

# W32-TYYPPISEN DIESELMOOTTORIN LUUKKUJEN MELUNTORJUNTA

**Annika Rajala<sup>1</sup>, Kari Saarinen<sup>2</sup>, Lasse Lamula<sup>2</sup>, Marko Kuivamäki<sup>2</sup>, Kari Saine<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Wärtsilä Finland Oy  
PL 244, 65101 Vaasa  
annika.rajala@wartsila.com  
kari.saine@wartsila.com

<sup>2</sup>VTT Tuotteet ja tuotanto  
PL 1307, 33101 Tampere  
kari.p.saarinen@vtt.fi, lasse.lamula@vtt.fi  
marko.kuivamaki@vtt.fi

## 1 JOHDANTO

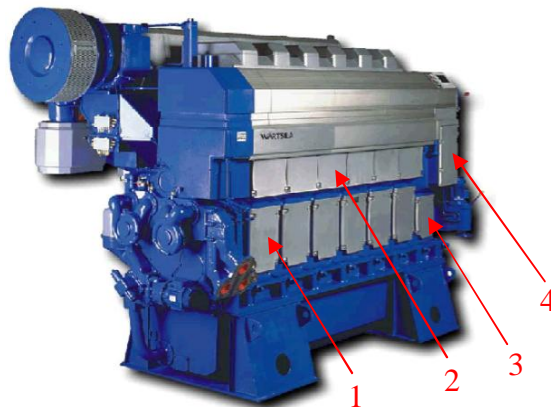
Kansainväliset melumääräykset muuttuvat ja tulevat yhä vaativammiksi sekä ympäristön että työturvallisuuden kannalta. Uudistuneita määräyksiä sovelletaan vanhoihin laitoksiin, joten melutason saattaminen vaaditulle tasolle ja täten laitoksen toiminnan jatkaminen vaatii jälkikäteen tehtäviä laitospäivityksiä. Laivojen konehuoneissa korkeimman sallitun melutason alittaminen on pienistä tiloista johtuen haasteellista. Moottorivalmistajien on panostettava entistä enemmän meluseikkoihin jo moottorin suunnitteluvaiheessa, jotta moottorin melutasot pysyisivät tulevaisuudessakin vaatimustasojen alapuolella. Lisäksi moottorin vähämeluisuus tulee olemaan merkittävä kilpailutekijä.

Wärtsilä on aloittanut dieselmootoreiden meluprojektin, jonka tarkoituksena on merkittävästi pienentää moottorin äänitehoa. Aiempien mittausten perusteella tiedetään moottorin useiden luukkurakenteiden olevan eräs moottorin äänitehon kannalta merkittävä tekijä. Tärkeimpiä luukkuja ovat moottorin kampikammion ja nokka-akselin luukut. Kehitystyön tarkoituksena on löytää luukkurakenne, johon moottorin lohkoista siirtyy vähemmän runkoäänitehoa, ja jolla on riittävä ääneneristävyys sekä halutut äänensäteilyominaisuudet.

## 2 LUUKKUJEN ÄÄNENSÄTEILYYN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

Huoltotoimenpiteiden mahdollistamiseksi nokka-akselin ja kampikammion luukkuja on jokaista sylinteriä kohden yksi. Nokka-akselin ja kampikammion luukkujen lisäksi moottorin vauhtipyörän päässä on välihammaspyörästön peittävät luukut. Huoltopuolella kampikammion luukuissa on varoventtiili kampikammioräjähdyksen varalta. Kaikki luukut, yhteensä 21 kappaletta, ovat kevytmetallia, GK-ALSi12.

**W6L32(CR) no 8514**  
- teho: 3000 kW  
- sylinterin halkaisija: 320 mm  
- iskunpituus: 400 mm  
- pituus: 5110 mm  
- leveys: 2207 mm  
- korkeus: 3703 mm



*Kuva 1. W6L32 käyttöpuoli. Kampikammion luukku (1), nokka-akselin luukku (2) ja välihammaspyörästön luukut (3 ja 4).*

Dieselmoottorissa on useita mekaanista värähtelyä (runkoääntä) aiheuttavia herätteitä; palamisen aiheuttavat kaasuvoimat, männän sivuiskut, sekä jakopyörästön, polttoaineen syöttölaitteiston ja venttiilikoneiston aiheuttamat herätteet. Näiden dynaamisten voimien synnyttämä runkoääni etenee moottorin rakenteissa luukkuihin ja säteilee ilmaäänä ympäristöön.

Toinen luukkujen äänensäteilöön vaikuttava tekijä on edellä lueteltujen herätteiden moottorin sisäpuolelle synnyttämä suuri äänenpaine, mikä edellyttää luukuilta riittävää ääneneristävyyttä.

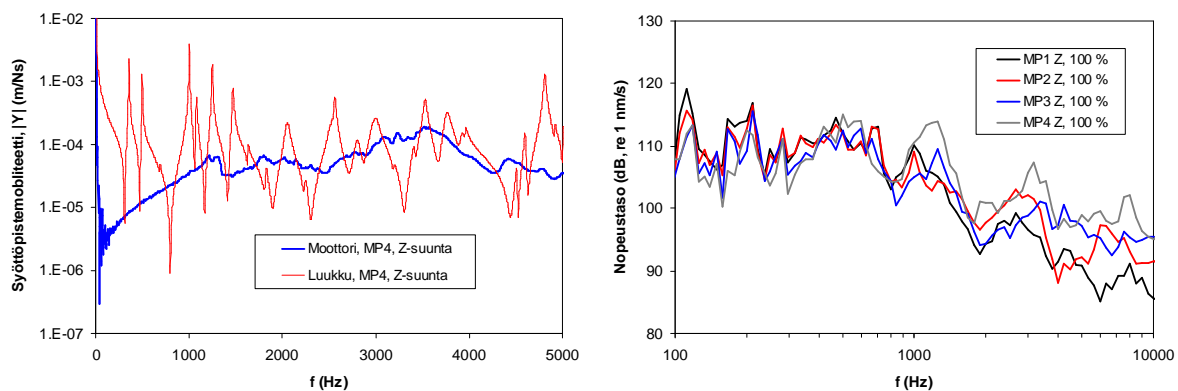
### 3 LÄHTÖTILANTEEN SELVITYS

Luukkujen meluntorjunnan lähtökohtana tulisi tietää, mikä on luukkujen tärkeimpien äänensäteilöön vaikuttavien äänensyntymekanismien suhteellinen merkitys, merkittävin taajuusalue ja miten tilanne vaihtelee moottorin eri osissa.

Korvaamalla moottorin käyttöpuolen luukut huonosti runkoääntä säteilevillä luukuilla selvitetiin luukkujen osuus koko moottorin käyttöpuolen säteilemästä äänitehosta. Mittaustulosten perusteella luukkujen ääniteho on noin 50 % moottorin sivun äänitehosta. Käytetyt hiljaiset luukut eivät mittaustulosten mukaan toimineet aivan odotetusti, joten luukkujen osuus moottorin sivun äänitehosta voi olla hieman suurempi.

Moottorin sisäpuoleisen äänenpaineen luotettava mittaaminen yhdessä luukun ääneneristävyyksimittauksen kanssa antaisi suoraan arvion ääneneristävyyden merkittävydestä luukun äänensäteilöissä ja tiedon tarvittavasta ääneneristävyydestä. Kampikammion öljy ja paineanturin asennus runkoäänivapaasti tekevät sisäpuoleisen äänenpaineen mittauksen vaikeaksi. Alustavien mittaustulosten perusteella moottorin sisäpuolen äänenpaine on korkea, mutta luukun ilmaäänän läpäisy ei kuitenkaan ole merkittävin äänensyntymekanismi.

Muiden, kampikammion luukkuihin keskittyneiden, mittausten tulosten perusteella tehtiin seuraavat havainnot. Rakenteissa etenevän runkoäänien kannalta tärkeitä tekijöitä ovat lähderakenteen (moottorin lohko) vapaa nopeus ja liitettävien osien syöttöpistemobiliteetit [1]. Moottorin sylinteriryhmästä mitatut vapaiden nopeuksien jakaumat olivat translaatiosuunnissa logaritmisella taajuusakselilla tarkasteltuna melko tasaiset 1 kHz asti ja sen jälkeen loivasti laskevat. Luukun ja sylinteriryhmän syöttöpistemobiliteettien välillä ei ollut selvää epäsovitusta, mikä tarkoittaa tehokasta runkoäänien siirtymistä liitoksen yli.

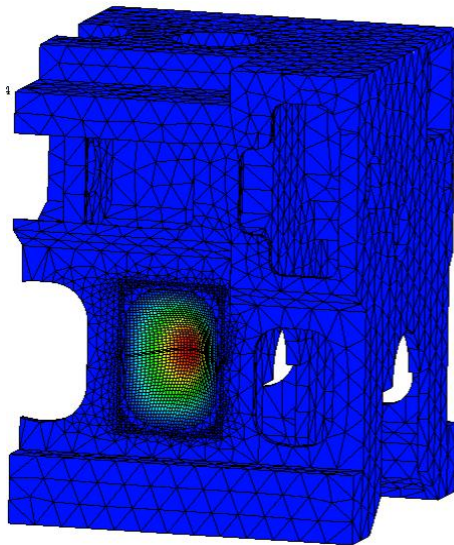


Kuva 2. Sylinteriryhmän ja luukun syöttöpistemobiliteetti sivusuunnassa (vasen) ja sylinteriryhmän mittauspisteiden vapaat nopeudet sivusuunnassa (oikea).

Luukkujen äänensäteily oli tehokasta ominaistajuuksilla, kampikammion luukuilla erityisesti alimmalla ominaistajuudella. Luukuista mitattu vaimennus oli vaimennussuhteena välillä 0.5-2.5 %. Vaikka moottorin herätteet ovat tyypillisesti perustaajuuden kerrannaisia, niin pienen pyörimisnopeuden takia luukkujen ominaistajuudet heräävät kaikissa käyttömoodeissa. Siirtäessä moottorin vapaasta päästä vauhtipyörän päähän luukkujen värähtelytasot nousivat ja äänensäteily oli voimakkaampaa, luultavasti mm. välihammaspyörästä vaikutuksesta.

#### 4 VAIHTOEHTOJEN VERTAILU SIMULOIMALLA

Moottorilohkon hammaspyörästä puoleisesta päästä tehtiin FE-malli, jolla simuloitiin massiiviseen rakenteeseen kiinnitetyn luukun värähtelyä ja äänensäteilyä. Tuloksia verrattiin nivel-tuetun luukun tapaukseen [2]. Herätteenä käytettiin kahta pistemäistä vakiovoimaa, jotka vaikuttivat sylinterin pinnassa pituus- ja sivusuuntaan. Kuvan 2 perusteella lohko värähtelee ikään kuin jäykkänä kappaleena ilman erottuvia ominaistajuuksia. Tästä syystä vaimennusta lisättiin malliin lohkon globaaleille ominaistajuuksille kuvaamaan paremmin rakenteen todellista käyttäytymistä. Vastaavasti luukun ominaistajuuksille määritettiin luukkumateriaalille tyypillinen vaimennus. Lohkomalliin liitetyn luukun solmujen pintaa vastaan kohtisuorat värähtelynopeudet laskettiin I-DEAS ohjelmalla. Tulokset siirrettiin herätteeksi SYSNOISEen, jolla (direct BEM, baffled) laskettiin luukun säteilemä ääniteho. Kuvassa 3 on esitetty käytetty FE-malli ja taulukossa 1 simuloitujen eri rakenteiden äänitehotasojen muutokset verrattuna vakioluukun laskentatulokseen.



Taulukko 1. Simulointitulokset.

Vaihtoehto	$L_{WA}$ (dB)
Vakioluukku	0
Teräsluukku	-12.5
Valurautaluukku	-9.0
Muoviluukku	-23.4
Vakio + jäykisteet	+1.7
Teräs + jäykisteet	-7.5

Kuva 3. Laskennassa käytetyn lohkon osan ja luukun FE-malli ja luukun alinta ominaistajuutta vastaava värähtelymuoto.

Vaikka käytetty laskentamalli poikkeaa oikeasta rakenteesta ja luukun kiinnityksestä, katsottiin tarkempi mallinnus tarpeettomaksi kasvavan resurssitarpeen ja saavutettavan lisätiedon vähäisyyden vuoksi. Tulosten perusteella voidaan todeta, että mallinnetut vaihtoehtoiset luukkuraakenteet ovat selvästi nykyistä rakennetta parempia ja että tässä tapauksessa jäykisteiden käyttö ei ole suositeltavaa. Tehtyjen simulointien suurin ongelma liittyy herätteen taajuussisältöön. Käytetty herätevoiman taajuusjakauma ei vastaa todellista herätettä vaan painottaa liikaa suuria taajuuksia.

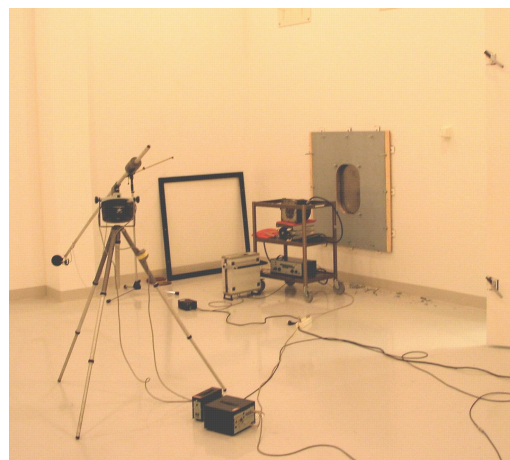
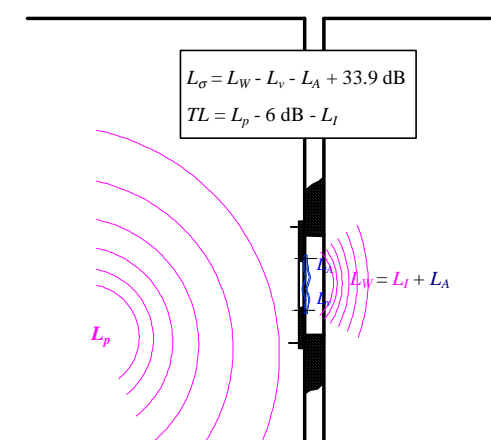
Verrattaessa tuloksia viitteen [2] tuloksiin tehtiin kaksi havaintoa. Lohkomallissa laatan säteilyindeksi saa koinsidenssitaajuuden alapuolella suurempia lukuarvoja kuin viitteen [2] tapauksessa. Tämä aiheutuu osittain erilaisesta reunaehdosta ja osittain siitä että lohkomallissa laataan kohdistuva heräte on diffuusi. Toinen havainto liittyy runkoäänien siirtymiseen lohkoista laattaan. Eri luukuvaihtoehdoilla lohkomallilla saatu äänitehotason muutos on joko suurempi tai pienempi kuin viitteen [2] tapauksessa. Tämä aiheutuu liitospintojen mobiliteettisovituksen eroista.

Muutamille rakennevaihtoehdoille tehtiin myös ääneneneristävyyslaskenta käyttäen tilastolliseen energia-analyysiin (SEA, Statistical Energy Analysis) perustuvaa AutoSEA-ohjelmistoa. Laskennan tavoitteena oli arvioida vaihtoehtoisten rakenteiden ääneneneristävyyttä. Tulosten perusteella tarkasteltujen vaihtoehtoisten jäykistämättömien rakenteiden ääneneneristävyys on suurempi kuin nykyisellä luukurakenteella. Lohkon mallinnukseen SEA ei ole elementtimenetelmän vaihtoehto, koska rakenne on lähinnä solidimainen eikä suuren mooditiheyden omaava ohutlevykappale. Luukun molempien herätmekanismien vaikutusten yhtäaikaiseen, sopivasti yksinkertaistettuun, tarkasteluun SEA soveltuu FEM/BEM mallinnusta paremmin.

## 5 MITTAUSTULOKSET

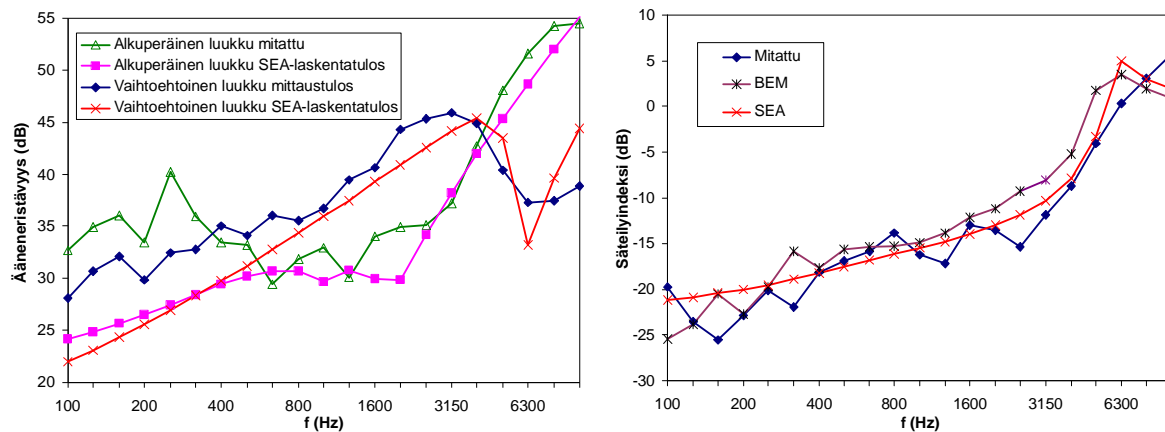
### 5.1 Laboratoriomittaukset

Laboratoriomittauksien tarkoituksena oli määrittää eri luukuvaihtoehtoisten ilmaääneneristävyydet ja säteilyindeksit. Näitä tuloksia tarvitaan arvioitaessa moottorin sisällä vallitsevan äänenpaineen merkitystä ja laskettaessa luukkujen äänitehoa värähtelymittauksien perusteella. Mittausten periaate on esitetty kuvassa 4. Kuvassa vasemmanpuoleinen tila on kaiuntahuone ja oikeanpuoleinen tila iso, hyvin akustoitettu koneakustiikkalaboratorio. Kaiuntahuoneeseen tuotettiin korkea äänenpainetaso ( $L_p$ ) useaa kaiutinta käyttäen. Tilojen välinen aukko on kooltaan 1 m x 1 m ja tarkasteltava luukku kiinnitettiin aukkoon tehtyyn kaulukseen, joka oli rakenteeltaan hyvin ääntä eristävä. Ääniteho ( $L_w$ ) mitattiin vastaanottohuoneen puolella intensiteettimenetelmällä. Keskimääräinen värähtelynopeustaso ( $L_v$ ) mitattiin kiihtyvyyssanturilla käyttäen kahdeksaa satunnaisesti valittua mittauspistettä. Säteilyindeksi ( $L_\sigma$ ) mitattiin akustisella herätteellä ja pistevoimaherätteellä, joka tuotettiin kaiuntahuoneen puolelle sähködynaamisella tärinämekanismilla. Kaikki mittaukset tehtiin 1/3-oktaavikaistoittain taajuusalueella 100 - 10 000 Hz.



Kuva 4. Vasemmalla laboratoriomittausten periaatekuva ja oikealla mittausjärjestely lähetystilan puolelta nähtynä.

Kuvassa 5 on muutama esimerkki mittaustuloksista verrattuna mallinnustuloksiin. Vaihtoehtoisen luukun ääneneristävyys on tärkeimmällä taajuusalueella suurempi kuin alkuperäisen luukun ääneneristävyys. Suuret erot pienillä taajuuksilla mittaustulosten välillä johtunevat yksinkertaistetusta laskentamallista. Säteilyindeksillä korrelaatio mitatun ja laskettujen tulosten välillä on parempi.



Kuva 5. Luukkujen ilmäineneristävyyden ja pistevoimaherätteen säteilyindeksin mittaustulosten vertailu laskentatuloksiin.

## 5.2 Kenttämittaukset

Kenttämittaukset tehtiin Vaasassa Wärtsilän laboratoriotiloissa. Mittauksien tavoitteena oli vertailla uusia luukuvaihtoehtoja nykyisiin luukkuihin oikeassa ympäristössä, maksimiteholla käyvään moottoriin kiinnitettynä. Mittaukset tehtiin vaihtamalla yhtä luukku tilanteessa, jossa moottorin käyttöpuolen muut luukut olivat huonosti runkoääntä säteileviä. Testattavasta luukusta mitattiin äänitehotaso intensiteettimenetelmällä ja luukun pintaa vastaan kohtisuora keskimääräinen värähtelynopeustaso. Koska mittausympäristö ei ollut optimaalinen, laskettiin keskimääräisen nopeustason ja laboratoriossa mitatun säteilyindeksin avulla toinen arvio luukuvaihtoehtojen ääniteholle. Taulukossa 2 esitetyt lukuarvot on saatu käyttämällä säteilyindeksiä, joka määritettiin akustisella herätteellä.

Taulukko 2. Toisessa sarakkeessa on testatun ja vakioaluukun A-painotetun äänitehotason ( $L_{WA}$ ) erotus. Kolmannessa sarakkeessa on keskimääräisen värähtelynopeuden ja laboratoriossa mitatun säteilyindeksin (akustinen heräte, muoville  $L_{\sigma}$  on laskettu) avulla saatu arvio testatun luukun ja vakioaluukun A-painotetun äänitehotason erotuksesta.

Luukku	$L_{WA}$ (dB)	$L_v + L_{\sigma}$ (dB)
Käyttöpuolen vakio luukku	0	0
Huolto puolen vakio luukku	-3.8	-6.0
Teräs	-4.7	-7.0
Vaimennettu teräs	-5.1	-15.5
Puu	-4.9	-8.5
Muovi	-6.1	-7.5
Huonosti runkoääntä säteilevä	-5.8	

Mittaustulosten perusteella vaihtoehtoiset rakenteet ovat vibroakustisilta ominaisuuksiltaan selvästi parempia kuin nykyinen käyttöpuolen luukku. Hankalan mittausympäristön vaikutuksesta intensiteettimenetelmällä tehdyt mittaukset antavat saavutettavalle lisäysvaimennukselle alalikiarvon. Vaihtoehtoisessa äänitehotason määrittämisessä on myös tietyt puutteet. Säteilyindeksin laboratoriomittauksessa luukun kiinnityksen reunaehto ja käytetty pelkkä akustinen heräte eroavat kenttämittauksen tilanteesta.

## 6 YHTEENVETO

Kansainväliset melumääräykset muuttuvat ja tulevat yhä vaativammiksi sekä ympäristön että työturvallisuuden kannalta. Moottorivalmistajien on panostettava entistä enemmän meluseikkoihin jo moottorin suunnitteluvaiheessa, jotta moottorin melutasot pysyisivät tulevaisuudessaakin vaatimustasojen alapuolella.

W6L32 dieselmoottorin useat luukkurakenteet ovat yksi moottorin äänitehon kannalta merkittävä tekijä. Luukkujen värähtelyn ja äänensäateilyn aiheuttavat moottorin useiden herätmekanismien synnyttämän runkoäänen eteneminen luukkuihin ja moottorin sisäpuoleinen äänenpainetaso.

Kartoitusmittausten tulosten perusteella valittiin useita vaihtoehtoisia luukkurakenteita, joiden vibroakustista käyttäytymistä simuloitiin numeerisilla mallinnusmenetelmillä FEM, BEM ja SEA. Mallinnusosaan sisältyi runkoäänen eteneminen rakenteissa, äänensäateily ja ääneneristävyys. Koneen irrallisen osarakenteen mallinnus on hyvä lähtökohta, mutta tulosten luotettavuus paranee jos malliin sisällytetään koko rakenne tai sopiva osa siitä. Tärkeitä, mutta vaikeasti määritettäviä suureita, ovat todelliset herätteet.

Vaihtoehtoisille luukkurakenteille tehtiin laboratorio- ja kenttämittauksia. Laboratoriossa mitattiin pistevaimennuksen ja akustisen kentän herättämän rakenteen säteilyindeksit sekä luukkujen ääneneristävyys. Kenttämittauksissa verifioitiin vaihtoehtoisten luukkujen toiminta intensiteetti- ja värähtelymittauksin. Koska mittausolosuhteet olivat epäsuorat, arvioitiin luukun äänitehotasoa myös keskimääräisen värähtelynopeusjakauman ja laboratoriossa mitatun säteilyindeksin avulla.

Mittausta ja mallinnusta hyödyntäen kehitettiin useita vibroakustisilta ominaisuuksiltaan nykyistä luukkuja parempia vaihtoehtoja. Jatkossa keskitytään uuden luukkurakenteen tuotteistamiseen, valintaperusteena mm. valmistus, hinta ja muotoilu.

## LÄHTEET

1. MOORHOUSE A & GIBBS A, Relationship between the characteristic power of structure-borne sound sources and their emission when installed. *Euro Noise 98*, Munich, Vol. 1, 389–394.
2. KUIVAMÄKI M, SAARINEN K & LAMULA L, Voimaherätteen tasolaatan äänensäateily. *Akustiikkapäivät 2005*, 26.-27.9.2005, Kuopio.