

Opinnäytetyö (AMK)

Konetekniikka

2025

Matias Hotti

Comfort-luokan äänieristyksen vaikutus laivan hintaan, painoon, painopisteeseen sekä propulsio- energiatehokkuuteen

– Meyer Turku Oy



Opinnäytetyö (AMK) | Tiivistelmä

Turun Ammattikorkeakoulu

Konetekniikan Koulutus

2025 | 43 sivua

Matias Hotti

Comfort-luokan äänieristyksen vaikutus laivan hintaan, painoon, painopisteeseen sekä propulsioon energiatehokkuuteen

- Meyer Turku Oy

Tämä opinnäytetyö toteutettiin toimeksiantona Meyer Turun Naval Architecture -osastolle keväällä 2025. Työ keskittyi laivan ääneneristykseen ja sen rakenteellisiin ratkaisuihin. Työn tavoitteena oli selvittää, miten DNV:n Comfort Class- ja IMO-määräysten mukaiset eristysratkaisut vaikuttivat laivan painoon, painopisteeseen, kustannuksiin ja propulsioon energiatehokkuuteen. Tutkimusaihe oli ajankohtainen, sillä matkustajien ja miehistön viihtyvyys sekä kansainvälisten säädösten noudattaminen edellyttävät toimivia melunhallintakeinoja.

Tutkimuksessa hyödynnettiin alan kirjallisuutta, säädöksiä ja mallilaivaan perustuvia esimerkkilaskelmia eristysratkaisujen soveltuvuuden arviointiin. Tarkastelussa olivat muun muassa kelluvat lattiat, viskoelastinen vaimennus sekä vinyyli ja eristemateriaalit.

Tulokset osoittivat, että eri eristysratkaisut vaikuttivat merkittävästi laivan eristysmassan painoon ja kustannuksiin IMO määrittämiin minimivaatimukset, kun taas DNV Comfort Class -vaatimukset edellyttivät parempaa ääneneristyskykyä, mikä lisäsi painoa ja kustannuksia, mutta samalla paransi aluksen melunhallintaa. Tutkimuksen perusteella todettiin, että laivan ääneneristyksen suunnittelussa oli tärkeää tasapainottaa melunhallinta, kustannukset ja energiatehokkuus, jotta varmistettiin sekä säädöstenmukaisuus että optimaalinen matkustusmukavuus.

Asiasanat:

Ääni, melunhallinta, äänieristys, IMO, DNV, Comfort Class, energiatehokkuus

Bachelor's Thesis | Abstract

Turku University of Applied Sciences

Mechanical Engineering

2025 | 43 pages

Matias Hotti

The impact of Comfort Class noise insulation on the ship's price, weight, center of gravity, and propulsion's energy efficiency

- Meyer Turku Oy

This thesis was commissioned by the Naval Architecture department of Meyer Turku in the spring of 2025. The study focused on the ship's noise insulation and its structural solutions. The aim of the thesis was to examine how insulation solutions complying with DNV Comfort Class and IMO regulations affected the ship's weight, center of gravity, costs, and propulsion's energy efficiency. The research topic was relevant. Passenger and crew comfort and compliance with international regulations, required effective noise control measures.

The research utilized industry literature, regulations, and example calculations based on a model ship to assess the suitability of insulation solutions. The study examined floating floors, viscoelastic damping, as well as vinyl and insulation materials.

The results indicated that different insulation solutions had a significant impact on the ship's insulation mass weight and costs. IMO defined minimum requirements and DNV Comfort Class requirements demanded better sound insulation performance, which increased weight and costs but improved the ship's sound insulation capability. Based on the research, it could be concluded that balancing noise control, costs, and energy efficiency was essential in the ship's sound insulation design to achieve both regulatory compliance and optimal passenger comfort.

Keywords:

Sound, noise control, noise insulation, IMO, DNV, Comfort Class, energy efficiency

Sisältö

Käytetyt lyhenteet tai sanasto	7
1 Johdanto	11
1.1 Opinnäytetyön aihe	11
1.2 Tutkimuksen vaiheet	11
1.3 Mallilaiva	12
1.4 Työn rajaus	13
1.5 Tutkimuskysymykset	13
2 Ääni ja akustiikka	14
2.1 Ääni	14
2.1.1 Äänenpainetaso	15
2.1.2 Äänitehotaso	16
2.2 Akustiikka	17
2.2.1 Absorptio	17
2.2.2 Jälkikaiunta-aika	18
3 Ääni laivaympäristössä	19
3.1 Äänilähteet laivassa	19
3.2 Koneistoäänet	20
4 Äänieristys ja rakenteet	21
4.1 Ilmaääni ja ilmaääneneristävyys	21
4.2 Askelääni ja askelääneneristävyys	23
4.3 Kelluva lattia	25
4.4 Viskoelastinen vaimennus	26
4.5 Eristeet ja vinyyli	26
5 Tilajärjestelyn vaikutus	27
5.1 Laivasuunnittelu ja tilojen järjestely	27
5.2 Esimerkkejä mallilaivasta	27

6 IMO:n vaatimukset	29
6.1 Yleistä	29
6.2 Melurajat	29
6.3 Ääneneristysindeksi	30
7 DNV:n Comfort Class vaatimukset	31
7.1 Yleistä	31
7.2 Melurajat	31
7.3 Ääneneristysindeksi	32
8 Eristyksen vaikutus laivaan	34
8.1 Hinta	34
8.2 Paino	35
8.3 Painopiste	37
9 Painomuutoksen vaikutus propulSION energiatehokkuuteen	38
9.1 Energiatehokkuus	38
9.2 Energiatehokkuuslaskelmat	38
10 Yhteenveto	40
Lähteet	42

Kuvat

Kuva 1 Laivan perustietoja (Meyer Turku Oy)	12
Kuva 2 Mein Schiff 7 (Meyer Turku Oy)	12
Kuva 3 Ympärisäteilevä kaiutin.	22
Kuva 4 Ilmaäänien kulkureitit	23
Kuva 5 Kalibraattori (1), Tuulisuoja (2), 1-Luokan mittarit (3)	24
Kuva 6 Askeläänikoje	25
Kuva 7 Äänieristyksen hinnat kansilla 1-6	34
Kuva 8 Kokonaisäänieristyksen hinnat	35
Kuva 9 Äänieristyksen painot kansilla 1-6	36
Kuva 10 Kokonaisäänieristyksen painot	36

Kaavat

(1) Taajuus	14
(2) Äänen nopeus	14
(3) Äänen nopeuden, taajuuden ja pitkittäisaallon aallonpituuden välinen yhteys	15
(4) Äänenpainetaso	15
(5) Usean äänilähteen äänenpainetaso	16
(6) Äänitehotaso	16
(7) Absorptiosuhde	17
(8) Absorptioala	18
(9) Jälkikaiunta-aika	18
(10) Ilmaääneneristävyys	22
(11) Askeläänitaso	24
(12) Amiraalilyhtälö	38

Taulukot

Taulukko 1 IMO:n melurajat	29
Taulukko 2 IMO:n ääneneristysindeksi	30
Taulukko 3 DNV Comfort Class melurajat	31
Taulukko 4 DNV Comfort Class ääneneristysindeksi matkustaja-alueilla	32
Taulukko 5 DNV Comfort Class ääneneristysindeksi miehistöalueilla	32
Taulukko 6 DNV Comfort Class matkustaja-alueiden maksimi askeläänitasot	33

Käytetyt lyhenteet tai sanasto

Termejä

COMF	Comfort Class
DNV	Det Norske Veritas
EEDI	Energy Efficiency Design Index
GT	Gross Tonnage
IACS	International Association of Classification Societies
IMO	International Maritime Organization
ISO	International Organization for Standardization
LVI	Lämpö, Vesi, Ilma
NAPA	Suunnitteluohjelma
VIBR	Vibration Class
YK	Yhdistyneet kansakunnat

Yleisiä

Hlö	Henkilö
Kn	Solmu
Kpl	Kappalemäärä
M	Metri
MW	Megawatti

Ääni

c	Äänen nopeus (m/s)
-----	--------------------

(C)	Celsius-aste
f	Taajuus (Hz)
Hz	Taajuuden yksikkö (1/s)
Λ	Ilmaäänien pitkittäisaallon aallonpituus
n	Syklien määrä
S	Sekunti
T	Aikajakso (s)
t	Lämpötila (°C)

Äänenpainetaso

dB	Desibeli
$L_{p,n}$	Jokin yksittäinen äänilähde
$L_{p,sall}$	Sallittu äänenpainetaso arvo
$L_{p,tot}$	Usean äänilähteen yhdessä tuottama äänenpainetaso
L_p	Äänenpainetaso (dB)
Pa	Pascal
p	Äänenpaine (Pa)
p_0	Kuulokynnys

Äänitehotaso

L_W	Äänitehotaso (dB)
W	Ääniteho (W)
W_0	Vertailuääniteho

Absorptio ja jälkikaiunta-aika

A	Absorptioala (m^2)
a	Absorptiosuhde
S	Pinta-ala (m^2)
T	Jälkikaiunta-aika (s)
V	Tilavuus (m^3)
w_1	Materiaalin pinnan kohdannut ääniteho
$w_1 - w_2$	Pinnasta heijastumatta jäänyt äänitehon suhde

Ilmaääni ja ilmaääneneristävyys

A	Absorptioala (m^2)
L_1	Keskimääräinen äänenpaine huoneessa, jossa äänilähde sijaitsee
L_2	Keskimääräinen äänenpaine vastaanottavassa huoneessa
R	Ilmaääneneristävyys
R_w	Ilmaääneneristysluku
S	Testattavan rakenteen pinta-ala (m^2)

Askelääni ja askelääneneristävyys

A	Absorptiopinta-ala vastaanottavassa huoneessa (m^2)
A_0	Referenssi absorptiopinta-ala
L_i	Energia-keskiarvoinen askeläänipaineen taso
L'_n	Askeläänitaso (dB)

Amiraaliyhtälö

C	Amiraalikerroin
Δ	Uppouma (T)
P	Akseliteho (kW)
V	Nopeus (KN)

1 Johdanto

1.1 Opinnäytetyön aihe

Opinnäytetyön tavoitteena on tutkia risteilyaluksen äänieristyksen vaikutusta aluksen hintaan, painoon, painopisteeseen, sekä propulsioon energiatehokkuuteen.

Opinnäytetyö toteutetaan Meyer Turku Oy:n antaman toimeksiannon mukaisesti.

Toimeksiannon toteutumisaikajankohta on kevät 2025.

1.2 Tutkimuksen vaiheet

Tutkimus alkaa johdannolla, jossa aihe esitellään ja tutkimuksen keskeiset tavoitteet sekä kysymykset määritellään. Seuraavaksi tarkastellaan tutkimuksen kannalta keskeisiä aihealueita, ääntä ja akustiikkaa, joiden pohjalta luodaan teoreettinen perusta tutkimukselle.

Kolmannessa vaiheessa keskitytään ääneen ja äänilähteisiin laivaympäristössä, josta jatketaan seuraavaan osioon eli äänieristyksen ja rakenteiden tarkasteluun. Esitellään erilaisia ratkaisuja, kuten kelluvia lattioita, viskorakenteita sekä eristeitä ja vinyyliä. Lisäksi tarkastellaan ilma- ja askelääneneristävyyttä sekä niiden mittaustapoja ja -standardeja.

Tämän jälkeen siirrytään laivan tilojen järjestelyn merkitykseen ääni- ja meluolosuhteiden hallinnassa. Tarkoituksena on käsitellä tilajärjestelyn vaikutusta ja esitellä yleisiä suunnitteluperiaatteita.

Tutkimus jakautuu osiin, joissa käsitellään IMO:n (International Maritime Organization) ja DNV-luokituslaitoksen (Det Norske Veritas) sääntöjen ja standardien asettamia vaatimuksia melurajoille, ääneneristysindekseille ja muille säädöksille. Aluksi IMO:n vaatimukset tutkitaan mallilaivan osalta, minkä jälkeen sama tarkastelu tehdään DNV:n sääntöjen mukaisesti.

Tutkimusta jatketaan analysoimalla lisäeristyksen vaikutuksia laivan hintaan, painoon ja painopisteeseen. Lopuksi keskitytään laivan propulsioon energiatehokkuuteen, jolloin aihealueen teoriaa käsitellään ja aiempien vaiheiden painonmuutoksiin perustuvia laskelmia suoritetaan.

Tutkimus etenee vaiheittain teoriasta käytäntöön ja tarkastelusta analyysiin, jotta asetettuihin tutkimuskysymyksiin voidaan vastata ja täytetään opinnäytetyön tavoitteet. Tekstin muotoilussa on käytetty avustavana työkaluna tekoälyä (ChatGPT:n versio GPT-4).

1.3 Mallilaiva

Tutkimuksessa käytetään mallilaivana Meyerin Turun telakan rakentamaa risteilyalusta **Mein Schiff 7**. Laiva on luovutettu tilaajalle TUI Cruises kesäkuussa 2024. Laiva on rakenteellisesti samankaltainen kuin edelliset saman sarjan alukset Mein Schiff 1 sekä Mein Schiff 2. Kuvassa 1 tarkemmin aluksen perustietoja.

Mein Schiff 7		
Bruttovetoisuus	111,500	GT
Pituus	316	M
Leveys	35,8	M
Kok. koneteho	48	MW
Propulsioteho	28	MW
Nopeus	22	Kn
Hyttejä	1447	Kpl
Matkustajamäärä	2894	Hlö
Miehistömäärä	1000	Hlö

Kuva 1 Laivan perustietoja (Meyer Turku Oy)

Kuvassa 2 Mallilaiva.



Kuva 2 Mein Schiff 7 (Meyer Turku Oy)

1.4 Työn rajaus

Lopputulos pyritään pitämään johdonmukaisena ja toimeksiannon kriteerit täyttävänä, joten työtä rajataan. Tutkimuksessa tarkastellaan äänieristystä kokonaisvaltaisesti. Koneiston, propulsio- ja LVI-järjestelmien aiheuttama melu otetaan huomioon, mutta värähtely jätetään tarkastelun ulkopuolelle, sillä siihen liittyy omat sääntönsä sekä VIBR-luokitus (Vibration Class).

1.5 Tutkimuskysymykset

Tutkimuksessa pyritään vastaamaan seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

- Mikä on vaaditun eristysmäärän hinta ja paino IMO:n vaatimusten mukaan?
- Mikä on vaaditun eristysmäärän hinta ja paino DNV:n Comfort Class sääntöjen mukaan?
- Miten muuttuu laivan painopiste IMO:n vaatimusten mukaisessa laivassa?
- Miten IMO:n mukaisen eristyksen aiheuttama painonmuutos vaikuttaa propulsioenergiätehokkuuteen?

2 Ääni ja akustiikka

2.1 Ääni

Ääni on värähtelyä, joka etenee aaltoliikkeenä väliaineessa. Tyhjiössä ääni ei voi edetä. Ääni syntyy värähtelyistä, jotka saavat ympäröivän aineen hiukkaset liikkumaan. Ääni etenee, kunnes sen energia absorboituu väliaineessa. Korvassa syntyy kuuloaistimus ilmanpaineen vaihtelun aiheuttaman rumpukalvon värähtelyn seurauksena. Ihmisen kuuloalue on 20 Hz – 20 000 Hz. Taajuus määritellään seuraavasti:

(1) Taajuus

$$f = \frac{n}{T}$$

jossa f on taajuus (Hz)

n on syklien määrä

T on jaksonaika (s)

Äänen nopeuteen vaikuttavat erilaiset tekijät, kuten esimerkiksi lämpötila, väliaineen tiheys, sekä väliaineen elastisuus. Äänen nopeus ilmassa lasketaan seuraavan kaavan mukaisesti:

(2) Äänen nopeus

$$c = 331 + 0,6 t$$

jossa c on äänen nopeus (m/s)

t on lämpötila (°C)

Normaalissa huonelämpötilassa äänen nopeus ilmassa on noin 340–345 m/s. Työssä tutkittavaa ilmaääntä käsitellään 20 °C lämpötilassa 343 m/s. Äänen nopeuden, taajuuden ja pitkäsaallon aallonpituuden välinen yhteys selitetään seuraavan kaavan avulla:

(3) Äänen nopeuden, taajuuden ja pitkäsaallon aallonpituuden välinen yhteys

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

jossa f on taajuus (Hz)

c on äänen nopeus (m/s)

λ on ilmaäänien pitkäsaallon aallonpituus

Äänen etenemisen väliaineena voi olla myös kiinteä aine, esimerkiksi teräs yms. Rakenteissa etenevä ääni tunnetaan runkoääninä. Runkoääntä syntyy rakenteeseen kiinnitettyjen laitteiden värähtelystä tai rakenteeseen kohdistuvista iskuista. Esimerkiksi huonekalujen siirtely, kävely ja esineiden putoaminen aiheuttavat rakenteisiin iskuja, jotka synnyttävät runkoääntä. (Kylliäinen ym. 2023, 37-38)

2.1.1 Äänenpainetaso

Äänenä aistittava ilmanpaineen muutos on nimeltään äänenpaine p (Pa).

Äänenpainetaso L_p (dB) laskennallinen kaava on seuraava:

(4) Äänenpainetaso

$$L_p = 10 \lg \frac{p^2}{p_0^2} = 20 \lg \frac{p}{p_0}$$

jossa L_p on äänenpainetaso (dB)

p on äänenpaine (Pa)

p_0 on 20 (μPa)

Usean äänilähteen yhdessä tuottaman äänenpainetason $L_{p,tot}$ kaava on:

(5) Usean
äänilähteen
äänenpainetaso

$$L_{p,tot} = 10 \lg \left(10^{\frac{L_{p,1}}{10}} + 10^{\frac{L_{p,2}}{10}} + \dots \right) = 10 \lg \sum_{i=1}^n 10^{L_{p,i}/10}$$

Jossa $L_{p,tot}$ on usean äänilähteen yhdessä tuottama (dB)

$L_{p,1}$ on kaavassa äänilähde (dB)

$L_{p,2}$ on kaavassa äänilähde (dB)

Kaavaan sijoittamalla x määrä äänilähteitä saadaan usean äänilähteen yhdessä tuottama äänenpainetaso.

2.1.2 Äänitehotaso

Äänilähteen kyky tuottaa äänitehoa ilmoitetaan äänitehona W (W). Vertailuääniteho W_0 on 1 pW. Suunnitteluprosessissa yksinkertaistetaan lukuarvoja, joten käytetään äänitehotasoa L_W (dB), jossa äänitehoa verrataan vertailuäänitehoon W_0 . (Kylliäinen ym. 2023, 43) Äänitehotaso määritetään seuraavalla kaavalla:

(6) Äänitehotaso

$$L_W = 10 \lg \frac{W}{W_0}$$

jossa L_W on äänitehotaso (dB)

W on ääniteho (W)

W_0 on vertailuääniteho

2.2 Akustiikka

Akustiikalla kuvataan sitä, miten ääni koetaan tutkittavassa tilassa, mihin vaikuttavat esimerkiksi absorptio ja jälkikaiunta-aika. Huoneakustiikalla kuvataan äänen heijastumista, vaimenemista, leviämistä ja muuta käyttäytymistä saman tilan sisällä.

2.2.1 Absorptio

Kylliäisen ym. (2023, 47) mukaan ”Huoneessa äänilähteen synnyttämä ääniaalto kohtaa seinä-, lattia ja kattorakenteita, joista se heijastuu takaisin huonetilaan. Pinnasta heijastuneen ääniaallon ääniteho ei ole yhtä suuri kuin pinnan kohdanneen ääniaallon ääniteho: vain osa äänitehosta heijastuu ja osa siirtyy pinnan kautta rakenteeseen. Rakenteeseen siirtynyt ääniteho muuttuu lämmöksi tai ääniaallon liike-energia muuttuu muotoaan: hiukkasten liike saa rakenteen värähtelemään. Heijastumatta jäänyt ääniteho on absorboitunut.” Absorptiosuhde kuvataan seuraavalla kaavalla:

(7) Absorptiosuhde

$$a = \frac{w_1 - w_2}{w_1}$$

jossa a on absorptiosuhde

w_1 on materiaalin pinnan kohdannut ääniteho

$w_1 - w_2$ on pinnasta heijastumatta jäänyt äänitehon suhde

2.2.2 Jälkikaiunta-aika

Jälkikaiunta-aikaa ja huoneen absorptioalaa käsitellään seuraavaksi. Koko huoneen absorptioala määritetään sen pintamateriaalien absorptioalojen kokonaismääränä ja se lasketaan seuraavalla kaavalla:

(8) Absorptioala

$$A = a_1S_1 + a_2S_2 \dots + a_nS_n = \sum_{i=1}^n a_iS_i$$

jossa A on absorptioala (m^2)

a on absorptiosuhde

S on pinta-ala (m^2)

Jälkikaiunta-aika kuvaa äänenpainetason alenemista ajan kuluessa, kun äänilähde ei enää tuota ääntä. Sabinen määritelmän mukaan 60 dB:n (desibelin) äänenpainotason aleneminen päättää jälkikaiunta-ajan mittaamisen. Sabinen kaavaa käytetään yleisesti suunnittelussa määrittäessä tilan käyttötarkoitukseen soveltuvaa jälkikaiunta-aikaa ja tarvittavaa absorptioalaa taajuuskaistoittain. (Kylliäinen ym. 2023, 49; Kylliäinen & Hongisto 2019, 31) Jälkikaiunta-aika lasketaan seuraavalla kaavalla:

(9) Jälkikaiunta-aika

$$T = 0,16 \frac{V}{A}$$

jossa T on jälkikaiunta-aika (s)

V on tilavuus (m^3)

A on absorptioala (m^2)

3 Ääni laivaympäristössä

3.1 Äänilähteet laivassa

IACS (International Association of Classification Societies) Rec 132 (2013, 21–22) mukaan ” Laivamelu voidaan jakaa ilmaitse kulkevaan meluun ja rakenteita pitkin kulkevaan meluun äänenlähteen luonteen mukaan. Se koostuu pääkoneiston melusta, apukoneiston melusta, potkurimelusta, rungon värähtelymelusta ja ilmanvaihtojärjestelmän melusta.

Laivamelun kolme pääasiallista kulkureittiä:

- Ilmateitse kulkeva melu, joka säteilee suoraan ilmaan pää- tai apukoneistojärjestelmästä.
- Rakenteita pitkin kulkeva melu, joka leviää rungon rakenteita pitkin mekaanisten värähtelyjen kautta ja säteilee ulospäin.
- Tuuletinmelu ja ilmavirran melu, jotka kulkevat ilmanvaihtojärjestelmän putkistojen kautta.

Mekaanisten värähtelyjen aiheuttaman melun hallinta:

- Mekaaniset värähtelyt ovat suurin melulähde. Rakenteisiin liittyvä värähtelyvaimennussuunnittelu on hyödyllinen myös värähtelyistä aiheutuvan melun hallinnassa, ja siihen kuuluu seuraavia menetelmiä:
 - Melulähteiden melutason vähentäminen.
 - Käyttämällä värähtelyvaimentimia pää- ja apukoneistossa melun vähentämiseksi.
 - Parantamalla koneiden staattista ja dynaamista tasapainoa.
 - Asentamalla koneille äänieristetty kotelo, jossa on ääntä vaimentava vuoraus.”

IMO:n säännöt pätevät lähes kaikkiin aluksiin, mutta sen asettamat vaatimukset meluasioissa koskettavat erityisesti miehistötiloja. Erityisesti risteilyaluksissa on kiinnitettävä huomiota ihmisten aiheuttamaan meluun, sekä yökerhojen, baarien, ravintoloiden sekä teatterin viihdejärjestelmistä kantautuvaan ääneen. Risteilyaluksissa näitä tekijöitä tarkastellaan sääntöjen ja vaatimusten näkökulmasta, asiakkaiden

viihtyvyys huomioon ottaen ja alusta ei voitaisi rakentaa pelkästään IMO:n sääntöjen perusteella. Aihepiiriin liittyviä seikkoja käsitellään tarkemmin tilojen järjestely, sekä sääntöihin ja luokitukseen liittyvissä osioissa.

3.2 Koneistoäänet

Osiossa käsitellään dieselsähköisen propulsiojärjestelmän melulähteitä yleisellä tasolla. Crockerin ym. (2007, 1219–1220) mukaan: ”Värähtelyvoimia tuottavat pääasialliset mekanismit ovat mekaaninen epätasapaino, sähkömagneettiset voimavaihtelut, iskut, kitka ja painevaihtelut.

Koneet, jotka aiheuttavat melua, voidaan luokitella niiden toimintojen mukaan seuraavasti:

- (a) voimansiirtokoneet (dieselmoottorit, höyryturbiinit, kaasuturbiinit, päämoottorit, vaihteistot jne.) ja
- (b) apukoneet (pumput, kompressorit, generaattorit, ilmastointilaitteet, hydrauliset ohjausjärjestelmät jne.).”

Melun aiheuttajiksi tunnistetaan seuraavat tekijät:

- Männän sivuääni määritellään dieselmoottorin melumekanismiksi, joka syntyy männän iskiessä sylinterin seinämää vasten.
- Mekaaninen epätasapaino generaattorissa ja apukoneissa aiheuttaa voimien ja momenttien vaihtelua.
- Vaihteistomelu johtuu pääosin hammaspyörien hampaiden iskuista.
- Potkurimelu koostuu kahdesta osasta: potkurin lavoista säteilevästä äänestä sekä matalataajuisista rungon värähtelymuodoista, jotka syntyvät potkurin lapoihin vaikuttavien hydrodynaamisten vaihteluvoimien seurauksena. Nämä voimat välittyvät potkuriakselin ja painelaakerien kautta runkoon. (Crocker ym. 2007, 1219–1220)

4 Äänieristys ja rakenteet

4.1 Ilmaääni ja ilmaääneneristävyys

Ilmassa etenevää ääntä kutsutaan ilmaääneksi. Ilmaääni syntyy, kun äänilähde saa ympärillään olevan ilman värähtelemään. Tästä aiheutuva ääniteho saa huonetta rajaavat seinä-, katto- ja lattiapinnat värähtelemään, joka saa myös toisella puolella olevan tilan ilman värähtelemään, jolloin toiseen tilaan välittyy jokin ääniteho. Ilmaääneneristävyttä tarkastellaan rakennusosan tai rakennusosien muodostaman kokonaisuuden ominaisuutena tilojen välillä. (Kylliäinen ym. 2023, 57)

Tutkimuksessa keskitytään ilmaääneneristävyden määrittelyyn ja tarkasteluun. Ilmaääneneristykseen tarkoitus on yleisesti vähentää äänen, kuten musiikin, puheen, äänentoiston tai erilaisten teknisten järjestelmien, siirtymistä tilasta toiseen.

Tilaan siirtyneen äänenpainetaso riippuu tilan koosta ja kalustuksesta, mittaustulokset on tehty vertailukelpoisiksi standardisoimalla ne vastaanottotilan jälkikaiunta-aikaan 0,5 sekuntia. (ISO 16283-1:2014, 4)

Ympäristöministeriön (2018, 19) mukaan ”Ilmaääneneristävyys R kuvaa äänitehon siirtymistä tilasta toiseen. Laboratoriossa mitattavaa ilmaääneneristyslukua R_w käytetään ilmaisemaan yksittäisen rakennusosan, esimerkiksi väliseinän tai ikkunan, kykyä eristää ilmaääntä. Rakennusosan kyky eristää ääntä on sitä parempi, mitä suurempi on ilmaääneneristävyys R tai ilmaääneneristysluku R_w .”

Ilmaääneneristysluku R_w vaatii mittauksia ja standardoitua taajuuspainotusta. Pelkästään laskennallisesti R_w - arvoa ei saada selville. Ilmaääneneristävyttä voidaan selvittää laboratoriossa, sekä kenttämittauksin. Mittaukset toteutetaan mittalaitteilla, sekä mikrofoneilla. Äänilähteenä toimii ympärisäteilevä kaiutin, joka kuvassa 3.



Kuva 3 Ympärisäteilevä kaiutin.

Ilmaääneneristävyys R (dB) on määritelty rakennusosan kohdanneen ja sen välityksellä toiseen huoneeseen siirtyneen äänitehon avulla:

(10) Ilmaääneneristävyys

$$R = L_1 - L_2 + 10 \lg \frac{S}{A}$$

jossa R on ilmaääneneristävyys (dB)

L_1 on keskimääräinen äänenpaine huoneessa, jossa äänilähde sijaitsee

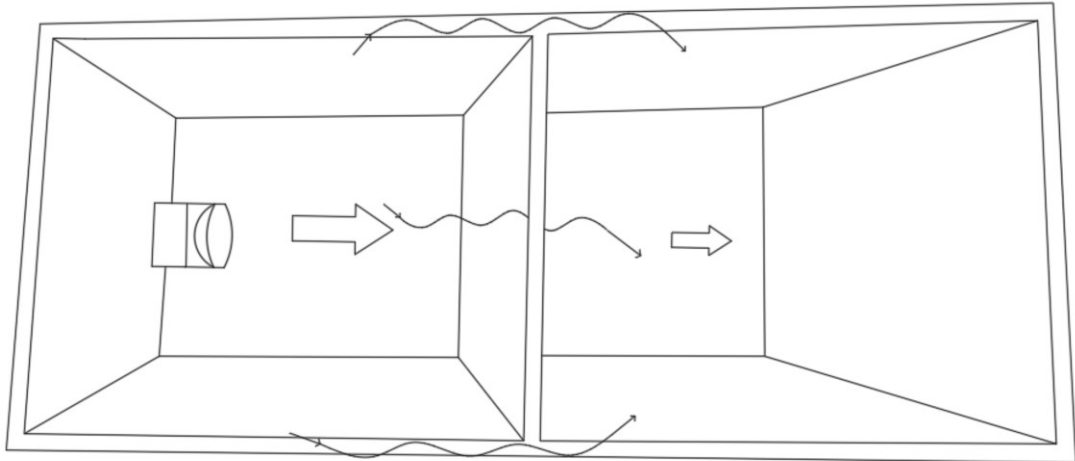
L_2 on keskimääräinen äänenpaine vastaanottavassa huoneessa

A on absorptioala (m^2)

S on testattavan rakenteen pinta-ala (m^2)

(Kylliäinen ym. 2023, 75 & Thrane H. 2013, 8)

Ilmaääneneristävyyden mittauksessa otetaan huomioon äänen kulkeminen kaikkia mahdollisia reittejä tilasta toiseen. Tämä vastaa kuulijan kokemusta äänen siirtymisestä. (Kylliäinen ym. 2023, 87) Ilmaääneneristävyyden pääasialliset kulkureitit havainnollistettuna kuvassa 4.



Kuva 4 Ilmaääneneristävyyden kulkureitit

4.2 Askelääni ja askelääneneristävyys

Askelääni muodostuu esimerkiksi kävelyn, esineiden putoamisen ja muiden vastaavien tapahtumien synnyttämistä runkoäänistä. Iskun seurauksena rakenne saa ympäröivän ilman värähtelemään, minkä vuoksi isku havaitaan rakenteen toisella puolella ilmaääninä. Askeläänieristystä käytetään vähentämään rakenteisiin kohdistuvien iskujen aiheuttamaa ääntä.

Kylliäisen ym. (2023,101) mukaan ”Askeläänieristystä ei voida arvioida lähetystilassa ja vastaanottotilassa havaittavan äänitehon suhteen perusteella kuten ilmaäänieristystä, vaan sitä arvioidaan epäsuorasti: äänilähteenä on standardoitu askeläänikoje, jonka toiseen tilaan tuottamat äänenpainetasot mitataan taajuuskaistoittain. Rakenteiden askelääneneristyskyky on siten sitä parempi, mitä alhaisempia mitatut äänenpainetasot ovat.”

Äänenpainetasomittaukset voidaan suorittaa viereisessä, sekä ala- tai yläpuolella sijaitsevassa tilassa. Laivoissa mittaukset tehdään usein yleisistä tiloista hytteihin tai

hytistä toiseen. Askeläänieristystä arvioidaan samalla tavoin kuin ilmaääneneristystä, sekä laboratorioissa että kenttämittauksin. Kuvassa 5 ilmaääni- sekä askeläänimittauksissa käytettäviä laitteita.



Kuva 5 Kalibraattori (1), Tuulisuoja (2), 1-Luokan mittarit (3)

Laivanrakennuksessa kenttämittauksissa käytetään standardisoitua askeläänitason kaavaa:

(11) Askeläänitaso

$$L'_n = L_i - 10 \lg \frac{A}{A_0}$$

jossa L'_n on askeläänitaso (dB)

L_i on energia-keskiarvoinen askeläänipaineen taso

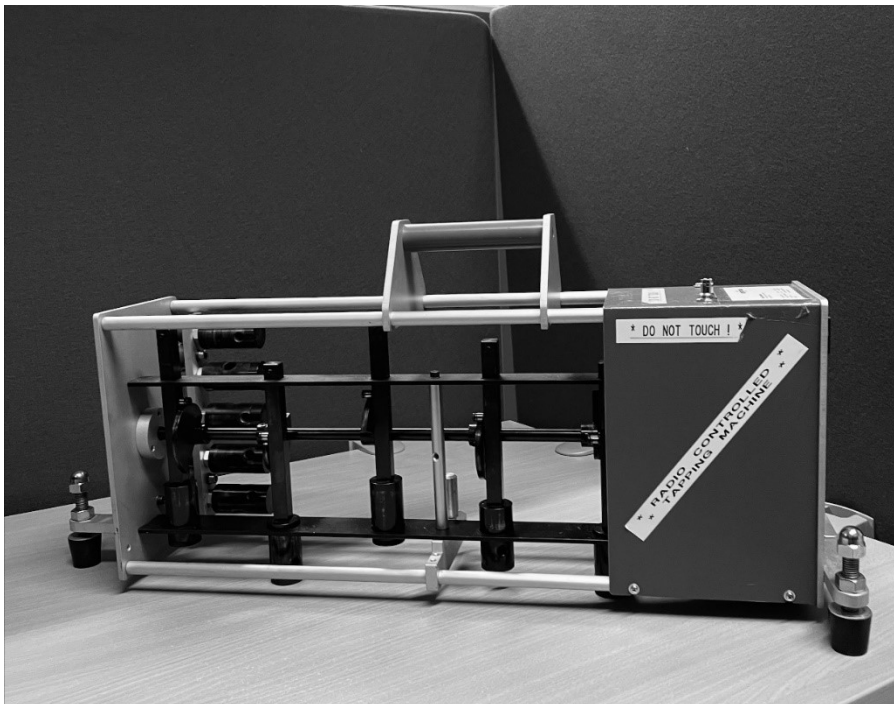
A on absorptio pinta-ala vastaanottavassa huoneessa (m^2)

A_0 on referenssi absorptio pinta-ala (m^2)

(Kylliäinen ym. 2023, 103 & SFS-EN ISO 16283-2. 2020, 10)

Äänenpainetaso riippuu vastaanottotilan koosta, sekä tilan kalustuksesta, joten askelääneneristyksen mittaluku on standardisoitu 0,5 sekunnin jälkikaiunta-aikaan. (SFS-EN ISO 16283-2:2020, 9)

Askeläänikojetta (kuva 6) käytetään mittauksissa siten, että viisi 0,5 kg painavaa vasaraa tiputetaan 40 mm korkeudesta lattialle. Vasarat iskeytyvät lattiaan kahdesti sekunnissa, jolloin laitteen kokonaistuottama iskujen määrä on 10 iskua sekunnissa. Standardi (ISO 16283-2:2020) määrittää, että kenttämittauksissa askeläänikojeelle on asetettava vähintään neljä sijaintia lähetyshuoneessa, ja vastaanottohuoneessa ääntä mitataan vähintään kahdesta kohdasta kutakin sijaintia kohden.



Kuva 6 Askeläänikoje

4.3 Kelluva lattia

Kelluva lattia on massajousisysteemi, jossa lattia on erotettu joustavilla vaimennuskerroksilla runkorakenteesta. Rakenne eristää hyvin keski- ja korkeita taajuuksia, mutta huonosti matalia taajuuksia resonanssin takia. Ratkaisulla pyritään estämään värähtelyn siirtyminen alusrakenteista lattian pinnalle, sekä eristämään tilassa muodostuvan äänen etenemistä ulkopuolelle. Kelluvaa lattiaratkaisua käytetään

erityisesti matkustaja- ja risteilyalusten majoitustilojen, ravintoloiden ja muiden meluherkkien tilojen äänieristyksessä.

4.4 Viskoelastinen vaimennus

Viskoelastista vaimennusta käytetään vaimennusratkaisuna, jossa hyödynnetään viskoelastisia materiaaleja äänen ja värähtelyn vaimennuksessa. Viskoelastinen-massa tarvitsee lisäksi esimerkiksi terästä tai betonia vaimennuskykyä parantaakseen. Viskoelastinen materiaali muuntaa mekaanista energiaa lämpöenergiaksi. Ratkaisua käytetään laivoissa erityisesti runkomelun vaimentamiseksi. Viskoelastinen vaimennus eristää hyvin koko taajuusalueella.

4.5 Eristeet ja vinyyli

Villa on kuitupohjainen eristemateriaali, jota käytetään lämmön ja äänen eristämiseen. Eristysvillan ominaisuuksiin kuuluu kyky absorboida ilmassa kulkevaa ääntä ja estää sen siirtymistä. Sitä käytetään seinien ja kattojen rakenteissa, ja sen etuja ovat hyvä palonkesto, tehokas äänenabsorptio ja lämpöeristys. Erilaisia eristeitä ovat esimerkiksi lasi- sekä kivivilla.

Mineraalivillaa käytetään erityisesti laivojen matkustajatilojen rakenteissa tarjoamaan sekä tehokasta ääneneristystä että palonkestävyyttä (Isover, 2023).

Vinyyliä on käytetty joustavana massiivisena kerrosmateriaalina rakenteiden äänieristyksen parantamiseen.

5 Tilajärjestelyn vaikutus

5.1 Laivasuunnittelu ja tilojen järjestely

Tässä osiossa käsitellään laivan suunnitteluprosessia yleisesti. Valmis laiva muodostuu monien eri tekijöiden kompromissina, mikä voi tarkoittaa esimerkiksi sitä, että viihdejärjestelmillä varustetut tilat kuten yökerhot tai teatterit, joissa äänitaso nousee korkeaksi, joudutaan sijoittamaan suoraan majoitustilojen ylä-, alapuolelle tai viereen. Suunnittelussa tulisi ottaa huomioon myös koneiston ja LVI-järjestelmien aiheuttama melu, jonka todetaan häiritsevän esimerkiksi matkustajien viihtyvyyttä ja miehistön työolosuhteita.

Lisäksi melunhallintaan vaikutetaan aluksen rakenteellisilla ratkaisuilla ja ääntä eristävillä materiaaleilla. Näiden elementtien avulla pyritään minimoimaan häiritsevät äänet ja takaamaan mukavuus erityisesti majoitustiloissa. Suunnitteluvaiheessa pyritään löytämään tasapaino eri toimintojen sijoittelun ja matkustajien kokemuksen välillä, mikä edellyttää tiivistä yhteistyötä laivasuunnittelijoiden kesken.

Vossen ym. (2013, 1) mukaan: ” Laivansuunnittelu on monimutkainen, iteratiivinen ja monimuotoinen prosessi, johon vaikuttaa useita tekijöitä. Asiakkaan visioon perustuen laivansuunnittelijan tehtävänä on kehittää tiettyyn tehtävään mahdollisimman kustannustehokas alus kansainvälisten ja kansallisten sääntöjen ja määräysten puitteissa. Suunnittelijan ja järjestelmäintegraattorin haasteena on löytää paras kompromissi näiden rajojen sisällä.”

5.2 Esimerkkejä mallilaivasta

Mein Schiff 7 -aluksessa miehistöhyttien alapuolella sijaitsevien koneistotilojen aiheuttama melu edellyttää lisäeristystä. Lisäeristys on toteutettu konehuoneen melukattoeristyksellä, ja yläpuolisen hyttikannen lattia on eristetty viskovaimennuskerroksella sekä kelluvalla lattialla.

Konekuilu on eristetty ulkopuolelta kauttaaltaan konehuoneesta kanteen 15 saakka. Eristys on välttämätön siellä kulkevien putkien ja järjestelmien aiheuttaman melun ja värähtelyn takia. Myös konehuoneen ilmanottoaukot on eristetty ilmavirran aiheuttaman melun takia.

Ensimmäisenä esimerkkinä julkisten tilojen eristyksestä käytetään pääravintolan eristystä, joka on toteutettu osittain vain kelluvalla lattialla ja osittain viskovaimennuskerroksella, jonka lisänä on kelluva lattia.

Julkisten tilojen eristys on suunniteltu siten, että mahdolliset lähellä sijaitsevat majoitustilat on otettu huomioon. Toisena esimerkkinä käytetään laivan perässä sijaitsevaa Diamond Bar –tilaa. Lattia on eristetty viskovaimennuskerroksella propulsioon vuoksi, koska tila sijaitsee perälaivassa. Yläpuolella sijaitsevien hyttien kansieristys on toteutettu kelluvalla lattialla ja hyttistä ylöspäin lisävilloituksella.

Keulassa sijaitseva teatteri äänieristetään, kuten muutkin viihdejärjestelmiä sisältävät tilat, joissa melutaso nousee tavallista korkeammalle. Teatterin lattian eristys on toteutettu viskovaimennuskerroksella, ja kattoon on asennettu melukatto. Ympäröivät tilat on otettu huomioon, mukaan lukien ylä- ja alapuolella sijaitsevat majoitustilat. Näin esitystilan aiheuttamaa meluhaittaa on estetty nousemasta liialliseksi hyteissä tai muissa ympäröivissä tiloissa.

Ulkokansien rakenne toteutetaan yksinkertaistetusti siten, että kovan polymeerin alla on toinen kerros pehmeämpää polymeeriä, ja tarvittaessa lisätään viskovaimennuskerros esimerkiksi baarien ja tanssilattioiden kohdalla. Mikäli ulkokannen alla sijaitsee hyttejä, jotka on tuettu kannakkeilla kanteen, viskovaimennuskerros vaaditaan askeläänien kulkeutumisen estämiseksi kiinnikkeiden kautta hyttiin.

Erikoistapauksissa, kuten koripallokentän kohdalla, eristys toteutetaan siten, että äänet eivät kantaudu alla oleviin tiloihin. Ravintolan puolella koripallokentän alueen alla käytetään eristykseenä lisävilloitusta. Koripallokentän lattia eristetään kattavasti, mikä mahdollistaa meluhaittojen välttämisen.

6 IMO:n vaatimukset

6.1 Yleistä

Kansainvälinen merenkulkujärjestö IMO (International Maritime Organization) on YK:n (yhdistyneiden kansakuntien) alainen erityisjärjestö, joka vastaa esimerkiksi kansainvälisen merenkulun turvallisuuden parantamisesta, meriympäristön suojelemisesta ja alusten energiatehokkuuden edistämisestä. IMO perustettiin vuonna 1948, ja sen toiminta alkoi vuonna 1959. Järjestön päämaja sijaitsee Lontoossa, Isossa-Britanniassa. (International Maritime Organization, 2025)

IMO:n keskeisiä tehtäviä ja vastuualueita ovat esimerkiksi meriturvallisuus, meriympäristön suojeleminen ja ilmastonmuutos, alusten energiatehokkuus, sekä oikeudelliset kysymykset.

6.2 Melurajat

IMO:n määrittämät melurajat (*dB*) yli 10 000 GT alukselle IMO:n julkaisun (MSC 91/22/Add.1:2012, 17-18) mukaan taulukossa 1:

Taulukko 1 IMO:n melurajat

Designation of rooms and spaces	≥ 10 000 GT
Work spaces	
Machinery spaces	110
Machinery control rooms	75
Workshops other than those forming part of machinery spaces	85
Non-specified work spaces (other work areas)	85
Navigation spaces	
Navigating bridge and chartrooms	65
Look-out posts, incl. navigating bridge wings and windows	70
Radio rooms (with radio equipment operating but not producing audio signals)	60
Radar rooms	65

(jatkuu)

Taulukko 1 (jatkuu)

Accommodation spaces	
Cabin and hospitals	55
Messrooms	60
Recreation rooms	60
Open recreation areas (external recreation areas)	75
Offices	60
Service spaces	
Galleys, without food processing equipment operating	75
Serveries and pantries	75
Normally unoccupied spaces (Cargo etc.)	90

6.3 Ääneneristysindeksi

Taulukossa 2 esitetään vaatimukset miten hyttitilojen, laipioiden ja kansien ilmaääneneristysominaisuuksien on täytettävä vähintään seuraavat painotetut ääneneristysluvut (R_w) ISO-standardin 717-1:1996 mukaan, kuten IMO:n julkaisussa (MSC 91/22/Add.1:2012, 21) mainitaan:

Taulukko 2 IMO:n ääneneristysindeksi

Cabin to cabin	R_w	= 35
Messrooms, recreation rooms, public spaces and entertainment areas to cabins and hospitals	R_w	= 45
Corridor to cabin	R_w	= 30
Cabin to cabin with communicating door	R_w	= 30

7 DNV:n Comfort Class vaatimukset

7.1 Yleistä

Det Norske Veritas on kansainvälinen luokituslaitos, jonka pääkonttori sijaitsee Norjassa. DNV:n toiminnan ytimessä on elämän, omaisuuden ja ympäristön turvaaminen. Se on toiminut Mein Schiff 7 - aluksen luokituslaitoksena. Aluksen matkustaja-alueet ovat Comfort Class V1-luokkaa ja miehistöalueet V2-luokkaa. Tilat, joita luokituslaitosten säännöissä ei erikseen mainita ovat IMO:n vaatimusten kanssa linjassa.

7.2 Melurajat

DNV:n määrittämät melurajat (dB) yli 10 000 GT alukselle (DNV-RU-SHIP 2025, Pt.6 Ch.8, Section 1, Table 13 & 15) taulukossa 3:

Taulukko 3 DNV Comfort Class melurajat

Passenger areas - maximum noise levels (dB(A))	
Locations	COMF-V1 Transit condition
Top grade cabins	44
Standard cabins	49
Waiting areas and corridors in cabin areas	65
Public spaces (1)	55
Gymnasium	58
Open deck recreation areas	65
Open deck restaurants (2)	65
(1) 5 dB(A) relaxation in serving area of open galleys and pantries when extract fans are running. (2) 5 dB(A) relaxation in sports areas, passageways and near (≤ 3 m from) ventilation inlets and outlets.	
Locations	COMF-V2
Crew Cabins	53

7.3 Ääneneristysindeksi

Taulukossa 4 esitetään matkustaja-alueiden ääneneristysindeksi standardin ISO 717-1 mukaisesti: (DNV-RU-SHIP 2025, Pt.6 Ch.8, Section 1, Table 19)

Taulukko 4 DNV Comfort Class ääneneristysindeksi matkustaja-alueilla

Cabin to cabin (standard grade)	Rw	= 41
Cabin to cabin (top grade*)	Rw	= 46
Corridor/staircase to cabin (standard grade) or cabin to cabin (standard grade) with communicating door	Rw	= 38
Corridor/staircase to cabin (top grade), cabin to cabin (top grade) with communicating door or private pantry to cabin (top grade) with communicating door	Rw	= 41
Office/public space excluding entertainment area *) to cabin (standard grade)	Rw	= 51
Office/public space excluding entertainment area *) to cabin (top grade)	Rw	= 56
Entertainment area/gymnasium*) to cabin	Rw	= 65

***Which areas to be graded as 'top grade' and 'entertainment area' must be specified and shall be listed in the scope clarification Z100**

Taulukossa 5 esitetään matkustaja-alueiden ääneneristysindeksi standardin ISO 717-1 mukaisesti: (DNV-RU-SHIP, 2025 Pt.6 Ch.8, Section 1, Table 20)

Taulukko 5 DNV Comfort Class ääneneristysindeksi miehistöalueilla

Cabin to cabin	Rw	= 35
Corridor/staircase to cabin or cabin to cabin with communicating door	Rw	= 32
Office/public space/gymnasium to cabin	Rw	= 47
Note: hospitals shall be subject to the same insulation requirements as crew cabins.		

Taulukossa 6 esitetään matkustaja-alueiden normalisoidut maksimi askeläänitasot $L'_{n,w}$ standardin ISO 717-2 mukaisesti: (DNV-RU-SHIP, 2025 Pt.6 Ch.8, Section 1, Table 21)

Taulukko 6 DNV Comfort Class matkustaja-alueiden maksimi askeläänitasot

Cabin underneath deck area in general	$L'_{n,w}$ (dB)	= 50
Cabin underneath deck area with hard deck covering*	$L'_{n,w}$ (dB)	= 57
Cabin underneath dance floor, stage and gymnasium	$L'_{n,w}$ (dB)	= 45

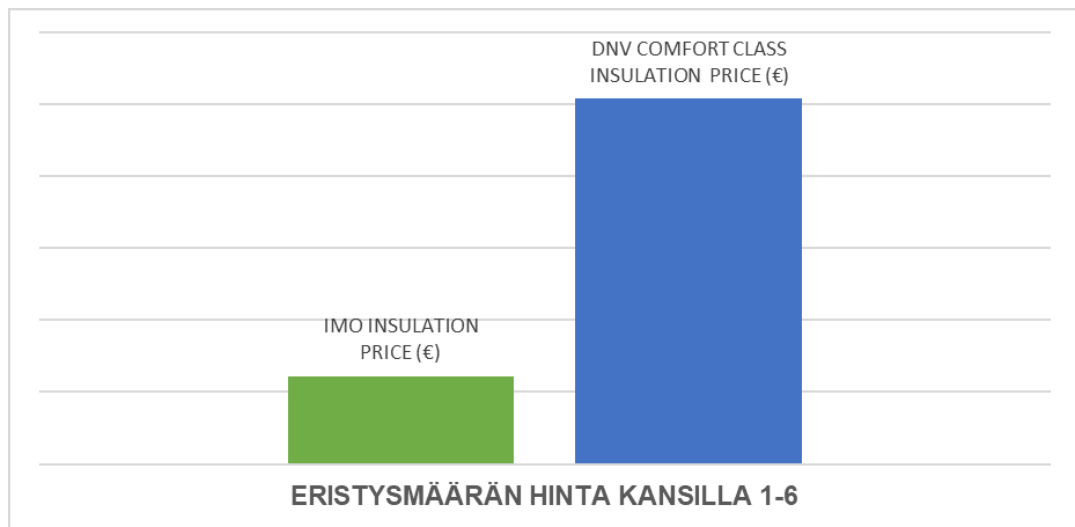
***Examples of hard deck coverings are wood, laminate wood, vinyl flooring, stone- and ceramic tiles.**

8 Eristyksen vaikutus laivaan

8.1 Hinta

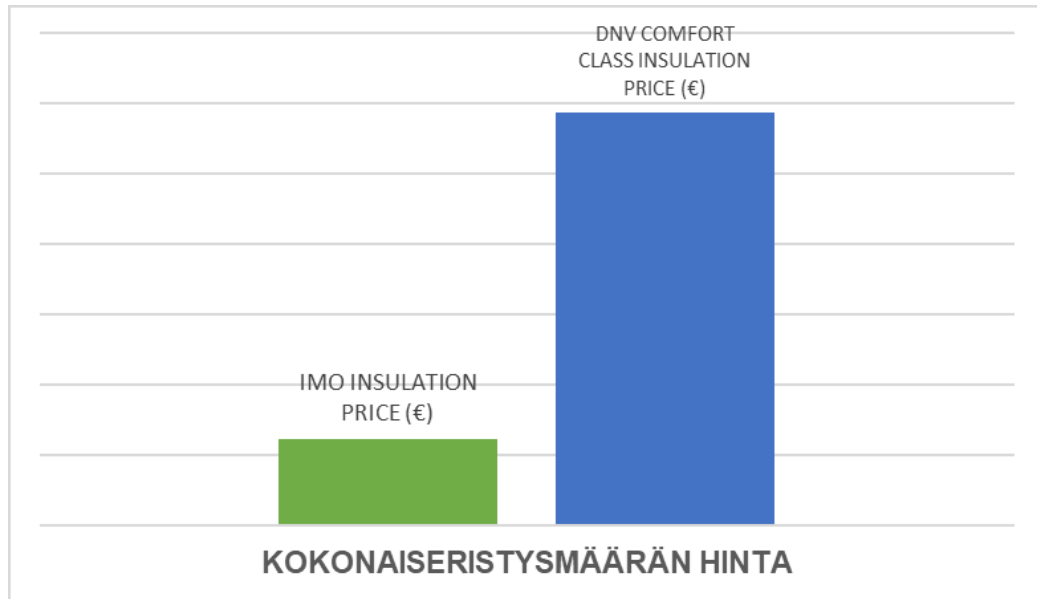
Laivan äänieristyksen vaikutusta hintaan selvitettiin vertailemalla tutkimusta varten laadittua IMO:n vaatimusten mukaista melunhallintasuunnitelmaa (Noise Control Plan) sekä DNV Comfort Class vaatimusten perusteella laadittua melunhallintasuunnitelmaa. Tutkimustyössä hinta- ja painotietoja kuvaavat dokumentit ovat saatu henkilökohtaisena tiedonantona. (28.01.2025)

Vertailu kohdistettiin kansien 1–6 välille, koska IMO:n vaatimusten täytyminen mahdollistettiin kyseisten kansien eristysratkaisujen uudelleensuunnittelulla. Lisäksi tutkimuksessa tarkasteltiin IMO:n vaatimusten mukaista eristystä suhteessa DNV Comfort Class edellyttämään kokonaiseristysmäärään. Kuvassa 7 esitetään äänieristyksen hintaeroa kansilla 1-6:



Kuva 7 Äänieristyksen hinnat kansilla 1-6

Tutkimuksessa vertailtiin myös IMO:n vaatimusten mukaista eristystä laivan kokonaiseristyksen hintaan, joka esitetään kuvassa 8:



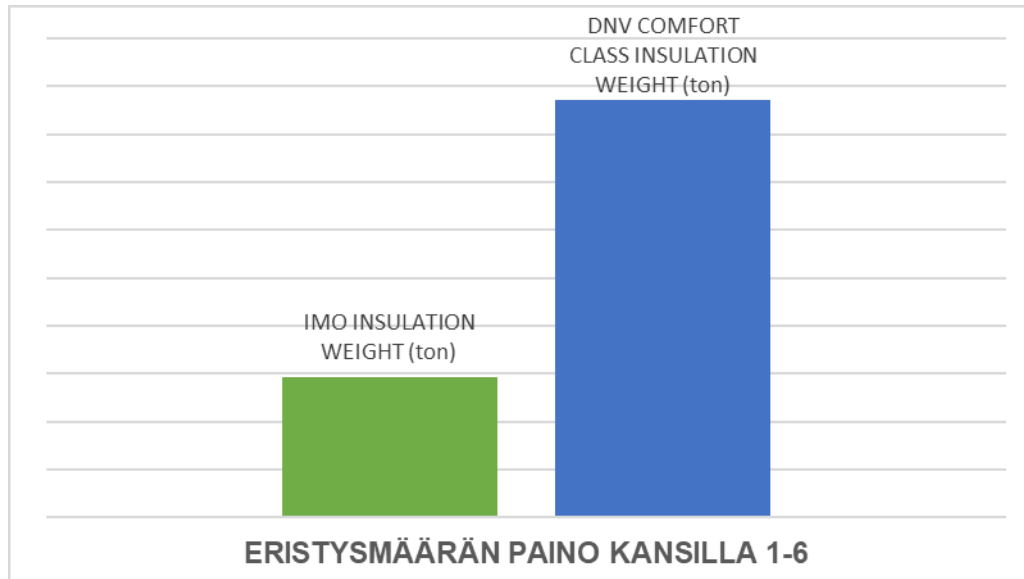
Kuva 8 Kokonaisäänieristyksen hinnat

Kuvasta 8 näemme, että Comfort Class ääneneristysvaatimukset aiheuttavat huomattavia lisäkustannuksia, verrattuna pelkästään IMO:n vaatimuksiin. Comfort Class vaatimusten mukaisen eristyksen hinta on melkein viisinkertainen.

8.2 Paino

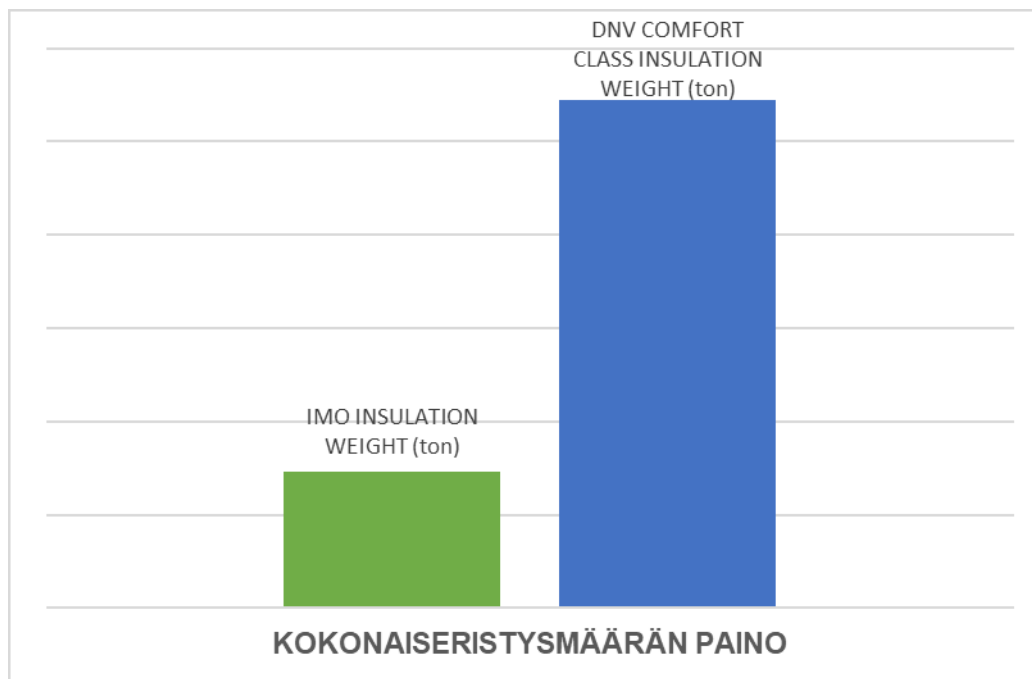
Laivan äänieristyksen vaikutusta aluksen painoon selvitettiin myös kuten edellisessä hinta-osiossa eli vertailemalla tutkimusta varten laadittua IMO:n vaatimusten mukaista melunhallintasuunnitelmaa sekä DNV Comfort Class vaatimusten perusteella laadittua melunhallintasuunnitelmaa. Tutkimustyössä käsiteltävät dokumentit ovat saatu henkilökohtaisena tiedonantona. (28.01.2025)

Vertailu kohdistettiin tässäkin kansien 1–6 välille, koska IMO:n vaatimukset täytettiin uudelleensuunnittelemalla näiden kansien eristysratkaisut. Lisäksi tutkimuksessa tarkasteltiin IMO:n eristystä suhteessa DNV Comfort Class edellyttämään kokonaiseristysmäärään. Kuvassa 9 esitetään äänieristyksen painoeroa kansilla 1-6:



Kuva 9 Äänieristyksen painot kansilla 1-6

Tutkimuksessa vertailtiin myös IMO:n mukaista eristystä laivan kokonaiseristyksen painoon, joka esitetään kuvassa 10:



Kuva 10 Kokonaisäänieristyksen painot

Kuvasta 10 näemme, että Comfort Class ääneneristysvaatimukset aiheuttavat huomattavan eron eristysmäärän painossa, verrattuna pelkästään IMO:n vaatimuksiin. IMO:n eristyksen paino on noin neljä kertaa alhaisempi.

8.3 Painopiste

Painopisteen muutos selvitettiin aluksen NAPA-mallista vähentämällä eristysmäärää ja sen painoa. Aluksi poistettiin kaikki DNV Comfort Class vaatimusten mukaiset uivien lattioiden eristykset kansilta 15–7, minkä jälkeen jäljelle jääneet eristykset mukautettiin IMO:n vaatimusten mukaisiksi.

Tutkimusta rajattiin siten, että painopiste-osiossa laipioeristykset ja lisävilloitukset jätettiin tarkastelun ulkopuolelle. Näiden osuus IMO:n mukaisen eristyksen pinta-alasta ja massasta oli vähäinen. Kyseisiä eristyksiä ei poistettu myöskään DNV Comfort Class mukaisesta NAPA-mallista, jotta data säilyi vertailukelpoisena.

Pelkkien uivien lattioiden painopistettä tarkasteltaessa havaittiin muutoksia, jotka johtuivat yleisen ääneneristysmäärän vähenemisestä ja joidenkin tilojen eristysratkaisujen kokonaan poistamisesta. Voidaan päätellä, että vaikka eristysmassan väheneminen ja uivien lattioiden painopisteen muutos vaikuttavat laivan kokonaispainopisteeseen, muutos ei ole merkittävä. Koko aluksen painopisteen muutos Z-akselilla oli alle yhden prosentin, kun taas X- ja Y-akseleilla tilojen sijoittelulla ja painojakaumalla olisi merkittävämpi vaikutus painopisteeseen.

9 Painomuutoksen vaikutus propulsioenergiatehokkuuteen

9.1 Energiatehokkuus

Laivan energiatehokkuus on keskeinen tekijä merenkulun ympäristövaikutusten vähentämisessä ja taloudellisen suorituskyvyn parantamisessa. Energiatehokkuudelle ei ole lisävaatimuksia, kunhan laiva läpäisee EEDI:n (Energy Efficiency Design Index) päästörajoitukset. EEDI on IMO:n asettama ja vuonna 2013 voimaan astunut määräys, joka asettaa ehdot kasvihuonepäästöjen vähentämiselle pitkällä aikavälillä. EEDI ohjaa laivanrakennusteollisuutta suunnittelemaan entistä energiatehokkaampia aluksia esimerkiksi kehittyneillä propulsiojärjestelmillä, paremmalla rungon muotoilulla ja vaihtoehtoisilla polttoaineilla. (IMO, 2025) Opinnäytetyössä otetaan tarkempaan tarkasteluun eristyksen aiheuttaman painonmuutoksen vaikutus propulsioenergiatehokkuuteen. Tämä toteutetaan amiraaliyhtälön avulla:

(12) Amiraaliyhtälö

$$C = \frac{\Delta^{\frac{2}{3}} V^3}{P}$$

jossa C on amiraalikerroin.

Δ on uppouma tonneina.

V on nopeus solmuina.

P on akseliteho kilowatteina.

9.2 Energiatehokkuuslaskelmat

Propulsioenergiatehokkuutta arvioitiin amiraaliyhtälön avulla. Amiraaliyhtälöstä saatiin ulos kerroin, joka kuvasi laivan propulsioenergiatehokkuutta. Arvo on yleisesti välillä 400 – 600 ja mitä suurempi luku, sen parempi propulsioenergiatehokkuus laivalla on, annetun nopeuden ja uppouman massan suhteen. Vertailussa

vakionopeutena käytettiin aluksen erittelyssä määriteltyä service speed - arvoa ja propulsiotehossa otettiin huomioon 80% rasitus per propulsio.

IMO:n vaatimusten mukainen eristysmassa vähensi laivan propulsioenergiatehokkuutta amiraaliyhtälön mukaan, noin yhden prosentin verran propulsiotehon ja nopeuden pysyessä samana. Vaikka aluksen uppouman painoa on vähennetty, propulsioenergian hyötysuhde suhteessa uppoumaan on hieman heikentynyt. Toisaalta myös kokonaispropulsioteho on laskenut, joka johtaa pienempään absoluuttiseen polttoaineenkulutukseen, mikä on energiataloudellisuuden kannalta keskeinen tavoite.

Näin voidaan todeta, että propulsiotehoa vähentämällä IMO:n äänieristyksen mukaisen aluksen laskennallinen energiaterveys parani, koska uppouman painon vähentyessä määritelty propulsioteho oli liian suuri.

Baldi ym. mukaan: "Vuotuista kumulatiivista energiankulutusta tarkasteltaessa lähes 50% kokonaisenergiankulutuksesta liittyy alusten propulsioon, kun taas jäljelle jäävä osuus jakautuu suunnilleen tasan sähkön ja lämmön tarpeen välillä." Laivan propulsioenergian todellinen amiraalikerroin voi erota tutkimuksessa lasketusta arvosta, mutta laskusta saatiin vertailukelpoinen tulos, työn tarkkuuden puitteissa

10 Yhteenveto

Tutkimuksessa selvitettiin IMO:n ja DNV:n Comfort Class meluvaatimusten eroja sekä niiden vaikutuksia laivan kustannuksiin ja painoon. Tutkimus vastasi johdannossa määritettyihin tutkimuskysymyksiin. Tulokset osoittivat, että IMO:n mukainen eristys vähensi eristyksen painoa ja hintaa, mutta vaikutus laivan kokonaismassaan, painopisteeseen ja propulsioenergiätehokkuuteen jäi vähäiseksi. Vaikka eristysmassan keventäminen oli merkittävää, matkustajien ja miehistön mukavuudesta tinkiminen toisi todennäköisesti enemmän ongelmia kuin taloudellista hyötyä.

Tutkimustyön perusteella selvisi, että DNV Comfort Class mukaisen ääneneristyksen hinta oli viisinkertainen IMO:n mukaiseen eristykseen verrattuna. COMF-eristyksen hinta jakautui niin, että noin 87 % hinnasta koostui kansilta 1–6. IMO:n mukainen ääneneristys suunniteltiin vain kansille 1–6, koska tämä riitti vaatimusten täyttämiseen.

Työn tuloksena saatiin selville risteilyaluksen ääneneristysmassan painonmuutos. IMO:n mukaisen ääneneristyksen paino oli noin neljä kertaa alhaisempi. DNV Comfort Class mukainen eristys suunniteltiin kansille 1–15. COMF-eristyksen paino jakautui niin, että kansilta 1–6 koostui noin 80 % koko ääneneristysmassan painosta. Suurta eristysmäärää alakansilla edellyttivät esimerkiksi miehistön majoitustilat, konehuoneet sekä julkiset tilat.

Painopisteen muutosta arvioitiin aluksen NAPA-mallista. Tutkimusta rajattiin jättämällä laipioeristykset ja lisävilloitukset tarkastelun ulkopuolelle, sillä niiden osuus IMO:n mukaisen eristyksen pinta-alasta ja massasta oli vähäinen. Työssä selvisi, että koko aluksen painopiste muuttui Z-akselilla alle yhden prosentin. Äänieristyksen painonmuutoksen vaikutus koko aluksen painopisteeseen ei ollut merkittävä.

Viimeisenä tarkasteltiin IMO:n mukaisen eristyksen aiheuttaman painonmuutoksen vaikutusta propulsioenergiätehokkuuteen. Propulsioenergiätehokkuutta arvioitiin amiraaliyhtälön avulla. IMO:n vaatimusten mukainen eristysmassa vähensi laivan propulsioenergiätehokkuutta amiraaliyhtälön mukaan, noin yhden prosentin verran propulsiotehon ja nopeuden pysyessä samana. Vaikka aluksen uppouman paino on pienentynyt, propulsioenergiätehokkuuden suhteessa uppoumaan on hieman heikentynyt. Toisaalta myös kokonaispropulsioteho on laskenut, joka johtaa pienempään absoluuttiseen polttoaineenkulutukseen, mikä on energiataloudellisuuden kannalta keskeinen tavoite.

Tulokset tukivat tutkimuksen aikana muodostunutta hypoteesia, jossa oletettiin vaikutusten olevan suhteellisen pieniä koko laivan mittakaavassa. Tuloksia voidaan hyödyntää laivojen eristysratkaisujen optimoinnissa sekä kustannustehokkuuden arvioinnissa. Jatkossa olisi hyödyllistä tutkia esimerkiksi erilaisten eristysmateriaalien vaikutusta laivojen LVI-järjestelmien energiatehokkuuteen ja ympäristövaikutuksiin.

Lähteet

Baldi, F.; Ahlgren, F.; Nguyen, T.-V.; Andersson K. Rev. 2018. Energy and Exergy Analysis of a cruise ship. Viitattu 28.02.2025.

[Energy and Exergy Analysis of a Cruise Ship](#)

Crocker, M.; Fischer, R.; Collier, R. 2007. Handbook of noise and vibration control. Viitattu 05.12.2024.

DNV-RU-SHIP (Pt.6 Ch.8). Viitattu 10.01.2025. [DNV.com - When trust matters - DNV Maritime](#)

IACS. 2013. Rec 132 Human Element Recommendations for structural design of lighting, ventilation, vibration, noise and egress arrangements. Viitattu 09.12.2024.

International Maritime Organization. 2025. Viitattu 10.01.2025.

[International Maritime Organization](#)

International Maritime Organization. (EEDI - 2013) 2025. Viitattu 24.02.2025.

[Improving the energy efficiency of ships](#)

International Maritime Organization. 2012. RESOLUTION MSC.337(91). Viitattu 03.02.2025.

Isover, 2023. Marine Solutions for Insulation. Viitattu 16.12.2024. [Isover](#).

Kylliäinen, M. & Hongisto, V. 2019. Rakennuksen ääniolosuhteiden suunnittelu ja toteutus. Helsinki, ympäristöministeriön julkaisuja 28. Viitattu 02.12.2024.

[Rakennuksen ääniolosuhteiden suunnittelu ja toteutus](#)

Kylliäinen, M.; Tervo, S.; Yli-Pietilä, A. 2023. Talonrakentamisen akustiikka. Viitattu 02.12.2024.

Meyer Turku. 2025. Viitattu 05.03.2025. [Mein Schiff 7 | New TUI Ship by MEYER TURKU](#)

SFS-EN ISO 16283-2. 2020. Acoustics. Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements. Part 2: Impact sound insulation (ISO 16283-2:2020). Viitattu 12.12.2024.

Thrane, H. & Dahl, S. 2013. Airborne and structure-borne properties for floor constructions (Lloyd's Register ODS). Viitattu 12.12.2024. [Sound Test Reports | Sika](#)

Vossen, C.; Kleppe, R.; Hjørungnes, S. 2013. Ship Design and System Integration. Viitattu 16.12.2024. [\(PDF\) Ship Design and System Integration](#)

Ympäristöministeriö. 2018. Ääniympäristö, Ympäristöministeriön ohje rakennuksen ääniympäristössä. Viitattu 12.12.2024. [Ympäristöministeriön ohje rakennuksen ääniympäristöstä](#)