

Opinnäytetyö (AMK)

Kone- ja tuotantotekniikka

Meritekniikka

2017

Iiro Vanne

1A SUPER- & PC6- JÄÄLUOKKIEN VASTAAVUUS

– Tarvittavat rakenteelliset muutokset 1A Super
-jääluokitettun saattohinaajan rungon
jäävahvistukseen PC6-jääluokituksen
mahdollistamiseksi

Iiro Vanne

1A SUPER- & PC6-JÄÄLUOKKIEN VASTAAVUUS

- Tarvittavat rakenteelliset muutokset 1A Super -jääluokitettujen saattohinaajien rungon jäävahvistukseen PC6-jääluokituksen mahdollistamiseksi

International Association of Classification Societies julkaisi vuonna 2007 Polar Class -jääluokasäännöt, joiden on tarkoitus korvata luokituslaitosten omat arktiset jääluokasäännöt. Finnish-Swedish Ice Class Rules:n 1A Super -luokka rinnastetaan PC6-luokkaan. Sääntöjen lähtökohdat ovat kuitenkin hyvin erilaiset, joten vastaavuutta ei voida taata. Tämän työn tavoitteena on selvittää työn tilaajan suunnitteleman 1A Super -jääluokitettujen saattohinaajien konseptiin tarvittavat rakenteelliset ja mitoitukselliset muutokset rungon jäävahvistuksen osalta sen luokittamiseksi PC6-jääluokkaan.

Sääntöjen suurimmat periaatteelliset erot ovat PC-sääntöjen huomioima monivuotinen paksu jää ja rakenteiden mitoituksen lähtökohta. FSICR käyttää elastista mitoitusastetta, kun PC-säännöt hyödyntävät plastista mitoitusastetta. Paikallislaskenta FSICR:n osalta suoritetaan DNV Nauticus Hull -ohjelmistolla ja PC-sääntöjen mukaiseen paikallislaskentaan kehitettiin sääntölaskentaohjelma.

Selvityksen perusteella mallilaivan konseptiin tarvittavat muutokset PC6-luokitusta varten ovat verrattain pieniä. Molempien sääntöjen mukaiset aluejaot vastaavat hyvin toisiaan, PC-säännöt muodostavat selkeämmän keskilaiva-alueen. PC-luokituksen vaatima jäävahvistus mallilaivan jäävyön ulkopuolelle on vähäinen. Selvin ero syntyy kaarituksessa PC-sääntöjen vaatiessa suurempia kaaria kaikilla alueilla. Vaikka mallilaivan kaaritus on toteutettu FSICR:n vaatimukseen nähden ylimitoitetuilla kaarilla, niin joudutaan niitä tästä huolimatta kasvattamaan suurimmassa osassa runkoa. Myös laidoituksen ainevahvuutta joudutaan kasvattamaan perän, keulan muutosalueen ja keulan alueilla.

Lopputuloksena mallilaivan konsepti voitaisiin toteuttaa PC6-luokitettuna. PC6-luokituksen tuoma painonlisäys mallilaivaan verrattuna on noin 11,5 tonnia, mikä on noin 1,4 % laivan kuivapainosta. Lisääntynyt paino tarkoittaa suurempia materiaali- ja rakennuskustannuksia. Suurempi paino kasvattaa myös laivan kulkuvastusta, mikä kasvattaa polttoaineen kulutusta. Mikäli PC6-luokitus ei ole ehdoton vaatimus, ei sitä kannata tavoitella.

ASIASANAT:

Arktika, Itämeri, jääluokitus, jäävahvistus, talvimerenkulku, teräsrakenne.

Iiro Vanne

EQUIVALENCY OF 1A SUPER & PC6 ICE CLASSES

- Structural changes in ice strengthened hull regions for 1A Super classified escort tug to enable PC6 classification

In 2007, the International Association of Classification Societies published the Polar Class ice rules. These rules are meant to replace classification societies' own arctic ice class rules. The ice class 1A Super from the Finnish-Swedish Ice Class Rules, is thought to be comparable with the PC6 class. Fundamentals of these rules are very different, so correspondence cannot be guaranteed. The objective of this thesis was to examine structural changes in ice strengthened hull areas that are needed for the 1A Super certified ASD tug concept, to enable PC6 classification. Tug has been designed by ILS OY, which has ordered this thesis.

The main differences between the FSICR and the PC rules are thick multiyear ice that PC accounts for, and the design point of structural strength calculations. The FSICR use elastic dimensioning and the PC use plastic dimensioning. The DNV Nauticus Hull rule calculation program was used to calculate structures according to the FSICR. A specific calculation program was created for the PC rules.

As a result, the needed changes in the model ship's concept are minor. The hull region division is fairly similar between the rules, the PC rules forms a more clear midship region. Required ice strengthening outside the model ship's ice belt is minor. The main difference comes in framing. In comparison with the FSICR, the PC rules require significantly greater frames throughout the ship. Even though the model ship's framing is mostly over dimensioned according to the FSICR, greater frames are needed almost throughout the ship. Shell plating scantlings need also to be increased at the areas of stern, bow intermediate and bow.

In conclusion, the concept of the model ship could be built to the PC6 ice class. In comparison with the model ship, the PC6 classification increases the ship's weight with about 11,5 tons, which is 1,4 % of the ship's dry weight. Added weight means greater building and material expenses. Added weight also adds the ship's fuel consumption. If PC6 classification is not specifically required, it should not be pursued.

KEYWORDS:

Arctic, Baltic Sea, ice classification, ice strengthening, steel structure, winter navigation

SISÄLTÖ

KÄYTETYT LYHENTEET TAI SANASTO	7
1 JOHDANTO	10
2 LAIVAN JÄÄVAHVISTUS	11
2.1 Jäävahvistettavat rakenteet	11
2.2 Jäissä suoriutuminen	13
2.3 Arktinen merenkulku	14
2.4 Talvimerenkulku Itämerellä	17
3 SUOMALAIS-RUOTSALAISET JÄÄLUOKKASÄÄNNÖT	18
3.1 Kehitys	18
3.2 Jäävahvistus	19
3.2.1 Rungon alueet ja jääpaine	20
3.2.2 Laidoitus	22
3.2.3 Kaaritus	23
4 POLAR CLASS -JÄÄLUOKKASÄÄNNÖT	24
4.1 Plastinen mitoitustapa	25
4.2 Jäävahvistus	25
4.2.1 Rungon alueet	26
4.2.2 Jääpaine	27
4.2.3 Laidoitus	27
4.2.4 Kaaritus	28
5 TULOKSET	30
5.1 Rungon alueet	31
5.2 Laidoitus	32
5.3 Kaaret	33
5.4 Paino	35
6 POHDINTAA JA HUOMIOITA	38
6.1 Laivan päämittojen vaikutus rakenteeseen ja rakenteellinen hierarkia	38
6.2 Keulamuodon vaikutus jääpaineeseen PC-säännöissä	40
6.3 1A Super- & PC6-sääntöjen mukainen vastaavuus	41

6.4 Ruoripotkurilaitteiden vaatima lisävahvistus	41
6.5 HP-profiilin laskenta	41
6.6 PC-laskenta ohjelman kehitys	42
7 YHTEENVETO	43
LÄHTEET	45

LIITTEET

Liite 1. Keula-alueen laskenta PC-sääntölaskentaohjelmalla	
Liite 2. Painolaskut	
Liite 3. PC- & FSICR-kaavat keskilaivan mitoitukseen	

KAAVAT

Kaava 1. Arvo k (TRAFI 2010).	22
Kaava 2. Siirtynyt plastinen neutraaliakseli (IACS 2016).	29
Kaava 3. Plastinen taivutusvastus (IACS 2016).	29
Kaava 4. Plastinen taivutusvastus neutraaliakselin siirtymisen jälkeen (IACS 2016).	29

KUVAT

Kuva 1. Laivan jäävahvistettavat rakenteet.	12
Kuva 2. Polaarikoodin soveltamisalue pohjoisnavan ympärillä. (Yliskylä-Peuralahti ym. 2016, 10.)	16
Kuva 3. Polaarikoodin soveltamisalue Etelännavan ympärillä. (Yliskylä-Peuralahti ym. 2016, 10.)	16
Kuva 4. Rungon alueet (TRAFI 2010).	21
Kuva 5. Kuormituskorkeuden kehitys (Riskä & Kämäräinen, 2011, 6).	21
Kuva 6. Rungon alueet (IACS 2016).	26
Kuva 7. Levyn plastinen muodonmuutos (Daley, 2002).	27
Kuva 8. Kolminivel luhistuminen	28
Kuva 9. Epäsymmetrinen leikkausluhistuminen	28
Kuva 10. Uuman luhistuminen	28
Kuva 11. PC-aluejaot.	31
Kuva 12. FSICR-aluejaot.	31
Kuva 13. Keularangan toteutustavat (TRAFI 2010.)	33
Kuva 14. Keskilaiva.	34
Kuva 15. Keula.	35

KUVIOT

Kuvio 1. Jäävahvistuksen metripainot.	36
Kuvio 2. Laidoituslevyn neliömetripainot.	37
Kuvio 3. Kaarien metripainot.	37

TAULUKOT

Taulukko 1. Yksikköhinnat (Tulli 2017).	17
Taulukko 2. Tasaisen jään paksuudet, kuormituskorkeus ja suorituskykyvaatimus (TRAFI 2010).	19
Taulukko 3. Polar Class -jääluokat (IACS 2016).	24
Taulukko 4. Laidoituksen levynpaksuudet.	32
Taulukko 5. Kaaret.	34

KÄYTETYT LYHENTEET TAI SANASTO

Lyhenne	Lyhenteen selitys (Lähdeviite)
A_1	Laskennallinen arvo (IACS 2016)
a_1	Laskennallinen arvo (IACS 2016)
AF	Rungon aluekohtainen arvo (IACS 2016)
A_{fn}	Kaaren laipan poikkileikkauksen netto pinta-ala (IACS 2016)
A_{pn}	Kaaren poikkileikkauksen netto pinta-ala (IACS 2016)
A_t	Leikkauspinta-alavaatimus (IACS 2016)
A_w	Leikkauspinta-ala (IACS 2016)
a	Jänneväli (IACS 2016)
a	Taulukkoarvo (TRAFI 2010)
b	Taulukkoarvo (TRAFI 2010)
b_{NonBow}	Kuormitusalan korkeus (IACS 2016)
B_{MLD}	Laivan suunnitteluleveys
b_w	Etäisyys kaaren uuman ainevahvuuden puolivälistä laipan keskilinjaan (IACS 2016)
C_a	Arvo, joka ottaa huomioon todennäköisyyden, että tarkasteltava alue on koko pituudeltaan jääpaineen alaisena samana ajankohtana (TRAFI 2010)
C_d	Arvo, joka ottaa huomioon laivan koon ja konetehon (TRAFI 2010)
CF_c	Murskautumispettämisen huomioiva taulukkoarvo (IACS 2016)
CF_D	Kuormitusalan mitat huomioiva taulukkoarvo (IACS 2016)
C_p	Arvo, joka ottaa huomioon sen todennäköisyyden, millä suunnittelujääpaine esiintyy tietyssä rungon alueessa kyseessä olevassa jääluokassa (TRAFI 2010)
DF	Uppouman huomioon ottava arvo (IACS 2016)

f_1	Laskennallinen arvo (TRAFI 2010)
f_3	Arvo joka ottaa huomioon suurimman leikkausvoiman kuorman sijainnin suhteen ja leikkauskuorman jakautuman (TRAFI 2010)
F_{NonBow}	Voima (IACS 2016)
FSICR	Finnish-Swedish Ice Class Regulations
h	Jääpaineen kuormitusalan korkeus (TRAFI 2010)
h	Kaaren korkeus (TRAFI 2010)
h_{fc}	Kaaren korkeus laipan keskelle mitattuna (IACS 2016)
HP	Holland profile, bulbi-profiili
h_w	Kaaren uuman korkeus (IACS 2016)
IACS	International Association of Classification Societies
k	Laivan uppouman ja konetehon huomioon ottava arvo (TRAFI 2010)
k_w	Laskennallinen arvo (IACS 2016)
k_z	Laskennallinen arvo (IACS 2016)
l_a	Jääpaineen kuormitusalan pituus (TRAFI 2010)
LIWL	Lower Ice Water Line, alempi jäävesiviiva (TRAFI 2010)
LL	Kaaren jännevälän kuormitettu pituus (IACS 2016)
L_{OA}	Laivan kokonaispituus
m_0	Reunaehdot huomioiva arvo (TRAFI 2010)
MPa	Megapascal
m_t	Laskennallinen arvo (TRAFI 2010)
Nettovetoisuus	Laivan hyötytilan kokoa kuvaava dimensioton yksikkö
P	Koneteho (TRAFI 2010)
p	Jääpaine (TRAFI 2010)
p_0	Vakio jääpaine (TRAFI 2010)
P_{avg}	Jääpaine (IACS 2016)
PC	Polar Class

PPF	Huippukuorman huomioiva arvo (IACS 2016)
P_{PL}	Tasaisen levyn paine (TRAFI 2010)
Q_{NonBow}	Viivakuorma (IACS 2016)
s	Kaariväli (TRAFI 2010)
t	Levynpaksuus (TRAFI 2010)
T_D	Suunnittelusyväys
t_{net}	Nettolevynpaksuus (IACS 2016)
t_{pn}	Käytettävä laidoituksen nettolevynpaksuus (IACS 2016)
t_s	Korroosiolisä (IACS 2016)
t_c	Korroosiolisä (TRAFI 2010)
t_{wn}	Kaaren uuman nettolevynpaksuus (IACS 2016)
UIWL	Upper Ice Water Line, ylempi jäävesiviiva (TRAFI 2010)
W_{NonBow}	Kuormitusalan leveys (IACS 2016)
Y	Jänneväliin perustuva laskennallinen arvo (IACS 2016)
Z_p	Plastinen taivutusvastus (IACS 2016)
Z_{pt}	Vaadittu plastinen taivutusvastus (IACS 2016)
Z_{na}	Plastinen neutraaliakseli (IACS 2016)
Δ	Laivan uppouma
φ_w	Kaaren ja laidoituslevyn välinen kulma (IACS 2016)

1 JOHDANTO

IACS julkaisi vuonna 2007 Polar Class -jääluokkasäännöt, joiden on tarkoitus korvata luokituslaitosten omat arktiset jääluokkamääräykset ja näin yhtenäistää jäissä kulkeviin laivoihin kohdistuvia vaatimuksia. FSICR 1A Super -jääluokka on verrattavissa PC6-jääluokkaan. Vastaavuutta haettaessa tulee tehdä ekvivalenttitarkastelu. Sääntöjen lähtökohdat ovat kuitenkin hyvin erilaiset, eikä vastaavuutta luokkien välillä voida suoraan taata.

Tämän työn tarkoitus on selvittää rungon jäävahvistuksen osalta työn tilaajan, ILS OY:n suunnitteleman 1A Super -jääluokitettun saattohinaajan konseptiin tarvittavat muutokset sen luokittamiseksi PC6-jääluokkaan. Samalla suoritetaan 1A Super- ja PC6-jääluokkien sääntövertailu rungon jäävahvistettavien rakenteiden osalta. Tarve työlle on ilmennyt, kun markkinoilla on ollut kiinnostusta arktisille alueille soveltuvista saattohinaajista, jotka kykenevät suorittamaan satamajäänmurtoa. Aiheesta aiemmin julkaistun materiaalin perusteella oli syytä olettaa, että ainevahvuuksia joudutaan kasvattamaan.

Työssä esitellään jäissä kulkevan laivan suunnittelun perusteita ja luokituslaitosten jääluokkasääntöjen merkitystä talvimerenkulkuun. Arktisen alueen ja Itämeren talvimerenkulkuun tehdään katsaus, jossa tuodaan esille molempien alueiden liikennöinnille ominaisia piirteitä. FSICR:n ja PC-sääntöjen kehitys ja sisältö käydään läpi, ja niiden oleellisia eroja verrataan keskenään. Sääntövertailun jälkeen esitetään molempien sääntöjen mukaiset minimiainevahvuuslaskelmat mallilaivalle, ja PC-sääntöjen mukaisia laskelmia verrataan mallilaivan todellisiin ainevahvuuksiin. Vertailun mahdollistamiseksi ja tilaajalle työkaluksi tehtiin Polar Class -sääntölaskentaohjelma.

2 LAIVAN JÄÄVAHVISTUS

Laivan jäävahvistuksen ensisijainen tehtävä on mahdollistaa turvallinen ja sujuva talvimerenkulku. Selvitäkseen jäisissä olosuhteissa laivan tulee kyetä toimimaan enimmäkseen itsenäisesti sille suunnitellulla operointialueella.

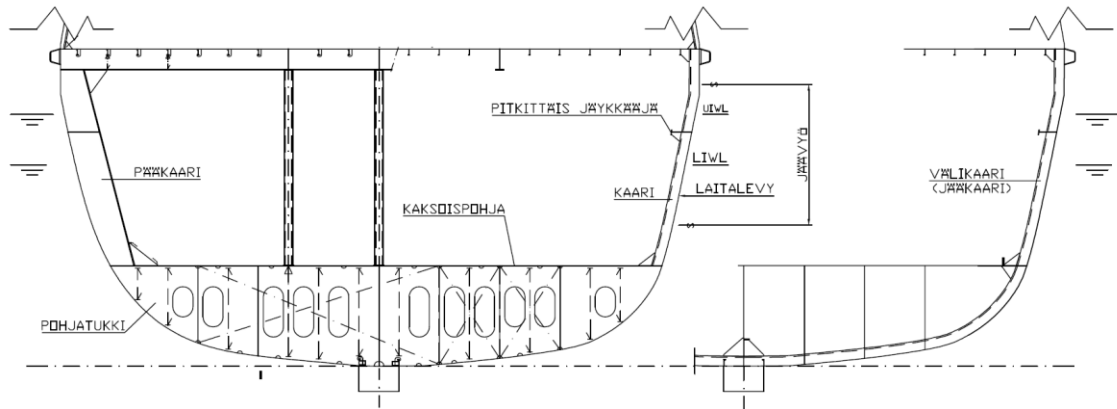
Yleisesti jäissä operoiva laiva luokitellaan laivan suunniteltuun käyttöön sopivaan jääluokkaan. Luokittamalla laiva johonkin yleisesti hyväksytyyn jääluokkaan todistetaan laiva kykeneväksi operoimaan jääluokan kuvailemissa olosuhteissa. Luokituslaitokset myöntävät laivalle jääluokan, kun se on rakennettu kyseisen jääluokan vaatimusten ja määräysten mukaisesti. Jääluokat asettavat määräyksiä rungon rakenteelle, koneistolle ja propulsiolaitteistolle. Usein myös vähimmäisteho- tai suorituskykyvaatimus on esitetty. Lisäksi vaatimuksia voi olla muille talvimerenkulun kannalta olennaisille ominaisuuksille, kuten kriittisten alueiden jäätyminen estolle ja navigaatiojärjestelmille. Luokituslaitosten lisäksi jotkin lippuviranomaiset antavat säädöksiä omilla aluevesillään liikkuville laivoille. (Riskä 2011, 32-37.)

2.1 Jäävahvistettavat rakenteet

Jääluokkasäännöissä laiva jaetaan alueisiin, joille jäävahvistus vaaditaan. Yleisesti määrätään jäävyö, joka ylittää ylemmän vesiviivan yläpuolelle ja alemman vesiviivan alapuolelle. Vaadittava jäävahvistus sijoittuu pääasiassa jäävyölle. Käytettävästä jääluokasta riippuen varsinaisen jäävyön alapuolisetkin alueet saattavat tarvita vahvistusta. Luokituslaitokset antavat jäävahvistettaville rakenteille mitoitusohjeita, jotka määräävät vaadittun vähimmäislujuuden. Vaadittuun lujuuteen vaikuttaa usein laivan koko, uppouma ja konetehto. Vahvistettavat rakenteet ovat pääasiassa laivassa normaalistikin olevia rakenteita, joiden lujuutta kasvatetaan.

Yleensä normaalien rakenteiden lisäksi asennetaan välikaaret eli jääkaaret. Välikaaret puolittavat paikallisen kaarivälin, jolloin viivakuorma jakautuu useammalle kaarelle. Samasta syystä poikittaiskaaritus on suositeltava kaaritustapa. Suuret laivat saattavat kuitenkin saada käytetyistä jääsäännöistä riippuen painohyötyä pitkittäiskaarituksesta keskilaivan alueella. Pitkittäiskaaritus voi tulla kyseeseen myös, mikäli luokituslaitoksen pituuslujuusvaatimuksen täyttäminen poikittaiskaarituksella osoittautuu haastavaksi. Vaadittuun kaaren lujuuteen vaikuttaa laskennallisen jääpaineen lisäksi merkittävästi myös

kaaren jänneväli. Jännevälin lyhentämiseksi usein asennetaan jäävyön alueelle jää-stringeri. Jää-stringeri sijoitetaan ylemmän- ja alemman jäävesiviivan väliin, jäävyölle, jolloin se vastaanottaa myös jääkuormia. (Eronen, H 27.2.2017.) Rungon jäävahvistettavat rakenteet on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Laivan jäävahvistettavat rakenteet.

Laidoitukseen lisätään aina korroosiolisä, sillä meriveden aiheuttama korrosio kuluttaa laidoituslevyä huomattavasti. Laivan operointiprofiili vaikuttaa suuresti laidoituksen kulumiseen. Jäänmurtajan avustuksella kulkevan kauppalaivan kuluma on pienempää kuin varsinaisen jäänmurtajan. 1A Super -luokan laivojen keulan laidoituksen kulumisen on 0,2–0,3 mm vuodessa. Suuritehoisilla jäänmurtajilla puolestaan kuluma on selvästi suurempaa, luokkaa 0,4–0,5 mm tai enemmän, vuodessa. Korroosion määrään vaikuttaa teräksen laatu ja siihen kohdistunut jääpaine. (Tsoy 1999, 13.)

Jään hankauksesta johtuva kitka luo merkittävän osan laivan jäävastuksesta. Korroosiota ja kitkaa vastaan on kehitetty erinäisiä pinnoitusmateriaaleja. Näistä yleisimpiä ovat Inerta160-tyyppiset, epoksipohjaiset kulutuksenkestomaalit. Hyvän kulutuksenkeston ja korroosiosuojan lisäksi Inerta160-pinnoitteen pinnankarheus on pieni, mikä johtaa pieneen kitkaan ja jäävastuksen vähenemiseen. Toinen yleisesti hyväksytty korroosionestomenetelmä on compound-levyn käyttö jäävyön alueella. Compound-levyssä laidoituslevyn uloin, noin 2 mm kerros on ruostumatonta terästä. Pinnankarheudeltaan compound-levy on hieman parempi kuin Inerta160. Mittaukset ovat osoittaneet, että compound-levyn pinnanlaatu paranee hieman ajan myötä, jään hioessa levyn pintaa. Compound-levy on huomattavasti kalliimpi ratkaisu kuin Inerta160, ja sitä onkin käytetty ainoastaan varsinaisissa jäänmurtajissa. Compound-levy tarjoaa suojan laivan koko elin-

iälle, kun Inerta160-maalauksesta noin 50 % tulee uusia 4–5 vuoden välein. Edellä mainittujen korroosionestomenetelmien lisäksi käytetään tarpeen vaatiessa katodista suojausta. (Liukkonen & Mäkinen 1994.) Luokituslaitosten säännöt ottavat edellä mainitut ehkäisy menetelmät huomioon pienempänä vaadittuna korroosiolisänä.

2.2 Jäissä suoriutuminen

Laivan suorituskyky jäissä on kompromissi avovesisuoriutumisen kanssa. Hyvin jäätä murtava runkomuoto kasvattaa avovesivastusta (Eronen 2017, 6). Laivan jäävahvistus kasvattaa laivan painoa, mikä puolestaan myös kasvattaa laivan kulkuvastusta. Nopeuden ylläpitäminen jäissä vaatii myös enemmän konetehoa kuin avovedessä, joten koneiston hankinta- ja käyttökustannukset ovat korkeammat. Laivan jäävahvistuksen taso ja jäissä suoriutuminen tulee suunnitella huolellisesti juuri laivalle suunnitellun operointiprofiilin mukaan.

Jäissä kulkevan laivan suunnitteluun vaikuttaa useita tekijöitä, jotka tulee ottaa huomioon. Laivan suunniteltu operointiprofiili ja toiminta-alue ovat oleellisia. Samallakin alueella jääolosuhteet vaihtelevat paljon talven aikana ja vuosien välillä (Kujala ym. 2007, 2). Perämerellä operoivan laivan ei tarvitse kestää monivuotisesta jäästä aiheutuvia kuormia, kun taas arktisilla alueilla operoivalle laivalle nämä ovat oleellisia jäävahvistuksen kannalta. Perämerellä mahdollisesti tarvittava apu on myös huomattavasti lähempänä kuin syrjäisillä arktisilla alueilla. (Eronen 2017, 2-3.)

Jäissä kulkemisen osalta tyypillisen arktisille alueille suunnitellun laivan suunnittelussa otetaan yleensä huomioon seuraavia asioita (Eronen 2017, 3-5):

- tasaisen jään paksuus, jossa laiva kykenee etenemään itsenäisesti 1,5 – 3 solmun nopeudella
- nopeudet eri paksuisissa jäissä
- nopeus murretussa jäärännissä
- kyky murtautua jäärännistä
- jäävalliin murtokyky
- jäissä ohjailtavuus
- peruutuskyky jäissä.

Mikäli laivaa ei luokitella suoraan jonkin jääluokan vaatimusten mukaan, on jäävahvistuksen oikean lujuustason määrittäminen erittäin tärkeää. Lujuustason suunnittelussa lähtökohtana on laivan runkoon kohdistuvat maksimikuormitukset ja näiden toistumistiheys, sekä sallittu vaurio. (Kujala ym. 2007, 1-2.) Tilastollisesti harvoin toistuvan maksimikuorman aiheuttama lievä muodonmuutos laidoituslevyissä on yleisesti hyväksyttävää.

Hyvin tunnetuille alueille, jotka ovat vakituisesti liikennöityjä ja joiden jääolot tunnetaan hyvin, kuten Itämeri, on tarvittavan jäävahvistuksen tason selvittäminen huomattavasti helpompaa. Tällöin kyseeseen tulee kokemuspohjaisen tiedon hyödyntäminen ja sopivan jääluokan valitseminen ja laivan jäävahvistuksen mitoitus tämän määräysten mukaisesti. (Eronen 2017, 3-4.)

2.3 Arktinen merenkulku

Ilmaston lämpenemisen myötä arktinen jäätikkö sulaa. Vuodesta 1970, kun napajäätiköiden ulottuvuutta alettiin seuraamaan satelliittikuvien avulla, on arktisen napajäätikön pinta-ala pienentynyt keskimäärin 50 500 neliökilometriä vuodessa. (NASA, 2015.) Arktisen napajäätikön pinta-ala tammikuussa 2017 oli noin 13,38 miljoonaa neliökilometriä (NSIDC, 2017). Tämä nopeasti tapahtuva muutos avaa uusia mahdollisuuksia kauppamerenkulkuun. Laivaliikenne arktisilla alueilla onkin lisääntynyt, ja sen uskotaan lisääntyvän entisestään (Yliskylä-Peuralahti ym. 2016, 9). Arktiset väylät ovat vielä suurimman osan vuodesta jäässä, eikä niitä kannata taloudellisista syistä pitää auki jäänmurtaajien avulla. Kesäkaudellakin kauppamerenkulun mahdollistamiseksi jäänmurtaajien avustus on pakollista.

Tärkeimmät arktisilla alueilla sijaitsevat väylät ovat Koillisväylä, Luoteisväylä ja Arctic Bridge. Koillisväylä kulkee Tyyneltä mereltä Venäjän ja Norjan rannikkoa pitkin Atlantin valtamerelle. Luoteisväylä puolestaan kulkee Kanadan ja Alaskan rannikkoa pitkin Tyyneltä mereltä Atlantin valtamerelle. Arctic Bridge yhdistää Murmanskin kaupungin Venäjällä ja Canadian Churchillin. (Hubert & Raspotnik 2012, 282.)

Tulevaisuudessa arktisen jään entisestään sulaessa on tavoite avata uusi Transpolar Sea Route, joka kulkee suorinta tietä Pohjoisnavan yli, Tyyneltä mereltä Atlantin valtamerelle. Akateemisissa piireissä ja tutkimuksissa on saatu eriäviä mielipiteitä TSR:n kannattavuudesta lähitulevaisuudessa. Epäilyt ovat kohdistuneet pääasiassa jäätilanteen kehitykseen. Todennäköistä on kuitenkin, että kahden vuosikymmenen sisällä, ainakin

kesäaikainen navigointi TSR:ää pitkin olisi mahdollista. Koillis- ja Luoteisväylillä nähdään yleisesti suurin taloudellinen potentiaali, vaikka TSR lyhentäisi välimatkaa Aasian ja Länsimaiden välillä huomattavasti. Arktisilla väylillä, etenkin TSR:llä on mahdollisuus mullistaa kauppamerenkulku Aasian ja länsimaiden välillä. Arktisten väylien laajamittainen käyttöönotto ei kuitenkaan ole kiinni pelkästään suosiollisesta jäätilanteesta. Maailman taloudellisella ja poliittisella kehityksellä kaupankäynnin suhteen on myös suuri merkitys. (Hubert & Raspotnik 2012, 281-284.)

Arktisilla alueilla operoitaessa turvallisuus- ja ympäristöseikkoihin tulee kiinnittää erityistä huomiota. Arktiseen merenkulkuun lasketaan perinteisesti kaikki jääpeitteiset merialueet ja Kanadan, sekä Pohjois-Amerikan suuret järvet. (Riskä, 2001).

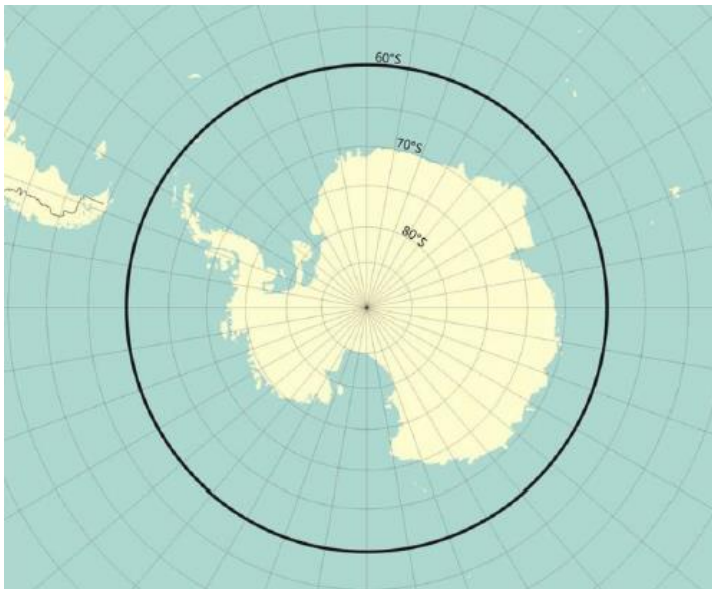
Arktinen merenkulku tapahtuu yleisesti syrjäisillä alueilla, joissa pelastus- ja huoltoinfrastruktuuri on kaukana. Nopeasti muuttuvat sääolot, jäävuoret ja monivuotinen jää aiheuttavat haasteita laivaliikenteelle. Kaikilta arktisilta alueilta ei myöskään ole täydellisiä merikarttoja tai jäätietoja. Arktinen ympäristö on myös erityisen herkkä saasteille, näin ollen laivojen kasvihuonepäästöt ja laivaliikenteen tarvitsema infrastruktuuri ovat suuri riski arktiselle luonnolle. (Yliskylä-Peuralahti ym. 2016, 9.)

Varmistaakseen asianmukaisen ja ympäristöystävällisen liikennöinnin arktisilla alueilla, on IMO hyväksynyt vuonna 2015 Polaarikoodin, joka astui voimaan 1.1.2017. Polaarikoodin tarkoitus on varmistaa turvallinen ja ympäristöystävällinen merenkulku arktisilla alueilla. Polaarikoodi asettaa yleisiä säädöksiä tiukempia vaatimuksia turvallisuusjärjestelyille, miehistön pätevyydelle ja laivan päästöille. Polaarikoodi velvoittaa kauppalaivoja. Sota- tai viranomaislaivoja, sekä muuta toimintaa harjoittavia laivoja määräykset eivät suoraan koske. (Yliskylä-Peuralahti ym. 2016, 13.) Polaarikoodin soveltamisalueet on esitetty kuvissa 2 ja 3.



Kuva 2. Polaarikoodin soveltamisalue pohjoisnavan ympärillä. (Yliskylä-Peuralahti ym. 2016, 10.)

Kuten kuvasta 2 nähdään, rajoittuu polaarikoodin soveltamisalue arktisille alueille, joilla esiintyy monivuotista jäätä. Polaarikoodin soveltamisalueen ulkopuolella tavataan vain ensimmäisen vuoden jäätä. Esimerkiksi Itämerellä ja Pohjois-Amerikan suurilla järvillä esiintyy ensimmäisen vuoden jäätä, eivätkä ne kuulu polaarikoodin soveltamisalueeseen.



Kuva 3. Polaarikoodin soveltamisalue Etelännavan ympärillä. (Yliskylä-Peuralahti ym. 2016, 10.)

2.4 Talvimerenkulku Itämerellä

Itämeren alue on eräs maailman vilkkaimmin liikennöidyistä merialueista. Sen alueella tapahtuu noin 8 % maailman kauppamerenkulusta. Itämerellä purjehtii samanaikaisesti noin 2000 laivaa. (HELCOM, 2010, 6.) Itämerellä esiintyy vain ensimmäisen vuoden jäätä. Jäätilanne vaihtelee talvien välillä suuresti, tavallisena talvena noin 40 % Itämeren 422 000 neliökilometrin pinta-alasta jäätyy. Leudoimpina jäätalvina ainoa merkittävä jäätyminen tapahtuu Perämeren alueella. Kovempina jäätalvina Perämeri, Suomenlahti ja kaikki Itämeren rannikot ovat jäässä. (Ilmatieteenlaitos, 2010.)

Itämeren talvimerenkulun järjestelmä sisältää kauppalaivoja avustavat jäänmurtaajat, jäävahvistetut kauppalaivat, jäätilanteen seurannan ja viranomaisten toimet. Lähtökohtaisesti kauppalaivat saavat tarvittaessa jäänmurtaajan avustusta jäissä kulkemiseen. Viranomaiset asettavat liikennöintirajoituksia jäätilanteen mukaan. Rajoitukset ottavat huomioon laivan jääluokan ja kantavuuden. (Riska 2001.)

Suomessa väylämaksut on sidottu jääluokkiin. Väylämaksu määräytyy kertomalla laivan nettovetoisuus määrättyllä yksikköhinnalla. Yksikköhinnat eri jääluokille on esitetty taulukossa 1. Risteily- ja suurnopeusaluksille sekä aluksille, joilla ei ole omaa kuljetuskoneistoa, on määrätty kiinteät yksikköhinnat. (Tulli 2017.) Yksikköhinta on tehty riippuvaiseksi jääluokasta koska pienemmällä jääluokalla varustettu laiva vaatii useammin jäänmurtaajan avustusta (Riskä & Kämäräinen, 2011, 3). Tunnettujen luokituslaitosten jääluokille ja FSICR-jääluokille löytyy vastaavuustaulukko, jolla yksikköhinta määrätään, mikäli laiva ei ole luokitettu FSICR:n mukaan. Yksikköhinnan muutos siirryttäessä korkeampaan jääluokkaan on merkittävä, mistä syystä vakituisesti Suomen ja Ruotsin aluevesillä ympärivuotisesti kulkevat laivat ovat enimmäkseen 1A Super -luokitettuja.

Taulukko 1. Yksikköhinnat (Tulli 2017).

Jääluokka	Lastialus (Yksikköhinta, €)	Matkustaja-alus (Yksikköhinta, €)
1A Super	0,470	0.625
1A	1.098	1,294
1B, 1C	2,578	2,358
II, III	4,381	4,169

3 SUOMALAIS-RUOTSALAISET JÄÄLUOKKASÄÄNNÖT

FSICR on kehitetty kauppalaivojen jäävahvistuksen näkökulmasta oletuksella, että jäänmurtajan avustus on saatavilla tarpeen mukaan. Säännöt on kehitetty laivoille, jotka kulkevat ensimmäisen vuoden jäässä. Kehityksessä on otettu huomioon, että Itämeri on vain osan vuodesta jäässä. Jäävahvistuksen taso on haluttu pitää kohtuullisena, eikä liian raskaana, sillä Itämerellä talvisin operoivat laivat joutuvat kesäkauden aikana kilpailemaan jäävahvistamattomien laivojen kanssa. Liiallinen jäävahvistus kasvattaisi laivan painoa ja heikentäisi kilpailukykyä. (IACS 2006, Liite 3.)

Jääsäännöt ovat muodostuneet pitkän kokemusperäisen kehitystyön tuloksena. Jääsääntöjä on päivitetty ja muokattu aina uuden tiedon myötä. Sääntöjen asettamaa lujuusvaatimustasoa testaavat joka talvi Suomen satamissa asioivat noin 10000 laivaa (IACS 2006, Liite 3). Säännöt antavat vaatimuksia laivan teräsrakenteelle, koneistolle ja suoriutumiskyvylle jäissä.

FSICR on pitkään ollut standardi ensimmäisen vuoden jäänmurrossa. Suurin osa luokituslaitoksista on omaksunut FSICR:n sellaisenaan tai hieman muunneltuna omaan käyttöönsä ensimmäisen vuoden jäissä kulkevien laivojen luokitukseen. (Riskä & Kämäräinen 2011, 2.)

Tässä luvussa viitataan pääsääntöisesti suomalais-ruotsalaisiin jääluokkasääntöihin (TRAFI 2010), ellei muuta lähdeä ole mainittu.

3.1 Kehitys

Ensimmäiset suomalaiset jääsäännöt annettiin 1890, kun talvinavigoinnin katsottiin olevan taloudellisesti merkittävää. Nämä säännöt sisälsivät lähinnä vaatimuksia laivan varustelusta ja yleis- sekä teräsjärjestelystä. 1920 annettiin niin kutsutut prosenttisäännöt, joissa esimerkiksi laitallevyn tapauksessa avovesisäännön vaatimaan paksuuteen lisättiin 45 %. Jääluokkien sitominen väylämaksuihin tapahtui 1932, jolloin esiteltiin kolme jääluokkaa, 1A, 1B, 1C, ja kaksi ei jäissä kulkeville laivoille tarkoitettua luokkaa, II ja III. Luokka 1A Super tuotiin sääntöihin 1965. Seuraavan kerran säännöt saivat suuren päivityksen 1971, kun suuren jäävauriotutkimuksen myötä saatiin ensimmäistä kertaa suun-

taa antavaa tietoa jääpaineen suuruudesta. (Riska & Kämäräinen 2011, 5-8.) Nämä olivat ensimmäiset säännöt, joiden pohjana oli laskennallinen jääkuorma (Riska 2001). Samalla syntyivät suomalais-ruotsalaiset jääsäännöt, kun Suomi ja Ruotsi päättivät suorittaa Perämeren ja Selkämeren laivaliikenteen vaatiman jäänmurron yhteistyönä. Kolmas suuri muutos tuli 1985 kun jääpaineen kuormitusalan korkeutta pienennettiin ja tehtiin jääluokasta riippuvaiseksi. Rungon mitoituksessa siirryttiin samalla suoraan elastiseen malliin (Riska 2001.) Tehovaatimus muutettiin jäissä etenemisen suoritusvaatimukseksi 1999. Laivan tulee kyetä pitämään viiden solmun nopeus luokkansa mukaisessa jäärännissä. Uusimmat päivitykset ovat 2006 ylä- ja alajäävesiviivojen määrittäminen ja runkosääntöjen laskuvakioiden päivittäminen 2010. (Riska & Kämäräinen 2011, 5-8.)

3.2 Jäävahvistus

FSICR:n vaatima lujuustaso on johdettu Itämerellä operoinille tyypillisistä skenaarioista. Lähtökohtina ovat törmäys tasaisen jään reunaan, törmäys jäärännin reunaan saattolanteessa ja kerrostuneen jäävallin rikkominen. (IACS 2006, Liite 3.)

Suorituskykyvaatimukset ovat jääluokkakohtaisia, jokaiselle jääluokalle on esitetty tietty murretun jäärännin paksuus, jossa laivan tulee kyetä pitämään viiden solmun nopeus. Laivan oletetaan kulkevan tasaisessa jäässä, jonka paksuus ei ylitä arvoa h_0 (TRAFI 2010). Tasaisen jään paksuuden jossa laivalla on turvallista operoida, katsotaan kuitenkin olevan hieman pienempi kuin arvon h_0 mukainen. Esimerkiksi 1A Super -luokan laivan katsotaan pystyvän operoimaan turvallisesti 0,8 m paksussa tasaisessa jäässä. (IACS 2006.) Jään kuormitusalan korkeus, h on myös jääluokkakohtainen, sillä kuormitusalan korkeuden katsotaan olevan riippuvainen tasaisen jään paksuudesta, missä laiva operoi (Riska & Kämäräinen 2011, 5-8). Yllä esitetyt suureet on esitetty taulukossa 2. Taulukossa esitettyjen jääluokkien lisäksi on kaksi luokkaa ei-jäävahvistetuille laivoille.

Taulukko 2. Tasaisen jään paksuudet, kuormituskorkeus ja suorituskykyvaatimus (TRAFI 2010).

Jääluokka	h_0	h	Murretun jäärännin paksuus
1A Super	1,0 m	0,35 m	1,0 m + 0,1 m jäänyt pintakerros
1A	0,8 m	0,30 m	1,0 m
1B	0,6 m	0,25 m	0,8 m
1C	0,4 m	0,22 m	0,6 m

Säännöt jakautuvat kolmeen osaan, suorituskykyvaatimuksiin, laivan rungon teräsrakenteen vaatimuksiin ja koneiston vaatimuksiin. Pääkomponentit, joiden mitoittamiseen esitetään vaatimuksia ovat:

- koneteho
- laidoitus
- kaaret
- jää-stringerit
- kehyskaaret
- potkuri/Ruoripotkuri
- peräsin
- akselijohto

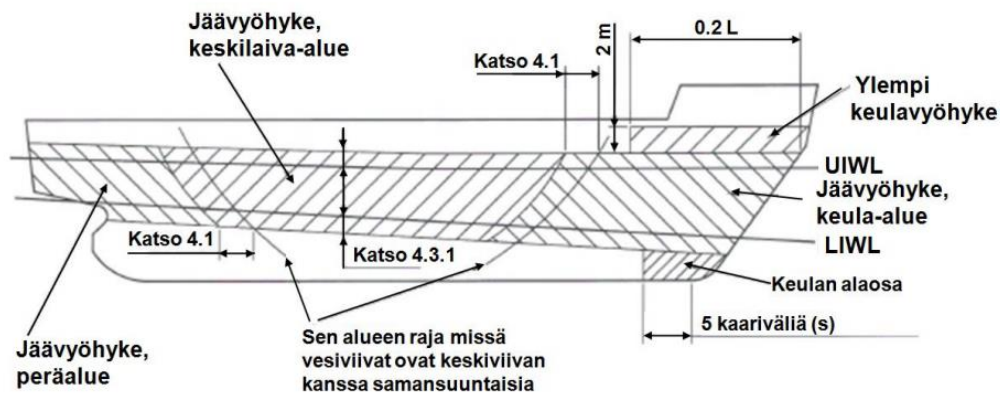
Lisäksi annetaan erinäisiä materiaali- ja toteutustapavaatimuksia.

Rajatila, jota paikallislaskennassa käytetään, on myötöraja, joten laskut ovat verrattain yksinkertaisia PC-luokan vastaaviin verrattuna, missä rajatila on plastisella alueella. Suunnitteluskenaario laidoitukselle ja kaaritukselle on, että myötöraja saavutetaan josakin kohtaa komponenttia. Käytännön jääkuormamittaukset ovat kuitenkin osoittaneet, että suunnittelujääkuorma saavutetaan melko usein ja FSICR:n mukainen jäävahvistus hyödyntää rakenteen plastista reserviä, vaikka suunnittelun lähtökohta on elastinen myötöraja. (IACS 2006, Liite 3.)

3.2.1 Rungon alueet ja jääpaine

Jääpaine vaikuttaa eri voimalla rungon eri kohtiin, joten runko on jaettu pituussuunnassa kolmeen alueeseen, keulaan, keskilaivaan ja perään. Alueiden rajaukset muodostuvat laivan päämittojen ja runkomuodon perusteella. Jäävahvistettavat kaaret ja laidoituslevy jatkuvat aluekohtaisesti yli ylemmän- ja ali alemman jäävesiviivan, kaarituksen ulottuman ollessa suurempi molempiin suuntiin. Jäävyön pystysuuntainen ulottuvuus on alue- ja jääluokkakohtainen.

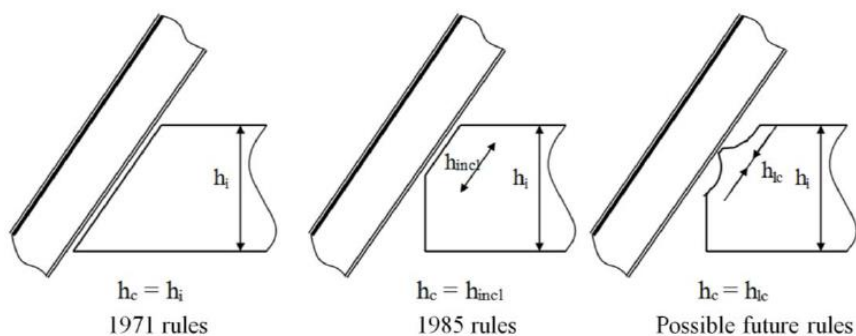
1A Super -luokan laivoille vaaditaan erillinen keulan alaosan jäävahvistus. 1A ja 1A Super luokkien laivoille, joiden avovesinopeus on 18 solmua tai enemmän, vaaditaan ylemmän keulavyöhykkeen jäävahvistus. Alueet on esitetty kuvassa 4.



Kuva 4. Rungon alueet (TRAFI 2010).

Aiemmin esitelty jääpaineen kuormitusalan korkeus, h on jääluokkakohtainen vakio, tämä kuvaa korkeutta millä jää vaikuttaa laivan runkoon jäänmurtotilanteessa. Säännöt eivät määrittele kuormitusalan pituutta aluekohtaisesti, vaan se riippuu mitoitettavasta rakenteesta ja kaaritusyypistä. Kuormitusalan pituutta kuvataan arvolla l_a .

Kuormitusalan korkeuden kehitys on esitetty kuvassa 5. Aluksi korkeuden ajateltiin olevan koko jään paksuuden korkuinen, mutta myöhemmät tutkimukset ovat osoittaneet jään murtumismekanismin muodostavan kapean alueen, joka kohdistaa viivakuorman laivan runkoon. Nykyisen tiedon pohjalta arvioidaan, että tulevaisuudessa viivakuorman korkeutta pienennetään vielä entisestään. Myös jään lämpötilan ja laivan etenemisnopeuden on havaittu vaikuttavan jään murtumismekanismiin. Mikäli jää on verrattain lämmintä, tai laivan etenemisnopeus on hyvin alhainen, on kuormitusala korkeampi. (Riskä & Kämäräinen 2011, 6.)



Kuva 5. Kuormituskorkeuden kehitys (Riskä & Kämäräinen, 2011, 6).

Säännöissä on päädytty käyttämään vakio jääpainetta $p_0 = 5.6 \text{ MPa}$, koska Itämeren jään lujuusominaisuudet eivät juurikaan muutu talven aikana meren eri alueilla (Riskä & Kämäräinen 2011, 8). Jääpaine lasketaan jokaiselle rungon alueelle erikseen. Laskennassa vakio jääpainetta kerrotaan arvoilla c_d , c_p ja c_a . Arvo c_p on jääluokkakohtainen rungon aluekohtainen arvo. Kerroin tuottaa keula-alueelle suurimman- ja peräalueelle pienimmän jääpaineen. Arvo c_a ottaa huomioon todennäköisyyden, että tarkasteltava alue on koko pituudeltaan jääpaineen alaisena.

Vuoden 1971 jääsääntöihin johtanut suuri jäävauriotutkimus antoi osviittaa, että laivan koko vaikuttaa siihen kohdistuvaan jääpaineeseen. Laivan ja jään törmäysmekanismien analysoinnin mukaan laivan uppouma ja nopeus vaikuttavat törmäysvoimaan. Tämä on johtanut arvon k ja suoraan tästä riippuvaisen arvon c_d käyttöön. Kaavassa 1 esitetty arvo k ottaa huomioon laivan uppouman ja konetehon. (Riskä & Kämäräinen 2011, 8.)

Kaava 1. Arvo k (TRAFI 2010).

$$k = \frac{\sqrt{\Delta \cdot P}}{1000}$$

3.2.2 Laidoitus

Laidoituksen ainevahvuuslaskelmissa käytettävät kaavat vastaavat hyvin autokansien laskelmissa käytettäviä kaavoja, joissa paine jakautuu renkaiden kautta. Säännöt esittävät omat kaavat pitkittäis- ja poikittaiskaaritetuille laivoille. Laskettaessa levynpaksuutta poikittaiskaaritetuille laivoille, lasketaan arvo $p_{PL} = 0.75 \cdot p$, jota kutsutaan tasaisen levyn paineeksi. Se ottaa huomioon kaarilla jäykistetyin levykentän käyttäytymisen kaariväliä pidemmän kuormituksen alla. Tällöin levyn jousaessa suuntautuu suurempi osa kuormasta kaarille ja kaarivälin keskellä levykentän kokema paine on laskennallista painetta pienempi. (Riskä & Kämäräinen 2011, 10-17.)

FSICR:ssä lopullinen levynpaksuus koostuu efektiivisestä levynpaksuudesta ja korroosiolisästä, t_c . Oletusarvona laidoituksen korroosiolisä on 2 mm, mutta käytettäessä kulumista ehkäisevää pinnoitetta, voidaan pienempikin arvo hyväksyä. Vaikka säännöt mahdollistavat alle 2 mm korroosiolisän käytön, ei tätä käytännössä kuitenkaan hyväksytä (Eronen, H. 7.3.2017).

3.2.3 Kaaritus

Kaarien ainevahvuuslaskennassa käytettävät kaavat perustuvat yksinkertaiseen palkki-teoriaan (Riskä & Kämäräinen 2011, 10). Arvolla m_0 otetaan huomioon reunaehdot eli kaaren kiinnitys ja tuenta. Pitkittäis- ja poikittaiskaarituksille on omat laskukaavansa. Molemmissa lasketaan vaadittava taivutusvastus Z ja vaadittava leikkauspinta-ala A .

Säännöt vaativat tapauskohtaisen minimipaksuuden kaaren uumalle. Lisäksi on esitetty vaatimuksia kaarien hitsauksesta, tukemisesta ja päiden kiinnittämisestä.

4 POLAR CLASS -JÄÄLUOKKASÄÄNNÖT

International Association of Classification Societies julkaisi Polar Class -jääluokkasäännöt vuonna 2006. Ennen tätä kaikilla luokituslaitoksilla oli ollut omat jääluokkasääntönsä arktisilla alueilla kulkeville laivoille. Polar Class -jääsääntöjen kehitys aloitettiin IACS:n toimesta 1996. Kehitykseen osallistui IACS:n henkilöstön lisäksi luokituslaitoksia, lippuvaltioita ja akateemisia tahoja (IACS, 2006). Motivaatio PC-sääntöjen kehitykseen oli luoda yhden jääsäännöt, jotka korvaisivat luokituslaitosten omat säännöt ja näin ollen yhtenäistäisivät jäissä kulkeviin laivoihin kohdistuvia vaatimuksia (Riskä 2011, 34).

PC-sääntöjen kehityksessä otettiin huomioon jäissä kulun nykyiset ja tulevat tarpeet, erityisesti kiinnitettiin huomiota arktisen merenkulun haasteisiin (IACS 2006). Taulukossa 3 on esitetty PC-jääluokat. Mikäli rakenteelliset vaatimukset täyttyvät, niin PC7-luokan katsotaan vastaavan FSICR 1A-luokkaa ja PC6-luokan katsotaan vastaavan 1A Super-luokkaa.

Taulukko 3. Polar Class -jääluokat (IACS 2016).

Polar Class	Toimintakuvaus
PC 1	Ympärivuotinen toiminta kaikilla polaarivesillä
PC 2	Ympärivuotinen toiminta kohtuullisissa monivuotisen jään oloissa
PC 3	Ympärivuotinen toiminta toisen vuoden jäässä, mikä voi sisältää osittain monivuotista jäätä
PC 4	Ympärivuotinen toiminta paksussa ensimmäisen vuoden jäässä, mikä voi sisältää osittain vanhaa jäätä
PC 5	Ympärivuotinen toiminta keskipaksussa ensimmäisen vuoden jäässä, mikä voi sisältää osittain vanhaa jäätä
PC 6	Kesä/kevät toiminta keskipaksussa ensimmäisen vuoden jäässä, mikä voi sisältää osittain vanhaa jäätä
PC 7	Kesä/kevät toiminta ohuessa ensimmäisen vuoden jäässä, mikä voi sisältää osittain vanhaa jäätä

PC-säännöt eivät erittele säännöissä suurinta tasaisen jään paksuutta, missä kunkin luokan laiva voi operoida. PC6-luokan laivojen katsotaan kuitenkin kykenevät operoimaan hieman haastavammissa jääoloissa kuin 1A Super -luokan laivojen. (IACS 2016, 7-11.)

Tässä luvussa viitataan pääsääntöisesti Polar Class -jääluokkasääntöihin (IACS 2016), ellei muuta lähdettä ole mainittu.

4.1 Plastinen mitoitustapa

Plastisen mitoitustavan käyttö on suurin eroavaisuus PC:n ja FSICR:n välillä. PC:n plastinen mitoitustapa antaa paremman ainevahvuusjakauman rungon teräsrakenteelle, joka puolestaan vastaanottaa paremmin suuria kuormia (Daley ym. 2001, 2).

Plastista mitoitustapaa käytettäessä rakenteellisen suunnittelun lähtökohdan valinta on huomattavasti haastavampaa kuin elastisessa suunnittelussa. Elastisessa suunnittelussa myötöraja on tarkkaan tiedossa ja tämä on suunnittelun lähtökohta. Plastisessa suunnittelussa suunnittelun lähtökohta voi sijoittua mihin tahansa myötörajan ja rakenteen lopullisen pettämisen väliin.

PC-sääntöihin valitut rakenteen plastiset pettämismekanismit ovat yksinkertaistettuja, eivätkä täysin hyödynnä plastisen suunnittelun mahdollisuuksia. Todellisuudessa yhtälöt kuvaavatkin huomattavaa plastista jännitystä, mutta ei kuitenkaan suurta plastista venymää tai muodonmuutosta. (Daley ym. 2001, 2.)

4.2 Jäävahvistus

PC-säännöt ottavat kantaa alla listattuihin päärakennekomponentteihin.

- Laidoitus
- Kaaret
- Potkuri/Ruoripotkuri
- Akselijohto

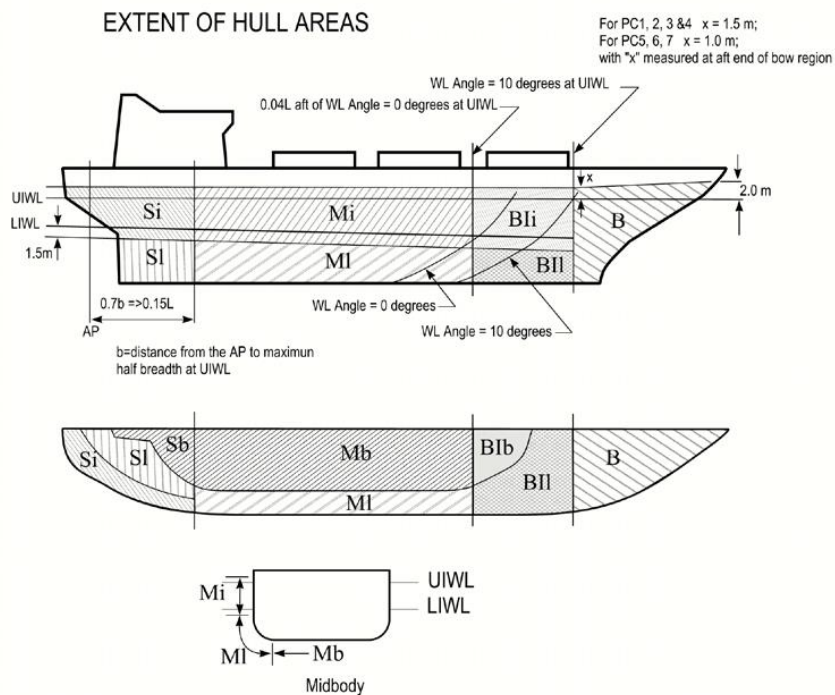
Kehyskaaret ja jää-stringerit tulee mitoittaa luokituslaitoksen ohjeiden mukaisesti. Materiaaleille ja erinäisille toteutustavoille annetaan myös vaatimuksia.

Rungon jäävahvistuksen lähtökohtana on keulan törmäys jäähän. Oletamus on, että laiva rikkoo jään ja jatkaa kulkuaan. Tästä on johdettu rungon kuormitusmalli, jossa runkoon kohdistetaan tasainen paine suorakaiteen muotoiselle alueelle. Vaadittava lujuus-taso on johdettu oletetusta suurimmasta, kerran vuodessa tapahtuvasta jääkuormasta. (IACS 2006, Liite 5)

FSICR:stä poiketen PC-säännöt antavat myös vaatimuksia laivan pitkittäislujuudelle. Pitkittäislujuutta laskettaessa otetaan huomioon avovesikuormat ja ramming-tilanteen aiheuttama taivutus laivan runkoon.

4.2.1 Rungon alueet

Runko jaetaan pituussuunnassa neljään ja pystysuunnassa kolmeen alueeseen. Neljäs pituussuuntainen alue, jota FSICR:ssä ei ole, on keulan muutosalue, joka sijaitsee keulan ja keskilaivan välissä. Keula-alueella ei ole erikseen pystysuuntaisia alueita. Kaikissa jääluokissa ei vahvisteta pohja- ja lower-aluetta. Rungon aluejako on esitetty kuvassa 6.



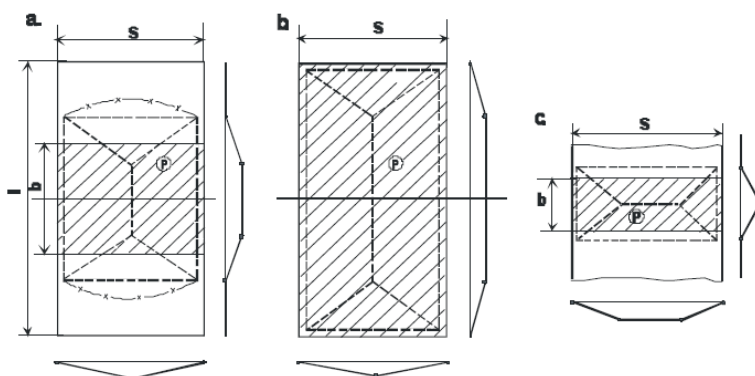
Kuva 6. Rungon alueet (IACS 2016).

4.2.2 Jääpaine

Jääpaineen ja sen kuormitusalan laskeminen eroaa FSICR:n vastaaviin verrattuna selkeästi. FSICR:stä eroten jääpaine ja sen kuormitusala on keulalle ja keulan muutosalueelle todellisen keulamudon funktioita. PC-säännöissä on eri laskukaavat jäätä murta-ville keulamudoille ja ei jäätä murtaville keulamudoille. Erottelu tehdään keulamudon kulmien perusteella. Muille alueille jääpaine ja kuormitusala ovat taulukkoarvoihin ja laivan uppoumaan perustuvien arvojen funktio. Jääpainetta ja sen kuormitusalaa laskettaessa käytetään useita jääluokkakohtaisia taulukkoarvoja, kuten pienelle alueelle kohdistuvan huippukuorman huomioon ottavaa PPF-arvoa, joka on kaaritus-systeemistä ja laske-
kennan kohteena olevasta elementistä riippuvainen.

4.2.3 Laidoitus

Laidoituslevyn muodonmuutosmekanismit, joita on käytetty PC-sääntöjen laidoituslevyn laskentakaavojen kehityksessä, on esitetty kuvassa 7. Numeerisen analyysin perusteella, syntyvän muodonmuutoksen on todettu olevan korkeudeltaan noin siihen kohdistuneen jääpaineen kuormitusalan korkeuden korkuinen. Laidoituksen laskennassa käytettävät kaavat on johdettu tästä olettamuksesta. (Daley ym. 2001, 3).



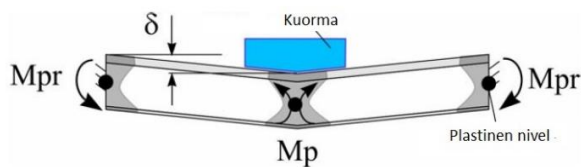
Kuva 7. Levyn plastinen muodonmuutos (Daley, 2002).

Laitalevyn paksuus koostuu minimilevynpaksuudesta t_{net} ja korroosiolisästä t_s . Korroosiolisä on alue- ja jääluokkakohtainen, sen paksuuteen vaikuttaa myös mahdollinen kulumista ehkäisevän pintakäsittelyn käyttäminen. Nettolevyn paksuuden laskemiseen on

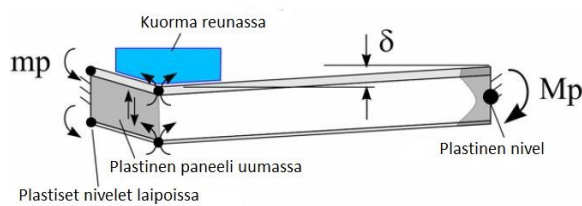
esitetty kolme kaavaa, yksi poikittaiskaaritukselle ja kaksi pitkittäiskaaritukselle, jotka otavat huomioon kaarivälin ja lasketun jääpaineen kuormitusalan korkeuden.

4.2.4 Kaaritus

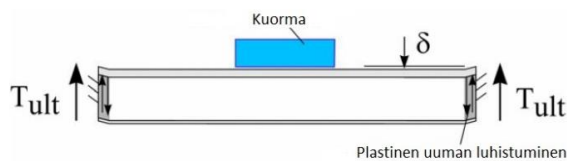
Kolme plastista rajatilaa valittiin edustamaan kaaritukseen kohdistuvia voimia, nämä rajatilat on esitetty kuvissa 8, 9 ja 10. Kaikki rajatilat pystytään johtamaan energiayhtälöillä, joissa tasapainotetaan sisäinen ja ulkoinen työ, ulkoinen työ on tässä tapauksessa jääkuorma (Daley ym. 2001, 2). Säännöissä käytetyt kaavat on johdettu näistä rajatiloista.



Kuva 8. Kolminivel luhistuminen



Kuva 9. Epäsymmetrinen leikkausluhistuminen



Kuva 10. Uuman luhistuminen

Kaarituksen laskentaan käytetyt kaavat ovat interaktiivisia leikkauksen ja taivutuksen suhteen. Kaavojen interaktiivisesta luonteesta johtuen suunnittelun voi toteuttaa monella eri tavalla. Hyvän lopputuloksen saaminen vaatii suunnittelijalta tietoa ja ymmärrystä kaavojen toimintaperiaatteesta ja mahdollisista poluista lopulliseen rakenteeseen. (Daley, 2002, 533).

Säännöissä lasketaan plastinen taivutusvastus Z_p ja leikkauspinta-ala A_w sekä minimivaatimukset Z_{pt} ja A_t , jotka laskettujen arvojen tulee ylittää. Maininnan arvoista on, että mikäli suunniteltu kaari on poikkileikkauspinta-alaltaan suurempi kuin mukaan laskettavan laidoituslevyn vastaava, niin lasketaan kaavalla 2 uusi plastinen neutraaliakseli Z_{na} . Tällöin myös todellinen plastinen taivutusvastus muuttuu, kaavalla 3. lasketaan plastinen taivutusvastus oletustapauksessa ja kaavalla 4. plastisen neutraaliakselin siirtymisen jälkeen.

Kaava 2. Siirtynyt plastinen neutraaliakseli (IACS 2016).

$$z_{na} = (100 \cdot A_{fn} + h_w \cdot t_{wn} - 1000 \cdot t_{pn} \cdot s) / (2 \cdot t_{wn}) \text{ [mm]}$$

Kaava 3. Plastinen taivutusvastus (IACS 2016).

$$Z_p = A_{pn} \cdot t_{pn} / 20 + \frac{h_w^2 \cdot t_{wn} \cdot \sin \varphi_w}{2000} + A_{fn} \cdot (h_{fc} \cdot \sin \varphi_w - b_w \cdot \cos \varphi_w) / 10 \text{ [cm}^3\text{]}$$

Kaava 4. Plastinen taivutusvastus neutraaliakselin siirtymisen jälkeen (IACS 2016).

$$Z_p = t_{pn} \cdot s \cdot (z_{na} + t_{pn} / 2) \cdot \sin \varphi_w + \left(\frac{((h_w - z_{na})^2 + z_{na}^2) \cdot t_{wn} \cdot \sin \varphi_w}{2000} + A_{fn} \cdot ((h_{fc} - z_{na}) \cdot \sin \varphi_w - b_w \cdot \cos \varphi_w) / 10 \right) \text{ [cm}^3\text{]}$$

Yleensä kevyin kaari saadaan mahdollisimman ohuella ja korkealla uumalla varustetulla profiililla. Korkeutta kuitenkin rajoitetaan lommahdusten estämiseksi kaavalla, joka ottaa huomioon kaaren uuman korkeuden, paksuuden ja käytettävän materiaalin myötörajan.

FSICR:stä poiketen PC-säännöissä kaikkiin sisäisiin rakenteisiin, kuten kaariin, tulee suunnitella vähintään 1 mm korroosiolisä, jonka sääntöjen kaavat ottavat huomioon.

5 TULOKSET

Kehyskaaret ja jää-stringerit jätettiin pois laskennasta koska PC-säännöt eivät anna niille mitoitusohjetta. Muuten laskennassa keskityttiin vain jäävahvistettavaan rungon komponentteihin.

FSICR:n osalta paikallislaskenta suoritettiin DNV Nauticus Hull -ohjelmistolla ja tulokset tarkastettiin pistokoeluontoisesti käsin laskemalla. Polar Class -sääntöjen paikallislaskuja varten jokaiselle laivan runkoalueelle luotiin oma laskentaohjelma. Lähtötietojen pohjalta ohjelma laskee jääpaineen kuormitusalan, jääpaineen, laitalevyn paksuuden korroosiolisällä ja ilman, sekä pienimmän standardi HP-profiilikoon, joka kyseiseen kohtaan voidaan kaareksi asentaa. Liitteessä 1 on esitetty periaatteellinen keula-alueen laskenta PC6 sääntölaskentaohjelmalla.

PC-säännöt eivät ota kantaa perälaivan ja perän olkien vahvistuksesta ruoripotkurilaitetta käytettäessä. Laivan kääntyessä jäissä ruoripotkurin avulla, pyrkii laivan perä työntymään kääntymissuunnan vastaiseen suuntaan, tämä aiheuttaa keskilaivan ja perän olkapäihin huomattavan suuria voimia (Eronen H, 11.1.2017). Näin ollen sääntöjen mukainen perälaivan jäävahvistus on riittämätön. Tästä syystä toimittiin mallilaivan toteutustavan ja yleisesti luokituslaitostenkin hyväksymän tavan mukaisesti, perälaiva mitoitettiin keulalaivan jääpainetta ja sen kuormitusala käyttäen.

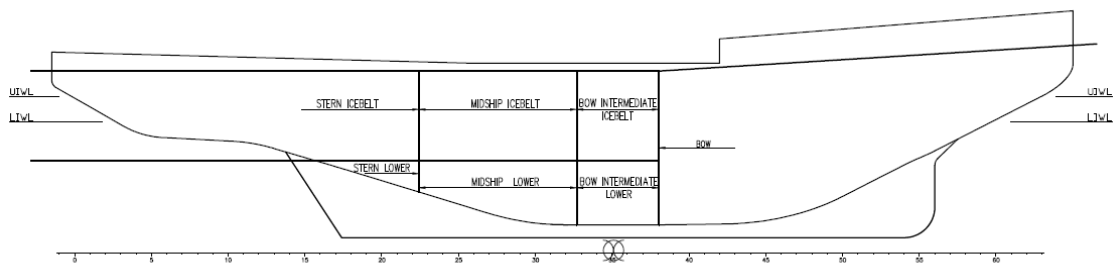
Mallilaiva on ILS OY:n suunnittelema 1A Super -jäälukitettu saattohinaaja, jonka päämitat on esitetty alla.

- $L_{O.A}$ = 40.0 m
- B_{MLD} = 12.8 m
- T_D = 4.7 m
- T_{MAX} = 5.0 m
- T_{MIN} = 4.0 m
- Δ = 1202 t
- P = 2 x 1800 kW

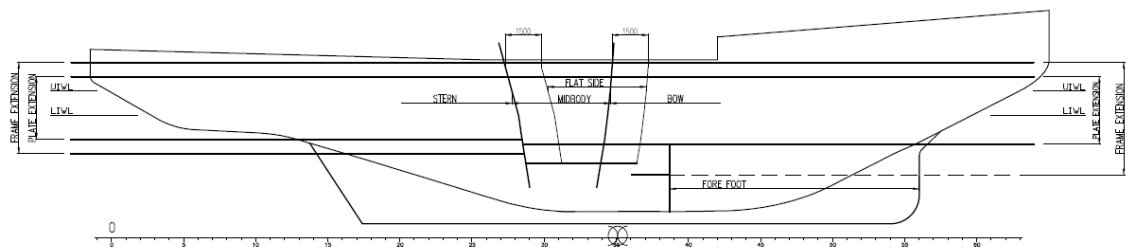
Kaikissa laskuissa teräksen myötöraja on 355 MPa. Laiva on toteutettu poikittaiskaarituksella.

5.1 Rungon alueet

Mallilaivan tapauksessa, ottaen huomioon sääntöjen hyvin erilaiset lähtökohdat, poikkeavat molempien sääntöjen mukaisen rungon aluejaot yllättävän vähän toisistaan. Suurin ero syntyy laivan keskivaiheilla, missä FSICR aluejako jatkaa peräaluetta huomattavasti pidemmälle keulaa kohden. PC-sääntöjen mukaisessa aluejaossa laivaan muodostuu myös huomattavasti selkeämpi ja pidempi keskilaiva-alue. Keula-alueen jäävahvistettu alue muodostui hyvin samankaltaiseksi kuin mallilaivassa. Lähtökohtaisesti PC aluejaossa keula on jäävahvistettu laivan pohjaan, keskilinjaan asti, kun FSICR:n mukaan jäävahvistus keulassa ulottuu 1,2 m alemman jäävesiviivan alle. FSICR vaatii kuitenkin 1A Super -luokalle keulan alaosan erityisen vahvistamisen, ns. forefoot-alueen. Mallilaivan tapauksessa tämä vahvistus alkaa kaarelta 39. PC-aluejaossa keula-alue alkaa kaarelta 38, joten keulan jäävahvistettu alue on hyvin samanlainen. Molempien sääntöjen mukaiset aluejaot on esitetty kuvissa 11 ja 12.



Kuva 11. PC-aluejaot.



Kuva 12. FSICR-aluejaot.

PC-säännöt määrittelevät jäävön alaiset alueet myös jäävahvistettaviksi. Mallilaivan tapauksessa ainoastaan keulan muutosalueen lower-alueen laidoitus vaati lisävahvistusta.

Muilla alueilla mallilaivan rakenne täytti lujuusvaatimukset, laidoitus on näillä alueilla Bureau Veritaksen avovesisääntöjen minimilevynpaksuuden mukainen.

FSICR:n antaessa kaaritukselle ja laidoitukselle pystysuunnassa eri ulottumat, antaa PC-säännöt molemmille yhtäläisen ulottumisvaatimuksen. PC-sääntöjen jäävyön ulottuvuus pystysuunnassa on hieman korkeampi kuin FSICR:n vastaava, etenkin laidoituksen ulottuvuudessa tulee selvä ero, sillä FSICR:n mukaan kaarituksen ulottuma on korkeampi kuin laidoituksen. Mallilaivan tapauksessa kaarituksen ulottuvuus on riittävä myös PC:n vaatimuksiin, erot aiheuttavatkin vain laidoituslevyjärjestelyn muutoksia.

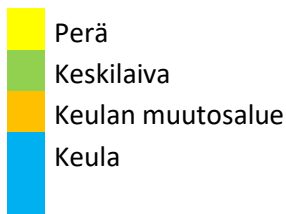
5.2 Laidoitus

Sääntöjen vaatimat levynpaksuudet ovat hyvin lähellä toisiaan, PC-säännöt vaativat keskilaivaa lukuun ottamatta hieman suurempia levynpaksuuksia. Keula-alueella keulamudon kaareutuessa jyrkästi kaariväli kasvaa, tämä aiheuttaa suurempia levynpaksuuksia molemmissa säännöissä. Levynpaksuus kasvaa molempien sääntöjen mukaan lähes samassa suhteessa kaarivälin kanssa.

Molempien sääntöjen mukaiset minimilevynpaksuudet pyöristettynä seuraavaan puoleen millimetriin on esitetty taulukossa 4. FSICR arvot ovat samalla mallilaivan todelliset levynpaksuudet. Taulukossa esitetyt arvot sisältävät 2 mm korroosiolisän.

Taulukko 4. Laidoituksen levynpaksuudet.

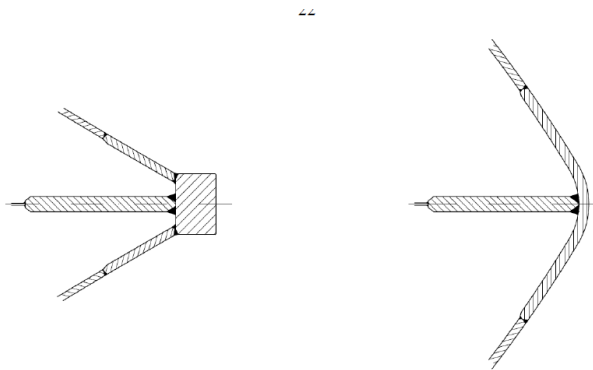
Kaari	t		Kaari
	FSICR	PC	
#6 - 28	13,0	14,5	#6 - 21
#29 - 32	11,5	11,0	#22 - 31
#33 - 41	13,0	14,5	#32 - 37
#42 - 49	13,5	14,5	#38 - 43
		15,0	#44 - 49
#50 - 57	14,0	16,0	#50 - 57



- Perä
- Keskilaiva
- Keulan muutosalue
- Keula

Keulan muutosalueen lower-alue vaatii PC-sääntöjen mukaan 11,5 mm levynpaksuuden, kun mallilaivassa tämä on Bureau Veritaksen avovesisääntöjen minimilevynpaksuus, yhdeksän millimetriä. Muilla jäävyön ulkopuolisilla alueilla avovesisääntöjen vähimmäislevynpaksuus, millä mallilaiva on rakennettu, täyttää PC-sääntöjenkin vaatimukset.

PC-säännöt eivät anna vaatimuksia keula- tai perärangan rakennetapaan, vaan mainitsee, että tämä on toteutettava luokituslaitoksen hyväksymällä tavalla. Lisämainintana PC6- ja PC7-luokille on, että jos vastaavuus 1A Super- tai 1A-luokkien kanssa vaaditaan, niin keula- ja perärangan toteutustapa tulee katsoa FSICR säännöistä. FSICR:n keularangan esimerkkitoimitustavat on esitetty kuvassa 13. Mallilaivan keularanka on toteutettu kuvan oikeanpuoleisen ns. soft nose -tavan mukaisesti. Tällä tavalla toteutetun keularangan vahvistetun levytyksen paksuus on 17 mm, mallilaivan keularangan vahvistus ulottuu kölistä pääkanteen asti 1600 mm leveänä. Mikäli konsepti rakennettaisiin PC6-luokkaan, eikä vastaavuutta 1A Super -luokan kanssa vaadittaisi, ei keularanka vaatisi erityistä vahvistusta. Mallilaivan rakenteesta ja propulsiolaitteiden tuennasta johtuen perärangan rakenne ei vaadi kummankaan säännön mukaan lisävahvistusta.



Kuva 13. Keularangan toteutustavat (TRAFI 2010.)

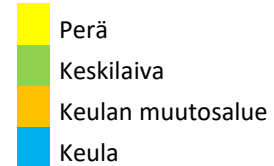
5.3 Kaaret

Kaarituksen ulottuvuuteen ei tarvinnut PC-sääntöjen takia tehdä muutoksia. Vaikka keulan muutosalueen laidoitusta jouduttiin kasvattamaan FSICR:n mukaisen jäävyön alapuolisella alueella, niin jääkaaritusta ei tarvinnut jatkaa. Mallilaivaan asennetut pohjatukit antavat normaalilla 600 mm kaarijalla riittävän lujuuden.

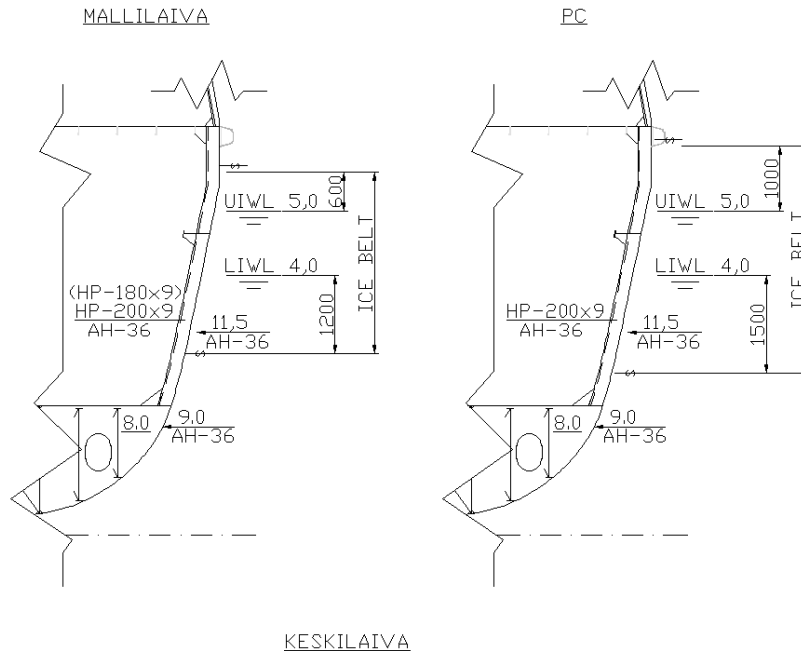
FSICR:n mukaan laskettuihin kaariin verrattuna PC-luokan vaatimat kaaret ovat huomattavasti suuremmat. Taulukossa 9 on esitetty mallilaivan todelliset kaaret ja pienimmät HP-profiilit, jotka täyttävät sääntöjen mukaiset kaarivaatimukset. Esitettyjen kaarien lisäksi, paikallisen rakenteen aiheuttaessa pidemmän jännevälin, tulee keula-alueen alussa jääkaarien olla normaaleja kaaria suurempia. Huomion arvoista on myös PC-sääntöjen vaatimus vähintään 1 mm korroosiolisästä myös kaarille, joka on pienissä kaarissa merkittävä prosentuaalinen lisäys.

Taulukko 5. Kaaret.

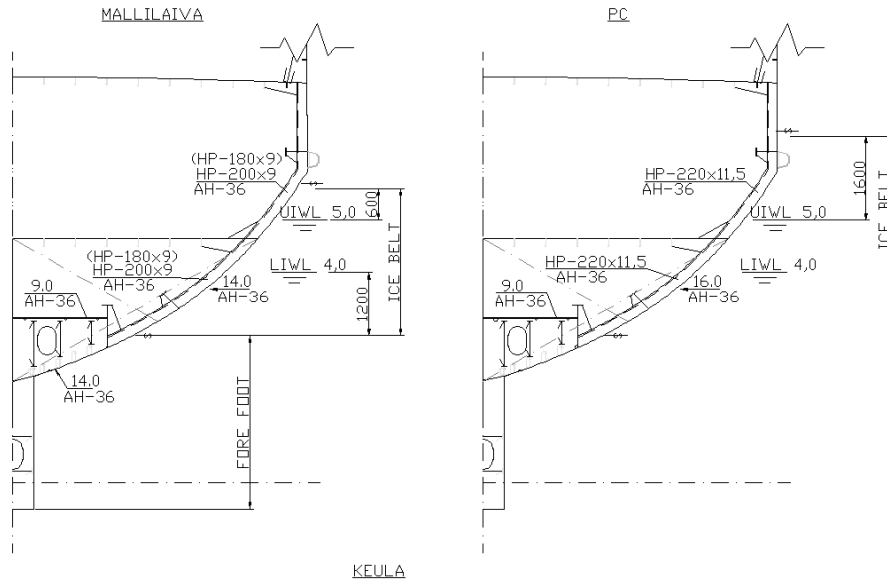
Kaari	HP-profiili			Kaari
	FSICR	MALLILAIVA	PC	
#6 - 13	HP180X8	HP200X9	HP220X10	#6 - 13
#14 - 21	HP200X9	HP200X9	HP240X11	#14 - 17
#22 - 28	HP180X10	HP200X9	HP260X10	#18 - 21
#29 - 32	HP180X9	HP200X9	HP200X9	#22 - 31
#33 - 41	HP180X10	HP200X9	HP240X10	#32 - 37
#42 - 57	HP180X9	HP200X9	HP220X11,5	#38 - 57



Kuvissa 14 ja 15 on esitetty keskilaivan- ja keulan poikkileikkaukset mitoitettuna mallilaitaan todellisen rakenteen ja PC-sääntöjen mukaan. Liitteessä 3 on esitetty molempien sääntöjen mukaiset keskilaivan mitoituksessa käytettävät kaavat. Vasemmanpuoleisessa leikkauksessa on mallilaitaan mitoitukset, sulkuihin on merkitty FSICR minimivaatimus. Mallilaitassa on rakenteen yksinkertaistamiseksi käytetty lähes pelkästään HP200X9 profiilia kaarena, vaikka säännöt monessa paikassa sallisivatkin pienemmän profiilin käytön.



Kuva 14. Keskilaiva.



Kuva 15. Keula.

Pitkittäiskaaret

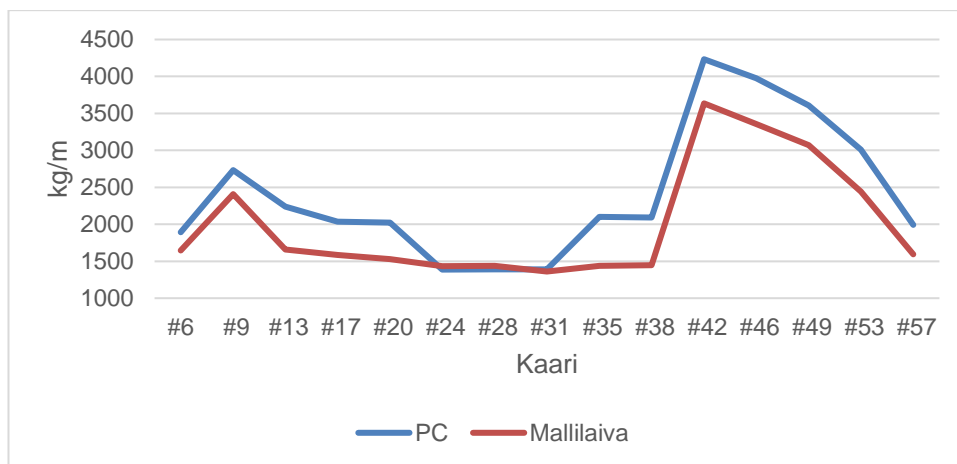
Keula-alueella kaaresta 50 eteenpäin on kuvan 15 mukainen pitkittäiskaaritus. Mallilavassakin käytetty HP160X9 HP-profiili on pienin profiili, joka täyttää PC-sääntöjen vaatimuksen. Mallilaivan perän vastaavassa pitkittäiskaarituksessa käytettiin 100X15 latta-profiilia, PC-sääntöjen mukaan laskettaessa tätä jouduttiin kasvattamaan kokoon 110X15.

5.4 Paino

Muutos laivan jäävahvistuksen painoon laskettiin Simpsonin sääntöä käyttäen. Ensin laskettiin jäävahvistuksen metripainot tasaisin välein läpi laivan ja tämän jälkeen Simpsonin kaavalla laskettiin kokonaispaino. Jäävahvistuksen painonlisäys PC-säännöillä on 11,5 tonnia. Tämä on noin 20,5 % painonlisäys jäävahvistuksen osalta, laivan kuivapainosta tämä on noin 1,4 %. Laskennoissa käytetyt arvot on esitetty liitteessä 2.

Kuviossa 3 näkyy mallilaivan ja PC-sääntöjen mukaisen jäävahvistuksen metripainot. Perässä kaarella 6 propulsiolaitteen tuenta vaatii paksumpaa levynpaksuutta, eikä tätä laskettu jäävahvistettavaksi, sillä sen ainevahvuus on huomattavasti suurempi kuin kummankaan säännön vaatimus. Tästä syystä metripaino tällä kohtaa on huomattavan pieni. Muuten perässä kaarilla 6 – 9 koko pohjan alue keskilinjaan asti kuuluu jäävyöhön, joten

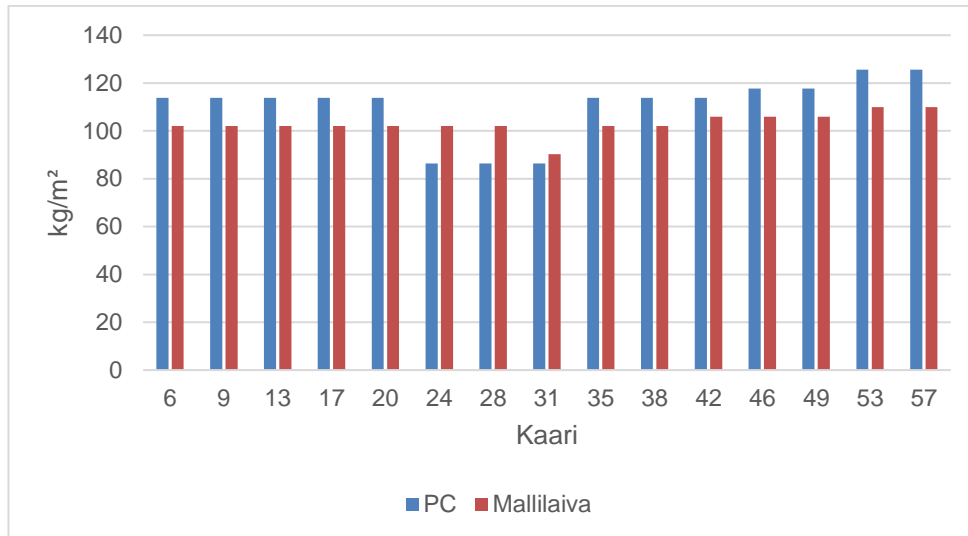
jäävahvistettavan laidoituksen pinta-ala on suuri, mikä aiheuttaa suuren painon. Kaarilla 17–20 kaarien jänneväli on erityisen pitkä. PC-sääntöjen vaatiessa huomattavasti suurempia kaaria jännevälin kasvaessa tulee tällä alueella selvä ero painossa. Kaarilla 35 – 38 erottuu selkeästi PC-sääntöjen mukainen keulan muutosalue, kun mallilaivassa tällä välillä on keulan aluetta, mutta forefoot-vahvistus ei ole vielä alkanut. Kaarella 42. ja siitä eteenpäin koko laidoitus ja kaaritus kuuluu jäävahvistukseen, mikä aiheuttaa suuren painon.



Kuvio 1. Jäävahvistuksen metripainot.

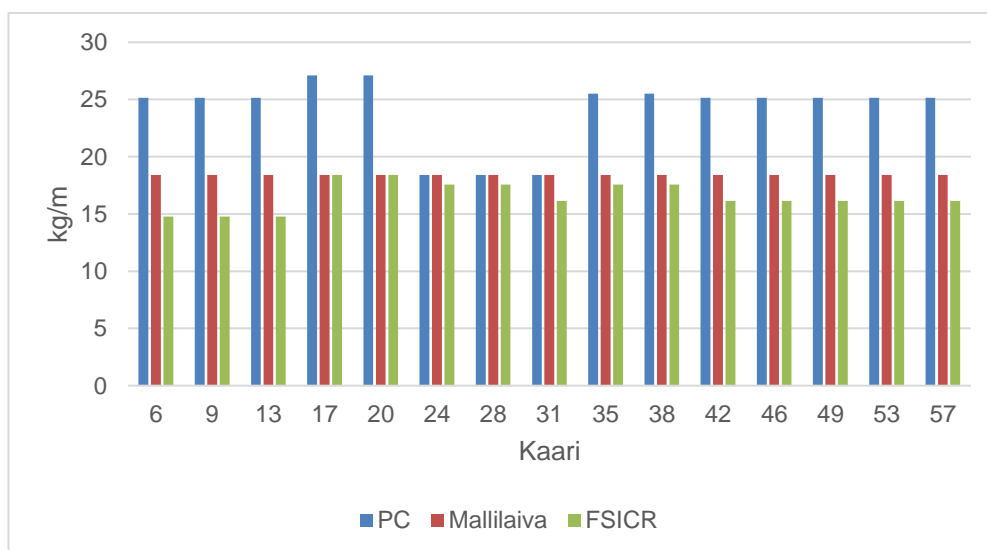
Painolaskuissa käytetyt metripainot sekä niiden mukaan lasketut kokonaispainot on esitetty liitteessä 2.

Painonlisäyksestä noin 54 % tulee kaarien painosta. PC-sääntöjen mukaisessa rakenteessa kaarituksen osuus laidoituksen ja kaarituksen yhteispainosta on noin 41 %, FSICR:n mukaisessa rakenteessa kaarituksen osuus on pienempi. Prosenttilukujen suhteesta voidaankin päätellä kaarituksen painon nousevan enemmän suhteessa koko laidoituksen ja kaarituksen painoon kuin laidoituksen. Vastaava erottelu tarkasteltaessa lisääntyneen painon jakaumaa olisi merkittävämpi, mikäli PC-sääntöjen mukaista rakennetta verrattaisiin tarkkaan FSICR:n mukaiseen rakenteeseen. Mallilaivan rakennustavassa suurimmaksi osaksi ylimitoitetuksi tulleet kaaret pienentävät kaarien suhteellista osuutta lisääntyneestä painosta. Laidoituslevyn neliömetripainot ja kaarien metripainot on esitetty kuvioissa 2 ja 3.



Kuvio 2. Laidoituslevyn neliömetripainot.

Kaaret ja välikaaret ovat samaa profiilia keula-alueen alkua lukuun ottamatta, missä laivan rakenne aiheuttaa suurempia välikaaria. Näiden suurempien välikaarien painoja ei ole esitetty kuviossa 3.



Kuvio 3. Kaarien metripainot.

PC-sääntöjen mukaisen jäävahvistuksen aiheuttaman lisääntyneen painon vaikutus laivan painopisteeseen on merkityksetön. Laskennallinen vaikutus pystysuuntaiseen painopisteeseen on -26 mm ja pituussuuntaiseen +33 mm. Lisääntyneen painon haitat rajoituvatkin lisääntyviin materiaali- ja työvoimakustannuksiin, sekä kasvavaan polttoaineen kulutukseen.

6 POHDINTAA JA HUOMIOITA

Arktisen jään sulamisesta johtuen arktinen merenkulku on käymässä helpommaksi ja taloudellisemmaksi. Selvää on kuitenkin, että jäänmurtaajia tarvitaan jatkossakin. Lisääntynyt kiinnostus arktisen alueen merenkuluun tarkoittaakin lisääntyntä kiinnostusta jäänmurtaajiin. Kiinnostus myös saattohinaajiin, jotka kykenevät hoitamaan satama-alueen jäänmurron ja toimimaan offshore-tehtävissä, on lisääntynyt. Perinteisiin saattohinaajiin verrattuna arktisille alueille suunnitellun laivan tulee kyetä vastaamaan arktisen alueen tuomiin haasteisiin. Saattohinaaja ei oletettavasti operoi erityisen syrjäisillä seuduilla ja huolto, sekä pelastusinfrastruktuuri ovat lähellä, joten kauppalaivaan tai jäänmurtaajaan verrattuna varustus voi olla kevyempi. Nopeasti vaihtelevat sääolot ja monivuotinen jää asettavat kuitenkin haasteita, joihin Polar Class -jääsäännöt ja Polaarikoodi yrittävät vastata.

Arktisen merenkulun herättäessä laajamittaisempaa kiinnostusta, on IMO selvästi kahden viime vuosikymmenen aikana panostanut arktisen merenkulun kehittämiseen, turvaamiseen ja ympäristöystävällisyyteen. Tästä osoituksena ovat Polar Class -jääloukka-säännöt ja arktisilla alueilla liikennöintiä koskeva Polaarikoodi.

6.1 Laivan päämittojen vaikutus rakenteeseen ja rakenteellinen hierarkia

Ennakkotietojen pohjalta oletuksena oli, että PC-säännöt eivät soveltuisi pienten laivojen mitoittamiseen erityisen hyvin. PC-sääntöjen oletus tarpeesta kestää satunnaisten, vanhojen, yli kaksivuotisen ja kolme metriä paksujen jäälautojen aiheuttamat kuormat sekä laskennassa käytettävä minimiuppouma, 5 kt antoivat olettaa, että ainevahvuuksista tulisi huomattavasti suurempia kuin FSICR:n mukaisista. Onkin yllättävää, että PC-sääntöjen mukainen jäävahvistus on huomattavan samankaltainen, suurempia kaaria lukuun ottamatta kuin FSICR:n mukainen jäävahvistus.

Laivan koon ja uppouman vaikutus laivan kohtaamaan jääpaineeseen on kiistelty asia. Jäissä puristuksissa oleva laiva kokee koosta ja uppoumasta riippumatta saman paineen. Suorassa törmäyksessä jäähän, tai jäärännistä murtauduttaessa laivan uppoumalla ja koolla on liike-energian kannalta merkitystä jääpaineen suuruuteen. (Eronen, H 11.1.2017). FSICR:ssä todellinen uppouma ja koneteho vaikuttavat suoraan las-

kennalliseen jääpaineeseen ja sitä kautta ainevahvuuksiin. Uppouman ja konetehon kasvaessa kasvavat myös ainevahvuudet. Myös PC-säännöissä laivan pituus ja uppouma vaikuttavat jääpaineeseen. Ne puolestaan eivät ota lainkaan huomioon konetehoa teräsrakenteen mitoituksessa. PC-säännöissä jääluokakohtaisen vakioarvon, CF_c :n muodostamisessa on kuitenkin käytetty jääluokalle ominaiseksi arvioitua nopeutta (IACS 2006, Liite 5). Näin ollen PC-säännötkin ovat huomioineet laivan törmäysnopeuden jäähän, mutta CF_c :n ollessa jääluokakohtainen vakio, eivät säännöt kuitenkaan huomioi laivan todellista nopeutta.

Pituuden ja uppouman vaikutus PC-säännöissä on huomattavasti pienempi kuin FSICR:ssä. Pienen mallilaivan tapauksessa PC-säännöt vaativat suurempia kaaria ja keskilaivaa lukuun ottamatta hieman suurempia levynvahvuuksia. Kokeellisten 1A Super- ja PC6-luokkien säännöillä tehtyjen laskujen mukaan, laivan koon kasvaessa ja laivan pituuden ollessa jonkin verran yli 100 m, laivan tehosta riippuen, alkaa FSICR vaatia suurempia levynpaksuuksia kuin PC. PC-säännöt vaativat kuitenkin edelleen suurempia kaaria. Riska & Kämäräinen saivat tutkielmassaan A review of ice loading and the evolution of the FSICR, vastaavia tuloksia 113 m kemikaalitankkeri MT Kemiralle. Heidän laskelmiensa mukaan perän ja keskilaivan alueilla FSICR vaati selvästi suurempia levynpaksuuksia. Keula-alueella PC-säännöt vaativat 0,6 mm paksumman levynpaksuuden. Heidänkin laskelmissaan PC-säännöt vaativat kautta laivan huomattavasti suurempia kaaria.

PC-sääntöjen oletuksena näyttääkin olevan lähtökohta, missä laivan koon ja tehon suuruudella ei ole niin suurta merkitystä laivan kokemaan jääpaineeseen kuin FSICR:n mukaan. PC-säännöt muodostavat myös, varsinkin suuremmilla laivoilla jyrkemmän rakenteellisen hierarkian. Kokeellisesti laskettuna, kun PC-säännöillä saadaan keula-alueella paine joka antaa FSICR:n kanssa yhtäläisen levynpaksuuden, on vaadittavan kaaren plastinen taivutusvastusvaatimus noin 20 % suurempi. Erityisesti kaaren jännevälin kasvaessa, vaativat PC-säännöt huomattavasti suurempia kaaria.

Rakenteellisen hierarkian jatkotutkimus

Varsinkin suurempien laivojen tapauksessa sääntöjen muodostamien rakenteellisten hierarkioiden tutkiminen olisi mielenkiintoinen jatkotutkimuksen aihe. Pienemmillä laivoilla sääntöjen mukaiset laidoituslevynpaksuudet ovat melko yhteneviä ja suuremmilla laivoilla FSICR vaatii suurempia levynpaksuuksia. PC-säännöt vaativat kuitenkin selvästi

kookkaampia kaaria kaiken kokoisille laivoille. PC-sääntöjen toiminnankuvaus sisältää oletuksen monivuotisen jään olemassaolosta laivan operointialueella. Paksun monivuotisen jään voidaan olettaa tuottavan suurempia maksimikuormia kuin Itämerellä tavattavat maksimikuormat. Näin ollen PC-sääntöjen mukainen laiva, jonka levynpaksuus on yhtäläinen FSICR:n vaatimusten kanssa, mutta omaa selvästi suuremmat kaaret, saattaa altistua huomattavasti suuremmille kuormille kuin mihin FSICR:n vaatimukset ovat perustuneet. PC-sääntöjen plastisen mitoituksen kehityksessä tiiviisti mukana ollut C.G. Daley on todennut PC-sääntöjen antavan paremman rakenteellisen ainevahvuusjakaman, joka vastaanottaa suuria kuormia paremmin. Mahdollista onkin, että PC-säännöt ottavat paremmin huomioon laidoituslevyn elastisen käyttäytymisen kuormitustilanteissa, jolloin laidoituslevy joustaa ja suurempi osa kuormasta siirtyy kaarille. Toinen vaihtoehto on, että PC-säännöt sallivat harvinaisen maksimikuorman tapauksessa suuremman laidoituslevyn muodonmuutoksen kuin FSICR. Kolmas vaihtoehto olisi, että FSICR ylimitoittaa levynpaksuudet suuremmille laivoille, tai PC ylimitoittaa kaaret.

Aihe olisikin haastava ja monimutkainen ja vaatisi perehtymistä sääntöjen tuottamien lujustasojen taustoihin, Itämeren ja arktisten alueiden jään lujuusominaisuuksiin, jäätilastoihin ja laivojen jäävaurioutilastoihin. Lisäksi jouduttaisiin ainakin tekemään tietokonepohjaisia lujuusanalyysyjä ja laskelmia.

6.2 Keulamuodon vaikutus jääpaineeseen PC-säännöissä

Jääpaine ja sen kuormitusala ovat varsinaisen keulamuodon funktioita PC-säännöissä. Keulamuodon vaikutusta jääpaineeseen haluttiin testata. Mallilaivan keulamuodon tuottamaa jääpainetta verrattiin samankokoisen, mutta keulamuodoltaan hyvin perinteisen V-mallin omaavan, jäissä kulkevan hinaajan tuottamaan jääpaineeseen. Vertailussa huomattiin, että hyvinkin radikaali ero keulamuotojen välillä tuotti vain pienen eron jääpaineeseen ja vaadittuihin ainevahvuuksiin. Ero laskennallisessa jääpaineessa oli vain 0,31 MPa, joka aiheutti 0,28 mm eron vaadittuun absoluuttiseen laidoituslevyn paksuuteen. Vertailun tapauksessa kaareksi vaadittava minimi HP-profiili pysyi samana kuin mallilaivallekin. Jääluokkasäännöissä saatu pienin vaadittava laskennallinen laidoituslevyn paksuus tulee pyöristää pienten prosentuaalisten rajojen sisällä seuraavaan puoleen millimetriin, sillä laivaterästä on saatavissa yleisesti 0,5 mm välein. Saatu 0,28 mm ero saattaakin tilanteesta riippuen mahdollistaa 0,5 mm ohuemman laidoituslevyn hyödyntämisen.

Sama vertailu olisi mielenkiintoista suorittaa suuremmalla otannalla ja suuremmille laivoille, jolloin erot saattaisivat muodostua jo merkittäviksi.

6.3 1A Super- & PC6-sääntöjen mukainen vastaavuus

FSICR antaa lähtökohtaisesti PC6-luokalle vastaavuuden 1A Super -luokan kanssa ja PC7-luokalle vastaavuuden 1A-luokan kanssa, kun FSICR:n mukainen konetehovaatimus täytetään. PC-säännöissä mainitaan erikseen, että mikäli vastaavuus FSICR:n kanssa halutaan, niin keula- ja perärangan toteutustapa tulee tehdä FSICR:n vaatimusten mukaisesti. Haettaessa vastaavuutta FSICR:n mukaisille laivoille PC-luokkien kanssa, tulee suorittaa luokituslaitoksen kanssa yhteistyössä ekvivalenttitarkastelu.

6.4 Ruoripotkurilaitteiden vaatima lisävahvistus

PC-säännöissä ei ole laisinkaan mainintaa ruoripotkurilaitteiden aiheuttamien lisäkuormien huomioon otosta laivan perän suunnittelussa. FSICR:ssä mainitaan, että uusien kääntyvien propulsiolaitteiden käyttäminen johtaa kasvaviin kuormituksiin laivan peräalueella. Peräalueen mitoitukseen ei kuitenkaan anneta tähän liittyen muuta ohjetta kuin että kasvaneet kuormitukset tulee ottaa huomioon. Monipotkurisissa laivoissa sivupotkurien kohdalla, potkureista 1,5 m keulaan ja perään päin, tulee jäävahvistetun laidoituksen ja kaarituksen jatkoa kaksoisporajaan asti. Esimerkiksi perän olkien erityisvahvistukseen ei oteta kantaa. FSICR:n soveltamisohjeessa mainitaan, että ruoripotkurien käyttö on erittäin toimiva ratkaisu, mutta kustannussyistä sitä ei kauppalaivoissa juuri käytetä. Normaali akseliveto mainitaan yleisimpänä ratkaisuna. Tämä saattaa olla syynä siihen, ettei ruoripotkurien vaatimaan erityisvahvistukseen juuri oteta kantaa.

6.5 HP-profiilin laskenta

PC-säännöissä annetaan selkeät ohjeet T-kaaren plastisen taivutusvastuksen laskemiseen, mutta HP-profiilin laskemisesta ei ole mainintaa. Mallilaivassa kaikki kaaret ovat HP-profiilista valmistettuja, joten näiden plastisen taivutusvastuksen laskeminen oli oleellista. Laskentaa kokeiltiin kahdella tavalla. Ensimmäinen tapa oli DNV:n laskukaava

HP-profiilin plastiselle taivutusvastukselle. Toisessa tavassa HP-profiili muutettiin poikileikkauksen ominaisuuksiltaan vastaavaksi L-profiiliksi DNV ohjeiden mukaisesti ja plastinen taivutusvastus laskettiin PC-sääntöjen kaavalla.

Laskutapojen antamat tulokset poikkesivat toisistaan noin 4 % siten, että suora HP-profiilin laskukaava tuotti suuremman taivutusvastuksen. Vaikka ero ei ole kovin suuri, niin saattaa se sopivilla parametreilla mahdollistaa yhden koon pienemmän profiilin hyödyntämisen.

6.6 PC-laskenta ohjelman kehitys

Ohjelmaa tulisi jatkaa yhdistämällä kaikki neljä osaa siten, että ensimmäiseksi ohjelmassa valittaisiin käytettävä jääloukka ja annettaisiin laivan pääparametrit, jonka jälkeen ohjelma laskisi vaaditut ainevahvuudet. Tämä tekisi ohjelmasta paljon yksinkertaisemmän käyttää. Samalla ohjelmasta jouduttaisiin tekemään paljon suljetumpi, jolloin käyttäjä ei pystyisi muokkaamaan mitään muuta kuin pääparametreja. Tämä estäisi monenlaisen kokeilun ja vertailun ohjelmalla.

Plastisen taivutusvastuksen ja kaaren geometrian riippuvuudesta johtuen kulloiseenkin tilanteeseen sopivan ja sääntövaatimukset täyttävän T-kaaren laskeminen on hidasta ja työlästä. Ohjelman laajentaminen T-kaaren optimointimahdollisuudella jonkin muuttujan perusteella olisikin mielekästä. Optimointi esimerkiksi painon suhteen olisi helposti toteutettavissa, jos käytettävä maksimilevynpaksuus olisi tiedossa.

7 YHTEENVETO

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää, millaisia rakenteellisia muutoksia 1A Super -luokitettun mallilaivan konseptiin tulisi tehdä, jotta se voitaisiin luokitaa IACS Polar Class PC6-luokkaan. Aluksi esiteltiin jäävahvistus ja sen tarpeellisuus talvimerenkulussa sekä luotiin katsaus arktiseen- ja Itämeren merenkulkuun. Seuraavaksi pohjustettiin laskennan kohteena olevat jääluokkasäännöt ja niiden taustat. Tulokset-osiossa esiteltiin molempien sääntöjen mukaan lasketut tulokset ja PC-sääntöjen mukaisia tuloksia verrattiin mallilaivan todelliseen rakenteeseen. Lopuksi käytiin läpi työn aikana heränneitä ajatuksia ja kysymyksiä.

PC6-luokituksen vaatimat muutokset mallilaivan konseptiin ovat yllättävän pieniä. Jäävahvistuksen aluejaot vastasivat keulan osalta toisiaan hyvin tarkasti. PC-sääntöjen mukaisen aluejaon keskilaiva-alue on pidempi kuin mallilaivan, mikä puolestaan lyhentää perä-alueita. Mallilaivan kaaritus on pystysuunnassa riittävän korkea koko jäävahvistetulla alueella täyttääkseen myös PC-sääntöjen ulottuvuusvaatimuksen. Laidoituksen osalta perässä, keulan muutosalueella ja keulassa ainevahvuuksia tulee kasvattaa hie-man. Jäävahvistetun laidoituksen pystysuuntaista ulottuvuutta tulee myös kasvattaa, tämä vaatii vain laidoituslevyjärjestelyn muutoksia. Selkein ero tulee kaarituksessa PC:n vaatiessa suurempia kaaria läpi laivan.

Mallilaivassa kaaritus on toteutettu käyttämällä samaa HP-profiilia kaarena lähes koko laivassa, tämä on ollut järkevää rakenteen ja rakentamisen yksinkertaistamisen kannalta, sillä lievästi lisääntynyt paino ei ole ollut ongelma. PC6-luokan mukaisen jäävahvistuksen toteutuksessa vaadittujen kaarien koot ja siten metripainot vaihtelevat huomattavasti enemmän kuin FSICR:n mukaisissa. Turhan painon välttämiseksi useamman HP-profiilin käyttö olisi suotavaa, mutta tämä lisää materiaalihankintojen ja rakentamisen kustannuksia.

Mallilaiva ei ole kovin painokriittinen, joten suurempien ainevahvuuksien tuoma painonlisäys ei tuota ongelmia. Painopisteen muutos on merkityksetön. Painonlisäys kuitenkin lisää laivan kulkuvastusta ja kasvattaa polttoaineen kulutusta. Myös rakennuskustannukset lisääntyvät.

Työn aikana ei ilmennyt erityistä seikkaa, jonka takia mallilaivan konseptia ei voisi toteuttaa PC6-luokan vaatimusten mukaisella rakenteella. Mikäli PC6-luokitus ei ole ehdoton

vaatimus ja aiotulla operointialueella voi liikennöidä 1A Super -luokitetulla laivalla, niin ei PC6-luokitusta kannata tavoitella. Syynä tähän ovat kustannukset, joita lisääntynyt paino materiaaleissa ja käyttökustannuksissa tuo.

LÄHTEET

Daley, C.G. 2002. Application of plastic framing requirements for polar ships, Canada, Memorial University, St. John's

Daley, C.G.; Kendrick, A.; Appolonov, E. 2001. Plating and framing design in the unified requirements for polar class ships. Canada: Ottawa, Ontario.

Eronen, H, Julkaistaan 2017, Laiva Encyclopedia Chapter XXX, Ship Design In Ice

HELCOM, 2010. Maritime Activities in the Baltic Sea – An integrated thematic assessment on maritime activities and response to pollution at sea in the Baltic Sea Region. Balt. Sea Environ. Proc. No. 123

Hubert, M.; Raspotnik, A. 2012. The future of Arctic shipping along the Transpolar Sea Route, Arctic Yearbook 2012

IACS, 2016 Requirements concerning POLAR CLASS

IACS, 2006. Polar Limitations Assessment Risk Indexing System (POLARIS) Background to Development, Revision 02

Ilmatieteenlaitos, 2010. Viitattu 21.2.2017, <http://en.ilmatieteenlaitos.fi/ice-winter-in-the-baltic-sea>

Kujala, P, Valkonen, J & Suominen, M, 2007. Maximum ice induced loads on ships in the Baltic Sea, Proc. 10th Int. Symp. on Practical Design of Ships and Other Floating Structures PRADS

Liukkonen, S. & Mäkinen, E. 1994, Friction and hull coatings in ice operations, Icetech - 5th Intl Conf on Ships and Marine Structures in Cold Regions

Nasa, study shows global sea ice diminishing, despite Antarctic gains, viitattu 21.2.2017. <https://www.nasa.gov/content/goddard/nasa-study-shows-global-sea-ice-diminishing-despite-antarctic-gains>

National Snow & Ice Data Center, 2017. Ushers in record low extent, viitattu 21.2.2017. <http://nsidc.org/arcticseaicenews/2017/02/2017-ushers-in-record-low-extent/>

Riska, K. & Kämäräinen, J. 2011. A review of ice loading and the evolution of the Finnish-Swedish ice class rules, Proceedings of the SNAME Annual Meeting and Expo

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

Riska, K. 2011. Design of ice breaking ships

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

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

Tulli 2017. Viitattu 02.03.2017, www.tulli.fi > Yritysasiakkaat > Kuljetus ja Varastointi > Väylämaksut

Yliskylä-Peuralahti, J.; Ala-Rämi, K.; Rove, R.; Kolli, T & Pongracz, E. 2016. Polaarikoodin turvallisuus- ja ympäristövaatimusten yhteensovittaminen Suomessa, Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 11/2016

Keula-alueen laskenta PC-sääntölaskentaohjelmalla

Vaihe 1. Kuormitusalan ja jääpaineen laskeminen keulamuodon perusteella.

LOAD PATCH, AVERAGE PRESSURE IN LOAD PATCH

	Case spesific value
	Table value
	Calculated result

D	5 kt
L	36,3 m
CFc	2,40
CFf	5,49
CFd	1,17
CFdis	40,00
CFI	2,37

	1	2	3	4
x				
α				
β				
fa1	0,49	0,34	0,16	0,06
fa2	2,28	3,13	4,76	8,31
fa3	0,60	0,60	0,60	0,60
Fi	3,31	2,27	1,08	0,38
ARi	6,59	4,80	3,15	1,80
Qi	1,26	1,11	0,82	0,52
Pi	3,14	2,62	1,97	1,32
wbow	2,64 m			
bbow	0,40 m			
Pavg	3,14 MP'a			

Vaihe 2. Vaadittavan laidoituslevyn paksuuden laskeminen.

PLATING

	Case spesific value
	Table value
	Calculated result
	From previous sheet

Average pressure within load patch	Pavg	3,14 MPa
Height of the load patch	bbow	0,40 m
Upper yield stress limit of shell plating material	σy	355 MPa
Frame spacing	s	0,3 m
Peak pressure factor, transverse framing	PPFp	1,5
Hull area factor, Bow	AF	1
Corrosion addition Bow	ts	2 mm

REQUIRED SHELL PLATING THICKNESS

t _{net}	12,56 mm
t	14,56 mm

Painolaskut

PC-sääntöjen mukaisen jäävahvistuksen painolaskelmat.

PC6	PERÄ					KESKILAIVA			KEULAN MUUTOSALUE		KEULA				
	6,0	9,0	13,0	17,0	20,0	24,0	28,0	31,0	35,0	38,0	42,0	46,0	49,0	53,0	57,0
Jäävyön levytys															
t	14,5	14,5	14,5	14,5	14,5	11,0	11,0	11,0	14,5	14,5	14,5	15,0	15,0	16,0	16,0
h	3,8	7,5	4,0	3,5	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	9,1	8,3	7,6	6,6	4,2
W (kg/m ³)	7850	7850	7850	7850	7850	7850	7850	7850	7850	7850	7850	7850	7850	7850	7850
W (kg/m)	432,5	853,7	455,3	392,7	341,5	259,1	259,1	259,1	341,5	341,5	1037,6	982,0	889,6	827,7	527,5
Levytys lisä															
t			5,5						2,5	2,5					
h			3,1						6,7	6,3					
W (kg/m ³)			7850	7850	7850	7850	7850	7850	7850	7850	7850	7850	7850	7850	7850
W (kg/m)			152,7	34,0	34,0	13,3	13,3	13,3	164,5	157,6	25,7	35,2	40,8	44,9	51,8
Kaaret	HP26	HP26	HP26	HP30	HP32	HP22	HP22	HP22	HP29	HP29	HP27	HP27	HP27	HP27	HP27
kpl/m	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13
l	4,7	4,1	4,4	4,9	5,3	4,4	4,5	4,5	4,5	4,5	9,7	8,9	8,2	5,2	2,8
W (kg/m)	22,6	22,6	22,6	27,1	28,0	18,4	18,4	18,4	25,5	25,5	25,2	25,2	25,2	25,2	25,2
W (kg/m)	120,2	104,8	113,3	149,0	167,2	92,4	93,0	93,0	128,9	130,3	277,0	254,8	232,5	147,9	79,8
Jääkaaret	HP26	HP26	HP26	HP30	HP32	HP22	HP22	HP22	HP29	HP29	HP32	HP30	HP27	HP27	HP27
kpl/m	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67
l	4,7	4,1	4,4	4,9	5,3	4,4	4,5	4,5	4,5	4,5	9,7	8,9	8,2	5,2	2,8
W (kg/m)	22,6	22,6	22,6	27,1	28,0	18,4	18,4	18,4	25,5	25,5	28,0	27,1	25,5	25,2	25,2
W (kg/m)	177,2	154,5	167,0	219,7	246,4	136,1	137,0	137,0	189,9	192,1	454,3	404,9	347,3	218,1	117,6
W (kg)	730	1113	888	795	789	501	502	502	825	821	1795	1677	1510	1239	777
Keulan pitkittäiskaaret	746,465		kg												
Perän pitkittäiskaaret	1430,34		kg												
KOKONAISPAINO	67546		kg												

Mallilaivan jäävahvistuksen mukaiset painolaskelmat.

AHTO	PERÄ					KESKILAIVA			KEULA						
	6,0	9,0	13,0	17,0	20,0	24,0	28,0	31,0	35,0	38,0	42,0	46,0	49,0	53,0	57,0
Jäävyön levytys															
t	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	11,5	13,0	13,0	13,5	13,5	13,5	14,0	14,0
h	3,8	7,5	4,0	3,5	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	9,1	8,3	7,6	6,6	4,2
W (kg/m ³)	7850	7850	7850	7850	7850	7850	7850	7850	7850	7850	7850	7850	7850	7850	7850
W (kg/m)	387,8	765,4	408,2	352,1	306,2	306,2	306,2	270,8	306,2	306,2	966,1	883,8	800,6	724,2	461,6
Kaaret	HP22	HP22	HP22	HP22	HP22	HP22	HP22	HP22	HP22	HP22	HP22	HP22	HP22	HP22	HP22
kpl/m	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13
l	4,7	4,1	4,4	4,9	5,3	4,4	4,5	4,5	4,5	4,5	9,7	8,9	8,2	5,2	2,8
W (kg/m)	18,4	18,4	18,4	18,4	18,4	18,4	18,4	18,4	18,4	18,4	18,4	18,4	18,4	18,4	18,4
W (kg/m)	98,0	85,5	92,4	101,1	109,9	92,4	93,0	93,0	93,0	94,0	202,6	186,4	170,0	108,2	58,4
Jääkaaret	HP22	HP22	HP22	HP22	HP22	HP22	HP22	HP22	HP22	HP22	HP26	HP26	HP26	HP22	HP22
kpl/m	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67
l	4,7	4,1	4,4	4,9	5,3	4,4	4,5	4,5	4,5	4,5	9,7	8,9	8,2	5,2	2,8
W (kg/m)	18,4	18,4	18,4	18,4	18,4	18,4	18,4	18,4	18,4	18,4	22,6	22,6	22,6	18,4	18,4
W (kg/m)	144,4	126,0	136,1	149,0	161,9	136,1	137,0	137,0	137,0	138,6	366,2	337,0	307,4	159,5	86,0
W(kg)	630	977	637	602	578	535	536	501	536	539	1535	1407	1278	992	606
Keulan pitkittäiskaaret	746,465		kg												
Perän pitkittäiskaaret	1300,31		kg												
KOKONAISPAINO	56084		kg												

PC- & FSICR-kaavat keskilaivan mitoitukseen

Polar Class	FSICR
<u>Jääkuorma</u>	<u>Jääpaine</u>
$F_{NobBow} = 0.36 * CF_c * DF$ [MN]	$p = c_d * c_p * c_a * p_0$ [MPa]
<u>Viivakuorma</u>	$c_d = \frac{a+k+b}{1000}$
$Q_{NonBow} = 0.639 * F_{NonBow}^{0.61} * CF_D$ [MN/m]	$k = \frac{\sqrt{\Delta * P}}{1000}$
<u>Suunnittelu kuormitusala</u>	$c_a = \sqrt{l_0/l_a}$
$W_{NonBow} = F_{NonBow}/Q_{NonBow}$ [m]	<u>Vähimmäislewynpaksuus</u>
$b_{NonBow} = W_{NonBow}/3.6$ [m]	$t = 557 * s * \sqrt{\frac{f_1 * P_{PL}}{\sigma_y}} + t_c$ [mm]
<u>Jääpaine kuormitusalalla</u>	$p_{PL} = 0.75 * [MPa]$
$P_{avg} = \frac{F}{b_{NonBow} * W_{NonBow}}$ [MPa]	$f_1 = 1.3 - \frac{4.2}{(\frac{h}{s} + 1.8)^2}$ [mm]
<u>Vähimmäislewynpaksuus</u>	
$t = t_{net} + t_s$ [mm]	<u>Kaaren vaadittava leikkauspinta-ala</u>
$t_{net} = 500 * s * \sqrt{\frac{(AF * PPF * P_{avg})}{\sigma_y}} / (1 + \frac{s}{2 * t})$ [mm]	$A = \frac{\sqrt{3} * f_3 * p * h * s}{2 * \sigma_y} * 10^4$ [cm ²]
<u>Kaaren efektiivinen leikkauspinta-ala</u>	<u>Kaaren vaadittava taivutusvastus</u>
$A_w = h * t_{wn} * \frac{\sin \phi_w}{100}$ [cm ²]	$Z = \frac{p * s * h * l}{m_t * \sigma_y} * 10^6$ [cm ³]
<u>Kaaren vaadittava plastinen taivutusvastus</u>	$m_t = \frac{7 * m_0}{7 - 5 * \frac{h}{t}}$
$Z_p = A_{pn} * \frac{t_{pn}}{20} + \frac{h_w^2 * t_{wn} * \sin \phi_y}{2000} + A_{fn} * \frac{h_{fc} * \sin \phi_y - b_w * \cos \phi_y}{10}$ [cm ³]	
<u>Kaaren vaadittava efektiivinen leikkauspinta-ala</u>	
$A_t = 100^2 * 0.5 * LL * s * \frac{AF * PPF * P_{avg}}{0.577 * \sigma_y}$ [cm ²]	
<u>Kaaren efektiivinen plastinen taivutusvastus</u>	
$Z_{pt} = 100^2 * LL * Y * s * (AF * PPF * P_{avg}) * a * \frac{A_1}{4 * \sigma_y}$ [cm ³]	
$Y = 1 - 0.5 * (\frac{LL}{a})$	
$A_1 = \text{suurempi } A_1/A_2$	
$A_{1A} = \frac{1}{1 + \frac{1}{2} * k_w * \frac{L}{2} * (\sqrt{1 + a_1^2} - 1)}$	
$A_{1B} = \frac{1}{0.275 + 1.44 * k_z^{0.7}}$	
$a_1 = \frac{A_t}{A_w}$	
$k_w = \frac{1}{1 + 2 * \frac{A_{fn}}{A_w}}$	
$k_z = \frac{z_p}{z_p} = 0$, jos kaari on kiinnitetty polvioin	