissuuntainen painopiste poikkeaa uppouman painopisteestä, ei laiva kellu tasakölillä, vaan viippaa keulaan tai perään päin. Viippaus lisää kulkuvastusta, jolloin tarvitaan lisää konetehoa (Alanko, X-3).

## 4.2 Rakenteet ja rakennuskustannukset

Laivan kevytpainon väheneminen vaikuttaa laivan rakenteisiin. Suuret muutokset painossa voivat vaikuttaa olemassa olevien rakenteiden mitoitukseen. Kevytpainossa säästetty paino voidaan rakenteissa käyttää eri tavoin. Kevyitä ja kalliita rakenteita voidaan korvata raskaammilla ja halvemmilla rakenteilla. Esimerkiksi alumiini voidaan korvata teräksellä. Säästetty paino voidaan hyödyntää esimerkiksi lisälastina.

## 4.3 Vakavuus

Laivan vakavuutta tutkitaan laivan pitkittäisen akselin kallistuman tarkastelulla. Viippaus tarkoittaa laivan poikittaisen akselin suhteen tapahtuvaa pitkittäistä vakavuutta. Laivan vakavuus määräytyy laivan rungonmuodosta, uppoumasta, uppouman painopisteestä ja laivan painopisteestä. Laivojen on täytettävä riittävä vakavuus, joka riippuu laivatyyppistä. Liian suuri vakavuus kuitenkin aiheuttaa laivan keiuessa nopeat kiihtyvyydet (Alanko, XI-2.)

Suuret muutokset laivan kevytpainossa voivat vaarantaa laivan vakavuuden. Laivan vakavuutta voidaan parantaa laskemalla laivan painopistettä alemmas, kasvattamalla laivan vesiviivan täyteläisyyttä tai laivaa leventämällä.

## 5 LUJUUDELTaan ERILAISTEN TERÄSTEN EROT

Muutos laivan suorituskykyyn laskettiin kolmella eri teräksellä, joiden myötörajat olivat 235 MPa (NV A), 355 MPa (NV A36) ja 500 MPa (NV A500). Vielä lujempia teräksiä tutkiessa huomattiin, että luokituslaitoksen vaatimat minimiainevahvuudet tulivat vastaan. Luokituslaitos sallii pienemmät kuin minimiainevahvuudet, mutta samalla se vaatii tarkat lujuustarkastelut.

Esimerkkilaivan tiedot:

- Laivatyyppi: vartiolaiva
- $L_{oa} = 63,9$  m
- $B_{moulded} = 10,2$  m
- $T = 4,2$  m
- Propulsioteho = 3500 kW
- Nopeus = 15 solmua
- Uppouma = 1367 t

### 5.1 Rakenteiden mitoitus DNV:n sääntöjen mukaan

Jäävyön rakenteet mitoitettiin DNV:n sääntöjen mukaan jääluokalle 1A. Tässä työssä tutkittavat rakenteet rajattiin aluksen jäävyöllä oleviin rakenteisiin, koska tämän kokoiselle laivalle luokituslaitoksen mitoitusohjeet eivät ota huomioon materiaalivahvuutta valtaosassa rakenteita.

Rakenteiden mitoittamisessa käytettiin DNV:n Nauticus Hull ohjelmaa. Nauticus Hull on ohjelmistopaketti laivan rakenteiden analysoimiseen. Mitoitettavat rakenteet jäävyönalueella olivat: laitalevy, kaaret, kehyskaaret ja jäästringerit. Mitoitus tehtiin DNV Rules July 2007 Pt. 5 ch. 1 sec. 1-3:n mukaan. Levynpaksuudet pyöristettiin ylöspäin lähimpään millimetriin. Kuvassa 2. on esimerkki rakennemitoitusohjelman tulostuksesta. Mitoitettava rakenne oli laidoitus ja kaaren taivutusvastus keskilaivan kohdalla.

**INPUT**

**General Main Data:**  
 Ice Class notation: ICE-1A  
 Draught :  
 L. betw. perp. L<sub>pp</sub> = 54,000 m  
 Rule length L = 58,620 m  
 Breadth moulded B = 10,002 m  
 UIWL: AP 4,20 Amidsh. 4,20 FP 4,20 m  
 LIWL: 3,70 3,70 3,70 m Minimum T<sub>FP</sub>...

Ice Displ.: Δ<sub>r</sub> = 1 373 tonne  Block coefficient: C<sub>b</sub> = N/A  
 Max. Engine outP<sub>s</sub> = 3 500 kW   
 Service speed V = 15,00 knots  
 x aft = Frame no...  
 x fwd = 28,3 m

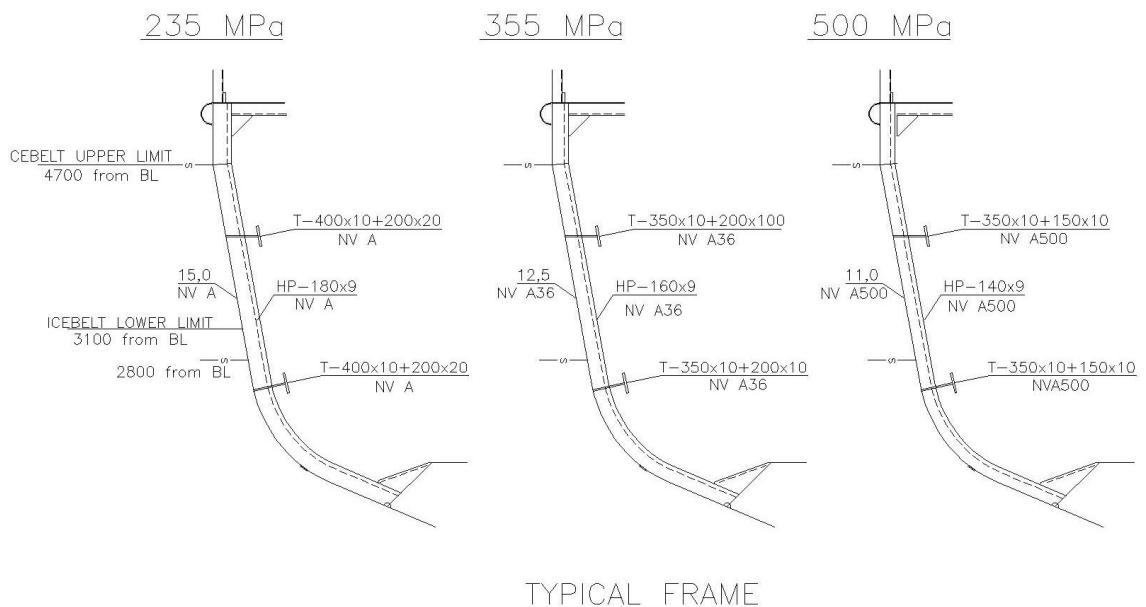
**Add. data for calc. of minimum required Engine output:**

Number of propellers	2	Max. breadth at WL: B =	10,00	10,00	m	Waterl. angle at B/4: α =	19,0	19,0	degrees
Propeller diam., D <sub>p</sub>	2,600	Length of bow: L <sub>BOW</sub>	25,20	24,80	m	Rake of stem at CL: φ <sub>1</sub>	42,0	42,0	degrees
Propeller type	Fixed pitch	L. of par. midship: L <sub>PAR</sub>	28,00	27,40	m	Rake of bow at B/4: φ <sub>2</sub>	40,0	40,0	degrees
Bulbous bow fitted:	<input type="checkbox"/>	Area of w.l. of bow: A <sub>wf</sub>	182,00	164,00	m <sup>2</sup>	Min.req.Engine output: =	1120	1000	kW

The L<sub>pp</sub>, B, L<sub>BOW</sub>/L, A<sub>wf</sub>/LB, L<sub>BOW</sub>/L, A<sub>wf</sub>/LB Parameters for calculating min engine output are outside valid range, see Rules

No	Location Id. text	Ice strengthening item	Frame no.	Type	Span [m]	σ <sub>F</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	m	Is [m]	Af [cm <sup>2</sup> ]	p [kN/m <sup>2</sup> ]	t/F [°]	Hpl [m]	Hpb [m]
					Spacing [m]	t <sub>c</sub> [mm]	b [m]	If/hs [m]	Aw [cm <sup>2</sup> ]	A [cm <sup>2</sup> ]	Z [cm <sup>3</sup> ]	Hfl [m]	Hfb [m]
1	ICE-1A/54,000/4,20/1 373/3 500/15,00	Plating and framing (Midship)	45	transverse	2	235	5,7			1102	12,38	4,70	3,10
					0,3	2	0			132	5,20	2,40	
2	ICE-1A/54,000/4,20/1 373/3 500/15,00	Plating and framing (Midship)	45	transverse	2	355	5,7			1102	10,44	4,70	3,10
					0,3	2	0			88	5,20	2,40	
3	ICE-1A/54,000/4,20/1 373/3 500/15,00	Plating and framing (Midship)	45	transverse	2	500	5,7			1102	9,115	4,70	3,10
					0,3	2	0			62	5,20	2,40	

Kuva 3. Kaaren ja laidoituksen mitoitus Nauticus Hull-ohjelmalla



Kuva 4. Tyypillinen kaari eri teräslaaduilla

## 5.2 Painolaskut

Painolaskut tehtiin mittaamalla AutoCadilla rakenteiden pinta-alat ja pituudet laivan pääkaari- ja laidoituskuvista. Levyjen paksuudet ja profiilien metripainot saatiin aiemmin lasketuista rakennemitoituksista. Kun rakenteiden painoja laskettiin, teräksen tiheytenä käytettiin  $8,0 \text{ t/m}^3$ . Kevennysaukkoja ei otettu huomioon ja kaarien painoon laskettiin polviot mukaan.

Taulukko 2. Painolaskujen yhteenveto

	Teräslaatu		
	235 MPa (NV A)	355 MPa (NV A36)	500 MPa (NV A500)
Laidoitus	59,2 t	49,6 t	44,1 t
Kaaret	37,7 t	30,7 t	25,7 t
Stringerit	10,3 t	7,1 t	5,8 t
Yhteensä	107,1 t	87,3 t	75,6 t

Jäävyöhykkeen painon muutos verrattuna 235-teräkseen:

- 355 MPa            -19,8 t        -18,5 %
- 500 MPa            -31,5 t        -29,4 %

Uppouman muutos verrattuna 235-teräkseen (1367 t):

- 355 MPa            1347,2 t      -1,4 %
- 500 MPa            1335,4 t      -2,3 %

### 5.3 Painon vaikutus vastukseen ja tehontarpeeseen

Paljaan rungon vastuksen määrittämiseen käytettiin systemaattista sarjaa (Bailey 1976, 18-20). Sarja soveltuu hyvin raskaasti lastatuille työveneille, nopeille partioaluksille ja pienille sota-aluksille, joilla on pyöreänmuotoinen palle ja joiden Frouden luku on 0,3 – 1,2.

Hinausteho saatiin kaavasta:

$$P_e = R_T \times V$$

Jossa:

$$R_T = R_R + R_F$$

Jäännösvastus  $R_R$  saatiin interpoloimalla systemaattisen sarjan kuvaajista (Bailey 1976, fig 8 & fig 9). Kitkavastus  $R_F$  laskettiin ITTC57:lla, joka määrittelee kitkavastuskertoimen:

$$C_F = \frac{0,075}{(\log_{10} \times R_N - 2)^2}$$

Reynoldsin luku laskettiin 15 °C:n suolaiseen veteen. Kitkavastus saatiin:

$$R_F = C_F \times 0,5 \times \rho \times A \times V^2$$

Laivan rungon märkäpinta-ala tyynessä vedessä arvioitiin vastaavanmuotoisesta rungosta (Bailey 1976, fig 3)

Hinausteho on esitetty taulukossa 3. tyneen veteen kolmella eri uppoumalla eri nopeuksille.

Taulukko 3. Hinausteho paljaalle rungolle eri nopeuksilla ja uppoumilla

	$\Delta = 1367$ t	$\Delta = 1347$ t	$\Delta = 1335$ t
V (knots)	Pe (kW)	Pe (kW)	Pe (kW)
12	454	449	445
13	658	650	645
14	879	868	861
15	1149	1134	1126
16	1426	1407	1396
17	1939	1913	1898

Käytettäessä 355 terästä hinausteho pieneni ~1,3 % ja käytettäessä 500 terästä hinausteho pieneni ~2,1 % verrattuna 235 teräkseen tarkastellulla nopeusalueella.

#### 5.4 Rakennekustannukset

Teräksen 235 hinta 700 €/t saatiin puhelinkeskustelussa Uudenkaupungin Työveneen kanssa (Juha Granqvist, 12.5.2014). Hinnan lisäys 235 verrattuna oli 355:lle +45 €/t ja 500:lle +167 €/t (Ruukilta saatu sähköposti Pekka Savolainen, 9.5.2014).

Taulukossa kolme on esitetty materiaalikustannukset kullekin teräslaadulle ja hin- taero 235 teräkseen verrattuna.

Taulukko 4. Materiaalikustannukset

	235 MPa	355 MPa	500 MPa
Hinta (€/t)	700	745	867
Jäävyön paino (t)	107,12	87,28	75,57
Materiaalikustannukset (€)	74985	65023	65516
Säästö (€)		9962	9469
Säästö		13 %	13 %

Materiaalikustannuksissa syntyy säästöjä vaikka teräksen hinta nousee, koska kilomääräisesti terästä kuluu vähemmän.

Rakennekustannuksia arvioitaessa on kuitenkin huomioitava, että teräksen lujuden kasvattaminen ja levypaksuuksien pienentäminen muuttavat rakennekustannuksia. Mitä lujempi hitsi sitä hankalampi se on koneistaa ja sitä pienempiä syöttöjä ja kalliimpia teräspaloja tarvitaan. 500 MPa:n asti hitsaus ei vaadi suuria muutoksia, mutta on hitsattaessa huomioitava lämmöntuonnin rajoitus, joka on max 2,5 kJ. Ohuet levypaksuudet pienentävät hitsilavuutta ja samalla hitsausajat lyhenevät. Jos käytetään lujaa lisäainetta, hitsilisäainekustannukset kasvavat. (Pekka Savolainen, sähköposti, 9.5.2014)

### 5.5 Polttoainekustannukset

Taulukossa 5. on esitetty miten hinaustehon muutos vaikuttaa polttoaineen kulu-  
tukseen ja kustannuksiin. Laivan propulsioteho on 3500 kW ja pääkoneiden käyt-  
töasteeksi on oletettu 75 %. Laskuissa on otettu huomioon vain propulsiosta ai-  
heutuvat polttoainekulut.

Taulukko 5. Polttoainekustannukset vuosittain

Polttoaineen kulutus vuosittain		
Koneteho	3200	kW
Käyttöaste	75 %	
Polttoainekulutus	195	g/kWh
Palveluspäiviä	340	d
Tuntia päivässä	24	h
Polttoaineen hinta	160	€/ton
$\Delta = 1367$ t	611021	€
$\Delta = 1347$ t	603078	€
Säästö vuodessa (€)	7943	€
$\Delta = 1335$ t	598189	€
Säästö vuodessa (€)	12831	€

## 6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämän tutkimuksen pohjalta voidaan päätellä, että erikoislujien terästen käyttäminen on taloudellisesti kannattavaa sekä telakan että tilaajan kannalta.

Työssä laskettava laiva olisi voinut olla suurempi kuin käytetty esimerkkilaiva. Rakenteita mitoittaessa DNV-luokituslaitoksen vaatimat minimiainevahvuudet tulivat vastaan. Rungon mitoituksessa käytettiin sääntöjä alle 100 metrin laivalle ja mitoitusohjeissa ainevahvuus ei ollut muuttujana. Esimerkkilaivaa suuremmalla laivalla erikoislujan teräksen käyttökohteita olisi enemmän, kuten, pohjalevyt, pohjatukit, lattiat, laitalevyt ja kaaret jäänvyön ulkopuolella. Tästä huolimatta huomattiin selviä hyötyjä suurlujuusteräksen käytössä. Taulukossa 6. on esitetty yhteenveto siitä, miten lujuudeltaan erilaisten terästen käyttö vaikuttaa laivaan 235 teräksen käyttöön verrattuna.

Taulukko 6. yhteenveto terästen vaikutuksista

	NV A (235 MPa)	NV A35 (355 MPa)	NV A500 (500 MPa)
Uppouma (t)	1367	1347 1,5 %	1335 2,3 %
Jäävyöhykkeen paino (t)	107,1	87,3 18,5 %	75,6 29,5 %
Materiaalikustannukset (€)	74985	65023 13,3 %	65516 12,6 %
Vastus 15 solmulla (kN)	148,8	146,9 1,3 %	145,8 2,1 %
Hinausteho (kW)	1149,4	1134,4 1,3 %	1125,6 2,1 %
Polttoainekustannukset (€)	611021	603078 1,3 %	598189 2,1 %

## LÄHTEET

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

Arkke, P. 1997. Laivateorian perusteet – Laivasuunnittelu – Laivojen lujuus ja rakenteet. Teoksessa Räsänen, P. (toim.) Laivatekniikka. Modernin laivanrakennuksen käsikirja. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy.

Bailey, D. 1976. The NPL High Speed Round Bilge Displacement Hull Series. Royal Institution of Naval Architects.

Mäkinen, E.; Liukkonen, S.; Nortala-Hoikkanen, A.; Harjula, A. ICETECH '94 FRICTION AND HULL COATINGS IN ICE OPERATIONS.

Laitinen, E.; Niinimäki, M.; Tiilikka, P.; Tuomikoski, J. 1993. Konetekniikan materiaalioppi. Helsinki: Painatuskeskus Oy.

Riska, K. 2001. Talvimerenkulku luentomoniste. Kul-24.405.

TRAFI, 2010 ICA CLASS REGULATIONS 2010 "FINNISH-SWEDISH ICE CLASS RULES 2010"

Tulli 2014. Väylämaksut. Viitattu 20.5.2014. <http://www.tulli.fi/fi/yrityksille/verotus/merenkulku-maksut/vaylamaksu/index.jsp>

Tsoy, L.G.; Grechin M.A.; Karavanov, S.B.; Glebko, Yu.V.; Mikhailichenko, V.V. 1999. INSOROP WORKING PAPER NO. 151 – 1999, IV.3.4 Arctic Environmental Law. Harmonization of Polar Ship Rules. International and National Provisions.

Valorinta, V. 1982. Koneenrakentajan metallioppi. Tampere: Kustannusyhtymä.