

# KESKINOPEAN MÄNTÄMOOTTORIN AKUSTISTEN LÄHDEOMINAISUUKSIEN MÄÄRITTÄMINEN TASOAALTOALUEEN YLÄPUOLELLA

Antti Hynninen<sup>1</sup>

<sup>1</sup> VTT

PL 1000 02044 VTT

etunimi.sukunimi@vtt.fi

## Tiivistelmä

Mäntämoottorivoimalan pakomelun simuloinnissa tarvitaan moottorin akustiset lähdeominaisuudet. Tasoaaltoalueen lähdeominaisuudet voidaan määrittää riittävän tarkasti monikuormamenetelmällä käyttäen prosessimulointiohjelmistoa. Korkeammilla taajuuksilla akustisen kuorman sekä lähteen välinen kytkentä heikkenee, jolloin lähdeominaisuudet voidaan arvioida äänitehomittauksin. Tässä työssä esitetään mittausmenetelmä korkeataajusten, tasoaaltoalueen yläpuolisten lähdeominaisuuksien arvioimiseksi. Menetelmässä pakoputken seinämältä mitattuja keskiarvostettuja ristispektrejä painotetaan terssikaistoittain tehokertoimilla. Kokeellisesti määritettyjen tehokertoimien luotettavuutta arvioidaan elementtimenetelmäsimuloinnin satunnaisherätettä käyttäen.

## 1 JOHDANTO

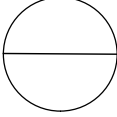
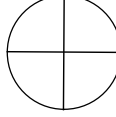
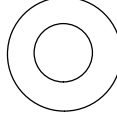
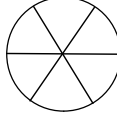
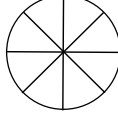
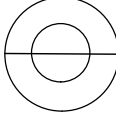
Koneakustisessa suunnittelussa on huomioitava ympäristömelulle asetetut normit ja raja-arvot. Mäntämoottorivoimalaitoksen aiheuttaman ympäristömelun kannalta moottorin pakomelu on merkittävä melun lähde [1]. Heräte on voimakas etenkin moottorin pyörimisnopeuden kerrannaisilla. Mitoittamalla pakomeluvaimentimen reaktiivinen toiminta oikein voidaan pientaajuinen melu torjua tehokkaasti. Yleensä äänenvaimentimissa käytetään lisäksi resistiivisiä materiaaleja vaimentamaan korkeataajuisia melua.

Äänenvaimentimen suunnittelussa tarvitaan moottorin akustiset lähdeominaisuudet laajalla taajuusalueella. Keskinopean mäntämoottorin akustiset lähdeominaisuudet tasoaaltoalueella on määritetty aiemmin [2]. Tässä työssä keskitytään tasoaaltoalueen yläpuolisiin lähdeominaisuuksiin.

## 2 TEORIA

Äänen eteneminen kanavassa aikaharmonisessa kentässä voidaan kuvata taajuustasossa Helmholtzin aaltoyhtälöllä. Suoran yhtenäisen kanavan tapauksessa voidaan Helmholtzin yhtälön ratkaisu äänenpaineelle  $\hat{p}$  esittää aaltomuotojen superpositio-

Taulukko 1: Eräiden korkeampien aaltomuotojen äänenpaineiden solmuviivat pyöreän kanavan poikkileikkauksessa ja vastaavat rajataajuudet Helmholtzin asteikolla.

$He$	1.84	3.05	3.83	4.20	5.32	5.33
$(m, n)$	1,0	2,0	0,1	3,0	4,0	1,1
						

na, esimerkiksi Munjalin [3] mukaan

$$\hat{p}(x, \mathbf{r}) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} [\hat{p}_{mn+}(x) \psi_{mn+}(\mathbf{r}) e^{-jk_{xmn+}x} + \hat{p}_{mn-}(x) \psi_{mn-}(\mathbf{r}) e^{jk_{xmn-}x}], \quad (1)$$

missä  $x$  on kanavan pitkittäinen koordinaatti,  $\mathbf{r}$  on paikkavektori kanavan poikkileikkauksessa, alaindeksit  $m$  ja  $n$  kuvaavat ortonormaalien ominaismuotojen  $\psi_{mn}$  solmuviivoja,  $k_x$  on aaltoluku ja alaindeksit  $+/-$  kuvaavat aallon etenemissuuntaa. Ominaisfunktiot  $\psi$  riippuvat kanavan poikkileikkauksesta ja virtauksesta.

Kukin aaltomuoto  $(m, n)$  etenee kanavassa vain oman rajataajuutensa  $f_{mn}$  yläpuolisilla taajuuksilla. Rajataajuutensa alapuolella aaltomuodot vaimenevat eksponentiaalisesti. Tasoaaltoalueen ylärajana on siis ensimmäisen korkeamman muodon  $(1, 0)$  rajataajuus  $f_{10}$ .

## 2.1 Akustiset lähdeominaisuudet

Akustiset lähdeominaisuudet tasoaaltoalueella voidaan määrittää monikuormamennetelmän [4]. Monikuormamennetelmissä äänenpaine kanavassa ja akustinen impedanssi mitataan usealle akustiselle kuormalle. Impedanssin määrittämiseksi alavirran (+) ja ylävirran (-) suuntaiset aallot erotellaan kaksimikrofonimennetelmällä [5]. Sähköisen ja akustisen siirtojohtoanalogian avulla tuloksista muodostetaan yhtälöryhmä, josta ratkaistaan lähdevoimakkuus  $\hat{p}_s$  ja lähdeimpedanssi  $\hat{\zeta}_s$ .

Tasoaaltoalueen yläpuolella äänikenttä kanavassa koostuu useista etenevistä aaltomuodoista kaavan (1) mukaan. Poikkileikkaukseltaan pyöreässä kanavassa taajuus voidaan esittää dimensiottomassa muodossa Helmholtzin asteikolla aaltoluvun ja säteen tulona,  $He = kR$ . Eräiden korkeampien aaltomuotojen äänenpaineiden solmuviivat ja vastaavat rajataajuudet Helmholtzin asteikolla poikkileikkaukseltaan pyöreässä kanavassa on esitetty taulukossa 1. Tasoaaltoalueen yläpuolella ylä- ja alavirran suuntaisten aaltojen erotteluun tarvitaan yhtä monta mikrofonia kuin tarkasteltavalla taajuuskaistalla esiintyy aaltomuotoja [6]. Korkeammilla taajuuksilla aaltomuotoja esiintyy niin paljon, että tarvittavien mikrofonien määrä kasvaa erittäin suureksi. Tasoaaltoalueen yläpuolella akustisen kuorman ja lähteen välinen kytkentä heikkenee. Taajuuden kasvaessa lähteen näkemä akustinen kuorma lähestyy asymptoottisesti puoliäärettömän kentän impedanssia. Tällöin akustiset lähdeominaisuudet voidaan arvioida kanavan sisäisestä äänitehosta keskiarvostamalla.

Taulukko 2: Kokeellisesti määritetyt terssikaistakohtaiset äänitehokertoimet Helmholtzin luvun funktiona [7].

$He$	[-]	1.9	2.4	2.9	3.8	4.7	5.9	7.4	9.4	11.8	14.8	18.8	23.6
$\varepsilon$	[dB]	-2	-2	-1	-1	-2	-1	-2	-2	-4	-6	-6	-6

Ääniteho tasoaaltoalueen yläpuolella ortonormaalien aaltomuotojen kannassa voidaan esittää aaltomuotopainotettuna summana

$$\overline{W} = \frac{A}{\rho c} \sum_{(m,n)} (\varepsilon_{mn+} |\tilde{p}_{mn+}|^2 - \varepsilon_{mn-} |\tilde{p}_{mn-}|^2), \quad (2)$$

missä  $A$  on kanavan poikkileikkauksen pinta-ala,  $\rho$  on fluidin tiheys,  $c$  on äänen nopeus ja  $\varepsilon_{mn}$  on aaltomuotokohtainen painokerroin. Kun oletetaan kuorman heijastusten olevan mitättömiä tasoaaltoalueen yläpuolella, ylävirran suuntaiset termit kaavassa (2) häviävät ja summaa voidaan arvioida painottamalla kanavan sisäistä kokonaisäänenpaineen tehollisarvoa. Terssikaistakohtaisia äänitehokertoimia  $\varepsilon$  käyttäen saadaan kanavan äänitehoksi tasoaaltoalueen yläpuolella

$$\overline{W} = \frac{A}{\rho c} \varepsilon \langle |\tilde{p}_+|^2 \rangle, \quad (3)$$

missä  $\tilde{p}_+$  on kokonaisäänenpaineen tehollisarvo ja  $\langle \rangle$  tarkoittaa terssikaistasummausta. Kokonaisäänenpaineen tehollisarvo voidaan määrittää mittaamalla ristispektrit  $S_{ab}$  mikrofoniin  $a$  ja  $b$  välillä

$$|\tilde{p}_+|^2 = \left| \frac{1}{N} \sum_{a=1}^{n-1} \sum_{b=a+1}^n S_{ab} \right|, \quad (4)$$

missä ristispektrien määrä  $N$  riippuu käytettävien mikrofoniin määrästä  $n$ ,  $N = n(n-1)/2$ . Sijoittamalla nämä äänitehon kaavaan (3) saadaan

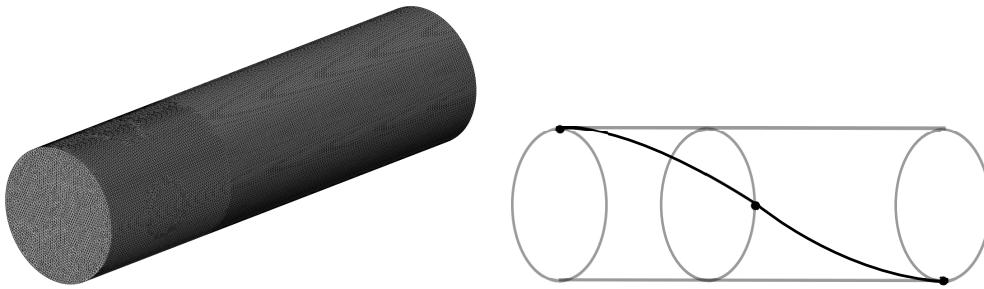
$$\overline{W} = \frac{A}{\rho c} \frac{\varepsilon}{n(n-1)} \left\langle \left| \sum_{a=1}^{n-1} \sum_{b=a+1}^n \hat{p}_b \hat{p}_a^* \right| \right\rangle, \quad (5)$$

missä  $\hat{p}_a$  ja  $\hat{p}_b$  ovat mitatut äänenpaineet ja  $*$  on kompleksikonjugaatti.

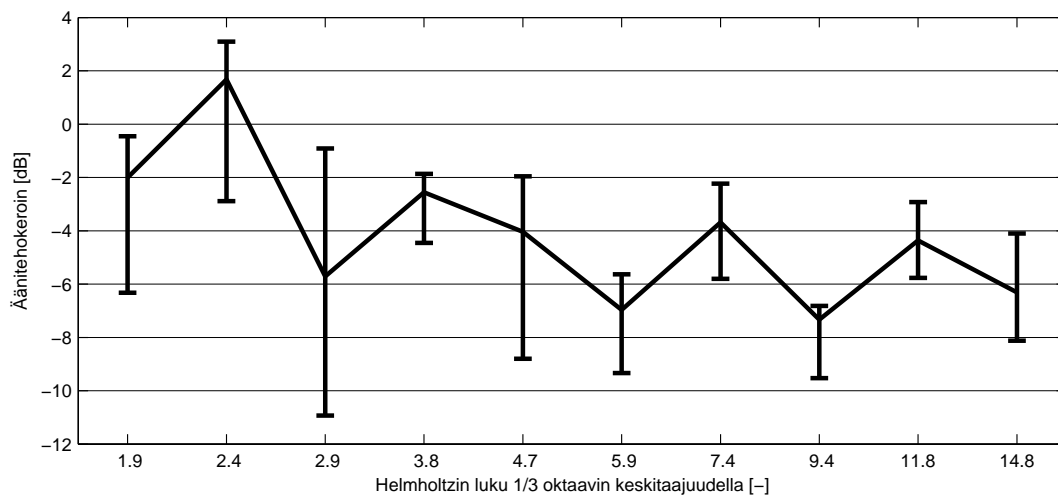
Kaavassa (5) esiintyvät äänitehokertoimet on määritetty kokeellisesti aiemmin käyttäen monopoli-, dipoli- ja kvadrupoliherätettä [7]. Näiden äänitehokertoimien keskiarvo Helmholtzin luvun funktiona on esitetty taulukossa 2.

### 3 SIMULOINTIMALLI

Yhden metrin pituinen osuus halkaisijaltaan  $\varnothing=255$  mm testiputkea mallinnettiin elementtimenetelmällä. Vaste satunnaisherätteelle laskettiin suoralla laskennalla taajuusalueella 500-8000 Hz, taajuusasteleella 10 Hz. Elementtimallissa on noin 270 000 solmua sekä 1 300 000 elementtiä. Putken ilmatila mallinnettiin tetraedrielementeillä, kun taas heijastamattomien päätyjen mallinnukseen käytettiin



Kuva 1: Testiputken elementtimalli ja tasoaaltoalueen yläpuolisen äänitehon arviointiin valitut kolme mittapistettä. Mittapistepoikkileikkausten väliset etäisyydet on valittu tasoaaltoalueen lähdeominaisuuksien määrittämiseen Åbomin ja Bodénin mukaan [8].



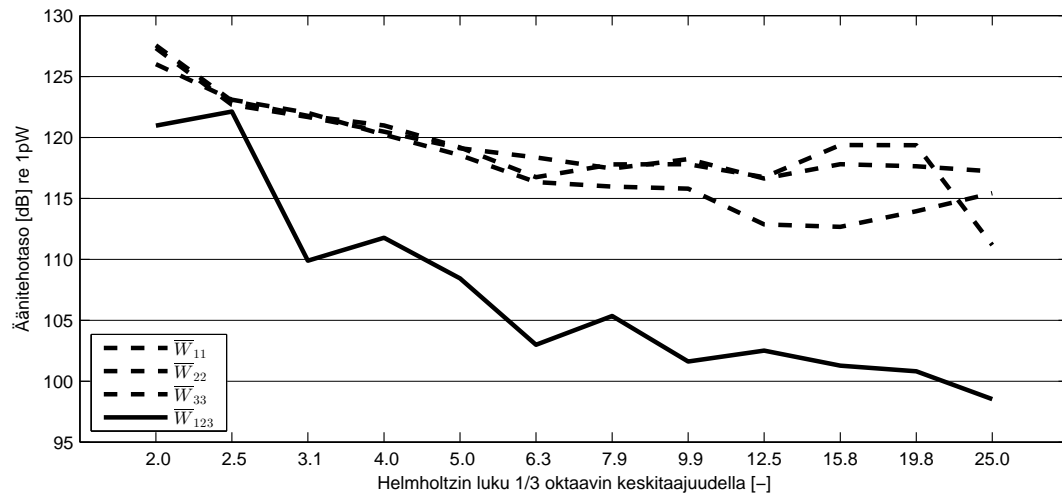
Kuva 2: Simuloidut terssikaistaäänitehokertoimet vaihteluvälein. Kertoimet kuvaavat kanavan seinämältä kolmesta pisteestä arvioidun ja ulostulevan äänitehon eroa kolmellakymmenellä satunnaisesti valitulla herätteellä.

äärettömiä elementtejä. Tyypillinen elementin pituus on noin 5 mm, jolloin aallonpituutta kohden saadaan noin kymmenen elementtiä terssikaistan 6300 Hz yläpäässä. Tämä varsin tiheä elementtimalli on esitetty kuvassa 1.

Malli ratkaistiin kolmekymmentä kertaa käyttäen satunnaista herätettä. Ulostulevaa äänitehoa arvioitiin kaavalla (5) käyttäen putken seinämältä pitkittäisakselin suhteen kierteisesti kuvan 1 mukaan valittuja kolmea mittauspistettä. Vertaamalla näin arvioitua äänitehoa putken päästä laskettuun äänitehoon, voidaan määrittää äänitehokertoimet kullakin herätteellä. Äänitehokertoimet vaihteluvälein on esitetty kuvassa 2.

## 4 SOVELLUS

Tässä työssä esitettyä menetelmää tasoaaltoalueen yläpuolisten lähdeominaisuuksien arvioimiseksi sovellettiin VTT:n moottorilaboratoriossa Wärtsilä Vasa 4R32 testimoottorin pakopuoleen. Nelisynterisen nelitahtisen moottorin pyörimisno-



Kuva 3: Wärtsilä Vasa 4R32 moottorin pakopuolen lähdeho tasoaltoaueen yläpuolella. Katkoviivat kuvaavat mitattua äänitehotasoa yksittäisillä mikrofoneilla, kun taas ehyt viiva kuvaa mitattua äänitehotasoa tässä työssä esitettyllä mittausmenetelmällä.

peus on 750 rpm. Moottorin teho on 1640 kW. Turboahimen BBC VTR 254 turbiinin pyörimisnopeus on noin 30 000 rpm.

Testimoottorin pakopuolen lähdeho on esitetty kuvassa 3. Kaavassa (5) käytettiin kuvassa 2 esitettyjä äänitehokertoimia. Kuvassa 3 on esitetty myös yksittäisillä mikrofoneilla mitatut äänitehotasot.

## 5 YHTEENVETO

Kuten kuvasta 2 nähdään, äänitehokertoimet riippuvat voimakkaasti herätteestä ja taajuudesta. Korkeammilla taajuuksilla lähestytään arvoa -6 dB. Kun oletetaan äänikenttä kanavassa puolidiffuusiksi sekä huomioidaan äänenpaineen suhde kanavan sisustan ja kanavan seinämän välillä, arvo on teoreettisesti oikein. Verrattaessa taulukon 2 kokeellisesti määritettyjä äänitehokertoimia kuvassa 2 esitettyihin huomataan, että mitatut tulokset mahtuvat vaihteluväleihin niin alimmilla kuin ylimmillä terssikaistoilla. Äänitehokertoimet mitattiin käyttäen monopoli-, dipoli- sekä kvadrupoliherätettä [7]. Taulukosta 1 nähdään, että näillä herätteillä aaltomuodot (1, 0), (2, 0) ja (3, 0) heräävät vahvasti. Korkeampien aaltomuotojen herättäminen kyseisillä herätteillä on hankalaa, koska heräte ja ominaisäänepainejakaumat ovat erilaiset. Tämä on yksi syy mitattujen ja simuloitujen äänitehokertoimien eroavuuksiin keskimmaisilla terssikaistoilla.

Tässä työssä esitettyä mittausmenetelmää sovellettiin Wärtsilä Vasa 4R32 moottorin lähdeominaisuuksien arvioimiseen tasoaltoaueen yläpuolella. Kuvasta 3 nähdään, että yksittäisiä mikrofoneja käyttämällä mitattu äänitehotaso on huomattavasti korkeampi kuin esitettyllä menetelmällä. Keskiarvostettujen painotettujen ristispektrien käyttö poistaa virtauksen aiheuttaman näennäisäänen vaikutusta te-

hokkaasti etenkin korkeammilla taajuuksilla. Voidaan todeta, että esitetty menetelmä soveltuu tasoaaltoalueen yläpuolisten lähdeominaisuuksien määrittämiseen.

## KIIITOKSET

Työ on tehty VTT:n ja Ruotsin kuninkaallisen teknillisen korkeakoulun KTH:n yhteisprojektissa Wärtsilä Power Plantsin tukemana. Ohjaajana on toiminut Professori Mats Åbom KTH:lta ja mittausasiantuntijana Heikki Isomoisio VTT:ltä.

## VIITTEET

- [1] Nousiainen E, Hankaniemi V, Veijanen V, Tanttari J, Isomoisio H, Uosukainen S, & Hyrynen J, Mäntämoottorivoimalaitoksen meluntorjunnan paras käytettävissä oleva tekniikka, Akustiikkapäivät Tampere, 2011.
- [2] Hynninen A, Turunen R, Åbom M, & Bodén H, Acoustic source data for medium speed IC-engines, *Journal of Vibration and Acoustics*, **134**(2012), 051008.
- [3] Munjal M L, *Acoustics of Ducts and Mufflers with Application to Exhaust and Ventilation System Design*, John Wiley & Sons, New York, 1987.
- [4] Bodén H, On multi-load methods for determination of the source data of acoustic one-port sources, *Journal of sound and vibration*, **180**(1995) 5, 725–743.
- [5] Chung J & Blaser D, Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties. I. theory II. experiment, *The Journal of the Acoustical Society of America*, **68**(1980), 907–921.
- [6] Uosukainen S, *Akustinen kenttäteoria*, Aalto-yliopisto, Espoo, 2012.
- [7] Hynninen A & Åbom M, Procedure to estimate the in-duct sound power in the high frequency range with non-plane waves, Proceedings of ASME NCAD meeting, 2012.
- [8] Åbom M & Bodén H, Error analysis of two-microphone measurements in ducts with flow, *The Journal of the Acoustical Society of America*, **83**(1988), 2429.