

Hannu Nykänen, Antti Lankila, Jarkko Keinänen  
& Simo-Pekka Simonaho

## Hiljaiset veneet

Yhteenveto ja johtopäätökset



VTT TIEDOTTEITA – RESEARCH NOTES 2516

# **Hiljaiset veneet**

## **Yhteenveto ja johtopäätökset**

Hannu Nykänen, Antti Lankila ja Jarkko Keinänen

VTT

Simo-Pekka Simonaho

Kuopion yliopisto



ISBN 978-951-38-7534-3 (nid.)

ISSN 1235-0605 (nid.)

ISBN 978-951-38-7535-0 (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>)

ISSN 1455-0865 (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>)

Copyright © VTT 2009

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

VTT, Vuorimiehentie 3, PL 1000, 02044 VTT

puh. vaihde 020 722 111, faksi 020 722 4374

VTT, Bergsmansvägen 3, PB 1000, 02044 VTT

tel. växel 020 722 111, fax 020 722 4374

VTT Technical Research Centre of Finland, Vuorimiehentie 3, P. O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland

phone internat. +358 20 722 111, fax +358 20 722 4374

Toimitus Mirjami Pullinen

Edita Prima Oy, Helsinki 2009

Hannu Nykänen, Antti Lankila, Jarkko Keinänen & Simo-Pekka Simonaho. Hiljaiset veneet – Yhteenveto ja johtopäätökset [Silent Boats – Summary and Conclusions]. Espoo 2009. VTT Tiedotteita – Research Notes 2516. 69 s. + liitt. 8 s.

**Avainsanat** boat, engine, stern drive, noise, noise control, noise level, sound environment, cabin noise, sound quality, noise source, source ranking, vibration, vibration control, acoustic modelling

## Tiivistelmä

Hiljaiset veneet (HILVE) -tutkimusprojekti kuului Tekesin Vene 2008–2011 -teknologiaohjelmaan. Projektin yleistavoitteena oli kehittää Suomessa valmistettavien veneiden ohjaamoäänien hallintaa alentamalla veneiden ohjaamoon syntyvän melun tasoa sekä tekemällä ohjaamon ääniympäristö miellyttävämmäksi ja vähemmän häiritseväksi.

Projekti toteutettiin 1.10.2008–31.10.2009. Hankkeessa mukana olleiden veneistämöiden valitsemien referenssiveneiden ohjaamo- ja matkustamotilojen melutasot, äänenlaatu ja puheen ymmärrettävyys analysoitiin eri ajonopeuksilla ja aallonkorkeuksilla. Ohjaamomelun lähteenä toimivista herätekokonaisuuksista (moottori, perävetolaitteen vaihteet ja potkurit) tehtiin yksityiskohtainen analyysi. Lisäksi niitä verrattiin tärkeimmissä ajotilanteissa sekä keskenään että muihin herätteisiin, lähinnä aaltoiskuihin. Yhden venetyypin matkustamotiloista laadittiin akustinen malli, jonka avulla laskettiin ohjaamon ominaistajuudet sekä äänenvaimennusmateriaalien ja pintojen värähtelyn vaikutus ohjaamomeluun pienillä taajuuksilla.

Tutkittujen referenssiveneiden melutasot vaihtelivat melko paljon. Meluisimmissa veneissä A-painotettu ohjaamomelu oli luokkaa 85 dB ja hiljaisimmissa yli 10 dB vähemmän. Myös ohjaamoäänien häiritsevyys vaihteli paljon. Häiritsevyysindeksi oli hiljaisimmissa veneissä puolet meluisimpien veneiden indeksistä. Sama koski normaalilla puheen voimakkuudella käytävän keskustelun ymmärrettävyyttä. Meluisimmassa veneessä keskustelu normaalilla puheen voimakkuudella oli käytännössä mahdotonta; hiljaisimmassa veneessä puheen ymmärrettävyys oli jo lähtötilanteessa tyydyttävällä tasolla.

Nopeasti toteutettavia meluntorjuntatoimenpiteitä tehtiin kahdelle eri venetyypille, joista toisessa tosin oli referenssiveneettä pienempitehoinen moottori. Veneiden melutasoa saatiin pudotettua parhaimmillaan runsaat 5 dB koteloimalla

moottori akustiseen koteloon. Myös yksittäisen venetyypin ohjaamoäänien häiritsevyyttä onnistuttiin vähentämään parhaimmillaan kolmanneksella ja puheen ymmärrettävyyttä parantamaan heikohkosta välttäväksi.

Lisäksi kevään 2009 aikana VTT toteutti veneissä käytettävien lujitemuovisten *sandwich*-paneelien värähtelynvaimennuksen ja ääneneristävyyden testisarjan. Testien avulla arvioitiin Bella-Veneet Oy:n toimittamien paneelien sekä hankkeen ulkopuolisten materiaalitoimittajien (Meluton Oy ja Oy Noisetek Ab) toimittamien meluntorjuntamateriaalien käyttökelpoisuutta.

Hannu Nykänen, Antti Lankila, Jarkko Keinänen & Simo-Pekka Simonaho. Hiljaiset veneet – Yhteenveto ja johtopäätökset [Silent Boats – Summary and Conclusions]. Espoo 2009. VTT Tiedotteita – Research Notes 2516. 69 p. + app. 8 p.

**Keywords** boat, engine, stern drive, noise, noise control, noise level, sound environment, cabin noise, sound quality, noise source, source ranking, vibration, vibration control, acoustic modelling

## Abstract

Silent boats (HILVE) research project belonged in the Boat 2008–2011 research programme of Technology and Innovation Development Centre of Finland (Tekes). The overall objective of the project was to develop the cabin acoustics of boats, which are manufactured in Finland by lowering the noise level in the boat cabins and by improving the sound quality of the cabin taking into consideration the quality factors of the sound environment in cabin design.

The project was executed during 1.10.2008–31.10.2009. Boatyards, which were participating in the project, selected one boat type from their production models as the reference boat. Sound pressure levels, sound quality and articulation index (speech intelligibility) of the reference boats were measured and analysed at different driving speeds and wave heights. Noise source ranking was performed for the most important cabin noise sources: engine, stern drive shafts and gears, propeller blades, and the importance of these sources were compared with the water-structure interaction as the noise source in the boat at most important driving conditions. Acoustic model of the cabin of one of the reference boat types was made, and acoustic eigen frequencies of the cabin were calculated with the model. Furthermore, the influence of cabin surface vibration of specific cabin surfaces, and the acoustic surface treatments of the surfaces of the cabin were simulated at low frequencies.

A-weighted cabin noise levels of the reference boats ranged from above 85 dB to more than 10 dB lower. Also the unbiased annoyance index of the cabin noise had large deviations, in the most silent boats the annoyance index value was about half of the index of the most annoying cabin noise value. Similar deviations were recorded for speech intelligibility: in the noisiest boats it was impossible to discuss at normal voice level, while in the most silent reference boats it was relatively easy to understand the speech of normal voice level.

Rapidly executable noise control measures were performed in two boat types. However, the results are not fully comparable, as the engine power in one of the modified boat types was slightly smaller than in the reference boat of the same type. The best noise control measure resulted in more than 5 dB noise level reduction in the cabin noise by enclosing the engine in an acoustic enclosure in the engine compartment. Some specific noise control measures resulted also in decreasing the noise annoyance index by one third, and improving the speech intelligibility from poor to tolerable.

During the spring 2009 Technical Research Centre of Finland (VTT) executed also a study of vibration damping and sound insulation performance of some glass fibre reinforced plastic (GFRP) panels furnished with different sound absorbing, sound insulating and vibration damping materials, in order to evaluate the sound insulation and vibration damping influence of different material combinations. The panels were provided by the boatyard Bella-Veneet Oy, and the acoustic and vibration damping materials were provided by companies Meluton Oy and Oy Noisetek Ab, which companies were not partners in the project.



# Sisällysluettelo

Tiivistelmä .....	3
Abstract .....	5
Symboliluettelo .....	9
1. Johdanto .....	11
2. Lujitemuoviset sisäperämoottoriveneet .....	13
2.1 Venemallit ja veneiden valmistustekniikka.....	13
2.2 Moottori-perävetolaitetekniikka .....	13
3. Tutkittujen veneiden meluominaisuudet .....	20
3.1 Veneiden melu- ja värähtelymittaukset.....	20
3.2 Referenssiveneiden melutasot.....	21
3.3 Herätteiden erottelu ohjaamomelussa .....	23
3.4 Veneiden värähtelyt .....	28
3.5 Ohjaamon akustinen mallinnus.....	33
3.5.1 Mallinnusgeometrian luonti.....	33
3.5.2 Mallin verifiointi.....	35
3.5.3 Ohjaamon ominaistajuudet.....	39
3.5.4 Materiaalien vaikutus ohjaamomeluun .....	42
3.5.5 Pintojen värähtelyn vaikutus ohjaamomeluun .....	46
3.5.6 Pintojen värähtelyn ja akustisen pistelähteen vaikutus ohjaamomeluun .....	49
3.6 Toteutetut meluntorjuntatoimenpiteet .....	52
3.6.1 K1-veneen meluntorjuntatoimenpiteet ja niiden vaikutus .....	52
3.6.1.1 Moottoritilan absorption lisääminen ja ilmaääntä välittävien läpivientien tiivistäminen (modifikaatio 1).....	52
3.6.1.2 Sisä- ja kansimoduulin paneelien värähtelyjen vaimentaminen (modifikaatio 2) .....	53
3.6.1.3 Ikkunoiden vaimentaminen (modifikaatio 3).....	55
3.6.1.4 Moottorin osakotelointi (modifikaatio 4) .....	56
3.6.2 R1-veneen moottorin akustinen kotelointi ja sen vaikutus .....	57
3.7 Yhteenveto melutasoista ja saavutetuista melutason vähenemistä .....	58
3.8 Äänenlaatu veneiden matkustamotiloissa .....	59
3.9 Yhteenveto herätteiden merkityksestä eri venetyypeissä.....	61
3.9.1 Moottori-perävetolaite.....	61
3.9.2 Vesi-runko-vuorovaikutus .....	62

4.	Johtopäätökset ja jatkotutkimustarpeet .....	64
4.1	Moottoritalan ilmaäänien absorptio ja eristäminen .....	64
4.2	Ilmaäänien eristäminen ja absorption riittävyyden varmistaminen .....	67
4.3	Runkovärähtelyjen ja -äänien vaimentaminen ja eristäminen, paneeleiden äänensäteilyn vähentäminen .....	68
4.4	Mallinnuksen käyttö veneen ohjaamon melun alentamiseen .....	68

#### Liitteet

Liite A: Äänenlaatuanalyysissä käytettyjen suureiden kuvaukset

Liite B: Kaksoiseinärakenteen ääneneristys

Liite C: Mallinnustulosten verifointi

## Symboliluettelo

$d$	seinien välinen etäisyys
$f$	taajuus
$f_0$	moottorin pyörimistaajuus (kaksoiseinäresonanssin taajuus*)
$f_c$	kriittinen taajuus (koinssidenssitaajuus)*
$h$	elementin koko (FEM-laskennassa)
$K$	kerroin*
$L_{In}$	keskimääräinen äänen intensiteetin taso mittauspinnalla*
$L_p$	äänepainetaso (painottamaton)
$L_{p1}$	keskimääräinen äänenpainetaso lähetyshuoneessa*
$L_{pA}$	A-suodattimella painotettu äänenpainetaso (A-äänitaso)
$m$	pinta-alamassa
$R_l$	intensiteettimenetelmällä määritetty äänenvaimennusindeksi*
$S$	testikappaleen ala*
$S_M$	mittauspinnan ala*
$v$	värähtelyn nopeus
$x, y, z$	suorakulmaisen koordinaatiston koordinaatit

\* Liite B



# 1. Johdanto

Hiljaiset veneet (HILVE) -tutkimusprojekti kuului Tekesin Vene 2008–2011 -teknologiaohjelmaan. Projektin yleistavoitteena oli kehittää Suomessa valmistettavien veneiden ohjaamoäänien hallintaa

- alentamalla veneiden ohjaamoon syntyvän melun tasoa
- tekemällä ohjaamon ääniympäristö miellyttävämmäksi ja vähemmän häiritseväksi.

Kohteina olivat suljettavalla ohjaamolla varustetut, 6–14 metriä pitkät sisäperämoottorilliset veneet. Projektiin osallistuivat VTT (projektin koordinaattori), Kuopion yliopiston fysiikan laitoksen inversio-ongelmien tutkimusryhmä, Bella-Veneet Oy, Oy Botnia Marin Ab, Tristan Boats Oy ja Volvo Finland Ab (Volvo Penta Europe, Office Finland).

Projektin yksityiskohtaisina tavoitteina oli

- selvittää melun pääasialliset synty- ja siirtotiemekanismit projektissa mukana olevien veistämöiden esimerkeiksi valitsemisissa referenssiveneissä
- selvittää veneiden ohjaamomelun luonne (melutaso ohjaamossa, äänekkyysvaikutelma, häiritsevät piirteet melussa, kokonaisäänenlaatu, puheen ymmärrettävyys ohjaamossa)
- selvittää melun luonteeseen vaikuttavat tekijät (herätteiden ja siirtoteiden vaikutus ohjaamomelun tasoon ja laadullisiin ominaisuuksiin)
- laatia yhden esimerkkiveneen ohjaamon malli ja simuloida ohjaamon akustisia ominaisuuksia sen avulla
- määrittää nopeasti toteutettavat toimenpiteet ohjaamomelun ja sen häiritsevien piirteiden vähentämiseksi
- määrittää veneenrakennuksessa yleisten materiaali- ja rakenneratkaisujen vaikutuksia ohjaamomeluun sekä hahmotella pidemmän tähtäimen keinoja veneiden ohjaamoiden äänenhallintaan.

## 1. Johdanto

Veneveistämöt valitsivat tuotemallistostaan yhden veneen referenssiveneeksi, ja VTT teki sille pintapuolisen *design review* -analyysin sekä kattavat ääni- ja värähtelymittaukset. Kahdelta veistämöltä referenssiveneitä (vertailuveneitä) oli käytännössä kaksi, joskin toisen vertailuveneen meluanalyysi oli huomattavasti suppeampi kuin muiden referenssiveneiden. Kuopion yliopisto laati yhden esimerkkiveneen ohjaamon akustisen mallin ja simuloi ohjaamon akustisia ominaisuuksia sen avulla.

Kansainvälinen talouden taantuma johti kuitenkin veneiden myynnin väheneemiseen HILVE-projektin käynnistysvaiheessa arvioitua enemmän. Tämä aiheutti puolestaan sen, että uusien veneiden valmistusmäärät pienenivät. Näin ollen projektin lähtökohtana ollut referenssiveneityyppeihin tehtävien muutosten toteuttaminen hidastui ja kävi osittain mahdottomaksi. Vain yhdelle alun perin referenssiveneeksi valituista venetyypistä valmistui ääniteknisesti modifioituja versioita, joille voitiin tehdä verifiointimittaukset projektin alkuperäisen aikataulun puitteissa.

Koska projektin tulosten arvioinnin kannalta oli tarpeellista saada mittaustuloksia useista akustisesti modifioiduista veneistä, projektin johtoryhmä ehdotti Tekesille projektin päättymisajankohdan siirtämistä vuoden 2009 kesäkuun lopusta lokakuun loppuun. Päättymisajankohdan siirtäminen mahdollisti muutamien muiden akustisesti modifioitujen veneiden mittaukset. Lisäksi mittauksia tehtiin kahdelle samantyyppiselle veneelle, joista toinen oli akustisesti standardityyppiä (vertailuvene) ja toisessa moottori oli sijoitettu moottoritilassa akustiseen koteloon. Näin saatiin tietoa akustisen kotelon käyttämisestä meluntorjuntakeinona.

Tässä raportissa kuvataan sekä varsinaisille referenssiveneille että muille veneille tehtyjen melumittausten tulokset (melun taso, äänen laatu ja puheen ymmärrettävyys ohjaamo- tai matkustustiloissa), kehitetty analyysimenetelmä ja herätekokonaisuuksien analysoimisesta saadut tulokset. Lisäksi esitetään yhteenveto värähtelymittauksista, esimerkkiveneen ohjaamon akustinen mallinnus ja simuloinnin tulokset, modifioituille veneille tehdyt toimenpiteet sekä melun vähentämiseen ja ohjaamoäänien laadun parantamiseen ehdotetut jatkotoimenpiteet. Raportissa kerrotaan myös, millaista syvällisempää tutkimusta tarvitaan veneiden materiaalien ja rakenteiden kehittämiseksi.

## **2. Lujitemuoviset sisäperämoottoriveneet**

### **2.1 Venemallit ja veneiden valmistustekniikka**

Tutkimuksen kohteina olivat suljettavalla ohjaamalla varustetut, 6–14 metriä pitkät sisäperämoottorilliset veneet. Tätä raporttia varten tutkitut venetyypit on jaettu kahteen ryhmään veneissä käytettyjen moottoreiden tehon perusteella. Pieniä (kevyitä) venetyyppejä edustavat veneet, joissa moottorina oli Volvo Pentan D4-260 tai D4-300 dieselmoottori (nelisylinterinen 3,7 litran ja 260 tai 300 hevosvoiman moottori), ja suuria (raskaita) venetyyppejä veneet, joissa oli yksi tai kaksi Volvo Pentan D6-370 dieselmoottoria (kuusisylinterinen 5,5 litran ja 370 hevosvoiman moottori).

Kaikki tutkitut veneet olivat lujitemuovirakenteisia sisäperämoottoriveneitä. Kevyimmän venetyypin lujitemuoviset moduulit olivat muottiin ruiskulaminoituja; muiden veneiden valmistustekniikkana oli käsin laminointi. Kansirakenteet oli kiinnitetty jäykästi ruuviliitoksella veneen runkoon, jolloin kansirakenne jäykisti myös veneen runkorakenteen. Runkomodulin veden alapuolinen osa oli kaikissa veneissä yhtenäistä lasikuitua ja veden yläpuoliset osat yhtenäistä lasikuitua tai erilaista *sandwich*-rakennetta.

### **2.2 Moottori-perävetolaitetekniikka**

Kaikissa tutkituissa veneissä oli moottorina Volvo Pentan neli- tai kuusisylinterinen dieselmoottori. Pienimmissä veneissä oli siis D4-260- tai D4-300-dieselmoottori (nelisylinterinen 3,7 litran ja 260 tai 300 hevosvoiman moottori); suurimmissa veneissä oli yksi tai kaksi D6-370 dieselmoottoria (kuusisylinterinen 5,5 litran ja 370 hevosvoiman moottori). Perävetolaitteina kaikissa veneissä oli Aquamatic DPH Duoprop, jossa on vastakkaisiin suuntiin pyörivien potku-

## 2. Lujitemuoviset sisäperämoottoriveneet

reiden muodostama kaksoispotkuri (Kuva 1). Veneenpuoleisessa (sisemmässä) potkurissa on kolme ja toisessa (ulommassa) neljä lapaa.

Kaikki veneet oli varustettu Volvo Pentan Electronic Vessel Control (EVC) CAN -väyläteknologiaan perustuvalla ohjauksen ja moottoritoimintojen sähköisellä hallintajärjestelmällä.



Kuva 1. Volvo Penta D4-260 moottori ja Aquamatic DPH Duoprop perävetolaite.<sup>1</sup>

Moottori lepää etupäästään tärinäneristimien ja takapäästään perävetolaitteen kartion ja pyöreän kumielementin varassa (Kuva 2). Kumielementin tarkoituksena on eristää moottori kilvestä, jonka välityksellä moottori-perävetolaite yhdistelmä on kiinnitetty lähes jäykästi veneen peräpeiliin.

---

<sup>1</sup> Volvo Penta D4-260/DP -datalehti 11/2007. <http://www.volvopenta.com>, haettu 16.10.2009.



## 2. Lujitemuoviset sisäperämoottoriveneet



Kuva 2. Kumirengas ja kartio, joiden varassa moottorin takapäätä lepää.

Moottorin vetoakselin ja perävetolaitteen yläpäähän vaaka-akselin välissä on vääntövärähtelyjen vaimennin (Kuva 3), joka yhdistää moottorin vetoakselin perävetolaitteen yläpäähän vaaka-akseliin. Vaimennin on suunniteltu pääasiassa vääntövärähtelyjen vaimentamiseen (vääntövärähtelyt voivat aiheuttaa hammasvälityksen melua, *gear rattle*), mutta se sallii myös jossain määrin liikettä kaikissa suunnissa.



Kuva 3. Moottorin vetoakselin ja perävetolaitteen yläpäähän välinen vääntövärähtelyjen vaimennin.

## 2. Lujitemuoviset sisäperämoottoriveneet

Perävetolaitteen vaaka-akselissa on lisäksi kaksoisnivel (Kuva 4), joka mahdollistaa perävetolaitteen kääntämisen vaakasuunnassa (vene ohjaaminen) ja pystysuunnassa (perävetolaitteen ajokulman säätö eli trimmi).



Kuva 4. Perävetolaitteen yläpään vaaka-akselin kaksoisnivel.

Kokonaisvälitys muodostuu moottorin vetoakselilta nivelakselin kautta perävetolaitteen yläpään vaihteeseen (merivaihte) tulevan hammaspyörävälityksen ja perävetolaitteen alapään hammaspyörävälityksen mukaiseksi (Kuva 5). Kokonaisvälityssuhde moottorilta potkuriakselille on D4-260-moottorissa 1:0.54 ja D6-370-moottorissa 1:0.61. Kun moottorin kierrosluku on esimerkiksi 3 000 kierrosta minuutissa, potkuriakselin kierrosluvut ovat 1620 (D4-260) ja 1830 kierrosta minuutissa (D6-370).

Perävetolaitteen yläpään vaaka-akselin hammaspyörässä on 20 ja pystyakselin yläpään hammaspyörässä 23 hammasta (välityssuhde 1:0.87). Perävetolaitteen pystyakselin alapään hammaspyörässä taas on 18 ja potkuriakselin hammaspyö-

rässä D4-260-moottorin perävetolaitteessa 29 hammasta (välityssuhde 1:0.62). D6-370-moottorin perävetolaitteessa hampaita on vastaavasti 19 ja 27 (välityssuhde 1:0.70).



Kuva 5. Perävetolaitteen rakenne.<sup>2</sup>

Taulukoissa 1 ja 2 on kuvattu D4-260 ja D6-370 moottoreiden ja vastaavien perävetolaitteiden eräiden herätetekonaisuuksien (moottori, perävetolaitteen pysty akseli, vaihteet, potkuri akseli ja potkurit) synnyttämien herätteiden taajuuDET suhteutettuna moottorin pyörimistaajuuteen,  $f_0$  (moottorin kierrosluku minuutissa / 60). Nämä herätetaajuuDET näkyvät voimakkaina taajuuspiikkeinä matkustustilojen sisämelussa kuljettajan ja matkustajan oleskelualueilla.

<sup>2</sup> Tuoteopas Powerboat. Volvo Penta 7749098 Finnish 06/2008. 28 s.

## 2. Lujitemuoviset sisäperämoottoriveneet

Taulukko 1. Volvo Penta D4-260 ja Aquamatic Duoprop DPH -moottori-perävetolaite-yhdistelmän eräiden mekanismien herätetaajuudet suhteutettuna moottorin pyörimistaajuuteen sekä esimerkkitaajuus, kun moottorin kierrosluku on 3 000 kierrosta minuutissa eli moottorin pyörimistaajuus on  $3\,000 / 60 = 50$  Hz.

Herätekokonaisuus	Herätetaajuus	Esimerkkitaajuus [Hz]	Huom!
<i>Moottori*</i>		(3 000 r/min)	Pyörimistaajuus on moottorin kierrosluku minuutissa jaettuna 60:lla.
- pyörimistaajuus	$f_0$	50	
- palotaajuus	$2 \cdot f_0$	100	
<i>Perävetolaite, pysty akseli</i>			Pysty akselin perustaajuus määräytyy ylävaihteen hammaspyörien hampaiden lukumäärästä: $20 / 23 = 0,87$ .
- perustaajuus	$0,87 \cdot f_0$	43,48	
- 2. kerrannainen	$1,74 \cdot f_0$	86,96	
- 3. kerrannainen	$2,61 \cdot f_0$	130,43	
- 4. kerrannainen	$3,48 \cdot f_0$	173,91	
<i>Perävetolaite, vaihteet</i>			Alavaihteen ryntötaajuus on $20 / 23 \cdot 18 = 15,65$ kertaa moottorin pyörimistaajuus.**
- ylävaihteen ryntötaajuus	$20,00 \cdot f_0$	1000	
- alavaihteen ryntötaajuus	$15,65 \cdot f_0$	782,61	
<i>Perävetolaite, potkuri akseli</i>			Potkuri akselin perustaajuus vastaa kokonaisvälitysuhdetta.
- perustaajuus	$0,54 \cdot f_0$	26,99	
- 2. kerrannainen	$1,08 \cdot f_0$	53,97	
<i>Perävetolaite, 3-lapainen potkuri</i>			Kolmelapaisen potkurin perustaajuus (= 3-lapaisen potkurin lapataajuus) on kolme kertaa potkuri akselin perustaajuus.
- perustaajuus	$1,62 \cdot f_0$	80,96	
- 2. kerrannainen	$3,24 \cdot f_0$	161,92	
- 3. kerrannainen	$4,86 \cdot f_0$	242,88	
- 4. kerrannainen	$6,48 \cdot f_0$	323,84	
<i>Perävetolaite, 4-lapainen potkuri</i>			Nelilapaisen potkurin perustaajuus (= 4-lapaisen potkurin lapataajuus) on neljä kertaa potkuri akselin perustaajuus.
- perustaajuus	$2,16 \cdot f_0$	107,95	
- 2. kerrannainen	$4,32 \cdot f_0$	215,89	
- 3. kerrannainen	$6,48 \cdot f_0$	323,84	
- 4. kerrannainen	$8,64 \cdot f_0$	431,78	

\* Moottorin herätteinä matkustustilojen melussa näkyvät lähes kaikki kokonaiskerrannaiset, mutta myös puolikaskerrannaiset (1.5, 2.5, 3.5 ...) ainakin kymmenenteen kerrannaiseen asti.

\*\* Ryntötaajuus voidaan laskea vaihteen hammaspyörien hampaiden lukumäärästä.

## 2. Lujitemuoviset sisäperämoottoriveneet

Taulukko 2. Volvo Penta D6-370 ja Aquamatic DPH Duoprop -moottori-perävetolaite-yhdistelmän eräiden mekanismien herätetaajuudet suhteutettuna moottorin pyörimistaajuuteen sekä esimerkkitaajuus, kun moottorin kierrosluku on 3 000 kierrosta minuutissa eli moottorin pyörimistaajuus on  $3\,000 / 60 = 50$  Hz.

Herätekokonaisuus	Herätetaajuus	Esimerkkitaajuus [Hz]	Huom!
<i>Moottori</i>		(3000 r/min)	
- pyörimistaajuus	$f_0$	50	Pyörimistaajuus on moottorin kierrosluku minuutissa jaettuna 60:lla.
- palotaajuus	$3 \cdot f_0$	150	
<i>Perävetolaite, pystyakseli</i>			Pystyakselin perustaajuus määräytyy ylävaihteen hammaspyörien hampaiden lukumäärästä: $20 / 23 = 0.87$ .
- perustaajuus	$0.87 \cdot f_0$	43,48	
- 2. kerrannainen	$1.74 \cdot f_0$	86,96	
- 3. kerrannainen	$2.61 \cdot f_0$	130,43	
- 4. kerrannainen	$3.48 \cdot f_0$	173,91	
<i>Perävetolaite, vaihteet</i>			Alavaihteen ryntötaajuus on $20 / 23 \cdot 19 = 16.52$ kertaa moottorin pyörimistaajuus.
- ylävaihteen ryntötaajuus	$20.00 \cdot f_0$	1000	
- alavaihteen ryntötaajuus	$16.52 \cdot f_0$	826,09	
<i>Perävetolaite, potkuriakseli</i>			Potkuriakselin perustaajuus vastaa kokonaisvälityssuhdetta.
- perustaajuus	$0.61 \cdot f_0$	30,60	
- 2. kerrannainen	$1.22 \cdot f_0$	61,19	
<i>Perävetolaite, 3-lapainen potkuri</i>			Kolmelapaisen potkurin perustaajuus (= 3-lapaisen potkurin lapataajuus) on kolme kertaa potkuriakselin perustaajuus.
- perustaajuus	$1.84 \cdot f_0$	91,79	
- 2. kerrannainen	$3.67 \cdot f_0$	183,57	
- 3. kerrannainen	$5.51 \cdot f_0$	275,36	
- 4. kerrannainen	$7.34 \cdot f_0$	367,15	
<i>Perävetolaite, 4-lapainen potkuri</i>			Nelilapaisen potkurin perustaajuus (= 4-lapaisen potkurin lapataajuus) on neljä kertaa potkuriakselin perustaajuus.
- perustaajuus	$2.45 \cdot f_0$	122,38	
- 2. kerrannainen	$4.90 \cdot f_0$	244,77	
- 3. kerrannainen	$7.34 \cdot f_0$	367,15	
- 4. kerrannainen	$9.79 \cdot f_0$	489,53	

Huomattakoon, että erityisesti moottorissa on myös monia muita moottorin pyörimistaajuuteen verrannollisia herätekokonaisuuksia (esim. laturi, vesipumput, mekaaninen ahdin), joiden pyörimistaajuus voi näkyä taajuuspiikkinä ohjaamomelussa. Näitä herätekokonaisuuksia ei kuitenkaan ole pyritty identifioimaan ohjaamomelun taajuusjakautumista.

## 3. Tutkittujen veneiden meluominaisuudet

### 3.1 Veneiden melu- ja värähtelymittaukset

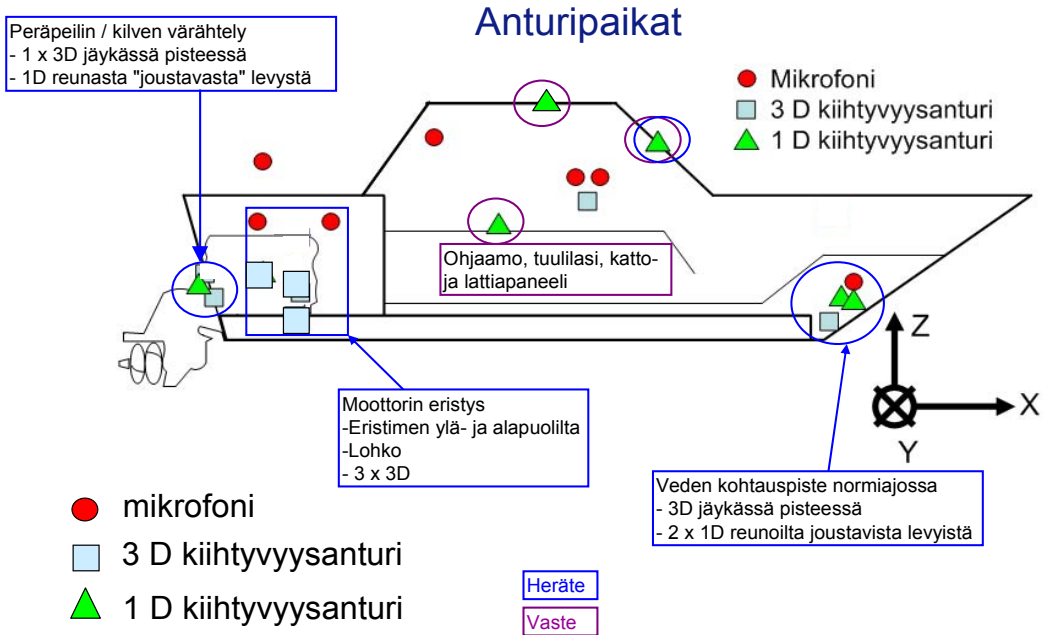
Varsinaisten referenssiveneiden perusmittaukset sisälsivät noin 40-kanavaiset ääni- ja värähtelymittaukset. Samanaikaisesti mitattiin moottorin pyörimisnopeus (pyörimistaajuus) ulkoisella takometrillä. Ulkoisista olosuhteista mitattiin vain tuulen suunta ja nopeus, sillä esimerkiksi lämpötilan ja ilman suhteellisen kosteuden ei katsottu vaikuttavan olennaisesti mittaustuloksiin. Aallokon korkeus arvioitiin silmämääräisesti.

Äänimittausten mikrofonit sijoitettiin kuljettajan pään taakse (2 kpl), matkustamon takaosaan (1 kpl), takakannelle (1 kpl), moottoritilaan (2 kpl) ja keulakoteloon (1 kpl). Suurissa veneissä mitattiin melutaso myös keula- tai perähytissä.

Värähtelymittausten kiihtyvyyssanturit (12 kpl) sijoitettiin moottoritilaan (moottori, peräpeili), keulaan ja matkustamoon eri herätekokonaisuuksien ja runkoäänen siirtoteiden identifioimiseksi.

Mikrofonien ja kiihtyvyyssantureiden paikat sekä kiihtyvyyssantureiden tyypit (3D ja 1D) on kuvattu pääpiirteissään Kuva 6. Heräte-vaste-pohdintojen lähtökohdista ovat eri anturipaikoissa tehdyt mittaukset, joista osa edustaa **herätemittauksia** ja osa **vastemittauksia**. Kuvassa sisätilojen ja takakannen mikrofonipaikat edustavat tärkeimpiä äänimittausten vastepisteitä, ja niitä on käytetty meluntorjuntatoimenpiteiden kriteeripisteinä ääniominaisuuksien muutoksia arvioitaessa.

Verifiointimittaukset tehtiin pääasiassa matkustustilojen melumittauspisteissä. Meluntorjuntatoimenpiteiden vaikutusta värähtelytasoihin arvioitiin vain muutamassa tapauksessa kevyimmän venetyypin matkustamopaneelien värähtelynvaimennuksen vaikutusten selvittämiseksi.



Kuva 6. Ääni- ja värähtelymittausten pääasialliset mittauspisteet. Kuvassa myös anturipaikkojen jaottelu heräte–vaste-pohdintojen lähtökohtana.

### 3.2 Referenssiveneiden melutasot

Tutkittujen referenssiveneiden melutasot vaihtelivat melko paljon. Meluisimpien veneiden ohjaamomelu oli A-painotettuna luokkaa 85 dB ja hiljaisimpien yli 10 dB vähemmän (Taulukko 3). Takakannen melutasojen erot olivat huomattavasti pienemmät. Hieman yllättäen takakannella mitatut melutasot olivat alhaisimmat veneessä, jonka ohjaamomelu oli suurinta. Takakannen kansiluukkujen ääneneristävyys ja moottorin imuilman meluloukkujen vaikutus oli siis paras ohjaamomelultaan vaatimattomimmassa ja rakenteeltaan kevyimmässä veneessä.

### 3. Tutkittujen veneiden meluominaisuudet

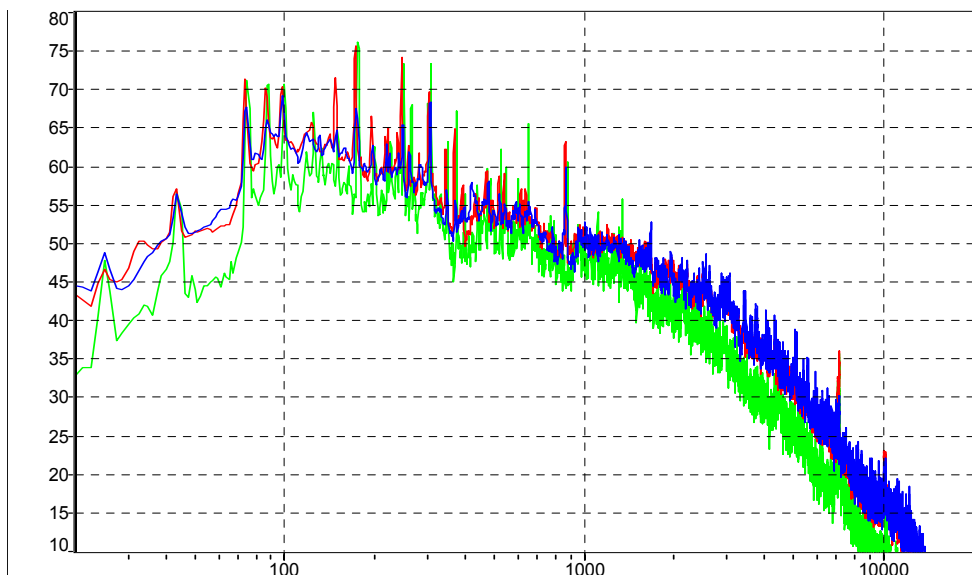
Taulukko 3. Yhteenveto referenssiveneiden (vertailuveneiden) melutasoista matkustustiloissa ja takakannella. Veneet on jaoteltu kevyisiin ja raskaisiin käytetyn moottorityypin perusteella. Kevyissä veneissä moottorina oli Volvo Penta D4-260 tai Volvo Penta D4-300 ja raskaissa yksi tai kaksi Volvo Penta D6-370 -moottoria. Kaikissa veneissä oli Aquamatic DPH Duoprop -perävetolaite.

Tunnus	Ajonopeus kn	Aallon korkeus m	Melutaso, $L_{pA}$			
			Matkustaja $L_{pA}$ , dB	Kuljettaja vasen $L_{pA}$ , dB	Kuljettaja oikea $L_{pA}$ , dB	Takakansi $L_{pA}$ , dB
K1 - ref	25,0	0 ... 0,15	83,6	84,2	84,9	85,7
	32,5	0 ... 0,15	84,5	85,2	84,7	85,5
	25,0	0,15 ... 0,5	83,9	85,9	86,5	87,1
K2 - ref	23,0	0 ... 0,15	80,6	81,0	82,7	91,7
	30,0	0 ... 0,15	81,0	80,5	81,1	94,0
R1 - ref	24,0	0,15 ... 0,5	76,6	79,0	81,2	
	30,0	0,15 ... 0,5	79,0	81,4	81,7	
R2 - ref	30,0	0 ... 0,15	74,3	73,2	74,1	85,7
	36,0	0 ... 0,15	80,0	78,5	80,0	89,1
R3 - ref	30,0	0 ... 0,15	73,4	72,3	74,0	86,8
	38,0	0 ... 0,15	76,4	75,3	76,9	90,2
	30,0	0,15 ... 0,5	75,9	74,3	75,5	
	38,0	0,15 ... 0,5	76,1	76,4	77,5	

Kaikissa tutkituissa veneissä matkustustilojen melun A-painotettu kapeakaistainen äänenpainetasospektri oli samantyyppinen (esim. Kuva 7). A-painotetussa kapeakaistaspektrissä erottuivat voimakkaimpina moottorin ja perävetolaitteen eri herätteiden synnyttämät erillistajuiset (pieni- ja keskitaajuiset alle 1 000 Hz) spektrikomponentit riippumatta siitä, minkälaisessa aallokossa veneellä ajettiin. Aallonkorkeus vaikutti ennen kaikkea kohinatyyppisen (laajakaistaisen) melun osuuteen. Kevyimmissä veneissä jo matalassa aallokossa ajo lisäsi laajakaistaisen melun osuutta selvästi tyynessä ajettaessa mitatun spektrin yläpuolelle.

Suurimmissa veneissä kokonaistasot ja erillistajuisien komponenttien tasot olivat olennaisesti alhaisemmat kuin kevyimmissä veneissä. Kohinatyyppisen melun voimistuminen aallokossa ajon vaikutuksesta alkoi näkyä vasta korkeassa aallokossa.





Kuva 7. K1-ref-vene, matka-ajo tyynessä (vihreä käyrä), keskiaallokossa (punainen käyrä) ja korkeassa aallokossa (sininen käyrä). A-painotettujen kapeakaistaspektrien vertailu kuljettajan paikalla.

### 3.3 Herätteiden erottelu ohjaamomelussa

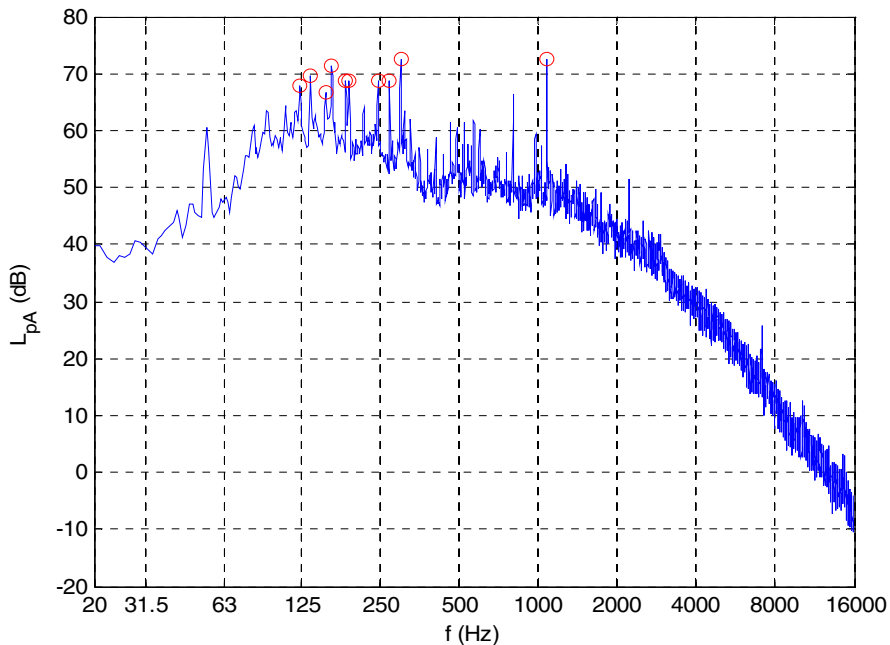
Veneiden matkustustilojen melun A-painotetuista kapeakaistaspektreistä (esim. Kuva 7) voidaan todeta, että alle 2 000 Hz:n taajuisen melun voimakkaimmat komponentit koostuvat selkeästi erottuvista erillistaajuisista tai hyvin kapeakaistasista taajuuskomponenteista. Useimmat näistä taajuuskomponenteista voidaan liittää moottorin tai perävetolaitteen johonkin mekaaniseen komponenttiin ja/tai fysikaaliseen ilmiöön (esim. polttoaineen jaksollinen syttyminen moottorin sylinterissä eli palotaajuus) ja tämän komponentin tai ilmiön aiheuttamaan jaksolliseen (moottorin pyörimistaajuuteen verrannolliseen) ääni-ilmiöön matkustustiloissa. Taajuuden perusteella melukomponentti voidaan kiinnittää tiettyyn herätekokonaisuuteen.

Tallennetuista melunäytteistä on analysoitu moottorin, perävetolaitteen vaihteiden sekä perävetolaitteen potkuriakselin, potkureiden perustaajuuksien ja perustaajuuksien kerrannaisten vaikutukset matkustustilojen melutasoihin. Moottorin kierrosluvun pieni vaihtelu mittausdatan tallennuksen aikana ja ikkunoinnin vaikutus taajuuspiikin leviämiseen taajuustasossa on otettu huomioon siten, että analyysikaistaa on levitetty moottorin pyörimistaajuuden vaihtelun mukaan.

### 3. Tutkittujen veneiden meluominaisuudet

Analyysikaista on siten taajuusalueessa pienillä taajuuksilla kapeampi ja suurilla taajuuksilla leveämpi oikean analyysituloksen varmistamiseksi.

Esimerkkikuvassa (Kuva 8) on ympäröity kymmenen korkeinta spektriipiikkiä punaisella ympyrällä, mutta varsinaiset herätekokonaisuusanalyysit on tehty koko signaalista taajuuskaistalta 20 ... ~ 1000 Hz. Ylärajataajuus on valittu siten, että analyysissa on aina mukana perävetolaitteen ylävaihteen ryntötaajuus, joka kaikissa tarkastelluissa Volvo Pentan sisäperämoottoreiden perävetolaitteissa on 20 kertaa moottorin pyörimistäajuus (ks. Taulukko 1 ja Taulukko 2).



Kuva 8. K1-ref-veneen A-painotettu kapeakaistaspektri (täysnopeusajo tyynessä, kuljettaja oikealla), kokonaistasot:  $L_p = 100.6$  dB ja  $L_{pA} = 84.7$  dB.

Yhteenvedona referenssiveneiden herätekokonaisuusanalyseista on esimerkkitaulukko K1-ref-veneen tiedoista (Taulukko 4) ja analyysikuvat K1-ref, K2-ref ja R3-ref-veneen herätekokonaisuuksista (Kuva 9, Kuva 10 ja Kuva 11). Niistä käy selkeästi ilmi eri venetyyppien varsin erilaiset herätekokonaisuudet.

Erikoisin herätekäyttäytyminen oli perävetolaitteen ylävaihteen hammasvälityksellä, mikä näkyy useimmissa veneissä erittäin voimakkaana erillistaajuusena melukomponenttina ylävaihteen ryntötaajuudella (esim. Kuva 7 ja Kuva 8). Ylävaihteen ryntötaajuinen melukomponentti esiintyi eri veneissä, eri ajoilanteissa ja eri mittauspisteissä hyvin voimakkaana mutta varsin satunnaisesti. Se ei olen-

### 3. Tutkittujen veneiden meluominaisuudet

naisesti vaimentunut moottoritilan absorption lisäämisen tai ääneneristykseen parantamisen myötä. Ryntötaajuisten herätteen siirtymisreitti ohjaamomeluksi jäi tutkimuksessa arvoitukseksi. Todennäköisin on runkoäänireitti, johon yhdistyy peräpeilin (tai muun rakenteen) resonanssi hammasvälityksen ryntötaajuudella.

Taulukko 4. Venetyyppi K1-ref, matka- ja täysnopeusajo tyynessä. Yhteenveto herätekokonaisuusien vaikutuksesta A-painotettuun kokonaistasoon eri ajoilanteissa (ajotilanteen kuvaukset sarakkeessa kaksi: mna = matkanopeudella ajo, tna = täysnopeusajo).

Herätekokonaisuus	Ajoilanne	Matkustaja	Kuljettaja vasen	Kuljettaja oikea
		L <sub>pA</sub> (dB)	L <sub>pA</sub> (dB)	L <sub>pA</sub> (dB)
<b>Moottori<sup>1</sup></b>	mna	77,4	76,5	78,0
	tna	79,8	77,6	78,9
<b>Vaihteet (ryntötaajuudet)<sup>2</sup></b>	mna	65,8	72,6	67,3
	tna	69,1	80,6	73,8
<b>Potkuriakseli ja potkurit<sup>3</sup></b>	mna	79,3	79,3	80,9
	tna	79,5	73,1	74,4
<b>Muut herätteet<sup>4</sup></b>	mna	79,4	80,7	80,8
	tna	79,5	81,5	82,2
<b>Kokonaistaso<sup>5</sup></b>	<b>mna</b>	<b>83,6</b>	<b>84,2</b>	<b>84,9</b>
	<b>tna</b>	<b>84,5</b>	<b>85,2</b>	<b>84,7</b>

<sup>1</sup> Moottorin pyörimistaajuuden ja sen kokonais- ja puolikaskerrannaisten taajuuksille sattuvien spektriipiikkien yhteisvaikutus matkustamon tai ohjaamon melutasoon eri mittauspisteissä.

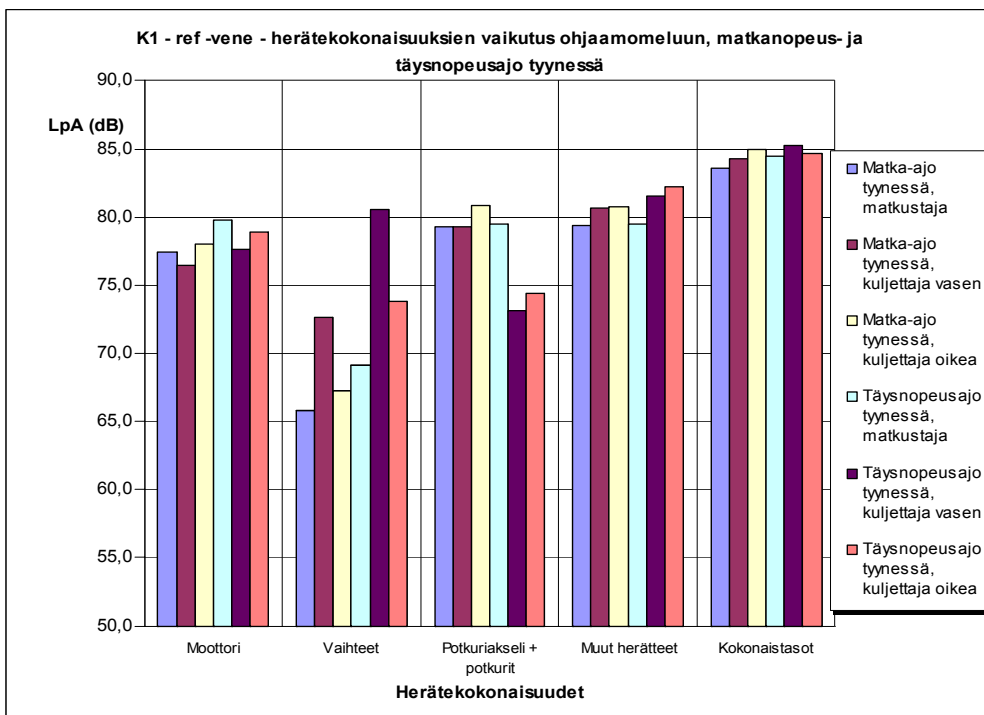
<sup>2</sup> Perävetolaitteen ylä- ja alavaihteen hammasvälitysten ryntötaajuuksille sattuvien spektriipiikkien yhteisvaikutus matkustamon tai ohjaamon melutasoon eri mittauspisteissä.

<sup>3</sup> Potkuriakselin pyörimistaajuuden sekä potkureiden lapataajuuksien ja niiden kokonaiskerrannaisten yhteisvaikutus matkustamon tai ohjaamon melutasoon eri mittauspisteissä.

<sup>4</sup> Muiden herätteiden kokonaisvaikutus matkustamon tai ohjaamon melutasoon eri mittauspisteissä.

<sup>5</sup> Kokonaistaso (mittauksista).

### 3. Tutkittujen veneiden meluominaisuudet

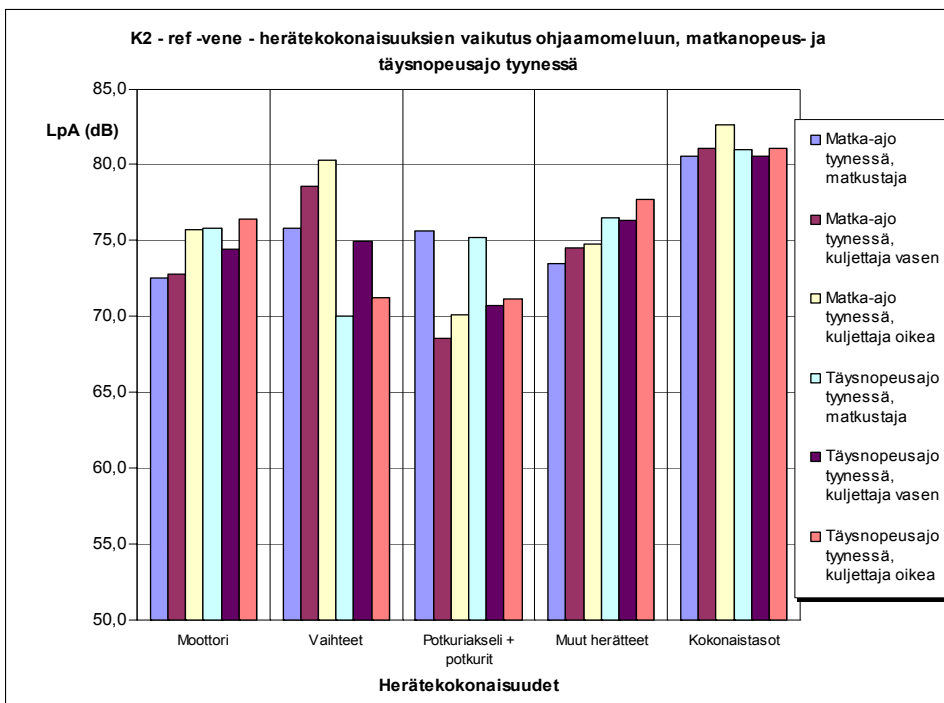


Kuva 9. K1-ref-veneeseen herätekokonaisuusanalyysi. Eri herätekokonaisuuksien vaikutus kokonaistasoon matkustustiloissa ajettaessa matkanopeudella (25 solmua) ja täydellä nopeudella (32,5 solmua) tyynessä.

Ajettaessa matka-ajonopeudella tyynessä **K1-ref-veneeseen** ohjaamomeluun eniten vaikuttavat moottori-perävetolaite-yhdistelmän herätekokonaisuudet ovat potkurit (yllättäen potkuriakselin korkeammat kerrannaiset sekä kolmi- ja nelilapaisen potkurin perustaajuudet) ja muut herätteet (runkoääninä etenevä laajakaistainen melu). Myös potkureiden melu saattaa tulla ohjaamoon veden kautta etenevänä värähtelynä, jossa kuitenkin säilyvät näkyvissä selvät erillistaajuiset komponentit.

Ajettaessa täydellä nopeudella tyynessä moottorin ja vaihteiden merkitys kasvaa (erityisesti perävetolaitteen ylävaihteen ryntötaajuuden merkitys ohjaamomelussa korostuu kuljettajan paikalla), joskin muut herätteet pysyvät edelleen kokonaistason kannalta merkittävimpänä herätekokonaisuutena. Potkureiden merkitys pienenee täysnopeusajossa.

### 3. Tutkittujen veneiden meluominaisuudet

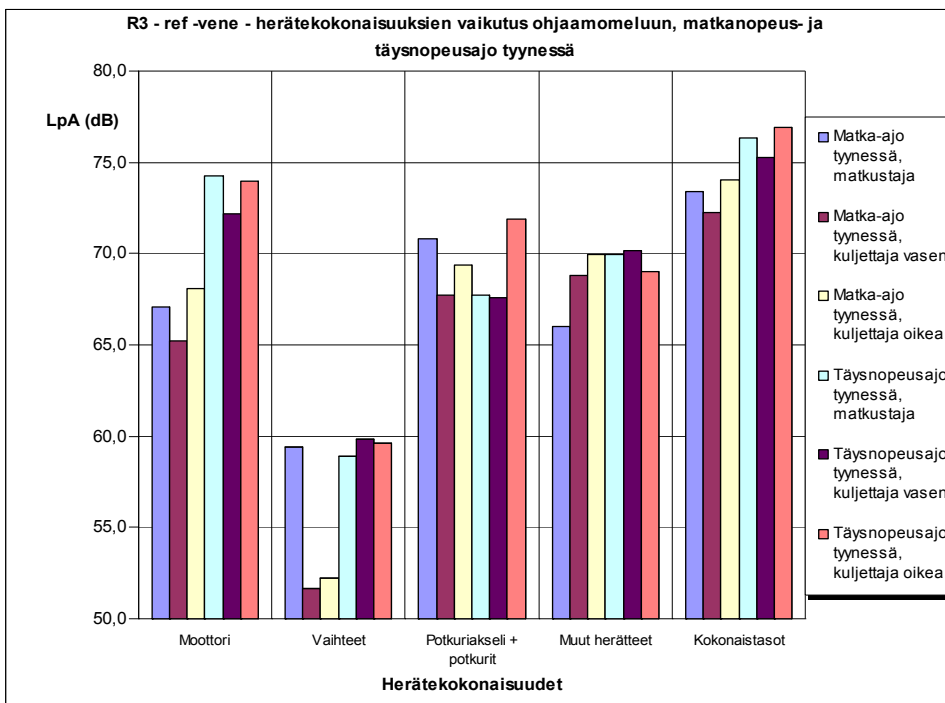


Kuva 10. K2-ref-veneeseen herätekokonaisuusanalyysi. Eri herätekokonaisuuksien vaikutus kokonaistasoon matkustustiloissa ajettaessa matkanopeudella (23 solmua) ja täydellä nopeudella (30 solmua) tyynessä.

Ajattaessa matka-ajonopeudella tyynessä **K2-ref-veneeseen** ohjaamomeluun vaikuttaa selvästi eniten perävetolaitteen ylävaihteen (merivaihteen) hammasvälitys eli hammasvälityksen ryntötaajuudelle syntyvä melu. Erityisen selkeänä tämä näkyy kuljettajan pään lähellä sijainneissa mittauspisteissä. Matkustajan paikalla potkureiden merkitys on kuitenkin yhtä suuri.

Ajattaessa täydellä nopeudella tyynessä moottorin ja muiden herätteiden merkitys kasvaa mutta vaihteiden ryntötaajuuksien merkitys pienenee olennaisesti. Potkureiden merkitys pysyy täysnopeusajossa likimain samanlaisena. Perävetolaitteen ylävaihteen merkitys matka-ajonopeudella on niin suuri, että matkustajan paikkaa lukuun ottamatta melutaso ohjaamossa on täysnopeusajossa alhaisempi kuin matka-ajonopeudella ajattaessa.

### 3. Tutkittujen veneiden meluominaisuudet



Kuva 11. R3-ref-veneen herätekokonaisuusanalyysi. Eri herätekokonaisuuksien vaikutus kokonaistasoon matkustustiloissa ajettaessa matkanopeudella (30 solmua) ja täydellä nopeudella (38 solmua) tyynessä.

Ajettaessa matka-ajonopeudella tyynessä **R3-ref-veneen** ohjaamomeluun eniten vaikuttavat moottori-perävetolaite-yhdistelmän herätekokonaisuudet ovat potkurit (kolmi- ja nelilapaisen potkurin perustaajuudet) ja muut herätteet (runkoäänenä etenevä laajakaistainen melu). Perävetolaitteen vaihteiden merkitys on hyvin vähäinen poiketen näin kaikista muista venetyypeistä.

Ajettaessa täydellä nopeudella tyynessä moottorin merkitys kasvaa voimakkaasti ja siitä tulee selvästi merkittävin herätekokonaisuus.

### 3.4 Veneiden värähtelyt

Värähtelymittausten analyysit tehtiin referenssiveneille K1, K2 ja R3. Tavoitteena oli selvittää eri herätelähteiden värähtelytasot sekä auttaa runkoäänien lähteiden identifioimisessa. Moottorin, peräpeilin ja keulan värähtelyanturit mittasivat herätelähteiden läheisyydessä ja sisämoduulin kolme anturia vasten läheisyydessä (kuljettaja ja matkustajat). Värähtelytasoja analysoitiin värähtelynopeute-

na, koska se kertoo enemmän värähtelyenergiasta kuin esimerkiksi värähtelykiihtyvyyks. Analyysitulokset olivat samankaltaiset kaikissa veneissä.

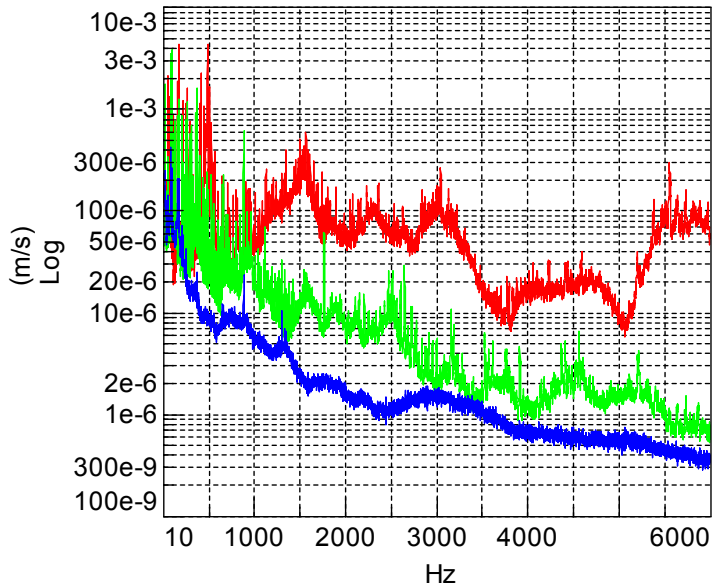
Suurimmat värähtelynopeudet mitattiin herätelähteiden läheltä. Matkaajonopeudella moottorin värähtelynopeus oli suurin ja peräpeilin jäykän mitauspisteen (kilven) värähtelynopeus toiseksi suurin (esim. Kuva 12). Keulan värähtely oli herätelähteistä pienin ja vastasi ohjaamosta mitattuja värähtelynopeuksia aina 2 kHz:iin saakka. Ohjaamon (lattia, katto ja tuulilasi) värähtelyt olivat suurimmat lattiasa. Ajonopeuden lisääminen matkanopeudesta täyteen nopeuteen ei vaikuttanut olennaisesti keulan värähtelynopeuksiin (esim. Kuva 13). Aallonkorkeudella oli suuri vaikutus värähtelynopeuksiin raskaalla referenssiveneellä alle 500 Hz:n taajuuksilla, mutta suuremmilla taajuuksilla vaikutus pieneni (Kuva 14). Kevyillä veneillä ero oli pienempi, ja keulan värähtelynopeudet olivat samaa luokkaa aallonkorkeudesta riippumatta. Peräpeilin veneen pituusakselin suuntaisiin värähtelynopeuksiin ajonopeudella ei ollut kovin suurta vaikutusta (esim. Kuva 15).

Lähes kaikissa värähtelymittauksessa erottuvat selvästi myös tärkeimpien herätelähteiden erillistaajuiset komponentit sekä näiden kerrannaiset:

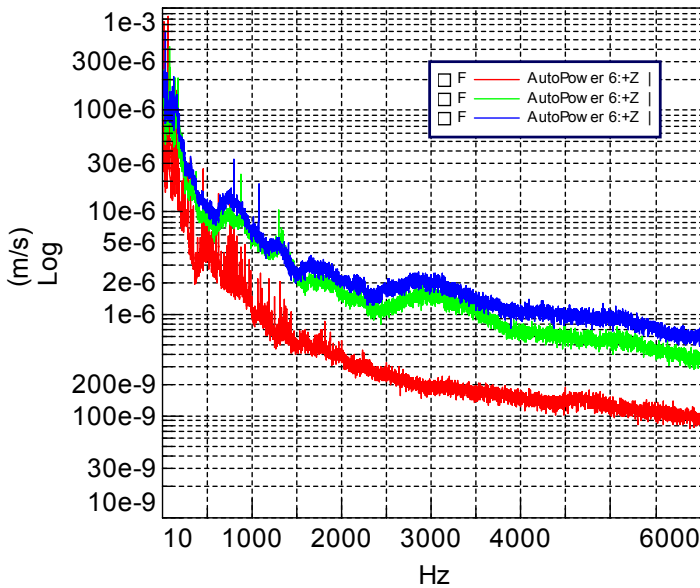
- moottorin pyörimistaajuus
- potkuriakselin pyörimistaajuus
- kolmelapaisen potkurin lapataajuus
- nelilapaisen potkurin lapataajuus.

Raskas referenssivene värähteli vähemmän kevyisiin veneisiin verrattuna. Kevyistä referenssiveneistä K2 (raskaampi) värähteli vähemmän kuin K1 (kevyempi). Veneen massalla on selvä yhteys veneen värähtelytasoihin: mitä raskaampi vene, sitä pienemmät olivat värähtelytasot ainakin matka-ajossa tyynessä (Kuva 16–Kuva 18). Eri referenssiveneille tehdyissä mittauksissa matkanopeudet vaihtelivat venetyypeittäin seuraavasti: K1: 25, K2: 23 ja R3: 30 solmua.

### 3. Tutkittujen veneiden meluominaisuudet



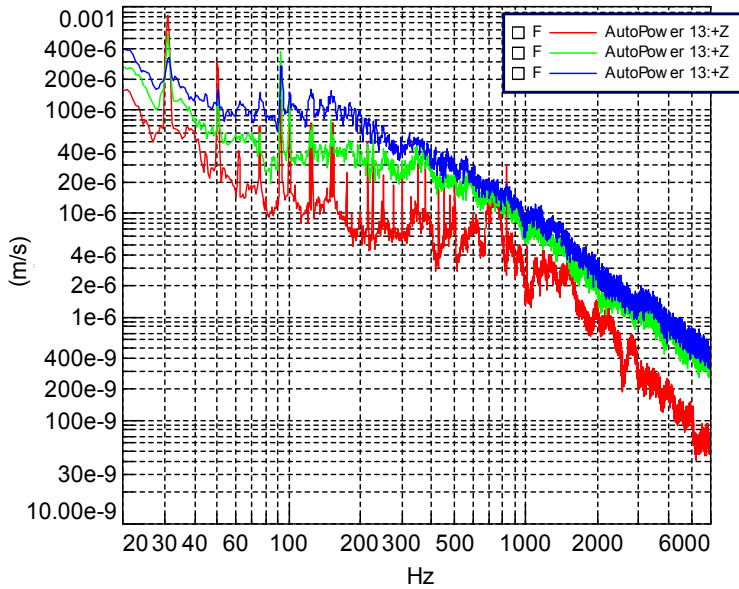
Kuva 12. Referenssiveneen K1 herätelähteiden värähtelynopeudet [m/s] taajuustasossa, matka-ajo tyynessä. Punainen käyrä kuvaa moottoria (X-suunta), vihreä käyrä peräpeiliä (X-suunta) ja sininen käyrä keulaa (Z-suunta).



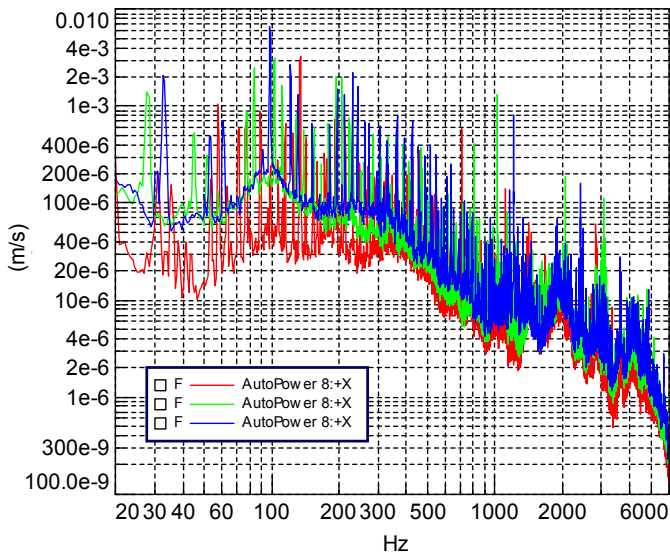
Kuva 13. Referenssiveneen K1 keulan värähtelynopeus [m/s] pystysuuntaan eri ajonopeuksilla tyynessä. Punainen käyrä kuvaa hiljaista nopeutta, vihreä käyrä matkanopeutta ja sininen käyrä maksiminopeutta.



### 3. Tutkittujen veneiden meluominaisuudet

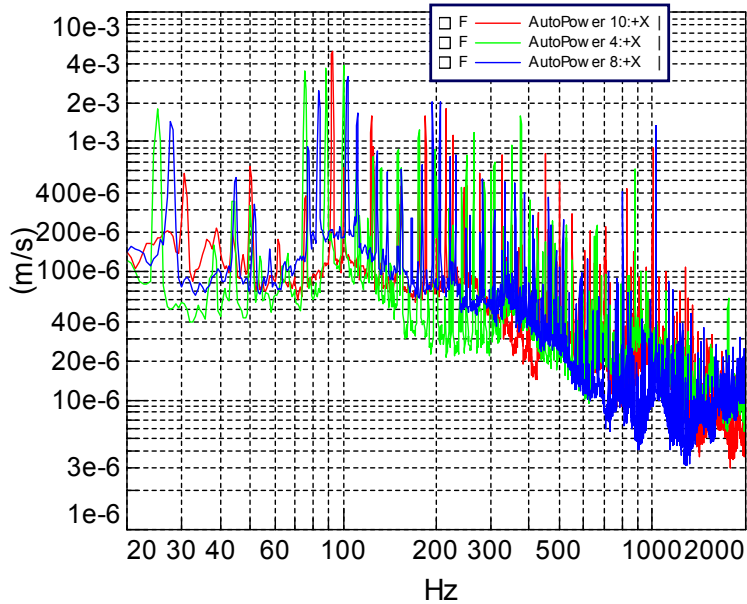


Kuva 14. Referenssiveneen R3 keulan värähtelynopeus [m/s] pystysuuntaan matkajoissa eri aallokoissa. Punainen käyrä kuvaa tyyntä, vihreä käyrä keskikorkeaa aallokkoa ja sininen käyrä korkeaa aallokkoa.

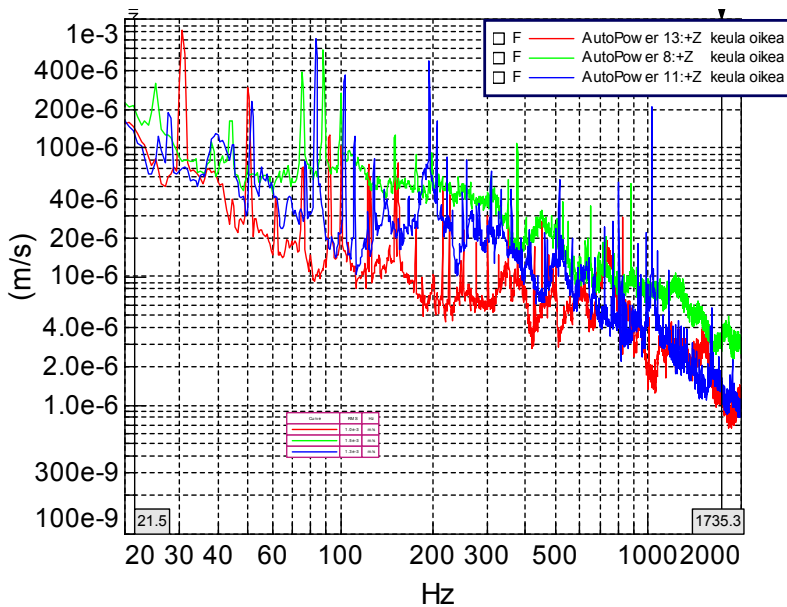


Kuva 15. Referenssiveneen K2 peräpeilin värähtelynopeus [m/s] menosuuntaan eri ajonopeuksilla tyyneessä. Punainen käyrä kuvaa hiljaista nopeutta, vihreä käyrä matkanopeutta ja sininen käyrä maksiminopeutta.

### 3. Tutkittujen veneiden meluominaisuudet

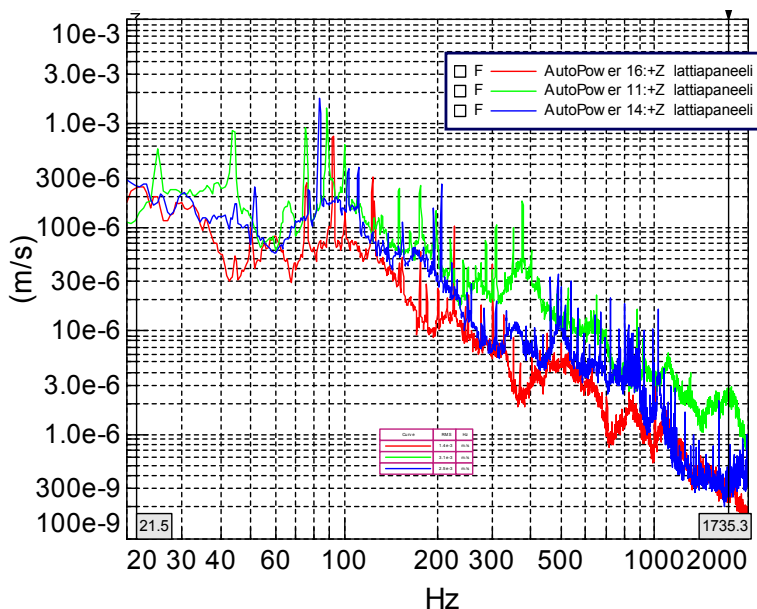


Kuva 16. Peräpeilin värähtelynopeus [m/s] menosuuntaan matkanopeudella tyynessä. Vihreä käyrä: K1, sininen käyrä: K2, punainen käyrä: R3. Värähtelynopeuden RMS-arvot taajuuskaistalla 22–1735 Hz: K1: 8.3 mm/s, K2: 6.8 mm/s, R3: 7.4 mm/s.



Kuva 17. Keulan värähtelynopeus [m/s] menosuuntaan matkanopeudella tyynessä. Vihreä käyrä: K1, sininen käyrä: K2, punainen käyrä: R3. Värähtelynopeuden RMS-arvot taajuuskaistalle 22–1735 Hz: K1: 1.5 mm/s, K2: 1.3 mm/s, R3: 1.0 mm/s.

### 3. Tutkittujen veneiden meluominaisuudet



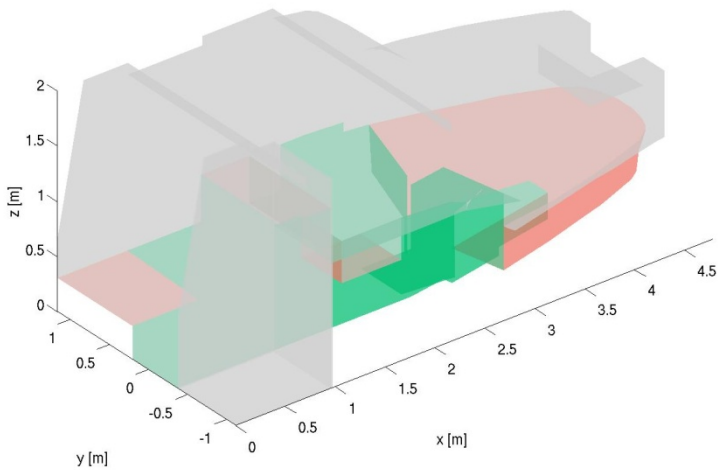
Kuva 18. Ohjaamon lattiapaneelin värähtelynopeus [m/s] menosuuntaan matkanopeudella tyynessä. Vihreä käyrä: K1, sininen käyrä: K2, punainen käyrä: R3. Värähtelynopeuden RMS-arvot taajuuskaistalle 22–1735 Hz: K1: 3.1 mm/s, K2: 2.5 mm/s, R3: 1.4 mm/s.

## 3.5 Ohjaamon akustinen mallinnus

### 3.5.1 Mallinnusgeometrian luonti

Referenssiveneen ohjaamon mallinnusgeometrian luomiseen käytettiin veneen 2D-piirroksia. Ohjaamon sisustuselementit ja sisägeometria jouduttiin määrittämään mittaamalla niiden dimensiot. Näin veneen ohjaamosta saatiin tehdyksi pistejoukko. Tämän jälkeen pistejoukko yhdistettiin tasoiksi ja tasot tilavuudeksi, jolloin veneen ohjaamon 3D-mallinnusgeometria oli valmis (Kuva 19). Mallinnusgeometria tehtiin Gambit-ohjelmistolla. Ohjaamon malli koostui neljästä eri tilavuudesta: ohjaamo, WC-tila sekä WC-tilan ja ohjaamon kaksi väliseinää.

### 3. Tutkittujen veneiden meluominaisuudet



Kuva 19. Veneen ohjaamon mallinnusgeometria.

Mallinnusta varten ohjaamon tilavuuksien väliaineille annettiin niitä vastaavat arvot. Ohjaamon ja WC-tilan väliaine on ilma ja väliseinien MDF-levy. Väliaineille käytetyt äänen nopeuden sekä tiheyden arvot on esitetty Taulukossa 5.

Taulukko 5. Laskennassa käytetyt väliaineiden äänen nopeuksien ja tiheyksien arvot.

Tila	Äänen nopeus [m/s]	Tiheys [kg/m <sup>3</sup> ]
Ohjaamo	340	1.2
WC väliseinät	3 500	720
WC tila	340	1.2

Mallinnuksessa jokaiselle pinnalle on annettava reunaehto, joka kuvaa materiaalin akustisia ominaisuuksia. Käytetyssä mallissa ohjaamon materiaalit mallinnettiin käyttämällä kolmea eri reunaehto (Kuva 19). Harmaat alueet on mallinnettu impedanssireunaehdolla käyttäen impedanssina keinoanahan, vaahtomuovin sekä MDF-levyn muodostaman rakenteen mitattua impedanssia. Ohjaamossa näillä pinnoilla on lasikuitua, keinoahkaa sekä katossa äänenvaimennusta lisääviä paneeleja. Vihreät alueet on mallinnettu käyttämällä *sound-hard*-reunaehto, joka

### 3. Tutkittujen veneiden meluominaisuudet

soveltuu kovien pintojen mallintamiseen. Ohjaamon vihreillä alueilla on lasikuitua sekä muita kovia pintoja, jotka voidaan olettaa akustisesti koviksi pinnoiksi. Punaiset alueet on mallinnettu käyttämällä absorboivaa reunaehdotusta. Punaisiin alueisiin kuuluvat matkustajien sekä kuljettajan penkit ja keulan sohva-alue.

Tämän jälkeen mallinnusgeometria jaettiin elementteihin. Elementteihin jakamisessa on otettava huomioon se, että elementtien maksimikoko ( $h_{\max}$ ) on enintään 0,2 kertaa tarkasteltavan taajuuden aallonpituus. Kun taajuus kasvaa, myös laskentahilan koko kasvaa. Mallinnuksessa käytettiin kahta eri kaupallista elementtimenetelmään perustuvaa ohjelmistoa, Comsol Multiphysics Acoustics Modulea sekä Waveller Acousticsia (Kuava Oy). Tulosten jälkikäsitelyyn käytettiin Matlab-ohjelmistoa.

#### 3.5.2 Mallin verifiointi

Mallin toimivuuden selvittämiseksi veneen ohjaamossa tehtiin mittauksia kahdessa eri tasossa. Kummassakin tasossa oli 30 mittapistettä, ja niiden etäisyys toisistaan oli 5 cm. Äänilähteenä mittauksissa käytettiin kaiutinta, joka sijaitsi ohjaamon peräosassa (Kuva 20). Kaiuttimesta toistettiin sinimuotoista ääntä viidellä eri taajuudella: 100, 200, 300, 400 ja 500 Hz. Äänenpainetaso mitattiin tasoissa 1 ja 2. Vertaamalla mittaustuloksia mallinnustuloksiin pystyttiin selvittämään mallin toimivuus.



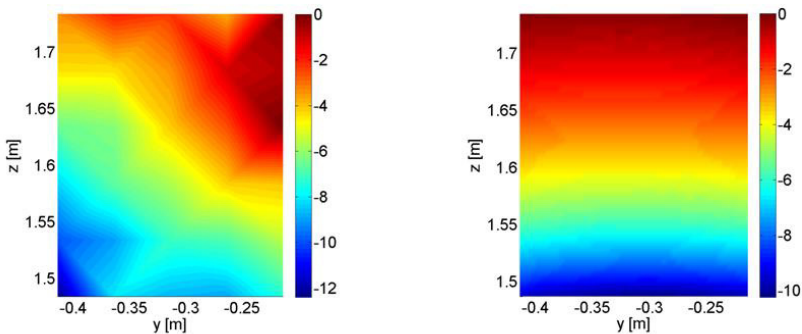
Kuva 20. Mittaustasot (vasen ja keskellä) sekä äänilähteen paikka (oikea) mallin verifiointimittauksissa.

Äänilähteenä mallinnuksessa käytettiin pistelähdettä, joka sijaitsi ohjaamon perällä pisteessä  $(x, y, z) = (0.558, -0.014, 0.3680)$ . Laskentaa varten mallinnusgeometria jaettiin 251 095 elementtiin. Mallinnus tehtiin Waveller Acoustics-ohjelmistolla. Verifiointikuvissa (Kuva 21–Kuva 26) vasemmalla puolella on mittaustuloksista ja oikealla mallinnustuloksista laskettu normeerattu äänen-

### 3. Tutkittujen veneiden meluominaisuudet

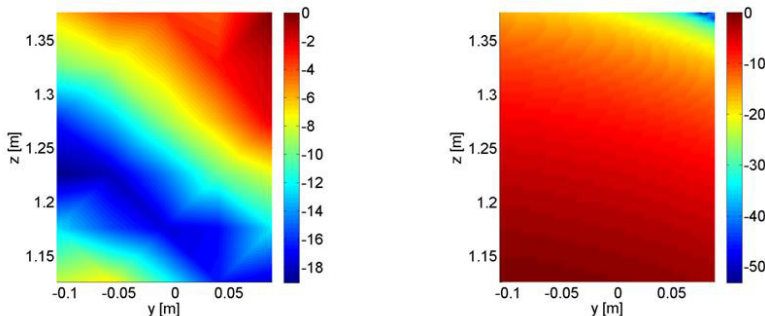
painetaso. Tulosten normeeraus on tehty helpottamaan mittaus- ja mallinnustulosten vertailua. 0 tarkoittaa kuvissa suurinta äänenpainetasoa ja  $-2$  sitä, että äänenpainetaso on 2 dB pienempi. Punaisissa kohdissa on suurin äänenpainetaso, ja sinisissä kohdissa se on noin 10 dB pienempi.

Taajuudella 100 Hz tasossa 1 (Kuva 21) mallinnustulokset ovat samankaltaisia mittausten kanssa äänenpainetasojen maksimin ja minimin paikan suhteen. Erot äänenpainetasoissa paikan funktiona ovat paikoitellen suuriakin mittausten ja mallinnustulosten välillä, erityisesti tarkastelualueen oikeassa reunassa.



Kuva 21. Mitattu (vasen) ja mallinnettu (oikea) normeerattu äänenpainetaso tasossa 1 taajuudella 100 Hz.

Tason 2 vastaavasta kuvasta (Kuva 22) havaitaan, että mallinnustulokset ovat täysin erilaiset kuin mittaustulokset, eli malli ei toimi 100 Hz:n taajuudella tasossa 2.

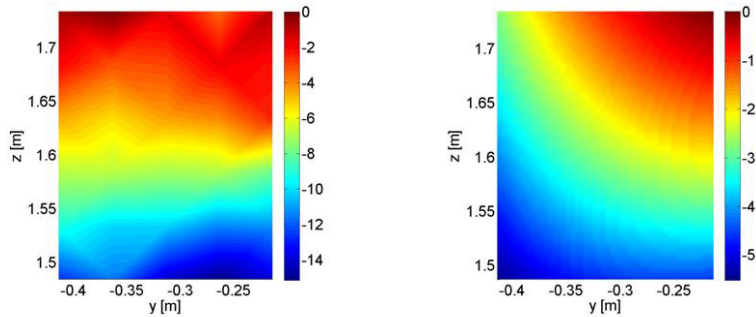


Kuva 22. Mitattu (vasen) ja mallinnettu (oikea) normeerattu äänenpainetaso tasossa 2 taajuudella 100 Hz.

Tasossa 1 taajuudella 200 Hz (Kuva 23) mitattu ja mallinnettu äänenpainetaso korreloivat kohtalaisesti eli käyttäytyvät samalla tavalla paikan funktiona – itse

### 3. Tutkittujen veneiden meluominaisuudet

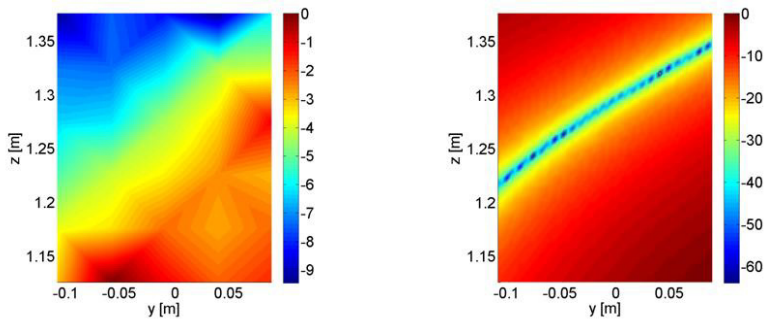
asiassa paremmin taajuudella 200 Hz kuin 100 Hz. Suurimmat erot ovat nähtävissä kuvien vasemmassa reunassa.



Kuva 23. Mitattu (vasen) ja mallinnettu (oikea) normeerattu äänenpainetaso tasossa 1 taajuudella 200 Hz.

Myös tason 2 tulokset ovat hieman yhteneväisempiä taajuudella 200 Hz kuin taajuudella 100 Hz (Kuva 24).

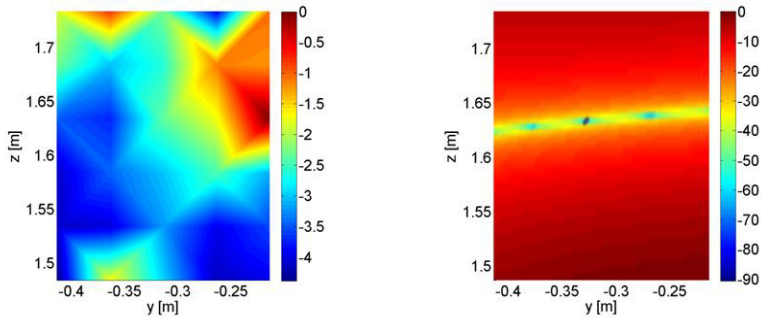
Tulosten perusteella voidaan todeta, että ohjaamon mallin avulla lasketut äänenpainetasot ovat luotettavampia 200 Hz:n taajuudella, eli ohjaamon akustinen malli toimii paremmin taajuudella 200 Hz kuin taajuudella 100 Hz.



Kuva 24. Mitattu (vasen) ja mallinnettu (oikea) normeerattu äänenpainetaso tasossa 2 taajuudella 200 Hz.

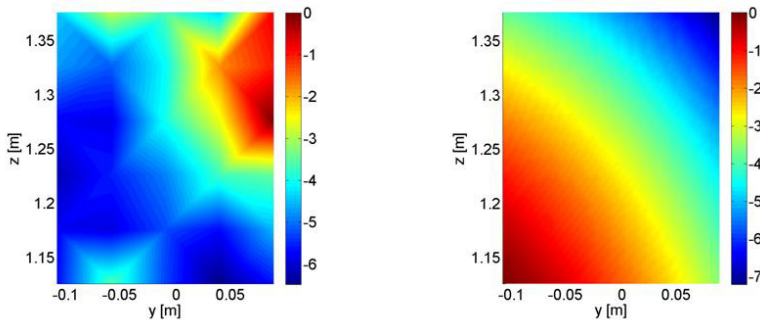
Taajuudella 300 Hz mitatut ja lasketut äänenpainetasot ovat täysin erilaiset (Kuva 25 ja Kuva 26), eli malli ei toimi taajuudella 300 Hz. Sama havaitaan myös taajuuksilla 400 Hz ja 500 Hz (ks. liite C).

### 3. Tutkittujen veneiden meluominaisuudet



Kuva 25. Mitattu (vasen) ja mallinnettu (oikea) normeerattu äänenpainetaso tasossa 1 taajuudella 300 Hz.

Mittaus- ja mallinnustulosten vertailuista taajuuksilla 100, 200, 300, 400 ja 500 Hz havaitaan, että malli toimii parhaiten taajuudella 200 Hz sekä taajuudella 100 Hz. Suuremmilla taajuuksilla (300, 400 ja 500 Hz) mallilla lasketut tulokset eivät korreloi mittaus tulosten kanssa tasossa 1 ja 2.



Kuva 26. Mitattu (vasen) ja mallinnettu (oikea) normeerattu äänenpainetaso tasossa 2 taajuudella 300 Hz.

Malli toimii vain pienillä taajuuksilla, koska geometrian luomisessa jouduttiin tekemään approksimaatioita ohjaamon oikeasta geometriasta. Yksityiskohtien poisjättäminen näkyy suurilla taajuuksilla. Yksityiskohdat parantaisivat mallinnustuloksia, mutta niiden mukaan ottaminen vaatisi ohjaamon 3D CAD -piirustuksia.

Koska ohjaamon akustisen mallin avulla lasketut tulokset korreloivat mittaus tulosten kanssa vain taajuuksilla 100 ja 200 Hz, keskitytään veneen ohjaamon akustisissa simuloinneissa niihin.



### 3.5.3 Ohjaamon ominaistajuuudet

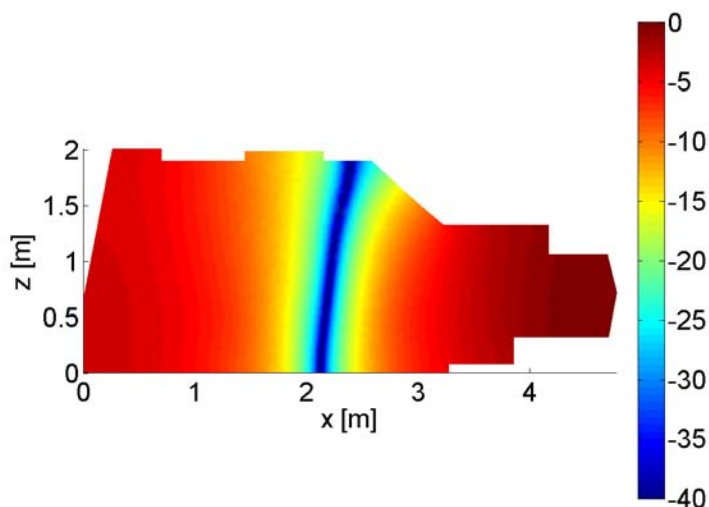
Ominaistaajuuksien laskemisessa käytettiin mallia, jossa kaikki pinnat oletettiin akustisesti koviksi. Laskenta tehtiin Comsol Multiphysics -ohjelmalla, josta löytyy valmis ratkaisija ominaistaajuuksien laskemiseen. Ominaistaajuuksien laskemista varten mallinnusgeometria jaettiin 60 173 elementtiin.

Ominaistaajuudet tarkoittavat sitä, että suljettu tila vahvistaa näillä taajuuksilla olevaa ääntä. Tarkastellun ohjaamon kymmenen alinta ominaistaajuutta ovat taajuusalueella 40–133 Hz (Taulukko 6). Alimman ominaistaajuuden aallonpituuden puolikas vastaa likimain ohjaamon pituutta eli ohjaamon suurinta mitta, kuten teorian mukaan pitää ollakin (Kuva 27).

Taulukko 6. Lasketut ohjaamon ominaistaajuudet sekä niiden aallonpituudet.

Ominaistaajuus [Hz]	Aallonpituus [m]
40,37	8,42
68,05	5,00
85,97	3,95
90,15	3,77
95,69	3,55
104,27	3,26
112,81	3,01
115,38	2,95
120,65	2,82
132,42	2,57

### 3. Tutkittujen veneiden meluominaisuudet



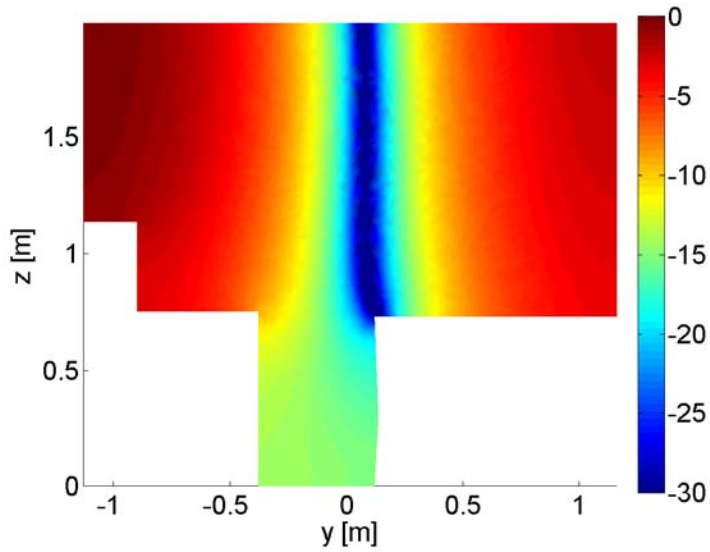
Kuva 27. Äänenpainetaso ohjaamossa ominaistajuuksella 40,37 Hz (0 vastaa suurinta äänenpainetasoa ja -40 pienintä).

Muut ominaistajuuudet määräytyvät ohjaamon muiden mittojen ja niiden monikertojen mukaan. Ominaisajuuuden vaikutus äänekyyteen on suurin, kun kuulutaja on painemaksimien kohdalla. Painemaksimit sijaitsevat yleisesti nurkkien läheisyydessä. Ohjaamossa kuljettajan sekä matkustajien paikat ovat nurkissa eli ominaistajuuksien vaikutus voi olla suuri kuljettajan ja matkustajan paikkojen äänenpainetasoihin.

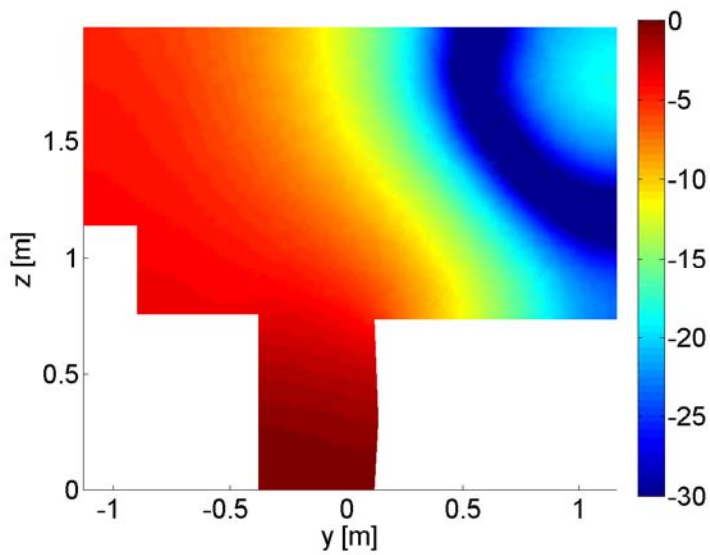
Kuvissa Kuva 28 ja Kuva 29 on esitetty mallinnettu äänenpainetaso ohjaamon poikittaissuunnassa kuljettajan paikalla yz-tasossa ominaistajuuksilla 85,97 Hz ja 104,27 Hz. Kuljettajan paikaksi oletettiin  $x = 1.58$  m. Ominaisajuuksella 85,97 Hz (Kuva 28) kuljettajan sekä etummaisena matkustajan paikalla äänenpainetaso laskee 10 dB, kun siirrytään ohjaamon seinistä 0,5 m pois päin. Tämä tarkoittaa sitä, että kuljettajan pään oikealla ja vasemmalla puolella äänenpainetasoissa voi olla suurikin ero.

Ominaisajuuksella 104,27 Hz etummaisena matkustajan paikalla on noin 20 dB alhaisempi äänenpainetaso verrattuna kuljettajan paikan äänenpainetasoon (Kuva 29). Kuljettajan paikalla on kummallakin ominaistajuuksella 85,97 Hz ja 104,27 Hz äänenpainetaso suurimmillaan.

### 3. Tutkittujen veneiden meluominaisuudet



Kuva 28. Normeerattu äänenpainetaso ominaistaajuudella 85,97 Hz kuljettajan kohdalla keulasta päin katsottuna.



Kuva 29. Normeerattu äänenpainetaso ominaistaajuudella 104,27 Hz kuljettajan kohdalla keulasta päin katsottuna.

### 3. Tutkittujen veneiden meluominaisuudet

#### 3.5.4 Materiaalien vaikutus ohjaamomeluun

Mahdollisten vaimennusmateriaalien käyttäytymistä ohjaamon seinillä on tarkasteltu neljän eri vaihtoehdon avulla (materiaalivaihtoehdot, ks. Taulukko 7):

0. Seinät ovat kovat eli ilman mitään vaimennusmateriaalia,
1. Seinät on päällystetty keinsonahan, vaahtomuovin ja MDF-levyn yhdistelmällä
2. Seinät on päällystetty villalla
3. Seinät on päällystetty vaahtomuovilla.

Taulukko 7. Mallinnuksessa käytetyt äänenvaimennusmateriaalit ja niiden paksuudet.

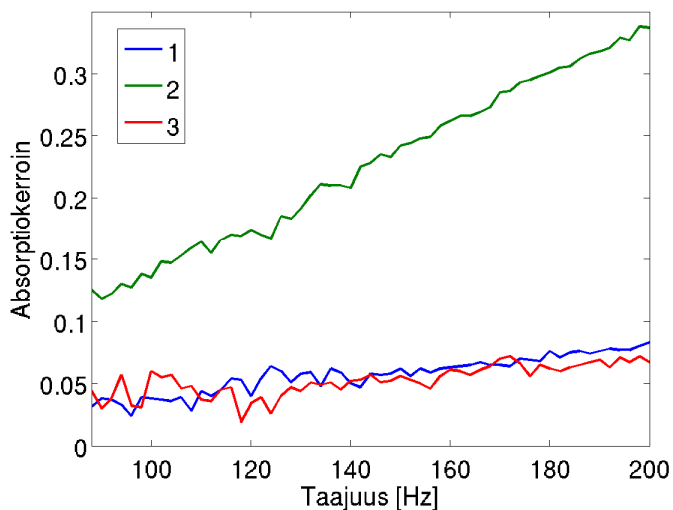
Materiaali	Nimike	Paksuus [mm]
1.	Keinsonahka + vaahtomuovi + MDF	
2.	Isover-akustovilla	50
3.	Superlon E27 PS	29

Mallinnusta varten käytettävien materiaalien akustinen impedanssi on mitattava impedanssiputkella. Mittaustuloksista voidaan laskea materiaalien absorptiokertoimet (Kuva 30). Absorptiokertoimien perusteella villa olisi paras vaihtoehto, keinsonahka + vaahtomuovi + MDF-levy sekä pelkkä vaahtomuovi olisivat sen sijaan heikosti vaimentavia materiaaleja.

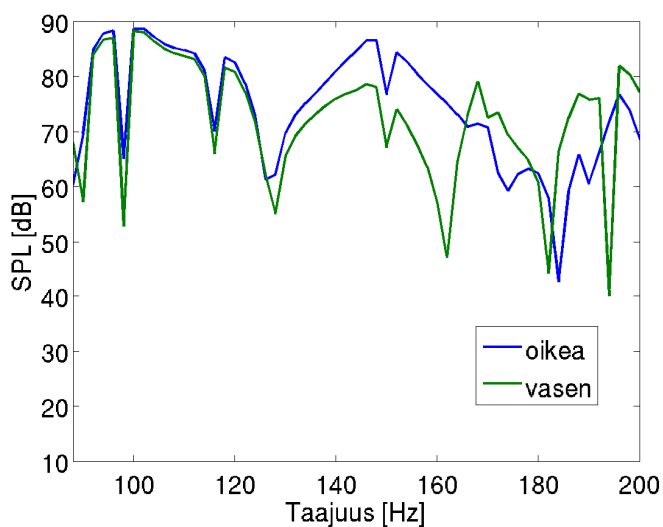
Simuloinneissa käytettiin äänilähteenä pistelähdettä samalla lailla kuin aiemmin mallin verifioimisen yhteydessä. Laskentaverkossa oli 80 561 elementtiä. Äänikenttä ohjaamossa laskettiin 2 Hz välein taajuusalueella 88–200 Hz. Jokaiselle taajuudelle käytettiin mittaamalla saatua impedanssiarvoa. Yhden materiaalin tarkasteluun laskettiin 57 simulaatiota. Laskenta tehtiin Comsol Multiphysics -ohjelmistolla, ja yksi simulaatio kesti noin 100 sekuntia.

Simuloinnin tuloksena (Kuva 31) nähdään, että äänenpainetaso taajuuskaistalla 130–160 Hz (taajuuteen 165 Hz asti) on kuljettajan pään oikealla puolella korkeampi kuin vasemmalla puolella, kun ohjaamon seinillä ei ole mitään vaimennusmateriaalia. Tämän jälkeen tilanne muuttuu päinvastaiseksi, eli vasemmalla puolella on korkeampi äänenpainetaso kuin oikealla puolella.

### 3. Tutkittujen veneiden meluominaisuudet



Kuva 30. Käytettyjen äänenvaimennusmateriaalien absorptiokertoimet taajuuden funktiona. Materiaali 1: keino nahka + vaahтомуovi + MDF, materiaali 2: villa ja materiaali 3 vaahтомуovi.

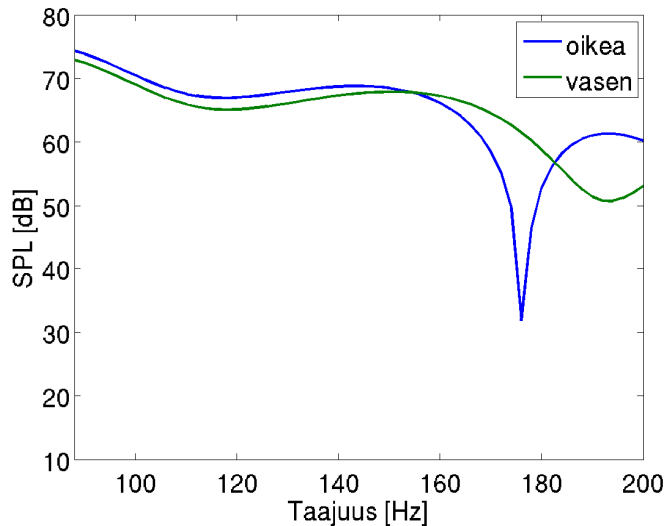


Kuva 31. Kuljettajan pään oikean ja vasemman puolen laskettu äänenpainetaso, kun ohjaamossa ei ole äänenvaimennusmateriaalia.

Kun äänenvaimennusmateriaalina on käytetty keino nahkan, vaahтомуovin ja MDF-levyn yhdistelmää (Kuva 32), äänenpainetaso on kuljettajan oikean korvan

### 3. Tutkittujen veneiden meluominaisuudet

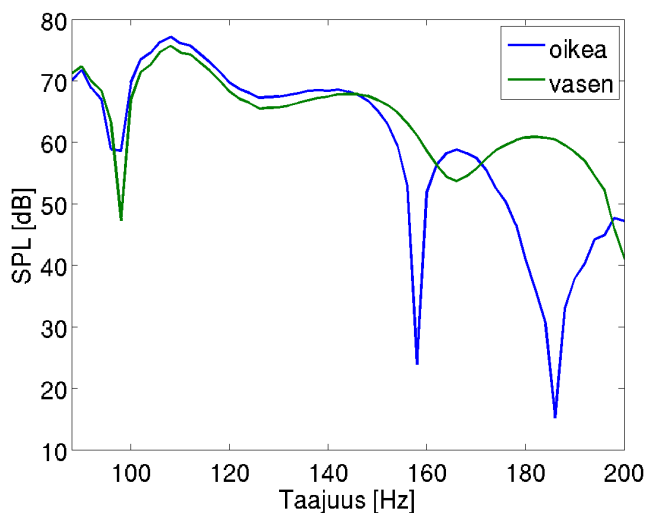
kohdalla muutaman desibelin korkeampi kuin vasemman korvan kohdalla, mutta vain alle 150 Hz:n taajuuksilla. Yli 150 Hz:n taajuuksilla äänenpainetaso kummallakin puolella laskee noin 10 dB, eli materiaali vaimentaa ääntä verrattuna tilanteeseen, jossa ohjaamossa ei ole lainkaan äänenvaimennusmateriaalia. Lisäksi havaitaan, että oikealla puolella on vaimennuskuoppa noin 170 Hz:n ja vasemmalla puolella noin 190 Hz:n taajuudella.



Kuva 32. Kuljettajan pään oikean ja vasemman puolen laskettu äänenpainetaso, kun ohjaamossa on käytetty äänenvaimennuksessa keinoahkaa + vaahtomuovia + MDF:ää.

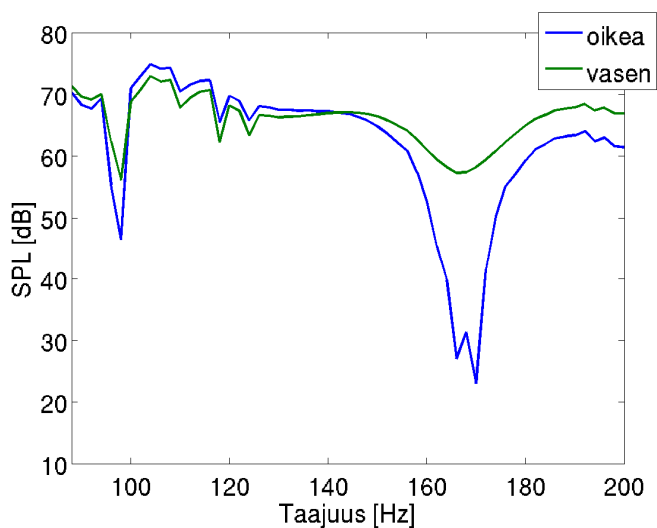
Kun äänenvaimennusmateriaalina on Isover-akustovilla (Kuva 33), äänenpainetaso on kuljettajan oikealla puolella hieman korkeampi kuin vasemmalla puolella, mutta vain alle 150 Hz:n taajuuksilla. Oikealla puolella havaitaan myös kaksi vaimennuskuoppaa taajuuksilla 158 Hz ja 186 Hz. Lisäksi äänenpainetaso laskee molemmilla puolilla noin 8 dB 150 Hz taajuuden jälkeen.

### 3. Tutkittujen veneiden meluominaisuudet



Kuva 33. Kuljettajan pään oikean ja vasemman puolen laskettu äänenpainetaso, kun ohjaamossa on käytetty äänenvaimennuksessa Isover-akustovillaa.

Kun materiaalina on vaahtomuovia, äänenpainetaso on korkeampi oikealla kuin vasemmalla puolella taajuuden ollessa alle 140 Hz (Kuva 34). Tämän taajuuden jälkeen tilanne muuttuu vastakkaiseksi, eli vasemmalla puolella on korkeampi äänenpainetaso kuin oikealla puolella. Vaahtomuovi ei juurikaan laske äänenpainetasoa lukuun ottamatta noin 170 Hz:n kohdalla olevaa vaimennuskuoppaa.



Kuva 34. Kuljettajan pään oikean ja vasemman puolen laskettu äänenpainetaso, kun ohjaamossa on käytetty äänenvaimennuksessa vaahtomuovia.

### 3. Tutkittujen veneiden meluominaisuudet

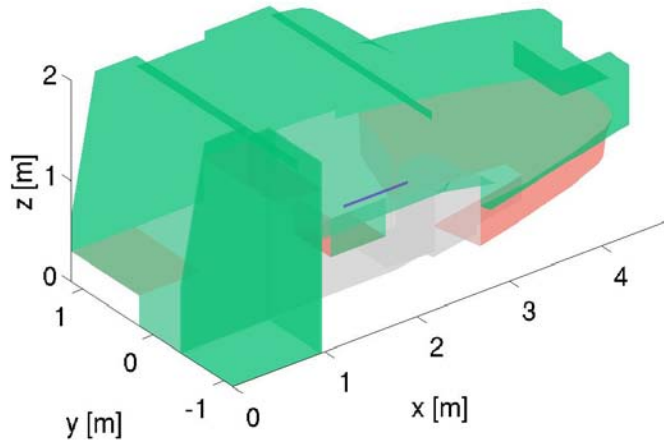
Vaimennusmateriaalin käyttöä simuloivia tuloksia (Kuva 31–Kuva 34) vertaamalla havaitaan, että äänenpainetaso kuljettajan pään kohdalla laskee, kun ohjaamon seiniin laitetaan äänenvaimennusmateriaalia – huolimatta siitä, mikä on kyseisen materiaalin absorptiokerroin. Erityisesti keinoahan, vaahtomuovin ja MDF-levyn yhdistelmä sekä pelkkä vaahtomuovi laskevat mallinnustulosten perusteella äänenpainetasoja kuljettajan pään kohdalla usealla desibelillä verrattuna tilanteeseen, jossa äänenvaimennusmateriaalia ei ole. Näin tapahtuu siitä huolimatta, että kyseisten materiaalien absorptiokerroin on vain noin 0,05. Mallinnustulosten perusteella näistä kolmesta materiaalista parhaiten alle 200 Hz:n taajuuksia kuljettajan kohdalla vaimentaa Isover-villa, mutta tämä johtunee pääasiassa siitä, että villa oli käytetyistä materiaaleista paksuin.

#### 3.5.5 Pintojen värähtelyn vaikutus ohjaamomeluun

Ohjaamon seinäpinnan värähtelyn tarkastelua varten kuljettajan oikealle puolelle määritettiin pinta, joka oli 70 cm leveä ja 3 cm korkea (sinertävä alue, Kuva 35). Pinta värähteli normaalin suuntaisesti nopeudella  $v = 0.037$  m/s. Tämä arvo on mitattu kiihtyvyyssanturilla ohjaamosta matkustajan puoleiselta seinäpinnalta.

Pinnan värähtelyn aiheuttamaa ääntä tutkittiin simuloimalla pinnan värähtelyä taajuuksilla 88, 107 ja 176 Hz. Taajuudet 88 ja 176 Hz vastaavat moottorin pyörimistaajuuden 2. ja 4. kerrannaista matkanopeudella, ja taajuus 107 Hz vastaa täysnopeuden moottorin pyörimistaajuuden 2. kerrannaista. Moottorin pyörimistaajuudet olivat matkanopeudella 44 Hz ja täysnopeudella 53 Hz. Nämä taajuudet erottuvat myös ohjaamosta tehdyissä pinnan värähtelymittauksissa.

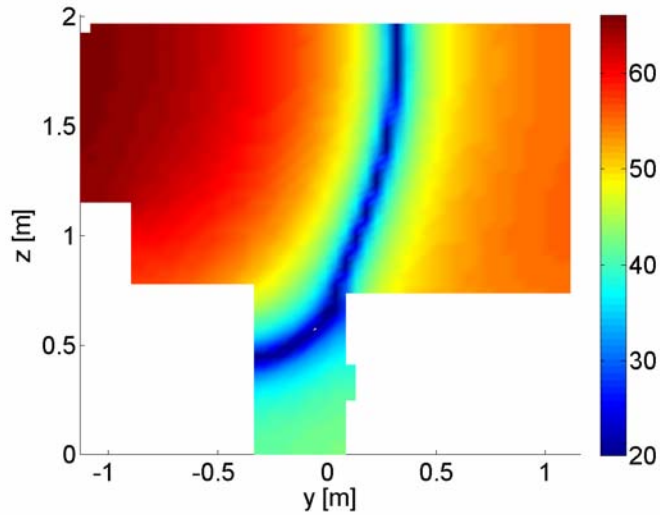




Kuva 35. Käytetty mallinnusgeometria värähtelyn vaikutusta ohjaamomeluun simuloitaessa. Sinertävä alue on värähtelevä pinta.

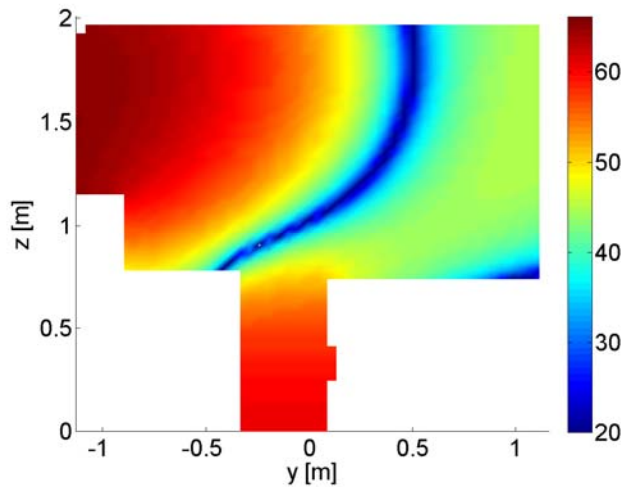
Pinnan värähtelyn synnyttämää äänenpainetta simuloitiin Waveller Acoustics -ohjelmistolla laskentaverkossa, jossa oli 251 863 elementtiä. Värähtelevän pinnan synnyttämä äänenpainetaso kuljettajan kohdalla yz-tasossa taajuudella 88 Hz on yli 60 dB kuljettajan oikealle puolella, mutta äänenpainetaso laskee noin 20 dB, kun siirrytään kuljettajan puoleiselta seinältä veneen keskilinjalle (Kuva 36). Keskilinjalta äänenpainetaso kasvaa uudestaan, kun siirrytään kohti vasemmanpuoleista seinää. Äänenpainetaso on kuitenkin vasemman seinän läheisyydessä muutaman desibelin alhaisempi kuin oikealla puolella. Pinta värähtelee lähellä ominaistajuutta 85,97 Hz (ks. Taulukko 6), ja seinän värähtelyn aiheuttama äänenpainetasojakauma ohjaamon poikittaissuunnassa on samankaltainen kuin ohjaamon akustisen ominaistajuuden vaikutuksesta syntyvä äänenpainetasojakauma (vrt. Kuva 28 ja Kuva 36). Ohjaamon poikittaissuuntainen mitta näin ollen vahvistaa moottorin palotajuista melua kuljettajan ja matkustajan paikalla matkanopeudella ajettaessa.

### 3. Tutkittujen veneiden meluominaisuudet



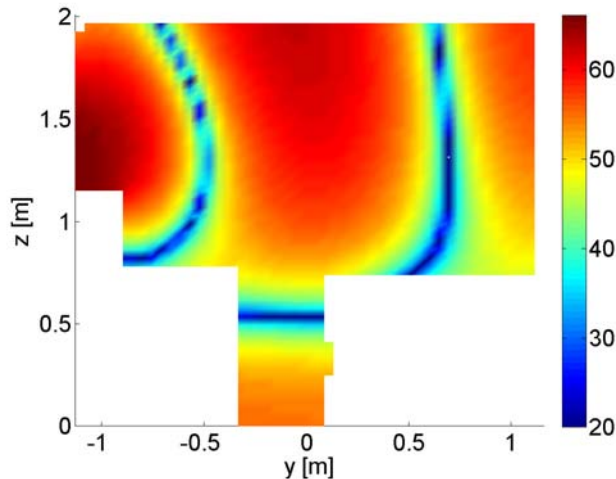
Kuva 36. Värähtelevän pinnan aiheuttama äänenpainetaso kuljettajan kohdalla taajuudella 88 Hz.

Kun pinta värähtelee taajuudella 107 Hz, äänenpainetaso on kuljettajan puolella noin 15 dB korkeampi kuin matkustajan puolella (Kuva 37). Lisäksi havaitaan, että kuljettajan pään oikealla ( $y = -0,69$  m) ja vasemmalla puolella ( $y = -0,49$ ) äänenpainetasoissa on huomattava ero.



Kuva 37. Värähtelevän pinnan aiheuttama äänenpainetaso kuljettajan kohdalla taajuudella 107 Hz.

Taajuudella 176 Hz värähtelevä pinta synnyttää äänenpainetasojakauman, jossa on kolme äänenpainemaksimin aluetta ja kaksi aluetta, joissa äänenpainetaso on noin 20 dB maksimia alaisempi (Kuva 38). Yksi näistä minimialueista on kuljettajan pään ja toinen matkustajan paikan kohdalla. Pelkästään taajuudella 176 Hz värähtelevä pinta ei mallinnustulosten perusteella siis vaikuta merkittävästi kuljettajan eikä etummaisena matkustajan äänenpainetasoihin, joskin äänenpainetaso kuljettajan pään oikealla puolella seinän lähellä on maksimissaan.



Kuva 38. Värähtelevän pinnan aiheuttama äänenpainetaso kuljettajan kohdalla taajuudella 176 Hz.

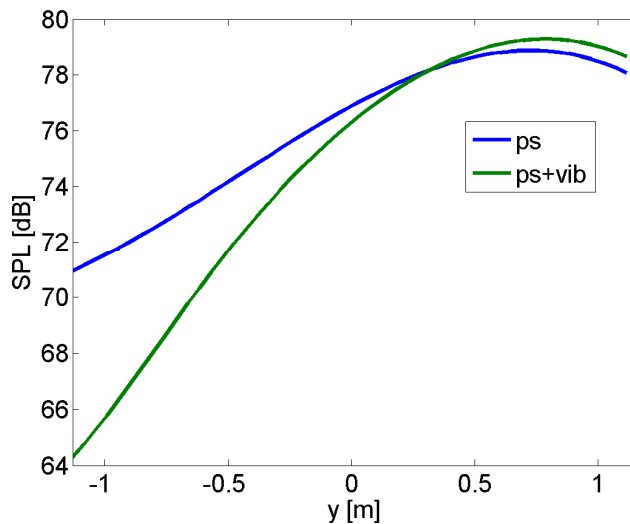
#### 3.5.6 Pintojen värähtelyn ja akustisen pistelähteen vaikutus ohjaamomeluun

Värähtelevän pinnan ja akustisen pistelähteen (esim. moottoritilan ja ohjaamon tiivistämätön läpivienti) yhteisvaikutusta ohjaamon äänenpainetasoon tarkasteltiin samoilla taajuuksilla kuin pelkän pistelähteen synnyttämää äänenpainetasoa. Vertailussa tarkasteltiin äänenpainetasoa korkeudella  $z = 1,76$  m (vastaa kuljettajan pään korkeutta) y-akselin suunnassa (ohjaamon poikittaissuunta). Ohjaamon äänenpainetasoa simuloitiin kahdella eri lähteellä: pistelähde ja värähtelevä pinta (ps + vib) sekä pelkkä pistelähde (ps) taajuuksilla 88, 107 ja 176 Hz. Lähteiden vaiheille annettiin sama alkuarvo eli lähteet ovat samassa vaiheessa. Oikeassa veneessä lähteiden vaiheistusta ei voida näin kontrolloida, joten todellisessa ajotilanteessa myös lähteiden yhteisvaikutus poikkeaa esitetyistä tuloksista. Pis-

### 3. Tutkittujen veneiden meluominaisuudet

telähteen ja värähtelevän pinnan mallinnuksessa käytettiin laskentaverkkoa, jossa oli 255 676 elementtiä.

Äänenpainetaso ohjaamossa kuljettajan pään tasolla ohjaamon poikittaissuunnassa taajuudella 88 Hz vaihtelee simuloinnin mukaan noin 15 dB (Kuva 39). Kuvassa sininen käyrä on pelkän pistelähteen aiheuttama äänenpainetaso ja vihreä käyrä pistelähteen ja värähtelevän pinnan yhdessä synnyttämä äänenpainetaso. Pinta värähteli normaalin suuntaisesti, ja sen värähtelynopeus oli sama kuin aiemmin eli  $v = 0.037$  m/s.

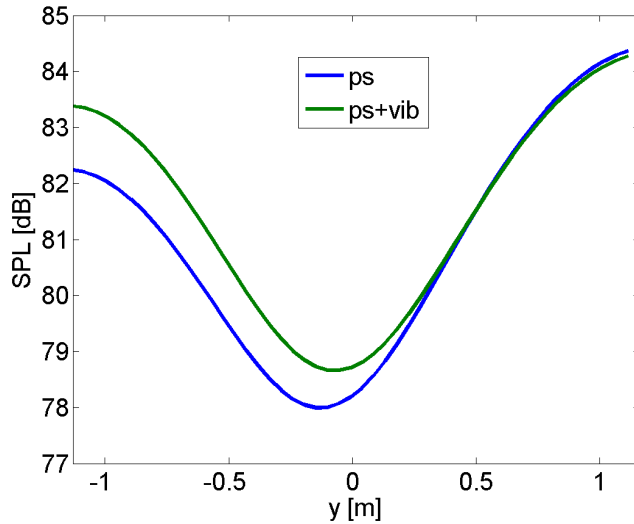


Kuva 39. Äänenpainetaso kuljettajan pään korkeudella kun äänilähteenä on pistelähde (ps) ja värähtelevä pinta + pistelähde (ps + vib) taajuudella 88 Hz.

Kuljettajan puolella äänenpainetaso laskee tarkastelukohdassa, kun kuljettajan oikealla puolella oleva pinta värähtelee. Matkustajan puolella värähtelevä pinta lisää äänenpainetasoa. Kun mallissa on nyt kaksi äänilähdettä, ohjaamon äänikenttä muodostuu niiden yhteisvaikutuksesta. Äänenpainetason laskeminen kuljettajan puolella johtuu siitä, että molemmilla ääniaalloilla on sama taajuus. Lisäksi ne ovat vastakkaisessa vaiheessa kuljettajan kohdalla, jolloin ne osittain kumoavat toisensa. Matkustajan kohdalla ääniaallot ovat samassa vaiheessa, jolloin ne lisäävät äänenpainetasoa. Tätä ääniaaltojen kumoutumista käytetään hyväksi aktiivisessa melunvaimennuksessa.

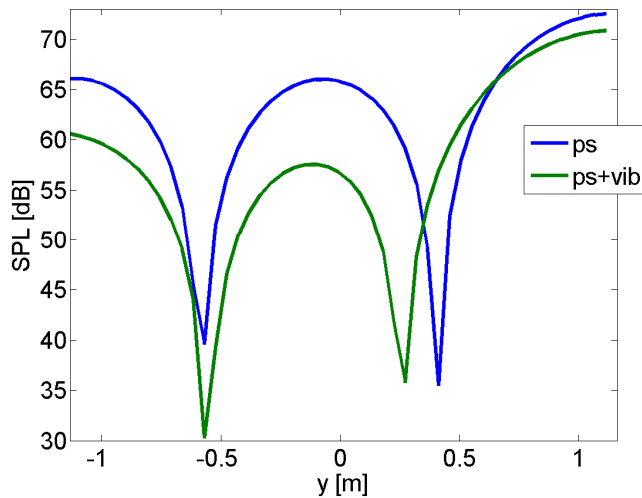
Kun pistelähde ja pinta värähtelevät taajuudella 107 Hz, äänenpainetaso nousee kuljettajan puolella (Kuva 40). Matkustajan puolella pinnan värähtely ei juurikaan vaikuta äänenpainetasoon.

### 3. Tutkittujen veneiden meluominaisuudet



Kuva 40. Äänenpainetaso kuljettajan pään korkeudella kun äänilähteenä on pistelähde (ps) ja värähtelevä pinta + pistelähde (ps + vib) taajuudella 107 Hz.

Taajuudella 176 Hz pinnan värähtely laskee äänenpainetasoa koko tarkasteltavalla matkalla lukuun ottamatta vaimennusminimin siirtymistä (Kuva 41). Pinnan värähtely siirtää matkustajan puolella olevaa minimiä lähemmäksi veneen keskilinjaa, mikä kasvattaa äänenpainetasoa kohdassa, jossa oli äänenpainetason minimikohta pelkän pistelähteen tapauksessa.



Kuva 41. Äänenpainetaso kuljettajan pään korkeudella kun äänilähteenä on pistelähde (ps) ja värähtelevä pinta + pistelähde (ps + vib) taajuudella 176 Hz.

### 3. Tutkittujen veneiden meluominaisuudet

Yhteenvedona pistelähteen ja värähtelevän pinnan yhteisvaikutusten simuloinneista (Kuva 36–Kuva 41) voidaan todeta, että ohjaamon seinäpintojen värähtelyllä on erittäin suuri merkitys ohjaamon äänenpainetasoihin. Ohjaamon äänikenttä syntyy ilmaäänä moottoritilasta ja seinien läpi tulevasta moottorimelusta sekä seinäpintojen värähtelystä. Tällaisen tilanteen mallintaminen vaatii merkittävämpien äänilähteiden selvittämistä mittaamalla eli niiden paikallistamista sekä voimakkuuden ja vaiheistuksen määrittämistä.

## 3.6 Toteutetut meluntorjuntatoimenpiteet

Seuraavassa luvuissa on kuvattu tiivistetysti eri veneille tehdyt meluntorjunnalliset modifikaatiot ja niiden vaikutus sisätilojen melutasoihin.

### 3.6.1 K1-veneen meluntorjuntatoimenpiteet ja niiden vaikutus

#### 3.6.1.1 Moottoritilan absorptioon lisääminen ja ilmaääntä välittävien läpivientien tiivistäminen (modifikaatio 1)

Veneissä tärkeimmät ilmaäänierätykset ovat moottoritilassa sijaitsevat moottori ja perävetolaitteen kilpi, jotka synnyttävät suoraa ilmaääntä moottoritilaan. Tämä etenee primäärinä ilmaäänä moottoritilan läpivientien kautta ohjaamoon ja moottorin imuilmantoaaukkojen kautta veneen ulkopuolelle.

Primäärin ilmaäänen eristäminen moottoritilan ja ohjaamon välillä edellyttää, että moottoritilan ja ohjaamon väliseinän ilmaääntä välittävät aukot tukitaan ja/tai tiivistetään (esim. Kuva 42). Lisäksi moottoritilan melutasoa pitää pyrkiä alentamaan moottoritilan riittäväällä absorptiolla.



Kuva 42. Erään veneen ohjaus- ja säätökaapeleiden läpivientiin käytetyt reiät ohjaamon ja moottoritilan väliseinässä.

K1-mod1-veneessä moottoritilan absorptioon lisääminen (absorptiomateriaalin vaihtaminen ja sen määrän huomattava lisääminen kiinnittämällä absorptiomateriaalikerrokset moottoritilan ja ohjaamon väliseinän lisäksi myös moottoritilan perä- ja sivuseiniin) ja ilmaääntä välittävien läpivientien tiivistäminen pienensivät kuljettajan paikan A-painotettuja melutasoja matkanopeudella tyynessä ajettaessa 2.4–2.6 dB(A) verrattuna referenssiveneen melutasoihin. Absorptioon lisääntymisen vaikutuksesta melutaso moottoritilassa alenee. Myös kaksoiseinäratkaisun ääneneristystä olennaisesti heikentänyt vaikutus moottoritilan ja ohjaamon väliseinässä kaksoiseinäresonanssin taajuudella poistuu (kaksoiseinä-rakenteen vaikutusta ääneneristävyyteen on tarkasteltu yksityiskohtaisemmin liitteessä B).

#### 3.6.1.2 Sisä- ja kansimoduulin paneelien värähtelyjen vaimentaminen (modifikaatio 2)

Toisen vaiheen toimenpiteiden lähtökohtana olivat K1-ref-veneiden värähtelymittausten tulokset sekä havainnot sisä- ja kansimoduulin sivupaneelien ”lepatamisesta” ja kalusteiden paneelipintojen vähäisestä vaimennuksesta. Katon, lattian sekä sivu- ja kalustepaneelien vaimennus arvioitiin riittämättömäksi ja

### 3. Tutkittujen veneiden meluominaisuudet

lisäksi epäiltiin, että paneelipintojen värähtelyt synnyttivät äänensäteilyä ohjaamoon. Olettamuksen todentamiseksi paneelipintojen vaimennusta lisättiin paneelisiin tilapäisesti liimattujen raskasmattojen avulla (esim. Kuva 43). Raskasmattoja lisättiin veneen kattoon, lattiaan ja sivupaneeleihin kerrallaan yhteensä noin 8 m<sup>2</sup>:n verran, mikä vastasi noin 40 kg massan lisäystä ohjaamon rakenteisiin. Suurin vaikutus ohjaamon äänenpainetasoihin ja värähtelytasoon oli raskasmattojen lisäyksellä sivuseiniin, joiden ikkunat ovat kiinni. Sivuseinät ovat isoja, joustavia pintoja, jotka tuottavat ääntä kuljettajan ja matkustajan korvan läheisyydessä.



Kuva 43. K1-mod2, esimerkki paneelipintojen vaimennuksen lisäämisestä keulatilassa. Raskasmattoja on liimattu sisämoduulin lasikuitupaneeleihin.

Modifikaatio 2 sisälsi myös modifikaatio 1:n toimenpiteet. Ohjaamon paneelien vaimentamisen lisävaikutus matkustustilojen melutasoihin oli kuitenkin yllättävän vähäinen verrattuna pelkkään moottoritilan absorption lisäämiseen ja ilmaaäntä välittävien läpivientien tiivistämiseen eli modifikaatio 1:een. Melutason alenemat verrattuna modifikaatio 1:een olivat kaikissa ajotilanteissa alle 1 dB.



#### 3.6.1.3 Ikkunoiden vaimentaminen (modifikaatio 3)

Kolmannen vaiheen toimenpiteiden lähtökohtana olivat modifikaatio 2:n tuloksena saavutetut vaatimattomat melutason alenemat. Lisäksi oli havaittu, että modifikaatio 2:n toimenpiteistä tehokkain oli raskasmattojen lisääminen sivuseiniin, joiden ikkunat ovat kiinni. Radikaalina toimenpiteenä päätettiin kokeilla, miten sivuikkunat vaikuttavat ohjaamon sisälle säteilevään ääneen, ja ne peitettiin raskasmatoilla (Kuva 44).



Kuva 44. K1-mod3, ikkunoiden vaimentamiskokeilu liimaamalla raskasmattoja ikkunoiden sisäpintaan.

Ikkunoiden vaimentaminen alensi matkanopeudella tyynessä ajettaessa sisämelutasoja mittauspisteestä riippuen 0,4–1,6 dB verrattuna modifikaatio 1 (tyynessä ajo) vaihtoehtoon. Ikkunoiden merkitys ohjaamon säteilevän äänen lähteenä on siten varsin merkittävä. Erityisesti kuljettajan oikean korvan puoleisessa mittauspaikassa todettu 1,6 dB:n melutason alenema viittaa ikkunan äänensäteilyn merkittävään vaikutukseen. Ikkunoita ei tietenkään voi poistaa veneestä, mutta huomiota kannattaa ehdottomasti kiinnittää kansimoduulin sivuseiniin, ja lisätä niiden vaimennusta sopivin toimenpitein.

### 3. Tutkittujen veneiden meluominaisuudet

#### 3.6.1.4 Moottorin osakotelointi (modifikaatio 4)

Neljännessä vaiheessa toteutettiin testiveneen moottorin osakotelointi ja kansiluukkujen lisäeristys (Kuva 45). Moottorin ympärille rakennettu osakotelo paransi moottorin ja peräpeilin moottoritilaan säteilemän ilmaääneneristystä ja absorptiota. Huomattakoon, että modifikaatio 4:n testausten yhteydessä tehtiin myös joitain rämisevien osien tiivistyksiä (esim. kattoluukku ja wc:n ovi), mutta raskasmattovaimennusten (modifikaatiot 2 ja 3) vaikutusta ei ole mukana tässä modifikaatiossa.



Kuva 45. K1-mod4, moottorin osakotelointi ja moottoritilan kansiluukkujen lisäeristys.

Moottorin osakoteloinnin lisävaikutus sisämelutasoihin verrattuna pelkkään moottoritilan absorbointiin ja läpivientien tiivistämiseen (mod. 1) oli 0,7–2,2 dB mittauspisteestä riippuen. Lähtötilanteeseen verrattuna (referenssivene) ero oli 3,3–3,5 dB. Huomattakoon kuitenkin, että mittaustulokset eivät ole täysin vertailukelpoiset, koska ajotilanne ei ollut aivan sama kuin aiemmin. Modifikaatio 4:ssä ajettiin kaikissa ajotilanteissa matalassa aallokossa joko myötä- tai vastaaltoon. Aallokon vaikutus alkoi kuulua erityisen selvästi täysnopeusajossa, jolloin vesi-runko-vuorovaikutus nosti melutasoa hyvin selvästi matkanopeudella ajoon verrattuna.

Yleisesti ottaen voidaan todeta, että modifikaatiot 3 ja 4 alensivat sisämelutasoja referenssiveneeseen verrattuna likimain yhtä paljon eli noin 3,5–5 dB hieman mittauspisteestä riippuen.

#### 3.6.2 R1-veneen moottorin akustinen kotelointi ja sen vaikutus

Lähtöolettamuksena oli, että Volvo Penta -moottoreiden tärinäneristys on ainakin etupäästä toteutettu hyvin. Lisäksi oletettiin, että moottori säteilee moottoritalasta ilmaäänenä sisätiloihin kaapeleiden ja letkujen läpivientien (primääri ilmaääni) sekä moottoritalan ja sisätilojen väliseinän (sekundäärinen ilmaääni) kautta (ilmaäänen välittymisen periaate, ks. Kuva 47). Näin ollen oli luontevaa pyrkiä eristämään moottorin ja osin myös peräpeilin äänensäteily jo moottoritalassa, mahdollisimman lähellä melun lähdettä.

R1-ref-veneen tyyppiseen veneeseen (R1-mod1) tehtiin moottorin kotelointi (Kuva 46). Kotelo paransi moottorin ja peräpeilin moottoritalaan säteilemän ilmaäänen eristystä ja absorptiota. Kotelon ilmanvaihtoa tehostettiin lisäämällä siihen poistopuhallin, joka jäähdyttää koteloa moottorin sammuttamisen jälkeen. Kotelo oli tehty vanerista ja sen sisäpinnalle liimatusta absorptiomateriaalista. Koteloon oli muotoiltu meluloukut imuilmalle.



Kuva 46. R1-mod1, moottoritalan kotelointi moottoritalassa. Kuvassa ei näy koteloon kuuluvaa kantta.

### 3. Tutkittujen veneiden meluominaisuudet

Moottorin koteloinnin vaikutus sisämelutasoihin oli 1–6,7 dB mittauspisteestä ja ajotilanteesta riippuen. Huomattakoon tässäkin, että mittaustulokset eivät ole täysin vertailukelpoiset, koska kyseessä ovat eri veneyksilöt. Vasta-aallokkoon ajettaessa aaltoiskujen ja vesi–runko-vuorovaikutuksen melu on voimakkaampaa, jolloin kotelon vaikutus kokonaismelutasoon jää vähäisemmäksi.

#### **3.7 Yhteenveto melutasoista ja saavutetuista melutason alenemista**

Yhteenvedoksi sekä referenssiveneiden että modifioitujen veneiden melutasoista matkustustiloissa on koottu Taulukko 8. Siinä on kuvattuna kunkin venetyypin melutasot matkustamotiloissa (matkustaja, kuljettaja vasen ja kuljettaja oikea) sekä takakannella. Ajotilannevaihtoehtoina ovat matka- ja täysnopeusajo tyynessä tai matalassa aallokossa (enintään 0,15 m:n aallonkorkeus) ja keskiaallokossa (aallonkorkeus 0,15–0,5 m). Huomattakoon, että kaikilla venetyypeillä ei ajettu kaikilla eri ajotilannevaihtoehdoilla.

”Nopeiden” meluntorjuntatoimenpiteiden tuloksena meluisimpien veneiden melutasoa saatiin pienennettyä matkanopeudella tyynessä ajettaessa noin 5 dB lähtötilanteeseen verrattuna, mutta vastaavaa pudotusta ei saatu aikaan aallokkoajossa. Parhaimmillaan yksittäisen venetyypin ohjaamomelun tasoa saatiin pudotettua myös aallokkoajossa runsaat 5 dB koteloidulla moottori akustiseen koteloon.

### 3. Tutkittujen veneiden meluominaisuudet

Taulukko 8. Yhteenveto tutkittujen veneiden melutasoista matkustustiloissa ja takakannella.

Tunnus	Ajonopeus kn	Aallon korkeus m	Melutaso, $L_{pA}$		
			Matkustaja $L_{pA}$ (dB)	Kuljettaja vasen $L_{pA}$ (dB)	Kuljettaja oikea $L_{pA}$ (dB)
K1-ref	25,0	0–0,15	83,6	84,2	84,9
	32,5	0–0,15	84,5	85,2	84,7
K1-mod1	25,0	0,15–0,5	83,9	85,9	86,5
	25,0	0–0,15	80,6	81,6	82,5
	32,5	0–0,15	85,0	85,1	85,4
K1-mod2	25,0	0,15–0,5	82,5	81,5	82,2
	25,0	0–0,15	80,8	81,3	82,0
K1-mod3	25,0	0–0,15	80,2	81,1	80,9
K1-mod4	25,0	0,15–0,5	80,3	80,7	81,5
	32,5	0,15–0,5	83,4	84,4	85,3
K2-ref	23,0	0–0,15	80,6	81,0	82,7
	30,0	0–0,15	81,0	80,5	81,1
R1-ref	24,0	0,15–0,5	76,6	79,0	81,2
	30,0	0,15–0,5	79,0	81,4	81,7
R1-mod1	24,0	0,15–0,5	73,0	72,4	74,5
	30,0	0,15–0,5	76,9	75,3	76,3
R2-ref	30,0	0–0,15	74,3	73,2	74,1
	36,0	0–0,15	80,0	78,5	80,0
R3-ref	30,0	0–0,15	73,4	72,3	74,0
	38,0	0–0,15	76,4	75,3	76,9
	30,0	0,15–0,5	75,9	74,3	75,5
	38,0	0,15–0,5	76,1	76,4	77,5

### 3.8 Äänenlaatu veneiden matkustamotiloissa

Myös ohjaamoäänien häiritsevyys vaihteli tutkituissa veneissä paljon: häiritsevyysindeksi oli hiljaisimmissa veneissä alle puolet siitä mitä meluisimmissa veneissä. Sama koski normaalilla puheen voimakkuudella käytävän keskustelun ymmärrettävyyttä. Meluisimmassa veneessä keskustelu normaalilla puheen voimakkuudella oli käytännössä mahdotonta; hiljaisimmassa veneessä se oli jo lähtötilanteessa tyydyttävällä tasolla. Taulukko 9 esittää yhteenvetona veneiden äänenlaadusta ja puheen ymmärrettävyydestä matkustustiloissa ja takakannella.

### 3. Tutkittujen veneiden meluominaisuudet

Taulukko 9. Yhteenveto tutkittujen veneiden äänenlaadusta matkustustiloissa ja takakan-  
nella ajettaessa tyynessä tai matalassa aallokossa matkanopeudella (äänekkyyden, äänen  
häiritsevyys ja artikulaatioindeksi eli puheen ymmärrettävyys, vertailun vuoksi taulukossa  
on myös A-painotettu äänenpainetaso). Äänen laatua kuvaavien suureiden suhteita ja  
niiden määritelmät on esitetty liitteessä A.

Tunnus	Suure	Yksikkö	Mittaus-/analyysipiste			
			Matkustaja	Kuljettaja vasen	Kuljettaja oikea	Takakansi
K1-ref	A-äänitaso	dB(A)	83,6	84,2	84,9	85,7
	Äänekkyyden	sone	78,3	73,0	75,2	87,2
	Häiritsevyys	au	418	380	390	485
	Puheen ym.	%	13,6	10,9	12,6	3,2
K1-mod1	A-äänitaso	dB(A)	82,5	81,5	82,2	
	Äänekkyyden	sone	70,5	65,3	67,5	
	Häiritsevyys	au	453	403	416	
	Puheen ym.	%	18,0	13,8	14,8	
K1-mod4	A-äänitaso	dB(A)	80,3	80,7	81,5	
	Äänekkyyden	sone	58,7	60,1	62,7	
	Häiritsevyys	au	391	398	412	
	Puheen ym.	%	25,7	19,0	21,3	
K2-ref	A-äänitaso	dB(A)	80,6	81,0	82,7	91,7
	Äänekkyyden	sone	65,2	57,1	62,2	118,5
	Häiritsevyys	au	352	249	301	793
	Puheen ym.	%	30,7	25,0	26,8	0
R1-ref	A-äänitaso	dB(A)	76,6	79,0	81,2	
	Äänekkyyden	sone	47,5	57,0	63,4	
	Häiritsevyys	au	238	291	329	
	Puheen ym.	%	43,0	32,4	33,0	
R1-mod1	A-äänitaso	dB(A)	73,0	72,4	74,5	
	Äänekkyyden	sone	38,8	36,5	40,5	
	Häiritsevyys	au	181	144	219	
	Puheen ym.	%	53,0	47,4	48,9	
R2-ref	A-äänitaso	dB(A)	74,3	73,2	74,1	85,8
	Äänekkyyden	sone	42,8	39,3	40,7	92,1
	Häiritsevyys	au	212	190	135	470
	Puheen ym.	%	45,9	44,1	45,1	0,4
R3-ref	A-äänitaso	dB(A)	73,4	72,3	74,0	86,8
	Äänekkyyden	sone	39,4	35,1	37,4	87,9
	Häiritsevyys	au	111	149	182	443
	Puheen ym.	%	59,4	57,2	56,9	0,2

Huomattakoon, että taulukon suureista A-äänitaso, äänekkyys ja häiritsevyys ovat sitä parempia, mitä pienempi lukuarvo on. Puheen ymmärrettävyys puolestaan on sitä parempi, mitä lähempänä arvo on sataa prosenttia (eli mitä suurempi lukuarvo on). Yksittäisen venetyypin ohjaamoäänien häiritsevyyttä onnistuttiin vähentämään meluntorjuntatoimenpitein parhaimmillaan kolmanneksella ja puheen ymmärrettävyyttä parhaimmillaan heikohkosta välttäväksi.

## 3.9 Yhteenveto herätteiden merkityksestä eri venetyypeissä

Yleisenä havaintona voidaan todeta, että kevyimpien venetyyppien runko-, sisä- ja kansimoduulien värähtelynvaimennusominaisuudet ovat varsin vaatimattomat. Veneen keveys ja valmistustekniikka (ruiskulaminointi) johtavat yhdessä siihen, että värähtelyt eivät juurikaan vaimene runkomoduulissa vaan etenevät lähes sellaisenaan sisä- ja kansimoduuliin. Raskaissa venetyypeissä veneen massa on niin suuri, että rungon värähtelyjen herättämiseen tarvitaan enemmän värähtelyenergiaa. Myös lujitemuovisten moduulien valmistustekniikka (käsini laminointi) edesauttaa sitä, että runkomoduulin värähtelyt heräävät ja siirtyvät huomattavasti runkomoduulista sisä- ja kansimoduuleihin.

Kevyimmissä veneissä moottori-perävetolaite-yhdistelmän runkomoduulit synnyttävät runkovärähtelyjä, joihin vesi-runko-vuorovaikutus (aaltoiskujen vaikutus) summautuu erittäin monimutkaiseksi, kohinatyyppiseksi värähtelyjakaumaksi jo matalassa aallokossa ajettaessa. Runkomoduulista värähtely siirtyy sisämoduuliin ja kansimoduuliin jäykkien kiinnitysten ja huonosti vaimentavien lujitemuovielementtien välityksellä. Viime kädessä värähtelyt siirtyvät kansimoduulin levy pintoihin ja kansimoduulin ikkunoihin sekä matkustustilojen kalusteisiin, jotka säteilevät värähtelyn ilmäneiksi ohjaamoon.

Raskaammissa veneissä moottori-perävetolaite-yhdistelmän runkomoduuliin synnyttämät runkovärähtelyt eivät summaudu aaltoiskujen vaikutukseen vielä keskiaallokossa ajettaessa. Korkeassa aallokossa ajettaessa näin sen sijaan tapahtuu, ja tuloksena on kansimoduulin ja kalusteiden paneelipintoihin siirtyvä värähtely, joka säteilee värähtelyn ilmäneiksi ohjaamoon.

### 3.9.1 Moottori-perävetolaite

Kaikissa tutkituissa veneissä tärkein herätekokonaisuus matkustustilojen meluominaisuuksien kannalta oli tyynessä ajettaessa moottori-perävetolaite-yhd-

### 3. Tutkittujen veneiden meluominaisuudet

telmä. Lähes kaikki matkustustilojen korkeimmat erillistaajuiset komponentit (spektriipiikit) voitiin yhdistää moottorin tai perävetolaitteen johonkin herätekokonaisuuteen. Tärkeimmät herätekokonaisuudet olivat moottori (ilmääniheräte moottoritilaan palotaaajuudella ja sen toisella kerrannaisella), perävetolaitteen yläpään vaihde (hammasvälityksen ryntötaajuinen runkoääniheräte erityisesti K2-ref, R1-ref ja R2-mod1-veneissä), kilven kautta moottoritilaan tuleva ilmääniheräte sekä kolme- ja nelilapaisen potkurin lapotaaajuudet (runkoääniheräte, mahdollisesti myös veden kautta runkoon kohdistuva heräte).

Moottori-perävetolaite-yhdistelmän merkitys sisätiloihin etenevän ilmaäänien sekä runkovärähtelyjen välityksellä etenevän runkoääneen synnyssä on ratkaiseva. Moottori-perävetolaite-yhdistelmän osuus ilma- ja runkoääniherätteisestä matkustustilojen melusta jäi kuitenkin jossain määrin epäselviksi. Ehdotuksissa on painauduttu molempiin, mutta ensisijaisesti nopeasti toteutettaviin toimenpiteisiin ilmääniherätteen melun vaimentamiseksi ja eristämiseksi ohjaamosta tai matkustamosta. Jatkotoimenpide-ehdotuksissa on mukana myös runkovärähtelyjen ja runkoäänien ohjaamoon tai matkustamoon säteilevän äänen vaimentaminen.

Moottorin koteloinnin ja osakoteloinnin vaikutus sisämelutasoihin (verrattuna vastaavaan veneyksilöön, jonka moottori oli koteloimaton) oli 1–7 dB venetyypistä, ajotilanteesta ja mittauspisteestä riippuen. Huomattakoon kuitenkin, että mittaukset eivät ole täysin vertailukelpoiset, koska ne on mitattu eri veneyksilöistä. Vasta-aallokkoon ajettaessa aaltoiskujen ja vesi-runko-vuorovaikutuksen aiheuttama melu on voimakkaampaa, ja tällöin moottorikotelon vaikutus kokonaismelutason alenemaan on pienempi kuin tyynessä ajettaessa.

#### 3.9.2 Vesi-runko-vuorovaikutus

Vesi-runko-vuorovaikutus on merkittävä herätekokonaisuus kevyimmissä veneissä jo matalassa aallokossa ajettaessa. Kuten jo todettiin, vesi-runko-vuorovaikutus eli aaltoiskujen aiheuttama heräte summautuu moottori-perävetolaite-yhdistelmän aiheuttamiin runkovärähtelyihin erittäin monimutkaiseksi kohinatyyppiseksi värähtelyjakaumaksi.

Vesi-runko-vuorovaikutuksen matkustustilojen melua lisäävä vaikutus näkyy hyvin selvänä, kun verrataan melutasoja ja spektrejä ajettaessa kevyimmällä veneellä tyynessä ja aallokossa (Kuva 7). Vaikka A-painotettujen melutasojen ero ei ole kovin suuri (alle 1,5 dB), spektrikuviissa näkyy selvästi, että kohinatyyppinen melu lisääntyy huomattavasti tyynessä mitattua tasoa suurem-



maksi koko taajuusalueella – moottori–perävetolaite-yhdistelmän erillistaajuisia spektriipukkeja lukuun ottamatta.

Vesi–runko-vuorovaikutuksella on lisäksi äänenlaatuun vaikuttava erityispiirre. Vaikka melutasoa saadaan alennettua aallokkoajossakin moottorin ja perävetolaitteen erillistaajuisia komponentteja vaimentamalla (moottoritilan absorptiota ja matkustustilojen välistä ääneneristystä parantamalla), matkustustilojen äänenlaatuominaisuudet eivät välttämättä parannu kovin paljon. Spektrin painopiste nimittäin siirtyy aaltoiskujen vaikutuksesta suuremmille taajuuksille, mikä puolestaan lisää melun häiritsevyyttä.

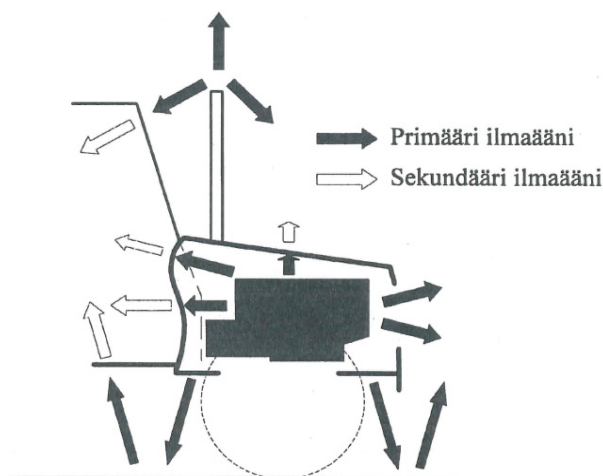
## 4. Johtopäätökset ja jatkotutkimustarpeet

### 4.1 Moottoritilan ilmaäänien absorptio ja eristäminen

Pinnan värähtely (esim. moottorin pinta) synnyttää suoraan ilmaääntä ympäröivään tilaan. Ilmaääni voi edetä joko primäärinä tai sekundäärisenä ilmaääninä herättämällä välittävän rakenteen värähtelyn vastaanottavan tilan (matkustamo) meluksi (Kuva 47).

Veneissä tärkeimmät ilmaääniherätteet ovat moottoritilassa olevat moottori ja perävetolaitteen kilpi, jotka synnyttävät suoraa ilmaääntä moottoritilaan. Melu etenee primäärinä ilmaääninä moottoritilan läpivientien kautta ohjaamoon ja moottorin imuilmanottoaukkojen kautta veneen ulkopuolelle. Sekundäärisen ilmaäänien tärkein reitti ohjaamoon on moottoritilan ja ohjaamon välinen seinäpinta.

Tehokkaimmalta vaikuttava meluntorjuntatoimenpide tutkituissa veneissä oli moottorin akustinen osa- tai kokonaiskotelointi. Kotelon avulla voidaan vaikuttaa moottoritilaan syntyvän ilmaäänien herätteisiin. Erityisesti moottorin ja perävetolaitteen kilven synnyttämä ilmaääni jää tällöin akustisen kotelon sisään, jolloin moottoritilan absorptio sekä moottoritilan ja ohjaamon väliseinän ääneneristyksen merkitys ohjaamomeluun vähenee olennaisesti. Haasteina koteloinnissa ovat kotelon avattavuus (huoltotoimenpiteitä varten) ja moottorin riittävän jäähdytysilman varmistaminen. Moottorin jäähdytys edellyttää pakotettua jäähdytysilman kiertoa kotelon sisällä. Pakotetun jäähdytyksen on toimittava riittävän pitkään myös moottorin pysäyttämisen jälkeen.



Kuva 47. Periaatekuva ilmaäänen etenemisestä moottoritilasta ohjaamoon eri reittejä pitkin<sup>3</sup>.

Mikäli moottoria ei haluta koteloida kokonaisuudessaan, vaihtoehtoina ovat ”sivuseinäkotelot” moottorin sivuilla, huolellinen läpivientien tiivistäminen moottoritilan ja ohjaamon välillä, riittävä absorptio moottoritilassa, moottoritilan ja ohjaamon väliseinän erittäin hyvä ääneneristys myös pienillä taajuuksilla (moottorin herätetaajuuksilla) ja moottorin imuilmakanavien kunnollinen meluloukutus.

Primäärin ilmaäänen eristäminen moottoritilan ja ohjaamon välillä edellyttää ensimmäisenä toimenpiteenä moottoritilan ja ohjaamon väliseinän ilmaääntä välittävien aukkojen tukkimisen ja/tai tiivistämisen (ks. Kuva 42).

Toiseksi tulee pyrkiä alentamaan moottoritilan melutasoa moottoritilan riittäväällä absorptiolla. Moottoritilan pintojen mahdollisimman täydellinen absorbointi mahdollisimman paksulla (tai muuten tehokkaalla) absorptiomateriaalilla vähentää tehokkaimmin moottoritilan melua.

Kolmas merkittävä reitti ilmaäänen siirtymisessä moottoritilasta ohjaamoon on sekundäärinen ilmaääni moottoritilan ja ohjaamon väliseinän kautta. HILVE-projektissa mukana olleiden valmistajien huviveneissä käyttämä ratkaisu oli äänen absorption ja ääneneristykseen yhdistelmä materiaali, joka liimataan moottoritilan ja ohjaamon väliseinään. Monikerroksinen materiaali edellyttää kuitenkin raken-

<sup>3</sup> Tanttari, J. & Saarinen, K., Työkoneiden melun vähentäminen – perusteet. Metalliteollisuuden Keskusliitto, MET, Tekninen tiedotus 4 • 95. Helsinki 1995. 124 s.

#### 4. Johtopäätökset ja jatkotutkimustarpeet

teen kokonaisuuden oikeaa mitoittamista, ja usein on suotavampaa käyttää pelkkää absorptiomateriaalia moottoritilassa. Tämä ei silti aina ole paras vaihtoehto. Siksi HILVE-projektissa tehtiin erälle paneeli-ääneneristysmateriaaliyhdistelmille laboratoriotutkimus, jonka yhteenvedona on Kuva 48. Siinä on verrattu erään venevalmistajan moottoritilan ja ohjaamon väliseinänä käyttämän lasikuitu-balsalasukuitu-paneelin ilmaääneneristävyyttä, kun paneeliin on liimattu äänilähteen (moottoritilan) puolelle erilaisia ääneneristys- ja vaimennusmateriaaleja.

Referenssipaneelina on lasikuitu-balsalasukuitu-*sandwich*-paneeli (jatkossa *balsapaneeli*). Testissä käytetyn paneelin (noin 1 x 1 m) alin kuvassa näkyvä ominaistajuus on 160 Hz:n terssikaistalla ja koinssidenssikuoppa vähän 1 000 Hz:n yläpuolella.

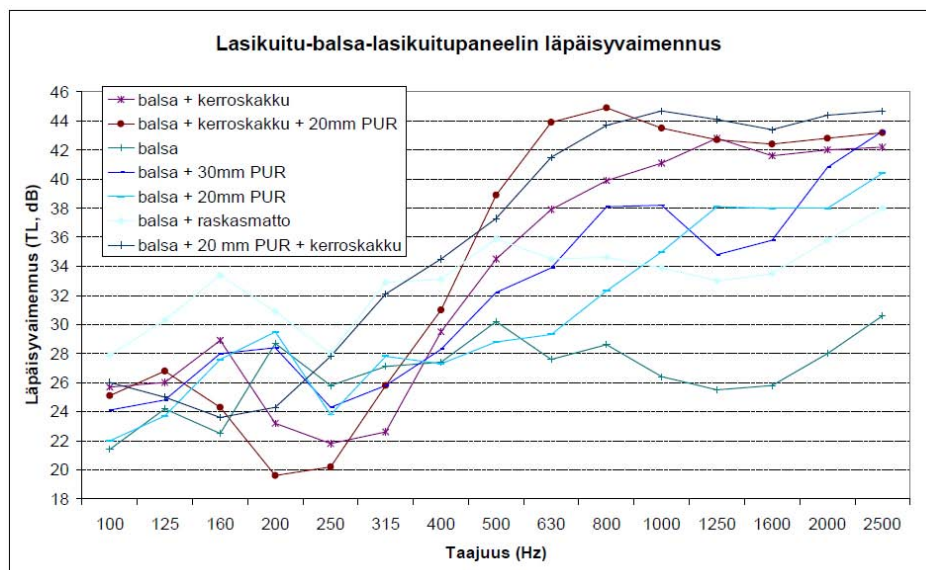
Balsapaneelin ja siihen liimatun monikerrosmateriaalin ääneneristävyyttä on kuvattu käyrällä ”balsa + kerroskakku”. Se parantaa ääneneristävyyttä pienillä taajuuksilla pelkkään balsapaneeliin verrattuna mutta huonontaa ääneneristävyyttä kaksoiseinäresonanssin alueella 200–350 Hz. Tämän jälkeen sen ääneneristävyys on olennaisesti parempi kuin pelkän balsapaneelin, parhaimmillaan 15 dB parempi.

Vaihtoehtoinen, pelkän absorptiomateriaalin käyttöön perustuva ratkaisu on kuvattu käyrällä ”balsa + 30 mm PUR” (PUR 30 on 30 mm paksu, muovikalvo-pinnoitteinen kierrätysmateriaalista valmistettu absorptiomateriaali), ja myös se huonontaa ääneneristävyyttä hieman 200–350 Hz:n taajuusalueella, kuitenkin vähemmän kuin ”balsa + kerroskakku”. Toisaalta sen ääneneristystä parantava vaikutus suuremmilla taajuuksilla on huonompi kuin ”balsa + kerroskakku” -yhdistelmän.

”Balsa + 20 mm PUR” käyttäytyy samoin kuin ”balsa + 30 mm PUR”, mutta ääneneristävyys keskitaajuuksilla on huonompi. ”Balsa + 20 mm PUR + kerroskakku” käyttäytyy kuten pitääkin, eli kaksoiseinäresonanssin taajuusalue siirtyy pienemmille taajuuksille. Suuremmilla taajuuksilla se on paras yhdessä ”balsa + kerroskakku + 20 mm PUR:n” kanssa.

”Balsa + kerroskakku + 20 mm PUR” käyttäytyy hieman erikoisesti: kaksoiseinäresonanssin taajuusalue siirtyy pienemmille taajuuksille (mutta kuoppa myös syvenee), mutta suuremmilla taajuuksilla se on paras yhdessä ”balsa + 20 mm PUR + kerroskakku” -materiaalirakenteen kanssa.

”Balsa + raskasmatto” on paras ääneneristysyhdistelmä alle 250 Hz:n taajuuksilla, mutta yli 500 Hz:n taajuuksilla kerrosrakenteet ovat parempia ja suurilla taajuuksilla myös pelkät absorptiomateriaalit.



Kuva 48. Veneen moottoritilan ja ohjaamon väliseinänä käytetyn lasikuitu–balsa–lasikuitu-paneelin ilmapääneneristävyys (= läpäisyvaimennus), kun paneeliin on äänilähteen (moottoritilan) puolelle liimattu erilaisia ääneneristys- ja vaimennusmateriaaleja.

## 4.2 Ilmaääneneristäminen ja absorption riittävyyden varmistaminen

- a) Moottorin kotelointi (täydellinen tai osakotelo): vähintään 12 mm vanerista tehty akustinen (osa)kotelo avattavalla kannella + 20 mm absorbentti kotelon seinien sisäpuolelle + absorboitu imuilman ottokanava + pakotettu jäähdytys jäähdytyspuhaltimella.
- b) Läpivientien tiivistys: kaikki moottoritilan ja matkustustilojen väliset putki- ja kaapeliläpiviennit on tiivistettävä erittäin huolellisesti.
- c) Moottoritilan absorptiomateriaalien riittävyyden varmistaminen: vähintään 30–40 mm paksu absorptiomateriaali moottoritilan kaikkiin mahdollisiin pintoihin.
- d) Ääneneristys ja absorptiomateriaaliratkaisujen mallinnus ja optimointi: erityisesti ratkaisujen ”materiaalitekkinen” kokonaisvaikutus: hinta, paino, valmistustekniikka, ääneneristyskyky, äänen absorptiokyky, värähtelyjen vaimennuskyky (edellyttää yksityiskohtaista jatkopohdintaa kunkin venetyypin erityispiirteiden tunnistamiseksi).
- e) Optimoitujen hybridimateriaalien kehittäminen ilmapääneneristys- ja ilmaääneneristysratkaisuihin: monikerrosmateriaalit, ”resonaattorimateriaalit”, mikrorei’itetyt materiaalit yms. (edellyttää jatkotutkimushanketta).

### 4.3 Runkovärähtelyjen ja -äänen vaimentaminen ja eristäminen, paneelien äänensäteilyn vähentäminen

- a) Ruiskutettavan värähtelynvaimennusmateriaalin (esim. Noxudol) lisääminen: peräpeilin ja runkomoduulin isojen levypintojen käsittely (erityisesti aaltoiskujen vaikutusalueiden käsittely).
- b) Runko- ja sisämoduulin ja/tai runko- ja kansimoduulin välisten kiinnitysten optimointi: kiinnitysten muuttaminen joustaviksi ja runkoäänen siirtymistä eristäviksi (edellyttää yksityiskohtaista jatkopohdintaa kunkin venetyypin erityispiirteiden tunnistamiseksi).
- c) Selvitys nousulistojen vaikutuksesta aaltoiskujen synnyttämään runko- ja sisämoduulin värähtelyyn/äänensäteilyyn, nousulistojen modifiointi ja/tai runkomoduulin jäykisteiden akustinen katkaisu: edellyttää yksityiskohtaista jatkopohdintaa kunkin venetyypin erityispiirteiden tunnistamiseksi.
- d) Mahdolliset vaihtoehtoiset ratkaisut hyvää vaimennusta vaativissa rakenteissa: raskasmattomateriaalin laminointi lujitemuovielementtien pintaan ja/tai lasikuitu-muovinen hunajakennoydin-lasikuitu-paneelityypin käyttäminen sisä- ja kansimoduuleiden paneelirakenteina (edellyttää yksityiskohtaista jatkopohdintaa kunkin venetyypin erityispiirteiden tunnistamiseksi).
- e) Moottorin ja perävetolaitteen eristäminen peräpeilistä: joustavan (värähtelyjä eristävän) materiaalin käyttö kilven ja peräpeilin välissä (edellyttää jatkotutkimushanketta).
- f) Runko- ja sisämoduulin värähtelymuotoanalyysi, värähtelynvaimennusratkaisujen mallinnus ja optimointi: anturointi tehtaalla, mittaus sekä maalla että vedessä, mallinnus ja simuloinnit erityisesti ratkaisujen kokonaisvaikutuksen optimoimiseksi (hinta, paino, valmistustekniikka, ääneneristyskyky, äänen absorptiokyky, värähtelyjen vaimennuskyky, edellyttää jatkotutkimushanketta).

### 4.4 Mallinnuksen käyttö veneen ohjaamon melun alentamiseen

Veneen ohjaamon akustinen mallinnus on mahdollista tehdä kaupallisilla ohjelmistoilla. Akustisen mallin tuloksia pystytään parantamaan, mikäli veneen ohjaamon geometria saadaan tarkasti tehtyä eli jos esimerkiksi ohjaamosta tehdään 3D CAD -piirustukset. Tässä projektissa ohjaamosta oli käytettävissä vain 2D-piirustuksia, joten useita ohjaamon geometrian yksityiskohtia jäi mallista pois.

Malli on kuitenkin jollain tasolla käyttökelpoinen matalilla taajuuksilla, koska taajuuksien 100 ja 200 Hz mittaus- ja mallinnustulokset korreloivat.

Mallin avulla laskettiin ohjaamon ominaistajuudet. Ohjaamon ominaistajuuksien selvittäminen on tärkeää, koska niiden vaikutus voi olla suuri, mikäli esimerkiksi moottorimelusta löytyvät samat taajuudet. Ajatellaan seuraavanlaista tilannetta: Moottorista tiedetään sen pyörimistaajuudet, ja niistä saadaan lasketua vastaavat aallonpituudet. Vertaamalla ominaistajuuksien aallonpituuksia ohjaamon mittoihin, voidaan ominaistajuuksien vaikutusta arvioida. Mikäli aallonpituudet täsmäävät ohjaamon mittoihin, se tarkoittaa, että ohjaamo korostaa näitä taajuuksia. Muuttamalla ohjaamon mittoja tai käyttämällä moottoria, jonka pyörimistaajuudet eivät täsmää ohjaamon ominaistajuuksiin, ominaistajuuksien vaikutusta saadaan pienennettyä.

Mallintamalla pystytään selvittämään erilaisten materiaalien toimivuus ohjaamomelun alentamisessa. Mallinnusta varten materiaaleista tarvitaan niiden akustinen impedanssi, joka pystytään mittaamaan impedanssiputkella. Tämän jälkeen mallin pinnoille annetaan reuna-ehdot, jotka kuvaavat niiden pinnoilla olevaa materiaalia. Vertaamalla eri materiaalien mallinnustuloksia halutuissa paikoissa saadaan selville paras vaihtoehto. Tulokset on kuitenkin muistettava testata kokeellisesti.

Myös pintojen värähtelyn vaikutusta ohjaamon äänenpainetasoihin pystytään simuloimaan. Ohjaamon pinnoille voidaan antaa värähtelynopeuksia ja laskea niiden synnyttämä äänikenttä ohjaamossa. Tällä tavoin on mahdollista selvittää, mitkä pinnat vaikuttavat äänenpainetasoihin eniten.

Mallinnuksesta saadaan suurin hyöty yhdistämällä mittaukset ja mallintaminen. Mitataan esimerkiksi ohjaamon seinien värähtelyä, mallinnetaan seinäpintojen synnyttämä äänenpainetaso ohjaamossa ja tarkastellaan sitä halutuissa kohdissa.

Saatujen tulosten perusteella voidaan todeta, että veneen ohjaamon akustinen mallinnus onnistuu jo olemassa olevilla kaupallisilla ohjelmistoilla. Mallinnusta varten tarvitaan veneen ohjaamon 3D CAD -malli, jolloin mallinusegeometrian luominen onnistuu helpoimmin ja geometriasta tulee mahdollisimman tarkka. Tuloksia voidaan hyödyntää esimerkiksi seuraavalla tavalla: Laskentaan erikoistunut taho tekee mallinnuksen veneveistämön toimittaman veneen ohjaamon 3D-geometriaan. Veistämö toimittaa tiedot käytettävissä olevista vaimennusmateriaaleista sekä paikat ja pinta-alat, joihin materiaaleja voidaan asentaa. Tämän jälkeen selvitetään simuloimalla optimaaliset materiaalit ja niiden paikat ja minimoidaan samalla niin materiaali- kuin työstökustannukset.





## Liite A: Äänenlaatuanalyseissä käytettyjen suureiden kuvaukset

Äänenlaatuanalyseissa käytetyt suureet ja mittauspisteet, on esitetty esimerkinomaisesti K1-referenssiveneelle tehdystä mittauksesta seuraavassa taulukossa. Varsinaisten äänenlaatusuureiden taulukkoon on lisätty vertailun vuoksi myös mitattu A-painotettu dB-taso. Äänekkyyssuureiden määritelmät on koottu pääosin teoksesta *Kommunikaatioakustiikka*<sup>4</sup>.

A1. K1-veneen äänenlaatuanalyysin tulokset.

Äänen laatua kuvaava suure	Matkustaja	Kuljettaja vasen	Kuljettaja oikea	Takakansi	Yksikkö
A-painotettu äänenpainetaso	83,6	84,2	84,9	85,7	dB
Äänekkyyys ( <i>loudness</i> )	78,3	72,95	75,2	87,18	sone
Äänekkyyys 10 % ( <i>loudness 10 %</i> )	85,54	79,11	81,8	93,38	sone
Äänen terävyys ( <i>sharpness</i> )	0,76	0,84	0,80	1,06	acum
Vaihteluvoimakkuus ( <i>fluctuation strength</i> )	1,33	1,23	1,22	1,01	vacil
Äänen karheus ( <i>roughness</i> )	5,04	4,71	4,74	3,74	asper
Tonaalisuus ( <i>tonality</i> )	0,03	0,14	0	0,33	tu
Äänen häiritsevyys ( <i>unbiased annoyance</i> )	417,61	380,12	390,23	485,05	au
Äänen miellyttävyys ( <i>sensory pleasantness</i> )	0	0	0	0	pu
Artikulaatioindeksi ( <i>articulation index, NVH</i> )	13,61	10,92	12,55	3,21	%

---

<sup>4</sup> Karjalainen, M., *Kommunikaatioakustiikka*. Teknillinen korkeakoulu, Akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratorio. Raportti 61. Espoo 1999. 237 s.

A-painotettu äänenpainetaso kuvaa A-suodattimella painotettua fysikaalista äänenpainetta mittauspisteessä. A-suodattimella vaimennetaan pieniä ja suuria taajuuksia (alle 1 000 ja yli 6000 Hz:n ääniä) ja korostetaan hieman tällä taajuusvälillä olevia ääniä (+ 1,3 dB maksimissaan 2 500 Hz:llä), jotta saataisiin likimain ihmisen ääniaistimusta vastaava lukema, kun kuulokynnyksen tasoksi on määritetty 0 dB re 20 µPa 1 000 Hz:n taajuudella.

Äänekkyys (*loudness*) on subjektiivisesti koettua äänenvoimakkuutta kuvaava suure. Äänekkyysaistimuksen muodostuminen on suhteellisen monimutkainen mutta kuitenkin johdonmukaisesti käyttäytyvä ilmiö. Tässä raportissa äänekkyyttä on käytetty A-painotetun äänenpainetason tapaan kuvaamaan kuljettajan ja matkustajan ääniaistimuksen voimakkuutta. Äänekkyys 10 % (*loudness* 10%) kuvaa äänenvoimakkuutta, joka ylitetään 10 % mitatusta ajasta.

Äänen terävyys (*sharpness*) korreloi äänispektrin painottumiseen taajuusasteikolla siten, että äänen terävyys kasvaa painopisteen siirtyessä taajuusasteikolla suurempiin taajuuksiin. Äänen vaihteluvoimakkuus (*fluctuation strength*) kuvaa äänen amplitudi- tai taajuusmodulaation voimakkuutta.

Äänen karheus (*roughness*) liittyy äänen nopeahkoihin amplitudimodulaatioihin. Esimerkiksi kapeakaistainen kohina kuulostaa aina jossain määrin karhealta, koska sen amplituditaso vaihtelee satunnaisesti. Tonaalisuus (*tonality*) tarkoittaa suurin piirtein samaa kuin äänen soinnillisuus laajahkossa mielessä. Tonaalisessa äänessä on yksi tai useampia kapeakaistaisia komponentteja, joista voi erottaa perustaajuuden tai soinnillisen osakokonaisuuden.

Äänen häiritsevyys (*unbiased annoyance*) kuvaa sitä, kuinka häiritseväksi (epämiellyttäväksi) kuulija kokee kuulemansa äänen. Tämä riippuu pääasiassa äänekkyudesta (äänekkyys, joka ylitetään 10 % tarkastelujaksone aikana) sekä äänen terävyydestä ja vaihteluvoimakkuudesta. Mitä suurempi lukema on, sitä epämiellyttävämmältä ääni kuulostaa.

Äänen sensorinen miellyttävyys (*sensory pleasantness*) riippuu edellä kuvatuista suureista eli äänen karheudesta, terävyydestä, tonaalisuudesta ja äänekkyudesta. Kaikkien muiden paitsi tonaalisuuden lisääntyminen vähentää sensorista miellyttävyyttä. Mitä suurempi lukema on, sitä miellyttävämpänä ääni koetaan.

Artikulaatioindeksi (*articulation index, NVH*) on käsite, jonka avulla ääniteiden ja äänneyhdistelmien tunnistettavuudelle saadaan puheen ymmärrettävyyteen liittyvä mittasuure. Tässä raportissa puheen ymmärrettävyyden mittana käytetään autoteollisuudessa kehitettyä mittasuureta *articulation index*, NVH. Mitä lähempänä lukema on 100 %:a, sitä parempi on puheen ymmärrettävyys ko. kuulijan paikalla.

## Liite B: Kaksoiseinärakenteen ääneneristys

Paneelien ääneneristystestauksen lähtökohtana oli sisäperämoottoriveneen moottoritilan ja ohjaamon välisen seinän ääneneristävyden tarkastelu. Tyypillinen väliseinärakenne on koostumukseltaan lasikuitu (kuorikerros) – balsa (ydinkerros) – lasikuitu (kuorikerros). Tätä käytettiin myös lähtötilanteen ääneneristysratkaisuna.

Suomalaisiin veneisiin on tyypillisesti kiinnitetty väliseinän moottoritilan puoleiseen pintaan äänen absorptioon ja ääneneristyksen yhdistelmämateriali, joka tekee rakenteesta kaksoiseinäperiaatteella toimivan ääneneristysratkaisun. Kaksoiseinärakenteen käytön haasteena on kuitenkin rakenteeseen muodostuva kaksoiseinäresonanssi, jonka ympäristössä (taajuusalueella) rakenteen ääneneristys on huonompi kuin jos pelkkä perusrakenne toimisi yksikerrosseinänä (kuva B1).

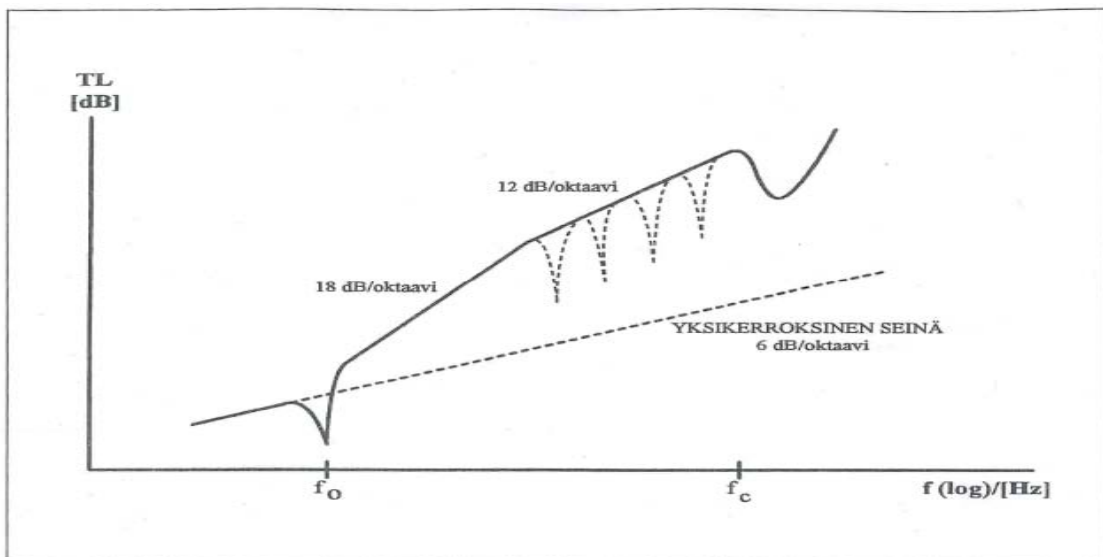
Ääneneristävyden minimi on kaksoiseinäresonanssin kohdalla, jossa on kahden massan (seinät) ja jousen (ilmatila) muodostama värähtelysystemi. Kaksoiseinäresonanssin taajuus ( $f_0$ ) lasketaan kaavalla<sup>5</sup>

$$f_0 = K \sqrt{\frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2 d}}$$

jossa  $m_1$  ja  $m_2$  ovat seinien pinta-alamassat;  $d$  on seinien väli;  $K$  on 60, jos seinien välissä ei ole absorptiomateriaalia, ja 43–50, jos välissä absorptiomateriaalia.

---

<sup>5</sup> Tanttari, J. & Saarinen, K., *Työkoneiden melun vähentäminen – perusteet*. Metalliteollisuuden Keskusliitto, MET, Tekninen tiedotus 4 • 95. Helsinki 1995. 124 s.



Kuva B1. Yksikerroksisen seinärakenteen (katkoviiva) ja kaksoisseinärakenteen (ehyt viiva) ääneneristävyyden periaatekuva<sup>5</sup>.

Esimerkkeinä käytetyssä lasikuitu–balsa–lasikuitu-tilanteessa seinän pinta-alamassa on  $15 \text{ kg/m}^2$  ja ääneneristysmateriaalien raskakerroksen  $2,7 \text{ kg/m}^2$  (näyte A1 kuvassa B.2) tai  $3,7 \text{ kg/m}^2$  (näyte B1 kuvassa B.2).

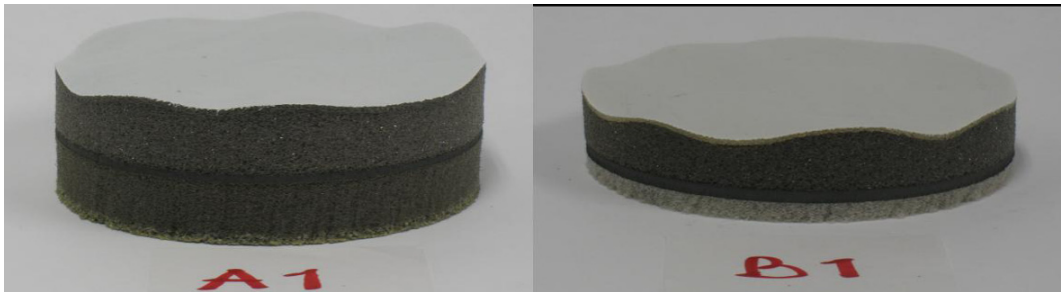
Näyte A1:

$$f_0 = 43 \times [(15 + 2,7)/(15 \times 2,7 \times 0,03)]^{1/2} = 164 \text{ Hz}$$

Näyte B1:

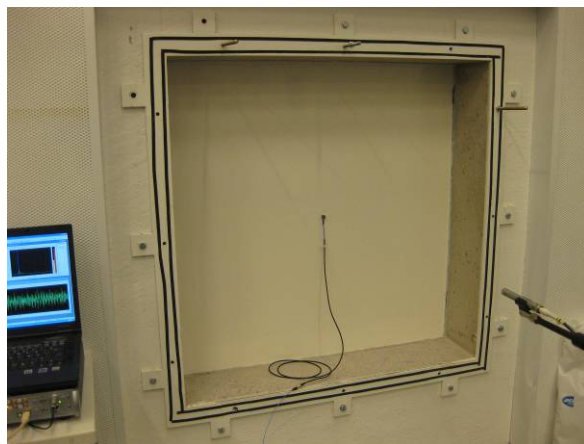
$$f_0 = 43 \times [(15 + 3,7)/(15 \times 3,7 \times 0,005)]^{1/2} = 353 \text{ Hz}$$

Näin laskettu kaksoisseinäresonanssi (ääneneristysten heikentyminen yksikerroksiseen seinään verrattuna) sattuu taajuusalueelle, jolla on moottorin synnyttämiä voimakkaita melun taajuuspiikkejä moottoritilassa (esim. Kuva 7).



Kuva B2. Veneiden ääneneristuksen/absorption kerrosmateriaalit. Molemmissa materiaaleissa on kahden ääntä absorboivan kerroksen välissä raskaskerros. Yksikerroksiseen seinään kiinnitettyä materiaali tekee seinärakenteesta kaksoisseinärakenteen.

Ääneneristystestaukset tehtiin intensiteettimenetelmällä. Lähetyshuoneena oli Tampereen VTT-talon kaiuntahuone, jonka seinässä olevaan 1 m x 1 m -kokoiseen aukkoon testattava paneeli kiinnitettiin (Kuva B3). Intensiteettimenetelmässä lähdehuoneeseen luodaan diffuusi äänikenttä, joka herättää tutkittavan paneelin värähtelyn. Paneelin äänensäteily (ääniteho) mitataan vastaanottohuoneen puolelta äänen intensiteetin mittalaitteella.



Kuva B3. Ääneneristysmittauksessa käytetty kaiuntahuoneen aukko, johon testipaneeli on kiinnitetty (kuvattuna vastaanottohuoneen puolelta).

## Liite B: Kaksoiseinärakenteen ääneneristys

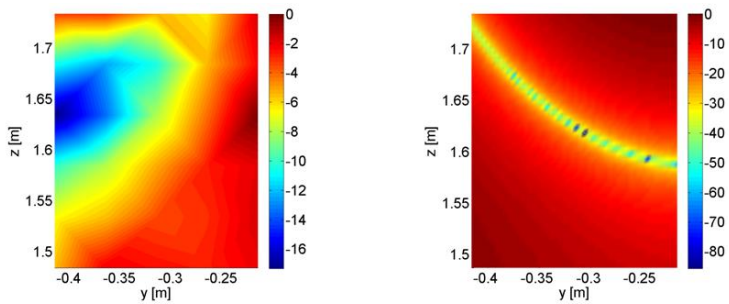
Tutkittavan näytteen (*intensity sound reduction index*)  $R_I$  (käytetään myös merkintää TL = *transmission loss*) lasketaan kaavalla (ISO 15186-1, 2000)

$$R_I = L_{p1} - 6 - \left[ L_{In} + 10 \lg \left( \frac{S_M}{S} \right) \right] \text{dB}$$

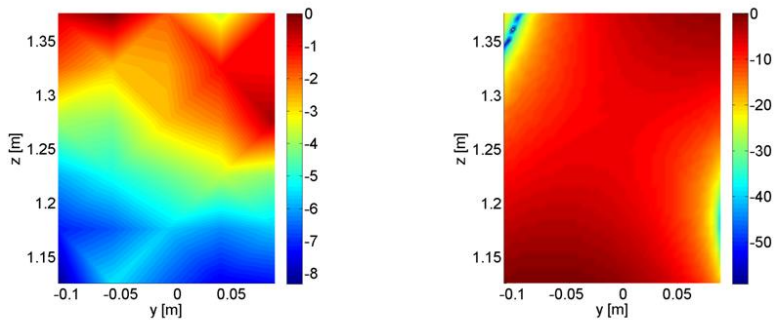
jossa

$L_{p1}$	on keskimääräinen äänenpainetaso lähetyshuoneessa, dB
$L_{In}$	on keskimääräinen äänen intensiteetin taso mittauspinnalla vastaanottohuoneessa, dB
$S_M$	on mittauspinnan ala, m
$S$	on testikappaleen ala, m.

## Liite C: Mallinnustulosten verifiointi

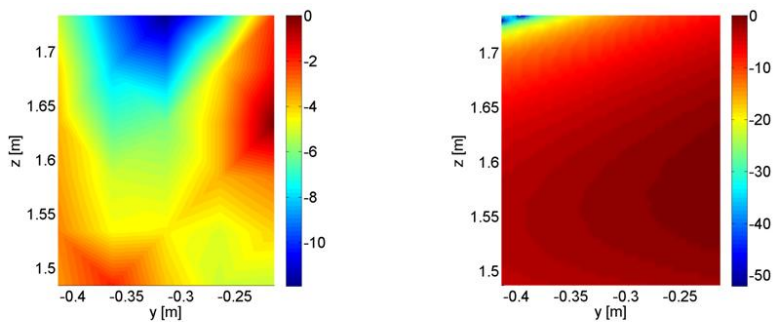


Kuva C1. Mitattu (vasen) ja mallinnettu (oikea) normeerattu äänenpainetaso tasossa 1 taajuudella 400 Hz.

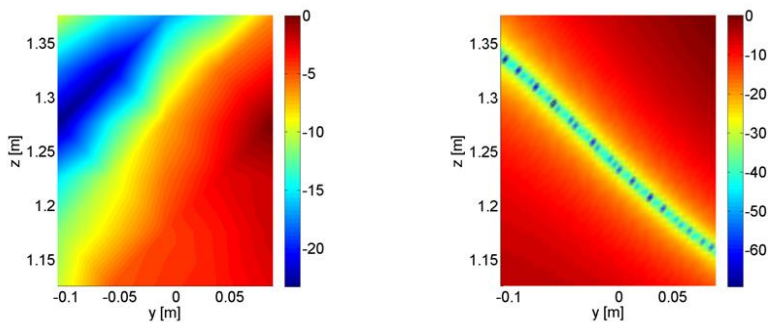


Kuva C2. Mitattu (vasen) ja mallinnettu (oikea) normeerattu äänenpainetaso tasossa 2 taajuudella 400 Hz.

## Liite C: Mallinnustulosten verifiointi



Kuva C3. Mitattu (vasen) ja mallinnettu (oikea) normeerattu äänenpainetaso tasossa 1 taajuudella 500 Hz.



Kuva C4. Mitattu (vasen) ja mallinnettu (oikea) normeerattu äänenpainetaso tasossa 2 taajuudella 500 Hz.



Tekijä(t) Hannu Nykänen, Antti Lankila, Jarkko Keinänen & Simo-Pekka Simonaho		
Nimeke <b>Hiljaiset veneet – yhteenveto ja johtopäätökset</b>		
Tiivistelmä Hiljaiset veneet -tutkimusprojektissa kehitettiin Suomessa valmistettavien veneiden ohjaamoiden suunnittelua veneiden ohjaamoon syntyvän melun tason alentamiseksi ja ohjaamon ääniympäristön laadun parantamiseksi. Veistämöiden referenssiveneiksi valitsemien venetyyppien matkustustilojen melutasot, äänenlaatu ja puheen ymmärrettävyys analysoitiin eri ajotilanteissa. Ohjaamomelun herätekokonaisuuksista (moottori, perävetolaitteen vaihteet ja potkurit) tehtiin yksityiskohtainen analyysi ja niitä verrattiin aaltoiskujen merkitykseen. Yhden venetyypin matkustamotiloista laadittiin akustinen malli, jonka avulla laskettiin ohjaamon ominaistajuudet sekä äänenvaimennusmateriaalien ja pintojen värähtelyn vaikutuksia ohjaamomeluun. Lähtötilanteessa ohjaamomelun tasot vaihtelivat meluisimpien veneiden luokkaa 85 dB(A) olleista tasoista hiljaisimpien veneiden yli 10 dB alempaan. Meluisimmissa veneissä häiritsevyysindeksi oli kaksinkertainen hiljaisimpiin verrattuna ja keskustelu normaalilla puheen voimakkuudella käytännössä mahdotonta, hiljaisimmissa veneissä puheen ymmärrettävyys oli jo lähtötilanteessa tyydyttävällä tasolla. Nopeasti toteutettavia meluntorjuntatoimenpiteitä tehtiin kahdelle eri venetyypille. Toteutettujen meluntorjuntatoimenpiteiden tuloksena veneiden melutasoa saatiin pudotettua parhaimmillaan runsaat 5 dB koteloimalla moottori akustiseen koteloon. Myös yksittäisen venetyypin ohjaamoäänien häiritsevyyttä onnistuttiin parhaimmillaan vähentämään kolmanneksella ja puheen ymmärrettävyyttä parantamaan heikokhokosta välttäväksi.		
ISBN 978-951-38-7534-3 (nid.) 978-951-38-7535-0 (URL: <a href="http://www.vtt.fi/publications/index.jsp">http://www.vtt.fi/publications/index.jsp</a> )		
Avainnimeke ja ISSN VTT Tiedotteita – Research Notes 1235-0605 (nid.) 1455-0865 (URL: <a href="http://www.vtt.fi/publications/index.jsp">http://www.vtt.fi/publications/index.jsp</a> )		Projektinnumero 31133
Julkaisuaika Joulukuu 2009	Kieli Suomi, engl. tiiv.	Sivuja 69 s. + liitt. 8 s.
Projektin nimi Hiljaiset veneet		Toimeksiantaja(t) Tekes
Avainsanat Boat, engine, stern drive, noise, noise control, noise level, sound environment, cabin noise, sound quality, noise source, source ranking, vibration, vibration control, acoustic modelling		Julkaisija VTT PL 1000, 02044 VTT Puh. 020 722 4404 Faksi 020 722 4374



Author(s) Hannu Nykänen, Antti Lankila, Jarkko Keinänen & Simo-Pekka Simonaho		
Title <b>Silent Boats – Summary and Conclusions</b>		
Abstract In the "Silent boats" research project was developed the design of pleasure boats manufactured in Finland in order to lower the noise level in boat cabins and to improve the sound quality of the acoustic environment in cabins. Boatyards selected reference boats for the research, and noise levels, sound quality and speech intelligibility was analysed in boat cabins in different driving conditions. Source ranking between engine, stern drive gears and propellers was performed and compared to water-boat interaction. Acoustic model of one of the reference boats was done, and lowest eigen frequencies of the cabin were calculated with the model, along with the influence of some absorbing material alternatives. In the starting point the noise levels of the noisiest boats were of the order of 85 dB(A), while the most silent were more than 10 dB lower. In the noisiest boats also the noise disturbance indicator was double compared to the most silent ones, and the discussion with normal voice level was impossible. Some rapid noise control measures were done in two boat types. At its best by enclosing the engine in an acoustic enclosure the noise control measures resulted in more than 5 dB reduction in cabin noise level. Also the disturbance index was reduced at its best by one third, and the speech intelligibility was improved from weak to tolerable.		
ISBN 978-951-38- (soft back ed.) 978-951-38- (URL: <a href="http://www.vtt.fi/publications/index.jsp">http://www.vtt.fi/publications/index.jsp</a> )		
Series title and ISSN VTT Publications 1235-0605 (soft back ed.) 1455-0865 (URL: <a href="http://www.vtt.fi/publications/index.jsp">http://www.vtt.fi/publications/index.jsp</a> )		Project number 31133
Date December 2009	Language Finnish, Engl. abstr.	Pages 69 p. + app. 8 p.
Name of project Silent boats		Commissioned by Tekes
Keywords Boat, engine, stern drive, noise, noise control, noise level, sound environment, cabin noise, sound quality, noise source, source ranking, vibration, vibration control, acoustic modelling		Publisher VTT Technical Research Centre of Finland P.O.Box 1000, FI-02044 VTT, Finland Phone internat. +358 20 722 4404 Fax +358 20 722 4374



Hiljaiset veneet -tutkimusprojektissa kehitettiin Suomessa valmistettavien veneiden suunnittelua ohjaamon melun vähentämiseksi ja ääniympäristön parantamiseksi. Neljän venetyyppien matkustustilojen melutasot, äänenlaatu ja puheen ymmärrettävyys analysoitiin eri ajotilanteissa. Moottorin, perävetolaitteen vaihteiden ja potkureiden merkityksestä tehtiin yksityiskohtainen analyysi ja niitä verrattiin aaltoiskujen merkitykseen. Yhden venetyypin matkustamotiloista laadittiin akustinen malli, jonka avulla laskettiin ohjaamon akustisia ominaisuuksia. Lähtötilanteessa ohjaamomelu vaihteli meluisim-pien veneiden 85 dB:stä (A) hiljaisimpien veneiden yli 10 dB alhaisempaan tasoon. Meluisimmissa veneissä häiritsevyysindeksi oli kaksinkertainen hiljaisimpiin verrattuna ja keskustelu normaalilla puheen voimakkuudella käytännössä mahdotonta. Hiljaisimmissa veneissä puheen ymmärrettävyys oli jo lähtötilanteessa tyydyttävällä tasolla. Meluntorjuntatoimenpiteitä tehtiin kahdelle eri venetyypille. Esimerkkiveneen melua saatiin vähennettyä parhaimmillaan runsaat 5 dB koteloimalla moottori akustiseen koteloon. Myös yksittäisen venetyypin ohjaamoäänen häiritsevyyttä onnistuttiin vähentämään parhaimmillaan kolmanneksella ja puheen ymmärrettävyyttä parantamaan heikohkosta välttäväksi.