

PAKOPUTKEN PÄÄN MUODON VAIKUTUS ÄÄNENSÄTEILYYN

Seppo Uosukainen¹, Virpi Hankaniemi², Mikko Matalamäki²

¹ Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy
Rakennedynamiikka ja vibroakustiikka
PL 1000
02044 VTT
etunimi.sukunimi@vtt.fi

² Wärtsilä Finland Oy
Energy Solutions
PL 252
65101 VAASA
etunimi.sukunimi@wartsila.com

Tiivistelmä

Laippoja ja lyhyitä torvia voidaan käyttää pystysuuntaisen pakoputken päässä äänen suuntaamiseksi pääosin ylöspäin maahan kohdistuvan äänen minimoimiseksi. Jos keskisuuret ja suuret taajuudet ovat vaimennuksen kannalta tärkeitä, lyhyt torvielementti putken päässä on paras vaihtoehto. Jos pienet taajuudet ovat relevantteja, suuri laippa putken päässä on parempi vaihtoehto. Kartiotorvilla saadaan pieni äänitehon kasvu maata kohti pienillä taajuuksilla, sitä pienempi, mitä lyhyempi torvi on. Suurilla taajuuksilla äänitehon vähentyminen maata kohti voi olla luokkaa 5 – 17 dB. Laipat eivät vahvista maata kohti tulevaa ääntä millään taajuuksilla, paitsi vähän aivan putken lähialueella pienillä taajuuksilla. Pienillä taajuuksilla suuremmat laipat toimivat parhaiten. Suuremmilla taajuuksilla eri kokoisten laippojen toimintakyvyllä ei ole paljoa eroa ja äänitehon vähentyminen maata kohti voi olla luokkaa 1 – 6 dB.

1 JOHDANTO

Akustisia torvia käytetään kahdesta syystä. Ensiksi ne parantavat hyötysuhdetta kaiuttimiin liitettynä, joten torvea käytettäessä saadaan suurempi ääniteho. Toiseksi ne aiheuttavat voimakkaan suuntaavuuden, jonka tähden torven apertuurin normaalisuuntaan saadaan enemmän ja poikittaissuuntiin vähemmän äänitehoa.

On herännyt kysymys, voiko voimalaitoksen pakoputkien päähän sijoitettuja torvielementtejä käyttää suuntaamaan ääntä pääosin ylöspäin äänen minimoimiseksi maan pinnalla. Aihetta on tutkittu Wärtsilä Finland Ltd Energy Solutionsin rahoittamassa Sopeva-hankkeessa sekä analyyttisellä että numeerisella lähestymistavalla. Tässä esitetään joitakin jälkimmäisestä saatuja tuloksia.

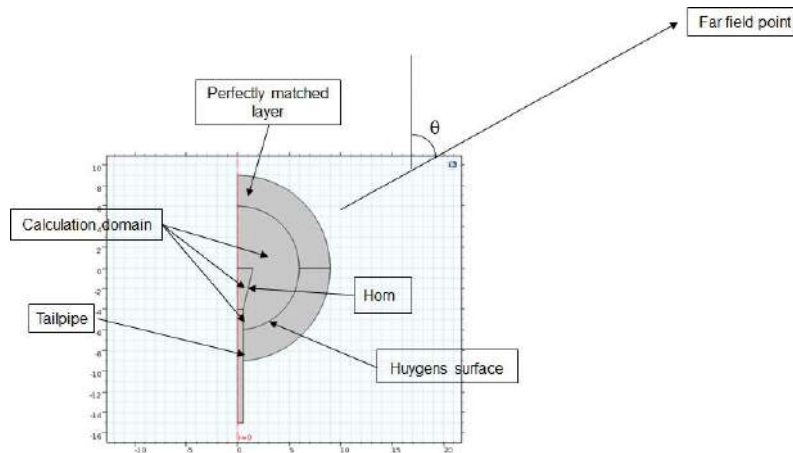
Häntäputki – torvi -konstruktion akustista toimintaa on simuloitu FEM-pohjaisella Comsol Multiphysics -ohjelmistolla. Lähtökohtana on ollut aksiaalisymmetrinen 2D-geometria,

jossa on PML-alue (**P**erfectly **M**atched **L**ayer) pakoputken pää ympärillä. Kaukokentän suuntavuussimuloinnit perustuvat BEM-laskentaan Huygensin pinnalta.

2 MALLI

2.1 Geometria

Kuvassa 1 on esitetty Comsol-mallin tyypillinen geometrinen sijoittelu. Häntäputken ja torven kokonaispituus on 15 m. Kartiotorven pituuksina on käytetty 0.5, 1, 2, 4 ja 8 m. Torven apertuurin halkaisijana on käytetty 3 m ja häntäputken halkaisijana on käytetty 1.1 m. Referenssigeometriana on käytetty 15 m:n pituista suoraa putkea halkaisijaltaan 1.1 m. Myös rakenteita, joissa torvi on korvattu laipalla ulkohalkaisijaltaan 2, 3 ja 4 m, on käytetty. Edelleen muunkinlaisia geometrisia rakenteita on käytetty, mutta niitä ei käsitellä tässä paperissa.



Kuva 1. Tyypillinen geometrinen sijoittelu.

Huygensin pinnan halkaisija on ollut 12 m paitsi 8 m pitkällä torvella se on ollut 24 m. Pinta sijaitsi PML-alueen sisäreunalla. PML-alueen paksuus on ollut 3 m.

2.2 Muita parametreja

Herätteenä on käytetty tasoaltoa häntäputken alaosassa. Lämpötila häntäputkessa ja torvessa on oletettu olevan 357 °C. Näiden ulkopuolella lämpötilajakauma on laskettu Comsolilla. Taajuusresoluutiona on ollut 1 Hz taajuusalueella 1 – 300 Hz ja 10 Hz taajuusalueella 300 – 1000 Hz. Kulmaresoluutiona on käytetty 1 astetta.

3 SIMULOINNIT

3.1 Comsol-simuloinnit

3.1.1 Lämpötila

Ilman lämpölähteitä ja staattista virtausta lämpötila T noudattaa Laplacen yhtälöä

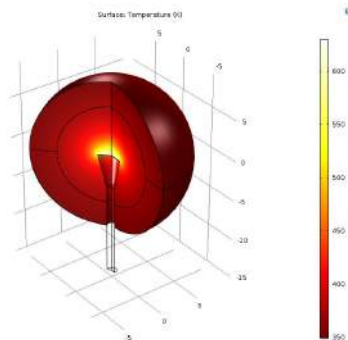
$$\nabla^2 T = 0. \quad (1)$$

Pallosymmetrisessä tapauksessa tämä johtaa ratkaisuun funktiona etäisyydestä r

$$T = (T_1 - T_0) \frac{r_1}{r} + T_0, \quad (2)$$

missä T_1 on lämpötila r_1 -säteisen pallon pinnalla, jonka keskipiste on origossa $r = 0$, ja T_0 on ympäristön lämpötila (raja-arvo, kun $r \rightarrow \infty$).

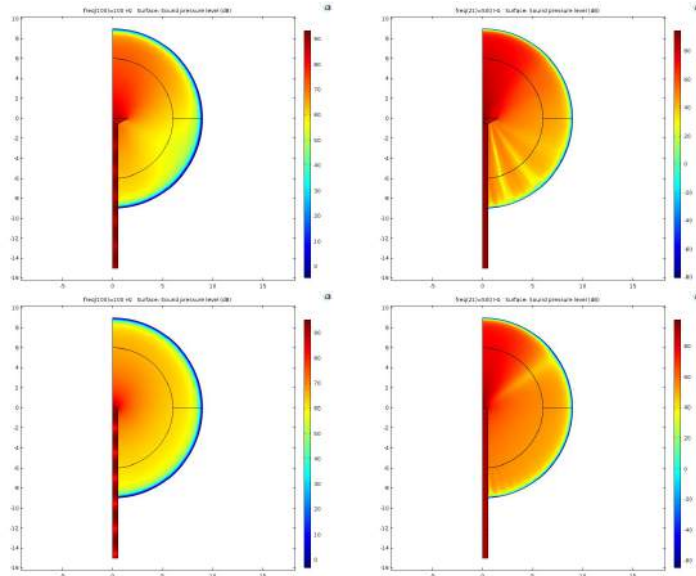
Tätä lauseketta on käytetty approksimaationa uloimman laskentapinnan lämpötilan laske-
miseksi käyttäen torven apertuurin lämpötilaa 630.15 K (357 °C) suureena T_1 , lämpötilaa
293.15 K (20 °C) suureena T_0 ja torven apertuurin sädettä suureena r_1 . Lämpötilajakauma
häntäputken ja torven ulkopuolella on laskettu Comsolilla käyttäen näitä lämpötilan reu-
naehtoja (apertuurissa ja uloimmalla laskentapinnalla). Esimerkki lämpötilajakaumasta on
esitetty kuvassa 2.



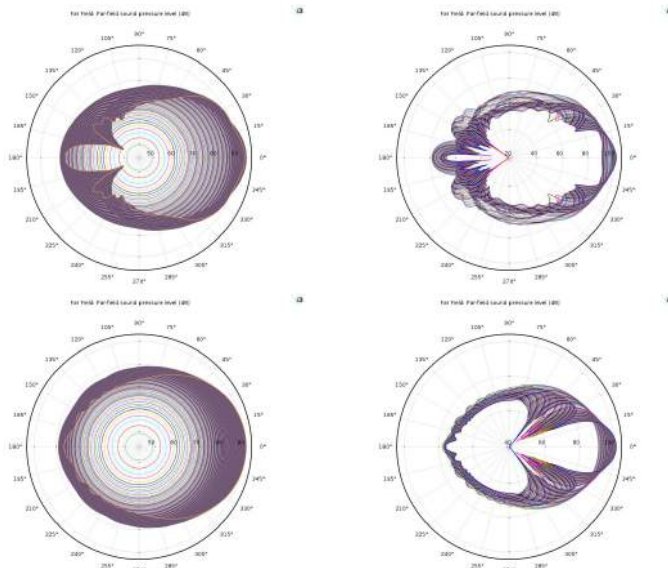
Kuva 2. Laskettu lämpötilajakauma, kun torven pituus on 4 m.

3.1.2 Äänikentät

Geometrian ympärillä on käytetty PML-aluetta uloimmasta laskentapinnasta tulevien heijastusten eliminoimiseksi kuvan 1 mukaan. Esimerkkejä lasketuista äänenpainetasojen jakaumista on esitetty kuvassa 3. Kompleksisesta äänenpainejakaumasta Huygensin pinnalla on laskettu kaukokentän äänenpainetasot taajuuden ja kulman funktioina. Esimerkkejä näistä on esitetty kuvassa 4. Laskennat on tehty kaikilla geometriilla ja referenssinä toimivalle suoralle putkelle. Kaukokentän tulokset on exportoitu myöhempiä MATLAB-laskelmia varten.



Kuva 3. Äänenpainetasojen jakauma, ylempi: 0.5 m pitkä kartiotorvi, alempi: referenssiputki, vasen: 100 Hz, oikea: 500 Hz.

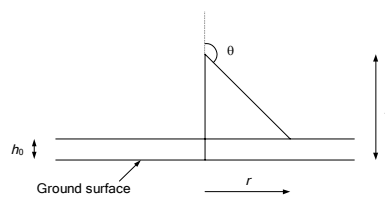


Kuva 4. Kaukokentän äänenpainetasoja, ylempi: 0.5 m pitkä kartiotorvi, alempi: referenssiputki, vasen: taajuudet 1 – 300 Hz, oikea: taajuudet 300 – 1000 Hz. Kulma 0 suuntautuu ylöspäin.

3.2 MATLAB-simuloinnit

Äänenpaineet integroitiin (tehollisina) yli kulma-alueiden, jotka vastasivat valittuja horisontaalisia etäisyysalueita pakoputken keskiosaan nähden käyttäen kuvasta 5 saatavaa kulma-etäisyys -yhteyttä

$$\theta = \pi - \arctan\left(\frac{r}{h - h_0}\right), \quad (3)$$



Kuva 5. Parametrit ja koordinaatit $\theta - r$ -riippuvuudessa.

Aperttuuri oli korkeudella $h = 27.5$ m ja teho laskettiin korkeudella $h_0 = 1.5$ m maan pinnasta. Suhteelliset tehot L_{wprop} (desibeleissä) laskettiin kunkin geometrian integroiduista tehoista P ja referenssiputken tehosta P_{ref} lausekkeella

$$L_{wprop} = 10 \log_{10} \left(\frac{P}{P_{ref}} \right). \quad (4)$$

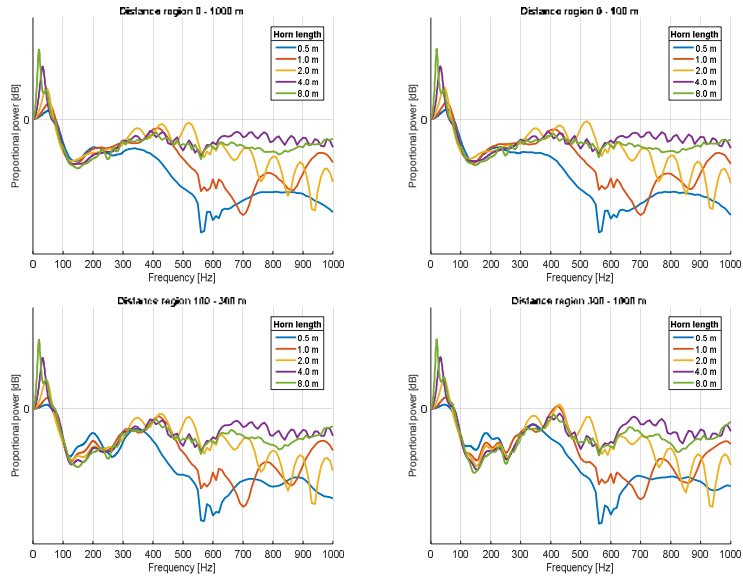
4 TULOKSIA

4.1 Kartiotorvet

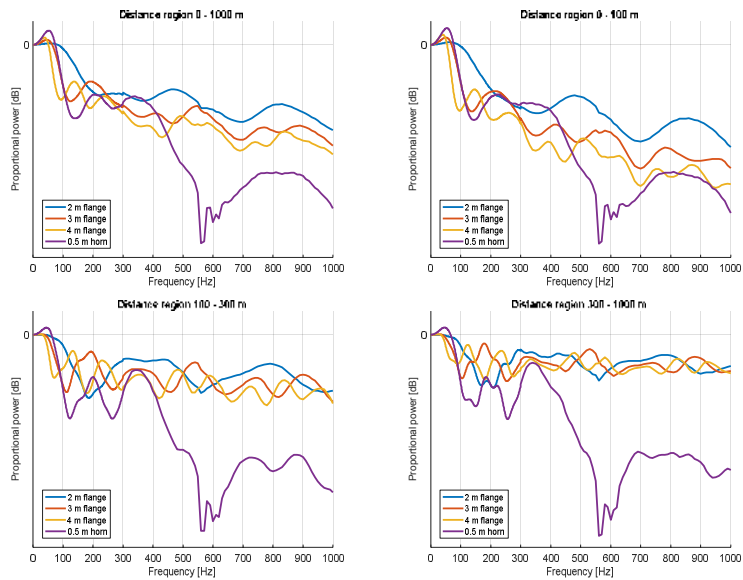
Häntäputki – kartiotorvi -rakenteen suhteellisia tehoja on esitetty kuvassa 6 neljälle etäisyysalueelle. Alle 100 Hz:n taajuuksilla on pieni tehon vahvistuma, sitä pienempi, mitä lyhyempi torvi on. Suuremmilla taajuuksilla ei käytännössä esiinny tehon vahvistumia. Yli 400 Hz:n taajuuksilla lyhyimmällä torvella on paras ääntä vähentävä vaikutus kaikilla etäisyysalueilla, ollen välillä 5 – 17 dB. Nähdään, että lyhin torvi on toimivin ratkaisu. Häntäputken ensimmäisen symmetrisen ei-tasoaaltomuodon rajataajuus on 557 Hz. Tämän vaikutus näkyy selkeästi kuvassa 6 miniminä suhteellisessa tehossa ja voimakkaimmin lyhyimmässä torvessa, koska se on puolen aallonpituuden resonanssissa rajataajuudella.

4.2 Laipat

Koska lyhin torvi on osoittautunut parhaaksi ratkaisuksi, kokeiltiin lyhentää sitä edelleen pituuteen 0 m, jolloin itse asiassa torvi korvautuu laipalla. Kuvassa 7 on esitetty tuloksia yhdessä lyhyimmän torven kanssa. Nähdään, että laipat eivät vahvista ääntä millään taajuuksilla paitsi alle 100 Hz:n taajuuksilla 100 m pienemmillä etäisyyksillä, jossa vahvistuma on kuitenkin pienempi kuin lyhyimmällä torvella. Yli 100 m:n etäisyyksillä ja alle 100 Hz:n taajuuksilla suurimmat laipat ovat parempia. Samoilla etäisyyksillä ja yli 100 Hz:n taajuuksilla laippojen toiminnassa ei ole suuria eroja, joillakin taajuusalueilla jokin niistä on paras ja joillakin toisilla taajuusalueilla taas jokin toinen, vaimennuksen ollessa luokkaa 1 – 6 dB. Näillä etäisyyksillä ja taajuuksilla lyhyt torvi on paras vaihtoehto.



Kuva 6. Suhteellisia tehoja eri etäisyysalueilla viidellä kartiotorven pituudella.



Kuva 7. Suhteellisia tehoja eri etäisyysalueilla rakenteille, joissa on eri ulkohalkaisijaisia laippoja tai lyhyt kartiotorvi.