

Opinnäytetyö AMK

Konetekniikka

2025

Elias Alho

# Alumiinin hyödyntäminen RoPax- alusten runkorakenteissa



Opinnäytetyö (AMK / YAMK) | Tiivistelmä

Turun ammattikorkeakoulu

Konetekniikka

2025 | 41 sivua

Elias Alho

## Alumiinin hyödyntäminen RoPax-alusten runkorakenteissa

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia alumiinin käyttöä RoPax-alusten runkorakenteissa ja tarkastella siihen liittyviä hyötyjä sekä haasteita. Opinnäytetyö toteutettiin yhteistyössä Deltamarin Oy:n kanssa. Opinnäytetyössä vertailtiin kahden toteutuneen RoPax-aluksen runkorakennetta käytetyn materiaalin osalta.

Työssä on esitelty kattava kirjallisuuskatsaus koskien alumiinin ominaisuuksia, kuten keveyttä, lujuutta, korroosionkestävyyttä ja liitostekniikoita. Lisäksi työssä on analysoitu alumiinirakenteiden vaikutuksia vakavuuteen, painopisteeseen ja elinkaarikustannuksiin. Vertailua tehtiin vain terästä sekä terästä ja alumiinia hyödyntävien runkorakenteiden välillä. Näin muodostettiin kattava kokonaiskuva alumiinin käyttömahdollisuuksista.

Korvaamalla ylimpien kansien teräsrakenteita alumiinilla, voidaan parantaa aluksen vakavuutta painopistettä alentamalla. Alumiinirakenteiden haasteiksi tunnistettiin erityisesti paloturvallisuus, galvaaninen korroosio ja väsymisrasitus. Uudet liitostekniikat ja palosuojausratkaisut mahdollistavat kuitenkin näiden hallinnan. Alumiinin korkea hankintahinta tasoittuu osittain elinkaaren aikaisilla säästöillä huollossa ja käytössä. Havaintojen perusteella alumiinia voidaan pitää kilpailukykyisenä vaihtoehtona RoPax-alusten runkorakenteisiin.

Asiasanat:

RoPax-alukset, alumiinirakenteet, laivanrakennus, painopisteen hallinta, vakavuus, paloturvallisuus, korroosionkestävyys.

Bachelor's / Master's Thesis | Abstract

Turku University of Applied Sciences

Mechanical Engineering

2025 | 41 pages

Elias Alho

## Using Aluminium in RoPax Vessel Hull Structures

The objective of this thesis is to investigate the use of aluminum in the hull structure of RoPax vessels and the associated benefits and disadvantages. This research was conducted together with a commissioning party, Deltamarin Ltd. The case studies were assessed utilizing both literature research and real case studies of completed RoPax projects. The thesis compared the hull structures of two completed RoPax vessels in terms of the materials used.

This thesis examined the properties of aluminum together with its lightness, strength, corrosion resistance, and joining capabilities. In addition, the effects of aluminum structures on stability, center of gravity, and life cycle costs were analyzed. The comparison focused on hull structures made entirely of steel and on structures where aluminum was used in the superstructures.

The results indicated that using aluminum could lead to increased stability by lowering the center of gravity. Fire safety, galvanic corrosion and fatigue stress were the three main issues presented for aluminum structure. However, modern joining techniques and fire protection solutions will help to address these issues. Although aluminum carries a high initial purchasing cost, its long lifetime can offset some maintenance and operation costs. The results allow aluminum to be seen as a competitive option for RoPax vessels' hull structure. Its use should be considered in future design projects aiming to improve stability and efficiency.

Keywords:

RoPax vessels, aluminium structures, shipbuilding, stability, fire safety, corrosion resistance.

# Sisältö

<b>Lyhenteet</b>	<b>7</b>
<b>1 Johdanto</b>	<b>8</b>
<b>2 RoPax-alukset ja niiden rakenteelliset vaatimukset</b>	<b>9</b>
2.1 RoPax-alusten määritelmä ja käyttötarkoitus	9
2.2 RoPax-alusten rakenteelliset vaatimukset	10
2.3 Kansainväliset standardit ja säädökset (SOLAS & IMO)	11
2.4 Paloturvallisuus ja osastointi	12
<b>3 Alumiini laivanrakennuksessa</b>	<b>14</b>
3.1 Alumiinin ominaisuudet	14
3.1.1 Kevys ja lujuus	14
3.1.2 Korroosiokestävyys	15
3.2 Laivanrakennuksessa käytettävät seokset	16
3.2.1 5083-alumiini	17
3.2.2 6082-alumiini	17
3.2.3 Kestävyys ja käyttöikä	18
3.2.4 Huolto ja korjattavuus	19
3.2.5 Kustannukset	20
<b>4 Alumiinin hyödyntäminen RoPax-alusten runkorakenteissa</b>	<b>21</b>
4.1 Toteutuneet RoPax-alukset	21
4.2 Toteutuneiden RoPax-alusten vertailu	22
4.2.1 Hinta	22
4.2.2 Paino	23
4.2.3 Aluksen painopiste ja vakavuus	25
4.2.4 Alumiinin tyypilliset käyttökohteet	26
4.3 Liitostekniikka ja rakenteelliset haasteet	27
4.3.1 Paloturvallisuus	29
4.3.2 Galvaaninen korroosio	29
4.3.3 Väsymisrasitus	30

4.3.4 Monimateriaaliratkaisut	31
<b>5 Tulevaisuuden näkymät ja kehityssuunnat</b>	<b>32</b>
5.1 Taloudelliset näkymät	32
5.2 Teknologinen kehitys	33
5.2.1 Liitostekniikka	33
5.2.2 Palosuojaus	35
5.2.3 Uudet alumiiniseokset	36
<b>6 Johtopäätökset ja yhteenveto</b>	<b>37</b>
<b>Lähteet</b>	<b>38</b>

## **Kuvat**

Kuva 1. RoPax-alus. (Itamerensatamat 2022)	9
Kuva 2. Rungon poikittainen rasitus aallokossa. (Maritimesa 2020)	10
Kuva 3. Ruostetta laivan rungossa. (Cruisersforum 2016)	16
Kuva 4. Alumiinin pinnalle muodostuva oksidikerros. (Alumeco n.d)	18
Kuva 5. Teräksen ja alumiinin kosketuksen estäminen. (Bouvy 2020)	19
Kuva 6. TriClad:in liitospala. (Triclad n.d)	28
Kuva 7. Teräksen ja alumiinin yhdistäminen pulttaamalla. (Triclad n.d)	28
Kuva 8. Kitkahitsaus piirrettynä. (ESAB 2024)	34

## **Taulukot**

Taulukko 1. Myötölujuus-painosuhte	15
Taulukko 2. Alusten A ja B päämitat	21
Taulukko 3. Alumiini- ja teräsrakenteiden hinnat Suomessa asennettuna (Pösö, A 2011)	23
Taulukko 4. Alumiini- ja teräsrakenteiden kustannusarvio Kiinassa	23
Taulukko 5. Aluksen A ja B eroavaisuudet (Deltamarin Oy 2019/2022)	23
Taulukko 6. Yhteenveto laskelmista	25

Taulukko 7. A- ja B-alusten painopisteiden vertailu. (Deltamarin Oy 2019/2022)	26
Taulukko 8. Alumiinin käyttökohteet aluksessa B. (Deltamarin Oy 2022)	27

## Lyhenteet

ABS	American Bureau of Shipping
ASTM	American Society for Testing and Materials
DNV	Det Norske Veritas
EN AW-5083	Eurooppalainen laatumerkintä alumiiniseokselle 5083
EN AW-6082	Eurooppalainen laatumerkintä alumiiniseokselle 6082
FSW	Friction Stir Welding, kitkahitsaus
H116, H321	Alumiinin lujuustilat, kovetustilat H116 ja H321
HAZ	Heat Affected Zone, hitsauksen lämpövaikutusalue
IMO	International Maritime Organization, kansainvälinen merenkulkujärjestö
LNG	Liquefied Natural Gas, nesteytetty maakaasu
LOA	Length Overall, laivan kokonaispituus
LPP	Length Between Perpendiculars, perpendikkeliin välinen etäisyys
MDO	Marine Diesel Oil, laivojen dieselpolttoaine
MIG	Metal Inert Gas, hitsaustekniikka
GM	Alkuvaihtokeskuskorkeus
PCTC	Pure Car and Truck Carrier
Ro-Ro	Roll-on/Roll-off -alus
RoPax	Roll-on/Roll-off Passenger ship
SOLAS	International Convention for the Safety of Life at Sea
TIG	Tungsten Inert Gas, hitsaustekniikka
VCG	Vertical Center of Gravity, pystysuuntainen painopiste

# 1 Johdanto

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on tutkia, kuinka alumiinia voidaan hyödyntää RoPax-alusten runkorakenteissa. RoPax-alukset (Roll on/Roll off Passenger) ovat yhdistelmä matkustaja- ja rahtialuksia. RoPax-alukset kuljettavat samaan aikaan sekä matkustajia että ajoneuvoja. Tämä aiheuttaa haasteita sekä suunnittelulle että materiaalivalinnoille. Lisäksi matkustaja-aluksissa pitää kiinnittää enemmän huomiota turvallisuuteen, kuten palonkestävyyteen ja rakenteiden liitosten kestävyys.

Alumiini on terästä kevyempää materiaalia. Tämä tarkoittaa sitä, että sen avulla voidaan tehdä aluksista kevyempiä ja polttoainetehokkaampia. Tämän seurauksena matkustaja- tai rahtikapasiteettia voidaan lisätä. Alumiinin käyttöön liittyy myös haasteita. Alumiini on esimerkiksi terästä kalliimpaa, ja sen hitsaaminen sekä korjaaminen vaatii erityistä osaamista.

Tässä työssä tarkastellaan erityisesti alumiinin haasteita ja hyötyjä RoPax-alusten runkorakenteissa. Samalla tutkitaan, miten alumiinin ominaisuudet, kiinnitysmenetelmät ja korroosion kesto vaikuttavat alusten suorituskykyyn. Tarkoitus on kerätä tietoa, jonka avulla alumiinin käyttöä voidaan arvioida tulevaisuuden suunnitteluprojekteissa ja tunnistaa kehityskohteita.

Tämä opinnäytetyö on tehty yhteistyössä Deltamarin Oy:n kanssa, joka on kansainvälisesti toimiva suomalainen meritekniikan suunnittelutoimisto. Yritys on perustettu vuonna 1990. Suomen lisäksi sillä on toimipisteitä Puolassa, Kroatiassa ja Kiinassa.

## 2 RoPax-alukset ja niiden rakenteelliset vaatimukset

### 2.1 RoPax-alusten määritelmä ja käyttötarkoitus

RoPax-alus on alus, joka on suunniteltu kuljettamaan sekä ajoneuvoja että matkustajia. Termi tulee englannin kielen sanoista Ro-Ro (Roll-on/Roll-off), joka tarkoittaa pyörillä kulkevaan lastia, ja Pax, joka tarkoittaa matkustajia. (Campbell, L. 2025) Kuvassa 1 on esitetty tyypillinen RoPax-alus, joka havainnollistaa tällaisten alusten rakennetta. Kansainvälisen merenkulun turvallisuussopimuksen SOLAS:in mukaan Ro-Ro-aluksella tarkoitetaan matkustaja-alusta, jossa on kulkuneuvoja varten varattuja autokansia tai erityisiä kategoriatiiloja. (Safety4sea. 2023)



Kuva 1. RoPax-alus. (Itamerensatamat 2022)

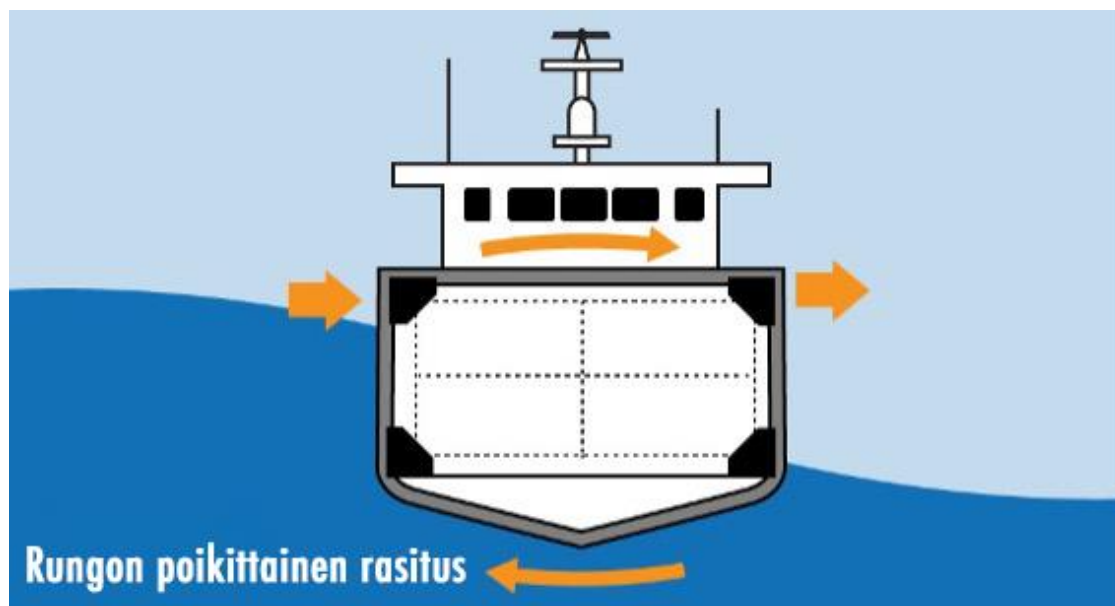
RoPax-alukset ovat keskeisessä roolissa lyhyen ja keskipitkän matkan matkustaja- ja rahtiliikenteessä. Niitä käytetään erityisesti reiteillä saarten tai naapurivaltioiden välillä, missä ne mahdollistavat matkustajien kuljetuksen heidän ajoneuvojensa kanssa. (Campbell, L. 2025) Alukset palvelevat samalla rahtiliikennettä kuljettamalla rekkoja ja perävaunuja. (Reinikainen. 2020, s.4)

Monilla reiteillä rahti muodostaa edelleen pääosan lauttaliikenteen tuloista, vaikka matkustajapalveluiden merkitys onkin viime vuosina jälleen kasvanut. RoPax-varustamot ovat alkaneet kehittää aluksiaan matkustajien kohonneiden odotusten mukaisesti. (Reinikainen. 2020, s.4) Tämä tekee RoPax-aluksista

tärkeän osan maiden logistiikkaketjuja, sillä ne yhdistävät tehokkaasti kaksi tehtävää: matkustajaliikenteen ja pyörillä kulkevan rahdin kuljetuksen. (Campbell, L. 2025)

## 2.2 RoPax-alusten rakenteelliset vaatimukset

RoPax-alusten rakenteessa on erityispiirteitä verrattuna perinteisiin rahtialuksiin. Esteettömät autokannet edellyttävät, että rungossa on vähemmän poikittaistukia. Tämä altistaa rakenteen poikittaiselle väännölle (racking) eli rungon poikittaiselle rasitukselle aallokossa. (Türk Loydu 2023, s. 1-8) Ilmiötä on havainnollistettu kuvassa 2.



Kuva 2. Rungon poikittainen rasitus aallokossa. (Maritimesa 2020)

Luokituslaitosten säännöissä on aiemmin mainitusta syystä erityisvaatimuksia rungon vääntöjäykkyydelle. Autokannen ja rungon sivujen väliset suhteelliset liikkeet saadaan hallittua vahvistamalla aluksen kansia ja pohjaa sekä lisäämällä jäykisteitä autokannen reunoille. (Türk Loydu 2023, s. 1-8; 1-7; 7-3)

Myös ajoneuvojen renkaista aiheutuvat pistemäiset kuormat aiheuttavat merkittäviä paikallisia rasituksia kansirakenteisiin. Autokansien levyjen paksuudet ja jäykistejako suunnitellaan pistekuormien perusteella. (Türk Loydu

2023, s.1-8) Lisäksi autokansirampit ja pylväät on mitoitettava siten, että ne kestävät rungon joustamista laivan ollessa aallokossa. (Türk Loydu 2023, s. 1-8)

Rungon pituuslujuus ja jäykkyys ovat kriittisiä tekijöitä RoPax-aluksissa. Aluksen pitkittäisrakenteen on kestävä aallokon aiheuttamat taivutuskuormat (hoggings/sagging) siten, että pääkannella ja kölissä syntyvät jännitykset pysyvät sallituissa rajoissa koko rungon pituudella. (Türk Loydu 2023, s.1-2)

### 2.3 Kansainväliset standardit ja säädökset (SOLAS & IMO)

SOLAS-yleissopimus (International Convention for the Safety of Life at Sea) asettaa matkustaja-alusten rakenteelliselle turvallisuudelle perusvaatimukset. SOLAS:in luku II-1 edellyttää, että matkustaja-alus on jaettu vesitiiviisiin osastoihin. Tämä takaa, että alus pysyy pinnalla ja vakaana vauriotilanteen jälkeen. (Joint Accident Investigation Commission [JAIC] 1997, Chapter 19)

RoPax-alusten kohdalla tämä on tarkoittanut muun muassa, että niiden on täytettävä SOLAS 90 -sääntöjen mukainen yhden osaston vauriovakavuusvaatimus. Käytännössä aluksen on selvitävä tietyn kokoisen vuotovaurion aiheuttamasta yhden osaston menetyksestä tietyllä turvamarginaalilla. Vuoden 1995 SOLAS-konferenssissa vaatimuksia tiukennettiin Ro-Ro-matkustaja-aluksille. Konferenssissa päätettiin, että olemassa olevat RoPax-alukset on asteittain päivitettävä täyttämään SOLAS 90 -kriteerit. (JAIC 1997, Chapter 19)

Lisäksi yli 400 matkustajan RoPax-aluksille asetettiin erityisvaatimus. Niiden tulisi olla rakenteellisesti sellaisia, että ne selviytyvät kahden osaston vuodosta. Vaihtoehtoisesti ne oli poistettava käytöstä tietyn ajan jälkeen. (JAIC 1997, Chapter 19) Nämä toimet paransivat erityisesti vanhempien alusten turvallisuutta vastaamaan uudempien normien tasoa.

SOLAS-määräyksiä kehitettiin merkittävästi M/S Estonian uppoamisen jälkeen. Vuoden 1995 lopulla IMO hyväksyi paljon muutoksia, joilla parannettiin RoPax-alusten vesitiiveyttä ja vakavuutta. Esimerkiksi keulaportista johtuvan onnettomuuden ehkäisemiseksi määrättiin, että aluksen törmäyslaipio (collision

bulkhead) on suunniteltava siten, ettei irtoava keulaportti pääse vahingoittamaan sitä. (JAIC 1997, Chapter 19)

## 2.4 Paloturvallisuus ja osastointi

RoPax-alusten paloturvallisuus on tiukasti säännelty SOLAS-yleissopimuksen luvussa II-2, joka kattaa aluksen rakenteellisen palosuojelun, havaitsemisen ja sammuttamisen. SOLAS luokittelee RoPax-alusten autokannet erityisiksi tiloiksi (special category spaces), koska niissä säilytetään ajoneuvoja, joissa on polttoainetta ja tiloihin voi olla matkustajilla pääsy. Pysty- ja vaakasuora palo-osastointi on näissä tiloissa haastavaa niiden koon vuoksi. Pääosastoihin jakaminen pystysuunnassa ei ole käytännössä mahdollista esteettömällä autokannella. (SOLAS 2002, Chapter II-2)

SOLAS sallii erityisjärjestelyn, jossa autokansi muodostaa yhden laajan vaakasuuntaisen palo-osaston, edellyttäen, että muita tärkeitä turvatoimia toteutetaan. Käytännössä tämä tarkoittaa, että autokannen ympäröivät rakenteet toimivat osaston rajoina ja ovat A-luokan paloseiniä tai -kansia, jotka estävät palon leviämisen viereisiin tiloihin. Koska osasto on pinta-alaltaan suuri, siinä on oltava tehokas kiinteä palontorjuntajärjestelmä. SOLAS:in mukaan pystysuuntaisia palo-osastoja vastaava turvataso on saavutettavissa automaattisella sammutusjärjestelmällä. (SOLAS 2002, Chapter II-2)

SOLAS asettaa autokansille lisävaatimuksia tunnistus- ja sammutusjärjestelmien osalta. Kaikissa ajoneuvo- ja Ro-Ro-tiloissa on oltava kiinteä palonilmaisu-, hälytys- sekä sammutusjärjestelmä. SOLAS edellyttää myös, että autokannen ilmanvaihtoa voidaan hätätilanteessa säätää. Palon sattuessa tuulettimet tulee voida pysäyttää tai siirtää hätätilatoimintaan. Tämä on tärkeää, jotta ne eivät syötä lisää happea tulelle. Myös savunhallinta on tärkeää. Ro-Ro-kannelle voidaan esimerkiksi järjestää savunpoisto-ohjaus siten, että savu johdetaan hallitusti ulos kannen aukkojen kautta. Kaikki ilmanvaihtokanavat, jotka lävistävät palo-osaston rajoja, on varustettava automaattisilla palopelleillä. Tämä estää sen, että savut tai kuumat kaasut eivät pääse leviämään viereisiin osastoihin. (SOLAS 2002, Chapter II-2)

SOLAS korostaa myös syttymislähteiden minimointia. Ajoneuvotiloissa ei saa olla turhia kipinänlähteitä tai kuumia pintoja. Lisäksi ajoneuvojen moottoreita tai sähkölaitteita ei yleensä saa käyttää matkan aikana. (SOLAS 2002, Chapter II-2)

Vaarallisten aineiden kuljetus autokannella on myös tarkoin säänneltyä. Esimerkiksi kaasupullot tai helposti syttyvät aineet on ilmoitettava ja sijoitettava erityispaikkoihin tai -kontteihin. (SOLAS 2002, Chapter II-2)

## 3 Alumiini laivanrakennuksessa

Alumiinia hyödynnetään laivanrakennuksessa silloin, kun rakenteilta vaaditaan keveyttä kestävyydestä tinkimättä. RoPax-aluksissa alumiinia käytetään tyypillisesti rungon ylärakenteissa painon säästämiseksi, painopisteen alentamiseksi ja aluksen suorituskyvyn parantamiseksi.

### 3.1 Alumiinin ominaisuudet

#### 3.1.1 Kevyys ja lujuus

Alumiinin alhainen paino on sen merkittävin etu laivanrakennusmateriaalina. Alumiinin tiheys on noin  $2,7 \text{ ton/m}^3$ , joka on noin kolmasosa teräksen tiheydestä. (Sunrise 2024.) Vaihtamalla teräsrakenteita alumiiniin voidaan rungon painoa vähentää tyypillisesti noin 35-40 % ja ylärakenteiden painoa 55-65 %. (Seanews 2017) Kevyempi runko parantaa aluksen kantavuutta ja siten polttoainetehokkuutta mahdollistaen suuremman hyötysuhteen ja matalamman kulutuksen. (Seanews 2017)

Alumiini on keveydestään huolimatta lujaa materiaalia. Useimpien merialumiiniseosten, kuten 5000- ja 6000-sarjojen, myötölujuus on samaa luokkaa kuin perinteisellä laivateräksellä. (Seanews 2017) Esimerkiksi merikäytössä yleinen 5083-seos (Al-Mg) saavuttaa tyypillisesti  $\sim 230 \text{ MPa}$  myötölujuuden, (Yieh n.d) kun tavallinen laivateräs on noin  $235 \text{ MPa}$ . (Gneesteels n.d) Alumiinin lujuus-painosuhte on siten erinomainen, jopa noin kolme (2,86) kertaa parempi kuin teräksellä puhtaasti myötölujuutta tarkasteltaessa.

Taulukko 1. Myötölujuus-painosuhte

Materiaali	Myötölujuus [MPa]	Tiheys [ton/m <sup>3</sup> ]	Myötölujuus-painosuhte [MPa/(ton/m <sup>3</sup> )]
<b>5083-Alumiini</b>	228	2,66	86
<b>Laivateräs</b>	235	7,85	30

Alumiinin erinomaisen lujuus-painosuhteen takia siitä voidaan suunnitella teräkseen nähden huomattavasti kevyempiä rakenteita saavuttaen silti vaadittu lujuus. On kuitenkin huomioitava, että alumiinin kimmomoduuli (noin 70 GPa) (Yieh. n.d) on vain noin kolmasosa teräksen kimmomoduulista (noin 210 GPa). (Metalformingmagazine 2022)

Jäykkyyden saavuttamiseksi alumiinirakenteissa on käytettävä terästä paksumpia aineenvahvuuksia. Tästä huolimatta kokonaispaino pysyy yleensä selvästi teräsrakenteita kevyempänä. Tutkimuksissa on raportoitu jopa noin 50 % kokonaispainon kevennys alumiinirakenteilla. (AJER 2015, s. 149)

### 3.1.2 Korroosiokestävyys

Meriympäristössä alumiini muodostaa pinnalleen oksidikerroksen, joka suojaa sitä korroosiolta. Alumiini ei ruostu, kuten teräs. Maalaamattoman teräksen korroosion etenemisnopeus on merivedessä jopa 0,12 mm vuodessa, kun taas alumiinin pinnan kulumisvauhti on vain luokkaa 0,001 mm vuodessa. (Seanews 2017) Toisin kuin alumiini, teräs on merivedessä alttiimpi korroosiolle, ja sen pintaan muodostuu nopeasti ruostetta, kuten kuvassa 3 näkyy.



Kuva 3. Ruostetta laivan rungossa. (Cruisersforum 2016)

Alumiinirakenteet säilyvät pitkään ilman suurempaa korroosiota, joka vähentää merkittävästi huollontarvetta. Alumiini soveltuu hyvin käytettäväksi ilman jatkuvaa maalipintaa toisin kuin teräs, joka tarvitsee pintakäsittelyä ruostumisen estämiseksi. Korkean magnesium-pitoisuuden 5000-sarjan merialumiinit ovat erityisen korroosionkestäviä suolaisessa merivedessä. Alumiinirakenteiden kunnossapitokustannukset jäävät vähäisemmiksi verrattuna teräkseen. (Seanews 2017)

### 3.2 Laivanrakennuksessa käytettävät seokset

Laivojen runkorakenteissa käytetään erityisesti merikäyttöön kehitettyjä alumiiniseoksia, joilla on hyvät mekaaniset ominaisuudet ja korroosionkestävyys. Yleisimmät merialumiinit kuuluvat 5000- ja 6000-seossarjoihin. (Seanews 2017)

5000-sarjan alumiinit ovat muokkauslujittuvia Al-Mg-seoksia, jotka eivät vaadi erillistä lämpökäsittelyä. Tämä tekee niistä hyviä laivan levy- ja palkkirakenteisiin. 6000-sarjan alumiinit puolestaan ovat lämpökäsiteltäviä Al-Mg-Si-seoksia, joilla saavutetaan suurempi myötölujuus ja kovuus. Tosin hitsatessa niiden lujuus laskee lämpövaikutuksesta. (Haomei n.d)

### 3.2.1 5083-alumiini

Suosituimpana merialumiinina pidetään seosta EN AW-5083, joka on 5000-sarjan seos noin 4-5 % magnesiumilla. Lisäksi siihen lisätään pieni määrä mangaania ja kromia. 5083-seos on erinomainen yhdistelmä lujuutta, sitkeyttä ja korroosionkestävyyttä meriolosuhteissa. (AJER 2015, s. 148)

Tyypillisesti 5083-seosta toimitetaan laivanrakennuksessa kovetettuina H116- tai H321-lujuustiloina, joissa materiaali on joko kevyesti muokkauslujittunut tai lämpökäsitelty korroosionkeston saavuttamiseksi. Nämä erityiset karkaisutilat täyttävät ASTM B928 -standardin vaatimukset merivedenkestävälle alumiinilevyille. (AJER 2015, s. 148-149)

Seos 5083 on helposti hitsattavissa ja säilyttää merkittävän osan lujuudestaan hitsauksen jälkeenkin, koska sitä ei ole saostuskarkaistu. Sitä käytetään erityisesti laivan rungon levyissä. Lisäksi sitä hyödynnetään rakenteissa, joissa tarvitaan hitsattavuutta, hyvää korroosionkestävyyttä ja vähintään keskitason lujuutta. (AJER 2015, s. 148)

### 3.2.2 6082-alumiini

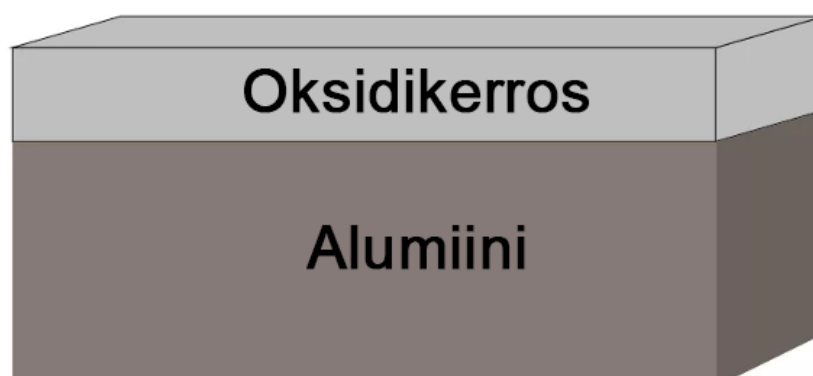
Alumiiniprofiileissa ja rungon poikittaisissa palkkirakenteissa käytetään usein 6000-sarjan seoksia, joista merkittävin laivanrakennuksessa on EN AW-6082. (AJER 2015, s. 148) Seos 6082 on T6-tilaansa lämpökäsiteltynä korkealujuuksinen (myötölujuus tyypillisesti >250 MPa) ja soveltuu hyvin voimakkaasti kuormitettuihin rakenteisiin. Sillä on hienorakenteinen mikrorakenne, joka kestää hyvin dynaamisia kuormituksia, kuten värähtelyjä ja iskuja, ilman väsymisvaurioita. (AJER 2015, s. 149)

6082-seoksen tyypillisiä käyttökohteita laivoissa ovat erilaiset pursotetut profiilit: pitkittäisjäykisteet, kannattimet, pylvää ja muut runkoa keventävät tukirakenteet. Luokituslaitokset (kuten DNV, ABS ym.) ovat hyväksyneet 6082-seoksen merikäyttöön, ja se on standardien mukaisesti sertifioitu alumiini. (AJER 2015, s. 149) Huomioitavaa on, että 6000-sarjan alumiinien korroosionkesto on hieman

heikompi kuin 5000-sarjalla: noin 2-3 kertaa nopeampi syöpmisvauhti laboratorio-olosuhteissa mitattuna. (Seanews 2017)

### 3.2.3 Kestävyys ja käyttöikä

Alumiinilla on erinomainen korroosionkesto merikäytössä verrattuna perinteisiin laivanrakennusmateriaaleihin. Sen pinnalle muodostuva kova oksidikerros suojaa materiaalia, minkä ansiosta meriveden aiheuttama syöpyminen on vähäisempää kuin teräksellä. (MC Aluminium CO 2025) Kuvassa 4 on havainnollistettu tätä oksidikerrosta. Tämän seurauksena oikein suunnitellun ja huolletun alumiinirakenteen käyttöikä voi olla erittäin pitkä. Esimerkiksi Länsi-Australiassa on yhä käytössä yli 60 vuotta vanha alumiinilaiva. Vastaavan ikäisiä teräsaluksia on harvoin yhtä hyväkuntoisina. (DNV 2019)



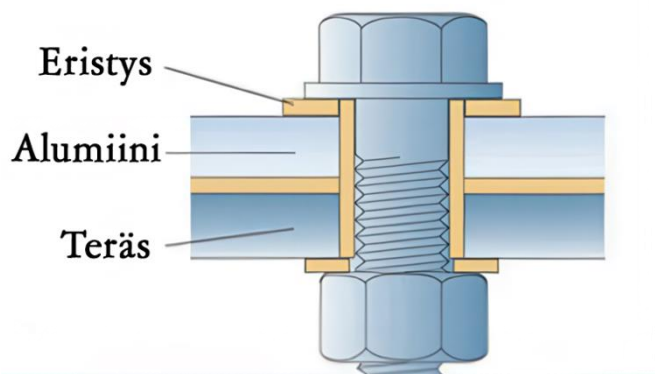
Kuva 4. Alumiinin pinnalle muodostuva oksidikerros. (Alumeco n.d)

Korkea lujuus-painosuhte tekee alumiinista rakenteellisesti kestävä materiaalin pienellä ainevahvuudella, mutta toisaalta hitsatuissa liitoksissa on huomioitava väsymisrasitus. Pitkällä aikavälillä alumiinirakenteisiin voi kehittyä väsymishalkeamia erityisesti hitsisaumoihin. (MC Aluminium CO 2025) Oikein toteutettuna alumiinirunko kuitenkin kestää hyvin ilman ennenaikaista heikentymistä. (DNV 2019)

### 3.2.4 Huolto ja korjattavuus

Materiaalivalinta vaikuttaa merkittävästi aluksen huoltotarpeeseen. Teräsrakenteet ovat alttiita ruostumiselle, joten teräsaluksilla on tehtävä säännöllisesti ruosteen poistoa ja uudelleenmaalausta. (MC Aluminium CO 2025) Alumiinilla ei esiinny ruostetta, eikä kaikkia pintoja tarvitse maalata. Paljas alumiini muodostaa itsestään suojaavan oksidikerroksen, joten esimerkiksi alumiinirungon yläosat voidaan usein jättää maalaamatta ilman korroosioriskiä. (Mike ym. 2022, s. 48) Tämä vähentää huollon työmäärää ja kustannuksia merkittävästi. On raportoitu, että joissakin alumiinilaivoissa ei käytetä ollenkaan maalipinnoitetta vesilinjan yläpuolisissa rakenteissa. (Austal 2015)

Toisaalta alumiini on sähkökemiallisesti epäjalompi materiaali kuin teräs, joten alumiinirakenteissa on huolehdittava huolellisesti eroosioroosion estämiseksi. Erityisesti on varmistettava, ettei alumiini ole suorassa kontaktissa toisen metallin kanssa, kuten kuvassa 5 on havainnollistettu. Muuten alumiini toimii anodina ja syöpyy nopeasti. (Mike ym. 2022, s. 48)



Kuva 5. Teräksen ja alumiinin kosketuksen estäminen. (Bouvy 2020)

Korjausten kannalta teräs on perinteisempi materiaali. Teräksen hitsaus ja muokkaus on monille telakoille rutinoitua ja vaatii vähemmän erikoisvälineitä. Alumiinin hitsaus taas edellyttää erikoisosaamista ja -kalustoa. (MC Aluminium CO 2025)

Vaikka nykyaikaiset telakat osaavat työstää alumiinia hyvin, vaurioiden korjaus voi silti olla hidasta ja kallista, jos koulutettuja hitsaajia tai oikeita menetelmiä ei

ole käytettävissä. Kuitenkin alumiinirakenteiden huoltoväli on monilta osin pidempi kuin teräksen. Esimerkiksi teräslaivoja joudutaan huoltomaalaamaan usein ruostumisen takia, kun taas alumiinilaivojen huoltotoimet painottuvat lähinnä hitsiliitosten tarkkailuun ja pintojen puhtaanapitoon. (MC Aluminium CO 2025)

### 3.2.5 Kustannukset

Alumiinin korkeampi hinta on sen käytön suurimpia negatiivisia puolia. Raaka-aineena alumiini on moninkertaisesti kalliimpaa kuin teräs. Tonnia kohti alumiini saattaa maksaa jopa 8-10 kertaa enemmän kuin tavallinen laivateräs. (Muzathik ym. 2012, s. 1-2) Myös valmistuskustannukset ovat alumiinilla suuremmat, koska hitsaus ja työstö vaativat erikoisosaamista ja enemmän laatukontrollia. Tämä nostaa työvoima- ja tuotantokuluja. (Muzathik ym. 2012, s. 3-4)

Alumiinin etuna on kuitenkin sen keveys, joka tuottaa säästöjä aluksen käytön aikana. Alumiinirungon pienempi paino merkitsee, että alukselle riittävät pienemmät koneet ja se kuluttaa vähemmän polttoainetta kuin vastaava teräsalus. Austal-telakan vertailussa 56-metrisen partioaluksen alumiinirunko sai aikaan noin 21 % pienemmän vuotuisen polttoaineenkulutuksen teräsrunkoversion verrattuna. (Austal 2015)

Huoltokulut puolestaan kääntyvät alumiinin eduksi elinkaaren aikana. Alhaisempi korroosikorjausten ja maalauksen tarve tarkoittaa vähemmän ylläpitokustannuksia vuosittain. Eräessä laskelmassa teräksisen laivarakenteen vuosihuoltokustannuksen arvioitiin olevan yli nelinkertainen alumiiniin verrattuna. (Muzathik ym. 2012, s. 4) Kun mukaan lasketaan käyttökulujen säästöt ja pidemmät huoltovälit, alumiinirakenteen elinkaarikustannus voi monissa tapauksissa jäädä terästä pienemmäksi. Myös offshore-aluksen kansirakenteen materiaalivalinnassa alumiini osoittautui kannattavammaksi vaihtoehdoksi. Alumiiniversio oli alkuinvestointina kalliimpi, mutta sen keveys mahdollisti lisätuottoa ja pienemmät kulut lyhentäen takaisinmaksuajan 7,9 vuoteen teräsrakenteen 8,4 vuodesta. (Muzathik ym. 2012, s. 5-6)

## 4 Alumiinin hyödyntäminen RoPax-alusten runkorakenteissa

Edellisissä luvuissa käsiteltiin alumiinin ominaisuuksia ja yleisiä vaatimuksia RoPax-aluksille. Tässä luvussa tarkastellaan tarkemmin, miten alumiinia käytetään runkorakenteissa käytännössä, missä sitä hyödynnetään, mitä teknisiä haasteita ilmenee ja millaisia ratkaisuja niihin on sovellettu.

### 4.1 Toteutuneet RoPax-alukset

Tässä osiossa tarkastellaan kahta toteutunutta RoPax-alusprojektia, jotka on suunniteltu saman varustamon tilauksesta. Projektit, joihin viitataan nimikkeillä A ja B, käsittivät koko laivan suunnitteluprosessin tuotantosuunnitteluun saakka. Projektien tavoitteena oli kehittää suorituskykyisiä RoPax-aluksia matkustajien ja ajoneuvojen kuljetukseen.

Alus A edustaa perinteistä rakennetta, jossa sekä runko että ylärakenteet on valmistettu kokonaan teräksestä. Alus B on kevennetty ja vakavuuden kannalta optimoitu versio aluksesta A. Aluksessa B osa ylärakenteiden teräksestä on korvattu noin 60 tonnilla alumiinia painopisteen alentamiseksi. Alus A on hieman pidempi, mutta aluksilla on sama leveys. Myös matkustaja- ja ajoneuvokapasiteetti on suurempi aluksessa A. Yksityiskohtaiset mitat on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Alusten A ja B päämitat

Ominaisuus	Alus A	Alus B
<b>Kokonaispituus [LOA]</b>	214,50 m	202,90 m
<b>Luotiviivojen välinen pituus [LPP]</b>	202,00 m	193,36 m
<b>Leveys [B]</b>	27,80 m	27,80 m
<b>Syväys [T]</b>	6,70 m	6,60 m
<b>Matkustajakapasiteetti</b>	1 015 henkilöä	930 henkilöä
<b>Ajoneuvokapasiteetti</b>	2 723 kaistametriä	2 500 kaistametriä

## 4.2 Toteutuneiden RoPax-alusten vertailu

Projektit erosivat toisistaan paitsi rakenteellisilta ratkaisuiltaan myös siinä, miten alumiinin käyttö vaikutti aluksen painoon ja painopisteeseen. Näitä vaikutuksia tarkastellaan tarkemmin alaluvuissa 4.2.2 ja 4.2.3.

### 4.2.1 Hinta

Materiaalien vertailussa tulee huomioida, että suurin kustannusero ei synny pelkästään materiaalin hinnasta, vaan myös sen työstöstä ja asennuksesta. Vaikka alumiini on selvästi terästä kalliimpaa, sen käyttömäärät pysyvät pienenä sen keveyden ansiosta. Tästä syystä pelkän raaka-aineen hinta ei vaikuta merkittävästi lopulliseen kokonaiskustannukseen.

Alumiinin raaka-ainehinta on noin 2 700 USD tonnilta (Ycharts 2025), kun teräksen hinta on noin 720 USD tonnilta (BBN 2025). Näin ollen alumiinin hinta on lähes nelinkertainen teräkseen verrattuna. Alumiinirakenteiden keveys kuitenkin vähentää materiaalin tarvetta, minkä vuoksi kustannusero ei muodostu ratkaisevaksi pelkästään raaka-ainehinnan perusteella. Täysin teräksisen A-aluksen raaka-ainekustannus on noin 720 USD tonnilta, kun taas vastaavan terästä ja alumiinia hyödyntävän B-aluksen raaka-ainekustannus on noin 738 USD tonnilta.

Todellinen ero kokonaiskustannuksissa ilmenee vasta rakenteiden valmistuksessa ja asennuksessa. Alumiinirakenteiden käsittely on huomattavasti kalliimpaa, sillä alumiinin hitsaus vaatii erikoisosaamista, tarkempaa laadunvalvontaa, erityisiä suojakaasuja ja monimutkaisempia liitostekniikoita. Näiden tekijöiden vuoksi valmiin alumiinirakenteen hinta on huomattavasti korkeampi verrattuna teräsrakenteeseen.

Taulukko 3. Alumiini- ja teräsrakenteiden hinnat Suomessa asennettuna (Pösö, A 2011)

Materiaali	Hinta €/tonni	Hintaero
Teräsrakenne	4 500 €	-
Alumiinirakenne	20 000 €	~4,4x teräkseen verrattuna

Euroopan telakoihin verrattuna Aasian telakat, erityisesti Kiina, on keskimäärin noin 30-40 % edullisempia johtuen alhaisemmista työvoimakustannuksista ja valtion tukitoimista. (Maritimeukraine 2024) Alla olevassa taulukossa on esitetty alumiini- ja teräsrakenteiden hinnat Kiinassa.

Taulukko 4. Alumiini- ja teräsrakenteiden kustannusarvio Kiinassa

Materiaali	Hinta €/tonni (Kiinassa, asennettu)	Verrattuna Suomeen
Teräsrakenne	noin 2 900 €/tonni	~35 % edullisempi
Alumiinirakenne	noin 13 000 €/tonni	~35 % edullisempi

#### 4.2.2 Paino

Alumiinin vaikutusta rungon painoon voidaan arvioida vertaamalla RoPax-aluksen painoja ja mittoja. Taulukko 5 esittää olennaiset vertailutiedot.

Taulukko 5. Aluksen A ja B eroavaisuudet (Deltamarin Oy 2019/2022)

Alus	Kokonaispaino [ton]	Rungon paino [ton]	Pituus LOA [m]	Leveys [B]	Ominaispaino (Rungon paino/LOA [ton/m])	Alumiini [ton]
Alus A	17 175	9 595	214,5	27,8	44,7	0
Alus B	15 618	8 932	202,9	27,8	44,0	60

Alus B on noin 11,6 metriä lyhyempi kuin vertailualue A. Tämä pituusero vaikuttaa siihen, että aluksen B kokonaispaino on kevyempi. Pelkkä painojen ero ei kuitenkaan kerro suoraan alumiinin vaikutuksesta rakenteiden keveyteen. Tästä syystä on katsottava alusten painoja siten, että pituuden vaikutus on huomioitu.

Rungon massojen ero alusten välillä on seuraava:

$$\Delta m = m_A - m_B = 9\,595 \text{ ton} - 8\,932 \text{ ton} = 663 \text{ ton}, \quad (1)$$

Näin katsottuna alus B vaikuttaa aluksi olevan noin 663 tonnia eli noin 6,9 % kevyempi. Jotta tämä luku olisi vertailukelpoinen, täytyy kuitenkin huomioida alusten eri pituudet. Koska alusten leveydet ja korkeudet ovat lähes samat, painoa on skaalattu vain pituuden suhteen. Lasketaan ensin aluksen A ominaispaino suhteessa sen kokonaispituuteen:

$$\gamma_A = \frac{m_A}{LOA_A} = \frac{9\,595 \text{ ton}}{214,5 \text{ m}} = 44,73 \text{ ton/m}, \quad (2)$$

Skaalaamalla aluksen A ominaispaino aluksen B pituuteen saadaan vertailukelpoinen paino, joka vastaa todellista painoa lyhyemmällä pituudella:

$$m_{skal} = \gamma_A \times LOA_B = 44,73 \frac{\text{ton}}{\text{m}} \times 202,9 \text{ m} = 9\,080 \text{ ton}, \quad (3)$$

Jos alus A olisi aluksen B pituinen, sen paino olisi noin 9 080 tonnia. Tämä tarkoittaa, että alusten pituusero yksistään selittää noin 515 tonnia painon erosta:

$$\Delta m_{pituus} = m_A - m_{skal} = 9\,595 \text{ ton} - 9\,080 \text{ ton} = 515 \text{ ton}, \quad (4)$$

Todellinen rakenteellinen säästö, joka johtuu nimenomaan alumiinin käytöstä on jäljelle jäävä osa massojen erotuksesta:

$$\Delta m_{Al} = m_{skal} - m_B = 9\,080 \text{ ton} - 8\,932 \text{ ton} = 148 \text{ ton}, \quad (5)$$

Laskelmien jälkeen voidaan todeta, että rakenteellinen optimointi ja teräksen korvaaminen noin 60 tonnilla alumiinia vähentää aluksen rungon painoa yhteensä noin 148 tonnia. Tämä on noin 1,5 % vertailussa käytetyn A-aluksen rungon painosta, joten alumiinin vaikutus on merkittävä. Alumiinin käyttö

ylärakenteissa johtaa huomattavaan painonsäästöön, joka vaikuttaa myös aluksen muihin ominaisuuksiin, kuten vakavuuteen ja painopisteeseen. Yhteenveto edellä esitetyistä laskelmista on koottu taulukkoon 6.

Taulukko 6. Yhteenveto laskelmista

Kuvaus	Tulos
Runkopainon ero (A - B)	663 ton
Aluksen A rungon ominaispaino	44,73 ton/m
Skaalattu paino (alus B skaalattuna aluksen A pituuteen)	9 080 ton
Pituuseron selittämä osuus alusten kokonaispainoerosta	515 ton
Alumiinin käyttö ylärakenteissa	60 ton
Rungon keventyminen alumiinin ansiosta	148 ton
Kevenemän osuus aluksen A rungon painosta	≈ 1,5 %

#### 4.2.3 Aluksen painopiste ja vakavuus

Kahden hieman erilaisen RoPax-aluksen vertailu osoittaa, kuinka alumiinin käyttö vaikuttaa suoraan aluksen kevytpainoon (LW) sekä aluksen painopisteen (G), korkeuteen ja vakavuuteen. Vaikka laivan kokonaispainoissa ja mitoissa on jonkin verran eroja, keskeisin havainto liittyy nimenomaan painopisteen alenemiseen. Täysin teräksisessä A-aluksessa painopiste on selvästi korkeammalla kuin B-aluksessa, jossa on käytetty ylärakenteissa alumiinia. Vertailun perusteella alumiinirakenteita sisältävän B-aluksen kokonaispaino (LW+DW) painopiste on noin 0,6 metriä alempana kuin vastaavan täysteräksisen version. Aluksen pelkän rungon (teräs ja alumiini) painopiste-ero on vielä suurempi, sillä aluksen B rungon painopiste on noin 1,1 metriä alempana kuin aluksen A.

Taulukko 7. A- ja B-alusten painopisteiden vertailu.  
(Deltamarin Oy 2019/2022)

Alus	VCG [m]	Ero VCG [m]
<b>Pelkkä runko</b>		
Alus A	12,44	Painopiste <b>1,14 m</b> ylempänä
Alus B	11,3	-
<b>Koko alus</b>		
Alus A	13,6	Painopiste <b>0,63 m</b> ylempänä
Alus B	12,97	-

Painopisteen alentuminen selittyy sillä, että alumiinia hyödynnettiin nimenomaan ylimmissä kansirakenteissa. Sijoittelu vähensi painoa ylhäällä, jolloin kokonaispainopiste laski. Painopisteen (G) aleneminen vaikuttaa suoraan aluksen vakavuuteen, koska alempi painopiste kasvattaa alkuvaihtokeskuskorkeutta (GM).

#### 4.2.4 Alumiinin tyypilliset käyttökohteet

RoPax-aluksissa alumiinia käytetään yleensä ylärakenteissa, joissa painonsäästöllä on merkittävä vaikutus aluksen vakavuuteen ja painopisteeseen. Yleensä alumiini sijoitetaan rakenteisiin, jotka sijaitsevat aluksen painopisteen yläpuolella. Tällöin saadaan tehokkain vaikutus painopisteen alentamisesta. Juuri tästä syystä alumiinia käytettiin aluksessa B. Tavoitteena oli alentaa painopistettä ja parantaa aluksen vakavuutta. Aluksessa B alumiinia käytettiin kansilla 10 ja 11. Seuraavassa taulukossa on esitetty alumiinisten rakenteiden painot ja painopisteiden korkeudet (VCG).

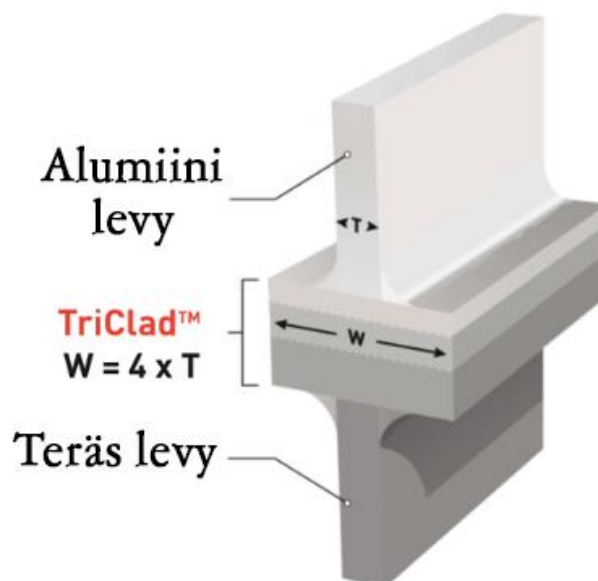
Taulukko 8. Alumiinin käyttökohteet aluksessa B. (Deltamarin Oy 2022)

Rakenneryhmä	Paino [ton]	VCG [m]
Kannen 10 yläpuoliset kylkilevyt	20,49	31,79
Kansirakenne 11 (helikopterikansi)	23,30	31,85
Kansi 11, muut rakenteet	11,66	33,05
Väliseinät kansien 10-11 välillä	5,58	31,83

#### 4.3 Liitostekniikka ja rakenteelliset haasteet

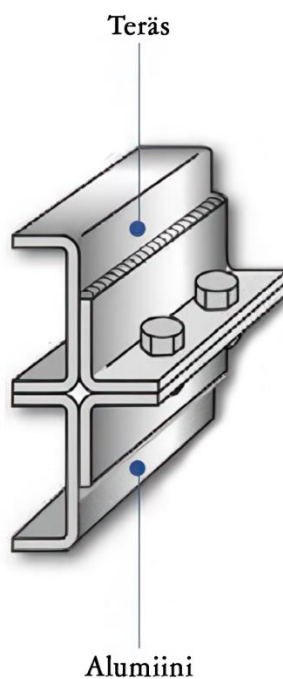
Alumiinikomponenttien liittämässä keskeisin menetelmä on sulahitsaus. Yleisesti käytetään suojakaasukaarihitsausta (MIG) tai tungstenkaarihitsausta (TIG). Teräkseen verrattuna alumiinin hitsaamisessa on huomioitava materiaalin korkea lämmönjohtavuus ja -laajeneminen. Hitsauksessa suositetaan suuria etenemisnopeuksia lämmötuonnin minimoimiseksi, jotta hitsauksen lämpövaikutusalue (HAZ) pysyy pienenä. Lisäksi alumiinin pintaan muodostuva kova oksidikalvo (alumiinioksidi  $Al_2O_3$ ) on poistettava ennen hitsausta. Oksidi estää sulan metallin yhdistymistä ja vaikeuttaa hitsin muodostumista. (Kramer ym. 2000, s.9)

Teräksen ja alumiinin suora yhdistäminen hitsaamalla on haastavaa, koska materiaalit eivät muodosta lujuudeltaan kestäviä liitoksia. Teräs-alumiini-liitoksissa käytetäänkin erityisiä siirtymäliitoksia. Bimetallisia liitosliuskkoja, joissa toinen pää on terästä ja toinen alumiinia. Nämä liitospalat valmistetaan tyypillisesti räjäytyshitsaamalla siten, että teräs ja alumiini muodostavat lujan sidoksen. Laivarakenteessa siirtymäliuska hitsataan teräspäästään teräsrunkoon ja alumiinipäästään alumiinirakenteeseen. Tällöin vältetään suora teräs-alumiini-hitsi. (Triclad n.d., s. 2; s. 4) Kuvassa 6 on esitetty esimerkki tällaisesta TriClad-liitospalasta, joka mahdollistaa alumiini- ja teräsrakenteiden vahvan ja kestävä liitoksen.



Kuva 6. TriClad:in liitospala. (Triclad n.d)

Vaihtoehtoisesti teräs ja alumiini voidaan pultata yhteen, mutta ilman siirtymäosan tarjoamaa galvanointisuojaaja tällainen liitos altistuu nopeasti korroosiolle merellisessä ympäristössä. (Triclad n.d., s. 2; s. 8). Kuvassa 7 on havainnollistettu pulttaamalla toteutettu liitos ilman siirtymäosaa.



Kuva 7. Teräksen ja alumiinin yhdistäminen pulttaamalla. (Triclad n.d)

Alumiinin ja teräksen yhdistämiseen liittyy edellä mainittujen ratkaisujen ohella joukko rakenteellisia haasteita, jotka on otettava huomioon suunnittelussa ja käytännössä. Esimerkiksi materiaalien lämpölaajenemiskertoimissa on suuri ero. Alumiinin lämpölaajenemiskerroin ( $\alpha$ ) on  $24 \times 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ , joka on lähes kaksinkertainen teräkseen verrattuna  $12 \times 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ . (Lai-Teräs n.d & Camcut n.d) Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että esimerkiksi  $70 \text{ }^\circ\text{C}$  lämpötilanousu pidentää 2 metrin mittaista alumiinirakennetta noin 3,4 mm, kun vastaavan teräsrakenteen pituus kasvaa vain noin puolella tästä. (Lai-Teräs n.d)

#### 4.3.1 Paloturvallisuus

Paloturvallisuus asettaa alumiinirakenteille erityisiä vaatimuksia. Alumiini on sinänsä palamaton metalli, mutta se menettää mekaanisen kantokykynsä huomattavasti terästä alhaisemmissa lämpötiloissa. Kokeellisesti on todettu, että alumiiniseosrakenteet menettävät lähes kaiken lujuutensa jo ennen  $550 \text{ }^\circ\text{C}$  lämpötilaa, ja monet alumiinilaadut alkavat sulaa vain hieman tämän lämpötilan yläpuolella (Hietaniemi ym. 2003, s.138-139) Teräksellä vastaava lujuusmenetys tapahtuu tyypillisesti korkeammassa lämpötilassa, sillä teräksen sulamispiste on noin  $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Kansainväliset laivaturvallisuusmääräykset edellyttävät, että alusten kantavat rungot, kansirakenteet ja rakennelmat on valmistettava teräksestä tai "muusta vastaavasta materiaalista". Tällä tarkoitetaan materiaalia, joka tulipalossa säilyttää rakenteellisen lujuutensa teräksen tavoin riittävän pitkään. Käytännössä tämä tarkoittaa, että jos laivassa käytetään alumiinia kantavissa rakenteissa, ne on suojattava paloneristyksellä siten, että alumiinirakenteen lämpötila ei nouse kriittisen korkeaksi palon aikana. (SOLAS 2002, Chapter II-2/Reg. 11)

#### 4.3.2 Galvaaninen korroosio

Galvaninen korroosio on merkittävä ongelma teräs-alumiini-liitoksissa. Teräs ja alumiini muodostavat elektrolyyttisessä ympäristössä, kuten merivedessä helposti galvanisen parin. Tällöin alumiini toimii epäjalona anodina ja syöpyy

teräksen hyväksi. Ilman suojaavia toimenpiteitä alumiinipinta altistuu korroosiolle liitoksen rajalta, mikä heikentää liitoksen kestävyyttä. Siirtymäliitosten etuna on, että hitsattu bimetallinen liitos ei sisällä korroosiolle alttiita rakoja toisin kuin pultatuissa liitoksissa. (Triclad n.d., s. 8)

Räjätysliitetyssä teräs-alumiini-liitoksessa alumiinin alkuvaiheen korrosio muodostaa tiiviin oksidikerroksen, joka käytännössä pysäyttää syöpymisen etenemisen rajapinnassa varsin nopeasti. (Triclad n.d., s. 8) Tästä huolimatta teräs-alumiini-liitokset suojataan huolellisesti esimerkiksi maalipinnoitteilla tai eristekerroksilla.

#### 4.3.3 Väsymisrasitus

Väsymisrasitus on keskeinen haaste alumiinirakenteiden liitoksille. Alumiinilla ei ole selkeää väsymisrajaa toistuvassa kuormituksessa. Materiaalin kestävä jännitystaso laskee sitä mukaan, kun väsymissyklien määrä kasvaa. Toisin kuin teräksellä, jolla tyypillisesti esiintyy tietty kynnsarvo jännitysamplitudille. Tämän alapuolella materiaali kestää lähes rajattomasti syklistä kuormitusta (Kramer ym. 2000, s. 45-46)

Pitkän käyttöiän aikana alumiinirakenteeseen voi kehittyä väsymismurtuma jopa melko alhaisella toistuvalla kuormitustasolla. Hitsatut liitokset ovat erityisen alttiita väsymiselle jännityskeskittymien ja hitsausjännitysten vuoksi. Esimerkiksi nopeasti liikennöivissä alumiinilaivoissa syntyy ajan myötä väsymishalkeamia, joita joudutaan korjaamaan huoltotoimenpiteinä säännöllisesti. (Kramer ym. 2000, s. 45-46 & 68-69)

Väsymisongelmaa voidaan lievittää sekä suunnitteluratkaisuin että uusilla liitostekniikoilla. Esimerkiksi kitkahitsaamalla (Friction Stir Welding, FSW) saadaan aikaan sulamaton liitos alumiiniin huomattavasti pienemmällä lämpökuormalla. Tämä parantaa hitsin väsymiskestävyyttä ja vähentää hitsauksesta aiheutuvia muodonmuutoksia. (TWI 2007)

#### 4.3.4 Monimateriaaliratkaisut

Hybridilaivarakenteet voivat yleistyä tulevaisuuden RoPax-aluksissa. Ajatuksena on hyödyntää kunkin materiaalin vahvuudet oikeassa kohdassa. Teräs erittäin kuormitetuissa osissa, alumiini laajoissa kevyissä rakenteissa ja komposiitit eristävissä osissa.

Yksi esimerkki on teräs-alumiini-monikerros-tekniikka, jossa teräslevyjen väliin vaahdotetaan alumiinia. Euroopan unionin rahoittamassa CREATING-hankkeessa kehitettyjä alumiinivaahtoytimiä sisältäviä runkolevyjä on testattu ja tulokset ovat olleet lupaavia. Painoa voitiin vähentää jopa 30 % teräslevyihin verrattuna, kuitenkin säilyttäen riittävä jäykkyys ja iskunkestävyys. Tällainen ratkaisu voisi tarkoittaa yli tuhannen tonnin kevennystä keskikokoisen laivan runkopainossa. (Barnstedt 2011) Tällä hetkellä nämä materiaalit ovat vielä tutkimus- ja prototyypivaiheessa, mutta 10-20 vuoden kuluessa ne saattavat olla laajemmassa käytössä.

## 5 Tulevaisuuden näkymät ja kehityssuunnat

### 5.1 Taloudelliset näkymät

Alumiinin hintaa ja saatavuutta tarkasteltaessa on huomioitava sekä kysynnän kansainvälinen kasvu, että tuotantoon liittyvät haasteet. Maailmanlaajuisesti alumiinin kysyntä on voimakkaassa kasvussa. Ennusteiden mukaan alumiinin kysyntä kaksinkertaistuu vuoteen 2050 mennessä energiatransition myötä. (Mitchell 2022) Alumiinia tarvitaan yhä enemmän esimerkiksi sähköautojen valmistuksessa. Tämä lisää kysyntää alumiinimarkkinoilla ja pitkän aikavälin ennusteet viittaavatkin hintatason nousuun. Esimerkiksi Fitch Solutionsin raaka-ainemarkkinaennusteen mukaan alumiinin hinta saattaisi nousta noin 3300 USD/tonni tasolle vuoteen 2030 mennessä (vuonna 2021 hinta oli noin 2000 USD/tonni). (Lepcha 2023)

Kysynnän ohella alumiinin hinnan nousuun vaikuttaa tuotantokustannuksien kallistuminen. Alumiinin tuotantolaitosten pyörittäminen vaatii runsaasti sähköä, joten sähköenergian hinnan vaihtelut näkyvät suoraan alumiinin hinnassa. Tämä tuli selväksi vuonna 2022, kun maailmanlaajuinen energian hinnannousu johti tuotantorajoituksiin. Korkeiden sähkökustannusten vuoksi osa tuotantokapasiteetista jopa suljettiin tilapäisesti. (Lepcha 2023)

Telakoiden näkökulmasta alumiinirakenteiden käyttö on perinteisesti merkinnyt korkeampia materiaalikustannuksia verrattuna teräkseen. Alumiinin kilohinta on moninkertainen verrattuna teräkseen ja alumiinirakenteiden valmistus vaatii erikoisosaamista. Taloudellisessa tarkastelussa on yhä olennaisempaa huomioida elinkaarikustannukset pelkän hankintahinnan sijaan. Kevyemmän aluksen tuoma polttoainesäästö koko käyttöiän aikana sekä alhaisemmat huolto- ja korroosionestokustannukset voivat kumota alkuinvestoinnin eron. (Lepcha 2023)

Eräessä tutkimuksessa vertailtiin teräs- ja alumiinirakenteisen laivan kustannuksia. Vaikka alumiinisen rungon materiaalikustannus oli noin 40 % teräsvaihtoehtoa kalliimpi, voitiin alumiinialus suunnitella niin, että koko aluksen

hankintahinta oli vain 7,5 % teräsalusta suurempi. Tämä oli mahdollista aluksen merkittävän keventymisen vuoksi. Kevyempi runkopaino johti ”kerrannaisvaikutuksiin”, kuten pienempään koneistoon sekä rakennemuutoksiin. Lisäksi kyseisessä analyysissä todettiin alumiinialuksen omaavan teräsalusta edullisemmat elinkaarikustannukset polttoaine- ja huoltokulujen säästöjen ansiosta. (Beavers ym. 2011) Tämä viittaa siihen, että alumiinirakenteiden pitkän aikavälin taloudellinen hyöty voi olla huomattava, erityisesti jos polttoaineen hinta tai mahdolliset päästökustannukset nousevat tulevaisuudessa.

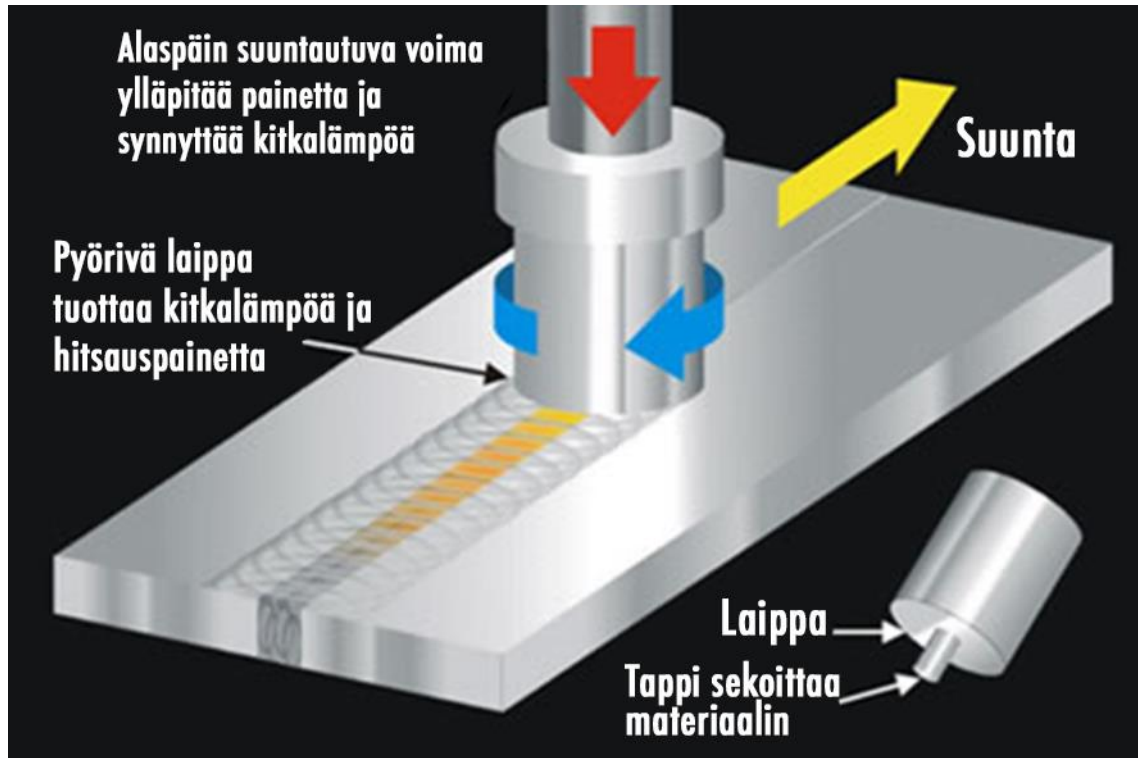
Huoltokustannusten osalta alumiini tarjoaa siis selvän taloudellisen edun. Kuten aiemmin todettu, alumiini ei tarvitse yhtä raskasta korroosiosuojausta kuin teräs. Sisäisten rakenteiden alumiinipintoja ei tarvitse maalata säännöllisesti, koska suojaava oksidikerros estää hapettumista.

## 5.2 Teknologinen kehitys

Teknologinen kehitys on keskeisessä roolissa siinä, kuinka laajasti ja tehokkaasti alumiinia hyödynnetään tulevaisuuden RoPax-aluksissa. Tulevaisuudessa odotetaan edistysaskelia liitostekniikoissa, paloturvallisuudessa ja materiaalikehityksessä, mikä poistaa aiempia alumiinirakenteiden käytön esteitä.

### 5.2.1 Liitostekniikka

Yksi merkittävimmistä kehityksistä on uusien hitsaus- ja liitostekniikoiden käyttöönotto. Erityisesti kitkahitsaus (FSW) on viime vuosikymmeninä nostanut asemansa erittäin tehokkaana vaihtoehtona perinteiselle sulahitsaukselle. (Taber 2020) Kuvassa 8 havainnollistetaan kitkahitsausmenetelmää.



Kuva 8. Kitkahitsaus piirrettynä. (ESAB 2024)

Kitkahitsauksessa pyörivä työkalu “sekoittaa” yhteen liitettävät alumiinipinnat. Näin materiaali ei koskaan sulaa täysin. Tämä vähentää lämpömuodonmuutoksia ja kutistumista, tehden tasalaatuisia ja lujia hitsisaumoja. Menetelmä soveltuu erityisen hyvin pitkien, suorien paneelien ja profiilien liittämiseen toisiinsa. (Taber 2020) Tämä sopii erinomaisesti laivan kansi- ja runkorakenteisiin, joissa on paljon suoria liitoksia.

Kitkahitsaus on mahdollistanut entistä suurempien esivalmistettujen alumiinipaneelien käytön. Esimerkiksi uuden norjalaisen rannikkoristeilijä Havila Kystruten alumiinirakenteissa hyödynnettiin alumiiniprofiileja, jotka liitettiin toisiinsa kitkahitsaamalla. Lopputuloksena saavutettiin noin 55 % painonsäästö verrattuna perinteiseen teräksiseen ylärakenteeseen, joka on merkittävä parannus aluksen vakavuuteen, painopisteeseen ja energiatehokkuuteen. (Moyle 2020)

Tulevaisuudessa kitkahitsauksen odotetaan yleistyvän entisestään sillä sen avulla voidaan myös ratkaista aiempia alumiinin hitsaushaasteita. Menetelmä kykenee jopa liittämään eri metallilaatuja toisiinsa. On raportoitu, että

kitkahitsaamalla voidaan tehdä toimivia liitoksia eri materiaalien, kuten teräksen ja alumiinin välille (Taber 2020). Tämä avaa täysin uusia mahdollisuuksia yhdistää alumiiniosia teräsrunkoon ilman perinteisiä pultti- tai räjähdysliitoksia. Tällaiset bimetalliliitokset voisivat esimerkiksi yksinkertaistaa alumiinisen ylärakenteen kiinnittämistä teräksiseen alaosaan. Myös muut liitostekniikat, kuten kehittyneet liimausmenetelmät ja hybridiliitokset etenevät.

### 5.2.2 Palosuojaus

Alumiinirakenteiden paloturvallisuus on ollut haaste matkustaja-aluksissa, sillä alumiini menettää lujuuttaan korkeissa lämpötiloissa. Tästä syystä tulevaisuuden RoPax-aluksissa tullaan hyödyntämään sekä passiivisia että aktiivisia palonsuojusratkaisuja. Modernit materiaali- ja eristeratkaisut mahdollistavat alumiinirakenteiden suojauksen siten, että ne täyttävät laivojen paloluokkavaatimukset. Alumiini itsessään on palamaton materiaali ja sillä on eräitä hyödyllisiä ominaisuuksia palotilanteessa. Esimerkiksi sen korkea lämmönjohtavuus ja hyvä lämpösäteilyheijastuvuus tarkoittavat, että lämpö leviää rakenteessa nopeasti pois kuumimmasta kohdasta, jolloin yksittäisen alueen lämpökuorma pienenee. Lisäksi alumiinin säteilyemissiivisyys on paljon terästä alhaisempi, joten alumiinipinnat eivät siirrä lämpösäteilyä ympäristöön yhtä voimakkaasti. (Bouvy 2020)

Edellä mainitut ominaisuudet voivat osaltaan vähentää palon etenemistä rakenteessa. Olennaista on kuitenkin oikeanlainen passiivinen palosuojaus. Tulevaisuuden alumiinirungoissa käytetään yhä kehittyneempiä paloeristysmateriaaleja ja rakenteellisia ratkaisuja, kuten alumiinipohjaisia monimateriaalipaneeleita, joissa alumiinilevyjen välissä on paloa eristävä ydin. Tällaisilla ratkaisuilla saavutetaan palonkestoa ilman huomattavaa lisäpainoa, sillä nykyaikaiset paloeristemateriaalit ovat kevyitä ja tilaa säästäviä. (Bouvy 2020)

### 5.2.3 Uudet alumiiniseokset

Alumiiniteknologia kehitty jatkuvasti ja uusia seoksia on kehitteillä laivanrakennuksen erityistarpeisiin. Merikäyttöön on valittu meriveden korroosiota kestäviä 5000- ja 6000-sarjan alumiiniseoksia, mutta tulevaisuudessa saatetaan hyödyntää entistä lujempia ja silti hyvin hitsattavia seoksia. Yksi lupaava seos on skandiumilla seostetut alumiiniseokset. Jo pienellä skandiumin lisäyksellä alumiinin lujuus paranee merkittävästi. Tutkimuksissa on raportoitu, että lisäämällä alumiiniseokseen skandiumia 0,1 painoprosentin verran koko seoksen massasta, myötölujuus voi kasvaa jopa 100 MPa. (Pilkington, B 2021)

Skandium-seoksilla saadaan aikaan kattava yhdistelmä eri ominaisuuksia: korkea lujuus, hyvä sitkeys, erinomainen hitsattavuus ja korroosionkesto. Käytännössä tämä tarkoittaa, että rakenteet voidaan mitoittaa ohuemmiksi ja kevyemmiksi ilman murtolujuuden heikkenemistä. (Pilkington, B 2021)

Tällaiset seokset voivat mahdollistaa merkittävän lisäpainonsäästön verrattuna nykyisiin merialumiiniseoksiin. Haasteena kuitenkin on skandiumin korkea hinta ja rajallinen saatavuus. Skandium on hyvin harvinainen alkuaine, jota saadaan sivutuotteena vain muutamista malmiesiintymistä. (Pilkington, B 2021)

Skandiumseokset ovat siis vielä kalliita ja niiden käyttö rajoittuu erikoissovelluksiin, kuten avaruus-, ilmailu ja kilpaurheiluteknologiaan. Tulevaisuudessa on kuitenkin mahdollista, että kierrätyksen tehostuminen, uudet valmistusmenetelmät ja skandiumin tuotannon kasvattaminen voivat tuoda nämä seokset laajemmin meriteollisuuteen. Tämän lisäksi kehitetään muita uusia seoksia ja lämpökäsittelytekniikoita, joilla parannetaan alumiinin suorituskykyä. Esimerkiksi korkean magnesium-pitoisuuden 5000-sarjan seoksissa pyritään vähentämään hitsauksessa tapahtuvaa lujuuden alenemaa. 6000-sarjassa kehitetään seoksia, joilla on parempi murtositkeys alhaisissa lämpötiloissa. Nämä materiaalikehitykset laajentavat alumiinin käyttökelpoisuutta uusille alueille RoPax-aluksissa ja mahdollistavat aiempaa kevyemmät mutta kestävämmät rakenteet.

## 6 Johtopäätökset ja yhteenveto

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli arvioida alumiinin käyttöä RoPax-alusten runkorakenteissa sekä tunnistaa keskeiset asiat, jotka vaikuttavat alumiinin käyttöön laivanrakennusmateriaalina. Opinnäytetyö osoitti, että alumiinin merkittävin etu on sen keveys, joka johtaa pienempään polttoaineenkulutukseen, kasvaneeseen rahti- ja matkustajakapasiteettiin sekä parantuneeseen vakavuuteen. Erityisen merkittävää on se, että alumiinin käyttö aluksen ylärakenteissa alentaa painopistettä.

Kevyemmän runkorakenteen lisäksi alumiinin hyvä korroosionkestävyys parantaa taloudellista hyötyä koko aluksen elinkaaren aikana. Maalipintaa ei välttämättä tarvita vesilinjan yläpuolisilla alueilla ja alumiinin ruostumattomuus vähentää sekä huoltokertoja että erilaisten pinnoitteiden kulutusta. Vaikka alumiinin alkuinvestointi on terästä korkeampi, elinkaarikustannuksia tarkasteltaessa huoltokulujen säästöt osoittavat alumiinirakenteiden olevan useissa tapauksissa perusteltu vaihtoehto.

Alumiinin käytöllä on myös haasteita. Paloturvallisuus edellyttää tehokasta suojausta, koska alumiini menettää kantokykynsä matalammassa lämpötilassa kuin teräs. Lisäksi metallien käyttäytymiseen liittyvät erot ja lämpölaajenemiskertoimet vaikuttavat suunnitteluun ja liitostekniikoihin. Uudet menetelmät, kuten bimetalliset siirtymäliuskat ja kitkahitsaus, mahdollistavat alumiinin entistä laajemman käytön.

Kokonaisuudessaan alumiinin edut keveyden, korroosionkestävyyden ja huoltovapauden kautta korostuvat nykyisissä päästö- ja suorituskykyvaatimuksissa. Teknologisen kehityksen myötä myös uudet alumiiniseokset, paremmat palosuojausratkaisut ja monimateriaalikonseptit laajentavat alumiinin käyttöaluetta. Tyypillisimmillään alumiinia kuitenkin käytetään edelleen RoPax-aluksen ylärakenteissa, missä siitä saadaan suurin hyöty aluksen painon ja painopisteen alenemisen kautta.

## Lähteet

AJER. 2015. 5083 type Al-Mg and 6082 type Al-Mg-Si alloys for ship building. Viitattu 7.3.2025. [https://ajer.org/papers/v4\(03\)/T04301460150.pdf](https://ajer.org/papers/v4(03)/T04301460150.pdf)

Alumeco. Kuva 4. Viitattu 22.4.2025.

[https://www.alumeco.com/media/2ebhz5at/oxide\\_layer.jpg](https://www.alumeco.com/media/2ebhz5at/oxide_layer.jpg)

Arjan, B. 2020. How aluminium provides effective fire protection offshore.

Viitattu 15.4.2025. <https://www.shapesbyhydro.com/en/material-properties/how-aluminium-provides-effective-fire-protection-offshore/>

Arjan, B. Kuva 5. Viitattu 22.4.2025.

<https://www.shapesbyhydro.com/globalassets/shapes/material-science/avoiding-galvanic-corrosion03.jpg>

Austal. 2015. Aluminium delivering speed & strength in naval applications.

Viitattu 13.3.2025. <https://www.austal.com/sites/default/files/00-images-philippines/Innovation/AUS%20Aluminium%20Brochure.pdf>

BBN. 2025. What is marine steel material AH36 plate price today. Viitattu

29.04.2025. <https://www.shipbuilding-steel.com/News/what-is-marine-steel-material-ah36-plate-price-today.html>

Ben, P. 2021. Advantages of Aluminum-Scandium Alloy in Shipping. Viitattu

15.4.2025. <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=20947>

Camcut. Konepajan laskukaavat. Viitattu 14.4.2025.

[https://www.camcut.fi/assets/Tiedostoarkisto/Camcut\\_Konepajan\\_laskukaavat.pdf](https://www.camcut.fi/assets/Tiedostoarkisto/Camcut_Konepajan_laskukaavat.pdf)

Campbell, L. 2025. Ropax Vessels: The Dual-Purpose Ferries Connecting Land

and Sea. Viitattu 13.3.2025. <https://www.seacareer.com/blog/ropax-vessels>

Chris, M. 2020. Why it is important to lightweight superstructures. Viitattu

15.4.2025. <https://www.shapesbyhydro.com/en/material-properties/why-it-is-important-to-lightweight-superstructures/>

Corinna, B. 2011. A new material to cut the weight of ships by 30 %. Viitattu 14.4.2025.

[https://www.youris.com/mobility/marine\\_transport/a\\_new\\_material\\_to\\_cut\\_weight\\_of\\_ships\\_by\\_30\\_percent\\_and\\_save\\_on\\_fuel\\_consumption\\_and\\_co2\\_emissions.kl](https://www.youris.com/mobility/marine_transport/a_new_material_to_cut_weight_of_ships_by_30_percent_and_save_on_fuel_consumption_and_co2_emissions.kl)

Cruisersforum. 2016. Kuva 3. Viitattu 22.04.2025.

<https://www.cruisersforum.com/forums/attachment.php?attachmentid=138020&d=1481728409>

Deltamarin Oy. 2019/2022. Taulukot 2-5. Aluksen A ja B painolaskenta-Excelit. Viitattu 15.04.2024.

DNV. 2019. Superyacht in aluminium. Viitattu 10.3.2025.

<https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/Superyacht-in-aluminium/>

ESAB. Kuva 8. Viitattu 23.04.2025.

[https://esab.com/sites/nam\\_en/assets/Image/image20241003042145.png](https://esab.com/sites/nam_en/assets/Image/image20241003042145.png)

Gneesteels. Abs Grade A Mild Steel Marine Grade Ship Building Steel Plate.

Viitattu 6.3.2025. <https://www.gneesteels.com/shipbuilding-steel-plate/abs-grade-a-mild-steel-marine-grade-ship.html>

Haomei. 5000 and 6000 Marine Grade Aluminum Alloys. Viitattu 7.3.2025.

<https://www.marinealu.com/a/5000-and-6000-marine-grade-aluminum-alloys.html>

Hietaniemi, J., Hakkarainen, T., Huhta, J., Jumppanen, U.-M., Kouhia, I., Vaari, J. & Weckman, H. 2003. Ontelotilojen paloturvallisuus. Viitattu 14.4.2025.

<https://publications.vtt.fi/pdf/tiedotteet/2003/T2202.pdf>

Itämerensatamat. 2022. Kuva 1. Viitattu 22.4.2025.

<https://www.itamerensatamat.fi/wp-content/uploads/2022/04/stena-line.jpg>

Jason, M. 2022. Aluminium production is critical for the energy transition but hamstrung by high electricity costs. Viitattu 14.4.2022.

<https://www.investmentmonitor.ai/sectors/energy/aluminium-production-energy-transition-challenges>

Joint Accident Investigation Commission [JAIC]. 1997. Final report on the MV ESTONIA disaster of 28 September 1994. Viitattu 20.3.2025.

<https://onse.fi/estonia/conten.html>

Kramer, R.K., Magnusson, A., Rampolla, B. 2000. Fatigue of Aluminium Structural Weldments. Viitattu 14.4.2025.

[https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/42254/dot\\_42254\\_DS1.pdf](https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/42254/dot_42254_DS1.pdf)

Lai-Teräs. Lämpöliikkeen huomioiminen. Viitattu 14.4.2025.

<https://laiteras.fi/tuotteet/purson-napsusajajestelma>

Maritimesa. 2020. Kuva 2. Viitattu 22.4.2025. <https://maritimesa.org/nautical-science-grade-12/wp-content/uploads/sites/7/2020/09/12-2-1-5-Fig10.jpg>

Maritimeukraine. 2024. Opportunities of European shipbuilding enterprises and competition with Asian shipbuilders. Viitattu 28.04.2025. <https://maritimeukraine.com/en/27-02-2024/>

MC Aluminium CO. 2025. Do aluminum alloy yachts have a higher maintenance frequency ? Viitattu 10.3.2025. <https://www.marinealum.com/a/compared-with-traditional-ship-materials-do-aluminum-alloy-yachts-have-a-higher-maintenance-frequency.html>

Mensholong, L. 2023. Aluminium price forecast: Will prices rebound in 2023 ? Viitattu 15.4.2025. <https://capital.com/aluminium-price-forecast>

Metalformingmagazine. 2022. Metal Properties: Elastic Modulus. Viitattu 6.3.2025. <https://www.metalformingmagazine.com/article/?/materials/high-strength-steel/metal-properties-elastic-modulus>

Mike, A.; Mike, S.; Ruben, D. 2022. Aluminium versus steel boat hulls discussion. s. 48. Viitattu 12.3.2025. <https://content.yudu.com/web/43kj8/0A43kug/TheReportMar22/html/48.html?page=48>

Muzathik, A.M.; Chan, M.Y.; Ferry, M.; Noor, C.W.M.; Samo, K.B. 2012. Comparison of aluminium alloy and steel materials as deckhouses for offshore support vessels. s. 1-2. Viitattu 12.3.2025. [https://www.seu.ac.lk/staff/academic/fe/muzathik/papers\\_conference/Comparison%20of%20Aluminium%20Alloy%20and%20Steel%20Materials%20As%20Deckhouses%20for%20Offshore%20Support%20Vessels.pdf](https://www.seu.ac.lk/staff/academic/fe/muzathik/papers_conference/Comparison%20of%20Aluminium%20Alloy%20and%20Steel%20Materials%20As%20Deckhouses%20for%20Offshore%20Support%20Vessels.pdf)

Nathaniel Beavers; Thomas Ingram; Thomas Lamb; Anton Schmieman. 2011. The Benefits and Cost Impact of Aluminum Naval Ship Structure. Viitattu 15.4.2025. <https://onepetro.org/JSPD/article-abstract/27/01/35/173481/The-Benefits-and-Cost-Impact-of-Aluminum-Naval>

Pösö, A. 2011. Eristeiden vaikutus laivan taloudelliseen suorituskykyyn. Viitattu 28.04.2025. [https://www.theseus.fi/bitstream/10024/25070/1/Antti\\_Poso.pdf](https://www.theseus.fi/bitstream/10024/25070/1/Antti_Poso.pdf)

Reinikainen, K. 2020. Ro-Pax Sector Moves Upmarket In Passenger Service. s. 8. Viitattu 17.3.2025. <https://www.knudehansen.com/wp-content/uploads/2020/05/RO-PAX-SECTOR-MOVES-UPMARKET-IN-PASSENGER-SERVICE.-shippax.pdf>

Safety4sea. 2023. Do you know the differences between PCTCs and RoRo/RoPax ? Viitattu 17.3.2025. <https://safety4sea.com/do-you-know-the-differences-between-pctcs-and-ro-ro-ropax/>

SENTA. 2018. Comparative Study on Ferry Ro-Ro's Car Deck Structural Strength by Means of Application of Sandwich Materials. Viitattu 14.4.2025. <https://www.scitepress.org/Papers/2018/85428/85428.pdf>

Seanews. 2017. Aluminium: The Metal for the Future of Shipbuilding. Viitattu 7.3.2025. <https://seanews.co.uk/shipping-news/aluminium-the-metal-for-the-future-of-shipbuilding/>

SOLAS. 2002. Regulation 11 - Structural Integrity. Viitattu 24.04.2025. [https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5a7f376240f0b6230268e272/Regulation\\_11\\_-\\_Structural\\_Integrity.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5a7f376240f0b6230268e272/Regulation_11_-_Structural_Integrity.pdf)

Sunrise. 2024. Density of Aluminum & Aluminum Alloys. Viitattu 7.3.2025. <https://www.sunrise-metal.com/density-of-aluminum-and-aluminum-alloys/>

Taber. 2020. The Benefits of Friction-Stir Welding in The Marine Industry. Viitattu 15.4.2025. <https://taberextrusions.com/benefits-of-friction-stir-welding-in-the-marine-industry/>

Triclad. Welding Aluminium to Steel. Viitattu 14.4.2025. Deltamarin Oy

Türk Loydu. 2023. Guidelines for the Structural Design Assessment of Ro-Ro Vessels. s. 1-2, 1-7, 1-8, 7-3. Viitattu 18.3.2025. <https://www.turkloydu.org/pdf-files/turk-loydu-kurallari/kilavuzlar/Guidelines-for-the-Structural-Design-Assessment-of-Ro-Ro-Vessels-JAN-2023.pdf>

Ycharts. 2025. Aluminum Price. Viitattu 29.04.2025. [https://ycharts.com/indicators/aluminum\\_price](https://ycharts.com/indicators/aluminum_price)

Yieh. Technical Data Sheet. Viitattu 6.3.2025. <https://aluminum.yieh.com/Upfiles/EDUp/files/5000%20Series/TDS/AA5083/TDS-YIEH-5083-Plate.pdf>