Aalto University

OPEN ACCESS

This is an electronic reprint of the original article.
This reprint may differ from the original in pagination and typographic detail.

Lokki, Tapio

Akustiikkapäivät 2019

Julkaistu: 28/10/2019

Document Version
Publisher's PDF, also known as Version of record

Published under the following license:
CC BY

Please cite the original version:
Lokki, T. (2019). *Akustiikkapäivät 2019: Oulu, 28. - 29.10.2019: Artikkelit ja ohjelma* . (Akustiikkapäivät). Akustinen Seura ry. http://www.akustinenseura.fi/wp-content/uploads/2019/10/akustikkapaivat_2019.pdf

This material is protected by copyright and other intellectual property rights, and duplication or sale of all or part of any of the repository collections is not permitted, except that material may be duplicated by you for your research use or educational purposes in electronic or print form. You must obtain permission for any other use. Electronic or print copies may not be offered, whether for sale or otherwise to anyone who is not an authorised user.

Akustinen Seura ry
Acoustical Society of Finland

Akustiikkapäivät 2019
Oulu, 28. - 29.10.2019
Artikkelit ja ohjelma

toimittaja:
Tapio Lokki

Akustinen Seura ry
Espoo 2019
ISSN 1236-8202
ISBN 978-952-60-3784-4 (vain verkkojulkaisu)

SISÄLTÖ

Alkusanat 3

Hieman historiaa 4

Akustiikkapäiviä 2019 tukemassa 5

Seuran toiminta lyhyesti 6

Seuran toimihenkilöt 7

Akustiikkapäivät 2019

- Ohjelma 8
- Artikkeleiden sisällysluettelo 10
- Artikkelit 14

ALKUSANAT

Vuoden 2019 Akustiikkapäivät järjestetään ensimmäistä kertaa päivien historiassa Oulussa. Konferenssipaikkana on hotelli Lasaretti Oulun Merikosken rannassa. Konferenssi on ainoa suomen kielinen akustiikan alan konferenssi maailmassa ja tarjoaa laajan kattauksen ajankohtaista tietoa akustikasta. Kuten tästä kirjasta selviää, on maassamme todella korkeatasoista ja aktiivista tutkimusta ja toimintaa akustiikan alueella.

Akustiikkapäivien esitelmissä nähdään ja kuullaan tänä vuonna laajasti eri akustiikan osa-alueilta, mutta erityisesti askeläänieneristyksestä sekä ympäristömelusta ja sen häiritsevyydestä. Aiheiden laaja kirjo osoittaa kuinka laajalla alalla maamme akustikot toimivat ja antaa hyvän katsauksen akustikkojen toimintaan Suomessa vuonna 2019. Toivottavasti nämä esitelmät lisäävät ymmärrystä äänestä niin asiantuntijoiden kuin muidenkin lukijoiden keskuudessa.

Tervetuloa Ouluun !

Prof. Tapio Lokki, Aalto-yliopisto
DI Otto Puomio, Aalto-yliopisto

HIEMAN HISTORIAA

Akustiikkapäivät 1989 -julkaisussa kerrattiin lyhyesti Akustiikkapäivien syntyä seuraavin sanoin:

”Kokoukset käynnistyivät maaliskuussa 1982 puolen päivän pituisella tilaisuudella. Seuraavan vuoden lokakuussa ohjelmaa jo koko päiväksi Akustisen Seuran 40-vuotisjuhlan yhteyteen. Marraskuussa -84 ja toukokuussa -86 pidettyjen päivien jälkeen tahti hiljeni, vaikka Akustiikkapäivä-perinteestä toivottiin pysyvää ja vuotuista tapahtumaa…

… Nyt Seuran jäsenet ja muutkin ovat tarjonneet runsaasti esitelmiä; niiden määrä osoittaa lupaavaa kasvua, ja joukossa on ilahduttavan paljon tuoreita voimia. Tällä kertaa ilmoittautui alunperin 22 esitelmänpitäjää, ja tähän julkaisuun asti pääsi 20, kun aiemmin määrä on liikkunut tusinan tienoilla. Jos kehitys jatkuu, on seuraavan kerran järjestelyissä totuttu yhden päivän kesto vaarassa ylittyä...”

Lähde: *Toimitus Akustiikkapäivät 1989 (Tapio Lahti, Jukka Linjama, Jussi Pekkarinen)*

AKUSTIIKKAPÄIVÄT KAUTTA AIKOJEN

1. Akustiikkapäivä 16.3.1982	Espoo	(9 esitelmää)
2. Akustiikkapäivä 21.10.1983	Helsinki	(13 esitelmää)
3. Akustiikkapäivä 16.11.1984	Espoo	(14 artikkelia)
4. Akustiikkapäivä 14.5.1986	Helsinki	(11 artikkelia)
5. Akustiikkapäivä 28.9.1989	Vantaa	(20 artikkelia)
6. Akustiikkapäivä 10.10.1991	Vantaa	(17 artikkelia)
7. Akustiikkapäivä 20.10.1993	Helsinki	(14 artikkelia)
8. Akustiikkapäivä 25.-26.10.1995	Tampere	(15 artikkelia)
9. Akustiikkapäivät 8.-9.10.1997	Espoo	(23 artikkelia)
10. Akustiikkapäivät 4.-5.10.1999	Tampere	(24 artikkelia)
11. Akustiikkapäivät 8.-9.10.2001	Espoo	(21 artikkelia)
12. Akustiikkapäivät 6.-7.10.2003	Turku	(26 artikkelia)
13. Akustiikkapäivät 26.-27.9.2005	Kuopio	(27 artikkelia)
14. Akustiikkapäivät 27.-28.9.2007	Espoo	(27 artikkelia)
15. Akustiikkapäivät 14.-15.5.2009	Vaasa	(42 artikkelia)
16. Akustiikkapäivät 11.-12.5.2011	Tampere	(64 artikkelia)
17. Akustiikkapäivät 22-23.5.2013	Turku	(42 artikkelia)
18. Akustiikkapäivät 1-2.9.2015	Kuopio	(51 artikkelia)
19. Akustiikkapäivät 24-25.8.2017	Espoo	(53 artikkelia)
20. Akustiikkapäivät 28-29.10.2019	Oulu	(52 artikkelia)

Lähde: *Akustiikkapäivät -julkaisujen 1984 - 2013 sisällysluettelot ja ”Arkistojen kertomaa Seuran 50-vuotistaipaleelta”, Eero Lampio, 1993*

AKUSTIIKKAPÄIVIÄ 2019 TUKEMASSA

Näytteilleasettajat:

A-insinöörit Oy
Akukon Oy
Christian Berner Oy
Comsol Oy
Ecophon Oy
Genelec Oy
HEAD acoustics GmbH
Helimäki Akustikot Oy
(osa Sitowise-konsernia)
Knauf Oy
Lumir Oy
MIP Electronics Oy
Paroc Group Oy
Qlu Oy
Rockfon /Rockwool Finland Oy
Turun ammattikorkeakoulu
Vahanen-Halme Acoustics Oy
Vibratec Akustikprodukter Ab
Yeseco Oy

SEURAN TOIMINTA LYHYESTI

Akustinen Seura ry. toimii yhdyssiteenä akustiikasta kiinnostuneiden eri alojen henkilöiden, kuten foneetikkojen, fysiologien, fyysikkojen, insinöörien, muusikkojen ja opiskelijoiden välillä. Yhdistys kehittää akustiikan tutkimusta, koulutusta, julkaisutoimintaa ja suomenkielistä sanastoa.

Kokouksista, esitelmätilaisuuksista, teemapäivistä, opintoretkeilyistä ja yhteismatkoista tiedotetaan jäsenille kirjeillä tai sähköpostilla. Tutkimusta edistetään tukemalla suomalaisten esitelmöitsijöiden kokousmatkoja sekä ylläpitämällä yhteyksiä ulkomaisiin opetus- ja tutkimuslaitoksiin. Yhdistys antaa lausuntoja, tiedottaa kansainvälisistä kokouksista ja osallistuu kotimaisten asiantuntijaelinten toimintaan. Se tukee alan oppikirjojen julkaisua ja sen piirissä on laadittu suomenkielinen akustiikan sanasto.

Yhteistyötä harjoitetaan useiden kotimaisten yhdistysten kanssa, ja seura on jäsenenä seuraavissa kansainvälisissä järjestöissä:

EAA	European Acoustics Association
I-INCE	International Institute of Noise Control Engineering
ICA	International Commission on Acoustics
NAA	Nordic Acoustics Association

Akustisessa seurassa oli vuoden 2018 lopussa henkilöjäseniä 214 ja kannattajajäseniä 16. Varsinaiseksi jäseneksi voidaan hyväksyä akustiikasta kiinnostunut henkilö. Varsinaisen jäsenen jäsenmaksu on 30 euroa vuodessa, johon kuuluu mm. Acta Acustica united with Acustica -lehden online-palvelu. Kannattajajäseniksi seuraan voivat liittyä sen pyrkimyksiä kannattavat henkilöt, yhteisöt ja säätiöt. Kannattajajäsenen jäsenmaksu on 300 euroa vuodessa. Jäsenhakemuksen voi jättää seuran sihteerille, joka esittää sen yhdistyksen hallituksen kokoukselle hyväksymistä varten.

Ajankohtaisista tapahtumista löytyy tietoa seuran www-sivuilta: http://www.akustinenseura.fi.

SEURAN TOIMIHENKILÖT 2019

Hallituksen jäsenet:

Panu Maijala (pj.)
VTT
panu.maijala@vtt.fi

Henrik Möller (varapj.)
Akukon Oy
henrik.moller@akukon.fi

Virpi Hankaniemi
Wärtsilä Finland Oy
virpi.hankaniemi@wartsila.com

Timo Huhtala
A-Insinöörit Suunnittelu Oy
timo.huhtala@ains.fi

Jukka Linjama
Flexound Oy
jukka@flexound.com

Tapio Lokki
Aalto-yliopisto
tapio.lokki@aalto.fi

Olli Santala
Helimäki Akustikot Oy
olli.santala@helimaki.fi

Vesa Välimäki
Aalto-yliopisto
vesa.valimaki@aalto.fi

Sihteeri:

Otto Puomio
Aalto-yliopisto
sihteeri@akustinenseura.fi

Akustinen Seura ry
Acoustical Society of Finland

AKUSTIIKKAPÄIVÄT 2019 – OHJELMA

	Maanantai 28.10.2019	
8:30	REKISTERÖINTI ALKAA	
8:55	TERVETULIAISSANAT	
	Askeläänеneristys	**pj. Olli Santala**
09:00-09:20	Askeläänеneristävyyden round robin -testi 2018	Jesse Lietzén ja Mikko Kylliäinen
09:20-09:40	Askeläänikojeen aiheuttama herätevoima puuvälipohjilla	Jesse Lietzén, Mikko Kylliäinen, Juha Miettinen ja Sami Pajunen
09:40-10:00	Lattianpäällysteen askeläänеneristävyyden parannusvaikutus CLT-välipohjilla	Saveli Valjakka, Jesse Lietzén, Mikko Kylliäinen ja Sami Pajunen
10:00-10:20	Kelluvien laattojen askeläänеneristävyyden analyyttinen laskenta	Ville Kovalainen, Jesse Lietzén ja Mikko Kylliäinen
10:20-10:40	*Yritysesittelyt*	*Yksi minuutti / yritys*
10:40-11:00	KAHVI JA YRITYSTEN STÄNDIT	
	Askeläänеneristys ja välipohjat	**pj. Panu Maijala**
11:00-11:20	Uusi mittaluku askeläänеneristävyyden arvioimiseksi	Mikko Kylliäinen, Petra Virjonen ja Valtteri Hongisto
11:20-11:40	Ääneneristävyysmittausten mittalukujen erot kenttämittausaineiston perusteella	Olli Santala ja Erno Huttunen
11:40-12:00	Parametrinen laskentamalli puuvälipohjien askeläänеneristävyyden arviointiin	Pekka Latvanne, Mikko Kylliäinen, Ville Kovalainen ja Jesse Lietzén
12:20-13:20	LOUNAS	
	Teatterit, salit ja harjoitustilat	**pj. Vesa Välimäki**
13:20-13:40	Ahlmanin ammattiopiston musiikkitilat	Jussi Rauhala, Joose Takala ja Tuomas Pelli
13:40-14:00	Helsingin kaupunginteatterin peruskorjaus- ja laajennushankkeen akustiset haasteet	Matias Remes, Tuomas Pärnänen ja Perttu Korhonen
14:00-14:20	Turun Akatemiatalon perusparannus	Timo Huhtala, Ilkka Valovirta, Mikko Kylliäinen ja Joose Takala
14:20-14:40	Jyväskylä Sinfonian harjoitussalin korjaus	Henry Niemi, Mikko Kylliäinen, Jesse Lietzén ja Mikko Tarri
14:40-15:00	Opera hall orchestra pit acoustic	Henrik Möller, Jukka Pätynen ja Petri Lehto
15:00-15:20	TAUKO	
	Rakennukset ja avotoimistot	**pj. Henrik Möller**
15:20-15:40	Tampereen pääkirjasto Metson perusparannus	Antti Mikkilä, Jesse Lietzén ja Mikko Kylliäinen
15:40-16:00	Kaarina-talon akustiset ratkaisut	Joose Takala, Mikko Kylliäinen ja Timo Huhtala
16:00-16:20	Avotoimiston huoneakustiikkamittausten epävarmuus	Jukka Keränen, Laura Labia ja Valtteri Hongisto
16:20-16:40	Ääniolosuhteiden kustannusvaikutukset avotoimistoissa	Joni Kemppainen, Mikko Kylliäinen, Henry Niemi ja Antti Mikkilä
16:40-17:10	KAHVI + PIENTÄ PURTAVAA	
	Akustiikkaa	**pj. Virpi Hankaniemi**
17:10-17:30	Akustiikan osa-alueet ja liiketoiminta Suomessa	Rauno Pääkkönen
17:30-17:50	Työpaikan melualtistusmääritysten uusi aika	Heli Koskinen ja Tapani Ollila
17:50-18:10	Paavo Arni (1905–1969) akustikkona	Mikko Kylliäinen
18:10-18:30	Akustiikka Wikipediassa	Vesa Välimäki, Panu Maijala ja Otto Puomio
18:30-19:00	Hybridihankkeiden akustinen suunnittelu Ääniympäristö hybridirakentamisessa	Janne Hautsalo, Jukka Ahonen, Henri Penttinen ja Olli Salmensaari / Pekka Taina ja Erno Huttunen
19:00-19:10	Akustiikkasuunnittelun tehtäväluettelon uudistus	Pekka Taina
19:10-19:30	Akustinen Seura ry:n syyskokous	
19:30-22:00	**Postereihin ja yrityksiin tutustumista sekä ruokaa ja juomaa**	
	Istuimeen integroidun äänituntumalaitteen värähtelyn optimointi pienillä taajuuksilla	Jukka Linjama, Seppo Uosukainen, Timo Avikainen ja Tommi Immonen
	Vaimennusmateriaalin sijoituksen vaikutus huoneakustiikkaan	Jose Cucharero Moya, Tuomas Hänninen ja Tapio Lokki
	Auton pakoputkiston akustinen mallintaminen	Juho Liski ja Vesa Välimäki
	Pölyn ja maalin vaikutus kipsilevyrakenteisen kaiuntahuoneen jälkikaiunta-aikaan	Anttoni Kananen
	Uusien äänenvaimenninratkaisujen kehittäminen ja ainetta lisäävä valmistus	Jukka Tanttari, Antti Hynninen, Heikki Isomoisio, Erin Komi, Seppo Uosukainen, Virpi Hankaniemi ja Mikko Matalamäki
	Fysiikkapohjaisen mallinnuksen käyttö kielisoitinten suunnittelussa ja rakennuksessa	Henna Tahvanainen
	Optimizing noise barriers with COMSOL multiphysics	Patrick Grahn ja Mads Herring Jensen
	Noise mitigation of old Årsta railway steel bridge	René Smidt Lützen ja Anders Olsen
	Isolated Fitness & Gym Floors - The next Generation	Marina Rodrigues, Paulo Pinto ja Zoltan Horvath

	Tiistai 29.10.2019	
	Ympäristömelu	**pj. Valtteri Hongisto**
08:00-08:20	Tuulivoimalan lavan aiheuttama häiriövirtaus ja melu	Matti A Ranta ja Laila Hosia
08:20-08:40	Tuulivoimalamelun pitkäaikaismittaukset ulkotiloissa. Kokemuksia, havaintoja sekä kehitysideoita	Denis Siponen
08:40-09:00	Hiljainen voimalaitos – haave vai realismia?	Virpi Hankaniemi, Mikko Matalamäki ja Esa Nousiainen
09:00-09:20	Voimalaitoksen pakokanavan pientaajuusmelupäästö ja raja-arvojen haasteet	Mikko Matalamäki, Virpi Hankaniemi ja Esa Nousiainen
09:20-09:40	Experimental ja simulation study on large engine exhaust noise	Kari Saine ja Zengxin Gao
09:40-10:00	Ympäristömelun mittaaminen käyttäen automaattista lähteiden tunnistusta	Panu Maijala, Toni Heittola ja Tuomas Virtanen
10:00-10:20	KAHVI	
	Melu, värähtely ja koneakustiikka	**pj. Timo Huhtala**
10:20-10:40	Laivojen vedenalaisen melun tutkimusta VTT:llä	Antti Hynninen, Jukka Tanttari, Seppo Uosukainen, Ville Viitanen ja Tuomas Sipilä
10:40-11:00	Saliakustiikkaa – kuntosalin tuottamien melu- ja tärinähaittojen torjuntakeinoja	Henri Penttinen, Jukka Pätynen, Sakari Tervo ja Mats Heikkinen
11:00-11:20	Käyttäjäkeskeinen melulähteiden luokittelu työkoneissa	Marko Antila, Jari Kataja, Lasse Lamula, Heikki Isomoisio ja Seppo Rantala
11:20-11:40	Värähtelyn eteneminen rakenteissa ja äänensäteily	Lasse Lamula ja Kari Saarinen
11:40-12:00	Raideliikenteen aiheuttama välipojan värähtely - Case: Lauttasaaren metroaseman tekniikkatila	Mats Heikkinen
12:00-13:00	LOUNAS	
	Audio- ja mittaustekniikka	**pj. Jukka Linjama**
13:00-13:20	Kaiuttimen äänekkyyden optimointi musiikille	Juha Holm
13:20-13:40	Kaiuttimien suuntaavuus: suureet ja esitystavat	Olli Kantamaa
13:40-14:00	EQ	Vesa Välimäki, Juho Liski ja Jussi Rämö
14:00-14:20	Ehdotus Musiikkitalon konserttisalin akustiikan parantamiseksi	Tapio Lokki
14:20-14:40	KAHVI	
	Anojanssi	**pj. Tapio Lokki**
14:40-15:00	Anojanssi –projektin tulokset: ympäristömelun häiritsevyys	Valtteri Hongisto, Jenni Radun, Ville Rajala, Henna Maula, Jukka Keränen, Pekka Saarinen, Petra Virjonen ja Jarkko Hakala
15:00-15:20	Amplitudimoduloidun äänen häiritsevyys ja sanktio	Valtteri Hongisto ja Petra Virjonen
15:20-15:40	Tieliikennemelun häiritsevyys elinympäristössä eri äänitasoilla	Henna Maula, Valtteri Hongisto ja Pekka Saarinen
15:40-16:00	Murskaamomelun häiritsevyys elinympäristössä	Henna Maula, Valtteri Hongisto, Jukka Keränen ja Pekka Saarinen
16:00-16:20	Erityyppisten äänten fysiologiset, psykologiset ja suoriutumisvaikutukset	Jenni Radun, Valtteri Hongisto, Henna Maula, Ville Rajala, Darin Al-Ramahi ja Mika Scheinin
16:20-16:40	Tuulivoimamelun häiritsevyyteen liittyvät ei-akustiset ja akustiset tekijät	Jenni Radun ja Valtteri Hongisto
16:40-17:00	Impulssimaisen melun sanktiointi – psykoakustinen tutkimus	Ville Rajala ja Valtteri Hongisto
17:00	LOPPUSANAT	

AKUSTIIKKAPÄIVÄT 2019 – ARTIKKELIT

Askeläänеneristävyyden round robin -testi 2018 14
Jesse Lietzén ja Mikko Kylliäinen

Askeläänikojeen aiheuttama herätevoima puuvälipohjilla 20
Jesse Lietzén, Mikko Kylliäinen, Juha Miettinen ja Sami Pajunen

Lattianpäällysteen askeläänеneristävyyden parannusvaikutus CLT-välipohjilla 26
Saveli Valjakka, Jesse Lietzén, Mikko Kylliäinen ja Sami Pajunen

Kelluvien laattojen askeläänеneristävyyden analyyttinen laskenta 33
Ville Kovalainen, Jesse Lietzén ja Mikko Kylliäinen

Uusi mittaluku askeläänеneristävyyden arvioimiseksi 41
Mikko Kylliäinen, Petra Virjonen ja Valtteri Hongisto

Ääneneristävyysmittausten mittalukujen erot kenttämittausaineiston perusteella 47
Olli Santala ja Erno Huttunen

Parametrinen laskentamalli puuvälipohjien askeläänеneristävyyden arviointiin 55
Pekka Latvanne, Mikko Kylliäinen, Ville Kovalainen ja Jesse Lietzén

Ahlmanin ammattiopiston musiikkitilat 62
Jussi Rauhala, Joose Takala ja Tuomas Pelli

Helsingin kaupunginteatterin peruskorjaus- ja laajennushankkeen akustiset haasteet 70
Matias Remes, Tuomas Pärnänen ja Perttu Korhonen

Turun Akatemiatalon perusparannus 78
Timo Huhtala, Ilkka Valovirta, Mikko Kylliäinen ja Joose Takala

Jyväskylä Sinfonian harjoitussalin korjaus 84
Henry Niemi, Mikko Kylliäinen, Jesse Lietzén ja Mikko Tarri

Opera hall orchestra pit acoustic 92
Henrik Möller, Jukka Pätynen ja Petri Lehto

Tampereen pääkirjasto Metson perusparannus 100
Antti Mikkilä, Jesse Lietzén ja Mikko Kylliäinen

Kaarina-talon akustiset ratkaisut 106
Joose Takala, Mikko Kylliäinen ja Timo Huhtala

Avotoimiston huoneakustiikkamittausten epävarmuus 112
Jukka Keränen, Laura Labia ja Valtteri Hongisto

Ääniolosuhteiden kustannusvaikutukset avotoimistoissa 118
Joni Kemppainen, Mikko Kylliäinen, Henry Niemi ja Antti Mikkilä

Akustiikan osa-alueet ja liiketoiminta Suomessa 124
Rauno Pääkkönen

Työpaikan melualtistusmääritysten uusi aika 131
Heli Koskinen ja Tapani Ollila

Paavo Arni (1905–1969) akustikkona 137
Mikko Kylliäinen

Akustiikka Wikipediassa 146
Vesa Välimäki, Panu Maijala ja Otto Puomio

Hybridihankkeiden akustinen suunnittelu 154
Janne Hautsalo, Jukka Ahonen, Henri Penttinen ja Olli Salmensaari

Ääniympäristö hybridirakentamisessa 161
Pekka Taina ja Erno Huttunen

Tuulivoimalan lavan aiheuttama häiriövirtaus ja melu 165
Matti A Ranta ja Laila Hosia

Tuulivoimalamelun pitkäaikaismittaukset ulkotiloissa. Kokemuksia, havaintoja sekä kehitysideoita 173
Denis Siponen

Hiljainen voimalaitos – haave vai realismia? 181
Virpi Hankaniemi, Mikko Matalamäki ja Esa Nousiainen

Voimalaitoksen pakokanavan pientaajuusmelupäästö ja raja-arvojen haasteet 185
Mikko Matalamäki, Virpi Hankaniemi ja Esa Nousiainen

Experimental ja simulation study on large engine exhaust noise 190
Kari Saine ja Zengxin Gao

Ympäristömelun mittaaminen käyttäen automaattista lähteiden tunnistusta 196
Panu Maijala, Toni Heittola ja Tuomas Virtanen

Laivojen vedenalaisen melun tutkimusta VTT:llä 207
Antti Hynninen, Jukka Tanttari, Seppo Uosukainen, Ville Viitanen ja Tuomas Sipilä

Saliakustiikkaa – kuntosalin tuottamien melu- ja tärinähaittojen torjuntakeinoja 213
Henri Penttinen, Jukka Pätynen, Sakari Tervo ja Mats Heikkinen

Käyttäjäkeskeinen melulähteiden luokittelu työkoneissa 223
Marko Antila, Jari Kataja, Lasse Lamula, Heikki Isomoisio ja Seppo Rantala

Värähtelyn eteneminen rakenteissa ja äänensäteily 229
Lasse Lamula ja Kari Saarinen

Raideliikenteen aiheuttama välipojan värähtely - Case: Lauttasaaren metroaseman tekniikkatila 236
Mats Heikkinen

Kaiuttimen äänekkyyden optimointi musiikille 244
Juha Holm

Kaiuttimien suuntaavuus: suureet ja esitystavat 248
Olli Kantamaa

EQ 262
Vesa Välimäki, Juho Liski ja Jussi Rämö

Ehdotus Musiikkitalon konserttisalin akustiikan parantamiseksi 270
Tapio Lokki

Anojanssi –projektin tulokset: ympäristömelun häiritsevyys 276
Valtteri Hongisto, Jenni Radun, Ville Rajala, Henna Maula, Jukka Keränen, Pekka Saarinen, Petra Virjonen ja Jarkko Hakala

Amplitudimoduloidun äänen häiritsevyys ja sanktio 284
Valtteri Hongisto ja Petra Virjonen

Tieliikennemelun häiritsevyys elinympäristössä eri äänitasoilla 288
Henna Maula, Valtteri Hongisto ja Pekka Saarinen

Murskaamomelun häiritsevyys elinympäristössä 293
Henna Maula, Valtteri Hongisto, Jukka Keränen ja Pekka Saarinen

Erityyppisten äänten fysiologiset, psykologiset ja suoriutumisvaikutukset 297
Jenni Radun, Valtteri Hongisto, Henna Maula, Ville Rajala, Darin Al-Ramahi ja Mika Scheinin

Tuulivoimamelun häiritsevyyteen liittyvät ei-akustiset ja akustiset tekijät 301
Jenni Radun ja Valtteri Hongisto

Impulssimaisen melun sanktiointi – psykoakustinen tutkimus 307
Ville Rajala ja Valtteri Hongisto

Istuimeen integroidun äänituntumalaitteen värähtelyn optimointi pienillä taajuuksilla 313
Jukka Linjama, Seppo Uosukainen, Timo Avikainen ja Tommi Immonen

Vaimennusmateriaalin sijoituksen vaikutus huoneakustiikkaan 321
Jose Cucharero Moya, Tuomas Hänninen ja Tapio Lokki

Auton pakoputkiston akustinen mallintaminen 327
Juho Liski ja Vesa Välimäki

Pölyn ja maalin vaikutus kipsilevyrakenteisen kaiuntahuoneen jälkikaiunta-aikaan 335
Anttoni Kananen

Uusien äänenvaimenninratkaisujen kehittäminen ja ainetta lisäävä valmistus 340
Jukka Tanttari, Antti Hynninen, Heikki Isomoisio, Erin Komi, Seppo Uosukainen, Virpi Hankaniemi ja Mikko Matalamäki

Optimizing noise barriers with COMSOL Multiphysics 346
Patrick Grahn ja Mads Herring Jensen

Noise mitigation of old Årsta railway steel bridge 356
René Smidt Lützen ja Anders Olsen

Isolated Fitness & Gym Floors - The next Generation 368
Paulo Pinto, Marina Rodrigues ja Zoltán Horváth

ASKELÄÄNENERISTÄVYYDEN ROUND ROBIN -TESTI 2018

Jesse Lietzén, **Mikko Kylliäinen**

Tampereen yliopisto
Rakennettu ympäristö
etunimi.sukunimi@tuni.fi

Tiivistelmä

Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry ja sen akustiikkatoimikunta järjesti syksyllä 2018 askeläänieristävyysmittausten round robin -testin. Testin tarkoituksena oli tarjota Suomessa ääneneristävyyden kenttämittauksia tekeville toimijoille mahdollisuus vertailla mittaustuloksiaan ja varmistaa niiden oikeellisuus. Testissä mitattiin kahden tilan välistä askeläänieristävyyttä pystysuuntaan standardin ISO 16283-2 mukaan ja mittaluvut määritettiin standardin ISO 717-2 mukaisesti. Mittaukset suoritettiin 1980-luvun lopulla rakennetussa betonielementtirunkoisessa toimistorakennuksessa ja tulokset saatiin 20 mittausryhmältä. Mittaajat määrittivät mittaustensa perusteella 1/3-oktaavikaistaiset askeläänitasot L'_{nT} ja L'_{n}, näistä lasketut yksilukuarvoiset mittaluvut $L'_{nT,w}$ ja $L'_{n,w}$ sekä spektripainotustermit C_I ja $C_{I,50\text{-}2500}$. Askeläänitasoluvun $L'_{nT,w}$ mittaustulosten keskiarvo oli 68,4 dB ja mittaluvun $L'_{n,w}$ keskiarvo 69,0 dB. Molempien mittalukujen keskihajonta oli 1,7 dB. Standardissa ISO 12999-1 esitettyihin keskihajontoihin verrattuna taajuuskaistaisten tulosten hajonnat olivat pääosin alhaisemmat. Standardin mukainen epävarmuus ylittyi 160 Hz keskitaajuudella ja yli 2000 Hz taajuuksilla. Testin perusteella syyt mittausepävarmuudelle olivat hajonta pienillä ja suurilla taajuuksilla ja yksi muista poikkeava mittaustulos. Poikkeava mittaustulos erosi muista erityisesti suurilla taajuuksilla, mikä saattoi johtua mittalaitteiston kalibroinnin puutteellisuudesta.

1 JOHDANTO

Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry ja sen akustiikkatoimikunta järjesti syksyllä 2018 askeläänieristävyysmittausten round robin -testin. Testin tarkoituksena oli tarjota Suomessa ääneneristävyyden kenttämittauksia tekeville toimijoille mahdollisuus vertailla mittaustuloksiaan ja varmistaa niiden oikeellisuus. Testissä mitattiin kahden tilan välistä askeläänieristävyyttä pystysuuntaan ja mittaustulokset saatiin 20 mittaajalta. Tampereen yliopiston laatima raportti testin tuloksista on esitetty lähteessä [1].

2 MITTAUKSET

RIL ry ja sen akustiikkatoimikunta kutsui akustisia mittauksia tekevät toimijat osallistumaan askeläänieristysmittausten round robin -testiin 6.6.2018. Kutsu lähetettiin suomalaisille ääneneristysmittauksia tekeville tutkimuslaitoksille, oppilaitoksille ja yrityksille. Mittauksiin ilmoittautuneille lähetettiin 4.9.2018 ohjekirje, jossa kerrottiin tarkemmin

© 2019 Jesse Lietzén ja Mikko Kylliäinen. Tämä on avoimesti julkaistu teos, joka noudattaa Creative Commons NIMEÄ 4.0 Ei sovitettu –lisenssiä (CC BY 4.0). Teosta saa kopioida, levittää, näyttää ja esittää julkisesti ja siitä saa luoda johdannaisteoksia, kunhan tekijän nimi ja lähde mainitaan asianmukaisesti.

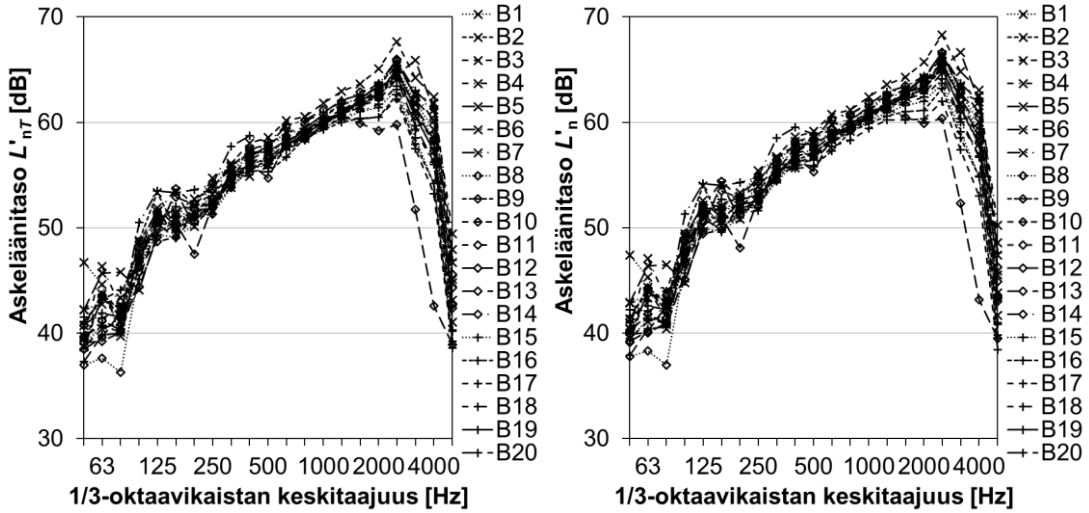
mittauspaikasta, ajanvarauksesta ja järjestelyistä. Mittaukset tehtiin kahden päällekkäisen tilan välillä pystysuuntaan betonielementtirunkoisessa 1980-luvun lopulla valmistuneessa toimistorakennuksessa. Välipohjarakenteena tilojen välillä oli 265 mm paksu ontelolaatasto, jonka päällä oli n. 35…55 mm paksu pintavalu ja lattianpäällysteenä kova muovimatto.

Mittaukset suoritettiin standardien ISO 16283-2 ja ISO 717-2 mukaisesti käyttäen askeläänikojetta äänilähteenä. Mittaajat määrittivät tuloksistaan 1/3-oktaavikaistaiset standardisoidut askeläänitasot L'_{nT} ja normalisoidut askeläänitasot L'_{n} sekä laskivat näistä vastaavasti standardisoidun askeläänitasoluvun $L'_{nT,w}$ ja normalisoidun askeläänitasoluvun $L'_{n,w}$ sekä spektripainotustermit C_I ja $C_{I,50\text{-}2500}$. Suomessa ei määräys- ja ohjearvoihin verrattaessa ilmoiteta spektripainotustermin $C_{I,50\text{-}2500}$ arvoa, jos se on alle 0 dB [2-4]. Tässä round robin -testissä haluttiin kuitenkin tarkastella spektripainotustermien hajontaa ja siksi kaikki spektripainotustermien arvot on esitetty.

Mittaajat kirjasivat saamansa tulokset ennalta määritettyyn tiedostoon, jotka lähetettiin testin järjestäjälle RIL ry:n toimistoon. Kunkin toimijan toimittamat mittaustulokset anonymisoitiin siten, että mittaustulosta ei voida yhdistää mittaajaan. Mittausryhmistä käytettiin merkintöjä B1…B20. Tutkimusraportissa [1] tuloksista määritettiin mm. aritmeettiset keskiarvot, minimi- ja maksimiarvot sekä otoskeskihajonnat.

3 TULOKSET

Mittaajien B1…B20 määrittämät 1/3-oktaavikaistaiset askeläänitasot L'_{nT} ja L'_{n} on esitetty käyräparvena kuvassa 1. Tulosten vaihtelu oli melko tasaista, mutta suurinta vaihtelu oli pienillä, alle 100 Hz taajuuksilla, ja suurilla, yli 2000 Hz taajuuksilla. Askeläänitasojen L'_{nT} taajuuskaistainen keskihajonta oli 0,6-4,4 dB ja askeläänitasojen L'_{n} 0,7-4,5 dB. Tulosten perusteella mittausryhmän B12 tulos oli muista poikkeava yli 2000 Hz taajuuksilla, jossa mittaajan määrittämät askeläänitasot ovat selkeästi muita alhaisemmat. Jos muista poikkeavaa mittaustulosta ei otettu huomioon, askeläänitasojen L'_{nT} keskihajonta oli 0,6-3,2 dB ja askeläänitasojen L'_{n} 0,7-3,3 dB.



Kuva 1. Askeläänitaso L'_{nT} (vas.) ja L'_{n} (oik.) 1/3-oktaavikaistoittain.

Standardisoidun askeläänitasoluvun $L'_{nT,w}$ ja spektripainotustermien C_I ja $C_{I,50\text{-}2500}$ sekä näiden summien keskiarvot, minimi- ja maksimiarvot sekä keskihajonnat on esitetty taulukossa 1. Vastaavat tulokset askeläänitasoluvulle $L'_{n,w}$ on esitetty taulukossa 2. Taulu-

koissa tulokset on esitetty sekä kaikkien mittaustulosten osalta että ilman muista poikkeavaa mittaajan B12 tulosta. Standardisoidun askeläänitasoluvun $L'_{nT,w}$ keskiarvo oli 68,4 dB kaikkien mittaustulosten osalta ja 68,6 dB ilman muista poikkeavaa mittaustulosta. Vastaavat tulokset askeläänitasoluvun $L'_{n,w}$ keskiarvolle olivat 69,0 dB ja 69,2 dB. Molempien askeläänitasolukujen keskihajonta oli 1,7 dB, kun kaikki mittaustulokset olivat mukana ja 1,4 dB ilman muista poikkeavaa mittaustulosta.

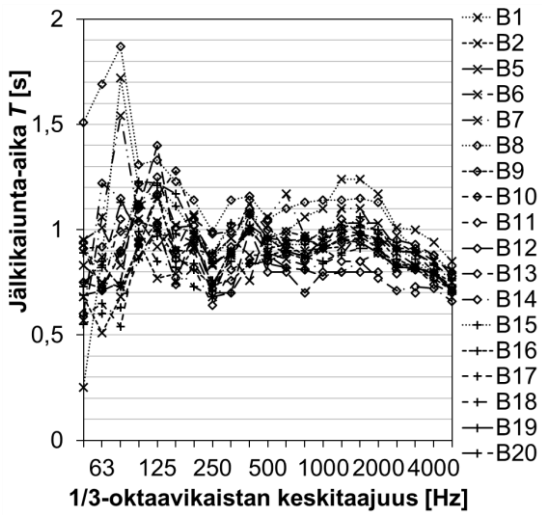
Taulukko 1. Askeläänitasolukujen $L'_{nT,w}$ ja spektripainotustermien ja näiden summien keskiarvo, minimi, maksimi ja keskihajonta. Soluissa vasemmalla kaikki tulokset, oikealla ilman poikkeavaa tulosta.

Mittaluku	Keskiarvo [dB]	Minimi [dB]	Maksimi [dB]	Keskihajonta [dB]
$L'_{nT,w}$	68,4 / 68,6	64 / 66	71 / 71	1,7 / 1,4
C_I	-12,6 / -12,7	-14 / -14	-10 / -12	0,9 / 0,7
$C_{I,50\text{-}2500}$	-12,5 / -12,7	-14 / -14	-10 / -12	0,9 / 0,7
$L'_{nT,w} + C_I$	55,8 / 55,9	54 / 54	58 / 58	1,1 / 1,1
$L'_{nT,w} + C_{I,50\text{-}2500}$	55,9 / 56,0	54 / 54	58 / 58	1,1 / 1,0

Taulukko 2. Askeläänitasolukujen $L'_{n,w}$ ja spektripainotustermien ja näiden summien keskiarvo, minimi, maksimi ja keskihajonta. Soluissa vasemmalla kaikki tulokset, oikealla ilman poikkeavaa tulosta.

Mittaluku	Keskiarvo [dB]	Minimi [dB]	Maksimi [dB]	Keskihajonta [dB]
$L'_{n,w}$	69,0 / 69,2	65 / 66	72 / 72	1,7 / 1,4
C_I	-12,5 / -12,7	-14 / -14	-10 / -12	0,8 / 0,6
$C_{I,50\text{-}2500}$	-12,5 / -12,7	-14 / -14	-10 / -12	0,8 / 0,6
$L'_{n,w} + C_I$	56,5 / 56,5	54 / 54	59 / 59	1,2 / 1,2
$L'_{n,w} + C_{I,50\text{-}2500}$	56,5 / 56,5	54 / 54	59 / 59	1,2 / 1,2

Askeläänitasojen, askeläänitasolukujen ja spektripainotustermien lisäksi osa mittaajista ilmoitti mittaamansa vastaanottohuoneen jälkikaiunta-ajan *T*. Mittaajien B1…B2 ja B5…B20 ilmoittamat jälkikaiunta-ajan tulokset on esitetty 1/3-oktaavikaistaisesti kuvassa 2. Tuloksista nähdään, että jälkikaiunta-ajan hajonta on suurinta pienillä, alle 160 Hz taajuuksilla.



Kuva 2. Jälkikaiunta-aika *T* 1/3-oktaavikaistoittain.

4 TULOSTEN TARKASTELU

4.1 Mittausmenetelmän vaikutus

Askeläänieneristävyyttä kuvaavien mittalukujen osalta voidaan todeta, että standardisoidun askeläänitasoluvun $L'_{nT,w}$ ja normalisoidun askeläänitasoluvun $L'_{n,w}$ keskihajonta oli yhtä suuri: 1,7 dB, kun kaikki mittaustulokset otettiin huomioon ja 1,4 dB, kun mittausryhmän B12 tulosta ei otettu huomioon. Askeläänitason L'_n perusteella määritettyjen spektripainotustermien C_I ja $C_{I,50\text{-}2500}$ keskihajonta oli 0,1 dB pienempi kuin standardisoidun askeläänitason L'_{nT} perusteella määritettyjen spektripainotustermien hajonta. Spektripainotustermien C_I ja $C_{I,50\text{-}2500}$ hajonta oli yhtä suurta, joten niiden perusteella pienten taajuuksien huomioon ottaminen ei tässä tapauksessa vaikuttanut tulosten hajontaan.

4.2 Mittalaitteiston kalibroinnin vaikutus

Mittaajat esittivät tiedot käyttämästään mittalaitteistosta ja sen kalibroinnista. Tietojen perusteella voitiin havaita, että mittalaitteiston kalibroinnissa oli puutteita mittaajilla B3 ja B12. Näistä mittaajan B12 tulos havaittiinkin jo edellä muista poikkeavaksi suurilla, yli 2000 Hz taajuuksilla. Lisäksi mittaajan B8 askeläänikojeen kalibrointitieto oli epäselvä. Näistä mittaaja B3 ei ilmoittanut mittauksissa käyttämiensä askeläänikojeen, äänianalysaattorin tai äänenpainekalibraattorin kalibrointiajankohtaa. Mittaaja B12 puolestaan ei ilmoittanut, koska äänianalysaattori ja äänenpainekalibraattori oli kalibroitu. Oletettavasti siis näiden ryhmien laitteiston kalibroinnissa oli puutteita. Lisäksi ryhmä B8 ilmoittamien tietojen perusteella askeläänikojeen kalibrointiajankohta oli epäselvä, mutta kalibrointi oli tarkastettu vuonna 2018. Siitä, mitä tarkastus tarkoitti, ei tutkimusraportin laatijalla ollut tietoa.

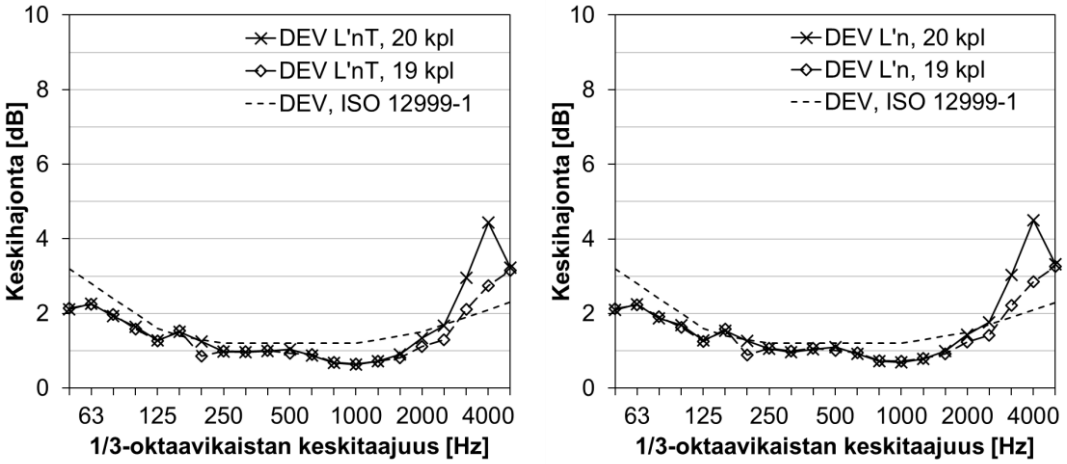
Kuvassa 1 esitettyjen tulosten perusteella voidaan havaita, että mittaajien B3 ja B12 tulokset erottuivat muista tuloksista olemalla taajuuskaistaisten tulosten ääripäissä suurilla ja keskitaajuuksilla. Mittaajan B8 taajuuskaistaiset tulokset olivat taas muita tuloksia pienemmät pienillä taajuuksilla.

4.3 Mittausten epävarmuus

Mittaustulosten keskinäisen epävarmuuden arviointiin voidaan käyttää standardin ISO 12999-1 [5] mukaan mittausten keskihajontaa. Koska kaikki mittausryhmät tekivät mittauksensa samassa sijainnissa omilla laitteillaan, round robin -testin mittaustulokset vastasivat standardin tilannetta B (situation B). Kuvassa 3 on esitetty standardisoidun askeläänitason L'_{nT} ja normalisoidun askeläänitason L'_n keskihajonnat kaikkien mittausten osalta ja ilman poikkeavaa mittaajan B12 tulosta. Standardin ISO 12999-1 mukainen tyypillinen keskihajonta kyseisessä tilanteessa on esitetty kuvissa katkoviivalla. Taulukossa 3 on esitetty mittalukujen keskihajonnat molemmissa tilanteissa ja standardissa mittaluvuille esitetyt keskihajonnat tilanteessa B.

Kuvasta 3 nähdään, että mittausten keskihajonta alitti standardissa ISO 12999-1 esitetyn taajuuskaistaisen keskihajonnan suurilta osin. Standardin mukainen epävarmuus ylittyi 160 Hz keskitaajuudella ja yli 2000 Hz taajuuksilla, jolloin hajonta oli suurimmillaan. Ilman mittaajan B12 poikkeavaa tulosta keskihajonta pieneni suurilla taajuuksilla. Pienten taajuuksien epävarmuus johtui luultavasti äänikentän epädiffuusisuudesta, joka on havaittavissa myös mitatuista jälkikaiunta-ajoista (ks. kuva 2). Tutkimuksessa [6] tulosten uusittavuudet alittivat vanhan standardin ISO 140-2 [7] esittämät uusittavuudet.

Taulukon 3 tuloksista nähdään, että kaikkien mittalukujen keskihajonta oli suurempi kuin standardissa ISO 12999-1 esitetyt mittalukujen keskihajonnat. Tässä tapauksessa spektripainotustermien huomioon ottaminen pienensi keskihajontaa. Ilman muista poikkeavaa mittaajan B12 tulosta askeläänitasolukujen $L'_{nT,w}$ ja $L'_{n,w}$ keskihajonta pieneni 0,3 dB.



Kuva 3. Askeläänitason L'_{nT} ja L'_{n} keskihajonnat (DEV) kaikkien tulosten osalta (20 kpl) ja ilman muista poikkeavaa tulosta (19 kpl). Standardissa ISO 12999-1 esitetty keskihajonta on kuvassa katkoviivalla.

Taulukko 3. Mittalukujen keskihajonnat kaikkien tulosten perusteella ja kun muista poikkeavia tuloksia ei otettu huomioon sekä standardissa ISO 12999-1 esitetyt mittalukujen keskihajonnat.

Mittaluku	Keskihajonta [dB] kaikki tulokset	Keskihajonta [dB] ei poikkeavia tuloksia	Keskihajonta [dB] ISO 12999-1 mukaan
$L'_{nT,w}$	1,7	1,4	1,0
$L'_{nT,w} + C_I$	1,1	1,1	1,0
$L'_{nT,w} + C_{I,50\text{-}2500}$	1,1	1,0	1,0
$L'_{n,w}$	1,7	1,4	1,0
$L'_{n,w} + C_I$	1,2	1,2	1,0
$L'_{n,w} + C_{I,50\text{-}2500}$	1,2	1,2	1,0

5 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Round robin -testissä määritettyjen standardisoitujen askeläänitasolukujen $L'_{nT,w}$ keskiarvo oli 68,4 dB kaikkien mittaustulosten osalta, ja 68,6 dB ilman muista poikkeavaa tulosta. Askeläänitasolukujen $L'_{n,w}$ keskiarvo oli 69,0 dB ja keskihajonta kaikki mittaustulokset huomioon otettuna ja 69,2 dB ilman muista poikkeavaa tulosta. Molempien mittalukujen osalta tulosten keskihajonta oli 1,7 dB kaikkien tulosten osalta ja 1,4 dB ilman poikkeavaa mittaustulosta. Askeläänitasojen L'_{nT} taajuuskaistainen keskihajonta oli 0,6–4,4 dB kaikkien tulosten osalta ja 0,6–3,2 dB kun muista poikkeava tulos oli poistettu. Askeläänitasojen L'_{n} keskihajonta oli 0,7–4,5 dB taajuuskaistoittain kaikkien tulosten osalta ja 0,7–3,3 dB, kun muista poikkeavaa tulosta ei otettu huomioon.

Standardissa ISO 12999-1 esitettyihin keskihajontoihin verrattuna round robin -testin perusteella määritettyjen taajuuskaistaisten tulosten hajonnat olivat pääosin alhaisemmat. Standardin mukainen epävarmuus ylittyi 160 Hz keskitaajuudella ja yli 2000 Hz taajuuksilla. Suurilla taajuuksilla hajonta oli suurinta. Teoria tukee äänikentän hajonnan kasvamista tällä taajuusalueella [8]. Mittalukujen keskihajonnat olivat kaikilta osin standardissa esitettyjä mittalukujen epävarmuuksia suuremmat. Pienimmät keskihajonnat olivat askeläänitasojen ja spektripainotustermien summilla. Näin ollen pienten taajuuksien huo-

mioon ottaminen ei tässä tapauksessa näyttänyt lisäävän mittausten epävarmuutta. Tämä johtuu siitä, että suuret ja keskitaajuudet määräävät vertailukäyrän paikan [9].

Round robin -testin perusteella syyt mittausepävarmuudelle olivat pienten ja suurten taajuuksien tulokset ja muista poikkeava mittaustulos. Koska pienillä alle 100 Hz:n taajuuksilla äänikenttä on epädiffuusi, hajonta pienillä taajuuksilla oli suurinta. Äänikentän epädiffuusisuus havaittiin myös jälkikaiunta-ajan mittaustuloksista. Suurilla taajuuksilla hajontaa lisäsivät muista poikkeava ryhmän B12 mittaustulos. Tuloksen poikkeavuuden ovat saattaneet aiheuttaa mittalaitteiston kalibroinnin puutteet. Puutteita laitteiston kalibroinnissa oli havaittavissa myös ryhmällä B3.

KIITOKSET

Round robin -testin käytännön järjestelyistä vastasi Pekka Talaskivi (Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry). Kirjoittavat kiittävät myös Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry:n akustiikkatoimikunnan jäseniä arvokkaista huomioista testin raportointia tehtäessä.

LÄHTEET

[1] Lietzén, J. & Kylliäinen, M. 2019. Askeläänеneristävyyden round robin -testi. Tampere, Tampereen yliopisto, rakennustekniikan, tutkimusselostus RAK/2581/2019.

[2] Ympäristöministeriön asetus rakennuksen ääniympäristöstä, nro 796/2017.

[3] Ympäristöministeriön ohje rakennuksen ääniympäristöstä. 2018. Helsinki, ympäristöministeriö.

[4] Kemppainen, J. & Kylliäinen, M. 2017. Spektripainotustermin $C_{I,50\text{-}2500}$ vaikutus askeläänеneristävyyden arviointiin. Akustiikkapäivät 2017. Espoo, 24.25.8., Akustinen Seura ry, s. 129-134.

[5] SFS-EN ISO 12999-1. 2014. Acoustics – Determination and application of measurement uncertainties in building acoustics – Part 1: Sound insulation. Helsinki, Suomen standardisoimisliitto SFS ry.

[6] Lang, J. 1997. A Round Robin on Sound Insulation in Buildings. Applied Acoustics, Vol. 52, s. 225-238.

[7] ISO 140-2. 1991. Acoustics – Measurement of sound insulation in buildings and of building elements – Part 2: Determination, verification and application of precision data. Genève, International Organization for Standardization.

[8] Lubman, D. 1974. Precision of reverberant sound power measurements. The Journal of the Acoustical Society of America. Vol 56, no. 2, p. 523-533.

[9] Kylliäinen, M. 2014. The measurement uncertainty of single-number quantities for rating the impact sound insulation of concrete floors. Acta Acustica united with Acustica. Vol. 100(4), s. 640-648.

ASKELÄÄNIKOJEEN AIHEUTTAMA HERÄTEVOIMA PUUVÄLIPOHJILLA

Jesse Lietzén[1], **Mikko Kylliäinen**[1], **Juha Miettinen**[2], **Sami Pajunen**[1]

[1] Tampereen yliopisto
Rakennettu ympäristö
Metalli- ja kevytrakenteet
etunimi.sukunimi@tuni.fi

[2] Tampereen yliopisto
Tekniikka ja luonnontieteet
Tribologia ja koneenosat
juha.miettinen@tuni.fi

Tiivistelmä

Välipohjarakenteen askeläänieneristävyyttä mitataan käyttämällä askeläänikojetta äänilähteenä. Koska koje pudottaa vasaroitaan välipohjan päälle vapaasti, mitattavan rakenteen tyyppi vaikuttaa kojeen aiheuttamaan herätevoimaan. Siten voimaa ei voida pitää rakenteesta riippumattomana vakiona. Tämä seikka on erityisen tärkeä puuvälipohjilla, jotka joustavat vasaroiden alapuolella, mikä taas vaikuttaa aiheutetun herätevoiman spektriin. Kirjallisuudessa on esitetty malleja, jotka kuvaavat askeläänikojeen tuottamaa herätettä, mutta vain muutamia mittaustuloksia on raportoitu. Tässä esitetään menetelmä, jolla askeläänikojeen aiheuttamaa herätevoimaa voidaan mitata. Lisäksi esitetään mittaustuloksia päällystetyltä ja päällystämättömältä CLT-välipohjalla ja määritetään lattianpäällysteen askeläänieneristävyyden parannusvaikutus ΔL.

1 JOHDANTO

Välipohjarakenteen askeläänieneristävyyttä mitataan käyttämällä äänilähteenä askeläänikojetta, joka tuottaa herätevoiman välipohjan pintaan. Koska koje pudottaa vasaroitaan välipohjan päälle vapaasti, mitattavan rakenteen tyyppi vaikuttaa kojeen aiheuttamaan herätevoimaan [1]. Kojeen tuottaman voiman spektri on erilainen puu- ja betonivälipohjilla. Voimaa ei siten voida pitää rakenteesta riippumattomana vakiona. Tietoa kojeen tuottamasta herätevoimasta tarvitaan, jotta voidaan määrittää puuvälipohjan askeläänieneristävyys laskennallisesti. Ensinnäkin tietoa tarvitaan rakenteeseen kohdistuvan askeläänitehon määrittämiseen. Toiseksi sitä voidaan hyödyntää esimerkiksi lattianpäällysteiden askeläänieneristävyyden parannuksen ΔL laskennalliseen tarkasteluun.

Kirjallisuudessa on esitetty useita malleja, joiden perusteella voitaisiin laskennallisesti arvioida askeläänikojeen välipohjaan tuottamaa herätettä [1–6]. Mallit vaihtelevat varhaisista yksinkertaisista malleista uudempiin yleisempiin malleihin. Varhaiset mallit [2–4] kehitet-

© 2019 Jesse Lietzén, Mikko Kylliäinen, Juha Miettinen ja Sami Pajunen. Tämä on avoimesti julkaistu teos, joka noudattaa Creative Commons NIMEÄ 4.0 Ei sovitettu –lisenssiä (CC BY 4.0). Teosta saa kopioida, levittää, näyttää ja esittää julkisesti ja siitä saa luoda johdannaisteoksia, kunhan tekijän nimi ja lähde mainitaan asianmukaisesti.

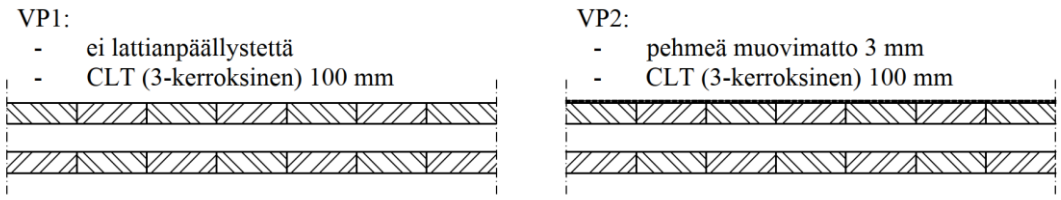
tiin askeläänierätteen mallintamiseen betonivälipohjilla, joten ne eivät aina sovellu voimaherätteen mallintamiseen betonivälipohjia joustavammilla puuvälipohjilla. Yleisemmät mallit [1, 5, 6] taas on kehitetty herätevoiman mallintamiseen välipohjilla yleensä, ja ne ottavat välipohjien ominaisuudet tarkemmin huomioon. Kirjallisuudessa on esitetty vain harvoja askeläänikojeen herätevoiman mittaustuloksia [esim. 5]. Mittaustulosten puute johtunee mittausten työläydestä ja siitä, että betonivälipohjien suunnittelemiseksi tietoa voimaherätteestä ei ole juuri tarvittu. Tämän artikkelin tavoitteena on kuvata menetelmä askeläänikojeen aiheuttaman herätevoiman mittaamiseksi sekä esittää mittaustuloksia kahdelle puuvälipohjalle ja johtaa tuloksista askelääneneristävyyden parannusvaikutus ΔL.

2 MENETELMÄT

2.1 Mittaukset ja rakenteet

Askeläänikojeen puuvälipohjalle tuottamaa herätevoimaa mitattiin käyttäen askeläänilähteenä instrumentoitua askeläänikojetta. Kojeen keskimmäistä vasaraa muokattiin ja varustettiin voima- ja kiihtyvyyssensoreilla. Erikoisvalmisteisella iskupäällä varustettu voimasensori (Kistler type 9712B5000) asennettiin kojeen vasaran alaosaan, jotta voitiin mitata vasaran aiheuttamaa voimaa kojeen operoidessa normaalisti. Kiihtyvyysanturi (Kistler type 8202A10) asennettiin vasaran yläpäähän, jotta vasaran liikkeestä saatiin lisätietoa. Vasaraa myös muokattiin siten, että instrumentoitu askeläänikoje täytti standardissa ISO 16283-2 askeläänikojeelle asetetut vaatimukset.

Testattujen kahden puuvälipohjan kantavana rakenteena oli 3-kerroksinen 100 mm paksu ristiinlaminoitu puulevy (CLT). Välipohjat (kuva 1) käsittivät päällystämättömän CLT-välipohjan (VP1) ja pehmeällä muovimatolla päällystetyn CLT:n (VP2). Pehmeän muovimaton dynaaminen jäykkyys *s*' oli n. 2280 MN/m^3. Rakenteiden koko oli 2,4 x 2,7 m^2, josta jänneväli oli 2,7 m. CLT-levy tuettiin molemmista päistään jäykästi ruuviliitoksin tärinäneristettyihin palkkirakenteisiin. Herätevoiman mittaukset suoritettiin aikatasossa ja voiman aikahistoria tallennettiin. Kunkin mittauksen pituus oli noin 30 s. Mittauksen alussa askeläänikoje oli levossa ja sen instrumentoitu vasara sattumanvaraisessa asennossa liikeradallaan. Askeläänikoje toimi viidessä herätepisteessä S1…S5 rakenteen päällä. Sijainnit määritettiin siten, että niiden etäisyys rakenteen reunaan oli vähintään 0,5 m. Piste S3 sijaitsi rakenteen keskellä.



Kuva 1. Rakenteet.

2.2 Mittaustulosten jälkikäsittely

Koska herätevoimaa mitattiin käyttäen vasaraan kiinnitettyä sensoria, vasaran kiihtyvyys aiheutti vähäisen voiman myös rakenteeseen kohdistuneiden iskujen välissä, kun vasarat olivat jatkuvassa liikkeessä. Kuitenkin mitatun voiman vastavoima herättää tässä tapauksessa rakenteen vain niissä tilanteissa, jossa vasara ja rakenteen pinta ovat kontaktissa. Jotta saatiin tieto varsinaisesta välipohjaa herättävästä voimasta, kaikki herätevoimapulssit ha-

ettiin ja näiden välillä voima asetettiin nollaksi. Koska askeläänikojeen vasaran asento mittauksen alussa oli sattumanvarainen eikä ensimmäinen rakenteeseen kohdistunut isku ollut täysi, tämän aiheuttama voimapulssi poistettiin mittausdatasta. Lisäksi aikadata viimeisen iskun alusta mittauksen loppuun poistettiin, koska tätä seuraavan iskun ajankohta ei ollut tiedossa (voimapulssien välinen aika ei ollut tarkalleen 0,5 s). Jälkikäsitelty herätevoiman aikahistoria suodatettiin 1/3-oktaavikaistasuotimin taajuusalueella 20–5000 Hz. Kullekin taajuuskaistalle määritettiin rms-voima F_{rms}. Herätevoiman spektrin arvot ovat pieniä verrattuna voimapulssien huippuarvoihin aikatasossa, koska välipohjaa herättävä voima on voimapulssien välissä nolla, ja F_{rms} määritettiin koko mittaushistorian perusteella.

2.3 Askeläänieneristävyyden parannusvaikutus Δ*L*

Lattianpäällysteen parannusvaikutus Δ*L* määritetään yleensä laboratoriomittauksin välipohjan alapuoleiseen tilaan syntyvien askeläänitasojen tai rakenteen kiihtyvyystasojen perusteella (vrt. standardit ISO 10140 ja ISO 16251-1). Tässä tutkimuksessa lattianpäällysteen parannusvaikutus Δ*L* määritettiin laskennallisesti Vérin mukaan [2] käyttäen lähtötietona mitattua herätevoimaa. Laskenta tehtiin 1/3-oktaavikaistaisesti kullekin herätepisteelle S1…S5 kaavalla

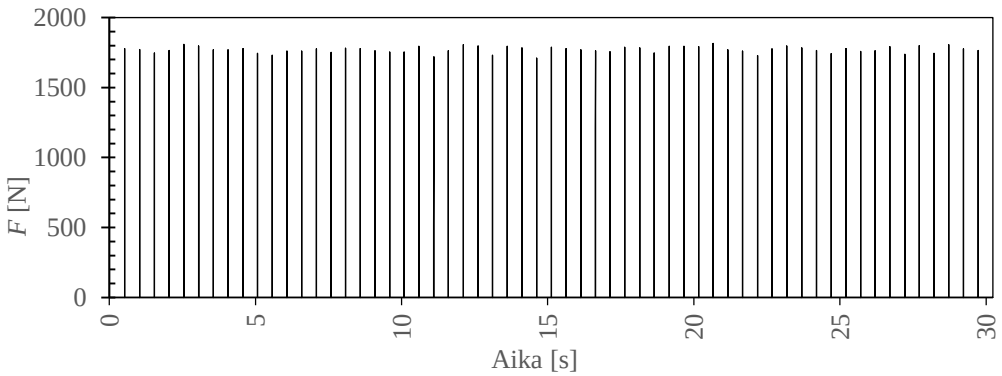
$$\Delta L = 20 \log\left(\frac{F_{\mathrm{rms,ei\_päällystettä}}}{F_{\mathrm{rms,päällyste}}}\right), \tag{1}$$

jossa $F_{\mathrm{rms,ei\_päällystettä}}$ ja $F_{\mathrm{rms,päällyste}}$ ovat rms-herätevoimia, kun välipohjalla ei ollut lattianpäällystettä (VP1) ja kun välipohjalla oli lattianpäällyste (VP2). Tulokset määritettiin taajuusalueella 20–5000 Hz. Koska askeläänikojeessa oli vain yksi instrumentoitu vasara, oletettiin, että kukin kojeen vasara tuottaa rakenteeseen samanlaisen herätevoiman.

3 TULOKSET

3.1 Herätevoima aikatasossa

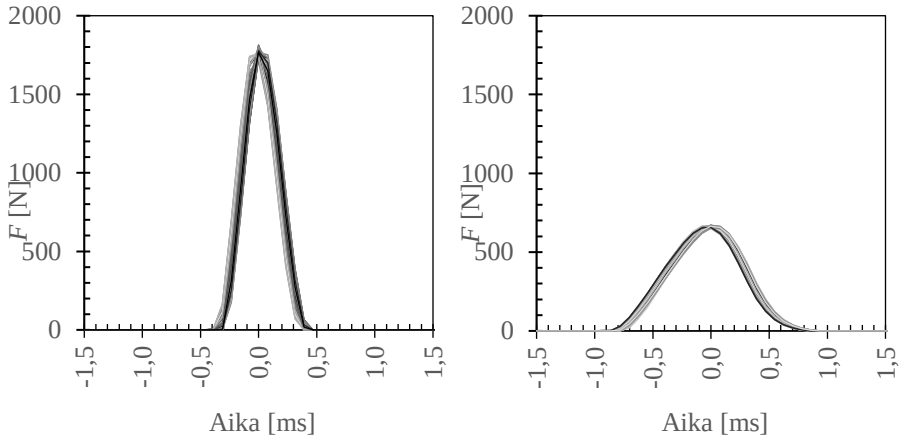
Kuvassa 2 on esitetty esimerkki mitatusta herätevoiman aikahistoriasta. Siinä on kuvattu koko jälkikäsitelty herätevoiman mittaustulos välipohjalla VP1 herätepisteessä S3. Mitattu voiman huippuarvo sekä askeläänikojeen vasaran iskutiheys on nähtävissä kuvasta.



Kuva 2. Mitattu herätevoiman aikahistoria (välipohja VP1, herätepiste S3).

Kuvassa 3 on esitetty esimerkit yksittäisistä herätevoimapulsseista askeläänikojeen vasaran ja välipohjan pinnan ollessa kontaktissa. Mittaustulokset on esitetty molemmilla välipohjilla samassa herätepisteessä S3. Kootut herätevoimapulssit rakenteelle VP1 ovat siis

samat kuin kuvassa 2 esitetyt. Tässä pulssit on keskitetty kuvaan siten, että niiden aiheuttama huippuarvo tapahtuu ajankohtana 0,0 s. Vasaroiden iskujen määrä lattiaan vaihteli välillä 60–61 (ilman ensimmäistä ja viimeistä iskua, ks. kohta 2.2). Kun verrataan kuvassa 3 voimapulsseja, voidaan havaita lattianpäällysteen vaikutus syntyvään voimapulssin muotoon: pulssin huippuarvo oli merkittävästi alhaisempi ja pulssi oli leveämpi, kun välipohjan päällä oli pehmeä lattianpäällyste.

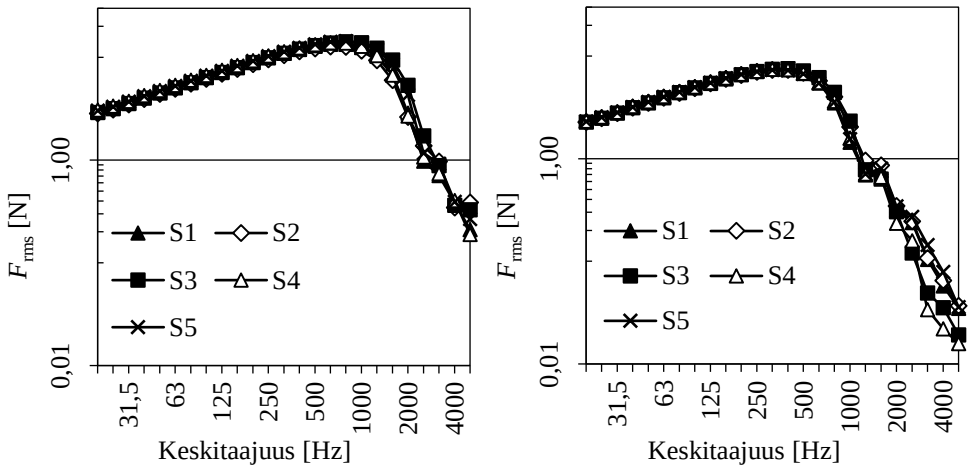


Kuva 3. Mitatut voimapulssit herätepisteestä S3 (vasemmalla VP1, oikealla VP2).

3.2 Herätevoiman spektri

Välipohjilla VP1 ja VP2 saadut tulokset herätevoiman spektreille on esitetty kuvassa 4. Tulosten perusteella pienillä- ja keskitaajuuksilla voima F_{rms} kasvaa taajuustasossa, kunnes äkillisesti pienenee suurilla taajuuksilla lähelle nollaa. Herätevoiman F_{rms} maksimiarvot olivat keskimäärin 13,7 ja 7,4 N välipohjille VP1 ja VP2. Tulokset olivat koko taajuusalueella suuremmat välipohjalla VP1 kuin välipohjalla VP2, koska pehmeä lattianpäällyste pienensi herätevoimaa. Voimien erot välipohjien välillä olivat suurimmillaan 1000 Hz keskitaajuudella.

Spektrin huippuarvon taajuus riippui välipohjasta. Välipohjalla VP1 voimaspektrin arvo oli suurimmillaan 800 Hz keskitaajuudella, kun taas välipohjalla VP2 huippuarvo sijaitsi 315 Hz keskitaajuudella. Tämä johtuu voimapulssien leveyden eroista: nopea pulssi herättää suurempia taajuuksia [4].

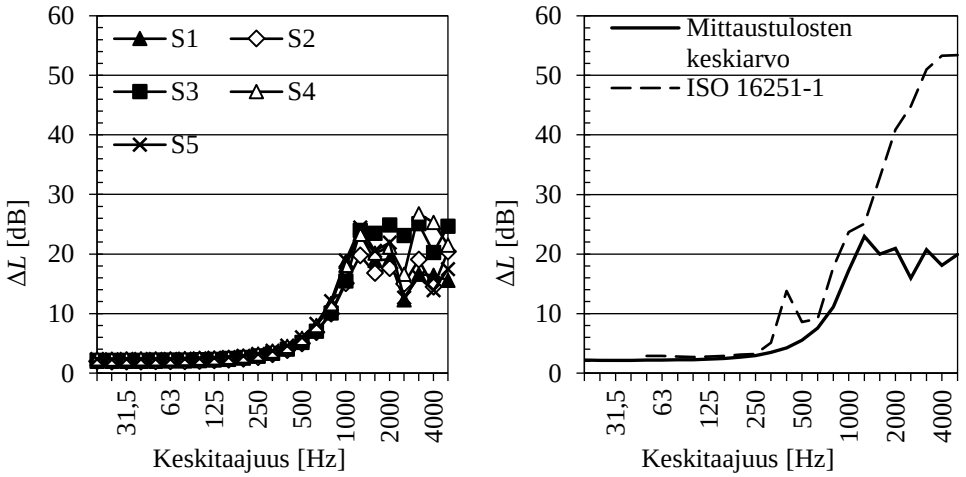


Kuva 4. Voimaherätteen spektrit herätepisteittäin S1…S5. (vasemmalla VP1 ja oikealla VP2).

Herätepisteiden välillä oli vain pieniä eroja samalla välipohjalla erityisesti pienillä taajuuksilla. Välipohjan VP1 tapauksessa voimaspektrin erot olivat suurimmillaan 500–2000 Hz taajuusalueella. Välipohjalla VP2 erot herätepisteiden välillä olivat pieniä. Tulokset viittaavat siihen, että tutkituilla välipohjilla askeläänikojeen aiheuttamat herätevoimat ovat samanlaiset mittauspisteestä riippumatta.

3.3 Askeläänieneristävyyden parannusvaikutus Δ*L*

Askeläänieneristävyyden parannusvaikutus Δ*L* sai positiivisia arvoja ja oli melko tasainen pienillä taajuuksilla 250 Hz keskitaajuudelle saakka (kuva 5). Tällä taajuusalueella Δ*L*:n arvot vaihtelivat välillä 2–3 dB. Keskitaajuuksilla 250–1250 Hz Δ*L* kasvoi eksponentiaalisesti aina yli 20 dB arvoon. Keskitaajuutta 1250 Hz suuremmilla taajuuksilla Δ*L* laski tai pysyi samalla tasolla pienempään taajuusalueeseen verrattuna. Eri herätepisteissä määritettyjen askeläänieneristävyyksien parannusvaikutusten Δ*L* välillä oli vähäisiä eroja pienillä- ja keskitaajuuksilla 1000 Hz:iin saakka. Suurimmat erot eri pisteiden välillä olivat pienillä taajuuksilla 0,4 dB ja 1000 Hz keskitaajuudella 3,8 dB. Yli 1000 Hz taajuuksilla erot pisteiden välillä olivat suuremmat ja vaihtelivat välillä 4,7–11,4 dB. Mittaustulosten keskiarvoa verrattiin tuloksiin standardin ISO 16251-1 mukaisesta mittauksesta, joka tehtiin Turun AMK:ssa pienellä betonilaatta-mock-upilla (h = 200 mm, m' = 400 kg/m^2). Tuloksia vastaavalla lattiamateriaalilla on esitetty myös lähteessä [7].



Kuva 5. Vasemmalla kaavan (1) perustella määritetty mitattu askeläänieneristävyyden parannusvaikutus Δ*L* herätepisteittäin. Oikealla on vasemmalla esitettyjen mittaustulosten keskiarvo verrattuna standardin ISO 16251-1 mukaiseen mittaustulokseen.

Mittaustulosten keskiarvo kuvassa 5 vastasi hyvin standardinmukaista mittaustulosta pienillä taajuuksilla 50–250 Hz. Taajuusalueella 315–1250 Hz mittaustulosten väliset erot olivat 1,5–9,6 dB. Tällä taajuusalueella suurin ero oli 400 Hz keskitaajuudella, jossa standardin ISO 16251-1 mukaisen mittauksen tuloksessa oli havaittavissa piikki. Betonilaatta-mock-upilla saatuihin mittaustuloksiin verrattuna 1250 Hz keskitaajuus näyttäisi toimivan eräänlaisena rajataajuutena, jonka jälkeen muovimaton Δ*L* arvo ei enää kasva, kuten betonilaatalla, vaan pysyy melko tasaisena. Tämä johtuu luultavasti välipohjan VP1 pienemmästä herätevoimasta suurilla taajuuksilla betonivälipohjiin verrattuna, mikä on havaittu aiemmassa tutkimuksessa [8, 9]. Betonivälipohjilla herätevoiman spektrin arvo kasvaa vielä suurilla taajuuksilla, jolloin voimaero ja Δ*L* päällystämättömän ja päällystetyn välipohjan välillä kasvaa. CLT-välipohjan lattianpäällysteiden askeläänieneristävyyden parannusvaikutusta Δ*L* on käsitelty lisää tutkimuksessa [10].

4 JOHTOPÄÄTÖKSET

Askeläänikojeen välipohjaan aiheuttama herätevoima riippuu välipohjarakenteesta. Erityisesti herätteen spektri sai kauttaaltaan alhaisempia arvoja, kun välipohjan päällä oli pehmeä muovimatto. Lisäksi spektrin maksimiarvot sijaitsivat mitatuilla välipohjilla eri taajuuskaistoilla. Askeläänikojeen voimaherätteen tulee olla tiedossa, kun välipohjan askeläänieneristävyyttä arvioidaan laskennallisesti. Herätepisteiden välillä mittaustulosten väliset erot olivat pieniä, joten askeläänikojeen aiheuttama herätevoima ei näyttäisi olevan erityisen paikkariippuvainen massiivisilla puuvälipohjilla.

Askeläänieneristävyyden parannusvaikutuksen ΔL tulokset vastasivat pienillä taajuuksilla hyvin standardin ISO 16251-1 mukaisia mittaustuloksia. Keskitaajuus 1250 Hz toimi eräänlaisena rajataajuutena, jonka jälkeen CLT-välipohjalla muovimaton ΔL ei kasvanut. Betonivälipohjilla saatuja ΔL:n mittaustuloksia nähtävästi voitaisiin käyttää puuvälipohjien askeläänieneristävyyden arvioinnissa tärkeällä alle 1000 Hz taajuusalueella.

KIITOKSET

Kirjoittajat kiittävät rakennusmateriaalit lahjoittaneita Christian Berner Oy:tä, Saint-Gobain Finland Oy:tä, Stora Enso Oy:tä ja Upofloor Oy:tä sekä Valtteri Hongistoa ja Pekka Saarista (TuAMK), jotka suorittivat standardin ISO 16251-1 mukaiset vertailumittaukset.

LÄHTEET

[1] Brunskog, J., & Hammer, P. 2003. The interaction between the ISO tapping machine and lightweight floors. Acta Acustica united with Acustica Vol. 89(2), s. 296-308.

[2] Vér, I. L. 1971. Impact noise isolation of composite floors. Journal of the Acoustical Society of America Vol. 50(4), s. 1043-1050.

[3] Scholl, W. & Maysenhölder, W. 1999. Impact sound insulation of timber floors: Interaction between source, floor coverings and load bearing floor. Journal of Building Acoustics Vol. 6(1), s. 43–61.

[4] Cremer, L., Heckl, M. & Petersson, B. A. T. 2005. Structure-Borne Sound: Structural vibrations and sound radiation at audio frequencies. Springer, Berlin, Heidelberg.

[5] Rabold, A., Buchschmid, M., Düster, A., Müller, G. & Rank, E. 2010. Modelling the excitation force of a standard tapping machine on lightweight floor structures. Journal of Building Acoustics Vol. 17(3), s. 175-197.

[6] Wittstock, V. 2012. On the spectral shape of the sound generated by standard tapping machines. Acta Acustica united with Acustica Vol. 98(2), s. 301-308.

[7] Keränen, J, Lietzén, J, Kylliäinen, M. & Hongisto, V. 2013. Improvement of impact sound reduction by floor coverings – measurements using a small floor mock-up and an impact sound laboratory. Proceedings of Inter-noise 2013, paper no. 530.

[8] Balanant, N., Guigou, C. & Villenave, M. 2012. Respect des exigences acoustiques dans les bâtiments à ossature bois, à vocation logements. Etape 2, Rapport final, Acoubois France, Qualitel, CSTB and FCBA.

[9] Latvanne, P. 2015. Puuvälipohjien akustiset ominaisuudet ja laskentamallit. Diplomityö. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, rakennustekniikka.

[10] Valjakka, S., Lietzén, J., Kylliäinen, M. & Pajunen, S. 2019. Lattianpäällysteen askeläänieneristävyyden parannusvaikutus CLT-välipohjilla. Oulu, Akustiikkapäivät, 28.-29.10.2019.

LATTIANPÄÄLLYSTEEN ASKELÄÄNENERISTÄVYYDEN PARANNUSVAIKUTUS CLT-VÄLIPOHJILLA

Saveli Valjakka, **Jesse Lietzén**, **Mikko Kylliäinen**, **Sami Pajunen**
Tampereen Yliopisto

Tiivistelmä

Lattianpäällysteen askeläänieristävyyden parannusvaikutus ΔL kuvaa päällysteen kykyä alentaa välipohjan alapuolelle syntyvää askeläänitasoa. Perinteisesti ΔL määritetään lattianpäällysteelle, kuten muovimatolle, laminaatille tai parketille, laboratoriomittauksin standardin ISO 10140 mukaisesti. Päällysteiden ΔL-arvon mittaukseen on vaihtoehtona standardin ISO 16251-1 mukaan mock up -järjestelmällä tehtävät mittaukset. Standardinmukaisten mittausmenetelmien ongelma puuvälipohjien näkökulmasta on kuitenkin se, että sekä laboratorio- että mock up -mittaukset on tehty betonivälipohjilla, vaikka standardi ISO 10140 esittää myös puuvälipohjia vaihtoehtoisiksi kantaviksi laboratoriorakenteiksi. Toisaalta ei ole tietoa siitä, voiko puuvälipohjien askeläänieristävyyden laskennassa käyttää suoraan näitä mittaustuloksia. Tässä artikkelissa esitetään CLT-välipohjalla saatuja mittaustuloksia lattianpäällysteiden askeläänieristävyyden parannusvaikutuksesta ΔL. Mittaukset tehtiin puuvälipohjilla mukaillen standardia ISO 16251-1. Tuloksia vertailtiin standardinmukaisten mittausten avulla betonivälipohjilla saatuihin tuloksiin.

1 JOHDANTO

Lattianpäällysteellä tarkoitetaan ala- tai välipohjarakenteen päälle asennettavaa pintamateriaalia, jonka tarkoitus on toimia käytännöllisenä ja esteettisenä alustana kyseisessä tilassa. Akustiikan kannalta lattianpäällysteiden avulla voidaan tehokkaasti parantaa lattiarakenteen askeläänieristävyyttä, koska ne vaimentavat kantavaan rakenteeseen kohdistuvia iskuja. Lattianpäällysteen askeläänieristävyyden parannusvaikutus (ΔL) kuvaa päällysteen kykyä alentaa sekä välipohjaan suoraan kohdistuvaa askeläänitaso. ΔL on taajuuden funktio ja kuvaa desibeleinä lattianpäällysteiden parannusvaikutusta päällystämättömän lattian eli raakavälipohjan askeläänieristävyyteen verrattuna. Tyypillisiä lattianpäällysteitä ovat muovimatot, tekstiilimatot ja parketit tai laminaatit joustavine alusmateriaaleineen. Näistä asuinrakennuksissa käytetään erityisesti muovimattoja sekä laminaattia ja parkettia alusmateriaaleineen.

Muovimaton askeläänieristävyyden parannusvaikutus perustuu sen kykyyn vaimentaa suoraan lattiaan kohdistuvaa iskua. Sen sijaan parketti tai laminaatti alusmateriaaleineen toimii kelluvan rakenteen tapaan, jolloin rakenne muodostaa kantavan rakenteen kanssa eräänlaisen massa-jousi-massajärjestelmän. Järjestelmä alentaa raakavälipohjaan kohdistuvaa askeläänitehoa. Puuvälipohjien askeläänieristävyyden kannalta erityisen oleellista on se, että lattianpäällysteen ΔL riippuu raakavälipohjan ominaisuuksista. Tämän takia

© 2019 Saveli Valjakka, Jesse Lietzén, Mikko Kylliäinen ja Sami Pajunen. Tämä on avoimesti julkaistu teos, joka noudattaa Creative Commons NIMEÄ 4.0 Ei sovitettu –lisenssiä (CC BY 4.0). Teosta saa kopioida, levittää, näyttää ja esittää julkisesti ja siitä saa luoda johdannaisteoksia, kunhan tekijän nimi ja lähde mainitaan asianmukaisesti.

betonivälipohjalla määritettyä askelääneneristävyyden parannusarvoa ei välttämättä voida suoraan käyttää puuvälipohjan askelääneneristävyyden arvioinnissa [1].

Lattianpäällysteen ΔL määritetään tyypillisesti standardin ISO 10140 [2] mukaisesti laboratoriomittauksin tai vaihtoehtoisesti standardin ISO 16251-1 [3] mukaan betonirakenteisella mock up -järjestelmällä. Standardin ISO 10140 mukaiset mittaukset tehdään usein betonirakenteisilla välipohjilla, vaikka standardi esittää vaihtoehtoisiksi raakavälipohjiksi myös puurakenteita. Standardi ISO 16251-1 taas ei toistaiseksi sisällä mittauksia puuvälipohjalla. Näin ollen puuvälipohjilla mitattuja lattianpäällysteen ΔL-tuloksia ei yleensä ole saatavilla. Tämän tutkimuksen tavoitteena on selvittää lattianpäällysteiden ΔL:n lukuarvon eroa puu- ja betonivälipohjilla. Tässä artikkelissa käsitellään lattianpäällysteiden parannusvaikutusta ristiinlaminoidulle puuvälipohjalle (CLT).

2 MITTAUKSET

2.1 Menetelmä ja mittaukset

Standardin ISO 10140 mukaisin laboratoriomittauksin välipohjaan asennetusta lattianpäällysteestä määritetään sen askelääneneristävyyden parannusvaikutus ΔL käyttäen äänilähteenä askeläänikojetta. Mittauksissa mitataan äänitasot välipohjan alapuolisessa tilassa askeläänikojeen toimiessa raakavälipohjalla ja kun raakavälipohjan päälle on asennettu lattianpäällyste, jonka ΔL halutaan selvittää. ΔL on käytännössä laboratoriomittausten äänitasoero, kun mittaukset toistetaan ilman lattianpäällystettä ja sen kanssa.

Standardin ISO 16251-1 mukaisessa mock up -järjestelmällä tehdyssä mittauksessa ΔL määritetään 1200x800x200 mm^3 kokoisen betonilaatan päälle asennetusta lattianpäällysteestä. Askeläänikoje toimii tässä mittauksessa askelääniläheteenä ja sen aiheuttama heräte saa välipohjan värähtelemään. Tästä värähtelystä mitataan välipohjan alapinnasta värähtelytasoja, joista saadaan lopulta laskemalla lattianpäällysteelle ΔL. ΔL muodostuu eri mittauspositioiden erotusten keskiarvoista, kun raakavälipohjasta saaduista värähtelytasoista vähennetään lattianpäällysteellä varustetun saman välipohjan värähtelytasot.

ISO 16251-1 standardi perustuu Sommerfeldin 2009 [4] esittämään mittausmenetelmään. Menetelmän tarkoitus oli esittää yksinkertainen menetelmä ΔL:n mittaamiseksi vaihtoehdoksi laboratoriomittausstandardille. Tutkimukset [5–8] osoittavat, että standardilla esitetyllä menetelmällä saadut tulokset vastaavat laboratoriomittauksissa saatuja tuloksia. Sommerfeld esitti tutkimuksessaan myös, että mittausmenetelmää voisi käyttää puurakenteisella mock upilla. Mittauksissaan hän käytti ripalaattaa ja siitä saadut tulokset vastasivat melko hyvin ISO 10140 -standardin mukaisessa laboratoriomittauksissa saatuja tuloksia vastaavalle välipohjalle.

Tässä tutkimuksessa määritettiin lattianpäällysteiden ΔL CLT-välipohjalla mukaillen standardia ISO 16251-1. Tuloksia vertailtiin standardin ISO 16251-1 mukaisten mock up -mittausten tuloksiin betonilaatalla. Standardista ja Sommerfeldin artikkelista poiketen mittauksissa käytetyn CLT-välipohjan dimensiot olivat 2400x2700 mm^2 jännevälin ollessa 2700 mm. Mittausolosuhteet kuvaavat näin paremmin asuintilassa vallitsevaa tilannetta. Mittauksista saaduista värähtelytasoista määritettiin lattianpäällysteen askelääneneristävyyden parannusluku ΔL.

Mittauksissa äänilähteenä oli askeläänikoje. ΔL mitattiin kiihtyvyysanturien avulla muovimatolle ja parketille. Raakavälipohja mittauksissa oli 3-kerroksinen 100 mm paksu ris-

tiinlaminoitu puulevy (CLT). Tämän päälle asennetut lattianpäällysteet olivat 3 mm paksu pehmeän muovimatto, jonka dynaaminen jäykkyys *s*' oli n. 2280 MN/m^3 sekä 14 mm paksu lautaparketti, jonka alla oli alusmateriaalina 3 mm paksu parketinalusmatto, jonka dynaaminen jäykkyys *s*' oli n. 65 MN/m^3.

Mittauksissa askeläänikojeen eri paikkoja oli 5 ja kiihtyvyysantureiden paikkoja 5. Kiihtyvyysantureista suoraan askeläänikojeen alla olevaa mittausanturia ei käytetty mittausten aikana. Askeläänikojeen toimiessa rakenteen värähtelytasoja mittasi 4 anturia kojepaikkaa kohden. Yhteensä mittaustuloksia saatiin yhdelle välipohjalle siis 20. Mittaukset tehtiin standardin ISO 16251-1 mukaisesti. Mitatut kiihtyvyyssignaalit suodatettiin 1/3-oktaavikaistasuotimin taajuusalueella 50–5000 Hz. Kullekin taajuuskaistalle määritettiin rms-kiihtyvyystasot, jotka taustakorjattiin vastaavalla tavalla mitattujen taustakiihtyvyystasojen avulla standardin mukaan.

2.2 Vertailumittaukset

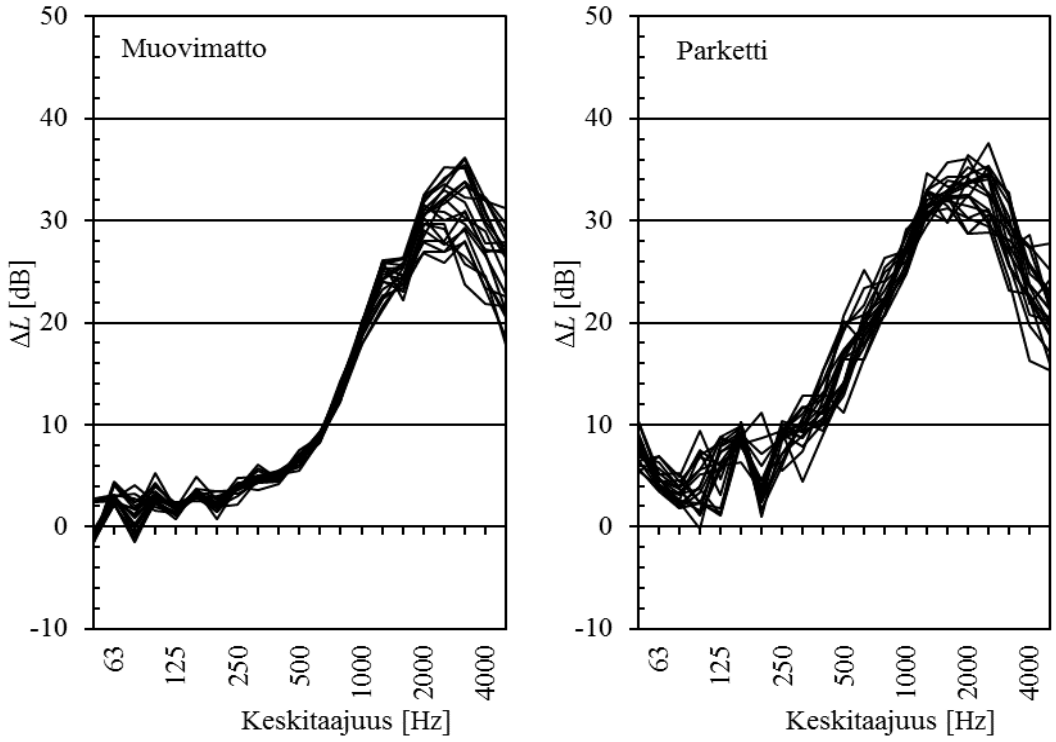
Puuvälipohjilla tehtyjen mittausten vertailukohdaksi tehtiin myös erilliset standardin ISO 16251-1 mukaiset mock up –mittaukset standardissa esitetyn kokoisella 1200x800x200 mm^3 betonivälipohjalla. Mittauksissa käytettiin samoja lattianpäällysteitä kuin puuvälipohjilla tehdyissä mittauksissa, jotta tulokset olisivat vertailukelpoisia keskenään. Lattianpäällysteet leikattiin betonilaatan kokoisiksi ja ne asennettiin betonilaatan päälle samalla tavalla kuin puuvälipohjalle. Mittaukset tehtiin Turun AMK:n akustiikkalaboratoriossa.

Puuvälipohjan värähtelytasojen lisäksi oltiin aikaisemmassa tutkimuksessa [9] selvitetty Δ*L*-arvoja herätevoiman perusteella tehdyistä mittauksista. Kyseisessä tutkimuksessa on tarkemmin esitetty mittausmenetelmä sekä Vérin esittämä tapa määrittää Δ*L* herätevoimasta [10]. Herätevoiman mittaukset tehtiin samalla CLT-välipohjalla kuin tässä tutkimuksessa esitetyt standardin ISO 16251-1 mukaiset mittaukset. Vertailussa käytettiin lattianpäällysteenä pelkästään muovimattoa.

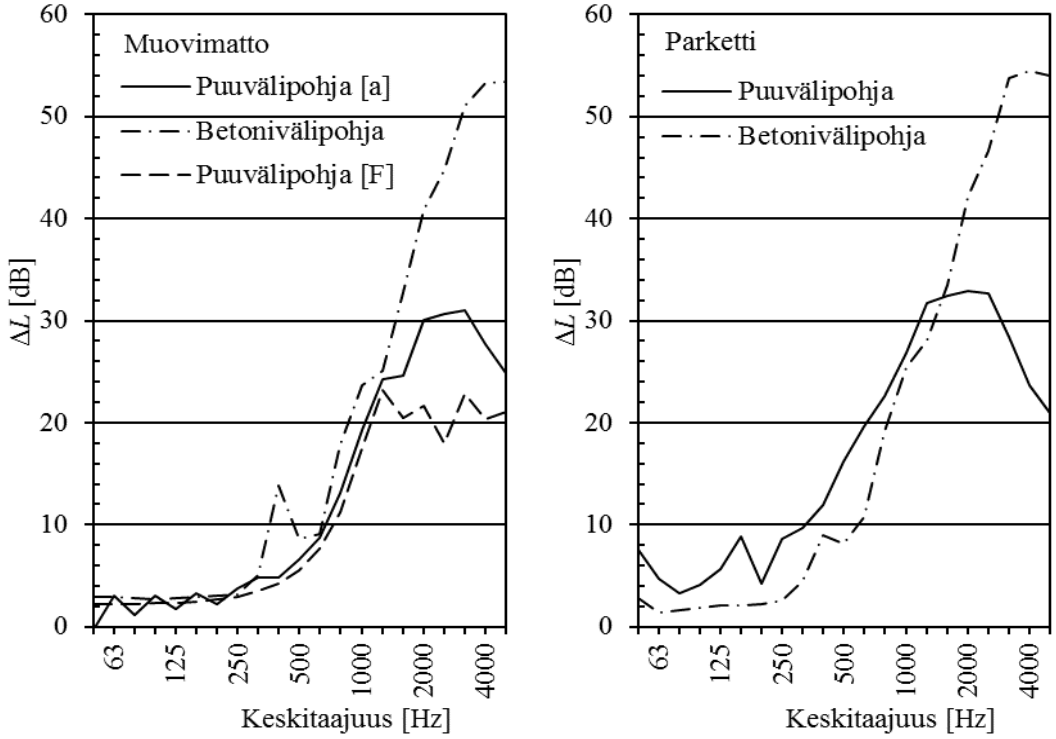
3 TULOKSET

CLT-välipohjalla tehtyjen Δ*L*-mittausten tulokset jokaisesta yksittäisestä mittauspisteestä muovimatolla ja parketilla alusmateriaaleineen on esitetty kuvassa 1. Kuvan 1 tuloksista muodostettiin lopuksi keskiarvokäyrä, joka kertoo lattianpäällysteen Δ*L*-arvon.

Mittaustuloksia vertailtiin mock up -betonivälipohjalla tehtyihin mittauksiin. Kuvassa 2 on esitetty standardien ISO 16251-1 mukaisten mittaustulosten lisäksi tulokset muovimaton Δ*L*-arvoille määritettynä askeläänikojeen herätevoiman perusteella [9]. Vertailu näiden kolmen mittauksen välillä on esitetty kuvassa 2.



Kuva 1. Δ*L*-mittausten tulokset eri mittausasetelmissa. Vasemmalla CLT-välipohjan päällä muovimatto, oikealla CLT-välipohjan päällä parketti.



Kuva 2. Betoni- ja CLT-välipohjilla tehtyjen Δ*L*-mittausten tulosten vertailua. Vasemmalla lattianpäällysteenä muovimatto ja oikealla parketti. Vasemmanpuoleisessa kuvaajassa [a] tarkoittaa välipohjan värähtelytasoista laskettua Δ*L*-lukua ja [F] askeläänikojeen herätevoiman perusteella laskettua Δ*L*-lukua [9]. Betonivälipohjien Δ*L*-luku on laskettu välipohjan värähtelytasoista.

4 TULOSTEN TARKASTELU

Muovimaton käyräparvesta (kuva 1) voidaan huomata, että sen muoto on yhtenäinen jokaisella mittaustuloksella. Δ*L* kasvaa tasaisesti 1250 Hz keskitaajuuteen asti. Tämän jälkeen Δ*L*-arvon nousu pysähtyy ja hieman laskee suurilla taajuuksilla (2000–5000 Hz). Tuloksista voidaan nähdä, että muovimatolla on parannusvaikutusta pienilläkin taajuuksilla. Käyräparven hajonta on vähäistä pienillä taajuuksilla 50–1000 Hz. Suurilla taajuuksilla (2000–5000 Hz) hajonta on suurempaa.

Myös parketin käyräparven muoto on yhtenäinen eri mittaustuloksilla. Δ*L* kasvaa tasaisesti 1250 Hz keskitaajuuteen asti ja Δ*L*-arvon nousu pysähtyy ja hieman laskee suurilla taajuuksilla (2000–5000 Hz). Parketin parannusvaikutus pienillä taajuuksilla on jopa suurempi kuin muovimatolla. Parketilla tehtyjen mittausten tuloksista voidaan nähdä, että käyräparvi on tasaisesti hajanainen, mutta silti yhtenäinen kaikilla taajuuksilla. Parketilla näkyy myös selkeä ominaistaajuus keskitaajuudella 200 Hz.

Tuloksista (kuva 2) voidaan nähdä, että muovimaton tapauksessa Δ*L*-käyrät nousevat tasaisesti ja käyttäytyvät lähes samalla tavalla 50–1250 Hz taajuuksilla. 1250–5000 Hz taajuuksilla CLT-välipohjan tuloksista voidaan nähdä, että ne kääntyvät tasaisesti vaihtelemaan 19–31 dB välillä, kun taas betonivälipohjan Δ*L*-luku jatkaa tasaista nousua 52 dB asti. Betonivälipohjalla tehdyissä mittauksissa näkyy myös selkeä piikki 400 Hz keskitaajuuden kohdalla.

Parketin tapauksessa CLT-välipohjan Δ*L*-arvot olivat 2–5 dB paremmat 50–1250 Hz taajuuksilla kuin betonivälipohjalla. 1250–5000 Hz tapahtuu Δ*L*-arvon samantapainen tasoittuminen CLT-välipohjalla kuin muovimatolla, kun taas betonivälipohjan Δ*L*-arvo jatkaa tasaista nousua. Lisäksi näyttää siltä, että puuvälipohjilla parannusvaikutus alkaa 200 Hz jälkeen, mutta betonivälipohjilla parannusvaikutus alkaa 315 Hz jälkeen. Tämä ilmiö viittaa kelluvan rakenteen eri ominaistaajuuteen.

Lattianpäällysteistä muovimaton Δ*L*:n käyttäytymistä eri raakavälipohjien päällä on tutkittu muun muassa Saksassa [11, 12] ja Kanadassa [13]. Tutkimuksissa vertailtiin Δ*L*:n arvoja puu- ja betonivälipohjilla eri taajuuksilla. Niiden mittaustuloksista on huomattavissa tätä tutkimusta vastaavia eroavaisuuksia Δ*L*:n käyttäytymisessä betoni- ja puuvälipohjien välillä. Lattianpäällysteen ollessa muovimatto päällysteen Δ*L* puuvälipohjilla vastasi betonivälipohjilla saatuja tuloksia taajuusalueella 50–1250 Hz. Tämän jälkeen Δ*L* tasoittui puuvälipohjilla käytännössä tasaiseksi käyräksi 1250–5000 Hz taajuuksilla, kun taas betonivälipohjien tapauksessa Δ*L* jatkoi tasaisesti kasvua suuremmilla taajuuksilla. Ilmiö johtuu todennäköisesti siitä, että suurilla taajuuksilla betonivälipohjilla herätevoima kasvaa, kun taas puuvälipohjilla se pienenee [9]. Vaikuttaakin siltä, että lattianpäällysteen Δ*L*:n arvossa on puuvälipohjilla jokin tietty rajataajuus betonivälipohjiin verrattuna.

Muovimatosta poiketen Δ*L*:n lukuarvo parketeilla on pienemmillä taajuuksilla (50–1250 Hz) hieman suurempi puuvälipohjilla kuin betonivälipohjilla. Tutkimustuloksia asiasta on vain muutamia [1, 13–15]. Vaikuttaakin siltä, että parketin alle asennettava alusmateriaali saa lattianpäällysteen käyttäytymään kelluvan rakenteen tavoin. On hyvä kuitenkin ottaa huomioon, että kelluvissa rakenteissa vaikutus on suurempi [16]. Zeitler arvioi tämän johtuvan puuvälipohjan massalisäyksestä [16]. Massalisäys on pintarakenteen, eli kelluvan levyn tuoman lisämassan parannusvaikutus askeläänieneristävyyteen.

Mittausten tulokset ovat samassa linjassa näiden kirjallisuudessa esitettyjen ilmiöiden kanssa.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

CLT- ja betonivälipohjilla tehtyjen standardin ISO 16125-1 mukaisten Δ*L*-mittausten tuloksista voitiin muovimatolla havaita selkeästi kaksi asiaa. Ensimmäiseksi voidaan todeta, että Δ*L*-käyrä tottelee puuvälipohjilla samanlaista trendiä pienillä taajuuksilla (50–1250 Hz) kuin betonivälipohjillakin. Toiseksi vaikuttaa siltä, että CLT-välipohjilla Δ*L*-arvon kasvulla on rajataajuus betonivälipohjiin verrattuna. Näiden mittausten perusteella se näyttäisi olevan n. 1250 Hz keskitaajuuden kohdalla. Tämän jälkeen Δ*L*-käyrä ei enää kasva toisin kuin betonivälipohjalla.

Parketin käyttäytyminen puuvälipohjalla erosi betonivälipohjasta selkeämmin kuin muovimaton tapauksessa. Parketti näyttäisi toimivan kelluvan rakenteen tavoin antaen parketin Δ*L*-luvulle parannusta myös pienillä taajuuksilla (50–1250 Hz). Muuten Δ*L*-käyrä seuraa samantyyppistä trendiä kuin muovimatollakin. Rajataajuus on samassa 1250 Hz kohdassa.

Näiden havaintojen pohjalta voidaan todeta myös, että betonivälipohjilla saadut Δ*L*-tulokset eivät päde suurilla taajuuksilla puuvälipohjilla. Tulosten perusteella muovimaton tuloksia voitaisiin käyttää alle rajataajuuden, koska vastaavuus on melko hyvä. Voidaan myös todeta, että tämä taajuusalue on puuvälipohjien kannalta erityisen tärkeä, koska usein pienet taajuudet määräävät puuvälipohjan askelääneneristävyyden. Parketin osalta näytti siltä, että tällaista vastaavuutta ei ollut.

Mittausten perusteella voidaan myös todeta, että mock up -mittauksia voidaan tehdä puuvälipohjillakin.

KIITOKSET

Kirjoittajat kiittävät rakennusmateriaalit lahjoittaneita Christian Berner Oy:tä, Saint-Gobain Finland Oy:tä, Stora Enso Oy:tä ja Upofloor Oy:tä sekä Valtteri Hongistoa ja Pekka Saarista (TuAMK), jotka suorittivat standardin ISO 16251-1 mukaiset vertailumittaukset.

LÄHTEET

[1] Latvanne P. 2015. Puuvälipohjien akustiset ominaisuudet ja laskentamallit. Diplomityö. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, rakennustekniikka.

[2] SFS-EN ISO 10140:2010 Acoustics – Laboratory Measurements of Sound Insulation of Building Elements.

[3] SFS-EN ISO 16251-1:2014 Acoustics – Laboratory Measurement of the Reduction of Transmitted Impact Noise by Floor Coverings on a Small Floor Mock-up – Part 1: Heavyweight Compact Floor.

[4] Sommerfeld M. 2009. A Simplified Measurement Method for the Determination of Impact Sound Reduction. Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig, Germany.

[5] Foret R., Chéné, J-B., Guigou-Carter C. 2011. A Comparison of the Reduction of Transmitted Impact Noise by Floor Coverings Measured Using ISO 140-8 and ISO/CD 16251-1. Forum Acusticum 27th June – 1st July 2011, Aalborg, Denmark.

[6] Pereira A., Godinho L., Mateus D., Ramis J., Branco F. G. 2013. Assessment of a Simplified Experimental Procedure to Evaluate Impact Sound Reduction of Floor Coverings. Applied Acoustics 79 (2014), p. 92-103.

[7] Schmidt J-H., Wittstock V., Langer S. C. 2014. Uncertainties and Validation Procedures for the Compact Measurement Setup. Inter Noise 16-19 November 2014, Melbourne, Australia.

[8] Bjor O.-H. 2010. Simplified Measurement of the Reduction of Transmitted Impact Noise by Floor Coverings, Proc 2010 BNAM 2010 – Bergen.

[9] Lietzén, J., Kylliäinen, M., Miettinen, J. & Pajunen, S. 2019. Askeläänikojeen aiheuttama herätevoima puuvälipohjilla. Oulu, Akustiikkapäivät, 28.-29.10.2019.

[10] I. L. Vér: Impact noise isolation of composite floors. Journal of the Acoustical Society of America 50 (1971) 1043-1050.

[11] Scholl W., Maysenhölder W. 1999. Impact Sound Insulation of Timber Floors: Interaction between Source, Floor Coverings and Load Bearing Floor. Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Stuttgart.

[12] Schmitz A. 2000. Comparison of Impact Sound Insulation Measurements of Floor Coverings Using Different Floor Types and Excitation Sources. The 29th International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering, 27-30 August 2000, Nice, France.

[13] Warnock A. C. C. 2000. Impact Sound Measurements on Floors Covered with Small Patches of Resilient Materials or Floating Assemblies. Internal Report (National Research Council Canada. NRC Institute for Research in Construction); no. IRC-IR-802.

[14] Pereira A., Mateus D., Godinho L., Moteiro S., Dias A. 2016. Evaluation of Impact Sound Reduction of Floor Coverings on Timber and Timber-Concrete Floors Using Vibration Measurements. EuroRegio2016, June 13-15, Porto, Portugal.

[15] Späh, M., Liebl, A., Leistner, P. 2013. Measurements in the Laboratory and in Single Family Houses, AcuWood report No. 1. Sweden, SP Technical Research Institute of Sweden, Report 2014:14.

[16] Zeitler B., Sabourin I., Schneider M. 2017. On the Relevance of Impact Source Impedance at Low Frequencies – Part 2: Floors with Floating Toppings. 24th International Congress on Sound and Vibration, 23-27 July 2017, London.

KELLUVIEN LAATTOJEN ASKELÄÄNENERISTÄVYYDEN ANALYYTTINEN LASKENTA

Ville Kovalainen, **Jesse Lietzén**, **Mikko Kylliäinen**

A-Insinöörit
etunimi.sukunimi@ains.fi

Tiivistelmä

Perinteisesti kelluvan laatan askeläänieristävyyden parannus on laskettu käyttämällä yksinkertaisia malleja, jotka kuvaavat joko lokaalisti tai resonoivasti käyttäytyvää laattaa. Alkuperäiset mallit perustuvat Cremerin (1952) ja Vérin (1971) teorioihin, jotka olettavat kantavan rakenteen olevan jäykkä massiivilaatta ja eristekerroksen toimivan ideaalisena jousena. Malleja ei ole määritelty kelluvan laatan ominaistaajuudella, joka tunnetusti on askeläänieristävyyden kannalta ratkaiseva taajuusalue etenkin, kun ääniympäristöasetus 796/2017 laajensi mitattavaa taajuusaluetta 50 Hz asti. Toisaalta varsinkin kevytrakenteisilla välipohjilla voidaan havaita askeläänieristävyyden parannusta myös ominaistaajuuden alapuolella. Gudmundsson (1984) jatkoi kelluvan laatan mallien kehittämistä ja käsitteli aiempien teorioiden vaille huomiota jättämiä ongelmakohtia. Gudmundsson otti mallissaan huomioon rakenteen reunaehdot ja eristekerroksessa kulkevan taivutusaallon. Hän kuitenkin teki yksinkertaistuksia sekä laskentamenetelmissä että niissä käytettävissä lähtöarvoissa, millä arvioidaan olevan vaikutusta tuloksiin. Tässä artikkelissa tutkitaan Gudmundssonin mallin käyttäytymistä erilaisilla kelluvilla laatoilla ja välipohjatyypeillä. Erityisesti tutkitaan mallin käyttäytymistä kevyen välipohjan tapauksessa.

1 JOHDANTO

Kelluvan laatan tarkoitus on parantaa välipohjan askeläänieristävyyttä vähentämällä kantavaan rakenteeseen kohdistuvaa askeläänitehoa. Kelluva lattia koostuu joustavasta eristekerroksesta ja sen päälle asennetusta pintalaatasta. Eristekerros on tyypillisesti mineraalivillaa tai EPS-eristettä. Pintalaattana taas voi toimia esimerkiksi betoni- tai tasoitevalu tai rakennuslevykerros. Myös parkettia joustavine alusmateriaaleineen voidaan pitää kelluvana rakenteena.

Kelluvan laatan vaikutusta välipohjan askeläänieristävyyteen kuvaa kelluvan rakenteen askeläänieristävyyden parannusvaikutus (ΔL). Tämä taajuudesta riippuva parannusvaikutus määritellään kelluvan laatan kykynä alentaa rakenteen askeläänitasoa verrattuna päällystämättömään kantavaan rakenteeseen. Standardien mukaan ΔL voidaan määrittää laboratoriomittauksin käyttäen äänilähteenä askeläänikojetta [1] tai laskennallisesti [2]. Laboratoriomittaukset tehdään tyypillisesti vertailubetonivälipohjalla, jolloin tuloksia ei välttämättä voi suoraan soveltaa puuvälipohjien askeläänieristävyyden arviointiin. Koska

© 2019 Ville Kovalainen, Jesse Lietzén ja Mikko Kylliäinen. Tämä on avoimesti julkaistu teos, joka noudattaa Creative Commons NIMEÄ 4.0 Ei sovitettu –lisenssiä (CC BY 4.0). Teosta saa kopioida, levittää, näyttää ja esittää julkisesti ja siitä saa luoda johdannaisteoksia, kunhan tekijän nimi ja lähde mainitaan asianmukaisesti.

laboratoriomittaukset ovat usein työläitä ja kalliita, parannusvaikutuksen laskennallinen tarkastelu on houkuttelevaa.

Perinteisesti kelluvan laatan askelääneneristävyyden parannus on laskettu käyttämällä yksinkertaisia malleja, jotka kuvaavat joko lokaalisti tai resonoivasti käyttäytyvää laattaa. Alkuperäiset ja standardissa ISO 12354-2 [2] esitetyt mallit perustuvat Cremerin [3] ja Vérin [4] teorioihin, jotka olettavat kantavan rakenteen olevan jäykkä massiivilaatta ja eristekerroksen toimivan ideaalisena jousena. Näistä Cremerin teoriaan perustuva malli lokaalisti käyttäytyvälle laatalle olettaa parannusvaikutuksen ΔL, taajuuden f ja kelluvan laatan ominaistaajuuden f_0 välille yhteyden $\Delta L = 40\log(f/f_0)$. Resonoivasti käyttäytyvän laatan parannusvaikutus taas määritellään $\Delta L = 30\log(f/f_0)$. Näistä resonoivan laatan mallin mukainen parannusvaikutus on standardin [2] mukaan tyypillisesti varmalla puolella oleva alarajaarvio [2].

Perinteisiä malleja ei ole määritelty kelluvan laatan ominaistaajuudella, joka tunnetusti on askelääneneristävyyden kannalta ratkaiseva taajuusalue etenkin, kun ääniympäristöasetus 796/2017 [5] laajensi mitattavaa taajuusaluetta 50 Hz asti. Kelluvan laatan parannusvaikutus on ominaistaajuuden alueella usein negatiivinen, jolloin kelluva rakenne vahvistaa askeläänikojeen aiheuttamaa askeläänitasoa. Toisaalta varsinkin kevytrakenteisilla välipohjilla voidaan havaita askelääneneristävyyden parannusta myös ominaistaajuuden alapuolella [6]. Yksi mallien ongelmista on myös se, että usein ei voida etukäteen tietää, toimiiko kelluva laatta lokaalisti tai resonoivasti. Jos parannusvaikutusta arvioidaan aina resonoivasti käyttäytyvänä, moni lokaalisti käyttäytyvä rakenne ylimitoitetaan. Tämä voi johtaa tarpeettoman kalliisiin rakenneratkaisuihin.

Gudmundsson esitti raportissaan vuonna 1984 mallin [7], jonka avulla kelluvan laatan ΔL voidaan määrittää taajuusalueella $f < f_0$. Mallin avulla voidaan myös arvioida, käyttäytyykö kelluva laatta lokaalisti vai resonoivasti (Gudmundsson kutsuu lokaalisti käyttäytyvän rakenteen ratkaisua pakkovärähteleväksi osaksi). Gudmundsson kuitenkin teki yksinkertaistuksia sekä laskentamenetelmissä että niissä käytettävissä lähtöarvoissa, millä arvioidaan olevan vaikutusta tuloksiin. Tässä artikkelissa tutkitaan Gudmundssonin mallin käyttäytymistä erilaisilla kelluvilla laatoilla ja välipohjatyypeillä. Erityisesti tutkitaan mallin käyttäytymistä kevyen välipohjan tapauksessa.

2 LASKENTAMALLI

Gudmundssonin esittämän mallin [7] mukaan kelluvan laatan askelääneneristävyyden parannus ΔL voidaan määrittää pakkovärähtelevän ja resonoivan osan summana:

$$\Delta L = \Delta L_{forced} + \Delta\Delta L_{res} \tag{1}$$

missä ΔL_{forced} kuvaa pakkovärähtelevän ja $\Delta\Delta L_{res}$ laatan resonoinnin vaikutusta askelääneneristävyyden parannukseen. Näistä ΔL_{forced} voidaan määrittää kantavaan rakenteeseen kohdistuvan askeläänitehon W_{I} (ilman kelluvaa) ja kelluvan laatan kautta kantavaan rakenteeseen kohdistuvan askeläänitehon W_{II} perusteella:

$$\Delta L_{forced} = 10\log\left(\frac{W_{\mathrm{I}}}{W_{\mathrm{II}}}\right). \tag{2}$$

Kun kantavan rakenteen päällä ei ole kelluvaa rakennetta, kantavaan rakenteeseen kohdistuva askeläänitaso W_{I} voidaan määrittää rakenteeseen kohdistuvan voimaherätteen $\hat{F}_{\mathrm{I}}$ sekä rakenteen ja ympäröivän fluidin kuorman (engl. "*radiation/fluid loading*") impedanssien Z_{p3} ja Z_f perusteella:

$$W_{\mathrm{I}} = \frac{\rho c k \hat{F}_{\mathrm{I}}^{\,2}}{4\pi} \int_0^k \frac{k_r}{|Z_{p3}+2Z_f|^2 \sqrt{k^2-k_r^{\,2}}} \mathrm{d}k_r, \tag{3}$$

jossa ρ on ilman tiheys, c on äänennopeus ilmassa ja k on aaltoluku. Kun määritetään kelluvan laatan kautta kantavaan rakenteeseen kohdistuvaa tehoa W_{II}, tulee ottaa huomioon kelluvan laatan ja kantavan rakenteen välinen impedanssi Z_{13}:

$$W_{\mathrm{II}} = \frac{\rho c k \hat{F}_{\mathrm{II}}^{\,2}}{4\pi} \int_0^k \frac{k_r}{|Z_{13}|^2 \sqrt{k^2-k_r^{\,2}}} \mathrm{d}k_r. \tag{4}$$

Kun kelluvan laatan alapuolista joustavaa kerrosta käsitellään lokaalisti toimivana jousena, impedanssi Z_{13} voidaan määrittää seuraavasti:

$$Z_{13} = Z_{p1} + Z_{p3} + 2Z_f + \frac{(Z_{p1}+Z_f)(Z_{p3}+Z_f)}{K/_{i\omega}}. \tag{5}$$

Jos eriste huomioidaan aaltomediana, impedanssi esitetään muodossa:

$$Z_{13} = \cos(k_2 h_2)\left(Z_{p1} + Z_{p3} + 2Z_f\right) + i \sin(k_2 h_2)\left(\rho_2 c_2 + \frac{(Z_{p1}+Z_f)(Z_{p3}+Z_f)}{\rho_2 c_2}\right), \tag{6}$$

jossa h_2 on eristeen paksuus, k_2 eristeen aaltoluku, ρ_2 eristeen tiheys ja c_2 vaihenopeus eristeessä. Eristeen anisotrooppinen käyttäytyminen on mahdollista ottaa huomioon muuttujassa k_2, mutta jäykkyyseroja ei tässä artikkelissa oleteta (näitä ei myöskään perinteisesti määritetä). Kelluvan laatan resonoinnin vaikutus askeläänieristävyyden parannusvaikutukseen $\Delta\Delta L_{res}$ voidaan määrittää seuraavasti:

$$\Delta\Delta L_{res} = -10 \log\left(1 + Y \frac{\sigma_{1,res}}{\sigma_{3,forced}}\right), \tag{7}$$

jossa kerroin Y määritetään resonoivan ja pakkovärähtelevän kelluvan laatan värähtelynopeuksien $v_{1,\mathrm{res}}$ ja $v_{1,\mathrm{forced}}$ avulla:

$$Y = \frac{\langle v_{1,\mathrm{res}}^2 \rangle}{\langle v_{1,\mathrm{forced}}^2 \rangle} \tag{8}$$

Kertoimen Y suuruus riippuu kantavan rakenteen ja kelluvan laatan reunaehdoista. Tyypillisesti kelluvaa laattaa voidaan pitää reunoiltaan vapaana (engl. free, F). Gudmundsson esitti raportissaan kertoimen Y laskennan kahdelle eri tapaukselle: Y_{SF} ja Y_{CF}. Näistä ensimmäisessä on oletettu kantava rakenne yksinkertaisesti tuetuksi (engl. simple, S) ja jälkimmäisessä tapauksessa jäykästi tuetuksi (engl. clamped, C). Voima F lasketaan lähteessä [8] esitetyllä yksinkertaisella menetelmällä, jonka Lindblad on alun perin esittänyt.

3 LASKENTAMALLIN KÄYTTÄYTYMINEN

3.1 Materiaaliparametrit

Laskentamallin käyttäytymistä tutkitaan kahdella raakavälipohjalla ja kolmella eri kelluvalla rakenteella. Raakavälipohjana on joko 200 mm teräsbetoni (a) tai 200 mm puu (b). Varsinaisia CLT-rakenteita ei tarkastella tässä ortotrooppisuutensa vuoksi. Kelluvina rakenteina ovat:

1. 14 mm parketti (m' = 7 kg/m^2), jonka alla alusmateriaali (dynaaminen jäykyys s' = 68 MN/m^3)
2. 40 mm kuitutasoite (m' = 80 kg/m^2), jonka alla 30 mm EPS-pohjainen askeläänieneriste (s' = 15 MN/m^3)
3. 80 mm betonivalu (m' = 200 kg/m^2), jonka alla 50 mm mineraalivillapohjainen askeläänieneriste (s' = 10 MN/m^3)

Rakenteiden häviökertoimena käytetään standardin ISO 12354-1 [9] mukaista laboratoriotilanteen approksimaatiota. Eristeiden häviökertoimena $\eta_{2,tot}$ käytetään vakioarvoa 0.05, jonka voidaan ajatella kuvaavan häviökertoimen vähimmäisarvoa lähteiden [7] ja [10] perusteella.

3.2 Laskentatulokset

Laskenta suoritetaan diskreetisti terssikaistojen keskitaajuuksilla. Rakennekombinaatioiden tulokset on esitetty kuvaajissa 1a-3b (kuvat 1 ja 2). Kuvissa on esitetty laskentatulokset eri vaiheille:

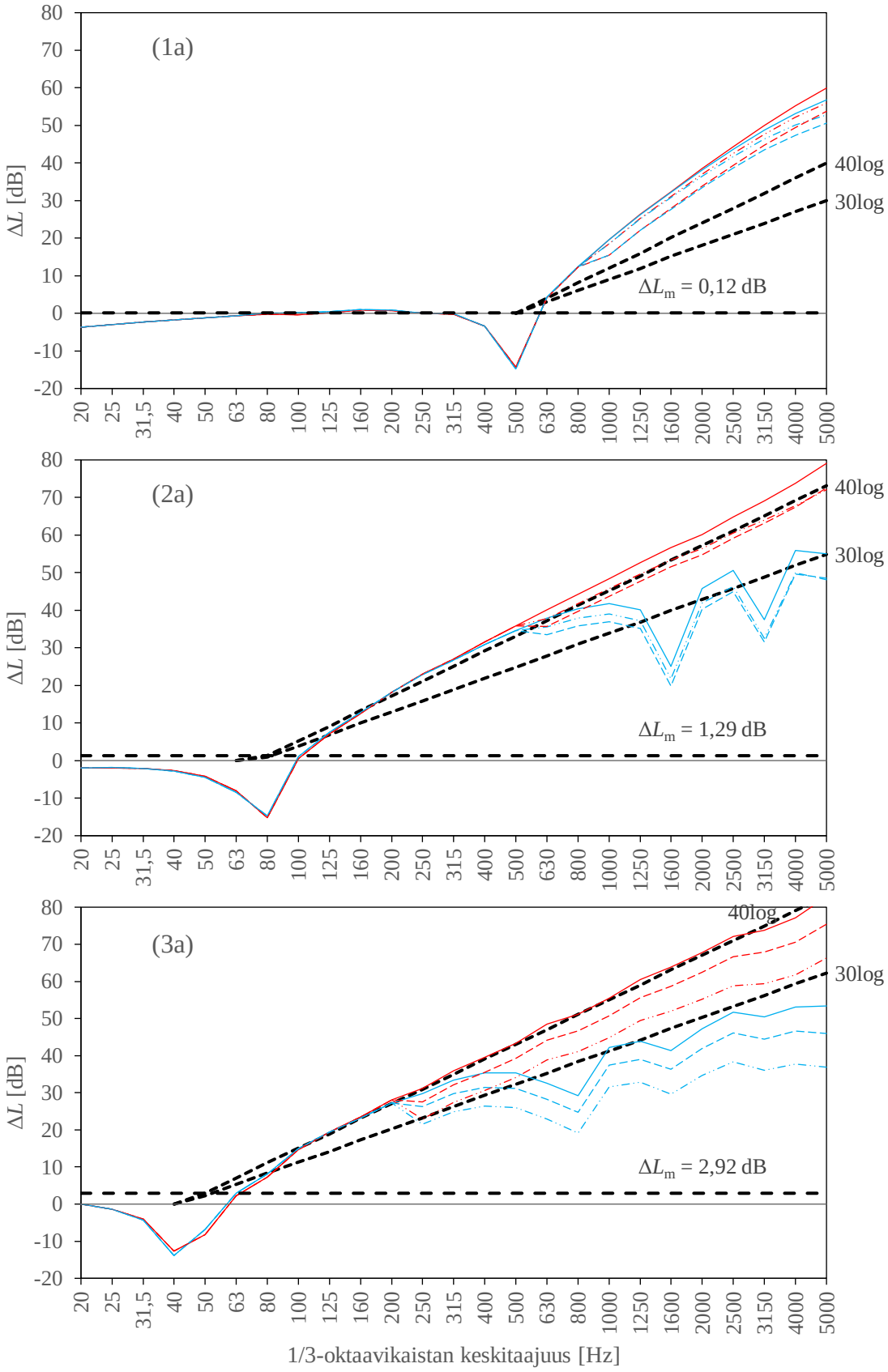
1. Pakkovärähtelevä ratkaisu lokaalisti käyttäytyvällä eristeellä (punainen viiva, kaavat (2) ja (5))
2. Pakkovärähtelevä ratkaisu aaltomediana käyttäytyvällä eristeellä (sininen viiva, kaavat (2) ja (6))
3. Kohtiin 1 ja 2 lisätty resonoivasta värähtelystä johtuva heikennys tuennalla CF (katkoviiva, kaavat (1) ja (7))
4. Kohtiin 1 ja 2 lisätty resonoivasta värähtelystä johtuva heikennys tuennalla SF (1)(7) (piste-piste-katkoviiva, kaavat (1) ja (7))

Lisäksi kuvaajissa on esitetty seuraavat apukäyrät:

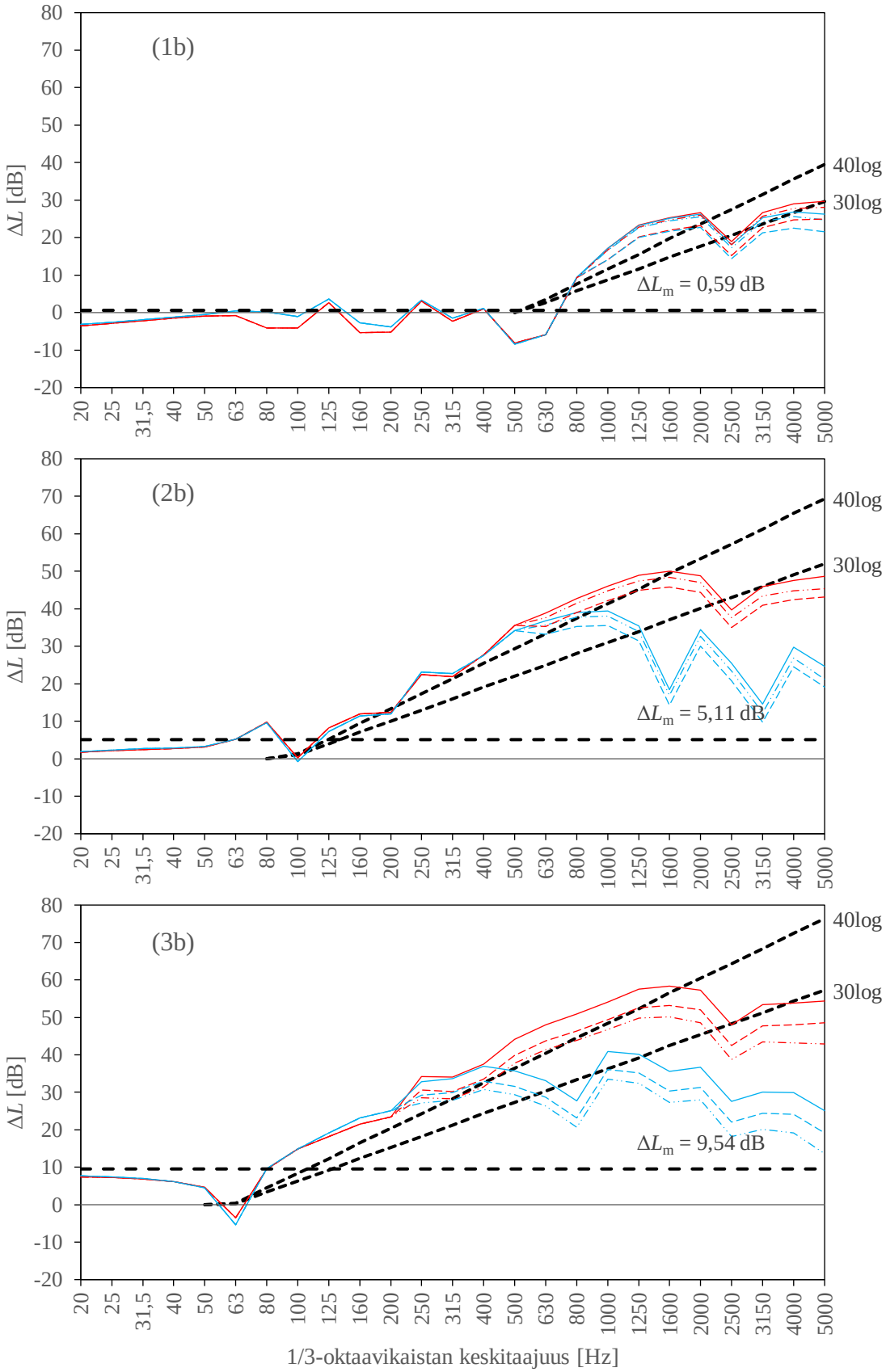
- Standardin ISO 12354-2 laskentamallin mukaiset tulokset 40log(f/f_0) ja 30log(f/f_0) (mustat katkoviivat)
- Massalisäys (musta katkoviiva, kaava (9))

Kelluvan rakenteen tuoma massalisäys koko rakenteeseen on varsinkin kevytrakenteisilla raakavälipohjilla merkittävä, jonka karkea askeläänitason parannus ominaistaajuuden f_0 alapuolella lasketaan kaavalla (9) [6]:

$$\Delta L_m = 20 \log\left(1 + \frac{m_1}{m_3}\right), \tag{9}$$



Kuva 1. Kelluvien laattojen (1-3) askeläänenparannusarvojen tulokset 200 mm betonille (a).



Kuva 2. Kelluvien laattojen (1-3) askeläänenparannusarvojen tulokset 200 mm puulle (b).

3.3 Tulosten tarkastelu

Tulosten tarkastelussa täytyy huomata, että laskenta on tehty vain terssikaistojen keskitaajuuksilla, jolloin kuvaajissa esiintyy ”piikkejä”. Kapeakaistaisessa tarkastelussa ja signaalia suodattamalla erot todennäköisesti tasoittuisivat. Voimamallilla otetaan huomioon vain muutos spektrien muodoissa, eikä impulssitason muutoksia oteta huomioon. Tämä normalisointi pienentää mm. kelluvan laatan ominaistaajuuden alapuolella saavutettavaa parannusta.

Pakkovärähtelevä tulos (kaavat 2 ja 5) ilman voimamallin ja resonoivan termin huomioon ottamista jäykällä raakavälipohjalla on periaatteellisesti sama lähtökohta kuin Cremerin klassisessa kaavassa $40\log(f/f_0)$. Kuvassa 3a nähdään, että laskennat ovat tällöin hyvin lähellä toisiaan, kun tehdään samat oletukset kuin Cremer, eikä voimatasoissa ole muutoksia, eikä resonoivaa värähtelyä oteta huomioon. Sen sijaan, kun otetaan huomioon voimaspektrin muutos (1a) ja resonoiva värähtely (3a, katkoviivat), eroja syntyy. Tulosten perusteella $40\log(f/f_0)$ ja $30\log(f/f_0)$ -sovitteet eivät vastaa kyseisen laskentamenetelmän tuloksia suurimmalla osaa kombinaatioista, eikä $30\log(f/f_0)$ -sovite ole aina vaihteluvälin minimiarvo. Aaltomediana toimiva eriste ja resonoiva termi käytännössä heikentävät lähtötilannetta. Näiden vaikutusten suuruus riippuu koko rakenteesta. Ohuemmalla eristeellä on kuitenkin havaittavissa pienempi muutos jousi- ja aaltomediamallin välillä.

Raakavälipohja vaikuttaa kelluvan rakenteen parannusarvoon. Erityispiirteinä huomataan kelluvan rakenteen ominaistaajuuden alapuolella saavutettava hyöty kevyillä raakavälipohjilla, mikä johtuu kelluvan rakenteen tuomasta lisämassasta. Massa vaikuttaa rakenteen impedansseihin ja siten kohdistuvaan voimatasoon ja taivutusaaltojen kytkentään. Suuremmilla taajuuksilla huomataan, ettei parannus sen sijaan ole yhtä suuri kuin betonirakenteilla, mikä johtuu mm. voimaspektrin muutoksesta (kovaan pintaan kohdistuu enemmän suuria taajuuksia kuin puupinnalla).

Kelluvan rakenteen ominaistaajuudella tapahtuva heikennys oli tutkituissa laskentatapauksissa -15…0 dB välillä, johon vaikuttaa eristeen häviökerroin. Heikennyksen suuruus riippuu häviökertoimen lisäksi myös tarkasteltavasta rakennekokonaisuudesta. Suuruus on toki riippuvainen myös siitä, miten laskentataajuus on osunut ominaistaajuuden kohdalle.

4 LOPPUPÄÄTELMÄ

Käytetty laskentamalli vaikuttaa lupaavalta, koska erot eri raakavälipohjien välillä ovat johdonmukaisia ja mallilla voidaan laskea tulokset kelluvan laatan ominaistaajuuden alueella sekä tätä pienemmillä taajuuksilla, jotka ovat merkittävässä roolissa varsinkin kevytrakenteisilla välipohjilla. Laskentamallilla ei tarvitse tehdä tulkintaa kelluvan rakenteen käyttäytymisestä (forced / resonant), jolloin tulos riippuu vain materiaaliparametreista. Laskentamalli on siitä syystä suhteellisen herkkä materiaaliparametreille, jolloin eroja mittauksiin oletettavasti tulee varsinkin eristeen ominaisuuksien vuoksi, koska eristeen häviökertoimista tai jäykkyyksistä eri suuntiin harvoin on tietoa. Gudmundsson [7] toteaakin, että näiltä osin tuloksia on jouduttu sovittamaan mittauksiin. Kevyiden raakavälipohjien kohdalla resonoivan termin tarkkuuden myös havaittiin heikkenevän.

VIITTEET

[1] SFS-EN ISO 10140-1, Acoustics. Laboratory measurement of sound insulation of building elements. Part 1: Application rules for specific products. 2010, Helsinki, Suomen standardisoimisliitto SFS ry.

[2] SFS-EN ISO 12354-2, Building acoustics. Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements. Part 2: Impact sound insulation between rooms, 2017, Helsinki, Suomen standardisoimisliitto SFS ry.

[3] Cremer, L.,Theorie des Klopschalles bei Decken mit schwimmendem Estrich, Acustica 2(1952), 167-178.

[4] Vér, I. L., Impact Noise Isolation of Composite Floors, Journal of the Acoustical Society of America, 50(1971), 1043-1050.

[5] Ympäristöministeriön asetus rakennuksen ääniympäristöstä 796/2017. Helsinki, ympäristöministeriö.

[6] Zeitler, B., Schneider, M., On the relevance of impact source impedance at low frequencies – Part 2: Floors with floating toppings, International congress on sound and vibration (ICSV24), 23.-27.7.2017, Lontoo.

[7] Gudmundsson, S., Report TVBA-3017: Sound insulation improvement of floating floors. A study of parameters, 1984, Lund, Lund Institute of Technology.

[8] Brunskog, J., Hammer, P., The Interaction Between the ISO Tapping Machine and Lightweight Floors, Acta Acustica united with Acustica, 89(2008), 296-308.

[9] SFS-EN ISO 12354-1, Building acoustics. Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements. Part 1: Airborner sound insulation between rooms, 2017, Helsinki, Suomen standardisoimisliitto SFS ry.

[10] Schiavi, A., Improvement of impact sound insulation: A constitutive model for floating floors, Applied Acoustics, 129(2018), 64-71.

UUSI MITTALUKU ASKELÄÄNENERISTÄVYYDEN ARVIOIMISEKSI

Mikko Kylliäinen[1], Petra Virjonen [1], Valtteri Hongisto [2]

[1] Tampereen yliopisto
Rakennettu ympäristö
mikko.kylliainen@tuni.fi

[2] Turun ammattikorkeakoulu
etunimi.sukunimi@tuamk.fi

Tiivistelmä

Jo kauan on tiedetty, että standardin ISO 717-2 mukaiset mittaluvut eivät vastaa erityisen hyvin subjektiivista kokemusta askeläänieristävyydestä asuinrakennuksissa. Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli kehittää mittalukuja, jotka vastaavat hyvin erilaisista asumisen synnyttämistä askeläänistä aiheutuvaa häiritsevyyden kokemusta. Mittalukujen kehittämiseen hyödynnettiin aineistoa sekä välipohjien askeläänieristysmittauksista että psykoakustisesta kokeesta. Viisi tutkittua äänityyppiä olivat kävely kovin kengin, pehmein kengin ja sukin sekä superpallo ja tuolin siirto. Lähtökohtana mittalukujen kehittämisessä oli ensinnäkin askeläänikojeen käyttäminen äänilähteenä sekä toiseksi se, että uusi mittaluku voidaan ilmaista askeläänitasoluvun $L'_{n,w}$ tai $L'_{nT,w}$ ja spektripainotustermin summana. Spektripainotustermien laskemiseksi tarvittavat referenssispektrit johdettiin matemaattisen optimoinnin keinoin. Jokaiselle viidelle äänelle johdettiin erikseen referenssispektri, ja lisäksi johdettiin optimoitu spektri, joka perustuu kaikkiin viiteen ääneen. Mittaluku ilmaistuna askeläänitasoluvun ja kaikkiin tutkittuihin ääniin perustuvan optimoidun spektrin perusteella lasketun spektripainotustermin summana vastasi erittäin hyvin subjektiivisesti koettua häiritsevyyttä erilaisista askeläänistä. Lisäksi mittaluku tuotti paremman selitysasteen suhteessa subjektiivisesti koettuun häiritsevyyteen (r^2 = 0,93) kuin yksikään standardin ISO 717-2 mukaisista mittaluvuista.

1 JOHDANTO

Jo pitkään on tiedetty, että standardin ISO 717-2 [1] mukaiset mittaluvut eivät vastaa erityisen hyvin asukkaiden subjektiivista kokemusta askeläänieristävyydestä asuinrakennuksissa [2]. Tämän ongelman ratkaisemiseksi on ollut kaksi lähestymistapaa. Ensinnäkin on pyritty muokkaamaan äänilähteenä mittauksissa käytettävää askeläänikojetta tai korvaamaan se uudella äänilähteellä. Hiljattain on kuitenkin saatu viitteitä siitä, että vaihtoehtoiset askeläänilähteet eivät välttämättä johda parempaan vastaavuuteen mittalukujen ja asukkaiden subjektiivisen kokemuksen välillä [3]. Toinen lähestymistapa ongelman selvittämiseksi on ollut askeläänikojeen säilyttäminen äänilähteenä, mutta vuosikymmeniä käytetyn askeläänitasoluvun $L'_{n,w}$ tai $L'_{nT,w}$ korvaaminen uudella, paremmin asukkai-

© 2019 Mikko Kylliäinen, Petra Virjonen ja Valtteri Hongisto. Tämä on avoimesti julkaistu teos, joka noudattaa Creative Commons NIMEÄ 4.0 Ei sovitettu –lisenssiä (CC BY 4.0). Teosta saa kopioida, levittää, näyttää ja esittää julkisesti ja siitä saa luoda johdannaisteoksia, kunhan tekijän nimi ja lähde mainitaan asianmukaisesti.

den kokemusta askeläänеneristyksestä vastaavalla mittaluvulla. Useita vaihtoehtoisia mittalukuja onkin kehitelty 1960-luvulta lähtien [4–8].

Hiljattain Suomessa on tehty psykoakustinen koe, joka koski betonivälipohjien askeläänеneristystä. Kokeen tulokset vahvistivat, että standardin [1] mukaiset mittaluvut $L'_{n,w}$ $L'_{n,w} + C_I$ ja $L'_{n,w} + C_{I,50\text{-}2500}$ eivät ole erityisen hyvin yhteydessä subjektiivisesti koettuun erilaisten askeläänten äänekkyyteen tai häiritsevyyteen [9]. Tämä koski myös neljää vaihtoehtoista mittalukua [5–8].

Tässä selostettavan tutkimuksen tavoitteena oli kehittää uusia askeläänеneristävyyden mittalukuja, jotka vastaisivat hyvin asukkaiden kokemaa häiritsevyyttä askeläänistä yläkerrassa. Vaihtoehtoiset mittaluvut kehitettiin viidelle äänityypille: kävelylle sukin sekä kova- ja pehmeäpohjaisin kengin, superpallon pompottelulle sekä tuolin siirrolle. Äänityyppejä on tarkemmin kuvattu lähteessä [9]. Lisäksi tavoitteena oli kehittää yksi mittaluku, joka yksinään vastaisi mahdollisimman hyvin kaikkien viiden äänityypin tuottamaa häiritsevyyttä. Tämä esitys perustuu laajempaan tutkimukseen, joka on kuvattu tarkemmin lähteissä [10] ja [11].

2 AINEISTO JA MENETELMÄT

2.1 Lähtökohdat

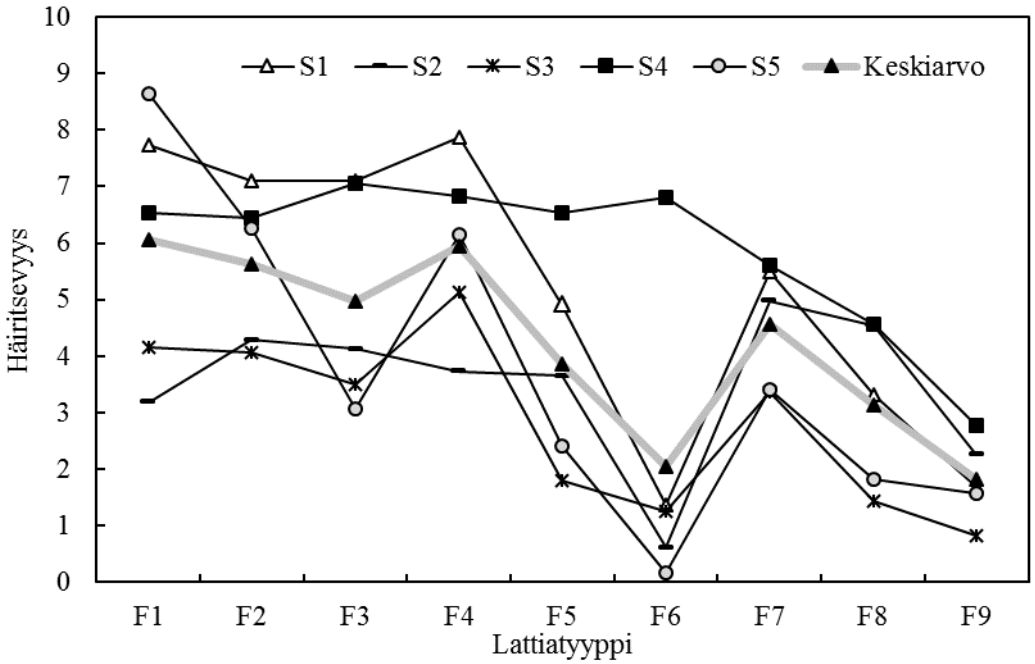
Tällä hetkellä näyttää ilmeiseltä, että askeläänikoje säilyy mittauksissa äänilähteenä [12]. Siksi tutkimuksen lähtökohtana oli, että parempi menetelmä askeläänеneristyksen arvioimiseen tulisi löytää johtamalla uusi mittaluku tai vertailukäyrä sen sijaan, että askeläänikoje yritettäisiin korvata uudella äänilähteellä. Lisäksi lähtökohtana oli, että uusi mittaluku voitaisiin ilmaista vanhan askeläänitasoluvun $L'_{n,w}$ tai $L'_{nT,w}$ ja uuden spektripainotustermin summana. Uudet mittaluvut kehitettiin taajuusalueelle 50–2500 Hz.

2.2 Kokeellinen aineisto

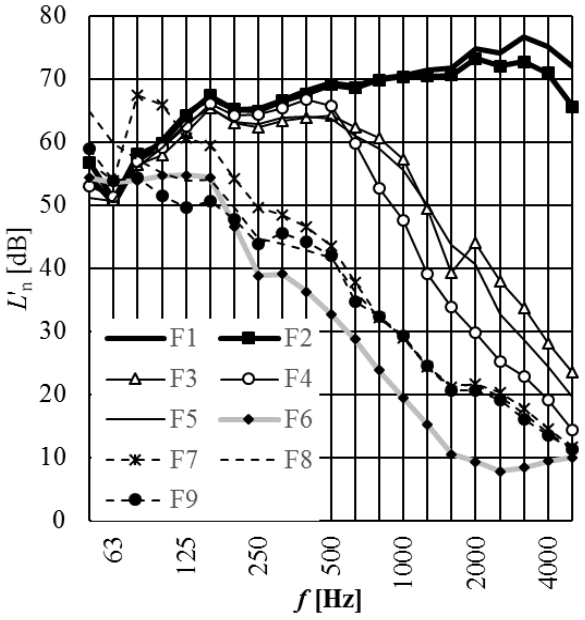
Kokeellinen aineisto tässä tutkimuksessa tuotettiin psykoakustisella laboratoriokokeella, joka käsitteli erilaisten askeläänеneristykseen liittyvien äänityyppien subjektiivisesti koettua äänekkyyttä ja häiritsevyyttä. Psykoakustinen koe on selostettu perusteellisesti lähteessä [9]. Kokeessa käytettyjen äänten tuottaminen, tallentaminen ja mittaaminen on raportoitu lähteessä [13].

Kokeessa kuuntelijoille toistettiin 45 erilaista askeläänтä. Ne oli saatu aikaan tallentamalla viiden äänilähteen tuottamia ääniä yhdeksällä lattiarakenteella askeläänilaboratoriossa. Lattian kantavana rakenteena oli päällystämätön 265 mm paksu ontelolaatasto (F1), jonka päällä oli kahdeksan lattianpäällystettä. Askeläänitasot L'_n [dB] mitattiin standardin ISO 140-7 [14] mukaisesti. Lattianpäällysteet ja askeläänеneristysmittaukset on selostettu tarkemmin lähteessä [13]. Lattianpäällysteinä olivat: kova muovimatto (F2), joustava muovimatto (F3), parketti alusmateriaaleineen (F4), kova tekstiilimatto (F5), pehmeä tekstiilimatto (F6), kahdesta lattiakipsilevystä ja 13 mm paksusta mineraalivillakerroksesta muodostuva kelluva lattia (F7), kahdesta lattiakipsilevystä ja 50 mm paksusta mineraalivillakerroksesta muodostuva kelluva lattia (F8) ja neljästä lattiakipsilevystä ja 50 mm mineraalivillakerroksesta muodostuva kelluva lattia (F9). Askeläänilaboratoriossa tallennettiin viiden äänilähteen kullakin yhdeksällä lattialla tuottamat äänet. Äänityypit olivat kävely kovapohjaisin kengin (S1), kävely sukin (S2), kävely pehmeäpohjaisin kengin (S3), superpallon pompottelu (S4) ja tuolin siirto (S5).

Psykoakustiseen kokeeseen osallistui 55 vapaaehtoista, joista 30 oli naisia ja 25 miehiä. Osallistujien ikä vaihteli 20 ja 57 vuoden välillä. Äänet toistettiin alakaton yläpuolelle asennetuista kaiuttimista siten, että ääni kuulosti tulevan yläkerran naapurista. Kuuntelijat arvioivat kunkin äänen häiritsevyyden asteikolla 0–10. Arvo 0 tarkoitti, että ääntä ei ollut mahdollista kuulla ja arvo 10, että ääni oli erittäin häiritsevä. Kokeen osallistujien kokeman häiritsevyyden keskiarvot on esitetty kuvassa 1. Lattioiden mitatut normalisoidut askeläänitasot L'_n on esitetty kuvassa 2.



KUVA 1. *Psykoakustisen kokeen osallistujien eri äänien S1–S5 häiritsevyysarvioiden keskiarvot lattioilta F1–F9. Lisäksi on esitetty keskiarvo kaikista äänityypeistä.*



KUVA 2. *Lattioiden F1–F9 mitatut askeläänitasot L'n.*

2.3 Mittalukujen matemaattinen optimointi

Mittalukujen johtamiseen käytettiin matemaattista optimointia aiemmassa tutkimuskirjallisuudessa [7–8] sovelletun arvaamismenettelyn sijasta. Uusien spektripainotustermien laskennassa tarvittavat vertailuspektrit johdettiin kullekin äänityypille erikseen. Lisäksi kehitettiin optimoitu vertailuspektri kaikille viidelle äänityypille yhdessä. Virjonen et al. [15] ovat aiemmin kehittäneet optimoidun vertailuspektrin ilmaääneneristävyydelle. Kehitetty optimointimenetelmä on tehokas ja nopea tapa matemaattisesti perusteltavissa olevan mittaluvun johtamiseen.

Uusiin vertailuspektreihin ja mittalukuihin johtava optimointi on kuvattu perusteellisesti lähteessä [10]. Subjektiivinen muuttuja kullekin lattia- ja äänityypille määriteltiin 55 koehenkilön antamien häiritsevyysarvioiden keskiarvona. Subjektiivisen muuttujan oletettiin riippuvan lineaarisesti mittaluvusta. Tavoitteena oli löytää optimoitu vertailuspektri kullekin äänityypeistä S1–S5. Optimoidusta vertailuspektristä äänityypille S1 käytetään merkintää L_{S1}. Kullekin äänityypille johdettiin oma vertailuspektrinsä siten, että subjektiivisesti koetulla häiritsevyydellä oli paras mahdollinen pienimmän neliösumman sovitus tuloksena saatujen mittalukujen kanssa. Optimoidut vertailuspektrit määriteltiin muotoilemalla tehtävä rajoitettuna epälineaarisena optimointiprobleemana ja ratkaisemalla se numeerisesti. Optimoitu mittaluku voidaan ilmaista askeläänitasoluvun $L'_{n,w}$ ja spektripainotustermin summana. Esimerkiksi äänityypille S1 spektripainotustermi $C_{I,S1}$ on

$$C_{I,S1} = 10\lg \sum_{j=1}^{K} 10^{0,1(L_{S1,j}-78,2-10\lg f_j+L_{n,j})} - 18,9 - L'_{n,w} \qquad (1)$$

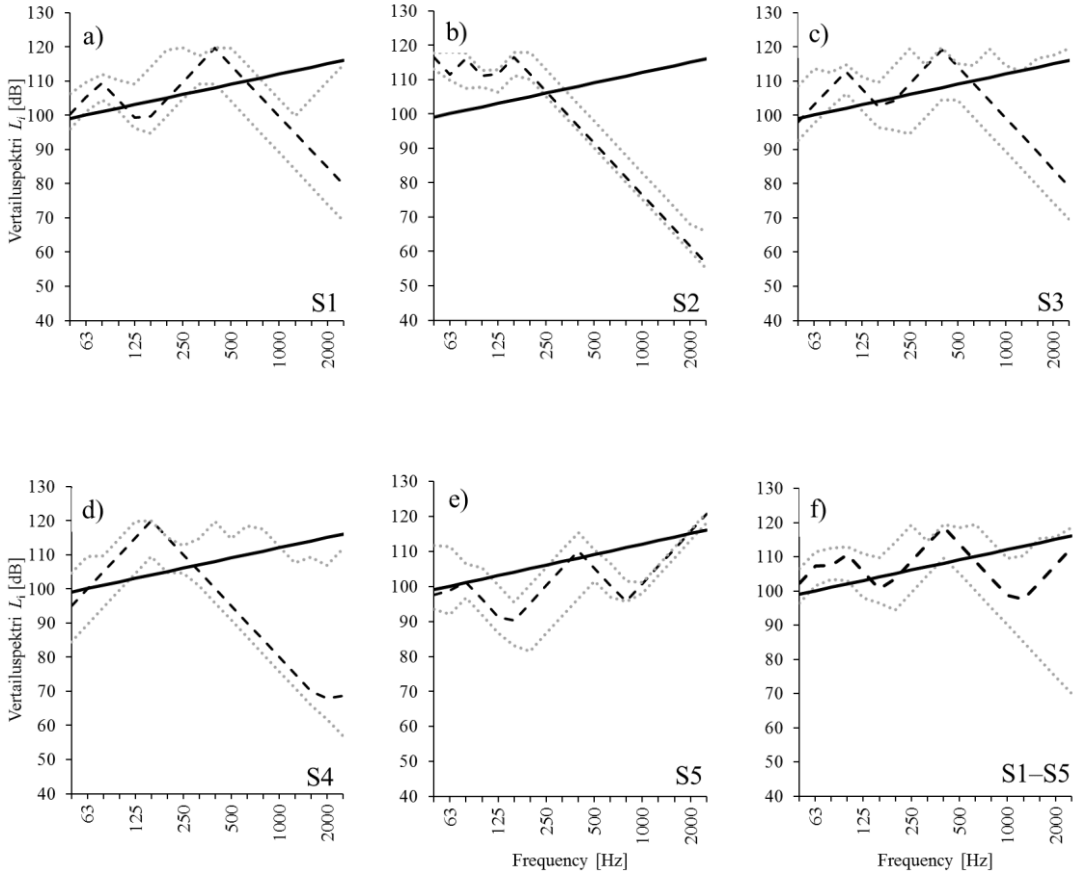
Kullekin äänityypille johdetun optimoidun vertailuspektrin lisäksi johdettiin vertailuspektri kaikille viidelle äänityypille yhdessä. Tämä on tarkoituksenmukaista, sillä rakentamismääräyksissä vaatimustaso ilmoitetaan yhdellä mittaluvulla, jonka tulee edustaa tavanomaisia asumisen äänityyppejä. Äänityyppien S1–S5 oletetaan edustavan äänityyppejä hyvin. Optimoidusta vertailuspektristä käytetään merkintää L_{opt} ja sen avulla ilmoitettava mittaluku on $L'_{n,w} + L_{opt}$. Tämä vertailuspektri perustuu siis 45 erilaiseen ääneen.

3 TULOKSET

Optimoidut vertailuspektrit on esitetty kuvassa 3. Selitysasteet standardin [1] mukaisten ja optimoitujen mittalukujen sekä häiritsevyyden kesken on esitetty taulukossa 1.

TAULUKKO 1. Selitysasteet r^2 optimoitujen ja standardinmukaisten mittalukujen ja häiritsevyyden kesken kullakin äänityypillä S1–S5. Parhaat arvot on alleviivattu.

Mittaluku	**S1**	**S2**	**S3**	**S4**	**S5**
$L'_{n,w} + C_{I,S1}$	<u>0,93</u>	0,38	0,75	0,35	0,73
$L'_{n,w} + C_{I,S2}$	0,41	<u>0,87</u>	0,30	0,01	0,31
$L'_{n,w} + C_{I,S3}$	0,91	0,35	<u>0,77</u>	0,42	0,69
$L'_{n,w} + C_{I,S4}$	0,87	0,24	0,71	<u>0,56</u>	0,59
$L'_{n,w} + C_{I,S5}$	0,75	0,26	0,61	0,20	<u>0,87</u>
$L'_{n,w} + C_{I,opt}$	0,92	0,40	0,75	0,35	0,74
$L'_{\mathbf{n,w}}$	0,68	0,09	0,54	0,30	0,80
$L'_{n,w} + C_{I}$	0,83	0,17	0,68	0,44	0,75
$L'_{n,w} + C_{I,50\text{-}2500}$	0,82	0,27	0,65	0,29	0,82



KUVA 3. Optimoidut vertailuspektrit L_{S1}…L_{S5} kullekin äänityypille S1–S5.

4 POHDINTA JA PÄÄTELMÄT

Standardoidut mittaluvut $L'_{n,w}$ $L'_{n,w} + C_I$ ja $L'_{n,w} + C_{I,50\text{-}2500}$ korreloivat kohtalaisesti äänityyppien S1 (kävely kovapohjaisin kengin), S4 (kävely pehmeäpohjaisin kengin) ja S5 (tuolin siirto) kanssa. Sitä vastoin selitysasete oli heikko äänityyppien S1 (kävely sukin) ja S4 (superpallo) kanssa.

Hyvään selitysasteeseen johtava optimoitu vertailuspektri voitiin määrittää kullekin äänityypille S1–S5. Verrattuna standardin ISO 717-2 [1] mukaisiin mittalukuihin kukin optimoitu mittaluku johti suurempaan korrelaatioon koetun häiritsevyyden kanssa. Virjonen et al [15] päätyivät samaan lopputulokseen optimoidessaan mittalukuja ilmaääneneristävyydelle. Tämä osoittaa, että matemaattinen optimointi on tarkoituksenmukainen ja perusteltu menetelmä uusien ääneneristävyyden mittalukujen johtamiseksi siten, että johdetut mittaluvut vastaavat paremmin asukkaiden kokemusta äänistä.

Käytännössä mittalukujen tulisi vastata kaikkia äänityyppejä yhdessä. Siksi johdettiin myös optimoitu vertailuspektri L_{opt}, johon sisältyvät kaikki viisi tutkittua äänityyppiä. Taulukon 1 perusteella optimoitu vertailuspektri on varsin hyvä, sillä se tuottaa äänityypeille S1–S3 paremman korrelaation kuin yksikään standardin mukainen mittaluku. Korrelaatio oli varsin hyvä myös äänityypeille S4 ja S5. Siten tutkimuksessa asetettu tavoite pystyttiin saavuttamaan eli kehitettiin askeläänеneristävyydelle mittaluku, joka toimii käytössä olevia mittalukuja paremmin.

VIITTEET

[1] ISO 717-2:2013. Acoustics – Rating of sound insulation in buildings and of building elements – Part 2: Impact sound insulation. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

[2] Kylliäinen, M. 2007. Miksi askeläänеneristyksen arviointi on niin vaikeaa? Akustiikkapäivät 2007. Espoo, 27.-28.9., Akustinen Seura ry, s. 130-135.

[3] Gover B N, Bradley J S, Schoenwald S & Zeitler B. Subjective ranking of footstep and low-frequency impact sounds on lightweight wood-framed floor assemblies. Proceedings of the 6th Forum Acusticum; 26 June – 1July 2011; Aalborg, Denmark.

[4] Gösele K. Zur Bewertung der Schalldämmung von Bauteilen nach Sollkurven. Acustica 1965:15, 264–270.

[5] Fasold W. Untersuchungen über den Verlauf der Sollkurve für den Trittschallschutz im Wohnungsbau. Acustica 1965:15, 271–284.

[6] Gerretsen E. A new system for rating impact sound insulation. App Ac 1976:9(4), 247–263.

[7] Bodlund K. Alternative reference curves for evaluation of the impact sound insulation between dwellings. J. of Sound and Vibration 1985:102, 381–402.

[8] Hagberg K. Evaluating field measurements of impact sound. Building Acoustics 2010:17, 105–128.

[9] Kylliäinen M, Hongisto V, Oliva D & Rekola J. Subjective and objective rating of impact sound insulation of a concrete floor with various coverings. Acta Acust united Ac. 2017:103(2), 236–251.

[10] Kylliäinen M, Virjonen P & Hongisto V. Optimized reference spectrum for rating the impact sound insulation of concrete floors. J Acoust Soc Am. 2019:145(1), 407–416.

[11] Kylliäinen, M. 2019. Rating the impact sound insulation of concrete floors with single-number quantities based on a psychoacoustic experiment. Dissertation. Tampere, Tampere University Dissertations 93.

[12] Rasmussen B & Machimbarrena M. Building acoustics throughout Europe - Volume 1: Towards a common framework in building acoustics throughout Europe. COST Action TU0901, Brussels; 2014.

[13] Kylliäinen M, Lietzén J, Kovalainen V & Hongisto V. Correlation between single number-quantities of impact sound insulation and noise ratings of walking on concrete floors. Acta Acust united Ac 2015:101(5), 975–985.

[14] ISO 140-7:1998. Acoustics – Measurement of sound insulation in buildings and of building elements - Part 7: Field measurements of impact sound insulation of floors. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

[15] Virjonen P, Hongisto V & Oliva D. Optimized single-number quantity for rating the airborne sound insulation of constructions: Living sounds. J. Acoust. Soc. Am. 2016:140 (6), 4428–4436.

[16] Ljunggren F, Simmons C & Hagberg K. Correlation between sound insulation and occupants' perception - Proposal of alternative single number rating of impact sound. Appl. Acoust 2014: 85, 57–68.

ÄÄNENERISTÄVYYSMITTAUSTEN MITTALUKUJEN EROT KENTTÄMITTAUSAINEISTON PERUSTEELLA

Olli Santala[1] **ja Erno Huttunen**[2]

[1] Helimäki Akustikot Oy
Temppelikatu 6 B
00100 Helsinki
olli.santala@helimaki.fi

[2] Helimäki Akustikot Oy
Asemakatu 22-24
70100 Kuopio
erno.huttunen@helimaki.fi

Tiivistelmä

Ääneneristävyysmääräykset muuttuivat Suomessa vuonna 2018, ja tällöin siirryttiin käyttämään ilma- ja askeläänieristysmittauksissa uusia mittalukuja. Varsinaiset mittausmenetelmät ovat samoja sekä vanhoilla että uusilla mittaluvuilla, mutta niiden laskennassa on eroavaisuuksia. Tässä artikkelissa tarkastellaan laajan kenttämittausaineiston avulla, miten mittaustulokset käyttäytyvät eri mittaluvuilla ja kuinka tyypillistä on, että ääneneristävyysmääräykset täyttyvät vain jommalla kummalla mittaluvulla. Lisäksi analysoidaan mittalukujen tulosten eroja suhteessa Rakennusteollisuusyhdistyksen tilavuusrajoitukseen, joka oli käytössä vanhojen mittalukujen tapauksessa asuinrakennuksissa. Askeläänieristävyyden osalta käsitellään myös spektripainotustermin $C_{I,50\text{-}2500}$ vaikutusta.

1 JOHDANTO

Suomessa käytettiin vuosikymmenien ajan ilmaääneneristävyyden laskennassa mittalukua R'_w ja askeläänieristävyydessä mittalukua $L'_{n,w}$. Eri mittalukuvaihtoehtojen ja subjektiivisen kokemuksen välisen yhteyden kehittämistä tutkittiin laajalti [1], ja vuonna 2018 astui voimaan uusi Ympäristöministeriön asetus (YMa 796/2017) [2], jossa mittaluvuiksi vaihtui äänitasoeroluku $D_{nT,w}$ sekä askeläänitasoluku $L'_{nT,w} + C_{I,50\text{-}2500}$. Muutoksen myötä itse mittausmenetelmät eivät muuttuneet, vain laskentatapa vaihtui. Määräystason lukuarvo, ilmaääneneristävyydessä vähintään 55 dB ja askeläänieristävyydessä enintään 53 dB, pysyi samana verrattuna aiempaan määräykseen, joka asetettiin Suomen rakennusmääräyskokoelmassa (SRakMk C1-1998) [3]. Mittalukujen laskentatavan muutos kuitenkin johtaa siihen, että mittaustuloksen määräyksen täyttyminen voi muuttua tapauskohtaisesti. Tässä tutkimuksessa käsiteltiin laajaa kenttämittausaineistoa erityisesti määräystasojen täyttymisen kannalta.

© 2019 Olli Santala ja Erno Huttunen. Tämä on avoimesti julkaistu teos, joka noudattaa Creative Commons NIMEÄ 4.0 Kansainvälinen –lisenssiä (CC BY 4.0). Teosta saa kopioida, levittää, näyttää ja esittää julkisesti ja siitä saa luoda johdannaisteoksia, kunhan tekijän nimi ja lähde mainitaan asianmukaisesti.

Mittalukujen eroja on tutkittu eri näkökulmista. Askeläänneneristävyyden spektripainotustermin $C_{I,50\text{-}2500}$ on todettu aiheuttavan välipohjatyyppien välillä muutoksia niiden paremmuusjärjestyksessä, mutta määräystason täyttymiseen sillä oli vaikutusta vain harvoin [4]. Askeläänneneristävyyden tarkastelun laajentamisen alaspäin 50 Hz taajuusalueelle tai jopa 20-25 Hz asti on havaittu johtavan parempaan vastaavuuteen koetun askeläänneneristävyyden kanssa [5]. Koettu askeläänneneristävyys korreloi paremmin mittaluvun kanssa myös silloin, kun käytetään standardisointia jälkikaiunta-aikaan (kuten mittaluvussa $L'_{nT,w}$) absorptiopinta-alaan normalisoinnin sijasta ($L'_{n,w}$) [1, 6].

Kuten kappaleessa 2 tullaan osoittamaan, mittalukujen R'_w ja $D_{nT,w}$ sekä $L'_{n,w}$ ja $L'_{nT,w}$ riippuvuus toisistaan noudattaa suoraan laskennallista teoriaa, joten siltä osin tarkastelu on suoraviivaista. Kenttämittausaineistoa tarkastelemalla haluttiin selvittää, miten käytännön asiat vaikuttavat mittalukujen riippuvuuteen ja millaisia eroavaisuuksia tämä aiheuttaa teoriaan verrattuna. Tämän tutkimuksen ensimmäisenä painopisteenä on se, että käytännön toiminnassa mittauksen tilaajaa ja valvovaa tahoa kiinnostaa erityisesti määräysten täyttyminen. Laajan kenttämittausaineiston avulla pystytään tarkastelemaan, miten ja kuinka yleisesti mittalukujen vaihtaminen vaikuttaa määräystasojen täyttymiseen. Lisäksi keskitytään spektripainotustermiin askeläänitasoluvun osalta sekä tilavuusrajoituksen vaikutukseen. Kyseinen tilavuusrajoitus oli käytössä Rakennusteollisuus RT:n suosituksesta vanhojen mittalukujen laskennassa vuosien 2009 ja 2017 välillä ja koski mittauksia, joissa vastaanottohuoneen tilavuus oli yli 60 m^3 [7].

Tutkimuksen aineisto on kerätty kenttämittauksista, jotka on tehty 2010-luvulla normaalina mittaustoimintana (Helimäki Akustikot Oy). Tarkasteltavat mittauskohteet on rajattu asuntoihin. Otoskoko on askeläänneneristävyyden osalta lähes tuhat mittausta ja ilmaääneneristävyydessä hieman yli tuhat.

2 TAUSTA

Sekä askel- että ilmaääneneristävyyden osalta mittalukujen välinen riippuvuussuhde on johdettavissa standardeissa esitetyistä kaavoista. Varsinaisissa mittaustavoissa ei ole eroja, eli samasta mittausaineistosta voidaan laskea sekä normalisoitu että standardisoitu mittaluku.

Askeläänneneristävyyden osalta standardi ISO 16283-2:2018 [8] määrittelee normalisoidun ja standardisoidun askeläänitason kaavoilla

$$L'_n = L_i + 10lg\frac{A}{A_0} \quad (1)$$

$$L'_{nT} = L_i - 10lg\frac{T}{T_0} \quad (2)$$

missä L_i on energiakeskiarvoistettu askeläänitaso kussakin mittauspisteessä, A on absorptioala vastaanottohuoneessa, A_0 on referenssiabsorptioala (10 m^2), T on jälkikaiunta-aika ja T_0 referenssijälkikaiunta-aika (0,5 s). Sabinen kaavan

$$A = \frac{0{,}161V}{T} \tag{3}$$

avulla saadaan johdettua normalisoidun ja standardisoidun askeläänitason erotus:

$$L'_{\mathrm{n}} - L'_{\mathrm{n}T} = 10\lg(V) + 10\lg\frac{0{,}161}{A_0 T_0}\,. \tag{4}$$

Jälkimmäinen osa on vakio, joten erotus on riippuvainen vain vastaanottohuoneen tilavuudesta V.

Ilmaääneneristävyyden osalta puolestaan standardi ISO 16283-1:2014 [9] määrittelee ilmaääneneristävyysluvun *R*' ja standardisoidun äänitasoeroluvun $D_{\mathrm{n}T}$ kaavoilla

$$R' = D + 10\,\lg\frac{S}{A} \tag{5}$$

$$D_{\mathrm{n}T} = D + 10\,\lg\frac{T}{T_0} \tag{6}$$

missä *D* on lähetys- ja vastaanottohuoneiden energiakeskiarvoistettujen äänenpainetasojen erotus ja S on lähetys- ja vastaanottohuoneen välinen pinta-ala. Jälleen Sabinen kaavaa (3) käyttäen voidaan johtaa mittalukujen erotus:

$$R' - D_{\mathrm{n}T} = 10\,\lg\frac{S}{V} + 10\,\lg\frac{T_0}{0{,}161} \tag{7}$$

Kaavasta nähdään, että erotus on riippuvainen vain mittaushuoneiden välisen pinta-alan ja vastaanottohuoneen tilavuuden suhteesta – eli vastaanottohuoneen syvyydestä.

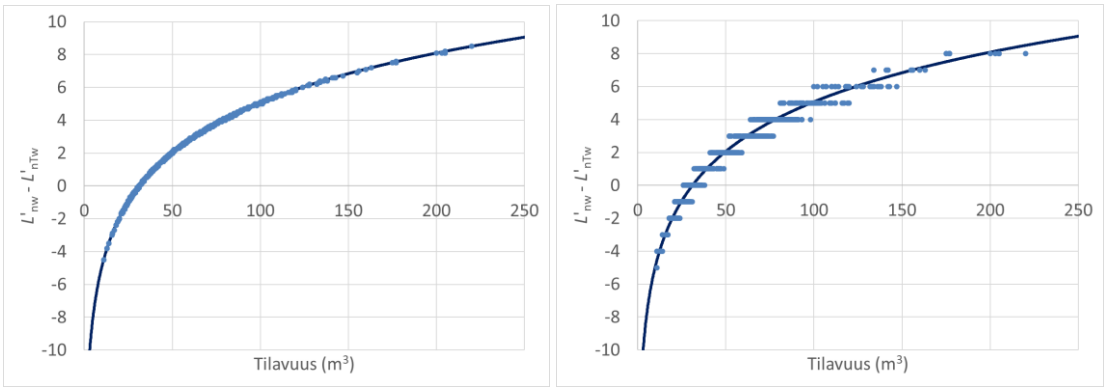
Kaavojen (4) ja (7) avulla voidaan esittää kuvaajat mittalukujen erotuksen riippuvuudesta. Nämä on esitetty kaikkien tuloskuvien yhteydessä yhtenäisellä viivalla. Askeläänerististävyyden tapauksessa vaaka-akselilla on vastaanottohuoneen tilavuus ja ilmaääneneristävyydessä puolestaan vastaanottohuoneen syvyys.

Askeläänerististävyyden osalta mittalukujen erotus kaavassa (4) saa arvon nolla tilavuuden 31 m^3 kohdalla. Tätä pienemmissä huoneissa standardisoitu askeläänitasoluku $L'_{\mathrm{n}T,\mathrm{w}}$ eli YMa 796/2017 mukainen uusi mittaluku antaa siis huonomman tuloksen eli suuremman askeläänitason kuin vanha mittaluku. Ilmaääneneristävyyden osalta puolestaan kaava (7) saa arvon nolla, kun vastaanottohuoneen syvyys on 3,1 m. Tätä pienemmissä huoneissa standardisoitu äänitasoeroluku $D_{\mathrm{n}T,\mathrm{w}}$ antaa huonomman tuloksen eli pienemmän ilmaääneneristävyyden kuin vanha mittaluku.

3 TULOKSET

3.1 Askelääneneristävyys

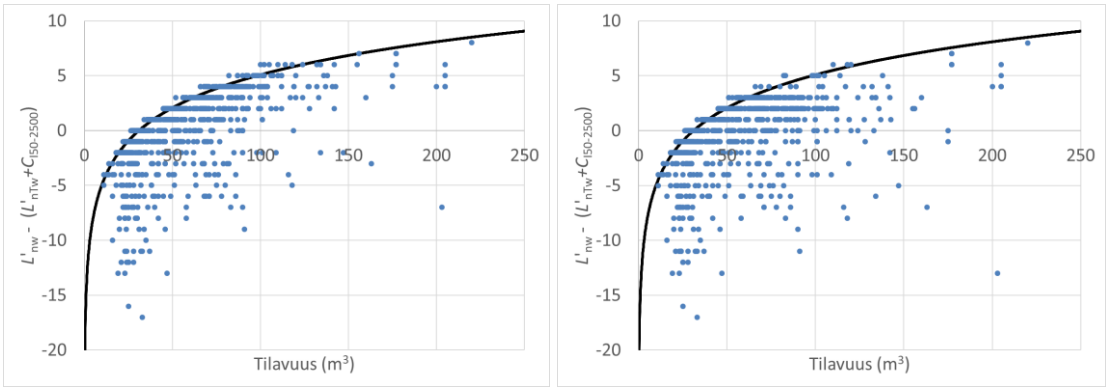
Aineistoa tarkasteltiin siten, että jokaisen mittauksen osalta laskettiin mittalukujen väliset erotukset useammalla eri tavalla. Kuvassa 1 on esitetty askelääneneristävyyden mittalukujen erotus, $L'_{n,w} - L'_{nT,w}$. Tässä tapauksessa kuva 1a seuraa suoraan teoriaa, sillä mukana on vain kaavojen mukaisia elementtejä. Kuvassa 1b puolestaan nähdään, miten erotus käyttäytyy, kun tehdään pyöristys kokonaislukuun. Ääneneristävyys esitetään määräyksiin verrattaessa kokonaislukuina, joten tämä tarkastelu esittää todellisessa tilanteessa esiintyvät epävarmuudet.



(a) (b)

Kuva 1. Askelääneneristävyyden mittalukujen erotus vastaanottohuoneen tilavuuden funktiona tarkkuudella 0,1 dB (a) sekä kokonaislukuihin pyöristettynä (b).

Kuvassa 2a on otettu mukaan spektripainotustermi $C_{I,50\text{-}2500}$ Ympäristöministeriön ohjeen [10] mukaisesti vain, kun termi on positiivinen eli kun se vaikuttaa heikentävästi askelääneneristävyyden tulokseen uudella mittaluvulla. Kuvassa 2b on otettu mukaan tilavuusrajoituksen vaikutus. Molemmissa kuvissa on käytetty pyöristämistä kokonaislukuun.



(a) (b)

Kuva 2. Askelääneneristävyyden mittalukujen erotus spektripainotustermi huomioiden vain, kun termi on positiivinen (a). Tämän lisäksi tilavuusrajoitus huomioitu (b).

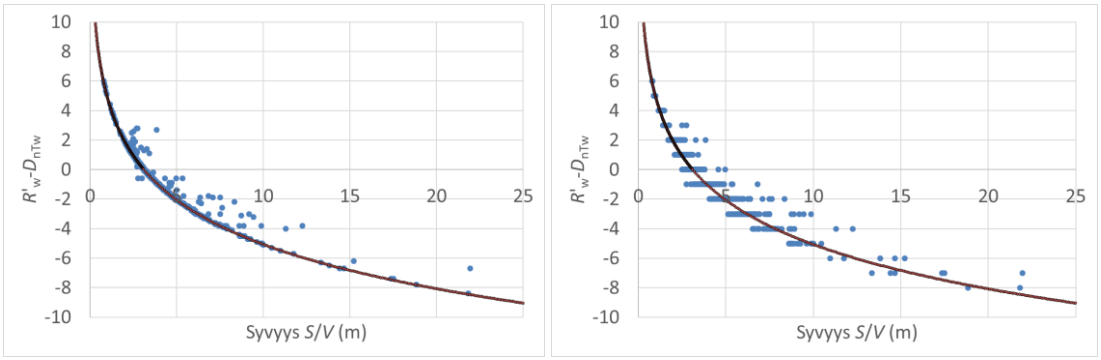
Taulukossa 1 on esitetty ne prosenttiosuudet mittausdatasta, joilla YMa 796/2017 [2] tai RakMK C1-1998 [3] mukainen määräystaso 53 dB askelääneneristävyydelle ei täyty.

Taulukko 1. Askeläänneneristävyyden määräystason 53 dB täyttyminen eri mittaluvuilla.

	Tilavuusrajoitus	Ei tilavuusrajoitusta
$L'_{n,w}$ ei täytä määräystä	26,2 %	27,3 %
$L'_{nT,w} + C_{I,50\text{-}2500}$ ei täytä määräystä	25,2 %	25,2 %
Kumpikaan ei täytä määräystä	21,3 %	21,4 %
Vain $L'_{n,w}$ ei täytä määräystä	5,1 %	6,0 %
Vain $L'_{nT,w} + C_{I,50\text{-}2500}$ ei täytä määräystä	4,1 %	3,9 %

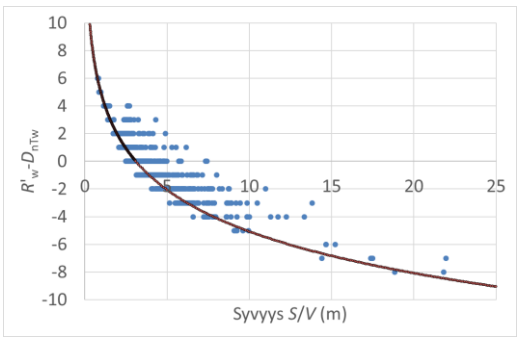
3.2 Ilmaääneneristävyys

Kuvassa 3a on esitetty ilmaääneneristävyyden mittalukujen erotus, $R'_w - D_{nTw}$. Erotus ei suoraan seuraa teoriaa, mikä johtuu pinta-alan laskennasta. Standardi ISO 140-4 [11] ja standardin ISO 16283-1 lisäys 1:2017 [12] määrittävät, että kun huoneiden erottava pinta-ala on alle 10 m^2, pinta-ala tulee laskea kaavalla S = max(S,V/7,5) [11, 12]. Kuvassa näkyvät poikkeamat kaavojen mukaisesta käyrästä ovat tapauksia, joissa pinta-ala on laskettu tilavuuden kautta. Kuvassa 3b on tehty pyöristys kokonaislukuun, ja kuvassa 4 on huomioitu tilavuusrajoitus mittaluvun R'_w laskennassa. Tilavuusrajoituksen vaikutuksen tarkastelu on erilaista ilmaääneneristävyydessä kuin askeläänneneristävyydessä, koska mittalukujen erotus on kaavan (7) mukaisesti riippuvainen pinta-alan ja tilavuuden suhteesta eikä pelkästä tilavuudesta.



(a) (b)

Kuva 3. Ilmaääneneristävyyden mittalukujen erotus huoneen syvyyden funktiona tarkkuudella 0,1 dB (a) sekä kokonaislukuihin pyöristettynä (b).



Kuva 4. Ilmaääneneristävyyden mittalukujen erotus tilavuusrajoitus huomioiden.

Taulukossa 2 on esitetty ne prosenttiosuudet mittausdatasta, joilla YMa 796/2017 [2] tai RakMK C1-1998 [3] mukainen määräystaso 55 dB ilmaääneneristävyydelle ei täyty.

Taulukko 2. Ilmaääneneristävyyden määräystason 55 dB täyttyminen eri mittaluvuilla.

	Tilavuusrajoitus	Ei tilavuusrajoitusta
R'_w ei täytä määräystä	30,0 %	31,5 %
$D_{nT,w}$ ei täytä määräystä	30,7 %	30,7 %
Kumpikaan ei täytä määräystä	26,7 %	26,8 %
Vain R'_w ei täytä määräystä	3,3 %	4,7 %
Vain $D_{nT,w}$ ei täytä määräystä	4,0 %	3,9 %

4 ANALYYSI

Kuvista 1a ja 3a on nähtävissä, että mittalukujen erotuksen ja tilavuuden tai syvyyden suhde noudattaa periaatteessa kaavoista johdettua riippuvuutta. Määräystasoon verrattaessa mittaluvuille tehdään kuitenkin kolme asiaa, jotka aiheuttavat sen, että mittalukujen eroja ei voi käsitellä pelkästään teorian kautta:

- 1. pyöristys kokonaislukuun,
- 2. rajoitus 60 m^3 tilavuuteen verrattaessa tuloksia RakMK C1-1998:aan sekä
- 3. spektripainotustermin $C_{I,50\text{-}2500}$ huomiointi (askeläänineristävyyden tapauksessa)

4.1 Pyöristäminen

Pyöristämisen vuoksi yhdellä tilavuuden tai syvyyden arvolla tulos voi poiketa 1 dB kaavan mukaan oletetusta arvosta. Ilmaääneneristävyyden tapauksessa kuvasta 3b nähdään, että yhdellä syvyyden arvolla voidaan itse asiassa saada jopa 5 dB toisistaan poikkeavia tuloksia. Tämä johtuu jo kuvassa 3a mukana olleesta pinta-alan laskentatavasta alle 10 m^2:n tapauksissa.

4.2 Tilavuusrajoitus

Vanhojen mittalukujen ja RakMK C1-1998:n tapauksessa käytetty laskennallinen 60 m^3:n tilavuusrajoitus rajoittaa merkittävän määrän mittaustuloksista tiettyyn arvoon. Tilavuusrajoitusta on käytetty askeläänineristävyyden mittausaineistosta noin 34%:ssa. Askeläänineristävyyden osalta sijoittamalla 60 m^3 kaavaan (4) saadaan arvo 2,9 dB. Tämä tarkoittaisi, että uusi mittaluku $L'_{nT,w}$ olisi aina tällaisissa tapauksissa 2,9 dB parempi kuin vanha. Kuvia 2a ja 2b vertailemalla nähdään, että tilavuusrajoituksen myötä huomattava määrä mittalukujen erotuksia asettuu kuvassa 2b arvoon 2 tai 3 dB. Noihin kahteen arvoon sijoittuvissa tapauksissa spektripainotustermi ei vaikuta tulokseen eli on nolla tai negatiivinen. Spektripainotustermin positiivisilla arvoilla puolestaan mittalukujen erotuksen vaihteluväli on pääsääntöisesti 2,9…-8 dB. Ilman tilavuusrajoitusta uuden ja vanhan mittaluvun erot olisivat vielä suurempia. Taulukon 1 perusteella tilavuusrajoitus vaikuttaa kuitenkin määräystasojen täyttymiseen vain harvoin.

Ilmaääneneristävyyden tapauksessa tilavuusrajoituksen vaikutus käyttäytyy eri tavalla, sillä mittalukujen erotusta tarkastellaan suhteessa syvyyteen eikä tilavuuteen.

Tilavuusrajoitus ei vaikuta ilmaääneneristävyydessäkään määräystasojen täyttymiseen usein: ilman tilavuusrajoitusta 1,5 prosenttiyksikköä suurempi osuus R'_w-tuloksista ei olisi täyttänyt määräystasoa.

4.3 Spektripainotustermi

Suurin vaihtelu mittalukujen välille aiheutuu askeläänеneristävyyden spektripainotustermin $C_{I,50\text{-}2500}$ huomioimisesta. Se voi olla jopa yli +10 dB, jolloin mittalukujen suhde on varsin kaukana kaavojen mukaisesta käyrästä. Määräysten täyttyminen ja mittalukujen suhde riippuu esimerkiksi välipohjarakenteesta, jonka vaikutusta ei tarkasteltu tässä artikkelissa. Askeläänеneristävyyden spektripainotustermi antaa kuitenkin osaltaan viitteitä tästä: spektripainotustermi saa suuria arvoja erityisesti kelluvilla rakenteilla, joiden ominaistaajuus asettuu taajuusalueelle 50 - 100Hz. Erityisesti tällaisissa tapauksissa voi tulla tilanne, että uusi mittaluku ei täytä määräystä, vaikka vanha mittaluku täyttääkin.

4.4 Määräysten täyttyminen

Sellaiset tapaukset ovat harvinaisia, joissa uusi mittaluku ei täytä määräystasoa, vaikka vanha mittaluku määräyksen täyttikin. Askeläänеneristävyyden tapauksessa näin voi tapahtua muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta pelkästään pienissä alle 31 m^3 huoneissa. Tämän artikkelin askeläänеneristysaineistossa noin 4 % tuloksista oli sellaisia, että vain uusi mittaluku ei täyttänyt määräystä. 5 % tuloksista oli päinvastainen tilanne eli se, että uusi mittaluku täytti määräyksen, vaikka vanha ei täyttänyt. Tämä puolestaan tapahtuu pääsääntöisesti 31 m^3 suuremmissa tiloissa.

Myös ilmaääneneristävyydessä yhtä suurella osuudella eli n. 4 %:ssa tuloksista vain uusi mittaluku ei täyttänyt määräystä. Kuvasta 4 nähdään, että tämä voi tapahtua lähinnä tapauksissa, joissa vastaanottohuoneen syvyys on enintään 5 m^2. Päinvastainen tilanne oli hieman harvinaisempaa, noin 3 % tuloksista.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Ääneneristävyyden uusien ja vanhojen mittalukujen ero perustuu suoraan niiden laskentakaavoista johdettavaan teoriaan. Tämä pätee kuitenkin vain niin kauan, kun mennään teorian ehdoilla.

Kenttämittausaineiston tarkastelu osoittaa, että RTY:n mukaisen 60 m^3:n tilavuusrajoituksen johdosta uuden ja vanhan mittaluvun erot ovat pienempiä kuin ilman rajoitusta. Voidaan ajatella, että tilavuusrajoitus oli aikanaan askel kohti uuden mittaluvun mukaisia tuloksia.

Jos vanhalla mittaluvulla määräystason täyttänyttä rakennetta tarkastellaan uudella mittaluvulla, on mahdollista mutta harvinaista, että törmätään tapaukseen, jossa uusi mittaluku ei täytäkään määräystä. Tällaisten tapausten riippuvuutta rakenteiden ominaisuuksista on mahdollista tarkastella tulevissa tutkimuksissa. Merkittävää on, että käytännössä yli 95 % tapauksista on sellaisia, että myös uusi mittaluku täyttää määräystason, mikäli vanha mittaluku on sen täyttänyt.

VIITTEET

[1] Hongisto, V. ja Kylliäinen, M. ÄKK loppuraportti, rakennusten ääniolosuhteiden käyttäjälähtöinen kehittäminen. Turku, Työterveyslaitos, 2015.

[2] Ympäristöministeriön asetus rakennuksen ääniympäristöstä. Suomen säädöskokoelma 796/2017. Helsinki, Ympäristöministeriö, 2017.

[3] Ääneneristys ja meluntorjunta rakennuksessa. Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa C1. Helsinki, Ympäristöministeriö, 1998.

[4] Kemppainen, J. ja Kylliäinen, M. Spektripainotustermin $C_{I,50\text{-}2500}$ vaikutus askelääneneristävyyden arviointiin. Akustiikkapäivät 2017, Espoo, 24.-25.8.2017.

[5] Ljunggren, F., Simmons, C. ja Öqvist, R. Correlation between sound insulation and occupants' perception – Proposal of alternative single number rating of impact sound, part II. Applied Acoustics 123, s. 143-151, 2017.

[6] Hagberg, K. G. Evaluating field measurements of impact sound. Journal of Building Acoustics, vol. 17, num. 2, s. 105-128, 2010.

[7] Rakennuksen ääneneristävyys, RakMk C1:n tulkinnat ja asuinrakennusten rakennesuositukset. Rakennusteollisuus RT, tiedote 29.9.2009.

[8] ISO 16283-2: Acoustics – Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements – Part 2: Impact sound insulation. International organization for standardization, 2018.

[9] ISO 16283-1: Acoustics – Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements – Part 1: Airborne sound insulation. International organization for standardization, 2014.

[10] Ääniympäristö, Ympäristöministeriön ohje rakennuksen ääniympäristöstä. Helsinki, Ympäristöministeriö, 2018.

[11] ISO 140-4: Acoustics – Measurement of sound insulation in buildings and of building elements – Part 4: Field measurements of airborne sound insulation between rooms. International organization for standardization, 1998.

[12] ISO 16283-1:2014 / Amd.1:2017. Acoustics – Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements – Part 1: Airborne sound insulation. Amendment 1. International organization for standardization, 2017.

PARAMETRINEN LASKENTAMALLI PUUVÄLIPOHJIEN ASKELÄÄNENERISTÄVYYDEN ARVIOINTIIN

Pekka Latvanne[1], Mikko Kylliäinen[2], Ville Kovalainen[1], Jesse Lietzén[2]

[1]A-Insinöörit
Bertel Jungin aukio 9
00260 Espoo
etunimi.sukunimi@ains.fi

[2]A-Insinöörit
Puutarhakatu 10
33210 Tampere
etunimi.sukunimi@ains.fi

Tiivistelmä

Puuvälipohjien askeläänneneristävyyden laskentaan ei ole ollut saatavissa validoituja ja suunnittelutyöhön soveltuvia laskentamenetelmiä tai ohjelmistoja. Siksi puuvälipohjien tuotekehitys on pitkälti perustunut rakenteiden toimivuuden varmistamiseen laboratoriomittauksin, mikä on usein aikaa vievää ja kallista. A-Insinöörien akustiikkasuunnitteluyksikössä on kehitetty suunnittelutyöhön ja tuotekehitykseen soveltuva laskentamenetelmä. Menetelmä koostuu analyyttisestä laskennasta sekä laajaan kirjallisuustutkimukseen pohjautuvasta parametrisestä mallista. Validoinnin perusteella voidaan todeta, että kehitetyllä laskentamenetelmällä saadaan tuloksia, jotka vastaavat tarkasti mittaustuloksia.

1 JOHDANTO

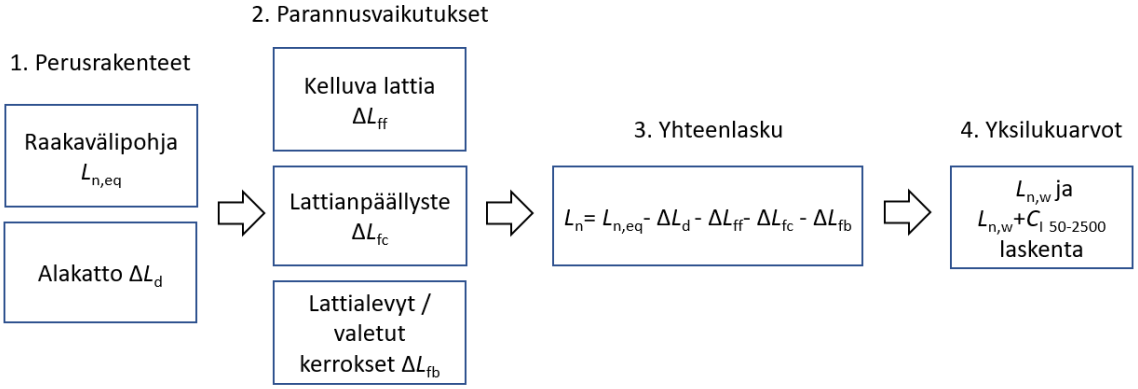
Puukerrostalojen välipohjarakenteelle kohdistuu useita vaatimuksia, kuten kantavuus, palonkesto, taipuma, värähtely ja ääneneristävyys. Välipohjan toteutuskustannukset ovat huomattava osa koko puukerrostalon toteutuskustannuksista ja merkittävässä asemassa, kun arvioidaan puurakentamisen kilpailukykyä betonirakentamiseen nähden. Puuvälipohjien askeläänneneristävyyden laskentaan ei ole ollut saatavissa validoituja ja suunnittelutyöhön soveltuvia laskentamenetelmiä tai -ohjelmistoja. [1] A-Insinöörien akustiikkasuunnitteluyksikössä on luotu suunnittelutyöhön ja tuotekehitykseen soveltuva askeläänneneristävyyden laskentamenetelmä. Menetelmä perustuu laajaan kirjallisuustutkimukseen puuvälipohjien parametrisistä askeläänneneristävyysmittauksista [1] sekä A-Insinöörien tutkimus- ja kehitystyöhön. Tämän artikkelin tarkoituksena on esittää kehitetyn laskentamenetelmän validointitulokset.

© 2019 Pekka Latvanne, Mikko Kylläinen, Ville Kovalainen ja Jesse Lietzén. Tämä on avoimesti julkaistu teos, joka noudattaa Creative Commons NIMEÄ 4.0 Kansainvälinen –lisenssiä (CC BY 4.0). Teosta saa kopioida, levittää, näyttää ja esittää julkisesti ja siitä saa luoda johdannaisteoksia, kunhan tekijän nimi ja lähde mainitaan asianmukaisesti.

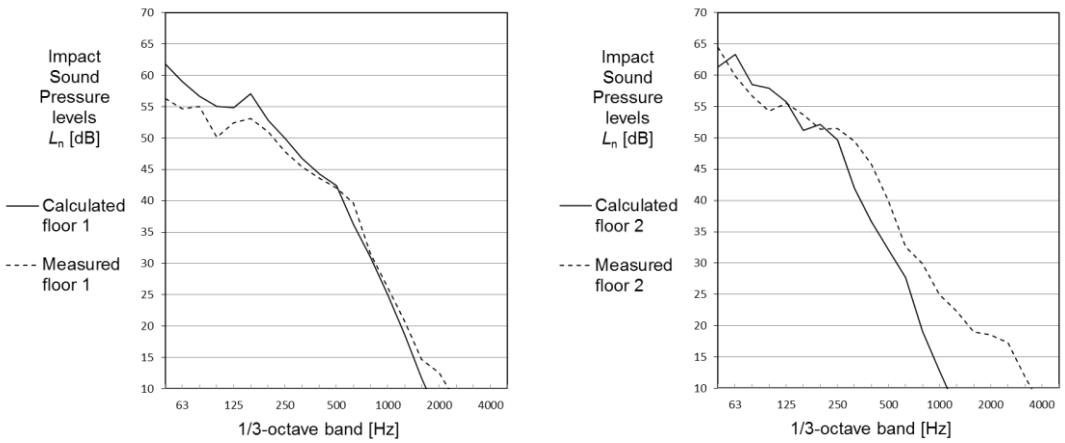
2 MENETELMÄ

2.1 Parametrinen laskentamalli

Laskennan vaiheet on esitetty kuvan 1 vuokaaviossa. Vaiheissa 1-3 tulokset lasketaan 1/3-oktaavikaistoittain 50-5000 Hz taajuusalueella. Raakavälipohjan askeläänitason L_n, ja alakaton vaikutuksen ΔL_d laskentaperusteet on esitetty kappaleissa 2.2 ja 2.3. Toisessa vaiheessa arvioidaan mahdollisen kelluvan laatan ΔL_{ff}, levykerrosten ΔL_{fb} ja lattianpäällysteen ΔL_{fc} parannusvaikutus askeläänitasoihin. Parannusvaikutukset voidaan arvioida joko laskennallisesti tai mittausdatan avulla. Kansilevyn päälle asennettujen levykerrosten parannusvaikutukset yhdistetään raakavälipohjan laskennalliseen askeläänitasolukuun Scholl esityksen mukaisesti [3,4]. 1/3-oktaavikaistoittain lasketuista askeläänitasoista L_n voidaan määrittää yksilukuarvot $L_{n,w}$ ja $L_{n,w} + C_{I,50\text{-}2500}$ [2]. Kuvassa 2 on esitetty kahden välipohjan mitatut ja laskennalliset askeläänitasot 1/3-oktaavikaistoittain.



Kuva 1. Vuokaavio parametrisen askeläänieneristävyyden laskentamallin laskennan vaiheista.



Kuva 2. Mitattujen ja laskennallisten askeläänitasojen L_n vertailu. Mittaustulokset on esitetty yhtenäisellä viivalla ja A-Insinöörien laskentamallilla määritetyt tulokset katkoviivalla.

2.2 Raakavälipohja

Raakavälipohjalla tarkoitetaan tässä tapauksessa välipohjan kantavaa palkistoa ja välipohjan kansilevyä tai CLT-levyä. Kansilevyn tai CLT:n päällä olevat levykerrokset lasketaan kappaleessa 2.4 esitetyin periaattein. Askeläänikojeen vasaran tuottaman voimaherätteen mallintaminen perustuu Lindbladin ja Brunskogin esityksiin [6–7], joissa esitetään ratkaisu herätteen voimayhtälölle taajuustasossa. Mallissa heräte mallinnetaan ensin aikatasossa käyttäen yksinkertaista yhden massan värähtelijää, josta ratkaisu käännetään taajuustasoon. Voimamallissa käytetään vain pintalevyjen jäykkyyden ja impedanssin reaaliarvoja, jolloin pintalevyn pistevoiman mobiliteetti kuvaa äärettömän levyn mobiliteettia. Välipohjapalkkeja ei oteta huomioon laskettaessa rakenteen taivutusjäykkyyttä voimaherätteelle, sillä määräävän iskun oletetaan kohdistuvan jännevälin keskialueelle.

Raakavälipohjarakenteen äänitehon, äänensäteilykyvyn ja pinnannopeuden laskenta on esitetty lähteissä [8–10]. Puuvälipohjien tapauksessa laskennassa tulee ottaa huomioon rakenteen ortotrooppisuus sekä askeläänikojeen vasaran mobiliteetin vaikutus rakenteeseen siirtyvään tehoon [1, 6, 7]. Raakavälipohjarakenteen äänensäteilykykyä laskettaessa on oletettu, että äänensäteily tapahtuu vain palkkien välisestä levyrakenteesta. Levyvälipohjilla, kuten CLT-levyt, koko rakenne osallistuu äänensäteilyyn. Raakavälipohjan tuottamat askeläänitasot $L_{n,eq}$ lasketaan lähteiden [8–10] perusteella.

2.3 Alakatto

Alakaton ja raakavälipohjan liitoksen ollessa joustava, alakaton parannusvaikutus askelääneneristävyyteen ΔL_d on yhtä suuri kuin alakaton parannusvaikutus ilmaääneneristävyyteen ΔR [1, 10]. Joustava liitos vaimentaa runkoääntä merkittävästi, joten alakattoon kohdistuva ääniheräte on pääosin ilmaääntä [1]. Näin ollen alakaton parannusvaikutus lasketaan vertaamalla laskennallisesti määritettyjä raakavälipohjan ja alakatollisen välipohjan 1/3-oktaavikaistaisia ilmaääneneristävyyksiä R [11–21]. Jos alakatto on jäykästi kytketty välipohjaan, alakaton parannusvaikutus heikkenee joustavaan kytkentään nähden ja ΔL_d-ΔR-vastaavuus heikkenee [1, 10].

2.4 Kelluva laatta ja lattialevyt

Edellä esitetyillä raakavälipohjilla ei yleensä saavuteta riittävää askelääneneristävyyttä vaan askelääneneristävyyttä parannetaan suoraan kansilevyn päälle asennettavilla levy- tai valukerroksilla tai kelluvalla lattialla. Parannusvaikutukset ΔL_{ff} ja ΔL_{fb} lasketaan [1, 10, 23] perusteella. Nykyisessä laskentamallissa kelluvan laatan parannusvaikutus arvioidaan ISO 12354-2 [10] mukaisesti perustuen alun perin Cremer et al. [24] esittämään teoriaan.

2.5 Validointi

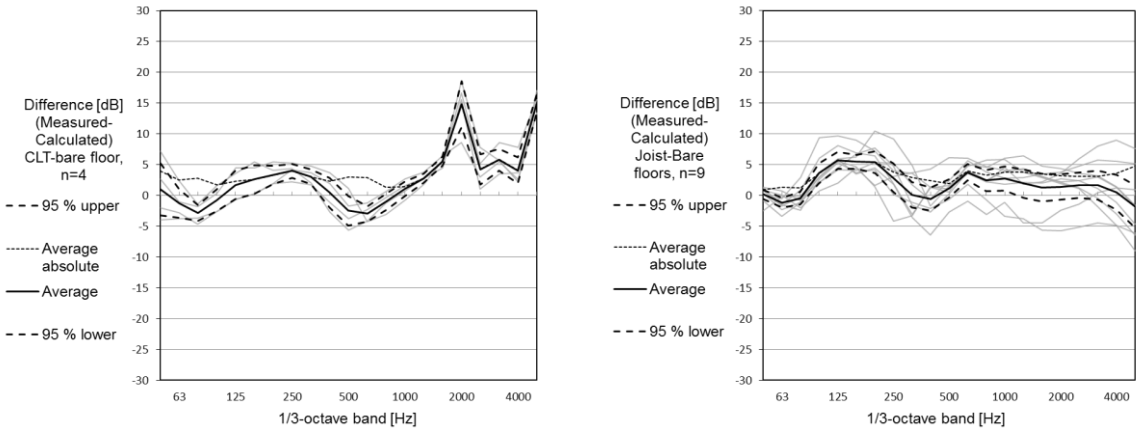
Validointi tehtiin kaksivaiheisesti. Ensimmäisessä vaiheessa laskettiin askeläänitasot raakavälipohjille (palkkirakenteet = 9 kpl, CLT-rakenteet = 4 kpl, n_{tot} = 13 kpl). Laskentatuloksia verrattiin vastaaviin laboratorio- ja kenttämittausten mittaustuloksiin [5, 26–33]. Toisessa vaiheessa laskenta- ja mittaustulosten vertailu tehtiin kokonaisille puuvälipohjarakenteille (n = 28 kpl). Ensimmäisessä vaiheessa laskettiin mitatun ja laskennallisen askeläänitason L_n erotukset 1/3-oktaavikaistoittain 50–5000 Hz taajuusalueella. Erotuksille laskettiin keskiarvo, itseisarvojen keskiarvo, keskihajonta sekä 95 % luottamusväli. Toi-

sessa vaiheessa määritettiin mitattujen ja laskennallisesti määritettyjen askeläänitasolukujen $L_{n,w}$ ja $L_{n,w}+C_{I,50\text{-}2500}$ tilastolliset tunnusluvut.

3 TULOKSET

3.1 Raakavälipohjat

Validoinnissa oli mukana 9 kpl puupalkki-laattarakenteita ja 4 kpl CLT-laattoja. Validoinnin tulokset on esitetty kuvassa 3.



Kuva 3: Raakavälipohjien validointitulokset. Vasemmanpuoleisessa kuvaajassa CLT-laatat ja oikealla palkki-levy rakenteet.

3.2 Kokonaiset välipohjarakenteet

Tässä validoinnissa kokonaisiksi välipohjarakenteiksi katsottiin rakenteet, joissa on raakavälipohja ja vähintään ääntä eristävä alakatto. Suurimmassa osassa rakenteista oli myös pintarakenne, kuten lattialevyjä tai kelluva laatta. Validoiduissa rakenteissa ei ollut lattianpäällystettä. Taulukossa 1 on esitetty mitattujen ja mallinnettujen yksilukuarvojen $L_{n,w}$ ja $L_{n,w}+C_{I,50\text{-}2500}$ erotusten keskiarvo, -hajonta sekä erotusten itseisarvojen keskiarvo.

Taulukko 1. Mittaus- ja laskentatulosten erotukset

	$L_{n,w}$ [2]	$L_{n,w}+C_{I,50\text{-}2500}$ [2]
Erotusten aritm. keskiarvot [dB]	2 dB	-0,4 dB
Erotusten keskihajonta [dB]	7 dB	6 dB
Erotusten itseisarvojen aritm. keskiarvo [dB]	5 dB	4 dB

4 TULOSTEN TARKASTELU

Raakavälipohjien laskentatulokset vastasivat mittaustuloksia hyvin koko tarkastellulla taajuusalueella. Validoinnissa havaittiin, että CLT-rakenteiden laskentatulokset olivat erittäin riippuvaisia laskennassa käytetyistä materiaaliparametrien lähtöarvoista. Materiaaliparametrien ja laskentamallien epävarmuustekijät, kuten ortotrooppisten materiaalien värähtelykäyttäytyminen, on tunnistettu jo aiemmassa tutkimuksessa [1].

Kokonaisten välipohjarakenteiden validoinnissa havaittiin, että laskentamallin tulokset vastaavat mittaustuloksia parhaiten 50-1000 Hz taajuusalueella. Laskentamallin epävarmuus kasvaa rakenteen monimutkaistuessa. Materiaalien rajapinnoissa ja sisällä tapahtuvat energiahäviöt ovat kuitenkin edelleen merkittävä epävarmuustekijä.

Validoinnin perusteella nykyinen laskentamenetelmä [10] yliarvioi kelluvan laatan parannusvaikutuksen puuvälipohjilla. Tutkimuskirjallisuudessa on esitetty, että puuvälipohjien tapauksessa kantavan rakenteen ominaisuudet on otettava huomioon kelluvan laatan parannusvaikutuksen arvioinnissa [8, 23, 34]. Lattiapäällysteiden parannusvaikutus on vahvasti riippuvainen tarkastelutaajuudesta ja siitä, millaisen alusmateriaalin päälle lattianpäällyste asennetaan [35]. Lattiapäällysteiden toimivuutta on aiemmin selvitetty lähteissä [1, 30, 31, 36]. Laskentamallin jatkokehitykseen tarvitaan kattavampaa tietoa lattiapäällysteiden ominaisuuksista puuvälipohjilla. A-Insinööreillä kehitetyn laskentamenetelmän jatkokehityksen painopisteet tulevat olemaan voima- ja tehomallinnuksen kehittämisessä, kelluvan laatan ja lattianpäällysteiden parannusvaikutusten laskennassa.

5 YHTEENVETO

Tässä artikkelissa esiteltiin A-Insinöörien akustiikkasuunnitteluyksikössä kehitetyn puuvälipohjan askeläänieneristävyyden laskentamenetelmän perusteet ja menetelmän tarkkuuden arvioimiseksi tehdyn validoinnin tulokset. Kehitetyllä laskentamenetelmällä voidaan arvioida puuvälipohjan askeläänitasot L_n 1/3-oktaavikaistoittain sekä yksilukuarvot $L_{n,w}$ ja $L_{n,w} + C_{I,50\text{-}2500}$. Validoinnissa laskentamallin tarkkuutta arviotiin määrittämällä mittaus- ja laskentatulosten välinen erotus sekä tilastolliset tunnusluvut erotuksille. Vertailussa oli mukana 28 erilaista välipohjarakennetta. Validointitulosten mukaan laskennalliset askeläänitasot L_n vastaavat hyvin mittaustuloksia 50-1000 Hz taajuusalueella. Mitatun ja laskennallisen askeläänitasoluvun Ln,w erotusten keskiarvo oli 5 dB ja spektripainotetun askeläänitasoluvun $L_{n,w} + C_{I,50\text{-}2500}$ erotusten keskiarvo 4 dB. A-Insinöörien akustiikkasuunnitteluyksikkö jatkaa kehitystyötä laskentamallin parantamiseksi. Validoinnissa kehityskohteiksi tunnistettiin raakavälipohjan, lattianpäällysteiden ja kelluvan laatan laskentatarkkuuden parantaminen.

VIITTEET

[1] Latvanne, P., The Acoustical properties and calculation models of the wooden intermediate floor constructions, Master's Thesis, Tampere University of Technology, Master's Degree Program in Civil Engineering, 2015

[2] EN ISO 717-2:2013. Acoustics – Rating of sound insulation in buildings and of building elements – Part 2: Impact sound insulation. Brussels, European Committee for Standardization, 2013.

[3] Scholl, W., Lang, V., V. Wittstock, Rating of sound insulation at present and in future. The revision of ISO 717. Acustica united with Acta Acustica, 97, 686–698., 2011.

[4] Scholl, W., Revision of ISO 717, Why not use impact sound reduction indices instead of impact sound pressure levels?, Acustica united with Acta Acustica 97, 503–508., 2011.

[5] AINS Group Ltd. database.

[6] Lindblad, S., Impact sound characteristics of resilient floor coverings, a study on linear and nonlinear dissipative compliance, Dissertation, Division of Building Technology, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden, 1968.
[7] Brunskog, J. and Hammer, P., The Interaction Between the ISO Tapping Machine and Lightweight Floors, Acta Acustica united with Acustica, 89, 2003, 296-308.
[8] Hopkins, C., Sound Insulation, Butterworth-Heinemann, Oxford, UK, 2007.
[9] Rindel, J.H., Sound Insulation in Buildings, CRC Press, 2017.
[10] EN ISO 12354-2, Building acoustics. Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements. Part 2: Impact sound insulation between rooms, International Organization for Standardization, 2017.
[11] Kovalainen, V. & Kylliäinen, M., Rakenteiden ilmaääneneristävyyden mallinnusohjelma RAIMO – käyttöohje. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, rakennustekniikan laitos. 2013.
[12] Gomperts, M. C. , The “sound insulation” of circular and slit-shaped apertures. Acustica. Vol. 14, s. 1–16. 1964.
[13] Gomperts, M. C. & Kihlman, T., The Sound Transmission Loss of Circular and Slit-Shaped Apertures in Walls. Acustica, Vol. 18, s. 144-150. 1967.
[14] Sewell, E. C. Transmission of reverberant sound through a single leaf partition surrounded by an infinite rigid baffle. Journal of Sound and Vibration, Vol. 12, s. 21-32. 1970.
[15] Sharp, B. H. Prediction methods for the sound transmission of building elements. Noise Control Engineering Journal. Vol. 11, s. 53–63. 1978.
[16] Kristensen, J. & Rindel, J. H., Bygningsakustik – teori og praksis. Glostrup, Statens Byggeforskningsinstitut, SBI-anvisning 166. 1989.
[17] EN ISO 12354-1. 2017. Building acoustics – Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements – Part 1: Airborne sound insulation between rooms. Helsinki, Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 2017.
[18] Hongisto, V., Monikerroksisen seinärakenteen ilmaääneneristävyyden ennustemalli. Helsinki, Työterveyslaitos, Työympäristötutkimuksen raporttisarja 2. 2003.
[19] Rauhala, J., Kylliäinen, M., Eristerapatun betoniseinän ilmaääneneristävyys. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos, Rakennetekniikka. Tutkimusraportti 142. 119 s + 83 s. 2009.
[20] Virjonen, P., Hongisto, V. Joustavarankaisen levyrakenneseinän äänenläpäisy. Akustiikkapäivät 2009. Vaasa, 14.-15.5. Akustinen Seura ry. 2009.
[21] Kylliäinen, M. & Mikkilä, A. Rakennusosien ilmaääneneristävyyksien mallintaminen rakentamisessa ja tuotekehityksessä. Rakennusfysiikka 2009. Tampere, 27.-29.10., Tampereen teknillisen yliopiston rakennustekniikan laitos ja Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, s. 269-278., 2009.
[22] EN ISO 717-1. 2013. Acoustics – Rating of sound insulation in buildings and of building elements – Part 1: Airborne sound insulation. Helsinki, Suomen Standardisoimisliitto SFS ry, 2013.
[23] Vigran, T.E, Building Acoustics. Taylor& Francis, 2008.
[24] Cremer, L., Heckl, M. and Petersson, B.A.T., Structure-Borne Sound, Structural Vibrations and Sound Radiation at Audio Frequencies, 3rd edition, Springer-Verlag, Berlin, 2005.
[25] Zeitler, B., Nightingale, T. and Schoenwald, S., Cremer’s parallel plates applied to lightweight construction, Proc. of Inter-Noise, Ottawa, Canada, 2009.
[26] Sabourin, I., McCartney, C. Measurement of Airborne Sound Insulation of 8 Wall Assemblies, Measurement of Airborne and Impact Sound Insulation of 29 Floor Assemblies, Nordic Engineered Wood report No. A1-006070.10, National Research Council Canada, 2015.

[27] Warnock, A. C. C., Birta, J. A., Detailed report for consortium on fire resistance and sound insulation of floors: Sound transmission and impact sound insulation data in 1/3 octave bands. Canada, National Research Council Canada, Institute for Research in Construction, Internal Report IR-811, 2000.

[28] Warnock, A. C. C., Summary Report for Consortium on Fire Resistance and Sound Insulation of Floors: Sound Transmission and Impact Insulation Data. Canada, National Research Council Canada, Institute for Research in Construction, Report RR-169, 2005.

[29] Chung, H., Dodd, G., Emms, G., McGunnigle, K., Schmid, G., Maximizing impact sound resistance of timber framed floor/ceiling systems, Volume 3. Australia, Forest and wood products research and development corporation, Project No. PN04.2005, 2006.

[30] Balanant, N., Guigou, C., Villenave, M., Respect des exigences acoustiques dans les bâtiments à ossature bois, à vocation logements. Etape 2, Rapport final, Acoubois France, French Institute of Technology for Forest based and Furniture sector (FCBA), 2012.

[31] Späh, M., Liebl, A., Leistner, P. Measurements in the Laboratory and in Single Family Houses, AcuWood report No. 1. Sweden, SP Technical Research Institute of Sweden, Report 2014:14, 2013.

[32] Zeitler, B., Nightingale, T.R.T., King, F., Methods to control low frequency impact noise in wood frame construction. Canada, National Research Council Canada, Institute for Research in Construction, Report NRCC-50445, 2008.

[33] Zeitler, B., Schoenwald, S., Nightingale, T.R.T., Parametric study of sound transmission through lightweight floors. Canada, National Research Council Canada, Institute for Research in Construction, Report NRCC-53564, 2010.

[34] Zeiler B., Schneider M., On the relevance of impact source impedance at low frequencies- part 2: Floor with floating toppings, 24th International Congress on sound and vibration 23.-27. July 2017

[36] Lietzen, J., Miettinen, J., Kylliäinen, M., Measurements of Impact Force Excitation on Wooden Floors, Euronoise 2018, 27-31. May 2018, Heraklion, Creece

[35] Warnock, A.C.C, Impact Sound Measurements on Floors Covered with Small Patches of Resilient Materials or Floating Assemblies, IRC-IR-802, National Research Council Canada, Institute for Research in Construction, Canada, 2015.

AHLMANIN AMMATTIOPISTON MUSIIKKITILAT

Jussi Rauhala, **Joose Takala**, **Tuomas Pelli**

A-Insinöörit
Puutarhakatu 10
33210 TAMPERE
etunimi.sukunimi@ains.fi

Tiivistelmä

Ahlmanin ammattiopisto Tampereella laajensi opintotarjontaansa musiikinopetuksella, kun Oriveden opisto muutti Ahlmanin tiloihin vuonna 2018. Perinteiset musiikkiluokat sijoitettiin kahteen vanhaan koululuokkaan ja yksi harjoitushuone toimistotilaan. Tilat studiolle löydettiin liikuntasalin näyttämöltä ja tarkkaamolle sen alapuoleisesta varastosta. Muutostöissä parannettiin sekä akustiikkaa että rakennuksen sisäilmaolosuhteita. Akustiikkasuunnittelijat suunnittelivat uudet rakenteet yhdessä rakennesuunnittelijan kanssa sekä tekivät kohteeseen detaljitasoiset työpiirustukset uusien ja vanhojen rakenteiden ja rakennusosien liitoksista. Ääneneristävyydet suunniteltiin myös LVIS-tekniikan ja sen tarvitsemien läpivientien osalta. Huoneakustiset verhoukset valittiin yhteistyössä arkkitehdin kanssa. Tilojen väliset ääneneristävyydet mitattiin saneerauksen jälkeen. Käyttäjä on ollut tiloihin tyytyväinen, niin tilojen akustisen toiminnan kuin myös sisäilman osalta.

1 JOHDANTO

Ahlmanin ammattiopisto Tampereella laajensi opintotarjontaansa musiikinopetuksella, kun Oriveden opisto muutti Ahlmanin tiloihin vuonna 2018. Ennen kuin musiikkilinja voitiin aloittaa, piti Ahlmanin opiston tiloista löytää sopivat tilat. Perinteiset musiikkiluokat sijoitettiin kahteen vanhaan koululuokkaan, joiden akustiikkaa kehitettiin tukemaan musiikinopetusta. Tilat studiolle ja tarkkaamolle löydettiin liikuntasalin näyttämöltä ja sen alapuoleisen kellarin varastosta. Tämä johti varsin mielenkiintoiseen suunnittelutehtävään ääneneristyksen, huoneakustiikan ja rakennusfysiikan näkökulmasta.

Näyttämön ja sen alapuoleisen varaston välinen ääneneristävyys ei sellaisenaan ollut riittävä studion ja tarkkaamon välisiin ääneneristysvaatimuksiin nähden, vaan ääneneristävyyttä piti parantaa. Kellarin asettamia haasteita oli useita: maanvarainen laatta oli valettu suoraan maata vasten (ei eristeitä), kuten sokkelikin, huonekorkeus oli hyvin matala, ilmanvaihto olematon ja ääneneristävyys yläpuoleiseen tilaan, tulevaan studioon, hyvin heikko.

© 2019 Jussi Rauhala, Joose Takala ja Tuomas Pelli. Tämä on avoimesti julkaistu teos, joka noudattaa Creative Commons NIMEÄ 4.0 Kansainvälinen –lisenssiä (CC BY 4.0). Teosta saa kopioida, levittää, näyttää ja esittää julkisesti ja siitä saa luoda johdannaisteoksia, kunhan tekijän nimi ja lähde mainitaan asianmukaisesti.

Haasteet ratkaistiin kehittämällä rakenteet, jotka sekä eristävät ääntä että toimivat rakennusfysikaalisesti oikein. Entinen välipohja purettiin, kasvatettiin huonekorkeutta ja tehtiin uusi paremmin ääntä eristävä rakenne. Kellarin uudet ääntä eristävät seinä-, ja lattiarakenteet toteutettiin taustastaan tuulettuvina, ja niiden välitilaan asennettiin ilmanvaihto. Uusien seinä- ja lattiarakenteiden sisäpintaan asennettiin myös tiivis ja elastinen kapselointikerros, jolloin välitilan ilma ja huoneilma ovat omissa osastoissaan. Ilmanvaihto kellariin uusittiin siten, että välitilan ja huoneen ilmanvaihto olivat erillisiä.

Musiikkiluokkien osalta noudatettiin Ympäristöministeriön asetusta rakennuksen ääniympäristöstä 796/2017, 7§, jossa mainitaan: ”*Rakennuksen ääneneristystä, melun- ja tärinäntorjuntaa … ja ääniolosuhteita ei saa rakennuksen korjaus- tai muutostyössä heikentää.*” [1] Studiossa ja tarkkaamossa noudatettiin ympäristöministeriön ohjetta rakennuksen ääniympäristöstä uusille tiloille, sillä kyseessä oli osittain myös käyttötarkoituksen muutos [2].

2 LÄHTÖKOHDAT JA ASETETUT VAATIMUKSET

Musiikkiluokat

Oriveden opisto tarvitsi kaksi musiikkiluokkaa opetusta varten. Musiikkiluokissa tapahtuu eri soitinten harjoittelua yksin ja ryhmässä. Tämän lisäksi tilassa myös opetetaan teoriaopintoja, jolloin tilan pitää toimia myös puhekäytössä. Tulevat kaksi musiikkiluokkaa sijoitettiin kahteen entiseen vierekkäiseen luokkahuoneeseen. Tilojen välistä ääneneristävyyttä ei ollut käyttäjän mielestä tarvetta suuresti parantaa, vaan tilojen välistä ääneneristävyyttä parannettaisiin vain kustannustehokkaasti ja vältettäisiin kelluvia rakenteita.

Suunnittelun lähtötiedoksi selvitettiin rakenteet vanhoista suunnitelmista ja paikalla katselmoituna sekä mitattiin luokkahuoneiden väliset ääneneristävyydet. Ilmaääneneristysmittaukset suoritettiin standardin ISO 16283-1 [3] ja askeläänеneristysmittaukset ISO 16283-2 [4] mukaan. Yksilukuarvot ilmaääneneristysmittauksille määritettiin ISO 717-1 [5] mukaan ja askeläänеneristysmittauksille ISO 717-2 [6] mukaan. Äänitasoeroluvuksi $D_{nT,w}$ saatiin 51 dB ja askeläänitasoluvuksi $L'_{nT,w}+C_{I,50\text{-}2500}$ 54 dB.

Studio (näyttämö)

Ahlmanin ammattiopiston juhlasalin näyttämö osoittautui parhaaksi paikaksi studion sijoittamiselle, vaikka se asetti akustiselle- ja rakennusfysikaaliselle suunnittelulle haasteita. Studion oli määrä toimia juhlasalin näyttämönä ja itsenäisenä studiona. Siirtoseinän ansiosta näyttämöltä voidaan esittää juhlasaliin esityksiä, jolloin studiolaitteisto on paikoillaan ja opiskelijat voivat taltioida live-esityksen studion laitteistoilla. Kun siirtoseinää pidetään kiinni, tila toimii pelkkänä studiona. Studio/Näyttämölle suunnitteluvaiheessa esitetyt vaatimukset on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Studion vaatimukset

Osa-alue	**Vaatimus**
Jälkikaiunta-aika	Muunneltava 0,5…0,9 s
Ilmaääneneristävyys tarkkaamoon	$D_{nT,w} \geq 65$ dB
Askeläääneneristävyys tarkkaamoon	$L'_{nT,w} + C_{I,50\text{-}2500} \leq 43$ dB
Taustaäänitaso	$L_{A,eq} \leq 20$ dB

Tarkkaamo (kuntosali & liikuntavälinevarasto)

Studio ja tarkkaamo haluttiin lähekkäin toisiaan, mutta näyttämön vieressä ei ollut riittävästi tilaa, joten tarkkaamo päädyttiin sijoittamaan studion/näyttämön alle kellaritilaan, joka oli aiemmin toiminut varastona. Tarkkaamon haluttiin toimivan opetuskäytössä, joten sinne tuli saada tilat varsinaisen äänipöydän lisäksi myös pienelle opiskelijaryhmälle. Lisäksi tarkkaamon viereen oli tarve tehdä vielä erillinen tila lauluäänityksiä varten.

Tarkkaamon ääneneristyksen parantaminen ja rakenteiden turvallisen kosteuskäyttäytymisen suunnitteleminen oli kohteessa haastavinta. Valokuva tulevasta tarkkaamosta on esitetty kuvassa 1. Tarkkaamolle suunnitteluvaiheessa esitetyt vaatimukset on esitetty taulukossa 2. Tarkkaamo sijaitsee rakennusfysiikan ja ääneneristävyyden parantamisen kannalta haastavassa paikassa. Tila on puoliksi maan pinnan alapuolella, ja koska tila on tehty varastoksi, ilmanvaihto on olematon ja maanvastaiset rakenteet on tehty ilman kapillaarikatkoja ja eristeitä. Kaikki tilan kantavat rakenteet oli tehty betonista, mukaan lukien tarkkaamon ja studion välinen välipohja. Tilan huonekorkeus oli noin 2,2 m.

Taulukko 2. Tarkkaamon vaatimukset

Osa-alue	**Vaatimus**
Jälkikaiunta-aika	0,3 s
Ilmaääneneristävyys studioon	$D_{nT,w} \geq 65$ dB
Ilmaääneneristävyys eteistilaan (laulu)	$D_{nT,w} \geq 44$ dB
Taustaäänitaso	$L_{A,eq} \leq 25$ dB

Kuva 1. Tuleva tarkkaamo oli kellarivarasto (kuntosali & liikuntavälinevarasto). Kuvassa näkyvä tiiliseinä ja betoniholvi purettiin.

Näyttämön ja alla olevan varaston välistä ilmaääneneristävyyttä ei mitattu, sillä se voitiin jo kokemusperäisesti todeta riittämättömäksi: tilojen välillä pystyi helposti keskustelemaan ääntään korottamatta silloisten ovien kehnon ääneneristävyyden ja muiden rakojen takia. Askeläneneristävyys mitattiin laittamalla ääntä eristävä kotelo askeläänikojeen päälle, jolla minimoitiin askeläänikojeen lähetyshuoneeseen tuottaman ilmaäänen vaikutus mittaustulokseen. Askeläänitasoluvuksi $L'_{nT,w}+C_{I,50\text{-}2500}$ saatiin 58 dB.

3 SUUNNITTELURATKAISUT, UUDET TILAT JA MITTAUSTULOKSET

Musiikkiluokat

Musiikkiluokkien väliseen ääneneristävyyteen suunniteltiin kolme kustannustehokasta parannuskeinoa:

- Toiseen musiikkiluokkaan tehtiin tärinäneristetty kipsilevykatto.
- Luokkien välisen seinän ääneneristävyyttä parannettiin uudella kevytrakenteisella kipsilevyseinällä.
- Tilojen pintalaatat sahattiin huoneiden reunoilta irti.

Näin luokkien välistä ääneneristävyyttä parannettiin kustannustehokkaasti. Molemmissa musiikkiluokissa uusittiin myös ovet ääntä eristävillä ovilla.

Musiikkiluokkien huoneakustiikka tehtiin muunneltavaksi, jotta luokassa voisi soittaa sähköisesti vahvistetuilla ja akustisilla soittimilla. Huoneakustiikan muunneltavuus toteutettiin verhojen avulla, jolloin verhojen ollessa levitettynä tila toimii sähköiselle musiikille ja verhojen ollessa supussa tila toimii akustiselle soittamiselle. Tilan kattomateriaali

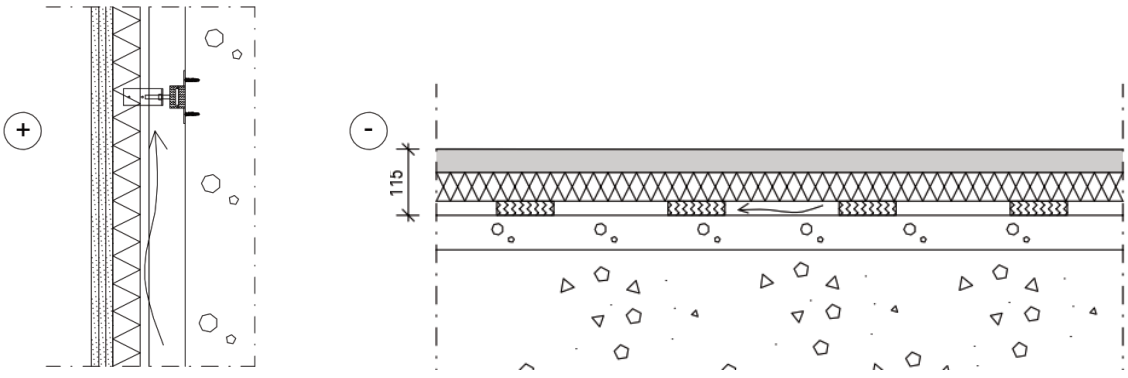
valittiin siten, että tilan jälkikaiunta-aika ei ole liian lyhyt ja katosta saadaan taaimmaiselle penkkiriville hyödyllinen heijastus. Molempiin musiikkiluokkiin asennettiin tilojen nurkkiin myös bassoansat, jotka vaimentavat pieniä taajuuksia.

Studio

Näyttämölle sijoitettavan studion kaikkien seinärakenteiden ääneneristävyyttä parannettiin tekemällä nykyisille betonirakenteisille ulko- ja väliseinille kipsilevyverhoukset. Tämän lisäksi tilan yläpohjan alapuolelle tehtiin tärinäneristetty kipsilevyalakatto, jonka taakse kätkettiin suuri osa tilan uutta tekniikkaa. Seinärakenteiden verhous tehtiin rakenteellisten sivutiesiirtymien eristämiseksi.

Studion ja tarkkaamon välinen välipohja purettiin ja tehtiin kokonaan uudestaan. Tähän oli kaksi syytä: alapuoleisen tilan mataluus ja tilojen välisen ääneneristävyyden parantaminen. Uusi välipohja tehtiin sekarakenteena, jossa teräspalkit kannattelivat yläpuoleisen studion betonirakenteista kelluvaa lattiaa. Teräspalkkien alle tehtiin lisäksi tärinäneristetty alakatto, jonka alle asennettiin huoneakustinen verhous.

Ulkovaipan peittäminen sisäpuolelta kipsilevyrakenteilla ja lisäeristeillä on rakenteiden kosteuskäyttäytymisen näkökulmasta haastavaa, sillä uuden seinärakenteen väliin voi tiivistyä kosteutta, joka ei välttämättä kuivu. Tilojen välisten ääneneristysvaatimusten ja toiminnan kannalta tämä oli kuitenkin välttämätöntä, jolloin rakenteen rakennusfysikaalinen ja akustinen käyttäytyminen tuli suunnitella huolellisesti. Kipsilevyverhouksen ja ulkoseinän väliin asennettiin äänenvaimennusmateriaalia, jonka lämmöneristävyys ei ole suuri, jolloin rakenne pysyy mahdollisimman lämpimänä, mutta kuitenkin hyvin ääntä eristävänä. LVI-suunnittelijan kanssa yhteistyössä suunniteltiin seinärunkojen väliin kanavisto, joka vaihtaa ilman myös seinän välissä, jolloin mahdollinen kostea ilma saadaan seinän välistä pois, eikä se pääse tiivistymään rakenteisiin. Samaa periaatetta noudattamalla suunniteltiin myös yläpohjan tärinäneristetty uusi kattorakenne. Kuvassa 2 on esitetty studion seinän ja tarkkaamon lattian rakennetyypit, joissa molemmissa on kiinnitetty huomiota rakenteiden ääneneristävyyteen ja kosteustekniseen käyttäytymiseen.



Kuva 2. Studion ulkoseinärakenne (vas.) ja tarkkaamon alapohjarakenne (oik.).

Studion huoneakustiikka toteutettiin osittain muunneltavaksi, jotta tila olisi monikäyttöisempi ja sopisi myös akustisille soittimille. Akustiikan muunneltavuus ratkaistiin näyttämöverhoilla, jotka voidaan siirtää syrjään, kun tilan halutaan soivan enemmän ja vastaavasti tilan jälkikaiunta-aikaa saadaan lyhyemmäksi, kun verhot otetaan esiin. Näyttämö-

aukkoon asennettiin uusi ääntä eristävä siirtoseinä, joka mahdollistaa näyttämön käyttämistä studiona silloin, kun juhlasalia ei käytetä.

Tarkkaamo

Studion tavoin myös tarkkaamossa kaikki seinä-, ja kattopinnat tehtiin kipsilevyverhoiltuina ja kytkettiin muihin rakenteisiin vain joustavilla liitososilla. Tarkkaamoon haluttiin myös lattialämmitys, jonka toteuttaminen vanhalle maanvaraiselle betonilaatalle, jossa ei ole eristeitä, osoittautui haastavaksi.

Tilan lattia tehtiin kelluvana ratkaisuna, jossa uretaanilevyn päällä on kipsivalu lämmitysputkineen. Uretaanilevyn ja maanvaraisen betonilaatan välissä oli tärinäneristimillä toteutettu tuulettuva ilmatila, jotta mahdollinen kosteus saadaan rakenteen välistä tuuletettua pois koneellisesti. Tilan rakenteiden sisäpinnat tehtiin kosteutta ja ilmaa läpäisemättömällä kapselikerroksella, jotta mahdolliset haitta-aineet eivät tule sisätiloihin, vaan päätyvät ilmanvaihdon kautta ulos. Tarkkaamon alapohjan rakennetyyppi on esitetty kuvassa 2.

Tarkkaamon huoneakustiikkaan kiinnitettiin erityistä huomiota. Se toteutettiin sijoittamalla ääntä vaimentavia pintoja tilan etuosaan, ja ääntä hajottavia pintoja tilan takaosaan. Ääntä hajottavat pinnat toteutettiin puurimoituksilla. Takaseinä tehtiin lisäksi vinoksi, jotta takaseinän kautta ei tule häiritseviä ensimmäisen kertaluokan heijastuksia. Kuvassa 3 on esitetty valmis tarkkaamo.

Kuva 3. Valmis tarkkaamo

Tilojen välisen ääneneristävyyden hallinta ei rajoitu pelkästään jo mainittujen rakenteiden ääneneristävyyden suunnitteluun, vaan tässäkin projektissa hyvän ääneneristävyyden oleellinen osa on talotekniikan kautta kulkeutuvat äänet. Tarkkaamoon ja studioon tehtiin kokonaan uusi ilmanvaihto sekä itse tilaan että seinäverhousten ja ulkoseinärakenteiden väliin. Ilmanvaihtokanavien sijoittelu ja kanaviston kautta kulkeutuvien äänien vaimentaminen vaati äänenvaimentimia useita metrejä per kanava. Vaikkakin mittaustulokset

(taulukko 4), ylittivät vaatimukset (taulukot 2 ja 3), oli kanaviston kautta kulkeutuva ääni havaittavissa, mikä kertoo ilmanvaihdon äänenvaimentimien merkityksestä.

Mittaustulokset valmiissa kohteessa

Kohteen valmistuttua suoritettiin tarkkaamon ja studion välillä ääneneristysmittauksia, joiden tulokset on esitetty taulukossa 4. Tuloksista voidaan nähdä, että asetettu vaatimustaso saavutettiin, ja jopa ylitettiin.

Taulukko 4. Mittaustulokset valmiissa kohteessa

Osa-alue	**Mittaustulos**
Jälkikaiunta-aika, tarkkaamo	0,2 s
Ilmaääneneristävyys studio – tarkkaamo	$D_{nT,w}$ 72 dB
Askeläääneneristävyys studio – tarkkaamo	$L'_{nT,w} + C_{I,50\text{-}2500}$ 35 dB
Taustaäänitaso, tarkkaamo	$L_{A,eq}$ 16 dB

4 YHTEENVETO

Ahlmanin ammattiopiston yhdistyi Oriveden opiston kanssa, minkä seurauksena Oriveden opiston musiikkilinjalle tuli löytää tilat Ahlmanin ammattiopiston kampukselta. Uudet tilat musiikkitiloille löydettiin entisistä luokkahuoneista, juhlasalin näyttämöltä sekä sen alapuolella olevasta kellaritilasta.

Näyttämölle tehtävän studion ja sen alapuolelle tehtävän tarkkaamon välinen ääneneristävyys suunniteltiin nykymääräysten mukaisin ääneneristysarvoin, joka tarkoitti ulkoseinän ja yläpohjan lisäeristämistä lämpimältä puolelta kipsilevyverhouksin. Tämän takia uuden ulkoseinän ilmaväliin asennettiin ilmanvaihto, joka poistaa mahdollisen kostean ilman. Lisäksi ulkoseinän vastaisissa rakenteissa käytettiin huonosti lämpöä eristävää, ääntä vaimentavaa materiaalia, jolloin rakenteet pysyvät lämpimämpinä, jolloin kosteuden tiivistyminen rakenteisiin on vaikeampaa.

Mittaustulosten perusteella suunnitelmat ja toteutus vastasi vaatimustasoa, ja jopa ylitti sen. Tilojen käyttäjä on ollut tiloihin tyytyväinen, niin ääneneristyksen kuin sisäilman kannalta.

VIITTEET

[1] Ympäristöministeriön asetus 796/2017 rakennuksen ääniympäristöstä.

[2] Ympäristöministeriön ohje rakennuksen ääniympäristöstä (28.6.2018).

[3] SFS-EN ISO 16283-1:2014. Acoustics. Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements. Part 1: Airborne sound insulation. Helsinki, Suomen Standardoimisliitto SFS ry.

[4] SFS-EN ISO 16283-2:2015. Acoustics. Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements. Part 2: Impact sound insulation. Helsinki, Suomen Standardoimisliitto SFS ry.

[5] SFS-EN ISO 717-1:2013. Acoustics. Rating of sound insulation in buildings and of building elements. Part 1: Airborne sound insulation. Helsinki, Suomen Standardoimisliitto SFS ry.

[6] SFS-EN ISO 717-2:2013. Acoustics. Rating of sound insulation in buildings and of building elements. Part 2: Impact sound insulation. Helsinki, Suomen Standardoimisliitto SFS ry

HELSINGIN KAUPUNGINTEATTERIN PERUSKORJAUS- JA LAAJENNUSHANKKEEN AKUSTISET HAASTEET

Matias Remes, **Tuomas Pärnänen**, **Perttu Korhonen**

Helimäki Akustikot Oy
Temppelikatu 6 B
00100 Helsinki
etunimi.sukunimi@helimaki.fi

Tiivistelmä

Helsingin kaupunginteatteri on Eläintarhanlahden rannan ympäristössä sijaitseva, arkkitehti Timo Penttilän suunnittelema teatterirakennus, jonka alkuperäinen osa on valmistunut vuonna 1967 ja laajennus 1989. Vuosien 2013-17 aikana toteutetussa peruskorjaus- ja laajennushankkeessa rakennukseen tehtiin merkittäviä toiminnallisia ja tilallisia muutoksia ja parannuksia, talotekniset järjestelmät uusittiin kauttaaltaan ja teatteri- ja esitystekniikka päivitettiin vastaamaan nykyvaatimuksia. Akustiikkasuunnittelussa oli huomioitava tiukat suojeluvaatimukset sekä vanhojen rakenteiden ja tilojen asettamat rajoitteet. Ääneneristyksen, huoneakustiikan ja meluntorjunnan kannalta vaativimpia tiloja olivat mm. suuri näyttämö avotarkkaamoineen ja orkesterisyvennyksineen, pieni näyttämö, äänitysstudiot sekä muusikoiden ja näyttelijöiden harjoitustilat. Taloteknisten järjestelmien äänenhallinta muodosti vanhan suojelukohteen reunaehdoista ja tiukoista akustisista vaatimuksista johtuen haasteellisen suunnittelukokonaisuuden. Onnistuneen lopputuloksen saavuttaminen edellytti akustikolta merkittävää rakennusaikaista työpanosta hankkeen loppumetreille saakka.

1 JOHDANTO

Helsingin kaupunginteatteri valmistui vuonna 1967 Eläintarhanlahden rannan puistoon arkkitehtikilpailun voittajaehdotuksen pohjalta (Arlecchino / Timo Penttilä, Kari Virta 1961) ja laajennusosa Studio Elsa vuonna 1989. Rakennus on arvotettu suomalaisen modernin arkkitehtuurin merkkiteokseksi ja aikansa teatterisuunnittelun edustavaksi esimerkiksi [1]. Alkuperäisen osan akustiikkasuunnittelusta vastasi Insinööritoimisto P. Arni & Co ja laajennuksen Alpo Halme.

Vuonna 2013 valmistuneen hankesuunnitelman (Ark.tsto A-konsultit Oy, akustiikkasuunnittelu Akukon Oy) myötä käynnistyneen peruskorjaus- ja laajennushankkeen pääasiallinen motivaattori oli elinkaarensa päähän tullut talotekniikka; rakennuksen ilmanvaihto ja muut TATE-järjestelmät oli todettu teknisesti ja toiminnallisesti puutteellisiksi. Esitystekniset järjestelmät olivat niin ikään uusimisen tarpeessa. Rakennuksen tiloissa ja toiminnallisuudessa oli myös havaittu korjaustarpeita. Akustiikan osalta puutteita oli ha-

© 2019 Matias Remes, Tuomas Pärnänen ja Perttu Korhonen. Tämä on avoimesti julkaistu teos, joka noudattaa Creative Commons NIMEÄ 4.0 Kansainvälinen – lisenssiä (CC BY 4.0). Teosta saa kopioida, levittää, näyttää ja esittää julkisesti ja siitä saa luoda johdannaisteoksia, kunhan tekijän nimi ja lähde mainitaan asianmukaisesti.

vaittu mm. tiettyjen tilojen ääneneristyksessä ja huoneakustiikassa. Talotekniikan perusteellisen uusimisen myötä oli selvää, että taloteknisten järjestelmien äänenhallintaan on kiinnitettävä peruskorjauksen akustiikkasuunnittelussa erityistä huomiota.

Helimäki Akustikot Oy vastasi vuosina 2013-17 toteutetun peruskorjaus- ja laajennushankkeen akustiikkasuunnittelusta luonnossuunnittelusta alkaen. Pää- ja arkkitehtisuunnittelijana oli LPR-Arkkitehdit Oy. Hankeen kokonaislaajuus oli n. 28 000 brm^2 ja budjetti 67 M€. Valmis talo avautui yleisölle 50-vuotisjuhlaesityksenä esitetyn Myrskyluodon Maija -musikaalin myötä 24.8.2017. Myöhemmin samana vuonna hanke sai tunnustusta saavuttamalla Rakentamisen Ruusu -kunniamaininnan ja Arkkitehtuurin Finlandia -palkintoehdokkuuden.

Kuva 1. Vasen: pääaula kesäkuussa 2017 (valmis tilanne). Oikea: suuri näyttämö syyskuussa 2014 (ennen rakennustöiden alkua). Kuvat: Matias Remes.

2 ÄÄNENERISTYS

Ääneneristyksen suunnittelun pääpaino oli käyttäjäpalautteen ja lähtötietomittausten perusteella selvinneiden ääneneristyksen ongelmapaikkojen korjaamisessa, hankkeessa käyttötarkoitukseltaan muuttuviksi määriteltyjen vanhojen tilojen ääneneristyksen parantamisessa sekä kokonaan uusien tilojen suunnittelussa. Tavoitetasona pidettiin pääosin SFS 5907 luokkaa C [2]. Ääneneristyksen kannalta vaativimpia tiloja olivat vuoden 1989 laajennusosaan sijoittuvat vanha äänitysstudio ja -tarkkaamo sekä uusi Studio Oriental -äänitysstudio, suuri ja pieni näyttämö, kapellimestarin, muusikoiden ja näyttelijöiden harjoitustilat, tanssisali, kuntosali sekä saleihin rajautuvat meluisat verstastilat.

Vanhan äänitystarkkaamon ääneneristävyys todettiin lähtötilannemittauksissa heikoksi. Tarkkaamo purettiin kokonaan kantaviin rakenteisiin saakka ja rakennettiin uudelleen järein huone huoneessa -rakentein. Uusi Studio Oriental äänitysstudio toteutettiin niin ikään huone huoneessa -rakentein vanhojen toimistotilojen paikalle. Studiotilat olivat suunnittelun ja toteutuksen kannalta erittäin haastava kokonaisuus, koska vanhat ympäröivät rakenteet ja tilat asettivat akustisille ratkaisuille tiukat reunaehdot. Akustikko laati kummankin tilan rakenteista kattavat detaljipiirustukset, jotka yhteensovitettiin ARK- ja RAK-suunnitelmien kanssa. Suunnitelmia hiottiin työmaavaiheessa rakenneavausten myötä tarkentuneiden lähtötietojen perusteella. Loppumittauksissa saavutetut ilmaääneneristysluvut R'_w vanhasta tarkkaamosta ja studiosta ympäröiviin tiloihin olivat 66…74 dB ja Studio Orientalissa vastaavasti 63…77 dB.

Suuren ja pienen näyttämön huonoksi koettua ääneneristystä lämpiöihin ja verstastiloihin päin parannettiin mm. tekemällä uusia äänisulkuja sekä parantamalla vanhojen ovien ääneneristystä. Pienen näyttämön ja lämpiön välinen nostoseinä tehtiin kokonaan uusiksi, mikä sisälsi haastavaa liitosdetaljiikkaa ympäröiviin suojeltuihin rakenteisiin. Tanssisalin ilma- ja askeläääneneristystä alapuoliseen teatterikäytössä olevaan aulatilaan päin parannettiin uudella tärinäneristimien päälle tehdyllä kelluvalla betonilattialla. Pieneen näyttämöön rajautuvaan uuteen laajennusosaan sijoittuvat kuntosali ja näyttelijöiden harjoitussali eristettiin näyttämöstä kelluvin lattioin ja kaksinkertaisin seinä- ja kattorakentein. Uusi kapellimestarin harjoitushuone toteutettiin huone huoneessa -rakentein.

Hankkeessa laadittiin satoja detaljipiirustuksia ääntä eristävien rakenteiden liitoksista ja läpivienneistä yhteistyössä muiden suunnittelijoiden kanssa. Kohteen erityishaasteena oli, että vanhat rakenteet ja liitokset eivät vielä toteutussuunnitteluvaiheessa olleet monin paikoin tiedossa, vaan selvisivät vasta työmaavaiheessa purkutöiden myötä; näin ollen suunnitelmia jouduttiin päivittämään ja muuttamaan laajasti rakennusaikana. Ilmanvaihdon ja muun talotekniikan vaikutukseen tilojen väliseen ääneneristykseen kiinnitettiin erityistä huomiota ja tämän edellyttämät ratkaisut (mm. kanavien koteloinnit, vuoraukset, läpivientidetaljit) suunniteltiin tilakohtaisten ääneneristysvaatimusten mukaisesti.

Ääneneristysmittaukset ja akustikon työmaavalvonta olivat keskeisessä roolissa työmaan laaduntarkkailun kannalta ja asetettujen vaatimusten todentamiseksi. Mittauksia tehtiin suuri määrä hankkeen eri vaiheissa: lähtötilannemittauksia suunnittelun lähtötiedoksi, mallihuonemittauksia rakennusaikana suunniteltujen ratkaisujen ja työmenetelmien testaamiseksi sekä loppumittauksia valmiissa tiloissa. Ääneneristyksen osalta kriittisistä työvaiheista tehtiin työmaalla välitarkastuksia työn oikeanlaisen etenemisen varmistamiseksi, ja lopuksi tarkastettiin ja hyväksyttiin valmiit työsuoritukset.

3 HUONEAKUSTIIKKA

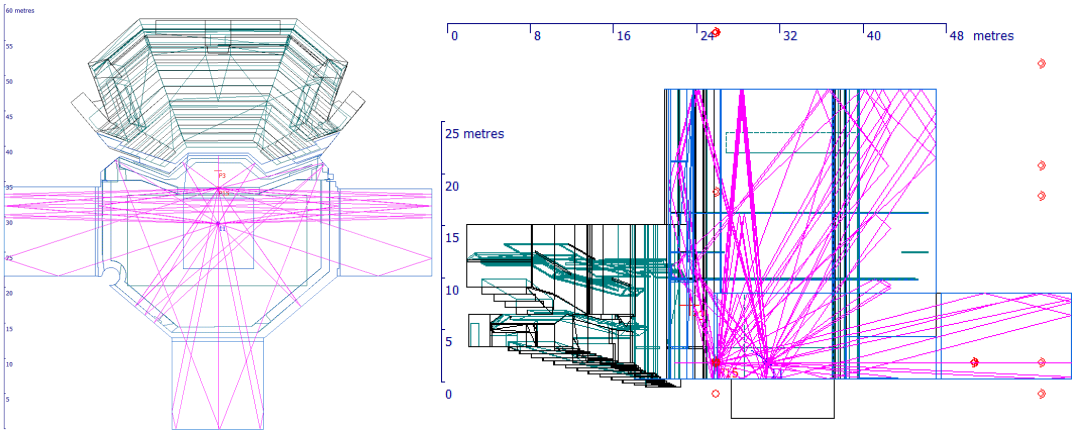
Hankkeen aikana rakennuksen kaikki tilat ja niiden huoneakustinen parannustarve käytiin läpi. Suunnittelussa keskityttiin erityisesti tiloihin, joiden huoneakustiikkaan käyttäjä oli toivonut parannuksia (esim. suuri ja pieni näyttämö) ja hankkeessa toteutettaviin uusiin tiloihin (esim. studiot, harjoitustilat). Huoneakustiikan suunnitteluun toivat oman erityishaasteensa tiukat suojeluvaatimukset, mitkä oli huomioitava kaikissa muutoksissa. Ratkaisut tutkittiin tarkkaan arkkitehdin kanssa, jotta uudet huoneakustiset pinnat ja rakenteet saatiin sovitettua sisäarkkitehtuuriin.

Suurella ja pienellä näyttämöllä käyttäjä oli kokenut ongelmia häiritsevistä heijastuksista lavalla ja suuren näyttämön avotarkkaamossa. Pienen näyttämön erityispiirteenä näyttelijät olivat kokeneet häiriötä äänen keskittymisestä tiettyyn pisteeseen lavalla (fokusointi). Sen sijaan saliakustiikka katsomossa oli kummassakin tilassa koettu toimivaksi eikä siihen haluttu muutoksia.

Saleista tehtiin huoneakustiset mallit Odeon Room Acoustics -ohjelmistolla. Geometrisen 3D-mallin pohjana käytettiin rakennuksesta tehtyä pistepilvikeilausta. Mallinnuksen päätarkoitus oli selvittää, mistä häiritsevät heijastukset ja fokusointi lavalla aiheutuvat ja miten lava-akustiikkaa saadaan tältä osin parannettua. Pienellä näyttämöllä tehtiin suunnittelun tueksi myös impulssivastemittauksia.

Kuvassa 2 on esitetty mallinnettuja heijastuksia suuren näyttämön lavalla. Mallinnuksen perusteella lavaäänen kannalta ongelmallisimmiksi havaittiin näyttämötornin seinistä,

katosta, nosto-ovista, sekä taka- ja sivunäyttämöiden seinistä ja avotarkkaamon etulevystä saapuvat heijastukset. Kyseisten heijastusten viiveet olivat 50…150 ms luokkaa ja etenkin näyttämötornin katosta ja sivunäyttämöiden päädyistä saapuvien heijastusten todettiin erottuvan lavaäänessä selkeästi erillisinä kaikuina. Yhtäaikaisesti saapuvien heijastusten havaittiin myös summautuvan eri tavalla lavan eri osissa aiheuttaen paikallista vaihtelua äänen selkeyteen. Mallinnuksen havainnot korreloivat hyvin käytännön havaintojen ja käyttäjiltä saadun palautteen kanssa.

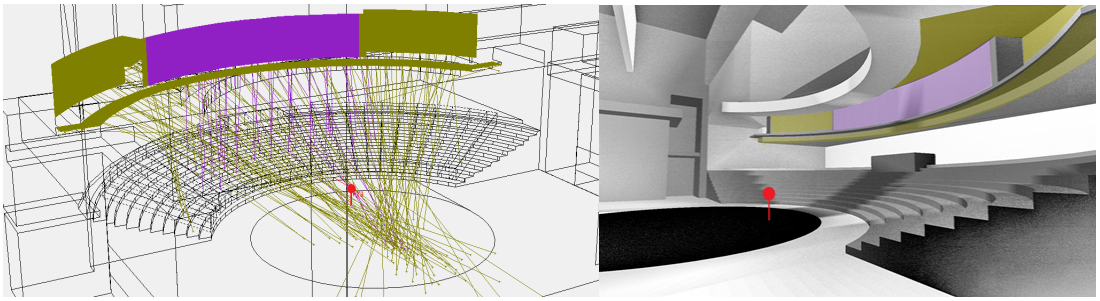


Kuva 2. Suuren näyttämön lavaheijastuksia, äänilähde lavan etuosassa ja kuulija keskellä, sivu- ja takanäyttämöt auki.

Suuren näyttämön permannon takaosassa sijaitsevan äänitarkkaamon tilanne selvitettiin myös mallintamalla. Äänitarkkailijan työtä haittaavia heijastuksia todettiin aiheutuvan näyttämön takaseinästä ja betonirakenteisen parven alapinnasta. Mallinnuksen perusteella havaittiin, että heijastusten viive suhteessa suoraan ääneen on niin pieni, ettei niistä aiheudu erillisiä kaikuja; heijastukset todettiin kuitenkin niin voimakkaiksi, että ne aiheuttavat äänen värittymää ja balanssin heikentymistä äänitarkkaamossa.

Pienellä näyttämöllä eniten häiriötä havaittiin aiheutuvan katon ja lattian sekä sivuseinän ja nosto-oven väliin muodostuvista paikallisista tärykaiuista, sekä erityisesti kaarevien parvirakenteiden ja tarkkaamon lasien aiheuttamasta äänen fokusoinnista lavalle. Paikan päällä tehtyjen havaintojen perusteella fokusointia esiintyi erittäin pienellä alueella, mutta sopivan kuuntelupisteen löydyttyä ilmiö oli yllättävän voimakas ja havaittiin selvänä äänen voimistumisena ja värittymänä ko. pisteessä.

Fokusointi näkyi selvästi myös huoneakustisessa mallissa, kun tarkasteltiin kaarevista pinnoista aiheutuvia heijastuskenttiä (kuva 3). Kaarevien pintojen mallintamiseen liittyvää epävarmuutta pyrittiin minimoimaan tekemällä geometrinen malli riittävän tarkasti. Aihetta on käsitelty mm. julkaisussa Kotsouris et al. [3], jossa esitetään, että kaarevien pintojen jakaminen 7...8° välein on riittävä. Pienen näyttämön mallinnuksessa kaarevat pinnat jaettiin 3...5° välein ja muotoja tarkennettiin laser-keilausaineiston pohjalta. Lisäksi optimaalinen havaintopiste mallissa pyrittiin löytämään mahdollisimman tarkasti siirtämällä havainnointipistettä 0,1...0,5 m välein, kunnes paras mahdollinen fokusoinnin ”sweet spot” löytyi. Tästä huolimatta tuloksissa havaittiin suuria paikallisia vaihteluita, ja kaarevista pinnoista havainnointipisteeseen osuvien heijastusten määrä vaihteli merkittävästi jo hyvinkin pienillä etäisyyksillä.

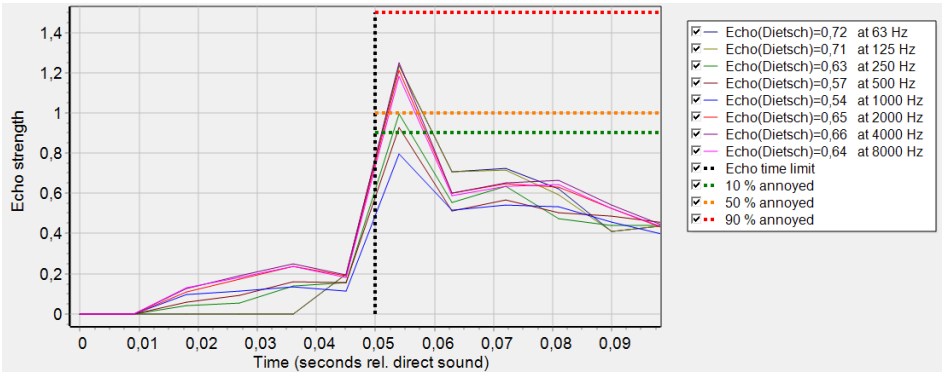


Kuva 3. Havainnekuvia pienen näyttämön akustisesta mallista. Punainen piste kuvaa äänilähdettä lavan etuosassa 1,5 m korkeudella ja viivat heijastuksia tarkkaamoparven kaarevista rakenteista.

Fokusoinnin aiheuttamaa häiritsevyyttä pyrittiin samaan esiin mallinnuksessa myös Dietsch-arvoja laskemalla. L. Dietschin ja W. Kraakin esittämällä menetelmällä voidaan karakterisoida kaikujen häiritsevyyttä [4]. Menetelmällä laskettuna yli 1:n oleva lukuarvo tarkoittaa, että 50 % kuulijoista voi häiriintyä kaiusta ja yli 1,5:n lukuarvolla vastaavasti 90 % kuulijoista.

Dietsch-arvojen laskentatulokset pienen näyttämön kaarevista pinnoista aiheutuvien heijastusten leikkauspisteessä on esitetty kuvassa 4. Häiritsevyyden raja ”50 % annoyed” ylittyy vasta yli 1 kHz taajuuksilla ja raja ”90 % annoyed” ei ylity lainkaan. Tätä selittää kaarevista pinnoista saapuvien heijastusten suhteellisen pieni viive (50…60 ms). Laskentatulos vastaa subjektiivista kuulohavaintoa siinä mielessä, että lavalla fokusointi havaittiin enemmänkin äänen värittymänä ja voimistumana, kuin kaikuna. Fokusointi-ilmiön voimakkuutta ja häiritsevyyttä ei Dietsch-arvojen laskentatulosten perusteella kuitenkaan voitu päätellä. Dietsch-arvojen mallinnuksessa havaittiin myös olevan merkittäviä epävarmuustekijöitä; numeerinen tulos riippui voimakkaasti mm. mallin tarkkuudesta ja havainnointipisteiden valinnasta.

Pienellä näyttämöllä esiintyy toteutettujen parannusten jälkeen edelleen jonkin verran fokusointia, sillä suojelusyistä merkittäviä rakenteellisia muutoksia ei ollut mahdollista tehdä. Subjektiivisesti arvioiden tilanne on kuitenkin selvästi parantunut.



Kuva 4. Dietsch-arvojen kuvaajat taajuuskaistoittain, kun havainnointipiste on kuvassa 3 näkyvien heijastusten leikkauskohdassa noin 2 m äänilähteestä näyttämön keskikohdan suuntaan.

Suurella näyttämöllä häiritsevien heijastusten poistaminen toteutettiin vaimennusverhouksilla; seinillä rei’itetyllä teräslevyllä verhoillulla 50 mm vaimennusvillalla ja kattopinnoissa kiinnitetyillä 50 mm vaimennuslevyillä. Laatikkomaisten sivunäyttämöiden tärykaikuja vähennettiin asentamalla niiden kattoon diffusoivat levyverhoukset koostuen

eri suuntiin kallistetuista kipsilevyistä. Pää- ja sivunäyttämöiden seinille alun perin suunniteltuja diffusoreja korvattiin rakennusvaiheessa vaimennuspinnoilla teknistaloudellisista syistä. Vaimennuksen lisääminen heikensi hieman vahvistamattoman äänen kuuluvuutta yleisön suuntaan; tällä ei kuitenkaan käytettävyyden kannalta arvioitu olevan suurta merkitystä, koska esityksissä käytetään pääosin äänenvahvistusta. Vaimennuksen neliömäärä suhteessa salin tilavuuteen saatiin pidettyä pienenä, joten vaikutus jälkikaiunta-aikaan jäi vähäiseksi. Katsomoalueen laskennallinen jälkikaiunta-aika (T_{30}) lyheni 500…8000 Hz oktaavikaistoilla <0,1 s ja 63...250 Hz oktaavikaistoilla <0,2 s.

Pienellä näyttämöllä lavaa ympäröivien katto- ja seinäpintojen vaimennukset toteutettiin pääosin vastaavasti kuin suurella näyttämöllä. Parven kaarevissa osissa käytettiin akustiikkaruiskutteella päällystettyä 40 mm vaimennusvillaa. Tarkkaamon ikkunat asennettiin vinoon sahalaita-kuvioon äänen fokusoinnin vähentämiseksi. Myös pienessä salissa suhteellinen muutos vaimennuksen määrässä saatiin pidettyä pienenä, ja mallinnuksella todettu jälkikaiunta-ajan muutos oli yhtä vähäinen kuin suurella näyttämöllä.

Laajennusosaan sijoittuvien äänitystarkkaamon ja Studio Oriental -äänitysstudion huoneakustiikan suunnittelussa lähtökohtia olivat heijastuksista vapaan alueen järjestäminen äänityspisteen kohdalle [5] sekä Dolbyn asettamat suositukset jälkikaiunta-ajalle ja varhaisille heijastuksille [6]. Heijastusten tutkimiseen käytettiin Odeon-mallinnusta. Jälkikaiunnan ja heijastusten kontrollointi toteutettiin ääntä vaimentavien ja hajottavien pintojen kombinaationa. Osa hajottavista pinnoista tehtiin valmiilla diffuusorituotteilla (RPG Diffractal). Kummankin tilan huoneakustisista ratkaisuista laadittiin työpiirustustasoiset seinäprojektiot ja detaljikuvat yhteistyössä arkkitehdin kanssa. Huoneakustiikan suunnittelua rajoitti se, että studiotilat sijoittuvat rakennusmassan sisään vanhojen tilojen paikalle, joten tilojen kokoon ja geometriaan ei voitu juuri vaikuttaa pintaverhouksia lukuun ottamatta.

Muusikoiden ja näyttelijöiden monikäyttöisiin harjoitustiloihin järjestettiin huoneakustista muunneltavuutta seinille sijoitetuilla käänneltävillä akustisilla elementeillä, joiden toinen puoli on ääntä vaimentava ja toinen heijastava ja diffusoiva. Kaikuisien ja hälyisien työ-, käytävä-, verstas- ja muiden vastaavien tilojen huoneakustiikkaa parannettiin lisäämällä vaimennuksia suojeluvaatimusten puitteissa.

4 TALOTEKNIIKAN ÄÄNENHALLINTA JA TÄRINÄNERISTYS

Peruskorjauksessa rakennukseen haluttiin toteuttaa käytännössä uudisrakennusta vastaava ilmanvaihto ja muut talotekniset järjestelmät – samalla tilojen tuli kuitenkin olla erittäin hiljaisia ja hyvin ääntä eristäviä. Tämä peruslähtökohta yhdistettynä vanhan suojellun rakennuksen asettamiin rajoitteisiin teki kohteen taloteknisten järjestelmien äänenhallinnan suunnittelusta ja toteutuksesta hyvin haastavan kokonaisuuden.

Äänenhallinnan vaikeusastetta lisäsivät käytettävissä olevien huone- ja kanavatilojen ahtaus sekä vanhat heikosti ääntä eristävät rakenteet. Ahtaus aiheutti päänvaivaa paitsi äänenvaimentimien ja muiden vaimennusratkaisujen mahtumisen kannalta yleensä, myös siksi, että pääosin oli käytettävä pyöreitä kanavia vähemmän tilaa vieviä mutta äänitekni-sesti heikompia kanttikanavia.

Tilojen LVIS-äänitasovaatimukset asetettiin pääosin suunnitteluaikana voimassa olleen RakMK D2-2012 mukaan [7], paikoin tavoiteltiin tätä parempaa tasoa. Vaatimukset olivat tiukat kautta linjan; mm. suuri ja pieni näyttämö $L_{A,eq,T} \leq 25/28$ dB (katso-

mo/näyttämö), studiotilat 20 dB, orkesterin harjoitussali 25 dB, harjoitushuoneet 28 dB. Tiloissa tehtiin rakennusaikana äänitasojen tarkistusmittauksia useassa vaiheessa ja korjauksia näiden perusteella sekä loppumittaukset. Kaikissa akustisesti kriittisissä tiloissa vaatimukset saavutettiin, ja muutamissa paikoissa käyttäjä hyväksyi pieniä ylityksiä.

Sisätilojen lisäksi ulos aiheutuvan LVIS-melun torjuntaan oli kiinnitettävä huomiota, koska kohde sijaitsee rauhallisella puistoalueella, johon ei haluttu aiheuttaa meluhaittaa. Kohteesta tehtiin kattava ulkomelun mallinnus CadnaA-ohjelmistolla, minkä perusteella kartoitettiin ongelmapaikat ja suunniteltiin tarvittavat meluntorjuntatoimenpiteet. Ulkomelutasot myös loppumitattiin, ja mittauksissa täytettiin vaatimukset.

Aksiaalipuhaltimet aiheuttivat kohteessa käytetyistä TATE-laitteista akustikolle eniten päänvaivaa puhaltimista aiheutuvan voimakkaan ilmaäänen ja tärinän vuoksi. Kriittisin aksiaalipuhaltimien sijoituspaikka oli suuren näyttämön katsomoon rajautuva IV-kuilu, jossa oli 4 kpl n. $L_{w,A}$ 100 dB puhaltimia. Puhallinten aiheuttama ilmaääni saatiin riittävästi vaimennettua kuilun rakenteellista ääneneristystä ja huonevaimennusta parantamalla, mutta tärinän ja runkoäänen eristys osoittautui haasteellisemmaksi. Akustikko laati puhaltimien tärinäneristyksistä asennuspiirustukset, joissa esitettiin mm. teräksiset kannatinrakenteet, äänenvaimentimet sekä laitekohtaisesti mitoitetut tärinäneristimet. Tärinäneristysten toteutus työmaalla ahtaassa kuilutilassa osoittautui erittäin herkäksi työvaiheeksi, jossa pienikin työvirhe pilaa lopputuloksen. Akustikon työmaavalvonta ja äänitasojen tarkistusmittaukset eri vaiheissa olivat tärkeässä roolissa siinä, että asetetut äänitasovaatimukset lopulta saavutettiin.

Rakennuksen ilmanvaihdon äänenhallinnan suunnittelussa käytettiin MagiCAD for AutoCAD -ohjelmaa. MagiCADin käyttö mahdollisti sisätilojen äänitasojen laajan kartoituksen, mikä oli tarpeen tiukkojen äänitasovaatimusten ja herkkien tilojen suuren määrän vuoksi. MagiCAD oli tarpeellinen työkalu myös suuren tietomäärän hallintaan; kohteessa kanavajärjestelmät olivat suuria ja kanavakomponentteja oli tuhansia. MagiCADin laskentamenetelmässä havaittiin kuitenkin puutteita, joiden vuoksi laskentaa täydennettiin taulukkolaskennalla käyttäen MagiCADin tuloksia lähtötietoina.

MagiCAD mallintaa IV-päätelaitteen huoneeseen tuottaman äänitason tarkastelemalla IV-suunnitelman kanavareittiä ilmanvaihtokoneelta päätelaitteelle asti. Ohjelma huomioi kaikki reitillä olevat kanavaosat, -mutkat, -haarat ja IV-komponentit tasapainottaen samalla ilmamäärät ja -paineet. Lopuksi ohjelma huomioi 4 dB huonevaimennuksen ja ilmoittaa yhden päätelaitteen tuotaman äänitason huoneessa. Äänitasolaskelmat tehdään IV-komponenttivalmistajien luovuttaman äänidatan perusteella. [8]

MagiCADissa oletushuonevaimennusta ei voi muuttaa eikä päätelaitteiden äänitasoja laskea yhteen automaattisesti, mitkä havaittiin suunnittelussa ohjelmiston merkittävimmiksi puutteiksi. Puutteet korostuivat, koska kohteessa tilojen lukumäärä oli hyvin suuri, tilat olivat suurikokoisia ja monimuotoisia ja niissä oli paljon päätelaitteita. Mallinnettavien huoneiden ja järjestelmien suuresta määrästä johtuen oli olennaista löytää yksinkertainen menetelmä äänitasojen laskentaan.

Yksinkertaisissa tiloissa päästiin riittävään tarkkuuteen energiasummaamalla samassa tilassa olevien päätelaitteiden tuottamat A-painotetut äänitasot yksilukuarvoina ja vähentämällä arvosta tilan laskennallinen huonevaimennus keskitaajuuksilla olettaen diffuusi äänikenttä. Akustisilta ratkaisuiltaan toistuvissa tyyppitiloissa, kuten toimistoissa, tilan erikseen laskettua huonevaimennusta skaalattiin huoneen pinta-alan perusteella. Akusti-

sesti kriittisimmissä ja monimutkaisimmissa tiloissa huonevaimennusta arvioitiin tarkemmilla laskelmilla ja Odeon-mallinnuksella. Tarvittaessa huomioitiin päätelaitteen suora ääni diffuusin äänikentän lisäksi.

Kokemusperäisesti arvioituna MagiCAD-mallinnus antoi kohteen tiloissa riittävän tarkan arvion äänitasosta tyypillisimmissä tapauksissa, mutta erikoistilanteissa laskentatulos aliarvioi huoneen äänitasoa merkittävästi. Suurien kanavien terävissä mutkissa tai kammioiden äkkinäisissä poikkipinta-alan muutoksissa syntyvää voimakasta pienitaajuista melua ohjelma ei osaa mallintaa. Tämä oli ongelma muun muassa teatterin aulatiloissa, jonne tuodaan suuri ilmamäärä ahtaassa tilassa. Lisäksi ohjelma ei mallinna kanavan läpi kantautuvaa ääntä, mikä havaittiin ongelmaksi suurissa teatteritiloissa, joiden läpi vietiin suuria ilmamääriä tilan läpi kanttikanavissa. Joissain tapauksissa laskennan yhdensuuntaisuus tuotti aliarvion äänitasoista; esimerkiksi kanavareitin sivuhaarassa olevan säätöpellin vastavirtaan kantautuvaa ääntä ohjelma ei osaa ottaa huomioon.

Kaiken kaikkiaan MagiCAD oli akustikolle erittäin hyödyllinen työkalu kohteen ilmanvaihdon äänenhallinnan suunnittelussa ja auttoi suuren tietomäärän hallinnassa. Periaatteessa huolellinen IV-suunnittelija saa arvion tilojen äänitasoista IV-suunnitelmia laatiessaan. Hankkeessa saadut kokemukset kuitenkin osoittivat, että tämän vaativuustason kohteessa suunnitelmat vaativat vähintään akustikon tarkastuksen ja usein myös tarkemmat laskelmat ja vaimennussuunnitelmat. Onnistuneen lopputuloksen kannalta akustikon työmaa-aikaiset tarkastukset ja loppumittaukset ovat myös tärkeässä roolissa.

VIITTEET

[1] Schalin M., Salonen K., Helsingin kaupunginteatteri, Rakennushistoriallinen selvitys ja inventointi, Helsingin kaupungin tilakeskuksen tilaama konsulttityö, 10.2.2013.

[2] SFS 5907:2004, Rakennusten akustinen luokitus, Suomen Standardoimisliitto SFS ry, Helsinki, 2004.

[3] Koutsouris G., Norgaard A. K., Christensen C. L., Rindel J. H., Discretisation of curved surfaces and choice of simulation parameters in acoustic modelling of religious spaces, 23th International Congress on Sound & Vibration, Athens, 10-14 July 2016.

[4] Dietsch L., Kraak W., Ein objektives Kriterium zur Erfassung von Echostörungen bei Musik- und Sprachdarbietungen, Acustica, 60, 205-216 (1986).

[5] Cox T. J., D`Antonio P., Acoustic Absorbers and Diffusers, Theory, design and application, Spon Press, London, 2004.

[6] 5.1-Channel Music Production Guidelines, Dolby Laboratories Inc., Issue 3, S05/14926/15996, 2005.

[7] Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa D2: Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto – Määräykset ja ohjeet, Helsinki, ympäristöministeriö, 2012.

[8] MagiCAD Common functions 2020.1 User guide, MagiCAD Group Ltd., https://help.magicad.com/mcaca/2020/EN/, tarkistuspäivämäärä 11.9.2019.

TURUN AKATEMIATALON PERUSPARANNUS

Timo Huhtala, Ilkka Valovirta, Mikko Kylliäinen, Joose Takala

A-Insinöörit
Puutarhakatu 10
33210 Tampere
etunimi.sukunimi@ains.fi

Tiivistelmä

Turun Akatemiatalo oli rakennusaikanaan Ruotsin valtakunnan suurin rakennushanke. Rakennustyöt alkoivat ruotsalaisen arkkitehti Carl Christoffer Gjörwellin suunnitelmien mukaan vuonna 1802. Talo valmistui 1815 Suomen jo tultua suuriruhtinaskuntana osaksi Venäjää. Akatemia-talo on merkittävimpiä kustavilaista arkkitehtuuria edustavista rakennuksista Suomessa. Sittemmin taloa ovat runnelleet Turun palo ja talvisodan pommitukset. Paljon alkuperäistä kuitenkin on jäljellä, mikä teki Akatemiatalon perusparannushankkeesta erittäin vaativan suunnittelutehtävän myös akustiikkasuunnittelijalle. Rakennushankkeessa taloon toteutettiin nykymääräyksiä vastaava ilmastointijärjestelmä, joka suojelutavoitteiden johdosta ei saanut jäädä sisätiloissa näkyväksi. Hovioikeuden istuntosalien ja toimistotilojen huoneakustiikkaa ja ääneneristystä parannettiin ja taloon toteutettiin kokonaan uusia toimistotiloja. Hankkeen yhteydessä myös mitattiin Akatemiatalon juhlasalin huoneakustiset ominaisuudet.

1 JOHDANTO

Turun Akatemiatalo (kuva 1) oli rakennusaikanaan Ruotsin valtakunnan suurin rakennushanke. Rakennustyöt alkoivat ruotsalaisen arkkitehti Carl Christoffer Gjörwellin (1766–1837) suunnitelmien mukaan vuonna 1802. Talo valmistui 1815 Suomen jo tultua suuriruhtinaskuntana osaksi Venäjää. Akatemiatalo on merkittävimpiä ruotsalaista uusklassismia eli kustavilaista arkkitehtuuria edustavista rakennuksista Suomessa [1]. Se myös vaikutti jossain määrin C. L. Engelin (1778–1840) suunnitelmiin Helsinkiin siirretyn ja Keisarilliseksi Aleksanterin-Yliopistoksi nimetyn akatemian uudeksi päärakennukseksi, joka valmistui 1832. [2].

Akatemiataloa ovat kahden vuosisadan aikana runnelleet Turun palo vuonna 1827 ja talvisodan pommitukset. Rakennuksen valmistumisen jälkeen siihen on tehty runsaasti korjauksia ja muutoksia, ensimmäisen kerran palon aiheuttamien vaurioiden vuoksi. Seuraavat muutokset toteutettiin jo 1830-luvulla yliopiston siirryttyä Helsinkiin vuonna 1829. Rakennuksen käyttötarkoitus muuttui, ja uudet käyttäjät, Turun tuomiokapituli, Turun hovioikeus ja Turun lääninhallitus tarvitsivat enemmän arkistotiloja ja virastohuoneita,

© 2019 Timo Huhtala, Ilkka Valovirta, Mikko Kylliäinen ja Joose Takala. Tämä on avoimesti julkaistu teos, joka noudattaa Creative Commons NIMEÄ 4.0 Ei sovitettu –lisenssiä (CC BY 4.0). Teosta saa kopioida, levittää, näyttää ja esittää julkisesti ja siitä saa luoda johdannaisteoksia, kunhan tekijän nimi ja lähde mainitaan asianmukaisesti.

joten luentosaleja jaettiin väliseinillä pienemmiksi huoneiksi. Viimeksi laajempi perusparannus on toteutettu vuosina 1977–1979 [3].

Perusparannushankkeen jälkeen Akatemiatalossa toimii Turun hovioikeus. Talossa on monista muutoksista huolimatta säilynyt paljon alkuperäistä, mikä teki sen perusparannushankkeesta erittäin vaativan suunnittelutehtävän myös akustiikkasuunnittelijalle. Hankkeessa toteutettiin uusi ilmanvaihtojärjestelmä, muutettiin tiloja paremmin käyttötarkoitustaan vastaaviksi ja rakennettiin kokonaan uusia toimistotiloja.

KUVA 1. Turun Akatemiatalo kesällä 2018 perusparannushankkeen valmistuttua. Katolla näkyvät uuden ilmanvaihtojärjestelmän raitis- ja jäteilma-aukot.

2 AKUSTIIKKASUUNNITTELU PERUSPARANNUSHANKKEESSA

2.1 Ilmanvaihtojärjestelmä

Perusparannushankkeen aikana voimassa olleiden rakentamismääräysten [4] vaatimukset täyttävä ilmanvaihtojärjestelmä edellytti uusien ilmanvaihtokonehuoneiden ja ilmanvaihtokanavien rakentamista taloon. Rakennussuojelun johdosta ne eivät saaneet sisätiloissa olla näkyviä, joten järjestelmän toteutus vaati tavallisuudesta poikkeavien, jopa varta vasten tähän kohteeseen kehitettyjen ratkaisujen käyttöä. Rakennuksen kolmannen kerroksen kerroskorkeus oli vain 3 m. Yläpohjan kantavat rakenteet ja eristykset veivät tästä huomattavan osan, ja lisäksi kattoon asennetut jäähdytyspaneelit vaativat korkeussuunnassa noin 200 mm tilaa. Ilmanvaihdolle järjestettiin tilaa sijoittamalla rakennuksen ylintä kerrosta palvelevat IV-kanavat ullakolle. Tilakohtaiset äänenvaimentimet sijoitettiin pystysuoraan yläpohjan eristetilan kohdalle, ja ainoastaan päätelaitteet tulivat huonetiloihin näkyviin. Kerroksen läpi alempiin kerroksiin menevät kanavat sijoitettiin leveisiin kotelorakenteisiin, joilla saatiin aikaan alkuperäisiä massiivitiiliseiniä vastaava vaikutelma.

Rakennuksen toisessa kerroksessa haasteena olivat sekä vaaka- että pystysuuntaiset reititykset. Useissa tiloissa kanavat lähtivät suoraan päätelaitteilta ylös kolmannen kerroksen läpi ullakolle. Ensimmäistä kerrosta palvelevia kanavia sijoitettiin erityisesti istuntosalien kohdalla alapohjaan. Tuloilma jaettiin osassa saleista lattiasäleikköjen kautta (kuva 2). Joissakin saleissa sekä tulo- että poistoilmanvaihto sijoitettiin varta vasten raken-

nettuun kalusteeseen, josta tuloilma puhallettiin viistosti ylös ja johon poistoilma otettiin ylhäältä (kuva 2).

KUVA 2. *Ilmanvaihdon kanavat ja päätelaitteet upotettiin rakenteisiin ja kalusteisiin.*

2.2 Ääneneristys

Puuvälipohjien alapinnat olivat useimmissa tapauksissa suojeltuja, mikä edellytti korjausten tekemistä ylhäältä käsin, eikä esimerkiksi ääntä eristävä alakatto ollut mahdollinen. Riittävän askelääneneristävyyden saavuttamiseksi käytettiin varsin järeää lattialevytystä, jossa alimmaisena oli ympäripontattu lattiavaneri. Sen päälle asennettiin Damtec System -askelääneneriste ja eristeen päälle kaksinkertainen lattiakipsilevy kelluvana. Vanhoista välipohjista purettiin alkuperäiset täytteet, ja tilalle asennettiin puukuitueristettä. Rakenteen massan pienenemistä kompensoitiin lattiapalkkien väliin asennetuilla kipsilevyillä.

Rakennuksen kolmas kerros oli matalan kerroskorkeuden vuoksi lähinnä toimistokäyttöön soveltuva. 1970-luvun peruskorjauksessa suureen osaan kerrosta oli rakennettu pieniä toimistohuoneita. Suurelta osin lastulevypintaiset väliseinä- ja kattorakenteet purettiin. Uudet väliseinät tehtiin teräsrankarunkoisina ja kipsilevyllä levytettyinä, jolloin ääneneristys saatiin käyttötarkoitusta vastaavalle tasolle. Kerroksen pohjaratkaisua muokattiin samalla tehokkaammaksi. Alemmissa kerroksissa tilamuutokset olivat vähäisempiä. Siellä tiloja rajasivat olemassa olevat, varsin taajassa sijainneet massiivitiiliseinät. Näin ollen tilamuutokset keskittyivät lähinnä toimintojen siirtoon tiloista toiseen, sekä joidenkin isohkojen tilojen jakamiseen pienemmiksi. Uusien tilojen ääneneristyksessä ratkaisevaa olivat seinien liitokset välipohjiin. Tavoitellun ääneneristyksen saavuttamiseksi liitoksista tehtiin yksityiskohtaiset työpiirustukset, jolloin erityisesti tiivistykset sekä levytysten katkot saatiin työmaalla toteutetuksi oikealla tavalla.

Istuntosalien ovet säilytettiin rakennussuojelun vuoksi. Ovet olivat kaksinkertaisia puuovia, joiden ovilehdet sijaitsivat massiivitiiliseinän pintojen kohdalla (kts. kuva 2, äärimmäisenä oikealla). Oviin asennettiin kaksinkertaiset EPDM-tiivisteet sekä lisäksi palotilanteessa paisuva palotiiviste. Ovien väliin jäävän tilan sivuille, ovenkarmien väliin, asennettiin verhoiltu akustiikkamineraalivilla vaimentamaan kaiunta ovien välissä.

2.3 Huoneakustiikka

Huoneakustiikkaa pyrittiin mahdollisuuksien mukaan parantamaan kaikissa saneerattavissa tiloissa. Haasteena oli parannusten toteuttaminen rakennussuojelun ehdoilla, ja yleensä niiden sovittaminen rakennuksen luonteeseen. Istuntosaleissa oli lisäksi varmistettava äänentoiston toimivuus ajatellen esimerkiksi videoyhteyksiä. Istuntosalien kattopinnat olivat lähtötilanteessa kokonaan ääntä heijastavia. Useimpien istuntosalien katoissa oli tilojen ympäri kiertävä friisi noin 1,2 m etäisyydellä kattopinnasta (kuva 3). Friisin ja seinäpinnan välinen kaista pinnoitettiin 39 mm paksulla pohjalevyn päälle asennetulla Fellert-ruiskutuksella. Näin saatiin aikaan erittäin hyvin ääntä vaimentava ja ulkonäöltään alkuperäisen kaltainen pinta. Katon keskialueet jätettiin ääntä heijastavaksi pinnaksi. Pieni absorptioalan lisäys aikaansaatiin lähes koko huoneen korkuisilla, ääntä hyvin vaimentavasta kankaasta valmistetuilla ikkunaverhoilla (kuva 3).

KUVA 3. *Hovioikeuden istuntosali, jonka huoneakustiikkaratkaisu perustuu verhoihin sekä katon reunoilla kiertävään ruiskutettuun pintaan.*

Kolmannessa kerroksen työhuoneiden katoista suurin osa jäi rei'itetyn jäähdytyspaneelin taakse. Paneeli toimii absorptiomateriaalina. Käytävillä käytettiin reikäkipsilevyä, jolloin näkyvän kattopinnan ulkonäkö pysyy lähes samana siirryttäessä käytävältä huoneisiin tai päinvastoin. Kipsilevyä käytettiin myös alempien kerrosten uusissa neuvottelutiloissa. Kolmannen kerroksen lattiamateriaalina käytettiin pitkälti tekstiilimattoja. Maton vaikutus tilojen jälkikaiunta-aikaan on minimaalinen, mutta kävelystä aiheutuvien äänten, sekä myös askeläänineristyksen, kannalta maton käyttö todettiin hyödylliseksi.

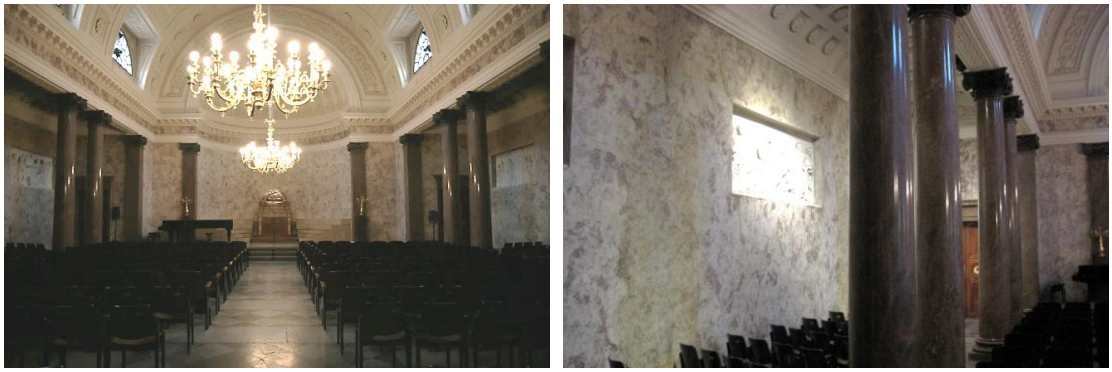
3 AKATEMIASALI

3.1 Rakennushistoria

Kärsimistään vaurioista huolimatta Akatemiatalo oli Turun palon jälkeen yksi parhaiten säilyneistä rakennuksista kaupungissa. Sisäpihan siivessä sijaitsevaan Akatemiasaliin (kuva 4) tuli talon tiloista vähiten palovaurioita, joten se on säilynyt varsin hyvin alkuperäisessä, Gjörwellin suunnittelemassa asussaan. Akatemiataloa on luonnehdittu Suomen ensimmäiseksi tieteille ja taiteille pyhitetyksi tilaksi [5]. Tässä suhteessa keskeinen osa rakennusta on ollut sen juhlasali, jossa järjestettiin sekä akateemisia seremonioita että turkulaisten orkesterien konsertteja.

Suomen musiikinhistoriassa Akatemiatalon juhlasali on ollut tärkeä paikka. Se on yksi ensimmäisistä tiloista, joissa Suomessa esitettiin sinfonista orkesterimusiikkia [6–7]. 1800-luvun loppupuolen konserttiarvostelijoiden mielestä Akatemiasalin akustiikka oli

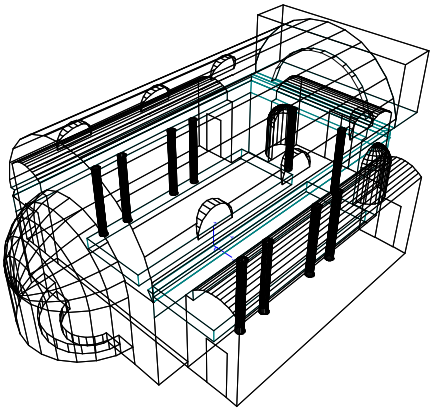
hyvä [8] tai erinomainen [9–11]. Vuonna 1899 salista kirjoitettiin, että ”…siellä owat wuoronsa jälkeen melkein kaikki ne musikaaliset suuruudet, jotka täällä owat käyneet, konsertteja antaen esiintyneet ja on salin erinomainen akustiikka aina herättänyt heissä ihastusta.” [12]. Salin puheakustiikkaa sitä vastoin on pidetty ongelmallisena. Vuosina 1955–1956 tehdyn sisustusuudistuksen aikana saliin suunniteltujen irtotuolien alapintaan lisättiin ääntä vaimentavaa materiaalia. Vuonna 1966 Paavo Arni suunnitteli korjauksen, jota nähtävästi ei kuitenkaan toteutettu. [3].



KUVA 4. *Akatemiatalon juhlasali.*

3.2 Akustiikka

Akatemiasali ei kuulunut perusparannushankkeeseen, mutta salin huoneakustiset ominaisuudet mitattiin standardin ISO 3382-1 [13] mukaisesti mahdollisten tulevaisuudessa toteutettavien puheakustiikan parannustoimenpiteiden lähtötiedoksi. Koska mittaukset tehtiin tyhjässä salissa, tehtiin myös huoneakustinen mallinnus, jonka tarkoituksena oli selvittää, kuinka paljon akustiikan mittaluvut muuttuvat, kun sali on täynnä yleisöä. Mallinnus tehtiin Odeon-ohjelmalla. Konserteissa Akatemiasalissa on 340 istumapaikkaa. Salin äärimitat ovat noin 25,8 m x 17,1 m ja suurin korkeus 11,2 m. Sali on rakenteeltaan kolmilaivainen ja kaikissa laivoissa on muurattu holvikatto (kuva 5). Päälaivan leveys on n. 11,2 m ja sivulaivojen n. 3,0 m, ja suurimmat korkeudet vastaavasti 11,2 m ja 5,95 m. Salin pinta-ala on 331 m^2 ja tilavuus noin 3000 m^3.



KUVA 5. *Akatemiatalon juhlasalin huoneakustinen malli.*

Salissa mitatut huoneakustiset mittaluvut on esitetty taulukossa 1. Lisäksi taulukossa on esitetty vastaavat mallinnetut mittaluvut tilanteessa, jossa sali on täynnä yleisöä. Puheensiirtoindeksin STI arvo oli tyhjässä salissa 0,35. Täyden salin akustiset ominaisuudet vas-

taavat nykykäsitystä siitä, millainen akustiikka tämän kokoisessa salissa tulisi olla [14–15]. Rakennusajankohtansa sinfonisen orkesterimusiikin esittämiseen sali sopii hyvin silloin, kun se on täynnä yleisöä, mutta puhetilaisuuksia ajatellen sali on turhan kaiuntainen.

TAULUKKO 1. *Akatemiasalin mitatut huoneakustiset parametrit keskitaajuuksilla salin ollessa tyhjä sekä vastaavat parametrit salin ollessa täynnä yleisöä.*

Mittaluku	Mittaustulos (sali tyhjä)	Mallinnettu (sali täynnä)
T_{30}	4,4 s	1,7 s
EDT	3,6 s	1,7 s
C_{80}	-6,0 dB	1,0 dB
LF_{80}	0,22	0,23

4 YHTEENVETO

Turun Akatemiatalo on arkkitehtuuriltaan ja rakennushistorialtaan ainutlaatuinen kohde Suomessa. Peruskorjaushankkeen akustiikkasuunnittelussa tuli kiinnittää erityistä huomiota uusien ratkaisuiden yhteensovittamiseen suojelumääräysten kanssa. Valmiita tuotteita tai ratkaisuja ei ollut suurelta osin käytettävissä, jolloin ne räätälöitiin varta vasten kohteen vaatimusten perusteella.

VIITTEET

[1] Alm, G. 2010. Arkitekturen och inredninskonsten. Teoksessa: Alm, G. et al. Den gustavianska konsten (2. p.). Stockholm, Bokförlaget Signum.
[2] Pöykkö, K. 1972. Das Hauptgebäude der Kaiserlichen Alexander-Universität von Finnland. Helsinki, Suomen Muinaismuistoyhdistyksen aikakauskirja 74.
[3] Winterhalter, K. & Bonsdorff, M. 2009. Turun Akatemiatalo – Rakennuhistoriaselvitys. Helsinki, Arkkitehtitoimisto OKULUS Oy.
[4] Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa D2: Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto. 2012. Helsinki, ympäristöministeriö.
[5] Niskanen, R. 2008. Missä soitto soi – Musiikkitilat Suomessa. Helsinki, Multikustannus Oy.
[6] Dahlström, F. & Salmenhaara, E. 1995. Suomen musiikinhistoria 1 – Ruotsin vallan ajasta romantiikkaan. Helsinki, Werner Söderström Osakeyhtiö.
[7] Korhonen, K. 2015. Sävelten aika – Turun Soitannollinen Seura ja Turun filharmoninen orkesteri 1790–2015. Helsinki, Kustannusosakeyhtiö Siltala.
[8] Åbo Tidning 5.2.1887, ”Konserten i går afton…”.
[9] Åbo Underrättelser 27.9.1885, ”Åbo-bref”.
[10] Åbo Underrättelser 10.2.1889, ”Herr Ackenströms konsert…”.
[11] Turun Sanomat 24.9.1905, ”William Hammarin konsertti”.
[12] Uusi Aura 22.9.1899, ”Auttamista ansaitsewa puute”.
[13] ISO 3382-1. 2019. Acoustics – Measurement of room acoustic parameters – Part 1: Performance spaces. Geneva, International Organization for Standardization.
[14] Barron, M. 2010. Auditorium acoustics and architectural design (2. p.). Lontoo, Spon-Press.
[15] Beranek, L. 2004. Concert halls and opera houses (2. p.). New York, Springer-Verlag.

JYVÄSKYLÄ SINFONIAN HARJOITUSSALIN KORJAUS

Henry Niemi, **Mikko Kylliäinen**, **Jesse Lietzén, Mikko Tarri**

A-Insinöörit
Puutarhakatu 10
33210 Tampere
etunimi.sukunimi@ains.fi

Tiivistelmä

Jyväskylä Sinfonian konserttipaikkana on Jyväskylän teatteritalo, mutta harjoitussali on muutaman korttelin päässä liikekiinteistössä Jyväskylän keskustassa. Harjoitussali on toteutettu alkujaan tennishalliksi rakennettuun ullakkotilaan, jossa sittemmin on toiminut autoliike. Salin korkeuden ja tilavuuden määrittää alkuperäinen katon muoto. Jyväskylä Sinfonian muusikot ovat kokeneet harjoitussalin liian kuivaksi. Toisaalta äänitaso harjoitusten aikana on ollut suuri, mikä ehkä osittain on johtunut siitä, että muusikot ovat joutuneet istumaan salissa varsin tiiviissä muodostelmassa. Korjaushankkeessa tavoitteeksi asetettiin tilan soinnin parantaminen kaiuntaa lisäämällä siten, että äänitaso ei saa kasvaa. Harjoitussalin tilavuutta voitiin jonkin verran kasvattaa. Lisäksi salista poistettiin melko paljon absorptiomateriaalia sekä muokattiin seinäpintoja ja kattoa. Mittaustulokset osoittavat, että näillä toimilla kaiuntaa on saatu lisätyksi. Tehtyjen kyselyjen ja haastattelujen perusteella myös muusikot ovat kokeneet tilan akustiikan korjauksen jälkeen paremmaksi kuin aiemmin.

1 JOHDANTO

Jyväskylä Sinfonia on 38-henkinen sinfoniaorkesteri, jonka kapellimestarina toimii Ville Matvejeff. Orkesterilla on konsertteja 1–2 kertaa viikossa ja sen ohjelmisto sisältää barokin, klassismin, romantiikan ja nykymusiikin teoksia.

Orkesterin harjoitustila sijaitsee Jyväskylän keskustassa vuonna 1938 rakennetun Kolmikulman kauppakeskuksen ylimmässä kerroksessa. Harjoitussali oli noin 17 m pitkä ja 15 m leveä hallimainen tila, jossa on noin 7 m korkea kaareva katto. Tilaa on aiemmin käytetty mm. tennishallina ennen kuin se otettiin orkesterin käyttöön. Orkesterilta on tullut valituksia tilan kaiuntaisuudesta. Muusikoiden mielestä tila on liian kuiva orkesterisoittoon. Lisäksi työterveyshuolto oli mitannut liian voimakkaita äänitasoja orkesterin harjoitusten aikana.

Tilan kaarevat kattopinnat oli päällystetty mineraalivillalla ja tilan kattoon oli sijoitettu useita kuperia levypintoja. Lisäksi seinille oli ripustettu pystysuoria levypintoja, joista osan taakse oli myös lisätty mineraalivillaa (kuva 1).

© 2019 Etunimi1 Sukunimi1, Etunimi2 Sukunimi2 ja Etunimi3 Sukunimi3. Tämä on avoimesti julkaistu teos, joka noudattaa Creative Commons NIMEÄ 4.0 Ei sovitettu –lisenssiä (CC BY 4.0). Teosta saa kopioida, levittää, näyttää ja esittää julkisesti ja siitä saa luoda johdannaisteoksia, kunhan tekijän nimi ja lähde mainitaan asianmukaisesti.

Orkesterin harjoitustilan huoneakustiikan ohjearvoja ja muita kriteerejä on esitetty norjalaisessa standardissa NS 8178:2014 [2]. Standardin mukaan sinfoniaorkesterin harjoitustilan tilavuus tulisi olla vähintään 1800 m³. Ennen korjaustoimenpiteitä tilan pinta-ala oli 264 m² ja tilavuus vain 1100 m². Tälle pienemmälle tilavuudelle oli standardissa asetettu voimakkaalle akustiselle musiikille jälkikaiunta-ajan tavoitteeksi 0,9–1,4 sekuntia.

Tilan ominaisuuksien ja muusikoiden valitusten perusteella tilan korjaussuunnittelun tavoitteeksi asetettiin tilan jälkikaiunta-ajan lisääminen siten, että tilan voimakkuus ei kasva.

KUVA 1. Harjoitustila ennen korjauksia.

2 MENETELMÄT

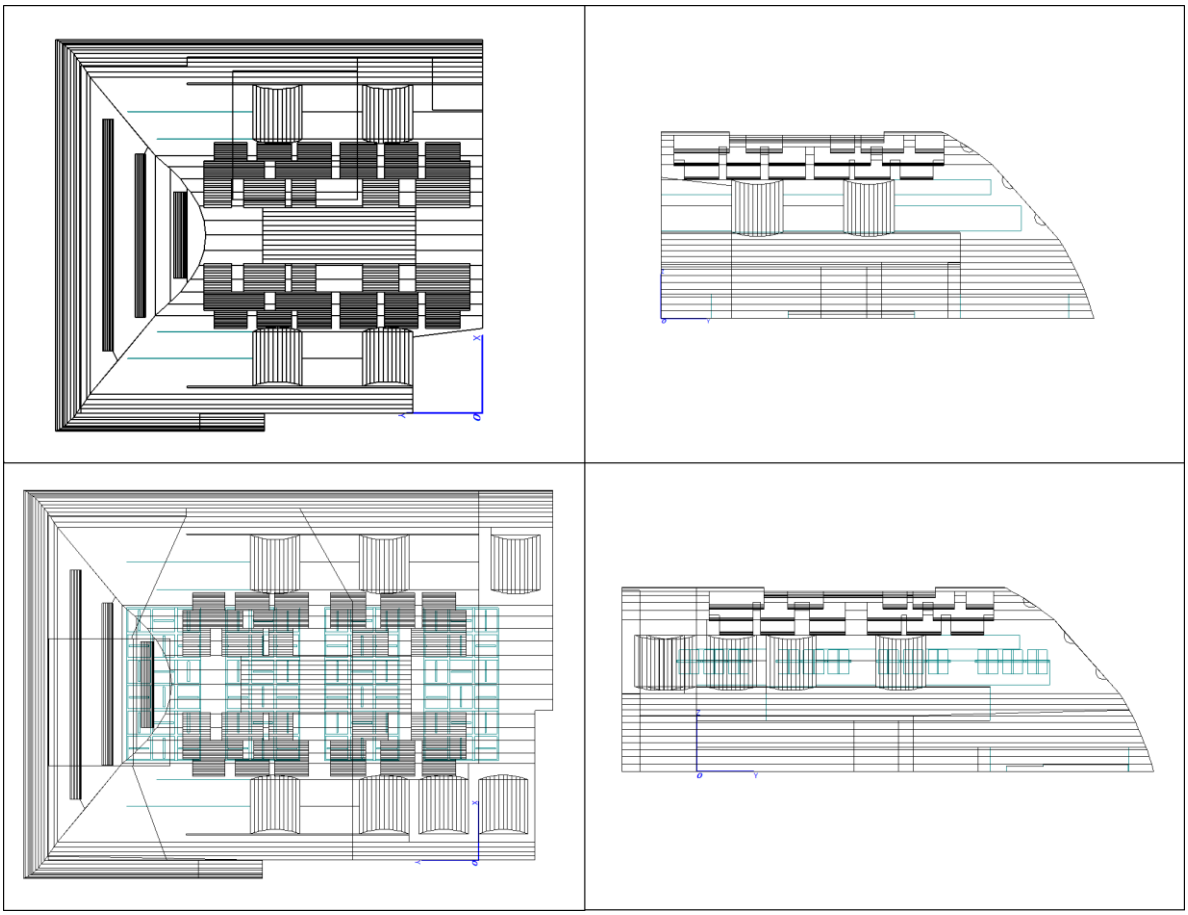
2.1 Mittaukset

Harjoitustilassa suoritettiin huoneakustisia mittauksia standardin ISO 3382-1 [1] mukaisesti integroidulla impulssivastemenetelmällä käyttäen siniaaltopyyhkäisyjä. Mittaukset tehtiin käyttäen mallinnus- ja mittausohjelmistoa Odeon 13.02. Harjoitustilassa mitattiin standardin mukaiset parametrit: jälkikaiunta-aika T_{30}, varhainen jälkikaiunta-aika *EDT*, selvyys C_{80}, voimakkuus *G* sekä lavaparametrit ST_{early} ja ST_{late}.

Parametrit mitattiin käyttäen 4 kaiutinpistettä ja 8 vastaanottopistettä. Lavaparametrit määritettiin käyttäen 12 vastanottopistettä, jotka määritettiin kaiutinpisteiden ympärille standardin mukaisesti. Mittaukset suoritettiin ennen korjausta sekä korjausten jälkeen mallinnustulosten ja korjaustoimenpiteiden varmistamiseksi.

2.2 Mallinnus

Tilasta luotiin Sketchup-ohjelmassa 3D-tilamalli, joka muunnettiin huoneakustiseksi malliksi Odeon Auditorium 13.02 -mallinnusohjelmalla (kuva 2). Huoneakustisen mallin absorptio-ominaisuudet kalibroitiin vastaamaan mittaustuloksia, käyttäen mallissa samoja lähde- ja vastaanottopisteitä kuin mittauksissa. Mallin kalibrointi suoritettiin käyttämällä ISO 3382-1 [1] parametrejä T_{30}, *EDT*, C_{80} ja *G* kunnes mallilla lasketut arvot vastasivat mitattuja arvoja mittaustarkkuuden puitteissa. Mallin avulla tutkittiin tilan huoneakustiikan ominaisuuksia ja kokeiltiin erilaisten korjaustoimenpiteiden vaikutusta salissa koettuihin ongelmiin.



KUVA 2. Harjoitustilan huoneakustinen malli ennen korjausta (ylhäällä) ja korjausten jälkeen (alhaalla)

2.3 Kysely

Korjaustoimenpiteiden subjektiivisten muutosten tutkimiseksi orkesterille jaettiin korjaustoimenpiteiden jälkeen kysely tilan akustiikasta. Kysely suoritettiin, kun orkesteri oli ehtinyt harjoitella uudessa salissa noin kuukauden ajan. Muusikoilta kysyttiin soitin ja istumapaikka orkesterissa. Muusikoita pyydettiin sen jälkeen arvioimaan akustiikan muutokset tilassa asteikolla 1–5. Kysymykset liittyivät soittajien keskinäiseen kuuluvuuteen, soittamisen yleiseen helppouteen, virityksen kuuntelemiseen ja tilan akustiikan yleiseen arviointiin.

3 KORJAUSTOIMENPITEET

Pääasiallinen keino kasvattaa tilan jälkikaiunta-aikaa lisäämättä äänenvoimakkuutta oli tilavuuden lisääminen. Tämän lisäksi tilaan lisättiin levykerroksia, diffuusorilevyjä sekä vaimennusta. Salin tilavuutta lisättiin purkamalla tilan päätyseinä. Tilan lattiapinta-ala kasvoi tällöin 264 m²:stä 312 m²:iin ja tilavuus kasvoi 1100 m³:stä 1500 m³:iin. Uudelle päätyseinälle lisättiin 30 m² alalle 20 mm paksua mineraalivillaa suoraan seinäpintaan kiinnitettynä. (kuva 3)

Kaarevien seinien alaosaan alle 3 m korkeudelle lisättiin kolme kipsilevyä pienentämään levyseinän absorptiota bassotaajuuksilla ja alimmat katosta ripustetut kipsilevyt poistettiin tilasta. Tilan keskelle, soittajien yläpuolelle, lisättiin pystysuuntaisia levyjä, jotka ripustettiin 3 x 3 m kehikkoon poikittain toisiinsa nähden Arau-Puchadesin [3–4] kuvauksen mukaisesti. Lisäksi tilan alaosaan alle 2,2 m korkeudelle lisättiin diffusoivia pyramidin muotoisia pintoja (kuva 3).

KUVA 3. Harjoitustila korjausten jälkeen.

4 TULOKSET

4.1 Mittaukset

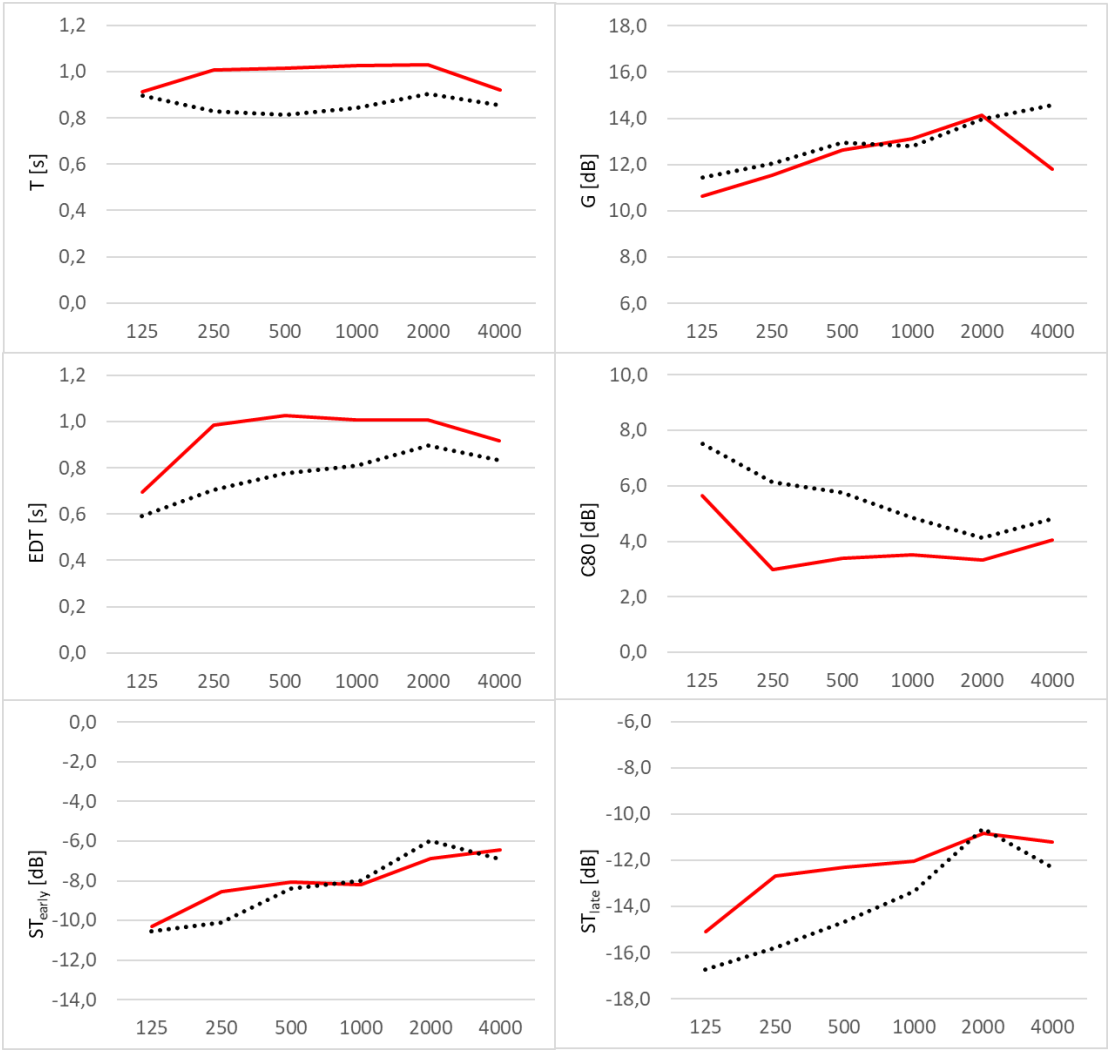
Huoneakustisten mittausten kaikkien vastaanotto- ja lähdepisteiden keskiarvot on esitetty taulukossa 1 sekä kuvassa 3 ennen korjauksia sekä niiden jälkeen. Kuvaajassa tulokset ennen korjauksia on esitetty katkoviivalla ja tulokset korjausten jälkeen yhtenäisellä viivalla.

Tuloksista nähdään, että ennen korjaustoimenpiteitä jälkikaiunta-aika alittaa standardin NS 8178:2014 [2] 1100 m³ tilavuudelle asetetun 0,9 s ohjearvon. Tuloksista nähdään myös, että varhainen jälkikaiunta-aika *EDT* on merkittävästi lyhyempi pienillä taajuuksilla, mikä voidaan tulkita lämmön puutteeseen orkesterin soinnissa. Tilan voimakkuus on yli 10 dB ja kasvaa suurille taajuuksille, mikä viittaa siihen, että äänenvoimakkuus tilassa nousee helposti liian suureksi. Selvyys C_{80} korreloi selvästi varhaisen jälkikaiunta-ajan kanssa, ollen poikkeuksellisen suuri pienillä taajuuksilla.

Korjausten jälkeen tehtyjen mittausten tuloksista nähdään, että korjaustoimenpiteillä onnistuttiin kasvattamaan jälkikaiunta-aikaa sekä varhaista jälkikaiunta-aikaa noin 0,2 sekuntia. *EDT* kasvoi 250 Hz oktaavikaistalla jopa 0,3 sekuntia, mutta parannus ei ole enää niin voimakas 125 Hz alueella.

TAULUKKO 1. Huoneakustiset parametrit salissa ennen korjauksia ja korjausten jälkeen.

Mitatut parametrit		Oktaavikaistat [Hz]					
		125	250	500	1000	2000	4000
T_{30} [s]	Ennen	0,9	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9
	Jälkeen	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9
EDT [s]	Ennen	0,6	0,7	0,8	0,8	0,9	0,8
	Jälkeen	0,7	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9
C_{80} [dB]	Ennen	7,5	6,1	5,8	4,9	4,1	4,8
	Jälkeen	5,7	3,0	3,4	3,5	3,3	4,1
G [dB]	Ennen	11,5	12,1	12,9	12,8	14,0	14,6
	Jälkeen	10,7	11,5	12,6	13,1	14,1	11,8
ST_{early} [dB]	Ennen	-10,6	-10,1	-8,4	-8,0	-6,0	-6,9
	Jälkeen	-10,3	-8,6	-8,1	-8,2	-6,9	-6,5
ST_{late} [dB]	Ennen	-16,7	-15,8	-14,7	-13,3	-10,6	-12,3
	Jälkeen	-15,1	-12,7	-12,3	-12,0	-10,9	-11,2



KUVA 3. Mittaustulokset ennen korjauksia (katkoviiva) ja korjausten jälkeen (punainen viiva).

Lavaparametrit ST_{early} ja ST_{late}. ovat molemmat heikompia pienillä taajuuksilla, vahvistaen muiden mittalukujen kanssa sen, että sali vahvistaa ääntä heikosti pienillä taajuuksilla. Korjauksen yhteydessä varhainen tuki ei muuttunut merkittävästi, mutta myöhäinen tuki parani erityisesti 125–500 Hz taajuusalueella.

4.3 Kysely

Muusikoille jaetun kyselyn tulokset on esitetty taulukossa 2. Orkesterin 38 muusikosta vain 16 palautti kyselyn, joten vastausprosentti oli ainoastaan 42 %. Tällöin on mahdollista, että tulokset ovat vääristyneet.

Kysely osoittaa, että yleisesti ottaen muusikot kokevat harjoitussalin ominaisuuksien parantuneen. Orkesteri kokee, että puhallin- ja lyömäsoittimet kuuluvat tilassa paremmin. Osa muusikoista myös kommentoi, että nämä soittimet kuuluvat liian voimakkaasti. Tuloksista nähdään myös, että tilan jälkikaiunta-ajan pidennys havaittiin myös subjektiivisesti.

Kyselyn lisäksi korjauksen jälkeen haastateltiin orkesterin valtuuskuntaa, jossa jäseninä on muusikoita puupuhallin- ja jousisektioista. Haastattelussa palaute oli paljon positiivisempaa. Valtuuskunta mainitsi, että korjauksen seurauksena keskinäinen kuuluvuus, omien soitinryhmän kuuluvuus ja äänten eroteltavuus ovat parantuneet. Jousisoittajien ei uudessa tilassa tarvinnut enää ”prässätä” (soittaa voimakkaasti) ja tilan sointi oli yleisesti parantunut. Orkesterin valtuuskunnan mielipide oli, että tilassa on yleisesti parempi työskennellä kuin ennen korjausta.

TAULUKKO 2. Kyselyn vastausten keskiarvot (korjauksen jälkeen).

Kysymys	**Asteikko (1-5)**	**Keskiarvo**
Kuinka hyvin kuulet oman soittosi?	heikommin - paremmin	3,6
Kuinka hyvin kuulet oman soitinryhmäsi?	heikommin - paremmin	3,1
Kuinka hyvin kuulet I-viulut?	heikommin - paremmin	3,6
Kuinka hyvin kuulet II-viulut?	heikommin - paremmin	3,1
Kuinka hyvin kuulet alttoviulut?	heikommin - paremmin	3,3
Kuinka hyvin kuulet sellot ja bassot?	heikommin - paremmin	3,6
Kuinka hyvin kuulet puupuhaltimet?	heikommin - paremmin	3,7
Kuinka hyvin kuulet vaskipuhaltimet?	heikommin - paremmin	3,9
Kuinka hyvin kuulet lyömäsoittimet?	heikommin - paremmin	3,7
Yhteissoitto tilassa on	vaikeampaa - helpompaa	3,5
Yleisvirityksen kuunteleminen tilassa on	vaikeampaa - helpompaa	3,5
Sävyjen ja nyanssien tekeminen tilassa on	vaikeampaa - helpompaa	3,4
Kuinka suurella voimakkuudella joudut soittamaan?	kovempaa – hiljempaa	3,1
Tilan sointi on	kuivempi – eloisampi	3,7
Tilan akustiikka yleisesti on	huonompi - parempi	3,6

5 YHTEENVETO

Jyväskylä Sinfonian harjoitustila koettiin ongelmalliseksi soinnin puutteen ja liiallisen äänenvoimakkuuden suhteen, mistä johtuen salissa suoritettiin akustisia mittauksia ja tehtiin korjaussuunnittelua. Mittaukset vahvistivat, että koetut puutteet johtuivat liian vähäisestä kaiunnasta (T_{30}, *EDT*) ja liian suuresta voimakkuudesta *(G*). Voimakkuus ja myöhäinen tuki oli heikompaa pienillä taajuuksilla, jolloin salin tuottamasta soinnista puuttui lämpöä.

Mallinnuksen avulla tilaan suunniteltiin ja toteutettiin korjaustoimenpiteitä. Salin tilavuutta lisättiin purkamalla yksi seinistä, levyseiniin lisättiin levykerroksia parantamaan kaiuntaa pienillä taajuuksilla ja tilaan lisättiin diffuusoripintoja. Esitetyillä toimenpiteillä salin jälkikaiuntaa onnistuttiin pidentämään n. 0,2 sekunnilla kasvattamatta salin voimakkuutta. Salin myöhäinen tuki myös parani pienillä taajuuksilla, korjaten hieman salin soinnin diskanttipainotteisuutta.

Muusikoille tehtiin kysely ja haastattelu korjausten jälkeen. Kyselyn tulokset olivat vaihtelevia, mutta ne osoittivat, että salin jälkikaiunta-ajan pidennys oli subjektiivisesti havaittavissa. Soittajien kanssa tehdyn haastattelun perusteella korjauksesta saatiin positiivista palautetta ja orkesteri koki, että korjauksilla oli positiivinen vaikutus salissa työskentelyyn.

VIITTEET

[1] SFS-EN ISO 3382-1. 2009. Acoustics - Measurement of room acoustic parameters - Part 1: Performance spaces. Helsinki, Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

[2] NS 8178. 2014. Acoustic criteria for rooms and spaces for music rehearsal and performance. Lysaker, Standard Norge.

[3] H. Arau-Puchades. 2012. The refurbishment of Tonhalle St. Gallen. Building Acoustics. Vol. 19(3), p. 185-204.

[4] U. Berardi, H. Arau-Puchades. 2013. Increasing reverberation time with diffusers: a new acoustic design for more sustainable halls. International Symposium on Room Acoustics. Toronto, June 9–11.

OPERA HALL ORCHESTRA PIT ACOUSTIC

Henrik Möller[1], **Jukka Pätynen** [1], **Petri Lehto** [1]

[1] Akukon Oy
Hiomotie 19
00380 HELSINKI
henrik.moller@akukon.com

Abstract

Within the last few years, we have used the "virtual orchestra" to measure acoustic conditions within the orchestra pit, and in particular, the connection between the pit and the parterre in two different opera orchestra pits, The Finnish National Opera and The Bolshoi Theater Historic stage in Moscow.

The paper will first of all describe the measurement system and setup, the actual measurements and discuss the results and the implications on design.

INTRODUCTION

The loudspeaker orchestra - a measurement system consisting of a large array of sources on stage was initially proposed in IOA Auditorium Acoustics in 2008[1].

In our case, that is for opera houses, the system offers a better method of investigating the acoustic connection between both the orchestra pit and the audience between the vocalist on stage and the audience as it uses a setup of semi-directional loudspeakers as compared to normal room acoustic investigations where an omni-directional loudspeaker is used.

The original measurement method and its refinements have been described in references [1] – [11] and the measurements in the Finnish National opera has previously been presented in [12].

Both the Finnish National Opera and the Bolshoi Opera was reported to have some acoustic challenges, regarding both the orchestra pit and stage, and more precisely the projection of sound from both pit and stage.

The “Virtual orchestra system” was used to get directional impulse responses from both these halls and based on the analysis of the direction impulse responses, improvement suggestions were presented.

© 2019 Henrik Möller, Jukka Pätynen, ja Petri Lehto. Tämä on avoimesti julkaistu teos, joka noudattaa Creative Commons NIMEÄ 4.0 Kansainvälinen –lisenssiä (CC BY 4.0). Teosta saa kopioida, levittää, näyttää ja esittää julkisesti ja siitä saa luoda johdannaisteoksia, kunhan tekijän nimi ja lähde mainitaan asianmukaisesti.

The challenge with the original Virtual Orchestra setup is, from a consultant point of view, the high number of loudspeakers. So, one of the challenges for the Bolshoi measurements was to reduce to total amount of loudspeakers and instead move the loudspeakers in the pit and on the stage. For the measurement a total of 4 small Genelec loudspeakers were used together with 2 medium size studio monitors, borrowed on site and one omnidirectional loudspeaker for direct reference to ISO 3382-1 parameters

2 THE FINNINSH NATIONAL OPERA

The Finnish National Opera is a horseshoe-type opera house opened in 1993. The medium-size theatre seats a combined audience of 1350 at the stalls and three tiers of balconies. The main stage has equally sized rectangular side and back wings, and a fly-tower. The floor plan and side section drawing are shown in Fig. 1. The orchestra pit accommodates a typical opera orchestra, and there is no overhang below the stage. A prominent feature of the side walls of the auditorium is that most of the overall surface consists of audience doors. They are angled so that they do not provide any natural early reflection patterns to the audience. Another feature of acoustic significance is that the balcony fronts are essentially smooth and tilted down towards the audience. This creates some focusing effects, which are mainly heard when the sound reinforcement system is used. Despite these observations, the acoustic conditions of the hall in general were found pleasing for the performers as well as audience since the inauguration, but also left room for improvements in the future.

A major renovation took place in 2007, when the stage mechanics and most of the audiovisual infrastructure were replaced. At the same time, the pit was enlarged to remove the pit overhang. Also, the sidewalls in front of the proscenium opening were altered. The intention of this modification was to enhance early reflections from the singer and provide better support for the orchestra. The general impression after the renovation was that the acoustics was improved, but the hall could still benefit from further improvements for some issues: missing clarity of the singers inside the auditorium; balancing the orchestra and singers; uneven sound and low brilliance of the strings inside the audience area; and, local sound focusing inside the audience area.

In 2015, the seats in the entire hall were scheduled to be replaced, and the orchestra shell was changed. This renovation also opened a possibility for further acoustical modifications, and it was decided to commission investigation of the acoustic conditions in order to suggest improvements for the opera house. The renovation of the seats required the conventional measurement reverberation time and other basic objective parameters in the opera house. For learning more on the room-acoustic features of the venue, we conducted spatial impulse response measurements with the loudspeaker orchestra. These measurements were studied by applying recently introduced analysis methods for evaluating the acoustics through spatiotemporal visualizations and planning the conceivable modifications based on those findings.

The measurements points are shown in Figure 1.

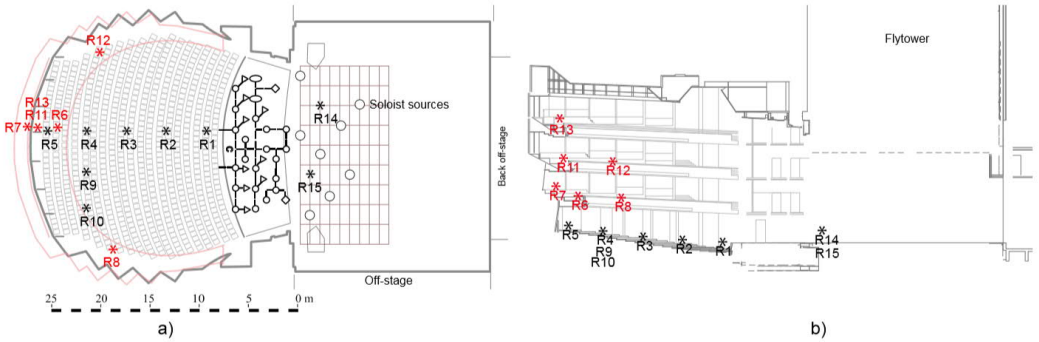


Figure 1: Measurement points in the Finnish National Opera

Measurement results

The visualizations show the accumulation of the spatial sound energy over time. Each of the outward expanding curve accumulate the directional energy from the initial direct sound to 5, 10, 20, 30 (bolded), 40 ms etc. up to 200 ms. The outermost red curve represents the spatial distribution of the entire impulse responses. Note that the curves are averaged over source positions included in each visualization. Detailed description of the visualization technique are presented in [5].

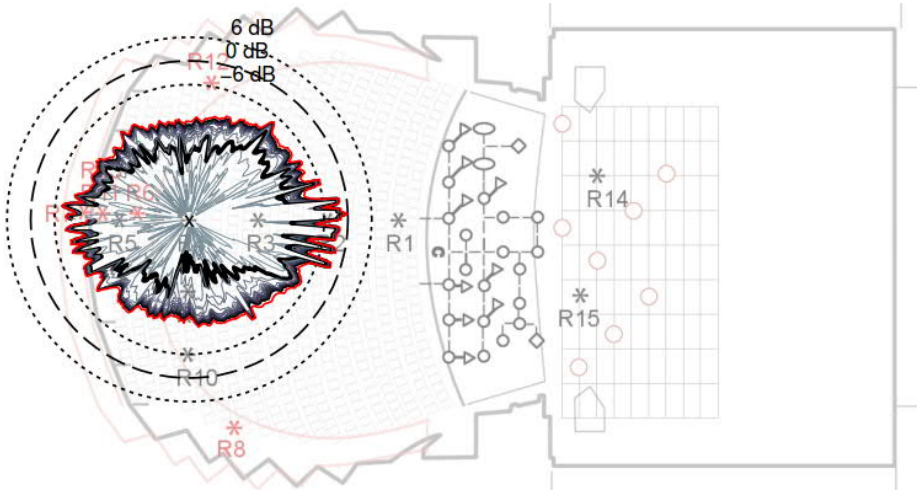


Figure 2: Reciever R4 X-Y direction, Stage sources only

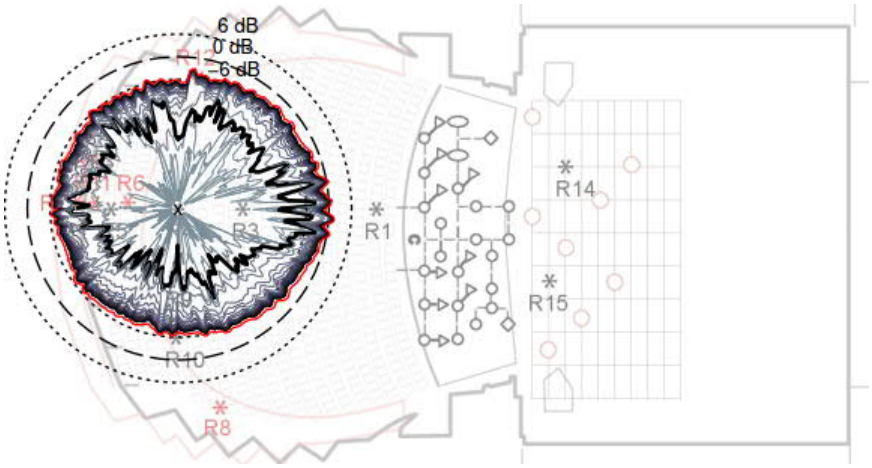


Figure 3: Receiver R4 X-Y direction, pit sources only.

As can be seen from Figs. 2 and 3, there is very little early lateral reflections (within the initial 30 ms; thick black curve) from the area around the proscenium. For the sources on the stage the few spikes outside the source positions suggests that the proscenium provides distinct reflections with only certain soloist positions. In the lateral plane (X-Y direction) from the pit we see that the example receiver position has a line-of-sight into only few source positions, and the unobstructed direct sound is shown as the strong spikes in the respective directions. Both for the stage sources and for pit sources there are quite strong reflections from the rear of the hall, which is expected due to the curved geometry.

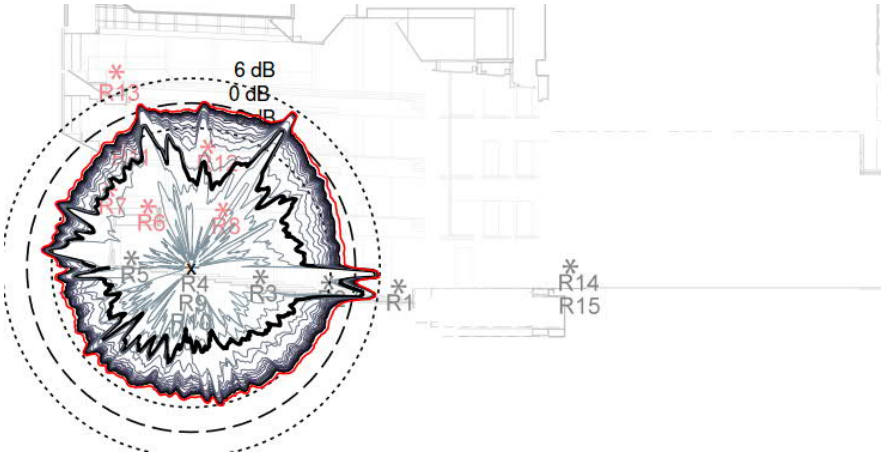


Figure 4: Receiver 4, X-Z direction, pit and stage sources

When inspecting the X-Z plane, it can be seen quite clearly that there is a very strong overhead reflection from the flat ceiling in front of the orchestra pit.

3 THE HISTORIC HALL OF THE BOLSHOI THEATER IN MOSCOW

The Historic Hall of the Bolshoi Theater is one of the most famous opera venues in the word. The original building for the Bolshoi Theatre was build opened in 1825 and has been reconstructed several times since then. The last major reconstruction was between 2005 and 2011. In this reconstruction, all technical systems in the building was renewed

but hall itself was essentially renovated, no geometric changes was made, except for some changes of the orchestra pit railing.

The problems reported are mainly concerning the sound on the parterre, in particular the front parterre. The orchestra is perceived as “not clear, detached, poor balance”. Also the soloists are not perceived clearly. It should however be clear that this concerns only the parterre. No such problems are reported from the balconies.

Measurement setup

As the equipment had to be flown to Moscow, it was necessary to narrow down the measurement setup, which led to using only 4 small directional loudspeakers, 2 mid-size studio monitors borrowed from the Bolshoi Theater and one omni-directional source for standardized measurements.

An ambisonic microphone, the CoreSound Tetra mic was used for spatial measurements and a DPA 4006 omni-directional microphone as extra references. The loudspeakers were placed in the pit (S1.1…S1.7) and on stage (S2.1…S2.3) as can be seen from Fig. 5.

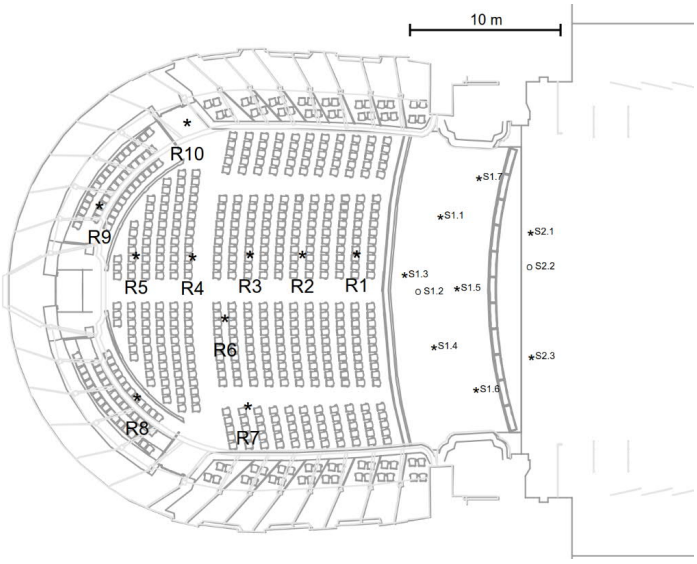


Figure 5: Source and reciever positions in the Historic Scene of the Bolshoi Theater

Evaluation of the measurements

The spatial room impulse responses pointed to some apparent problems with the projection between both the stage and the orchestra pit and the parterre. From the X-Y plane (lateral plane) shown in Fig. 6, it is clear that very little early lateral reflections reach the listener positions on the parterre. What is also clear is that the diffraction from the orchestra pit railing is very low in energy.

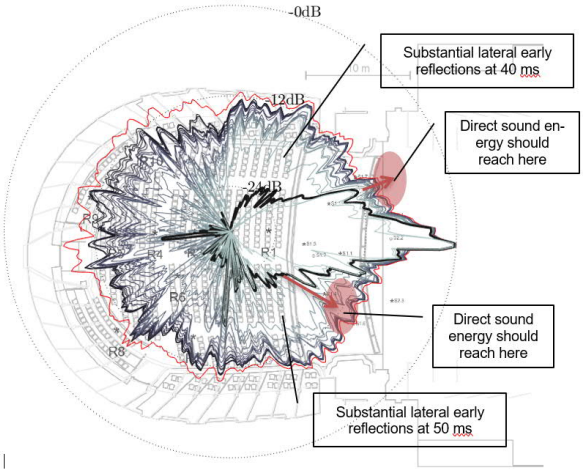


Figure 6: Example of measured spatial impulse response, X-Y axis: Receiver position R2; orchestra pit sources.

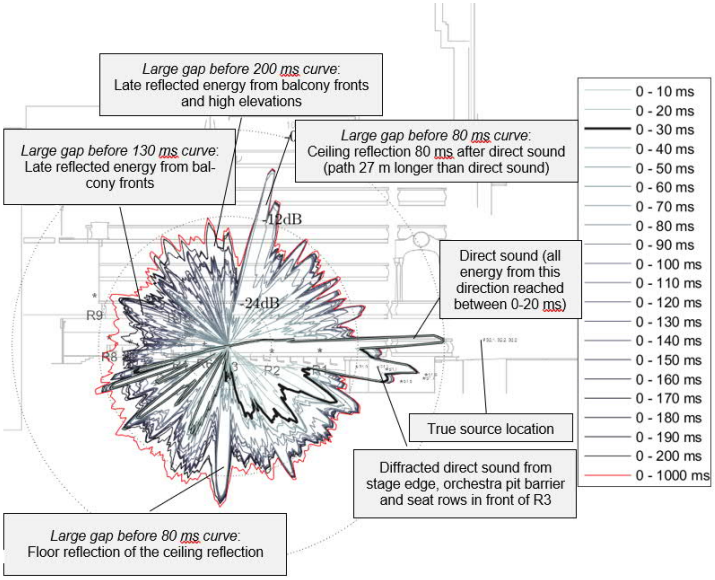


Figure 7: Example of measured spatial impulse response, X-Z axis: Receiver position R3, Source S2.2 (omni-directional source)

As can be seen from Fig. 7, there is a very strong ceiling reflection from some source positions. This can almost be heard as discrete reflections (in the empty hall between ceiling and floor)

4 DISCUSSION

The work shows, from a technical point of view, that it is possible to use a downscaled version of the virtual orchestra to investigate foremost reflection- and projection-related problems in opera houses. The directional speakers provide a possibility to simulate the natural directional characteristics of the orchestra and, to moderate extent, the singers on

stage, whereas the use of an omni directional source, makes it possible investigate pure geometric patterns in the hall.

The microphone used in the Bolshoi measurements is essentially a standard Ambisonic microphone, but our measurements show that the precision of the microphone is suitable for measuring spatial impulse responses that can be feasibly analyzed in 3-D.

REFERENCES

[1] J. Pätynen, S. Tervo, and T. Lokki. A loudspeaker orchestra for concert hall studies. In The Seventh Int. Conference On Auditorium Acoustics, pages 45-52, Oslo, Norway, Oct. 3-5 2008. Institute of Acoustics. Also published in Acoustics Bulletin 2009, 34(6), pp. 32-37.

[2] J. Pätynen. A virtual symphony orchestra for studies on concert hall acoustics. PhD thesis, Aalto University School of Science, November 2011.

[3] J. Pätynen, S. Tervo, and T. Lokki. Simulation of the violin section sound based on the analysis of orchestra performance. In IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics (WASPAA 2011), pages 173-176, Piscataway, NJ, Oct. 16-19 2011. IEEE.

[4] S. Tervo, J. Pätynen, A. Kuusinen, and T. Lokki. Spatial decomposition method for room impulse responses. J Audio Eng. Soc., 61(1/2):16-27, January/February 2013.

[5] J. Pätynen, S. Tervo, and T. Lokki. Analysis of concert hall acoustics via visualizations of time-frequency and spatiotemporal responses. J Acoust Soc Am, 133(2):842-857, 2013.

[6] T. Lokki. Tasting music like wine. Physics Today, 67(1):27-32, 2014.

[7] J. Pätynen, S. Tervo, P. W. Robinson, and T. Lokki. Concert halls with strong lateral reflections enhance musical dynamics. Proc Natl Acad Sci Am, 111(12):4409-4414, Mar. 2014.

[8] S. Tervo, P. Laukkanen, J. Pätynen, and T. Lokki. Preferences of critical listening environments among sound engineers. J Audio Eng. Soc., 62(5):300-314, 2014.

[9] J. Pätynen and T. Lokki. The acoustics of vineyard halls, is it so great after all? Acoustics Australia, (43):33-39, 2015.

[10] S. Tervo, J. Pätynen, and T. Lokki. Spatial analysis of concert hall impulse responses. In International Symposium on Room Acoustics (ISRA 2013), Toronto, Canada, June 9-11 2013.

[11] T. Lokki and J. Pätynen. Lateral reflections are favorable in concert halls due to binaural loudness. J Acoust Soc Am, 130(5):EL345-EL351, 2011. Vol. 37.

[12] H.Möller, J. Pätynen, S. Tervo, T. Lokki. Practical application and analysis of full orchestra spatial impulse reponses in an opera house, Auditorium Acoustics, Paris, 2015, Proceedings of the Institute of Acoustics, Vol. 37. Pt.3 2015

[13] T. Hidaka and L. Beranek. Objective and subjective evaluations of twenty-three opera houses in Europe, Japan, and the Americas. J Acoust Soc Am, 107(1):368-383, 2000.

[14] L. Beranek. Concert Halls and Opera Houses: Music, Acoustics, and Architecture. Springer, New York, NY, USA, 2004.

[15] M. Barron and L.-J. Lee. Energy relations in concert auditoriums. I. J Acoust Soc Am, 84(2):618-628, 1988.

TAMPEREEN PÄÄKIRJASTO METSON PERUSPARANNUS

Antti Mikkilä, Jesse Lietzén, Mikko Kylliäinen

A-Insinöörit
Puutarhakatu 10
33210 Tampere
etunimi.sukunimi@ains.fi

Tiivistelmä

Arkkitehdit Raili ja Reima Pietilä suunnittelivat Tampereen kaupungin pääkirjasto Metson, joka otettiin käyttöön vuonna 1986. Rakennuksessa on sen jälkeen tehty joitakin muutostöitä, mutta vuosina 2015–2017 toteutettiin vaiheittain laaja perusparannus. Sen yhteydessä tehtiin myös tilojen käyttötarkoituksen muutoksia, erityisesti kellarikerroksessa, jossa aiemmin toimi kaksi museota. Niiden siirryttyä muihin tiloihin kellarikerrokseen voitiin toteuttaa kokouskeskus. Sen erikoisuutena on pyöreä auditorio Lehmus. Auditorio on lähinnä puhesali, joka on tarkoitettu kirjaston omia yleisötilaisuuksia varten sekä vuokrattavaksi ulkopuolisille, kuten järjestöjen ja muiden tapahtumantuottajien käyttöön. Auditorion huoneakustisissa ratkaisuissa on hyödynnetty kellarikerroksen katon alkuperäistä kantavaa rakennetta, joka on teräsbetoninen arina. Lisäksi tilan pyöreä muoto on rikottu ääntä sirottavin pintarakentein. Perusparannushankkeen yhteydessä tehtiin akustiikkaa parantavia toimenpiteitä myös kirjaston musiikkiosaston tiloissa.

1 JOHDANTO

Tampereen kaupunki järjesti vuonna 1978 arkkitehtuurikilpailun uuden pääkirjastonsa suunnittelusta. Kilpailun voittivat seuraavana vuonna arkkitehdit Raili ja Reima Pietilä ehdotuksellaan ”Soidinkuvat”. Rakennus toteutettiin vuosina 1983–1986 [1–2]. Sittemmin rakennus on tullut tunnetuksi Metsona, sillä ilmasta katsottuna rakennus näyttää soitimella olevalta ukkometsolta. Kirjastossa veistoksellinen arkkitehtuuri ja rakenteelliset ratkaisut sulautuvat yhdeksi kokonaisuudeksi (kuva 1). Reima Pietilä on kertonut, että rakennuksen ensimmäiset luonnokset syntyivät neuvottelussa rakennesuunnittelijan kanssa [3]. Rakennushankkeessa rakennesuunnittelusta vastasi A-Insinöörit [1].

Rakennuksessa on valmistumisensa jälkeen tehty joitakin tilamuutoksia. Kellarikerroksessa toimi alkujaan luonnontieteellinen museo ja sittemmin Kivimuseo ja Muumimuseo. Kivimuseon siirryttyä museokeskus Vapriikkiin ja Muumimuseon laajennettuun Tampere-taloon [4] rakennuksessa toteutettiin vuosina 2015–2017 vaiheittain laaja perusparannus. Sen yhteydessä tehtiin myös tilojen käyttötarkoituksen muutoksia, erityisesti kellarikerroksessa, jonne toteutettiin uusi kokouskeskus. Perusparannushankkeen yhteydessä tehtiin akustiikkaa parantavia toimenpiteitä myös kirjaston musiikkiosaston tiloissa.

© 2019 Antti Mikkilä, Jesse Lietzén ja Mikko Kylliäinen. Tämä on avoimesti julkaistu teos, joka noudattaa Creative Commons NIMEÄ 4.0 Ei sovitettu –lisenssiä (CC BY 4.0). Teosta saa kopioida, levittää, näyttää ja esittää julkisesti ja siitä saa luoda johdannaisteoksia, kunhan tekijän nimi ja lähde mainitaan asianmukaisesti.

KUVA 1. Tampereen pääkirjasto Metso perusparannushankkeen valmistuttua. Kuvalähde: A-Insinöörien kuva-arkisto.

Pääkirjasto Metson perusparannushankkeessa pää- ja arkkitehtisuunnittelijana toimi Arkkitehtitoimisto Lasse Kosunen Oy. A-Insinöörit vastasi hankkeessa rakennesuunnittelusta ja akustiikkasuunnittelusta.

2 AKUSTIIKKASUUNNITTELU PERUSPARANNUSHANKKEESSA

2.1 Kokouskeskus

Perusparannushankkeen myötä Metson kokoustilojen määrä kaksinkertaistui. Uudessa kokouskeskuksessa on kahdeksan varattavaa kokoustilaa sekä lisäksi neljä vapaasti käytettävissä olevaa tilaa (kuva 1).

KUVA 2. Kokouskeskuksen aulatila, jonka katossa nähdään ääntä vaimentava rimakatto. Kuvalähde: A-Insinöörien kuva-arkisto.

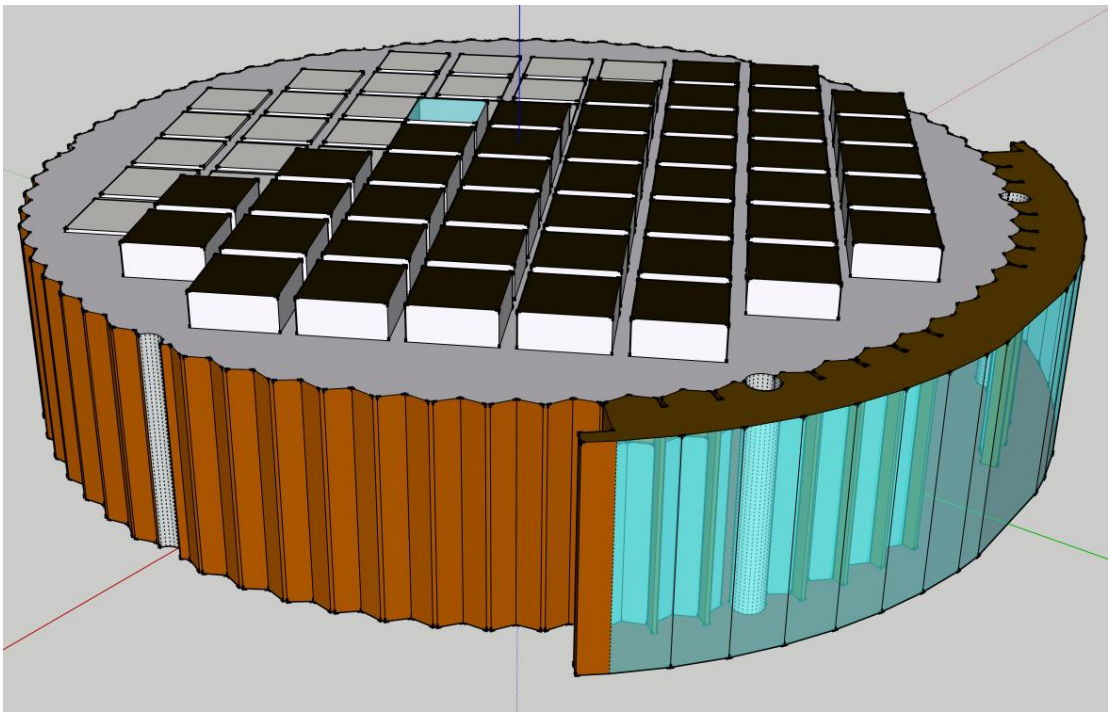
Kokouskeskuksen arkkitehtuuri ei toista Pietilöiden ratkaisua, mutta se on sovitettu rakennuksen henkeen. Kokoustiloissa on käytetty runsaasti puuta, ja huoneakustinen ratkaisu perustuu tiloissa erityisesti kattopintojen puurimoituksiin. Katot toimivat puoliheijastavina pintoina: rimavälien kautta ääni ajautuu vaimentavaan pintaan.

Kokoushuoneiden ilmaääneneristävyydelle asetettiin tavoitearvo ilmaääneneristyslukuna R'_w, jonka tuli olla vähintään 48 dB. Erityistä huomiota kiinnitettiin lasiseinien ja luentosalien välisten siirtoseinien ääneneristävyyteen. Jälkikaiunta-ajan tavoitearvoksi asetettiin 0,5...0,6 sekuntia poikkeuksena hiljainen tila, jossa jälkikaiunta-aika oli alle 0,5 s.

2.2 Pyöreä auditorio

Kokouskeskuksen erikoisuutena on pyöreä auditorio Lehmus. Auditorio on lähinnä puhesali, joka on tarkoitettu kirjaston omia yleisötilaisuuksia varten sekä vuokrattavaksi ulkopuolisille, kuten järjestöjen ja muiden tapahtumantuottajien käyttöön. Auditoriossa on 150 paikkaa.

Auditorion kohdalla oli alkujaan kantavana rakenteena teräsbetoninen arina, joka kantaa kirjaston pääaulaa. Arinan ympärillä oli ympyrän kehälle asetettuina kuusi kantavaa teräsbetonipilaria. Kokouskeskuksen auditorio päätettiin sijoittaa tälle kohtaa, jolloin arinaa voitiin hyödyntää osana tilan arkkitehtuuria. Samalla sitä voitiin käyttää myös akustiikkaratkaisun osana. Tilan takaosassa arinan ”kuppien” pohjalle on tehty absorboiva ruiskutus (kuva 3). Etuosassa auditoriota kuppeja on madallettu tekemällä lähelle arinapalkkien pintaa ääntä heijastavat levyrakenteet kuitenkin siten, että alkuperäiset arinan palkit ovat jääneet näkyviin (kuva 4).



KUVA 3. Huoneakustista tietokonemallinnusta varten tehty tilamalli. Vasemmalla nähdään arinaan salin etuosaan tehty heijastava pinta. Oikealla on kaksinkertainen lasiseinä. Kuvalähde: A-Insinöörien kuva-arkisto.

Kiertävien kaikuilmiöiden ja äänen keskittymisen välttämiseksi auditorion pyöreä muoto rikottiin ääntä sirottavin pintarakentein. Sahalaidan muotoisessa pinnassa on saliin suunniteltu puurimoitus (kuva 4), jonka rimavälien takana on tila rakennuksen teknisten järjestelmien asennuksille sekä ääntä absorboivalle mineraalivillakerrokselle. Sen takana on ääntä eristävä väliseinärakenne. Salin takaosassa on ikkuna, joka toteutettiin kaksinkertaisena siten, että sisempi lasitus noudattaa sahalaitakuviota, joka muualla auditoriossa on toteutettu rimoituksena. Tyhjän tilan jälkikaiunta-aika mitoitettiin 0,5…0,6 sekuntiin.

KUVA 4. Auditorio valmiina. Kuvalähde: A-Insinöörien kuva-arkisto.

Kirjaston sisääntulohallia kattava kupoli on kallistettu vastaamaan maan pyörimisakselin kaltevuutta [1]. Pietilät olivat alkujaan suunnitelleet, että kupolin korkeimmalla kohdalla olevasta valoaukosta lankeaisi päivänvalo koko rakennuksen läpi kellarikerrokseen asti. Avausta ensimmäisen ja kellarikerroksen välille ei kuitenkaan aikanaan toteutettu, nähtävästi kellarikerroksen museokäytön vuoksi. Perusparannushankkeen yhteydessä Pietilöiden ajatus ajatus valoaukosta voitiin toteuttaa, koska sillä ei ollut auditorion akustiikan kannalta vaikutusta (kuva 5).

KUVA 5. Sisääntulohallin kupolin valoaukoista tulviva valo muodostaa akselin kellarikerroksen auditorioon asti. Kuvalähde: A-Insinöörien kuva-arkisto.

2.3 Musiikkitilat

Kirjaston musiikkiosasto sijaitsee alkuperäisellä paikallaan rakennuksen parvikerroksessa. Rakennuksen valmistuessa asiakkaiden käyttöön tarkoitettuja kuuntelu- ja soittohuoneita oli musiikkiosastolla kolme. Vuosien myötä soittotilojen ääneneristystä ja huoneakustiikkaa oli jonkin verran korjailtu ja yksi tiloista oli muutettu toimistohuoneeksi. Tilat olivat kuitenkin säilyneet lähes alkuperäisessä asussaan.

Perusparannushankkeessa toimistohuone palautettiin alkuperäiseen käyttötarkoitukseensa ja tilan ääneneristys korjattiin vastaamaan muita soittotiloja. Seinärakenteisiin tehtiin muutoksia ja tilaan lisätiin kelluva lattiarakenne. Myös muiden soittotilojen rakenteiden liitokset sekä talotekniikan läpiviennit tarkastettiin ja tiivistettiin. Suuria näkyviä muutoksia soittotiloihin ei kuitenkaan tehty. Taidokkaat alkuperäiset ovi- ja sisäikkunarakenteet säilytettiin, mutta niiden ääneneristävyyttä parannettiin mm. tiivistyskorjauksin.

Entisen toimistotilan huoneakustiikka muutettiin vastaamaan uutta käyttötarkoitusta mm. lisäämällä ääntä eristäville seinille sirottavia pintarakenteita. Peruskorjaushankkeen yhteydellä tilojen alkuperäiset rakennusta varten suunnitellut siniset rei’itetyt Lautex-alumiinialakatot kunnostettiin. Katot purettiin, säleet puhdistettiin ja sisällä olevat äänenvaimennusmateriaalit uusittiin. Lopuksi kunnostettu alakatto asennettiin takaisin.

KUVA 6. Musiikkiosaston soittotilat. Kuvalähde: A-Insinöörien kuva-arkisto.

3 YHTEENVETO

Tampereen pääkirjasto Metso on arkkitehtuuriltaan ja rakenneratkaisuiltaan arvokas kohde. Peruskorjaushankkeessa rakennukseen pohjakerrokseen tehtiin merkittäviä tilamuutoksia, joissa vanhat museotilat muutettiin kokouskeskukseksi. Kokouskeskuksen erikoisuutena on pyöreä auditorio Lehmus, jonka huoneakustiikka mallinnettiin tietokoneella. Perusparannushankkeen yhteydessä tehtiin akustiikkaa parantavia toimenpiteitä myös kirjaston musiikkiosaston tiloissa.

VIITTEET

[1] Pietilä, R. & Pietilä, R. 1987. Tampereen pääkirjasto Metso. Arkkitehti. Nro 2, s. 24–31.

[2] Quantrill, M. 1987. Reima Pietilä. Helsinki, Kustannusosakeyhtiö Otava.

[3] Pietilä, R. 1987. Kolme projektia: kolme mahdollista suunnittelutapaa. Arkkitehti. Nro 2, s. 14–23.

[4] Rauhala, J., Kylliäinen, M., Lietzén, J., Valovirta, I., Takala, J. & Ruohonen, M. 2017. Tampere-talon laajennus ja tilamuutokset. Akustiikkapäivät 2017. Espoo, 24.–25.8., Akustinen Seura ry, s. 190–195.

KAARINA-TALON AKUSTISET RATKAISUT

Joose Takala[1], Mikko Kylliäinen[1], Timo Huhtala[1]

A-Insinöörit
Puutarhakatu 10
33210 Tampere
etunimi.sukunimi@ains.fi

Tiivistelmä

Vuonna 2018 käyttöön otettu Kaarina-talo on Kaarinan kaupungin keskeinen kulttuurirakennus. Siinä toimii kaupunginkirjasto. Lisäksi rakennuksessa on näyttelytiloja, kokoustiloja, musiikkihuone sekä 232-paikkainen Kaarina-sali, joka on suunniteltu monikäyttösaliksi. Käyttötarkoituksina ovat kamarimusiikki, kuorokonsertit, puhetilaisuudet, tanssi ja elokuva. Lisäksi tila toimii Kaarinan kaupunginvaltuuston kokoussalina. Käyttötarkoitusten laajan kirjon johdosta Kaarina-saliin on suunniteltu muunneltava akustiikka, joka perustuu seinille kupariverkon taakse laskeutuviin verhoihin. Kaarina-salin huoneakustiset ratkaisut suunniteltiin huoneakustisen mallinnuksen avulla. Lisäksi rakennuksen valmistuttua tehtiin huoneakustiset mittaukset standardisarjan ISO 3382 mukaisesti salin eri muuntelutilanteista.

1 JOHDANTO

Vuonna 2018 Kaarinan keskustaan valmistui uusi kulttuurirakennus nimeltään Kaarina-talo. Rakennuksen pääkäyttäjiä ovat Kaarinan kaupunginkirjasto, sekä Kaarinan kaupunginvaltuusto. Kaarina-talossa pääsisäänkäynnistä aukeaa kolme kerrosta korkea tila, johon on sijoitettu suurin osa kirjaston toimintoja lukusali ja hyllymetreittäin luettavaa. Kirjaston kahvio toimii myös samassa tilassa. Kahvion vieressä sijaitsee ovi Kaarina-saliin, joka on suunniteltu monikäyttöiseksi. Tilassa järjestetään kamarimusiikkiesityksiä, kuorokonsertteja, puhetilaisuuksia, elokuvia, ja kaupunginvaltuuston kokouksia. Toisessa kerroksessa on toimistotilaa ja kirjaston musiikkiharjoitteluhuone. Tätä huonetta voi vuokrata erilaisiin soittoharjoitteluihin ja se on suunniteltu hyvin ääntä eristäväksi ja äänimaailmaltaan miellyttäväksi. Kolmannessa kerroksessa on avotoimisto, hallinnon työtilat, sekä talotekniikan konehuoneet.

Kohteessa on monta toimijaa ja toimintoa saman katon alla, joten tilojen tuli akustiikkaan kiinnittää erityistä huomiota, jotta eri toiminnot eivät häiritsisi toisiaan. Akustiikkasuunnittelulla varmistettiin kirjastosalin ja musiikkiharjoitustilan häiriötön toiminta, musiikkiharjoitteluhuoneen ääneneristys ja huoneakustiikka sekä Kaarina-salin monen käyttötarkoituksen vaatima muunneltava huoneakustiikka. Kohde suunniteltiin täyttämään Suomen rakentamismääräyskokoelman osan C1 (1998) [1] akustiset vaatimukset. Suurimpaan osaan tiloista sovellettiin myös standardia SFS 5907:2004 [2] luokkaa C, jonka vaatimusten voidaan katsoa täyttävän RakMk C1 vaatimustaso.

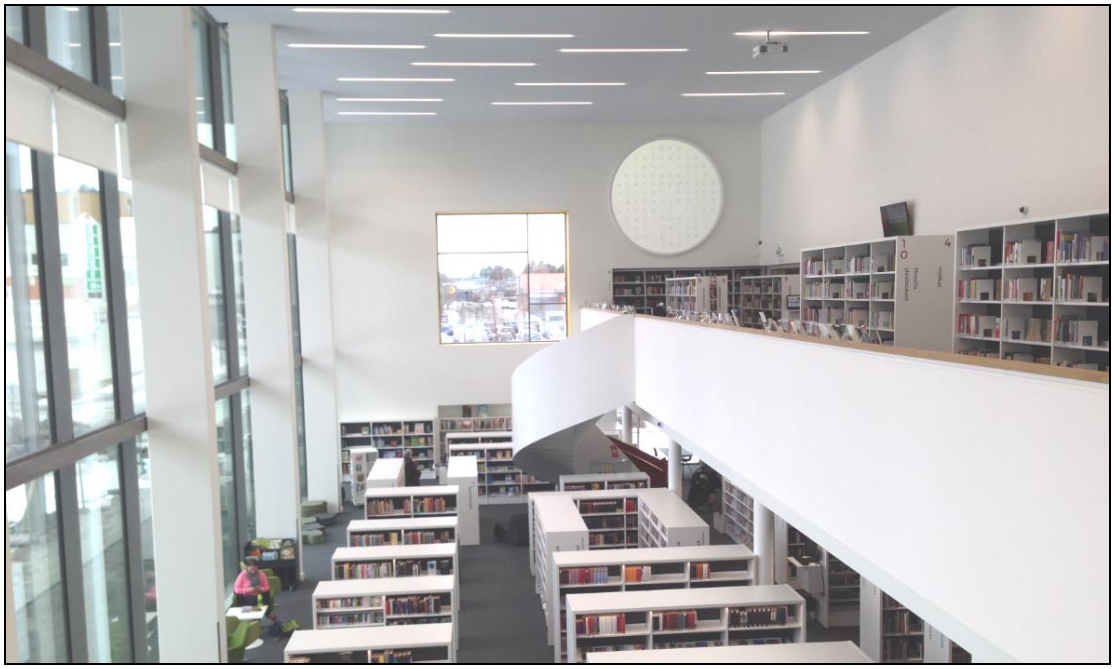
© 2019 Joose Takala, Mikko Kylliäinen ja Timo Huhtala. Tämä on avoimesti julkaistu teos, joka noudattaa Creative Commons NIMEÄ 4.0 Kansainvälinen – lisenssiä (CC BY 4.0). Teosta saa kopioida, levittää, näyttää ja esittää julkisesti ja siitä saa luoda johdannaisteoksia, kunhan tekijän nimi ja lähde mainitaan asianmukaisesti.

2 KOHTEEN SUUNNITTELU

2.1 Kirjasto

Kirjasto on suuri yhtenäinen tila, jonka jälkikaiunta-aika olisi helposti todella pitkä, ellei siihen kiinnitettäisi erityistä huomiota. Tila on noin 10 metriä korkea, ja sen tilavuus on noin 6300 m^3. Kulttuurirakennusten ulkonäkövaatimukset ovat merkittävästi tavanomaista rakennusta korkeammat, jolloin vaimennusmateriaalien ulkonäköön oli kiinnitettävä erityistä huomiota.

Tilan jälkikaiunta-ajan lyhentämiseksi päädyttiin pinnoittamaan suurin osa seinäpinnoista rei'itetyillä kipsilevyillä, joiden päälle asennettiin akustinen ruiskutasoite. Näin seinäpinnoista saatiin tasaiset ja ääntä vaimentavat. Kuvassa 1 on esitetty kirjaston suuri yhtenäinen tila ja akustisella ruiskutteella tehty ääntä vaimentava seinäpinta. Seinäpintojen vaimentaminen ei kuitenkaan ollut riittävä, vaan talotekniikan asennukset peittävän sälekaton päälle laitettiin lisäksi ääntä vaimentavaa pehmeää muovipohjaista vaimennuslevyä. Muissa tilan alakatoissa on käytetty ääntä vaimentavia puukuituakustiikkalevyjä, kuten 2., ja 3. kerroksen kulkusiltojen alapuolen alakatoissa.



Kuva 1. Kaarina-talon kirjaston 10 m korkea tila.

2.2 Musiikkiharjoitteluhuone

Kirjaston parvelle, toiseen kerrokseen, sijoitettiin myös harjoitteluhuone musiikkia varten. Tilassa voidaan soittaa erilaisia sähköisesti vahvistettuja, tai akustisia soittimia. Aivan tilan vieressä sijaitsee kirjasto, avotoimisto ja sen puhelinkoppi. Näin ollen musiikkiharjoitustilan ääneneristävyyden viereisiin tiloihin tuli olla erittäin hyvä. Yleiseksi ääneneristysvaatimukseksi asetettiin $R'_w \geq 57$ dB, ja aulan suuntaan, johon on ovet, 50 dB. Tilaan suunniteltiin kaksinkertaiset seinärakenteet, kelluva lattia sekä tärinäneristetty alakatto. Huoneen muoto suunniteltiin siten, että yksikään seinäpinta ei ole samansuuntainen

toisen seinän kanssa, jotta tilaan ei synny tärykaikua. Huoneakustiikka tilassa suunniteltiin verhoilla muunneltavaksi, jolloin tila palvelee niin akustisia kuin sähköisiä soittimia.

2.3 Kaarina-sali

Kaarina-salin (kuva 2) huoneakustiikkaan kiinnitettiin erityistä huomiota sen monien eri käyttötarkoitusten johdosta. Salin tuli toimia puhetilaisuuksista kamarimusiikkiesityksiin, toisinsanottuna salin oli määrä toimia kahdessa akustisessa ääripäässä ja niiden välillä.

Hankkeen alkuvaiheessa salin tilavuus ja mittasuhteet määriteltiin yhteistyössä arkkitehdin ja akustiikkasuunnittelijan kesken ottaen huomioon myös muut tilalle asetetut tavoitteet. Jo ensimmäisistä suunnitelmaluonnoksista lähtien salin muodoksi oli päätetty suorakaide, joka pysyi toteutussuunnitelmiin asti pitkälti samana. Salin lopullisiksi mitoiksi tuli 13,5 x 18 x 7 m (L x P x K), eli noin 1700 m^3. Paikkoja salissa on 232 hengelle, jolloin tilavuutta on henkilöä kohti noin 7 m^3.

Salin jälkikaiunta-aika suunniteltiin ensin kamarimusiikkitilannetta varten noin 1,5 sekuntiin salin ollessa täynnä yleisöä, minkä jälkeen saliin suunniteltiin muunneltava akustiikka. Salin jälkikaiunta-aikaa keski- ja suurilla taajuuksilla voidaan lyhentää joka seinälle laskeutuvilla verhoilla. Verhot ovat rullattuna ylhäällä, ja nappia painamalla ne saadaan laskettua eri tilanteita varten sopivaksi.

Salin kattopinnassa on pystysuunnassa harvaa akustisesti läpinäkyvää kupariverkkoa, jonka yläpuolella on puurakenteisia vinoja pintoja. Vinot pinnat on sijoitettu siten, että niistä ei muodostu tärykaikua esiintyjille, mutta ne parantavat takarivin kuuluvuutta. Salin viimeisimpiin taitoksiin on asennettu akustiikkamineraalivillaa jälkikaiunta-ajan tasoittamiseksi.

Kuva 2. Kaarina-sali näyttämöltä kuvattuna.

Salin sivuseinien kupariverkon takana on alaosassa taitettu kipsilevyseinä ja yläosassa sivuheijastuksen tuottavia hyllyjä kaksi kappaletta koko salin matkalla. Takaseinän alaosan liukuovien pinnat on puolestaan rimoitettu, ja yläosan seinä on useasta kohdasta taitettu. Näillä ratkaisuilla on pyritty minimoimaan takaseinästä tulevaa haitallista heijastus-

ta. Salin penkit ovat helposti siirreltäviä kovia metallirunkoisia vaneripenkkejä, minkä johdosta salin jälkikaiunta-aika muuttuu yleisön määrästä riippuen. Tätä voidaan tarvittaessa kompensoida muunneltavan akustiikan keinoin.

3 KAARINA-SALIN AKUSTIIKKA

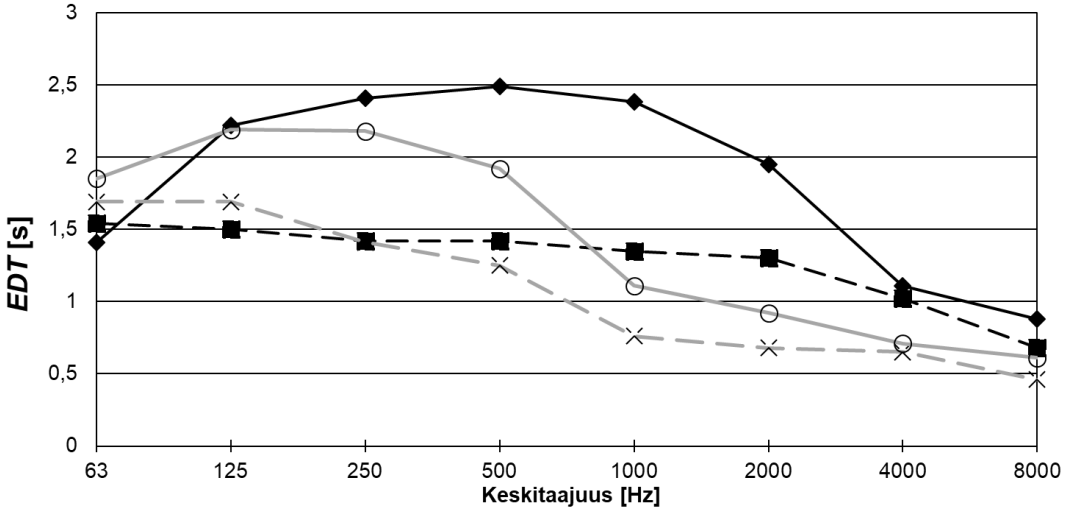
Tässä kappaleessa esitetään Kaarina-salista standardin ISO 3382-1 [3] mukaan mitattuja mittalukuja. Mittaukset tehtiin tyhjässä salissa 187 penkin ollessa paikoillaan kuvan 2 mukaisesti, sekä jokaisella seinällä olevat verhot alimmassa mahdollisessa asennossa. Takaseinän verhot näytetään laskettuna kuvassa 3.

Kuva 3. Kaarina-sali näyttämöltä kuvattuna, ääntä vaimentavat verhot laskettuna.

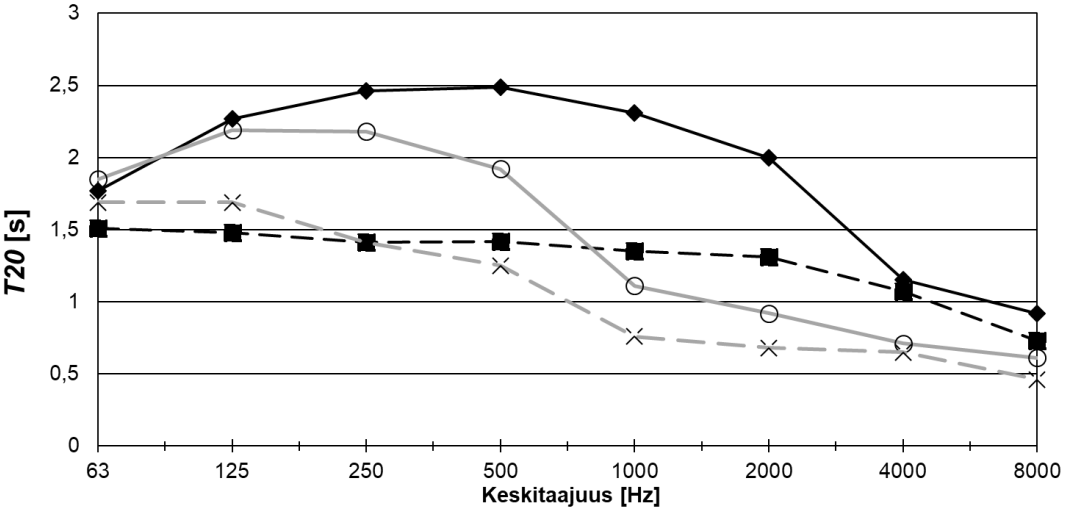
Kaarina-salin valmistumisen jälkeen huoneakustiset mittaukset suoritettiin tyhjässä salissa, joten salin huoneakustiset arvot olivat melko kaukana täydelle salille asetetuista tavoitearvoista. Mittauksia ei kuitenkaan voitu suorittaa yleisön kanssa käytännön syistä johtuen. Näin ollen suunnitteluvaiheessa luodun huoneakustisen mallin ja salin akustisten mittausten perusteella voitiin huoneakustinen malli kalibroida vastaamaan tarkasti tyhjän salin mittaustuloksia. Huoneakustisen mallin kalibroinnin jälkeen voitiin mallintaa tilanne, jossa sali on täynnä yleisöä. Kuvissa 5–7 on esitetty tyhjän salin mitatut huoneakustiset mittaluvut (EDT, T20, G), sekä yleisöä täynnä olevan salin mallinnetut huoneakustiset mittaluvut. Kuvissa esitettyjen viivojen ja merkkien selitteet on esitetty kuvassa 4.

Kuvista 5 ja 6 nähdään, että salin jälkikaiunta-aika tyhjänä verhot ylhäällä on yli 2 sekuntia ja verhot laskettuna alle 500 Hz taajuuksilla noin 2 sekuntia ja 1000 Hz ylöspäin 1 sekuntia. Mallinnettaessa yleisö mukaan, on jälkikaiunta-aika verhot ylhäällä noin 1,5 s, verhot alhaalla alle 500 Hz taajuuksilla noin 1,5 s, ja 2000 Hz ylöspäin noin 0,7 s. Varhainen jälkikaiunta-aika *EDT* ja jälkikaiunta-aika T_{20} antavat suunnilleen samat tulokset, joka kertoo tasaisesta jälkikaiunta-ajan lyhentymisestä. Kuvassa 7 esitetyt G -arvot vaihtelevat tyhjän salin 20… 10 dB ja täyden salin 14… 7 dB välillä.

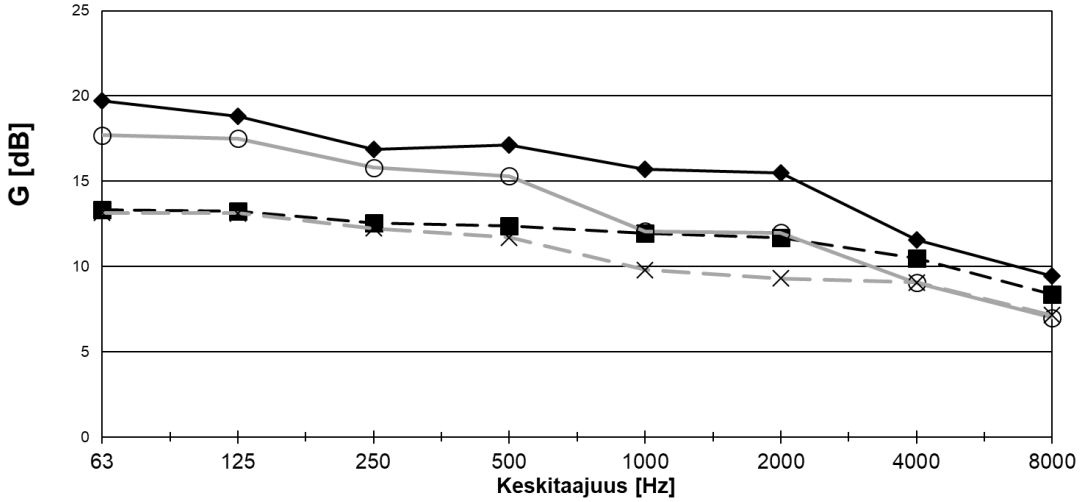
Kuva 4. Kuvien 6-8 viivojen selitteet.



Kuva 5. Kaarina-salin mitatut ja mallinnetut varhaisen jälkikaiunta-ajan EDT tulokset.



Kuva 6. Kaarina-salin mitatut ja mallinnetut jälkikaiunta-ajan T_{20} tulokset.



Kuva 7. Kaarina-salin mitatut ja mallinnetut G tulokset

4 YHTEENVETO

Vuonna 2018 käyttöön otetun Kaarina-talon akustiikkasuunnitteluun piti kiinnittää erityistä huomiota, sillä saman katon alla on useita erilaisia toimintoja, jotka tuli yhteensovittaa myös akustiikan näkökulmasta. Suurimmat akustiikkasuunnittelua vaatineet tilat olivat: kirjaston suuri lukusali, musiikkiharjoitustila sekä Kaarina-sali.

Kirjaston suuren lukusalin jälkikaiunta-aika suunniteltiin lyhyeksi erilaisin vaimennusmateriaalein, joista suurin osa toteutettiin rei'itettynä kipsilevynä, jonka päälle laitettiin akustinen ruiskute, jolla saatiin tasaista, kulttuurirakennukseen sopivaa, vaimentavaa pintaa. Musiikkiharjoitteluhuone toteutettiin kaksinkertaisilla seinä- ja kattorakenteilla, sekä kelluvalla lattiaratkaisulla. Musiikkiharjoitteluhuoneen huoneakustiikka suunniteltiin muunneltavaksi ääntä vaimentavien verhojen avulla.

Kaarina-salin huoneakustiikka suunniteltiin akustista mallintamista hyväksi käyttäen. Salin huoneakustiikasta suunniteltiin muunneltava verhojen avulla, jolloin jälkikaiunta-aikaa saatiin konserttitilanteen 1,5 sekuntista laskettua puhetaajuuksilla alle 1,0 sekuntiin. Salissa tehtyjen akustisten mittausten perusteella mallinnettu ja toteutunut akustiikka vastaavat hyvin toisiaan.

VIITTEET

[1] Suomen Rakentamismääräyskokoelma, osa C1 (1998). Ääneneristys ja meluntorjunta rakennuksessa, määräykset ja ohjeet

[2] SFS 5907:2004. Rakennusten akustinen luokitus, 2004. Helsinki, Suomen Standardoimisliitto SFS ry.

[3] SFS-EN ISO 3382-1. 2009. Acoustics – Measurement of room acoustic parameters – Part 1: Performance spaces. Helsinki, Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

AVOTOIMISTON HUONEAKUSTIIKKAMITTAUSTEN EPÄVARMUUS

Jukka Keränen[1], **Laura Labia**[2], **Valtteri Hongisto** [1]

[1] Turun ammattikorkeakoulu, Rakennettu ympäristö, akustiikka
Lemminkäisenkatu 14-18 B 20520 Turku, Finland

[2] Politecnico di Torino, Architecture Construction City, Italy

Tiivistelmä

Suomessa on useita toimijoita, jotka suorittavat huoneakustisia kenttämittauksia. Mittauksiin sisältyy yleensä standardin määrittämä epävarmuus. ISO 3382-2 ja ISO 3382-3 standardissa ei ole esitetty lukuarvoja mittausepävarmuudelle. Epävarmuuden määrittämiselle on tarvetta erityisesti Suomessa, koska Ympäristöministeriön ääniympäristöohjeessa on annettu ohjearvoja sekä jälkikaiunta-ajalle että puheensiirtoindeksille useille eri tiloille. Tämän tutkimuksen tavoitteena on määrittää epävarmuus em. standardeille avotoimistossa. Turun ammattikorkeakoulu järjesti keväällä 2019 avotoimiston huoneakustiikkamittausten vertailumittauksen. Testiin osallistui 9 mittaajaa. Mitattava kohde oli 12 työpisteen avotoimisto. Mittalukujen epävarmuudet olivat kohtuullisen pienet. Tuloksia voidaan hyödyntää ISO 3382-3 standardin revisiossa, joka on alkanut 2019.

1 JOHDANTO

Rakennusakustisia ja huoneakustisia mittauksia suorittavia toimijoita on Suomessa useita. ISO 3382-3 standardin [1] mukaista avotoimistojen huoneakustiikan mittausta tekeviä on kuitenkin vähemmän, koska standardi edellyttää puheensiirtoindeksin, STI, mittaamista, mihin kaikilla toimijoilla ei ole mahdollisuutta.
Yleensä standardin mukaisiin mittauksiin sisältyy standardissa määritelty epävarmuus, mutta ISO 3382-2 ja ISO 3382-3 standardeissa ei esitetä mittausepävarmuutta lukuarvoina [1, 2]. Tämän epävarmuuden määrittämiselle on tarvetta erityisesti, koska Ympäristöministeriön ääniympäristöohjeessa [3] on annettu sekä jälkikaiunta-ajan että puheensiirtoindeksin ohjearvoja useille eri tiloille. Tämän tutkimuksen tavoitteena oli määrittää epävarmuudet em. standardien mukaisille mittaustuloksille riittävän monta riippumatonta mittaajaa kattavan vertailumittauksen avulla.

2 MITTAUKSET

Turun ammattikorkeakoulu järjesti keväällä 2019 avotoimiston huoneakustiikkamittauksen vertailumittauksen (Round Robin test). Kutsutuista 12 toimijoista testiin osallistui 9 mittaajaa. Mitattava kohde oli 12 työpisteen avotoimisto, jonka mitat olivat 18,5 m x 5,9 m x 3,5 m (Kuva 1). Mittaukset tehtiin kahdessa tilanteessa: **Tilanne A** työpöydät alhaal-

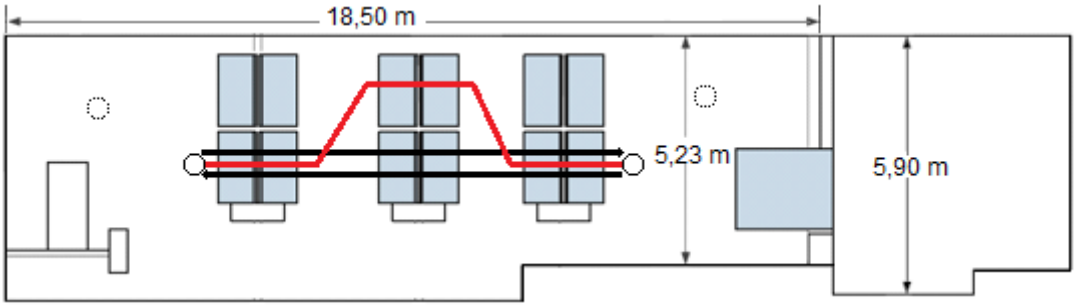
© 2019 Jukka Keränen, Laura Labia ja Valtteri Hongisto. Tämä on avoimesti julkaistu teos, joka noudattaa Creative Commons NIMEÄ 4.0 Ei sovitettu –lisenssiä (CC BY 4.0). Teosta saa kopioida, levittää, näyttää ja esittää julkisesti ja siitä saa luoda johdannaisteoksia, kunhan tekijän nimi ja lähde mainitaan asianmukaisesti.

la, sermien yläreuna 117 cm korkeudessa, ja **Tilanne B** työpöydät ylhäällä, sermien yläreuna 147 cm korkeudessa. Työpöytien oikeat korkeudet tarkastettiin järjestäjän toimesta.

Mittaajat tekivät itsenäisesti standardien edellyttämät määrittelyt ja mittaukset käyttäen omia laitteitaan. ISO 3382-3 mukaiset mittaukset tehtiin yhdellä mittauslinjalla molempiin suuntiin tilanteissa **A** ja **B**. Jälkikaiunta-ajat mitattiin ISO 3382-2 mukaan myös molemmissa tilanteissa **A** ja **B**. Mittaajat määrittivät standardien mukaiset mittaluvut: puheen leviämisvaimennusaste $D_{2,S}$, puheen äänenpainetaso 4 m etäisyydellä $L_{p,A,S,4m}$, häiritsevyysetäisyys r_D, taustaäänenpainetaso $L_{p,A,B}$ ja jälkikaiunta-aika T.

Puheensiirtoindeksin mittaaminen on välttämätöntä, jotta häiritsevyysetäisyyden voisi määrittää. ISO 3382-3 standardi [1] ei ohjeista yksiselitteisesti, mitä menetelmää tulisi käyttää. ISO 3382-3 viittaa IEC 60268-16 standardiin [4], mutta sen soveltaminen on ristiriitaista. Esimerkiksi käytettävät puheen spektrit ovat standardeissa [1,4] erilaiset ja ISO 3382-3 ei määrittele, käytetäänkö laskennassa miehen vai naisen puheen mukaisia painotuksia. Tästä tulkinnanvaraisuudesta johtuen menettelyt vaihtelivat hieman mittaajien kesken.

Mittaustulokset kirjattiin ennalta määritettyyn tiedostoon, joka lähetettiin sähköpostitse vertailutestin järjestäjälle. Vastaanotetut tulokset anonymisoitiin ennen niiden tarkastelua. Tulosten tarkastelussa käytetään mittaajista merkintöjä 1 – 9.

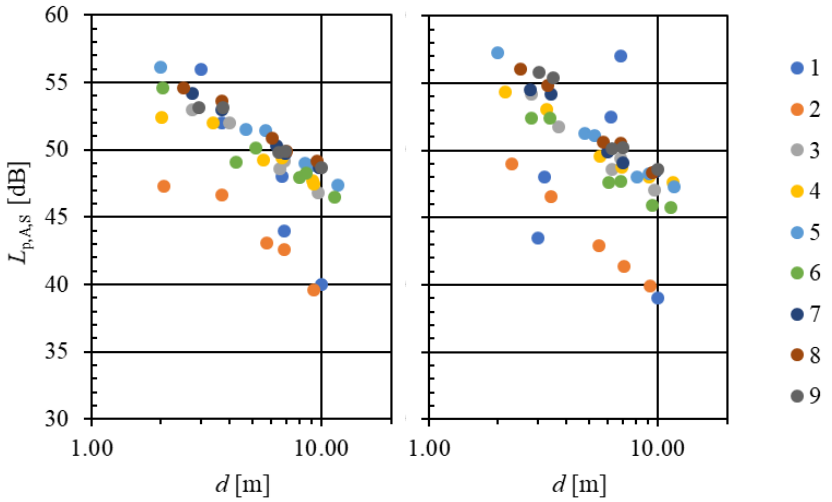


Kuva 1. Vertailumittauksen kohde oli 12 työpisteen avotoimisto. Mittaajien valitsemat mittauslinjat ja kaiutinpaikat (ympyrät). Linjan 1 suunta on kuvassa vasemmalta oikealle ja linjan 2 päinvastoin. Mittauspisteet olivat työpisteissä.

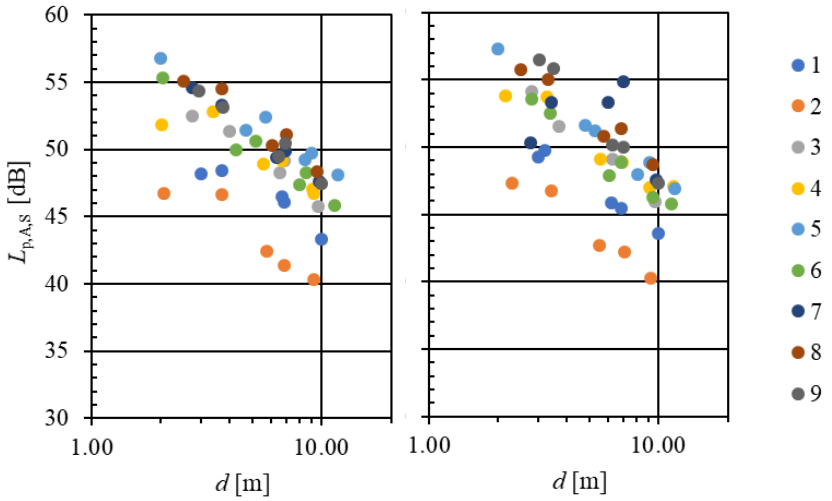
Mittaajat valitsivat mittauslinjat kuvassa 1 esitetyillä tavoilla. Kuusi mittaajaa sijoitti äänilähteen työpistelinjan päähän ja mittasi linjan muissa 5 työpisteissä (musta linja). Kaksi mittaajaa sijoitti äänilähteen kauemmas em. työpistelinjasta (ympyrät pisteviivalla) ja mittasi linjan kaikissa 6 työpisteessä (musta linja). Yksi mittaaja sijoitti äänilähteen työpistelinjan päässä olevaan työpisteeseen ja mittasi punaisen linjan 5 työpisteessä.

3 TULOKSET

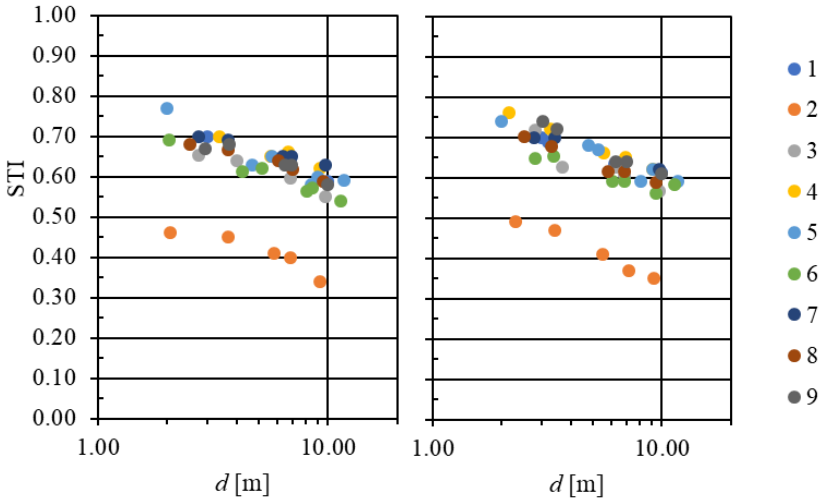
Kaikkien 9 mittaajan määrittämät puheen äänenpainetasot tilanteissa **A** ja **B** esitetään kuvissa 2 ja 3. Vastaavasti 9 mittaajan määrittämät puheensiirtoindeksit tilanteissa **A** ja **B** esitetään kuvissa 4 ja 5.



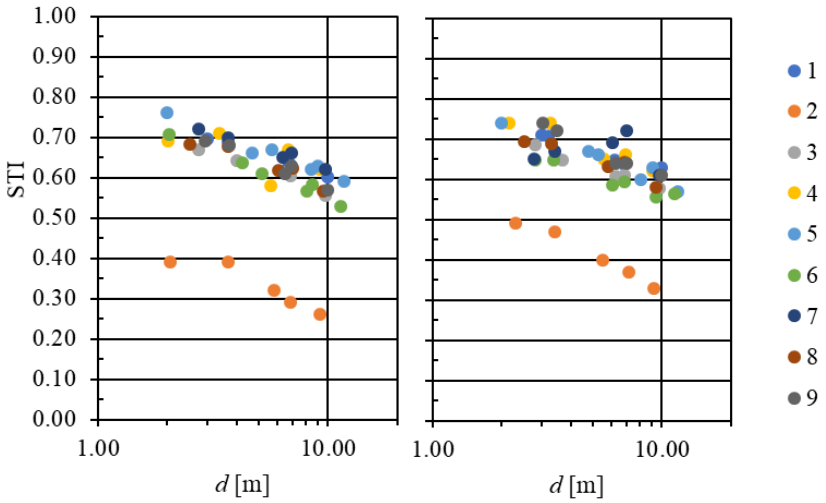
Kuva 2. Puheen äänenpainetaso mittauslinjoilla 1 ja 2 tilanteessa **A**.



Kuva 3. Puheen äänenpainetaso mittauslinjoilla 1 ja 2 tilanteessa **B**.



Kuva 4. Puheensiirtoindeksi mittauslinjoilla 1 ja 2 tilanteessa **A**.



Kuva 5. Puheensiirtoindeksi mittauslinjoilla 1 ja 2 tilanteessa **B**.

Mittaajien määrittämät ISO 3382-3 standardin mittaluvut tilanteissa **A** ja **B** esitetään taulukoissa 1 ja 2. Tilastollinen analyysi tehtiin ottaen huomioon seuraavat poistot:

- mittaaja 5 ei ollut määrittänyt mittalukuja tilanteessa **B**
- mittaajilla 1, 2 ja 7 jotkut havainnot ovat muista selvästi poikkeavia

ISO 3382-2 standardin mukaisten jälkikaiunta-aikamittausten tulokset saatiin 7 mittaajalta 9:stä (Taulukko 3).

Taulukko 1. Mittaajien määrittämät ISO 3382-3 standardin mittaluvut tilanteessa **A**.

Mittaaja	1	2	3	4	5	6	7	8	9	keskiarvo	keskihajonta
Linja 1											
$D_{2,S}$ [dB]	4.0		3.5	2.7	3.3	3.0	4.0	3.1	4.1	3.5	0.5
$L_{p,A,S,4m}$ [dB]	48.0		51.3	52.0	53.2	51.0	53.0	53.0	52.4	51.7	1.7
$L_{p,A,B}$ [dB]	32.2		37.2	38.2	37.8	38.2	37.7	38.6	38.0	37.2	2.1
r_D [m]			13.8		12.2	13.2	20.5	16.0	15.6	15.2	3.0
Linja 2											
$D_{2,S}$ [dB]			3.8	3.8	4.3	3.7	4.0	4.1	4.1	4.0	0.2
$L_{p,A,S,4m}$ [dB]			51.4	52.9	52.8	50.6	53.0	53.0	54.0	52.5	1.1
$L_{p,A,B}$ [dB]			36.8	38.2	37.8	37.8	37.7	38.5	37.8	37.8	0.5
r_D [m]			13.2		14.1	17.5	19.8	14.0	14.1	15.5	2.6

Taulukko 2. Mittaajien määrittämät ISO 3382-3 standardin mittaluvut tilanteessa **B**.

Mittaaja	1	2	3	4	5	6	7	8	9	keskiarvo	keskihajonta
Linja 1											
$D_{2,S}$ [dB]	4.0		3.6	2.5	3.3	3.6	4.0	3.6	4.0	3.6	0.5
$L_{p,A,S,4m}$ [dB]	48.0		50.9	51.9	53.2	51.3	53.0	54.0	52.9	51.9	1.9
$L_{p,A,B}$ [dB]	31.6		37.3	38.2	37.8	37.9	37.7	38.6	37.9	37.1	2.3
r_D [m]			13.4		15.3	11.9	18.0	13.5	13.5	14.3	2.1
Linja 2											
$D_{2,S}$ [dB]	3.7		4.2	3.5		4.0		3.7	4.1	3.9	0.3
$L_{p,A,S,4m}$ [dB]	48.5		51.2	52.4		51.0		53.0	54.7	51.8	2.1
$L_{p,A,B}$ [dB]	31.9		36.7	38.2		37.8		38.1	37.5	36.7	2.4
r_D [m]			14.4			15.7		14.6	14.1	14.7	0.7

Taulukko 3. Mittaajien määrittämät jälkikaiunta-ajat T oktaavikaistoilla 125 – 8000 Hz tilanteissa **A** ja **B**.

Tilanne A

Mittaaja	1	2	3	4	5	6	7	8	9	keskiarvo	keskihajonta
125	0.74	0.74	0.85	0.77		0.88	0.79	0.85		0.80	0.06
250	0.55	0.62	0.61	0.60		0.59	0.62	0.64		0.60	0.03
500	0.49	0.57	0.54	0.53		0.56	0.55	0.55		0.54	0.03
1000	0.52	0.56	0.54	0.52		0.54	0.58	0.56		0.55	0.02
2000	0.52	0.54	0.53	0.53		0.53	0.59	0.59		0.55	0.03
4000	0.44	0.46	0.51	0.50		0.47	0.55	0.56		0.50	0.05
8000	0.41	0.42	0.38	0.41		0.36	0.53	0.53		0.43	0.07

Tilanne B

Mittaaja	1	2	3	4	5	6	7	8	9	keskiarvo	keskihajonta
125	0.77	0.84	0.71	0.79		0.92	0.81	0.87		0.82	0.07
250	0.57	0.56	0.60	0.64		0.70	0.60	0.64		0.62	0.05
500	0.53	0.53	0.51	0.55		0.58	0.56	0.53		0.54	0.02
1000	0.52	0.55	0.54	0.56		0.60	0.57	0.56		0.56	0.02
2000	0.51	0.54	0.54	0.56		0.55	0.58	0.59		0.55	0.03
4000	0.42	0.46	0.50	0.50		0.48	0.52	0.54		0.49	0.04
8000	0.39	0.42	0.38	0.41		0.37	0.50	0.51		0.43	0.06

4 TULOSTEN TARKASTELU JA POHDINTA

Mittaluvun $D_{2,S}$ epävarmuus oli pieni. Tilanteissa **A** ja **B** mittaluvun $D_{2,S}$ -keskiarvot linjoilla 1 ja 2 olivat 3,5 – 4,0 dB. Keskihajonnat olivat ≤ 0,5 dB molemmissa tilanteissa.

Tilanteissa **A** ja **B** $L_{p,A,S,4m}$ -keskiarvot linjoilla 1 ja 2 olivat 51,7 – 52,5 dB. Keskihajonnat olivat 1,1 – 2,1 dB. Mittaluvun epävarmuus oli suurempi kuin mittaluvulla $D_{2,S}$.

Jälkikaiunta-ajan T keskihajonnat eri taajuuskaistoilla olivat 0,02 – 0,07 s tilanteissa **A** ja **B**. Jälkikaiunta-ajan epävarmuus oli siis yllättävän pieni.

Taustaäänenpainetason $L_{p,A,B}$ keskiarvot olivat 36,7 – 37,8 dB ja keskihajonnat 0,5 – 2,4 dB. Mitattujen $L_{p,A,B}$ -arvojen vaihteluväli oli kuitenkin suurempi 31,6 – 38,6 dB. Tämä vaikutti STI:n ja r_D :n epävarmuutta kasvattavasti. Osa taustaäänitason suuresta vaihtelusta voi johtua ilmanvaihdon äänitason vaihtelusta. Epävarmuus olisi ollut pienempi, jos tilassa olisi ollut tasainen 40 dB peittoääni tämän turhan virhelähteen minimoimiseksi. Peittoäänen käyttö olisi myös varmistanut, että r_D arvoa ei olisi tarvinnut ekstrapoloida.

Häiritsevyysetäisyyden r_D keskiarvot olivat 14,3 – 15,5 m ja keskihajonnat 0,7 – 3,0 m tilanteissa **A** ja **B**. Osasyy tähän oli se, että arvo jouduttiin ekstrapoloimaan (mittauslinjan pituus oli noin 12 metriä).

5 YHTEENVETO

Mittausepävarmuus voitiin määrittää standardien mukaisille mittaluvuille vertailumittauksen keskihajontojen perusteella. Kaikki mittaajat tekivät mittaukset samassa tilassa omilla laitteillaan, joten testi vastasi ISO 12999-1 standardin mukaista *in situ* tilannetta [5]. Tulosten perusteella voidaan ehdottaa ISO 3382-3 ja ISO 3382-2 standardien mittaluvuille keskihajontoihin perustuvat mittausepävarmuudet u taulukon 4 mukaisesti. Tulokset pätevät vain tälle avotoimistolle. Epävarmuus voi riippua jonkin verran kohteesta.

Taulukko 4. ISO 3382-3 ja ISO 3382-2 mittalukujen mittausepävarmuudet u.

	$D_{2,S}$ [dB]	$L_{p,A,S,4m}$ [dB]	$L_{p,A,B}$ [dB]	r_D [m]	T_{20} [s]
u	0.5	2.0	2.5	3.0	0.05

VIITTEET

[1] SFS-EN ISO 3382-3 (2012) Acoustics – Measurement of room acoustic parameters – Part 3: Open plan offices.

[2] SFS-EN ISO 3382-2 (2008) Acoustics – Measurement of room acoustic parameters – Part 2: Reverberation time in ordinary rooms.

[3] Saarinen A. (2018) Ääniympäristö. Ympäristöministeriön ohje rakennuksen ääniympäristöstä. Helsinki, ympäristöministeriö.

[4] IEC 60268-16 (2011) Sound system equipment – Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index.

[5] SFS-EN ISO 12999-1 (2014) Acoustics – Determination and application of measurement uncertainties in building acoustics – Part 1: Sound insulation.

ÄÄNIOLOSUHTEIDEN KUSTANNUSVAIKUTUKSET AVOTOIMISTOISSA

Joni Kemppainen[1], Mikko Kylliäinen [2], Henry Niemi [2], Antti Mikkilä [2]

[1] A-Insinöörit
Bertel Jungin aukio 9
02600 Espoo
joni.m.kemppainen@ains.fi

[2] A-Insinöörit
Puutarhakatu 10
33210 Tampere
etunimi.sukunimi@ains.fi

Tiivistelmä

Rakennusalan kustannustarkasteluissa otetaan huomioon rakennuskustannukset, käyttökustannukset ja elinkaarikustannukset. Käytön aikana syntyy myös kustannuksia, joita yleensä ei oteta huomioon, kuten epätarkoituksenmukaisesta akustiikasta seuraava työajan hukka avotoimistoissa. Tutkimuskirjallisuuden perusteella tunnetaan ratkaisut, joiden mukaan avotoimistot tulee suunnitella akustisesti ja toiminnallisesti. Tutkimuskirjallisuudessa on esitetty myös arvioita työajan hukasta. Tässä tutkimuksessa arvioitiin casetapauksena 170 työpisteen avotoimistoa, josta laadittiin akustisesti tarkoituksenmukainen sekä vähimmäisvaatimukset täyttävä suunnitelma, joiden rakennuskustannukset laskettiin. Avotoimiston huoneakustiset ominaisuudet määritettiin huoneakustisella tietokonemallinnuksella ja työajan hukasta aiheutuvat kustannukset tutkimuskirjallisuuden avulla. Tulokset osoittavat, että akustisesti tarkoituksenmukaisen avotoimiston rakennuskustannukset ovat kaksinkertaiset minimivaatimukset täyttävään nähden. Työajan hukka johtaa kuitenkin siihen, että alle vuodessa akustisesti tarkoituksenmukainen avotoimisto on jo minimivaatimukset täyttävää edullisempi. Viidessä vuodessa vähimmäisvaatimukset täyttävän avotoimiston aiheuttama kokonaiskustannuskertymä on 2,5-kertainen tarkoituksenmukaiseen verrattuna ja pelkästään työajan hukasta syntyvä kustannuskertymä kuusinkertainen.

1 JOHDANTO

Rakennusalan kustannustarkasteluissa otetaan huomioon rakennuskustannukset, käyttökustannukset ja nykyisin jossain määrin myös elinkaarikustannukset. Tilojen käytön aikana syntyy kuitenkin kustannuksia, joita yleensä ei oteta huomioon. Tällaisia ovat esimerkiksi akustisesti epätarkoituksenmukaisten tilojen aiheuttamat kustannukset terveysvaikutusten tai työajan hukan vuoksi.

© 2019 Joni Kemppainen, Mikko Kylliäinen, Henry Niemi ja Antti Mikkilä. Tämä on avoimesti julkaistu teos, joka noudattaa Creative Commons NIMEÄ 4.0 Ei sovitettu –lisenssiä (CC BY 4.0). Teosta saa kopioida, levittää, näyttää ja esittää julkisesti ja siitä saa luoda johdannaisteoksia, kunhan tekijän nimi ja lähde mainitaan asianmukaisesti.

Avotoimistojen akustiikkaa on tutkittu Suomessa ja kansainvälisesti varsin paljon. Tutkimuskirjallisuuden perusteella tunnetaan ratkaisut, joiden mukaan avotoimistot kannattaa suunnitella akustisesti ja toiminnallisesti. Tutkimuskirjallisuudessa on esitetty myös arvioita työajan hukasta silloin, kun avotoimiston akustiikka ei vastaa tarkoitustaan. Työajan hukka voidaan laskea puheenerotettavuuden ja puhesalien akustisen hyvyyden arvioimiseksi alkujaan kehitetyn puheensiirtoindeksin STI avulla. Puheensiirtoindeksiä voidaan käyttää myös puheen häiritsevyyden ja puheyksityisyyden arviointiin. [1–2]

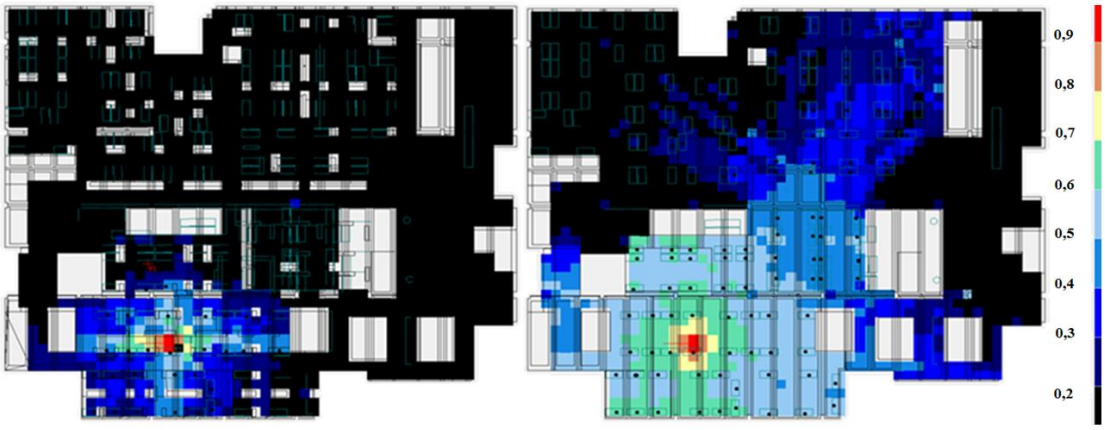
Tässä tutkimuksessa arvioitiin case-tapauksena 170 työpisteen avotoimistoa, josta laadittiin akustisesti tarkoituksenmukainen suunnitelma sekä vähimmäisvaatimukset täyttävä suunnitelma. Kummankin vaihtoehdon akustisista ratkaisuista syntyvistä rakennuskustannuksista laadittiin kustannusarvio ja tutkimuskirjallisuuden perusteella arvioitiin työajan hukasta syntyviä kustannuksia. Tutkimus on laajemmin selostettu lähteessä [3].

2 AINEISTO JA MENETELMÄT

2.1 Huoneakustinen tietokonemallinnus

Avotoimiston akustisia parametreja tutkittiin huoneakustisella tietokonemallinnuksella kaupallisella Odeon Auditorium 14 -ohjelmalla. Toimiston geometriasta laadittiin kolmiulotteinen tilamalli, joka vietiin huoneakustiikan mallinnusohjelmaan. Ohjelmassa mallin pinnoille määritettiin absorptio- ja sirontakertoimet.

Ohjelman laskeman impulssivasteen avulla määritettiin puheensiirtoindeksin STI arvo koko toimiston alalle laskentaverkossa. Tarkoituksena oli selvittää puheensiirtoindeksi jokaisen työpisteen kohdalla. Koska puheensiirtoindeksillä on yhteys puheen häiritsevyydestä syntyvään työajan hukkaan [4], sen avulla voidaan tarkastella koko toimiston alalla syntyvää työajan menetystä. Puheensiirtoindeksin STI arvosta eri puolilla toimistoa laadittiin neljä laskentaverkkoa (kuva 1) siten, että äänilähde oli avotoimistossa neljässä eri työpisteessä.



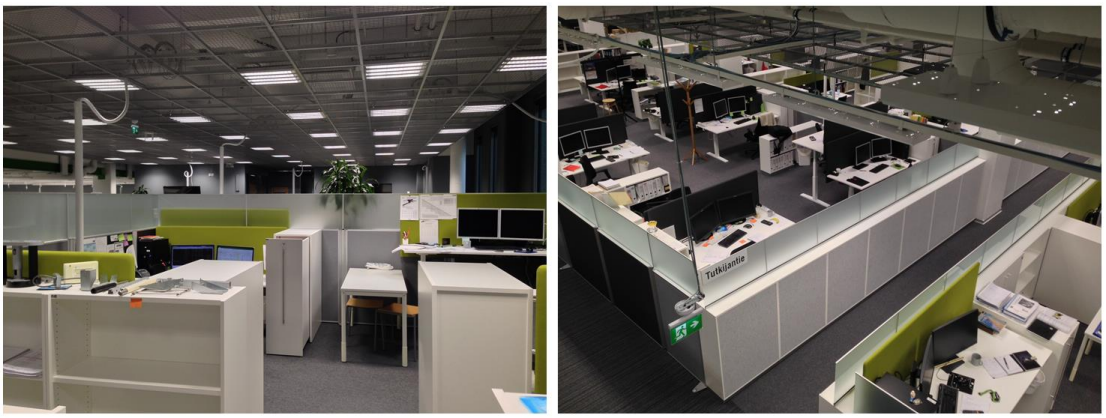
Kuva 1. Puheensiirtoindeksin STI leviäminen tarkoituksenmukaisessa (vasemmalla) ja vähimmäisvaatimukset täyttävässä (oikealla) avotoimistossa. Värejä vastaavat puheensiirtoindeksin arvot on esitetty oikealla laidassa. Äänilähde eli puhuja on punaisen alueen keskellä.

2.2 Rakennuskustannukset

Mallinnuksen avulla tutkittiin kahta eri vaihtoehtoa avotoimistolle. Avotoimisto 1 vastaa huoneakustiikaltaan tarkoituksenmukaisesti suunniteltua avotoimistoa (kuva 2). Tässä vaihtoehdossa työpisteet on eroteltu toisistaan kaapeilla ja seinäkkeillä. Toimiston katto on täynnä akustiikkamineraalivillaa ja lattia on peitetty tekstiilimatolla. Lisäksi tilaan on asennettu peittoäänijärjestelmä, jonka tuottama peittoäänitaso $L_{A,eq,B}$ on 42 dB [2].

Avotoimisto 2 on suunniteltu täyttämään jälkikaiunta-ajan osalta standardin SFS 5907 [5] toimistohuoneille asettaman vähimmäistason eli laatuluokituksen D vaatimukset. Taustaäänitaso $L_{A,eq,B}$ on 33 dB. Toimistossa ei työpöytien lisäksi ole muita kiintokalusteita. Katto on täynnä akustiikkamineraalivillaa ja lattiamateriaalina on käytetty muovimattoa.

Vaihtoehdoille 1 ja 2 on laskettu kalusteiden ja huoneakustisten pintojen materiaali- ja työkustannukset sekä peiteäänijärjestelmän kustannukset. Muut kuin akustisista ratkaisuista syntyvät kustannukset, kuten rakennuksen rungon ja teknisten järjestelmien kustannukset, oletetaan samoiksi molemmissa vaihtoehdoissa. Vaihtoehtojen rakennuskustannukset on määrittänyt A-Insinöörit Rakennuttaminen Oy:n kustannuslaskentayksikkö. Hinnat on laskettu ilman arvonlisäveroa (alv 0 %). Arvio peittoäänijärjestelmän kustannuksista saatiin Audico Systems Oy:lta.

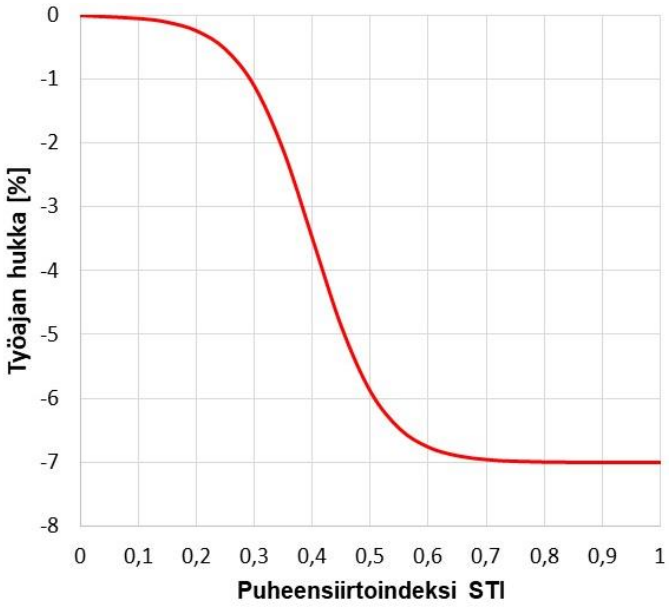


Kuva 2. Vaihtoehdon 1 (tarkoituksenmukainen huoneakustiikka) mukainen valmis avotoimistotila.

2.3 Työajan hukan kustannukset

Olettaen, että avotoimistossa on aina vähintään yksi puhuja jossain päin, STI:n perusteella voitiin laskea Hongiston mallin [4] mukaisesti työajan hukka ja edelleen siitä syntyvät kustannukset. Kuvassa 3 on esitetty puheensiirtoindeksin vaikutus työtehon alenemiseen Hongiston mukaisesti.

Työajan hukan kustannuksia laskettaessa on oletettu, että toimiston työajasta 90 % on laskutettavaa ja työtunnin hinta on 60 €/h (alv 0 %). Äänilähde sijoitettiin johonkin toimiston työpisteen kohdalle ja tämän perusteella on laskettu puheensiirtoindeksin arvon jakauma koko toimistossa. Tarkastelu tehtiin erikseen neljällä äänilähteen sijainnilla. Puheensiirtoindeksin lasketuista neljästä jakaumasta on laskettu keskiarvo, jonka perusteella on arvioitu työajan hukkaa vaihtoehdoissa 1 ja 2. Toisin sanoen on oletettu, että koko työpäivän ajan vähintään yksi työntekijä puhuu jossain päin toimistoa.



Kuva 3. Puheensiirtoindeksin vaikutus työajan hukkaan Hongiston mallin [4] perusteella.

3 TULOKSET

3.1 Rakennuskustannukset

Akustisten ratkaisujen materiaali- ja asennuskustannukset ovat vaihtoehdon 1 mukaisessa tarkoituksenmukaisesti suunnitellussa avotoimistossa 517 711 € ja vaihtoehdon 2 mukaisessa vähimmäistason mukaan suunnitellussa avotoimistossa 261 774 €. Kustannukset on laskettu ilman arvonlisäveroa (alv 0 %). Yksityiskohtainen kustannuslaskelma on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Akustisesti tarkoituksenmukaisen ja vähimmäisvaatimukset täyttävän avotoimiston rakennuskustannukset, joihin sisältyvät vain ääniolosuhteisiin liittyvät kustannukset.

Kustannuserä	Kustannukset	
	Toimisto 1 Tarkoituksenmukainen avotoimisto	Toimisto 2 Vähimmäisvaatimukset
Työpöydät	63 664 €	63 664 €
Seinäkkeet	58 474 €	–
Kaapit	93 000 €	–
Lattianpäällyste	93 960 €	68 904 €
Kattoabsorptio	78 540 €	78 540 €
Muut kustannukset	46 516 €	25 333 €
Kate	46 516 €	25 333 €
Peittoäänijärjestelmä	37 040 €	–
Yhteensä	**517 711 €**	**261 774 €**

3.2 Työajan hukan kustannukset

Taulukoissa 2 ja 3 on esitetty puheensiirtoindeksin STI eri vyöhykkeillä työskentelevien työntekijöiden määrät mallinnuksen perusteella. Taulukoissa on esitetty myös Hongiston mallin [4] mukaisesti määritetyn työajan hukan aiheuttama kustannusvaikutus vyöhykkeittäin.

Taulukko 2. Työajan hukasta aiheutuva kustannusmenetys tarkoituksenmukaisesti suunnitellussa avotoimistossa (vaihtoehto 1) yhden vuoden aikana.

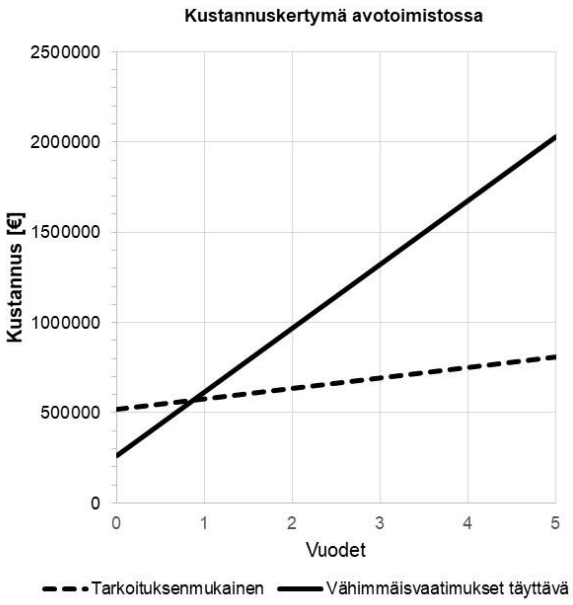
STI-vyöhyke	> 0,8	0,7-0,79	0,6-0,69	0,5-0,59	0,4-0,49	0,3-0,39	0,2-0,29
Työntekijöitä	1	1	1	4	5	9	9
Kustannusmenetys	1628 €	6477 €	4722 €	17825 €	17116 €	8805 €	2021 €
Kustannusmenetys yhteensä							**58595 €**

Taulukko 3. Työajan hukasta aiheutuva kustannusmenetys vähimmäisvaatimukset täyttävässä avotoimistossa (vaihtoehto 2) yhden vuoden aikana.

STI-vyöhyke	> 0,8	0,7-0,79	0,6-0,69	0,5-0,59	0,4-0,49	0,3-0,39	0,2-0,29
Työntekijöitä	1	4	14	20	31	27	19
Kustannusmenetys	1628 €	22669 €	86569 €	109692 €	100253 €	28228 €	4267 €
Kustannusmenetys yhteensä							**353306 €**

3.3 Kustannukset yhteensä

Kuvassa 4 on esitetty rakennuskustannuksista ja työajan hukasta muodostuva kustannuskertymä viiden vuoden aikana toimistossa 1 (tarkoituksenmukainen) ja toimistossa 2 (vähimmäisvaatimukset täyttävä). Ajanhetkellä 0 kustannukset sisältävät rakennuskustannukset, minkä jälkeen kustannuksia kertyy työajan hukasta.



Kuva 4. Akustisista olosuhteista 170 hengen avotoimistossa aiheutuva kustannuskertymä, johon sisältyvät rakennuskustannukset ja työajan hukasta syntyvät kustannukset.

4 TULOSTEN TARKASTELU

Mallinnuksen perusteella voidaan todeta, että avotoimiston suunnittelu vähimmäisvaatimusten mukaisesti altistaa suuren määrän työntekijöitä häiritsevälle puheelle, mikä kasvattaa kustannuskertymää viiden vuoden aikana. Akustisesti tarkoituksenmukaisesti suunnitellun avotoimiston materiaali- ja asennuskustannukset ovat noin kaksinkertaiset vähimmäistasoon verrattuna.

Työajan hukkaan perustuva kustannusmenetys on vähimmäisvaatimukset täyttävässä avotoimistossa kuusinkertainen tarkoituksenmukaiseen avotoimistoon verrattuna. Tulosten perusteella tarkoituksenmukaisesti suunniteltu avotoimisto maksaa itsensä takaisin jo vuoden kuluessa. Viiden vuoden käytön jälkeen vähimmäisvaatimukset täyttävä avotoimisto on tullut työajan hukan vuoksi tässä tapauksessa noin 1,2 miljoonaa euroa kalliimmaksi kuin tarkoituksenmukainen avotoimisto. Kustannuskertymän perusteella huomion kiinnittäminen avotoimistoiden akustiikkaan myös määräys- ja ohjetasolla [6] on ollut perusteltua.

5 YHTEENVETO

Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin case-tapauksena 170 työpisteen avotoimiston huoneakustisia olosuhteita ja niiden vaikutusta työajan hukkaan. Avotoimistosta laadittiin akustisesti tarkoituksenmukainen sekä vähimmäisvaatimukset täyttävä suunnitelma, joiden rakennuskustannukset laskettiin. Avotoimiston huoneakustiset ominaisuudet määritettiin huoneakustisella tietokonemallinnuksella ja työajan hukasta aiheutuvat kustannukset tutkimuskirjallisuuden avulla. Tulokset osoittavat, että akustisesti tarkoituksenmukaisen avotoimiston rakennuskustannukset ovat kaksinkertaiset vähimmäisvaatimukset täyttävään nähden. Työajan hukasta seuraavat kustannukset kuitenkin johtavat siihen, että alle vuodessa akustisesti tarkoituksenmukainen avotoimisto on jo minimivaatimukset täyttävää edullisempi. Viidessä vuodessa vähimmäisvaatimukset täyttävän avotoimiston aiheuttama kokonaiskustannuskertymä on työajan hukan vuoksi 2,5-kertainen tarkoituksenmukaiseen avotoimistoon verrattuna ja työajan hukasta aiheutuva kustannuskertymä kuusinkertainen.

VIITTEET

[1] SFS-EN ISO 3382-3-2012. Acoustics – Measurement of room acoustic parameters – Part 3: Open plan offices, Suomen Standardisoimisliitto SFS ry, Helsinki.

[2] Hongisto V, Kylliäinen M, RIL 243-3-2008 Rakennusten akustinen suunnittelu, toimistot, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, Helsinki, 2008

[3] Kemppainen J, Akustisten olosuhteiden kustannusvaikutukset, Diplomityö, Aaltoyliopisto, sähkötekniikan korkeakoulu, Espoo, 2017.

[4] Hongisto V, A model predicting the effect of speech of varying intelligibility on work performance, Indoor Air 15, 2005. 458–468.

[5] SFS 5907-2004 Rakennusten akustinen luokitus, Suomen Standardisoimisliitto SFS ry, Helsinki.

[6] Ääniympäristö – Ympäristöministeriön ohje rakennuksen ääniympäristöstä, ympäristöministeriö, Helsinki, 2018.

AKUSTIIKAN OSA-ALUEET JA LIIKETOIMINTA SUOMESSA

Rauno Pääkkönen [1]

[1]A-Insinöörit Oy
Puutarhakatu 10
33201 Tampere
Rauno.Paakkonen@ains.fi

Tiivistelmä

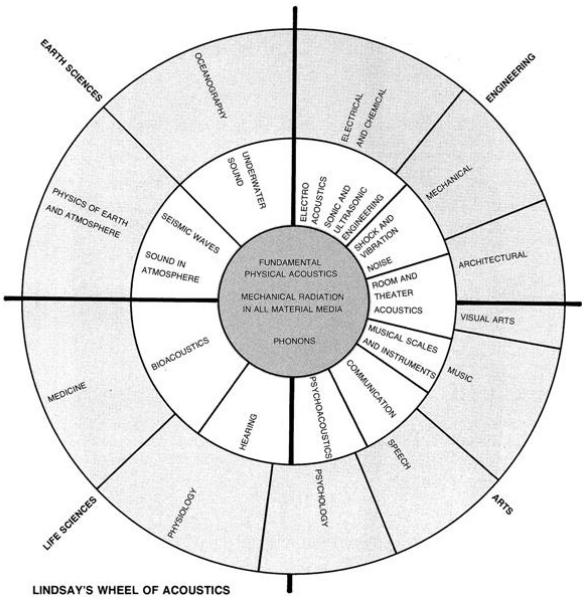
Akustiikkaan kuuluu tutkimus soittimista ja arkkitehtonisista tiloista, mutta se kattaa monia alueita kuten esimerkiksi meluntorjuntaa, sukellusvenenavigointia, lääketieteellisen kuvantamisen ultraääntä, lämpöakustista jäähdytystä, seismologiaa, bioakustiikkaa, ja sähköakustista viestintää. Fononien käsite liittää aaltohiukkasdualismiin kvanttimekaanisen hiukkasominaisuuksien ymmärryksen äänen painevaihtelujen synnystä ja etenemisestä väliaineissa. Akustiikan suunnittelu lienee suurin osa-alue akustiikassa (80 henkilöä ja 8 miljoonaa euroa), sitten työ- ja ympäristömelu (60 henkilöä ja 6 miljoonaa euroa), sähköakustiikka ja musiikkiakustiikka (40 henkilöä ja 4 miljoonaa euroa) ja loput mm. geoakustiikka, bioakustiikka ja merentutkimus (40 henkeä ja 3-4 miljoonaa euroa). Akustiikkaa lähellä olevien soveltavien alueiden liikevaihto on huimasti suurempaa, esimerkiksi kuulontutkimus ja akustiikkaa soveltavat materiaalit ja laitteet, mutta näistä on vaikea sanoa, mikä akustiikan osuus niissä on. Esityksessä tarkastellaan paitsi akustiikan osa-alueita, myös akustiikkaan liittyviä rajapintoja kuten audiologiaa sekä kuulon ja puheentutkimusta. Akustiikan suunnittelussa sekä työ- ja ympäristömelussa on päästy harrastelusta ammattimaiseen työskentelyyn. Esimerkiksi ääneen ja rakenteisiin liittyvät mallinnukset ovat arkipäivää ja äänen mittaustekniikka on kehittynyt huimasti. Myös terveydenhuoltoon ja viestintään liittyvät akustiikan asiat ovat kehittyneet paljon, erityisesti on tullut sellaisia apuvälineitä, joista ei voitu haaveillakaan esimerkiksi 1970-luvulla.

1 JOHDANTO

Akustiikka määritellään tieteenalaksi, joka käsittelee äänen tuotantoa, hallintaa, läpäisyä, havaitsemista ja vaikutuksia (Merriam-Webster sanakirja). Monet ihmiset luulevat, että akustiikka on vain musiikillista tai arkkitehtonista luonteeltaan. Akustiikkaan kuuluu tutkimus soittimista ja arkkitehtonisista tiloista, mutta se kattaa monia alueita kuten esimerkiksi meluntorjuntaa, sukellusvenenavigointia, lääketieteellisen kuvantamisen ultraääntä, lämpöakustista jäähdytystä, seismologiaa, bioakustiikkaa, ja sähköakustista viestintää. Ehkä yleisimmin akustiikkaa kuvataan "Lindsayn akustisella pyörällä", jonka julkaisi R. Bruce Lindsey artikkelissa J. Acoust. Soc. Am. V. 36, p. 2242 (1964) [4]. Tämä pyörä kuvaa akustiikan osa-alueet alkaen neljästä laajasta kentästä: maapallon tutkimus, insinööritoiminta, luonnontieteet ja taiteet. Amerikan akustinen seura, the Acoustical Society of America (ASA) koostuu 13 pääalueesta, joita kutsutaan teknisiksi komiteoiksi (TC):

© 2019 Rauno Pääkkönen. Tämä on avoimesti julkaistu teos, joka noudattaa Creative Commons NIMEÄ 4.0 Kansainvälinen –lisenssiä (CC BY 4.0). Teosta saa kopioida, levittää, näyttää ja esittää julkisesti ja siitä saa luoda johdannaisteoksia, kunhan tekijän nimi ja lähde mainitaan asianmukaisesti.

•Akustinen oseanografia (valtamerten tutkimus)(AO)
•Eläinten bioakustiikka (AB)
•Arkkitehtoninen akustiikka (AA)
•Biolääketieteellinen ultraääni/värähtelyn biovasteet (BB)
•Akustinen tekniikka (EA)
•Musiikkiakustiikka (MU)
•Melu (NS)
•Fysikaalinen akustiikka (PA)
•Psykologinen ja fysiologinen akustiikka (PP)
•Akustinen signaalinkäsittely (SP)
•Puheviestintä (SC)
•Rakenteellinen akustiikka ja tärinä (SA)
•Vedenalainen akustiikka (UW)



Kuva 1. Lindsayn akustiikan osa-alueita kuvaavat ympyrät [4]

Suomessa näitä jaotteluita ovat esittäneet kuvina Kari Pesonen ja Panu Maijala. Heidän esityksensä luultavasti perustuvat myös yllä olevaan Lindsayn ympyrään, mutta jokainen muovaa akustiikan maailmankuvaansa omista lähtökohdistaan eikä varmaan tässä suhteessa ole oikeita tai vääriä näkemyksiä.

Puhdas akustiikka fysiikan osana on ollut teoreettisesti koottuna jo yli sata vuotta. Ymmärretään mitä ääni on, sen leviäminen ja hallinta aika- ja taajuustasossa. Näkökulmaa on noussut jo Lindsayn ympyrässäkin mainituista fononeista, mitkä liittyvät parempaan ymmärrykseen äänen painevaihtelujen synnystä ja etenemisestä väliaineissa. Fononit ovat ryhmässä tapahtuva atomirakenteiden ja hilojen järjestelmällinen ja joustava järjestäytyminen kiinteässä aineessa ja nesteissä. Kaasut, kuten ilma, ovat järjestäytymättömiä samalla tavalla kuin kiinteät aineet ja nesteet, mutta paineaaltojen eteneminen muokkaa ilmamolekyylien rakenteen käyttäytymisen samankaltaiseksi kuin mitä tapahtuu kiinteissä aineissa ja nesteissä. Fononien käsite tuo aaltohiukkasdualismiin kvanttimekaanisen hiukkasominaisuuksien ymmärryksen, kun atomien hilat tai

molekyylit värähtelevät yhdellä taajuudella. Fononin käsitteen sanotaan ensimmäisen kerran esitetyn 1932, jolloin pitkäaaltoisten fononien kuvataan synnyttävän ääntä.

2 AKUSTIIKKAAN LIITTYVÄ LIIKETOIMINTA

Suomessa on ollut ja on suhteellisen vähän fysiikan perustutkimusta akustiikan näkökulmasta. Yleensä tutkimuksissa on kysymys akustiikan soveltamisesta erilaisilla tieteen alueilla, joita edellä olevassa Lindsayn ympyrässäkin esitetään. Jos edellä olevasta näkökulmasta siirtyy suomalaiseen soveltavaan akustiikkaan, voidaan esittää seuraavan kaltainen arvio (Taulukko 1). Arvio voi mennä pahastikin pieleen, mutta antaa kuitenkin käsitystä eri alueista. Näistä alueista voidaan kiistellä, ovatko ne akustiikkaa vai eivät. Joka tapauksessa ne soveltavat akustiikan tietämystä ja useimmiten ovat monitieteisiä.

Taulukko 1. Käytännön akustiikan osa-alueita ja liiketoiminnan arviointia Suomessa

Akustiikan osa-alueet ja henkilöresurssiarvio	arvio		
	henkilötyövuosia	liiketoimintaa	liiketoiminta €
1. Akustiikka			
Akustiikkasuunnittelu	80	Kyllä +++	8 milj
Ympäristömelu	50	Kyllä +++	5 milj
Musiikkiakustiikka	20	Kyllä osin ++	2 milj
Sähköakustiikka	20	Kyllä osin ++	2 milj
Geoakustiikka	15	Osin +	1,5 milj
Bioakustiikka	15	Kyllä osin ++	1,5 milj
Merentutkimus	10	osin +	1 milj
Työmelu	10	Kyllä +++	1 milj
2. Akustiikkaa tai audiologiaa soveltavia			
Kuulo ja kuuleminen*	1000	Kyllä +++	100 mij
Materiaaliliiketoiminta*	200	Kyllä +++	20 milj
yhteensä, noin	**1400**		**142 miljoonaa €**
*audiologit, audionomit, KNK-asiantuntijat			
neuvolat, terveyskeskukset, ym			
*materiaaliliiketoimintaan kuuluvat			
akustiset rakennemateriaalit, kuulonsuojaus			
ja kuulolaitteet, laitteiden tuotekehitys jne			

Puhtaan akustiikan osalta akustiikkasuunnittelu ja ympäristömelu ovat merkittävimmät osa-alueet, mutta akustiikan rajapinnassa kuuloon ja puheeseen liittyvä toiminta on ylivoimaisesti merkittävin osa-alue, sitten tulee materiaaliliiketoiminta. Pieniin osa-alueisiin kuuluvat sähköakustiikka, geoakustiikka, bioakustiikka, merentutkimus ja työmelu. Erilaisten arvioiden mukaan potilaspuolella on 700 - 800 000 ihmistä, joilla on huonontunut kuulokyky. Heitä varten tarvitaan audiologeja, kuulontutkijoita, korvalääkäreitä, ja muuta tutkimushenkilökuntaa. Samoin puheentutkimustyössä on aktiviteetteja yliopistosairaaloissa ja yliopistoissa toisaalta potilastyössä, mutta myös tutkimustoiminnassa.

Taulukko 2. Kuulon aleneman ja kommunikaatiohäiriön esiintyminen Suomessa (arvio) [6]

Yhteensä (10-12 %)	700.000 – 800.000
Työssä olevat	250.000
(Meluvamma edellä olevista)	50 000
Eläkkeellä olevat	500.000
Lapsikuurot	2.000
Aikuiskuurot	4.000
Esikoululapset	700
Koululaiset	2.000
Kuulolaitetta käyttävät	200.000
Kuulolaitteita/vuosi	20.000

3 AKUSTIIKAN TOIMIJOITA

Suomessa on myös yhdistyksiä ja toimijoita akustiikan alalla kuten Suomen audiologian yhdistys ry, Akustinen Seura ry ja Kuuloliitto ry. Suomen Audiologian yhdistyksessä ja Suomen Akustisessa seurassa on yhteensä noin 500 jäsentä. Kuuloliitossa on 37 työntekijää ja sen jäsenyhdistyksiin kuuluu yhteensä yli 16 000 jäsentä. Sitten ovat vielä Suomen Akustisen Ekologian Seura ry ja Suomen Ääniergonomian Seura ry.

Akustiikkaa opetetaan useimmiten muiden aineiden yhteydessä yliopistoissa, ammattikorkeakouluissa ja muissa oppilaitoksissa. Akustiikan professuureja on Aalto-yliopistossa ja kuulon tai puheen kautta lääketieteen puolella yliopistollisten sairaaloiden korvalääketieteessä. Ehkäpä merkittävämpi akustisten asioiden opetus tapahtuu soveltavien tieteiden alueella kuten lääketieteessä, fysiikassa ja tekniikassa. Suomessa akustiikka ei ole saanut merkittävää jalansijaa omana oppiaineenaan. Luonnontieteissä ja tekniikassa on kuitenkin usein akustiikan kursseja nimettyinä. Aalto-yliopistossa voi opiskella maisteriksi akustiikan alalta. Tampereen yliopistossa voi opiskella akustiikkaa sivuaineena. Opetus painottuu erityisesti rakennusakustiikkaan. Taideyliopistossa voi opiskella musiikkiteknologiaa ja äänisuunnittelua. Helsingin yliopistossa ja Itä-Suomen yliopistossa voi opiskella musiikkitiedettä, johon liittyy akustiikan kursseja.

Ministeriöt: Useimmilla ministeriöillä on kytkentöjä akustiikkaan tai meluun tai niiden soveltamiseen. Sosiaali- ja terveysministeriö hallinnoi työturvallisuuslainsäädäntöä ja asumisterveyttä, ympäristöministeriö valvoo maankäyttöä, maaperän pilaantumista, kaavoitusta, melulle altistuvia kohteita sekä rakentamista (rakennusakustiikka) [7-13]. Työ- ja elinkeinoministeriön toimivaltaan kuuluvat tuotteisiin, vientiin ja tuontiin liittyvät kysymykset, mm. melupäästökysymykset. Puolustusministeriön ja pääesikunnan osalta esiin nousee sotilaallisesta toiminnasta syntyvä melu. Sisäministeriön toimialaan kuuluu mm. poliisi- ja pelastustoimen melukysymyksiä. Opetusministeriön alueella selvitetään opettamiseen ja liikuntapaikkoihin liittyvää akustiikkaa ja puheentutkimusta. Valtiovarainministeriö ohjaa mm. akustiikan tutkimukseen liittyvää rahankäyttöä. Viranomaistasoon kuuluvat muun muassa aluehallintovirastot ja ELY-keskukset. Kuntien terveys- ja ympäristövalvontaan liittyy paljon äänikysymyksiä.

Akustiikkaan liittyvien asiantuntijalaitosten toimijoita tällä alueella ovat muun muassa Terveyden ja hyvinvoinnin laitos, Valvira, Tukes, SYKE, Työterveyslaitos ja VTT. Joillakin yliopistoilla on ääneen ja meluun liittyvää tutkimusta, mm. Aalto, Turun ja Itä-Suomen yliopistot, sekä Tampereen ja Lappeenrannan yliopistot. Ammattikorkeakoulut, mm. Metropolia, Mikkeli, Tampere ja Turku tekevät palvelua, tutkimusta ja kehitystyötä. Ympäristömelun ja rakennusakustiikan alueella toimii joitakin konsultteja ja insinööritoimistoja, mm. A-Insinöörit Oy, Akukon Oy, Promethor Oy, Helimäki Akustikot Oy, Ramboll Oy, Ax-suunnittelu Oy, Kari Pesonen Oy ja Vahanen Oy. Meluntorjunnan alalla toimii myös joitakin yrityksiä; OC-systems Oy, Paroc Oy, Isover Saint-Gobain Oy, Savox Communications Oy, Silenta Oy, Rakenne Ahlfors Oy. Materiaaleja akustiikkaan liittyen ovat mm. kuulokojeet, kuulonsuojaimet, tilojen akustiset materiaalit, äänitason mittauslaitteet ja niin edelleen. Alalla tunnettuja yrityksiä ovat mm. Ecophon Oy, Paroc Oy, MIP Electronics Oy, Siemens Oy, Nokia Oy ja Huawei Oy.

Akustiikan standardisointi jaetaan akustiikkaan, meluntorjuntaan, rakennusakustiikkaan, ympäristömeluun ja mekaaniseen värähtelyyn [2]. Vastaavasti myös muut (melun lisäksi) kuulovammoja aiheuttavat tekijät jakautuvat monen hallinnon kesken: Varhaislapsuuden korvatulehdukset kuuluvat STM:n ja sisäasiainministeriön hallinnon alaan. Terveet nuoruusiän tavat liittävät opetusministeriön ja puolustusministeriön mukaan. Samoin suunnittelijoiden koulutus on opetusministeriön toiminnan alaa. Ympäristömelu on pääsääntöisesti ympäristöministeriön työkentässä. Laitteiden ja kojeiden osalta myös työ- ja elinkeinoministeriö on mukana. Ympäristömelun vaikutukset (lisääntynyt kuolleisuus, taustamelun vaikutukset työssä) tulevat STM:n toimialaan.

Puheen akustiikasta tai puheakustiikasta (tai ASA:n luokituksessa puheviestinnästä) käytetään myös yleisempää nimitystä puheentutkimus. Se kattaa sekä kielellisiä ilmiöitä että ei-kielellisiä (prosodiikkaa) ja niiden tutkimusta. Suomessa on julkaistu vuonna 2001 ”Puheen tutkimuksen resurssit Suomessa”. Toimintaa on myös äänenkäytön ohjaus. Laulunopettajat ovat myös paitsi Sibelius Akatemiassa ja muissa oppilaitoksissa, myös yksityisissä firmoissa toimijoita, jotka ovat päivittäin tekemisissä puhe/lauluäänen akustiikan kanssa. Oppilaitokset myös myyvät omien työntekijöidensä (esim. logonomien) laatimia kursseja muillekin kuin ao. oppilaitoksessa opiskeleville. Vokologit toimivat samoin terveiden äänten harjaannuttamisen ja ongelmien ennalta ehkäisyn parissa kaupallisilla markkinoilla. Vokologiaa voi opiskella Tampereen yliopistossa.

Kuulokojesovitusten määrä voi olla jo yli 20 000/vuosi, koska väestö vanhenee. Sairaalat ostavat kuulokojeita ja kuulokojesovituspalveluita yksityisiltä firmoilta. Sisäkorvaistutteita maahan tuovia yrityksiä on tällä hetkellä neljä (Cochlear, MED-EL; Oticon, Advanced Bionics), ja Suomessa aikuisia istutteen saaneita on vähintäänkin noin yli 1000 (vuonna 2011 ja sitä ennen leikattujen aikuisten luku oli noin 700 ja vuonna 2015 vastaava luku oli 951) ja lapsia noin yli 400 (vuonna 2015 heitä oli noin 330, noin 20–30 uutta leikataan joka vuosi). Istutteet ovat kalliita, samoin hoito ja kuntoutus.

Kuulovammojen määrä 750 000 - 800 000 (Taulukko 2) on suuri. Lievimmissä tapauksissa ei vielä välttämättä tarvitse sovittaa kuulokojetta. Määrällisesti kuulonhuollon resurssien tarve on suuri myös sisäkorvaistutehoidossa ja synnynnäisesti kuulovikaisten lasten tutkimisessa ja kuntoutuksessa [3, 14-15]. Noin 300 000:n (6 % Suomessa asuvista) on arvioitu kuulonsa perusteella tarvitsevan kuulokojeen ja/tai muuta kuulon kuntoutusta. Kouluikäisiä kuulovammaisia lapsia on opetuspuolen tilastojen mukaan ilmoitettu perinteisesti olevan noin 2500 - 3000. Sanna Häklin väitöskirjaan sisältyvän

lasten kuulovikojen prevalenssityön perusteella (prevalenssi 1/1000 eli 60 000 syntyvää lasta kohden syntyy 60 vähintään keskivaikeasti kuulovikaista lasta per vuosi) [1]. Voisi haarukoida, että alle 18-vuotiaita kuulovammaisia lapsia ja nuoria on Suomessa noin 2500–3000.

4 POHDINTAA AKUSTIIKAN OSA-ALUEISTA JA LIIKETOIMINNASTA

Edellä mainittua näkemystä (Taulukko 1 ja kuva 1) voidaan hyvinkin kyseenalaistaa [5], koska on paljon mielipiteitä siitä, katsotaanko tätä asiaa akustiikasta käsin vai esimerkiksi terveydenhuollosta, rakentamisesta tai tekniikasta. Tällöin rajapinnat muuttuvat sameiksi. Varsinkin terveydenhuollon puheen ja kuulon sisällyttäminen akustiikkaan voi herättää kovinkin kriittisiä näkökulmia. Tärkeätä ei kuitenkaan ole se, miten rajapinnat kulkevat, vaan se, mitä hyötyä akustiikan osaamisesta on eri tahoille. Tieteiden väliset rajapinnat lienevät myös akustiikan osalta niitä, missä uusia löytöjä voi tulla. Siksi olisi hyödyllistä, jos akustiikan tieteiden välisiä rajoja voitaisiin ravistella.

Liitetoiminnan kehittäminen uusille alueilla voisi luoda Suomeenkin työtä ja tulevaisuutta. Tästä on esimerkkejä mm. terveydenhuollossa ja rakentamisessa. Akustiikan trendit ja tulevaisuus kiinnostaa ainakin akustiikan osalta aktiivisia asiantuntijoita. Yliopistomaailman myllerrysten perusteella on epätodennäköistä, että akustiikkaan liittyvää yliopisto-opettamista ratkaisevasti lisättäisiin. On todennäköisempää, että akustiikkaan liittyvät koulutukselliset resurssit pysyvät ennallaan tai hieman vähentyvät. Sen sijaan soveltavan akustiikan alueilla väestön vanhenemisen pitäisi lisätä kuulemiseen selvittelyihin liittyvää aktiviteettia.

Puheviestinnän merkitys nousee koko ajan niin ihmisten kuin laitetekniikan osalta ja kysymys kuuluu, tuleeko sille alueelle uusia innovaatioita esimerkiksi konepuheen tai robotiikan alueilta. Rakennusakustiikkaan ja rakentamiseen liittyvät aktiviteetit seurannevat yleisiä rakentamisen syklejä. Ilmastonmuutoskeskusteluissa ja ympäristönsuojelussa akustiikan osalta ei ole näkyvissä radikaaleja muutospaineita. Voisi ajatella, että maaperän, oseanografian, bioakustiikan ja seismologian alueilla voisi odottaa uusia löydöksiä, missä maapallon lämpenemistä ja jäätiköiden sulamista voisi tutkia värähtelyn keinoilla entistä paremmin.

Värähtelyjen osalta tärinään liittyvä akustiikka jää usein vähemmälle huomiolle. Tärinään liittyvä altistuminen työssä on jo lainsäädännön perusteella työnantajan selvittämisvelvollisuus, mutta esimerkiksi ympäristötärinän arviointi kaipaa säännöksiä. Ympäristötärinä on kehittyvä alue.

Oman kokemukseni (noin 40 vuotta akustiikkaa jotenkin seuranneena) voisin todeta, että akustiikkasuunnittelussa sekä työ- ja ympäristönsuojelussa on päästy harrastelusta ammattimaiseen työskentelyyn. Esimerkiksi melumallinnukset ja rakenteiden mallinnukset ovat arkipäivää. Myös terveydenhuoltoon ja viestintään liittyvät akustiikan asiat ovat kehittyneet paljon, erityisesti on tullut sellaisia apuvälineitä, joista ei voitu haaveillakaan esimerkiksi 1970-luvulla. Toisaalta ei voi oikein sanoa, että mikään alue olisi merkittävästi taantunut. Vaikutelma on, että akustiikkasuunnittelu ja ympäristömelu ovat osa-alueina kasvaneet voimakkaasti lähimenneisyydessä. Esimerkiksi tuulivoimaan liittyvät äänikysymykset aiheuttavat tutkimustarvetta jatkossakin, koska kysymys ei ole puhtaasta akustisesta mittaustekniikasta, vaan asiaan liittyy ihmisten kokeminen ja poliittisluonteiset näkökulmat. Sisäympäristöön ja sähköherkkyyteen liittyvät pohdinnat antavat tähän suuntaa.

VIITTEET

1. Häkli, Sanna, Childhood hearing impairment in northern Finland : prevalence, aetiology and additional disabilities. Acta Universitatis Ouluensis. D, Medica Oulu 2014. http://jultika.oulu.fi/Record/isbn978-952-62-0662-2
2. Konkarikoski Kimmo, Akustiikka ja standardisointi. Ympäristö ja Terveys-lehti 2/2017, 70-76.
3. Kuulonhuollon keskiössä – audionomikoulutuksen kehittäminen. Opetus- ja kulttuuriministeriön työryhmämuistioita ja selvityksiä 2013:12. Helsinki: Opetus- ja kulttuuriministeriö. Saatavilla osoitteessa: http://www.minedu.fi/export/sites/default/OPM/Julkaisut/2013/liitteet/tr12.pdf?lang=fi
4. Lindsay R B, artikkelissa J. Acoust. Soc. Am. V. 36, p. 2242 (1964)
5. Maijala P, Metsta, akustiikka, ääni ja melu. https://www.slideshare.net/SFSedu/akustiikka-ni-ja-melu
6. Mäki-Torkko, Elina; Roine, Risto; Laippala, Pekka, Hearing impairement among adults (HIA)-Report of a joint (Nordic-British) project, Edita Oyj, Helsinki 2001.
7. RIL 243 Rakennusten akustinen suunnittelu
8. RIL 243-1 Akustiikan perusteet Rakennusinsinöörien liitto, Helsinki 2007
9. RIL 243-2 Opetustilat, auditoriot, liikuntatilat ja kirjastot Rakennusinsinöörien liitto, Helsinki 2007
10. RIL 243-3 Toimistot Rakennusinsinöörien liitto, Helsinki 2008
11. RIL 243-4 Teollisuustilat Rakennusinsinöörien liitto, Helsinki 2010
12. RIL 243-5 Asunnot
13. SFS 5907 standardi, Rakennusten akustinen luokitus. Suomen standardoimisliitto, Helsinki 2006.
14. Toivanen J & Miettinen M: Puheen tutkimuksen resurssit Suomessa. Tieteellinen laskenta Oy. Oulu 2001. http://www.mediateam.oulu.fi/publications/pdf/325.pdf
15. Uimonen, S., Huttunen, K., Jounio-Ervasti, K., & Sorri, M. (1999). Do we know the real need for hearing rehabilitation at the population level? Hearing impairments in the 5- to 75-year-old cross-sectional Finnish population. British Journal of Audiology, 33(1), 53–59.

TYÖPAIKAN MELUALTISTUSMÄÄRITYSTEN UUSI AIKA

Heli Koskinen[1], **Tapani Ollilla**[1]

[1] Työterveyslaitos
Topeliuksenkatu 41 B
00250 Helsinki
heli.koskinen@ttl.fi

Tiivistelmä

Uusimman ammattitautijulkaisun mukaan meluvammojen jatkuva lasku näyttää pysähtyneen ja epäiltyjen meluvammojen määrä on lähtenyt kasvuun. Meluvamma on yhä ammattitautitilastojen ykkönen. Meluasetus määrittää työnantajan velvollisuudet puuttua melualtistukseen. Työpaikoilla suoritetaan melualtistusmittauksia, joiden lopputuloksena käytetään kuulonsuojaimia. Altistumistilanteen tulisi parantua jatkuvasti, mutta näin ei tapahdu.

Lainsäädäntö antaa pohjan melualtistuksen arviointiin. Meluasetus velvoittaa työnantajat tekemään tai teettämään arviointeja. Työnantajalla on myös velvollisuus tunnistaa melua aiheuttavat työt ja kohteet, joihin meluntorjuntaa voisi kohdistaa, ja jos torjuntatoimet eivät riitä, vasta sitten tulee valita ja hankkia kuulonsuojaimet torjumaan jäännösriskiä.

Käytännössä mittauksia tekevät osin epäpätevät mittaajat. Melua mitataan puhelinsovelluksilla, tai varsinaista melumittaria ei osata käyttää altistumisten arvioinneissa. Mittaukset tulisi tehdä ISO 9612 standardin mukaisesti. Rakennusmelumittaukset tehdään lähes aina akkreditoituna ja ympäristömelumittauksia henkilösertifioituna. Myös työmelumittaukset tulisi tehdä akkreditoituna. Jos kuulovamma syntyy, kyseessä on pysyvä terveyshaitta.

Työntekijän kuulonsuojeluprosessi alkaa huonosti, jos altistusarviointi tehdään väärin. Mittaustuloksiin tulisi voida luottaa, koska niiden perusteella tehdään meluntorjunta ja mahdollinen suojainten valinta. Meluntorjunnan tulee sisältyä meluntorjuntaohjelmaan, ja vasta sitten ottaa käyttöön kuulonsuojaimet ja varmistaa niiden oikea käyttö. Meluvammojen pysyvään laskuun tarvitaan eri toimijoiden yhteistyötä ja myös akkreditoituja työmelumittauksia.

© 2019 Heli Koskinen. Tämä on avoimesti julkaistu teos, joka noudattaa Creative Commons NIMEÄ 4.0 Ei sovitettu –lisenssiä (CC BY 4.0). Teosta saa kopioida, levittää, näyttää ja esittää julkisesti ja siitä saa luoda johdannaisteoksia, kunhan tekijän nimi ja lähde mainitaan asianmukaisesti.

1 JOHDANTO

Uusin Työterveyslaitoksen julkaisu (Koskela et al. 2019) ammattitaudeista osoittaa, että meluvammojen jatkuva lasku näyttää pysähtyneen ja epäiltyjen meluvammojen määrä on jopa lähtenyt kasvuun. Tämän lisäksi meluvamma on yhä ammattitautitilastojen ykkönen. Lainsäädäntö on kuitenkin kehittynyt jatkuvasti, ja työnantaja on velvollinen huolehtimaan työntekijöidensä työoloista ja terveydestä sekä estämään työssä syntyvät kuulovammat. Käytännössä näyttää kuitenkin olevan haasteita, koska merkittävää parannusta tilastoissa ei tunnu tapahtuvan.

Melun esiintyminen työssä on jo vuoden 1993 lainsäädännön uudistumisesta lähtien (Vna 85/2006) ja työnantajan meluntorjuntavelvoitteista huolimatta pysynyt vielä nykyäänkin merkittävänä työolohaittana ja ammattitautien aiheuttajana. Melutilanne hyväksytään työpaikoilla, vaikka melusta syntyy terveydellisiä haittoja. Tämä on vastoin työturvallisuuslain (L 738/2002) pykälän 1 tavoitteita ja pykälän 8 velvoitteita. Meluntorjunta mielletään vaikeaksi ja kalliiksi toteuttaa, jolloin ainoaksi vaihtoehdoksi esitetään helppona ratkaisuna kuulonsuojainten käyttöä ja varsinainen meluntorjunta jätetään tekemättä. Meluntorjunnaksi virheellisesti mielletyt suojaimet voivat osaltaan olla lisäämässä tai jopa aiheuttamassa näitä välillisiä vaaratilanteita. Kuulonsuojaimia on totuttu käyttämään ratkaisuna kaikkiin meluongelmiin, vaikka kuitenkaan niiden oikeaan valintaan, käyttöön ja huoltoon ei monellakaan työpaikalla kiinnitetä huomiota. Tämäkin voi olla syynä siihen, että kuulovammat eivät vähene, vaikka nykyään on hyvin harvoja työpaikkoja, joissa kuulovammoja voisi syntyä edes vahingossa, jos meluntorjunta- ja kuulonsuojeluasiat olisivat kunnossa.

Koska työpaikan riskinarviointi ja työterveyshuollon työpaikkaselvitys (Työterveyshuoltolaki, L 1383/2001)) parhaimmillaan tukevat toisiaan, työpaikalla pitäisi huolellisesti miettiä, miten kummastakin saadaan eniten hyötyä. Työpaikkaselvitykseen liittyvän tietojen vaihdon kannalta oleellisia tietoja ovat työn riski- ja kuormitustekijät, tiedot työympäristöstä ja henkilöstöstä sekä muutoksista työpaikoilla. Lisäksi oleellisia tietoja ovat suositukset työn terveellisyyden ja turvallisuuden varmistamiseksi työpaikalla. (Nissinen & Leino, 2018). Työmelumittaukset ja altistusarviointi tulisi sisällyttää tähän prosessiin niin, että ne ovat ammattimaisesti tehty, työterveyshuolto voi niiden ja muiden altistusarvioiden perusteella arvioida työpaikan terveydelliset riskit, yhteisvaikutukset ja suosittaa toimenpiteitä. Työpaikalle melumittaukset ja melualtistuksen arviointi ja sitä seuraavien suositusten tulisi mahdollistaa harkita eri meluntorjuntavaihtoehtoja ja niiden toteuttamisen sujuvasti. Kun torjuntaa suunnitellaan, tulee torjuntamahdollisuuksien tarkan harkinnan perusteella miettiä, vieläkö tarvitaan kuulonsuojaimiakin. Luonnollisesti työtekijöitä ei jätetä missään vaiheessa suojaamatta, mutta melutason vähentäminen tulisi aina olla työpaikalla päällimmäisenä mielessä.

Asiantilasta kärsivät sekä yritykset, työterveyshuolto että työhygieenisiä mittauksia tekevät. Yritykset maksavat virheellisistä mittauksista ja pahimmillaan mahdollisesti myöhemmin sairasvakuutuskorvauksia kuulon alenemasta ja työkyvyttömyydestä. Oikein

mittauksia tekevät kärsivät, koska mittauksista annetaan kuva, että ne ovat helppoja ja riittää kunhan jostain jonkunlaisen mittarin hankkii, tai jopa että puhelimen sovellus riittää oikeaoppiseen mittaukseen.

Jos esimerkiksi mittauksen kilpailutuksessa ei voida asettaa mitään vaatimuksia mittaajan pätevyydelle, on selvä että kunnolla työn tekevä häviää. Lisäksi raporteista/käytännöstä saattaa puuttua kokonaan sekä melualtistusarvio että kunnollinen opastus suojainten valintaan. Suojainten valinta on toki työnantajan vastuulla, mutta harvalla työnantajalla on kompetenssia tehdä se oikein ja usein luotetaan siihen, että työterveyshuolto yksin hoitaa asian.

2 LAINSÄÄDÄNTÖ

Valtioneuvoston asetus työntekijöiden suojelemisesta melusta aiheutuvilta vaaroilta (VNA 85/2006) toteaa, että ” Melulle altistumisen arviointi ja mittaus on suunniteltava ja toteutettava asianmukaisesti sekä toistettava tarvittaessa. Arvioijan tai mittaajan tulee olla työterveyshuollon asiantuntija tai muu työnantajan palveluksessa oleva tai ulkopuolinen henkilö, jolla on tarvittava kyky ja taito arvioida ja mitata melua.” Tätä kohtaa tulkitaan hyvin vaihtelevasti, mikä on tarvittava kyky ja taito. Mittaustulosten arvioinnissa tulee myös ottaa huomioon mittauksen epävarmuudet.

Työmelun mittaamiseen tulisi käyttää standardia ISO 9612, joka on uusin ja voimassa oleva käyttötarkoitukseen soveltuva standardi. Standardi SFS 4578, jota käytettiin ennen, on vanhentunut ja sen voimassaolo on kumottu.

Työpaikkamelun mittaamiseen käytettävän melumittarin tulisi olla vähintään tarkkuusluokan 2 melumittari, jossa on ekvivalenttitason mittaus A-taajuuspainotuksella ja peak-huippuarvonilmaisin C-taajuuspainotuksella. Standardi antaa myös lisäohjeita mittausolosuhteista. Mittaukset tehdään luonnollisesti kalibroituna (luokka 1 kalibraattori).

Työpaikan tehtävät arvioidaan ja valitaan tilanteeseen parhaiten sopiva mittausstrategia, jotka ISO 9612 standardissa ovat seuraavat: tehtäväkeskeinen (task-based), työkeskeinen (job-based) ja kokopäivämittaus (full-day). Taulukossa 1 on eritelty eri mittausstrategioiden soveltuvuus eri työpaikoille ja tilanteisiin.

Standardissa on kuvaukset eri mittausstrategioiden toteuttamiseen, itse mittaukseen ja tämän jälkeen tehtävään laskentaan ja arviointiin sekä epävarmuuden määrittämiseen. Myös mittarin asemointi ja mittauspaikat on määritelty. Standardissa on myös määritelty, mitä tietoja mittausraportissa tulee olla ja tämän tulisikin olla mittauksen tilaajan tiedossa eli mitä hyvältä mittausraportilta tulee vaatia.

Taulukko 1. ISO 9612 standardin mukaisten mittausstrategioiden soveltuvuus eri työpaikoille ja työtehtäviin

	Mittausstrategia		
Työn luonnehdinta	"Task-based"	"Job-based"	"Full-day"
Kiinteät työpisteet - vähän erilaisia työtehtäviä	suositeltava	ei sovi	ei sovi
Kiinteät työpisteet - monia erilaisia työtehtäviä	suositeltava	sopii	sopii
Liikkuva työ - ennakoitavat tehtävät - vähän erilaisia töitä	suositeltava	sopii	sopii
Liikkuva työ - ennakoitavat tehtävät - paljon erilaisia töitä	sopii	sopii	suositeltava
Liikkuva työ - ennakoimattomat työtehtävät	ei sovi	sopii	suositeltava
Kiinteä tai liikkuva työ - monia vaihtelevia työtehtäviä	ei sovi	suositeltava	sopii
Kiinteä tai liikkuva työ -työtehtäviä ei määritelty	ei sovi	suositeltava	sopii

3 MELUMITTAUKSET JA ALTISTUSTEN ARVIOINTI KÄYTÄNNÖSSÄ

Työterveyslaitoksen työhygieenikot tekevät paljon työmeluselvityksiä työpaikoilla ja joskus työnantajalla on työn pohjaksi jonkun muun tekemät melumittaukset työpaikalla. Tämä saattaa aiheuttaa hankaluuksia arvioinnissa silloin, kun mittausraportit ovat puutteellisia tai virheellisiä. Melualtistusmittauksia ovat saattaneet tehdä työntekijät tai joku toinen osapuoli, joilla ei ole koulutusta melumittausten tekemisestä tai tietoa käyttämänsä mittarin ominaisuuksista.

Seuraavassa muutamia esimerkkejä siitä, millaisia mittausraportit voivat olla:

1. Raportissa ilmoitettiin, että melutasot työssä vaihtelivat välillä 74 dB - 93 dB. Mittauspisteitä ei ollut, eikä sitä, mistä arvot on mitattu, eikä käytettyä painotusta. Ilmeisesti mitattaessa oli luettu suoraan osoittavaa mittaria ja jätetty altistusarviointi kokonaan tekemättä. Altistusaikaa ei oltu annettu.

2. Työpaikan käyttämä mittaaja oli mitannut keskiäänitasoksi työpaikalla 106 dB(A). Mittaus tehtiin uudestaan standardin mukaisesti ja tulokseksi saatiin 87-93 dB(A) työpisteittäin. Tässä harkinta siitä, käytetäänkö meluntorjuntaa, voisi hyvinkin pysähtyä virheelliseen mittaustulokseen.

3. Melumittarin mikrofoni oli rikkinäinen, eikä tätä oltu huomattu. Mittari näytti lukemia, mutta lukemien virhe oli noin 8 dB.

4. Mittaus oli suoritettu työpaikkana takomo. Oli mitattu sinänsä oikein keskimääräinen melualtistus, mutta unohdettu mitata piikkiarvot, joka täytyy myös mitata tällaisessa työpaikassa.

5. Mittaus oli suoritettu työpaikkana sinfoniaorkesteri. Oli mitattu harjoitukset ja esitykset, mutta niiden vaikutusta ei oltu laskettu yhteen, tulokset arkistoidaan, mutta melualtistusarviota ei oltu tehty. Impulssimelumittaukset olivat kaikki väärin tehty. Koska toiminta-arvo ylittyi impulssimelun kohdalla (virheellisiä liian korkeita lukemia), työpaikalla oli paljon huolestuneita työntekijöitä.

Kun työpaikalla mitataan virheellisesti, tästä on monia seuraamuksia, jotka vaikuttavat kuulonsuojaamiseen ja riskien hallintaan. Jos melulähdettä ei osata tunnistaa, ja varsinkaan suurinta aiheuttajaa ei osata oikein mitata, voi olla, että meluntorjuntaa ei edes harkita, koska kuvitellaan ettei asialle voi tehdä mitään. Kuulonsuojainten valinta voidaan tehdä väärin joko niin että kuulonsuojaimien käytön ongelmia syntyy ylisuojauksen (kommunikaatiovaikeus, eristyneisyyden tunne, lisääntynyt onnettomuusriski) tai alisuojauksen (tinnitus, hyperakusia, kuulonalenema) muodossa.

4 MITEN TUODAAN HYVÄT KÄYTÄNNÖT TYÖPAIKOILLE

Työpaikoille tulisi tuoda tietoisuus siitä, että kuten jo moni muukin altistusarviointi, melualtistuksen arviointi tulee teettää ammattilaisella tai hankkia riittävä osaaminen. Valitettavasti tähän sopivia kursseja on vähän, jos yhtään, tarjolla työpaikkojen työsuojeluhenkilöstölle. Lisäksi vähänkin vaativammat työpaikat tulisi aina mitata käyttäen akkreditoituja mittauksia. Työterveyslaitos on ensimmäisenä keväällä 2019 saanut akkreditoinnin melumittauksiin ja melualtistuksen määritykseen. Akkreditointi perustuu standardin ISO 9612 mittausmenetelmiin. Kun puhutaan asumisterveydestä ja rakentamisesta, rakennusmääräysten ja -ohjeiden mukaiset mittaukset suoritetaan lähes aina akkreditoituina ja ympäristömelu mittauksille on henkilösertifiointi mittausten tekemiseen. Ainostaan melu, joka voi aiheuttaa pysyvän kuulovamman tai -haitan, on tähän saakka ollut ja vieläkin on hyvin sekalaisten käytäntöjen kohteena. Tähän on saatava muutos. Mittausten akkreditoinnin tulee yleistyä ammattilaisten keskuudessa, ja työpaikoille tulee saada ymmärrys akkreditoinnin tarpeellisuudesta ja kuulonsuojainten hankkimisen riittämättömyydestä. Näiden hyvien käytäntöjen viemiseen työpaikoille tarvitaan koko akustiikan kenttää. Työterveyslaitos valistaa osaltaan eri koulutuksissa ja esimerkiksi työterveyshuollon koulutuksissa nykyään painotetaan sitä, ettei mittariin saa tarttua, jos ei todella tiedä mitä tekee.

Koneasetus (VNA 400/2008) edellyttää konevalmistajia ilmoittamaan melupäästöarvot, joiden perusteella työpaikka voisi uutta suunnitellessaan valita vähiten meluisat koneet. Tietoa äänitehon merkityksestä ja käyttäjän paikalla vallitsevasta äänenpainetasojen määrityksestä on kuitenkin hyvin harvoilla, eikä koneiden tai konelinjojen ostajat osaa niitä tietoja hyödyntää. Tämä johtaa siihen, että konevalmistajille ei synny kilpailuetua meluttoman tekniikan käytöstä tai kehittämisestä. Meluntorjuntaan ja akustiikkaan perehtyneiden tulisi nostaa näitä epäkohtia esiin ja tarjota tuotekehitykseen sekä työolojen suunnitteluun osaamistaan entistä pontevammin.

5 YHTEENVETO

Meluntorjuntaohjelmasta on muodostunut kuulonsuojainohjelma, mikä ei ole ollut tarkoitus. Kuulonsuojainten käytössä työpaikoilla on haasteita. Suojainten käyttöongelmat ovat tunnistetut kirjallisuudessa ja koulutuksissa, mutta tieto ei siirry työntekijälle. Työterveyslaitos pyrkii muuttamaan vallitsevaa tilannetta, ja on saanut akkreditoinnin työpaikkojen melumittauksille ja melualtistumisten määrityksille 5.3.2019. Akkreditoinnin tulee yleistyä työmelumittauksissa. Meluntorjunnan tulee sisältyä meluntorjuntaohjelmaan, ja kuulonsuojaimet tulisi mieltää työvälineeksi, joita on käytettävä, kun meluntorjuntaa ei ole vielä saatu toteutettua. Lisäksi tulisi varmistaa suojainten oikea käyttö. Tähän tarvitaan hyvää yhteistyötä koko akustiikan alalla Suomessa.

VIITTEET

[1] Koskela K, Lehtimäki J Toivio P, Aalto-Korte K, Pesonen M, Suuronen K, Lindström I, Airaksinen L, Suojalehto H, Helaskoski E, Ammattitaudit ja ammattitautiepäilyt 2015 : Työperäisten sairauksien rekisteriin kirjatut uudet tapaukset, Työterveyslaitos, Katsauksia 171, Helsinki, 2019.

[2] VNa 85/2006, Valtioneuvoston asetus työntekijöiden suojelemisesta melusta aiheutuvilta vaaroilta, www.finlex.fi, 2006.

[3] 23.8.2002/738, Työturvallisuuslaki, www.finlex.fi, 2002

[4] L1383/2001, Työterveyshuoltolaki 1383/2001, www.finlex.fi, 2001

[5] Nissinen, S. & Leino T, Data in the workplace surveys of occupational health services. Occup Environ Med (2018);75: A182

[6] ISO 9612, Acoustics -Determination of occupational noise exposure -Engineering method, ISO, 2009

[7] SFS 4578, Melualtistuksen mittaaminen, SFS, 1982

[8] VNa 400/2008 Valtioneuvoston asetus koneiden turvallisuudesta, www.finlex.fi, 2008

PAAVO ARNI (1905–1969) AKUSTIKKONA

Mikko Kylliäinen

Tampereen yliopisto
Rakennettu ympäristö
Korkeakoulunkatu 5
33720 Tampere
mikko.kylliainen@tuni.fi

Tiivistelmä

Paavo Arnin (1905–1969) kuolemasta tuli toukokuussa 2019 kuluneeksi 50 vuotta. Hän oli varsinaiselta ammatiltaan Yleisradion studiopäällikkö ja myöhemmin teknillinen johtaja, mutta näiden tehtävien ohella hän oli akustiikkasuunnittelun, akustiikkaa koskevien säädösten sekä järjestötoiminnan keskeinen kehittäjä 1940-luvun alusta kuolemaansa saakka. Myös Akustisen Seuran perustamiseksi aloitteen teki Paavo Arni, joka sitten toimi pitkään Seuran hallituksessa ja puheenjohtajana. Lisäksi hän oli ensimmäinen kansainvälisesti tunnettu suomalainen akustikko, joka yhteyksillään sai välitetyksi uusinta tutkimustietoa Suomeen, jossa akustiikan oppituoli perustettiin vasta hänen kuolemansa jälkeen. Perustellusti voidaan sanoa, että Paavo Arni on ollut Suomen toistaiseksi merkittävin akustikko.

1 JOHDANTO

Akustiikkaa ja akustiikkasuunnittelua voi lähestyä ammatillisesti monesta suunnasta. Varhaisista, 1930-luvulla toimineista suomalaisista akustiikan asiantuntijoista Jaakko Packalén ja Uuno Varjo olivat rakennusinsinöörejä ja T. K. Laakso sähköinsinööri, kaikki Teknillisessä korkeakoulussa opiskelleita [1–2]. Paavo Arni valmistui vuonna 1930 diplomi-insinööriksi Teknillisen korkeakoulun koneinsinööriosastolta koneenrakennuksen opintosuunnalta, mutta konepajateollisuudessa hän työskenteli vain hetken. Lamaaikana opintoja vastaavaa työtä ei ollut saatavilla, ja Arni päätyi Yleisradion palvelukseen studioteknikoksi vuonna 1931. [3–4]

Yleisradion insinöörit, aluksi erityisesti T. K. Laakso, jolta Arni omien sanojensa mukaan oppi ”akustiikan ensimäiset alkeet” [5], joutuivat studioita suunnitellessaan perehtymään akustiikkaan [6]. Arni kertoi tästä vaiheesta Akustisen Aikakauslehden pääkirjoituksessa vuonna 1963 [7]: ”Suomessa, kuten muuallakin, oli yleisradiotoiminta 30-luvulla voimakkaassa nousussa. Yleisradiotekniikka samoin kuin sille läheiset äänielokuva- ja äänilevytekniikka tarvitsivat välttämättömästi tietoja äänenmuodostuksesta, huoneakustiikasta, ääneneristyksestä ja ohjelman kuuntelun yhteydessä esiintyneistä probleemoista. Tästä syystä alkoivat yleisradiolaitokset eri maissa, myös Suomessa, syventyä ääniteknillisiin kysymyksiin ja niiden ratkaisuihin.” Tieto akustiikasta keskittyi näin Yleisradioon, jonka vuonna 1934 valmistuneen Fabianinkadun toimitalon kellariin rakennettiin akustiikkala-

© 2019 Mikko Kylliäinen. Tämä on avoimesti julkaistu teos, joka noudattaa Creative Commons NIMEÄ 4.0 Ei sovitettu –lisenssiä (CC BY 4.0). Teosta saa kopioida, levittää, näyttää ja esittää julkisesti ja siitä saa luoda johdannaisteoksia, kunhan tekijän nimi ja lähde mainitaan asianmukaisesti.

boratorio rakenteiden ja materiaalien akustisten ominaisuuksien mittaamista varten [6, 8–9].

Tutkimuskirjallisuudessa Paavo Arnista on kerrottu Yleisradion näkökulmasta, sillä hänellä oli sen palveluksessa useita merkittäviä tehtäviä [6, 10–12]. Esimerkiksi vuonna 1952 hän vastasi Helsingin olympiakisojen radioinnista ympäri maailmaa sekä muutamia vuosia myöhemmin Yleisradion televisiotoiminnan käynnistämisestä [3, 13]. Urallaan Yleisradiossa hän eteni vuonna 1952 yli-insinööriksi ja edelleen teknilliseksi johtajaksi vuonna 1964 [12]. Arnin toiminta akustiikan asiantuntijana sitä vastoin sivuutetaan tutkimuskirjallisuudessa lyhyillä maininnoilla [3, 12].

Tämän artikkelin tarkoituksena on esitellä Paavo Arnin toimintaa akustiikan uranuurtajana erityisesti rakennus- ja huoneakustiikan sekä meluntorjunnan aloilla. Sähköakustiikka on tästä artikkelista rajattu pois. Samoin Arnin toimintaa Yleisradiossa ei käsitellä muuten kuin rakennus- ja huoneakustiikkaan liittyvin osin.

2 KANSAINVÄLISET YHTEYDET

Yleisradion studioiden rakentaminen edellytti tietoa akustiikasta, mutta Suomessa akustiikan tutkimusta ja opetusta ei vielä 1930-luvulla ollut [14]. Tieto oli siten hankittava muualta teknologian siirtoina. Niiden yksi muoto ovat ulkomaille suuntautuvat opintomatkat, joita Paavo Arni teki eri tehtävissään Yleisradiossa runsaasti 1930-luvulta lähtien. Esimerkiksi vuonna 1938 hän tutustui ”uudenaikaisiin studiokonstruktioihin” Ruotsissa ja seuraavana vuonna juuri valmistuneen Wienin radiotalon ääneneristysratkaisuihin [15–17].

Esimerkki siitä, miten ulkomailla kehitetyn teknologian siirto Suomeen tapahtui, on muunneltava huoneakustiikka. Vuonna 1946 Kaartin maneesiin oltiin sijoittamassa Yleisradion uutta musiikkisalia. Sen suunnitteluun liittyen Arni vieraili hiljattain valmistuneissa radiotaloissa Kööpenhaminassa ja Brysselissä, joissa hänen huomiotaan kiinnitti ensinnäkin se, että radioitavat konsertit soitettiin studioiden sijasta radiotalojen yhteydessä olleissa konserttisaleissa. Toisaalta häntä kiinnosti Brysselissä se, että studiossa saatettiin ”automaattisesti vaihtaa akustiikkaa” eli siellä voitiin sähkömoottoreilla pyörittää kuusikulmaisia, pinnoiltaan eri tavoin absorboivin materiaalein päällystettyjä pylväitä esityksen vaatiman jälkikaiunta-ajan edellyttämiin asentoihin [18]. Yleisradion hanke Kaartin maneesin muuttamisesta 600-paikkaiseksi konserttisaliksi raukeni kuitenkin pian [19–20].

Maneesihankkeen keskeytymisestä huolimatta musiikkistudion suunnittelu jatkui, ja vuonna 1949 lehdistölle esiteltiin Yleisradion ”ns. muuttuvan akustiikan sali", joka mainittiin ainutlaatuiseksi Pohjoismaissa. Saliin oli sijoitettu käsin käänneltäviä rakenteita, joilla salin jälkikaiunta-aikaa voitiin säätää erilaisiin tarkoituksiin sopivaksi. Helsingin Sanomain uutisessa salia esitellyt Arni ennusti, että ”lähivuosien suurempien salien rakennussuunnitelmissa tullaan käyttämään nyt Yleisradion piirissä kokeiltavaa ’keksintöä’ ” [21]. Näin kävikin, sillä 1950-luvun alkuvuosina valmistuivat Kauppakorkeakoulun ja Hangon kaupungintalon uudisrakennukset, joihin kumpaankin Arni oli suunnitellut muunneltavan akustiikan [22–23].

Kehittämäänsä muunneltavan akustiikan suomalaista sovellusta Arni ei jättänyt vain omaksi tiedokseen, vaan vuonna 1950 hän julkaisi sen periaatteen Arkkitehti-lehdessä Kauppakorkeakoulun uudisrakennuksen akustiikkaa koskeneessa artikkelissaan [22].

Samana vuonna hän julkaisi aiheesta artikkelin myös alan arvovaltaisimmassa lehdessä JASAssa [24]. Keväällä 1950 Arni esitelmöi ”muuttuvasta akustiikasta” kansainvälisessä kansainvälisessä akustikkokokouksessa Marseillessa. Esitelmän seurauksena englantilainen akustikkoryhmä vieraili vielä saman kesän aikana Suomessa tutustumassa tähän tekniikkaan [25].

Edellä oleva kertoo myös siitä, miten Arni verkostoitui ulkomaisten akustiikan asiantuntijoiden kanssa. Verkostoitumisen ansiosta Ääniteknillisen Yhdistyksen kokouksissa vierailivat 1940- ja 1950-luvuilla esitelmöimässä Per Brüel, V. L. Jordan, Fritz Ingerslev ja Willi Furrer [26]. Leo Beranekin Arni oli tavannut keväällä 1948 matkallaan Yhdysvaltoihin, jossa hän tutustui akustiikkalaboratorioihin. Matkan aikana hän vieraili MIT:n akustiikkalaboratoriossa, jossa Beranek työskenteli [27]. Samana vuonna Beranek teki Arnin isännöimänä vierailun Suomeen [28], minkä Beranek mainitsi 60 vuotta myöhemmin julkaisemissaan muistelmissa [29]. Toisen kerran Arni oli järjestämässä Beranekin vierailua vuonna 1960, kun tämä oli kirjoittamassa ensimmäistä versiota kuuluisasta konserttisalikirjastaan [29–30].

1950-luvun alkuun mennessä Paavo Arni oli saavuttanut kansainvälisesti mainetta siinä määrin, että hänet syksyllä 1951 kutsuttiin 18 muun akustiikan asiantuntijan kanssa kuuntelemaan ongelmalliseksi osoittautunutta Royal Festival Hallin akustiikkaa koekonserttiin [31]. Arvostusta Arnia kohtaan osoittaa myös se, että sveitsiläinen professori Willi Furrer julkaisi Suomessa vuonna 1953 vierailtuaan Arnin suunnittelutöistä näyttävästi kuvitetun artikkelin Schweizerische Bauzeitungissa [23].

3 ALAN EDISTÄMINEN

3.1 Järjestötehtävät

Erittäin merkitykselliseksi akustiikan kehittymisen kannalta Suomessa osoittautui saksalaisen tohtori Hans Joachim von Braunmühlin vierailu Helsingissä vuonna 1942. Vierailu liittyi Yleisradion hankkeeseen rakentaa uusi radiotalo korvaamaan nopeasti ahtaaksi käyneet Fabianinkadun tilat [13]. Akustiikkaan ja yleisradiotekniikkaan perehtynyt von Braunmühl esitelmöi Yleisradiossa rakennusten akustisesta suunnittelusta, ääneneristyksestä, huoneakustiikasta ja rakennusaineiden akustisista ominaisuuksista. Esitelmä julkaistiin laajana kaksiosaisena artikkelina Rakennustaito-lehdessä Arnin kääntämänä [32–33].

Radiotalohanke raukesi sota-aikana, mutta von Braunmühlin esitelmä sai aikaan niin paljon akustiikkaan kohdistunutta kiinnostusta ja innostusta, että 25.8.1942 Yleisradiossa pidettiin kokous, johon oli kutsuttu 11 asiantuntijaa akustiikan eri aloilta sekä elinkeinoelämästä että tutkimuslaitoksista. Paavo Arni oli valmistellut kokoukseen esityksen siitä, että ”olisi perustettava Suomeen seura, jonka tehtävänä olisi tehdä tutkimustyötä ja mittauksia akustiikan alalta ja tehdä valistustyötä määrättyjen piirien keskuudessa.” Kaikki kokouksen osallistujat kannattivat seuran perustamista, ja kokouksen päätteeksi asetettiin väliaikainen toimikunta laatimaan seuralle sääntöjä. Toimikunnan sihteeriksi ja kokoonkutsujaksi valittiin Paavo Arni. [34]

Toimikunnan saatua tehtävänsä valmiiksi pidettiin 29.3.1943 Ääniteknillisen Yhdistyksen perustava kokous, jossa hyväksyttiin yhdistyksen säännöt. Niiden mukaan yhdistyksen tuli järjestää kokouksia, esitelmä- ja luentotilaisuuksia, edistää alan tutkimustyötä ja ammattikirjallisuuden leviämistä, harjoittaa julkaisu- ja neuvontatoimintaa sekä kehittää

alan suomenkielistä sanastoa. Paavo Arni valittiin yhdistyksen johtokunnan jäseneksi [35]. Yhdistyksen johtokunnan jäsenenä hän toimi kolmessa jaksossa kaikkiaan 26 vuotta ja niistä 15 vuotta puheenjohtajana.

Kokouksessaan 26.10.1943 yhdistyksen johtokunta linjasi, että ”yhdistyksen tulisi ensin tehdä voimakasta propagandaa akustisten peruskysymysten, erikoisesti äänieristys- ja jälkikaiunta-aikakysymysten selvittämiseksi”. [36]. Propagandaa alkoikin tulla: vielä samana vuonna Arni julkaisi Helsingin Sanomissa artikkelin ”Melu – sivistyksen kasvannainen” ja seuraavana vuonna toisen otsikolla ”Mitä on ’akustiikka’?” [37–38].

Merkittävin Arnin kirjallisista töistä on Otavan 1949 kustantama oppikirja ”Käytännöllisen akustiikan perusteet” [39], joka yli vuosikymmenen ajan oli ainoa alan suomenkielinen oppikirja [14]. Myös se oli tulosta Arnin matkoista ja kontakteista ulkomaille ja kansainvälisten asiantuntijoiden vierailuista Suomeen: kirjan lähdeluettelon ja suositellun kirjallisuuden 61 nimikkeestä 20 kpl oli saksalaisia, pohjoismaisia 13 kpl, 10 kpl yhdysvaltalaisia, ja loput Iso-Britanniasta, Alankomaista ja Sveitsistä. Kotimaisia lähteitä oli vain kuusi [40].

1950-luvulla Paavo Arnin järjestötehtävät laajenivat Suomen ulkopuolelle. Arni osallistui ensimmäiseen kansainväliseen ICA-konferenssiin Delftissä 1953 [17]. Konferenssin loppupuolella neljän Pohjoismaan edustajat kokoontuivat yhteen ja päättivät perustaa pohjoismaisen akustisen seuran, jonka nimeksi tuli Nordiska Akustiska Sällskapet [41]. Ääniteknillinen Yhdistys nimitti pohjoismaisen seuran johtokuntaan Suomen edustajaksi Paavo Arnin [42]. Ensimmäinen varsinainen pohjoismainen konferenssi oli Helsingissä 1956 [41]. Sen avasi isäntäseuran puheenjohtajana Paavo Arni [43]. Kun ICA-konferenssi oli vuonna 1962 Kööpenhaminassa, järjestelyvastuussa oli NAS. Konferenssin neuvoa antava toimikunta muodostettiin kansallisten jäsenseurojen hallituksen jäsenistä. Suomea siinä edusti kahden muun suomalaisen kanssa Paavo Arni [44].

3.2 Komitea- ja tutkimustyö

Ääniteknillisen yhdistyksen aloitteesta valtioneuvosto asetti vuoden 1945 alussa komitean valmistelemaan lainsäädäntöä melun aiheuttamien haitallisten vaikutusten vähentämiseksi työpaikoilla. Paavo Arni kutsuttiin komitean jäseneksi, mutta komitean puheenjohtajan kuoltua hänet määrättiin uudeksi puheenjohtajaksi vuonna 1947 [45]. Näihin aikoihin Arnin opintomatkat ulkomaille suuntautuivat monesti meluntorjunnan kannalta merkittäviin kohteisiin. Esimerkiksi esitelmämatkallaan Ruotsiin Tukholman radioyhdistykseen kokoukseen vuonna 1945 hän tutustui Västeråsissa ASEAn tehtaalla ”suoritettuun suurenmoiseen työhön äänen vaimentamiseksi suurimeluisissa tehdassaleissa ym. työhuoneissa” [46].

Meluntorjuntakomitea sai työnsä valmiiksi vuonna 1949 ja jätti sisäasiainministeriölle mietintönsä. Se sisälsi myös ehdotuksen meluntorjuntalaiksi, joka koski työntekijöiden suojelemista melun haitallisilta vaikutuksilta [45]. Erillistä meluntorjuntalakia ei kuitenkaan tuolloin annettu, mutta komitean työskentely vaikutti vuonna 1958 annetun työturvallisuuslain sisältöön melun ja tärinän osalta [47–48]. Myöhemmin Arni istui kahdessa muussa meluun liittyvässä komiteassa. 1950-luvun alkupuolelta lähtien hän oli ollut toteuttamassa moottoriajoneuvojen melumittauksia [49], ja kun NAS alkoi vuonna 1956 kehittää aiheesta mittausstandardia, Arni nimitettiin standardityöryhmän vetäjäksi. Työryhmän ehdotus toimi sittemmin pohjana kansainväliselle ISO-standardille [41, 47].

1960-luvun loppupuolella hän oli jäsenenä valtioneuvoston asettamassa ilmansuojelun ja meluntorjunnan neuvottelukunnassa [50].

Vuonna 1947 Ääniteknillisen Yhdistyksen hallitus päätti lähestyä sisäasianministeriötä kirjeellä ”ääniteknillisten normien laatimisesta talojen rakentajille” [51]. Tähän oli vaikuttanut se, että Yhdistyksen kokouksessa oli saman vuoden keväällä esitelmöinyt tanskalainen tohtori V. L. Jordan eri maissa annetuista ääneneristystä ja meluntorjuntaa koskevista säädöksistä. Yhdistyksen sihteeri Paavo Arni toimitti Jordanin esitelmän lehdistölle julkaistavaksi suomeksi käännettynä otsikolla ”Nykyisiä melua ja ääneneristystä koskevia oikeussääntöjä ja normeja eri maista”. Ehdotus kotimaisten normien laatimiseksi perustettavasta komiteasta toimitettiin sisäasianministeriöön keväällä 1948 [40].

Ääneneristysnormien aikaansaaminen osoittautui pitkäkestoiseksi hankkeeksi, jossa tärkeitä välivaiheita olivat vuosina 1952–1955 toiminut ääneneristystutkimustoimikunta ja vuonna 1957 asetettu komitea, joka laati vuonna 1960 julkaistun ”Ehdotuksen ääneneristysmääräyksiksi”. Paavo Arni kutsuttiin jäseneksi kumpaankin komiteaan [47, 52–53]. Ääneneristysmääräysten aikaansaaminen lienee yhteiskunnallisesti merkittävin Akustisen Seuran alulle panema hanke, joka vaikutti asuntojen ääneneristyksen paranemiseen ja edelleen miljoonien suomalaisten jokapäiväiseen elämään [54].

4 SUUNNITTELUTYÖT

Taulukossa 1 on esitetty luettelo Paavo Arnin suunnittelutöistä. Niitä on oletettavasti paljon enemmänkin, mutta niistä on käytännössä mahdotonta saada tietoa, ellei sitä ole aikanaan julkaistu. Esimerkiksi Hämeenkadun koulusta Hyvinkäällä tällaista julkaistua tietoa ei ole, mutta Arnin osuus tuli ilmi perusparannushankkeen yhteydessä rakennusaikaisista suunnitelmista, jotka olivat tallella Hyvinkään kaupunginarkistossa [55].

Paavo Arnilla näyttää olleen pitkäaikaista yhteistyötä aikansa johtavien arkkitehtien, erityisesti Risto-Veikko Luukkosen sekä Kaija ja Heikki Sirenin kanssa. Alvar Aallon kohteista hän oli suunnittelemassa Kulttuuritalon akustiikkaa ja ehti aloittaa Finlandia-talon suunnittelun [56–57]. Ulkomailla Arni osallistui Linzin konserttitalon eli Brucknerhausin sekä Itävallan radion Salzburgiin, Innsbruckiin Dornbirniin ja Linziin rakennettujen studioiden suunnitteluun [57].

3 YHTEENVETO

Tekniikan historiassa ovat viime vuosikymmeninä olleet vallalla ajatukset teknologian sosiaalisesta rakentumisesta [58], jolloin yksittäisten ihmisten vaikutus teknologian kehittymiseen jää vähälle huomiolle. Paavo Arni näyttäisi lähteiden kertoman perusteella olleen poikkeuksellinen henkilö. Ensinnäkin hänen tehtävänsä nopeasti kehittyvän yleisradiotoiminnan parissa antoi mahdollisuuksia luoda kansainvälisiin akustiikan asiantuntijoihin yhteyksiä, joita hän käytti koko alan hyväksi ja kehittämiseksi Suomessa. Nuoren Arnin pyrkimys näyttää olleen oppia ja välittää tietoa akustiikan eri aloista Suomeen. Myöhemmin hän näyttää pyrkineen vähentämään kehittymässä olleita ääniolosuhteisiin liittyviä yhteiskunnallisia ongelmia, mistä esimerkkinä ovat hänen työnsä meluntorjunta- ja ääneneristyskysymyksiä käsittelevissä komiteoissa. Hänen työnsä ulottui siten käytännön suunnittelutyöstä yhteiskunnalliseen vaikuttamiseen.

Keskeistä Paavo Arnin uralla ja saavutuksissa olivat kansainväliset yhteydet, jotka mahdollistivat teknologian siirrot Suomeen. Juhani Borenius [59] on arvioinut, että Arnin

liikkumisen kansainvälisissä piireissä teki helpoksi hänen monipuolinen kielitaitonsa sekä lapsuuden ympäristö monikulttuurisessa Viipurissa. Vaikka hän ehti saada paljon aikaan ja oli ilmeisen tehokas kaikissa tehtävissään, hänen työnsä jäi kuitenkin kesken: Paavo Arni kuoli 64-vuotiaana keväällä 1969, joten hänen suunnitelmansa keskittymisestä eläkepäivinä akustiikkasuunnitteluun jäi toteutumatta [3].

TAULUKKO 1. *Paavo Arnin suunnittelutöitä. Kirjoittajan hallussa ovat taulukon lähteet, joita tilanpuutteen vuoksi ei ole mahdollista esittää viiteluettelossa.*

Vuosi	Rakennus	Sijainti	Paikkaluku	Arkkitehti
1943	Messuhallin korjaus	Helsinki	4000–5000	Aarne Hytönen ja Risto-Veikko Luukkonen
1947	Hietaniemen uuden siunauskappelin korjaus	Helsinki	240	Albert Nyberg
1948	Yliopiston juhlasalin uudelleenrakennus	Helsinki	934	J. S. Sirén
1949	Hotelli Merihovi	Kemi	–	Toivo Anttila ja Veli Klami
1950	Hämeenkadun koulu	Hyvinkää	–	Aarne Hytönen ja Risto-Veikko Luukkonen
1950	Kauppakorkeakoulu	Helsinki	772	Hugo Harmia ja Woldemar Baeckmann
1951	Hangon kaupungintalo	Hanko	360	Bertel Liljequist
1951	Keravan kauppalantalo	Kerava	–	Aarne Hytönen ja Risto-Veikko Luukkonen
1952	Turun konserttitalo	Turku	1002	Risto-Veikko Luukkonen
1953	Svenska Handelshögskolan	Helsinki	350	Kurt Simberg
1954	Lahden konserttitalo	Lahti	583	Heikki ja Kaija Siren
1954	Kansallisteatterin pieni näyttämö	Helsinki	307	Heikki ja Kaija Siren
1955	Wasa Teater	Vaasa	272	Bertel Liljequist ja Sam Salvesen
1956	Pyynikin uimahalli	Tampere	–	Harry W. Schreck
1958	Kulttuuritalo	Helsinki	1500	Alvar Aalto
1960	Kouvolan teatteritalo	Kouvola	353	Eero A. Kajava
1960	Hotelli Polar	Rovaniemi	–	Aarne Ehojoki
1961	Oriveden kirkko	Orivesi	800	Kaija ja Heikki Siren
1962	Hotelli Marski	Helsinki	–	Einari Teräsvirta
1962	Turun kaupunginteatteri	Turku	655	Risto-Veikko Luukkonen ja Helmer Stenroos
1966	Turun Akatemiatalon juhlasalin korjaus	Turku	340	–
1967	Helsingin kaupungin-teatteri	Helsinki	923 ja 274	Timo Penttilä

VIITTEET

[1] Kylliäinen, M. 2009a. Tämä akustiikka on niin uutta! Akustiikkapäivät 2009. Vaasa, 14.–15.5. Akustinen Seura ry, 36–41.

[2] Kuusela, A. 1983. Dipl.ins. T. K. Laakso. Teoksessa: Pekkarinen, J., Nuotio, T. J. & Lahti, T. (toim.). Akustinen Seura 40 vuotta 1943–1983. Helsinki, Akustinen Seura ry, 14–15.

[3] Ilmonen, K. 2003. Paavo Arni (1905–1968) – Yleisradion tekninen johtaja. Teoksessa: Klinge, M. et al. (toim.). Suomen Kansallisbiografia 1. Helsinki, Suomalaisen Kirjallisuuden Seura, 382–383.

[4] Helsingin Sanomat 20.4.1955, "Yli-ins. Paavo Arni 50-vuotias".

[5] Paavo Arnin kirje T. K. Laaksolle 14.2.1945, C1 Saapunut ja lähtenyt posti 1944–1978, Akustisen Seuran arkisto.

[6] Lyytinen, E. 1996. Perustamisesta talvisotaan. Teoksessa: Lyytinen, E. & Vihavainen, T. Yleisradion historia 1926–1996, 1. osa. Helsinki, Yleisradio Oy, 11–128.

[7] Arni, P. 1963. Akustisen tutkimuksen merkityksestä. Akustinen Aikakauslehti. Nro 3–4, 1–2.

[8] Laakso, T. K. 1937a. Rakennusten akustisista kysymyksistä. Teknillinen Aikakauslehti. Nro 7–8, 259–276.

[9] Laakso, T. K. 1937b. Rakennusten ääneneristyksestä. Rakennustaito. Nro 4, 55–61.

[10] Vihavainen, T. 1996. Sodan ja vaaran vuodet. Teoksessa: Lyytinen, E. & Vihavainen, T. Yleisradion historia 1926–1996, 1. osa. Helsinki, Yleisradio Oy, 129–302.

[11] Salokangas, R. 1996. Yleisradion historia, 3. osa: Aikansa oloinen. Helsinki, Yleisradio Oy.

[12] Ilmonen, K. 1996. Yleisradion historia 1926–1996, 3. osa: Tekniikka, kaiken perusta. Helsinki, Yleisradio Oy.

[13] Arni, P. 1953. Experiences with electroacoustic equipment used at the Olympic Games in Helsinki. Proceedings of the First Iinternational Congress on Acoustics. Delft, International Commission on Acoustics, 16..–24.6., 61–63.

[14] Karjalainen, M. 2009. Akustiikan opetuksen historiaa Suomessa. Tekniikan Waiheita. Nro 2, 36–44.

[15] Helsingin Sanomat 1.4.1938, "Lisää studioita yleisradiollemme".

[16] Helsingin Sanomat 14.7.1939, "Olympialaisten radiolähetykset jo järjestelyn alaisina".

[17] Helsingin Sanomat 2.7.1953, "Elektro-akustiikkaa Delftissä ja Kölnin radiotalon hienouksia".

[18] Helsingin Sanomat 25.9.1946, "Automaattinen akustiikka radiomme uuteen musiikkistudioon?".

[19] Helsingin Sanomat 16.11.1946, "Ääniaaltoja vesimallissa eli 'Arnin akvaario' ".

[20] Bonsdorff, M., Winterhalter, R. & Tainio, K. 2013. Kaartin maneesi – rakennushistoriaselvitys. Espoo, Senaatti-kiinteistöt.

[21] Helsingin Sanomat 13.5.1949, "Musiikki ja puhe samasta salista".

[22] Arni, P. 1950a. Kauppakorkeakoulun huoneakustiset rakenteet. Arkkitehtilehti. Nro 1, s. 135–136.

[23] Furrer, W. 1954. Akustik und Architektur in Finnland. Schweizerische Bauzeitung. Vol. 72, 401–404.

[24] Arni, P. 1950b. Rooms with reverberation time adjustable over a wide frequency band. The Journal of the Acoustical Society of America. Vol. 22(3), 353–354.

[25] Helsingin Sanomat 27.4.1950, "Ins. Arni esitelmöinyt akustiikasta Marseillessa".

[26] Ääniteknillinen Yhdistys ry:n 10-vuotistoimintakertomus 20.4.1953, B1 Pöytäkirjat, vuosi- ja toimintakertomukset 1942–1962, Akustisen Seuran arkisto.

[27] Arni, P. 1948. Äänilaboratorioista. Teknillinen Aikakauslehti. Nro 11, s. 241–244.ternational Commission on Acoustics, 16..–24.6., 61–63.

[28] Helsingin Sanomat 10.8.1948, "Asuntojen ääneneristys Euroopassa edellä Yhdysvalloista".

[29] Beranek, L. 2008. Riding the waves: a life in sound, science, and industry. Cambridge, The MIT Press.

[30] Helsingin Sanomat 21.2.1960, "Kapellimestari ja akustikko vierailivat Turussa".

[31] Helsingin Sanomat 7.9.1951, "Akustiikan tuntijoita kokoontuu Lontooseen".

[32] von Braunmühl, H. J. 1942a. Huoneiden ja rakennusten akustiikasta. Rakennustaito. Nro 24, s. 315–324. Suom. Paavo Arni.

[33] von Braunmühl, H. J. 1942b. Huoneiden ja rakennusten akustiikasta (jatk.). Rakennustaito. Nro 25–26, s. 335–346. Suom. Paavo Arni.

[34] Pöytäkirja Ääniteknillisen Yhdistyksen suunnittelukokouksesta 25.8.1942, B1 Pöytäkirjat, vuosi- ja toimintakertomukset 1942–1962, Akustisen Seuran arkisto.

[35] Pöytäkirja Ääniteknillisen Yhdistyksen perustavasta kokouksesta 29.3.1943, B1 Pöytäkirjat, vuosi- ja toimintakertomukset 1942–1962, Akustisen Seuran arkisto.

[36] Pöytäkirja Ääniteknillisen Yhdistyksen johtokunnan kokouksesta 26.10.1943, B1 Pöytäkirjat, vuosi- ja toimintakertomukset 1942–1962, Akustisen Seuran arkisto.

[37] Arni, P. 1943. Melu – sivistyksen kasvannainen. Helsingin Sanomat 29.12.1943.

[38] Arni, P. 1944a. Mitä on ”akustiikka?” Helsingin Sanomat 31.10.1944.

[39] Arni, P. 1949. Käytännöllisen akustiikan perusteet. Helsinki, Kustannusosakeyhtiö Otava.

[40] Kylliäinen, M. 2009b. Kansainväliset yhteydet vuoden 1967 ääneneristysnormien muotoutumisessa. Tekniikan Waiheita. Nro 3, 29–47.

[41] Rindel, J. H. 2014. The history of the Nordic Acoustic Association. Rindel, J. H. (toim.). 2014. Nordic Acoustic Association – 60 years anniversary book. Lyngby, Nordic Acoustic Association, s. 7–14.

[42] Kylliäinen, M. 2014. Acoustical Society of Finland as a channel of technology transfer – Development of sound insulation of Finnish dwelling stock as an example. Rindel, J. H. (toim.). 2014. Nordic Acoustic Association – 60 years anniversary book. Lyngby, Nordic Acoustic Association, s. 15–26.

[43] Helsingin Sanomat 28.9.1956, "Huoneakustiikka ja meluntorjunta akustisen seuran kokousteemana".

[44] Proceedings of the Fourth International_Congress on Acoustics, Vol. 2. 1962. Kööpenhamina, International Commission on Acoustics, 21.–28.8.

[45] Arni, P., Siirala, U., Alho, I., Laine, L. & Mäkipää, O. 1949. Meluntorjuntakomitean mietintö, toinen osa. Helsinki.

[46] Helsingin Sanomat 20.2.1946, " 'Hiljainen' tehdas saa tunnustusta Ruotsissa".

[47] S.n. 1964. 20 vuotta äänitekniikan hyväksi. Akustinen Aikakauslehti. Nro 3–4, s. 5.

[48] Työturvallisuuslaki. Suomen säädöskokoelma 299/1958.

[49] Helsingin Sanomat 5.2.1954, "Moottoripyörät melun pahimpia aiheuttajia".

[50] S.n. 1967. Ilmansuojelun ja meluntorjunnan neuvottelukunnan toimintakertomus no 1 vuosilta 1966, 1967. Helsinki.

[51] Pöytäkirja Ääniteknillisen Yhdistyksen johtokunnan kokouksesta 1.10.1947, B1 Pöytäkirjat, vuosi- ja toimintakertomukset 1942–1962, Akustisen Seuran arkisto.

[52] Helsingin Sanomat 11.5.1955, "Uudistalon oikea ääneneristys vaatii 1 %:n lisäkustannukset"

[53] S.n. 1960. Ehdotus ääneneristysmääräyksiksi. Rakennusinsinööri. Nro 9, s. 337–342.

[54] Lietzén, J. & Kylliäinen, M. 2013. Asuinkerrostalojen ääneneristävyyden kehittyminen Suomessa vuosina 1955–2008. Tekniikan Waiheita. Nro 1, 5–23.

[55] Kylliäinen, M. & Valovirta, I. 2011. Opetustilojen huoneakustiikka – paluu juurille. Akustiikkapäivät 2011. Tampere, 11.–12.5., Akustinen Seura ry, 285–290.

[56] Lukander, M. & Mannevaara, M, 2005. Finlandia-talon rakennushistoriaselvitys. Helsinki, Arkkitehtuuri- ja muotoilutoimisto Talli Oy.

[57] Halme, A. 2009. Musiikki- ja puhesalien akustisen suunnittelun vaiheita 1900-luvulla. Tekniikan Waiheita. Nro 2, 19–35.

[58] Bijker, W. E., Hughes, T. P. & Pinch, T. (toim.). 1989. The social construction of technological systems (2. p.). Cambridge, The MIT Press.

[59] Borenius, J. 1983. Dipl.ins. Paavo Arni. Teoksessa: Pekkarinen, J., Nuotio, T. J. & Lahti, T. (toim.). Akustinen Seura 40 vuotta 1943–1983. Helsinki, Akustinen Seura ry, 16–17.

AKUSTIIKKA WIKIPEDIASSA

Vesa Välimäki[1], Panu Maijala[2] ja Otto Puomio[3]

[1]Aalto-yliopisto, Akustiikan laboratorio, Signaalinkäsittelyn ja akustiikan laitos, Otakaari 5, 02150 Espoo
[2]VTT, Visiokatu 4, 33720 Tampere
[3]Aalto-yliopisto, Akustiikan laboratorio, Tietotekniikan laitos, Otakaari 5, 02150 Espoo

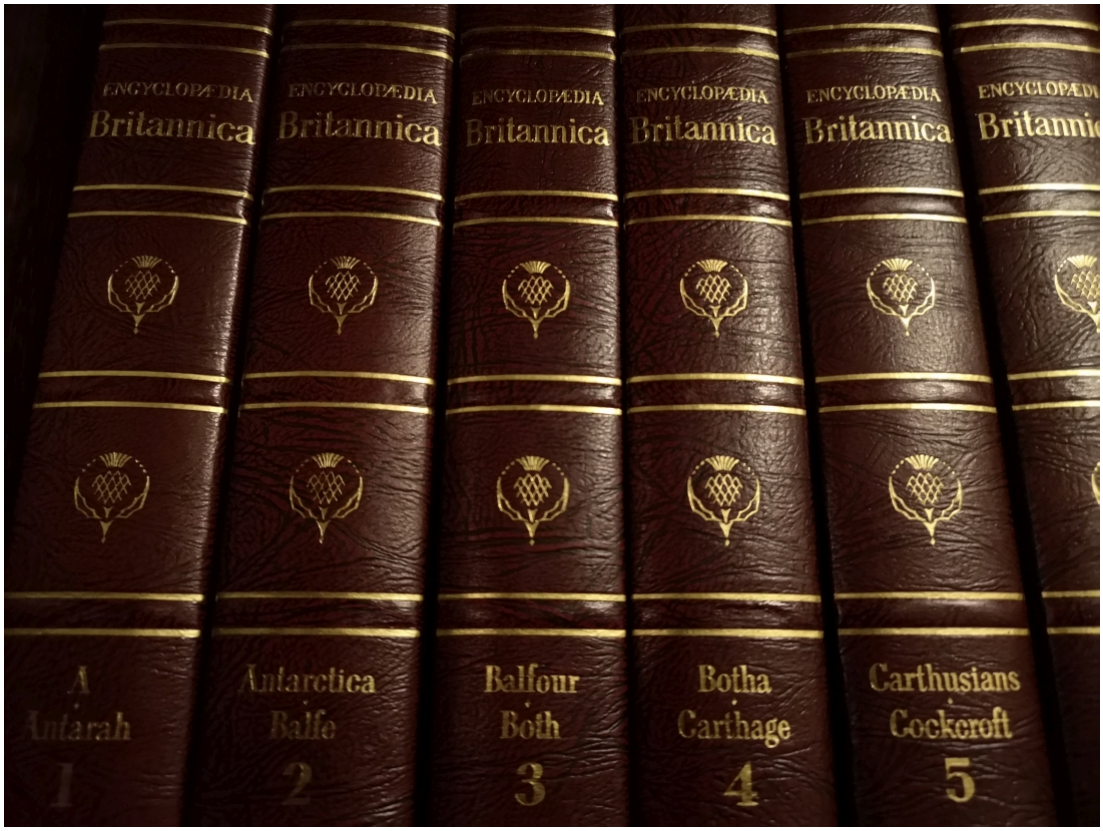
Tiivistelmä

Wikipedia on nykyään varmin tapa levittää tietoa akustiikasta suomalaisille, koska sivustolla on enemmän lukijoita kuin millään muulla medialla. Suomenkielisessä Wikipediassa on kuitenkin akustiikan alan artikkeleita varsin vähän, tätä kirjoitettaessa vain 45 kappaletta, kun englanniksi vastaavia artikkeleita on moninkertainen määrä. Akustisen Seuran hallitus perusti vuoden 2019 alussa viestintätoimikunnan, jonka tehtävänä on ollut muun muassa suomenkielisten akustiikan Wikipedia-sivujen kehittäminen. Työryhmän tarkoituksena on ollut edistää oikean tiedon ja akustiikan käsitteiden leviämistä suomeksi, sekä mainostaa alaamme. Olemme pyrkineet korjaamaan akustiikan sivuilla esiintyviä virheitä ja lisäämään viitteitä, mutta myös välttämään aiemman materiaalin poistamista. Tämän lisäksi olemme pohtineet, mitkä puuttuvat sivut olisi tärkeintä laatia seuraavaksi. Vaikka Wikipediaa ei yleisesti pidetä täysin luotettavana tietolähteenä, tutkimusten mukaan useimmat internetistä tietoa hakevat käyvät katsomassa, mitä siellä on kirjoitettu heidän etsimästään asiasta. Täten, jos tietoa akustiikasta on saatavilla runsaasti Wikipediassa, voimme olettaa myös koululaisten, nuorten ja kaikkien asiasta kiinnostuneiden löytävän sen. Tässä artikkelissa kerromme Wikipedian roolista tiedonlähteenä, sivujen laatimismahdollisuuksista ja suunnitelmistamme akustiikan alan Wikipedia-sivujen kehittämiseksi.

1 JOHDANTO

Wikipedia on vapaaehtoisvoimin tuotettu verkkotietosanakirja, joka perustettiin vuonna 2001 [1]. Suomenkielinen Wikipedia aloitti vuotta myöhemmin, ja heinäkuuhun 2019 mennessä sivusto oli laajentunut 304 kielelle [2]. Ensimmäisen vuosikymmenen aikana Wikipediaan kirjoitettiin 3,5 miljoonaa artikkelia [1]. Nykyisin se on yksi maailman suosituimmista internet-sivustoista: Webin data-analyysiin keskittyvän Ahrefsin mukaan vuoden 2019 elokuussa `en.wikipedia.org` oli maailman kolmanneksi suosituin webisivusto, johon kohdistui yli 2,4 miljardia hakua kuukaudessa [3]. Wikipediaa voidaankin pitää yhtenä internet-aikakauden menestystarinoista, joka on demokratisoinut tietosanakirjatiedon: tuoretta tietoa on nyt ilmaiseksi kaikkien saatavilla.

Copyright ©2019 Vesa Välimäki et al. Tämä on avoimesti julkaistu teos, joka noudattaa Creative Commons NIMEÄ 4.0 Kansainvälinen –lisenssiä (CC BY 4.0). Teosta saa kopioida, levittää, näyttää ja esittää julkisesti ja siitä saa luoda johdannaisteoksia, kunhan tekijän nimi ja lähde mainitaan asianmukaisesti.



Kuva 1: *Vuonna 1768 perustettu Encyplopædia Britannica on erittäin huolellisesti toimitettu tietosanakirjasarja. Sen painaminen lopetettiin vuonna 2012 [4], mutta se on edelleen saatavilla sähköisenä versiona.*

Vaikka Wikipedia on ilmeisen suosittu tietolähde, sivustolla on suomeksi vain vähän akustiikka-aiheisia sivuja. Akustiikan alan tiedon avoin julkaiseminen lisää alan näkyvyyttä ja tietämystä, mutta samalla vahvistaa myös yleisön kiinnostusta asiaan. Tässä artikkelissa kerromme Wikipedian roolista tiedonlähteenä, sivujen laatimismahdollisuuksista ja suunnitelmistamme akustiikan alan Wikipedia-sivujen kehittämiseksi.

2 WIKIPEDIA TIETOLÄHTEENÄ

Monet internetistä tietoa hakevat käyvät katsomassa, mitä heidän etsimästään asiasta kerrotaan Wikipediassa [5]. Wikipedia on käytännössä korvannut painetut tietosanakirjasarjat, joita ei enää laadita eikä myydä. Jopa muut verkossa ilmestyneet suomenkieliset tietosanakirjat on lakkautettu [5].

Wikipedia-artikkeleihin on syytä suhtautua kriittisesti, eikä niitä yleisesti pidetä täysin luotettavana tietolähteenä [6]. Kouluissa ja oppilaitoksissa Wikipediaa ei suositella ainoaksi lähteeksi, eivätkä sen artikkelit kelpaa viitteiksi tieteellisissä julkaisuissa. Kuitenkin jo muutama vuosi perustamisensa jälkeen englanninkielinen Wikipedia oli virheiden määrän osalta suurin piirtein yhtä luotettava kuin ammattimaisesti toimitettu Encyplopædia Britannica (ks. kuva 1), joka oli tuolloin arvostetuin painettu tietosanakirja [4] ja joka laajimmillaan koostui 120 000 artikkelista 32 osaan jaettuna. Wikipedian englan-

ninkielisten sivujen lukumäärä ylittää pian 6 miljoonaa. Keskimäärin artikkelien laajuus Wikipediassa vastaa Encyplopædia Britannicaa [7].

Helsingin Sanomien tiedetoimituksen vuonna 2013 tekemän laajan selvityksen mukaan noin 70 % suomenkielisen Wikipedian sivuista oli asiantuntijoiden mukaan erinomaisia tai hyviä tiedonlähteitä ja noin 10 % huonoja tai välttäviä [5]. Wikipedian luotettavuus onkin parantunut vuosien varrella merkittävästi [6]. Sosiaalisen median toimintaperiaatteen mukaisesti ihmiset osallistuvat Wikipedian kirjoittamiseen ja tietojen korjaamiseen oman kiinnostuksensa mukaan, joten erikoistietämys löytää luonnollisesti tiensä oikeaan paikkaan.

Wikipedia-sivuja voi muokata tai perustaa kuka tahansa. Kenenkään ei silti tietääksemme ole pakko kirjoittaa niitä, vaan Wikipedia-sivuja laativat henkilöt, jotka ovat tietystä aiheesta suuresti kiinnostuneita. Kun sivua on muokattu ja se on talletettu, uusi sivu näkyy heti kaikille internetin käyttäjille. Myös sivun entiset sisällöt näkyvät historia-osiossa, vaikka niitä on myöhemmin muokattu tai poistettu. Wikipedian tarkoituksena on antaa kaikille mahdollisuus osallistua, koska se perustuu käyttäjien tuottamaan sisältöön. Siksi toisten henkilöiden työn hedelmiä ei pidä kokonaan tuhota. Parempi on tehdä niihin korjauksia ja lisäyksiä tai muokata artikkelia rakenteellisesti kokonaisuuden parantamiseksi.

Muokattuja sivuja käyvät läpi Wikipedian vapaaehtoiset seulojat, jotka päättävät, onko sivu muutoksen seurauksena parantunut vaiko ei. Jos muutos kelpuutetaan, se saa hyväksymismerkinnän, mutta jos sisältö ei seulojan mielestä parantunut, se poistetaan. Nykyisin noin 25 % muokkauksista poistetaan tämän periaatteen mukaisesti. Näin torjutaan ilkivaltaa, mainostusta ja niin kutsuttuja muokkaussotia.

Wikipedia-sivuille hyväksyttävä materiaali muistuttaa tieteellistä tekstiä, koska vaatimuksena on neutraali asenne ja koska kaikista mainituista faktoista pitää antaa luotettava viite [5]. Käytännössä juuri viitteiden etsiminen ja niiden tekninen toteuttaminen ovat sivujen muokkaamisessa vaikeinta. Muut Wikipedia-sivut eivät kelpaa viitteiksi, mutta niihin suositellaan luotavaksi hyperlinkkejä tekstistä. Suomalaisia Wikipedia-sivuja ajatellen suomenkieliset lähteet olisivat parhaita, koska niiden tarkistaminen sujuu periaatteessa kaikilta lukijoita. Tätä toivetta ei voida kuitenkaan aina täyttää, koska monet asiat kerrotaan englanninkielisissä kirjoissa ja artikkeleissa.

Historialla on Wikipediassa merkittävä rooli. Uuteen sivuun suositellaan kirjoitettavaksi historiaosuus, jossa kuvataan, miten nykytilanteeseen on päädytty. Käytännössä melkein kaikki tieto onkin historiaa, ja nykytilanne on vain tiedon viimeisin ohut kerrostuma. Tulevaisuudesta on varsin vähän kirjoitettavaa.

Yliopistotutkinnon hankkineille Wikipedian viittauskäytäntö on helppo omaksua, mutta kaikilta se ei luonnistu. Viitteet tulee nimittäin toteuttaa wiki-merkintäkielellä, joka muistuttaa HTML-kieltä. Tietotekniikkaa hallitseville viitteiden työstäminen on varsin suoraviivaista, mutta on ilmeistä, että monille se on vaikeaa. Helsingin Sanomien selvityksen perusteella 38 %:ssa suomalaisen Wikipedian artikkeleista viitteiden käyttö on heikkoa tai välttävää [5]. Tietosanakirjatiedon tuotantoprosessia Wikipedia ei ole vielä onnistunut täysin demokratisoimaan.

3 AKUSTIIKKA SUOMENKIELISESSÄ WIKIPEDIASSA

Suomenkielisessä Wikipediassa on akustiikan alan artikkeleita varsin vähän. Tätä julkaisua kirjoitettaessa artikkeleita oli vain 45 kappaletta [8], kun esimerkiksi englanninkielisessä Wikipediassa on 273 artikkelia luokassa ”acoustics”. Lisäksi englanniksi on perustettu 13 akustiikan alaluokkaa, joissa myös on useita artikkeleita [9]. Suomenkielisessä Wikipediassa useilta keskeisiltä akustiikan käsitteiltä puuttui oma sivu, kuten esimerkiksi Helmholtz-resonaattorilta, kaiuttomalta huoneelta ja musiikkiakustiikalta. Kirjoittamishetkellä akustiikan aiheet vaihtelivat perussuureista mielenkiintoisiin akustiikan ilmiöihin, kuten ”kuuman kaakaon ilmiöön” (ks. taulukko 1).

Luokkaan ”akustiikkasuunnittelijat” kuuluivat kirjoittamishetkellä vain sivut Paavo Arnista, Alpo Halmeesta ja Yasuhisa Toyotasta [10]. Vastaavasti englanninkielisessä Wikipediassa luokassa ”acousticians”, joka toki on käsitteenä laajempi kuin suunnittelija, oli 19 nimeä, mm. John William Strutt (Lordi Rayleigh) ja Hermann von Helmholtz [11]. Heistä molemmista oli kirjoitettu artikkelit myös suomeksi, mutta Rayleigh’in työstä akustiikassa ei kerrottu mitään [12]. Lisäksi englanninkielisen Wikipedian luokassa ”acoustic engineers” listattiin 60 henkilöä tai yritystä [13], mutta vastaavaa suomenkielistä luokkaa ei ollut.

Akustiikan Wikipedia-sivuista osa on myös tynkiä. Tynkä tarkoittaa Wikipediassa lyhyttä artikkelia, joka on tiivis johdatus aiheeseen, mutta josta on mahdollista tarjota enemmän oleellista tietoa. Esimerkiksi artikkeli ”Akustinen monopoli” on tynkä: se sisältää vain seitsemän virkettä eikä yhtään viitettä [14]. Asiantuntijan olisi helppo nopeastikin parantaa tätä sivua lisäämällä viite johonkin akustiikan oppikirjaan. Lisäksi hyvissä artikkeleissa on kuvia, mahdollisesti matemaattisia kaavoja ja viittauksia muihin lähteisiin (Aiheesta muualla). Esimerkki hyvästä akustiikka-aiheisesta sivusta on ”Kuulokynnys”, joka on tällä hetkellä luokiteltu yhdeksi noin 3000 lupaavasta artikkelista suomalaisessa Wikipediassa [15].

Taulukko 1: *Suomenkieliset akustiikan artikkelit Wikipediassa 3.9.2019.*

Akustiikka	Akustinen Seura	Akustiikkalevy
Akustinen kierto	Akustinen monopoli	Bassotaajuudet
Desibeli	Fooni	Formantti
Huojunta	Häly	Induktiosilmukka
Jalustin (luu)	Jälkikaiku	Jälkikaiunta-aika
Kaiku	Korvatulppa	Kuulokynnys
Kuuman kaakaon ilmiö	Liitutaulun raapimisääni	Luujohtuminen
Peittoilmiö	PMPO	Psykoakustiikka
Pään siirtofunktio	Rakennusakustiikka	Sointiväri
Sooni	Vastamelukuuloke	Volyymisota
Yliäänipamaus	Yläsävel	Äänekkyys
Äänekkyystaso	Äänen havaitseminen	Äänen nopeus
Ääneneristys	Äänenkorkeus	Äänenpaine
Äänenvoimakkuus	Äänes	Ääni
Äänieriste	Ääniteho	Äänitehotaso

Taulukko 2: *Meluun liittyvät artikkelit Wikipediassa 4.9.2019.*

Lentomelu	Melu	Melueste	Meluvero	Naapurimelu

Akustiikka-luokkaan merkittyjen artikkelien lisäksi Wikipedia toki sisältää paljon materiaalia, joka liittyy akustiikkaan ja audiotekniikkaan. Esimerkiksi monet musiikkiin liittyvistä sivuista esittelevät akustisia periaatteita (musiikkiakustiikkaa), kuten erinomaiset artikkelit harmonikasta [16] ja huuliharpusta [17]. Monilla kaiuttimia [18], kuuloaistia [19] ja melua [20] käsittelevillä sivuilla mainitaan myös akustikoille läheisiä asioita. Luokkaan ”melu” kuului tätä kirjoitettaessa vain viisi artikkelia (ks. taulukko 2).

4 LAAJENNUSSUUNNITELMA AKUSTIIKAN SIVUILLE

Akustisen Seuran vuoden 2019 hallitus on perustanut useita toimikuntia, joista yksi keskittyy viestintään. Viestintätoimikunnan tehtäviin kuuluu muun muassa tuottaa sisältöä akustiikasta suomenkieliseen Wikipediaan. Wikipedia on nykyisin varmin tapa levittää tietoa akustiikasta suomalaisille, koska sillä on enemmän lukijoita kuin millään muulla medialla. Tarkoituksemme on edistää akustiikan alan oikean tiedon ja suomenkielisten käsitteiden leviämistä sekä mainostaa alaamme. Jos tietoa akustiikasta on saatavilla runsaasti Wikipediassa, voimme olettaa koululaisten, nuorten ja kaikkien äänestä kiinnostuneiden löytävän sen. Jotkut heistä voivat innostua opiskelemaan akustiikkaa tulevaisuudessa tai heistä voi tulla akustiikka-alan yritysten asiakkaita.

Olemme pyrkineet parantamaan akustiikka-aiheisten sivujen laatua Wikipediassa korjaamalla virheitä ja lisäämällä viitteitä. Ensimmäiseksi ryhmämme lisäsi tietoa ja viittauksia perussivulle ”Akustiikka” [21]. Tämän pääsivun muokkaamisen lisäksi olemme perustaneet tänä vuonna joitain uusia sivuja, kuten artikkeleita suomalaisista akustiikan professoreista. Havaittuamme akustiikkaan liittyvää tietoa monilla kuuloon ja musiikkiin liittyvillä sivuilla, päätimme sisällyttää jotkut näistä sivuista akustiikan luokkaan (wikitekstin loppuun lisätään seuraava koodi: [[Luokka:Akustiikka]]). Sivuston osallistamisperiaatteiden mukaisesti olemme korjauksia tehdessämme pyrkineet olemaan poistamatta aiempaa materiaalia, vaikka se ei tyydyttäisi akustikkojen mieltymyksiä.

Myös Akustisesta Seurasta on luotu Wikipedia-sivu [22]. Sivusta ei olla tekemässä seuran kotisivua, vaan kuvaus siitä, mikä seura on. Sivustolle aiotaan tulevaisuudessa lisätä merkittäviä seuraan liittyviä asioita, kuten lisätietoa seuran historiasta ja yleisestä toiminnasta. Nämä tiedot vaativat kuitenkin ulkoisia lähteitä, jotta lisäykset voidaan tehdä.

Akustisen Seuran viestintätyöryhmässä olemme pohtineet, mitkä puuttuvat sivut olisi tärkeintä laatia seuraavaksi. Tärkeänä ohjenuorana on, että Wikipediaan saa lisätä sivuja vain merkittävistä asioista. Toisin sanoen lisättävien käsitteiden olemassaolo on osattava perustella riittävän hyvin, jotta myös ulkopuolinen sensori ymmärtää niiden merkittävyyden. Monet akustiikan käsitteet liittyvät kuitenkin tavallisten ihmisten elämään siinä määrin, että ne voidaan tulkita tärkeiksi.

Uusien sivujen laatimiseen voidaan käyttää eri lähestymistapoja. Laatimista voi lähestyä joko *teoria- tai ilmiölähtöisesti*. Teorialähtöisessä lähestymistavassa tarkoituksena on, et-

tä ensin laaditaan artikkelit akustiikan keskeisistä käsitteistä, joista sivustoa laajennetaan arkipäivän sovelluksiin. Ilmiölähtöisessä lähestymisessä edetään puolestaan toiseen suuntaan: ensin kirjoitetaan arkipäivän ilmiöistä, joista johdatellaan lukija itse teorian pariin. Teorialähtöisessä lähestymistavassa perusteet saadaan dokumentoitua nopeasti, mutta tekstin merkittävyyden todistaminen vaatii enemmän työtä. Ilmiölähtöisessä lähestymistavassa merkityksen perustelu on puolestaan helppoa, mutta tällöin ristiinviittaaminen muihin Wikipedia-artikkeleihin on haastavampaa.

Toinen näkökulma sivujen laatimiseen on artikkelien pituus. Luotavat sivut voivat olla tynkiä tai täysimittaisia, joiden lisäksi voidaan hyödyntää käännöstekstejä. Tynkiä artikkeleja on nopea kirjoittaa, mutta niiden uskottavuus kärsii, jos viitteet puuttuvat, ja niiden laatimisessa on myös vaarana sanakirjamaisuus, mikä ei ole Wikipedian tyylin mukaista. Täysimittaiset artikkelit ovat viitteiden takia tynkiä uskottavampi tietolähde, mutta myös raskaampia kirjoittaa.

Yksi helpohko tapa tuottaa uusia suomenkielisiä sivuja onkin kääntää niitä erikielisistä Wikipedia-sivuista, kuten englannista, koska niissä on valmiiksi tarjolla paljon edistynyttä materiaalia. Tämä on Wikipedian sääntöjen mukaan sallittua, kunhan suomalaisella sivulla kerrotaan, että kyseessä on käännös. Suositeltu käytäntö on kuitenkin tuottaa kaikilla kielillä alkuperäisiä artikkeleita. Näin artikkeleihin tulee paikallista väriä, joka voi olla lukijoille kiinnostavampaa kuin universaali selitys. Olisi esimerkiksi parempi, jos suomenkielisellä sivulla meluestettä havainnollistava valokuva olisi otettu Suomessa kuin Keski-Euroopassa.

Akustisen Seuran viestintätyöryhmä ehdottaa akustiikan sivujen täydentämiseksi teorialähtöistä lähestymistapaa. Ensimmäisenä pyrimme täydentämään ilmiöt, joille on jo ristiinviittaamismahdollisuus olemassaolevilla sivuilla. Ilmiöistä kirjoitetaan ensin tynkäversiot ristiinviittaamista varten, jonka jälkeen niitä täydennetään myöhemmin täysimittaisiksi artikkeleiksi. Tynkiä laadittaessa kuitenkin tiedostetaan, että viitteitä tulee käyttää ja että artikkelin tulee kuvata asia kohtuullisen tyhjentävästi, jotta vältetään lisäysten sanakirjamaisuus.

5 POHDINTAA

Työtä Wikipedian akustiikkasivujen parissa riittää vuosiksi eteenpäin, eikä Wikipedia koskaan tule valmiiksi. Paras tapa laajentaa suomenkielistä akustiikan Wikipedia-sivustoa merkittävästi on pyytää vapaaehtoisia (akustikkoja) kirjoittamaan heitä itseään kiinnostavista aiheista. Esimerkiksi äänieristykseen liittyville sivuille sopiva kirjoittaja on joku alalla tällä hetkellä toimiva henkilö, jolla on ajankohtainen tieto ja joka on lisäksi motivoitunut kirjoittamaan asiasta. Tästä syystä pyydämmekin apua jäsenistöltämme, jotta tietoisuus akustiikasta saadaan leviämään Suomessa.

Suomenkielisiä Wikipedia-sivuja on nykyään lähes puoli miljoonaa eli noin 0,1 sivua kansalaista kohti. Yhden Wikipedia-sivun perustanut henkilö on siis 10 kertaa aktiivisempi kuin suomalaiset keskimäärin. Varsin pienellä työmäärällä voi tehdä enemmän tämän asian hyväksi kuin juuri kukaan muu.

6 YHTEENVETO

Tässä artikkelissa kerroimme Wikipedia-verkkotietosanakirjasta ja sen käytöstä akustiikan alan tietämyksen lisäämiseen Suomessa. Wikipedia on nykyään käytännössä ainoa suomenkielinen tietosanakirja, jota päivitetään jatkuvasti. Se on kaikkien ihmisten nähtävissä koko ajan ja on erittäin suosittu, joten todennäköisesti juuri Wikipediasta kansalaiset hakevat tarkkaa tietoa aiheesta kuin aiheesta. Akustiikka-aiheisia suomenkielisiä sivuja on Wikipediassa kuitenkin vähän ja osa niistä on tynkiä eli niistä puuttuu viitteitä tai ne eivät anna riittävää selitystä aiheestaan.

Akustisen Seuran viestintätyöryhmä on täydentänyt ja korjannut tänä vuonna muutamia Wikipedia-sivuja ja luonut uusia, kuten artikkelin Akustisesta Seurasta [22]. Aiomme jatkaa tärkeiksi arvioimiemme aiheiden lisäämistä Wikipediaan. Samalla voimme edistää suomenkielisten akustiikan termien käyttöä. Mielellään näkisimme muiden akustikkojen auttavan tässä laajassa urakassa: mene siis ja perusta akustiikka-aiheinen Wikipedia-artikkeli tai parantele alaamme liittyvää sivua. Jokaisen akustiikan asiantuntijan työpanos on tarpeen. Wikipedia-sivun täydentäminen on asiantuntijalle nopea toimenpide, mutta jokainen uusi akustiikka-aiheinen sivu lisää koko kansan tietämystä akustiikasta!

VIITTEET

[1] Encyclopædia Britannica. Wikipedia, 2019. URL `https://www.britannica.com/topic/Wikipedia`. Katsottu 21.8.2019.

[2] Wikipedia. List of Wikipedias, 2019. URL `https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_Wikipedias`. Katsottu 22.8.2019.

[3] Ahrefs Pte. Ltd. Top 100 most visited websites by search traffic, 2019. URL `https://ahrefs.com/blog/most-visited-websites/`. Katsottu 22.8.2019.

[4] J. Giles. Internet encyclopaedias go head to head. *Nature*, 438:900–901, 2005.

[5] Helsingin Sanomat. HS selvitti: Näin luotettava Wikipedia on, 30.11.2013. URL `https://www.hs.fi/tiede/art-2000002692612.html`. Katsottu 27.8.2019.

[6] YLE. Wikipedia tieteen lähteenä – Ei kai nyt sentään? Onko se edes sopivaa?, 2018. URL `https://yle.fi/uutiset/3-10065693`. Päivitetty 9.2.2018.

[7] Wikipedia. Wikipedia:Size comparisons, 2019. URL `https://en.wikipedia.org/wiki/Wikipedia:Size_comparisons`. Katsottu 19.9.2019.

[8] Wikipedia. Luokka:Akustiikka, 2019. URL `https://fi.wikipedia.org/wiki/Luokka:Akustiikka`. Katsottu 21.8.2019.

[9] Wikipedia. Category:Acoustics, 2019. URL `https://en.wikipedia.org/wiki/Category:Acoustics`. Katsottu 21.8.2019.

[10] Wikipedia. Luokka:Akustiikan_suunnittelijat, 2019. URL https://fi.wikipedia.org/wiki/Luokka:Akustiikan_suunnittelijat. Katsottu 21.8.2019.

[11] Wikipedia. Category:Acousticians, 2019. URL https://en.wikipedia.org/wiki/Category:Acousticians. Katsottu 21.8.2019.

[12] Wikipedia. Lordi Rayleigh, 2019. URL https://fi.wikipedia.org/wiki/Lordi_Rayleigh. Katsottu 21.8.2019.

[13] Wikipedia. Category:Acoustical_engineers, 2019. URL https://en.wikipedia.org/wiki/Category:Acoustical_engineers. Katsottu 22.8.2019.

[14] Wikipedia. Akustinen monopoli, 2017. URL https://fi.wikipedia.org/wiki/Akustinen_monopoli. Katsottu 21.8.2019.

[15] Wikipedia. Kuulokynnys, 2019. URL https://fi.wikipedia.org/wiki/Kuulokynnys. Katsottu 27.8.2019.

[16] Wikipedia. Harmonikka, 2019. URL https://fi.wikipedia.org/wiki/Harmonikka. Katsottu 21.8.2019.

[17] Wikipedia. Huuliharppu, 2019. URL https://fi.wikipedia.org/wiki/Huuliharppu. Katsottu 27.8.2019.

[18] Wikipedia. Luokka:Kaiuttimet, 2019. URL https://fi.wikipedia.org/wiki/Luokka:Kaiuttimet. Katsottu 3.9.2019.

[19] Wikipedia. Luokka:Kuuloaisti, 2019. URL https://fi.wikipedia.org/wiki/Luokka:Kuuloaisti. Katsottu 21.8.2019.

[20] Wikipedia. Luokka:Melu, 2019. URL https://fi.wikipedia.org/wiki/Luokka:Melu. Katsottu 2.9.2019.

[21] Wikipedia. Akustiikka, 2019. URL https://fi.wikipedia.org/wiki/Akustiikka. Katsottu 21.8.2019.

[22] Wikipedia. Akustinen seura, 2019. URL https://fi.wikipedia.org/wiki/Akustinen_Seura. Katsottu 21.8.2019.

HYBRIDIHANKKEIDEN AKUSTINEN SUUNNITTELU

Janne Hautsalo[1], **Jukka Ahonen** [1], **Henri Penttinen** [1], **Olli Salmensaari** [1]

[1] Akukon Oy
Hiomotie 19
00380 HELSINKI
etunimi.sukunimi@akukon.com

Tiivistelmä

Hybridihankkeissa korostuu akustisen suunnittelu monipuolisuus. Hybridihankkeet rakennetaan usein liikenteen solmukohtiin, jolloin hankkeessa tulee varmistaa riittävä liikenteen aiheuttaman melun, runkomelun ja tärinän torjunta. Kauppakeskusten tavara- ja huoltoliikenne aiheuttaa erityisesti runkomelua, joka voi edetä häiritsevänä useankin kerroksen päähän, jollei riittävään runkomelueristykseen kiinnitetä huomiota. Hybridihankkeisiin sisältyy usein myös akustisesti vaativia tiloja kuten elokuvasaleja. Hybridihankkeiden tilasijoittelulla voidaan pyrkiä pienentämään ääneneristyksellisesti vaativien ratkaisujen tarvetta.

1 JOHDANTO

Suomessa on tällä hetkellä rakenteilla useita hybridihankkeita, joissa rakennuskokonaisuus tulee valmistuttuaan palvelemaan useita eri käyttötarkoituksia. Kauppakeskukset toimivat usein julkisen liikenteen solmupisteinä ja niiden yhteyteen rakennetaan yhä useammin myös asuntoja, toimistorakennuksia ja pysäköintilaitoksia. Suurissa hybridihankkeissa rakennuskokoisuuteen kuuluu usein myös hotelleja, elokuvateattereita ja erilaisia tapahtumakeskuksia.

Yhdessä hybridihankkeessa on mukana useita rakennuskokonaisuuteen asettuvia toimijoita, joilla on kaikilla omat tavoitteensa myös akustiikan kannalta. Asuntojen osalta ensisijaisena tavoitteena on tyypillisesti ääniympäristön rauhallisuus ja häiriöttömyys. Liikenteen aiheuttama melu ei saa kantautua sisätiloihin liian voimakkaasti, ja esimerkiksi kaupakeskuksen toiminnasta aiheutuvat äänet, kuten tavaraliikenne ja ravintoloiden musiikkimelu, eivät saa kantautua häiritsevästi asuntoihin. Elokuvateattereissa sekä ääneneristyksen että huoneakustiikan vaatimukset ovat korkeita. Toimistotiloihin sisältyy tyypillisesti akustisesti vaativia avotoimistotiloja ja neuvottelukeskuksia, joiden akustisiin olosuhteisiin tulee panostaa.

2 VIRANOMAISMÄÄRÄYKSET JA OHJEARVOT

Rakentamista koskevat keskeisimmät akustiset vaatimukset on annettu maankäyttö- ja rakennuslakiin (132/1999) nojaavassa Ympäristöministeriön asetuksessa 796/2017 rakennuksen ääniympäristöstä [1]. Asetus koskee hankkeita, jotka ovat tulleet vireille ai-

© 2019 Etunimi1 Sukunimi1, Etunimi2 Sukunimi2 ja Etunimi3 Sukunimi3. Tämä on avoimesti julkaistu teos, joka noudattaa Creative Commons NIMEÄ 4.0 Kansainvälinen –lisenssiä (CC BY 4.0). Teosta saa kopioida, levittää, näyttää ja esittää julkisesti ja siitä saa luoda johdannaisteoksia, kunhan tekijän nimi ja lähde mainitaan asianmukaisesti.

kaisintaan 1.1.2018. Ympäristöministeriö on julkaissut asetusta täydentävän ohjeen rakennuksen ääniympäristöstä [2]. Useissa tällä hetkellä meneillään olevissa rakennushankkeissa noudatetaan vielä Suomen rakentamismääräyskokoelman osaa C1:1998 [3]. Täydentäviä vaatimuksia on esitetty muun muassa standardissa SFS 5907 Rakennusten akustinen luokitus [4].

Rakennusten ulko- ja sisämelutasoja koskevia ohjearvoja on esitetty Valtioneuvoston päätöksessä melutason ohjearvoista [5]. Sisämelutasoja koskevia ohjearvoja on esitetty myös Sosiaali- ja terveysministeriön asetuksessa [6].

Maaperäisen runkomeluun ja tärinään liittyvät vaatimukset on esitetty Ympäristöministeriön asetuksessa [1] sekä ohjeessa [2].

3 HYBRIDIHANKKEIDEN AKUSTISEN SUUNNITTELUN OSA-ALUEITA

3.1 Liikenteen melu, runkomelu ja tärinä

Hybridihankkeet rakennetaan usein liikenteen solmukohtiin ja ne saattavat altistua yhtä aikaa monelle eri liikennemelutyypille. Tie- ja lentoliikenne aiheuttavat rakennusten ulkovaippaan kohdistuvaa ilmaääntä. Raideliikenne aiheuttaa ilmaäänen lisäksi myös rakennuksen perustusten kautta välittyvää runkomelua ja tärinää.

Suurissa hybridihankkeissa tie- ja raideliikenteen melu mallinnetaan yleensä jo aikaisessa hankevaiheessa tavallisesti yhteispohjoismaisia tie- ja raideliikennemelumalleja käyttäen [7, 8]. Tyypillisesti mallinnus tapahtuu kolmiulotteista akustista maasto- ja melulähdemallia hyödyntäen, joka sisältää jo olemassa olevat ja suunnittelut rakennukset, kadut, maaston muodot ja muut meluesteinä toimivat rakenteet sekä ääntä heijastavien tai absorboivien pintojen akustiset ominaisuudet. Melumallinnuksen tuloksia voidaan hyödyntää määritettäessä hankkeen ulkovaipan ääneneristyksen kaavavaatimus.

Annetun ääneneristyksen kaavavaatimuksen tai melumallin avulla määritettyjen ulkovaippaan kohdistuvien liikennemelun äänitasojen perusteella voidaan määrittää ulkovaipan rakennusosilta vaadittavat ääneneristävyydet. Ulkovaipan ääneneristyksen mitoituslaskenta tehdään tyypillisesti Ympäristöministeriön oppaan [9] laskentamenetelmää käyttäen.

3.2 Huolto- ja tavaraliikenteen aiheuttama melu

Liiketilojen tavaraliikenteestä aiheutuu sekä suoraan ilman välityksellä etenevää ilmaääntä että rakenteisiin kytkeytyvää runkoääntä. Erityisesti päivittäistavarakauppojen tavaraliikenne on hyvin vilkasta ja tavaratoimituksia on usein myös yöaikaan (klo 22 - 07), jolloin noudatettavat melutasojen ohjearvot ovat päiväaikaa tiukempia.

Tyypillisesti rakennuksen sisällä tapahtuvan tavaraliikenteen osalta ilmaääntä merkittävämpää häiriötä aiheuttaa runkomelu, joka aiheutuu tavarankuljetukseen käytettävien rullakoiden ja pumppukärryjen työntämisestä lastauslaitureilla, huoltokäytävillä ja liikkeiden tiloissa. Voimakas runkomelu etenee rakennusrungossa helposti useiden kerrosten päähän. Tavarankuljetusreiteillä esiintyvät epätasaisuuskohdat, kuten kynnykset, hissien kynnykset ja liikuntasaumat, aiheuttavat lisäksi impulssimaisia melupiikkejä, jotka etenevät runkomeluna.

Tavaraliikenteen aiheuttaman runkomelun torjunnan kannalta olennaista on laatia arvio melun vaimenemisesta tavarankuljetusreitin ja häiriintyvän kohteen, esimerkiksi asuinhuoneiston, välillä. Mikäli näiden välinen etäisyys on riittävän pitkä, ei erityisiä runkomelun vaimennustoimenpiteitä välttämättä tarvita. Tavarankuljetusreittien runkomelueristystä voidaan parantaa esimerkiksi tekemällä reiteistä ns. kelluvia, tyypillisesti toteuttamalla teräsbetonirakenteinen laatta joustavan runkomelueristemateriaalin päälle. Samoin lastauslaiturit, niihin liittyvät kuormaussillat ja vastaavat tulee tarpeen mukaan toteuttaa kelluvin ratkaisuin.

Joissakin tapauksissa on mahdollista sijoittaa tehokkaasti runkomelua vaimentava liikuntasauma runkomelulähteen ja häiriintyvän kohteen väliin. On huomattava, että tavanomaisen rakenteellisen liikuntasauman äänenvaimennus voi olla vähäistä, mikäli liikuntasauman akustiseen toimivuuteen ei ole kiinnitetty huomiota.

Tavara- ja huoltoliikenteestä aiheutuu myös ilmaääntä, joka saattaa edetä rakennuksen ulkovaipan läpi melulle herkkiin tiloihin. Raskaiden ajoneuvojen pientaajuinen ääni läpäisee erityisesti ikkunarakenteet ja kevyet ulkoseinärakenteet helpommin kuin henkilöautojen ääni. Lisäksi tavaranpurku saattaa tapahtua ulkoalueilla, jolloin tavaroiden liikuttelusta kuorma-auton lavalla ja ulkoalueilla aiheutuu melua. Meluhäiriötä voidaan vähentää panostamalla tavallista enemmän melulle kohdistuvien melulle herkkien tilojen ulkovaipan rakenteiden ääneneristävyyteen. Mahdollisuuksien mukaan tavarankuljetus- ja huoltoreittejä voidaan sijoittaa niin, että ne eivät sijaitse asuntojen ikkunoiden välittömässä läheisyydessä.

3.3 Akustiset vaativat tilat

Usein hybridihankkeisiin sisältyy akustisesti sinällään vaativia tiloja. Suuriin kauppakeskuksiin kuuluu yleensä esim. elokuvakeskus. Tavallisesti elokuvasalit toteutetaan ns. kelluvin rakentein, eli elokuvasalien sisäkuori (so. lattian, ääntäeristävän alakaton ja seinien sisärunkojen muodostama kokonaisuus) erotetaan muusta rakennusrungosta tärinäeristetysti. Tyypillisesti elokuvasalien lattiarakenteena on mineraalivillan tai muun elastisen materiaalin päällä ”kelluva” teräsbetonilaatta, jonka päälle elokuvasalin seinärakenteet ja sisärakenteet toteutetaan. Elokuvasalien jälkikaiunta-ajan tulee olla lyhyt, mikä edellyttää tehokasta huoneakustista vaimennusta. Tehokas bassotaajuuksien vaimennus edellyttää tavanomaista toimitilarakentamista paksumpien äänen absorptiomateriaalien käyttöä, mikä tulee huomioida riittävin tilavarauksin.

Hybridihankkeiden yhteyteen rakennetaan usein eri kokoisia esitystiloja ja ravintoloita, joissa syntyvät äänitasot asettavat ympäröivien rakenteiden ääneneristykselle korkeita vaatimuksia varsinkin, jos lähellä on asuntoja, hotellihuoneita tai muita häiriölle erityisen alttiita tiloja.

Kuntosalit ja tanssisalit aiheuttavat runkomelua ja tärinää sekä ilmaääntä. Kuntosalin aiheuttama runkomelu ei välttämättä kuulu itse salissa muun taustamelun yli, mutta se kantautuu rakennusrunkoa pitkin jopa kymmenen kerroksen päähän. Kuntosaleilla runkomelua aiheuttavat mm. painonnostoalueet, käsipainot, painopakkalaitteet ja heitettävät kuntopallot. Ryhmäliikunnan ja tanssin aiheuttamaa tärinää ei usein kuulla vaan se havaitaan välipohjan värähtelynä tai esimerkiksi pöytien ja lamppujen heilumisena. Kuntosaleilla toistettava musiikki voi aiheuttaa meluhaittoja lähimpiin tiloihin. Ilmanvaihtoputket, joissa ei ole äänenvaimentimia, ja jäykästi rakennusrunkoon kiinnitetyt kaiuttimet johtavat melua naapuritiloihin.

3.4 Taloteknisten laitteiden melu

Suuriin hybridihankkeisiin sisältyy valtava määrä talotekniikkaa. Akustisen suunnittelun kannalta keskeinen hybridihankkeisiin liittyvä haaste on hallita suuri määrä erilaisia melulähteitä. Erityisesti suunnittelussa tulee huomioida, että asunnot ja muut häiriölle alttiit tilat eivät altistu muita tiloja palvelevien laitteiden, ohjearvot ylittävälle melulle.

3.5. Tilasijoittelun vaikutus

Tilasijoittelun avulla voidaan pienentää riskiä, että hybridihankkeiden toiminnot häiritsevät toisiaan ja samalla vähentää ääneneristyksellisesti vaativien ratkaisujen tarvetta. Esimerkiksi ravintolatiloja ja tavarankuljetusreittejä voidaan sijoittaa mahdollisimman kauas asunnoista. Mikäli liikuntakeskus voidaan sijoittaa mahdollisimman kauas häiriöille alttiista tiloista, kevennetään liikuntakeskuksen vaatimien runkomelueristysratkaisujen vaatimuksia.

3.6 Akustiset koemittaukset

Useissa tapauksissa akustisten ratkaisujen mitoittaminen on hankalaa, sillä melulähteestä ei ole saatavilla tarkkoja lähtötietoja eikä erityisesti runkomelun etenemistä rakennuksessa voida kaikissa tapauksissa mallintaa kovin tarkasti. Tällöin tapauskohtaisesti arvioinnin apuna voidaan käyttää kohteessa tehtäviä akustisia koemittauksia. Esimerkiksi tavarankuljetusreitin runkomelueristystarvetta voidaan arvioida kohteessa tehtävin koemittauksin, mikäli lopullinen päätös toteutustavasta voidaan tehdä kyseisessä vaiheessa, joka on tyypillisesti melko myöhäinen suunnittelutyön kannalta.

Hybridihankkeiden osakokonaisuuksien valmistumisen yhteydessä voidaan tiloissa tehdä akustisia mittauksia, esim. ilmaääneneristys- ja askeläänentasomittauksia, joiden avulla voidaan tarkastaa akustisten vaatimusten toteutuminen valmiissa tiloissa.

4 MERKITTÄVIÄ HYBRIDIHANKKEITA

4.1 Keski-Pasilan Tripla

Tripla on Helsingin Pasilan rautatieaseman yhteyteen rakennettava, kolmesta korttelista koostuva kokonaisuus, joka valmistuu vuosien 2019 - 2020 aikana. Triplaan valmistuu muun muassa Pasilan uusi asema, kauppakeskus, elokuvakeskus, ravintoloita, toimistoja, asuntoja, hotelli sekä musiikkimuseo.

Triplan akustinen suunnittelu alkoi kaupunkisuunnitteluvaiheessa vuonna 2014. Hankkeessa laadittiin ensimmäisessä vaiheessa runkomelu- ja tärinäselvitys. Selvityksen lähtötiedoksi Pasilan vanhan asemarakennuksen tiloissa selvitettiin juna- ja raitioliikenteen aiheuttamaa tärinää ja runkomeluherätettä asemahallin tasolla ja laituritasolla tehdyin värähtelymittauksin. Alueen kaavoitukseen liittyen hankkeesta laadittiin kolmiulotteinen liikennemelumalli, jonka avulla analysoitiin ulkovaippaan kohdistuvat liikennemelun äänitasot. Liikennemelun mallilaskennan tulosten perusteella asetettiin kaavamääräykset hankkeen ulkovaipan ääneneristykselle yhteistyössä kaupunkisuunnitteluviraston kanssa.

Myöhemmissä suunnitteluvaiheissa Triplan akustiseen suunnitteluun on kuulunut muun muassa seuraavia osa-alueita:

- junaliikenteen ja raideliikenteen runkomelueristysten suunnittelu

- ulkovaipan ääneneristyksen mitoituslaskenta
- hotellin, toimistojen ja neuvottelutilojen akustinen suunnittelu
- elokuvakeskuksen, tapahtuma-alueiden ja musiikkimuseon akustinen suunnittelu
- kauppakeskuksen huoneakustinen suunnittelu
- asuinrakennusten akustista suunnittelua
- ravintoloiden aiheuttaman melun arviointia ja melun edellyttämien ääneneristysratkaisujen suunnittelua
- kauppakeskuksen tavarankuljetusliikenteen aiheuttaman runkomelun ja tarvittavien eristysratkaisujen suunnittelu
- talotekniikan aiheuttaman ympäristömelun mallinnus ja äänenvaimennustarpeiden määrittely
- esitysteknistä suunnittelua ja AV-suunnittelua
- kuntosalin aiheuttaman runkomelun torjunta akustisin kellutuksin sekä ryhmäliikunnan aiheuttaman tärinän huomioiminen jäykistävin rakentein

4.2 Kalasataman Redi

Helsingin Kalasatamassa sijaitseva Redi koostuu kauppakeskuksesta, pihakannesta puistoalueineen sekä kahdeksasta asuin-, hotelli- ja toimistokäyttöön tarkoitetusta korkeasta tornitalosta. Näistä kauppakeskus ja osa pihakannen puisto- ja oleskelualueista ovat valmistuneet vuonna 2018. Ensimmäinen asuinkäyttöön tarkoitettu tornitalo valmistuu vuoden 2019 lopussa. Koko hankkeen on suunniteltu valmistuvan vuonna 2023.

Redin kauppakeskus sijoittuu pihakannen alapuolelle ja tornitalot sen yläpuolelle. Kauppakeskusrakennus rajoittuu vilkasliikenteisen Itäväylän silta- ja tunnelirakenteisiin sekä metrosiltaan. Käytännössä siis Itäväylän tieliikenne ja metroliikenne kulkevat kauppakeskuksen tilojen läpi, mikä on asettanut merkittäviä haasteita melun ja tärinän torjunnan suunnittelulle. Lisäksi kauppakeskuksen sisälle on sijoitettu koko kauppakeskuksen korkuinen vapaalento-tuulitunneli, jossa suuritehoinen sähkömoottori tuottaa enimmillään 300 km/h nopeudella kulkevan ilmavirran suljettuun putkeen. Vapaalento-tuulitunnelin tuottamaa voimakasta melua ja tärinää on torjuttu irrottamalla tuulitunnelin rakenteet ympäröivästä rakennusmassasta, riittävästi ääntäeristävillä rakenteilla ja yksityiskohtaisesti suunnitelluilla äänenvaimentimilla tuulitunnelin jäähdytysilman tulo- ja poistokammioissa.

Redin akustinen suunnittelu aloitettiin vuonna 2011, ensin Kalasataman kaavamuutoksen meluselvityksellä sekä runkomelu- ja tärinäeristystarpeen selvittämisellä värähtelytekni-sin mittauksin. Nämä selvitykset ovat toimineet lähtötietoina mm. tornitalojen julkisivurakenteiden ääneneristyksen suunnittelussa ja runkomelun sekä tärinän torjunnan suunnittelussa. Muita Redin akustiseen suunnitteluun kuuluvia tehtäviä ovat mm.:

- tornitalojen sisäpuolisen ääneneristyksen ja meluntorjunnan suunnittelu

- elokuvakeskuksen ääneneristyksen suunnittelu
- kuntosalin ääneneristyksen sekä runkomelun ja tärinän torjunnan suunnittelu
- kauppakeskuksen huoneakustinen suunnittelu

4.3 Tampereen kansi ja areena

Tampereen keskustaan rakennetaan rautatien päälle kansi, jonka päälle valmistuu noin 13 000 katsojaa vetävä monitoimiareena, jossa järjestetään jääkiekko-otteluita, konsertteja ja kongresseja. Kannen päälle rakennetaan myös toimisto- ja liiketiloja, asuntoja, hotelli ja kasino.

Kansi ja areena -hankkeessa raideliikenteen aiheuttamaa runkomelua on torjuttu ratatasolla ja siltakannella sijaitsevilla joustavilla akustisilla kellutuksilla. Poikkeuksellisen lyhyet etäisyydet kiskoihin (pienimmillään < 5 m), alueen vaihteet ja siltakannen dynaaminen joustavuus tekee kohteen runkomelu- ja tärinäsuunnittelun haastavaksi. Kohteen suunnittelussa on huomioitu koko resonanssiketju, ratatasolta siltakannelle sekä kellutetuista rakennuksista välipohjiin saakka. Lähes kaikki Kansi ja areena -hankkeen rakennusrunkojen osat on kellutettu joustavasti siltakannen tasolla.

Monitoimiareenan musiikki on huomioitu sekä akustiikkasuunnittelussa että rakennuksen ulkovaipparakenteissa. Tapahtumamelun aiheuttama melukuorma on niin merkittävä, että musiikkimelu on huomioitu sekä Areenan katon että hotellin ja asuintornien julkisivujen suunnittelussa. Musiikkimelun pientaajuisen jylinän vaimentaminen vaatii selvästi enemmän massaa, suurempia ilmavälejä kuin normaalirakentamisessa sekä joissain detaljeissa akustisesti kellutettuja ratkaisuja. Monitoimiareenan sisäpuolinen akustiikka on suunniteltu kolmiulotteista akustista mallia hyödyntäen.

4 YHTEENVETO

Erityisesti suurissa hybridihankkeissa akustisen suunnittelun tarve on hyvin laajaa ja se voi ulottua ajallisesti hankkeen alkuvaiheiden melu-, tärinä- ja runkomeluselvityksistä aina vastaanoton akustisiin tarkistusmittauksiin.

Hybridihankkeiden akustisen suunnittelun lisähaasteena on varmistaa, että eri toiminnot eivät aiheuta toisilleen meluhäiriötä. Tyypillinen esimerkki on kauppakeskuksen yhteyteen rakennetut asunnot, joita kauppakeskuksen tavarankuljetusliikenteen aiheuttama runkomelu ei saa häiritä liiallisesti. Suunnittelussa on arvioitava runkomelun vaimenema ja määriteltävä riittävät runkomelun torjuntaratkaisut.

Hybridihankkeisiin kuuluu usein akustisesti sinällään vaativia tiloja, kuten elokuvakeskuksia tai muita tiloja, joissa ääneneristysvaatimukset ja huoneakustiikan vaatimukset ovat korkeita.

VIITTEET

[1] Ympäristöministeriön asetus rakennuksen ääniympäristöstä 796/2017

[2] Ääniympäristö – Ympäristöministeriön ohje rakennuksen ääniympäristöstä. Ympäristöministeriö, Helsinki 2018.

[3] Suomen rakentamismääräyskokoelma C1 – Ääneneristys ja meluntorjunta rakennuksessa, määräykset ja ohjeet 1998. Ympäristöministeriö, Helsinki 1998.

[4] Rakennusten akustinen luokitus, SFS 5907. Suomen standardisoimisliitto SFS, Helsinki 2004.

[5] Valtioneuvoston ohje melutasojen ohjearvoista 993/1992. Helsinki 1992.

[6] Sosiaali- ja terveysministeriön asetus asunnon ja muun oleskelutilan terveydellisistä olosuhteista sekä ulkopuolisten asiantuntijoiden pätevyysvaatimuksista 545/2015.

[7] Road traffic noise – Nordic Prediction Method. TemaNord 1996:525. Nordic council of ministers. 110 s. Tieliikennemelun laskentamalli, Ohje 6/1993. Ympäristöministeriö, Helsinki 1993.

[8] Raideliikennemelun laskentamalli. Ympäristöopas 97. Ympäristöministeriö, Helsinki 2002. 58 s.

[9] Ympäristöopas 108, Rakennuksen julkisivun ääneneristävyyden mitoittaminen. Ympäristöministeriö, Helsinki 2003.

[10] Huttunen, Erno & Taina, Pekka: Hybridi haastaa akustiikan. Ympäristö ja Terveys -lehti 2/2019, sivut 12 – 16, Pori 2019.

ÄÄNIYMPÄRISTÖ HYBRIDIRAKENTAMISESSA

Pekka Taina[1], **Erno Huttunen** [2]

[1] Helimäki Akustikot Oy
Temppelikatu 6 B
00100 HELSINKI
pekka.taina@helimaki.fi

[2] Helimäki Akustikot Oy
Asemakatu 22-24
70100 KUOPIO
erno.huttunen@helimaki.fi

Tiivistelmä

Maankäytön ja kaupunkirakenteiden tiivistyessä myös hybridirakentaminen on lisääntynyt huomattavasti. Hybridirakentamisessa erityyppisiä toimintoja sijoittuu samaan rakennusmassaan. Osa toiminnoista voi olla hyvin meluisia ja toisaalta osa toiminnoista edellyttää ehdotonta häiriöttömyyttä. Tästä seuraa erityisiä vaatimuksia myös kohteiden akustiikkasuunnittelulle. Tässä selvityksessä esitetään hybridirakennushankkeen akustiikkasuunnittelun lähtökohtia, hybridihankkeissa korostuvia ääniympäristön riskejä ja riskien huomioimista akustiikkasuunnittelussa.

1 JOHDANTO

Maankäytön ja kaupunkirakenteiden tiivistyessä on hybridirakentaminen lisääntynyt huomattavasti. Hybridirakentamisella tässä selvityksessä tarkoitetaan rakentamista, jossa samaan rakennusmassaan sijoittuu ääniympäristöltään hyvin erityyppisiä toimintoja. Osa toiminnoista tuottaa huomattavaa melu- ja värähtelykuormitusta rakennuksen runkoon, kun taas osa toiminnoista vaatii hyvin hiljaista ja rauhallista ääniympäristöä. Hybridihankkeet sijoittuvat usein vilkkaiden liikenneväylien välittömään läheisyyteen. Nämä seikat tuottavat normaalia huomattavasti suurempia vaatimuksia kohteen melun ja tärinäntorjunnalle.

2 VAATIMUKSET ÄÄNIYMPÄRISTÖN SUUNNITTELULLE

2.1 Suunnittelun vaatimustasot

Rakennustuoteasetuksessa [1] esitettyjen rakennuskohteen perusvaatimusten mukaan rakennuskohteen kokonaisuudessaan ja sen erillisten osien on sovittava aiottuun käyttötarkoitukseensa ottaen erityisesti huomioon asianomaisten henkilöiden terveys ja turvalli-

© 2019 Pekka Taina ja Erno Huttunen. Tämä on avoimesti julkaistu teos, joka noudattaa Creative Commons Nimeä 4.0 Kansainvälinen –lisenssiä (CC BY 4.0). Teosta saa kopioida, levittää, näyttää ja esittää julkisesti ja siitä saa luoda johdannaisteoksia, kunhan tekijän nimi ja lähde mainitaan asianmukaisesti.

suus rakennuskohteen koko elinkaaren ajan. Rakennuskohteen on täytettävä nämä rakennuskohteen perusvaatimukset tavanomaisella kunnossapidolla koko sen taloudellisesti kohtuullisen käyttöiän ajan. Rakennuskohde on suunniteltava ja rakennettava siten, että melu, jolle rakennuskohteen käyttäjät tai sen lähellä olevat henkilöt altistuvat, pysyy tasolla, joka ei vaaranna heidän terveyttään ja mahdollistaa heidän nukkumisensa, lepäämisensä ja työskentelemisensä tyydyttävissä olosuhteissa.

Ympäristöministeriön julkaiseman asetuksen 796/2017 rakennuksen ääniympäristöstä (nk. ääniympäristöasetus) [2] mukaan rakennuksen ääniympäristöä koskeva olennainen tekninen vaatimus täyttyy, jos rakennuksen ääneneristys, melun- ja tärinäntorjunta sekä ääniolosuhteet suunnitellaan ja toteutetaan tilan käyttötarkoitus huomioon ottaen asetuksen mukaisesti.

Hybridihankkeissa lisäksi huomioidaan Sosiaali- ja terveysministeriön julkaisema asetus 545/2015 asunnon ja muun oleskelutilan terveydellisistä olosuhteista sekä ulkopuolisten asiantuntijoiden pätevyysvaatimuksista (nk. asumisterveysasetus) [3]. Molempiin asetuksiin liittyy perustelumuistio sekä tarkempia ohjeistuksia [4, 5, 6]. Julkaisuissa annetaan akustisiin olosuhteisiin liittyviä vaatimustasoja teknisinä mittalukuina. Vaatimustasoja voi lisäksi olla erikseen esitettynä rakennushankkeen alueen asemakaavassa, tilojen käyttäjien omassa dokumentaatiossa, ympäristösertifikaateissa tai muualla kirjallisuudessa.

Asemakaavoissa esitetyt vaatimukset kohteen suojaamiseksi melulta ja tärinältä on selvitetty kaavoitustyön yhteydessä. Kaavassa saatetaan antaa vaatimuksia myös rakennuksesta ulospäin suuntautuvalle melulle ja tärinälle. Mikäli kaava on vanha tai on syytä epäillä siinä esitettyjen vaatimusten paikkansapitävyyttä, jää melun ja tärinään liittyvä vaatimusten määrittely hankkeissa akustiikan asiantuntijan varaan.

2.3 Suunnittelun vaativuus

Modernissa hybridirakentamisen hankkeessa on akustiikkasuunnittelijan kiinnittäminen suunnitteluryhmään välttämätöntä onnistuneen lopputuloksen varmistamiseksi. Hankkeen laajuudesta ja sisällöstä riippuen hybridirakennuksen akustiikkasuunnittelu voidaan tulkita vähintään vaativaksi (V) suunnittelutehtäväksi – joissain tapauksissa jopa poikkeuksellisen vaativaksi (PV) suunnittelutehtäväksi [7].

3 ÄÄNIYMPÄRISTÖÖN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

3.1 Rakennuspaikan melu- ja tärinäolosuhteet

Ääniympäristöasetuksen [2] 3§ edellytetään rakennuspaikan melu- ja tärinäolosuhteiden huomioiminen rakennuksen suunnittelussa ja toteutuksessa. Rakennuspaikan melu- ja tärinäolosuhteet muodostuvat ympäristön melua ja tärinää tuottavien toimintojen päästöistä. Tällaisia toimintoja yleisimmin ovat tie- ja raideliikenne, mutta myös muita toimintoja voi olla. Hybridirakentamisessa rakennuspaikan olosuhteiden huomioiminen ei periaatteiltaan poikkea muusta rakentamisesta. Ilmiö kuitenkin korostuu hybridihankkeiden sijoittuessa useimmiten vilkkaiden liikenneväylien solmukohtiin. Hybridirakennukset voivat myös sijoittua liikenneväylien päälle, jolloin melun- ja tärinäntorjunnan suunnittelu muodostuu normaalia vaativammaksi. Lisäksi hybridirakentamisen yhteydessä voi ympäristöön sijoittua myös uutta liityntäpysäköintiä, joka on huomioitava melun- ja tärinäntorjunnan suunnittelussa.

3.2 Rakennukseen sijoittuvien tilojen ja toimintojen melu- ja tärinäolosuhteet

Tässä käsiteltävän hybridirakentamisen erityispiirre on akustiikan kannalta hyvin erilaisten toimintojen sijoittuminen samaan rakennusmassaan. Erilaisten toimintojen huomioimista suunnitteluvaiheessa edellytetään ääniympäristöasetuksen [2] 4§: ”Jos asunto, majoitus- tai potilashuone kytkeytyy rakenteellisesti tiloihin, joissa syntyy voimakasta, erityisen häiritsevää tai pienitaajuista ääntä, riittävän ääneneristyksen toteutumiseen on kiinnitettävä suunnittelussa ja toteutuksessa erityistä huomiota”.

Mahdollisia häiriölähteitä ovat esimerkiksi taloteknisten laitteiden toiminta tai liiketiloissa sekä huolto- ja lastaustiloissa tapahtuva toiminta. On huomioitavaa, että osa meluherkkien tilojen toiminnasta voi myös toimia häiriölähteenä muiden ympäröivien tilojen näkökulmasta. Esimerkki tällaisesta on elokuvateatterin näytöksissä syntyvä voimakas ääni, joka voi siirtyä samassa tai naapurikiinteistössä sijaitsevaan asuntoon häiritsevästi.

4 ÄÄNIYMPÄRISTÖN SUUNNITTELU JA TOTEUTUS

4.1 Tunnistaminen

Ääniympäristön suunnittelua varten hybridirakentamisessa on ensin tunnistettava melulle herkät tilat sekä mahdolliset häiriölähteet. Meluherkiksi tiloiksi voidaan tässä katsoa sellaiset tilat, joita ympäristöstä ja rakennuksen sisältä kohdistuva melu- ja värähtelykuormitus voi häiritä. Tällaisia tiloja ovat esimerkiksi asunnot, hoivakodit, koulut, päiväkodit ja toimistotilat. Erityyppisissä tiloissa on usein hyvin erityyppisiä vaatimustasoja akustisten olosuhteiden osalta ja ne on hankkeissa aina listattava teknisinä arvoina suunnittelun tueksi.

4.2 Vaatimustasojen määrittely

Melulle herkkien tilojen ja melua ja tärinää tuottavien tilojen ja toimintojen tunnistamisen jälkeen melun- ja tärinäntorjunnan vaatimustasot voidaan määritellä ja erilaiset niihin liittyvät riskit arvioida. Vaikutukset suunnitteluun määrittyvät yhdessä häiriintyvän tilan teknisen vaatimustason, melu- ja värähtelylähteiden voimakkuuden sekä näiden keskinäisen sijoittumisen kautta.

Suunnitteluvaiheessa olennaista tietoa on herätteen voimakkuus. Joissain tapauksissa se on tunnettu tai se voidaan mitata, kuten talotekniset laitteet tai maaliikenne. Joissain tapauksissa herätteen voimakkuus ja tapahtumatiheys voivat olla hyvin satunnaisia, kuten esimerkiksi lastaustilojen toiminnot. Voimakkuuden lisäksi suunnittelun tueksi tarvitaan tietoa herätteiden taajuussisällöstä ja mahdollisesta impulssimaisuudesta.

Hybridirakennuksessa toimintojen sijoittumisella toisiinsa nähden on suuri merkitys melun ja tärinäntorjunnan toimenpiteiden laajuuden kannalta. Toimintojen sijoittumisella voidaan osaltaan vaikuttaa ääneneristysrakenteiden tarpeeseen ja laajuuteen. Jotkin toiminnot ovat luonteeltaan sellaisia, ettei edes niiden sijoittaminen kauas melulle herkistä toiminnoista riitä melun ja tärinäntorjunnan näkökulmasta, mikäli ne kuitenkin sijoittuvat samaan rakennusmassaan.

4.3 Suunnittelu

Melua ja tärinää voidaan vaimentaa joko häiriölähteessä, siirtotiellä tai häiriintyvässä kohteessa. Vaikutuksiltaan ja usein myös kustannuksiltaan tehokkainta vaimentaminen

on aina häiriölähteessä, koska tällöin toimenpiteestä hyötyvät kaikki lähistöllä olevat häiriintyvät kohteet. Lähteessä vaimentaminen voi rakennuksen sisäisten lähteiden osalta käytännössä tarkoittaa esimerkiksi pehmeiden pyörien asentamista huoltoliikenne- ja lastausalueella käytettäviin pumppukärryihin ja rullakoihin, tai hiljaisempien taloteknisten laitteiden ja järjestelmien valintaa. Rakennuksen ulkopuolelta kantautuvan häiriön osalta lähteessä eristäminen voi tarkoittaa esimerkiksi kiskoilla liikennöivän kaluston kunnostamista tai uusimista tai nopeusrajoitusten kiristämistä.

Siirtotiellä tarkoitetaan tässä tapauksessa sitä reittiä, mitä pitkin häiriö siirtyy lähteestä häiriintyvään kohteeseen. Siirtotiellä melu- ja tärinäkuormituksen vaimentaminen on yleinen ratkaisu ja se voi tarkoittaa hyvin montaa eri asiaa. Esimerkkeinä tästä ovat kytkennän heikentäminen häiriölähteen ja rakennuksen rungon välillä (taloteknisten laitteiden tärinäeristykset, liikenneväylien tärinäeristykset, rakennusten perustusten tärinäeristykset), ääntä- ja värähtelyä vaimentavien rakenteiden käyttö, meluesteet liikenneväylien varrella, liikuntasaumat, äänenvaimentimet ja laitteiden koteloinnit.

Vaimentaminen häiriintyvässä kohteessa on yleensä vähiten kustannustehokas ratkaisu, mutta joissain tapauksissa ainoa mahdollinen. Kohteessa vaimentamisella voidaan tarkoittaa esimerkiksi kohteessa tehtäviä lisärakenteita (ääntä säteilevien pintojen verhoukset), tärinäeristyksiä (kelluvat lattiat) ja äänenvaimennusratkaisuja (huonevaimennuksen lisääminen).

4.4 Toteutus

Onnistuneen lopputuloksen aikaansaaminen vaatii laadukkaan suunnittelun lisäksi huolellista toteutusta, jota edesauttaa työmaan hyvä ja selkeä ohjeistus sekä jatkuva yhteydenpito työmaan ja suunnittelijan välillä. Vaativissa kohteissa voidaan tarvittaessa suorittaa akustiikkasuunnittelijan asiantuntijavalvontaa työmaalla. Valvonnan lisäksi työvaiheiden ja kokonaisuuden onnistumista voidaan tarkastaa työmaa-aikana ja käyttöönoton yhteydessä akustisilla mittauksilla.

VIITTEET

[1] Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EU) N:o 305/2011 (EUR-Lex) rakennustuotteiden kaupan pitämistä koskevien ehtojen yhdenmukaistamisesta ja neuvoston direktiivin 89/106/ETY kumoamisesta.

[2] Ympäristöministeriön asetus rakennusten ääniympäristöstä 796/2017.

[3] Sosiaali- ja terveysministeriön asetus asunnon ja muun oleskelutilan terveydellisistä olosuhteista sekä ulkopuolisten asiantuntijoiden pätevyysvaatimuksista 545/2015.

[4] Perustelumuistio koskien Ympäristöministeriön asetusta rakennusten ääniympäristöstä. 24.11.2017

[5] Ympäristöministeriön ohje rakennusten ääniympäristöstä. 2018.

[6] Asumisterveysasetuksen soveltamisohje, Osa II. Ohje 8/2016. Sosiaali- ja terveysalan lupa- ja valvontavirasto Valvira.

[7] Hakemus akustiikkasuunnittelijan pätevyyden toteamiseksi. FISE Oy. 2018.

Tuulivoimalan lavan aiheuttama häiriövirtaus ja melu

Matti A Ranta[1], Laila Hosia[2]

[1] Aalto-yliopisto
Perustieteiden korkeakoulu
Matematiikan ja systeemianalyysin laitos
PL 1100, 02015 Espoo
matti.ranta@aalto.fi

[2] Nallenpolku 2 C 38
02110 Espoo
laila.hosia@gmail.com

Tiivistelmä

Tässä esityksessä keskitytään kolmilapaisen tuulivoimalan lavan aiheuttaman häiriövirtauksen laskennalliseen tutkimiseen ja arvioidaan häiriövirtauksesta syntyvä ääni esimerkkitapauksessa. Lähtöoletuksena on lentokoneen siiven ja tuulivoimalan lavan aiheuttaman häiriövirtauksen samankaltaisuus. [4]...[7].

1. Johdanto, aerodynamiikka

Tuulivoimalan esikuva on tuulimylly, joka tunnettiin Persiassa jo 600-luvulla. Ristiretkeilijät toivat tuulimyllyn Eurooppaan1100 luvulla. Sitä käytettiin lähinnä veden nostamiseen ja viljan jauhamiseen. Nykyaikaista tuulivoimalaa käytetään ennen muuta sähkön tuottamiseen. [1], [2] ja [10].
Tuulivoimaloiden yleistyttyä niitä on noussut asutuksen lähelle, jolloin on tullut valituksia tuulivoimalan aiheuttamasta melusta. Melua on ruvettu mittaaman ja pohtimaan sen vähentämisen mahdollisuuksia.

Vastus- ja nostovoima. Tuulivoimalassa on pyörivä roottori, jossa on napa ja siinä yleensä kolme lapaa. Lapojen koko ja profiili vaihtelevat voimalatyypin mukaan, Lapojen pyöriessä tuulessa lapoihin kohdistuu vastusvoima D ja sitä vastaan kohtisuora nostovoima L. [4]

$$D = C_D(\alpha)\tfrac{1}{2}\rho w^2 c \qquad L = C_L(\alpha)\tfrac{1}{2}\rho w^2 c \qquad (1)$$

$$C_D = C_D(\alpha) = C_{D0} + \frac{C_{L\alpha}{}^2}{\pi A}\alpha^2 \qquad C_L = C_L(\alpha) = C_{L0} + C_{L\alpha}\alpha \qquad (2)$$

Lapojen C-kertoimet riippuvat siipiprofiilista sekä tuulen ja lavan välisestä kohtauskulmasta α [rad] [4], C-kertoimet ovat myös toisistaan riippuvat.

Oletetaan, että lapaprofiili on suorakaide, jonka leveys c on vakio. Lavan sisäsäde pyörimisakselista on R_0 ja lavan ulkosäde R. Lavan sivusuhde on $A = (R-R_0)^2 / c(R-R_0)$. Ilman tiheys on ρ ja tuulen nopeus on *w*.

pituus^2 pinta-ala

Lapaan vaikuttavien voimien resultantti on

$$F = \sqrt{C_L^2 + C_D^2}\, \tfrac{1}{2}\rho w^2 \quad . \tag{3}$$

Sirkulaatio ja kiertovirtaus. Sirkulaatioksi kutsutaan nopeusvektorin viivaintegraalia suljetun käyrän ympäri $\Gamma = \oint \bar{ds} \cdot \bar{v}$ sen dimensio on $[\Gamma] = \mathrm{m^2 s^{-1}}$. Jos nopeus on vakio ja käyrä on *r*-säteinen ympyrä, seuraa siitä $\Gamma = 2\pi r v$. Sirkulaatio kuvaa suljetun käyrän sisään jäävien pyörteiden voimakkuutta.

Kutta-Zukovski-teoreeman avulla voidaan selittää lentokoneen siiven kantokyky [4]…[7]. Sovelletaan teoreemaa tuulivoimalan lapaan. Kiertovirtaus pannaan siirtämään virtauksen irtoamispiste lähelle lavan kärkeä. Tällöin lapaan vaikuttava voima pituusyksikö kohti on $F = \Gamma \rho w / c$. Kun tämä voimat asetetaan likimäärin yhtä suureksi voimien (3) kanssa, saadaan $F = \Gamma \rho w / c = \sqrt{C_L^2 + C_D^2}\, \tfrac{1}{2}\rho w^2$. Tästä saadaan sirkulaatiolle arvio

$$\tfrac{1}{2} C_L\, c\, w \le \Gamma < \tfrac{1}{2}\sqrt{C_L^2 + C_D^2}\, c\, w \tag{4}$$

2. Jättöpyörre

Tuulessa lavan kärjen tuntumasta irtoaa pyörresäie eli jättöpyörre, joka synnyttää ympäristöönsä säiekeskeisen nopeuskentän $v_i = \Gamma/(2\pi r_i)$.

Valitaan sylinterikoordinaatisto, jossa z-akseli yhtyy pyörimisakseliin tuulen suunnassa.. Roottorin tasossa olevan mielivaltaisen pisteen koordinaatit ovat $P = \{r, \varphi, z = 0\}$ ja roottorin lavalla olevan pyörteen irtoamispisteen koordinaatit olkoon $P_j = \{R, \phi_j, z = 0\}$. Kolmilapaisen roottorin lapojen välinen kulma on $\Phi = 120° = 2\pi/3 \approx 2{,}0944\,\mathrm{rad}$. Valitaan jonkun lavan jättöpyörre perussäikeeksi, jossa $\phi_0 = 0$. Sen viereiset lavat saavat tällöin vaihekulmat $\phi_{-1} = -\Phi$ ja $\phi_{+1} = +\Phi$.

Pisteet origo eli pyörimisnapa *O*, säikeen irtoamispiste P_j ja tarkastelupiste P muodostavat kolmion.

Kulma $P\,O\,P_j$ on $\varphi - \omega t + \phi_j$. Pisteiden $P_j\,P$ välinen etäisyys on $r_j = \sqrt{r^2 + R^2 - 2rR\cos(\varphi - \omega t + \phi_j)}$. Tätä janaa vastaan kohtisuora nopeus on $\Gamma/(2\pi r_j)$. Nopeudet tulee projisoida $P = \{r, \varphi, z = 0\}$ koordinaatistoon. Siihen tarvitaan:: R_j:n ja *r*:n välisen kulma ε_j, jonka sini ja cosini saadaan kolmion siniväittämällä

$$\sin\varepsilon_j = \left(R \Big/ \sqrt{r^2 + R^2 - 2rR\cos(\varphi - \omega t + \phi_j)}\right)\sin(\varphi - \omega t + \phi_j) \text{ ja}$$

$$\cos\varepsilon_j = \cos\left\{\arcsin\left[\left(R \Big/ \sqrt{r^2 + R^2 - 2rR\cos(\varphi - \omega t + \phi_j)}\right)\sin(\varphi - \omega t + \phi_j)\right]\right\}.$$

3. Nopeuskomponentit

Pyörresäikeiden aiheuttaman nopeuskentän komponentit $\{r, \varphi, z = 0\}$ koordinaatistossa ovat

$$u(r,\varphi,t) = \frac{\Gamma}{2\pi}\sum_{i=-1}^{+1}\frac{\sin\varepsilon_i}{r_i} = \frac{\Gamma}{2\pi}\sum_{i=-1}^{+1}\frac{R\sin(\varphi-\omega t+\phi_i)}{r^2+R^2-2rR\cos(\varphi-\omega t+\phi_i)} \tag{5}$$

$$v(r,\varphi,t) = \frac{\Gamma}{2\pi}\sum_{i=-1}^{+1}\frac{\cos\varepsilon_i}{r_i} = \tag{6}$$

$$\frac{\Gamma}{2\pi}\sum_{i=-1}^{+1}\cos\left[\arcsin\frac{R\sin(\varphi-\omega t+\phi_i)}{\sqrt{r^2+R^2-2rR\cos(\varphi-\omega t+\phi_i)}}\right]\Bigg/\sqrt{r^2+R^2-2rR\cos(\varphi-\omega t+\phi_i)}$$

4. Virtauksen pyörteisyys

Vektorikentän pyörimistä kuvaa operaattori **rotaatio** eli $\nabla\times$(**vektori**).
Sylinterikoordinaatistossa nopeusvektori on **nopeus** $=\{u,v,w\}$ ja sen rotaation lauseke kuuluu, kun *u* ja *v* riippuvat vain *r*:stä ja φ:stä sekä *w* on vakio. [7] s.3

$$\mathbf{rot}\{u,v,w\} = \frac{1}{r}\begin{vmatrix}\mathbf{e}_r & r\mathbf{e}_\varphi & \mathbf{e}_z\\ \partial/\partial r & \partial/\partial\varphi & \partial/\partial z\\ u & rv & w\end{vmatrix} = \mathbf{e}_z\frac{1}{r}\left(\partial(rv)/\partial r - \partial u/\partial\varphi\right) \tag{7}$$

Jäykällä kappaleella kulmanopeusvektori on $\boldsymbol{\omega} = \frac{1}{2}\nabla\times\mathbf{nopeus}$. Oletetaan, että kaavaa voidaan soveltaa myös fluideille. Rotaation lauseke sievenee skalaariseen muotoon

$$\mathrm{rot}\{u,v,w\} = \frac{1}{r}\left(\frac{\partial(rv)}{\partial r} - \frac{\partial u}{\partial\varphi}\right) \tag{8}$$

Rotaatio kuvaa ilman pyörimistä riittävällä tarkkuudella. Tämä johtaa kiertoajan T kautta tulokseen

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{\frac{1}{2}\|\nabla\times\mathbf{nopeus}\|}{2\pi} = \frac{\frac{1}{2}\mathrm{rot}\{u,v,w\}}{2\pi} \tag{9}$$

eli värähtelyiden frekvenssiin.

Häiriövirtaukselle kaavassa (8) tarvittavat kaavojen (5) ja (6) derivaatat voidaan laskea helpoiten lähteen [8] eli Mathematican keinoilla

$$\frac{\partial u(r,\varphi,t)}{\partial \varphi} = \frac{\Gamma}{2\pi}\sum_{i=-1}^{+1}\frac{R\left(r^2+R^2\right)\cos\left(\varphi-\omega t+\phi_i\right)-2rR^2}{\left[r^2+R^2-2rR\cos\left(\varphi-\omega t+\phi_i\right)\right]^2} \tag{10}$$

$$\frac{\partial\left(rv(r,\varphi,t)\right)}{\partial r} = \frac{\Gamma}{2\pi}\sum_{i=-1}^{+1}\frac{R\left[5r^2R+R^3-2r\left(r^2+3R^2\right)\cos\left(\varphi-\omega t+\phi_i\right)+R\left(r^2+R^2\right)\cos 2\left(\varphi-\omega t+\phi_i\right)\right]}{2\sqrt{\frac{\left(r-R\cos\left(\varphi-\omega t+\phi_i\right)\right)^2}{r^2+R^2-2rR\cos\left(\varphi-\omega t+\phi_i\right)}}\left[r^2+R^2-2rR\cos\left(\varphi-\omega t+\phi_i\right)\right]^{5/2}} \tag{11}$$

Tuloksena saadaan häiriövirtauksen frekvenssi.

5. Ilman tiheyden ja paineen vaihtelu, divergenssi

Divergenssi mittaa vektorikentän kenttäviivojen tiheyttä eli konkreettisesti ilman tiheyden vaihtelua. Jatkuvuusyhtälö kuuluu yleisesti

$$-\partial\ln\left(\rho/\rho_0\right)/\partial t = \underbrace{\mathbf{nopeus}\cdot\nabla\ln\left(\rho/\rho_0\right)}_{<|1|} + \nabla\cdot\mathbf{nopeus}$$

Akustiikassa pienenä suureena jätetään usein pois summan ensimmäinen termi [9]. Tällöin tulee

$$\partial\ln\left(\rho/\rho_0\right)/\partial t\ ;\ -\nabla\cdot\mathbf{nopeus} \tag{12}$$

Nopeassa prosessissa painesuhde on tiheyssuhde korotettuna potenssiin adiabaatti-vakio κ. Painesuhteelle seuraa lauseke

$$\partial\ln\left(p/p_0\right)/\partial t\ ;\ -\kappa\nabla\cdot\mathbf{nopeus} \tag{13}$$

Tässä ρ_0 ja p_0 ovat vertailusuureita esim. standardi-ilmakehän tiheys ja paine.

Sylinterikoordinaatistossa nopeusvektorin divergenssin lauseke kuuluu

$$\operatorname{div}\{u,v,w\} \equiv \underbrace{\nabla\cdot\mathbf{nopeus}}_{\operatorname{div}} = \frac{\partial u}{\partial r}+\frac{\partial v}{r\partial\varphi}+\underbrace{\frac{\partial w}{\partial z}}_{0} = \frac{\partial u}{\partial r}+\frac{\partial v}{r\partial\varphi} \equiv \operatorname{div}(r,\varphi,t) \tag{14}$$

Kun tuuli on oletettu tasaiseksi, on $\partial w/\partial z = 0$

Häiriövirtaukselle kaavassa (13) tarvittavat derivaatat saadaan lähteen [8] avulla

$$\frac{\partial u(r,\varphi,t)}{\partial r} = -\frac{\Gamma}{2\pi}\sum_{i=-1}^{+1}\frac{2R\left[r - R\cos(\varphi-\omega t+\phi_i)\right]\sin(\varphi-\omega t+\phi_i)}{\left[r^2+R^2-2rR\cos(\varphi-\omega t+\phi_i)\right]^2} \tag{15}$$

$$\frac{\partial v(r,\varphi,t)}{r\partial\varphi} = -\frac{\Gamma}{2\pi r}\sum_{i=-1}^{+1}\frac{R\left(r^2-R^2\right)\left[r - R\cos(\varphi-\omega t+\phi_i)\right]\sin(\varphi-\omega t+\phi_i)}{\sqrt{\frac{\left[r - R\cos(\varphi-\omega t+\phi_i)\right]^2}{r^2+R^2-2rR\cos(\varphi-\omega t+\phi_i)}\left[r^2+R^2-2rR\cos(\varphi-\omega t+\phi_i)\right]^{5/2}}} \tag{16}$$

6. Numeerinen sovellutus

Tuulivoimali: Oletetaan kuvitteellinen yksinkertaistettu kolmilapainen tuulivoimala, jonka lapojen arvot ovat

Lapojen rakenne		Aerodynamiikka	
suure	suuruus	suure	suuruus
ulkosäde R	$3,5\text{m}$	C_{L0}	$0,01$
sisäsäde R_0	$0,5\text{m}$	$C_{L\alpha}$	2π
leveys c	$0,25\text{m}$	C_{D0}	$0,002$
sivusuhde $A=(R-R_0)^2/((R-R_0)c)$	12	$C_{L\alpha}^2/(\pi A)$	$1,047$

Taulukko 1. Tuulivoimalan lavan oletetut arvot

Kaavasta (4) saadaan *sirkulaation* voimakkuus. Valitaan w=10,0m/s. Optimi kohtauskulmalla $\alpha_{opt} = 0,494 rad$ saadaan sirkulaatiolle yläarvio

$$\Gamma = \tfrac{1}{2}\sqrt{C_L^2 + C_D^2}\, c \quad w = 3,98\ \text{m}^2/\text{s}$$

E5555555F

0,39781m 10m/s

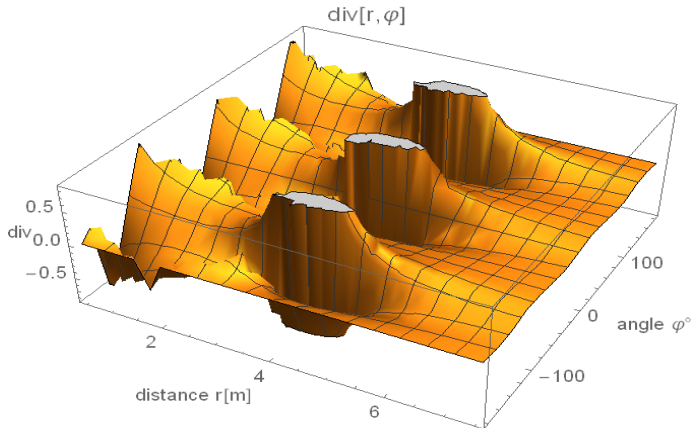
Kaavoista (10) ja (11) saadaan tarvittavat suureet frekvenssin ja kaavoista (15) ja (16) divergenssin laskemiseksi.

Paineen ja tiheyden vaihtelu tuulella w=10m/s, divergenssi.

Painesuhteen vaihtelu tilasta yksi tilaan kaksi akustisessa kentässä saadaan kaavasta (13) integroimalla

$$\ln(p_2/p_1) = -\kappa\int_{t_1}^{t_2} div\{r,\varphi,t\}dt = \kappa\Delta div\{r,\varphi,\Delta T\} \tag{17}$$

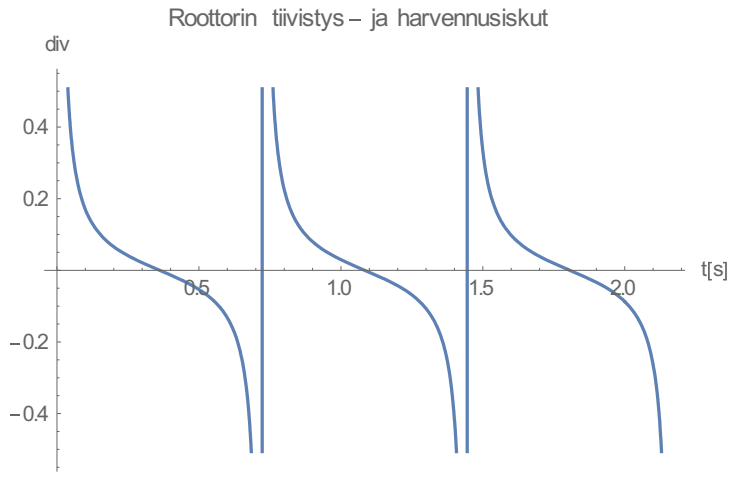
Suureet ρ_0 ja p_0 supistuvat pois ja nopeusvektorin divergenssi määrittää prosessin. Ilmalle $\kappa = 7/5 = 1,4$



Kuva 1. Pyörivien lapojen yhdellä kierroksella aiheuttama divergenssi.

Kolmilapainen roottori määrittää roottoritason. Tässä tasossa etäisyydellä $r = 4,0\mathrm{m}$ akselista olkoon *tarkkailupiste.*

Voimalan roottorin pyörähdysaika olkoon $\mathrm{T} = 2,2\,\mathrm{s}$. Lapojen ohikulkuajan puolikas on $\Delta\mathrm{T} = \mathrm{T}/6 = 0,36\,\mathrm{s}$. Yhdellä ohimenolla $\mathrm{T}/3 = 0,73\,\mathrm{s}$ syntyy paineen sekä nousu- että lasku.



Kuva 2. Lapojen kolme adiabaattista tiivistys- ja harvennusiskua kierroksella.

Divergenssin integrointi numeerisesti aikavälin $\mathrm{T}/6 \Rightarrow \mathrm{T}/3$ yli antaa

$$\Delta\mathrm{div}(r,\varphi) = -\int_{\mathrm{T}/6}^{\mathrm{T}/3} \mathrm{div}(r,\varphi,t)dt\ ;\ 0,22$$

Painesuhteelle saadaan nyt numeroarvo

$$p_2/p_1 = (\rho_2/\rho_1)^{\kappa} = \exp\left[\kappa\Delta\mathrm{div}(r,\varphi)\right];\ 1,36 \qquad (18)$$

Kolmasosa pyörähdyksen aikana paine käy välin maksimi-minimi, jolloin divergenssi muuttuu kaksinkertaisella määrällä.

Tuulivoimalan melu tarkkailupisteessä r=4m

Melun voimakkuutta mitataan desibeleinä painesuhteesta (p_2 / p_1) kaavalla $20 \log_{10}(p_2 / p_1)$. Siirrytään käyttämään luonnollista logaritmia, jolloin kaava kuuluu $(20 / \ln 10)\ln(p_2/p_1)$. Tarkastellaan yhtä lapaa, jonka painesuhde saadaan kaavasta (18). Tällöin sen synnyttämä melu on

$$(20/\ln 10)\left[2\kappa\Delta \mathrm{div}(r,\varphi)\right] = 5{,}38 \text{ dB} \qquad (19)$$

Koska lapoja on kolme ja jos vaiheiden osuminen yhteen on sattumanvaraista, saadaan suurin melun lisäys

$$(20/\ln 10)\ln 3 = 9{,}55 \text{ dB} \qquad (20)$$

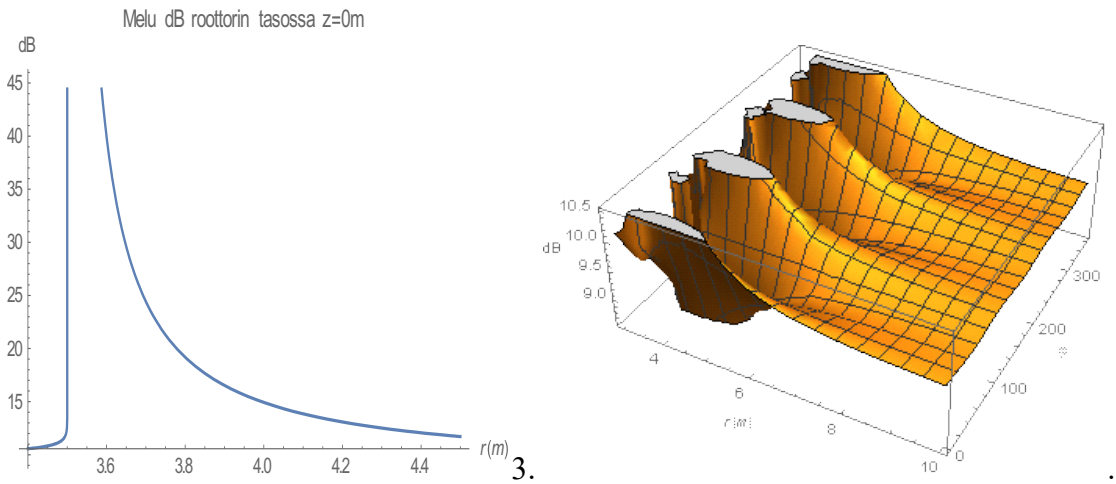
Yhden tämänkokoisen tuulivoimalan tarkkailupisteessä r = 4m synnyttämälle melulle saadaan rajat ja kaava (21)

$$5{,}38\,\text{dB} = (20/\ln 10)\left[2\kappa\Delta \mathrm{div}(r,\varphi)\right] < \text{melu} < (20/\ln 10)\left[\ln 3 + 2\kappa\Delta \mathrm{div}(r,\varphi)\right] = 14{,}93 \text{ dB}$$

kaava (21)

Syntyvä melu lavan kärjen tuntumassa

Sovelletun matemaattisen mallin mukaan häiriövirtauksella olisi lavan kärjessä singulariteetti, jossa melu olisi äärettömän suuri. Käytännössä näin ei voi olla. Pyörteen keskellä on rauhoittunut alue, jonka suuruudesta ei ole täsmällistä tietoa.



3. .

Kuva 3. Pyörivien lapojen synnyttämä melu dB:nä ja melun synnyn vaimeneminen, 3,0 m < r < 10 m, laskettu kaavasta (21).

7. Loppusanat

Tuulivoimalan pyöriessä lapojen kärkiin syntyy ns. jättöpyörre, joka indusoi roottorin tason lähelle voimakkaan pyörrekentän. Se puolestaan aiheuttaa paineen vaihtelua eli melua, jonka spektri on laaja. Miten lähelle singulariteettipisteitä voi tarkastelun ulottaa ei ole varmaa. Tuulivoimala aiheuttaa matalataajuisia värähtelyjä. Niiden melutaso on

kuitenkin alhainen. Aivan roottorin lavan ulkoreunalla syntyy voimakkaita pyörteitä ja ilman tiivistys- ja harvennusaaltoja. Tuuli kuljettaa niitä mukanaan. Korvaan sattuessaan nämä voivat tuntua epämiellyttävältä.

Äänen vaimentumista ilmassa ei ole otettu huomioon tarkastelussa. Äänen ja pyörteiden kulkeutuminen tuulen mukana on myös jätetty huomioon ottamatta.

Lavan kaventaminen pienentää sirkulaatiota ja samalla pyörteiden ja melun voimakkuutta. Melua voidaan vähentää tekemällä voimalan ulkokehälle roottorin lapoja yhdistävä rengas ns meluvalli.

Lähteet, kirjallisuutta

[1] Tuulimylly. https://fi.wikipedia.org/wiki/Tuulimylly

[2] Tuulienergian perusteet-Siilo
http://siilo.dyndns.org/wiki/index.php/Tuulienergian_perusteet

[3] Tuulivoimalamelun mittaus ja mallinnus, Veli-Matti Yli-Kätkä, diplomityö, Sähkötekniikan korkeakoulu, Espoo 2013, 73 s. http://www.tuulivoimayhdistys.fi/filebank/200-tuulivoimalamelun_mittaus_ja_mallinnus

[4] Lentokoneen aerodynamiikka ja lentomekaniikka.
Seppo Laine, Jaakko Hoffren ja Kari Renko. WSOY Oppimateriaalit Oy.
1. painos. Helsinki 2006. 434s.

[5] Advanced Fluid Mechanics, A.J. Raudkivi & R.A. Callander, Edward Arnold. 1974. s. 325

[6] Fluid Mechanics, W. Kaufmann, McGraw-Hill Book Company, Inc. Ney York 1958. 432s.

[7] Roottori(Matematiikka)-Wikipedia
https://fi.wikipedia.org/wiki/Roottori_(matematiikka)

[8] Stephen Wolfram, *The Mathematica Book*, Third Edition, Wolfram Media, Cambridge University Press, 1996, s. 1403

[9] A.P. Dowling and J. E. Ffowcs Williams, *Sound and Sources of Sound*, Ellis Horwood Publishers, Chishester, 1982, pp.321

[10] 1 SMG-4500 Tuulivoima Tuulivoiman hyötysuhde
http://www.tut.fi/smg/tp/kurssit/SMG-4500/2012/luento6.pdf

[11] Tuulimyllyn tehon laskenta http://www..hsaoy.com/4_APUA/Tuulimylly/Tuulimyllyn_tehon_laskenta.pdf

[12] Seppo Uosukainen, Tuulivoimaloiden melun synty, eteneminen ja häiritsevyys. http://vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2010/T2529.pdf

TUULIVOIMALAMELUN PITKÄAIKAISMITTAUKSET ULKOTILOISSA. KOKEMUKSIA, HAVAINTOJA SEKÄ KEHITYSIDEOITA

Denis Siponen[1]

[1] Suomen Akustiikkasuunnittelu
Kivirannantie 19 A 9
40270 Palokka
denis.siponen@suomenakustiikkasuunnittelu.fi

Tiivistelmä

Vuonna 2018 suoritettiin Vaasan Öjenissä tuulivoimalan melun pitkäikaismittaukset ulkotiloissa. Mittausten tavoitteena oli selvittää mahdollisen luotettavasti tuulivoimalasta aiheutuvan melun voimakkuus sekä mahdolliset melun erityispiirteet. Mittaukset suoritettiin 5.4 – 11.10 välisenä aikana kahdessa pisteessä 900 ja 1200 metrin etäisyydellä tuulivoimalasta. Mittaukset suoritettiin YM:n ohjeistuksen OH4/2014 menettelyn ”A” mukaisesti. Kaikki mitattu signaali tallennettiin ääniaaltomuodossa, mitattu signaali käytiin manuaalisesti läpi, ja autojen ohiajojen kaltaiset ylimääräiset äänet leikattiin pois. Mittausdatasta poistettiin myös kaikki tuulivoimalan normaalitoiminnasta poikkeavien toimintamoodien tulokset.

Tulosten analysoinnissa linnunlaulu poistettiin mittausdatasta alipäästösuotimella, jonka jälkeen tämä suodatettu osuus rekonstruoitiin ei linnun laulua sisältävän mittausdatan avulla. Tämä metodi mahdollistaa sellaisen signaalin rekonstruoinnin, joka sisältää tuulivoimalan melun spektrin mutta ei lainkaan linnunlaulua. Tulosten analysoinnissa havaittiin myös, että mittaukset 4 sekä 5 m/s tuulen nopeuksilla olivat tarpeettomia ja ne tulisikin jättää analysoimatta, kun halutaan kuvata tuulivoimalan melu tuotetun tehon suhteen mahdollisimman tarkasti. Lisäksi havaittiin, ettei regressioanalyysissa suora viiva kuvaa aina parhaiten tuulivoimalan melua tuotetun tehon suhteen. Kyseisessä mittauksessa kaksi suoraa (0 – 1 MW sekä 1 - 3.6 MW) toimi regressioanalyysissä parhaiten. Lisäksi havaittiin, että luotettavien tulosten saamiseksi taustamelutasot tulisivat olla vähintään 6 dB pienemmät mittaustuloksiin verrattuna.

1 JOHDANTO

Vuonna 2018 suoritettiin Vaasan Öjenissä tuulivoimalan melun pitkäikaismittaukset ulkotiloissa [1]. Toimeksiannon tilaajana oli Vaasan kaupunki ja sen tavoitteena oli selvittää parhain mahdollisin keinoin Vaasan Öjenissä sijaitsevan Mervento 3.6-118 -tuulivoimalan aiheuttama melutaso kahdessa ennalta määritellyssä altistuvassa kohteessa (ulkotiloissa). Tämän lisäksi toimeksiannon tavoitteena oli selvittää yksityiskohtaisesti

© 2019 Denis Siponen. Tämä on avoimesti julkaistu teos, joka noudattaa Creative Commons NIMEÄ 4.0 Kansainvälinen –lisenssiä (CC BY 4.0). Teosta saa kopioida, levittää, näyttää ja esittää julkisesti ja siitä saa luoda johdannaisteoksia, kunhan tekijän nimi ja lähde mainitaan asianmukaisesti.

melun mahdolliset erityispiirteet sekä se voimalan tehotaso, jonka alapuolella valtioneuvoston ohjearvon tuulivoimalamelun ulkomelulle eivät ylity.

Kyseisen tuulivoimalan melua on mitattu aikaisemmin useaan otteeseen; Esimerkiksi VTT on suorittanut mittaukset ulkotiloissa 10.12.2013 - 12.12.2013 välisenä aikana [2]. Myös sisämelua on mitattu eräässä lähialueen asuinrakennuksessa 28.11.2014 - 18.12.2014 välisenä aikana [3].

2 MITTAUSASETELMA JA MITTAUSMENETTELY

Mittaukset suoritettiin 5.4 - 11.10.2018 kahdessa eri mittauspisteessä. Itse mittausvuorokausia oli yhteensä 101. Mittausvuorokausia tuli 49 kpl mittauspisteessä 1 ja 52 kpl mittauspisteessä 2. Molemmat mittauspisteet sijaitsivat tuulivoimalan itäpuolella. Mittauspiste 1 sijaitsi 108 astetta tuulivoimalaan nähden idässä n. 910 metrin etäisyydellä tuulivoimalasta louhosalueella, jonne Vaasan Kaupunki on kaavoittanut pientaloalueen. Mittauspisteen lähimaasto oli kivikkoista ja tasoitettua maa-ainesta, pinnan geometrian ollessa hyvin tasainen. Maasto oli täysin aukeaa ja mittauspisteen kaakkoispuolella oli vedellä täyttynyt louhos. Mittauspiste 2 sijaitsi 142 astetta tuulivoimalaan nähden kaakossa n. 1200 metrin etäisyydellä tuulivoimalasta omakotitaloalueella.

Mittauslaitteisto koostui kaksoistuulisuojalla varustetusta 1-luokan äänitasomittarista, sääasemasta sekä mikrotietokoneesta. Mikrofoni sijaitsi 1,5 m korkeudella ja sääasema 10 m korkeudella. Sekä mitattu äänisignaali, että tuulidata (tuulen nopeus ja puuska) tallennettiin 1 minuutin ajanjaksoissa. Mitattu äänisignaali tallennettiin ääniaaltomuodossa mikrotietokoneen avulla verkkoon pilvipalvelimelle, kuten myös tuulidata.

Mittausmenettelynä käytettiin ympäristöministeriön ohjeistuksen OH4/2014 mittausmenettelyä ”A” [4]. Siinä tuulivoimalan ja taustamelua tuottavien äänilähteiden melutaso mitataan eri tuulen nopeuksilla 1 minuutin mittausjaksoissa. Tuulen nopeus ja melutaso mitataan samanaikaisesti ja samassa paikassa. Menetelmän ”A” etu muihin ympäristöministeriön menetelmiin (”B” ja ”C”) nähden on se, että sen avulla voidaan määritellä tuulivoimalan tuottama melutaso nimellistehon lisäksi muillakin tehoalueilla. Tämän lisäksi kyseisellä menetelmällä saatuja mittaustuloksia voidaan verrata tuulivoimalan tuottamaa melutasoa suunnittelu- tai tunnusarvoon.”

Ympäristöministeriön ohjeistuksessa edellytetään lisäksi tiettyjä mittausten aikaisia sääoloja, joista oleellisimmat ovat tuulen suunta ± 45 º tuulivoimalasta mittauspisteeseen sekä positiivinen pystysuora lämpötilagradientti. Tuulen suunta tuulivoimalaan nähden saatiin tuulivoimayhtiön toimittamista tuulivoimalan tuotantotiedoista ja pystysuora lämpötilagradientti täyttyy tyypillisesti, kun mittaukset suoritetaan yöaikaan.

3 MITTAUSDATAN KARSINTA JA ANALYSOINTI

Jotta mittaustuloksista voidaan selvittää luotettavasti tuulivoimalan tuottama melutaso altistuvassa kohteessa (tässä tapauksessa mittauspisteissä 1 ja 2), on mitattu ja kerätty mittausdata analysoitava tietyllä tavalla. Tämä tarkoittaa sitä, että taustamelutaso ja toisaalta tuulivoimalan käynnin aikana mitattu sekä tuulivoimalan, että taustamelun yhteinen melutaso on kyettävä määrittelemään mahdollisimman tarkasti.

Ennen varsinaista analysointia on mitatusta aineistosta ensin erotettava oleellinen mittausdata. Tämä aloitettiin valitsemalla kaikesta mittausdatasta kappaleessa 2 kuvattujen

ehtojen täyttävä data. Lisäksi tuulen nopeuden ylärajaksi päätettiin 5 m/s, koska tätä suuremmilla tuulen nopeuksilla on käytännön mittauksissa havaittu tuulesta aiheutuva mikrofonisignaalin säröytyminen kontaminoivan mittaussignaalin. Täytettävät ehdot ovat siis:

- Taustamelu: aikaväli 22 – 07, tuulen nopeus 0 – 5 m/s.
- Tuulivoimalamelu: aikaväli 22 – 07, tuulen nopeus 0 – 5 m/s, tuulen suunta ± 45 º, tuulivoimala toiminnassa.

Mittauksissa taustamelua ei määritetty pysäyttämällä tuulivoimalaa päivittäin. Sen sijaan mitatusta datasta etsittiin ne kaikki ajankohdat, jolloin tuulivoimala ei ollut toiminnassa joko huollosta tai muista syistä johtuen. Tuulen nopeus jaettiin viiteen eri luokkaan 0 - 1, 1 - 2, 2 - 3, 3 - 4 ja 4 - 5 m/s. Näistä eri tuulen nopeusluokkien ääninäytteistä poistettiin häiriöäänet niin monesta näytteestä kuin mahdollista, kuitenkin enintään n. 250 näytteestä per luokka. Eri tuulen nopeusluokkiin jaettujen taustamelutasojen kuunneltujen ja analysoitujenmittausjaksojen määrä on esitetty alla olevassa taulukossa:

	Tuulen nopeus [m/s]				
Mittauspiste 1	0 – 1	1 – 2	2 – 3	3 - 4	4 - 5
Kuunnellut mittausjaksot	200	181	88	44	39
Kuunneltujen mittausjaksojen osuus [1)]	12 %	28 %	100 %	100 %	100 %
Validit mittausjaksot	145	91	40	23	20
Analysointiin kelpaamattomat mittausjaksot	54	90	48	21	19
Mittauspiste 2	0 – 1	1 – 2	2 – 3	3 - 4	4 - 5
Kuunnellut mittausjaksot	258	239	54	78	48
Kuunneltujen mittausjaksojen osuus [1)]	10 %	37 %	100 %	100 %	100 %
Validit mittausjaksot	157	79	33	58	44
Analysointiin kelpaamattomat mittausjaksot	99	160	21	20	4

1) Kuunneltujen mittausjaksojen osuus kaikista sen tuulen nopeusluokan mittausjaksoista

Edellisen taulukon mukaisista tuulen nopeusluokittain analysoiduista taustamelutasosta voidaan laskea keskimääräinen taustamelutaso, sekä 95% luottamusväli. Luottamusväli lasketaan kaavasta:

$$ci = \pm 1{,}96 \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \quad (1)$$

, missä σ on keskihajonta, ja N on otoksen koko.

Tuulen nopeusluokittain lasketut taustamelutasot 95% luottamusvälillä on esitetty alla olevassa taulukossa.

	Tuulen nopeus [m/s]				
Mittauspiste 1	0 – 1	1 – 2	2 – 3	3 - 4	4 - 5
A-taajuuspainotettu äänenpainetaso [dB]	25,1	26,6	29,8	33,1	37,0

Virheraja [dB]	0,4	0,4	1,1	1,3	1,3
Mittauspiste 2	0 – 1	1 – 2	2 – 3	3 – 4	4 – 5
A-taajuuspainotettu äänenpainetaso [dB]	26,0	27,4	31,7	37,5	40,3
Virheraja [dB]	0,2	0,4	1,1	1,1	1,7

Kuten ylläolevasta taulukosta voidaan nähdä, tuulivoimalan melun mittaukset yli 3 m/s mittauspaikalla vallitsevan tuulen nopeudella ei ole mielekästä, sillä tuulivoimalan melu on tyypillisesti näillä tuulen nopeuksilla taustamelutasoa pienempää.

Jotta tuulivoimalan aiheuttama melutaso voidaan selvittää mitatusta kokonaismelutasosta, on taustamelun vaikutus poistettava ympäristöministeriön ohjeistuksen kaavaa käyttäen:

$$L_{Aeq,corr} = 10lg \quad 10^{\frac{L_{Aeq\,,free}}{10}} - 10^{\frac{L_n}{10}} \tag{1}$$

, missä $L_{Aeq,corr}$ on tuulivoimalan tuottama melutaso (korjattu arvo), $L_{Aeq,free}$ tuulivoimalan ja taustamelun yhdessä aiheuttama melutaso (mitattu arvo) ja L_n keskimääräinen taustamelutaso kullakin tuulen nopeusalueella. Mikäli $L_{Aeq,free} - L_n$ on välillä 3 – 6 dB, korjattuihin arvoihin tehdään tästä kertova merkintä. Mikäli se on 3 dB tai tämän alle, arvoa $L_{Aeq,free}$ − 3 dB voidaan pitää tuulivoimalan tuottaman melutason ylärajana. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että mittaustulokset ja niistä tehdyt laskelmat kuvaavat tuulivoimalan aiheuttamaa melutasoa riittävän luotettavasti, kun mitattujen melutasojen $L_{Aeq,free}$ ja taustamelutasojen L_n välinen ero on vähintään 6 dB.

Mittausajankohdasta johtuen linnunlaulu oli varsin runsasta mittauspisteiden lähialueella, eikä sitä ollut mahdollista poistaa itse ääninäytteitä leikkaamalla. Linnunlaulu saatiin poistettua mittausdatasta suodattamalla ääninäytteet 10 -asteen Butterworth -tyyppisellä alipäästösuotimella, jonka rajataajuus *Fc* oli 1200 Hz. Tämän jälkeen laskettiin niiden ääninäytteiden suodatuksen vaikutus, jossa ei esiinny linnunlaulua. Tämä toteutettiin käymällä läpi kaikki mitatut ääninäytteet taustamelusta sekä tuulivoimalamelusta, jotka eivät sisältäneet linnunlaulua. Itse mittaustulosten kokonaismelutaso rekonstruoitiin lopuksi siten, että mittaustuloksiin lisättiin tuulen nopeusluokittain alipäästösuodattimen vaikutus kokonaismelutasoon. Alipäästösuodattimen vaikutus niihin ääninäytteisiin, jotka eivät sisältäneet linnunlaulua on esitetty alla olevassa taulukossa.

	Alipäästösuodattimen vaikutus [dB]				
	Mittauspiste 1				
Tuulen nopeus	0 – 1	1 – 2	2 – 3	3 - 4	4 - 5
Taustamelu	0,8	0,7	0,6	0,3	1,9
Tuulivoimala toiminnassa	0,1	0,2	0,2	0,2	0,6
	Mittauspiste 2				
Tuulen nopeus	0 – 1	1 – 2	2 – 3	3 - 4	4 - 5
Taustamelu	0,8	1,8	2,3	2,3	3,0
Tuulivoimala toiminnassa	0,3	0,9	1,0	1,1	1,5

On mainittava, ettei suodin kyennyt poistamaan kaikkien lintujen laulua, koska esimerkiksi lokin ääni on luonteeltaan muiden mittauksissa kuultujen lintujen laulua selvästi matalampitaajuista. Nämä äänet poistettiin ääninäytteistä käsin ja jos tämä ei ollut mahdollista, ääninäyte hylättiin tulosten analyyseistä.

3 MITTAUSTULOSTEN ANALYSOINTI

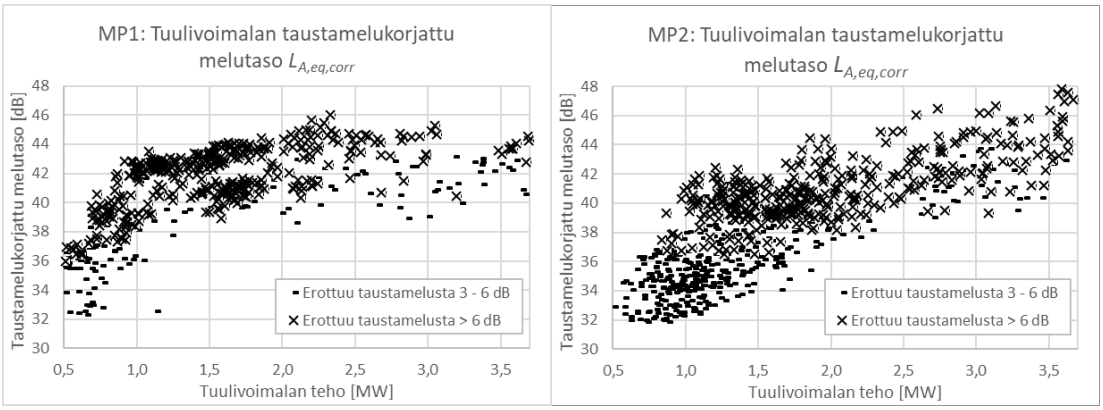
Edellisen kappaleen kuvauksen mukaisesti karsituista, 1 minuutin pituisista taustamelukorjatuista mittausjaksoista saatiin mittaustulokset tuulivoimalan tehon suhteen. Nämä laskettiin kaavaa 2 käyttäen. Alla olevassa taulukossa on esitetty taustamelukorjattujen mittausjaksojen lukumäärä tuulen nopeusluokittain kummassakin mittauspisteessä.

	Mittausjaksojen lukumäärä				
	Mittauspiste 1				
Tuulen nopeus	0 – 1	1 – 2	2 – 3	3 - 4	4 - 5
Erottuu heikosti taustamelusta [1)]	113	248	103	95	2
Erottuu selvästi taustamelusta [2)]	113	202	74	24	0
	Mittauspiste 2				
Tuulen nopeus	0 – 1	1 – 2	2 – 3	3 - 4	4 - 5
Erottuu heikosti taustamelusta [1)]	251	492	104	0	0
Erottuu selvästi taustamelusta [2)]	77	304	33	0	0

1) $L_{Aeq,free} - L_n$ on välillä 3 – 6 dB
2) $L_{Aeq,free} - L_n$ on suurempi 6 dB

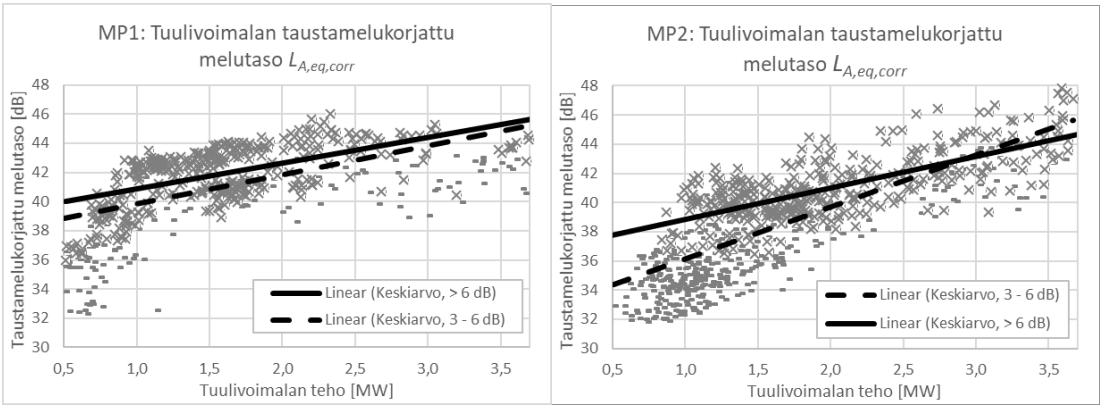
Kuten ylläolevasta taulukosta voidaan selvästi havaita, yli 3 m/s tuulen nopeuksilla validien mittausjaksojen määrä on varsin pieni suhteessa kaikkien mittausjaksojen määrään. Tuulen nopeudella 4 - 5 m ei saatu kummassakaan mittauspisteessä valideja mittaustuloksia käytännössä lainkaan. Mittauspisteessä 2, jossa lähialueella sijaitsi runsaasti lehtipuita valideja mittausjaksoja ei saatu lainkaan edes tuulen nopeudella 3 - 4 m/s.

Edellisen kappaleen kuvauksen mukaisesti karsituista, 1 minuutin pituisista mittausjaksoista voidaan piirtää kuvaajat taustamelukorjatun melutason ja tuulivoimalan suhteen. Alla olevissa kuvissa on esitetty mittauspisteittäin tällaiset kuvaajat tapauksissa, joissa tuulivoimalamelu erottuu taustamelusta heikosti ($L_{Aeq,free} - L_n$ on joko 3 - 6 dB) tai selvästi ($L_{Aeq,free} - L_n$ on yli 6 dB).



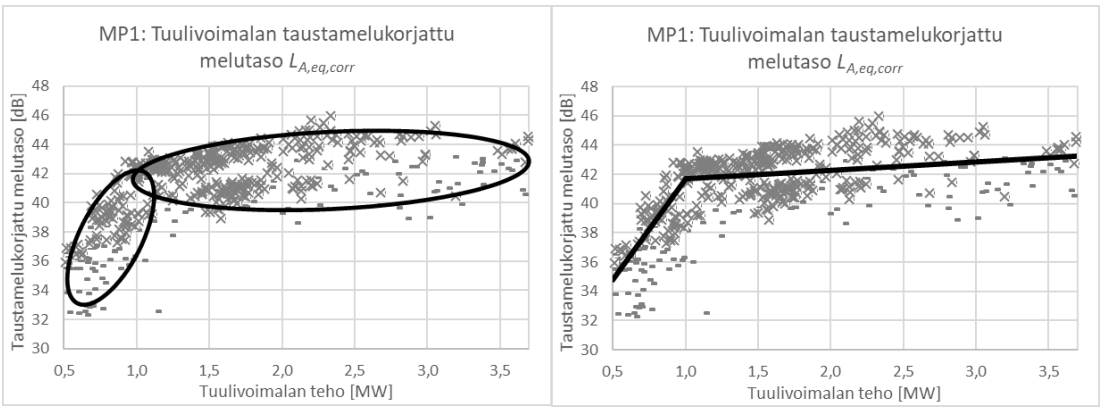
Kuten yllä olevista kuvista voidaan nähdä, heikosti taustamelusta erottuvat mittausnäytteet ovat systemaattisesti hyvin taustamelusta erottuvien näytteiden alapuolella. Tämä vääristää tuloksia pienemmiksi kuin mitä ne todellisuudessa ovat

Edellisessä kappaleessa kuvattua ilmiötä voidaan havainnollistaa myös kuvaajaan sovitetulla regressiokäyrällä. Alla olevissa kuvissa on esitetty kummassakin mittauspisteessä mittausdatan regressiokäyrät niin heikosti kuin selvästi taustamelusta erottuvalle tuulivoimalamelulle.

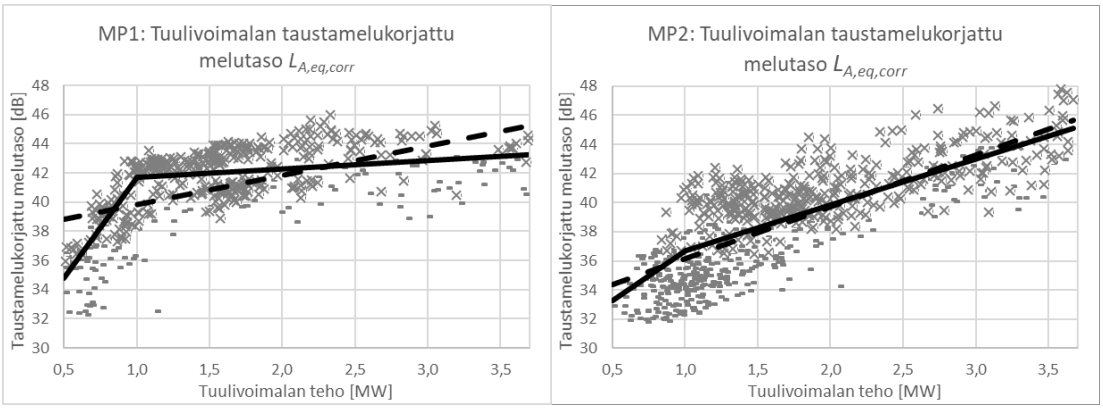


Kuten ylläolevista kuvaajista voidaan nähdä, regressiokäyrät ovat selvästi toisistaan poikkeavat. Mittauspisteessä 2 regressiokäyrien suurempi ero verrattuna mittauspisteen 1 regressiokäyriin johtuu todennäköisesti maaston eroista mittauspisteiden välillä; Mittauspisteen 2 lähialueen runsas puusto aiheuttaa selvän virheen mittaustuloksiin, jos tuloksissa huomioitaisiin myös heikosti taustamelusta erottuva tuulivoimalamelu. Puuston lehtien havinan aiheuttaman virheen mittaustuloksissa voidaan välttää valitsemalla mittausajankohta myöhäissyksyn ja alkukevään väliseen aikaan, jolloin puissa ei ole lehtiä.

Tämän kappaleen ensimmäisen kuvasarjan kuvista voidaan myös nähdä, ettei lineaarisen regressiokäyrän sovittaminen mittausdataan välttämättä tuota dataparvea parhaiten kuvaavaa estimaattia. Jos katsotaan tarkemmin esimerkiksi mittauspaikan 1 mittausdataa, havaitaan sen koostuvan kahdesta toisistaan poikkeavasta dataparvesta. Alla olevassa kuvaparissa on esitetty nämä mittauspisteen 1 mittausdatan dataparvet ja niihin sovitettu kahdesta lineaarisesta regressiokäyrästä koostuva regressiosovite.



Kyseisen regressiosovitteen ja perinteisen, lineaarisen regressiokäyrän ero kummankin mittauspisteen tuloksissa on esitetty alla olevassa kuvaparissa.



Kuten ylläolevasta kuvaparista voidaan havaita, lineaarisen regressiokäyrän ja kahdesta lineaarisesta regressiokäyrästä koostuva regressiosovitteen ero poikkeaa voimakkaasti toisistaan mittauspisteiden välillä; Mittauspisteessä 1 ero on erittäin huomattava, kun taas mittauspisteessä 2 ero on erittäin pieni. Tämä johtuu mitä todennäköisemmin maastollisista eroista mittauspisteiden välillä. Tuulivoimalan melun käyttäytyminen tehon suhteen tulee selvemmin esille maastoissa, jossa ei ole puiden lehtien havinan kaltaisia mittaustuloksia vääristäviä melulähteitä.

4 JOHTOPÄÄTÖKSET

Kun suoritetaan ympäristöministeriön ohjeistuksen OH4/2014 mukaisia tuulivoimalan melun mittauksia immissiopisteessä, tulisi virheellisten tulosten välttämiseksi kiinnittää erityistä huomiota niin mittauksen ajankohtaan, mittausjärjestelyyn, kuin mittaustulosten analysointiinkin. Vaasan Öjenissä vuonna 2018 suoritetuissa pitkäaikaismittauksissa saatiin useita näitä asioita tukevia havaintoja.

Mittausjakson sijoittuessa kesäaikaan, havaittiin linnunlaulun kontaminoivan mittaustuloksia suhteellisen monissa mittausjaksoissa. Tämä asia ratkaistiin alipäästösuodattamalla kaikki signaalit ja rekonstruoimalla lasketut taustamelukorjatut kokonaisäänitasot ”puuttuvalla” linnunlauluttomalla osuudella. Menetelmä oli työläs, ja tämän välttämiseksi onkin suositeltavaa suorittaa mittaukset ajankohtana, jolloin linnunlaulua ei esiinny.

Mittausdatan kerääminen yli 3 m/s tuulen nopeuksilla havaittiin olevan varsin hyödytöntä. Itse taustamelutaso näillä tuulen nopeuksilla oli varsin suuri, varsinkin jos mittauspisteen lähialueella on lehtipuita. Tämän vaikutus näkyi varsin selvästi laskettujen taustamelukorjattuihin mittausjaksoihin, pikemminkin niiden lukumääriin. Yli 3 m/s tuulen nopeuksilla selvästi taustamelusta erottuvien ($L_{Aeq,free}$ - L_n on yli 6 dB) mittausnäytteiden lukumäärän suhde kaikkiin mittausnäytteisiin oli ainoastaan 6 % (mittauspiste 1) ja 0% (mittauspiste 2). Mikäli myös heikosti taustamelusta erottuvat mittausnäytteet ($L_{Aeq,free}$ - L_n on yli 6 dB) sisällytettiin analyysiin, suhdeluku on silti ainoastaan 21 % (mittauspiste 1) ja 0% (mittauspiste 2). Yli 3 m/s tuulen nopeuksilla mittaaminen ei siis heikentäisi mittaustulosten määrää tai luotettavuutta, mutta säästäisi aikaa itse mittauksissa ja mittausten käsittelyssä.

Kun taustamelukorjatut 1 minuutin pituiset kokonaismelutasot esitettiin graafisesti tuulivoimalan tehon suhteen, havaittiin että heikosti taustamelusta erottuvat kokonaismelutasot vääristivät laskettuja lineaarisia regressiokäyriä. Suurimmillaan eroja tuli mittauspisteessä, jonka lähialueella oli lehtipuita. Mittausten analysoinnissa tulisikin välttää näiden kokonaismelutasojen käyttöä kokonaan, jolloin mittaustulokset olisivat mahdollisimman

todenperäiset. Mittauksia tulisi suorittaa niin pitkään, että hyvin taustamelusta erottuvia näytteitä on luotettavaa tilastollista analyysiä varten riittävä määrä.

Sovitettaessa regressioviivaa havaittiin myös, ettei lineaarinen regressiosovite ole aina optimaalisin tapa määrittää tuulivoimalan melutason suhde tehoon. Mittausten analysoinnissa havaittiin, että mittauspisteen 1 (missä ei ole lähialueella lehtipuita) taustamelukorjattujen mittaustulosten datajoukkoa edustaa parhaiten kahdesta lineaarisesta regressiokäyrästä koostuva regressiosovite. Ero yhdestä lineaarisesti regressiokäyrästä muodostuvan sovitteen välillä oli huomattava. Asialla on suuri merkitys esimerkiksi silloin, kun pyritään löytämään mahdollisimman luotettavasti tuulivoimalan tehon taso, joka alittaa olemassa olevat melun ohjearvot; Väärällä regressiosovitteella päädyttäisiin virheelliseen tulkintaan.

VIITTEET

[1] Siponen D, Mervento 3.6-118 -tuulivoimalan melon mittaus altistuvassa kohteessa. Suomen Akustiikkasuunnittelu, 2019.

[2] Siponen. D, Mervento 3.6-118 -tuulivoimalan aiheuttaman melun immissiomittaukset. VTT, 2014.

[3] Siponen. D, Vaasassa sijaitsevan asunnon melututkimus. VTT-CR-00433-15. VTT, 2015.

[4] Ympäristöministeriön ohje 4/2014. Tuulivoimaloiden melun mittaaminen altistuvassa kohteessa. 2014.

HILJAINEN VOIMALAITOS – HAAVE VAI REALISMIA?

Virpi Hankaniemi, Mikko Matalamäki, Esa Nousiainen

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

Tiivistelmä

Tällä hetkellä vallalla olevat kaupungistumisen ja energiatuotannon hajautumisen megatrendit ovat tuoneet voimalaitostoimialalle uuden markkina-alueen, joka tuo energiatuotannon lähelle kuluttajia ja samalla melulle herkkiä kohteita. Tämä on asettanut uusia haasteita voimalaitoksen tuotekehitykselle. On tarvittu kehittyneitä meluntorjuntamenetelmiä lainsäädännön vaatimusten täyttämiseen. Käytännössä tämä tarkoittaa aiempaa laitosta melujalanjäljeltään 10...20 dB pienempää voimalaitosta, tai melujalanjäljen pienentämistä määrällä 90...99 %. Wärtsilässä tätä kehitystyötä on tehty v. 2015…2019 SOPEVA - Sosiaalisesti kelpo energiantuotanto vaihtelevissa olosuhteissa -projektissa. Projektin tuloksia esitellään käytännön mittaustulosten avulla.

1 JOHDANTO

Uusiutuvat energiamuodot, kuten aurinko- ja tuulivoima, tarvitsevat rinnalleen nopeakäyttöistä säätövoimaa, jotta energiantuotanto pystyy vastaamaan sen kuluttajien tarpeisiin. Erinomainen ratkaisu tähän haasteeseen ovat nopeasti käynnistyvät mäntämoottorivoimalaitokset, jotka käyttävät polttoaineenaan kaasua. Kirjoituksessa tarkastellaan kokonaisteholtaan 100 MW voimalaitosta, jossa on kymmenen Wärtsilän W20V34SG moottoria. Laitos on rakennettu Mainz-Wiesbadeniin Saksaan. Se sijaitsee teollisuusalueella ja lähimpiin asuntoihin on matkaa 400 metriä.

Voimalaitoksen suunnitteluvaihe oli haastava. SOPEVA-projektissa kehitettyjä ratkaisuja voitiin viedä heti käytäntöön tässä voimalaitoksessa. Siitä huolimatta moneen melulähteeseen tarvittiin viime hetken tuotekehitystä ja meluasiantuntijan täytyi olla jatkuvassa yhteydessä kaikkien eri osa-alueiden suunnittelijoiden kanssa. Lisäksi kaikki ratkaisut täytyi yksityiskohtaisesti hyväksyttää loppuasiakkaalla, mikä aiheutti aikataulupaineita. Joitain asioita, kuten esimerkiksi pakoputkiston eristystä, jouduttiin vielä muokkaamaan asennuksen jälkeenkin, että asiakas sen hyväksyi.

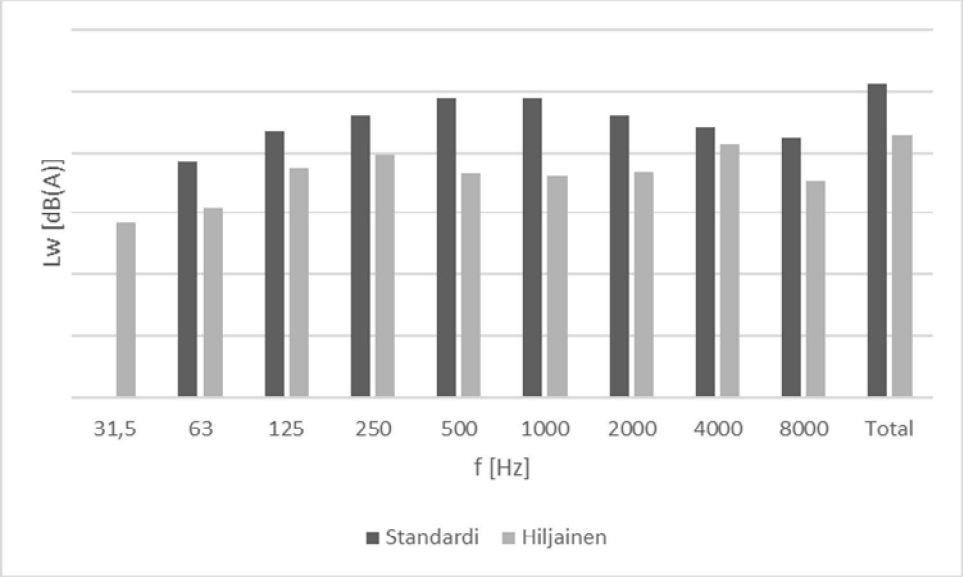
© 2019 Hankaniemi Virpi, Matalamäki Mikko ja Nousiainen Esa. Tämä on avoimesti julkaistu teos, joka noudattaa Creative Commons NIMEÄ 4.0 Kansainvälinen –lisenssiä (CC BY 4.0). Teosta saa kopioida, levittää, näyttää ja esittää julkisesti ja siitä saa luoda johdannaisteoksia, kunhan tekijän nimi ja lähde mainitaan asianmukaisesti.

2 MELULÄHTEET JA NIIDEN MELUNTORJUNTATOIMET

Voimalaitoksen päämelulähteet ovat jäähdytysradiaattorit, pakokaasupiippu, moottorisalin ilmanvaihto sekä voimalaitoksen seinien läpi tuleva moottoriaggregaatin melu. [1] Kaikkien melulähteiden tarkoituksenmukaiseen meluntorjuntaan on tarvittu pitkälle vietyjä toimenpiteitä, jotta viranomaisten asettamat vaatimukset meluimmissiolle lähimpien häiriintyvien kohteiden luona voidaan täyttää.

2.1 JÄÄHDYTYSRADIAATTORI

Jäähdytysradiaattorit on sijoitettu voimalaitosrakennuksen katolle. Niissä on yhteensä 90 puhallinta, joiden sähkömoottoreiden toimintaa ohjataan taajuusmuuttajilla. Puhaltimien tuottamaa ilmavirtaa käytetään voimalan jäähdyttämiseen. Jotta melupäästö saatiin riittävän alhaiseksi, jäähdytysradiaattoreissa käytettiin suuria 1,8 m halkaisijaltaan olevia puhaltimia alhaisella pyörimisnopeudella. [2] Kustannustehokasta sekä teknisesti ylivertaista jäähdytintä on kehitetty osana SOPEVA-projektia.



Kuva 1. Yhden jäähdytysradiaattorin äänitehotaso. Y-akselilla viivat on sijoitettu 10 dB välein. Ero standardin ja hiljaisen ratkaisun välillä on 17 dB.

2.2 PAKOKAASUPIIPPU

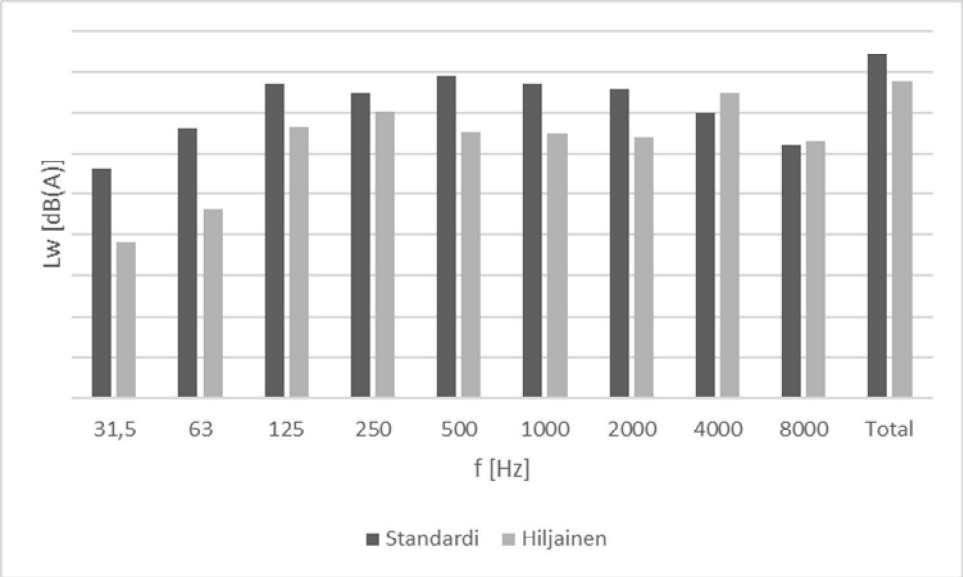
Wärtsilässä SOPEVA-projektissa ja jo sitä aiemminkin tehty määrätietoinen kehitystyö on mahdollistanut sen, että pakomeluemissio osataan vaimentaa tehokkaasti ja ennakoiden. Tämä on ollut edellytys, jotta voidaan täyttää Saksan pientaajuusmeluvaatimukset. [3]

Tässä voimalaitoksessa äänenvaimentimia, savukaasun puhdistuslaitteet ja lämmöntalteenottokattilat on sijoitettu voimalaitosrakennuksen sisälle. Pakokaasupiipun meluemissio on 22 dB pienempi kuin normaalissa voimalaitoksessa. Huomattakoon, että normaalissakin voimalaitoksessa on hyvin suunniteltu vaimennin.

2.2 ILMANVAIHTO

Kukin 10 MW moottoriaggregaatti tarvitsee 21 m^3/s jäähdytysilmaa. Suuren ilmamäärän vuoksi ilmanvaihtoaukkojen on oltava myös pinta-alaltaan suuria, jotta ilman virtausnopeus voidaan pitää riittävän alhaisena.

Äänenpainetaso on luokkaa 110 dB(A) seinien vieressä huoneissa, joihin moottoriaggregaatit sijoitettu. Tämän vuoksi ilmanvaihdon laitteissa on käytetty pitkiä lamellivaimentimia.

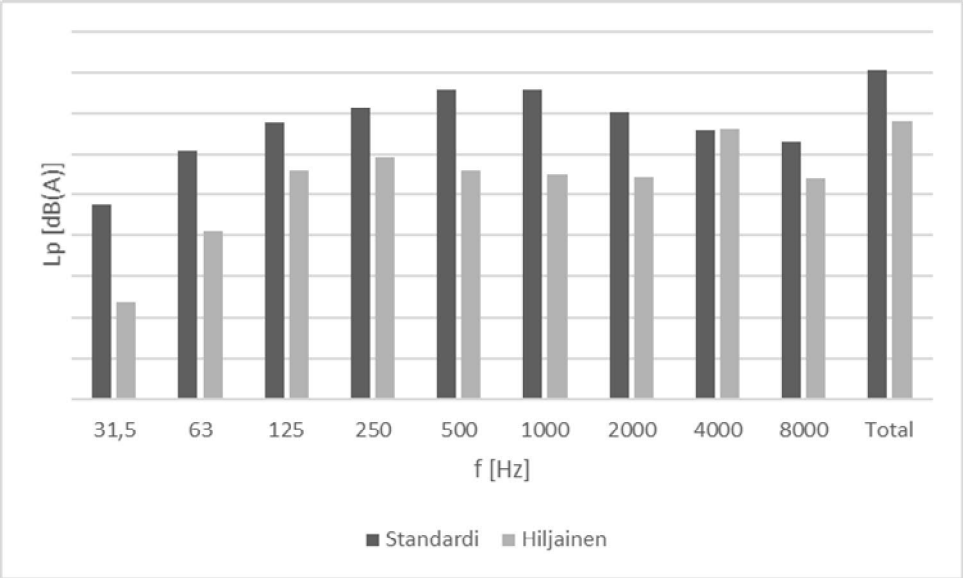


Kuva 2. Yhden ilmanvaihtoyksikön äänitehotaso. Y-akselilla viivat on sijoitettu 10 dB välein. Ero standardin ja hiljaisen ratkaisun välillä on 7 dB. Todennäköisesti osa hiljaisen ratkaisun meluemissiosta 4000 Hz taajuudella aiheutuu jostain muualta. Mittaus on toteutettu painemenetelmällä.

2.3 MOOTTORIAGGREGAATTI

Laitoksen moottoritila on jaettu viiteen huoneeseen. Yhdessä huoneessa on kaksi moottoriaggregaattia. Huoneiden välinen betoniseinä on suunniteltu siten, että viereisessä huoneessa voidaan tehdä huoltotoimenpiteitä ilman kuulonsuojausta. Voimalaitosrakennuksen toisessa kerroksessa olevat vaimentimet, savukaasun puhdistuslaitteet ja kattilat on sijoitettu yhteiseen tilaan moottoriaggregaattien yläpuolelle. Myös tässä tilassa voidaan työskennellä ilman kuulonsuojausta.

Moottoriaggregaatin ympärille on rakennettu kaksinkertaiset betoniseinät. Yksi seinä on kuitenkin kaksinkertaisesta teräs-sandwich-elementistä, jossa on suuri käytävänäkin toimiva ilmaväli. Tämä oli tarpeen mahdollisia huoltotoimenpiteitä varten.



Kuva 3. Äänenpainetaso 1 m etäisyydellä voimalaitoksen seinästä. Y-akselilla viivat on sijoitettu 10 dB välein. Ero standardin ja hiljaisen voimalaitoksen välillä on 12 dB.

3 VOIMALAITOKSEN MELUJALANJÄLKI

Melujalanjälki ilmaisee, kuinka suuri pinta-ala tarvitaan tietyn melutason saavuttamiseksi. Hiljaisen voimalaitoksen melujalanjälki on 99 % pienempi kuin standardivaihtoehdon. Ero on merkittävä.

4 YHTEENVETO

SOPEVA-projektissa toteutettu kehitystyö on ollut osaltaan edellytys, että Wärtsilä on voinut rakentaa voimalaitoksia Saksaan. Kehitystyön hedelmiä voidaan hyödyntää myös muissa voimalaitoksissa eri puolilla maailmaa ja yhtiölle kertynyt tietotaito on merkittävä pääoma. Aiemmin hiljainen voimalaitos oli haave, nyt se on realismia.

VIITTEET

[1] Veijanen, V. et.al. Voimalaitoksen ympäristömelun tehokas ja luotettava kuvaus. Akustiikkapäivät 2013.

[2] Oksanen, S. et.al. Wärtsilä ja akustiikka – Katsaus ajankohtaisiin haasteisiin. Akustiikkapäivät 2017.

[3] Matalamäki, M. et.al. Voimalaitoksen pakokanavan pientaajuusemissio ja raja-arvojen haasteet. Akustiikkapäivät 2019.

VOIMALAITOKSEN PAKOKANAVAN PIENTAAJUUSMELUPÄÄSTÖ JA RAJA-ARVOJEN HAASTEET

Mikko Matalamäki, **Virpi Hankaniemi**, **Esa Nousiainen**

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

Tiivistelmä

Nykyisestä energiatuotannon hajautumisen trendistä johtuen voimalaitoksia halutaan rakentaa lähelle asutusta. Tyypillisesti voimalaitoksen pakoputken pään melupäästölle on asetettu pelkkä A-painotettu äänitehotason raja. Kehittyneissä maissa, kuten Saksassa, on tiukat ja yksityiskohtaiset meluimmissiorajat, jotka on määritetty terssikaistoittain melun häiritsevyyden vähentämiseksi.

Saksaan toimitettavassa voimalaitoksessa pakoputkiston pään pientaajuusmelupäästölle on määritetty standardin DIN 45680 mukaiset terssikaistakohtaiset rajat, jotka pohjautuvat ihmisen kuulokynnykseen matalilla taajuuksilla ja tapauskohtaiseen etäisyyteen pakoputkiston päästä lähimpään mahdollisesti häiriintyvään kohteeseen. Tämän voimalaitoksen pakokanavan pientaajuusmelupäästön suunnittelu ja melupäästörajojen määrittämisen eteneminen kerrotaan tässä esityksessä.

1 JOHDANTO

Saksassa on käynnissä kansallinen ohjelma, jolla rahallisesti tuetaan yhdistetyn sähkön- ja lämmöntuoton kaasuvoimalaitosten tuottamaa sähköä. Perusteena ohjelmalle on halu päästä eroon saastuttavasta kivihiilestä ja tukea uusiutuvien energiantuottomuotojen kasvavaa osuutta rakentamalla ympäristöystävällistä ja nopeaan reagointiin kykenevää energiantuottokapasiteettia. [1] Wärtsilä on rakentanut kaksi tämänkaltaista voimalaitosta Saksaan ja kolmas on suunnitteluvaiheessa.

Saksassa on asetettu uusille voimalaitoksille verrattain tiukat ja yksityiskohtaiset melurajat ja -vaatimukset. Vaatimukset pohjautuvat paikalliseen melulainsäädäntöön ja vaihtelevat kaupunki- ja laitoskohtaisesti. Uuden laitoksen meluimmission kokonaistaso täytyy olla 6...12 dB(A) alhaisempi kuin melulainsäädännön raja-arvo lähimmän häiriintyvän kohteen luona. Lopulta paikallinen viranomainen määrittää vaaditun raja-

© 2019 Mikko Matalamäki, Virpi Hankaniemi ja Esa Nousiainen. Tämä on avoimesti julkaistu teos, joka noudattaa Creative Commons NIMEÄ 4.0 Kansainvälinen –lisenssiä (CC BY 4.0). Teosta saa kopioida, levittää, näyttää ja esittää julkisesti ja siitä saa luoda johdannaisteoksia, kunhan tekijän nimi ja lähde mainitaan asianmukaisesti.

arvon. Koska etäisyyttä lähimpään mahdollisesti häiriintyvään kohteeseen ei ennalta tiedetä, vaatimukset voivat poiketa merkittävästi eri voimalaitosten välillä.

2 PIENTAAJUUSMELUPÄÄSTÖN RAJA-ARVOT HUOMIOON OTTAVA SUUNNITTELU

Kirjoituksessa tarkastellaan Saksaan rakenteilla olevaa kokonaisteholtaan 90 MW kahdeksan Wärtsilä W20V31SG-moottorin voimalaitosta. Tyypillisesti voimalaitosprojektissa pakoputken pään melupäästölle on asetettu A-painotetun kokonaisäänitehotason raja ilman taajuuskaistakohtaisia raja-arvoja. Tässä projektissa oli lisänä teknisesti vaativampana raja-arvona pakoputken pään terssikaistakohtainen äänitehotaso taajuusalueella 12.5...80 Hz. Raja-arvo perustuu projektin ympäristölupahakemuksen ympäristömelulaskentaan ja standardiin DIN 45680. Ehtona on, että meluimmissio lähimmässä mahdollisesti häiriintyvässä kohteessa on jokaisella tarkasteltavalla terssikaistalla alle ihmisen kuulokynnyksen, jolloin voidaan todeta että pientaajuusmelu ei tule olemaan kuultavissa eikä siten ei ole häiritsevää.

Huomionarvoista on, että pientaajuusmeluvaatimus koskee nimenomaan asujaimistojen sisätiloja. Vaadittu terssikaistakohtainen äänenpaine on esitetty taulukossa 1 alla.

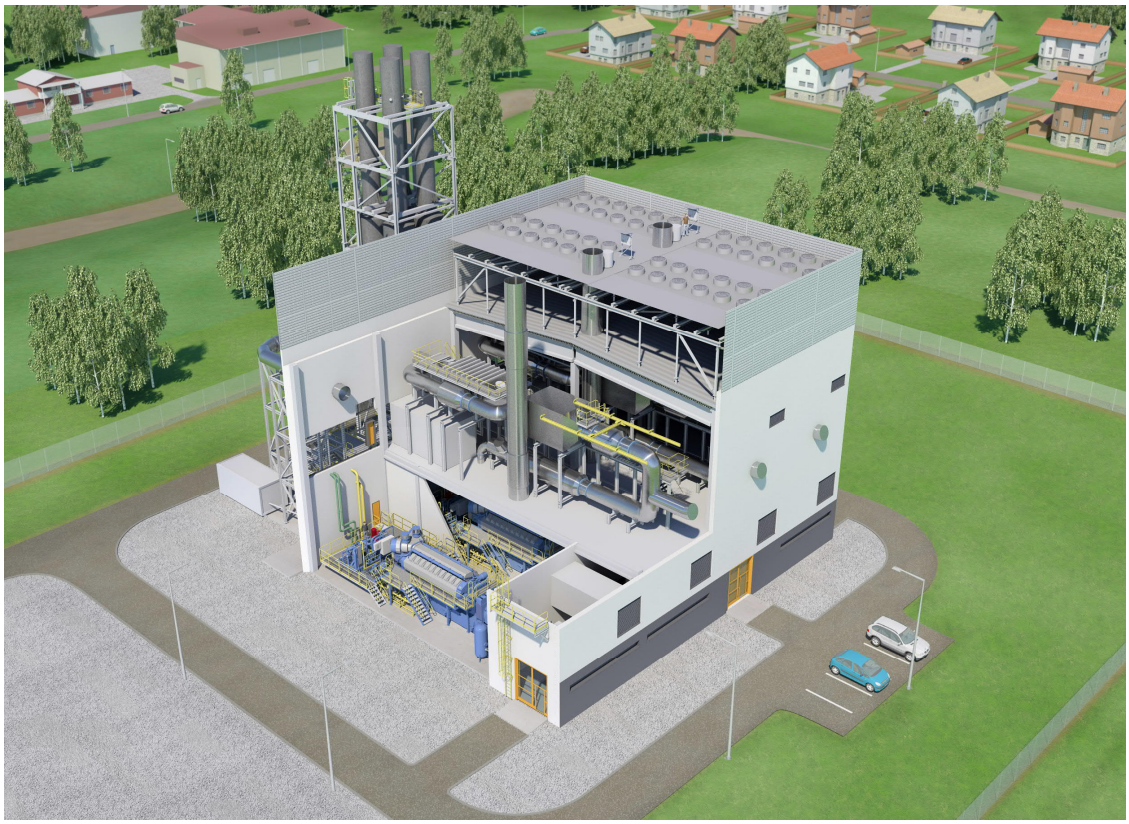
Taulukko 1: Kuulokynnys terssikaistan keskitaajuuden funktiona. [2]

Centre frequency of third-octave band, in Hz	Hearing threshold level, L_{HS}, in dB
8	103
10	95
12,5	87
16	79
20	71
25	63
31,5	55,5
40	48
50	40,5
63	33,5
80	28
100	23,5
NOTE 1: The values given for frequencies of 20 Hz and higher correspond to the values represented in the hearing threshold curves given in DIN 45630-2. The values for the lower frequencies are taken from [3] and [4] (cf. Explanatory notes). NOTE 2: Third-octave bands with centre frequencies of 8 Hz or 100 Hz should only be considered in the special case described in subclause 3.1.	

Wärtsilän voimalaitossuunnitelussa on ennenkin otettu pientaajuus- ja infraäänet huomioon häiritsevyyden kannalta, mutta ei terssikohtaisina raja-arvoina [3]. Projektikohtaiset raja-arvot eivät usein ole täydellisesti ennakoitavissa, johtuen yksityiskohtaisen tiedon puutteesta. Esimerkiksi lähimpien häiriintyvien kohteiden

sijaintia ei tiedetä. Lisähaaste tässä tapauksessa on se, että W20V31SG moottori on uusi, eikä sitä ole aiemmin käytetty voimalaitoksen rakentamiseen.

Saksaan rakennettavat mäntämoottorivoimalaitokset suunnitellaan siten, että kaksikerroksisessa voimalaitosrakennuksessa alempaan kerrokseen on sijoitettu moottori apulaitteineen ja ylempään kerrokseen pakokaasukomponentit, mukaan lukien äänenvaimentimet. Kaksikerroksista pakokaasukomponentit sisätiloissa sisältävää ratkaisua käytetään muun muassa pienemmän melupäästön ja tilansäästön vuoksi. [4]



Kuva 1: Periaatekuva tyypillisestä Saksaan rakennettavasta voimalaitoksesta. [5]

Pakokanavaan on asennettu kolme äänenvaimenninta melupäästön pienentämiseksi. [6] Projektissa käytettävistä pakokaasuvaimentimista osan toiminta on testattu mittaamalla vaimennintoimittajan tehdastiloissa. Projektissa käytettävien katalyyttireaktorin ja pakokaasukattilan akustista toimintaa ei pienillä taajuuksilla tunneta tarkasti.

Pakokaasukanavan komponentit on asennettu kaksikerroksisen voimalaitosrakennuksen toiseen kerrokseen, noin 10 metrin korkeudelle maan pinnasta. Jos mitoitus epäonnistuu ja laitoksen käynnistyessä raja-arvoihin ei päästä, on muutosten tekeminen erittäin vaikeaa ja kallista. Toisaalta, äänenvaimentimen akustinen ylimitoitus lisää kustannuksia tarpeettomasti ja vie tilaa.

3 PIENTAAJUUSMELUPÄÄSTÖN MÄÄRITTÄMINEN JA LASKENTA

Voimalaitosprojektin myyntivaiheessa sopimuksessa oli mainittu terssikaistakohtainen pientaajuusäänitehoraja, jonka perusteella pakokaasujärjestelmä vaimentimineen suunniteltiin. Pientaajuusrajojen määrittely perustui akustiikkakonsultin laskentaan standardin DIN 45680 pohjalta. Vaadittuja raja-arvoja voitiin pitää tiukkoina mutta realistisina, ja alkuvaiheen laskelmien mukaan raja-arvot olivat saavutettavissa kohtuullisilla ratkaisuilla.

Alle kaksi viikkoa ennen kaupan syntyä ilmi tulivat kaupungin viranomaisten asettamat, huomattavasti tiukemmat raja-arvot. Raja-arvot olivat terssikaistasta riippuen jopa lähes 40 desibeliä alhaisemmat kuin sopimuksessa olleet raja-arvot. Lisäksi tarkastelu ulottui aiempaa laajemmalle alueelle, terssikaistoille 8...100 Hz. Oli välittömästi selvää, että nämä raja-arvot eivät olleet tarkoituksenmukaisia uudelle voimalaitokselle.

Asiakkaalta saatu tieto oli, että kaupungin viranomaisilla oli ollut lähihistoriassa negatiivisia kokemuksia pientaajuusmelusta. Uusilla raja-arvoilla oletettavasti haluttiin varmistaa, että pientaajuusmelu ei varmasti häiritse asukkaita. Koska aikaa ei ollut riittävästi haastamaan viranomaisten näkemystä sopimuksen loppuvaiheen neuvottelujen aikataulusta johtuen, tulevan asiakkaan kanssa sovittiin, että asiasta sovitaan yksityiskohtaisesti myöhemmin.

Wärtsilän voitettua voimalaitoskaupan alkoi kaupungin viranomaisten kanssa monivaiheinen neuvottelu sovellettavista pientaajuisen melun raja-arvoista. Wärtsilän ehdotukset sovellettavasta raja-arvosta perustuivat standardiin DIN 45680 ja pakoputken pään melupäästöön. Tavoite oli riittävän alhainen melutaso kuulokynnykseen verrattuna häiriintyvässä kohteessa.

Kielimuuri, monen eri tahon osallistuminen ja epäsuora kommunikointikanava projektiryhmän ja asiakkaan kautta hankaloittivat neuvotteluita. Neuvottelun aikana keskusteltiin myös siitä, voidaanko voimalaitosprojektia toteuttaa ollenkaan, jos viranomaisten määräämät raja-arvot eivät ole realistisesti saavutettavissa.

Wärtsilä oli aiemman voimalaitosprojektin yhteydessä konsultoinut Müller-BBM GmbH suunnittelutoimistoa saksalaiseen melulainsäädäntöön liittyen. Pienitaajuisen melun raja-arvo määritetään asuintalojen sisätilassa. Talon seinien vaikutus otetaan huomioon olettamalla että jokaisella terssikaistalla melu vaimenee 15 dB seinän vaikutuksesta. Tätä tason alenemaa ei hyväksytty otettavan huomioon lainkaan tässä projektissa, paikallisen käytännön vuoksi.

Raja-arvojen neuvottelun aikana koko pakoputkisto kaikkine komponentteineen mallinnettiin akustisella elementtimenetelmällä ja VA One -ohjelmistolla laskettiin siirtohäviö (transmission loss), jotta voitiin varmistua, ettei pakoputkiston vaimennusvasteeseen jää ”heikkoja kohtia”. Myöhemmin laskettiin samaa mallia hyödyntäen pakoputken pään melupäästö myös moottorin oikeita lähdeominaisuuksia hyödyntäen. Molempien mallinnusten tulokset näyttivät rohkaisevalta, mikä lisäsi uskoa järjestelmän toimivuuteen.

Viranomaisten kanssa päästiin lopulta yhteisymmärrykseen terssikaistatasoista, joihin molemmat osapuolet olivat tyytyväisiä. Lopulliset raja-arvot olivat silti 6...17 dB alhaisemmat kuin sopimuksessa alunperin olleet raja-arvot. Raja-arvojen laskun vuoksi

Wärtsilä päätyi lisäämään yhden reaktiivisen lisävaimentimen pakoputkistoon. Mitoituksen varmuusvaraa jouduttiin myös käytännössä pienentämään, ja olettamaan että kaikki lopulta toimii niin kuin on suunniteltu.

Voimalaitoksen on määrä käynnistyä kesällä 2021, jolloin nähdään, toimiiko pakokaasujärjestelmä akustisesti kuten on suunniteltu. Lisäksi eri moottorilla käyvästä vastaavantyyppisestä voimalaitoksesta on saatu melumittaustulokset, jotka vahvistavat uskoa tämän kaltaisen pakokaasujärjestelmän toimintaa kohtaan. Jos tämä toimii kuten on ennustettu, on voimalaitoksen pakomelupäästö todennäköisesti pienin, mitä Wärtsilän voimalaitoksissa on koskaan ollut.

4 YHTEENVETO

Wärtsilä suunnittelee paraikaa erittäin hiljaista voimalaitosta Saksaan. Pakoputken pään melupäästörajat ja niiden arviointi, laskenta sekä viranomaisten kanssa toiminta ja sopivien raja-arvojen neuvotteleminen osoittautuivat haastaviksi, mutta menestyksekkäiksi tehtäviksi. Neuvottelu siitä, mihin raja-arvot asetetaan, sisälsi monia haasteita. Lopputuloksena saatiin asetettua sitovat raja-arvot, joihin kaikki osapuolet ovat ainakin jokseenkin tyytyväisiä.

Lopullisten raja-arvojen on arvioitu olevan haastavat mutta toteuttamiskelpoiset. Laskennan tulokset ja onnistunut toteutus eri moottorilla antavat uskoa onnistumiseen tässäkin tapauksessa. Kokemukset laitoksesta ja meluteknisestä kehitysprosessista antavat ennennäkemättömän hyvät mahdollisuudet Wärtsilälle suunnitella erittäin hiljaisia, lähelle asutusta sijoitettavia voimalaitoksia.

VIITTEET

[1] Andersson, J. Flexibility is the new black, 2018. www.wartsila.com

[2] DIN 45680: 1997-03, Measurement and evaluation of low-frequency environmental noise. 8 sivua.

[3] Veijanen, V. et.al. Mäntämoottorivoimalaitoksen ympäristömelun psykoakustisia piirteitä. Akustiikkapäivät 2011.

[4] Oksanen, S. et.al. Wärtsilä ja akustiikka – Katsaus ajankohtaisiin haasteisiin. Akustiikkapäivät 2017, 56-62.

[5] Flexible combined heat and power & trigeneration solutions, 2019. https://www.wartsila.com/energy/explore-solutions/flexicycle-and-chp/combined-heat-and-power-(chp)-plants

[6] Tanttari, J. et.al. Pakoäänenvaimentimen kehitysprosessi. Akustiikkapäivät 2013, 67-72.

EXPERIMENTAL AND SIMULATION STUDY ON LARGE ENGINE EXHAUST NOISE

Kari Saine[1], **Zengxin Gao** [1]

[1] *Wärtsilä Finland Oy*
Järvikatu 2-4, 65100 Vaasa, Finland
kari.saine@wartsila.com

Tiivistelmä

Large engine low frequency exhaust noise is one of the key sources of environmental annoyances, especially when the residential area is nearby harbour, power plant, or industrial factory. There is lack of worldwide standard defining how and where exactly the noise should be measured, especially for in-duct noise in the exhaust pipeline system. The limitations in regulations related to this subject are rather local, i.e. different by countries or areas. One of the reasons behind is believed to be that the low frequency noise is indeed difficult to be measured in a simple way with high accuracy and reliability. Wärtsilä has over decade of exhaust noise experience and recently in cooperation with VTT even deeper investigation about exhaust noise has been made. In this paper, the challenges of exhaust noise measurement are revealed and the benefit of utilizing the combination of engine performance software and finite element method software for exhaust noise calculation is demonstrated. The importance of pipeline system influence to the measured exhaust noise level is addressed. Exhaust pipeline resonances influenced by exhaust gas temperature will be explained in detail.

1 BACKGROUND

Engine exhaust noise has low frequency feature and for most people it becomes annoying as long as it can be heard. Wärtsilä has decades of experience on this topic. At the beginning of 90's this low frequency thumping caused lots of problems in Turku and Vaasa during long running test periods. It was found that wrong types exhaust noise silencers were used. Power plant started co-operation with Danish company ODS (Ødegaard & Danneskiold-Samsøe). Together with JTK Power the right types of silencers were developed, after which most of the problems were solved. The entire project took about 3 years' time. During that time, it was also clear that basic noise training courses were needed. In 1996 Wärtsilä published the first training materials for the salesmen and designers. Wärtsilä have kept these basic noise courses more than 15 years for employees. In 1997 Wärtsilä introduced the world's largest 4 stroke medium speed diesel engine, Wärtsilä 6L64 (with cylinder bore diameter of cylinder 64cm and output of 2MW per cylinder). New type of exhaust silencer was designed. After the first testing, people

© 2019 Kari Saine ja Zengxin Gao. Tämä on avoimesti julkaistu teos, joka noudattaa Creative Commons NIMEÄ 4.0 Ei sovitettu –lisenssiä (CC BY 4.0). Teosta saa kopioida, levittää, näyttää ja esittää julkisesti ja siitä saa luoda johdannaisteoksia, kunhan tekijän nimi ja lähde mainitaan asianmukaisesti.

working in the office had the common feeling that the noise could not be heard but can be felt. The firing frequency was 17Hz, which you can't hear but feel. Many big windows vibrated because of the exhaust wave pulses. The problem was solved by a resonator. After this case most of the laboratory exhaust silencers were reformed [1].

For the measurement in duct line, at the beginning the Brüel & Kjær exhaust probe was used, but it was quite sensitive of high temperature. Many times, the probe was burned. In 1996 first time we lead the exhaust gas to the air directly by removing the exhaust silencer. Of course, the whole city of Vaasa heard this measurement, Figure 1.

Figure 1: Exhaust noise measurement by removing the silencer, 1996.

The new exhaust silencers were developed and designed by Alpo Halme in 1999. First time also the attenuation curve was measured. These silencers are still in use. In 2002 Wärtsilä started co-operation with Claes-Göran Johansson from ABB Västerås and prof. Mats Åbom from KTH (Royal Institute of Technology). The new type of exhaust probe was developed, sc. SESAM probe. With this probe it was easy to measure the exhaust noise level after turbo charger [2-4]. Flow noise was also tested at KTH, Figure 2.

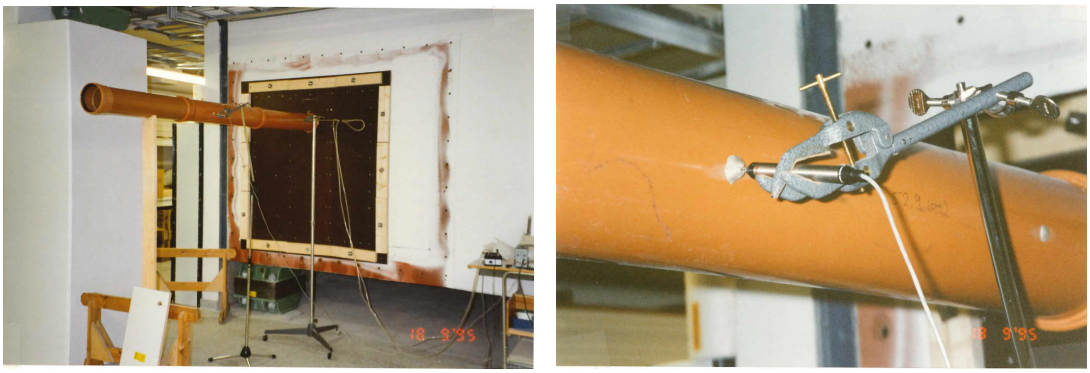


Figure 2: Flow noise test at KTH, Stockholm.

From those days Wärtsilä could produce reliable exhaust noise source data to our customers and for silencer manufacturers. From 2003 Wärtsilä started new and very interesting co-operation with JTK Power to develop even better silencers. New measurement systems for obtaining attenuation curve of the silencers were developed together with ABB. One M.Sc. project has been working on this issue.

2 RECENT RESEARCH

In recent decade, exhaust noise has become more and more important because the awareness of people's comfort has increased. Noise is seriously taken as one of the most important sources for environmental pollution. For environmental noise control, Wärtsilä has installed noise monitors on factory roofs to examine the noise situation near the pipelines, and the results have been published in quite many conferences [5-6].

Moreover, from experience it is known that the measurement of exhaust noise in duct line may have quite much uncertainties, especially when a single sensor is used on a duct line with complex geometry. To avoid smooth out pipeline geometry influence, the measurement needs to be taken at multiple locations along the duct line. To get the netto source strength and load impedance, two microphones are needed at the same time. Finally, to get the pipeline independent source strength and source impedance, two microphones need to measure at multiple acoustic load conditions, e.g. various pipelines [7]. This is a bit unfeasible for real industrial environment but can be done by software.

In the most recent years Wärtsilä started exhaust noise simulation by GT-Suite and modelling the complete duct line for some cases with FEM software, e.g. Actran or VA One. This is done in close cooperation with VTT (Technical Research Centre of Finland), as well as FFT (Free Field Technologies). Recent work has been published worldwide [8].

3 EXHAUST NOISE MEASUREMENT

At low frequencies, most of the exhaust noise energy is in the plane wave region. In case of medium speed engines with large exhaust pipeline, the plane wave region is normally below 200 Hz. Measurement locations and typical noise spectra are shown in Figure 3.

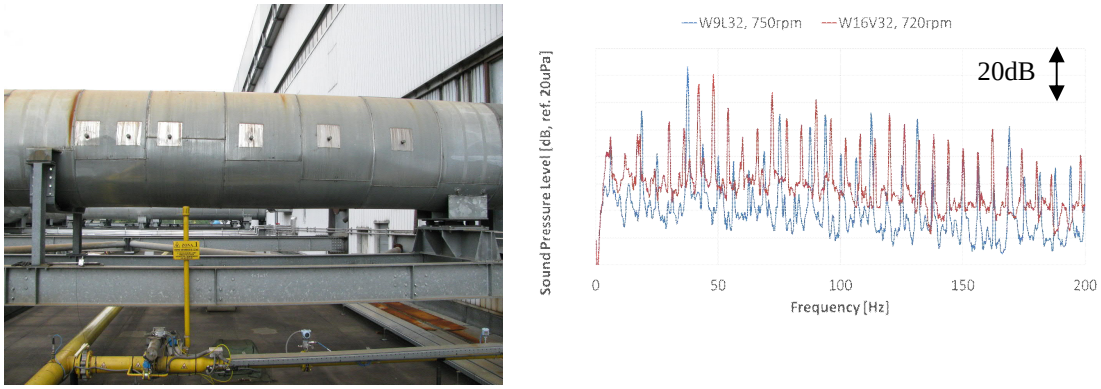


Figure 3: Left, six measurement locations for exhaust noise after turbocharger outlet and before exhaust silencer; Right, typical exhaust noise spectra in the pipeline.

Exhaust noise is measured by a probe microphone inserting through the pre-drilled holes on the duct to obtain the in-duct noise level. The in-house measurement method with six points has been used over decade in Wärtsilä. The idea of measuring six locations before the first exhaust silencer is to get a decent average spatially for the levels of the octave band center frequencies in the plane wave region. Since the engines are 4-strokes, the noise peaks in the spectra typically will have 0.5 order intervals.

As mentioned earlier, the measurement has many uncertainty factors, e.g. pipeline geometry, flow influence, exhaust temperature change and sensor reliability etc. To get better

understanding of the pipeline resonance influence to measured results, in addition to constant speed measurement one should also do the speed sweep measurement. An example of W9L34DF (dual-fuel) speed sweep is shown in Figure 4.

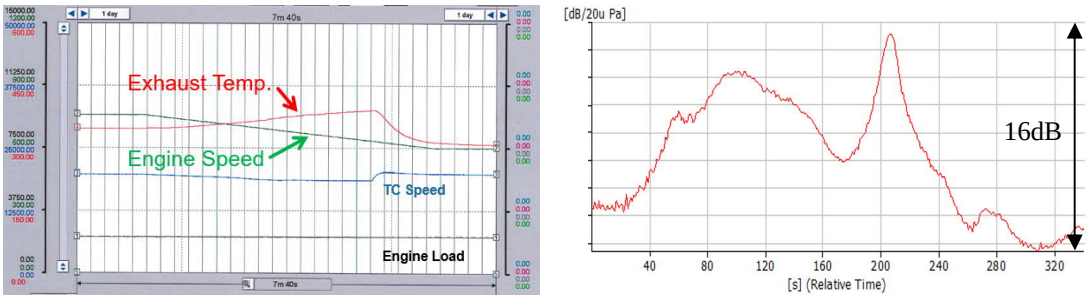


Figure 4: Left, engine speed, load, turbine speed and exhaust temperature curves during W9L34DF speed sweep 760-600rpm at 50% load; Right, total in-duct noise level variation during sweep at one measurement location.

During the sweep 760-600rpm, exhaust temperature had a variation of about 50 Celsius. The total in-duct noise level had a variation about 16dB. For a constant load, 16dB variation is considerably large. Further, the noise spectra are plotted in Figure 5.

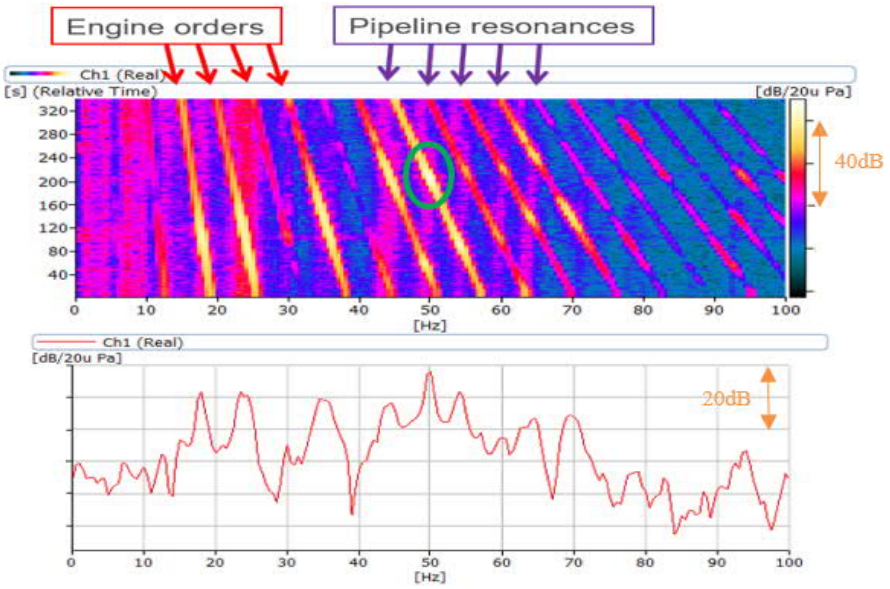


Figure 5: Upper, in-duct sound noise level in contour plot for the speed sweep; Lower, peak-hold spectrum [8].

As known, the sound speed changes with temperature. Thus, with unchanged geometry of a pipeline, the resonant frequencies of standing waves will change accordingly. In the contour plot one may see the forward-slash lines representing the resonances of the pipeline, and the backslash lines are the exhaust noise peaks for various engine orders. When the engine order lines come across with pipeline resonance lines, high noise level will occur, in case of which the measured level is an overestimate. It can also happen that the engine order lines come across with anti-resonance lines, in case of which the measured level is an underestimate. In other words, at constant load and certain speed condition, the measured noise spectrum in pipeline is not reliable due to the influence of pipeline resonances. In the peak-hold spectra one can also see that at 50 Hz as an example having the

highest noise level. This is due to exhaust noise at engine order 4.5 has encountered with one of the pipeline resonances, marked out by green oval.

4 EXHAUST NOISE SIMULATION

In cooperation with VTT, one of the diesel test cell pipelines in Wärtsilä Vaasa factory was simulated by using FEM tools for acoustic purpose during 2018. The results of simulation were later compared with measurements, Figure 6-7.

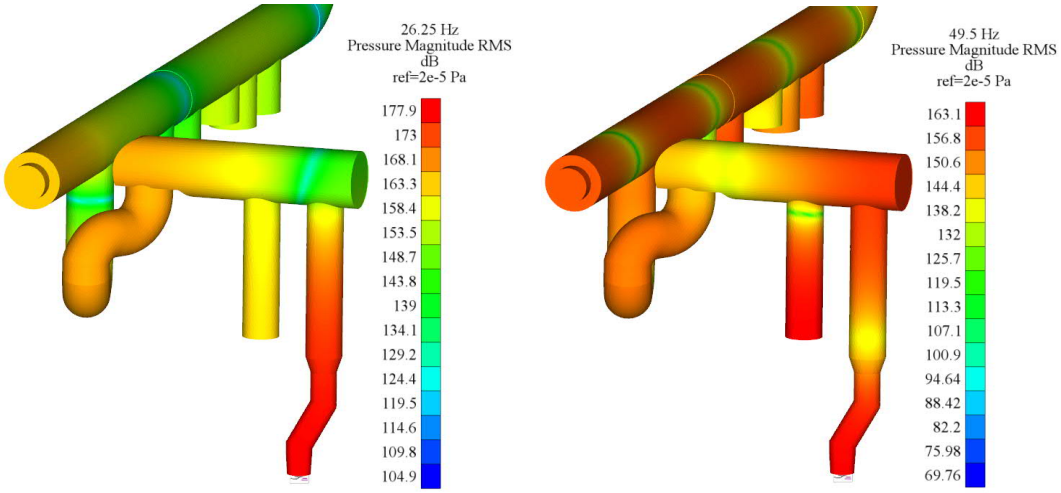


Figure 6: Simulated sound fields resonances examples.

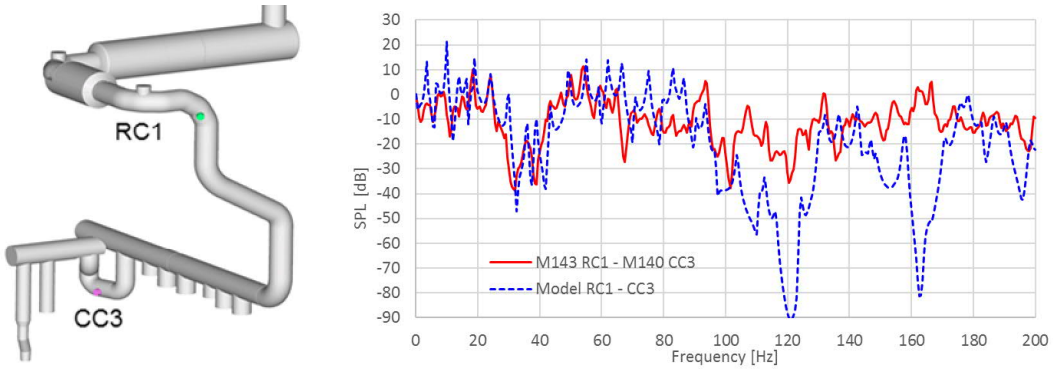


Figure 7: Measured (solid red) and simulated (dotted blue) level differences (NR) between RC1 and CC3.

Couple of interesting results are presented in Figure 9 as examples. At 26 Hz there is the first sound power maxima due to the inlet pipe and around 49 Hz there is also a clear global resonance of the system. Moreover, another way is to compare level differences (Noise Reduction, NR) between points. This quantity should be independent of excitation. A comparison of simulated and measured NR between two locations RC1 and CC3 is shown in Figure 10. In general, the simulation result corresponds well with measurement results, especially at low frequencies (<100 Hz). At higher frequencies the resonances and anti-resonances are not so clear in measurement as in simulation. Probable causes to difference between measurement and simulation results are convection of sound in flow, temperature and damping to mention a few. For the flow-induced sound, its generation was not modelled [8].

5 SUMMARIES

Over years Wärtsilä has increased in-house knowledge, developed measurement technology, and improved simulation method for the topic of large engine exhaust noise. It is already well known that low frequency in-duct exhaust noise measurement may have high uncertainties in the result due to various factors, e.g. flow influence, pipeline geometry caused resonances, temperature change, and reflected waves etc. To achieve reliable results for customers and silencer designers, simulation is a powerful tool to be used together with measurements. One of the biggest advantages of simulation is the result will not be influenced by flow. Besides, all controllable parameters can be optimized.

The engine source data can be achieved by using GT-Suite, after which the whole pipeline can be simulated by FEM tools or other 1D software. Especially for the GT-Suite simulation, it was found out that correct setup for crucial parameters as well as turbocharger map is important for the result accuracy.

VIITTEET

[1] K. Saine, Z. Gao, E. Nousiainen, Two decades of noise research in Wärtsilä, Proceedings of BNAM, Tallinn, Estonia, 2-4 Jun., (2014).

[2] M. Aura, K. Saine, C. G. Johansson, P. Johansson, Experience of the in-duct exhaust noise measurement system, Proceedings of Inter-noise, Hawaii, USA, 3-6 Dec., (2006).

[3] C. G. Johansson, K. Saine, P. Johansson, M. Åbom, Exhaust noise – a new novel in-situ measurement technology in duct, Proceedings of ICSV12, Lisbon, Portugal, 11-14 Jul., (2005)

[4] M. Aura, Combustion engine exhaust noise, Master Thesis, Helsinki University of Technology, Vaasa, Finland, (2006).

[5] K. Saine, Z. Gao, A. Leskinen, R. Hjort, Long term noise measurements – Is Leq(A) run out of steam, Proceedings of BNAM, Stockholm, Sweden, 20-22 Jun., (2016).

[6] Z. Gao, S. Oksanen, K. Saine, J. Hartikainen, R. Hjort, Low frequency noise investigation and solution for a large diesel engine factory in the city, Proceedings of Inter-noise, California, USA, 9-12 August, (2015).

[7] A. Hynninen, Acoustic in-duct characterization of fluid machines with applications to medium speed IC-engines, Doctoral Thesis, KTH, Stockholm, Sweden, (2015).

[8] Z. Gao, K. Saine, A. Hynninen, J. Tanttari, Large engine exhaust noise in real life and measurement techniques in practice, Proceedings of ICSV26, Montreal, Canada, 7-11 Jul., (2019).

YMPÄRISTÖMELUN MITTAAMINEN KÄYTTÄEN AUTOMAATTISTA LÄHTEIDEN TUNNISTUSTA

Panu Maijala[1], **Toni Heittola**[2] **ja Tuomas Virtanen**[2]

[1] VTT
Visiokatu 4, 33720 Tampere
etunimi.sukunimi@vtt.fi

[2] Tampereen yliopisto
Audio research group
Korkeakoulunkatu 7, 33720 Tampere
etunimi.sukunimi@tuni.fi

Tiivistelmä

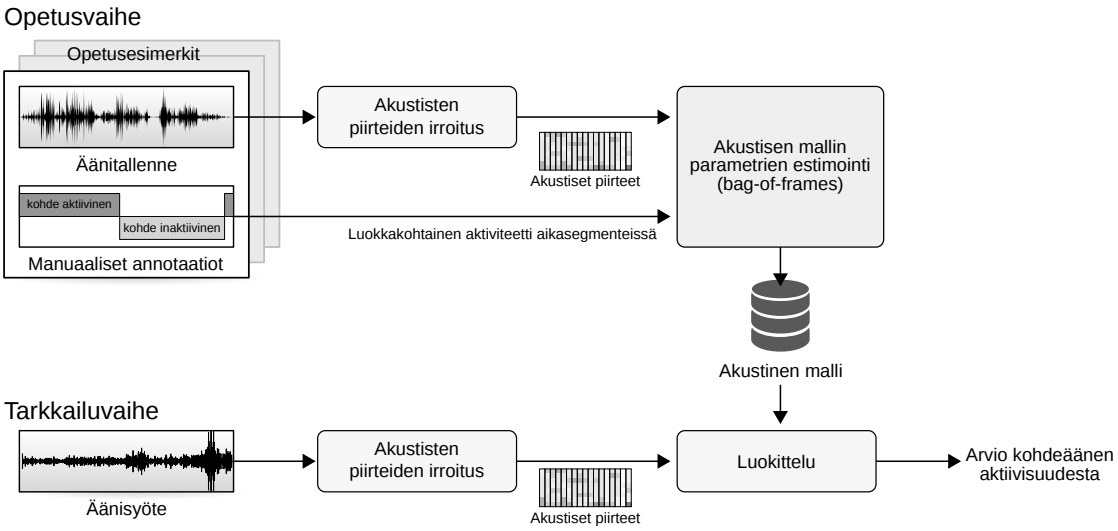
Jatkuvatoimisen ympäristömelun mittaamisen suuri haaste on ollut eri äänilähteiden osuuksien erottelu mittauksen aikana vallinneesta kokonaisäänitasosta. Yleensä mittaus suoritetaan selkeästi osoitettavissa olevan melulähteen vuoksi ja lopputuloksesta pyritään poistamaan muiden melulähteiden vaikutus. Ajallisesti lyhyessä mittaustapahtumassa mittaaja voi todentaa tilanteen joko kuuntelemalla mittaushetkellä tai tallennetusta äänestä jälkikäteen. Olemme toteuttaneet hahmontunnistukseen perustuvan luokittelualgoritmin äänitasomittariin ja testanneet sitä useissa eri kohteissa. Tässä paperissa kerromme uudesta äänitasomittarikonseptista, siihen toteutetusta opetetusta luokittelijasta ja luokittelijan suorituskyvystä pilottitutkimuksemme aikana. Lisäksi kerromme kohtaamistamme haasteista ja ratkaisuista niihin.

1 JOHDANTO

Ympäristömelua syntyy monista ihmisen toimista, työssä ja vapaa-aikana. Tyypillisiä ympäristömelulähteitä ovat lentokentät, ampumaradat, satamat ja kivenmurskaamot. Ääni saattaa kuulua sopivissa olosuhteissa jopa kymmenien kilometrien päähän näistä melulähteistä. Sää vaikuttaa merkittävästi melun leviämiseen [1] ja sään vaikutuksen aiheuttaman äänitasojen vaihtelun selvittämiseksi melua tulee seurata riittävän pitkään [2], tai käyttää statistiikkaan perustuvaa ympäristömelumallia, jolla keskiäänitason lisäksi myös vaihtelun suuruusluokka voidaan arvioida [3, 4].

Melun pitkäaikaisessa seurannassa on useita ongelmia: arvokkaita mittalaitteita ei voi sitoa yhteen kohteeseen pitkäksi aikaa ja yksittäinen mittauspiste ei useinkaan ole hyvä edustamaan koko naapuruston äänitasojen vaihtelua. Yksi haastavimmista ongelmista

Copyrigth ©2019 Panu Maijala, Toni Heittola ja Tuomas Virtanen. Tämä on avoimesti julkaistu teos, joka noudattaa Creative Commons NIMEÄ 4.0 Kansainvälinen –lisenssiä (CC BY 4.0). Teosta saa kopioida, levittää, näyttää ja esittää julkisesti ja siitä saa luoda johdannaisteoksia, kunhan tekijän nimi ja lähde mainitaan asianmukaisesti.



Kuva 1: Kohteen automaattisen äänitunnistamisen lohkokaavio.

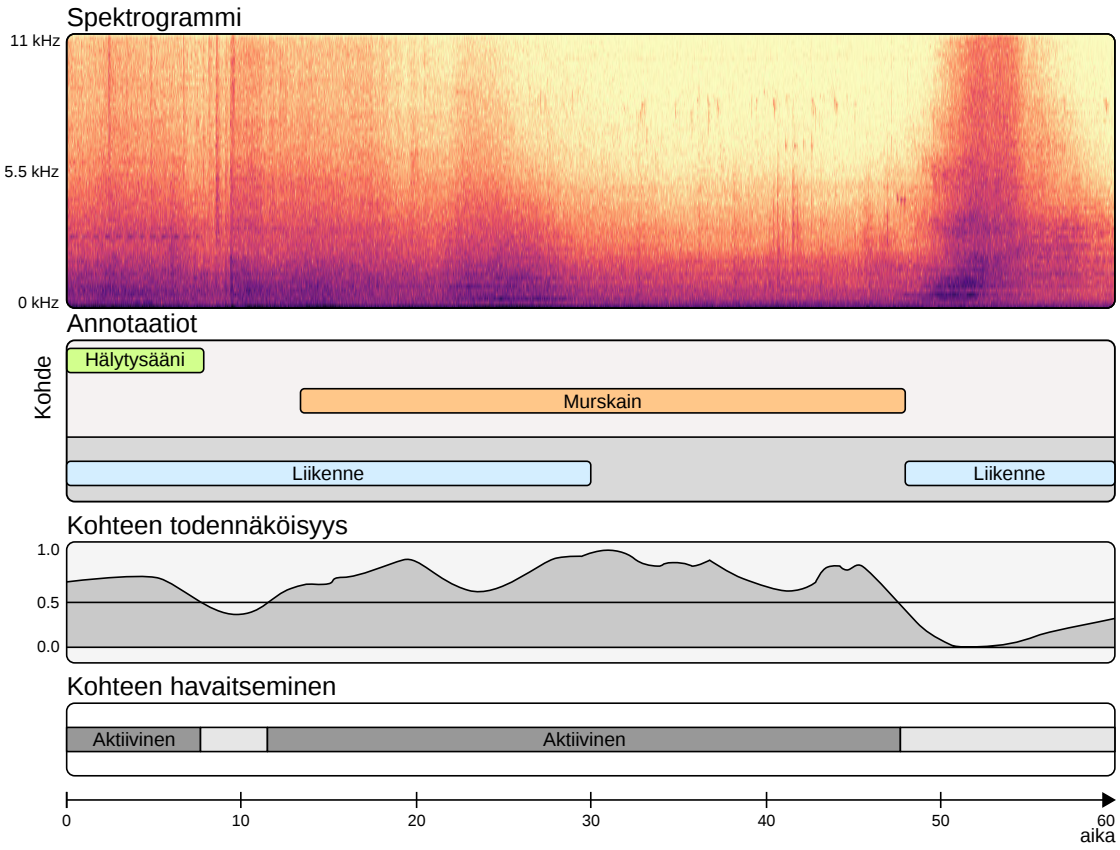
on kuitenkin, miten erottaa mittausdatan joukosta ne äänitasolukemat, jotka eivät ole peräisin seurattavasta melulähteestä. Jos seurattava melulähde tuottaa merkittävästi muuta ympäristömelua suurempia äänitasoja, on äänitasoon perustuva luokittelu aivan riittävä. Asuinympäristössä syntyy usein ihmisen harrastetoiminnastakin (ruohonleikkurit, moottorisahat, painepesurit, lehtipuhaltimet) hetkellisesti suuria äänitasoja, jotka voivat vaikuttaa mittaustulokseen. Yhtenä ratkaisuna on käytetty äänisignaalin tallentamista äänitasojen tallentamisen lisäksi, jolloin mittauksista voidaan jälkikäteen kuuntelemalla todentaa, mitkä ajanhetket edustavat kohdetta. Äänilähteiden luokittelu ajallisesti pitkistä äänitallenteista kuuntelemalla on kuitenkin erittäin työlästä ja esitämme tässä paperissa konseptin, joka perustuu opetettuun luokittelualgoritmiin. Algoritmi erottelee mittaussignaalista seurattavan melulähteen aiheuttamat äänitasot muista ympäristömelulähteistä. Menetelmän yksityiskohtaisempi kuvaus löytyy julkaisusta Maijala et al. 2018 [5]. Lisäksi kerromme, minkälaisia haasteita olemme kokeneet tämän uuden mittauskonseptin pilotoinnissa ja miten olemme onnistuneet niitä ratkomaan.

2 METODI

Tässä kohteiden automaattiseksi tunnistamiseksi ehdottamassamme menetelmässä melulähteet jaetaan kahteen luokkaan. Tarkasteltavan melulähteen äänet kuuluvat luokkaan *kohdemelu* ja muut äänisignaaliin summautuvat äänet kuuluvat luokkaan *taustamelu*. Kohdemeluun voi kuulua useita, hyvinkin erityyppisiä herätteitä, kuten moottoriääniä, prosessiääniä ja hälytysääniä. Taustameluun kuuluvat ihmisen tuottamien herätteiden, kuten liikenne, lisäksi luonnonäänet: tuuli, sade, ukkonen ja linnut.

Kohteen herätteiden aktiivisuus analysoidaan jatkuvasta äänisignaalista tekemällä binäärinen luokittelu taustamelun ja kohdemelun välillä. Samasta äänisignaalista lasketaan myös melua karakterisoivat suureet, kuten A-painotettu ekvivalenttiäänitaso.

Tunnistusmenetelmässä on kaksi vaihetta: opetusvaihe ja seurantavaihe (katso kuva 1). Opetusvaiheessa akustiset mallit opetetaan manuaalisesti annotoitujen ääninäytteiden



Kuva 2: Esimerkki kohteen tunnistamisesta luokittelijalla. Ylimmässä osiossa spektrogrammi ja seuraavassa vastaava annotointi. Liikenne kuuluu luokkaan *taustamelu*, kun taas murskain- ja hälytinäänet kuuluvat luokkaan *kohde*. Kolmas osio havainnollistaa kohteen tunnistamistodennäköisyyden ja näyttää päätöskynnyksen. Alimmassa on järjestelmän tunnistustulos.

avulla. Seurantavaiheessa opetettuja akustisia malleja käytetään tunnistamaan kohdemelu. Kuvassa 2 on esimerkki kohteen tunnistamisesta. Opetusalgoritmi tarvitsee ainoastaan kohdemelun annotoinnin, mutta kuvassa on annotoitu myös taustamelu (liikenne), jotta järjestelmän toiminta olisi helpommin ymmärrettävissä.

2.1 Akustinen piirreanalyysi

Akustinen piirreanalyysi muuttaa äänisignaalin redusoituun esitysmuotoon joka soveltuu paremmin akustisen mallin opettamiseen. Ehdottamassamme menetelmässä käytämme piirteinä joko meli-kepstrikertoimia (MFCC) [6] tai niiden dekorreloimatonta muotoa, log-mel –energiaspektriä. MFCC-piirreanalyysimenetelmä on alunperin kehitetty puheentunnistukseen [7], mutta se on osoittautunut hyvin toimivaksi menetelmäksi myös muissakin äänenkäsittelyyn liittyvissä sovelluksissa kuten yleisessä äänitapahtumien tunnistuksessa [8]. Menetelmässä äänisignaali analysoidaan lyhyissä laskentakehyksissä (esimerkiksi 100 ms) siten, että perättäiset kehykset peittävät toisensa 50 %. Laskentakehykset ikkunoidaan Hamming-ikkunalla ja kehyksen äänelle lasketaan spektri käyttäen diskreettiä Fourier-muunnosta. Saatu spektri skaalataan käyttäen logaritmista

meli-asteikkoa, joka mukailee ihmisen kykyä havainnoida äänenkorkeutta taajuuden funktiona. Spektrin logaritmi-arvot muutetaan diskreetillä kosinimuunnoksella (DCT) meli-kepstriksi, jonka kertoimia yleisesti kutsutaan MFCC-piirteiksi. Signaalienergia mallintuu ensimmäiseen kertoimeen tässä esitysmuodossa, joten tämä kerroin tiputetaan menetelmässämme pois piirrevektorista, jotta järjestelmä olisi invariantti havaittavien äänilähteiden etäisyyden suhteen. Piirteiden ajallinen muutos otettiin huomioon laskemalla ensimmäisen ja toisen kertaluvun delta-kertoimet.

2.2 Ohjattu oppiminen

Tutkimme kahden tyyppisiä ohjattuja luokittelijoita: normaalijakaumiin perustuvaa sekoitemallia (Gaussian Mixture Model, GMM), joka edustaa generatiivista luokittelijaa ja keinotekoista neuroverkkoa (artificial neural network, ANN), joka edustaa erottelevaa luokittelijaa. Opetusvaiheessa ohjattu oppiminen vaatii manuaalisesti annotoituja opetusesimerkkejä. Tarkkailuvaiheessa tunnistus tehdään yhden sekunnin segmenteissä käyttäen aikaisemmin opetettua luokittelijaa.

GMM-pohjainen luokittelija mallintaa luokan piirrevektorien jakaumaa usean normaalijakauman painotettuna summana [9]. Jokaiselle luokalle estimoidaan opetusmateriaalin perusteella oma GMM-malli opetusvaiheessa iteratiivisesti odotusarvon maksimoivalla EM-algoritmilla. Tarkkailuvaiheessa luokitus tehdään suurimman uskottavuuden estimaattorilla: äänisyötteen akustisille piirteille lasketaan luokkakohtainen uskottavuus ja luokittelu tehdään luokkaan, joka antoi suurimman uskottavuuden.

ANN-luokittelija estimoi funktiota, joka antaa halutun luokittelu-tuloksen tietyllä syötteenä käytettävällä piirrevektorilla [10]. Tutkimme kahta erityyppistä neuroverkkorakennetta: yksinkertaista monikerroksista perseptroniverkkoa (MLP) ja hieman monimutkaisempaa konvoluutioneuroverkkoa (CNN). MLP-verkkorakenne koostuu useampaan kerrokseen sijoitetuista keinotekoisista neuroneista, jotka on yhdistetty toisiinsa täysin. CNN-verkkorakenne puolestaan koostuu eteenpäin kytketyistä konvoluutiokerroksista, jotka ovat erikoistuneet kaksiulotteisten muotojen tunnistamiseen spektrogrammista. Luokittimen parametrit opetetaan käyttäen opetusesimerkkejä, jotka sisältävät syötteenä käytettävän piirrevektorin ja halutun binäärisen tulosvektorin, jossa aktiivinen luokka on indikoitu. Opetuksessa verkon parametreja optimoidaan iteratiivisesti minimoimalla virhefunktio halutun tulosvektorin ja verkon todellisen tulostiedon välillä. Tarkkailuvaiheessa luokitus tehdään syöttämällä äänisyötteen akustiset piirteet verkolle ja valitsemalla suurimman aktivaatiotuloksen tuottava luokka.

3 TULOKSET

Ensimmäinen pilottitestimme kohteena olivat Eurajoella sijaitsevan kivenmurskaamon melulähteet: kivenmurskaamon liikkuvat työkoneet ja murskaimien melu. Kivenmurskaamosta lähimmän asuinrakennuksen etäisyydelle sijoitettu sensori tallensi kivenmurskaamomelun lisäksi läheisen vilkasliikenteisen tien liikennemelua, joka luokiteltiin taustameluksi (katso kuva 2).

Toinen evaluointikohteemme oli musiikkimelu. Hangon huvivenesataman eli itäisen sataman alueella on useita ravintoloita, joissa kesäaikana soi musiikki. Alueella on myös asumiskäytössä olevia rakennuksia. Pilottitestissämme arvioimme n. 50 metrin päässä lähimmästä ravintolasta sijaitsevan sensorimme suorituskykyä kohdemeluna musiikki. Ravintolan ja yksityisasunnon seinään asennetun sensorin välissä on autotie ja erityisesti kesäisin suosittu ulkoilualue.

3.1 Kivenmurskaamomelu

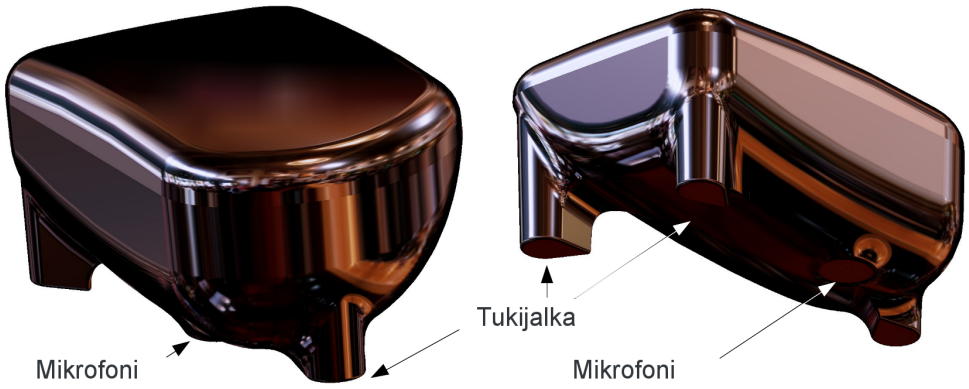
Kohteessa tallennettiin ääntä kolme minuuttia kymmenen minuutin välein ja kahden päivän mittausdata (432 min) annotoitiin manuaalisesti evaluointioa varten. Evaluointi tehtiin käyttäen ristiinvalidointia siten, että vuorollaan kumpikin päivä oli opetusmateriaalina ja testimateriaalina. Kohdeäänenä oli kaikki kivenmurskaamon tuottama melu. Pääasiallisia melulähteitä murskaamossa olivat kiinteät ja siirreltävät kivenmurskaimet, sekä erilaiset maansiirtokoneet.

Järjestelmän komponentteja arvioitiin yksittäin piirteiden ja luokittelijoiden valitsemiseksi. Aluksi testasimme parametrejä MFCC-piirteille ja tämän jälkeen arvioimme kahden luokittimen (GMM ja MLP) suorituskykyä. Tulokset on esitetty taulukossa 1, valitut arvot lihavoituna ja piirteiden irrotuksen laskennalliset vaatimukset suhteena reaaliaikalaskentaan. Tunnistustehokkuuden lisäksi on esitetty arvioitu laskenta-aika (piirteiden irrotusaika) suhteessa sensorin raudan reaaliaikalaskentakapasiteettiin. Kepstrikertoimien lukumäärää vaihtelemalla saatiin pieni vaikutus luokittelijan suorituskykyyn.

Taulukko 1: Tulokset akustisen piirreanalyysin evaluoinnista.

Tarkasteltava muuttuja	Muuttujan arvo	F-arvo	Piirteiden irrotusaika
Kertoimien lukumäärä	8	92.6	0.51x
	13	**92.7**	0.51x
	20	92.7	0.51x
Aikatason dynamiikka	MFCC	92.7	0.51x
	MFCC+ Δ	**93.1**	0.51x
	MFCC+ Δ + $\Delta\Delta$	91.7	0.51x
Aikatason suodin	**Ilman suodinta**	**93.1**	0.51x
	Esikorostus	88.5	0.54x
	A-suodin	93.0	0.64x
Laskentakehyksen pituus	50 ms	89.8	0.99x
	100 ms	**93.1**	0.51x
	200 ms	91.4	0.27x

GMM-luokittelijaa käytettäessä keptrikertoimien määräksi valittiin 13, sillä tällä määrällä saadaan sama suorituskyky kuin 20 keptrikertoimella, mutta pienemmällä laskennallisella kuormalla. Paras suorituskyky tutkituissa aikatason piirreyhdistelmissä saadaan käyttämällä melikertoimia ensimmäisen kertaluvun delta-kertoimien kanssa. Toisen kertaluvun delta-kertoimet eivät lisänneet suorituskykyä, luultavasti koska laskentakehyksen pituus oli melko suuri (100 ms) ja ensimmäisen kertaluvun delta-kertoimet kattoivat



Kuva 3: *Sensorille suunniteltiin akustista BEM-mallinnusta hyödyntämällä kotelo, joka suojaa fyysisesti mikrofonin ja vääristää mahdollisimman vähän ääniaaltoa.*

aikatason dynamiikkaa jo 500 ms. Tulosten perusteella aikatason suodinten (A-painotus [11] ja esikorostus [9]) ei ole perusteltua. Laskentakehyksen pituus on selvästi tärkein laskenta-aikaan vaikuttava muuttuja. Paras luokittelukyky reaaliaikalaskennassa saadaan 100 ms:n laskentakehyksellä.

Taulukossa 2 on esitetty tulokset luokittelijoille erilaisilla parametreilla. Taulukossa parametri M on GMM-luokittelijassa käytettyjen normaalijakaumien lukumäärä ja MLP-luokittelijassa vastaavana muuttujana on $a \times b$, joka määrittää neuroverkon rakenteen niin että on b piilokerrosten lukumäärä ja a on neuronien määrä näissä piilokerroksissa.

Taulukko 2: Tulokset kivenmurskaamomelun luokittelijatestistä

Luokittelija	Parametrit	F-arvo	Luokitteluaika
GMM	$M = 1$	79.5	0.10×
	$M = 2$	87.0	0.10×
	$M = 4$	92.5	0.10×
	$M = 8$	92.8	0.11×
	$M = 16$	93.1	0.12×
	$M = 32$	93.4	0.14×
MLP	10×2	90.4	0.10×
	30×2	93.4	0.10×
	50×2	93.8	0.11×
	100×2	93.8	0.12×

MLP-luokittelijalla saadaan paras F-arvo ja sen laskenta on nopeinta. Ero MLP- ja GMM-luokittelijoiden välillä on kuitenkin melko pieni. Arvioitu luokitteluaika ei juurikaan riipu mallin parametreista. Tämä viittaa siihen, että suurin osa laskenta-ajasta menee yleisiin operaatioihin, kuten piirteiden kopiointiin, jos verrataan todennäköisyyksien laskentaan luokittelijalla. Laskenta-aikaa voitaisiin varmasti pienentää edelleen optimoimalla koodia, mutta tämän työn puitteissa se ei ollut tarpeen.

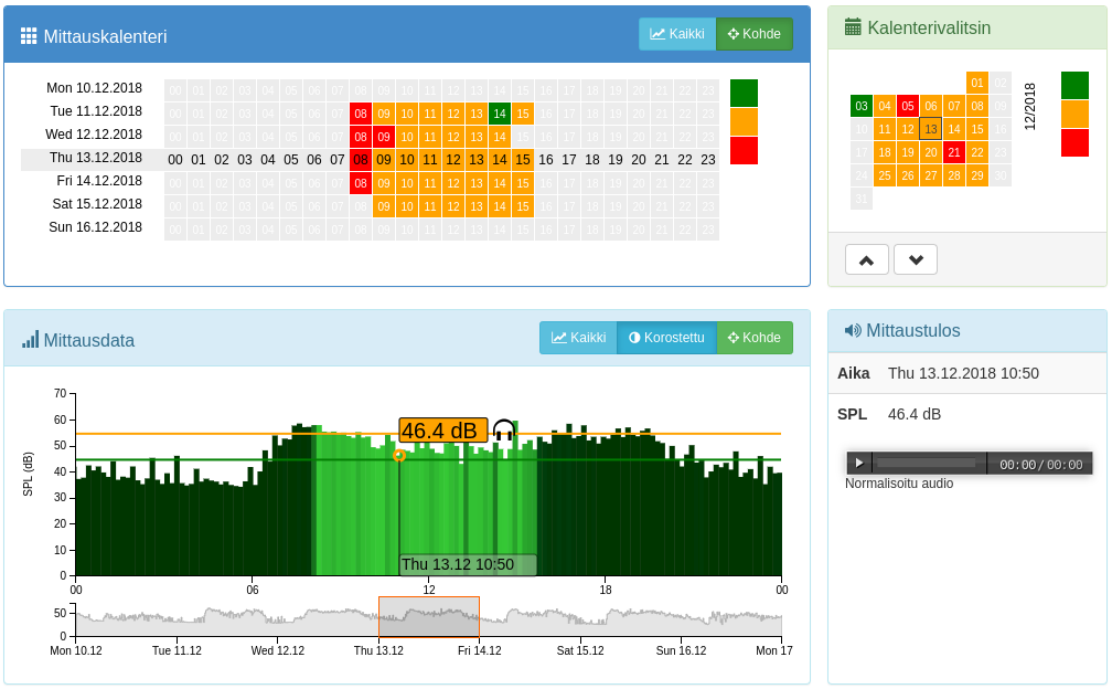
Kuva 4: *Sensori asennetaan standardin ISO1996-2:2007 mukaiselle tasaiselle pinnalle.*

3.2 Musiikkimelu

Musiikkimelun tapauksessa evaluaatio keskittyi menetelmän kehittelyyn vaihtelevissa melutilanteissa. Kohteessa oli mittausaikana käynnissä musiikkifestivaali, jossa soitettiin äänekästä ulkoilmamusiikkia ja tämä oli helppo havainnoida mittaussignaaleista. Normaalisti kohteessa kuului kuitenkin sataman ravintoloiden terasseilta hieman hiljaisempaa musiikkia, joka puolestaan oli haastavampaa tunnistaa, johtuen mm. muista ympäristöäänistä, sekä vaihtelevista tuuliolosuhteista. Nämä kaksi tilannetta otettiin erikseen myös huomioon evaluoinnissa. Kohteessa tehtiin mittauksia yhteensä 30 päivää ja tästä materiaalista valittiin manuaalisesti kuuntelemalla kumpaankin tapaukseen kuvaavat ääninäytteet. Evaluoinnissa käytettiin yhteensä 45 tuntia äänimateriaalia, josta 15 tuntia valittiin ajalta, jolloin ravintolamusiikki oli mahdollisesti aktiivinen ja 30 tuntia valittiin ajalta, jolloin musiikkifestivaali on käynnissä. Ääninäytteitä valittaessa pidettiin huoli siitä, että puolessa näytteistä oli musiikki kuultavissa.

Piirteinä käytimme 40 ms ikkunoissa laskettuja log-mel –energiaspektrejä (128 melikaistaa). Käyttämässämme CNN-luokittimessa on kaksi konvoloivaa kerrosta, jotka koostuivat konvoluutiokerroksista (32 ja 64 painokerrointa sekä 3×3 konvoluutiokerneli) ja kokoomakerroksesta (max-pooling), sekä yksi täysin kytketty luokitinkerros (MLP-verkko, 50 neuronia), joka tekee luokittelun konvoloivien kerrosten tiivistämän tiedon pohjalta [12]. Luokittelu ja evaluointi tehtiin 10 sekunnin segmenteissä.

Evaluointitulokset on nähtävissä taulukossa 3. Evaluoinnit tehtiin kahdella eri metriikalla: kohteeksi luokitellut kohdeherätteet (True positive rate, TPR), sekä tunnistustarkkuudella. TPR kuvaa miten suuri osa musiikkia sisältäviksi luokiteltujen 10 sekunnin segmenteistä sisältää oikeasti musiikkia. Tunnistustarkuus puolestaa kuvaa miten suuri osa segmenteistä luokiteltiin oikein (musiikki-ei musiikkia). Ravintolamusiikin luokittelu toimi odotetusti hieman huonommin kuin musiikkifestivaalin, mutta saavutettu suorituskyky oli silti melko hyvä. Kun kaikki data käsiteltiin yhdessä ja järjestelmä opetettiin, sekä testattiin kummankin tyyppisellä materiaalilla, suorituskyky oli hyvä. Kun segmentissä tunnistettiin aktiivista musiikkia, oli se lähes 90 % oikea luokittelutulos. Vastaavasti kaikista segmenteistä 86 % luokiteltiin oikein joko musiikkia tai pelkkää taustamelua sisältävaksi.



Kuva 5: Esimerkkinäkymä www-käyttöliittymästä. Oikealla, ylemmässä kuvassa on ajankohdan valintamahdollisuus. Vasemmalla ylhäällä näkyy kokonaistilanne kalenterinäkymässä: kunkin päivän ekvivalenttitaso värikoodattuna. Palkkinäyttössä vasemmalla alapuolella esitetään 10 minuutin ekvivalenttitasot siten, että värillä ilmaistaan, kuinka todennäköistä on kyseisen äänen kuuluminen valitulle melunseurantakohteelle. Lisäksi jokainen mittaus on kuunneltavissa (alhaalla oikealla).

Taulukko 3: Tulokset musiikkimelun luokittelijatestistä

Tilanteen kuvaus	TPR	Tunnistustarkkuus
Ravintolamusiikki	81.2	82.5
Musiikkifestivaali	94.0	88.5
Yhdistetty	89.5	86.4

4 DISKUSSIO

Julkiselle paikalle sijoitettu, ääntä tallentava mittalaite tuo mukanaan monia haasteita. EU:n yleinen tietosuoja-asetus 2016/679 (engl. General Data Protection Regulation, GDPR) edellyttää tämän kaltaiselta sovellukselta toiminnasta tiedottamista ja yksityisiltä henkilöiltä kirjallista lupaa heidän hallinnassaan olevalle alueelle sijoitettuna [13]. Julkisella paikalla mittalaitteet joutuvat helposti ilkivallan kohteeksi ja herkkä mikrofoni on vaikeimmin suojattavissa oleva komponentti, sillä kaikenlaiset suojarakenteet muuttavat myös sen vastetta. Pilottikoettamme varten suunnittelimme akustista BEM-mallinnusta hyödyntämällä kotelon, jossa mikrofoni on sijoitettu asennuspinnan lähelle, suojaan kotelon taakse (kuva 3). Mallinnus- ja myöhemmin mittaustulosten mukaan kotelo vääristää eri suunnista saapuvaa tasoaaltoa alle ± 3 dB taajuuksilla 50–4000 Hz ja vasteen suoristaminen tehdään tulosten käsittelyn yhteydessä. Sensori asennetaan tasaiselle seinäpinnalle,

tai jos seinä ei ole yhtenäinen, mitoiltaan 0.5 m$\times$0.7 m levyn pinnalle (kuva 4). Ympäristömelun mittausstandardin ISO1996-2:2007 mukaan seinäpinnan tulee olla tasainen ($\pm$5 cm) 1 metrin etäisyydelle mikrofonista [4].

Mittauspisteessä tallennetut äänitasolukemat voidaan suodattaa näyttämään ainoastaan valitun kohteen tuottamat äänitaso. Konseptiin kuuluu www-käyttöliittymä, jossa tulokset voidaan esittää lämpökarttakalenterina, graafeina ja taulukoiduin lukuarvoin. Yksi esimerkkinäkymä esitetään kuvassa 5.

Pilotoinnissa kohdatut haasteet liittyvät pääasiassa langattomaan verkkoyhteyteen. Langattomat modeemit, mokkulat, aiheuttavat dataa lähettäessään voimakkaan häiriösignaalin äänitallenteisiin ja koska etäisyydet pienen laitekotelon sisällä ovat millimetrejä, tulisi antenni ja analoginen osuus signaalitiestä suunnitella ja toteuttaa kokonaisuutena häiriöiden välttämiseksi, kuten matkapuhelimissa. Pilotissamme ratkaisimme ongelman rakentamalla modeemille virranohjauksen: modeemista katkaistaan virta pois mittausten ajaksi. Tämä sama ratkaisu auttoi toipumaan myös mobiiliverkon katkoksista, joiden jälkeen modeemi jää usein tilaan, josta se toipuu ainoastaan katkaisemalla virta hetkeksi.

5 YHTEENVETO

Tässä artikkelissa osoitimme, että ympäristömelun monitorointia saadaan helpotettua ja tehostettua käyttämällä automaattista lähteiden luokittelua ja että luokittelun voi siirtää melusensorin tehtäväksi. Kerroimme myös uudenlaisten melusensoreiden toteutuksesta ja niiden pilvipalvelukytkennästä. Melusensori on mahdollista toteuttaa edullisilla komponenteilla, mikä mahdollistaa myös niiden lukumäärän lisäämisen ja lopputuloksena on yksityiskohtaisempi melukartta.

Luottokortin kokoinen Raspberry Pi –tietokone osoittautui riittävän tehokkaaksi automaattiselle lähteiden luokittelulle. Esittelimme akustisen BEM-mallinnuksen avulla suunnitellun ja 3D-tulostetun kotelon, mutta olemme pilotoineet myös aurinkopaneeliversiota, joka mahdollistaa täysin langattoman mittaamisen [5].

Melulähteen aktiivisuus havaittiin binäärisellä luokittelijalla: taustamelu tai melulähde. Akustisina piirteinä käytettiin meli-kepstrikertoimia ja annotoitujen melutallenteiden perusteella opetettuja luokittelijoita olivat GMM sekä ANN-luokittelijat MLP ja CNN.

Testasimme menetelmämme suorituskykyä kohteina kivenmurskaamo- ja musiikkimelu. Suorituskyky osoittautui riittäväksi: kvantitatiivisesti arvioituna, yhden sekunnin aikaresoluutiolla, F-arvo oli parhaalla luokittelijalla kivenmurskaamomelulle 93.8. Järjestelmä toimi 50 päivän ajan kivenmurskaamon lähellä ja luokittelijan tulokset vastasivat oikein hyvin murskaamon päivärytmiä. Musiikkimelu osoittautui haastavammaksi ja paras tunnistustarkkuus, 89 %, saavutettiin musiikkifestivaalin aikaan, jolloin musiikin äänitaso oli merkittävästi muita ympäristön ääniä suurempi. Pilotointi musiikkimelun osalta on jatkunut yli vuoden ajan ja jatkuu edelleen.

Esittelimme myös toteuttamamme pilvipalvelun ja meluportaalin. Melusensorit lähettivät tulokset pilvipalveluun ja tulosten visualisointi, tilastollinen analyysi ja tietojen arkistointi tapahtuivat portaalissa. Tämä lähestymistapa mahdollistaa järjestelmän laajentamisen kokonaisvaltaiseen melunhallintaan ja yksittäisen sensorin edullisuuden vuoksi reaaliai-

kaisen melukartoituksen todellisella, mitatulla datalla. Tätä lähestymistapaa käyttäen, luotettavuus, validiteetti ja ympäristömelun kartoitusten kattavuus lisääntyvät merkittävästi.

VIITTEET

[1] Panu P. Maijala. Excess Attenuation and Meteorological Data in a Long Term Measurement. In *Proceedings of the International Conference on Noise Control Engineering, Tampere, Finland, 30 May – 1 June, (Euronoise 2006)*, number SS20-392 in euro-noise series, page 1–6, Tampere, Finland, May 2006. EAA.

[2] Panu P. Maijala. A Set-up for Long Term Sound Propagation Measurements. In *Proceedings of the International Congress on Noise Control Engineering, Tampere, Finland, 30 May – 1 June, (Euronoise 2006)*, number SS20-390 in euro-noise series, pages 1–6, Tampere, Finland, May 2006. EAA.

[3] Panu P. Maijala. *A Measurement-based Statistical Model to Evaluate Uncertainty in Long-range Noise Assessments*. Doctoral dissertation, Tampere University of Technology, P.O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland, 2013.

[4] ISO. Standard ISO 1996-2:2007. Acoustics — Description, Measurement and Assessment of Environmental Noise — Part 2: Determination of Environmental Noise Levels, 2007.

[5] Panu P. Maijala, Zhao Shuyang, Toni Heittola, and Tuomas Virtanen. Environmental Noise Monitoring Using Source Classification in Sensors. *Applied Acoustics*, 129 (1):258–267, 2018. ISSN 0003-682X. URL `https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2017.08.006`.

[6] Michael Noll. Short-Time Spectrum and Cepstrum Techniques for Vocal-Pitch Detection. *"Journal of the Acoustical Society of America"*, pages 296–302, February 1964.

[7] Lawrence Rabiner and Biing-Hwang Juang. *Fundamentals of Speech Recognition*. Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, NJ, USA, 1993. ISBN 0-13-015157-2.

[8] Toni Heittola, Annamaria Mesaros, Antti Eronen, and Tuomas Virtanen. Context-dependent sound event detection. *EURASIP Journal on Audio, Speech and Music Processing*, 2013.

[9] Douglas A. Reynolds, Thomas F. Quatieri, and Robert B. Dunn. Speaker verification using adapted gaussian mixture models. In *Digital Signal Processing*, volume 10, pages 19 – 41, 2000.

[10] Simon Haykin. *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*. Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ, USA, 2nd edition, 1998. ISBN 0132733501.

[11] IEC. Standard IEC 61672-1:2002. Electroacoustics — Sound Level Meters — Part 1: Specifications, May 2002.

[12] Annamaria Mesaros, Toni Heittola, and Tuomas Virtanen. A multi-device dataset for urban acoustic scene classification. In *Proceedings of the Detection and Classi-*

LAIVOJEN VEDENALAISEN MELUN TUTKIMUSTA VTT:LLÄ

Antti Hynninen[1,a], Jukka Tanttari[1,b], Seppo Uosukainen[2], Ville Viitanen[1,a], Tuomas Sipilä[1,a]

[1] Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy
[a] PL 1000, 02044 VTT; [b] PL 1300, 33101 Tampere
etunimi.sukunimi@vtt.fi

[2] SU Akustiikka
Lehmustie 1B, 00780 Helsinki
etunimi.sukunimi@pp.inet.fi

Tiivistelmä

Laivojen vedenalaisen melun rajoittamista ajavat sekä sotilaalliset tarpeet sekä ympäristönsuojelu. Ensimmäisiä melupäästön raja-arvoja siviilialuksille ehdotettiin 1990-luvulla. Sittemmin useat luokituslaitokset ovat antaneet suosituksia enimmäismelupäästölle sekä mittausohjeita. Vedenalais- ja ilma-akustiikalla on monia eroavaisuuksia. Ne liittyvät erityisesti väliaineeseen, mutta myös lähteiden tyypilliseen kokoon, äänen syntytapoihin sekä traditioihin melupäästön kvantitatiivisessa ilmoittamisessa. VTT:llä tehty ja tehtävä tutkimus kattaa koko aihealueen: mittaukset, rakenteiden äänensäteily, potkurin äänentuotto sekä äänen eteneminen vedessä.

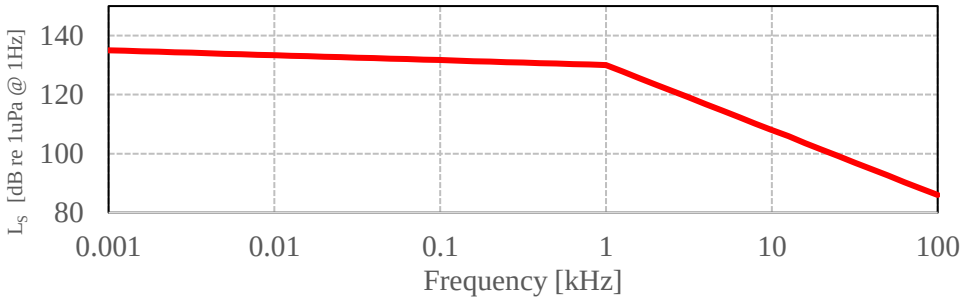
1 JOHDANTO

Tämän esityksen tarkoitus on (i) antaa yleiskuva laivojen vedenalaisen melupäästön hallinnasta, (ii) valottaa eroavaisuuksia ilma-akustiikkaan ja (iii) esitellä aiheeseen liittyviä VTT:n tutkimusaktiviteetteja.

Jo Leonardo da Vinci huomautti, että etäällä olevan laivan aiheuttamat äänet voidaan kuulla veden alla. Tekniset innovaatiot tulivat myöhemmin. 1900-luvun alussa pyrittiin turvallisuutta parantamaan karikoista varoittavilla vedenalaisilla kelloilla. Titanicin onnettomuuden jälkeen alkoi akustisen kaikuluotauksen systemaattinen kehittäminen [1, 2]. Maailmansotien seurauksena sekä kaikuluotaus että akustisten signaalien kuuntelu ottivat pitkiä harppauksia. Viitteessä [3] on vaikuttava kooste UCDWR:n (University of California Division of War Research) II maailmansodan aikaisen tutkimusohjelman tuloksista.

Hiljalleen alkoi ympäristönsuojelu toimia ajurina siviilipuolella. Tosin Ross [4] totesi vielä 1987 ykskantaan, että ”*Underwater noise is sound in water that limits the military effectiveness of naval systems*”. Eräs virstanpylväs oli Mitsonin vuonna 1995 kokoama raportti [5]. Siinä ehdotettiin ensimmäisen kerran raja-arvoja kalantutkimusalusten melupäästölle (kuva 1). Taustalla oli havainto, että tutkimusalusten melu vaikeutti kaikuluotausta ja karkotti kaloja. Tällöin tulokset olivat epäluotettavia.

© 2019 Antti Hynninen, Jukka Tanttari, Ville Viitanen, Seppo Uosukainen, Tuomas Sipilä.Tämä on avoimesti julkaistu teos, joka noudattaa Creative Commons NIMEÄ 4.0 Ei sovitettu –lisenssiä (CC BY 4.0). Teosta saa kopioida, levittää, näyttää ja esittää julkisesti ja siitä saa luoda johdannaisteoksia, kunhan tekijän nimi ja lähde mainitaan asianmukaisesti.



Kuva 1. Mitsonin ehdottamat raja-arvot. Tutkimusalus, 11 kn [5].

2 VEDENALAISAKUSTIIKAN JA ILMA-AKUSTIIKAN EROJA

Olennaisin vedenalais- ja ilma-akustiikkaa erottava tekijä on luonnollisesti väliaine. Veden tiheys on noin 1000 kg/m^3 ja äänen nopeus vedessä 1500 m/s. Karakteristinen resistanssi on siten vedellä 1.5x10^6 kg/m^{2}s ja ilmalla (NTP) 400 kg/m^{2}s. Vesi kuormittaa rakenteita voimakkaasti muuttaen niiden värähtelykäyttäytymistä. Rakenne voi myös säteillä ääntä veteen niin tehokkaasti, että säteily on rakenteen pääasiallinen häviömekanismi.

Vedessä voi syntyä kavitaatiota, so. alipaineessa syntyy höyrykuplia, jotka ylipaineessa luhistuvat kasaan synnyttäen voimakkaita paineiskuja. Kavitoivan potkurin melupäästö on huomattavan suuri verrattuna kavitoimattomaan potkuriin.

Vesialue reunoineen sekä veden kerrostuneisuus vaikuttavat akustiikkaan. Pinnalla tapahtuu lähes täydellinen heijastus (Lloyds'n efekti); äänenpaine on pieni ja hiukkasnopeus on maksimissaan. Pohjan vaikutus vaihtelee riippuen pohjan rakenteesta. Matala vesialue toimii aaltoputkena pienillä taajuuksilla, minkä vuoksi geometrinen etäisyysvaimentuma on pienempi kuin syvässä vesialueessa. Veden lämpötilan, paineen ja suolapitoisuuden jakaumat saavat aikaan äänen taipumista ja ilmiön vuoksi voi syntyä äänivarjoja.

3 LAIVAN MELUPÄÄSTÖ JA SEN MITTAAMINEN

Laivan vedenalainen melupäästö ilmoitetaan suureella Lähdetaso (Source Level, SL, L_S). Sitä käytettiin jo mainituissa 1940-luvun tutkimuksissa [3]. Luokituslaitokset, kuten BV, DNV ja ABS [6,7,8], ovat viime vuosina laatineet ohjeita Lähdetason määrittämiseen sekä antaneet suositusarvoja, kuten DNV:n luokat SILENT-A, -S, -F, -R sekä -E eri tyyppisille aluksille. Näistä esim. F tarkoittaa kalastusalusta ja R tutkimusalusta. Lisäksi on julkaistu mm. ASA:n ja ISO:n standardit [9,10]. ABS:n ohjeessa Lähdetason määritysyhtälö on muotoa

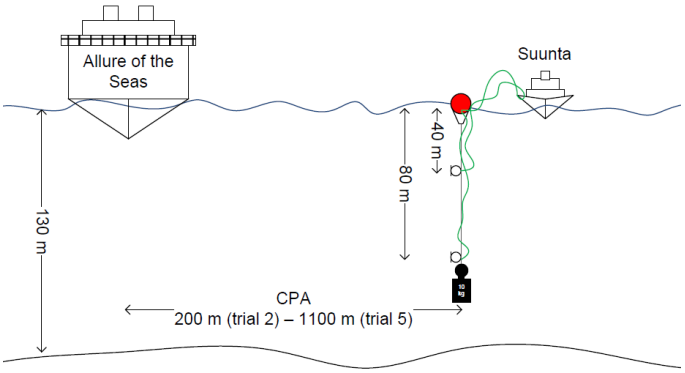
$$L_S(r,i) = L_p'' + TL = L_p'' + N\log(\frac{r}{r_0}) + \alpha r \quad (1)$$

Lähdetaso L_s on etäisyydellä r lähteestä olevan hydrofonin i referenssietäisyydelle $r_0 = 1$ m korjattu äänenpainetaso. Yhtälössä (1) L_p'' on hydrofonin i mitattu ja taustamelukorjattu äänenpainetaso. "*TL*" (oikeastaan *NR*) sisältää äänikentän geometrisesta hajaantumisesta ja absorptiosta α muodostuvan tasokorjauksen mittauspisteestä lähdepisteeseen. Eri ohjeet ovat periaatteiltaan samankaltaisia, mutta mm. *TL*:n arviointi, veden syvyysvaatimukset sekä pintaheijastuksen huomiointi voivat olla erilaisia. Yhtälössä (1) oleva luku *N* on ideaalilla palloaallolla 20 ja sylinteriaallolla 10. Ohjeissa annetaan lähtöoletuksia *N*:lle

sekä menetelmiä sen määrittämiseen. Suurikokoisen lähteen melupäästön määrittämisen kannalta lähteen pisteeksi normalisointi on sinänsä tarpeeton traditio.

Mittausten taajuusalue ulottuu jopa 100 kHz saakka. Lähdetaso voidaan esittää 1 Hz kaistalla [7], vaikka mittaukset olisi tehty 1/3-oktaaveittain. Pintaheijastuksen vaikutus voidaan myös yrittää poistaa (”Dipole level” -> ”Monopole level”). Lähdetason ohella käytetään myös suuretta ”Radiated Noise Level” (RNL), joka on lähinnä Lähdetasoa karkeammin normalisoitu esim. palloaalto-oletuksella.

Kuvassa 2 on esimerkki Allure of the Seas -risteilijän mittauksista [11]. Mittaukset toteutettiin pääosin 130 m syvässä vedessä käyttäen kahta hydrofonia. Syvyys ei täyttänyt menetelmän [9] vaatimuksia (epätarkimmalla menetelmällä vaadittiin vähintään aluksen mitta 360 m). Mittaustulos määritettiin ajanjaksolta, jolla ohiajava alus kulki asemasta -30° asemaan +30° mitattuna suoralta linjalta (0°) hydrofoneista aluksen keskikohtaan. Viitteessä [12] on tuloksia jäänmurtaja Polariksen lähdetason määrityksistä matalammassa vedessä DNV-menetelmän mukaan sekä eri tekijöiden vaikutuksesta lukuun *N*.



Kuva 2. Vedenalaisen melun mittausasetelma, Allure of the Seas [11].

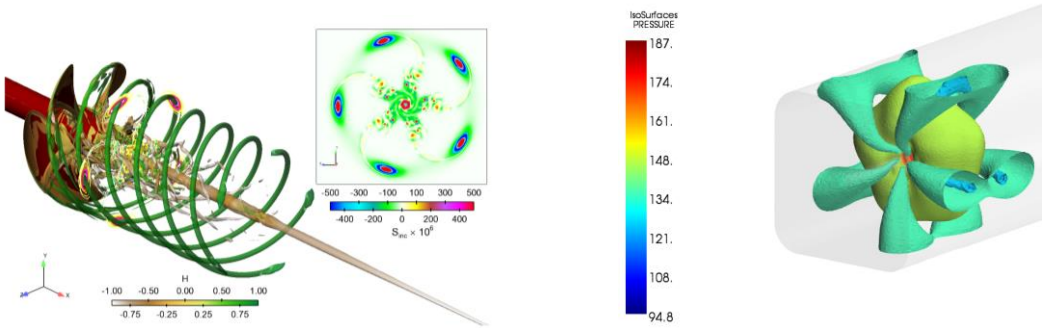
4 LAIVAN MELUPÄÄSTÖN SIMULOINNISTA

Laivojen tuottamaa melupäästöä voidaan arvioida simuloimalla virtausilmiöitä potkureissa ja aluksen rungon pinnoissa, simuloimalla aluksen rungon rakenteiden värähtelyjä sekä simuloimalla äänen etenemistä vedessä. Kehittyneet tietokoneet ja numeeriset laskentamenetelmät mahdollistavat näiden kytkettyjen ilmiöiden tehokkaan simuloinnin.

4.1 Potkurin äänensäteily

Kavitoimattoman potkurin melu sisältää lapataajuuden ja sen harmonisia, turbulenssin ja jättöreunan pyörteiden aiheuttamaa laajakaistaista melua sekä tonaalista melua virtauksen pyörrevanan ja lavan ominaistaajuuksien yhteisvaikutuksena [13]. Suuremmilla laivanopeuksilla kavitaatio kasvattaa melun tasoa huomattavasti. Kavitaatiokuplien kehittyminen ja romahtaminen aiheuttaa laajakaistaista melua. Kavitaatiokuplien tilavuusvaihtelu vahvistaa lapataajuista melua ja sen harmonisia.

Potkurin aiheuttama hydrodynaaminen turbulenttinen virtauskenttä voidaan ratkaista laskennallisen virtaustekniikan menetelmin CFD:llä (Computational Fluid Dynamics). Ratkaisusta muodostetaan monopoli, dipoli ja quadrupoli lähdetermit akustisia analogioita käyttäen [14]. Lähdetermit voidaan syöttää esimerkiksi elementtimenetelmämalliin (FEM) jolla simuloidaan äänikentän käyttäytymistä aluksen rungon läheisyydessä [15-17].

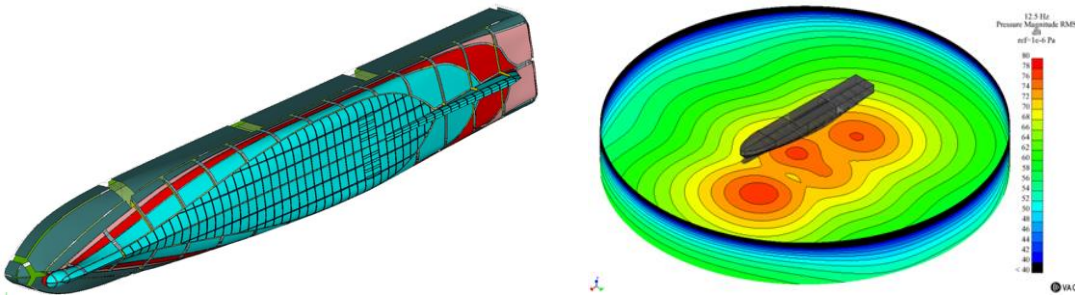


Kuva 3. Esimerkki kavitoivan potkurin virtaussimuloinnista, kavitaation aiheuttamista akustisista lähteistä ja vastaavasta äänikentästä lapataajudella.

4.2 Aluksen rakenteiden äänensäteily

Rakenteiden äänensäteilyn koko syntyketju veteen saakka tulee tuntea. Herätteitä ovat kavitoivan potkurin lisäksi mm. pääkoneet, vaihteet, generaattorit, pumput ja sähkökoneet. Herätetietojen saaminen on usein haastavinta. Joskus tyydytään laskemaan yksikköherätteillä (1W, 1N). Semi-empiiriset menetelmät olivat ennakoinnissa vallitsevia 1980-luvulle saakka. Ne perustuivat koottuun mittaustietoon tyyppirakenteista ja värähtelyn vaimentumisesta niiden välillä. Tämän jälkeen Tilastollinen Energia-Analyysi (SEA) alkoi yleistyä [18, 19]. Nykyään SEA palvelee suurten taajuuksien menetelmänä ja elementtimenetelmä FEM, yhdistettynä äänensäteilymalliin, pienten taajuuksien menetelmänä. Muitakin menetelmiä sovelletaan.

Kuvassa 4 on erään noin 175 m pitkän aluksen SEA-malli sekä saman aluksen FEM/BEM-mallilla simuloitu äänikenttä [20]. Malleissa ei ole mukana aluksen ylärakenteita. FE-pohjaiset mallit olivat tässä tapauksessa mielekkäitä noin 50-100 Hz saakka ja SEA tämän jälkeen. Jopa 75%:a laivan painosta voi olla varustelua ja lastia, joita on vaikea sijoittaa malliin täsmällisesti. Laiva onkin tyyppiesimerkki kompleksisesta järjestelmästä [21].



Kuva 4. Vasemmalla laivan SEA-malli (1350 osajärjestelmää, joista 190 akustisia tiloja). Oikealla laivan FEM+BEM -mallilla laskettu ja visualisoitu äänikenttä 50 m syvässä vesialueessa, jonka halkaisija on 400 m. Lloyd's efekti on selvästi nähtävissä.

4.3 Äänen eteneminen vedessä

Erilaisten vedenalaisakustiikkaan soveltuvien äänen etenemismallien soveltuvuusalueita on esitetty kuvassa 5. Mallit on luokiteltu perustuen niiden kykyyn ennustaa äänen etenemistä matalassa tai syvässä vedessä ja niiden soveltuvuuteen pienien tai suurten taajuuksien hallintaan. Tyypillisesti 200 m maksimisyvyyttä on käytetty matalien vesien tarkasteluissa. Pienten ja suurten taajuuksien rajataajuus 500 Hz on jossain määrin mielival-

tainen. Se on vain karkea raja, jonka yläpuolisilla taajuuksilla monet aaltoteoreettiset mallit ovat laskennallisesti vaativia ja jonka alapuolisilla taajuuksilla jotkut sädeteoriaan pohjautuvat mallit voivat olla kyseenalaisia niiden formuloinnissa käytettyjen oletusten takia. Mallit on lisäksi luokiteltu etäisyysriippumattomiin (vain syvyysriippuvat) ja etäisyysriippuviin malleihin, etäisyysriippuvuuden tarkoittaessa äänen nopeuden tai syvyyden muutoksia etäisyyden funktiona. On myös olemassa hybridimalleja, joissa useampia lähestymistapoja on käytetty.

Model type	Applications							
	Shallow water				Deep water			
	Low frequency		High frequency		Low frequency		High frequency	
	RI	RD	RI	RD	RI	RD	RI	RD
Ray theory	○	○	◑	●	◑	◑	●	●
Normal mode	●	◑	●	◑	●	◑	◑	○
Multipath expansion	○	○	◑	◑	◑	◑	●	◑
Fast field	●	◑	●	◑	●	◑	◑	◑
Parabolic equation	◑	●	○	○	◑	●	◑	◑

Low frequency (<500 Hz)
High frequency (>500 Hz)

RI: Range-independent environment
RD: Range-dependent environment

● Modeling approach is both applicable (physically) and practical (computationally)
◑ Limitations in accuracy or in speed of execution
○ Neither applicable nor practical

Kuva 5. Äänen etenemismallien soveltuvuusalueita vedenalaisakustiikassa [22-23].

Etäisyysriippumattomia malleja voi käyttää myös etäisyysriippuvissa tilanteissa käyttäen esimerkiksi paloittain vakiosyvyisiä diskreettejä etäisyysintervalleja [22]. Matalassa vedessä ja erityisesti lyhyillä etäisyyksillä äänen nopeuden spatiaalivaihteluiden vaikutukset ovat yleisesti paljon vähäisempiä kuin pohjan impedanssin vaikutus etenemiseen, jolloin pohjan sedimenttirakenteen tarkka tuntemus on oleellisen tärkeää [24].

U.S. Office of Naval Research –instituutin tukemasta kirjastosta Ocean Acoustic Library [25] löytyy kokoelma avoimen koodin etenemismalleja, erityisesti GNU:n julkisen lisenssin alla olevasta Acoustic Toolbox –osiosta [26].

5 YHTEENVETO JA KIITOKSET

Paperissa esitettiin läpileikkaus VTT:llä tehdystä ja tehtävästä laivojen vedenalaismelua koskevasta julkisesta tutkimuksesta. Aineisto ja esimerkit ovat FIMECC/EFFIMA/SEEÉ projektista *Unno*, TEKES-projektista *Propnoise* sekä VTT:n omarahoitteisista projekteista.

VIITTEET

[1] https://dosits.org/people-and-sound/history-of-underwater-acoustics/

[2] Urick, R.J. Principles of underwater sound. 3rd edition, Peninsula Publishing 1983.

[3] Principles and applications of underwater sound. Summary technical report of division 6, NDRC, Volume 7. Washington, D. C., 1946. Ed: Carl Eckart.

[4] Ross, D. Mechanics of underwater sound. Peninsula Publishing 1987.

[5] Underwater noise of research vessels. Review and recommendations. Co-operative research report No. 209. International Council for the Exploration of the Sea, Copenhagen 1995. Ed: R.B.Mitson.

[6] DNV, Silent class notation. Rules for classification of ships, Part 6 Chapter 24 (2010)

[7] Bureau Veritas, Underwater radiated noise (URN). Rule note NR614 DT R00 E (2014)

[8] Guide for the classification notation. Underwater noise. American Bureau of Shipping, July 2018.

[9] ANSI/ASA S12.64-2009/Part 1, Quantities and procedures for description and measurement of underwater sound from ships — Part 1: General requirements.

[10] SFS-ISO 17208-1:2016. Underwater acoustics. Quantities and procedures for description and measurement of underwater sound from ships. Part 1: Requirements for precision measurements in deep water used for comparison purposes. 24 p.

[11] Lankila, A. Full scale underwater noise measurements. VTT-R-03893-11. 89 p. 2011.

[12] Sipilä, T., Viitanen, V., Uosukainen, S. Klose, R. (2019). Shallow water effects on ship underwater noise measurements. Internoise 2019. Madrid, Spain.

[13] Fisher, R. & Collier, R., Noise Prediction and prevention on ships. In: Crocker, M. (ed.), Handbook of Noise and Vibration Control. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 2007.

[14] Uosukainen, S. (2011). Foundations of acoustic analogies. (VTT Publications; No. 757). Espoo: VTT. http://www.vtt.fi/inf/pdf/publications/2011/P757.pdf

[15] Hynninen, A., Tanttari, J., Viitanen, V., & Sipilä, T. (2017). On predicting the sound from a cavitating marine propeller in a tunnel. In Fifth International Symposium on Marine Propulsors: SMP '17 (International Symposiums on Marine Propulsors). Espoo, Finland.

[16] Viitanen, V., Hynninen, A., Lübke, L., Klose, R., Tanttari, J., Sipilä, T., & Siikonen, T. (2017). CFD and CHA simulation of underwater noise induced by a marine propeller in twophase flows. In A. Sánchez-Caja (Ed.), Proceedings of the Fifth International Symposium on Marine Propulsors: SMP '17 (International Symposiums on Marine Propulsors). Espoo, Finland.

[17] Viitanen, V. M., Hynninen, A., Sipilä, T., & Siikonen, T. (2018). DDES of wetted and cavitating marine propeller for CHA underwater noise assessment. Journal of Marine Science and Engineering, 6(2), [56]. https://doi.org/10.3390/jmse6020056.

[18] Plunt, J. Methods for predicting noise levels in ships, Part II. PhD Thesis. Chalmers University of Technology. 1980.

[19] Hynnä, P. Laivan potkuri äänilähteenä ja runkoäänen etenemisen ennustemenetelmiä. VTT Tutkimuksia 472. Espoo 1987. 129 p.

[20] Tanttari, J. Simulation of underwater sound radiation from ship structures in full frequency range. VTT-R-00724-12. 76 p. 2012.

[21] Shorter, P.J. & Langley, R.S. Vibro-acoustic analysis of complex system, Journal of Sound and Vibration, Vol. 288(2005), p. 669-699.

[22] Etter, P. C., Review of ocean-acoustic models. OCEANS 2009. 6 p.

[23] Etter, P. C., Underwater Acoustic Modeling and Simulation. CRC Press, 2013.

[24] Farcas, A., Thompson, P. M. & Merchant, N. D., Underwater noise modelling for environmental impact assessment. Environmental Impact Assessment Review 57(2016), pp. 114–122.

[25] http://oalib.hlsresearch.com/

[26] http://oalib.hlsresearch.com/Modes/AcousticsToolbox/

SALIAKUSTIIKKAA – KUNTOSALIN TUOTTAMIEN MELU- JA TÄRINÄHAITTOJEN TORJUNTAKEINOJA

Henri Penttinen[1], Jukka Pätynen[1], Sakari Tervo[1] ja Mats Heikkinen[1]

[1] Akukon Oy
Hiomotie 19
00380 Helsinki
etunimi.sukunimi@akukon.com

Tiivistelmä

Kuntosalitoiminnan aiheuttama runkomelu ja tärinä etenevät rakennusrungossa helposti useiden kerrosten päähän. Torjuntaratkaisut ovat tarpeellisia erityisesti hybridihankkeissa, joissa kuntosalin lähettyvillä sijaitsee muuta toimintaa. Kuntosalien edellyttämät massiiviset torjuntaratkaisut voivat muodostaa haasteita rakennusprojektille suurien piste- ja viivakuormien sekä suurien pystysuuntaisten tilantarpeiden kautta. Onnistuneessa kuntosalisuunnittelussa on tärkeä huomioida välipohjarakenteiden dynaamiset ominaisuudet. Etenkin ryhmäliikunnan kannalta välipohjien matalimpien ominaistaajuuksien huomioimien on kriittistä. Herätteen ja rakenteiden ominaismoodien ei tulisi muodostaa resonanssiketjua, joka vahvistaa kuntosalin aiheuttamaa värähtelyherätettä. Perinteiset ilma- ja askeläänitunnusluvut eivät kuvaa riittävän kattavasti kuntosalin aiheuttamaa tärinä- tai meluriskiä. Kuntosaleissa painopakkalaitteiden ja vapaiden punnusten pudottamisen aiheuttamaa runkomelua ja ryhmäliikunnan aiheuttamaa tärinäriskiä tulisi arvioida laskennallisella mallinnuksella ja lähtötilannemittauksin. Lähtötilanneselvityksen avulla arvioitavat torjuntatarpeet määräytyvät suunniteltujen toimintojen ja tilasijoittelun mukaan. Tässä artikkelissa esitellään kuntosalin aiheuttaman melun ja tärinän torjuntasuunnittelua, sen vaikutuksia rakennesuunnitteluun sekä mittaustuloksia valmiista kohteista.

1 JOHDANTO

Riittävän hyvän ääniympäristön toteuttaminen on tärkeä osa rakentamista, koska sillä on suoria vaikutuksia ihmisten hyvinvointiin ja terveyteen. Meluisa asuinympäristö hankaloittaa nukkumista, ja vähäisen unen on osoitettu olevan terveydelle haitallista. [1]

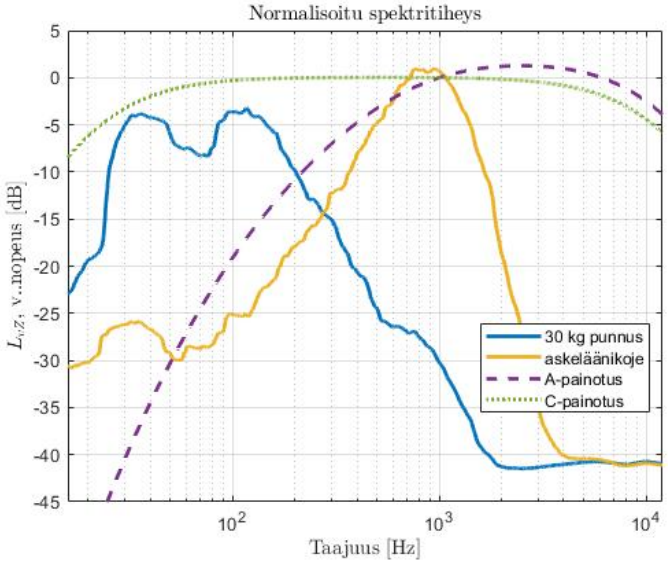
Modernissa rakentamisessa melulähteiden määrä on kasvanut, ja eräs mahdollinen melunaiheuttaja on kuntosali. Kuntosalit ovat aiemmin enimmäkseen sijainneet erillisissä tiloissa, joissa on omat vankat perustukset ja joiden etäisyydet asuntoihin, hotelleihin ja liiketiloihin ovat suuria. Kaupunkirakenteen tiivistyessä kuntosaleja on enenevissä määrin sijoitettu samaan rakennukseen asuntojen, hotellien, toimistojen sekä lääkärikeskuksien kanssa.

© 2019 Henri Penttinen, Jukka Pätynen, Sakari Tervo ja Mats Heikkinen. Tämä on avoimesti julkaistu teos, joka noudattaa Creative Commons NIMEÄ 4.0 Kansainvälinen –lisenssiä (CC BY 4.0). Teosta saa kopioida, levittää, näyttää ja esittää julkisesti ja siitä saa luoda johdannaisteoksia, kunhan tekijän nimi ja lähde mainitaan asianmukaisesti.

Kuntosalista muihin tiloihin päin melua aiheuttavat laitteiden tai painojen käytöstä johtuvat impulssimaiset äänet. Kuntosalin toiminnan aiheuttama värähtelyheräte vaimenee hitaasti rakennusrungossa ja sen energia on spektriltään pienitaajuista (1…250 Hz), ja se kantautuu kauas betonirakenteisessa kerrostalossa. Torjuntaratkaisut tämänkaltaiselle värähtelylle voivat olla vaativia ja aiheuttavat haasteita rakennushankkeelle kustannuksiin, aikatauluihin, tilankäyttöön sekä rakenteiden kuormien siedolle. Myös äänentoisto, sekä useat muut toiminnot voivat aiheuttaa meluhaittoja rakennuksen muille toimijoille.

Eräs yleinen harhakäsitys melun leviämisestä kuntosaleista muualle rakennukseen on se, että ilmaäänen torjuminen olisi riittävä ratkaisu melun leviämisen estämiseksi. Tämän takia useisiin kuntosaleihin asennetaan pehmeää materiaalia lattialle, esimerkiksi kumirouhemattoja, jotka vaimentavat painojen putoamisesta johtuvaa ilmaääntä kuntosalin sisällä. Tämä johtaa siihen, että kuntosalin toiminta ei välttämättä aiheuta salin puolella merkittäviä melutasoja tai tärinähaittoja ja käyttäjät tai toiminnanharjoittajat eivät välttämättä huomaa aiheuttavansa melu- tai tärinähaittoja muihin tiloihin päin. Käytännössä pehmeät kumirouhematot suojaavat lattioita, mutta eivät kuitenkaan vaimenna rakennuksen runkoon siirtyvää pientaajuista (alle 250 Hz) melua juuri ollenkaan. Tämä pientaajuinen melu on ongelmallisinta, sillä pienet taajuudet vaimenevat etäisyyden suhteen hitaimmin teräsbetonirakenteessa ja kantautuvat talossa kauimmaksi. Lisäksi teräsbetonirakenteiset välipohjien ominaistaajuudet ovat usein pienillä taajuuksilla ja välipohjat näin ollen vahvistavat enemmän pientaajuista värähtelyä.

Kuvassa 1 on esitetty esimerkki betonirakenteisessa talossa etenevästä impulssimaisesta melusta. Käsipunnuksen aiheuttama impulssimainen melu etenee rakennusrungossa pitkälle. Lisäksi herätteen taajuussisältö sijoittuu yleisimmin käytetyn A-taajuuspainotuksen alapuolelle, jolloin melutason arviointiin tulee kiinnittää erityistä huomiota.



Kuva 1. Normalisoidut värähtelynopeudet askeläänikoneelle ja käsipunnukselle (20 cm, tiputuskorkeus), sekä A- ja C-taajuuspainotukset.

2 KUNTOSALIN AIHEUTTAMA RUNKOMELU JA TÄRINÄ

Kuntosalin toiminnasta voi aiheutua useampia meluhaittoja, joiden etenemisreitti muihin tiloihin riippuu herätetyypistä. Painojen ja laitteiden aiheuttamat kolahdukset etenevät

useimmiten pientaajuisena värähtelynä rakennusrungon kautta muihin tiloihin ja ne havaitaan runkomeluna. Vahvistettu musiikki tai puhe voi edetä runkomeluna kaiuttimien kiinnityksen kautta värähtelynä, kytkeytyä ilmaäänestä värähtelyksi rakennusrunkoon tai edetä ilmaäänenä ilmastointikanavien kautta ja kuulua muissa tiloissa meluna. Tärinä aiheutuu ryhmäliikunnasta, juoksumatoista tai painojen ja laitteiden kolahduksista ja etenee rakennusrungon välityksellä muihin tiloihin. Voimakas tärinä voi lisäksi aiheuttaa sekundäärilähteiden kautta melua. Esimerkiksi välipohjan voimakas värähtely voi siirtyä siihen kiinnittyneisiin kevyisiin rakenteisiin tai laitteisiin ja aiheuttaa kuultavaa melua tai räminää.

Kuntosalin aiheuttamaa runkomelua esiintyy tyypillisesti noin 20–250 Hz taajuusalueella. Tätä pienemmillä taajuuksilla kuuloaistin herkkyys on niin pieni, ettei runkomelu yleensä ole kuultavissa. Lisäksi suuremmilla taajuuksilla rakennusrungon häviöt kasvavat jyrkästi ja kuntosalin suojamatot (rouhematot) alipäästävät herätettä.

Kuntosalin aiheuttamaa tärinää esiintyy ryhmäliikunnan ja juoksumattojen aiheuttamana tyypillisesti 1-20(…40) Hz taajuusalueella. Ryhmäliikunnan matalin ominaistaajuus on tyypillisesti 0,5…2 Hz luokkaa, mutta niiden korkeataajuisemmat kerrannaiset sekä jäykkien rakenteiden kautta kytkeytyvä värähtelyheräte voivat silti saada rakennusrungon värähtelemään korkeammillakin tärinätaajuuksilla (10…20 Hz). Lisäksi yksittäiset kolahdukset painoista tai laitteista herättävät välipohjat tyypillisesti samoilla taajuusalueilla, tosin vain hetkeksi.

3 VIRANOMAISMÄÄRÄYKSET, OHJEARVOT JA LAATUTASOMÄÄRITYKSET

Rakentamista koskevat keskeisimmät akustiset vaatimukset on annettu maankäyttö- ja rakennuslakiin (132/1999) nojaavassa Ympäristöministeriön asetuksessa 796/2017 rakennuksen ääniympäristöstä [2]. Ympäristöministeriö on julkaissut asetusta täydentävän ohjeen rakennuksen ympäristöstä [3]. Asetus [2] ja ohje [3] antavat vaatimuksia myös tärinään liittyvistä olosuhteista. Asetus on astunut voimaan 1.1.2018.

Osassa meneillään olevissa rakennushankkeissa noudatetaan vielä Suomen rakentamismääräyskokoelman osaa C1:1998 [4]. Täydentäviä vaatimuksia on esitetty muun muassa standardissa SFS 5907 Rakennusten akustinen luokitus [5]. Sisämelutasoja koskevia ohjearvoja on esitetty myös Sosiaali- ja terveysministeriön asetuksessa 545/2015 [6].

Tavoitetasot määräytyvät vastaanottavan toiminnan mukaan, eli lepäämiseen käytettävissä tiloissa käytetään tiukempia arvoja kuin avokonttoreille tai neuvotteluhuoneille. Jos kyseessä ei ole soiva musiikki, runkomelua tai tärinää esiintyy tyypillisesti vain hetkellisesti toiminnan aikana. Kuntosalin aiheuttama melu ja tärinä voi olla impulssimaista ja kapeakaistaista, joka voidaan huomioida tiukempina raja-arvioina, vastaavaan tasaiseen ja laajakaistaiseen herätteeseen verrattuna. Koska aiheuttajaa ei yleensä näy ja ajankohtaa on vaikea ennakoida, voidaan kuntosalin toiminta kokea erityisen häiritseväksi. Laadukkaimmillaan kuntosalitoiminta ei erotu taustamelusta.

4 TORJUNTATARPEEN ARVIONTI

Kuntosalin torjuntatarpeita arvioitaessa tarvitaan riittävä määrä lähtötietoja:

- toiminnan tarkka kuvaus ja sijoittelu,
- altistuvat kohteet ja niiden toiminta, etäisyydet kuntosalille,
- rakennuksen tiedot: perustustapa, rakennusrungon tyyppi, välipohjien tiedot, sekä
- IV-suunnitelmat ja rakenteiden liitosdetaljit.

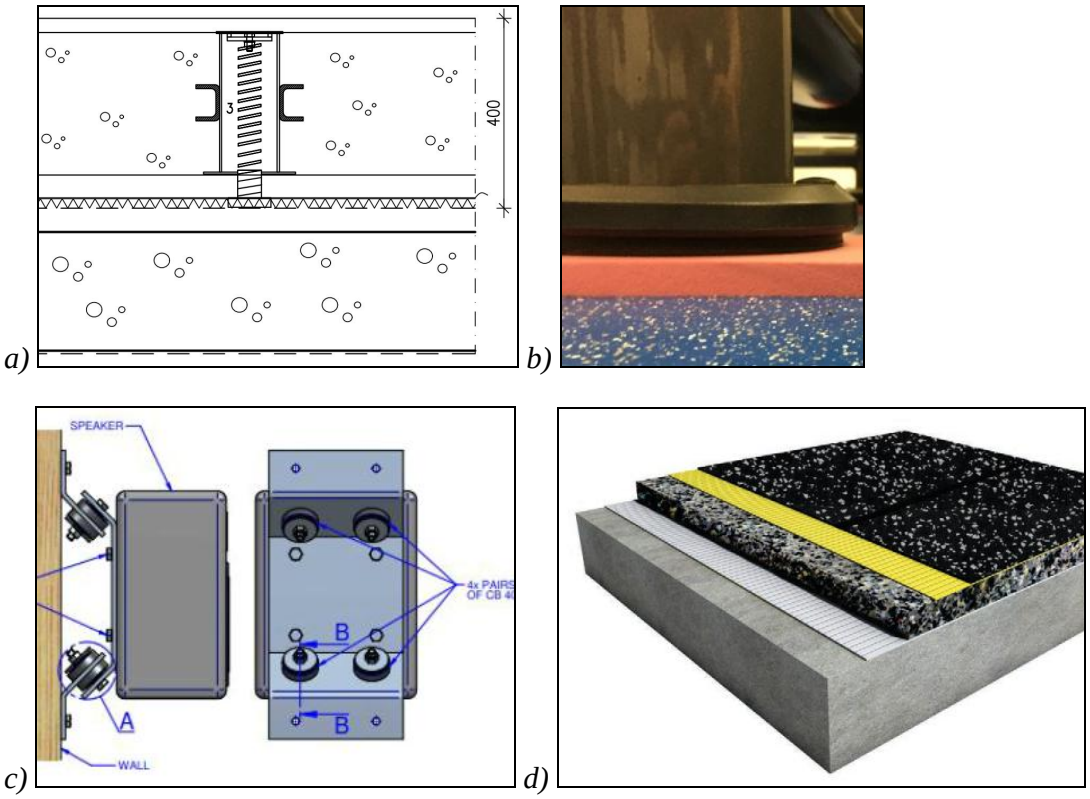
Lähtötietojen ja aikaisempien mittausten avulla on laskennallisesti mahdollista arvioida kuntosalitoiminnan aiheuttamia torjuntatarpeita. Välipohjien ominaistaajuuksia voidaan arvioida laskennallisesti [7, 8, 9]. Rakennuksen toteutukseen liittyy kuitenkin suuri määrä tekijöitä, jotka vaikuttavat runkomelun ja tärinän lopullisiin arvoihin. Tästä syystä käytetään usein rakentamisenaikaisia tai valmiissa kohteessa lähtötilannemittauksia suunnittelua tarkentavana ja riskejä minivoivana työkaluna.

Lähtötilannemittauksilla voidaan laskennallista arvioita tarkemmin selvittää todelliset vaimennustarpeet sekä rakenteiden toteutuneita ominaistaajuuksia. Lähtötilannemittauksissa aiheutetaan runkomelua ja tärinää, joka vastaa kuntosalin toimintaa. Runkomelun tuottaminen voidaan tehdä esim. 35 kg käsipunnuksella, joka pudotetaan n. 50 cm korkeudelta. Ryhmäliikunnan ja tanssin aiheuttamaa tärinää voidaan arvioida myös punnuksella tehtävillä impulssimittauksilla, mutta luotettavampaa on kerätä ryhmä ihmisiä (n. 10 kpl), jotka hyppivät ja juoksevat samaan tahtiin. Melua ja tärinää mitataan samanaikaisesti altistuvassa kohteessa tai rakennusrungosta, jos rakennushanke on vielä kesken. Tulokset skaalataan vastaamaan kuntosalin aiheuttamaa runkomelua.

5 KUNTOSALIN TOIMINNAN AIHEUTTAMAN MELUN JA TÄRINÄN TORJUNTAKEINOJA

Koska kuntosalin aiheuttama heräte on pientaajuista, vaativat torjuntaratkaisut onnistuakseen joko runsaasti massaa, jotta kellutustaajuudet saadaan riittävän alhaisiksi tai useita joustavia kerroksia pystysuunnassa. Tämä johtaa usein tilaa vieviin ja massiivisiin torjuntaratkaisuihin.

Kuvassa 2 on esitetty esimerkkejä kellutusratkaisuista *a)-c)* ja *d)* kerrosrakenteesta. Kuvassa 2 *a)* on esitetty Gerbin teräsjousilla kellutettu 300 mm paksu betonilaatta, *b)* 25 mm paksu runkomelueriste painopakkalaitteen jalan alla, c) periaatekuva joustavasta kaiutinkiinnityksestä seinärakenteeseen ja *d)* periaatekuva kerrostetusta rakenteesta.



a) *b)* *c)* *d)*

Kuva 2. a) teräsjousilla kellutettu betonilaatta, b) painopakkalaitteen jalkakohtainen eriste, c) joustava kaiutinkiinnitys (lähde: AMC Mechanocaucho) ja d) kerrostettu rakenne (lähde:BSW Regupol).

5.1 Kellutuksilla runkomelua vastaan

Kellutukset ovat tyypillinen tapa vaimentaa kuntosalin aiheuttamaa runkomelua (kts. *kuva 2 a*). Koska putoavan punnuksen spektri (kts. *kuva 1*) sisältää paljon pieniä taajuuksia, rakenteen kellutustaajuus tulisi olla riittävän alhainen. Yleensä suositaan kellutustaajuutta, joka on vähintään alle kuuloalueen (< 20 Hz). Lisäksi välipohjan resonanssit ja niiden vaikutukset joustavana alustana tulisi huomioida mitoituksessa. Jos kellutuksen mitoituksessa ei huomioida välipohjien ominaistaajuuksia on mahdollista, että luodaan pientaajuinen vahvistin, jolloin vaimennuksen sijaan vahvistetaan toiminnan aiheuttamaa häiriötä.

Kellutetut lattiarakenteet ovat tyypillinen ja muuntojoustava tapa vaimentaa kuntosalin aiheuttamaa runkomelua. Painopakkalaitteet voidaan kelluttaa myös jalkakohtaisesti, jolloin on mahdollista hieman säästää torjuntakustannuksissa.

Painopakkalaitteet voidaan kelluttaa laitekohtaisesti (kts. *kuva 2 b*) tai kelluttaa painopakkoja laitteiden rakenteissa. Kuntosalin äänentoistojärjestelmä voidaan myös kelluttaa, joko kiinnittämällä kaiuttimet joustavasti rakenteisiin (kts. *kuva 2 c*) tai kelluttamalla lattialle asennetut bassokaiuttimet.

Kellutusratkaisuissa pystysuuntaiset tilatarpeet vaihtelevat mm. vaimennustarpeen mukaan h = 25…400 mm.

5.2 Joustavat kerrotetut rakenteet runkomelua vastaan

Käsipainot aiheuttavat pienestä painostaan tai tiputuskorkeudesta huolimatta helposti suuren runkomeluherätteen. Käsipainon pudotuksen aiheuttamaa runkomelua voidaan vaimentaa tehokkaasti myös kerrostetuilla rakenteilla (korkeus = 30…250 mm), joissa rakenne on tyypillisesti: suojaava rouhematto tai parketti, joustava kuormaa jakavakerros, häviöllinen kerros ja muotoaan muuttava kerros (kts. *kuva 2 d*).

Suojaavat rouhematot vaimentavat tehokkaasti yli 250 Hz taajuuksia. Askeläänieristystä kuvaavalla luvulla ilmoitettuna rouhemattojen vaimennuskyvyt ovat näyttäytyvät vaikuttavilta ΔL_n = 20…40 dB**.** Kuntosalin aiheuttaman meluntorjunnan kannalta ongelmana on että**,** runkomelutaajuuksilla rouhematot saattavat jopa vahvistaa herätettä. *Taulukko 1* havainnollistaa miksi rouhematolle tiputettu punnus synnyttää huonetilaan pienet äänitasot, mutta ei juuri vaimenna rakennusrunkoon kytkeytyvää runkomelutaajuista (20-250 Hz) herätettä.

Taulukko 1. Rouhematon (paksuus 30 mm) vaimennuskyky runkomelutaajuuksilla.

***f* [Hz]**	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200	250
ΔL [dB]	-1	-2	-2	2	1	1	5	6	11	14

5.3 Jäykisteet ja massat tärinän torjuntaan

Kun runkomelua torjutaan usein joustavalla rajapinnalla, joka katkaisee äänisillan, tärinän torjunnassa ratkaisut perustuvat rakenteiden jäykistämiseen. Kuntosalien tärinäntorjunta voidaan toteuttaa:

1. jäykistäviä teräs- tai betonipalkkeja käyttäen,
2. tukipilareilla, jotka tukeutuvat kantaviin rakenteisiin,
3. viritetyllä massavaimentimella (TMD, Tuned-Mass-Damper) ja
4. kellutetuilla rakenteilla, jos kellutustaajuudet ovat riittävän pieniä.

Tärinän torjuntaratkaisut ovat runkomelun torjuntaan nähden askelta massiivisempia, koska värähtelevät taajuudet ovat pieniä ja herätteen kokonaismassat (esim. 12x60 kg tanssijaa) suuria.

5.4 Ilmaäänen torjunta

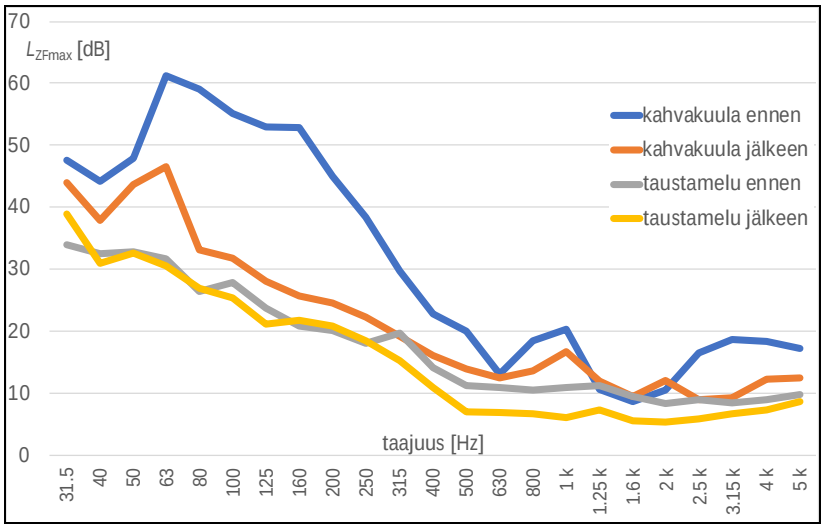
Ryhmäliikuntatiloissa bassovoittoisen musiikkimelun L_{Aeq} saattaa olla 90-95 dB luokkaa, jolloin ilmaäänieristyksen on oltava riittävä. Myös kannustushuudot saattavat kuulua naapuriin. Betonirakenteiden lisäksi seinien levyrakenteet ja pystysuunnassa alaslaskettu äänieristyskatto kasvattavat ilmaäänieritystä tilojen välillä.

Ovet, ikkunat. tekniikan läpiviennit ja IV-putket saattavat heikentää tilojen välistä äänieristystä. Putkien koteloinnit, äänenvaimentimet ja läpivientien tiivistykset ovat siksi osa onnistunutta äänieristystä.

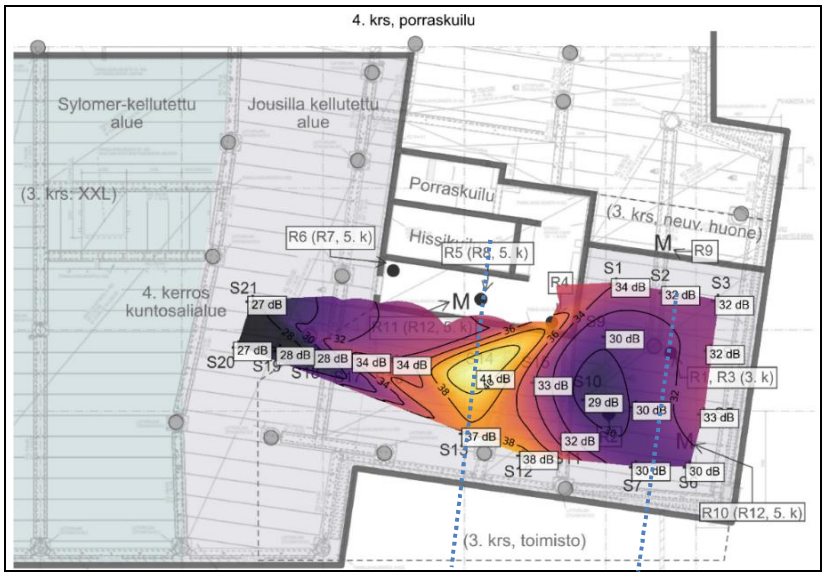
6 MITTAUSTULOKSIA

6.1 Runkomelun torjunta ja vaikutukset

Kuvassa 2 on esitetty **kerrostalon kellarissa kellutetulla betonilaatalla** mitatut äänitasojen spektrit ennen ja jälkeen torjuntatoimien. Kerrostaloon toteutettiin elastomeerikaistoilla (Getzner, Sylomer) kellutettu betonilaatta (100 mm). *Kuvassa 3* havainnollistetaan **teräsjousilla kellutetun betonilaatan alueellista vaimennuskykyä**. Redin/Kalasataman kuntosalikohteessa teräsjousilla (Gerb) kellutetun betonilaatan (125 mm), vaimennuskyvyksi runkomelutaajuuksilla 20…250 Hz mitattiin 25…30 dB.



*Kuva 2. **Kahvakuulalla** mitatut enimmäisäänitasojen painottamattomat terssispektrit ennen ja jälkeen torjuntatoimien.*



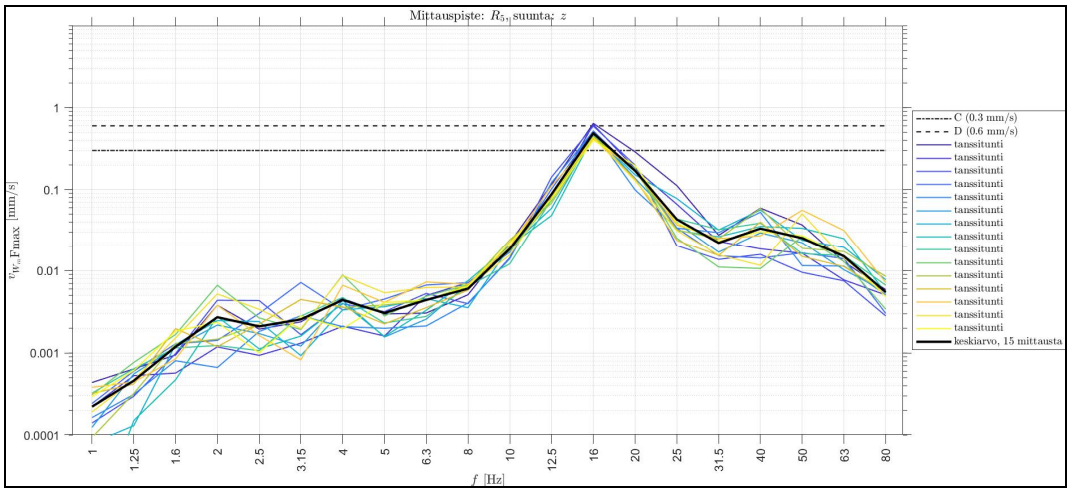
*Kuva 3. **Teräsjousilla kellutetun betonilaatan** runkomeluherätteen enimmäistasot ($L_{vAF\text{-}max}$ re. 50nm/s) mitattuna kuntosalin viereisessä porraskuilussa (mittauspisteet kuvassa R4-R6). Kellutettujen betonilaattojen liikuntasaumat on hahmoteltu katkoviivoin.*

6.2 Tärinän mittaustuloksia

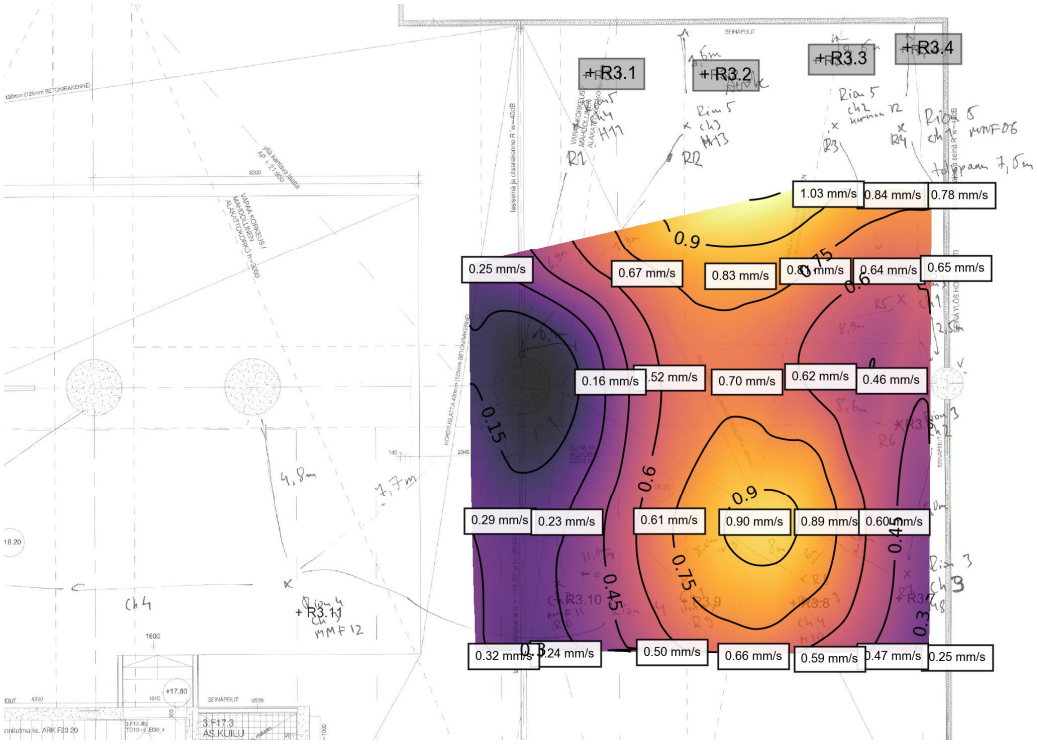
Tärinä ilmenee rakenteiden pienitaajuisena värähtelynä (1-40 Hz), jonka etenemistä voidaan tarkastella rakenteisiin kiinnitetyillä kiihtyvyysantureilla.

Kuvassa 4 on esitetty **tanssitunnin aiheuttamaa tärinää** mitattuna kiihtyvyysanturilla kerrosta ylemmän toimiston välipohjasta. Välipohja värähtelee herätteen pääasiallista taajuussisältöä (1…10 Hz) korkeammilla taajuuksilla, koska impulssimaisen herätteen laajakaistaisesta luonteesta välipohjan ominaistaajuuksia lähellä oleva taajuuskaista vahvistuu joustavassa rakenteessa.

Rakenteiden jäykkyyden vaikutusta tärinään voidaan kartoittaa herätepisteiden hilan avulla. Jokaisessa lähdepisteessä toistettavan herätteen tuottama tärinä voidaan yhdistää rakenteen pohjapiirustukseen, jolloin syntyvä visualisointi havainnollistaa rakenteen tärinäherkkyyttä. Esimerkki tästä on esitetty *kuvassa 5*, jossa pilarien ja palkkien jäykistävät vaikutukset näkyvät ympäristöään matalampina tärinäarvoina. Vastaavasti välipohjan vapaammin värähtelevät alueet osoittavat suurempia tärinän arvoja. Esimerkin tapauksessa voimakkaimpia tärinäalueita ympäröivät jäykemmät rakenteet vähentävät tärinäarvoja n. 60...70%.



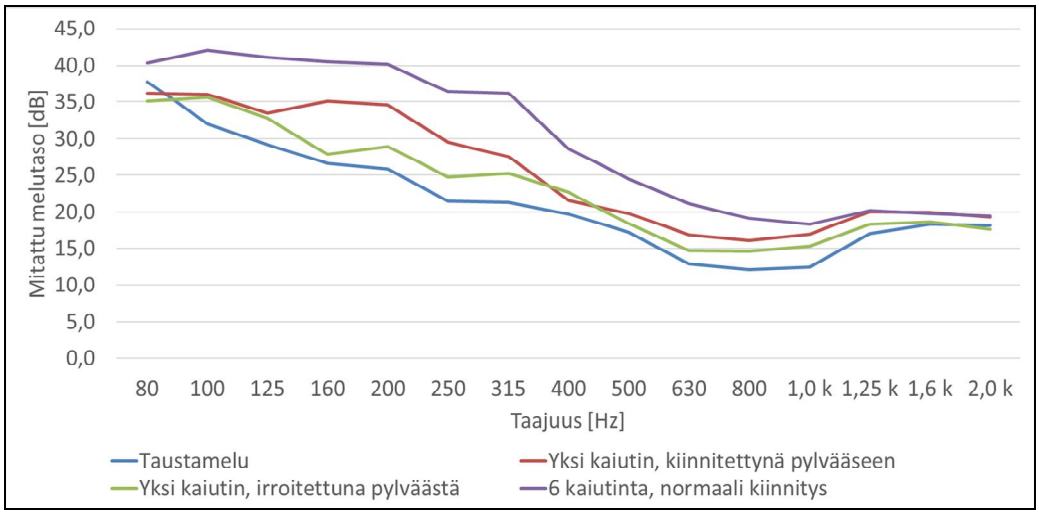
Kuva 4. ***Tanssituntien aiheuttamaa tärinää*** *mitattuna kerrosta ylemmän toimiston lattiasta/välipohjasta.*



Kuva 5. Tärinäherätteen eteneminen välipohjassa herätepisteen sijainnista riippuen. Vyöhykkeen väri ilmaisee kuvan yläreunan vastaanottopisteissä (tumma tekstipohja) mitattua w_m-painotetun tärinän huippua.

6.3 Äänentoiston runkoäänen eristyksen vaikutuksia

Kuvassa 6 on esitetty kaiuttimien irrotuksen vaikutuksia yläkertaan syntyvään meluun. Kaiuttimen jäykkä kiinnitys seinään (kuvassa ”normaali kiinnitys”) aiheuttaa yläkerrassa muutamalla terssikaistalla yli 5 dB suuremman äänitason kuin seinästä irrotettu kaiutin.



Kuva 6. Kaiuttimen irrotuksen vaikutuksia meluun kuntosalin yläpuolisessa tilassa.

7 YHTEENVETO

Kuntosalien yhteydessä runkomelueristykselle on usein selvä tarve. Lähes kaikki kuntosalin toiminta aiheuttaa runkomelua (20-250 Hz), joka tulisi huomioida suunnittelussa. Jopa painopakkalaitteet ja rouhematolle tiputetut käsipunnukset aiheuttavat häiritsevää melua useiden kerrosten päähän. Ryhmäliikunnan aiheuttamat tärinäriskit (1-20 Hz) saattavat olla vähäisempiä, jos toiminnansijoittelu on huomioitu suunnittelun alkuvaiheessa.

Esitetyt mittaustulokset osoittavat, että kuntosalin aiheuttamaa häiriötä voidaan vähentää merkittävästi suunnitelulla ja onnistuneella toteutuksella. Kuntosalin torjunta on monialasuunnittelua, joka vaatii rakennesuunnittelijan, toiminnan harjoittajan sekä akustikon että työmaan tiivistä yhteistyötä.

VIITTEET

[1] World Health Organization, Night Noise Guidelines For Europe, 2009, Ed. C. Hurtley
[2] Ympäristöministeriön asetus rakennuksen ääniympäristöstä 796/2017
[3] Ääniympäristö – Ympäristöministeriön ohje rakennuksen ääniympäristöstä. Ympäristöministeriö, Helsinki 2018.
[4] Suomen rakentamismääräyskokoelma C1 – Ääneneristys ja meluntorjunta rakennuksessa, määräykset ja ohjeet 1998. Ympäristöministeriö, Helsinki 1998.
[5] Rakennusten akustinen luokitus, SFS 5907. Suomen standardisoimisliitto SFS, Helsinki 2004.
[6] Sosiaali- ja terveysministeriön asetus asunnon ja muun oleskelutilan terveydellisistä olosuhteista sekä ulkopuolisten asiantuntijoiden pätevyys vaatimuksista 545/2015.
[7] Feldmann, M. et al. Design of floor structures for human induced vibration. EUR 24084 EN. Joint Research Centre – European Commission. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities. 2009. 64 s.
[8] Talja, A., Toratti, T. &J Järvinen, E. Lattioiden värähtelyt – Suunnittelu ja kokeellinen arviointi. VTT tiedotteita 2124. Espoo. 2002.
[9] Heikkinen, M. Raideliikenteen aiheuttama rakenteiden värähtely. Diplomityö. Aalto-yliopisto. Signaalinkäsittelyn ja akustiikan laitos. 2019. 86 + 39 s.

KÄYTTÄJÄKESKEINEN MELULÄHTEIDEN LUOKITTELU TYÖKONEISSA

Marko Antila, Jari Kataja, Lasse Lamula, Heikki Isomoisio ja Seppo Rantala

Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy
PL 1300
33101 TAMPERE
etunimi.sukunimi@vtt.fi

Tiivistelmä

Olemme tutkineet tavanomaisen konemelun luokittelun laajennuksena käyttäjäkeskeistä melun luokittelua. Käyttäjäkeskeisessä melun luokittelussa on merkittävää sijainti, jossa melun vaikutusta arvioidaan. Lähestymistapaa on arvioitu tutkimalla kaivoksessa toimivan kallionjyrsintälaitteen melu- ja värähtelyominaisuuksia. Käyttäjäkeskeinen melulähteen luokitusmenetelmä laajentaa tavanomaisia melunluokitusmahdollisuuksia, koska se mahdollistaa yksityiskohtaisemman analyysin. Samoin on mahdollista erottaa merkittävimmät melulähteet automaattisesti. Käyttäjäkeskeinen melulähteiden luokittelu vaatii aikasarjojen käyttöä analyysissä. Saavutettavat hyödyt kompensoivat lisääntyneen tallennustilan tarpeen.

1 JOHDANTO JA TAVOITE

Koneiden tuottaman melun luokittelua (noise ranking) käytetään arvioitaessa sitä, mitkä koneen osat vaikuttavat eniten koneen tuottamaan kokonaismeluun [1]–[3]. Olemme tutkineet tällaisen tavanomaisen melun luokittelun laajennuksena käyttäjäkeskeistä melun luokittelua [4]–[6].

Tutkimuskohteina ovat olleet sekä melun psykoakustinen arviointi, että melulähteiden tunnistaminen niiden piirteiden perusteella. Tavanomaisen melunluokittelumenetelmän tapaan tunnistetaan merkittävimmät melulähteet ja arvioidaan niiden yhteisvaikutus. Merkittävyyttä arvioidaan äänen laadun perusteella [7].

Käyttäjäkeskeisessä melun luokittelussa on merkittävää myös sijainti, jossa melun vaikutusta arvioidaan. Sijainti tai sijainnit valitaan yleensä niiksi paikoiksi, joissa koneen käyttäjä tai muut melulle altistuvat työntekijät ovat.

© 2019 Marko Antila, Jari Kataja, Lasse Lamula, Heikki Isomoisio ja Seppo Rantala. Tämä on avoimesti julkaistu teos, joka noudattaa *Creative Commons NIMEÄ 4.0 Kansainvälinen* -lisenssiä (CC BY 4.0). Teosta saa kopioida, levittää, näyttää ja esittää julkisesti ja siitä saa luoda johdannaisteoksia, kunhan tekijän nimi ja lähde mainitaan asianmukaisesti.

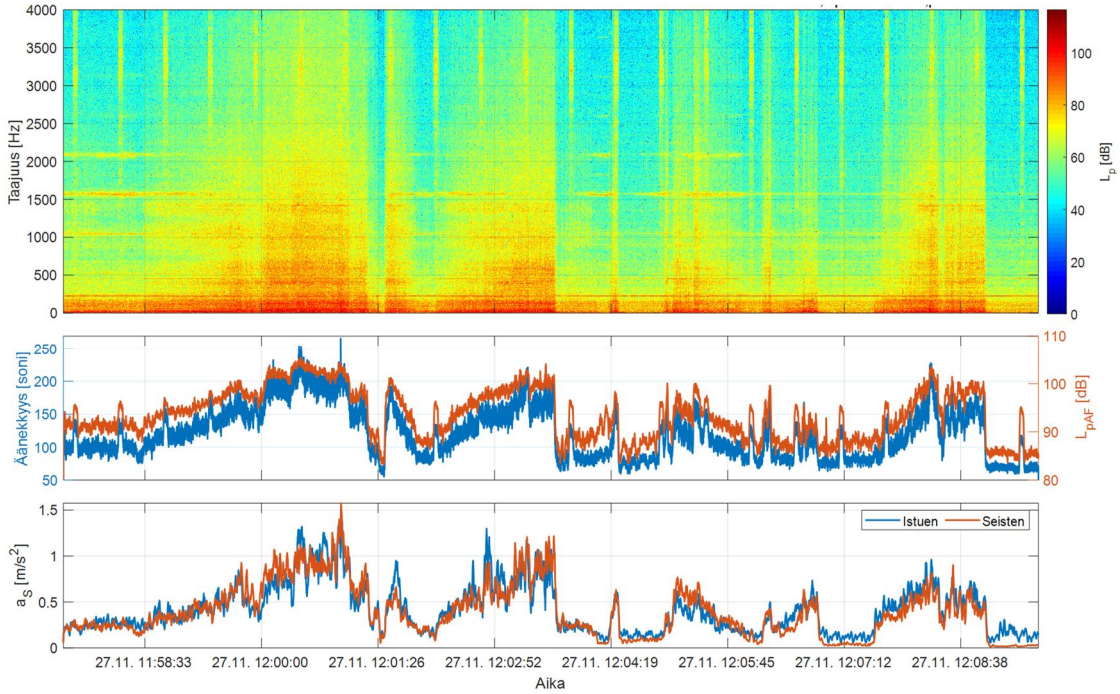
Kuva 1. MX650 kovaa kiveä jyrsivä kaivoskone (valokuva Sandvik Itävalta).

2 TUTKIMUSKOHDE JA SEN TOIMINTA

Tutkimuskohteena on ollut scheeliittikaivoksessa (wolframimalmi) toimiva kiveä jyrsivä koekone MX650 (kuva 1). Koneen periaatteena on jyrsiä malmi suoraan malmisuonesta, ilman erillistä porausta, panostusta, räjäytystä ja kivimurskan poistoa. Toimintaperiaatteesta johtuen kone on erittäin meluinen, ja myös värähtelytasot nousevat korkeiksi.

Koneesta mitattiin sen tuottama melu sekä värähtely. Melu mitattiin yhtäaikaisesti useassa mittauspisteessä. Mittauspisteet valittiin siten, että ne ovat todennäköisimmissä paikoissa, joissa koneen käyttäjät altistuvat melulle. Mittausdata analysoitiin sekä tavallisin menetelmin, että käyttäen psykoakustisia menetelmiä, tässä tapauksessa äänekkyyttä.

Tyypilliset mittaukset ja niiden analyysi on esitetty kuvassa 2. Vaaka-akselilla on aika, ja pystyakseleilla spektrogrammi (ylempi kuva), äänekkyys- sekä huipputasot (keskimmäinen kuva), sekä värähtelyt (alin kuva). Spektrogrammi näyttää tasot värikarttana 4 kHz asti. Keskimmäinen kuva koostuu sekä äänekkyyskäyrästä [8] (sininen käyrä ja vasen asteikko) ja A-painotetusta fast-aikaikkunan äänitasokäyrästä (punainen käyrä ja oikea asteikko, L_{pAF}). Tässä tapauksessa nämä kaksi eri käyrää eivät eroa merkittävästi toisistaan. Joissain tapauksissa erot voivat olla kuitenkin merkittäviä. Alin kuvaaja edustaa istuen tai seisten kehoon kohdistuvaa tärinää.



Kuva 2. Esimerkki MX650 tuottamasta äänestä ja värähtelystä yhdellä työtekijän pisteellä. Kuvassa ylimpänä spektrogrammi, keskellä äänekkyys soneina (sinisellä) ja äänitaso L_{pAF} (punaisella). Alimpana ovat värähtelytason sekä seisten että istuen. Äänekkäimmät osuudet edustavat jyrsintää.

3 MELUN LUOKITTELU

Kuten kuvasta 2 havaittiin, melu koostuu selvästi useasta erilaisesta osamelulähteestä. Jotta melun lähteitä pystyttäisiin tehokkaasti vaimentamaan, on tarpeen pystyä tunnistamaan ja luokittelemaan eri melulähteet. Melun lähteitä ei voi koneen toimiessa normaalisti eristää erillisiksi lähteiksi. Siksi tarvittiin erityisiä luokittelumenetelmiä, jotka pystyisivät tekemään luokittelun mitatusta yhdistelmämelusta. Luokittelumenetelmien opettamista varten tehtiin koneen joistakin erillisistä äänilähteistä mittaukset komponenteittain. Lisäksi, koska haluttiin arvioida melua nimenomaan psykoakustisista lähtökohdista, etsittiin menetelmiä, jotka toimisivat aikatason signaaleille.

On olemassa useita luokittelumenetelmiä, joita voidaan soveltaa myös kone- ja laitemeluun. Niihin kuuluvat Independent Component Analysis (ICA) [9], [10], Principal Component Analysis (PCA) [11], ja useita Deep Learning (DL) kategorioita [12]. ICA ja PCA kuuluvat Blind Source Separation (BSS) -menetelmiin. Se tarkoittaa, että niitä käytettäessä ei ole muuta aikaisempaa tietoa niiden lähteestä. Sekä lähteet että siirtofunktiot ovat tuntemattomia. Comon & Jutten ovat tehneet BSS-menetelmien laajan arvioinnin [13].

Jotta pystytään erottelemaan eri lähteiden vaikutus tilanteessa, jossa on useita äänilähteitä, mittauksiin sovitetaan malli. Mallilla luokittelemme signaalilähteet eri luokkiin. Tässä tutkimuksessa mallinnukseen on käytetty neuroverkon rakennetta, jossa on useita välikerroksia. Useimmiten kun puhutaan Deep Learning menetelmistä, niin silloin tarkoitetaan juuri sellaista rakennetta, jossa neuroverkon rakenteessa on useita välikerroksia. Käyttämässämme mallissa on sekä perinteisiä täysin kytkettyä että 2D konvoluutiokerroksia.

Tutkimuksen ensimmäisessä vaiheessa mitattiin erikseen eri äänilähteitä samanaikaisesti sekä binaural- että tarkkuusmikrofonilla. Taulukossa 1 on esitetty mitatut äänilähteet ja niiden indeksit, joita käytetään kuvissa 3 - 5.

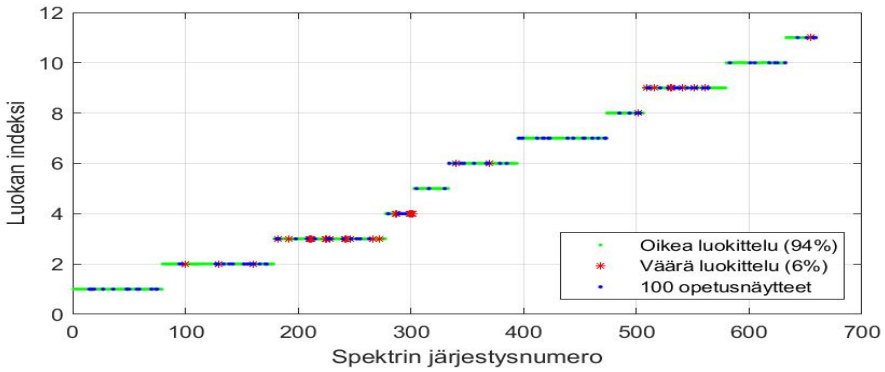
Luokittelun syöttötietoina ovat edellä mainituista aikasarjoista estimoidut autoregressiiviset spektrit. Koska äänilähteet olivat epästationäärisiä ja koska halusimme saada luokitteluun riittävästi opetusainestoa, aikasarjat jaettiin 0,6 sekunnin lohkoihin, joiden kokonaismääräksi tuli 659 kappaletta. Koska käytössä oli kolme erillistä mittausta, jokaisesta lohkosta saatiin kolme spektriä. Mallin rakentaminen aloitetaan valitsemalla satunnaisesti opetusnäytteet.

Taulukko 1 Mitatut äänilähteet ja niiden indeksit.

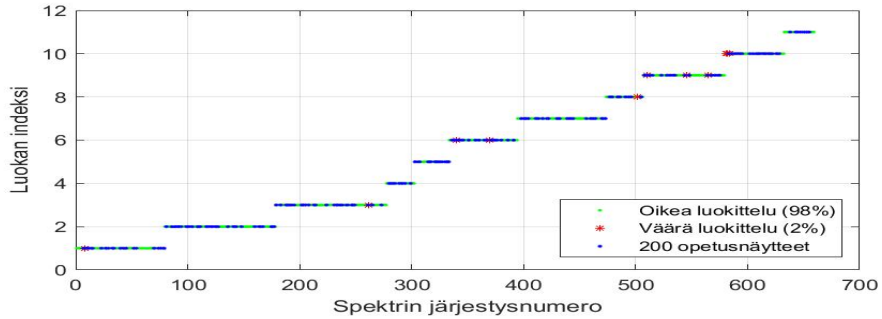
Luokan indeksi	Pulttaajan paikka vasemmalla	Luokan indeksi	Pulttaajan paikka oikealla
1	Hydraulipumput (2 yksikköä)	7	Pumput (+jäähdytys)
2	Jyrsinterän moottorit	8	Jyrsinterän moottorit (+jäähdytys)
3	Hihnakuljetin ilman kiviä	9	Hihnakuljetin
4	Porauskompressori - akku täynnä	10	Kompressori
5	Pumput kuormitettuina	11	Pumput kuormitettuina
6	Pölynpoisto (kaukaa)		

Kuvassa 3 on opetusnäytteiden määrä 100 kappaletta. Verifioidessa mallia havaittiin, että luokittelun osuvuus oli 94%. Luokissa 3 ja 9 oli eniten vääriä tuloksia. Molemmat ovat aikasarjoja hihnakuljettimista, joiden spektreissä on vähän diskreettejä taajuuksia. Jos opetusmäärä tuplataan saadaan parempi tulos kuten kuvasta 4 nähdään.

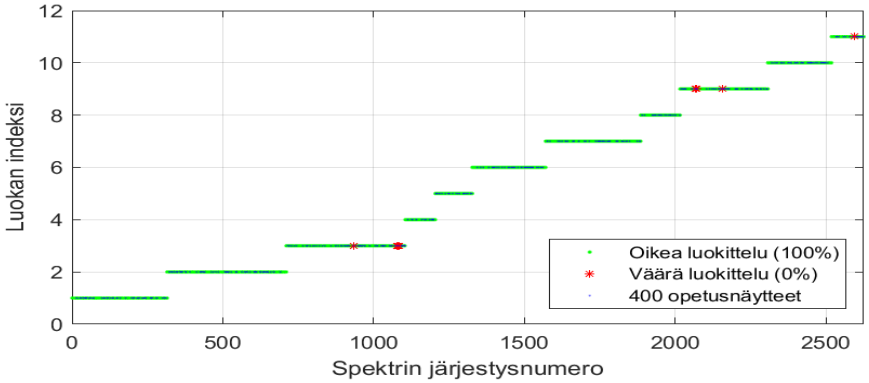
Koska opetusaineiston määrä on suuri (~30%) kokonaismäärään suhteutettuna, voidaan epäillä, että malli on sovittanut liian hyvin opetusaineistoon eikä ole pystynyt yleistämään. Tällöin sen jatkokäyttö on hyödytöntä. Opetusnäytteiden määrää voidaan lisätä esimerkiksi laskemalla spektrit lomittamalla. Tästä esimerkkinä on kuvassa 5 esitetty tapaus, jossa lohkojen kokonaismäärä on 2625 ja opetusnäytteiden määrää on 400, joka tarkoittaa noin 15% opetusnäytettä kokonaisuudesta. Luokitus on erittäin hyvä. Ainoastaan muutama lohko on väärin. Nämäkin tapaukset ovat enimmäkseen hihnakuljettimista.



Kuva 3. Luokittelutulokset 100 opetusnäytteellä.



Kuva 4. Luokittelutulokset 200 opetusnäytteellä.



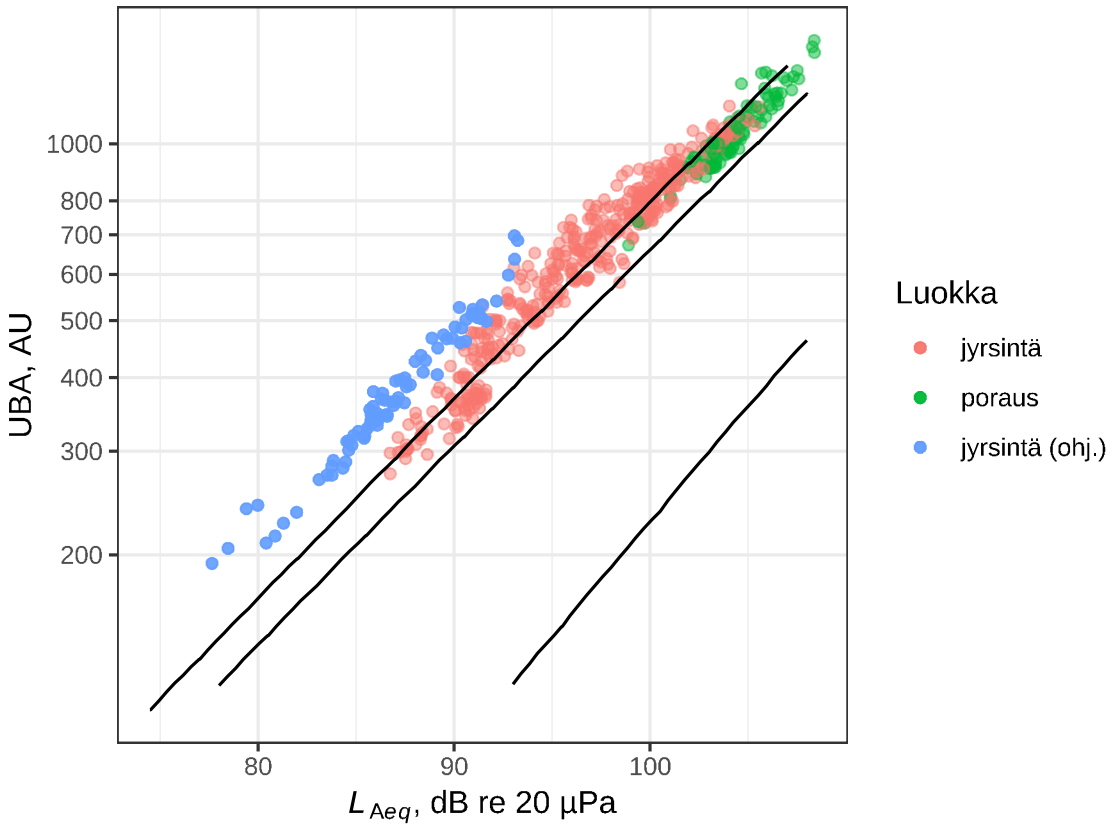
Kuva 5 . Luokittelutulokset 400 opetusnäytteellä 2625 lohkosta .

4 ÄÄNEN LAADUN ARVIOINTI

Kuvassa 6 on esitetty harhaton häiritsevyys (unbiased annoyance, UBA) ja A-painotetut ekvivalenttitasot. Analyysi on tehty kahdelle erilaiselle melutyypille, jyrsinnälle (punaiset pisteet) ja poraamiselle (vihreät pisteet). Myös ohjaamon sisällä tehdyt mittaukset ovat kuvassa (siniset pisteet). Mustat suorat edustavat referenssisignaaleja. Ne ovat häiritsevimmästä vähiten häiritsevään tasajakautunut peittoääni (uniform masking noise), valkoinen kohina ja 1 kHz äänes.

Jyrsintämelu ohjaamossa on jonkin verran suurempi kuin ohjaamon ulkopuolella. Tämä johtuu todennäköisesti impulssimaisista voimista, jotka aiheuttavat räminää ja kitinää ohjaamossa. Tämä taas nostaa vaihteluvoimakkuuden (fluctuation strength) tasoa. Ohjaamon ulkopuolella melutaso on korkeampi, mutta vaihteluvoimakkuus pienempi. Siksi UBA antaa tulokseksi pienemmän häiritsevyyden, kun tasot säädetään ekvivalenttitasoiksi.

Vaikka jyrsintä aiheuttaakin lähtökohtaisesti impulssimaista melua kalliota leikkaavien jyrsinterien rakenteen takia, niin häiritsevyys lisääntyy UBA:n mukaan ainoastaan noin1 dB äänitasossa arvioituna. Ohjaamon sisällä korjaus on 2 dB tai hieman yli.



Kuva 6. Kolmen melukategorian harhaton häiritsevyys (unbiased annoyance).

5 YHTEENVETO

Käyttäjäkeskeistä melun luokittelua on arvioitu tutkimalla kaivoksessa toimivan kallionjyrsintälaitteen melu- ja värähtelyominaisuuksia. Tuloksena on ollut, että käyttäjäkeskeinen melulähteen luokitusmenetelmä laajentaa tavanomaisia melunluokitusmahdollisuuksia, koska se mahdollistaa yksityiskohtaisemman analyysin. Samoin on mahdollista erottaa merkittävimmät melulähteet automaattisesti. Toisaalta käyttäjäkeskeinen melulähteiden luokittelu rajoittaa käytettäviä analysointimenetelmiä. Käytetyt psykoakustiset analyysimenetelmät vaativat äänenpaineen hankkimisen aikasarjana. Tämä luo uusia vaatimuksia tiedonkeruu- ja analyysimenetelmille. Nykytekniikka mahdollistaa kuitenkin pitkienkin aikasarjojen tallennuksien, ja saavutettavat hyödyt kompensoivat lisääntyneen tallennustilan tarpeen.

KIITOKSET

Kiitokset RockVader EIT Raw Materials -hankkeelle (RockVader - Smart Hard Rock Mining System project, EIT RM projekti 16136) työn rahoituksesta, sekä erityiskiitos Sandvik Itävallalle.

VIITTEET

[1]J. W. Verheij, “Inverse and Reciprocity Methods for Machinery Noise Source Characterization and Sound Path Quantification Part 1: Sources,” *Int. J. Acoust. Vib.*, vol. 2, no. 1, pp. 11–20, 1997.

[2]G. Shu and X. Liang, “Mechanical Systems and Signal Processing Identification of complex diesel engine noise sources based on coherent power spectrum analysis,” *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 21, pp. 405–416, 2007.

[3]D. Fernandez Comesana, A. Grosso, H.-E. De Bree, J. Wind, and K. Holland, “Further Development of Velocity-based Airborne TPA: Scan & Paint TPA as a Fast Tool for Sound Source Ranking,” SAE, Jun. 2012.

[4]M. Antila, L. Lamula, J. Kataja, H. Isomoisio, and S. Rantala, “User centric noise source ranking,” in *Euronoise 2018*, 2018, pp. 869–876.

[5]M. Antila *et al.*, “Machinery noise source identification with deep learning,” in *Proceedings of Internoise 2019*, 2019.

[6]M. Antila, H. Isomoisio, J. Kataja, and J. Heikkilä, “Psychoacoustic Evaluation of Rock Crushing Plant Noise,” in *Proc. of Euronoise 2015*, 2015.

[7]E. Carletti and F. Pedrielli, “From Noise Levels to Sound Quality: The Successful Approach to Improve the Acoustic Comfort,” .

[8]K. H. Lee, “Perception of tones in machinery noise and its influence on annoyance,” 2006.

[9]A. Hyvärinen and E. Oja, “Independent Component Analysis: Algorithms and Applications,” *Neural Netw.*, vol. 13, no. 4–5, pp. 411–430, May 2000.

[10]G. R. Naik, “An overview of independent component analysis and its applications,” *Inform.*, vol. 35, no. 1, pp. 63–81, 2011.

[11]J. Shlens, “A Tutorial on Principal Component Analysis,” Apr. 2014.

[12]Y. LeCun, Y. Bengio, and G. Hinton, “Deep learning,” *Nature*, vol. 521, no. 7553, pp. 436–444, May 2015.

[13]P. Comon and C. Jutten, *Handbook of Blind Source Separation Independent Component Analysis and Applications*. Elsevier, 2010.

VÄRÄHTELYN ETENEMINEN RAKENTEISSA JA ÄÄNEN SÄTEILY

Lasse Lamula[1], **Kari Saarinen**[2]

[1] Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy
PL 1300
33101 TAMPERE
etunimi.sukunimi@vtt.fi

[2] Bofinksvägen 31
15157 Södertälje
Ruotsi
kps.tre@gmail.com

Tiivistelmä

Hiljaisen tuotteen suunnittelun lähtökohtana on usein jo tuotannossa olevan version meluominaisuuksien määritys eli äänilähteiden ja niiden keskinäisen merkittävyyden selvittäminen. Perusteellisempi äänen syntymekanismeihin perehtyminen ja hiljaisempien rakenneratkaisujen kehittely edellyttävät jotain enemmän. Tavoitteena tulee olla riittävän hiljainen kone, jolloin ei tarvita prototyypin päälle rakennettuja meluntorjuntavirityksiä, vaan ne on jo ”piilotettu” valmiin koneen rakenteisiin osana suunnitteluprosessia. Värähtelevän rakenteen äänensäteily on useissa koneissa merkittävä melun-syntymekanismi. Lisäinformaatiota siitä, mitä rakenteissa tapahtuu, saadaan numeerisella koneen tai koneen osan mallilla ja erilaisilla värähtely- ja äänimittauksilla.

Runkoäänen etenemistä koneen rakenteissa tarkastellaan usein koneen kahden eri osan liitoksessa. Herätemekanismit vaikuttavat rakenteeseen A (lähde) ja mekaaninen värähtely etenee osaan B (vastaanotin). Lähteen ja vastaanottimen dynaamiset ominaisuudet liitoksessa voidaan suunnitella sellaisiksi, että runkoäänen siirtyminen on tehotonta. Tällöin lähteen ja vastaanottimen liitoksiin luodaan mahdollisimman suuri mobiliteettiepäsovitus. Liitoskohtien mobiliteetit vaikuttavat myös rakenteiden äänensäteilyyn.

Koneen pinnan värähtelynopeus ja säteilysuhde määräävät syntyvän äänitehon. Säteilysuhde kuvaa kuinka tehokkaasti pinnan värähtely kytkeytyy ääneksi. Rakenteen mekaanisten ominaisuuksien lisäksi se on riippuvainen mm. myös herätteistä ja siirtoteistä. Tässä paperissa havainnollistetaan esimerkein mobiliteettisovituksen ja säteilysuhteen vaikutusta äänitehoon.

1 JOHDANTO

Värähtelevän rakenteen äänitehon määritys tehdään standardoiduilla menetelmillä äänenpaine tai äänenintensiteettimittauksin. Intensiteettimittaus ja poissulkemismenetelmä

© 2019 Lasse Lamula ja Kari Saarinen. Tämä on avoimesti julkaistu teos, joka noudattaa Creative Commons NIMEÄ 4.0 Kansainvälinen –lisenssiä (CC BY 4.0). Teosta saa kopioida, levittää, näyttää ja esittää julkisesti ja siitä saa luoda johdannaisteoksia, kunhan tekijän nimi ja lähde mainitaan asianmukaisesti.

mahdollistavat värähtelevän rakenteen osien merkittävyysjärjestyksen selvittämisen, osalähteiden äänitehot. Varsinaiset äänensyntymekanismit jäävät tuntemattomiksi. Tässä paperissa havainnollistetaan esimerkein, mitä on tehtävissä syvällisemmän ymmärryksen hankkimiseksi.

2 HERÄTEVOIMA JA SEN SYNNYTTÄMÄ RUNKOÄÄNITEHO

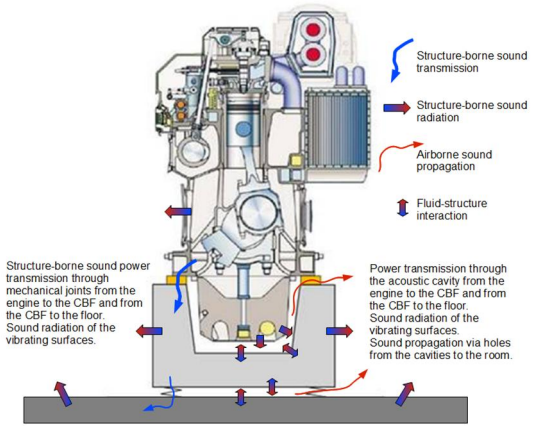
Perinteisesti koneen todellisia herätevoimia ei ole pystytty määrittämään. Laskelmissa rakenteiden vertailu on tehty vakiovoimilla halutulla taajuuskaistalla. Herätesuureina on voitu käyttää arvioituja tai jos mahdollista mitattuja pistevoimia, -momentteja, siirtymiä, nopeuksia, kiihtyvyyksiä tai tasan jakautunutta painetta. Monikappaledynamiikalla tai CFD-mallinnuksella voidaan päästä lähemmäs todellisia herätteitä.

Pistevoiman (F) rakenteeseen synnyttämä runkoääniteho (P) on riippuvainen rakenteen dynaamisista ominaisuuksista eli kohdistuspisteen mobiliteetista (Y) [1].

$$P = \frac{1}{2}\mathrm{Re}(F v^*) = \frac{1}{2}|F|^2\,\mathrm{Re}(Y) \tag{1}$$

3 RUNKOÄÄNEN ETENEMINEN RAKENTEISSA

Värähtelyn etenemistä on hankalaa tarkastella koko rakenteessa. Usein tarkastellaan runkoäänitehon siirtymistä sopivasta paikasta valitun liitoksen yli. Kuvassa on havainnollistettu runkoäänitehon siirtymistä moottorista alustaan ja eri osien äänen säteilyä ja ilma-/nesteäänen ja rakenteen värähtelyn yhteisvaikutusta.



$$P = \tfrac{1}{2}|v_{sf}|^2\,\mathrm{Re}(Y_r)/\,|Y_r + Y_s|^2 \tag{2}$$

$$P = \tfrac{1}{2}|v_c|^2\,\mathrm{Re}(Y_r)/\,|Y_r|^2 \tag{3}$$

$$P = \tfrac{1}{2}\mathrm{Re}(\boldsymbol{v}_{sf}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{Y}_s + \boldsymbol{Y}_r)^{-1}\boldsymbol{Y}_r^{*}((\boldsymbol{Y}_s + \boldsymbol{Y}_r)^{-1})\boldsymbol{v}_{sf}^{*}) \tag{4}$$

$$P = \tfrac{1}{2}\mathrm{Re}(\boldsymbol{v}_c^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Y}_r^{-1}\,\boldsymbol{v}_c^{*}) \tag{5}$$

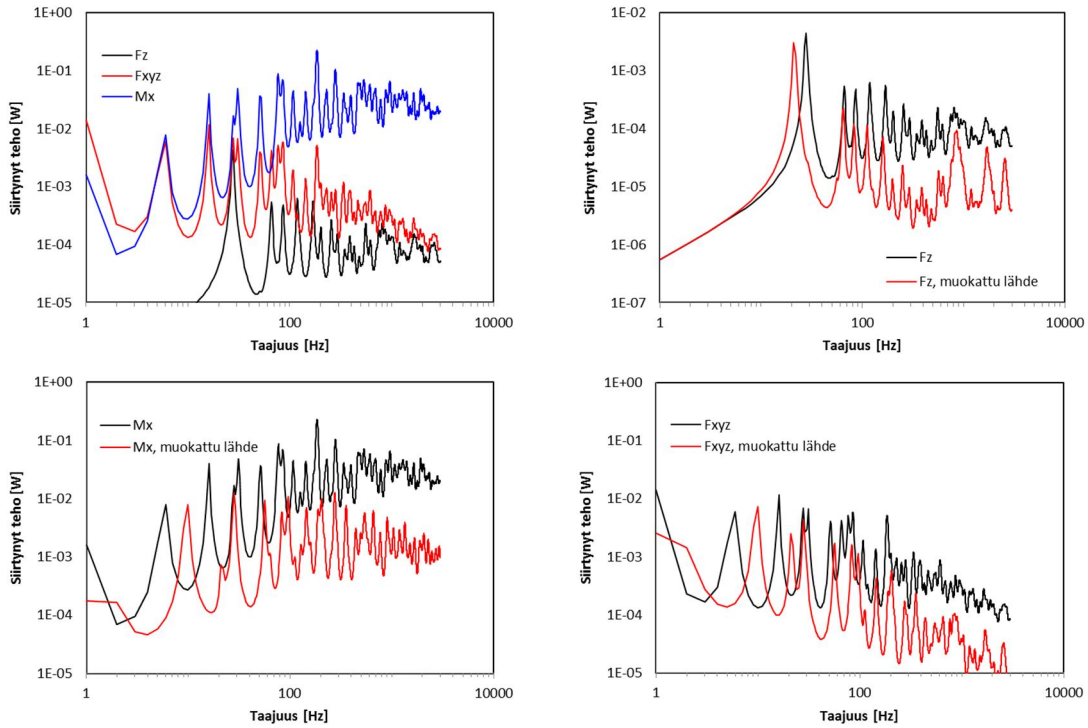
v_{sf} on lähteen vapaa nopeus
v_c on kytketty nopeus
Y_r on vastaanottimen mobiliteetti
Y_s on lähteen mobiliteetti

Kuva 1. Periaatekuva tehonsiirtoreiteistä liitoksen ympäristössä. Liitoksen yli siirtyvän runkoäänitehon laskentakaavat vapaan ja kytketyn nopeuden avulla määritettynä (matriisit lihavoituina).

Käytettävissä on useita menetelmiä, joista yleisin perustuu liitospisteiden mobiliteettien ja nk. vapaan nopeuden avulla liitoksen yli siirtyvän runkoäänitehon analysointiin [2]. Vapaa nopeus (v_f) määritetään koneen (lähde) toimiessa normaalisti kaikki liitospisteet irrotettuna. Mallilla tämä on helppoa, mutta jos kyseessä on puhdas mittaus, parempi vaihtoehto on liitosten kytketyillä nopeuksilla tapahtuva analyysi [2]. Kytketty nopeus (v_c) määritetään koneen toimiessa normaalisti. Menetelmän valinta voidaan tehdä tapauskohtaisesti, riippuen siitä mitä analyysillä haetaan. Yleisessä tilanteessa analyysi

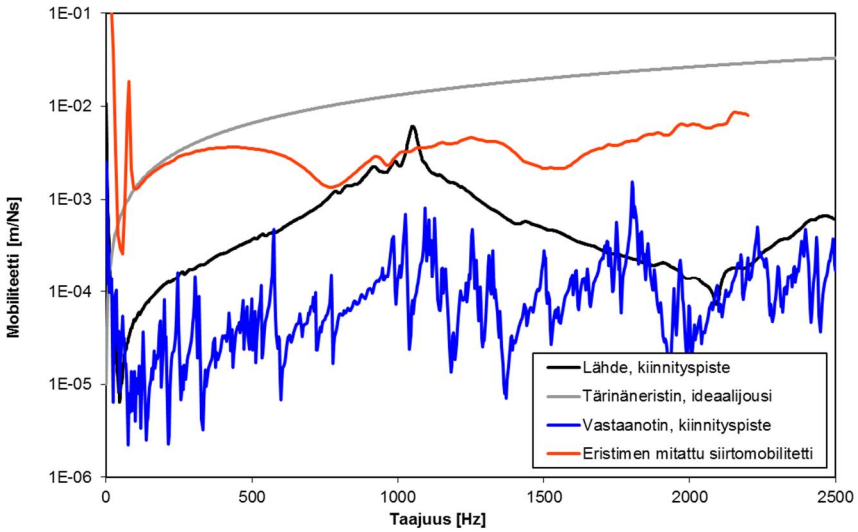
tehdään matriisilaskentana. Mallilla voidaan käyttää jopa täysiä matriiseja, mutta mitattaessa käytössä ovat käytännössä vain translaatiovapausasteet.

Tarkastellaan esimerkkinä teräspalkin (lähde 0.01 x 0.01 x 3 m) ja teräslaatan (vastaanotin 1.0 x 0.8 x 0.005 m) välistä pisteliitosta. Palkin pitkittäissuunta on laatan pintaa vastaan kohtisuorassa (z). Tutkitaan kolmea erilaista herätetapausta palkin vapaassa päässä: a. aksiaalisuunnassa $F_z(f)$= 1 N / per taajuus, b. kolmessa translaatio suunnassa $F_x(f)$ = $F_y(f)$ = $F_z(f)$ = 1 N ja c. momentti x-akselin ympäri $M_x(f)$ = 1 Nm. Herätteen vaikutusta liitospisteen yli siirtyvään runkoäänitehoon on havainnollistettu kuvassa 2 (vasen yläkuva).



Kuva 2. Kolmella eri herätteellä pisteliitoksen yli siirtynyt kokonaisrunkoääniteho (6 dof), sekä lähteen rakennemuutoksen (palkin poikkileikkaus nelinkertaistettu) vaikutus siirtyneeseen tehoon.

Seuraavassa kuvassa on esimerkki mobiliteettisovituksen haittavaikutuksista. Kyseessä on työkoneen ohjaamon tärinäneristys, joka synnytti meluongelman odottamattoman suurilla taajuuksilla (800 Hz….1 kHz). Kuvassa on rungon puolelta mitattu eristimen kiinnityspisteen syöttöpistemobiliteetti ja vastaava suure ohjaamon (vastaanotin) puolelta. Tärinäneristin on esitetty ideaalijousena ja mitattuna siirtomobiliteettina. Tilanne ei näytä pahalta, jos vertaillaan ideaalijousen ja lähteen (rungon) mobiliteetteja. Lähteen mobiliteetin huiput ovat tasoltaan huomattavasti alempia kuin ideaalijousen mobiliteetti. Eristimen mittaustulos sen sijaan paljastaa, että kyseisen eristimen ensimmäinen aksiaalinen ominaistaajuus on luokkaa 770 Hz, mikä näkyy kuoppana eristimen siirtomobiliteetissa ja tekee tilanteesta hyvin epätoivotun.



Kuva 3. Mobiliteettisovituksen aiheuttama melu- ja värähtelyongelma 1 kHz alapuolella.

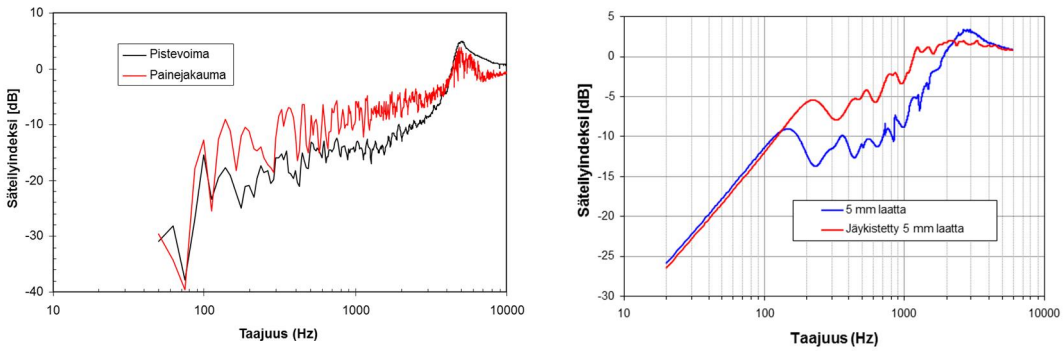
4 SÄTEILYSUHDE JA ÄÄNITEHO

Säteilysuhde on värähtelevän pinnan pinta-alayksikköä kohden säteilemän äänitehon suhde samalla tehollisella keskimääräisellä värähtelynopeudella värähtelevän männän pinta-alayksikköä kohden säteilemään äänitehoon (edellyttäen, että männän piiri on huomattavasti suurempi kuin aallonpituus: $ka >> 1$) [3].

$$\sigma = P / P_0 \,, \tag{6}$$

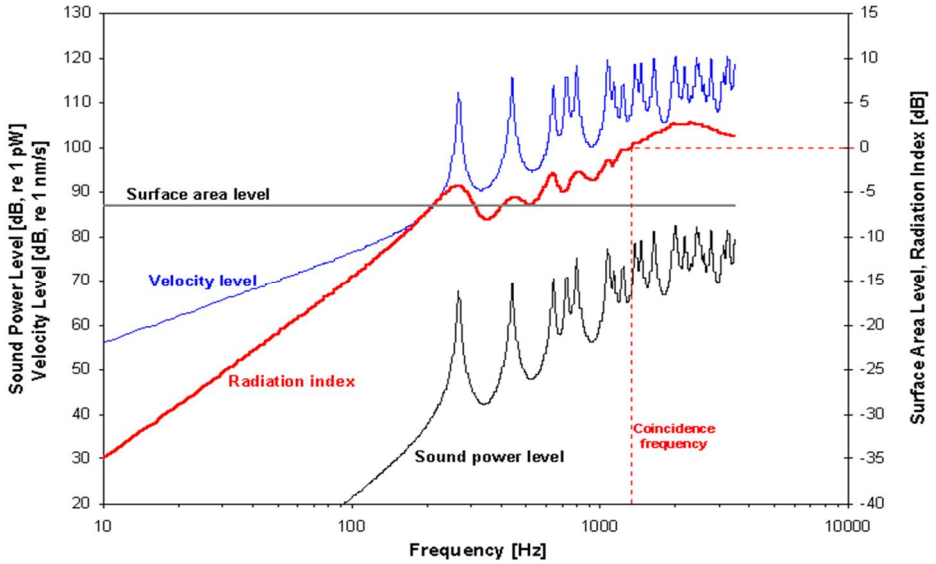
missä $P_0 = \rho\, c \int \langle v^2 \rangle \, dA$. Se kuvaa kuinka tehokkaasti lähde säteilee ääntä taajuuden funktiona. Säteilyindeksi on säteilysuhteen kymmenlogaritmi kerrottuna kymmenellä. Säteilysuhde on hankala määrittää. Mekaanisten ja materiaaliominaisuuksien lisäksi se on merkittävästi riippuvainen myös herätteestä.

Koinsidenssi on tilanne, jossa rakenteessa etenevän taivutusvärähtelyn aaltoluku ($k = 2\pi/\lambda$) on yhtä suuri kuin kohtaavan tai säteillyn ääniaallon aaltolukuvektorin projektio taivutusaallon etenemissuunnassa [4]. Koinsidenssin rajataajuus (kriittinen taajuus) määrittää rajataajuuden, jonka yläpuolella säteilysuhde lähestyy yhtä. Esimerkiksi teräksellä, alumiinilla ja lasilla kriittinen taajuus on 12 kHz jaettuna laatan paksuudella millimetreinä.



Kuva 4. Vasemmalla herätteen vaikutus säteilyindeksin taajuusjakaumaan. Pintaa vastaan kohtisuora pistevoima ja painejakauma (mittaustulos). Oikealla jäykisteen vaikutus säteilyindeksin taajuusjakaumaan (FEM + BEM).

Pistevoimaherätteellä kriittisen taajuuden alapuolella ominaismuodot määrittävät laatan värähtelynopeusjakauman. Ensimmäinen puolikasaalto säteilee ääntä tehokkaasti. Laatta värähtelee tällä ominaismuodolla (1,1), kunnes aallon pituuden lähestyessä toisen moodin dimensioita värähtelyjakauma muuntuu toisen ominaismuodon kaltaiseksi (2,1) tai (1,2) (ei neliölaatta). Näin määräytyy koko taajuuskaistan värähtelynopeusjakauma ominaismuotojen määrittäminä. Mitä suurempi taajuus sitä enemmän puolikasaaltoja laattaan syntyy. Koska värähtelymuotojen vierekkäiset kuvut ovat vastakkaisessa vaiheessa, niiden välille syntyy akustinen kytkentä, joka pienentää rakenteen säteilemää äänitehoa. Pistevoima herätteellä saadaan säteilysuhteen minimiarvot. Vastaavaa symmetristä värähtelynopeusjakaumaa ei saada muilla herätteillä.



Kuva 5. Värähtelevän rakenteen äänensäteilyyn vaikuttavat tekijät taajuusjakaumina.

Värähtelevän rakenteen säteilemä ääniteho (W) saadaan yhtälöstä

$$W = \rho\, c\, \sigma\, A\, \langle v^2 \rangle, \tag{7}$$

missä ρ on väliaineen tiheys, c äänennopeus väliaineessa, A pinta-ala ja $\langle v^2 \rangle$ neliöllisesti keskiarvotettu värähtelynopeus. Kaava esitetään usein logaritmisena dB-asteikolla:

$$L_W = L_\sigma + L_v + L_A - 33.9 \text{ dB} \tag{8}$$

Äänitehotaso on $L_W = 10\log(P/10^{-12})$ W, säteilyindeksi $L_\sigma = 10\log(\sigma)$, neliöllisesti keskiarvoitettu pintaa vastaan kohtisuora värähtelynopeustaso $L_v = 10\log(\langle v^2 \rangle / (10^{-9}\text{ m/s})^2)$ ja pinta-alataso $L_A = 10\log(\text{A}/1\text{m}^2)$. Kun väliaineena on ilma vakio –33.9 dB saadaan ilman tiheyden (ρ_i = 1.188 kg/m^3, 20 °C ja 1 x 10^5 Pa), äänen nopeuden ilmassa (c_i = 343.3 m/s, 20 °C) ja standardoitujen vertailulukujen avulla.

$$10\log_{10}\left(\frac{\rho_i\, c_i \left(10^{-9}\text{ m/s}\right)^2}{10^{-12}\text{ W}}\right) = -33.9 \text{ dB} \tag{9}$$

Reunaelementtimenetelmä määrittää pinnan äänenpaine jakauman käyttämällä herätteenä pinnan värähtelynopeusjakaumaa. Ja kappaleen säteilemä ääniteho saadaan kaavalla 10. Säteilysuhde voidaan määrittää erikseen.

$$P = \frac{1}{2} \int \mathrm{Re}\left(p^* v\right)\, dA. \tag{10}$$

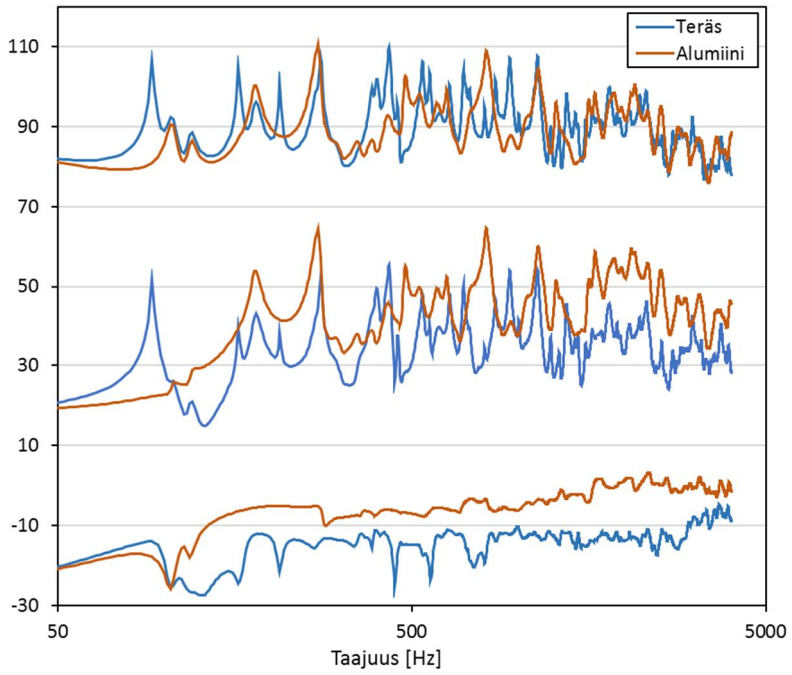
Kolmas tapa määrittää ääniteho on käyttää ISO 3744 kaukokentän pisteiden äänenpaineita ja mittauspinnan pinta-alatasoa (Kaava 11). Periaatteessa myös äänenintensiteetti menetelmällä voidaan määrittää kappaleen ääniteho. Sitä on käytetty lähinnä vain mittauksissa.

$$L_W = L_p + L_A \tag{11}$$

5 ESIMERKKI

Massiiviseen värähtelevään kappaleeseen kiinnitetyn laatan äänitehoon vaikuttavat tekijät ovat: Laattaan siirtyvä runkoääniteho sekä laattaan syntyvän taivutusvärähtelyn säteilysuhde. Tarkastellaan 400 mm x 500 mm laattoja. Teräslaatan paksuus on 2 mm ja alumiinilaatan 6 mm.

Kappaleen värähtely synnytetään vakiovoimalla, jonka kohdistuspisteestä syntyvä värähtely etenee useita siirtoteitä pitkin laattaan kappaleiden välisen viivaliitoksen kautta. Vakiovoiman synnyttämä runkoääniteho lasketaan kaavalla 1. Syöttöteho on likimäärin yhtä suuri molemmilla laatoilla, koko taajuuskaistalla. Laatoilla ei siis ole juurikaan vaikutusta voiman syöttöpisteen mobiliteettiin eikä kappaleeseen siirtyvään runkoäänitehoon. Koska laatalla ei ole muita herätteitä, siihen syntyvä taivutusvärähtely on verrannollinen viivaliitoksen yli siirtyvään runkoäänitehoon. Eli laattojen ja massiivisen kappaleen välisen liitoksen vertailu tehdään laatan pinnan neliöllisen värähtelynopeuden avulla (kuva 6). Vastaavasti laattojen säteilemän äänitehon määrää säteilysuhde (kuva 7).



Kuva 8. Laattojen värähtelynopeustaso, äänitehotaso ja säiteilyindeksi.

Analyysin tuloksena saadaan paljon enemmän informaatiota kuin esimerkiksi laatan intensiteettimittauksella.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Koneen tai laitteen validoitu vibro-akustinen malli mahdollistaa melu- ja värähtelyominaisuuksien tehokkaan suunnittelun. Värähtelevien rakenteiden äänensäteily on useimmissa koneissa yksi merkittävistä äänen syntymekanismeista. Nykyisin koneen meluominaisuudet ilmoitetaan kokonaisäänitehotasona ja/tai käyttäjänpaikan emissioäänenpainetasona. Äänitehotaso on käyttökelpoinen lähdekuvaus, jota voidaan hyödyntää koneen sijoittelupaikan valinnassa ja suunnittelussa.

Mutta miten ääni syntyy koneessa? Klassinen, heräte - siirtotie - vaste, vastaa kysymykseen melko abstraktisti. Käytännössä tämän ketjun avaaminen ja perusteellisempi äänen syntymekanismeihin perehtyminen mahdollistavat hiljaisempien rakenneratkaisujen integroimisen koneen rakenteisiin osana suunnitteluprosessia. Tällöin ei tarvita prototyypin päälle rakennettuja meluntorjuntavirityksiä.

VIITTEET

[1] L. Cremer and M. Heckl, *Structure-Borne Sound*, 2nd ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1988.

[2] S. Aatola, A. Kinnunen, P. Klinge, and K. Saarinen, “Mechanical vibration: Source strength and power transmission estimate - Methods and guidelines for measurements and modelling,” Espoo, VTT-R-01354-08, 2008.

[3] F. Fahy, *Sound and Structural Vibration*. London: Academic Press, 1985.

[4] K. Saarinen and J. Tanttari, *Työkoneiden melun vähentäminen : perusteet*. Helsinki: Metalliteollisuuden kustannus, 1995.

RAIDELIIKENTEEN AIHEUTTAMA VÄLIPOHJAN VÄRÄHTELY - CASE: LAUTTASAAREN METROASEMAN TEKNIIKKATILA

Mats Heikkinen[1]

[1] Akukon Oy
Hiomotie 19, 00380 Helsinki
mats.heikkinen@akukon.fi

Tiivistelmä

Lauttasaaren metroaseman laituritasolla ratatunnelien välissä sijaitsevassa tekniikkatilassa mitattiin liikennöivien metrojunien aiheuttamaa välipohjan värähtelyä. Välipohjan kymmenen alinta ominaistaajuutta ja mobiliteetit määritettiin iskukokeiden ja FEM-mallinnuksen avulla. Työn tavoitteena oli selvittää, onko muurattujen rakenteiden käyttö värähtelyteknisesti mahdollista metroasemien maanalaisissa tekniikkatiloissa.

Suurin metron ohiajojen aiheuttama värähtelynopeuden huippuarvo v_{peak} oli 0,64 mm/s ja sen taajuussisältö keskittyi 80-125 Hz:n taajuusalueelle. Rakenteiden vaurioitumisen kannalta esiintyvät värähtelytasot kyseisellä taajuusalueella alittavat annetut ohjearvot ja vaurioitumisriskit ovat täten hyvin pienet.

Mitatun tilan välipohjan alin ominaistaajuus f_0 on noin 6 Hz. Pienin poikkeama mittausten ja mallinnuksen välillä ominaistaajuuksien tapauksessa oli 0,01 Hz ja suurin 4,36 Hz poissulkien toiseksi alinta ominaistaajuutta, jota mallinnusmenetelmä ei ennustanut. Mobiliteettien tapauksessa vastaavanlaiset amplitudit saavutettiin menetelmien kesken saman suuruusluokan herätteillä.

Tulosten perusteella käytetyt menetelmät soveltuvat hyvin nykyisten ja uusien kohteiden värähtelyhaittojen arviointiin ja rakenteiden värähtelyominaisuuksien selvitykseen.

1 JOHDANTO

Lauttasaaren metroaseman laituritason tekniikkatilassa suoritettiin lokakuussa 2019 värähtelymittaukset. Mittausten tarkoituksena oli selvittää mikäli metrojunien ohiajojen aiheuttama värähtely on välipohjarakenteiden päälle tuleville muuratuille väliseinille haitallista sekä arvioida välipohjan värähtelyominaisuuksia. Selvitys tehtiin Länsimetro-projektin rahoittamana diplomityönä [1].

Mitattu tekniikkatila sijaitsee itään päin johtavan metrotunnelin vieressä. Metrojen ohiajojen aiheuttamaa pystysuuntaista värähtelyä mitattiin useammassa pisteessä välipohjarakenteessa. Mitattuja värähtelyn huippuarvoja v_{peak} vertailtiin soveltuviin rakenteiden vaurioitumisen ohjearvoihin.

Copyright ©2019 Mats Heikkinen. Tämä on avoimesti julkaistu teos, joka noudattaa Creative Commons NIMEÄ 4.0 Kansainvälinen –lisenssiä (CC BY 4.0). Teosta saa kopioida, levittää, näyttää ja esittää julkisesti ja siitä saa luoda johdannaisteoksia, kunhan tekijän nimi ja lähde mainitaan asianmukaisesti.

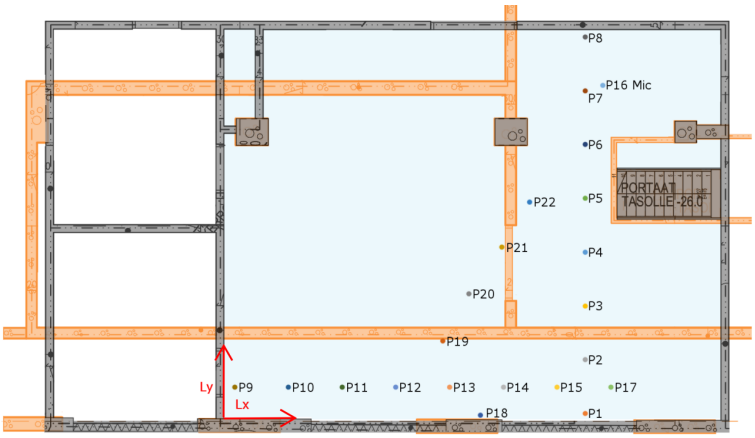
Tilassa tehtiin myös mobiliteettimittaukset välipohjalaatan värähtelyominaisuuksien mm. ominaistaajuuksien selvittämiseksi. Mikäli metron aiheuttama värähtelyheräte osuu välipohjan ensimmäisille ominaistaajuuksille, voivat näillä taajuuksilla esiintyvät värähtelyn amplitudit voimistua merkittävästi resonanssi-ilmiöstä johtuen. Tilan välipohja, sen mobiliteetti ja kymmenen alinta ominaistaajuutta mallinnettiin myös AutoDesk Robot -ohjelmistoa käyttäen.

2 MITATTU TEKNIIKKATILA JA MITTAUSJÄRJESTELYT

Mittaustila valikoitui rakennesuunnittelijan suosituksesta, jolloin tila edustaa rakenteiltaan tyypillistä metroaseman tekniikkatilaa. Tilan alla sijaitsee kellarikerros, jonka kalliovaraiset kantavat seinä- ja pilarirakenteet tukevat tekniikkatilan välipohjarakennetta. Mitattu välipohjarakenne on 300 mm paksu betonilaatta. Tilassa sijaitsee noin 5000 kg painava varavoimakone.

Metron ohiajojen aiheuttamaa pystysuuntaista värähtelyherätettä mitattiin yhteensä 21 pisteessä kiihtyvyysantureita käyttäen. Lähimmät mittauspisteet sijaitsivat noin 3,4 metrin päässä eteläisen raiteen keskilinjasta. Tiheästi liikennöivää metroliikennettä mitattiin noin 1,5 tunnin ajan. Mobiliteettimittaukset suoritettiin impulssilekaa käyttäen, herättäen välipohjalaattaa useammassa pisteessä. Iskukokeiden aikana tiheästi liikennöivät metrot ja mittaustilan lähettyvillä sijainnut vinohissi tuottivat merkittävästi taustavärähtelyä ja hankaloittivat signaali-kohina-suhteeltaan edullisten mittausolosuhteiden saavuttamista.

Kuvassa 1 on esitetty mittauksiin käytetty tila, sen alla sijaitsevan kellarikerroksen pystysuuntaiset kantavat rakenteet ja mittauspisteet. Kuvasta 2 nähdään mitattu tila ja mittausjärjestelyt.

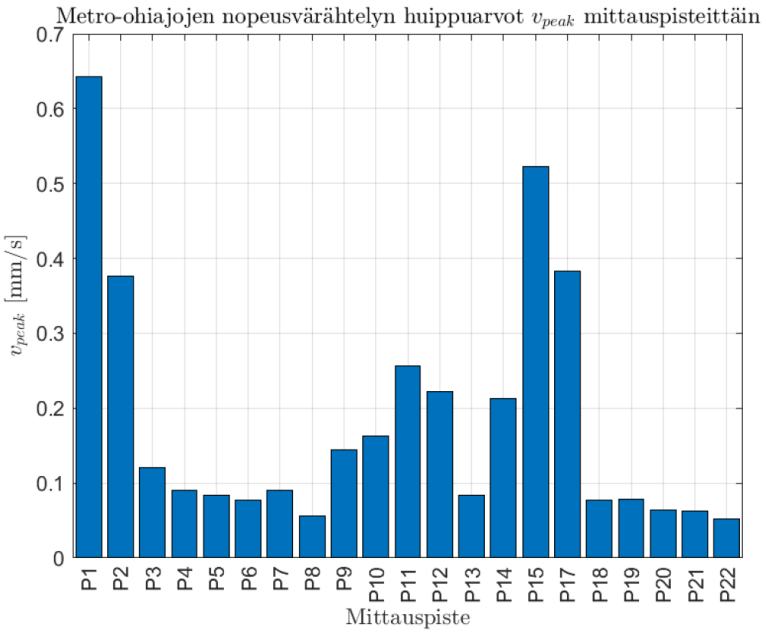


Kuva 1: Kiihtyvyysantureiden sijainnit (P1-P15, P17-P22). Vaaleansininen alue kuvaa mittaustilaa. Oranssit alueet kuvaavat kellaritason kantavia pystysuuntaisia kantavia rakenteita. [1]

Kuva 2: Mittaustila ja mittausjärjestelyt. Taustalla varavoimakone.

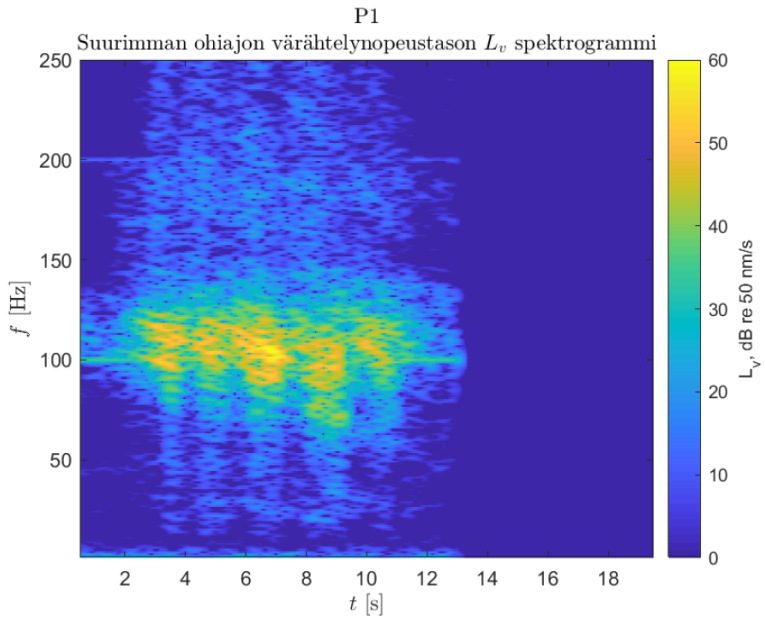
3 TULOKSET: VÄRÄHTELYMITTAUKSET

Metroliikenteen värähtelymittausten tuloksia tarkasteltiin rakenteiden vaurioriskin kannalta. Kuvaajassa 3 nähdään mittauspistekohtaisesti mitatut suurimmat metroliikenteen aiheuttamat värähtelynopeuden huippuarvot v_{peak}. Suurin huippuarvo v_{peak} = 0,64 mm/s mitattiin mittauspisteessä P1.



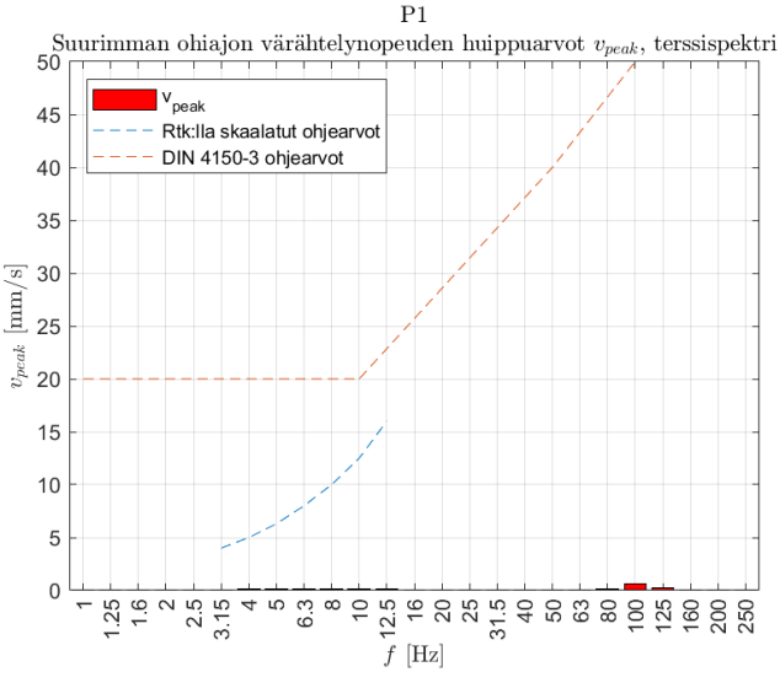
Kuva 3: Mittauspistekohtaisesti mitatut suurimmat metroliikenteen aiheuttamat värähtelynopeuden huippuarvot v_{peak}. [1]

Kuvassa 4 on esitetty mittauspisteen P1 suurimman ohiajon spektrogrammi. Spektrogrammista nähdään, että metron ohiajojen taajuussisältö keskittyy selvästi noin 80-125 Hz:n alueelle. Alle 70 Hz:n ei värähtelyä esiinny merkittävästi. Metrotunnelissa oleva voimakas sähkökenttä kytkeytyi mittaussignaaleihin ja on nähtävissä 100 Hz ja 200 Hz taajuuksilla.



Kuva 4: Spektrogrammi mittauspisteessä P1 mitatusta suurimmasta ohiajosta. [1]

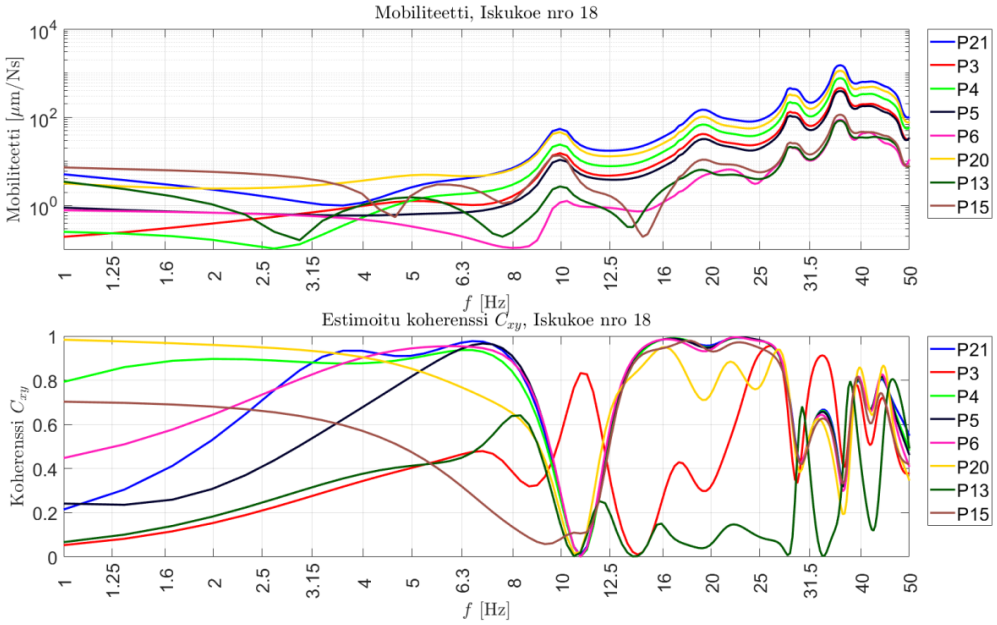
Rakenteiden vaurioitumisen kannalta voidaan soveltaa mm. DIN 4150-3[2] ja BS 7385-2 [3] standardien sekä rakennustapakertoimella [4][5] skaalattuja ohjearvoja. Kuvasta 5 nähdään, että suurin mitattu ohiajo pysyy selvästi raja-arvojen sisällä, jolloin rakenteiden vaurioitumisriskit ovat hyvin pieniä. Kuvassa rakennustapakertoimena on käytetty F_k = 1,00, jota voidaan soveltaa muurattujen rakenteiden tapauksessa.



Kuva 5: Mittauspisteen P1 huippuarvot terssikaistoittain, rakennustapakertoimella F_k = 1,00 kerrotut värähtelyn ohjearvot ja DIN 4150-3 ohjearvot. [1]

4 TULOKSET: MOBILITEETTIMITTAUKSET

Iskukokeiden avulla selvitettiin laatan ominaistaajuudet ja niiden esiintyminen eri puolilla rakennetta. Mobiliteettimittausten taajuusvaste- ja koherenssifunktioista arvioitiin välipohjalaatan kymmenen alinta ominaistaajuutta. Kuvassa 6 on esitetty iskukoeherätteen numero 18 taajuusvaste- ja koherenssifunktiot.



Kuva 6: Iskukokeen numero 18 taajuusvaste- ja koherenssifunktiot. [1]

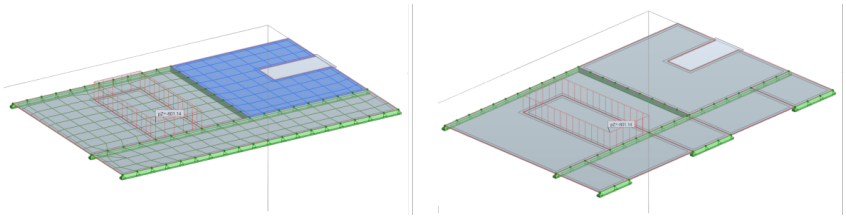
Taajuusvastefunktioista nähdään huippuarvot noin 10, 18, 28 ja 36 Hz:n taajuuksilla, jotka ovat mitatun välipohjan ominaistaajuuksia. Koherenssifunktioista nähdään herätteen ja vasteiden välisen koherenssin olevan yleisti ottaen hyvä, mikä lisää tulosten uskottavuutta. Ominaistaajuuksien tulisi näkyä koherenssin laskuna [6]. Funktioiden minimiarvot vastaavat karkeasti ominaistaajuuksia.

Analyysivaiheessa päädyttiin histogrammien käyttämiseen, joiden avulla pystytään tilastollisesti määrittämään esiintyvien taajuuksien esiintymistiheys ja parantamaan kohinaisesta datasta saatavia tulosten luotettavuutta. Etenkin alimman ominaistaajuuden arviointi oli haastavaa jäykän välipohjarakenteen, impulssilekan tuottaman rajallisen herätteen ja taustavärähtelyn vuoksi.

Arvioidut välipohjan kymmenen alinta ominaistaajuutta on esitetty kappaleessa 6.

5 MALLINNUS

Välipohjasta tehtiin yhteensä 13 mallia AutoDesk Robot-ohjelmistoa käyttäen mallinnusresoluution mm. pilareiden ja väliseinien pituuksien vaikutuksen selvittämiseksi. Kuvassa 7 nähdään mallit numero 1 ja 3. Malleissa otettiin huomioon varavoimakoneen aiheuttama omakuorma. Malleille laskettiin kymmenen alinta ominaistaajuutta ja mobiliteetit kahdelle herätepisteelle. Herätepisteiden pistemäiset herätevoimat olivat 0,5 kN, jotka vastaavat mittauksissa käytetyn impulssivasaran tuottamaa herätettä.



Kuva 7: Malli 1 vasemmalla ja malli 3 oikealla. [1]

6 TULOSTEN VERTAILU: OMINAISTAAJUUDET JA MOBILITEETTI

Kuvassa 8 on esitetty mallien 1, 3, 5, 6, 9 ja 10 ennustamat ominaistaajuudet. Kyseiset mallit ennustivat ominaistaajuuksia parhaiten. Huomioitavaa on, että ominaistaajuuksien lukujärjestys n on määritetty mittaustulosten mukaan ja mallien ominaistaajuudet on sovitettu niiden mukaisesti. Tämä tarkoittaa mitattujen taajuuksien f_3 - f_9 vastaavan mallien taajuuksia f_2 - f_8, sillä mitattua ominaistaajuutta f_2 ei ennustettu malleissa. $f_{n,avg}$ on ehdotettujen ominaistaajuusalueiden keskiarvot ja Δf_{avg} on mallien ominaistaajuuksien erotus keskiarvosta f_{avg}. Mallien taajuudet, joiden poikkeamat ovat -0,5 Hz < Δf < 0,5 Hz, on merkitty taulukkoon vihreällä. Taajuuspoikkeamat -1 Hz < Δf < 1 Hz ovat merkittynä sinisellä.

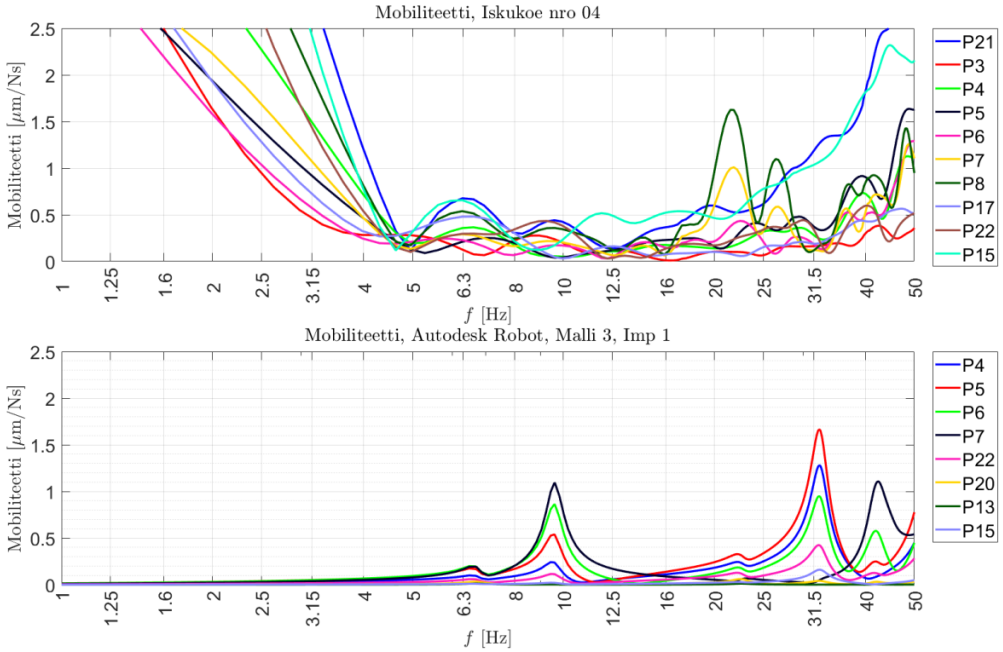
Mitatut		**Mallit**					
$f_{n,\text{avg}}$	[Hz]	1	Δf_{avg}	3	Δf_{avg}	5	Δf_{avg}
f_0	6,00	6,77	0,77	6,74	0,74	6,95	0,95
f_1	9,75	9,65	-0,10	9,65	-0,10	9,66	-0,09
f_2	14,50	-	-	-	-	-	-
f_3	18,88	18,89	0,01	18,83	-0,05	18,93	0,05
f_4	21,75	22,64	0,89	22,64	0,89	23,52	1,77
f_5	28,75	32,55	3,80	32,49	3,74	32,57	3,82
f_6	36,25	38,66	2,41	38,55	2,30	37,36	1,11
f_7	40,38	41,47	1,09	41,49	1,11	38,65	-1,73
f_8	42,25	42,20	-0,05	42,20	-0,05	41,73	-0,52
f_9	46,63	44,81	-1,82	44,80	-1,83	43,16	-3,47
$f_{n,\text{avg}}$	[Hz]	7	Δf_{avg}	9	Δf_{avg}	10	Δf_{avg}
f_0	6,00	6,91	0,91	5,92	-0,08	5,65	-0,35
f_1	9,75	9,66	-0,09	9,01	-0,74	8,99	-0,76
f_2	14,50	-	-	-	-	-	-
f_3	18,88	18,87	-0,01	17,55	-1,33	17,52	-1,36
f_4	21,75	23,51	1,76	21,68	-0,07	20,78	-0,97
f_5	28,75	32,49	3,74	24,39	-4,36	24,30	-4,45
f_6	36,25	37,15	0,90	33,66	-2,59	37,14	0,89
f_7	40,38	38,57	-1,81	37,10	-3,28	40,02	-0,36
f_8	42,25	41,72	-0,53	40,56	-1,69	40,83	-1,42
f_9	46,63	43,15	-3,48	42,56	-4,07	42,96	-3,67

Kuva 8: Mitattujen ja mallien ominaistaajuuksien vertailu. [1]

Tulosten vertailun perusteella voidaan todeta mallien ennustavan mitatun välipohjarakenteen ominaistaajuudet varsin hyvin. Mitattujen ja mallinnettujen taajuuksien pienin poikkeama on 0,01 Hz ominaistaajuuksille f_3 (mallit 1 ja 7). Suurin poikkeama oli 4,36

Hz ominaistaajuudelle f_5 (malli 9), jos ominaistaajuutta f_2, jota mallit eivät pystyneet ennustamaan, ei huomioida vertailussa.

Kuvassa 9 on esitetty mallille 3 lasketut ja iskukokeen 4 mobiliteetit. Mobiliteetti näyttäisi yleisesti ottaen olevan mitatuissa ja mallinnetuissa vasteissa pienempi ensimmäisellä kahdella ominaistaajuudella, kun sitä verrataan korkeamman kertaluvun ominaistaajuuksiin. Malli ennustaa toisen ominaistaajuuden mobiliteetin olevan suurempi kuin ensimmäisen. Mittaustulokset taas näyttävät ensimmäisen ominaistaajuuden mobiliteetin olleen suurempi kuin toisen. Noin 22 Hz:n ominaistaajuus f_4 näkyy selvästi mitatuissa vasteissa, kun taas mallissa vastaavan ominaistaajuuden mobiliteettiarvot ovat pienemmät. Eroa nähdään myös rakenteen ominaistaajuudella $f_5 \approx 29$ Hz ja sitä vastaavalla mallin taajuudella 32,5 Hz. Noin 40 Hz:n ominaistaajuudet näyttäisivät pitkälti vastaavan toisiaan. Toisaalta, mitatuissa ja mallinnetuissa vasteissa nähdään selkeästi antureiden sijaintien, mallien analysoitavien solmupisteiden ja herätteen sijainnin vaikutukset mobiliteettiin. Herätepisteiden eri sijainneista johtuen samalle ominaistaajuudelle f_n saadaan mittauspisteestä riippuen eri arvot mobiliteetille, johtuen niin etäisyyksistä tuotettuun impulssiin kuin välipohjan ominaismuotojen kupu- ja solmukohdista. Mitatuista taajuusvastefunktioista nähdään taustavärähtelyn, kiihtyvyysanturin taustakohinan ja analyysi-ikkunan pituuden vaikutus alle 4 Hz:n taajuuksilla. Mitatuissa taajuusvasteissa mobiliteettiarvot ovat melko suuria, kun taas mallin vasteissa mobiliteetit ovat hyvin pieniä.



Kuva 9: Iskukokeen numero 4 ja mallin numero 3 mobiliteettikuvaajat. [1]

7 YHTEENVETO

Lauttasaaren metroaseman tekniikkatilassa tehtyjen värähtelymittausten tulokset osoittavat, että metron aiheuttamat hetkelliset värähtelyn huippuarvot alittavat selvästi rakenteiden vaurioitumisriskille käytetyt ohjearvot. Värähtelyn taajuussisältö keskittyi selvästi 80-125 Hz:n taajuusalueelle, jolloin mitatun välipohjarakenteen alimmat ominaistaajuudet eivät juurikaan päässeet heräämään. Tämän ansiosta todennäköisyys värähtelyn aiheuttamalle rakenteiden, mm. muurattujen väliseinien, vaurioitumiselle on pieni.

Mitatun betonisen välipohjarakenteen kymmenen alinta ominaistaajuutta selvitettiin iskukokeiden ja FEM-mallinnuksen avulla. Mittaukset osoittautuivat haasteellisiksi vallitsevan taustavärähtelyn, mitattavan välipohjan jäykkyyden ja antureiden taustakohinan johdosta. Mitatun massiivisen välipohjalaatan ollessa hyvin jäykkä, impulssileka ei kyennyt herättämään laattaa riittävästi, jotta alimmat ominaistaajuudet erottuisivat selvästi yleisestä taustavärähtelystä.

Mitattujen ominaistaajuuksien vertailu AutoDesk Robot -mallinnusohjelman ennustamille ominaistaajuuksille viittaisi siihen, että mallinnusmenetelmä pystyy arvioimaan rakenteiden ominaistaajuudet varsin hyvin. 13:sta tehdystä mallista mallit numero 1, 3, 7 ja 10 ennustavat välipohjarakenteen ominaistaajuudet parhaiten. Etenkin mallit 3 ja 7 vastaavat todellista mittaustilaa hyvin.

Taajuusvastefunktioiden vertailu paljasti, että saman suuruusluokan herätevoimilla mitatut ja malleille lasketut mobiliteetit olivat vastaavanlaisia. Nämä tulokset antavat lisäluotettavuutta mallinnusmenetelmälle. Mallinnuksessa oleellista näyttäisi olevan mallinnettavan tilan todelliset mittasuhteet, kantavien rakenteiden ja niiden muodostamien laatta-alueiden huomioonotto. Mallinnettujen rakenteiden omapainot ja muut merkittävät staattiset kuormat on myös otettava huomioon.

VIITTEET

[1] Heikkinen, M. Raideliikenteen aiheuttama rakenteiden värähtely. Aalto-yliopisto. Sähkötekniikan korkeakoulu. 2019.

[2] DIN 4150-2:1999. Structural vibration - Human exposure to vibration in buldings Deutsches Institut für Normung. 1999

[3] BS 7385-2:1993 Evaluation and measurement for vibration in buildings - Part 2: Guide to damage levels from groundboren vibration. British Standard Institution. 1993.

[4] RIL 253-2010. Rakentamisen aiheuttamat tärinät. Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL. 2010.

[5] Talja, A. Törnqvist, J. Liikennetärinä: Alueiden tärinäkartoitus ja rakenteiden vaurioitumisalttius. VTT:n tutkimusraportti VTT-R-04703-14. 2014.

[6] ISO 7626-2:2015. Mechanical vibration and shock - Experimental determination of mechanical mobility - Part 2: Measurements using single-point translation excitation wit an attached vibration exciter. 2015.

KAIUTTIMEN ÄÄNEKKYYDEN OPTIMOINTI MUSIIKILLE

Juha Holm[1]

[1] Genelec Oy
Olvitie 5
74100 IISALMI

Tiivistelmä

Kolmitiekaiuttimessa voi olla äännekkyyden suhteen kaksitoista rajoittavaa tekijää. Kaikkien kolmen vahvistinkanavan huipputeho tai pitkäaikainen tehonkesto voi loppua. Samoin kaikkien kolmen kaiutinelementin liikerata tai pitkäaikainen tehonkesto voi loppua. Tässä paperissa esitetään mittaustavat, joilla voi arvioida kaiuttimen maksimiäänekkyyttä musiikkisignaalia käyttäen. Vertailun vuoksi käytetään myös vakiintuneita tapoja mitata maksimiäänekkyyttä kohinasignaaleilla. Pienellä otannalla eri musiikkityylejä saatiin tulokseksi, että kaiuttimen kuormitus vaihtelee merkittävästi musiikkikappaleesta toiseen. Edelleen, kohinasignaalien tuottama kuormitus poikkeaa huomattavasti musiikin kuormituksesta. Kohinasignaali antaa väärän kuvan äänekkyyttä kaiuttimessa rajoittavasta osatekijästä.

Mittauksilla saadaan tieto siitä, mikä tekijä rajoittaa maksimaalista äänekkyyttä ja silloin parannustoimenpiteet voidaan kohdistaa oikeaan osa-alueeseen. Tuloksista voidaan päätellä, että tässä työssä testatun kaiuttimen äänekkyyttä rajoittavat diskanttikanavan huipputeho ja bassonkanavan tehonkesto.

2 JOHDANTO

Kaiuttimen maksimaalinen äänenpaine on yksi kriteereistä arvioitaessa kaiuttimen suorituskykyä ja soveltuvuutta käyttökohteeseen. Esimerkiksi elokuvateollisuudessa määritellään äänenpainetasoksi 85 dB kuuntelualueelle. Vastaava taso äänitallenteessa on -20 dBFS. Jokaisen kaiuttimen pitää pystyä toistamaan lyhytaikaisesti myös 0 dBFS taso, joka on 105 dB SPL kuuntelualueella. Tämä vaatimus sulkee pois pienemmät kaiuttimet, riippuen kuunteluetäisyydestä. [1]

Tehonkeston lisääminen vaikuttaa helpolta tavalta kasvattaa maksimaalista äänekkyyttä. Sen lisääminen vaatii kuitenkin kompromisseja. Ilmeisin kompromisseista on korkeampi komponenttikustannus. Tehonkeston kasvattaminen vaatii suurempaa puhekelan halkaisijaa ja sen mukana myös magneettipiiriä pitää kasvattaa. Etenkin magneettipiirin kasvattaminen maksaa ja se on yleensä kaiutinelementin kallein yksittäinen komponentti. Suurempi puhekela kasvattaa myös virran säröjä, painaa enemmän ja suurempi liikkuva massa tarvitsee enemmän virtaa tuottaakseen saman liikkeen. Isomman kelan ympärillä on myös enemmän rautaa, jolloin pyörrevirtojen aiheuttama virran särö kasvaa. Molemmat ilmiöt lisäävät virran säröjä, joka aiheuttaa erityisesti intermodulaatiosäröjä äänenpaineeseen. Virran säröt ovat pääasiallinen särön lähde silloin, kun liikepoikkeama on pieni eli taajuus on suuri. [2]

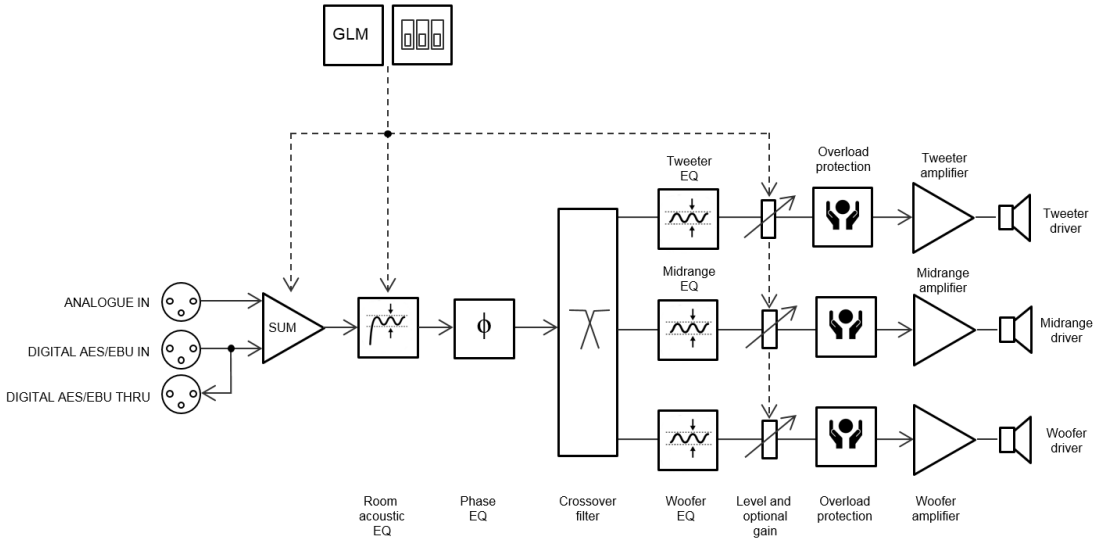
Äänekkyyden suhteen optimaalisen kaiuttimen kaikki rajat tulevat samaan aikaan vastaan. Vaihtoehdot ovat: vahvistimen huipputeho tai tehonkesto, elementin tehonkesto tai maksimi liikepoikkeama. Elementin liikepoikkeaman aiheuttamaa rajoitusta ei käsitellä tässä kirjoituksessa.

2 LEIKKAUTUMISEN JA SUOJAN AKTIVOITUMISEN TARKKAILU

Parhaan signaali-kohinasuhteen saamiseksi DA-muuntimen jälkeinen vahvistus kannattaa mitoittaa niin, että 0 dBFS tasolla vahvistin juuri leikkaa. Tämän seurauksena kaiuttimen sisäistä signaalinkäsittelyä tarkkailemalla voidaan havaita, kun DA saavuttaa 0 dBFS, jolloin myös vahvistin leikkaa. [3]

Vahvistimen ja kaiutinelementin pitkäaikaista tehoa ennustetaan signaalinkäsittelyssä. Ennuste integroi (summaa) kaiutinelementtiin vaikuttavaksi arvioitua tehoa halutulla aikavakiolla. Useimmiten pitkäaikaisen tehon rajoittaa elementin tehonkesto. Joissain tapauksissa vahvistimen tehonkesto voi olla rajoittava tekijä.

Kuva 1 esittää kolmitiekaiuttimen signaalinkäsittelyn vuokaavion. Pitkäaikaisen tehon tarkkailu ja suojaus tehdään kohdassa ”Overload protection”.



Kuva 1. Kolmitiekaiuttimen signaalinkäsittelyn lohkokaavio

Musiikki- ja elokuvan ääniraidan spektri, taso ja huippujen kesto vaihtelee [4]. Tällöin myös saavutettava maksimaalinen äänenpaine, leikkautuminen ja suojaaminen riippuvat materiaalin sisällöstä. Tästä syystä koe tehtiin usealla musiikkikappaleella. Kappaleet edustavat useampaa tyylisuuntaa ja aikakautta.

Kaiuttimen maksimiäänekkyys ilmoitetaan usein kohinalla mitattuna. Esimerkiksi PA-kaiuttimissa tämä on vakiintunut tapa. Taulukko 1 esittää kolme vakiintunutta tapaa käyttää vaaleanpunaista kohinaa tai siitä suodatettuja kohinaa. Suodatuksen tavoitteena on muuttaa vaaleanpunaisen kohinan spektri vastaamaan paremmin musiikin tai elokuvan spektriä. [5,6]

Taulukko 1. Kohinoiden huippukertoimet

	Huippukerroin (dB)
Vaaleanpunainen kohina	6-12
IEC 20268 suodatus	6
CTA-2034 suodatus	12
M-noise	17.5

3 TULOKSET

Taulukko 2 sisältää kaikki mittaustulokset. Äänenpainetaso kuvaa kuinka kovaa kaiutinta pystyi soittamaan kyseisellä äänimateriaalilla. Vahvistin leikkautuu, kun ”dBFS” nousee yli -1 arvoon. Lämpösuoja aktivoituu, kun integroitu teho ylittää asetetun 100 % arvon.

Kohinasignaaleilla mitattu lyhytaikainen maksimiäänenpainetaso jäi pienemmäksi kuin musiikilla mitattu. Syynä on luultavasti kohinasignaaleiden pienempi huippukerroin (engl. crest factor).

Taulukko 2. Leikkautuminen ja suojaus eri materiaalilla

			Diskantti	Keskiääni	Basso			
Artisti	**Kappale**	Äänenpainetaso, lyhytaikainen (dB SPL)	**DA**	**Lämpö-suoja**	**DA**	**Lämpö-suoja**	**DA**	**Lämpö-suoja**
			dbFS	**%**	**dbFS**	**%**	**dbFS**	**%**
Danny Byrd	Sweet harmony	119.4	0	102	-2	65	-4	98
Aaron Neville	Feels like rain	122.4	0	48	0	66	0	100
Daft Punk	Get lucky	122.4	-1	48	-7	49	0	101
Michael Jackson	Billie Jean	119.5	1	90	-2	63	-2	73
Deadmaus	some chords	117.8	-3	51	-11	43	-5	101
AC/DC	Rock’n roll train	121.4	1	100	-1	75	-1	100
NTI	IEC 60268 kohina		-5	103	-2	104	-5	101
REW	CTA-2034 kohina	106.8	-7	94	-2	102	-2	93
REW	vaaleanpunainen kohina, CF 5.2	100	-6	106	-8	57	-8	47
Rajoittava tekijä musiikilla (n)			4	2	1	0	2	4
Rajoittava tekijä kohinalla (n)			0	2	0	2	0	1
Kaikki			4	4	1	2	2	5

Musiikkimateriaaleilla todettu rajoittava tekijä oli useimmiten diskantin huipputeho tai basson lämpösuojan aktivoituminen (neljä kertaa). Seuraavaksi rajoittavimmat tekijät olivat diskantin lämpösuojan aktivoituminen ja bassovahvistimen huipputeho (kaksi kertaa).

Kohinasignaalilla mitattu rajoittava tekijä oli useimmiten diskantin lämpösuoja ja keskiäänisen lämpösuoja (2 kertaa). Seuraavaksi yleisin syy oli basson lämpösuojan aktivoituminen.

4 JOHTOPÄÄTÖKSET

Musiikkia kuunneltaessa keskiäänisen suojaustaso ei ole rajoittava tekijä. Muut viisi parametria rajoittavat maksimiäänekkyyttä ainakin kerran. Tämän perusteella voi arvioida, että kaiuttimen äänentuottokyky on kohtuullisen hyvin optimoitu. Diskanttikanavan huipputeho ja bassokanavan tehonkesto ovat useiten rajoittavat tekijät. Niitä parantamalla maksimiäänekkyys parantuisi useimmilla musiikkinäytteillä.

Kaikki kolme kohinasignaalia kuormittavat kaiutinta eri tavoin kuin musiikki. Musiikilla ja kohinalla mitattaessa äänenpainetta rajoittaviksi tekijöiksi muodostuivat eri syyt. Tästä voi päätellä, että kokeillut kohinasignaalit soveltuvat huonosti kaiuttimen äänekkyyttä rajoittavien tekijöiden arviointiin.

Tulosten perusteella työssä käytettyä menetelmää voidaan käyttää arvioimaan tarkasti kaiuttimen maksimaalista äänenpainetta rajoittavia tekijöitä. Näin tuotekehitysaika ja komponenttikustannus saadaan kohdennettua niihin tekijöihin, joiden parantamisesta on useimmiten hyötyä.

Tutkimuksen aikana heräsi kaksi ideaa seuraaviin jatkotutkimuksiin. Ensimmäisenä, musiikin ja kohinan tarkempi analysointi keskittyen taajuussisältöön ja dynamiikan vaihteluun. Toisena aiheena särörajan tai muun laadullisen mittarin lisääminen rajoittavien tekijöiden analyysiin.

VIITTEET

[1] SMPTE RP 200:2012 - SMPTE Recommended Practice - Relative and Absolute Sound Pressure Levels for Motion-Picture Multichannel Sound Systems.

[2] Tutorial: Loudspeaker nonlinearities - Causes, parameters, symptoms. Article in Journal of the Audio Engineering Society 54(10):907-939 · October 2006.

[3] How do you set system gain structure?, Chuck McGregor, Community Professional Loudspeakers, 1999.

[4] Sound Pressure Capacity Requirements for Monitoring Immersive Audio Formats, Mäkivirta et al, ICSA 2015.

[5] IEC 60268-1:1985 “Sound system equipment - Part1: General”, International Electro-technical Commission (IEC).

[6] CTA 2034-A Standard Method of Measurement for In-Home Loudspeakers, Consumer Technology Association (Formerly CEA), 2015.

KAIUTTIMEN SUUNTAAVUUS: SUUREET JA ESITYSTAVAT

Olli Kantamaa[1]

[1] Genelec Oy
Olvitie 5 74100 Iisalmi
olli.kantamaa@genelec.com

Tiivistelmä

Kaiuttimen suuntaavuudella tarkoitetaan kaiuttimen ominaisuutta säteillä ääntä avaruuteen. Suuntaavuudelle on määritelty useita erilaisia suureita kuten suuntaavuusindeksi ja tehovaste. Suuntaavuuden merkityksestä havaittuun äänenlaatuun on tehty monenlaisia havaintoja perustuen karkeisiin suuntaavuuskäsitteisiin. Suuntaavuus on kuitenkin moniulotteinen käsite, joten suuntaavuuden kuvaaminen yhdellä suureella ei kuvaa todellisuutta. Kaiuttimen konfiguraatio luo suuntaavuuteen selkeästi erottuvia artefakteja jotka voidaan tunnistaa kuvaajista, mutta joita ei voi yksittäisen suureen perusteella havannoida. Suuntaavuuskuvaajan piirtotapoja on kuitenkin monia ja kaiuttimien ominaisuuksien tulkitseminen kuvaajien avulla voi johtaa sekä oikeisiin että vääriin johtopäätöksiin.

1 JOHDANTO

Kaiuttimen suuntaavuus on kaiuttimen ominaisuus säteillä ääntä avaruuteen. Kaiuttimen suuntavuudella ja akustisen akselin suuntaisella taajuusvasteella eli akselivasteella (engl. on–axis response) on suuri merkitys kuuntelupaikalla mitattuun taajuusvasteeseen ja havaittuun äänenlaatuun. Vasteen tasaisuus vapaakentässä on helppo todeta. Suuntaavuus on kolmiulotteinen ominaisuus ja sen esittäminen on huomattavasti monimutkaisempaa.

Suuntaavuudelle on vuosien varrella määritelty useita kuvaavia suureita kuten tehovaste, suuntaavuusindeksi ja dispersio. Näitä suureita on käytetty tuotteiden tietolehtisten lisäksi myös standardeissa ja suosituksissa kuvaamaan kaiuttimelta vaadittavaa suorituskykyä. Yksittäisten suureiden suurin ongelma on kuitenkin niiden rajallinen esittämiskyky. Yksittäisellä numerolla on vaikea kuvata kolmiulotteista ja taajuusriippuvaista ominaisuutta ja arvioida suuntaavuuden todellista vaikutusta havaittuun äänenlaatuun ja huonekäyttäytymiseen.

Piirtämällä suuntaavuussuureista kuvaajia taajuuden suhteen saavutetaan karkea kuva kaiuttimen säteilemästä energiamäärästä huoneeseen. Kuitenkaan esimerkiksi tehovasteen piirtäminen ja tulkitseminen ei kerro vielä säteilyn absoluuttisesta suunnasta. Kahdella täysin eri tavalla suuntavalla kaiuttimella saattaa olla samanlainen tehovaste, jolloin tarvitaan tarkempaa kuvausta suuntaavuuden hahmottamiseksi.

Copyrigth ©2019 Olli Kantamaa. Tämä on avoimesti julkaistu teos, joka noudattaa Creative Commons NIMEÄ 4.0 Ei sovitettu –lisenssiä (CC BY 4.0). Teosta saa kopioida, levittää, näyttää ja esittää julkisesti ja siitä saa luoda johdannaisteoksia, kunhan tekijän nimi ja lähde mainitaan asianmukaisesti.

2 MOTIVAATIO

Suuntaavuuden on esitetty vaikuttavaan muun muassa virtuaaliäänikuvien sijoittumiseen ja laatuun, tilantuntuun, äänenväriin, kuuntelualueen kokoon, lokalisaatioon ja yleiseen vaikutelmaan äänestä [1]. Vaikka akustisen akselin taajuusvasteen on todettu vaikuttavan keskeisesti kuuntelukokemukseen [2], on suuntaavuuden esitetty vaikuttavan edellä mainittuihin attribuutteihin huonevasteen välityksellä [3, 4].

Suuntaavuuden merkityksen arviointi on helpointa kysymällä kuulijoilta äänenvärin havaitsemiseen ja äänen lokalisaatioon liittyviä vaikutuksia. Lokalisaatio liittyy äänikuvan sijoittumisen ja rakenteen sekä tilantunnun kokemukseen. Äänenvärin havaitsemisella viitataan kuunneltavan materiaalin taajuusbalanssin uskottavuuteen ja siihen, että toisto olisi uskollinen alkuperäiselle äänitteen äänenvärisisällölle. [3]

Tilantunnun, stereokuvan ja lokalisaation kannalta ei ole osoitettu, että olisi olemassa huoneessa sijaitsevalle kaiuttimelle optimaalinen suuntaavuuden arvo [5]. Simuloitujen aikaisten heijastusten tasoa ja viivettä suhteessa suoraan ääneen säätämällä on todettu aikaisten heijastusten vaikuttavan ensisijaisesti äänen lokalisaation havaitsemiseen. [8, 6, 7]

Suuntaavuuden on ajateltu vaikuttavan äänenvärin kokemiseen kuuntelupaikalla [3]. Huoneen ominaisuudet ja kaiuttimen sijainti vaikuttavat olennaisesti äänenvärin kokemukseen. Kaiuttimen sijainti vaikuttaa suoraan huonemoodien heräämiseen ja seisovat aallot huoneessa vaikuttavat eritoten matalilla taajuuksilla äänenvärin kokemukseen [9]. Huoneen jälkikaiunta-aika vaikuttaa käsitykseen kaiuttimen äänenlaadusta [10, 3] enemmän kuin aikaiset heijastukset [8]. Aikaiset heijastukset voivat kuitenkin tuottaa merkittäviä äänenvärikokemuksia. Tyypillisin esimerkki aikaisen heijastuksen vaikutuksesta äänenväriin on laaja-alainen keskialuevärittymä, joka syntyy studion konsolista tai työpinnasta aiheutuvan merkittävän heijastuksen takia [11, 12].

Alabassokaiuttimen (subwooferin) käyttöä perustellaan sillä, että sen avulla voidaan saavuttaa hallittu matalien taajuuksien äänenväri kuuntelupaikalla ilman merkittävää äänen lokalisoitumisen heikentymistä [13, 14]. Alabassokaiutin voi kuitenkin vaikuttaa lokalisaation havaitsemiseen keskitaajuuksilla [6, 15] sopivissa olosuhteissa kriittisellä testisignaalilla, jolloin alabassokaiutin voi lokalisoitua erillisenä äänilähteenä [16]. Yleisesti lokalisoitumiseen vaikuttava ominaisuus on korkeammilla taajuuksilla tapahtuva kaiuttimen suuntaavuuden muuttuminen [15].

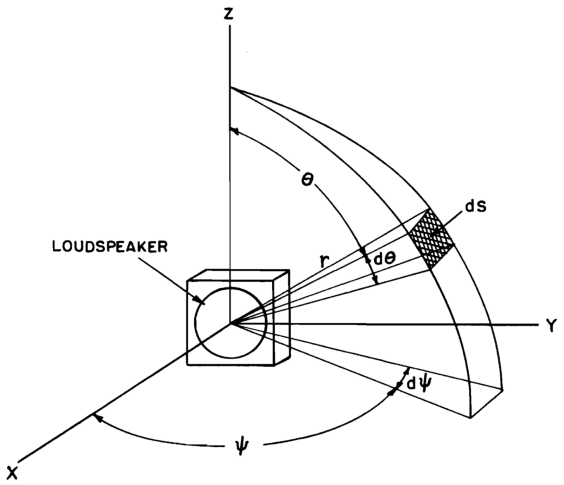
Tutkimuksissa on keskitytty täysin erilaisten kaiuttimien äänensäteilyperiaatteiden, kuten dipolisäteilyn ja ympärisäteilevyyden vaikutusten analysoimiseen huonekuuntelussa [1]. Vaikka eri säteilyperiaatteiden on raportoitu tuottavan samankaltaisia äänikuvia, pienemmilläkin suuntaavuuden muutoksilla on havaittu olevan merkitystä kuuntelukokemukseen [17, 10]. Yhteistä tutkimuksille on suuntaavuuksien väljä kuvailu. Tyypillisesti kaiuttimeen viitataan esimerkiksi adjektiiveilla ympärisäteilevä, dipolimainen, tavanomainen, kaksitie, jatkuva, pehmeä, tasainen ja kardioidi. Tarkempia vapaakentässä suoritettuja mittauksia sisältyi ainoastaan harvoin raportointiin, eismerkiksi [10]. Kuitenkin kaiuttimen suuntaavuuden ajatellaan yleisesti vaikuttavan merkittävästi havaittuun kuulokuvaan.

3 METODI

3.1 Tehovaste ja Suuntaavuusindeksi

Tehovaste (engl. power response) kuvaa kaiuttimen avaruuteen säteilemää akustista tehoa. Tehovaste P_{AD} lasketaan integroimalla kaiuttimen säteilemä teho pallon pinta-alan yli ds kokoisissa sektoreissa kuvan 1 mukaan. Tehovaste approksimoidaan mittaamalla kaiuttimen energia erikseen ϕ ja θ kulmien funktiona ja ekstrapoloimalla kaikki niiden väliset kulmat [18]. Kulman ϕ varioiminen vastaa horisontaalitasoa ja kulman θ suhteessa xy-tasoon varioiminen vastaa vertikaalitasoa.

Suurempi tehovaste pistetaajuudella tarkoittaa kaiuttimen olevan vähemmän suuntaava kyseisellä taajuudella olettaen että kaiuttimen akustisella akselilla taajuusvaste on tasainen vapaakentässä. Kirjallisuudesta löytyviä tehovasteen tulkintoja on monenlaisia. Osa tutkimuksista pitää tehovastetta merkityksellisempänä tekijänä äänenvärin havaitsemiseen kuin akselivastetta [19].



Kuva 1: Kaiutin esitettynä karteesisessa ja pallomaisessa koordinaatistossa. [18]

Suuntaavuusindeksi (engl. directivity index) määritellään akselivasteen sekä tehovasteen erotuksena [15]. Tasaisen akselivasteen omaavan kaiuttimen suuntaavuusindeksin kuvaaja on siis tehovasteen peilikuva.

Suuntaavuusindeksi on taajuusriippuvainen suure ja yleensä se esitetäänkin taajuuden funktiona. Ympärisäteilevän kaiuttimen suuntaavuusindeksi on pienempi kuin suuntaavan kaiuttimen. [18]

ITU-R on suosittanut vuodesta 1994 lähtien kaiuttimen suuntavuusindeksiksi

$$6dB \leq C \leq 12dB \tag{1}$$

taajuuksilla 500 Hz – 10 kHz. [20]. Kun taas Claumarch ilmoittaa toivotuksi suuntavuudeksi mahdollisimman pienen suuntaavuusindeksin. [21].

3.2 Vasteet

Akselivasteen lisäksi kaiuttimien datalehtisissä tyypillisesti ilmoitetaan sivukentissä, 15, 30, 45 ja 60 asteen kulmilla, mitatut vasteet vapaakentässä. Mittaukset tehdään sekä vertikaali– että horisontaalkulmien ϕ ja θ suuntaisesti. Vasteet myös pehmennetään (engl. smoothing) jolloin niistä saadaan helpommin luettavia. Tyypilliset pehmennykset ovat 1/48 ja 1/3 oktaavin väliltä.

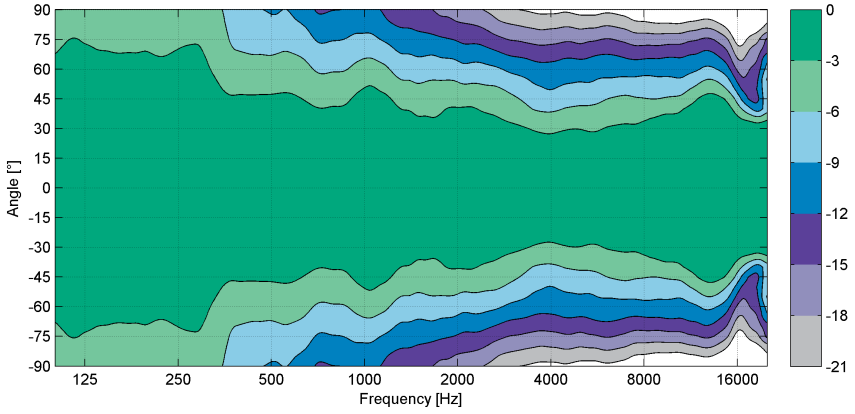
Vasteiden tulkinta on huomattavasti hankalampaa sillä ne eivät sisällä vain yhtä lukua, vaan useita eri käyriä. Vertikaalinen suuntaavuus on erityisen hankala tulkittava, sillä viidellä vastekuvaajalla ei pystytä kuvaamaan pystysuunnassa epäsymmetrisen kaiuttimen säteilyä. 6

Vasteiden muodosta ei ole annettu varsinaisia suosituksia. Yleisesti suositaan johdonmukaisesti käyttäytyviä vasteita joissa ei ole suuria yhtäkkisiä kehityssuunnan muutoksia. Enemmän suuntaavan kaiuttimen sivukenttävasteet ovat luonnollisesti enemmän vaimentuneita kuin vähemmän suuntaavan kaiuttimen. Ideaalisen ympärisäteilevän sivukenttävasteet ovat identtisiä akselivasteen kanssa.

3.3 Suuntaavuuskuvaaja

Suuntaavuuskuvaajassa (engl. directivity plot) yhdistyy polaarikuvaajan kulmaresoluutio sekä vastekuvaajan magnitudiresoluutio. Suuntaavuuskuvaaja piirretään normitettuna sopivan äänenpainekeskiarvon ympärille. Ryhmittämällä mittapisteitä haluttujen rajojen sisään ja piirtämällä ääriviivakuvaaja näille rajoille. Visualisaation auttamiseksi ääriviivojen välit täytetään väreillä.

Suuntaavuuskuvaajan piirtomenetelmässä voidaan muokata taajuuspehmennystä, kulma–asteikkoa sekä magnitudiresoluutiota. Suuntaavuuskuvaaja piirretään erikseen horisontaali– ja vertikaalitasolle. Suuntaavuuskuvaajan esiaste oli niin sanottu dispersiokuvaaja jossa käytettiin yleensä kiinteää -6 dB:n rajaa kaiuttimen peittoalueelle [22].

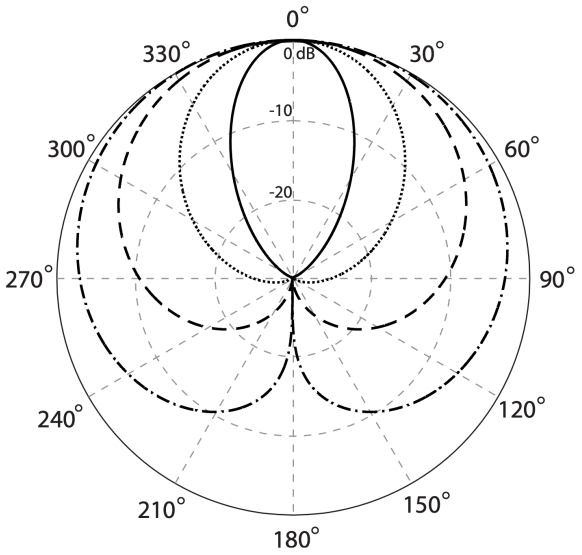


Kuva 2: Esimerkki suuntaavuuskuvaajasta. 3 dB resoluutio.

3.4 Polaarikuvaaja

Polaarikuvaaja (engl. polar plot) on napakoordinaatistoon piirretty kuvaaja, jossa äänenpaine esitetään kulman funktiona yhdelle taajuudelle kerrallaan joko kulman θ tai ϕ funktiona. Polaarikoordinaatistossa suuntaavuutta kuvatessa tarvitaan aina yhtä monta kuvaajaa kuin on taajuuksia.

Kuvassa 3 on esitetty polaarikoordinaattiesitys tavoiteltavasta kaiuttimen suuntaavuudesta. Hyvin suuntaavan kaiuttimen polaarikuvaajan muodosta on annettu useita eri suosituksia mutta suositukset koskevat yleensä pistetaajuuksia.



Kuva 3: Polaarikuvaaja jossa on esitetty pyöreän kaiutinrykelmän tavoitesuuntavuus [23] mukaan. Taajuudet 500 Hz – 4 kHz.

4 TULOKSET

4.1 Mittausjärjestelyt ja -kohteet

Tässä tutkimuksessa mitattiin kaksi kaiutinta kaiuttomassa huoneessa tietokoneella ohjatun kääntöpöydän päällä 5 asteen välein vertikaali- ja horisontaalisuunnissa. Huoneen korjauskertoimia ei käytetty tulosten vertailukelpoisuuden säilyttämiseksi. Kääntöpöydästä todettiin aiheutuvan heijastuksia 300 Hz:n ympäristössä, muita haittavaikutuksia ei havaittu vertaillessa mittauksia.

Kaittimet A ja B ovat ammattikäyttöön tarkoitettuja pieniä kolmitiekaittimia. Kaiutin A on perinteinen kolmitiekaiutin jossa elementit ovat sijoitettu erilleen etupaneeliin. Kaiutin B on rakenteeltaan koaksiaalinen jossa kaikki elementit sijaitsevat symmetrisesti akustisen akselin suhteen. Kaiuttimien ilmoitetut spesifikaatiot ovat luettavissa taulukosta 1.

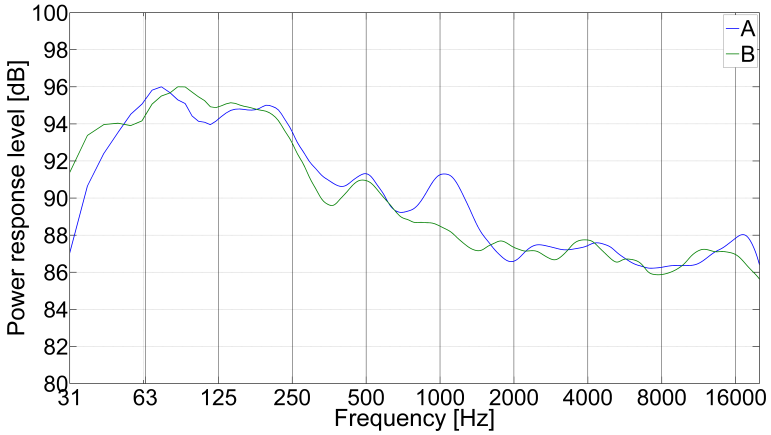
	A	B
Ulkotilavuus	28.3 litraa	31 litraa
Toistoalue [-6 dB]	30 -22 kHz	32 - 43 kHz
Kotelo	Suljettu	Refleksi
Diskantti	25 mm metallikalotti	25 mm metallikalotti
Keskiääni	75 mm silkkikalotti	130 mm metallikartio
Basso	8 tuumaa	8 tuumaa vastaava
Alajakotaajuus	650 Hz	320 Hz
Yläjakotaajuus	2000 Hz	2800 Hz
Suuntaimen koko	96 $\times$ 133 mm	230 $\times$ 330 mm

Taulukko 1: Yhteenveto tarkasteltavien kaiutinten ominaisuuksista.

Kummankin kaiuttimen särö- ja vastekäyttäytyminen on mittauksien mukaan hyvin samanlaista. 0.5 %:n säröraja ylitetään 100 Hz:n alapuolella. Kummankin taajuusvaste on hyvinkäyttäytyvää ja vaihteluväli on $\pm$ 1.5 dB 40 Hz – 20 kHz alueella.

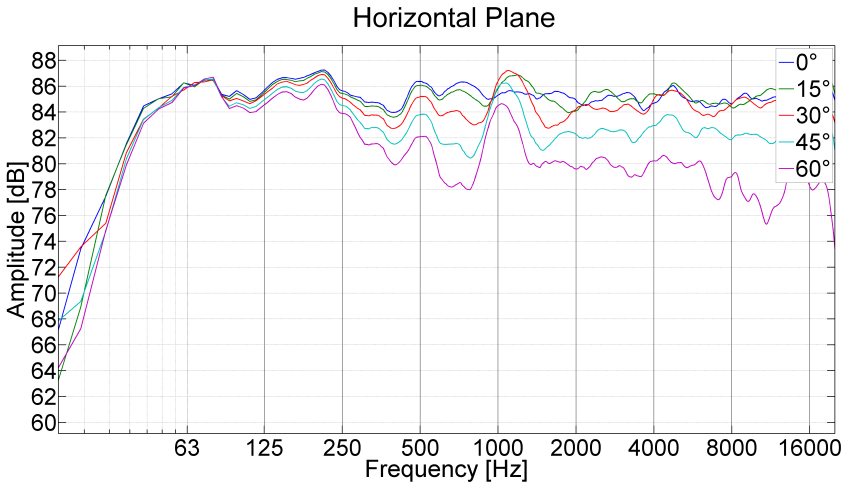
Mitatusta datasta tuotettiin tehovaste, vaste– sekä suuntaavuuskuvaajat.

4.2 Tehovaste ja SuuntaavuusIndeksi

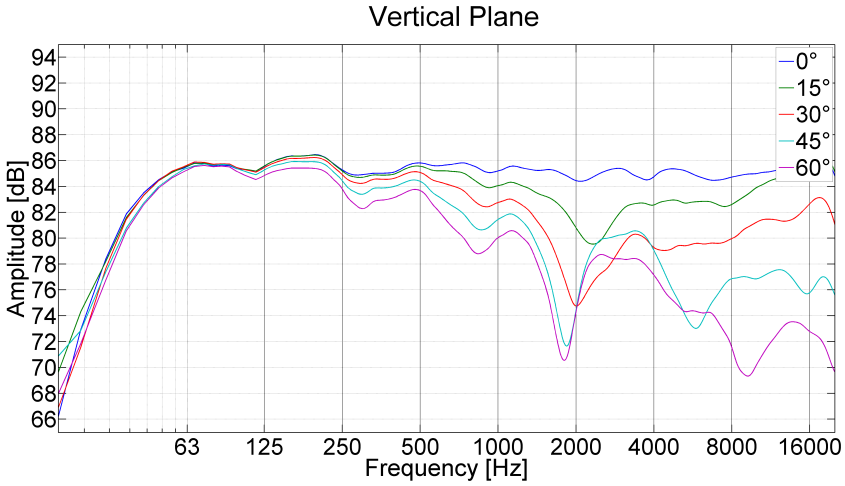


Kuva 4: Kaiuttimien A ja B tehovasteet. 1/3-oktaavin pehmennyksellä.

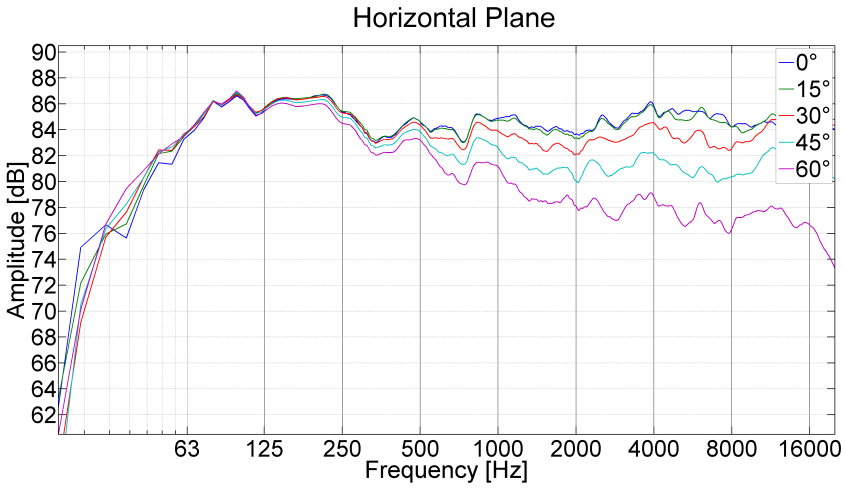
4.3 Taajuusvasteet



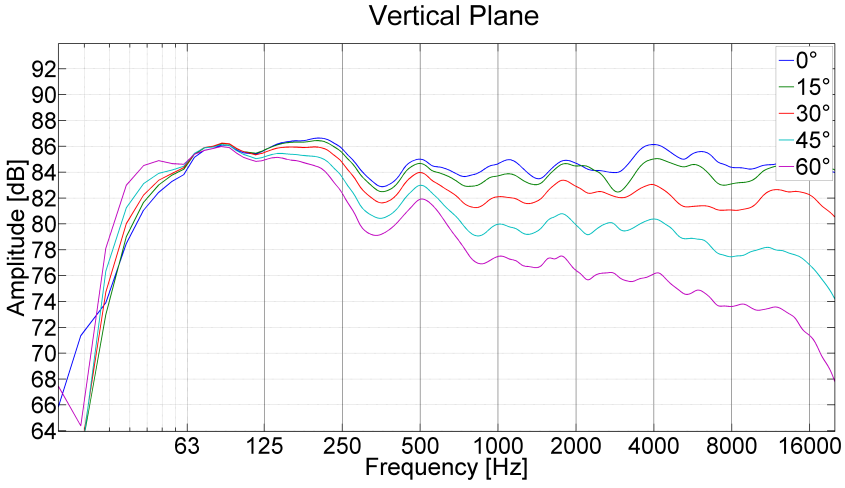
Kuva 5: Kaiuttimen A taajuusvasteet horisontaalitasossa.



Kuva 6: Kaiuttimen A taajuusvasteet vertikaalitasossa.

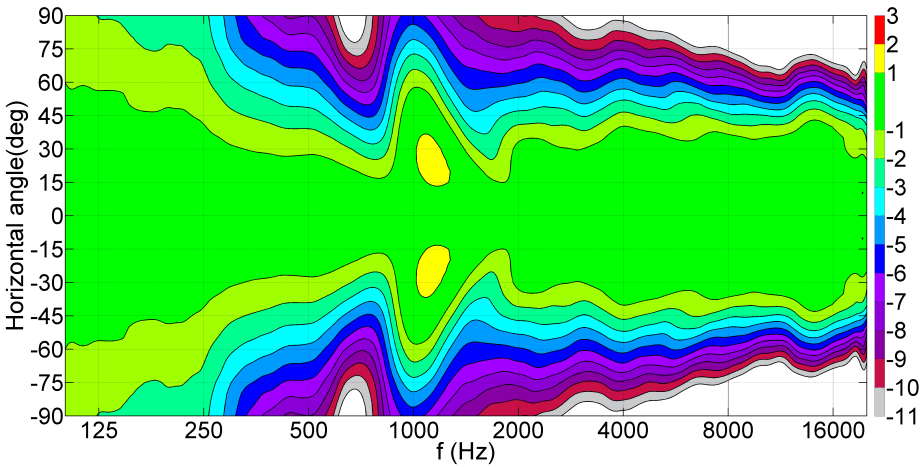


Kuva 7: Kaiuttimen B taajuusvasteet horisontaalitasossa.

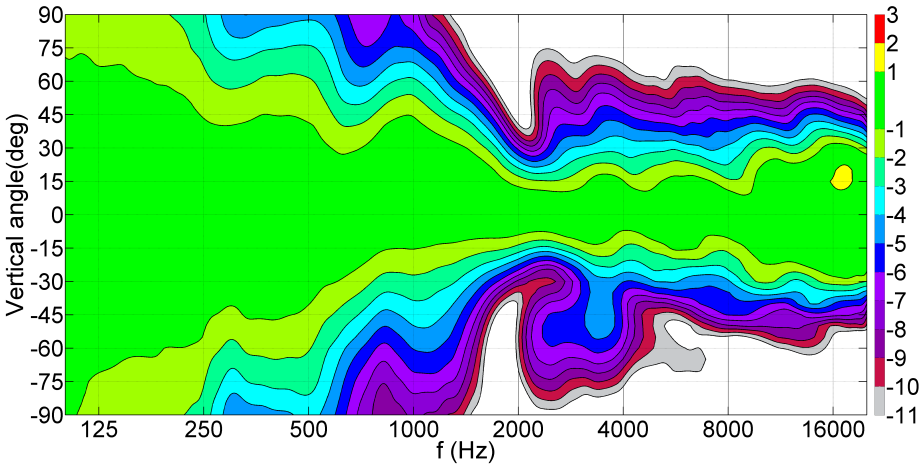


Kuva 8: Kaiuttimen B taajuusvasteet vertikaalitasossa.

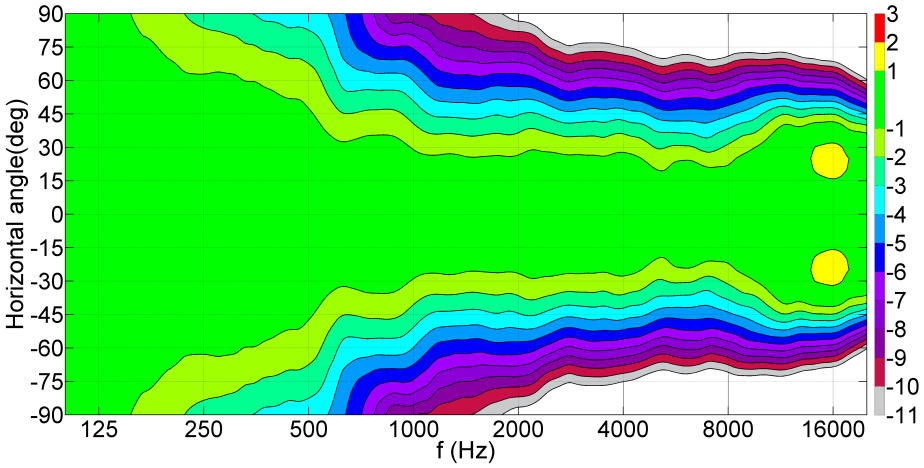
4.4 Suuntaavuuskuvaajat



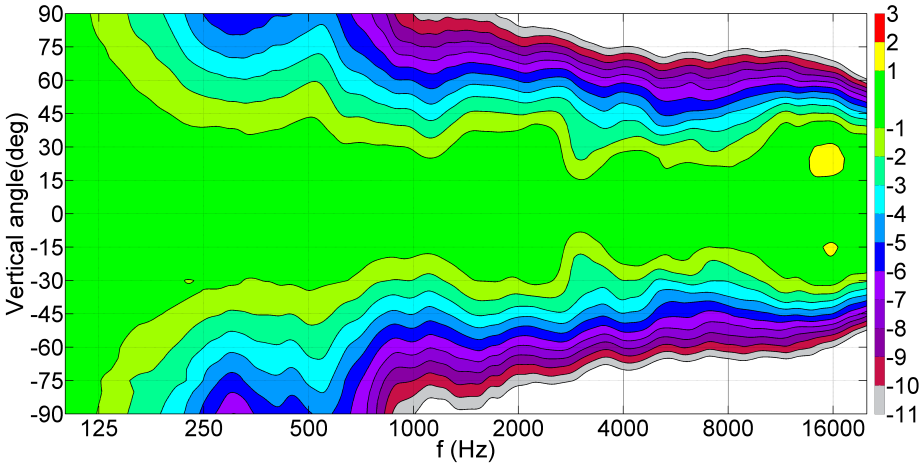
Kuva 9: Kaiuttimen A horisontaalitason suuntaavuuskuvaaja.



Kuva 10: Kaiuttimen A vertikaalitason suuntaavuuskuvaaja.



Kuva 11: Kaiuttimen B horisontaalitason suuntaavuuskuvaaja.



Kuva 12: Kaiuttimen B vertikaalitason suuntaavuuskuvaaja.

5 DISKUSSIO

Kaikilla eri suuntaavuuskuvaajilla on kuitenkin rajoitteita, joiden vuoksi suuntaavuuden määritteleminen voi johtaa virheelliseen lopputulokseen. Tässä työssä tarkastelluista kaiuttimista ei piirretty polaarikuvaajia johtuen valtavasta kuvaajamäärästä, jonka riittävä taajuusresoluutio vaatii. Polaarikuvaajia on käytetty menneisyydessä hyvin yleisenä kuvaajana kuvaamaan torvimaisten suuntaimien säteilykuvioita, myöhemmin kuitenkin kävi ilmi että torven säteilykuvio ei kertonut riittävästi havaitusta äänenlaadusta. [18, 22, 24] Polaarikuvaajien magnitudiasteikko on yleensä liian karkea perinteiselle kaiuttimelle sillä suuntakuvion muutos on merkittävä siirryttäessä matalilta taajuuksille jolloin kuvaaja hukkaa yksityiskohdat karkealla asteikolla.

Tehovaste kuvaa hyvin kaiuttimen säteilemää energiaa huoneeseen, mutta kuuntelupaikalla koettuun äänenväriin ja äänenlaatuun sillä ei ole ollut todistettavia välittömiä vaikutuksia. Tehovasteen kuvaajasta ei käy ilmi mihin suuntaan kaiutin säteilee energian. Esimerkiksi niin sanotun jatkuvasti suuntaavan kaiuttimen tehovaste on tasainen jos akselivaste on tasainen. Tavanomaisen 2– tai 3– tiekaiuttimen akselivasteen ollessa tasainen tehovaste muistuttaa tässä työssä laskettuja tehovasteita kuvassa 4. Myös tehovasteen pehmennyksellä on vaikutusta kuvaajan muotoon, mutta vähemmän kuin muilla mitatuilla kuvaajilla sillä tehovaste on valmiiksi jo keskiarvoistettua dataa.

Vastekuvaajat ovat suhteellisen hyvä kaiuttimen suuntaavuuden mittari ja äänenlaadun muutos on havaittu sivukenttien kuvaajien käyttäytyessä epäjohdonmukaisesti. Vaikka tyypillisesti suuntaavuus esitetään vain viiden käyrän parvella, väliin jäävien kulmien vasteet ovat suhteellisen hyvin ennustettavissa, useamman käyrän piirtäminen samaan kuvaajaan vaikeuttaisi kuvaajien tulkitsemista. Värikoodaus on myös lähes pakollinen sillä käyrät leikkaavat usein toisensa kuten tämänkin työn kuvaajissa 5678. Epävarmuutta vastekuvaajien tulkintaan tuovat kuitenkin pehmennyksen käyttö, 60 astetta suurempien kulmien suuntiin säteilevä akustinen teho ja normalisointi. Normalisointi poistaa akselivasteen vaikutuksen suuntaavuuden tulkinnasta ja tekee suuntaavuuksien vertailusta helpompaa. Akselivaste on kuitenkin olennainen osa äänenvärin kokemusta ja siksi pitäisi ottaa huomioon.

Suuntaavuuskuvaaja sisältää käsitellyistä suuntaavuuden kuvausmetodeista eniten datapisteitä yhdessä kuvassa. Suuntaavuskuvaaja pysyy tulkittavana pienestä magnitudiresoluutiosta huolimatta, eikä kulmaresoluution, eli mittauspisteiden, kasvattaminen huononna tulkittavuutta niin kuin vastekuvaajassa, vaan päinvastoin. Pehmennyksen pienentäminen kun taas huonontaa kuvan luettavuutta huomattavasti jolloin suuren pehmennyksen käyttäminen voi piilottaa pieniä piileviä ongelmia. Kaiuttimen akselivasteen tulkitseminen suuntaavuuskuvaajasta on mahdotonta mikäli kaiuttimen akselivaste ei vaihtele enempää kuin kuvaajan taajuusresoluutio ja tarkka vasteenmuoto on silti hävitetty kuvaajasta. Suuntaavuuskuvaaja sopivilla parametreillä piirrettynä antaa kuitenkin todellisen kuvan kaiuttimen suuntaavuudesta ja sen perusteella pystynee tekemään päätelmiä kuuntelupaikalla havaittuun äänenlaatuun.

Mittavista rakenteellisista eroista huolimatta kaiuttimilla A ja B on huomattavan samanlainen tehovaste jolloin ne säteilevät yhtä paljon energiaa huoneeseen kuvan 4. Kuitenkin muista suuntaavuutta kuvaavista kuvaajista voidaan tulkita kaiuttimien olevan todella eri-

laisia suuntaavuudeltaan. Kaiuttimen A tehovasteessa 1 kHz:n kohdalla näkyvä korostus näkyy myös horisontaalisuunnan suuntaavuus- ja vastekuvaajissa. Kaiuttimien väliset erot muilla taajuusalueilla ovat merkittäviä, mutta tehovasteesta niitä ei ole tulkittavissa.

6 YHTEENVETO

Suuntaavuutta voidaan siis mitata monilla eri tavoilla ja erilaiset suuntaavuudet tuottavat erilaisia kuunteluhavaintoja riippuen myös ympäristöstä riippuen. Suuntaavuutta voidaan kuitenkin hahmottaa erilaisten suureiden ja kuvaajien avulla. Kuitenkin tulkitessa suuntaavuuskuvaajia on samalla huomioitava kunkin kuvaajan heikkoudet jolloin vältetään virhearvioinnit kaiuttimen suuntaavuusominaisuuksissa.

VIITTEET

[1] William Evans, Jakob Dyreby, Søren Bech, Slawomir Zielinski, and Francis Rumsey. Effects of loudspeaker directivity on perceived sound quality - a review of existing studies. In *Audio Engineering Society Convention 126*, May 2009. URL `http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=14941`.

[2] Floyd E. Toole. Loudspeaker measurements and their relationship to listener preferences: Part 2. *J. Audio Eng. Soc*, 34(5):323–348, 1986. URL `http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=5270`.

[3] Søren Bech. Perception of timbre of reproduced sound in small rooms: Influence of room and loudspeaker position. *J. Audio Eng. Soc*, 42(12):999–1007, 1994. URL `http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=6917`.

[4] I. H. Flindell, A. R. McKenzie, H. Negishi, M. Jewett, and P. Word. Subjective evaluations of preferred loudspeaker directivity. In *Audio Engineering Society Convention 90*, Feb 1991. URL `http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=5617`.

[5] Siegfried Linkwitz. The challenge to find the optimum radiation pattern and placement of stereo loudspeakers in a room for the creation of phantom sources and simultaneous masking of real sources. In *Audio Engineering Society Convention 127*, Oct 2009. URL `http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=15153`.

[6] Kyeong Ok Kang, Philip Nelson, and Munhum Park. Evaluation of stereophonic images with listening tests and model simulations. In *Audio Engineering Society Convention 124*, May 2008. URL `http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=14593`.

[7] William L. Martens, Sean E. Olive, and Todd Welti. Listener loudspeaker preference ratings obtained in situ match those obtained via a binaural room scanning measurement and playback system. In *Audio Engineering Society Convention 122*, May 2007. URL `http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=14019`.

[8] Søren Bech. Timbral aspects of reproduced sound in small rooms. i. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 97(3):1717–1726, 1995.

[9] Allen R. Groh. High-fidelity sound system equalization by analysis of standing waves. *J. Audio Eng. Soc*, 22(10):795–799, 1974. URL http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=2723.

[10] Sean E. Olive and William L. Martens. Interaction between loudspeakers and room acoustics influences loudspeaker preferences in multichannel audio reproduction. In *Audio Engineering Society Convention 123*, Oct 2007. URL http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=14254.

[11] Karl Gentner, Jonas Braasch, and Paul Calamia. A perforated desk surface to diminish coloration in desktop audio-production environments. In *Audio Engineering Society Convention 123*, Oct 2007. URL http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=14257.

[12] R Walker. Early reflections in studio control rooms: The results from the first controlled image design installations. In *Audio Engineering Society Convention 96*. Audio Engineering Society, 1994.

[13] Nick Zacharov, Søren Bech, and David J. Meares. The use of subwoofers in the context of surround sound program reproduction. In *Audio Engineering Society Convention 102*, Mar 1997. URL http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=7368.

[14] Günther Thiele and Christoph Kügler. Loudspeaker reproduction: Study on the subwoofer concept. In *Audio Engineering Society Convention 92*, Mar 1992. URL http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=6798.

[15] Floyd E Toole. *Sound reproduction: The acoustics and psychoacoustics of loudspeakers and rooms*. Routledge, 2017.

[16] Densil Cabrera, Sam Ferguson, and Alan Subkey. Localization and image size effects for low frequency sound. In *Audio Engineering Society Convention 118*. Audio Engineering Society, 2005.

[17] Siegfried Linkwitz. Room reflections misunderstood? In *Audio Engineering Society Convention 123*, Oct 2007. URL http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=14220.

[18] Harry F Olson. *Acoustical engineering*. van Nostrand, 1957.

[19] P. H. Chapelle. The frequency response of loudspeakers: On-axis response or power response? In *Audio Engineering Society Convention 44*, Mar 1973. URL http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=1738.

[20] ITU-R BS.1116-1. Methods for the subjective assessment of small impairments in audio systems including multichannel sound systems . Standard, International Telecommunications Union, Geneva, CH, February 2015.

[21] Christian Claumarch, Kasper Kiis Jensen, and Mikkel Krogh Simonsen. Design of loudspeaker crossover networks using genetic algorithm. In *Audio Engineering*

Society Convention 143, Oct 2017. URL http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=19306.

[22] Rex Sinclair. The dispersion of re-entrant exponential horns. In *Audio Engineering Society Convention 60*, May 1978. URL http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=2983.

[23] Martin Møller, Martin Olsen, Finn T. Agerkvist, Jakob Dyreby, and Gert Kudahl Munch. Circular loudspeaker arrays with controllable directivity. In *Audio Engineering Society Convention 128*, May 2010. URL http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=15309.

[24] Wolfgang Klippel. Nonlinear system models for horn loudspeakers. In *Audio Engineering Society Convention 99*, Oct 1995. URL http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=7683.

EQ

Vesa Välimäki, Juho Liski ja Jussi Rämö

Aalto-yliopisto, Akustiikan laboratorio, Signaalinkäsittelyn ja akustiikan laitos
Otakaari 5, 02150 Espoo
etunimi.sukunimi@aalto.fi

Tiivistelmä

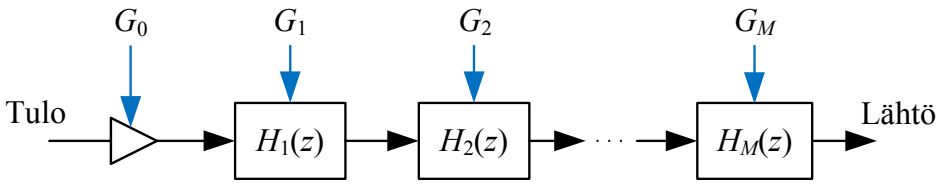
Ekvalisointia käytetään akustiikassa ja audiotekniikassa laajasti esimerkiksi äänentoistojärjestelmän taajuusvasteen korjaamiseen. Ekvalisaattorien (EQ) suunnittelu on kehittynyt paljon viime vuosina. Tässä artikkelissa keskitymme graafisiin ekvalisaattoreihin, joiden suunnittelu on haastavaa. Esittelemme kaksi periaatetta ekvalisaattorin toteuttamiseen, peräkkäis- ja rinnaisrakenteen. Kehittämämme uusimmat graafiset ekvalisaattorit täyttävät kriittisen hifi-vaatimuksen, jonka mukaan taajuusvasteen tulee vastata asetuksia yhden desibelin tarkkuudella. Graafisen ekvalisaattorin peräkkäisrakenteessa se onnistuu valitsemalla tarkoituksenmukainen parametrinen suodin jokaiselle kaistalle, säätämällä niiden kaistanleveys siten, että vahvistuksen vaikutus viereisille kaistoille tunnetaan, ja ratkaisemalla kaistasuotimien vahvistukset pienimmän neliösumman menetelmällä. Tarkka ja tehokas rinnakkainen graafinen ekvalisaattori saadaan muuntamalla peräkkäisrakenne viivästettyyn rinnakkaismuotoon, joka on uutuus tällä alalla. Koska näillä menetelmillä suunniteltujen oktaavi- ja terssiekvalisaattorien parametrien päivitys vaatii paljon laskentaa, olemme korvanneet vahvistusten optimoinnin keinotekoisen hermoverkon avulla. Kehittämiemme menetelmien ansiosta graafisen oktaavi- ja terssiekvalisaattorin suunnitteluongelma on nyt käytännössä ratkaistu.

1 JOHDANTO

Ekvalisaattorilla (engl. equalizer, EQ) tarkoitetaan tyypillisesti laitetta/järjestelmää, jolla käyttäjä voi säätää yhtä, kahta tai kolmea suodinparametria [1]. Nämä ovat keskitaajuus, vahvistus/vaimennus (yleensä desibeleinä) ja Q-arvo (kaistanleveys). Graafisessa ekvalisaattorissa näistä parametreistä vain vahvistus on käyttäjän säädettävissä. Tyypillisesti graafisen ekvalisaattorin keskitaajuudet valitaan tasavälein logaritmisella taajuusasteikolla ja niiden vahvistusta ohjataan vierekkäisillä liukusäätimillä, jotka siten kuvaavat järjestelmän taajuusvastetta eli vahvistusta taajuuden funktiona. Tästä syystä graafinen ekvalisaattori on intuitiivinen käyttäjälle.

Useimmat graafiset ekvalisaattorit eivät toimi oletetusti, sillä niiden taajuusvaste ei vastaa kovin tarkasti säätimien asetuksia. Taajuusvasteen virheet syntyvät, kun vierekkäiset

Copyright ©2019 Vesa Välimäki, Juho Liski ja Jussi Rämö. Tämä on avoimesti julkaistu teos, joka noudattaa Creative Commons NIMEÄ 4.0 Kansainvälinen –lisenssiä (CC BY 4.0). Teosta saa kopioida, levittää, näyttää ja esittää julkisesti ja siitä saa luoda johdannaisteoksia, kunhan tekijän nimi ja lähde mainitaan asianmukaisesti.



Kuva 1: *Sarjamuotoinen graafinen ekvalisaattorirakenne, jossa kytketään M kaistasuodatinta peräkkäin. Parametrit G_m ovat suodattimien lineaariset vahvistukset.*

suotimet vuorovaikuttavat keskenään [2, 3]. Sarjaankytkettyjen suotimien vahvistukset desibeleinä summautuvat, ja usein ekvalisaattorin kokonaisvaste on paljon suurempi tai pienempi kuin odotetaan. Tästä syystä tarkan ekvalisaattorin toteuttaminen vaatii suodinvahvistusten optimointia, joka on riippuvainen käyttäjän valitsemista asetuksista, joita kutsutaan komennoiksi [3, 1]. Työmme ekvalisaattorien parissa on keskittynyt sekä suotimien että suodinvahvistusten optimointiin, jotta graafisella ekvalisaattorilla saavutettaisiin alle yhden desibelin kokonaisvirhe [4, 5].

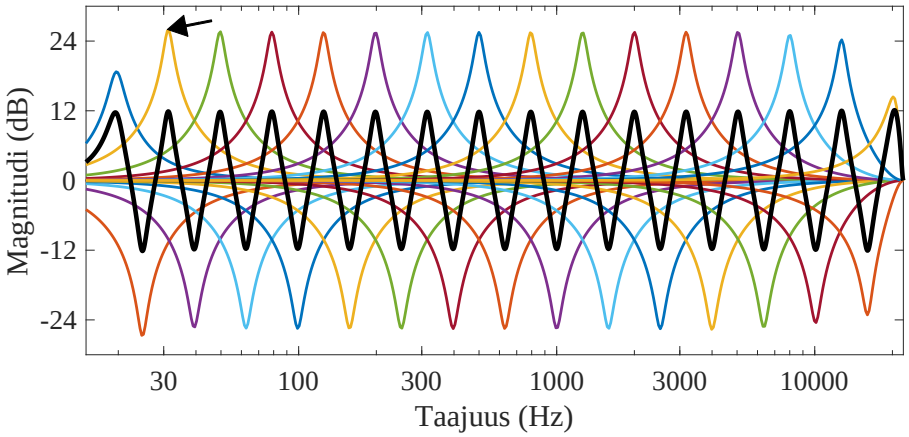
Tämän artikkelin rakenne on seuraavanlainen. Kappaleessa 2 kuvataan uusi periaate, jolla voidaan suunnitella tarkka sarjamuotoinen graafinen ekvalisaattori. Kappaleessa 3 kerrotaan kuinka graafinen ekvalisaattori voidaan muuntaa rinnakkaismuotoiseksi. Kappaleessa 4 kuvataan kuinka suodinvahvistusten optimointi voidaan korvata hermoverkon avulla, joka yksinkertaistaa ja nopeuttaa ekvalisaattorin parametrien säätöä. Kappaleessa 5 esitetään yhteenveto ja tulevaisuudensuunnitelmat.

2 SARJAMUOTOISEN EKVALISAATTORIN SUUNNITTELU

Kuva 1 näyttää kaskadi- eli sarjamuotoisen graafisen ekvalisaattorin rakenteen. Jokainen kaistasuodin $H_m(z)$, missä $m = 1, 2, ...M$, on parametrinen ekvalisaattori, joka tekee keskitaajuutensa ympärille tietyn levyisen vahvistuksen tai vaimennuksen. Kaukana keskitaajuudesta parametrisen ekvalisaattorin vahvistus lähenee nollaa desibeliä. Kuitenkin kaistasuodattimet vaikuttavat toistensa taajuusalueilla jonkin verran, ja juuri tämä vaikeuttaa graafisen ekvalisaattorin tarkkaa suunnittelua.

Tarkka peräkkäismuotoinen graafinen ekvalisaattori opittiin suunnittelemaan yhdistämällä Abelin ja Bernersin [6] ehdottama desibelivahvistusten optimointi ja Orfanidisin [7] parametrinen EQ-rakenne. Orfanidiksen suodattimessa kaistanleveys voidaan määrittää halutulla tavalla, ja päädyimme määrittämään sen desibelivahvistuksen murto-osan mukaan [4]. Yleensä resonanssin kaistanleveys määritellään -3 dB:n kohdalta huipun eri puolilta [1], mutta tässä tapauksessa se ei ole tarkoituksenmukaista. Tarkin tulos saadaan, kun vahvistus kaistanleveydellä on oktaaviekvalisaattorissa $0.3g$ [4] ja terssiekvalisaattorissa $0.4g$ [5], missä g on parametrisen suodattimen vahvistus desibeleinä keskitaajuudella. Vahvistuksen optimointi suoraan desibeleinä johtaa siihen, että graafinen ekvalisaattori toimii symmetrisesti positiivisilla (korostus) ja negatiivisillä vahvistuksilla (vaimennus). Tämä ei muuten tapahtuisi automaattisesti.

Kuvassa 2 näytetään suunnitteluesimerkki, kun tavoitevaste on siksak-asetus, jossa peräkkäiset tavoitevahvistukset ovat 12 dB ja -12 dB. Kaistasuodattimien vahvistusten on



Kuva 2: *Sarjamuotoisen ekvalisaattorin kokonaisvaste (musta paksu viiva) ja kaistasuodattimien vasteet (värikkäät viivat) siksak-asetuksella. Nuoli osoittaa suurimman kaistasuodattimet vahvistuksen, joka 26 dB.*

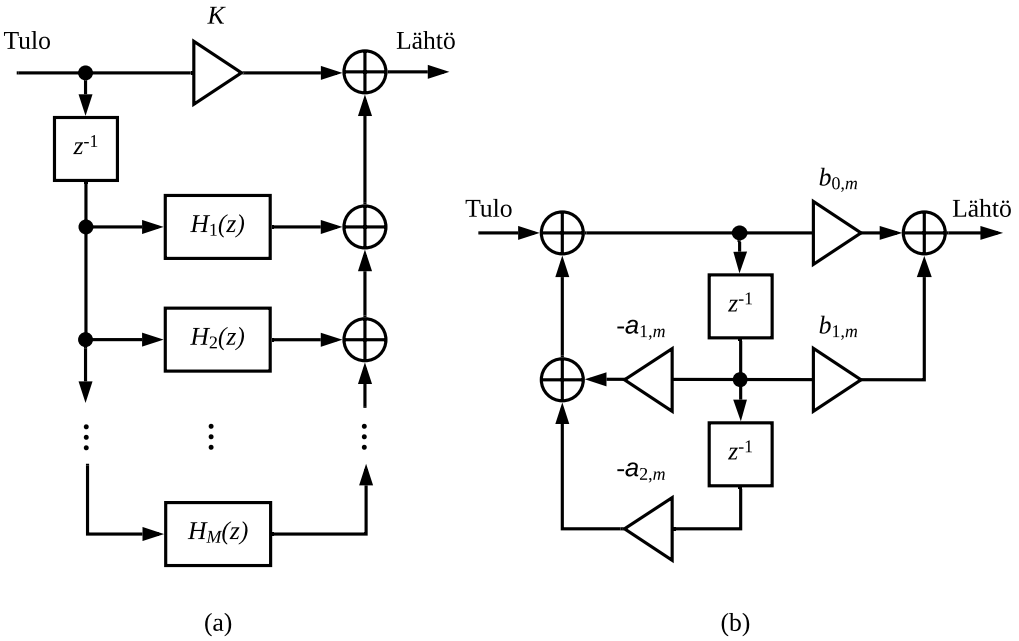
oltava paljon suuremmat kuin $\pm$12 dB, jotta viereisten suodattimien aiheuttama vuorovaikutus saadaan kumottua. Nämä suodinvahvistukset ratkaistaan pienimmän neliösumman optimoinnilla [4, 5].

3 PERÄKKÄISSUODATTIMEN MUUNTAMINEN RINNAKKAISEKSI

Rinnakkaismuotoisen graafisen ekvalisaattorin tarkka suunnittelu on osoittaunut vaikeaksi [2, 1]. Olemme esittäneet aiemmin suunnittelumenetelmän, jossa tarvitaan kaksinkertainen määrä suodattimia keskitaajuuksiin verrattuna ja näin saavutetaan yhden desibelin tarkkuus [2]. Ilman välisuodattimia riittävää tarkkuutta ei toistaiseksi ole saavutettu. Ilmeisesti epätarkkuutta aiheuttaa vaihevasteen määrittely, joka on välttämätön rinnakkaissuunnitelussa, koska kokonaisvaste koostuu suodattimien kompleksisten taajuusvasteiden (vahvistus ja vaihe) yhteenlaskusta [1].

Tarkka ja tehokas rinnakkainen graafinen ekvalisaattori saadaan muuntamalla peräkkäisrakenne viivästettyyn rinnakkaismuotoon, joka esitetään kuvassa 3 [8]. Muuntaminen on helppoa uuden algoritmimme avulla, jossa peräkkäisrakenteen vahvistus ja navat siirretään suoraan rinnakkaisrakenteeseen ja rinnakkaissuodattimien yhdistämiseen tarvittavat kertoimet ratkaistaan osamurtokehitelmän avulla.

Kuvan 1 rakenteesta voidaan suoraan sijoittaa vahvistus G_0 viivästettyyn rakenteeseen: $K = G_0$. Kertoimet $a_{1,m}$ ja $a_{2,m}$ ovat täsmälleen samat kuin kuvan 1 kaistasuodattimissa. Kuvan 3 viivästetyn rakenteen kertoimet $b_{0,m}$ ja $b_{1,m}$ ratkaistaan Heavisiden peittomenetelmällä [8]. Näin vältetään ns. pitkä polynomien jakolasku, jota yleensä tarvitaan osamurtokehitelmässä. Lopputuloksena saatu rinnakkaissuodin on erittäin suurella tarkkuudella samanlainen kuin sarjasuodin, josta se on muunnettu [8]. Tällä hetkellä tämä on helpoin ja tarkin tapa suunnitella rinnakkainen graafinen ekvalisaattori. Rinnakkaisrakenne soveltuu hyvin toteutettavaksi moderneilla prosessoreilla, joissa käytetään paljon rinnakkaisuutta laskennassa.



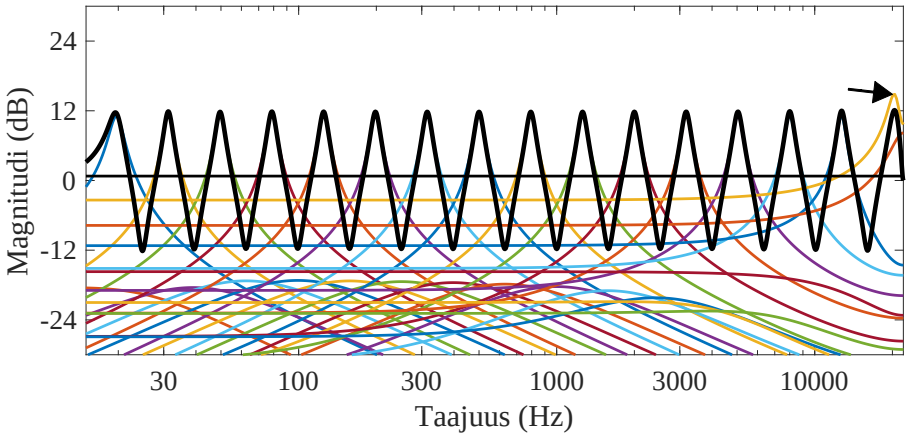
Kuva 3: *(a) Graafisen EQ:n viivästetty rinnakkaisrakenne, jossa kaistasuodattimiin menevää tulosignaalia viivästetään yhdellä näytteellä (lohkossa z^{-1}) ja (b) jonka kaistasuodattimet $H_m(z)$ ovat toista astetta, mutta niiden myötäkytketty osa on ensimmäistä astetta. Laskentakuorma on sama kuin kuvan 1 sarjamuotoisessa EQ:ssa.*

Kuva 4 näyttää suunnitteluesimerkin, missä kuvan 2 sarjamuotoinen ekvalisaattori on muutettu viivästettyyn rinnakkaismuotoon. Näiden kahden suodattimen taajuusvasteet ovat tarkalleen samat, vaikka kaistasuodattimet ovat kovin erilaiset. Rinnakkaissuodattimen etuja ovat soveltuvuus rinnakkaislaskentaan ja kaistasuodattimien pienempi dynamiikka, mikä nähdään esimerkissämme kuvan 4 kaistasuodattimien pienempinä vahvistuksina kuin kuvassa 2.

4 VAHVISTUKSEN LASKEMINEN HERMOVERKON AVULLA

Koska uusilla menetelmillämme suunniteltujen oktaavi- ja terssiekvalisaattorien parametrien päivitys vaatii paljon laskentaa, olemme yksinkertaistaneet vahvistusten optimointia keinotekoisen hermoverkon avulla [9, 10]. Perinteinen monitasoinen perceptron-hermoverkko soveltuu tähän tarkoitukseen erinomaisesti.

Hermoverkkoa opetetaan näyttämällä sille paljon esimerkkejä käyttäjän asetuksista ja niitä vastaavista optimoiduista suodinvahvistuksista [9, 10]. Samalla hermoverkon parametrejä eli painoja säädetään opetusalgoritmin avulla. Opetuksen aikana hermoverkko kokeilee mitkä suodinvahvistukset tulevat sen nykyisillä painokertoimilla, ja opetusalgoritmi korjaa toteutuneen virheen perusteella painoja siten, että jatkossa virhe on pienempi. Kun opetusdataa eli vahvistuskerroinvektoripareja on riittävästi ja opetusta jatketaan riittävän kauan, virhe saavuttaa minimin. Jos verkon kuvauskysy riittää ongelman oppimiseen eli siinä on riittävästi neuroneja ja kerroksia, optimointi voidaan korvata hermo-



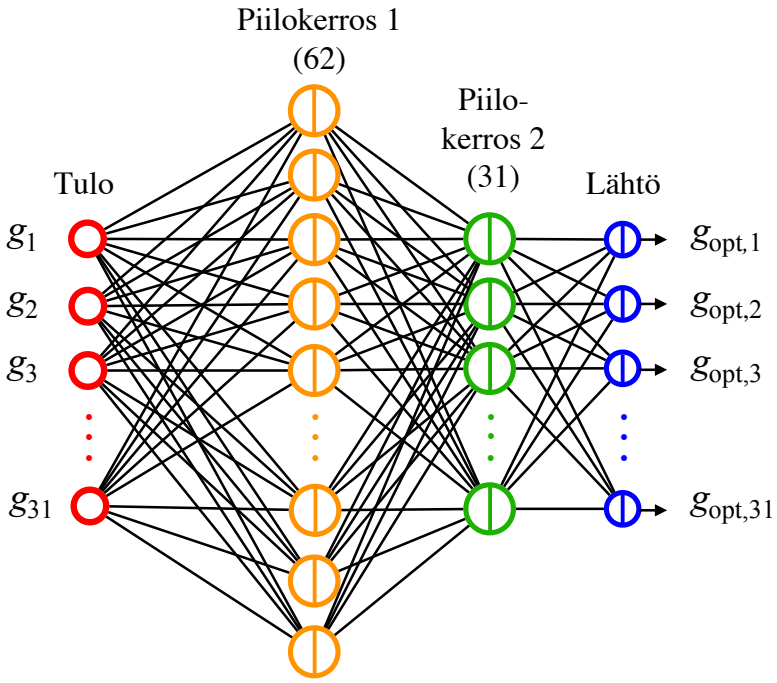
Kuva 4: *Rinnakkaismuotoisen graafisen ekvalisaattorin taajuusvaste (musta paksu käyrä), vahvistus K (musta ohut vaakaviiva) ja kaistasuodattimien vasteet (värikkäät viivat). Suodin on muunnettu kuvan 2 sarjasuodattimesta, jolla on identtinen vaste. Kaistasuodattimien vasteet sen sijaan ovat erilaiset, ja nuolen osoittama kaistasuodattimen suurin vahvistus on nyt 15 dB eli paljon pienempi kuin sarjamuotoisessa ekvalisaattorissa.*

verkolla. Ekvalisaattoria käytettäessä hermoverkon parametrejä ei enää muuteta, vaan ne lukitaan parhaisiin arvoihin, jotka löydettiin opetuksen aikana.

Kokeilumme erikokoisilla perceptron-verkoilla johtivat riittävän suurten mutta mahdollisimman pienten verkkojen löytymiseen, joilla oktaavi- ja terssiekvalisaattorin kertoimet voidaan ennustaa riittävän tarkasti. Oktaaviekvalisaattorin tapauksessa virhe pysyy 1 dB:n sisällä, kun perceptron-verkossa on yksi piilokerros, jossa on 20 neuronia. Tämä on jostain syystä täsmälleen kaksinkertainen määrä oktaavikaistojen määrään nähden, koska niitä on 10 [9]. Terssiekvalisaattorin tapauksessa tarvitaan kaksi piilokerrosta, joista ensimmäisessä on 62 ja toisessa 31 neuronia. Tämän verkon rakenne näytetään kuvassa 5. Terssiekvalisaattorissa on 31 kaistaa, joten tälläkin kertaa ensimmäisen piilokerroksen koko on kaksinkertainen kaistojen määrään nähden [10]. Tälle suhdeluvulle ei toistaiseksi ole keksitty selitystä.

Hermoverkon etuja suodinvahvistusten laskennassa ovat yksinkertaisuus ja nopeus. Kertoimien laskenta hermoverkolla vaatii ainoastaan matriisikertolaskuja ja hyperbolisen tangenttifunktion, mikä on paljon helpompaa ohjelmoida kuin aiemmin kehittämämme pienimmän neliösumman menetelmään perustuva optimointialgoritmi [9]. Hermoverkko laskee Matlabissa suodinkertoimet oktaaviekvalisaattorille yli 200 kertaa optimointia nopeammin [9] ja terssiekvalisaattorille yli 350 kertaa nopeammin [10].

Kuvassa 6 näytetään terssiekvalisaattorin testauksessa yleinen siksak-asetus (punaiset ympyrät) ja siihen sovitettu sarjamuotoisen graafisen EQ-suodattimen taajuusvaste (musta käyrä). Pienet neliöt ovat optimointialgoritmin antamat suodinvahvistukset ja rastit ovat hermoverkon ennustamat suodinvahvistukset. Koska rastit sattuvat neliöihin, hermoverkon antamat luvut vastaavat tarkasti optimoinnin tuloksia. Hermoverkosta aiheutuu vähäinen approksimaatiovirhe, joka ei käytännössä huononna EQ:n tarkkuutta. Tässä testissä suurin vahvistusvirhe 1 dB sattuu alimmalla terssikaistalla, joka on kuuloalueen alarajalla.



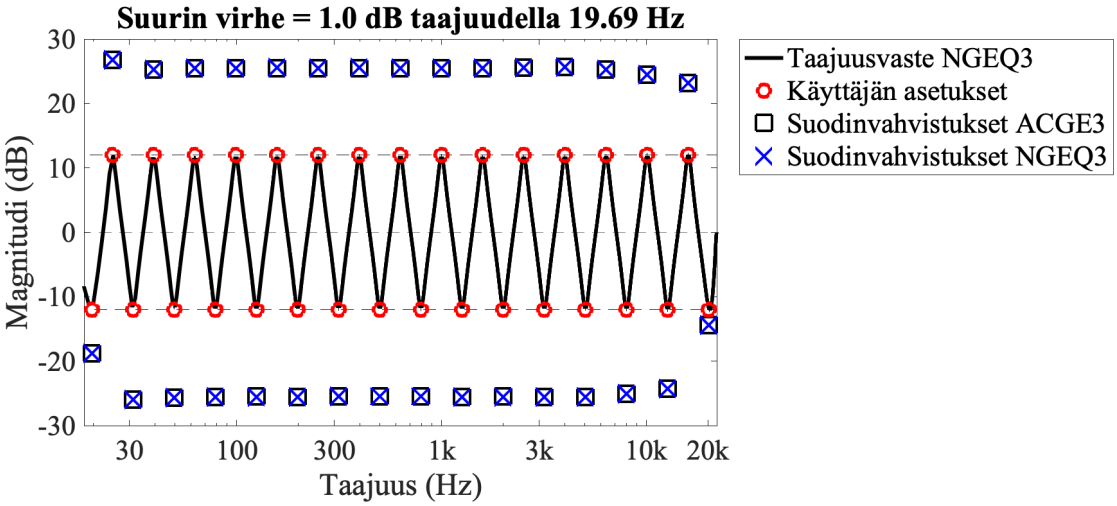
Kuva 5: *Kahden piilokerroksen perceptron-hermoverkko 31-kaistaisen graafisen ekvalisaattorin suodinvahvistusten $g_{\mathrm{opt},m}$ ennustamiseen komentovahvistusten g_m perusteella. Kaikki vahvistukset ovat desibeleinä.*

Kuva 7 on vastaavan testin tulos satunnaisilla asetuksilla, jotka muistuttavat tyypillistä EQ:n käyttöä paremmin kuin ääriasetukset. Nyt suurin virhe on vain alle 0,5 dB, jonka ei uskota olevan korvin kuultavissa.

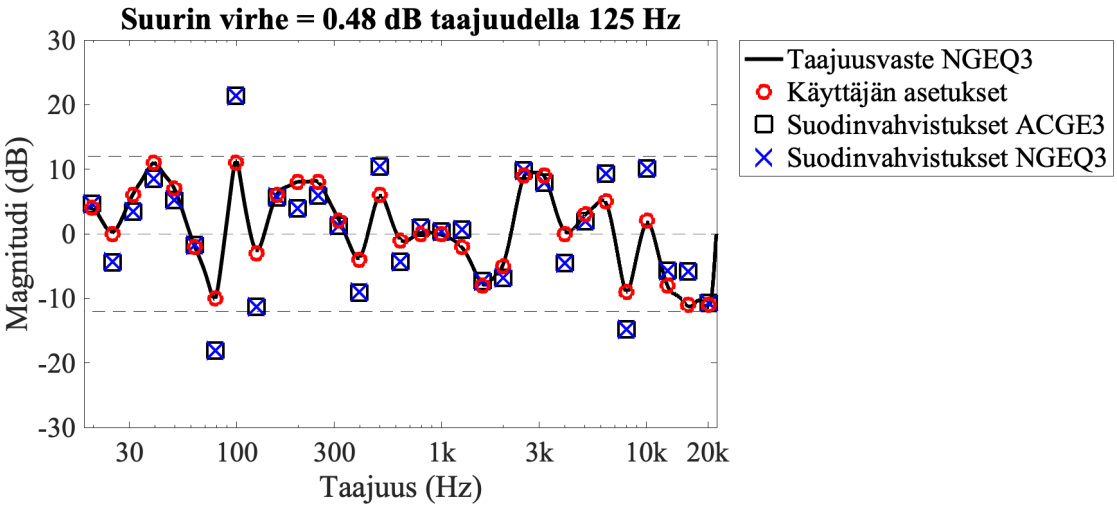
5 YHTEENVETO

Graafinen ekvalisaattori osataan nyt suunnitella tarkasti, kun suodattimien keskitaajuudet sijoittuvat tasavälein logaritmiselle taajuusakselille oktaavin tai terssin välein. Peräkkäisrakenteen suunnittelu on nopeinta perinteisen hermoverkon avulla, joka ennustaa kaistasuodattimien vahvistukset asetuksista. Rinnakkaisrakenne kannattaa suunnitella muuntamalla se peräkkäisrakenteesta, koska muuten sen suunnittelu on haastavaa. Esittämämme moderni rinnakkainen graafinen ekvalisaattori perustuu viivästettyyn rakenteeseen, jossa useat kerroinarvot voidaan lainata suoraan peräkkäissuotimesta ja loput ratkaistaan Heavisiden peittomenetelmällä. Uusimmat menetelmät graafisen ekvalisaattorin suunnitteluun, kuten kaistasuodattimien vaihtaminen symmetrisiksi [11], voidaan helposti opettaa hermoverkolle, jolloin kaistojen vahvistusten säätö on helppoa ja nopeaa.

Jatkossa esitettyjä menetelmiä pyritään laajentamaan muihin kaistajakoihin kuin logaritmisiin taajuusasteikkoihin, kuten auditoriseen Bark-asteikkoon. On mielenkiintoista pohtia voidaanko samoja periaatteita soveltaa yleisesti parametristen ekvalisaattoreiden yhteydessä, kun vahvistuksen lisäksi myös jokaisen suodattimen keskitaajuus ja kaistanleveys ovat vapaasti käyttäjän säädettävissä.



Kuva 6: *Siksak-testissä verrataan pienimmän neliösumman menetelmällä (ACGE3) ja hermoverkolla (NGEQ3) saatuja suodinvahvistuksia sarjamuotoisessa graafisessa terssiekvalisaattorissa. Hermoverkon ennustamat suodinvahvistukset ovat lähes samat kuin optimoinnin antamat. Lopullinen taajuusvaste on laskettu hermoverkon antamilla suodinvahvistuksilla, ja maksimivirhe pysyy 1 desibelin puitteissa.*



Kuva 7: *Kuvaa 6 vastaava testi satunnaisilla asetuksilla. Satunnaistestit paljastavat, että suurin taajuusvastevirhe on tyypillisesti pienempi kuin yksi desibeli.*

6 KIITOKSET

Juho Liskin työtä rahoittaa Aalto-yliopiston sähkötekniikan korkeakoulun tohtoriohjelma (Aalto ELEC Doctoral School). Tämä tutkimus liittyy NordicSMC-hankkeeseen (“Nordic Sound and Music Computing Network”, NordForsk-projekti nro. 86892).

VIITTEET

[1] V. Välimäki and J. D. Reiss. All about audio equalization: Solutions and frontiers. *Applied Sciences*, 6(129/5):1–46, May 2016. Open Access -julkaisu: https://www.mdpi.com/2076-3417/6/5/129.

[2] J. Rämö, V. Välimäki, and B. Bank. High-precision parallel graphic equalizer. *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech and Language Processing*, 22(12):1894–1904, December 2014. Saatavana osoitteesta: https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/14206/article7.pdf.

[3] R. J. Oliver and J.-M. Jot. Efficient multi-band digital audio graphic equalizer with accurate frequency response control. In *Proceedings of the 139th Convention of the Audio Engineering Society*, New York, New York, USA, October 2015.

[4] V. Välimäki and J. Liski. Accurate cascade graphic equalizer. *IEEE Signal Processing Letters*, 24(2):176–180, February 2017.

[5] J. Liski and V. Välimäki. The quest for the best graphic equalizer. In *Proceedings of the International Conference on Digital Audio Effects (DAFx-17)*, pages 95–102, Edinburgh, UK, September 2017. Open Access -julkaisu: http://www.dafx17.eca.ed.ac.uk/papers/DAFx17_paper_94.pdf.

[6] J. S. Abel and D. P. Berners. Filter design using second-order peaking and shelving sections. In *Proc. International Computer Music Conference (ICMC-04)*, Miami, Florida, USA, November 2004. Open Access -julkaisu: https://quod.lib.umich.edu/i/icmc/bbp2372.2004.152/1.

[7] S. J. Orfanidis. *Introduction to Signal Processing*. Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 1996. URL https://www.ece.rutgers.edu/~orfanidi/intro2sp/.

[8] J. Liski, B. Bank, J. O. Smith, and V. Välimäki. Converting series biquad filters into delayed parallel form: Application to graphic equalizers. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 67(14):3785–3795, July 2019. Open Access -julkaisu: https://ieeexplore.ieee.org/document/8723568.

[9] V. Välimäki and J. Rämö. Neurally controlled graphic equalizer. *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech and Language Processing*, hyväksytty julkaistavaksi, 2019. Open Access -julkaisu: https://ieeexplore.ieee.org/document/8809819.

[10] J. Rämö and V. Välimäki. Neural third-octave graphic equalizer. In *Proceedings of the International Conference on Digital Audio Effects (DAFx-19)*, Birmingham, UK, September 2017. Open Access -julkaisu: https://www.researchgate.net/publication/335740795_Neural_Third-Octave_Graphic_Equalizer.

[11] J. Liski, J. Rämö, and V. Välimäki. Graphic equalizer design with symmetric biquad filters. In *Proceedings of the IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics (WASPAA-19)*, New Paltz, New York, USA, October 2019.

EHDOTUS MUSIIKKITALON KONSERTTISALIN AKUSTIIKAN PARANTAMISEKSI

Tapio Lokki

Aalto-yliopiston perustieteiden korkeakoulu
Tietotekniikan laitos
PL 13100, 0076 Aalto
tapio.lokki@aalto.fi

Tiivistelmä

Musiikkitalon akustiikka on puhuttanut salin avaamisesta lähtien. Nyt kahdeksan vuoden kokemusten jälkeen on selvää, että akustiikka ei ole maailman huippuluokkaa. Äänikuva on hieman etäinen eikä salin kaiunta ympäröi kuuntelijoita. Lisäksi salin akustiikka latistaa dynamiikkaa, ennen kaikkea fortissimoita. Salin akustiikan parantamiseksi ehdotan katosta roikotettavia heijastimia, joiden muoto muistuttaa klassisten salien sivuparvien tukipilareita ja parvien etukaiteita. Näiden heijastavien elementtien pitäisi parantaa akustiikkaa merkittävästi lisäämällä saliin varhaisia heijastuksia. Tässä artikkelissa heijastimien vaikutusta pyritään arvioimaan simulointitulosten avulla sekä perustuen kokemukseen, joka minulla on tutkimusryhmäni kymmenen vuoden intensiivisen työn tuloksena.

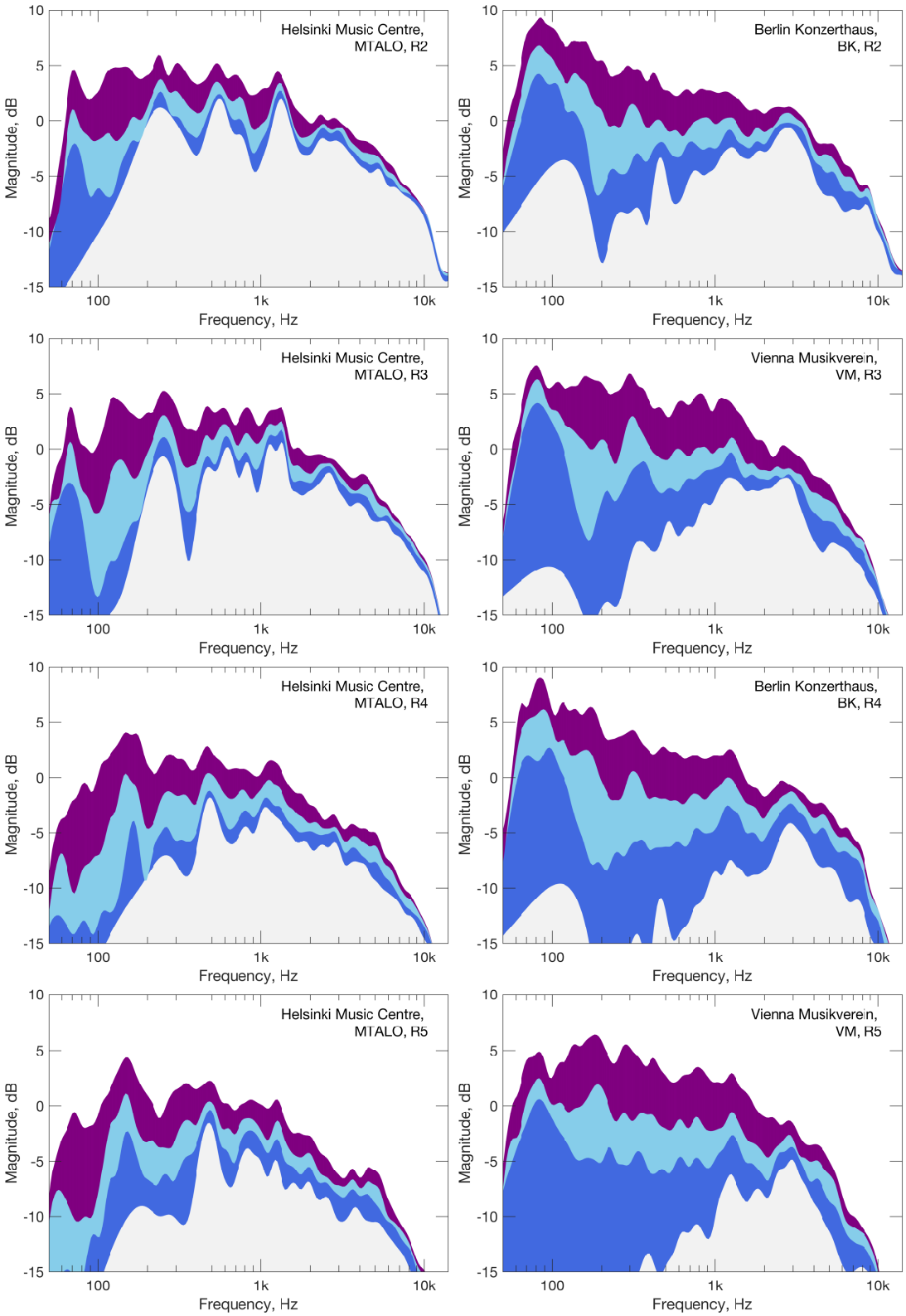
1 JOHDANTO

Musiikkitalon akustiikka on herättänyt keskustelua käytännössä jo avajaisista alkaen. Ensiarviot olivat ylistäviä, kuten aina uudesta salista, mutta nopeasti kuultiin myös muunlaisia mielipiteitä [1, 2]. Salia on kritisoitu myös logistiikan, portaiden jyrkkyyden, narikan, jne. suhteen sekä erityisesti ongelmista vahvistetun musiikin kanssa. Tässä artikkelissa en ota kantaa näihin ongelmiin vaan keskityn ainoastaan salin akustiikan parantamiseen sinfoniakonserteissa, joita salissa järjestetään useita viikossa ja jotka käsittääkseni ovat salin päätarkoituksen mukaisia tapahtumia.

Tutkimusryhmäni Aalto-yliopistossa on tutkinut konserttisalien akustikkaa runsaat 10 vuotta. Tuloksena on syntynyt kattava ymmärrys salien akustiikasta ja erityisesti erilaisista arkkitehtoonisista elementeistä, jotka luovat suotuisan akustiikan sinfoniamusiikille [3]. Itse Musiikkitalon konserttisalista olemme julkaisseet mittaustuloksia [4, 5] ja sali on ollut mukana laajoissa kuuntelukokeissamme [6, 7, 8]. Kaikkien näiden tutkimusten jälkeen on valitettavasti todettava, että Musiikkitalon akustiikka ei ole kovin mairitteleva ja tukee huonosti sinfoniaorkesterin vivahteikasta sointia.

Akustisten mittausten ja laboratoriotutkimusten tulosten valossa valossa on todettava, että Jukka Isopuro kirjoitti konserteissa tekemistään havainnoista jo vuonna 2012 hyvin

Copyright ©2019 Tapio Lokki. Tämä on avoimesti julkaistu teos, joka noudattaa Creative Commons NIMEÄ 4.0 Kansainvälinen –lisenssiä (CC BY 4.0). Teosta saa kopioida, levittää, näyttää ja esittää julkisesti ja siitä saa luoda johdannaisteoksia, kunhan tekijän nimi ja lähde mainitaan asianmukaisesti.



Kuva 1: Kumulatiivinen taajuusvaste 24-lähdepisteen keskiarvona eri mittausetäisyyksillä (R2=11m, R3=15m, R4=19m ja R5=23m) orkesterista. Vaalean harmaa 0-10ms, tumman sininen 0-50ms, vaalean sininen 0-100ms, violetti 0-2800ms.

osuvasti: "*Yläsävelikön säyseys syö Musiikkitalossa sävyerottelua, loistoa ja intensiteettiä. ... Permannon alapaikoilla konserttisali tuntuu nostetun pystyyn, kun kaiunta tulee lähiheijasteiden niukkuuden vuoksi korkealta katosta. ... Ääntä mahtuu paljon yleissoinnin kiristymättä tai karkeutumatta, mutta huippusoinnin artikulaatio latistuu ja voima leikkautuu. Loisto puuttuu. Emotionaalinen katto tulee vastaan.*"[1]

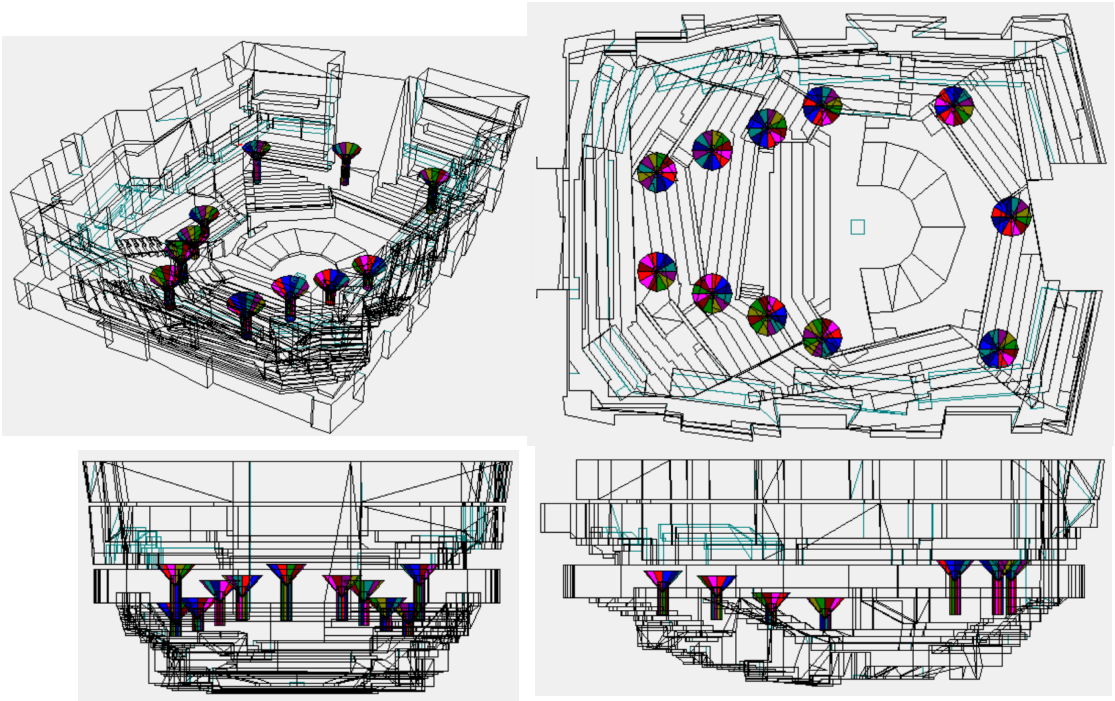
Musiikkitalon salin pääongelman muodostavat mielestäni äänikuvaa dominoiva suora ääni, heikot sivusuuntaiset heijastukset sekä huonosti ympäröivä, sävyltään tumma jälkikaiunta. Nämä seikat näkyvät aiemmin julkaisemistamme mittaustuloksista ja kuvassa 1 on aika-taajuusanalyysit neljästä paikasta permannolta. Musiikkitaloa on kuvissa verrattu Berliinin Konzerthausin ja Wienin Musikvereinin salien identtisiin mittauksiin ja kuvista nähdään erittäin hyvin edellä mainittu vahva suora ääni, lähes olematon varhaisten heijastusten tuoma lisäys kumulatiiviseen energiaan sekä korkeiden taajuuksien (ja basson) matala taso, etenkin takapermannolla (R4 ja R5 kuvassa 1). Kun otetaan huomioon vielä heijastusten ja jälkikaiunnan spatiaalinen suunta [4, 5] voidaan vetää seuraavat johtopäätökset, joita tukevat myös lukuisat kuuntelukokeemme.

- Äänikuva on selkeä ja erottelu hyvä hiljaa soitettaessa ja pienillä kokoonpanoilla. Fortissimossa (etenkin kauempana lavasta) selkeys katoaa ja ”sali ei herää eloon”.
- Äänikuva on hieman etäinen ja tilantuntu on aika olematon.
- Briljanssi ja loistokkuus puuttuvat jousien ja vaskien äänistä.
- Musiikin dynamiikka on suppea, joka johtuu korkeiden taajuuksien nopeasta vaimenemisesta ja varhaisten heijastusten puutteesta [5].

2 EHDOTUKSENI VARHAISTEN HEIJASTUSTEN LISÄÄMISEKSI

Nähdäkseni yksi suurimpia akustisia ongelmia on varhaisten heijastusten puute. Nämä heijastukset tulevat monessa akustiikaltaan arvostetussa salissa kuuntelijan sivulta ja lisäksi hieman yläviistosta. Tällöin varhaiset heijastukset lisäävät äänekkyyttä, tuovat äänilähteitä kuulokuvassa lähemmäksi sekä lisäävät havaittua dynamiikkaa [9, 10, 11]. Musiikkitalon salissa kaikki merkittävät sivuseinät ovat sellaisessa asennossa, että ne tuottavat vähäisen määrän heijastuksia mille tahansa paikalle.

Vahvan suoran äänen ja pitkän, joskin tasoltaan matalan, jälkikaiunnan väliin olisi siis saatava varhaisia heijastuksia, jotka viinitarhanmuotoisista saleista tyypillisesti puuttuvat, mutta jotka parantavat akustiikkaa selkeästi [12]. Musiikkitalossa heijastavien seinien lisääminen saliin on mahdotonta salin muodon vuoksi sekä menettämättä suurta määrää istumapaikkoja. Ratkaisu on tuoda saliin roikkuvat heijastimet, jota tuottavat useita varhaisia heijastuksia jokaiselle istumapaikalle permannolla. Ehdottamani heijastimet ovat sileitä ja pyöreitä, lasista tai riittävän jäykästä pleksistä tehtyjä läpinäkyviä elementtejä, joiden halkaisija olisi 100cm, korkeus 2-4m ja yläpään halkaisija n. 2m (kuva 2). Elementtiä voisi kuvata ilmassa leijuvaksi tyngäksi pilariksi, joka levenee yläosaa kohti kaarevasti ja jonka päällinen olisi hieman kupera ja diffusoiva. Heijastimet voidaan asentaa sellaiselle korkeudelle, että ne eivät tule minkään katsomonosan ja lavan väliin, eli niistä ei pitäisi tulla näköestettä millekään paikalle. Permannolta yleisö näkee lavalle niiden alitse ja parvelta niiden ylitse. Toisin sanoen heijastimet sijoitettaisiin siten, että sisääntulotason lasi-ikkunoihin suuntautuva ääni suunnataan yleisölle. Näiden heijastimien kustannukset olisivat erittäin maltilliset, koska läpinäkyvät elementit voidaan



Kuva 2: Ehdotetut 11 heijastinta, jotka valmistetaan läpinäkyvästä heijastavasta materiaalista.

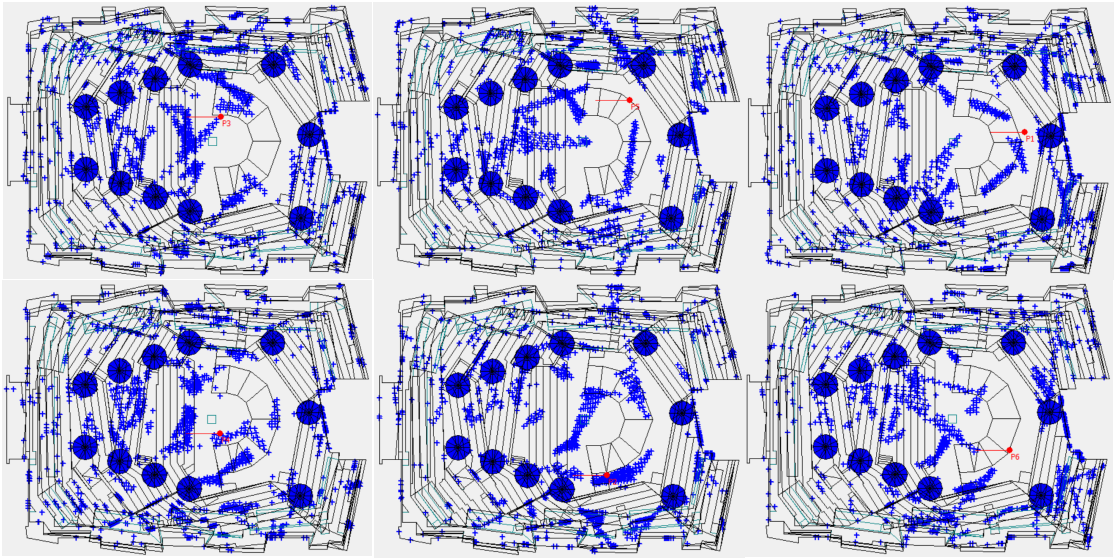
roikottaa katosta kajoamatta seiniin ja istumapaikkoihin. Lisäksi, jos katon yläpuolelle asennetaan moottorit niin heijastimet voidaan tarvittaessa nostaa kattoon, jolloin ne eivät käytännössä vaikuta akustiikkaan lainkaan. Lisäksi läpinäkyviin heijastimiin on helppo asentaa sisäpuolelle ledinauhoja tai muita valonlähteitä, jolloin niitä voisi tarvittaessa käyttää myös valaisimina.

3 HEIJASTIMIEN VAIKUTUKSET SALIN AKUSTIIKKAAN

Heijastimien vaikutusta salin akustiikkaan on mahdotonta ennustaa tarkasti, mutta ymmärrykseni mukaan nämä nopeat varhaiset heijastukset lisäisivät orkesterin sointiin kirkkautta, tilantuntua sekä lisäisivät äänikuvan läheisyyttä, eivätkä juuri muuttaisi salin havaittua jälkikaiuntaa. Toisin sanoen uudet varhaiset heijastukset balansoisivat salin vastetta ja aiempien tutkimustemme perustella uskon, että lisätyt varhaiset heijastukset tekisivät äänestä täyteläisemmän ja läheisemmän, silti heikentämättä äänen selkeyttä, päin vastoin äänen pitäisi selkeytyä fortissimoissa.

Heijastimien sijoittelua voidaan tarkastella akustiikan mallinnusohjelmistolla (Odeon 14.05) ja kuvassa 3 on esitetty rasteilla heijastimien tuottamat ensimmäisen kertaluvun heijastukset kuudesta eri lähdepisteestä. Kuvista nähdään, että heijastimet tuottavat aika kattavasti varhaisia heijastuksia permannon kaikkiin sektoreihin. Heijastimet myös lisäisivät varhaisia heijastuksia lavalle, joka olisi erittäin positiivista ja auttaisi soittajia kuulemaan sekä itsensä että toisensa entistä paremmin.

Odeon-ohjelmalla voidaan laskea huoneakustisia parametreja, mutta itse en usko niiden oikeellisuuteen kahdestakin syystä. Ensinnäkin käyttämäni malli ei ole kovin tarkka, mm.



Kuva 3: Heijastimien tuottamat ensimmäisen kertaluvun heijastukset kuudesta eri lähdepisteestä.

Taulukko 1: Huoneakustisten parametrien muutokset Odeon-simuloinneista keskiarvoina 6 lähdepisteestä 10 vastaanottopisteeseen permannolla (Heijastimilla - ilman heijastimia).

	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
EDT [s]	-0,1	-0,1	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
T20 [s]	-0,1	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Ts [ms]	-9,2	-9,8	-4,5	-4,9	-4,3	-4,1	-3,3	-1,1
C80 [dB]	0,5	0,4	0,3	0,4	0,4	0,3	0,3	0,2
LF(80)	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01

katon muoto on väärä. Toiseksi käyttämäni materiaalien absorptiokertoimet eivät vastaa todellisuutta, vaikka yritin arvata niitä parhaani mukaan. Näin ollen absoluuttisiin parametrien arvoihin ei voi luottaa, mutta suhteellista muutosta simuloinneilla on mahdollista tarkastella. Taulukossa 1 on esitetty muutamien huoneakustisten parametrien muutos heijastimien lisäyksen jälkeen. Nähdään, että heijastimien kanssa jälkikaiunta (EDT ja T20) ei muutu havaittavasti, äänen selkeys (C80, Ts) hieman paranee, koska varhaisen vasteen äänienergia kasvaa suhteessa jälkikaiuntaan. Lisäksi poikittaisen varhaisen äänienergian (LF(80)) osuus kasvaa vain hieman, mutta uskon että todellisuudessa muutos on merkittävämpi.

4 YHTEENVETO

Esitämäni läpinäkyvät roikkuvat elementit lisäävät Musiikkitalon permannon paikoille sivusta ja yläviistosta tulevia varhaisia heijastuksia. Tällaiset heijastukset tuovat aiempien tutkimustemme mukaan orkesterin sointiin kirkkautta ja läheisyyttä sekä välittävät yleisölle laajemman dynamiikan. Itse salin jälkikaiuntaan niillä ei pitäisi olla vaikutusta. Heijastimet eivät myöskään vaikuta parvella koettuun akustiikkaan. Heijastimet ovat erittäin kustannustehokkaita, eivät ole näköesteenä yhdellekään paikalle, voidaan tar-

vittaessa nostaa kattoon ja niitä voisi käyttää myös valaisimina. Luonnollisesti tässä esittämissäni havainnekuvissa on vain alustava muoto ja arkkitehtien kanssa pitäisi hakea heijastimille lopullinen muoto ja sijoituspaikat. Uskon vakaasti, että tällaiset heijastimet parantaisivat Musiikkitalon latteaa akustiikkaa havaittavasti ja ratkaisu on monistettavissa myös muihin viinitarhan muotoisiin konserttisaleihin, joissa kaikissa voi havaita samantyyppisiä akustisia puutteita kuin Musiikkitalossa.

Kiitokset Akukon Oy:lle, jolta sain Musiikkitalon Odeon-mallin.

VIITTEET

[1] J. Isopuro. Akustinen ufo Töölönlahdella. *Rondo Classic*, pages 40–44, April 2012.

[2] T. Lokki. Musiikkitalo on kuin suuri studio. *Rondo Classic*, pages 48–49, June 2012.

[3] T. Lokki and J. Pätynen. Architectural features that make music bloom in concert halls. *MDPI Acoustics*, 1(2):439–449, 2019.

[4] T. Lokki, S. Tervo, J. Pätynen, and A. Kuusinen. Musiikkitalon ison konserttisalin akustiikka. In *Akustiikkapäivät*, pages 225–230, Turku, Finland, May 22-23 2013. URL `http://www.akustinenseura.fi/images/stories/ap2013/ap2013_submission_15.pdf`.

[5] J. Pätynen and T. Lokki. The acoustics of vineyard halls, is it so great after all? *Acoustics Australia*, 43(1):33–39, 2015.

[6] T. Lokki, J. Pätynen, A. Kuusinen, and S. Tervo. Concert hall acoustics: Repertoire, listening position and individual taste of the listeners influence the qualitative attributes and preferences. *Journal of the Acoustical Society of America*, 140(1): 551–562, July 2016.

[7] J. Pätynen and T. Lokki. Concert halls with strong and lateral sound increase the emotional impact of orchestra music. *Journal of the Acoustical Society of America*, 139(3):1214–1224, March 2016.

[8] J. Pätynen and T. Lokki. Perception of music dynamics in concert halls. *Journal of the Acoustical Society of America*, 140(5):3787–3798, November 2016.

[9] T. Lokki, J. Pätynen, S. Tervo, S. Siltanen, and L. Savioja. Engaging concert hall acoustics is made up of temporal envelope preserving reflections. *Journal of the Acoustical Society of America*, 129(6):EL223–EL228, June 2011.

[10] J. Pätynen, S. Tervo, P. W. Robinson, and T. Lokki. Concert halls with strong lateral reflections enhance musical dynamics. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*, 111(12):4409–4414, 2014.

[11] E. Green and E. Kahle. Dynamic spatial responsiveness in concert halls. *MDPI Acoustics*, 1(3):549–560, 2019.

[12] A. Haapaniemi and T. Lokki. The preferred level balance between direct, early and late sound in concert halls. *Psychomusicology: Music, Mind, and Brain*, 25(3): 306–316, 2015.

ANOJANSSI –PROJEKTIN TULOKSET: YMPÄRISTÖMELUN HÄIRITSEVYYS

Valtteri Hongisto, Jenni Radun, Ville Rajala, Henna Maula, Jukka Keränen, Pekka Saarinen, Petra Virjonen, Jarkko Hakala

Turun ammattikorkeakoulu
Joukahaisenkatu 3
20520 Turku
valtteri.hongisto@turkuamk.fi

Tiivistelmä

Turun ammattikorkeakoulun akustiikkaryhmä toteutti vuosina 2016-2019 laajan julkisen tutkimusprojektin ”Anojanssi – Ympäristömelun häiritsevyyden mittaluvut”. Projektin tavoite oli saavuttaa tieteellisesti korkeatasoinen ymmärrys seuraaviin kysymyksiin. A. Miten pientalojen julkisivurakenteet eristävät pienitaajuista ääntä? B. Miten melun erityispiirteistä tulisi sanktioida subjektiivisen häiritsevyyden kannalta? C. Miten äänitaso ja yksilölliset ei-akustiset tekijät selittävät melun häiritsevyyttä asuinympäristöissä eri melulajeilla? D. Mitä vaikutuksia erityyppisillä melulajeilla on ihmiseen? Kysymykseen A vastattiin mittaamalla 26 pientalon ääneneristys. Kysymykseen B vastattiin toteuttamalla 7 psykoakustista laboratoriokoetta, joihin osallistui yli 250 tutkittavaa. Kysymykseen C vastattiin toteuttamalla asukaskysely teiden, murskaamojen ja tuulivoima-alueiden lähellä. Vastaajia saatiin yli 2000. Kysymykseen D saatiin vastaus laboratoriokokeesta, jossa 102 osallistujalta mitattiin eri melulajien fysiologisia, kognitiivisia ja subjektiivisia vaikutuksia. Artikkelissa esitetään päälöydöksiä kustakin osatutkimuksesta.

1 JOHDANTO

Ympäristömelun ohjearvot asuinympäristöissä [1,2,3] pyrkivät siihen, ettei melusta aiheutuisi merkittävää terveys- tai viihtyvyyshaittaa. Asunnon pihamaan ohjearvot huomioivat keskiäänitason, vuorokaudenajan, äänilähdetyypin ja äänen erityispiirteet. Erityispiirteistä tulee antaa sanktio *k* (*penalty, adjustment*), joka lisätään mitattuun keskiäänitasoon L_{Aeq} ennen ohjearvoon vertaamista. Makuuhuoneita koskevat myös pientaajuisen melun toimenpidearvot [2]. Melu voi silti häiritä, vaikka ohjearvot täyttyvät. Keskiäänitaso ei selitä hyvin äänen häiritsevyyttä. Yritykset ja viranomaiset tarvitsivat parempaa tietämystä, miten äänenlaatu ja ei-akustiset tekijät selittäisivät eri melulajien häiritsevyyttä. Projektin tavoite oli saavuttaa tieteellisesti korkeatasoinen ymmärrys neljään tiivistelmän pääkysymykseen. Näihin vastaamiseksi toteutettiin neljä työpakettia.

2 TYÖPAKETTI 1 – JULKISIVUN ÄÄNENERISTYS

Ympäristömelu L_{Aeq} asunnon sisätiloissa ei saisi ylittää 35 dB päiväaikaan ja 30 dB yöaikaan [1]. Tämän lisäksi pientaajuisen melun 20–200 Hz toimenpidearvot eivät saa ylittyä

© 2019 Valtteri Hongisto, Jenni Radun, Ville Rajala, Henna Maula, Jukka Keränen, Pekka Saa-rinen, Petra Virjonen, Jarkko Hakala. Tämä on avoimesti julkaistu teos, joka noudattaa Creative Commons NIMEÄ 4.0 Ei sovitettu –lisenssiä (CC BY 4.0). Teosta saa kopioida, levittää, näyttää ja esittää julkisesti ja siitä saa luoda johdannaisteoksia, kunhan tekijän nimi ja lähde mainitaan asianmukaisesti.

[2]. L_{Aeq} voidaan laskea taajuuksittain pihamaalle mutta asunnon sisäpuolisen L_{Aeq}:n laskenta vaatisi tietoa julkisivun ilmaääneneristävyydestä R. Koska R vaihtelee talokohtaisesti, on laskelmissa käytetty estimaattia siitä, mikä R vähintään yleensä on. Tämä tieto on otettu tanskalaisesta tutkimuksesta [4]. Suomalaisista julkisivuista ei ole vastaavaa tutkimusta. Lisäksi kansainvälisesti tieto puuttuu rakenteiden eristyskyvystä lähes kokonaan taajuuksien 20 Hz alapuolelta. Tavoitteena oli selvittää, miten pientalojen julkisivurakenteet eristävät pienitaajuista ääntä.

Rakennettiin 2 ihmisen kannateltavissa oleva infraäänikaiutin. Valittiin 13 pientaloa ja 26 julkisivurakennetta niin, että edustettuina oli kevyitä, raskaita, uusia ja vanhoja julkisivurakenteita. Mitattiin ilmaääneneristävyys standardin ISO 16283-3:2016 mukaan alueella 50–5000 Hz ja äänitasoero 5–200 Hz. Tuloksista johdettiin 84 % persentiili, joka kertoo arvon, joka ylittyi 84 % mitatuista suomalaisista pientaloista.

Äänitasoeron 84 % persentiili, eli DL_σ, on esitetty taulukossa 1. Yksityiskohtainen tutkimus [5] sisältää myös taajuusalueen 50–5000 Hz tulokset. Tuloksia voidaan hyödyntää arvioitaessa ympäristömelun äänenpainetaso asunnon sisätiloissa, kun taso tunnetaan pihamaalla taajuuksilla 5–200 Hz. Ympäristömelun äänenpainetaso sisällä saadaan vähentämällä DL_σ rakennuksen julkisivulla vallitsevasta ympäristömelun taajuuskaistoittaisista tasoista ilman julkisivun aiheuttamaa heijastusta. Saatava äänenpainetaso on yläarvio, sillä 84 % mitatuista julkisivuilla äänitasoero oli suurempi kuin DL_σ. Tuloksilla voidaan Suomessa korvata tähän asti käytetyt tanskalaiset arvot [4].

Taulukko 1. Suomalaisen pientalon julkisivun äänitasoeron alalikiarvo.

f [Hz]	5.0	6.3	8.0	10.0	12.5	16.0	20.0	25.0	31.5	40	50	63	80	100	125	160	200
DL_σ [dB]	5.5	5.7	5.9	6.2	6.6	7.1	7.6	8.3	9.2	10.3	11.5	13.0	14.8	16.8	18.8	21.1	22.8

3 TYÖPAKETTI 2 – PSYKOAKUSTISET LABORATORIOKOKEET

Työpaketin tavoitteena oli selvittää, miten melun erityispiirteistä tulisi sanktioida, jotta se vastaisi subjektiivista häiritsevyyden kokemusta. Projektissa toteutettiin 7 psykoakustista koetta. Koe 1 käsitteli kapeakaistaisuutta, koe 2 amplitudimodulaatiota, kokeet 3 ja 4 tiemelun spektriä, koe 5 kapeakaistaisuutta yhdistettynä erilaisiin spektreihin ja koe 6 impulssimaisuutta. Koe 7 sisälsi ääniä kaikista erityispiirretyypeistä, jolloin kunkin erityispiirteen sanktiointitarpeita voidaan verrata keskenään. Tässä käsitellään kokeet 1, 2 ja 6, koska niistä on julkaisuja ja kyseiset erityispiirteet ovat keskeisimpiä.

3.1 Kapeakaistamelu

Suomalainen melulainsäädäntö [1,2,3,6] sisältää vakiosanktioita 3, 5 ja 6 dB kapeakaistamelulle. Kapeakaistamelu (tonaalinen tai ääneksiä sisältävä melu) tarkoittaa, että äänessä on selvästi erottuva yksittäinen tai useampi taajuus. Standardin ISO 1996-2:2007 mukaan sanktio riippuisi ääneksen taajuudesta f_T ja ääneksen erotettavuudesta A_T (spektripiikin korkeudesta), jolloin vakiosanktio ei olisi perusteltu. Standardi esittää suoraviivaisen ja toimivan menetelmän kapeakaistaisuuden mittaamiseksi FFT-spektristä. Sen sijaan standardin sanktiomallin tieteelliset perusteet ovat löyhät: kirjallisuudessa ei ole tutkimuksia siitä, mistä tekijöistä kapeakaistamelun sanktio riippuu etenkin hiljaisilla äänitasoilla (alle 50 dB L_{Aeq}). Tämä on sanktioinnin kannalta olennaisin, koska korjatut arvot voivat vaikuttaa tulosten tulkintaan. Tavoitteena oli määrittää, miten f_T ja A_T vaikuttavat

kapeakaistamelun sanktioon, kun L_{Aeq} on 25 dB tai 35 dB.

Sanktion riippuvuus eri f_T ja A_T arvoista on esitetty kuvassa 1a. Sanktio oli korkeimmillaan jopa 12 dB. Tämä tapahtui suurilla f_T-arvoilla. Vakiosanktiointia on vaikea perustella. Esimerkiksi pienillä f_T-arvoilla sanktiota ei havaittu, vaikka A_T oli suuri. Yksityiskohtaista tietoa antavat viitteet [7, 8].

3.2 Amplitudimoduloitu melu

Tuulivoimalamelu on usein amplitudimoduloitua (AM). AM tarkoittaa, että äänessä on jaksollista voimakkuuden vaihtelua, jolloin äänen havaitseminen helpottuu ja tämä voi lisätä häiritsevyyttä. AM äänellä tärkeimmät ominaisuudet ovat modulaatiotaajuus f_m (vaihtelun nopeus) ja modulaatiosyvyys D_m (vaihtelun voimakkuus). Tuulivoimalamelun asetusta [3] valmisteltaessa keskusteltiin, tulisiko AM:sta asettaa sanktio mutta asetukseen ei tullut tästä mainintaa. Sama tilanne on muissa maissa. Sanktiota on vaikea perustella tieteellisen näytön vähyyden vuoksi. Tavoitteena oli määrittää, miten f_m ja D_m vaikuttavat AM:n äänen sanktioon, kun L_{Aeq} on 35 dB.

Sanktion riippuvuus eri f_m ja D_m arvoista on esitetty kuvassa 1b. Sanktio oli korkeimmillaan 12 dB. Vakiosanktiointia on vaikea perustella, koska alhaisilla f_m arvoilla sanktiota ei havaittu, vaikka D_m oli suuri. Tuloksista voidaan myös arvioida tuulivoimamelun sanktio, kun f_m ja D_m tunnetaan. Yksityiskohtaista tietoa antaa viite [9].

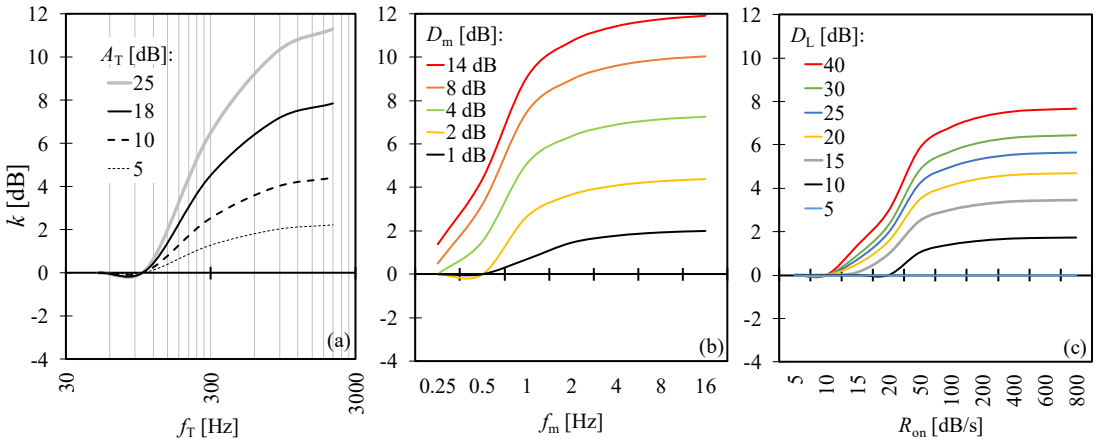
3.3 Impulssimelu

Suomalainen melulainsäädäntö [1,2,3,6] sisältää vakiosanktioita 3, 5 ja 10 dB impulssimelulle. ISO 1996-1:2016 mukaan sanktio on 5 tai 12 dB. Arvot perustuvat laajoihin ampumamelun tutkimuksiin 80- ja 90-luvuilta [10]. Nordtest [11] esittää toimivan menetelmän impulssimaisuuden mittaamiseksi äänisignaalista. Impulssilla on kaksi ominaisuutta: nousunopeus (*onset rate*) R_{on} [dB/s] ja tasoero (*level difference*) D_L [dB]. Edellinen kuvaa impulssin terävyyttä ja jälkimmäinen sen voimakkuutta. Impulssi rekisteröidään, kun nousunopeus ylittää 10 dB/s. Tämän kriteerin voi täyttää mm. ohiajava auto tai tuulivoimalan AM ääni. Jostain syystä tasoerolle ei ole kriteeriä. Nordtest esittää myös sanktion arviointimallin: sanktio riippuu R_{on} ja D_L arvoista. Sanktiomallin tieteelliset perusteet ovat löyhät. Tavoitteena oli määrittää, miten R_{on} ja D_L vaikuttavat impulssimelun sanktioon, kun L_{Aeq} on 55 dB ja verrata havaintoja Nordtest-mallin ennustamaan sanktioon.

Sanktion riippuvuus eri R_{on} ja D_L arvoista on esitetty kuvassa 1c. Sanktio oli korkeimmillaan 8 dB. Vakiosanktiointia on vaikea perustella. Nordtestin malli antoi suurempia sanktioarvoja kuin tuloksemme, kun $R_{on} \geq 200$ dB/s. Yksityiskohtaista tietoa antaa viite [12].

3.4 Työpaketin 2 johtopäätökset

Työpaketissa tehdyt kokeet ovat kansainvälisesti ottaen ainutlaatuisia ja uraa uurtavia: aiemmin ei ole tehty lainsäädäntöä näin suoraan hyödyttäviä psykoakustisia kokeita. Tuloksia voidaan hyödyntää mahdollisten sanktiomenettelyjen kehittämisessä tulevaisuudessa, meluntorjunnassa sekä myös tuotekehityksessä. Tuloksilla pyritään vaikuttamaan standardisointiin. Tätä kautta on mahdollista, että tulokset vaikuttavat joskus mittausmenetelmiin ja lainsäädäntöön. Tuloksia voidaan soveltaa oikeuskäsittelyissä, joissa on arvioitava melun erityispiirteistä aiheutuvaa häiriötä ohjearvoja yksityiskohtaisemmin.



Kuva 1. (a) Kapeakaistamelun sanktion riippuvuus ääneksen taajuudesta f_T ja ääneksen erottuvuudesta A_T. (b) Amplitudimoduloidun äänen sanktion riippuvuus modulaatiotaajuudesta f_m ja modulaatiosyvyydestä D_m. (c) Impulssimelun sanktion riippuvuus nousunopeudesta R_{on} ja tasoerosta D_L. Käyrät perustuvat sovituskaavoihin, joilla psykoakustisissa kokeissa 1, 2 ja 6 saadut sanktioarvot voitiin ennustaa ±2 dB tarkkuudella.

4 TYÖPAKETTI 3 – ÄÄNIYMPÄRISTÖ ASUINYMPÄRISTÖISSÄ

Tavoitteena oli selvittää, miten äänitaso ja yksilölliset ei-akustiset tekijät selittävät melun häiritsevyyttä asuinympäristöissä eri ympäristömelun lajeilla. Tutkimuksessa pyrittiin saamaan vähintään 200 vastaajaa kutakin äänilajia kohti. Tähän päästiin 3 melulajin kohdalla. Erityisintressinä oli määrittää kunkin äänilajin *annosvastesuhde* käyttäen samanlaista melun häiritsevyyden kysymystä. Annosvastesuhde kertoo, kuinka suuri osa väestöstä kokee melun erittäin häiritsevänä eri L_{Aeq} arvoilla.

1	2	3	4	5
Ääni ei kuulu	Kuuluu muttei häiritse	Häiritsee jonkin verran	Häiritsee melko paljon	Häiritsee erittäin paljon

Kuva 2. Melun häiritsevyyttä sisällä koskevan kysymyksen vastausasteikko. Vastaukset sijoitettiin jatkuvalle 4-portaiselle asteikolle 0–100 % niin, että vastaukset 1 ja 2 saivat arvon 12.5, vastaus 3 arvon 37.5, vastaus 4 arvon 62.5 ja vastaus 5 arvon 87.5. Tähän sovitettiin polynomifunktio. Melun erittäin häiritseväksi kokeneiden osuus (%HA) laskettiin siitä, kuinka suuri osa vastaajista sijoittui polynomimallissa rajan 72 % yläpuolelle.

4.1 Tieliikennemelu

Yhteensä 3077 taloutta 18 eri asuinalueelta kutsuttiin tutkimukseen. Mukana oli asukkaita pientaloista ja kerrostaloista sekä moottoriteiden, keskinopeiden teiden ja kaupunkiteiden varsilta. Kyselyyn vastasi 834 asukasta (vastausaste 27 %). Tieliikennemelu pihamaalla mallinnettiin liittämällä rakennusten julkisivujen korkeimmat L_{Aeq} arvot kyselyvastauksiin. Melun häiritsevyyttä sisätiloissa mitattiin kysymyksellä ”*Kuinka häiritsevinä koet tieliikenteen äänet sisällä kotonasi?*” Vastausasteikko sekä melun erittäin häiritseväksi kokeneiden osuuden (%HA, *percentage of highly annoyed*) laskentamenetelmä on esitetty kuvassa 2.

Tieliikennemelun annosvastesuhde on kuvassa 3. %HA käyrä lähtee nousemaan vasta,

kun L_{Aeq} pihalla ylittää 60 dB. %HA ei ylitä 15:ttä %, vaikka L_{Aeq} pihalla ylittää 70 dB. Vyöhykkeellä 70–75 dB tulokseen liittyy epävarmuuksia, koska vastaajia oli vain 12. Kaikkien kyselymuuttujien perusteella tehdyn logistisen regressioanalyysin perusteella tiemelun häiritsevyys sisällä oli todennäköisempää, jos henkilö oli huolestunut tiemelun terveysvaikutuksista, tieliikennemelun äänitaso oli korkeampi, jos henkilö kärsii yleisesti univaikeuksista, henkilö asui pientalossa eikä kerrostalossa, henkilö oli huolestunut yleensä tieliikenteen terveysvaikutuksista tai henkilö ei luottanut viranomaisiin. Lisätietoja antaa viite [13].

4.2 Murskaamomelu

Yhteensä 683 taloutta 5 toiminnassa olevan kivimurskaamon läheltä (alle 2 km) kutsuttiin tutkimukseen. Kyselyyn vastasi 197 asukasta (vastausaste 29 %). Kunkin murskaamon äänitehotaso määritettiin toiminnan aikana mittauksin. L_{Aeq} pihamaalla määritettiin mallintamalla. Rakennusten julkisivujen korkeimmat L_{Aeq} arvot liitettiin kyselyvastauksiin. Murskaamomelun häiritsevyyttä sisätiloissa mitattiin kysymyksellä ”*Kuinka häiritsevinä koet kivimurskaamon äänet sisällä kotonasi?*” Vastausasteikko on esitetty kuvassa 2.

Murskaamomelun annosvastesuhde on kuvassa 3. %HA käyrä lähtee nousemaan, kun L_{Aeq} pihalla ylittää 40 dB. %HA pysyy 15 % alapuolella, kun L_{Aeq} pihamaalla on ohjearvon 55 dB tuntumassa. Vyöhykkeellä 50–55 dB tulokseen liittyy epävarmuuksia, koska vastaajia oli vain 14. Lisätietoja antaa viite [14].

4.3 Tuulivoimalamelu 1

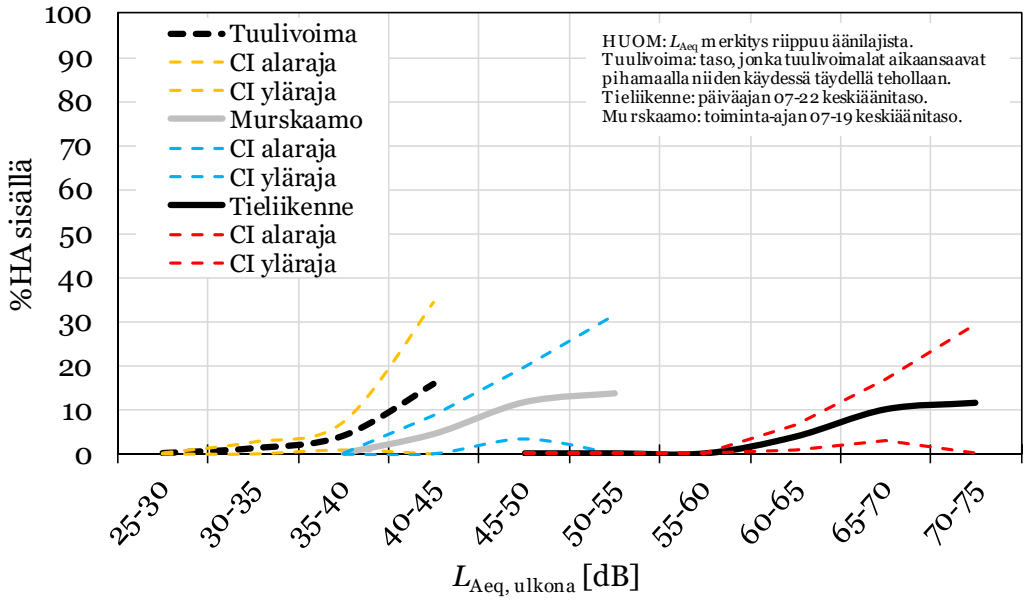
Tutkimuksen tavoitteena on määrittää tuulivoimamelun annosvastesuhde sekä sen häiritsevyyteen liittyviä ei-akustisia tekijöitä. Yhteensä 753 taloutta kolmen toiminnassa olevan tuulivoima-alueen läheltä (alle 2 km) kutsuttiin tutkimukseen. Kysymykseen melun häiritsevyydestä vastasi 400 asukasta (vastausaste 57 %). Tuulivoimaloiden äänitehotaso määritettiin kullekin voimalatyypille erikseen. L_{Aeq} pihamaalla määritettiin mallintamalla. Rakennusten julkisivujen korkeimmat äänitasot liitettiin kyselyvastauksiin. Tuulivoimamelun häiritsevyyttä sisätiloissa mitattiin kysymyksellä ”*Kuinka häiritsevinä koet tuulivoimaloiden äänet sisällä kotonasi?*” Vastausasteikko on esitetty kuvassa 2.

Tuulivoimalamelun annosvastesuhde on kuvassa 3. %HA käyrä lähtee nousemaan, kun L_{Aeq} pihalla ylittää 35 dB. %HA saavuttaa arvon 15 %, kun L_{Aeq} pihamaalla ylittää 40 dB. Vyöhykkeellä 40–45 dB tulokseen liittyy epävarmuuksia, koska vastaajia oli vain 15. Kyselymuuttujien perusteella tehdyn logistisen regressioanalyysin perusteella tuulivoimalamelu sisällä koettiin todennäköisemmin häiritseväksi, jos henkilö oli huolestunut tuulivoimalamelun terveysvaikutuksista, henkilö asui Peittoossa eikä Olhavassa tai Märynummella, henkilön meluherkkyys oli suurempi, henkilö oli nainen tai asenne tuulienergiaa kohtaan oli negatiivinen. Lisätietoja antavat viitteet [15,16].

4.4 Tuulivoimamelu 2

Tuulivoiman läheisyyden on väitetty vaikuttavan negatiivisesti terveyteen. Aihetta on tutkittu Suomessa kerran [17], eikä siinä havaittu yhteyttä tuulivoiman läheisyyden ja terveysoireiden välillä. Tutkimuksessa oli alle 2.5 km säteellä tuulivoimaloista vain 378 vastaajaa eikä kyseisen vyöhykkeen sisällä tehty analyysiä äänialtistusvyöhykkeittäin. Tavoitteena oli selvittää, onko tuulivoimaloiden äänitasolla yhteyttä häiritsevyyteen, terveyteen ja hyvinvointiin. Toteutimme ympäristöepidemiologisen kyselytutkimuksen

kolmen tuulivoima-alueen lähellä asuvien parissa (900–2700 m). Kontrolliryhmä sijaitsi yli 8 km päässä mistään tuulivoimalasta. Kysely lähetettiin 3051 asukkaalle. Vastauksia saatiin kontrolliryhmästä 118 ja tuulivoimaloiden läheltä 558. Vastausaste oli 22.2 %. Äänitaso mallinnettiin pihamaalle käyttäen valmistajan ilmoittamia äänitehotasoja, jotka oli varmistettu emissiomittauksin. . Rakennusten julkisivujen korkeimmat äänitasot liitettiin kyselyvastauksiin. Kysely oli 10-sivuinen ja se kartoitti hyvin laajasti asukkaan terveydentilaa, elintapoja, elämänlaatua (WHO-QOL BREF), terveysoireita ja eri melulajeista koettua häiritsevyyttä ja unen häiriintymistä. Kyselyn tarkoitus oli peitetty asuinympäristökyselyksi eikä siitä voinut päätellä, että se koskee nimenomaan tuulivoimaa. Vastaajat tuulivoima-alueelta jaettiin 3 tuulivoimaryhmään: <25 dB (N=151), 25-30 dB (N=321) ja 30-36 dB (N=86). Tuloksia ei ole vielä julkaistu.



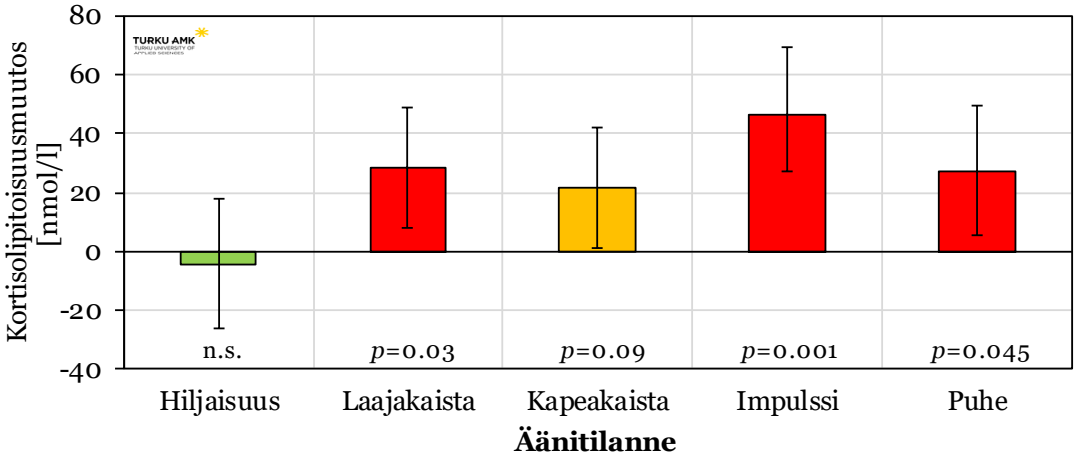
Kuva 3. Eri äänilajien annosvastesuhteet sekä näiden 95 % luottamusvälit (CI-katkoviivat). Vaaka-akselilla esitetään keskiäänitaso rakennuksen äänekkäimmällä sivulla ja pystyakselilla melusta erittäin paljon häiritsevyyttä raportoivien osuus. Mitä suurempi arvo on, sitä suurempaa osuutta vastanneista kyseinen äänitaso häiritsi erittäin paljon.

Työpaketin 3 johtopäätökset. Eri äänilajien annosvastesuhteet jouduttiin määrittämään eri äänitasovyöhykkeillä, koska lainsäädäntö on vaikuttanut siihen, minkälaisille äänitasoille ylipäätään saa altistua. Tästä johtuen tuulivoimalamelusta ei ole tutkimustietoa 45 dB:n yläpuolelta ja murskaamoista 55 dB:n yläpuolelta. Erittäin häiritseväksi melun kokevien osuus sisällä alkoi poiketa nollasta tuulivoimalamelun tapauksessa, kun L_{Aeq} ylitti 35 dB. Murskaamomelun tapauksessa poikkeaminen alkoi 40 dB:stä ja tieliikennemelun tapauksessa vasta 60 dB:stä. Työpaketin 2 psykoakustisten kokeiden perusteella uskaltaa väittää, että näin suuret erot eivät selity pelkästään äänen psykoakustisista ominaisuuksista vaan häiritsevyyteen voisivat vaikuttaa myös ei-akustiset tekijät. Tulokset aikaansaatiin samanlaisella kysymyksellä ja vastausasteikolla, joten tulosten pitäisi olla äänilajien osalta vertailukelpoisia. 11-portaisella vastausasteikolla %HA-arvot olivat murskaamo- ja tieliikennemelulla selvästi suurempia kuin kuvassa 3 [13,14]. Eri tutkimusten annosvastesuhteita ei kannata ehkä vertailla vakavasti, jos niissä on käytetty eri vastausasteikkoja.

5 TYÖPAKETTI 4 – MELUN VAIKUTUKSET

Tavoitteena oli selvittää, mitä vaikutuksia erityyppisillä melulajeilla on ihmiseen. Tutkimuksessa tarkasteltiin melun vaikutuksia fysiologisiin ja psykologisiin vasteisiin ja suoriutumiseen. Erityisesti oltiin kiinnostuneita akuuteista fysiologisista stressihormonivasteista, joiden tuloksia esitetään tässä. Laboratoriokokeeseen rekrytoitiin viisi noin 20 tutkittavan ryhmää, yhteensä 102 tutkittavaa. Kukin ryhmä altistettiin erilaisille äänitilanteille. Äänitilanteet olivat hiljaisuus (laajakaistaääni 35 dB L_{Aeq}), laajakaistaääni (65 dB), kapeakaistaääni (65 dB), impulssiääni (65 dB) sekä puheääni (65 dB). Koko koe kesti keskimäärin 3 h 20 min. Koska kortisolipitoisuus laskee voimakkaasti aamupäivällä, koe toteutettiin iltapäivisin aina samaan aikaan. Tutkittavilta mitattiin veriplasman kortisolipitoisuus kuusi kertaa kokeen aikana. Äänialtistuksen aikana tehtiin erilaisia työmuistitehtäviä ja se kesti 50 min. Yksilöiden välisen vaihtelun takia tarkasteltiin kortisolipitoisuuden muutosta äänitilanteessa suhteessa lepotilanteeseen. Näin saatua kortisolipitoisuuden muutosta verrattiin muilla ääniryhmillä hiljaisuusryhmän arvoihin.

Kortisolitason muutos lepotilanteeseen nähden on esitetty kuvassa 4. Odotusten mukaan hiljaisuudessa kortisolitaso ei muuttunut merkitsevästi lepotilanteeseen nähden. Koska tämä vastaa tilannetta ilman mitään äänialtistusta (hiljaisuus), muiden äänitilanteiden muutoksia voidaan verrata siihen. Kortisolipitoisuus oli merkitsevästi suurempi äänitilanteissa laajakaistamelu, impulssimelu ja puhemelu kuin hiljaisuudessa. Kapeakaistamelun kohdalla ero hiljaisuuteen oli lähes merkitsevä. Tutkimus on ainutlaatuinen, koska se sisälsi useita äänilajeja kattaen kaikki tärkeimmät melun erityispiirteet. Lähes kaikilla äänillä voitiin havaita akuutteja fysiologisia stressivaikutuksia. Tulokset vaikuttavat merkittävästi käsitykseemme melun vaikutuksista ihmiseen. Lisätietoja antaa viite [18].



Kuva 4. Pylväät kertovat kortisolipitoisuuden muutoksen lepotilanteeseen nähden eri äänitilanteissa. Viikset kertovat muutoksen 95 % luottamusvälin kaikkien tutkittavien osalta. Muutos lepotilanteeseen nähden oli tilastollisesti merkitsevä, jos $p<0.05$.

KIITOKSET

Anojanssi-projektia rahoittivat Business Finland, Turun ammattikorkeakoulu, Ympäristöministeriö, Sosiaali- ja terveysministeriö sekä yhteistyöyritykset.

Viitteet

[1] Valtioneuvoston päätös 993/1992 melutason ohjearvoista, 29.10.1992, Helsinki.

[2] Sosiaali- ja terveysministeriön asetus 545-2015 asunnon ja muun oleskelutilan olosuhteista. 23.4.2015, Helsinki.

[3] Valtioneuvoston asetus 1107/2015 tuulivoimaloiden ulkomelutason ohjearvoista.

[4] Danish Ministry of the Environment (2011). Order No. 1284, Copenhagen, Denmark.

[5] Keränen, J., Hongisto, V., Hakala, J. (2019). The sound insulation of façades at frequencies 5–5000 Hz. Build. Environ. 156 12–20.

[6] Ympäristöministeriön asetus 796-2017 rakennuksen ääniympäristöstä

[7] Oliva, D., Hongisto, V., Haapakangas, A. (2017). Annoyance of low-level tonal sounds - factors affecting the penalty, Build. Environ. 123 404–414.

[8] Hongisto, V., Saarinen, P., Oliva, D. (2019). Annoyance of low-level tonal sounds – A penalty model. Appl. Acoust. 145 358–361.

[9] Hongisto, V., Virjonen, P. (2019). Annoyance penalty of amplitude-modulated sound. Paper 976. Proc. 23rd Int. Congress on Acoustics ICA 2019, Aachen, Germany.

[10] Rice, C. G. (1996). Human response effects of impulse noise. J. Sound Vib. 190(3) 525–543.

[11] Nordtest (2002). NT ACOU 112:2002 – Acoustics – Prominence of impulsive sounds and for adjustment of LAeq. Approved 2002-05, Taastrup, Denmark.

[12] Rajala, V., Hongisto, V. (2019). Annoyance of impulsive sounds – a psychoacoustic experiment involving synthetic sounds. Paper 530. Proc. 23rd Int. Congress on Acoustics ICA 2019, 9-13 Sep, Aachen, Germany.

[13] Maula, H., Hongisto, V., Saarinen, P. (2019). Tieliikennemelun häiritsevyys elinympäristöissä eri äänitasoilla. Akustiikkapäivät 2019. 28-29.10, Oulu, Akustinen Seura ry.

[14] Maula, H., Hongisto, V., Keränen, J., Saarinen, P. (2019). Murskaamomelun häiritsevyys elinympäristöissä. Akustiikkapäivät 2019. 28-29.10, Oulu, Akustinen Seura ry.

[15] Hongisto, V., Keränen, J., Oliva, D. (2017). Indoor noise annoyance due to 3–5 MW wind turbines. An exposure-response relationship. J. Acoust. Soc. Am. 142 2185–2196.

[16] Radun, J., Hongisto, V., & Suokas, M. (2019). Variables associated with wind turbine noise annoyance and sleep disturbance. Build. Environ. 150 339–348.

[17] Turunen, A., Tiittanen, P., Lanki, T. (2016). Meluhaittojen kokeminen ja oireilu yhdeksällä tuulivoima-alueella Suomessa. Ympäristö- ja Terveys-lehti 5 76-81.

[18] Radun, J., et al. (2019). Eri tyyppisten äänten fysiologiset, psykologiset ja suoriutumisvaikutukset. Akustiikkapäivät 2019. 28-29.10, Oulu, Akustinen Seura ry.

AMPLITUDIMODULOIDUN ÄÄNEN HÄIRITSEVYYS JA SANKTIO

Valtteri Hongisto ja Petra Virjonen

Turun ammattikorkeakoulu Osakeyhtiö
Lemminkäisenkatu 14-18 B
20520 Turku
valtteri.hongisto@turkuamk.fi

Tiivistelmä

Amplitudimoduloitu (AM) ääni on voimakkuudeltaan sykkivää ääntä. AM:n äänen ominaisuuksia ovat modulaatiotaajuus f_m [Hz] ja modulaatiosyvyys D_m [dB]. Tavoitteenamme oli määrittää AM:n äänen häiritsevyyssanktio. Psykoakustiseen kokeeseen osallistui 40 tutkittavaa. Kukin arvioi 92 äänen häiritsevyyden asteikolla 0–10. Riippumattomat muuttujat olivat f_m (7 tasoa, 0.25–16 Hz), D_m (5 tasoa, 1–14 dB), ja spektri (2 vaihtoehtoa). Kaikki AM äänet soitettiin tasolla 35 dB L_{Aeq}. Sanktio määritettiin moduloimattomien vertailuäänten häiritsevyyden avulla. Vertailuäänet soitettiin tasoilla 29–49 dB. Kaikki äänet olivat synteettisiä ja luotu laajakaistaisesta kohinasta. Tulosten perusteella f_m, D_m ja spektri vaikuttivat AM:n äänen häiritsevyyteen. Suurin vaikutus oli kahdella ensin mainitulla. Sanktiot vaihtelivat 0 ja +12 dB välillä. Tuloksia voidaan hyödyntää mm. sanktiomenettelyjen kehittämisessä.

1 TAVOITE

Meluohjearvot sisältävät vakiosanktioita 3 ja 10 dB:n väliltä impulssi- ja kapeakaistamelua koskien. Sanktio k [dB] lisätään mitattuun keskiäänitasoon L_{Aeq} [dB], jolloin lopputuloksen arvioidaan heijastavan paremmin äänen häiritsevyyttä kuin pelkästään L_{Aeq}.

Amplitudimoduloitu (AM) ääni on voimakkuudeltaan sykkivää ääntä. AM:n ominaisuuksia kuvataan mm. modulaatiotaajuudella f_m [Hz] ja modulaatiosyvyydellä D_m [dB]. Edellinen kertoo, miten nopeasti ääni sykkii ja jälkimmäinen miten voimakasta sykintä on. AM:ta esiintyy meren aalloissa, sykkivässä tieliikennemelussa, tuulivoimaloissa, turbulenttisessa ilmanvaihdon äänessä ja hidaskäyntisissä moottoreissa. Kaksi tutkimusta [1,2] ehdottavat, että tuulivoimaloiden AM ääni edellyttäisi sanktiointia.

Aikaisemmat AM:n äänen häiritsevyyttä koskeneet psykoakustiset kokeet [3,4,5,6,7] viittaavat, että häiritsevyys kasvaa, kun tietty D_m arvo ylitetään. Suurin osa kokeista koski spesifisti tuulivoimalaääntä. Koska AM:a ääntä esiintyy myös muualla kuin tuulivoimaloissa, on tärkeää selvittää AM:n äänen häiritsevyyttä geneerisesti. Tavoitteenamme oli määrittää jaksollisen AM:n häiritsevyyssanktio eri f_m ja D_m arvoilla ja kahdella spektrillä.

© 2019 Valtteri Hongisto, Petra Virjonen. Tämä on avoimesti julkaistu teos, joka noudattaa Creative Commons NIMEÄ 4.0 Ei sovitettu –lisenssiä (CC BY 4.0). Teosta saa kopioida, levittää, näyttää ja esittää julkisesti ja siitä saa luoda johdannaisteoksia, kunhan tekijän nimi ja lähde mainitaan asianmukaisesti.

2 MENETELMÄT

Toteutimme psykoakustisen laboratoriokokeen, johon osallistui 40 vapaaehtoista (keskiikä 27 vuotta, 28 naista). Riippumaton muuttuja oli ääni ja riippumattomat muuttujat äänekkyys (*loudness*) ja häiritsevyys (*annoyance*). Tässä tutkimuksessa käsitellään vain jälkimmäistä. Kukin tutkittava arvioi 92 äänen häiritsevyyden ISO/TS 15666 mukaista 11-portaista asteikkoa käyttäen (0 Ei lainkaan, 10 Erittäin häiritsevä). Äänet koostuivat AM:sta äänistä ja vertailuäänistä. Vertailuääniä tarvittiin sanktion määrittämiseen. AM:t äänet muodostettiin kolmen muuttujan permutaatioina: f_m (7 tasoa, 0.25–16 Hz), D_m (5 tasoa, 1–14 dB), ja spektri (2 vaihtoehtoa). Yhteensä AM:ja ääniä oli 70 ja ne soitettiin tasolla 35 dB L_{Aeq}. Vertailuäänissä ei ollut AM:ta. Ne soitettiin 2 dB välein tasoilla 29–49 dB L_{Aeq} kummallakin spektrillä.

Äänet tuotettiin synteettisesti (Matlab). Ensin luotiin spektrit S1 ja S2 laajakaistakohinasta. Spektri S1 vastasi tuulivoimaääntä ja S2 tieliikenneääntä (Kuva 1a). Nämä kohinat toimivat kantoaaltoina AM äänille. Modulaatioindeksi m määritellään yhtälöllä

$$m = \frac{10^{Dm/20}-1}{10^{Dm/20}+1} \quad . \tag{1}$$

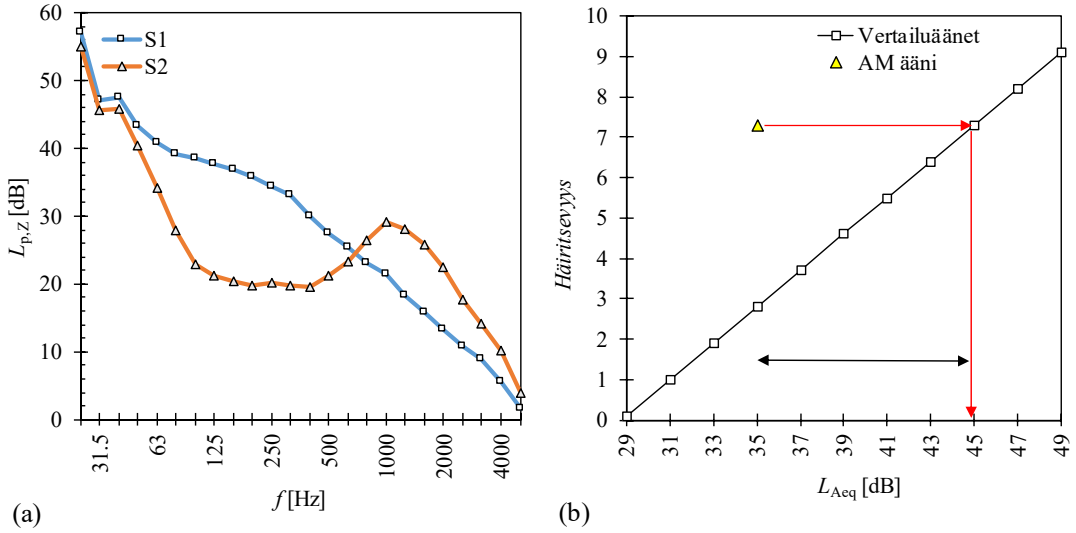
Kantoaalto kerrottiin aika-avaruudessa funktiolla Q

$$Q(m,t) = 1 + m \cdot \sin(2\pi f_m t) \tag{2}$$

jolloin sinimuotoinen AM saatiin aikaan. Aika t [s] oli diskreetti

$$t = (0, 1, 2, \dots, n_s - 1)\frac{1}{f_s}, \tag{3}$$

missä n_s on näytteiden lukumäärä ja f_s [Hz] on näytteistystaajuus (44.1 kHz).

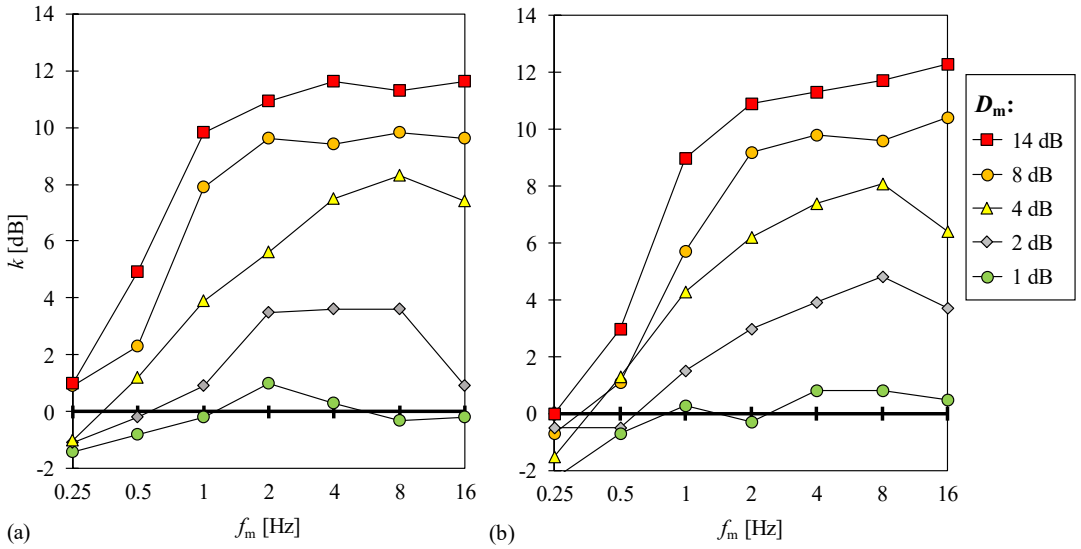


Kuva 1. (a) Spektrien S1 ja S2 painottamaton äänenpainetaso, $L_{p,Z}$, taajuuden f funktiona. (b) AM äänen häiritsevyyssanktion k määritysperiaate. Käyrässä esitetään 40 vastaajan häiritsevyyskeskiarvo vertailuäänillä. Sanktion määrityksen esimerkkinä on AM ääni, jonka ominaisuudet olivat S1, D_m=8 dB ja f_m=8 Hz.

Koetta varten luotiin 20 sekunnin pituisia ääninäytteitä. Kutakin ääntä toistettiin, kunnes henkilö oli arvioinut sen. Äänet esitettiin terssikaistoilla 20–5000 Hz. Äänet soitettiin tutkittaville kuulokkeilla. Ennen koetta äänten ominaisuudet mitattiin yksitellen, jotta ne vastasivat muuttujien (L_{Aeq}, spektri, D_m, ja f_m) tavoitearvoja. Mittaukset tehtiin keinopäällä. Koe toteutettiin Turussa keväällä 2017 Hilja -huoneessa, jossa taustaäänitaso on 21 dB L_{Aeq}. Koe koostui 12 vaiheesta. (1) Suostumuslomakkeen täyttö. (2) Alkukysely. (3) Kuulokykytesti. Kaikki olivat normaalikuuloisia. (4) Ääniin totuttelu. (5) Äänekkyyden arviointiharjoittelu. (6) Äänekkyyden arviointi joko spektrin S1 tai S2 äänille. (7) Äänekkyyden arviointi toisen spektrin äänille. (8) Lyhyt tauko. (9) Häiritsevyyden arviointiharjoittelu. (10) Häiritsevyyden arviointi joko spektrin S1 tai S2 äänille. (11) Häiritsevyyden arviointi toisen spektrin äänille. (12) Palaute ja 20 euron lahjakortin luovutus.

AM:n äänen sanktio määritettiin kuvan 1b menetelmällä. Menetelmä on kehitetty viitteissä [8] ja [9]. Sanktio k AM:lle äänelle saatiin määrittämällä vertailuäänen taso L_{Aeq}, jolla saavutettiin yhtä korkea häiritsevyys. Muuttujien vaikutus häiritsevyyteen määritettiin ANOVAlla. Analyysi perustui 35 vastaajaan, joilla normaalijakaumaehdot täytettiin.

3 TULOKSET



Kuva 2. Häiritsevyyssanktio k modulaatiotaajuuden f_m ja modulaatiosyvyyden D_m funktiona. (a) Spektri S1. (b) Spectri S2.

ANOVAlla havaittiin tilastollisesti merkitsevä vaikutus häiritsevyyteen spektrillä (p<0.003), modulaatiotaajuudella (p<0.001) ja modulaatiosyvyydellä (p<0.001).

Sanktiot kaikille AM:lle äänille on esitetty kuvassa 2. Suurin sanktio oli peräti 12 dB. Se havaittiin suurimmalla D_m arvolla ja f_m arvoilla 4–16 Hz. Sanktiot k > 1.5 dB olivat tilastollisesti merkitseviä. Tätä pienemmillä sanktioilla äänen häiritsevyys ei poikennut merkitsevästi 35 dB:n vertailuäänen häiritsevyydestä. Sanktio kasvoi systemaattisesti, kun f_m kasvoi arvosta 0.25 Hz arvoon 2 Hz. Alueella 2–16 Hz, sanktion riippuvuus f_m:sta on pienempi. Havaitsimme myös negatiivisia sanktioita, kun f_m oli pieni. Jotkut niistä olivat tilastollisesti merkitseviä. Pientaajuinen modulaatio muistuttaa meren aaltoja. Luontoon viittaavat äänet koetaan usein miellyttäviksi. Spektrin vaikutus sanktioon oli silmämääräisesti katsoen vähäinen vaikka tilastollisesti merkitsevä.

Tutkimus on ensimmäinen, jossa selvitetään näin laajan f_m ja D_m arvojoukon vaikutuksia AM äänen häiritsevyyteen ja sanktioon. Hafke-Dys ym. [4] tutkivat f_m ja D_m vaikutusta häiritsevyyteen. Tuloksemme tukivat viitettä [4]. Sanktioita he eivät kuitenkaan laskeneet.

4 JOHTOPÄÄTÖKSET

Määritimme psykoakustisen kokeen avulla sanktion *k* desibeleinä, joka voidaan lisätä amplitudimoduloidun äänen keskiäänitasoon L_{Aeq}, jolloin saatava korjattu äänitaso (*rating level*) kertoo paremmin äänen häiritsevyydestä kuin L_{Aeq} yksinään. Sanktio määritettiin 7x5 kokoiselle modulaatiotaajuuden ja -syvyyden matriisille. Sanktiot ylsivät jopa 12 dB:n arvoon kun nykyiset impulssi- ja kapeakaistamelun sanktiot meluohjearvoissa ovat korkeintaan 10 dB. Tuloksemme hyödyttävät amplitudimoduloidun äänen häiritsevyyden arvioinnissa ja mahdollisissa sanktiomenettelyjen kehityspyrkimyksissä.

KIITOKSET

Tutkimus oli osa Anojanssi-projektia, jota rahoittivat Business Finland, Turun ammattikorkeakoulu, Ympäristöministeriö, Sosiaali- ja terveysministeriö sekä yhteistyöyritykset.

VIITTEET

[1] Lotinga MJB, Perkins RA, Berry B, Grimwood CJ, Stansfeld SA (2017). A review of the human exposure-response to amplitude-modulated wind turbine noise: health effects, influences on community annoyance, methods of control and mitigation. Proc. of 12th ICBEN Congress on Noise as a Public Health Problem, June 18-22, Zurich, Switzerland.

[2] Hansen KL, Zajamsek B, Hansen CH (2018). Towards a reasonable penalty for amplitude modulated wind turbine noise. Acoust Aust. 46(1):21–25.

[3] Lee S, Kim K, Choi W, Lee S (2011). Annoyance caused by amplitude modulation of wind turbine noise. Noise Con Eng J. 59(1):38–46.

[4] Hafke-Dys H, Preis A, Kaczmarek T, Biniakowski A, Kleka P (2016). Noise annoyance caused by amplitude modulated sounds resembling the main characteristics of temporal wind turbine noise Arch Acoust 41(2):221–232.

[5] Ioannidou C, Santurette S, Jeong C-H (2016). Effect of modulation depth, frequency, and intermittence on wind turbine noise annoyance. J Acoust Soc Am 139(3):1241–1251.

[6] Schäffer B, Schlittmeier SJ, Pieren R, Heutschi K, Brink M, Graf R, Hellbrück J (2016). Short-term annoyance reactions to stationary and time-varying wind turbine and road traffic noise: A laboratory study. J Acoust Soc Am. 139(5):2949–2963.

[7] Schäffer B, Pieren R, Schlittmeier S, Brink M (2018). Effects of Different Spectral Shapes and Amplitude Modulation of Broadband Noise on Annoyance Reactions in a Controlled Listening Experiment. Int J Environ Res Publ Health 15(5):E1029.

[8] Oliva D, Hongisto V, Haapakangas A (2017). Annoyance of low-level tonal sounds – Factors affecting the penalty. Build Environ 123:404–414.

[9] Hongisto V, Saarinen P, Oliva D (2019). Annoyance of low-level tonal sounds – A penalty model. Appl Acoust 145:358-361.

TIELIIKENNEMELUN HÄIRITSEVYYS ELINYMPÄRISTÖSSÄ ERI ÄÄNITASOILLA

Henna Maula, **Valtteri Hongisto**, **Pekka Saarinen**

Turun ammattikorkeakoulu
Lemminkäisenkatu 14-18 B
20520 Turku
henna.maula@turkuamk.fi

Tiivistelmä

Tutkimuksen tavoitteena on määrittää tieliikennemelun annosvastesuhde. Se kertoo, kuinka suuri osa väestöstä kokee melun erittäin häiritsevänä eri äänitasoilla. Annosvastesuhde määritettiin 5 dB äänitasovyöhykkeillä väliltä 40─80 dB $L_{Aeq07\text{-}22}$. Tutkimuksen toisena tavoitteena on selvittää vaikuttaako vastaajan asunnon talotyyppi tai melua aiheuttava tietyyppi annosvastesuhteeseen. Yhteensä 3070 taloutta 18 eri asuinalueelta Etelä- ja Lounais-Suomesta kutsuttiin tutkimukseen. Kyselyyn vastasi 833 asukasta (vastausaste 27,1 %). Tieliikennemelu mallinnettiin ja rakennusten julkisivujen korkeimmat äänitasot liitettiin kyselyvastauksiin. Yli 50 % vastaajista koki tieliikennemelun ulkona erittäin häiritsevänä äänitasovyöhykkeellä [70─75) dB. Talo- tai tietyypillä ei ollut vaikutusta annosvastesuhteeseen tieliikennemelun ollessa alle 65 dB. Äänitasovyöhykkeellä [65 ─70) dB tieliikennemelusta erittäin paljon häiriintyneiden osuus oli suurempi keskinopean tien varrella (nopeusrajoitus v = 60─80 km/h) kuin kaupunkitien ($v \leq 50$ km/h) tai moottoritien varrella ($v \geq 100$ km/h) asuvilla. Vastaavasti omakotitalossa asuvien joukossa oli suhteessa enemmän tieliikennemelusta erittäin paljon häiriintyneitä kuin kerrostalossa asuvien joukossa. Tuloksilla voidaan osittain selittää sitä, miksi tieliikennemelun kokemisessa on havaittu alueellisia eroja.

1 JOHDANTO

Ympäristömelu on yksi vakavimmista ympäristösaasteista. Melun keskeisin terveysvaikutus on melun häiritsevyys. Ylivoimaisesti suurin ympäristömelulähde on tieliikenne [1]. Ympäristöministeriön mukaiset ympäristömelun ohjearvot ovat asuinalueiden pihamailla päiväsaikaan 55 dB ($L_{Aeq07\text{-}22}$) ja yöaikaan 50 dB ($L_{Aeq22\text{-}07}$, uusilla alueilla 45 dB $L_{Aeq22\text{-}07}$) [2]. Äänitason vaikutusta melun häiritsevyyteen kuvataan annosvastesuhteella (*dose─response relationship*) [3]. Annosvastesuhteet ovat kuitenkin eronneet toisistaan merkittävästi eri tutkimuksissa, mitä ei ole osattu kovin hyvin selittää [4, 5].

Asuinalueella saattaa olla vaikutusta tieliikennemelun annosvastesuhteeseen. Kaupungissa asuvien on havaittu olevan vähemmän häiriintyneitä moottoritiemelusta kuin esikaupungissa tai maaseudulla asuvien [6]. Lisäksi tietyyppi saattaa vaikuttaa tieliikennemelun annosvastesuhteeseen, sillä tieliikennemelun taajuusjakauma on erilainen eri tietyypeillä (kaupunkitie vs. moottoritie) ja kaupunkiteillä liikennevalot aiheuttavat äänitasossa usein voimakkaampaa vaihtelua kuin moottoriteillä [7]. Asuintalon talotyypillä saattaa niin

© 2019 Henna Maula, Valtteri Hongisto ja Pekka Saarinen. Tämä on avoimesti julkaistu teos, joka noudattaa Creative Commons NIMEÄ 4.0 Ei sovitettu –lisenssiä (CC BY 4.0). Teosta saa kopioida, levittää, näyttää ja esittää julkisesti ja siitä saa luoda johdannaisteoksia, kunhan tekijän nimi ja lähde mainitaan asianmukaisesti.

ikään olla vaikutusta melun kokemiseen, koska pientaloasukkaat viettävät enemmän aikaa pihamaalla kuin kerrostaloasukkaat. Moottoritien lähellä asuvien on havaittu olevan ulkona häiriintyneempiä tieliikennemelusta kuin kaupungissa asuvien ja vastaavasti pientalossa asuvien on havaittu olevan ulkona tieliikennemelusta häiriintyneempiä kuin kerrostalossa asuvien [8]. Tutkimuksen [8] aineisto on kuitenkin asunto- ja talotyypin suhteen vino. Suurin osa kaupungissa asuvista vastaajista asui kerrostalossa ja suurin osa moottoritien varrella asuvista vastaajista asui omakotitalossa. Talo- ja tietyypin vaikutusta tieliikennemelun annosvastesuhteeseen tulisi tutkia aineistolla, missä vastaajia on tasaisesti eri talotyypeissä kaupunki- ja moottoritien varrella.

Tutkimuksen tavoitteena on määrittää tieliikennemelun annosvastesuhde, eli kuinka suuri osa väestöstä kokee melun erittäin häiritsevänä eri äänitasoilla. Toisena tavoitteena on selvittää annosvastesuhteet eri tietyyppien varrella ja kerros- ja pientaloissa.

2 MENETELMÄT

Tutkimus toteutettiin elinympäristöissä tapahtuvien kyselytutkimusten muodossa kesällä 2017. Tutkimukseen valittiin 18 asuinalueesta Etelä- ja Lounas-Suomesta 3070 taloutta, joiden pihamaalla altistutaan tieliikennemelulle ($L_{Aeq07\text{-}22}$) 40 dB ja 80 dB väliltä. Asuinalueet ja vastaavat taloudet valittiin siten, että eri talotyypit (kerrostalo, omakotitalo ja rivitalo/paritalo) olivat mahdollisimman tasaisesti edustettuina kaupunkitien ($v \leq 50$ km/h, 4 asuinaluetta) ja moottoritien ($v \geq 100$ km/h, 6 asuinaluetta) varrella mahdollisimman laajalla äänitasoalueella (40−75 dB $L_{Aeq07\text{-}22}$). Lisäksi tutkimukseen otettiin mukaan 8 pientaloaluetta keskinopean tien (v = 60─80 km/h) varrelta. Valinta tehtiin julkisten meluselvitysten pohjalta selainpohjaisia karttoja ja satelliittikuvia hyödyntäen.

Saatekirje, nelisivuinen kyselylomake sekä vastauslähetyskuori lähetettiin postitse yhdelle taloudessa asuvalle täysi-ikäiselle henkilölle. Vastaajien osoitetiedot tilattiin Väestörekisterikeskukselta (VRK). Kyselyn vastaanottaja satunnaistettiin VRK:n toimesta iän ja sukupuolen suhteen. Kyselyyn oli mahdollista vastata joko suomenkielisellä paperilomakkeella tai internetissä. Internet -kysely oli suomeksi, ruotsiksi ja englanniksi.

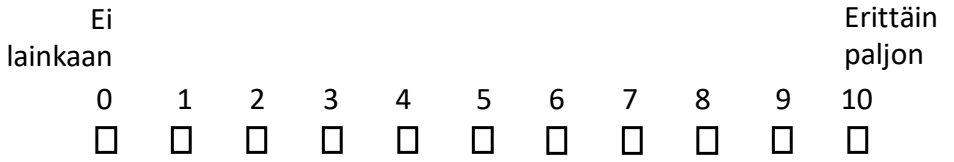
Eri ympäristömelulajien sekä naapuruston äänien häiritsevyyttä tiedusteltiin kyselyssä sekä ulko- että sisätiloissa. Häiritsevyyden lisäksi kyselyllä selvitettiin erinäisiä taustatietoja, kuten vastaajan ikä, sukupuoli, kuulokyky ja meluherkkyys. Lisäksi selvitettiin erilaisia asuinympäristöön liittyviä tekijöitä, vastaajan stressiä sekä koettua melun vaikutusta nukkumiseen. Tässä julkaisussa käsitellään tieliikennemelun häiritsevyyttä. Sitä tiedusteltiin kahdella kysymyksellä (taulukko 1, kuva 1).

Annosvastesuhteiden määrittämiseksi vastaajan asuinrakennuksen julkisivulle mallinnettiin tieliikenteen melutasot ($L_{Aeq07\text{-}22}$) ja julkisivun korkein melutaso yhdistettiin kyselyvastaukseen. Mallinnukset tehtiin CadnaA melumallinnusohjelmalla hyödyntäen Maanmittauslaitoksen kartta- ja korkeustietokantoja. Maastokartan tarkkuutta teiden lähellä parannettiin tarvittaessa manuaalisesti. Kunkin alueen kokonaisliikennemäärät ja raskaan liikenteen osuudet tilattiin liikennevirastolta tai asuinalueen kaupungilta. Melumallinnuksessa käytettiin yhteispohjoismaista tieliikennemelun laskentamallia [9].

Kysymysten 1 ja 2 kohdalla käytettiin ISO 15666 standardin mukaista 11-portaista numeerista asteikkoa [10]. Aineisto skaalattiin välille 0-100 ja annosvastesuhde laskettiin käyttäen 72 % leikkauspistettä [3].

Taulukko 1. Tieliikennemelun häiritsevyyttä koskeneet kysymykset ja vastausasteikot.

Kysymys	1. **Kuinka paljon seuraavat äänet häiritsevät, vaivaavat tai ärsyttävät sinua ollessasi sisällä kotonasi?** Ajattele tilannetta viimeisten 2 viikon ajalta. a. Tieliikenteen äänet	2. **Kuinka paljon seuraavat äänet häiritsevät, vaivaavat tai ärsyttävät sinua ollessasi ulkona kotisi pihalla, parvekkeella tai terassilla?** Ajattele tilannetta viimeisten 2 viikon ajalta. a. Tieliikenteen äänet



Kuva 1. Taulukon 1 kysymysten 1 ja 2 vastausasteikko. Melu katsottiin erittäin häiritseväksi, jos vastaaja valitsi vaihtoehdon 8, 9 tai 10.

Annosvastesuhteiden eroja analysoitiin myös tilastollisin menetelmin (IBM SPSS Statistics for Windows, Versio 20.0, IBM Corporation, Armonk, NY, USA) käyttäen joko Mann-Whitney U-testiä tai Wilcoxon testiä. Analyyseissä käytettiin 95 % luottamusväliä. Tilastollisesti merkitsevän muutoksen rajana oli $p<.05$.

3 TULOKSET JA POHDINTA

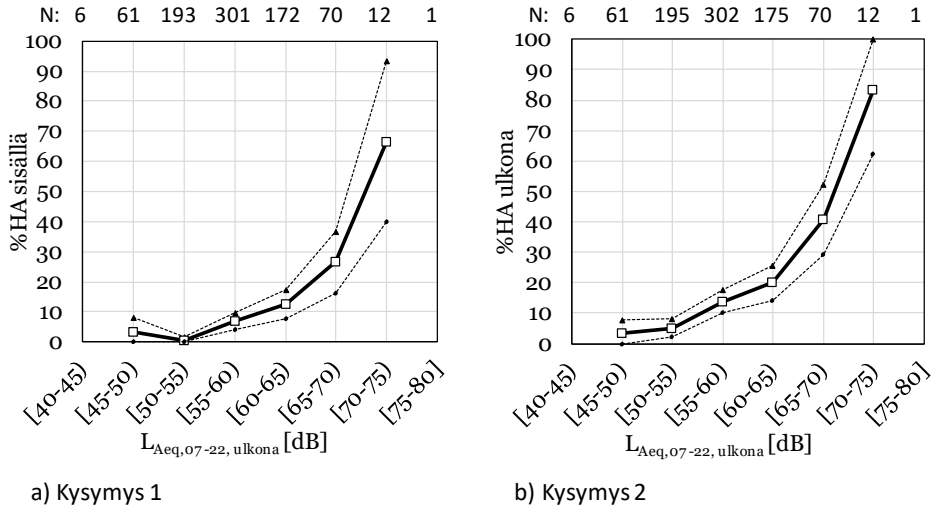
Vastaajia saatiin 833 (vastausaste 27,1 %). Vastaajien määrät eri talo- ja tietyypeittäin on esitetty taulukossa 2. Annosvastesuhteet koskien kysymyksiä 1 ja 2 on esitetty kuvassa 2.

Tieliikennemelun koki erittäin häiritseväksi ulkona 5% ja sisällä 2% vastaajista, kun tieliikenteen äänitaso pihamaalla alitti päiväohjearvon 55 dB.

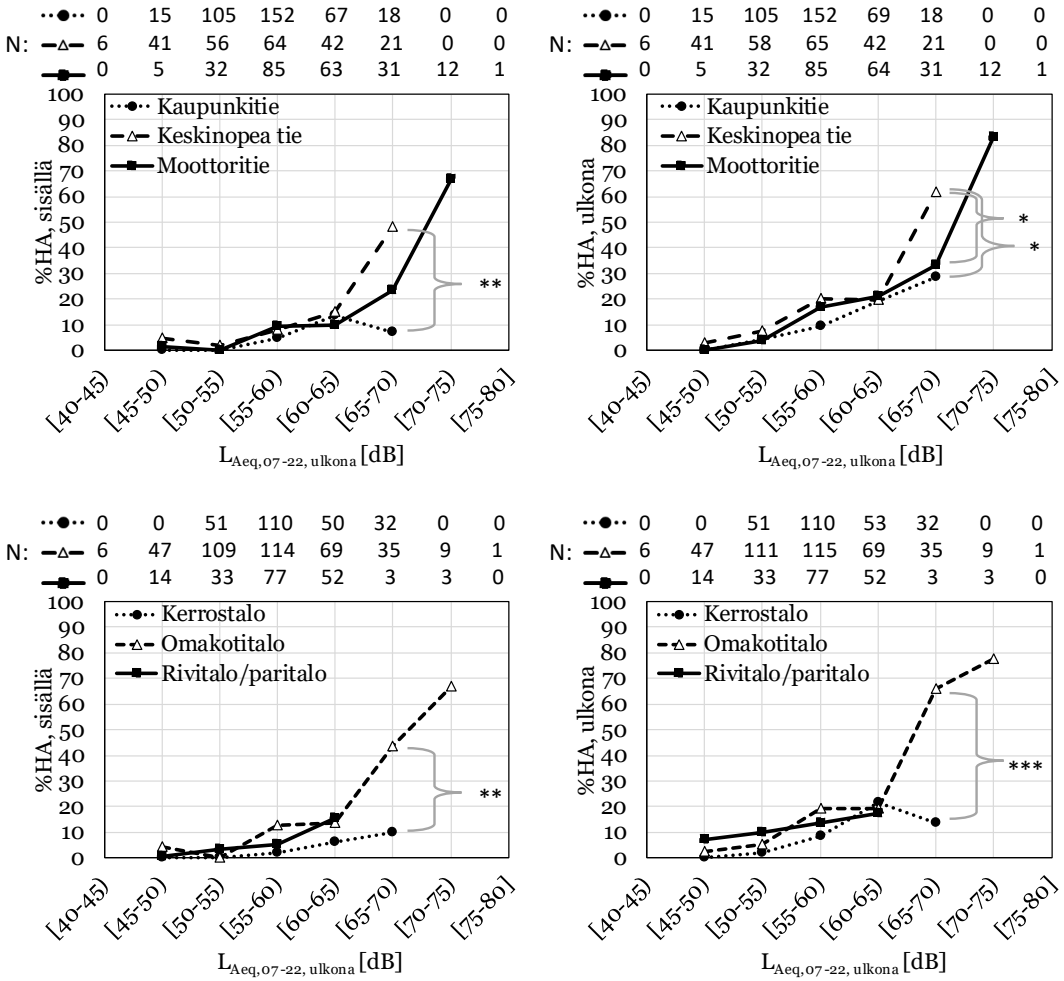
Annosvastesuhteet tie- ja asuntotyypeittäin on esitetty kuvassa 3. Tietyyppi tai asuintalon tyyppi eivät vaikuttaneet annosvastesuhteeseen, kun tieliikenteen äänitaso pihamaalla alittaa 65 dB. Tätä suuremmilla tieliikenteen äänitasoilla melusta erittäin häiriintyneitä oli suhteessa eniten keskinopean tien varrella tai omakotitalossa asuvilla (kuva 3).

Taulukko 2. Vastaajien määrät eri talo- ja tietyypeittäin.

Tietyyppi	Talotyyppi			
	Kerrostalo	Omakotitalo	Rivitalo / paritalo	Yhteensä
Kaupunkitie (v ≤ 50 km/h)	171	89	106	366
Keskinopea tie (v = 60–80 km/h)	2	193	37	232
Moottoritie (v ≥ 100 km/h)	82	114	39	235
Yhteensä	255	396	182	833



Kuva 2. Tieliikennemelun häiritsevyyden annosvastesuhde taulukon 1 kysymyksiin. %HA on tieliikennemelun erittäin häiritseväksi kokevien osuus. 95% luottamusväli on merkitty katkoviivoin. N on vastaajamäärä kussakin äänitasovyöhykkeessä.



Kuva 3. Tieliikennemelun häiritsevyyden annosvastesuhde eri tie- ja talotyypeillä. %HA tarkoittaa tieliikennemelusta erittäin paljon häiritsevyyttä kokevien osuutta. N on vastaajamäärä. Tilastolliset merkitsevyydet: *p<0.05, **p<0.01, ***p<0.001.

4 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tieliikennemelun häiritsevyyttä asuinympäristössä eri meluvyöhykkeillä (40─80 dB, $L_{Aeq07\text{-}22}$) tutkittiin annosvastesuhteen avulla. Näyttäisi siltä, että tieliikennemelua ei koeta sisätiloissa häiritsevänä, kun äänitaso ulkona alittaa ympäristöministeriön mukaisen enimmäisarvon 55 dB päiväaikaan. Vaikuttaisi siltä, että tietyypillä ja asuintalon tyypillä on vaikutusta annosvastesuhteeseen, kun tieliikenteen äänitaso pihamaalla ylittää 65 dB. Tuloksilla voidaan osittain selittää sitä, miksi tieliikennemelun annosvastesuhteissa on havaittu suuria eroja eri tutkimusten/alueiden kesken.

5 KIITOKSET

Tutkimus on osa ANOJANSSI –projektia, jota rahoittavat mm. Business Finland, Turun ammattikorkeakoulu, Ympäristöministeriö, Sosiaali- ja terveysministeriö sekä yhteistyöyritykset.

VIITTEET

[1] Liikonen L, Leppänen P, Altistuminen ympäristömelulle Suomessa – Tilannekatsaus 2005, Suomen ympäristö 809, ympäristöministeriö, Helsinki, 2005.

[2] Valtioneuvoston päätös 993/1992 melutason ohjearvoista, 29.10.1992, Helsinki. http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/1992/19920993

[3] European Communities, Position paper on Dose response relationships between transportation noise and annoyance. ISBN 92-894-3894-0, European Communities, 2002

[4] Schultz, T.J. (1978). Synthesis of social surveys on noise annoyance, J. Acoust. Soc. Am. 104(6), 3432-3445.

[5] Fidell, S., Barber, D. S. and Schultz T. J. (1991). Updating a dosage-effect relationship for the prevalence of annoyance due to general transportation noise. J. Acoust. Soc. Am. 89(1), 221-233.

[6] Lercher P., Greve B., Botteldooren D. and Rüdisser J. (2008). A comparison of regional noise-annoyance-curves in alpine areas with the European standard curves. in Proceedings of the 9th International Congress on Noise as a Public Health Problem (ICBEN).

[7] Hongisto V, Oliva D, Rekola L, Subjective and objective rating of the sound insulation of residential building façades against road traffic noise. The Journal of the Acoustical Society of America 144(2):1100-1112. 2018. DOI:10.1121/1.5051647

[8] Fryd J. and Pedersen H. (2016). Noise Annoyance from Urban Roads and Motorways. In Proceedings of the inter-noise 2106, Hamburg.

[9] Road traffic noise. Nordic prediction method. TemaNord 1996:525, Nordic Council of Ministers, Kööpenhamina, 1996.

[10] ISO/TS 15666 Acoustics – Assessment of noise annoyance by means of social and socio-acoustic surveys. International Organization for Standardization, Genève, 2003.

MURSKAAMOMELUN HÄIRITSEVYYS ELINYMPÄRISTÖSSÄ

Henna Maula, Valtteri Hongisto, Jukka Keränen, Pekka Saarinen

Turun ammattikorkeakoulu
Lemminkäisenkatu 14-18 B
20520 Turku
henna.maula@turkuamk.fi

Tiivistelmä

Tutkimuksen tavoitteena on määrittää murskaamojen aiheuttaman ympäristömelun annos-vastesuhde, eli kuinka suuri osa väestöstä kokee melun erittäin häiritsevänä eri äänitasoilla. Annosvastesuhde määritettiin 5 dB äänitasovyöhykkeillä väliltä 30─55 dB L_{Aeq}. Tutkimukseen sisältyi 5 kivimurskaamoa. Kyselyyn kutsuttiin vastaamaan alle 2 km etäisyydellä murskaamoista sijaitsevia vakituisia asukkaita. Kyselyyn vastasi 197 asukasta (vastausaste on 28,8 %). Murskaamomelu mallinnettiin pihamaille ja äänitasot liitettiin kyselyvastauksiin. Murskaamomelua ei koettu erittäin häiritsevänä sisätiloissa tai pihamaalla, kun äänitaso pihamaalla alitti 40 dB. Erittäin häiritseväksi melun koki 44 % sisätiloissa ja 72 % ulkotiloissa. kun äänitaso pihamaalla oli 50–55 dB.

1 JOHDANTO

Kiviainestuotanto (myöh. murskaamo) aiheuttaa toimintansa aikana merkittävän melupäästön, joka voi erottua sopivissa olosuhteissa satojen metrien päähän. Murskaamot sijoitetaan siten, että ympäristöministeriön päätöksen 993/1992 ohjearvot täyttyvät: asuinalueiden pihamailla päiväsaikaan 55 dB ($L_{Aeq07-22}$) ja yöaikaan 50 dB ($L_{Aeq22-07}$, uusilla alueilla 45 dB). Murskaustoimintaa tehdään taloudellisista syistä mahdollisimman lähellä käyttökohteita ja hyviä tieverkostoja. Mikäli asutusta on alle 500 metrin etäisyydellä, tulee toiminnan noudattaa Valtioneuvoston asetuksen 800/2010 aikarajoja.

Melun keskeisin terveysvaikutus on melun häiritsevyys. WHO:n mukaan melun häiritsevyys on herkkä melun haittojen ja terveysvaikutusten indikaattori. Äänitason ja melun häiritsevyyden yhteyttä kuvataan annosvastesuhteella (*dose─response relationship*). Annosvastesuhteita on määritetty liikennemelulle [1] mutta ei murskaamomelulle.

Kiviainestuotantolaitoksessa syntyy melua eri työvaiheiden ajalta ainakin seitsemästä eri toiminnasta; porauksesta, räjäytyksestä, louhinnasta, rikotuksesta, murskauksesta, generaattorin käytöstä ja kiviainesta kuljettavista työkoneista. Murskausvaiheen melu soveltuu parhaiten asuinympäristöjen melukyselytutkimuksiin, sillä se on jatkuvaa ja työvaiheista pitkäkestoisin. Ulkomaisessa tutkimuksessa on havaittu äänitasoltaan alle 60 dB L_{Aeq} rakennusmelun häiritsevyyden olevan yhtäläinen riippumatta onko kyseessä melu yksittäisestä lähteestä (esimerkiksi rikkojasta, puskutraktorista tai kaivurista) tai ääniyhdistelmästä

© 2019 Henna Maula, Valtteri Hongisto, Jukka Keränen ja Pekka Saarinen. Tämä on avoimesti julkaistu teos, joka noudattaa Creative Commons NIMEÄ 4.0 Ei sovitettu –lisenssiä (CC BY 4.0). Teosta saa kopioida, levittää, näyttää ja esittää julkisesti ja siitä saa luoda johdannaisteoksia, kunhan tekijän nimi ja lähde mainitaan asianmukaisesti.

(esimerkiksi rikkojasta sekä puskutraktorista tai rikkojasta sekä kaivurista) [2]. Tässä tutkimuksessa tarkasteltavat äänitasot ovat alle 60 dB L_{Aeq}, joten pelkän murskaustoiminnan melun tarkastelu kiviainestuotannon annosvastesuhteen määrittämiseen on perusteltua.

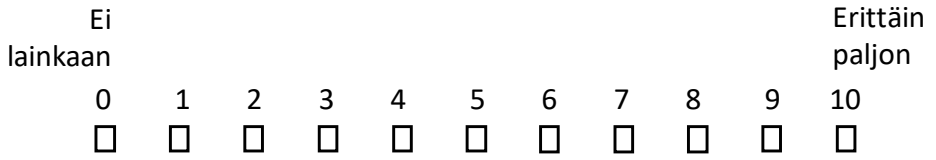
Tavoitteena on määrittää murskaamomelun annosvastesuhde, eli kuinka suuri osa väestöstä kokee melun erittäin häiritsevänä eri äänitasoilla.

2 MENETELMÄT

Tutkimus toteutettiin elinympäristöissä tapahtuvien kyselytutkimusten muodossa vuosina 2017-2019. Tutkimukseen päätyi 5 toiminnassa olevan kivimurskaamon lähellä (alle 2 km) sijaitsevat talviasuttavat asuinrakennukset. Saatekirje, nelisivuinen kyselylomake sekä vastauslähetyskuori lähetettiin postitse yhteensä 683 talouteen. Vastaajia saatiin 197 (vastausaste 28,8 %). Asuinrakennusten osoitteet haettiin Maanmittauslaitoksen ylläpitämästä karttapalvelusta. Kesämökkejä ei huomioitu, koska näissä vietetään aikaa erittäin vähän ja melun mahdolliset terveysvaikutukset jäävät talviasukkaita merkittävästi pienemmiksi. Kyselyyn oli mahdollista vastata joko kirjeessä olleella paperilomakkeella tai netissä. Murskaamomelun häiritsevyyttä tiedusteltiin kyselyssä sekä sisä- että ulkotiloissa (taulukko 1, kuva 1). Kysely oli 4-sivuinen sisältäen useita mittareita mutta tässä artikkelissa ei käsitellä kuin häiritsevyyttä.

Taulukko 1. Murskaamomelun häiritsevyyttä koskeneet kysymykset.

Kysymys	1. **Kuinka paljon seuraavat äänet häiritsevät, vaivaavat tai ärsyttävät sinua ollessasi <u>sisällä</u> kotonasi?** Ajattele tilannetta viimeisten 2 viikon ajalta. a. Kivimurskaamon äänet	2. **Kuinka paljon seuraavat äänet häiritsevät, vaivaavat tai ärsyttävät sinua ollessasi <u>ulkona</u> kotisi pihalla, parvekkeella tai terassilla?** Ajattele tilannetta viimeisten 2 viikon ajalta. a. Kivimurskaamon äänet



Kuva 1. Taulukon 1 kysymysten 1 ja 2 vastausasteikko. Melu katsottiin erittäin häiritseväksi, jos vastaaja valitsi vaihtoehdon 8, 9 tai 10.

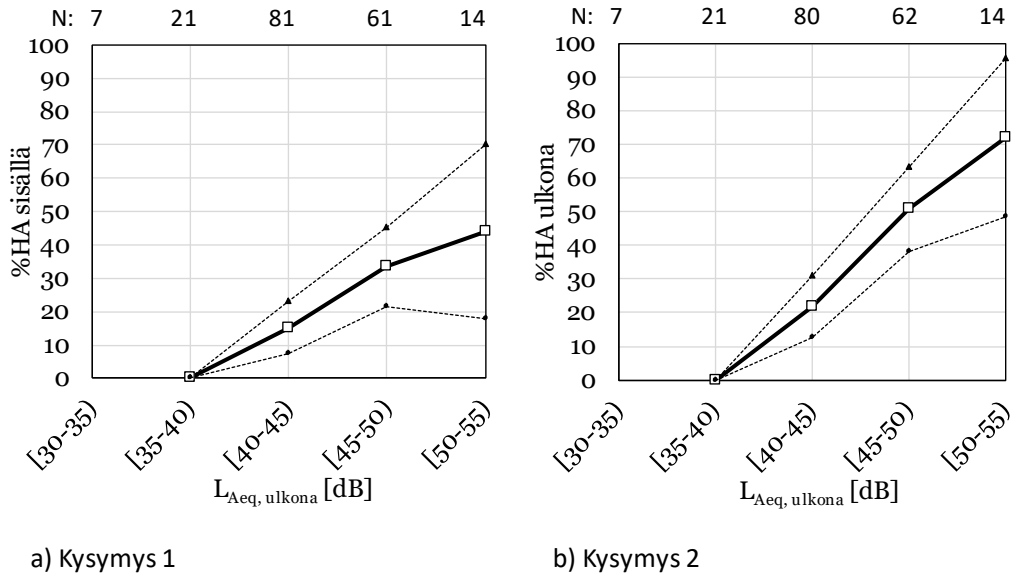
Annosvastesuhteiden määrittämiseksi vastaajan asuinrakennuksen julkisivulle mallinnettiin kiviaineksen murskausvaiheen äänitasot (L_{Aeq}) ja julkisivun korkein melutaso yhdistettiin vastaukseen. Mallinnukset tehtiin CadnaA melumallinnusohjelmalla hyödyntäen Maanmittauslaitoksen kartta- ja korkeustietokantoja. Murskauksen äänitehotaso määritettiin kussakin kohteessa erikseen toiminnan aikana. Melumallinnuksessa käytettiin yhteispohjoismaista laskentamallia [3]. Mallinnustuloksia verrattiin Turku AMK:n tekemiin melumittauksiin kullakin alueella. Murskaamoalueen maastokartan tarkkuutta parannettiin manuaalisesti perustuen melumittausten yhteydessä tehtyyn maaston kartoitukseen. Mallinnettu äänitaso vastaa äänitasoa, joka on murskaustoiminnan ollessa käynnissä. Ilta-ajan joutokäyntiä, ja siitä aiheutuvaa 1-2 dB vähennystä lakisääteiseen tasoon $L_{Aeq22\text{-}07}$ ei huomioitu.

Annosvastesuhde laskettiin melusta erittäin häiriintyneiden (%HA, percentage highly annoyed) mukaan. Kummankin kysymyksen 1 ja 2 kohdalla käytettiin ISO 15666 standardin mukaista 11-portaista numeerista asteikkoa [4]. Aineisto skaalattiin välille 0-100 ja annosvastesuhde laskettiin käyttäen 72 % leikkauspistettä [1]. Annosvastesuhdetta ei määritetty äänitasovyöhykkeelle [30-35) dB pienen vastaajamäärän ja tästä aiheutuvan epävarmuuden takia.

3 TULOKSET JA POHDINTA

Murskaamomelun annosvastesuhteet on esitetty kuvassa 2. Murskaamomelua ei koettu erittäin häiritsevänä sisätiloissa tai pihamaalla, kun äänitaso pihamaalla alitti 40 dB. Murskaamomelun koki erittäin häiritseväksi sisällä 16 % ja ulkona 22 % vastaajista murskaamomelun äänitason ollessa pihamaalla välillä [40-45) dB, ja sisällä 34 % ja ulkona 51 % pihamaan äänitason ollessa välillä [45-50) dB. Vastaavasti melun koki erittäin häiritseväksi sisällä 44 % ja ulkona 72 % vastaajista, kun murskaamomelu pihamaalla oli äänitasovyöhykkeellä [50-55) dB, mikä alittaa päiväohjearvon 55 dB. Kyseisellä äänitasovyöhykkeellä vastaajamäärä jäi kuitenkin vähäiseksi ja 95 % luottamusväli on suuri.

Äänimallinnukset tehtiin vain murskaustoiminnalle. Häiritsevyyskokemukset voivat johtua myös porauksesta tai räjäytyksien impulssiäänistä, joita mallinnettu äänitaso ei sisällä.



a) Kysymys 1 b) Kysymys 2

Kuva 2. Kiviaineksen murskaamomelun häiritsevyyden annosvastesuhde taulukon 1 kysymyksiin. %HA on melun erittäin häiritseväksi kokeneiden osuus. 95 % luottamusväli on merkitty katkoviivoin. Kuvan yläreunassa on vastaajien määrä (N) kussakin äänitasovyöhykkeessä.

4 JOHTOPÄÄTÖKSET

Kiviaineksen murskaamomelun häiritsevyyttä asuinympäristössä eri meluvyöhykkeillä (30─55 dB, L_{Aeq}) tutkittiin annosvastesuhteen avulla. Näyttäisi siltä, että murskaamomelua ei koeta sisätiloissa häiritsevänä, kun äänitaso ulkona alittaa 40 dB.

5 KIITOKSET

Tutkimus on osa ANOJANSSI –projektia, jota rahoittavat mm. Business Finland, Turun ammattikorkeakoulu, Ympäristöministeriö, Sosiaali- ja terveysministeriö sekä yhteistyöyritykset.

VIITTEET

[1] European Communities, Position paper on Dose response relationships between transportation noise and annoyance. ISBN 92-894-3894-0, European Communities, 2002

[2] Lee S.C., Hong J.Y and Jeon J.Y. (2015). Effects of acoustic characteristics of combined construction noise on annoyance. Building and Environment, Volume 92, pages 657-667.

[3] Road traffic noise. Nordic prediction method. TemaNord 1996:525, Nordic Council of Ministers, Kööpenhamina, 1996.

[4] ISO/TS 15666 Acoustics – Assessment of noise annoyance by means of social and socio-acoustic surveys. International Organization for Standardization, Genève, 2003

ERI TYYPPISTEN ÄÄNTEN FYSIOLOGISET, PSYKOLOGISET JA SUORIUTUMISVAIKUTUKSET

Jenni Radun[1], **Valtteri Hongisto**[1], **Henna Maula**[1], **Ville Rajala**[1], **Darin Al-Ramahi**[2], **Mika Scheinin**[2]

[1] Turun ammattikorkeakoulu
Lemminkäisenkatu 14-18 B,
20520 TURKU
etunimi.sukunimi@turkuamk.fi

[2] Turun yliopisto
Itäinen Pitkäkatu 4 B
20014 TURUN YLIOPISTO
darin.al-ramahi@utu.fi; mschein@utu.fi

Tiivistelmä

Tavoitteena oli tarkastella eri tyyppisten äänien vaikutusta ihmisen fysiologisiin stressivasteisiin, psykologiseen kokemukseen sekä tehtäväsuoriutumiseen. Neljän eri äänilajin vaikutusta tarkasteltiin ryhmien välisessä vertailussa (N=98). Ryhmien äänilajeina olivat laajakaistaääni, kapeakaistaääni, impulssiääni sekä puheääni. Äänet soitettiin 65 dB L_{Aeq} voimakkuudella ja altistus kesti noin 50 minuuttia. Viides äänilaji oli hiljaisuus (35 dB L_{Aeq}), johon muita äänitilanteita verrattiin. Koehenkilöiltä mitattiin psykologista kokemusta (häiritsevyys ja kuormittuminen), tehtäväsuoriutumista työmuistitehtävissä (sarjamuisti ja N-back) sekä fysiologisia stressivasteita (stressihormonit, verenpaine, sykevälivaihtelu). Impulssiäänen ja erityisesti puheäänen vaikutukset niin psykologisiin, fysiologisiin kuin suoriutumismittoihin olivat selkeimmät. Kuitenkin hiljaisuuteen verrattuna saimme kaikilla äänilajeilla näkyviin jonkun vaikutuksen fysiologisiin vasteisiin, joten kaikki äänilajit lisäävät kuormittumista.

1 JOHDANTO

Melu on terveydelle haitallista, epämiellyttäväksi koettua tai itselle tarpeetonta ääntä. Kohtuullisilla äänen voimakkuuksilla melu vaikuttaa ihmiseen lähinnä epäsuorasti häiritsevyyden kokemuksen kautta, johon saattaa liittyä myös stressireaktio [1]. Häiritsevyyttä lisäävät luonnollisesti äänen voimakkuuden kasvu mutta myös äänen sisältämä kapeakaistaisuus, impulssimaisuus ja informaatiosisältö. Akuutti altistuminen melulle onkin liitetty stressireaktioon, joka näkyy mm. autonomisen hermoston ja endokriinisysteemin aktivoitumisena [1]. Tämä tarkoittaa, että melulla voi olla sekä psykologisia että fysiologisia seurauksia. Näiden lisäksi melu voi häiritä suoriutumista, erityisesti tarkkuutta vaativissa kognitiivisissa tehtävissä [2].

© 2019 Jenni Radun, Valtteri Hongisto, Henna Maula, Ville Rajala, Darin Al-Ramahi, Mika Scheinin. Tämä on avoimesti julkaistu teos, joka noudattaa Creative Commons NIMEÄ 4.0 Ei sovitettu –lisenssiä (CC BY 4.0). Teosta saa kopioida, levittää, näyttää ja esittää julkisesti ja siitä saa luoda johdannaisteoksia, kunhan tekijän nimi ja lähde mainitaan asianmukaisesti.

Yleisesti tiedetään, että äänen voimakkuuden merkittävä korotus voi aiheuttaa akuutteja fysiologisia stressivasteita. Sen sijaan eri tyyppisten äänten vaikutusta on tutkittu systemaattisesti erittäin vähän. Suurin osa tutkimuksesta on keskittynyt äänen voimakkuuden tai puheen vaikutusten tutkimiseen. Vaikka impulssimaisesta ja kapeakaistaisesta ympäristömelusta sanktioidaan 5 dB niiden tuoman häiritsevyyslisän vuoksi (VnA 993/1992), ei näiden ääniominaisuuksien fysiologisista vaikutuksista tiedetä juuri mitään.

Tämän tutkimuksen tarkoituksena on tarjota systemaattinen laboratoriotutkimus koskien eri tyyppisten äänten vaikutuksia fysiologisiin ja psykologisiin vasteisiin sekä suoriutumiseen.

2 MENETELMÄT

Riippumaton muuttuja oli äänilaji. Äänilajeja olivat **laajakaistaääni**, **kapeakaistaääni**, **impulssiääni** ja **puheääni**, jotka esitettiin 65 dB L_{Aeq} tasolla, sekä verrokkina **hiljaisuus**, joka oli laajakaistaääni esitettynä 35 dB L_{Aeq} tasolla. Neljää edellistä verrattiin tässä tutkimuksessa vain hiljaisuuteen. Laajakaistaäänenä toimi ns. ”Beranekin” miellyttävä taustaääni, kapeakaistaäänenä sähkömoottori (3753 Hz, ΔL_{ta} 15 dB), impulssiäänenä paalutusjuntta (LD 8.6 dB, OR 236 dB/s) ja puheäänenä radiodialogi.

Koe toteutettiin ryhmien välisenä vertailuna. Hiljaisuusryhmässä oli 19 koehenkilöä, laajakaistaäänen ryhmässä 19, kapeakaistaäänen ryhmässä 18, impulssiäänen ryhmässä 21 ja puheäänen ryhmässä 21. Kaikki ryhmät tekivät samat tehtävät.

Tarkastelun kohteena olivat äänilajin vaikutukset fysiologisiin ja psykologisiin muuttujiin sekä suoriutumiseen. Fysiologiset riippuvat muuttujat olivat sykevälivaihtelu ($HRV_{stressi(LF/HF)}$), systolinen ja diastolinen verenpaine sekä stressihormonien kortisoli ja noradrenaliinipitoisuudet plasmassa. Psykologiset riippuvat muuttujat olivat häiritsevyys ja kuormitus. Suoriutumista mitattiin työmuistia vaativilla tehtävillä, joita olivat auditiivinen ja visuaalinen sarjamuisti sekä N-back.

Kaikki koehenkilöt kävivät läpi kokeessa alkuvalmistelun, harjoitusosion, perustilanteen, tauon, varsinaisen koetilanteen (äänialtistus) ja palautumistilanteen. Perustilanne ja koetilanne vastasivat toisiaan, ainoana erona oli koetilanteessa taustalla oleva äänialtistus. Äänialtistus oli myös ainoa ryhmästä riippuva tekijä. Äänialtistuksen pituus oli keskimäärin 49 minuuttia. Perus- ja koetilanteissa koehenkilöt suorittivat tehtävät järjestyksessä visuaalinen sarjamuisti, N-back, auditiivinen sarjamuisti ja N-back. Subjektiiviset arviot annettiin jokaisen tehtävän jälkeen. Sykevälivaihtelua mitattiin jatkuvasti rinnan ympärillä olevalla sykevyöllä. Verenpainetta ja stressihormonitasoja mitattiin kuusi kertaa kokeen aikana. Verikokeet otettiin käsivarteen laitetun kanyylin kautta. Koko koe kesti yhteensä keskimäärin 3 tuntia 21 minuuttia.

Tulokset analysoitiin tarkastelemalla ääniryhmien välisiä eroja varianssianalyysillä tai toistomittausvarianssianalyysillä. Jos äänitilanteiden päävaikutus oli merkitsevä, verrattiin muita äänitilanteita hiljaisuusryhmään.

3 TULOKSET

Kokeen päätulokset on esitetty taulukossa 1. Äänilaji vaikutti häiritsevyyden ($F(4,92)=10.9$, $p<0.001$) ja kuormittavuuden ($F(4,89)=4.5$, $p=0.002$) kokemukseen. Laajakaistaääni, kapeakaistaääni ja impulssiääni arvioitiin häiritsevämmäksi kuin hiljaisuus.

Kapeakaista-, impulssi- ja puheäänen aikana tehtävien tekeminen arvioitiin kuormittavammaksi kuin hiljaisuuden aikana. Auditiivisessa sarjamuistissa sarjan viimeisten numeroiden muistaminen oli heikompaa puheäänen kuin hiljaisuuden aikana (kuva 1; interaktio äänitilanne x positio: $F(17,385)=2.5$, $p=0.001$). 3-backissä äänitilanne vaikutti muistamiseen ($F(4,91)=3.1$, $p=0.020$) ja muistamisen tarkkuus oli heikompaa laajakaista-impulssi-, ja puheäänen aikana kuin hiljaisuudessa. Kortisolitason ero palautumistilanteeseen nähden oli suurempi laajakaista-, impulssi- ja puheäänen aikana kuin hiljaisuudessa ($F(4,69)=3.1$, $p=0.021$). Noradrenaliinitason ero perustilanteeseen nähden oli hiljaisuudessa suurempi kuin impulssiäänellä ($F(4,76)=4.3$, $p=0.004$), jossa taso pysyi vakaana. Sykevälivaihtelussa näkyi puhe- ja kapeakaistaäänellä kuormittumista N-back tehtävässä: kuormittuminen lisääntyi, kun tehtävä tehtiin toista kertaa ($F(4,84)=4.1$, $p=0.004$).

Taulukko 1. Kokeen päätulokset. Punaiset ruudut osoittavat äänilajeja, joiden arvot erosivat merkitsevästi hiljaisuuden arvoista häiritsevään/heikentävään suuntaan. Vihreät ruudut kuvaavat eroa hiljaisuuteen nähden positiiviseen suuntaan.

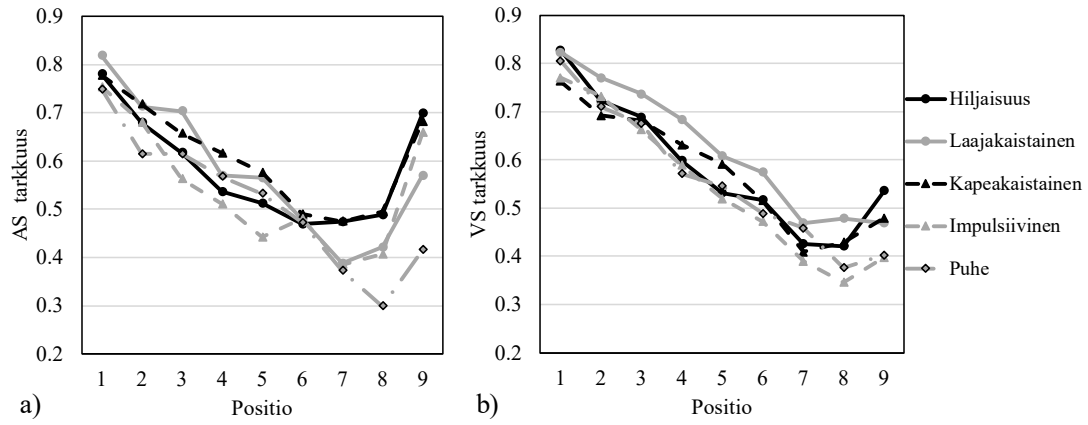
Muuttuja [a]	**Referessi**	**Laajakaistainen**	**Kapeakaistainen**	**Impulssimainen**	**Puhe**
Subjektiivinen					
Häiritsevyys ***	Perustilanne	**	***	***	***
Kuormittavuus **	Perustilanne	ns	*	***	**
Suoriutuminen					
Auditiivinen sarjamuisti (As) [x]	-	ns	ns	ns	x
Visuaalinen sarjamuisti (Vs)	-	ns	ns	ns	ns
3-back **	-	*	ns	***	*
Fysiologinen					
Kortisoli *	Palautumistilanne	*	ns	***	**
Noradrenaliini **	Perustilanne	ns	ns	*	ns
Systolinen verenpaine	Perustilanne	ns	ns	ns	ns
Diastolinen verenpaine	Perustilanne	ns	ns	ns	ns
$HRV_{stressi(LF/HF)}$ *As*	Perustilanne	ns	ns	ns	ns
$HRV_{stressi(LF/HF)}$ *Vs*	Perustilanne	ns	ns	ns	ns
$HRV_{stressi(LF/HF)}$ *n-back* [x]	Perustilanne	ns	x	ns	x

[a] Taustaääniä on verrattu hiljaisuuteen vain jos päävaikutus muuttujalla on merkitsevä.
*$p<0.05$, **$p<0.01$; ***$p<0.001$
x=Taustaäänen ja position tai ajan interaktio merkitsevä.
ns= ei merkitsevä

4 POHDINTA

Kaikki äänilajit, jotka kokeessamme esitettiin 65 dB voimakkuudella, aiheuttivat fysiologisia ja psykologisia seurauksia ja suurin osa myös suoriutumisen heikentymistä verrattuna hiljaisuuteen. Tämä on yllättävää, etenkin laajakaistaäänen kohdalla, sillä informaatiosisällöttömän, staattisen ja spektriltään tasaisen äänen on raportoitu aiheuttavan vain pieniä vaikutuksia suoriutumiseen [2]. Puheäänen vaikutus oli laajin. Puhe häiritsi, lisäsi kuormitusta ja heikensi suoriutumista kahdessa eri tehtävässä. Verrattuna hiljaisuuteen puheääni myös nosti kortisolitasoja sekä sykevälivaihtelussa näkyi ajan myötä merkkejä kuormittumisesta. Myös impulssiääni koettiin häiritsevänä, kuormittavana ja se heikensi suoriutumista 3-back tehtävässä ja nosti kortisolitasoja verrattuna hiljaisuuteen. Odotusten vastaisesti noradrenaliinitason muutos perustilanteeseen verrattuna oli impulssiäänen tapauksessa pienempi kuin hiljaisuuden. Tulkitsimme kuitenkin eron noradrenaliinitasoissa niin pieneksi, ettei sillä fysiologisessa mielessä ole merkitystä, vaikka ero oli tilas-

tollisesti merkitsevä. Kapeakaistaääni puolestaan oli häiritsevä ja kuormittava, muttei heikentänyt suoriutumista. Ajan myötä sykevälivaihtelussa näkyi kuitenkin kuormittumista. Laajakaistaäänen odotettiin olevan vähemmän häiritsevä kuin kapeakaistaäänen, ja subjektiivisesti sitä ei arvioitukaan hiljaisuutta kuormittavammaksi, mutta laajakaistaääni arvioitiin häiritseväksi ja se kohotti kortisolitasoja ja alensi suoriutumista 3-back tehtävässä. Kortisolitason nousu onkin liitetty tehtävään liittyvään pinnistelyyn, eikä niinkään suoraan äänialtistukseen [3].



Kuva 1. Auditiivisen (a) ja visuaalisen (b) sarjamuistitehtävän (AS ja VS) tarkkuus suhteessa numeroiden esitysjärjestykseen sarjassa (positio) eri äänilajeilla.

Tutkimus osoittaa, että jo 65 desibelin voimakkuisella äänellä on moninaiset vaikutukset sekä psykologisiin että fysiologisiin vasteisiin, mutta myös suoriutumiseen. Neljästä tutkitusta äänilajista puheäänen vaikutukset olivat laajimmat. Erityisesti työpaikoilla, joissa samanaikaisesti tehdään muistiprosessointia ja keskittymistä vaativaa työtä, pitää kiinnittää huomiota ääniympäristöön.

KIITOKSET

Tutkimus on osa Anojanssi-projektia, jonka rahoittivat Business Finland, Turun ammattikorkeakoulu, ympäristöministeriö, sosiaali- ja terveysministeriö sekä yhteistyöyritykset.

VIITTEET

[1] Basner M, Babisch W, Davis A, Brink M, Clark C, Janssen S, Stansfeld S, Auditory and non-auditory effects of noise on health, Lancet. 383 (2014), 1325–1332.

[2] Szalma JL, Hancock PA, Noise effects on human performance: A meta-analytic synthesis, Psychol. Bull. 137(2011), 682–707.

[3] Brandenberger G, Follenius M, Wittersheim G, Salame P, Siméoni M, Reinhardt B, Plasma catecholamines and pituitary adrenal hormones related to mental task demand under quiet and noise conditions, Biol. Psychol. 10(1980), 239–252.

TUULIVOIMAMELUN HÄIRITSEVYYTEEN LIITTYVÄT EI-AKUSTISET JA AKUSTISET TEKIJÄT

Jenni Radun[1], **Valtteri Hongisto** [1]

[1] Turun ammattikorkeakoulu
Lemminkäisenkatu 14-18 B,
20520 TURKU
etunimi.sukunimi@turkuamk.fi

Tiivistelmä

Tutkimuksen tavoitteena oli kartoittaa miten erilaiset ei-akustiset tekijät sekä äänitaso ovat yhteydessä siihen, että tuulivoimamelu koetaan melko tai erittäin häiritseväksi. Kolmen suomalaisen tuulivoima-alueen läheisyydessä kyselyyn kutsuttiin vastaamaan asukkaat, jotka asuivat 2 km:n säteellä tuulivoimaloista. Tuulivoima-alueilla oli 3-5 MW:n voimaloita. Kyselyyn vastasi 318 henkilöä. Mallinnettu tuulivoiman äänitaso vastaajien pihamaalla oli 27-44 dB L_{Aeq}. Kysely kartoitti tuulivoimamelun häiritsevyyttä sisällä ja ulkona sekä erittäin monipuolisesti mm. ihmisten asenteita ja asuinolosuhteita. Tärkein tuulivoimamelun häiritsevyyteen yhteydessä oleva tekijä oli huolestuneisuus tuulivoimamelun terveysvaikutuksista. Muut tekijät olivat tuulivoima-alue, meluherkkyys, sukupuoli sekä yleinen suhtautuminen tuulivoimaan energian tuotantomuotona. Äänitaso pihamaalla selitti vain pienen osan häiritsevyydestä ulkona, mutta se ei selittänyt häiritsevyyttä sisällä. Tuulivoiman terveysvaikutuksista tulisi aktiivisesti jakaa faktoihin pohjautuvaa tietoa asukkaille. Tämä voisi vähentää huolia terveysvaikutuksista ja siten myös tuulivoimamelun häiritsevyyttä. Myös tuulivoimaloiden pystytysvaiheessa tulisi kiinnittää erityistä huomiota vastavuoroiseen ja läpinäkyvään kommunikointiin asukkaiden kanssa.

1 JOHDANTO

Tuulivoima tuottaa ajoittain ääntä, jonka lähiasukkaat saattavat kokea häiritsevänä äänenä, eli meluna. Tuulivoiman keskiäänitaso L_{Aeq} on ollut yhteydessä tuulivoimamelun häiritsevyyteen ja itseraportoituihin unihäiriöihin. Muuta terveyshaittaa tuulivoimamelun ei ole havaittu toistaiseksi kiistattomasti aiheuttavan [1]. Äänitaso ei kuitenkaan suoraan selitä kovinkaan suurta osuutta häiritsevyydestä. Kanadalaisen tutkimuksen mukaan melutaso selittää 9 % korkeasta häiritsevyydestä [2] ja vastaavasti Suomessa 92 % korkeasta häiritsevyydestä on raportoitu liittyvän muihin tekijöihin kuin äänitasoon [3]. Näitä ääneen liittymättömiä tekijöitä kutsutaan ei-akustisiksi tekijöiksi.

Tuulivoimamelun ei-akustiset tekijät voivat olla henkilökohtaisiin tekijöihin, tilanteeseen tai kontekstiin liittyviä. Henkilökohtaisia tekijöitä ovat ihmisen piirteet, odotukset ja asenteet, joita tuulivoimaan liittyen ovat esimerkiksi meluherkkyys [2,4], huoli fyysisestä turvallisuudesta [2] tai negatiivinen asenne tuulivoimaloita kohtaan [5]. Tilannetekijät liittyvät ympäristöön ja tilanteeseen, joita ovat esimerkiksi tuulivoimalan näkyminen ko-

© 2019 Jenni Radun, ja Valtteri Hongisto. Tämä on avoimesti julkaistu teos, joka noudattaa Creative Commons NIMEÄ 4.0 Ei sovitettu –lisenssiä (CC BY 4.0). Teosta saa kopioida, levittää, näyttää ja esittää julkisesti ja siitä saa luoda johdannaisteoksia, kunhan tekijän nimi ja lähde mainitaan asianmukaisesti.

toa [6] tai asunnon omistaminen [2] tai asukastyyppi (vakituinen vai loma-asukas) [7]. Kontekstiin liittyvät tekijät vaikuttavat muokkaamalla asenteita. Näitä ovat tuulivoiman tapauksessa esimerkiksi kokemus epäreilusta suunnittelusta ja tapa tuoda tuulivoima alueelle [8].

Tutkimuksen tavoitteena oli kartoittaa miten erilaiset ei-akustiset tekijät sekä äänitaso ovat yhteydessä siihen, että tuulivoimamelu koetaan melko tai erittäin häiritseväksi (%H). Tutkimus on julkaistu kansainvälisesti [9], kuten myös aineiston pohjalta tehty annosvastesuhdetarkastelu [3].

2 MENETELMÄ

Tutkimukseen valittiin vain alueita, joissa oli vähintään 3 MW voimaloita ja keskimääräistä suomalaista tuulivoima-aluetta selvästi enemmän kotitalouksia voimaloiden lähistöllä. Kysely lähetettiin 2 km:n säteellä tuulivoimaloista sijaitseville kotitalouksille kolmella tuulivoima-alueella eri puolilla Suomea (Peittoo, Olhava ja Märynummi). Alueet erosivat toisistaan seuraavien tekijöiden osalta: tuulivoimavastaisuus, maakunta, asukastiheys ja alueen aiempi maankäyttö. Näiden erojen takia ajateltiin, että alueet edustavat hyvin tuulivoima-alueita Suomessa.

Tuulivoimamelun äänitaso mallinnettiin jokaisen asuinrakennuksen julkisivulle. Mallinnuksen tarkkuus tarkastettiin mittauksilla ja mallinnustulokset vastasivat hyvin mittaustuloksia [3].

Kyselyssä kysyttyjä kysymyksiä on kuvattu taulukossa 1 ja niihin liittyvät skaalat taulukossa 2. Tähän tarkasteluun on valittu muuttujat (kysymykset), jotka on esitetty kaikilla kolmella alueella ja joiden vastaukset eivät korreloi keskenään.

Riippuvat muuttujat kyselyssä olivat *%H sisällä* ja *%H ulkona*. *%H sisällä* tarkoittaa, kuinka monta prosenttia vastaajista koki melun häiritseväksi sisätiloissa. Vastaaja kuuluu ryhmään *%H sisällä*, jos hän on vastannut kysymykseen *häiritsevyys sisällä* arvoilla 4 tai 5. Vastaava määrittely tehtiin muuttujalle *%H ulkona*.

Tilastoanalyyseinä alueiden välisten erojen tarkastelussa käytettiin Fisherin testiä (Fisher exact test) nominaaliasteikollisille muuttujille (*sukupuoli*, *%H sisällä*, *%H ulkona*, *luottamus viranomaisiin*, *luottamus toimijoihin* ja *yhteisön hyöty*) ja varianssianalyysiä jatkuville muuttujille (*ikä*, *äänitaso*, *etäisyys*). Binaarisia logistisen regression malleja käytettiin tarkastelemaan mitkä riippumattomat muuttujat selittäisivät muuttujia *%H sisällä* ja *%H ulkona*. Logistiseen regressioon otettiin mukaan muuttujat: *meluherkkyys, huoli terveysvaikutuksista, energia-asenne, maisema-asenne, äänitaso, näkyvyys* ja taustamuuttujia *sukupuoli, ikä* ja *alue*. Käytettiin stepwise-mallia, jossa malliin lisäämiskynnys oli 0.05 ja poistokriteeri oli 0.10.

3 TULOKSET

Taulukko 3 kuvaa eri alueiden otoksia. 8 % vastaajista kuului ryhmään *%H sisällä* ja 15,4 % vastaajista ryhmään *%H ulkona*. Binaarisella logistisella regressiomallilla haettiin tärkeimpiä muuttujia, jotka ovat yhteydessä tuulivoiman muuttujiin *%H sisällä* ja *%H ulkona* (taulukko 4). Tärkein muuttuja molemmissa malleissa oli *huoli terveysvaikutuksista* ja toisena *alue*. Logistisen regression tuloksia voidaan tulkita taulukosta käyttäen seuraavaa esimerkkiä: Kun vastaaja antaa yhden arvon suuremman vastauksen *huoli ter-*

veysvaikutuksista –muuttujalla, hän kuuluu 4,5 kertaa todennäköisemmin ryhmään *%H sisällä*. Muut tuulivoimamelun häiritsevyyteen liittyvät muuttujat olivat *energia-asenne* ja *meluherkkyys*. Naiset ovat todennäköisemmin häiriintyneitä tuulivoimamelusta sisällä kuin miehet. *Äänitaso* oli selittävä tekijä vain mallissa *%H ulkona*.

Taulukko 1. Kyselyn muuttujat. Vastausvaihtoehdot on esitetty taulukossa 2.

Muuttujan nimi	Kysymys/selitys	Skaala
Häiritsevyys ulkona	K16 a. Kuinka häiritsevänä koet tuulivoimaloiden äänet pihamaallasi?	A
Häiritsevyys sisällä	K18 a. Kuinka häiritsevänä koet tuulivoimaloiden äänet sisällä asunnossasi?	A
Meluherkkyys	Kysymysten 10a. (käännettynä) ja 10b summa.	
	K10a. Totun helposti suurimpaan osaan äänistä.	B
	K10b. Äänet häiritsevät minua herkästi.	B
Huoli terveysvaikutuksista	K31. Oletko huolestunut tuulivoimaloiden äänien mahdollisista vaikutuksista terveyteen?	C
Maisema-asenne	K24. Tuulivoimalan vaikutus maisemaan on …	D
Asennemuutos	K25.Onko mielipiteesi tuulivoimaloista muuttunut alueen tuulivoimaloiden rakentamisen jälkeen?	D
Yhteisön hyöty	K28. Onko tuulivoimaloista ollut jotain hyötyä kyläyhteisöllesi?	E
Energia-asenne	K30. Mitä mieltä olet tuulivoimalla tuotetusta sähköstä energiamuotona?	F
Luottamus toimijoihin	K33a. Ovatko tuulivoimatoimijat tehneet tarpeeksi mahdollisten haittojen kontrolloimiseksi?	E
Luottamus viranomaisiin	K33b. Ovatko viranomaiset tehneet tarpeeksi mahdollisten haittojen kontrolloimiseksi?	E
Näkyvyys	Jos K22 tai K23 vastaus kyllä, tuulivoimala on näkyvä	
	K22. Näkyykö tuulivoimala pihallesi?	E
	K23. Näkyykö tuulivoimala ikkunastasi?	E

Taulukko 2. Kyselyn muuttujien vastausvaihtoehdot.

Skaala	Vastauskategoriat
A	1 Ääni ei kuulu. 2 Ääni kuuluu, muttei häiritse. 3 Häiritsee jonkin verran. 4 Häiritsee melko paljon. 5 Häiritsee erittäin paljon.
B	1 Kuvaa minua erittäin huonosti, 2 Kuvaa minua melko huonosti, 3 Ei kuvaa hyvin, eikä huonosti, 4 Kuvaa minua melko hyvin, 5 Kuvaa minua erittäin hyvin
C	1 En lainkaan, 2 Vain vähän, 3 Jonkin verran, 4 Melko paljon, 5 Erittäin paljon.
D	1 Selvästi myönteinen, 2 Hieman myönteinen, 3 Ei vaikutusta/neutraali, 4 Hieman kielteinen, 5 Selvästi kielteinen
E	0 Ei/Eivät, 1 Kyllä
F	1 Kantani on myönteinen, 2 Kantani on enemmäin myönteinen kuin kielteinen, 3 Kantani on neutraali, 4 Kantani on enemmän kielteinen kuin myönteinen, 5 Kantani on selvästi kielteinen

4 POHDINTA

Huoli terveysvaikutuksista oli tärkein muuttuja, joka oli yhteydessä sekä häiritsevyyteen sisällä *(%H sisällä)*, että häiritsevyyteen ulkona (*%H ulkona*). Jos henkilö on huolissaan tuulivoimamelun mahdollisista vaikutuksista terveyteensä, hän on myös todennäköisemmin häiriintynyt melusta. Tuloksemme osoittavat kuitenkin vain subjektiivisten muuttujien yhteyden, mutta eivät suuntaa. Tällä tutkimuksella on mahdotonta todistaa, että huolestuneisuus terveysvaikutuksista lisäisi melun häiritsevyyttä eikä päinvastoin. Koska melun häiritsevyys on yleisin melun terveysvaikutus [1], tarkastelimme muiden muuttujien yhteyttä nimenomaan siihen, emmekä esimerkiksi *huoleen terveysvaikutuksista*.

Toinen häiritsevyyteen liittyvä tekijä oli *alue*. Porissa (alue 1) häiritsevyys oli yleisintä ja Olhavassa (alue 2) harvinaisinta, vaikka äänitaso oli sama. Tulos oli ennakoitavissa mediakirjoitusten pohjalta mutta silti yhteys oli yllättävän voimakas. Negatiiviset asenteet

Porissa näkyivät selvästi suurempana häiritsevyyden raportoimisena muihin alueisiin verrattuna.

Taulukko 3. Otoksen kuvailu alueittain.

	Alue 1	***Alue 2***	***Alue 3***	**Yhteensä**	***p*-arvo**
Kotitalouksien määrä (2 km säde)	107	189	457	753	
Vastaajien määrä	70	91	268	429	
Vastausprosentti [%]	65,4	48,1	58,6	57	
Vakituisia asukkaita [%]	54	41	95	77	
Vastaajien määrä (Vakituisten asukkaiden määrä)	**30**	**37**	**251**	**318**	
Ikä [vuosia]					0.01
Keskiarvo (keskihajonta)	60 (14)	59 (14)	53 (15)	55 (15)	
Vaihteluväli	24–85	23–85	17–89	17–89	
Sukupuoli**, naisia** [%]	56,7	32,4	48,6	47,5	ns
Äänitaso [dB L_{Aeq}]					<0.001
Keskiarvo (keskihajonta)	38 (3)	36 (3)	34 (3)	34 (3)	
Vaihteluväli	34–44	32–41	27–46	27–46	
Etäisyys [m]					<0.001
Keskiarvo (keskihajonta)	1395 (372)	1317 (327)	1542 (244)	1503 (279)	
Vaihteluväli	672– 2005	785– 1901	479– 1996	479– 2005	
%H sisällä [%]	31,0	0,0	6,5	8,0	<0.001
%H ulkona [%]	62,1	5,6	11,4	15,4	<0.001
Luottamus viranomaisiin [%]	12,5	66,7	48,6	46,0	0.001
Luottamus toimijoihin [%]	12,0	66,7	50,8	48,3	<0.001
Yhteisön hyöty [%]	18,5	51,7	21,8	24,6	0.003

Vastaajat eri alueilla erosivat toisistaan myös *luottamuksessa toimijoihin* ja *viranomaisiin* sekä siinä kokevatko he yhteisönsä hyötyvän tuulivoimasta. Tulkitsimme alueiden erojen johtuvan ainakin osin maankäytön historiasta, joka heijastuu ihmisten asenteisiin.

Muut tuulivoimamelun häiritsevyyteen liittyvät tekijät olivat *meluherkkyys* ja *energia-asenne*. *Meluherkkyys* on aiemminkin liitetty tuulivoiman häiritsevyyden kokemiseen [2,4]. *Äänitaso* valikoitui vain malliin *%H ulkona*. Tämä voi johtua siitä, että rakennusten julkisivut vaimentavat ääntä, jolloin äänen suora vaikutus vähenee. Lisäksi pientalojen julkisivujen äänieristävyys vaihtelee suuresti [10], mikä voi aiheuttaa suurta vaihtelua sisä-äänitasoissa samalla ympäristömelun äänitasoalueella. *Sukupuoli* liittyi tuulivoiman häiritsevyyteen sisällä naisten raportoidessa useammin häiritsevyyttä kuin miehet. Aikaisempi tutkimus ei raportoinut sukupuolen vaikuttavan häiritsevyyteen sisällä [4].

Tuulivoiman häiritsevyyden vähentämiseksi ehdotamme tutkitun faktatiedon jakamista ihmisten huolien vähentämiseksi. Tämä voisi vähentää ihmisten huolia ja he voisivat tuntea tulleensa kuulluiksi.

Taulukko 4. Logistisen regression mallit *%H ulkona* ja *%H sisällä*.

%H ulkona		Logistinen regressiomalli		
Muuttuja	Muuttujan ryhmät	(N=280, R^2=0.710,[c] H-L,[d] p=0.651)		
		OR (luottamusväli)[b]	*p-arvo*[e]	Malliin ottamisen järjestys: R^2 joka vaiheessa
Huoli terveysvaikutuksista	Skaala: 1-5	2.71 (1.78, 4.11)	<0.01	Vaihe 1: 0.43
Alue	Alue 1	10.32 (2.22, 47.84)	<0.01	Vaihe 2: 0.58
	Alue 2	0.29 (0.03, 3.21)	0.31	
	Alue 3	Referenssi	<0.01	
Energia-asenne	Skaala: 1-5	1.89 (1.24, 2.87)	<0.01	Vaihe 3: 0.63
Meluherkkyys	Skaala: 2-10	1.69 (1.23, 1.32)	<0.01	Vaihe 4: 0.67
Äänitaso [dB]	Jatkuva	1.41 (1.14, 1.74)	<0.01	Vaihe 5: 0.71
%H sisällä		Logistinen regressiomalli		
Muuttuja	Muuttujan ryhmät	(N=281, R^2=0.667,[c] H-L,[d] p=0.992)		
		OR (luottamusväli)[b]	*p-arvo*[e]	Malliin ottamisen järjestys: R^2 joka vaiheessa
Huoli terveysvaikutuksista	Skaala: 1-5	4.46 (2.41, 8.26)	<0.01	Vaihe 1: 0.47
Alue	Alue 1	5.69 (1.25, 25.97)	0.03	Vaihe 2: 0.55
	Alue 2 [f]	0.00 (0.00, 0.00)	1	
	Alue 3	Referenssi	0.08	
Meluherkkyys	Skaala: 2-10	1.81 (1.15, 2.84)	0.01	Vaihe 3: 0.60
Sukupuoli	Nainen/Mies	8.30 (1.63, 42.19)	0.01	Vaihe 4: 0.63
Energia-asenne	Skaala: 1-5	1.92 (1.10, 3.35)	0.02	Vaihe 5: 0.67

[a] Kategorisen muuttujan referenssikategoria on aina viimeinen kategoria.

[b] Vetolyöntikertoimien suhde (OR) ja 95% luottamusväli. Nämä perustuvat binaarisen logistisen regression malliin. OR näyttää kuinka paljon todennäköisyys kuulua riippuvaan muutujan ryhmään muuttuu yhdellä riippumattoman muuttujan arvon muutoksella. OR > 1 kuvaa todennäköisyyden kuulua riippuvaan ryhmään olevan korkeampi suhteessa referessikategoriaan ja OR < 1 tarkoittaa, että se on matalampi.

[c] Nagelkerken pseudo R^2 antaa arvion mallin selittämästä osuudesta. Se vaihtelee nollasta yhteen, yhden indikoidessa täydellistä mallia.

[d] H-L: Hosmer-Lemeshow testi, p>0.05 viittaa hyvään sopivuuteen.

[e] *p-arvot* kuvaavat vaikuttaako muuttuja malliin merkitsevästi.

[f] Alueella 2 ei ollut ketään, joka olisi raportoinut häiritsevyyttä sisällä arvon 3 yli.

KIITOKSET

Tutkimus on osa Anojanssi-projektia, jonka rahoittivat Business Finland, Turun ammatti-korkeakoulu, ympäristöministeriö, sosiaali- ja terveysministeriö sekä yhteistyöyritykset.

VIITTEET

[1] Schmidt JH, Klokker M, Health effects related to wind turbine noise exposure: A systematic review, PLoS One. 9(2014).

[2] Michaud DS, Keith SE, Feder K, Voicescu SA, Marro L, Than J, Guay M, Bower T,

Denning A, Lavigne E, Whelan C, Janssen SA, Leroux T, van den Berg F, Personal and situational variables associated with wind turbine noise annoyance, J. Acoust. Soc. Am. 139(2016), 1455–1466.

[3] Hongisto V, Oliva D, Keränen J, Indoor noise annoyance due to 3–5 megawatt wind turbines—An exposure–response relationship, J. Acoust. Soc. Am. 142(2017), 2185–2196.

[4] Janssen SA, Vos H, Eisses AR, Pedersen E, A comparison between exposure-response relationships for wind turbine annoyance and annoyance due to other noise sources, J. Acoust. Soc. Am. 130(2011), 3746–3753.

[5] Pawlaczyk-Luszczynska M, Dudarewicz A, Zaborowski K, Zamojska-Daniszewska M, Waszkowska M, Annoyance related to wind turbine noise, Arch. Acoust. 39(2014), 89–102.

[6] Pedersen E, van den Berg F, Bakker R, Bouma J, Response to noise from modern wind farms in The Netherlands, J. Acoust. Soc. Am. 126(2009), 634–643.

[7] Janhunen S, Hujala M, Pätäri S, Owners of second homes, locals and their attitudes towards future rural wind farm, Energy Policy. 73(2014), 450–460.

[8] Pohl J, Gabriel J, Hübner G, Understanding stress effects of wind turbine noise – The integrated approach, Energy Policy. 112(2018), 119–128.

[9] Radun J, Hongisto V, Suokas M, Variables associated with wind turbine noise annoyance and sleep disturbance, Build. Environ. 150(2019).

[10] Keränen J, Hakala J, Hongisto V, The sound insulation of façades at frequencies 5–5000 Hz, Build. Environ. 156(2019), 12–20.

IMPULSSIMAISEN MELUN SANKTIOINTI – PSYKOAKUSTINEN TUTKIMUS

Ville Rajala[1], **Valtteri Hongisto**[1]

[1] Turun ammattikorkeakoulu
Lemminkäisenkatu 14-18 B
20520 TURKU
ville.rajala@turkuamk.fi; valtteri.hongisto@turkuamk.fi

Tiivistelmä

Impulssiääni saatetaan kokea häiritsevämpänä kuin muuttumaton ääni samalla keskiäänitasolla. Ero koetussa häiritsevyydessä on mahdollista kompensoida lisäämällä äänestä mitattuun keskiäänitasoon L_{Aeq} [dB] asianmukainen sanktio k [dB]. Nordtest NT ACOU 112 –metodi kuvaa impulssiäänen käyttämällä kahta suuretta: tasoero (D_L) ja nousunopeus (R_{on}), sekä esittää ennustemallin impulssimelun sanktioinnille. Tämän tutkimuksen tavoite oli selvittää, miten tasoero ja nousunopeus vaikuttavat impulssimelun häiritsevyyssanktion määrään, sekä verrata havaittuja sanktioita NT ACOU 112 –metodin ennustamaan sanktioon. Toteutimme psykoakustisen laboratoriokokeen, jossa 32 osallistujaa arvioi sekä synteettisten impulssimaisten että impulssittomien äänten häiritsevyyttä. Impulssiäänille havaitut sanktioarvot olivat välillä -2 dB ja +8 dB. Suuremmilla tasoeroilla ja nousunopeuksilla saavutettiin suurempi sanktio. Havaitut sanktioarvot ovat pienempiä kuin Nordtest-metodin ennustamat, kun $R_{on} \geq 200$ dB/s. Tulosten perusteella Nordtest-metodin sanktiomallin jatkokehittäminen vaikuttaa olevan perusteltua.

1 JOHDANTO

Impulssiääni saatetaan kokea häiritsevämpänä kuin tasainen ääni samalla A-painotetulla keskiäänitasolla L_{Aeq} [dB]. L_{Aeq} ei siis välttämättä yksinään täysin kuvaa impulssiäänen häiritsevyyttä. Ero koetussa häiritsevyydessä voidaan kompensoida lisäämällä impulssiäänen mitattuun keskiäänitasoon sanktio k [dB]. Sanktion tulisi kuvata impulssimaisuuden aiheuttamaa häiritsevyyslisää. Impulssimaisuuden mittaamiseen on olemassa useita metodeja. Nordtest –metodi NT ACOU 112 [1] kuvaa impulssin käyttämällä suureita *tasoero* (D_L) ja *nousunopeus* (R_{on}). D_L kuvaa kuinka paljon impulssin äänitaso nousee ja R_{on} kuinka nopeasti äänitaso nousee. NT ACOU 112 -metodi on otettu käyttöön brittiläisessä ympäristönmelun mittausstandardissa [2] ja sen implementointia ISO standardiksi valmistellaan [3]. On olemassa hyvin vähän tutkimusta siitä, miten NT ACOU 112 -metodin avulla mitattuja impulsseja tulisi sanktioida [4]. Tämän tutkimuksen tavoite oli selvittää, miten D_L ja R_{on} vaikuttavat periodisen impulssimelun *häiritsevyyden* sanktioon ja miten havaitsemamme sanktio vertautuu NT ACOU 112 –metodin mukaiseen sanktiomalliin. Asiaa tutkittiin kahdella eri impulssiäänen spektrillä.

© 2019 Ville Rajala ja Valtteri Hongisto. Tämä on avoimesti julkaistu teos, joka noudattaa Creative Commons NIMEÄ 4.0 Ei sovitettu –lisenssiä (CC BY 4.0). Teosta saa kopioida, levittää, näyttää ja esittää julkisesti ja siitä saa luoda johdannaisteoksia, kunhan tekijän nimi ja lähde mainitaan asianmukaisesti.

2 METODIT

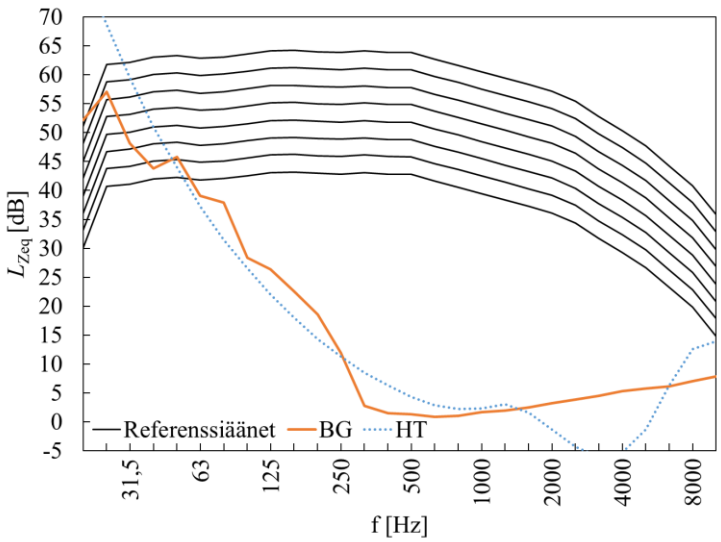
2.1 Tutkimusasetelma ja tutkittavat

Tutkimus suoritettiin psykoakustisena laboratoriokokeena, jossa tutkittavat arvioivat 74:n eri koeäänen *häiritsevyyttä*. Koeäänet sisälsivät impulssiääniä sekä referenssiääniä (tasaista kohinaa). Referenssiääniä käytettiin määrittämään impulssiääniin yhdistettävä sanktio. Tutkimuksen riippumaton muuttuja oli koeääni ja riippuva muuttuja subjektiivinen kokemus *häiritsevyys*. Tutkimukseen osallistui 32 vapaaehtoista henkilöä (13 miestä ja 19 naista), iältään 20−44 vuotta (keskiarvo 29).

2.2 Koeäänet

Koeäänet muodostuivat 66 impulssiäänestä sekä kahdeksasta referenssiäänestä. Impulssiäänet toistettiin keskiäänitasolla 55 dB L_{Aeq}. Referenssiäänien A-painotettu keskiäänitaso vaihteli 49 ja 70 dB välillä kolmen desibelin askelmin. Kuvassa 1 on esitetty referenssiäänien terssispektri. Jokaisen koeäänen kesto oli 18.5 sekuntia.

Impulssiäänet määriteltiin kolmella suureella: D_L (7 tasoa), R_{on} (10 arvoa) ja spektri (2 arvoa). Taulukossa 1 on esitetty kokeen D_L ja R_{on} arvot. Impulssiäänessä impulssilla oli toinen kahdesta vaihtoehtoisesta spektristä, S1 tai S2. S1 vastasi referenssiäänien spektriä (Kuva 1) ja S2 valkoisen kohinan spektriä.



Kuva 1 Referenssiäänien painottamaton äänitaso, L_{Zeq}, taajuuden (f) funktiona, tutkimushuoneen taustamelutaso (BG), sekä standardoitu kuulokynnys (HT) [5].

Impulssiääni muodostui kahdesta osasta: tasaisesta taustakohinasta sekä impulsseista. Taustakohina soitettiin läpi koko äänen, jotta keskiäänitaso voitiin pitää 55 dB:n tasolla impulssin voimakkuudesta riippumatta. Taustakohinan spektri vastasi referenssiäänien spektriä. Impulssiääni sisälsi aina seitsemän impulssia.

Äänet luotiin digitaalisesti (MATLAB R2017b). Referenssi- ja impulssiäänet luotiin näennäissatunnaisesta kohinasta. Impulssit luotiin kertomalla näennäissatunnaista kohinaa funktiolla. Äänitason noususa äänenpaine nousi lineaarisesti. Äänenpaineen huipun jäl-

keen se vaimeni eksponentiaalisesti. Eksponentiaalinen vaimeneminen vastaa kahden kiinteän kappaleen törmäämisestä syntyvän äänen vaimentumista. Luotu impulssi lisättiin taustakohinaan.

Koeäänet soitettiin ja arviot kerättiin käyttämällä MATLAB-pohjaista ohjelmistoa. Äänet soitettiin käyttämällä äänikorttia (D-audio USB Pre-Amp), kuulokevahvistinta (Brüel&Kjær ZE 0769), sekä kuulokkeita (Sennheiser HD 580). Koeäänten spektri ja keskiäänitaso varmistettiin keinopäämittauksilla (Brüel&Kjær 4100).

Taulukko 1 Mustat pyöreät merkit kuvaavat kokeen D_L ja R_{on} arvoja. Jokainen kombinaatio esiintyi kokeessa kaksi kertaa: kerran spektrillä S1 ja kerran spektrillä S2.

		R_{on}, dB/s									
		5	10	15	20	50	100	200	400	600	800
D_L, dB	5	●	●	●	●	●					
	10		●	●	●	●	●				
	15			●	●	●	●				
	20				●	●	●	●			
	25					●	●	●	●		
	30					●	●	●	●	●	
	40					●	●	●	●	●	●

2.3 Kokeen kulku

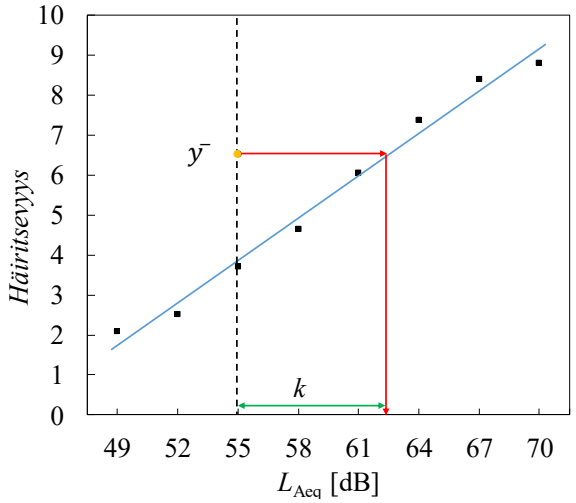
Tutkimus suoritettiin psykofysiikkahuoneessa Turun ammattikorkeakoulussa. Tutkimushuoneen taustamelutaso oli 23 dB L_{Aeq} (Kuva 1). Kokeeseen osallistui yksi tutkittava kerrallaan. Koe muodostui seitsemästä vaiheesta. Ensimmäisessä vaiheessa tutkittivat lukivat ja allekirjoittivat suostumuslomakkeen. Toisessa vaiheessa tutkittivat täyttivät taustatietoja keränneen alkukyselyn. Kolmannessa vaiheessa testattiin tutkittavan kuulokyky. Totuttelussa (vaihe 4) tutkittava kuunteli kuusi koeääntä, mutta ei arvioinut niitä. Kokeessa vastaamista harjoiteltiin (vaihe 5) kuuntelemalla kymmenen koeääntä. Harjoittelun vastauksia ei analysoitu. Varsinainen koe (vaihe 6) sisälsi kaikkien koeäänien *häiritsevyyden* arvioinnin. Koeäänet soitettiin tutkittavalle yhdellä viidestä etukäteen valitusta näennäissatunnaisesta järjestyksestä. Referenssiäänet esitettiin koeäänien joukossa niin, etteivät ne koskaan soineet peräkkäin.

Häiritsevyys arvioitiin ISO/TS 15666 [6] mukaisella vastausasteikolla. Tutkittavalle esitettiin kysymys *”Kuinka paljon ääni häiritsee, ärsyttää tai kiusaa sinua?”* Yksitoistaportaisen vastausasteikon skaala vaihteli välillä 0−10, jossa lukuun 10 liitettiin sanalliseen kuvaus ”*Erittäin*” ja lukuun 0 kuvaus ”*Ei lainkaan*”. Tutkittavia ohjeistettiin käyttämään koko asteikkoa ja vastaamaan mahdollisimman johdonmukaisesti. Tutkittavien tuli kuunnella ääntä 18,5 sekuntia ennen vastaamista.

Kokeen jälkeen (vaihe 7) tutkittava vastaanotti 20 €:n lahjakortin korvaukseksi osallistumisesta sekä lyhyen esittelyn tutkimuksen tavoitteista.

2.4 Sanktion määritys psykoakustisen kokeen tuloksista

Impulssimaisuuden sanktio määritettiin Olivan ym. [7] kehittämällä metodilla. Metodissa impulssiäänen sanktio lasketaan äänen keskimääräisestä *häiritsevyydestä* sekä referenssiäänien *häiritsevyyskeskiarvoista* lineaariregression avulla Kuvan 2 mukaisesti.



Kuva 2 Esimerkki sanktion määrittämisestä psykoakustisessa kokeessa. Mustat neliöt kuvaavat referenssiäänien *häiritsevyysarvioiden* keskiarvoa. Sininen suora on referenssiäänien *häiritsevyyskeskiarvoihin* sovitettu lineaariregressio. Keltainen pyöreä merkki on esimerkki yhden impulssiäänen (D_L=40 dB ja R_{on}=600 dB/s, spektri S1) *häiritsevyyskeskiarvosta*. Sanktio *k* määritetään vertaamalla impulssiäänen *häiritsevyyskeskiarvoa* lineaariregressioon. Sanktio saadaan vähentämällä regressiosuoralta impulssiäänen *häiritsevyyskeskiarvoa* vastaava keskiäänitaso impulssiäänen todellisesta keskiäänitasosta (55 dB). Kuvan esimerkkitapauksessa sanktio k=7,5 dB.

2.5 Nordtestin sanktion ennustusmalli

Nordtest NT ACOU 112 [1] esittää mallin, jolla voidaan ennustaa impulssiäänen sanktio. Ennustettu sanktio k_N määritellään yhtälöllä

$$k_N = 1.8 \cdot (P - 5), \qquad \text{kun } P > 5, \tag{1}$$

jossa P on ns. *prominenssi* (engl. *predicted prominence*):

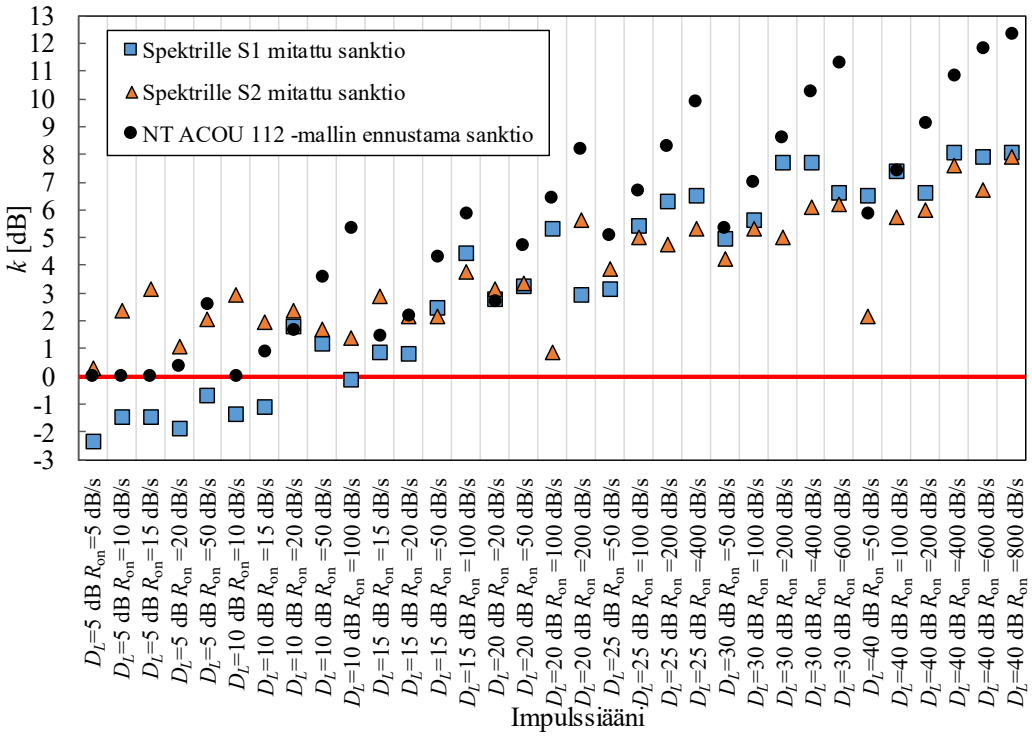
$$P = 3 \cdot \lg(R_{on}) + 2 \cdot \lg(D_L). \tag{2}$$

3 TULOKSET

Kuvassa 3 on esitetty psykoakustisen kokeen impulssiäänien sanktiot laskettuna luvussa 2.4 esitetyllä tavalla, sekä Nordtest –metodin sanktiomallilla ennustetut sanktiot (Kaava 1) Taulukon 1 äänille.

4 TARKASTELU

Psykoakustisen kokeen perusteella saadut sanktioarvot kasvavat D_L ja R_{on} arvojen kasvaessa. Osalla impulssiäänistä myös spektri vaikutti äänen *häiritsevyyteen*. NT ACOU 112 [1] sanktiomalli ennusti osalla äänistä suurempia sanktioita kuin tutkimuksessamme havaittiin, kun $R_{on} \geq 200$ dB/s. Tulosten perusteella NT ACOU 112-sanktiomallin jatkotarkastelu vaikuttaa perustellulta.



Kuva 3 Impulssiäänien sanktio psykoakustisen kokeen sekä Nordtest –ennustemallin mukaan. Punainen vaakaviiva kuvaa sanktiota 0 dB.

Toistaiseksi NT ACOU 112 -metodiin [1] on kohdistunut vain vähän tieteellistä kiinnostusta. Meidän tietääksemme tutkimuksemme on ensimmäinen tutkimuksen [4] jälkeen, jossa impulssimaisuuden *häiritsevyyttä* tutkijaan määrittelemällä impulssi D_L ja R_{on} arvojen avulla. Tutkimuksemme tuloksia voi tulevaisuudessa hyödyntää impulssiäänien sanktiomallin kehittämisessä.

NT ACOU 112 [1] sanktiomalli antaa impulssimaisuudesta sanktion, kun $R_{on} \geq 20$ dB/s ja $D_L > 10$ dB. Ennustettu alaraja vastaa hyvin tutkimuksemme tuloksia impulsseille spektrillä S1. Mittasimme kuitenkin spektrillä S2 sanktioita jo pienemmillä D_L ja R_{on} arvoilla kuin NT ACOU 112. Tulosten perusteella sanktiomallin tulisi ehkä ottaa huomioon myös äänen spektrin vaikutus. Aiemman tutkimuksen perusteella spektri on merkittävästi äänen *häiritsevyyteen* vaikuttava tekijä [8]. Vaikuttaa siltä, että useat äänen erityisominaisuudet vaikuttavat yhtä aikaa koettuun *häiritsevyyteen*.

Lopullisen sanktion määrittely impulssimaisuudelle on haastavaa, koska impulssimaisuus ei ole stationäärinen ilmiö. Me toteutimme laboratoriokokeen homogeenisillä synteettisillä äänillä. Jatkotutkimus todellisen impulssiäänen *häiritsevyydestä* suhteessa esim. kapeakaistaisen tai spektreiltään erilaisten äänten häiritsevyyteen voisi tarjota laajempaa ymmärrystä erilaisten äänten asianmukaisesta sanktioinnista.

5 YHTEENVETO

Tasoeron (D_L), nousunopeuden (R_{on}) ja spektrin vaikutusta impulssimelun häiritsevyyden sanktiointiin tutkittiin laboratorio-oloissa. Keskimäärin sanktio kasvoi D_L ja R_{on} arvojen kasvaessa. NT ACOU 112 sanktiomallin ennustamat sanktiot olivat yleensä suurempia kuin tutkimuksessa mitatut sanktiot, kun $R_{on} \geq 200$ dB/s. Tulosten perusteella NT ACOU

112 sanktiomallin jatkotarkastelu vaikuttaa perustellulta. Tutkimuksen tuloksia voi tulevaisuudessa hyödyntää impulssiäänien sanktiomallin kehittämisessä.

KIITOKSET

Tutkimus on osa Anojanssi -projektia, jonka rahoittajana toimi Business Finland, Turun ammattikorkeakoulu, Ympäristöministeriö, Sosiaali- ja terveysministeriö sekä yhteistyöyritykset. Haluamme kiittää rahoittajia tämän tutkimuksen mahdollistamisesta. Kiitokset Petra Virjoselle monista neuvoista ja MATLAB-koodeista.

VIITTEET

[1] Nordtest, Nordtest Method NT ACOU 112. Acoustics – Prominence of impulsive sounds and for adjustment of LAeq, Taastrup, Denmark: Nordtest, 2002.

[2] The British Standards Institution, BS 4142:2014. Methods for rating and assessing industrial and commercial sound, London, United Kingdom: BSI, 2014.

[3] International Organization for Standardization [Internet], Geneva Switzerland: ISO. ISO/WD PAS 1996-3 Acoustics -- Description, measurement and assessment of environmental noise -- Part 3: Objective method for the measurement of prominence of impulsive sounds and for adjustment of LAeq, 18.4.2019. [viitattu 20.5.2019]. Saatavilla: https://www.iso.org/standard/77035.html

[4] Pedersen TH, Impulsive noise, An objective measuring method for the prominence of impulsive sounds and for the adjustment of LAeq, Danish Environmental Protection Agency, 2001. Working Report No.: 1.

[5] International Organization for Standardization, ISO 389-7:2005. Acoustics. Reference zero for the calibration of audiometric equipment. Part 7: Reference threshold of hearing under free-field and diffuse-field listening conditions, Geneva, Switzerland: ISO, 2005.

[6] International Organization for Standardization, ISO/TS 15666:2003. Acoustics – Assessment of noise annoyance by means of social and socio-acoustic surveys, Geneva, Switzerland: ISO, 2003.

[7] Oliva D, Hongisto V, Haapakangas A, Annoyance of low-level tonal sounds – Factors affecting the penalty, Build Environ, 123(2017), 404-414.

[8] Hongisto V, Oliva D, Rekola L, Subjective and Objective Rating of Spectrally Different Pseudorandom Noises – Implications for Speech Masking Design, J Acoust Soc Am, 137(3)(2015), 1344-1355.

ISTUIMEEN INTEGROIDUN ÄÄNITUNTUMALAITTEEN VÄRÄHTELYN OPTIMOINTI PIENILLÄ TAAJUUKSILLA

Jukka Linjama[1], **Seppo Uosukainen**[2], **Timo Avikainen**[3] **ja Tommi Immonen**[1]

[1] Flexound Systems Oy
Finnoonniitynkuja 4
02270 ESPOO
etunimi@flexound.com

[2] SU Akustiikka
Lehmustie 1 B
00780 Helsinki
etunimi.sukunimi@pp.inet.fi

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

Tiivistelmä

Suomessa kehitetty FLEXOUND Augmented Audio™ -äänentoistoratkaisu tuo moniaistisen kuuntelukokemuksen pehmeisiin tyynymäisiin tuotteisiin ja istuimiin. Elokuvasalin tuolien selkänojaan integroituna saavutetaan tarkka istuinkohtainen äänentoisto. Äänituntumalaitteeksi kutsutun ratkaisun ydin on levymäinen herätelähde, elastinen värinäelementti EVE, joka voidaan integroida istuimen sisään. Elementti säteilee ilmaäänen ja tuottaa istuimen pinnassa pienillä taajuuksilla tuntuvan äänivärähtelyn.

Ratkaisun optimaalinen toiminta yli koko audioalueen taajuuskaistan edellyttää huolellista vibroakustista suunnittelua. Bassotoisto muodostuu sekä kuultavasta lähikentästä että istujan tuntemasta tuolin värähtelystä. Esityksessä keskitytään istuimen selkänojan ratkaisuihin, joissa vain yhtä stereofonista EVE-lähdettä käyttämällä värähtely saadaan leviämään istuimen selkänojaan tasaisesti. Istuimen värähtelyjakaumaa simuloidaan numeerisesti Comsol Multiphysics -ympäristössä. Mallinnustyön tavoitteena on suunnittelusääntöjen luominen hyvin erityyppisten istuimien äänentoiston äänituntumatoteutuksiin. Tulokset osoittavat, että istuimen runkorakennetta ja pehmeitä osia hyödyntämällä äänituntumatoisto saadaan riittävän tasaiseksi taajuusalueella 20 – 100 Hz.

© 2019 Jukka Linjama, Seppo Uosukainen, Timo Avikainen ja Tommi Immonen. Tämä on avoimesti julkaistu teos, joka noudattaa Creative Commons NIMEÄ 4.0 Kansainvälinen –lisenssiä (CC BY 4.0). Teosta saa kopioida, levittää, näyttää ja esittää julkisesti ja siitä saa luoda johdannaisteoksia, kunhan tekijän nimi ja lähde mainitaan asianmukaisesti.

1 JOHDANTO

Suomessa kehitetty uudenlainen Flexound Augmented Audio -äänentoistoratkaisu mahdollistaa moniaistisen, laajennetun kuunteluelämyksen: lähikenttäkuuntelun ja äänen tuntemisen pinnan värähtelynä. Alun perin terapiakäyttöön suunnatun innovaation pohjalle on kehitetty tyynymäisiä tuotteita, mm. HUMU Smart Cushion kuluttajamarkkinoille (kuva 1). Paras kuuntelukokemus saavutetaan, kun ääntä säteilevä värähtelylähde, elastinen värinäelementtti (Elastic vibrating element EVE) on integroitu istuimeen. Tällöin värähtely ei keskity ainoastaan pään ja hartioiden seudulle, vaan jakautuu laajemmalle alueelle. Lisäksi ilmäänen kautta aistittu bassotoisto on voimakkaampi, koska ääntä säteilevä pinta on laajempi. Istuimiin integroitua Augmented Audio -järjestelmää voidaan käyttää elokuvateatterissa täydentämään kaiuttimien äänentoistoa. Ensimmäinen toteutus otettiin käyttöön Suomessa Elokuvateatteri Kinossa Mäntyharjulla (kuva 1, [1]) ja käyttäjäpalaute on ollut positiivista. Äänikokemus kokonaisuutena on immersiivisempi kuin pelkillä kaiuttimilla toistettuna, ja puhedialogin selkeys on hyvä riippumatta istuinpaikasta.

Kuva 1. HUMU Augmented Audio cushion, ja Flexound -istuimia Elokuvateatteri Kinossa Mäntyharjulla.

Ratkaisun ydin on elastinen värinäelementti EVE^{TM}, kerroksittainen häviöllinen levyrakenne, jonka toimintaa on mallinnettu ja simuloitu viitteessä [21]. Elementin vibroakustiset ominaisuudet määrittävät äänensäteilyn lähi- ja kaukokenttään, sekä pinnassa tuntuvan värähtelyn. Rakenteen akustisen suorituskyvyn kuvaaminen ja optimointi on haastavaa, koska värähtelevät huokoiset kerrokset sekä tuottavat akustisia häviöitä että välittävät energiaa. Elementissä huokoinen absorptiomateriaali toimii siis sekä ilmaäänen että mekaanisen värähtelyn välittäjänä. Oikein mitoitetulla rakenteella saavutetaan hyvä hyötysuhde ja

äänenlaatu. EVE tuottaa jakautuneena äänilähteenä, joka kuulosta hyvin luonnollisesta sellaisenaan, vaikka äänimaisema aistitaan ikään kuin takaviistossa.

Signaalikäsittelyllä viimeistellään vasteen tasaisuus. Kuulokkeille kehitettyä binauraalista prosessointia voidaan myös hyödyntää äänikuvan levittämisessä enemmän myös etuviistoon, mutta lähikenttäkuuntelun luonteesta johtuen tehtävä ei ole suoraviivainen ja vaatii vielä kehitystyötä. Ensimmäisiä kokeiluja binauraalisen prosessoinnin hyödyntämisestä Augmented Audio -äänentoistossa jota on jo tehty Aalto-yliopistossa [3].

2 YLEISTÄ COMSOL-OHJELMASTA

COMSOL Multiphysics on elementtimenetelmään (FEM) perustuva laskentaohjelmisto, joka tarjoaa suhteellisen laajan mahdollisuuden monifysikaalisten ratkaisujen samanaikaiseen laskemiseen ja analysointiin. Mukaan voi liittää perinteisen rakennemekaniikan lisäksi lämmönhallintaa, virtausdynamiikkaa, akustiikkaa, sähkömagnetiikkaa, MEMS sovelluksia jne.

Mallinnuksessa käytettävät parametrit voidaan lisätä jo heti mallinnuksen alussa parametrilistaan, jolloin laskentamallia on helppo päivittää muuttamalla niiden arvoja. Parametreja hyväksikäyttäen voidaan helposti parametripyyhkäisyllä tehdä herkkyysanalyysiä missä lasketaan ja tulostetaan annettujen rajoitusten sisällä valittuja parametreja esimerkiksi jonkin toisen muuttujan funktiona. Ratkaisija suorittaa laskuiteraatioita niin kauan, kunnes tulos on annetun virhemarginaalin sisällä. Eräs ohjelmiston merkittävä etu on sen avoimuus, kaikki laskentayhtälöt ovat käyttäjän luettavissa ja tarvittaessa muokattavissa, kunhan vain tietää, mitä on tekemässä. Materiaalikirjastossa on mukana yleisimpien insinöörisovelluksissa käytettyjen materiaalien parametrit, mutta sinne on helppo käyttäjän lisätä materiaaliparametreja.

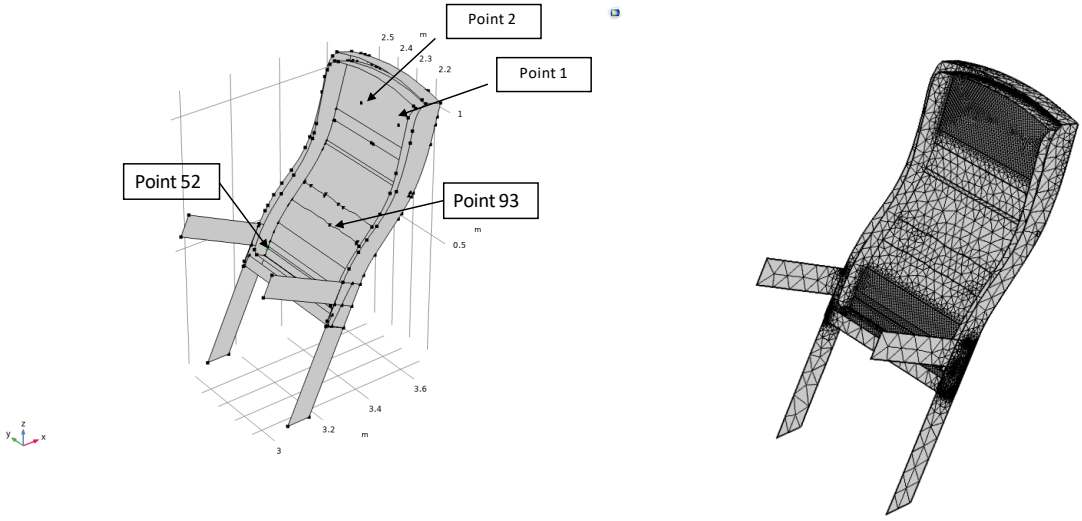
Analysoitavaa rakennetta kuvaava geometriamalli voidaan luoda ohjelmiston omilla mallinrakennustyökaluilla tai vaihtoehtoisesti ulkopuolinen geometria voidaan lukea yleisemmissä CAD-formaateissa. Voidaan myös lukea verkko, jonka Comsol-ohjelmisto muuntaa geometriaksi. Tämän jälkeen geometriamalli verkotetaan Comsol-ohjelmiston omalla verkottajalla.

3 VIBROAKUSTINEN MALLINNUS JA SIMULOINTI

Istuimen dynaamista vastetta mallinnettiin numeerisesti Comsol Multiphysics –ohjelmistolla, versiolla 5.4. Tässä esityksessä kuvataan simulointituloksia istuimen selkänojan osalta taajuusalueella 0 – 200 Hz. Pohjana on olemassaolevan istuimen geometria, joka syötettiin ensimmäisiä simulointeja varten step-fileinä ja viimeisimpiä varten Nastran-verkkona, jonka Comsol muunsi geometriaksi. Apurunko, selkänoja, jalat ja käsinojat mallinnettiin kuorina, vaahtomuovit solideina, ja apurungon ja selkänojan välinen tukipalkki ensimmäisissä mallinnuksissa Comsolin linear extension –menetelmällä ja viimeisimmissä solidina. Mallinnuksessa käytettävien osien materiaali oli vaneria, paitsi em. tukipalkki oli terästä.

3.1 Malli

Malli koostuu osista: puinen selkänoja, siihen keskiosastaan kiinnitetty apurunko Feelframe ja lattiaan jäykästi kiinnittyvä jalkaosa. Ensin tarkasteltiin apurungon ja selkänojan dynamiikkaa vapaana kappaleena. Sen jälkeen lisättiin selkänoja kiinnitys lattiaan yksinkertaistetulla puisella jalkaosalla.



Kuva 2. Laskennan geometria (vasen kuva) ja elementtiverkko (oikea kuva).

Tarkastellun istuinrakenteen CAD-geometriatiedoston lukeminen Comsol-ohjelmaan ja suoraan sen pohjalta tehty verkottaminen osoittautui haasteelliseksi työn aikana. Tämä tapa toimi vielä istuinmallille. jossa oli rakenteena mukana vain takalevy ja apurunko Feelframe sekä niitä yhdistävä rakenne. Geometriatiedoston siirtoa testattiin eri CAD formaateissa (mm. step, iges, parasolid), käyttäen suurinta käytettävää geometriatoleranssia sekä muutamia ohjelmistojen tarjoamia toimintavaihtoehtoja. Kun lähtögeometriaan lisättiin tilavuus- eli solidigeometriat selkänojan ylä- ja alaosaan kuvaamaan absorptiomateriaalia, piti lopulta käyttää vaihtoehtoista tapaa geometrioiden sisään lukemisessa. Siinä istuimen rakenteet verkotettiin ensiksi hyvin tiheällä elementtiverkolla Hypermesh ohjelmassa josta elementtiverkko luettiin Comsoliin sisään Nastran-formaatissa. Comsol ohjelma kykenee luomaan uuden geometrian sisäänluettavasta elementtiverkosta ja näin luotua geometriaa käytimme pohjana istuinmallinnuksessa. Tiheän verkon käyttö oli perusteltua, jotta Comsol luo geometrian mahdollisimman tarkasti.

Laskentamallin elementtiverkon tiheyttä päivitetään taajuusalueittain, sillä verkon tiheydellä useimmin on merkittävä vaikutus laskenta-ajan pituuteen. Akustisissa laskentatapauksissa verkon tiheysvaatimus kasvaa mentäessä suuremmille äänitaajuuksille, rakenneanalyyseissä on käytettävä taas paikallisia tihennyksiä liitosten ja geometriaepäjatkuvuuskohtien lähellä. Esimerkiksi alla olevassa kuvan elementtiverkossa on noin 400 000 vapausastetta. Absorptiomateriaalien vaatimat geometriatilavuudet on verkotettu Tetrahedra-tilavuuselementeillä. Samoin myös apurungon ja takalevyn yhdistävä palkkirakenne on kuvattu tilavuuselementeillä. Muilta osin istuimen levyrakenteiden kuvaamisessa on käytetty Triangles-kuorielementtiä, jolle annetaan levyosakohtaisesti sen käyttämä paksuus.

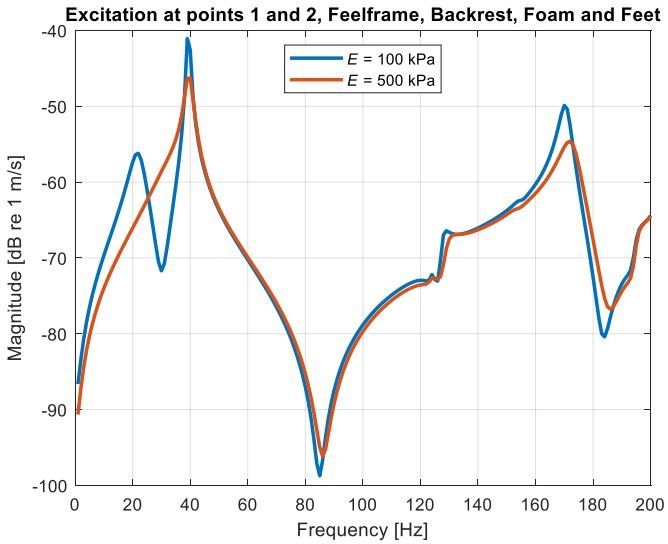
3.2 Simulointi

Mallilla tehdyillä simuloinneilla oli tarkoituksena selvittää yksinkertaistetun tuolirakenteen avulla, miten elastinen apurunko ”Feelframe” auttaa värähtelyn leviämistä koko selkänojan alueelle. Herätelähteenä toimiva EVE-elementti on mallinnettu kahtena pistevoimana (1 N).

Malli rakennettiin herätelähteestä käsin: ensin Feelframe apurunko vapaana kappaleena, sitten se kiinnitettynä selkänojaan, sitten lisäämällä joustinelementtinä toimiva vaahtomuovi apurungon ylä- ja alaosaan. Lopuksi lisättiin rakenteen jalkaosa, joka on jäykästi kiinni lattiassa. Ensin laskettiin yhden voimaherätteen (vasen stereokanava) vaste neljässä ideaalitapauksessa. Sitten tarkasteltiin kahden samanvaiheisen herätteen (monotoisto, vasen ja oikea stereokanava).

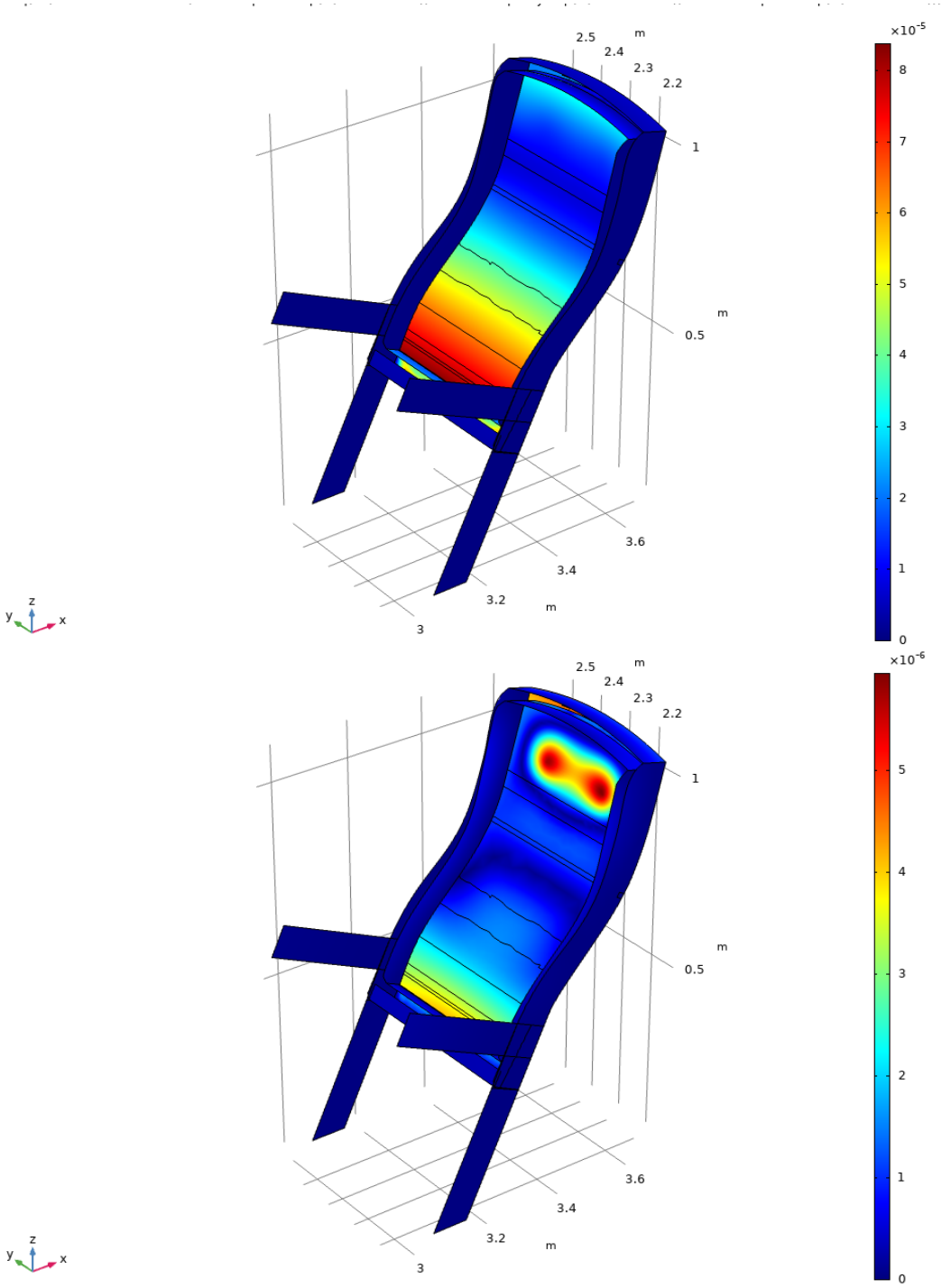
4 TULOKSIA

Kuvassa 3 on esitetty istuimen yläosan (herätepiste 1) nopeusvaste taajuuksilla 0 – 200 Hz kahdella vaahtomuovin jäykkyyden (kimmomodulin) arvolla. Arvolla 500 kPa vasteessa on resonansi taajuudella 40 Hz. Joustavammalla kimmomodulin mitoituksella 100 kPa vaste kasvaa noin 6 dB tällä taajuudella, ja lisäksi syntyy resonanssivahvistus myös 20 Hz alueelle.



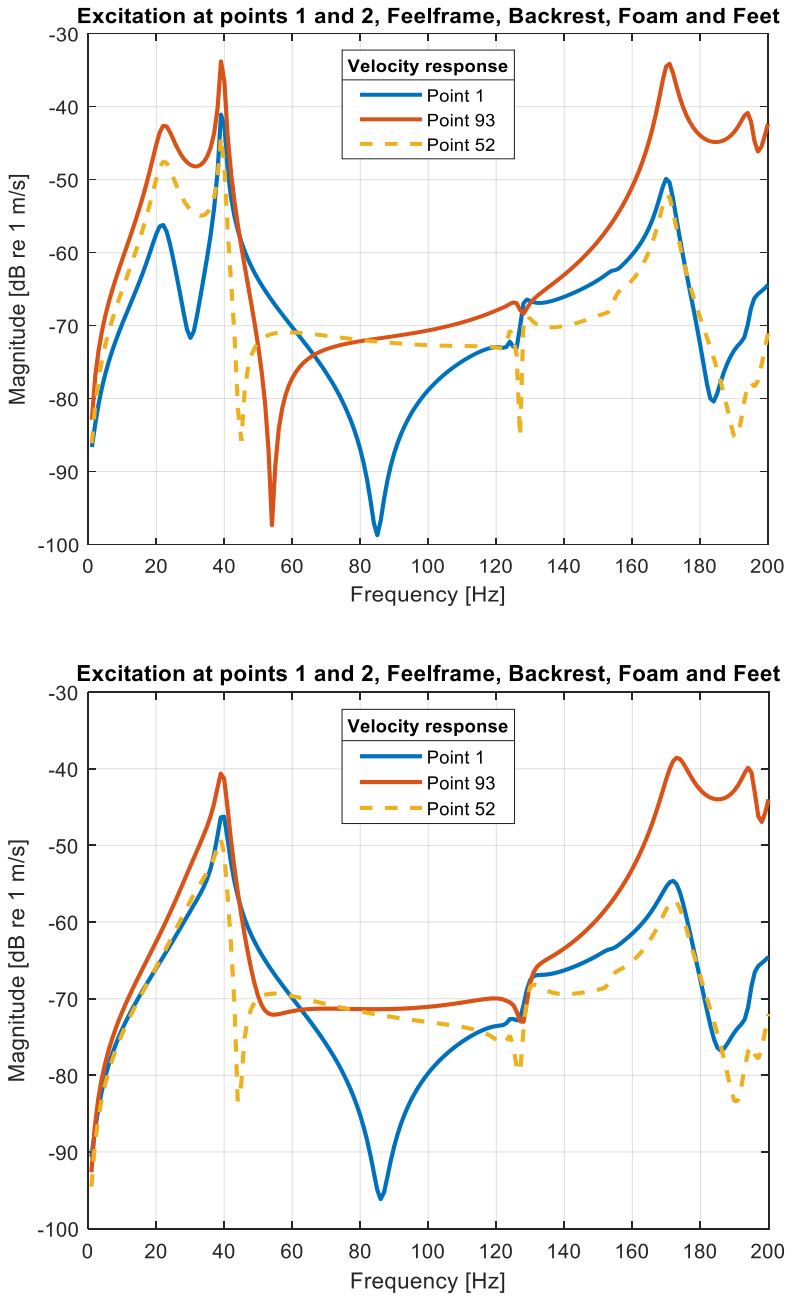
Kuva 3. Herätelähteen piste 1 nopeusvaste monofonisella herätteellä (yksikkövoimaheräte pisteissä 1 ja 2) kahdessa tapauksessa: selkänojan ja apurungon välisen vaahtomuovin kimmomoduli 100 kPa ja 500 kPa.

Kuvassa 4 on esitetty värähtelyn pinnan normaalisuuntaisen komponentin amplitudijakauma taajuudella 30 Hz. Havaitaan, että selkänojan alaosassa värähtely on voimakkaampaa kuin sen yläosassa. Käyttäjän pään kohdalla vallitseva värähtely saadaan siis jakautumaan koko selkänojaan apurungon resonanssien avulla.



Kuva 4. Esimerkki istuimen värähtelyjakaumasta. Pinnan normaalinsuuntainen siirtymä taajuuksilla 30 Hz (yllä) ja 110 Hz (alla).

Kuvassa 5 on vertailtu värähtelynopeutta eri pisteissä. Havaitaan, että alle 40 Hz taajuuksilla vaste on selkänojan alaosassa (piste 93) amplitudiltaan suurempi kuin niskan kohdalla (piste 1). Joustavamman vaahtomuovin tapauksessa ero on suurempi, johtuen 20 Hz taajuudella resonanssivahvistuksesta.



Kuva 5. Värähtelyn nopeusvaste taajuuksilla 0 – 200 Hz monofonisella herätteellä istuimen yläosassa (point 1), ristiselässä (point 93), ja apurungon alaosassa (point 52). Kaksi vaahtomuovin joustavuutta 100 kPA (yllä) ja 500 kPa (alla).

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Istuimen selkänojaan integroidun Augmented Audio-äänentoiston matalien taajuuksien värähtelytoistoa mallinnettiin numeerisesti Comsol Multiphysics -ympäristössä. Tavoitteena on. Multiphysics mahdollistaa monipuolisen analyysin, myös äänensäteilyn mallintamisen, mutta se osoittautui työlääksi valmiin geometrian tuomisessa ja verkottamisessa. Samoin värähtelymuotojen visualisointiin ei löytynyt yksinkertaista työkalua.

Tulokset osoittavat, että käyttämällä apurunkojärjestelyä alimpien audiotaajuuksien värähtelyjakaumaa saadaan laajennetuksi selkänojan yläosasta koko selkänojan alueelle.

Työssä kuvattu yksinkertaistettu vapaan istuimen mallitus muodostaa pohjan tarkemmalle analyysille, jossa otetaan huomioon ihmisen mekaaninen kuorma, ja värähtelyn välittyminen kehoon. Edelleen voidaan mallittaa äänensäteilyä lähikentässä, jonka vaste pienillä taajuuksilla määrittyy lähes koko istuimen pinnan värähtelyllä. Keskitaajuuksilla äänensäteily on enemmän paikallista EVE-elementin värähtelyä. Dynamiikan mallinnus ja simulointi mahdollistaa nopeamman kehityssyklin vaativan akustisen järjestelmän tuotekehityksessä.

VIITTEET

[1] https://mantyharju.fi/sisalto/elokuvateatteri-kino/tilat, viitattu 24.9.2019

[2] Linjama J, Uosukainen S, Immonen T, Avikainen T, Äänituntumasoittimen akustinen mallintaminen ja simulointi. Akustiikkapäivät 2017, Espoo.

[3] Puomio, O., Gonzalez, R., and Lokki, T., Augmented audio with behind-the-head listening device, In the AES International Conference on Immersive and Interactive Audio, York, UK, March 27-29, 2019.

VAIMENNUSMATERIAALIN SIJOITUKSEN VAIKUTUS HUONEAKUSTIIKKAAN

Jose Cucharero [1,2]*, Tuomas Hänninen [1,3] ja Tapio Lokki [2]

[1] Lumir Oy, Tammiston kauppatie 22, 01510 Vantaa
[2] Aalto-yliopisto, Tietotekniikan laitos, PL 13100, 00076 Aalto
[3] Aalto-yliopisto, Biotuotteiden ja biotekniikan laitos, PL 16300, 00076 Aalto
jose.cuchareromoya@aalto.fi

Tiivistelmä

Luokkahuoneissa ja monitilatoimistoissa jälkikaiuntaa vaimennetaan asentamalla ääntä absorboivia akustiikkalevyjä kattoon ja seinille. Näin saadaan äänitasoa laskettua, parannettua puheen ymmärrettävyyttä sekä tehtyä tiloista miellyttävämpiä. Tässä työssä tutkittiin akustiikkalevyjen sijoittelun vaikutusta huoneen vaimentamiseen, toisin sanoen miten akustiikkalevyt pitäisi asentaa, jotta saavutettaisiin mahdollisimman hyvä äänenvaimennus. Mittauksia tehtiin sekä kaiuntahuoneessa että luokkahuonetta muistuttavassa ympäristössä. Tulokset osoittavat, että akustiikkalevyt vaimentavat vähemmän ääntä, jos ne asennetaan huoneen nurkkiin, jos huoneen äänikenttä on diffuusi. Jos huoneessa on selkeästi pintoja, joiden välille ääni jää heijastelemaan, silloin luonnollisesti paras absorptiomateriaalin sijoituspaikka on vaimentaa kyseiset pinnat.

1 JOHDANTO

Luokkahuoneiden akustiikalla on suuri vaikutus oppimiseen ja opettajien hyvinvointiin. Hälyisä akustiikka voi johtaa oppimisvaikeuksiin ja heikompaan sosiaaliseen kanssakäymiseen [1, 2, 3]. Tutkimukset osoittavat, että erityisesti nuorten lapsien oppimistulokset kärsivät korkeista melutasoista sekä kaikuisista tiloista [2]. Erityisesti kielten opetusluokkien akustiikkaan tulisi kiinnittää huomiota. Eniten hälyisistä luokista kärsivät huonokuuloiset sekä puheongelmaiset oppilaat. Luokkien akustiikan parantamisella on myös positiivinen vaikutus opettajien hyvinvointiin [4].

Akustikkalevyjen optimaalinen sijoittaminen tuottaa parhaan mahdollisen ääniympäristön sekä säästää kustannuksia. Tässä tutkimuksessa ääntä absorboivan materiaalin sijoittelun vaikutusta tutkittiin mittaamalla kahden vaimennusmateriaalin absorptiokertoimet jälkikaiuntahuoneessa sekä huoneessa, joka kalustettiin muistuttamaan luokkahuonetta. Jälkimmäisessä huoneessa mitattiin jälkikaiunta-aika (T_{20}), selkeys (C_{50}) and puheensiirtoindeksi (STI) sijoittamalla tietty määrä vaimennusmateriaalia useammalla

Copyright ©2019 Jose Cucharero, Tuomas Hänninen ja Tapio Lokki. Tämä on avoimesti julkaistu teos, joka noudattaa Creative Commons NIMEÄ 4.0 Kansainvälinen –lisenssiä (CC BY 4.0). Teosta saa kopioida, levittää, näyttää ja esittää julkisesti ja siitä saa luoda johdannaisteoksia, kunhan tekijän nimi ja lähde mainitaan asianmukaisesti.

eri tavalla. Tutkimuksen tarkoitus oli tarkastella materiaalisijoittelun vaikutusta näihin yleisesti mitattuin huoneakustiikan tunnuslukuihin.

2 MENETELMÄT

2.1 Kaiuntahuonemittaukset

Kahden vaimenusmateriaalin absorptiokertoimet määritettiin ISO-354 standardin [5] mukaisella mittauksella Aalto-yliopiston kaiuntahuoneessa. Huoneen mitat ovat 8.7 m x 6.2 m x 3.6 m, eli tilavuus on 194 m^3. Huoneessa roikkui 8 diffuusoria estämässä häiritseviä tärykaikuja ja huoneen Schröder-taajuus on 275 Hz. Mittaukset tehtiin ilmaisella ARTA-ohjelmalla (http://www.artalabs.hr), joka tekee impulssivastemittaukset logaritmisellä sinipyyhkäisyllä. Kussakin mittaustilanteessa tehtiin standardin mukaisesti 12 jälkikaiunta-aikamittausta, kahdesta lähdepisteestä kuuteen mikrofonipisteeseen. Mikrofonit olivat pallokuvioisia mittausmikrofoneja ja äänilähteenä käytettiin Genelec 8040 -kaiutinta, joka suunnattiin diffuusoreita kohti. Huoneen lämpotilaa ja ilmankosteutta seurattiin mittausten ajan ja ne eivät muuttuneet mittausten aikana.

Tutkitut materiaalit olivat Lumir Oy:n valmistamia 8 mm paksuja puukuidusta ruiskutetuja levyjä sekä 100 mm paksuja Rockwool Finland Oy:n valmistamia kivivillalevyjä. Molempia materiaaleja oli käytettävissä 12 m^2. ISO-354 standardi ohjeistaa sijoittamaan mitattavan näytteen huoneen keskelle. Tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää, kuinka paljon määritetty absorptiokerroin muuttuu, jos materiaalit sijoitetaan lähemmäksi seiniä tai jopa huoneen nurkkaan (kuva 1).

2.2 Luokkahuonetta jäljittelevä mittaustila

Vaimennusmateriaalien sijoittelun vaikutusta huoneen akustiikkaan tutkittiin myös toisessa mittaustilassa, joka kalustettiin pöydillä ja tuoleilla muistuttamaan luokkahuonetta. Tämän huoneen tilavuus oli 125 m^3 ja pöytiä sekä tuoleja oli molempia 13. Luokkahuoneen mittaukset suoritettiin tyhjässä huoneessa.

Mittaukset tehtiin standardeiden ISO 3382-1:2009 [6] ja IEC 60268-16:2011 [7] mukaan ja kuten aiemmin todettiin mittauksista laskettiin T_{20}, C_{50} ja STI. Tällä kertaa käytettiin neljää vastaanottopistettä ja kahta lähdepistettä. Äänilähteenä oli Genelec 8030B -kaiutin, jonka suuntaavuus muistuttaa ihmisen pään suuntaavuutta. Puheensiirtoindeksin arvot laskettiin ilman signaalikohinasuhteen vaikutusta, eli ainoastaan jälkikaiunta muutti STI:n arvoja.

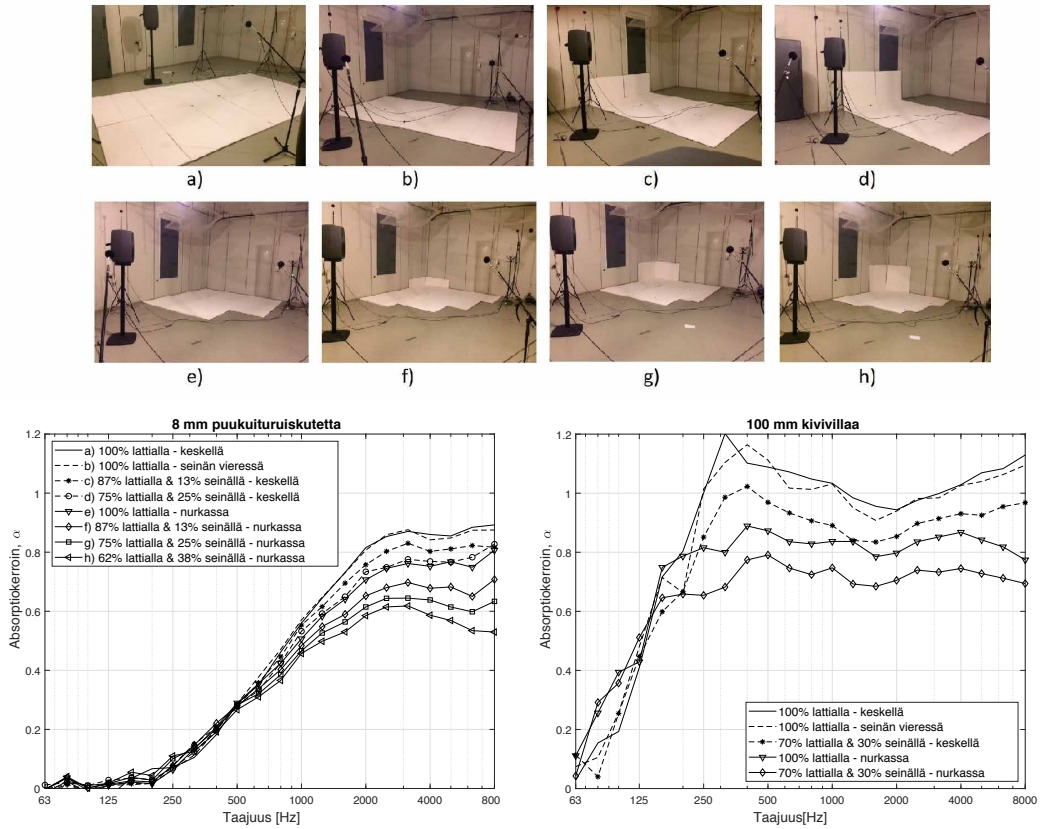
Tässä "luokkahuoneessa"vaimennusmateriaalina oli 10.6 m^2 50 mm paksua Ecophon Oy:n valmistamaa lasivillaa. Tutkitut materiaalisijoittelut olivat (kts. kuvat 2a-d):

(a) 100% sivu- ja päätyseinällä katonrajassa.

(b) 50% seinällä katonrajassa 50 % katossa huoneen perällä.

(c) 100% katossa huoneen perällä.

(d) 100% katon keskellä.



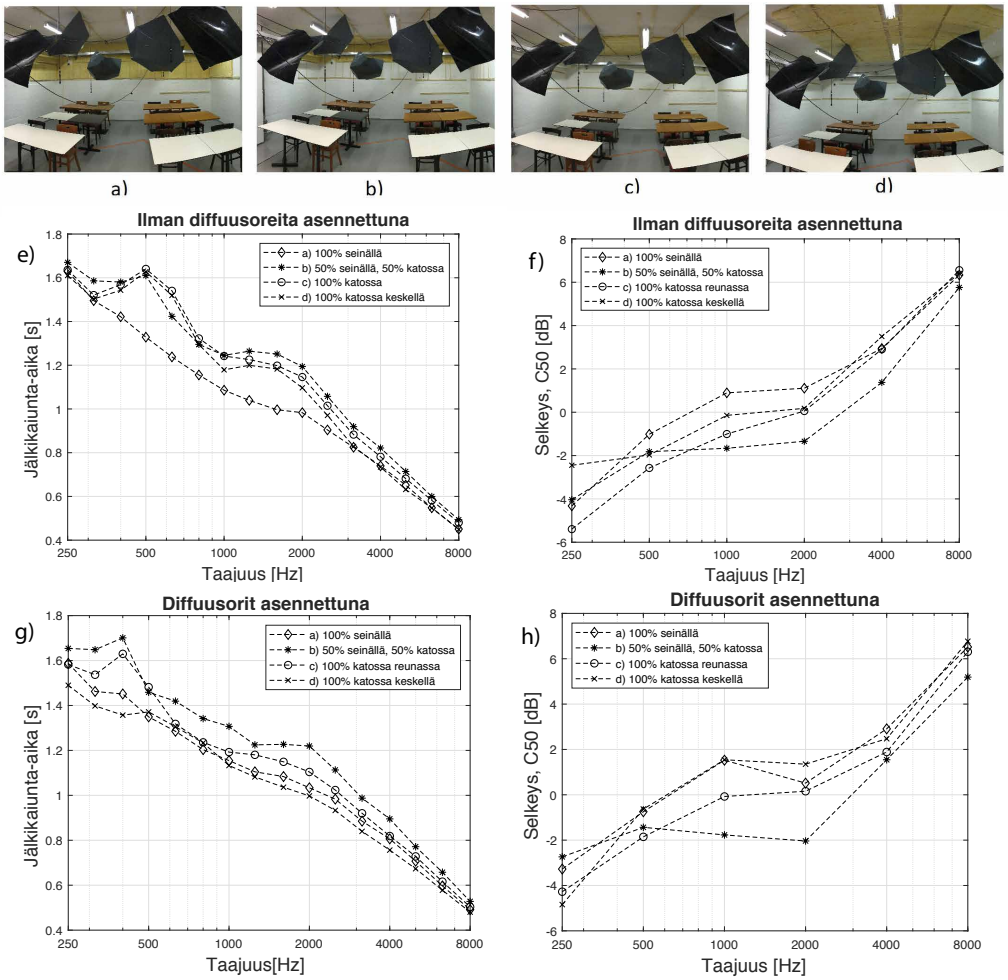
Kuva 1: Absorptiokertoimet: 8 mm ruiskutettua puukuitua (vasemmalla) ja 100 mm kivivillaa (oikealla) materiaalien ollessa a) huoneen keskellä, b) lähellä seinää, c-d) osoittain seinällä sekä e-h) huoneen nurkassa erilaisilla sijoitteluilla. Kuvissa on ruiskutetut puukuitulevyt.

Luokkahuoneemme mitattiin tyhjänä, jolloin pelkät tuolit ja pöydät eivät riitä tekemään äänikentästä kovin diffuusia. Niinpä mittaukset toistettiin asentamalla 6 noin neliön kokoista diffuusoria huoneeseen (kts. Kuvat 2a-d).

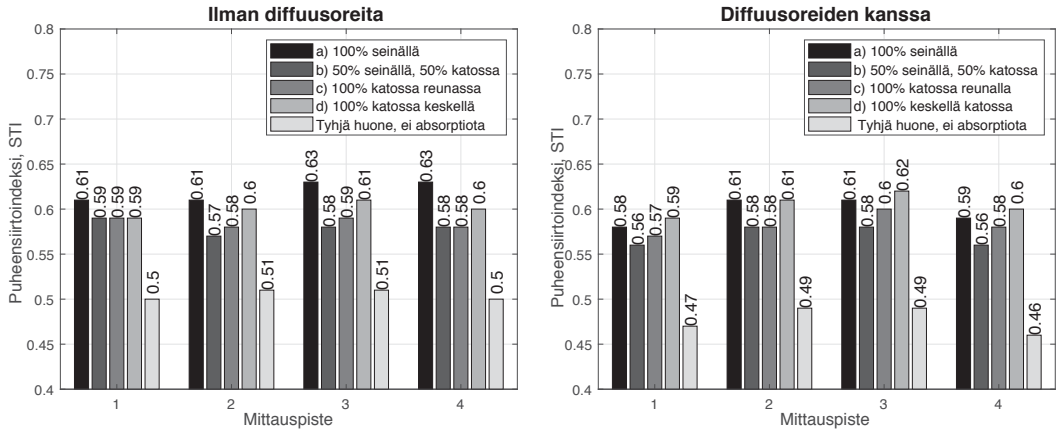
3 TULOKSET

3.1 Absorptiokerroinmittaukset kaiuntahuoneessa

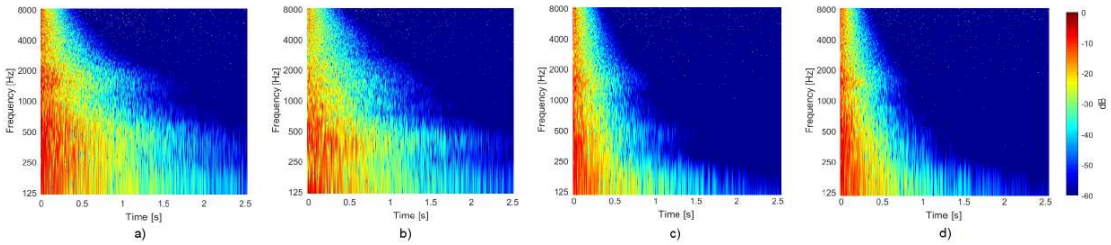
Kuva 1 esittää mitatut absorptiokertoimet terssikaistoittain usealla materiaalien sijoitteluilla. Kuvaaajista nähdään selvästi, että absorptiokertoimien arvot putoavat sitä enemmän mitä enemmän vaimennusmateriaalia sijoitetaan lähemmäksi huoneen nurkkaa. Ero on merkittävä ja se on suurimmillaan yli 20% keski- ja nurkkasijoituksien välillä.



Kuva 2: Luokkahuoneessa mitatut T_{20} ja C_{50}, vaimennusmateriaalina oli 50 mm lasivillaa asennettuna a) katon rajaan seinälle, b) puolet seinälle ja puolet kattoon, c) kattoon seinän vierustalle ja d) katon keskelle. Kuvissa e-f) on mittaustulokset ilman roikkuvia diffuusoreita ja g-h) diffuusoreiden kanssa.



Kuva 3: Luokkahuoneessa mitatut puheensiirtoindeksin arvot neljässä eri mittauspisteessä erilaisilla vaimennusmateriaalin sijoitteluilla sekä diffuusoreiden kanssa että ilman.



Kuva 4: Luokkahuoneessa mitatuista impulssivasteista lasketut spektrogrammit: a) huone ilman vaimennusmateriaaleja ja diffuusoreita, b) huone ilman vaimennusmateriaaleja, mutta diffuusorit asennettuna, c) vaimennusmateriaalit keskellä kattoa, mutta ei diffuusoreita ja d) vaimennusmateriaalit peräseinällä ilman diffuusoreita.

3.2 Luokkahuonemittaukset, jälkikaiunta-aika T_{20}, puheen selkeys C_{50} ja puheensiirtoindeksi STI

Kuvassa 2 on T_{20} ja C_{50} mittaustulokset neljälle eri materiaalisijoittelulle sekä diffuusorien kanssa että ilman niitä. Mitatut puheensiirtoindeksin arvot on esitetty kuvassa 3. Ensimmäiset mittaukset tehtiin ilman diffuusoreita ja jälkikaiunta-ajoista näkee (kuva 2e)) kuinka vain seinälle asennettu vaimennusmateriaali pienentää jälkikaiuntaaikaa alle 3 kHz taajuuksilla. On ilmiselvää, että ääni jää heijastelemaan seinien välillä ja siksi katossa oleva vaimennusmateriaali ei vaikuta juurikaan jälkikaiunta-aikaan [8]. Lisäksi mittausten aikana havaittiin selvä tärykaiku 1-2 kHz taajuuksilla. Tämä taajuusalue vaimeni selvästi hitaammin, kuten kuvan 4a spektrogrammi paljastaa. Kuva 4d osoittaa, että seinälle asennettu lasivilla vaimentaa tehokkaasti nämä seinien välille muodostuvat moodit noin 500 Hz taajuudella sekä tärykaiut 1-2 kHz taajuusalueella. Nämä tulokset osoittavat selvästi, että jos tilassa on selkeitä moodeja tai tärykaikuja niin silloin ilman muuta tehokkain vaimennusmateriaalin paikka on sellainen, joka vaimentaa nämä ilmiöt.

Kun luokkahuoneeseen asennettiin roikkuvat diffuusorit (kuvissa 2a-d), lyhin jälkikaiuntaaika ja paras puheen selkeys mitattiin tilanteessa, jossa vaimennusmateriaalit oli asennettuna katon keskelle, varsinkin niillä taajuusalueilla, joilla äänikenttä oli riittävän diffuusi (eli ilman vahvoja moodeja ja tärykaikuja). Kuva 4b osoittaa hyvin, kuin roikkuvat diffuusorit poistivat häiritsevät tärykaiut, mutta suurempia diffuusoreita tai muita huonekaluja olisi tarvittu, jotta äänikenttä olisi ollut tasaisempi myös alle 1000 Hz taajuuksilla.

4 YHTEENVETO

Kaiuntahuoneessa tehdyt kahden eri vaimennusmateriaalin absorptiokerroinmittaukset osoittivat, että mitä lähemmäksi huoneen nurkkia vaimennusmateriaali sijoitetaan, sitä vähemmän se imee ääntä. Sijoituksen vaikutus oli hämmästyttävän suuri, jopa yli 20% huoneen keskelle ja huoneen nurkkaan sijoittelun välillä. Käytännössä huoneen nurkassa tarvitaan siis 20% enemmän vaimennusmateriaalia, joka on merkittävä kustannuslisäys.

Mittaukset toistettiin toisessa tilassa, joka kalustettiin pöydillä ja tuoleilla muistuttamaan luokkahuonetta. Koska tämän tilan betoniseinillä ei ollut mitään (esim. kirjahyllyjä) niin

näiden seinien välille ääni jäi heijastelemaan pitkäksi aikaa. Kun huoneeseen asennettiin roikkuvat heijastinlevyt niin äänikenttä diffusoitui enemmän ja materiaalisijoituksen vaikutus äänen vaimenemiseen pystyttiin toistamaan. Tämä lisätutkimus oli hyvä muistutus siitä, että vaimennusmateriaalin sijoituksessa tulee aina ensin pohtia, onko huoneessa mahdollisia pintoja, joiden välille ääni voi jäädä heijastelemaan ja tällaiset pinnat tulee luonnollisesti vaimentaa ensimmäisenä.

Tämän tutkimuksen tulokset ovat jokseenkin ristiriidassa standardissa SFS 5907 [9] esitettyjen suositusten kanssa. Standardissa suositellaan jättämään luokkahuoneen katon keskiosa vaimentamatta, jotta opettajan ääni kantautuisi hyvin myös luokkahuoneen perälle. Tämä on varmasti toimiva ratkaisu, mutta silloin vaimennusmateriaali joudutaan sijoittamaan katon nurkkiin ja osin seinille, jotka tämän tutkimuksen mukaan eivät ole optimaalisia vaimennustehon näkökulmasta. Ennenkuin lopullisia johtopäätöksiä voidaan esittää, tarvitaan lisää mittauksia oikeissa luokkahuoneissa erilaisilla materiaalisijoitteluilla. Vasta niiden myötä voidaan varmistua, miten oppimista ja hyvinvointia tukeva ääniympäristö luokkahuoneisiin pitäisi toteuttaa mahdollisimman kustannustehokkaasti.

VIITTEET

[1] D. Lubman and L.C. Sutherland. Classroom acoustics for the 21st century. In *19th International Congress on Acoustics*. International Commission on Acoustics (ICA), 2007.

[2] J. Bradley and H. Sato. The intelligibility of speech in elementary school classrooms. *J. Acoust. Soc. Am.*, 123(4):2078–2086, 2008.

[3] B. Shield, R. Conetta, J. Dockrell, D. Connolly, T. Cox, and C. Mydlarz. A survey of acoustic conditions and noise levels in secondary school classrooms in england. *J. Acoust. Soc. Am.*, 137(1):177–188, 2015.

[4] C. Campbell, C. Svensson, and E. Nilsson. Classroom acoustic research on speech behaviour of teachers and students. In *The 42nd International Congress and Exposition on Noise Control Engineering (Internoise)*. International Institute of Noise Control Engineering (I-INCE), Innsbruck, Austria, 2013.

[5] ISO 354. Acoustics—measurement of sound absorption in a reverberation room. 2003.

[6] ISO 3382-1. Acoustics – measurement of room acoustic parameters – part 1: Performance spaces. International Standards Organization, 2009.

[7] IEC 60268-16. Sound system equipment – part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index. International Electrotechnical Commission, 2011.

[8] J. Angus. The effect of diffusers on frequency dependent room mode decay. In *107th Convention of the Audio Engineering Society*. Audio Engineering Society (AES), 1999.

[9] SFS 5907. Rakennusten akustinen luokitus. Suomen standardoimisliitto, 2004.

AUTON PAKOPUTKISTON AKUSTINEN MALLINTAMINEN

Juho Liski ja Vesa Välimäki

Aalto-yliopiston sähkötekniikan korkeakoulu
Akustiikan laboratorio, Signaalinkäsittelyn ja akustiikan laitos
Otakaari 5, 02150 Espoo
etunimi.sukunimi@aalto.fi

Tiivistelmä

Tässä artikkelissa kuvaillaan auton pakoputkiston suunnitteluohjelma, jolla pakoputkiston ulostuloääntä voidaan simuloida ennen rakentamista. Ohjelman toiminta perustuu aaltojohtomalliin, jossa suoraa putkea mallinnetaan viiveillä ja eri osien vaikutusta suodattimilla. Jokaiselle mallinnetulle osalle on määritelty heijastus- ja läpäisykertoimet molempiin suuntiin sekä osan aiheuttama ekvalisointivaikutus mittauksiin perustuen. Mittaukset perustuivat tasoaalto-oletukseen, ja niitä on tehty sekä laboratoriotiloissa että todellisessa ympäristössä, jolloin esimerkiksi herätesignaaliksi on saatu realistista moottorin ääntä. Joidenkin osien ominaisuudet on parametrisoitu, jolloin niitä vastaavat suodattimet riippuvat käyttäjän asettamasta parametrin arvosta. Parametrisointi perustuu joko prototyyppisuodattimeen, jonka ominaisuuksia muokataan vastaamaan asetettua arvoa, tai täysin alusta alkaen suunniteltaviin suodattimiin. Ohjelma on toteutettu Matlabilla ja sitä käytetään graafisen käyttöliittymän avulla. Ohjelman toiminta on varmistettu sekä yksittäisten osien ominaisuuksia kuvaavien suodattimien kohdalla vertaamalla niitä mittaustuloksiin että ohjelman laskennan kohdalla vertaamalla simuloitua putkistoa laboratoriossa mitattuun putkistoon.

1 JOHDANTO

Mallinnettaessa äänilähdettä akustisesti yritetään sen tuottama ääni saada aikaan keinotekoisesti esimerkiksi tietokoneella [1]. Esimerkkejä mallinnettavista äänilähteistä ovat ihmisen puhemekanismi [2], soittimet [3] sekä koneiden äänet simulaattoreissa [4]. Tässä työssä esitellään Matlabilla toteutettu ohjelma, jolla voidaan mallintaa auton pakoputkiston toimintaa. Putkiston mallintaminen perustuu aaltojohtomalliin, missä putkea kuvataan viivelinjalla sekä epäjatkuvuuskohtiin sijoitettavilla heijastus- ja läpäisykertoimilla. Aaltojohtomallia on käytetty aiemmin esimerkiksi puhesynteesissä [2, 1], soitinten mallintamisessa [1, 5] ja etäisyyden simulointiin digitaalisessa ympäristössä [6]. Putkiston mallintaminen perustuu laboratoriomittauksiin, missä mitattiin eri putkiston osien tarvittavat impulssivasteet. Näin ollen osien akustiikkaa ei mallinneta

Copyright ©2019 Juho Liski ja Vesa Välimäki. Tämä on avoimesti julkaistu teos, joka noudattaa Creative Commons NIMEÄ 4.0 Kansainvälinen –lisenssiä (CC BY 4.0). Teosta saa kopioida, levittää, näyttää ja esittää julkisesti ja siitä saa luoda johdannaisteoksia, kunhan tekijän nimi ja lähde mainitaan asianmukaisesti.

niiden fysiikkaan perustuen vaan käytetään “mustan laatikon” menetelmää, jossa verrataan järjestelmän tulo- ja lähtösignaaleja. Samalla tavalla voidaan toimia esimerkiksi mallinnettaessa analogista viivettä [7] tai kitaravahvistimia [8].

Tämän artikkelin rakenne on seuraavanlainen. Osiossa 2 kuvataan projektin aikana tehdyt mittaukset. Pakoputkiston mallintaminen sekä Matlab-toteutuksen toiminta esitellään osiossa 3. Lopuksi osio 4 päättää artikkelin.

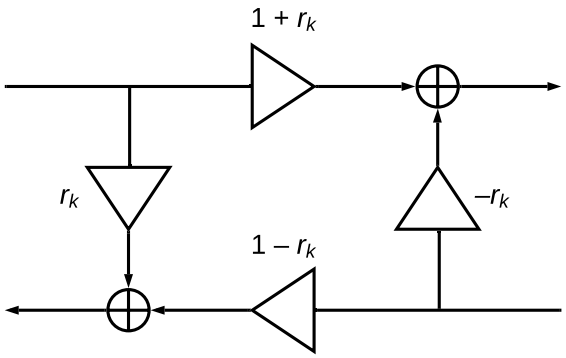
2 MITTAUKSET

Työn aikana tehdyt mittaukset sisälsivät sekä laboratorio- että kenttämittauksia. Laboratoriomittaukset toteutettiin Aalto-yliopiston Akustiikan laboratorion isossa kaiuttomassa huoneessa ja kenttämittaukset Laitilassa Martelius-Exhaust Oy:n toimitilojen pihalla. Mittausten eroista on huomioitava se, että kenttämittauksissa (kuten myös todellisessa ajossa) putkiston sisällä esiintyviä ilman virtausta sekä pienhiukkasia ei ollut mukana laboratoriomittauksissa.

Laboratoriomittauksilla oli kaksi tarkoitusta: ensimmäisten mittausten avulla määriteltiin tarvittavat parametrit putkiston mallintamista varten ja toisissa mittauksissa mallinnettua putkistoa verrattiin mitattuun putkistoon. Laboratoriossa käytetty mittausjärjestelmä on seuraavanlainen. Mitattavat putken osat liitettiin toisiinsa ja äänilähde kiinnitettiin muodostuneen putkiston päähän adapterilla, joka toteutettiin varta vasten tätä työtä varten. Osaan putken osista oli porattu pieniä reikiä miniatyyrimikrofoneja varten, joilla putkiston vaste nauhoitettiin. Mikrofonien tuli olla tasassa putken sisäseinän kanssa, jotta ne aiheuttivat mahdollisimman vähän häiriöitä putkessa etenevään ääneen. Jos reiässä ei ollut mikrofonia, se tukittiin muovailuvahalla. Koska mitatut putkistot olivat lyhyitä suhteessa äänen nopeuteen, mittauksissa rakennettiin pitkä putkisto jokaista mittausta varten. Tällöin mitattava osa oli suunnilleen keskellä ja osan ympärillä on vakiopaksuista suoraa putkea. Tämä helpotti mittaustulosten jälkikäsittelyä.

Suunnitteluohjelmisto perustuu aaltojohtomalliin, eli käytännössä putkiston eri osien välisiin heijastus- ja läpäisykertoimiin sekä eri osien ekvalisointivaikutuksiin. Näiden parametrien määrittämiseksi tarvitaan kulloinkin mitatun osan impulssivaste, joka saadaan käyttämällä testisignaalina logaritmista taajuuspyyhkäisyä [9]. Taajuuspyyhkäisyn taajuusalue rajoitettiin välille 20 Hz – 20 kHz (näytteenottotaajuus on 44.1 kHz koko työssä). Heijastuskertoimia varten mitattiin impulssivaste ennen osaa, ja tästä impulssivasteesta ikkunoitiin äänilähteestä soitettu signaali sekä epäjatkuvuuskohdasta heijastunut signaali. Tiettyjen osien ekvalisointivaikutuksen määrittämiseksi mitattiin impulssivaste ennen ja jälkeen kyseisen osan, ja kyseisistä vasteista ikkunoitiin ensimmäiset etenevät aallot. Tämä oli mahdollista, koska mittaukset perustuivat tasoaalto-oletukseen. Tällöin tietyn rajataajuuden alapuolella putkistossa etenee ainoastaan yksiulotteinen tasoaalto, mikä mahdollistaa yksittäisten impulssien ikkunoinnin impulssivasteesta. Mitatuissa putkissa tämä rajataajuus on noin 4 kHz.

Kenttämittaukset toteutettiin käyttäen kahta mikrofonia, joilla nauhoitettiin todellisen autoon kiinnitetyn pakoputkiston ääntä. Toinen mikrofoni oli kiinnitetty aivan putkiston alkupäässä nauhoittaen putken sisällä olevaa ääntä, jolloin kyseisiä signaaleja voidaan käyttää heräteääninä suunnitteluohjelmassa. Kiinnityspiste oli heti katalysaattorin jälkeen.



Kuva 1: *Kaksiporttinen sirontaliitoskohta akustiselle painesignaalille.*

Koska kyseisessä kohdassa moottorista tuleva ilma on erittäin kuumaa ja ääntä haluttiin mitata putken sisällä, mittauksessa käytettiin G.R.A.S. 40SC-sondimikrofonia [10]. Tämä mikrofoni kestää hyvin suuria lämpötiloja, koska itse mikrofonikapselia ei tarvitse altistaa kuumalle ilmalle, vaan mikrofoni kiinnitetään mitattavaan kohtaan nokan avulla. Toinen mikrofoni oli puolestaan kiinnitettynä auton takapuskuriin lähelle pakoputkiston loppupäätä ja se nauhoitti samanaikaisesti ensimmäisen mikrofonin kanssa.

3 PUTKISTON MALLINTAMINEN

Putkistoa mallinnetaan aaltojohtomallilla. Näin ollen putkiston pituus syntyy kahdesta viivelinjasta, joissa epäjatkuvuuskohtiin on sijoitettu heijastus- ja läpäisykertoimia mallintavat suodattimet kuvan 1 mukaisesti. Viivelinjojen pituuteen vaikuttaa valittujen osien pituus ja approksimoitu ilman lämpötila. Lämpötilan gradientti putken sisällä perustuu erillisiin mittauksiin ja riippuu moottorin kuormitustilasta. Heijastussuodattimien lisäksi muiden kuin tasapaksua putkea olevien osien keskikohtaan viivelinjassa on sijoitettu ekvalisointivaikutuksen tuottava suodatin. Kyseiset suodattimet perustuvat osiossa 2 kuvattuihin mittauksiin. Tässä työssä oletetaan putkistossa olevien käännösten olevan niin loivia, että ne eivät eroa suorasta putkesta ominaisuuksiltaan.

Kuten kuvassa 1 näytetään, kaksiporttisen epäjatkuvuuskohdan heijastus- ja läpäisykertoimet voidaan esittää positiivisen suunnan heijastukertoimen r_k avulla [11]. Sen laskemiseksi määriteltiin ensiksi heijastukertoimen tavoitevaste $H_r(f)$, joka saadaan:

$$H_r(f) = \frac{\text{FFT}(y(t))}{\text{FFT}(x(t))} = \frac{Y(f)}{X(f)} = 20\log_{10} Y(f) - 20\log_{10} X(f), \tag{1}$$

missä $Y(f)$ on heijastuneen impulssin $y(t)$ taajuusvaste ja $X(f)$ on etenevän impulssin $x(t)$ taajuusvaste. Ekvalisointivaikutuksen tavoitevaste saadaan samalla kaavalla, kun $y(t)$ on osan läpi edennyt impulssi ja $x(t)$ puolestaan on ennen osaa mitattu, etenevä impulssi.

Kun kaikkien osien tavoitevasteet oli määritetty, suunniteltiin niitä vastaavat IIR-suodattimet. Lopulliset suodattimet voidaan jakaa kahteen kategoriaan: ominaisuuk-

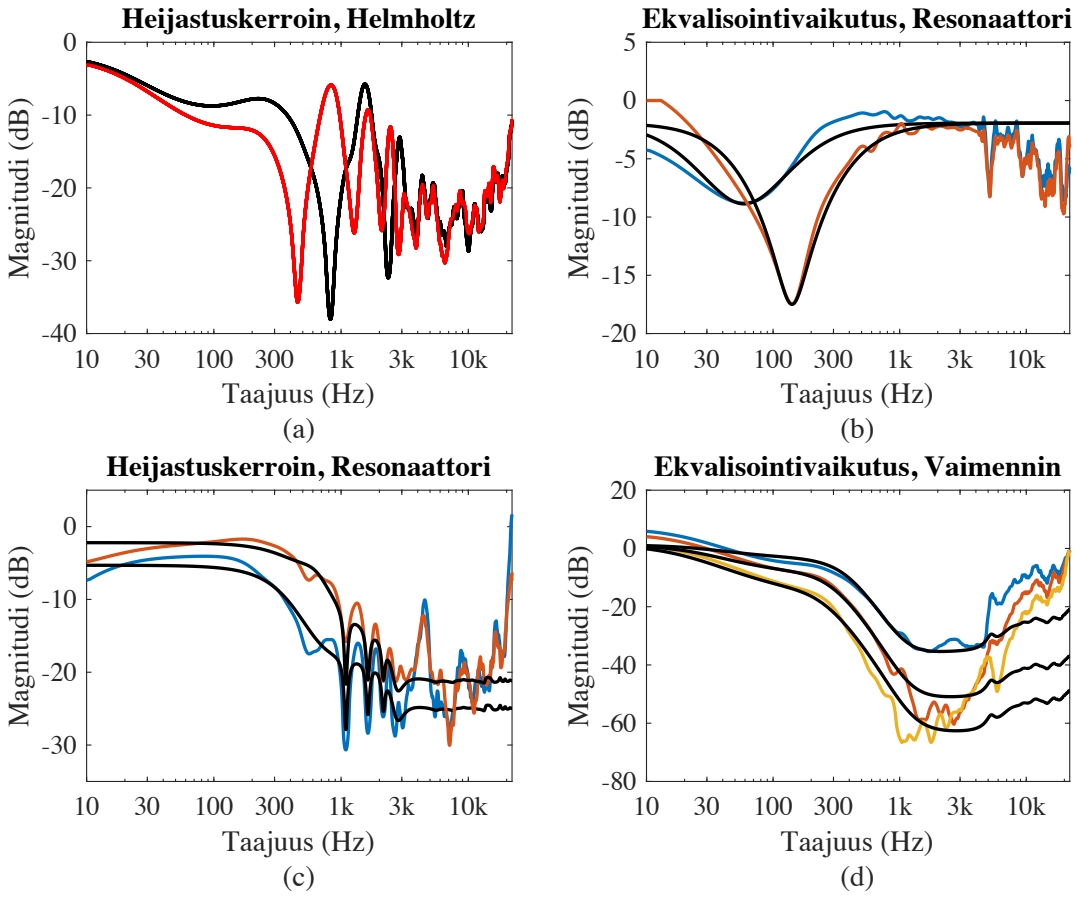
siltaan lukitut suodattimet ja parametrisoidut suodattimet. Jos haluttu suodatin kuuluu ensimmäiseen ryhmään, se on suunniteltu etukäteen ja tallennettu valmiina suodattimena, jota käytetään sellaisenaan laskennassa. Näiden suodattimien suunnittelu perustuu Matlabin Yule-Walker –menetelmään [12]. Siinä halutuissa pisteissä näytteistetty taajuusvaste (tavoitevaste) annetaan Matlab-funktiolle, joka suunnittelee tavoitevasteen ja määritetyn asteluvun perusteella IIR-suodattimen, jonka taajuusvaste yrittää vastata tavoitevastetta. Jos tällä tavoin suunniteltu suodatin oli epäjatkuvuuskohdan heijastuskerroin, määriteltiin sitä kuvaavan IIR-suodattimen avulla lopuksi heijastumiskerroin toiseen suuntaan sekä läpäisykertoimet molempiin suuntiin kuvassa 1 näkyvällä tavalla.

Toiseen kategoriaan kuuluvat suodattimet puolestaan vaativat käyttäjältä parametrin arvon, jonka perusteella joko suunnitellaan suodatin kokonaan alusta alkaen tai muokataan prototyyppisuodatinta vastaamaan asetettua parametria. Tähän toiseen kategoriaan kuuluvat seuraavat osat: Helmholtz-vaimentimet (sekä heijastuskertoimet että ekvalisointivaikutus), resonaattorivaimentimet, joiden sisäputkessa on yksi reikä (sekä heijastuskertoimet että ekvalisointivaikutus) ja villatäytteiset vaimentimet (ainoastaan ekvalisointivaikutus). Näiden osien suodatinsuunnittelu alkoi parametrisoinnista, eli sopivan ominaisuuden määrittämisestä useista vertailumittauksissa samantyyppisten osien kesken, joka selittää vasteissa tapahtuvat muutokset. Tämän jälkeen parametrisointisääntö selvitettin Matlabin avulla käyttäen käyrän sovittamista. Seuraavaksi esitellään tarkemmin edellä mainittujen osien parametrisointi.

Helmholtz-vaimentimet muodostuvat suoraan putkeen liitetystä sivuhaarasta ja sen päässä olevasta kammiosta. Niiden parametrisointi perustuu sivuputken eli kaulan pituuteen. Mittausten perusteella sillä on merkittävin vaikutus sekä ekvalisointivaikutuksen että heijastus- ja läpäisykertoimien vasteiden muotoon. Muuttamalla kaulan pituutta, vasteiden kuopat ja huiput siirtyvät eri taajuuksille. Tämä on nähtävissä kuvassa 2(a), jossa on kahden eri osan heijastukertoimet. Helmholtz-vaimentimien parametrisointi perustuu prototyyppisuodattimien vasteen muokkaamiseen. Käytännössä vastetta skaalataan eli sitä siirretään horisontaalisesti logaritmisessa taajuustasossa. Prototyyppisuodattimia on kolme jokaista tyyppiä kohden (ekvalisointisuodatin, kaksi heijastussuodatinta ja kaksi läpäisysuodatinta), ja sopivin prototyyppisuodatin valitaan asetetun parametrin arvon perusteella.

Vasteiden liikuttaminen taajuudessa tehdään prototyyppisuodattimen nollien ja napojen kulmia säätämällä, jolloin halutut taajuusvasteen ominaisuudet saadaan liikutettua halutulle taajuudelle. Tämä vastaa periaatteessa näytteenottotaajuuden muuttamista arvolla, joka vastaa uusien kulmien ja vanhojen kulmien suhdetta. Kun tarvittava muutoskerroin on laskettu, sillä kerrotaan sekä napojen että nollien kulmat. Ennen kuin osoittaja- ja nimittäjäpolynomit muodostetaan uudestaan, varsmitetaan, että uusien polynomien tuottama vaste matalilla taajuuksilla vastaa alkuperäistä vastetta. Tämän jälkeen uudet navat ja nollat saadaan diskreetillä Fourier'n käänteismuunnoksella ja lopulliset osoittaja- ja nimittäjäpolynomit Matlabin `poly`-komennolla. Hieman suurempia muutoksia tehtäessä tulee huomioida napojen ja nollien laskostuminen yksikköympyrällä, mikä vaikuttaa vasteeseen varsinkin korkeilla taajuuksilla. Tämän estämiseksi yksinkertaisin keino on hylätä kaikki ne navat ja nollat, joiden uudeksi kulman arvoksi tulisi yli π tai $-\pi$.

Parametrisoidut resonaattorivaimentimet muodostuvat suorasta sisäputkesta, jossa on yksi reikä, sekä putken ympärillä olevasta sylinterinmuotoisesta kammiosta. Tällöin



Kuva 2: *Parametristen osien vasteita: (a) kahden eri Helmholtz-vaimentimen heijastuskerroinsuodatinten vasteet, (b) kahden eri resonaattorivaimentimen ekvalisointisuodattimien vasteet (mustat) sekä tavoitevasteet (värilliset), (c) kahden eri resonaattorivaimentimen heijastuskerroinsuodattimien vasteet (mustat) sekä tavoitevasteet (värilliset) ja (d) kolmen eri vaimentimen tavoitevasteet (värilliset) sekä niitä vastaavat suodatinvasteet (mustat).*

parametrin arvo on sisäputkessa olevan reiän halkaisija. Tämän osan kohdalla ekvalisointivaikutuksen tuottavan suodattimen ja heijastus- sekä läpäisykerroinsuodatinten suunnittelu eroavat toisistaan. Ekvalisointivaikutusta mallinnetaan toisen asteen kuoppasuodattimella. Kuopan vaimennus, keskitaajuus sekä Q-arvo muuttuvat parametrin arvon funktiona. Lisäksi suodattimella on noin -2 dB:n vakiopoikkeama nollasta, jotta se paremmin vastaa mitattuja vasteita. Kaksi esimerkkiä resonaattorivaimentimen ekvalisointisuodatinten tavoitevasteesta sekä niitä vastaavista suodattimista on kuvassa 2(b).

Halutut heijastussuodattimet saadaan puolestaan aloittamalla prototyyppisuodattimesta ja muokkaamalla sen taajuusvastetta ensimmäisen asteen korkealla hyllykorjaimella sekä toisen asteen korostussuodattimella, joiden vahvistukseen parametrin arvo vaikuttaa. Korostussuodattimen keskitaajuus on 650 Hz, sen Q-arvo on 1 ja hyllyn keskitaajuus on 1 kHz. Kaksi esimerkkiä on nähtävissä kuvassa 2(c). Lopuksi, läpäisykertoimet saadaan myös aloittamalla prototyyppisuodattimesta ja yhdistämällä niihin toisen asteen

matala hyllykorjain (positiivinen suunta) tai ensimmäisen asteen matala hyllykorjain (negatiivinen suunta), joiden vahvistukset määritetään parametrin arvoon perustuen. Toisen asteen hyllyn keskitaajuus on 1 kHz ja ensimmäisen asteen hyllyn 450 Hz.

Vaimentimella tarkoitetaan tässä sylinterinmuotoista kammiota, joka on täytetty villalla ja jonka läpi kulkee suora, rei'itetty putki. Vaimentimen mallinnus eroaa kahdesta yllä mainitusta siten, että parametrin arvo vaikuttaa ainoastaan ekvalisointisuodattimeen. Mittausten perustella heijastus- ja läpäisykertoimet olivat hyvin samanlaisia riippumatta vaimentimen ominaisuuksista. Parametrin arvona käytetään vaimentimen pituutta. Koska mitatuissa vaimentimissa oli likimäärin sama villatiheys, oletetaan tässä työssä villatiheys vakioksi.

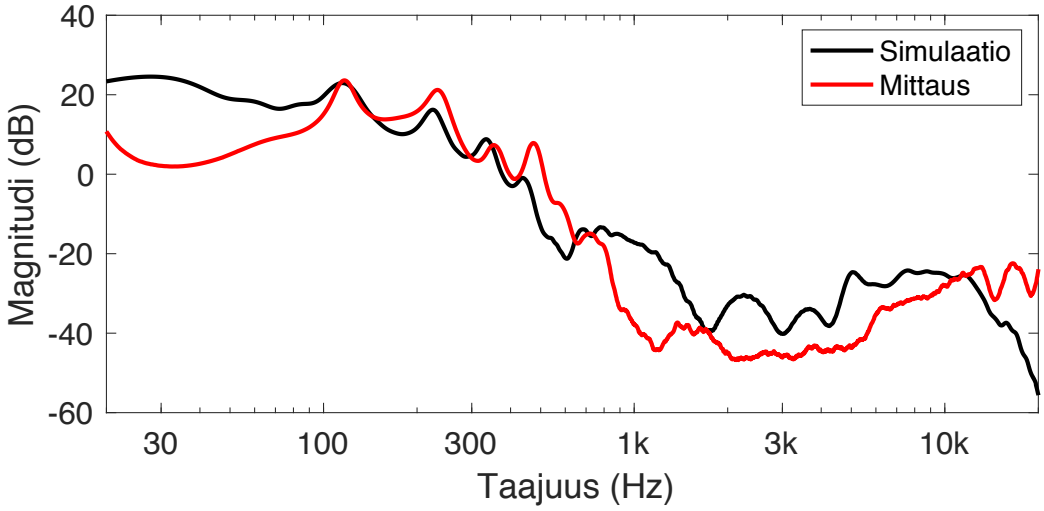
Vaimentimen ekvalisointisuodattimen lähtökohta on prototyyppisuodatin, jonka vaste vastaa 10 cm pitkää vaimenninta. Se on saatu jakamalla eripituisten vaimenninten vaste oman pituutensa kymmenesosalla ja ottamalla näistä keskiarvo. Parametrin arvon perusteella prototyyppisuodattimen vastetta säädetään kahdella korkealla hyllykorjaimella vastaamaan haluttua lopputulosta. Toinen hyllykorjain on ensimmäistä astetta ($f_c = 40$ Hz) ja toinen toista astetta ($f_c = 600$ Hz), ja molempien vaimennus määritetään parametrin arvon perusteella. Kuten kuvasta 2(d) nähdään, näin toteutettu ekvalisointisuodatin vastaa hyvin mittauksia kiinnostavalla taajuuskaistalla (alle putken 4 kHz:n rajataajuuden) ja eroaa mitatuista vasteista ainoastaan taajuuksilla, joilla mallinnuksen perustana oleva tasoaalto-oletus ei enää ole voimassa.

3.1 Matlab-toteutus

Suunnitteluohjelma toteutettiin Matlabilla ja sitä käytetään graafisen käyttöliittymän avulla. Käyttöliittymästä valitaan vuorotellen suoran putken pituus ja sitä seuraava osa (vaimennin, resonaattori, tms.) sekä tarvittaessa kyseisen osan parametrin arvo. Kun haluttu putkisto on muodostettu valittavissa olevista osista, ohjelma muodostaa sitä vastaavan aaltojohtomallin. Kaksi viivelinjaa luodaan vastaamaan positiivista ja negatiivista kulkusuuntaa. Nämä viivelinjat ovat samanpituisia ja tähän pituuteen vaikuttaa asetetut osien pituudet, approksimoitu lämpötila putkessa sekä näytteenottotaajuus. Seuraavaksi osia vastaavat heijastus- ja läpäisysuodattimet sijoitetaan epäjatkuvuuskohtiin sekä tarvittavien osien ekvalisointivaikutuksen tuottavat suodattimet kyseisesten osien keskikohtaan.

Koska lopullinen mallinnus tehdään askeleittain (signaalit liikkuvat kerrallaan yhden askeleen viivelinjoissa), tarvitaan suodattimia vastaavat tilamuuttujat, jotka tallentavat suodattimen tilan askeleiden välillä. Näin ollen putkiston impulssivaste saadaan syöttämällä putkiston alkuun ideaali impulssi ja seuraamalla sen etenemistä ja heijastumista putkistossa riittävän pitkään, jotta kaikki putkistossa liikkuvat signaalit ovat vaimentuneet tarpeeksi. Laskennan toimiessa tällä tavoin tulee olla tarkkana, että suodattimet eivät tuota vahvistusta, koska tällöin signaali saattaa "räjähtää" (signaaliarvot kasvavat rajatta) eikä impulssivastetta saada laskettua. Tämän estämiseksi, lopullisessa mallissa käytetään ylimääräisenä suodattimena tasavirtasulkua.

Mallinnuksessa saadaan putkiston impulssivaste pisteestä, joka on välittömästi putken (avoimen) lopun jälkeen. Tarvittaessa impulssivaste voidaan myös määrittää putken sisäl-



Kuva 3: *Mitatun ja mallinnetun putkiston vasteiden vertailu.*

lä, mikä on tehty kuvassa 3, missä verrataan samanlaista putkistoa mallinnettuna sekä mitattuna. Vertailu on tehty putken sisällä lähellä loppua, koska mittaus oli helppoa toteuttaa kyseisessä pisteessä. Kuten kuvasta nähdään, resonanssit osuvat oikeille kohdille, mutta niiden tasoissa on eroavaisuuksia. Koska lopullisena tarkoituksena on kuunnella sen ääntä reaalimaailmaa vastaavassa tilanteessa, saatu impulssivaste alipäästösuodatetaan Matlabin `diff`-komennolla. Tällä simuloidaan äänen säteilyä putkiston avoimesta loppupäästä. Tämä lopullinen impulssivaste konvoloidaan lopuksi valitun heräteäänen kanssa, jolloin saadaan käyttäjälle toistettava signaali.

4 YHTEENVETO

Tässä artikkelissa esiteltiin pakoputkiston suunnitteluohjelmaa varten tehdyt mittaukset sekä mittausten pohjalta toteutettu putkiston mallintamien. Mittauksia tehtiin sekä laboratoriossa pelkälle putkistolle että todellisessa ajotilanteessa autossa kiinniolleelle putkistolle. Putkiston mallintaminen perustuu aaltojohtomalliin, jossa putken pituus muodostuu kahdesta viivelinjasta, johon lisätään heijastus- ja läpäisysuodattimet epäjatkuvuuskohtien paikalle sekä lisäksi ekvalisointisuodattimet ääntä muokkaavien osien paikalle. Suodattimet ovat IIR-tyyppisiä, je ne voivat olla joko parametreiltaan lukittuja tai tietyn osan ominaisuuden mukaan parametrisoituja. Suunnitteluohjelma on toteutettu Matlab-ympäristössä. Käyttäjät voivat suunnitella haluamansa putkiston graafisen käyttöliittymän avulla ja sen jälkeen kuunnella kyseisen putkiston ääntä käyttäen eri heräteääniä.

KIITOKSET

Kirjoittajat kiittävät Martelius-Exhaust Oy:tä, jonka kanssa tämän työ toteutettiin yhteistyössä (Aalto-yliopiston projektinumero 410643).

VIITTEET

[1] V. Välimäki. *Discrete-time modeling of acoustic tubes using fractional delay filters*. PhD thesis, Teknillinen korkeakoulu, Sähkötekniikan osasto, Akustiikan ja ääenkäsittelytekniikan laboratorio, Espoo, Finland, 1995.

[2] J. L. Kelly Jr. and C. C. Lochbaum. Speech synthesis. In *Proc. 4th International Congress on Acoustics*, pages 1–4, Copenhagen, Denmark, 1962.

[3] J. O. Smith. Physical modeling synthesis update. *Computer Music Journal*, 20(2): 44–56, 1996.

[4] V. Mäntyniemi and V. Välimäki. Äänisynteesi työkonesimulaattoreissa. In *Proc. Akustiikkapäivät 2015*, Kuopio, Finland, Sep. 2015.

[5] T. Smyth and J. S. Abel. Estimating waveguide model elements from acoustic tube measurements. *Acta Acustica united with Acustica*, 95(6):1093–1103, 2009.

[6] M. Geronazzo, F. Avanzini, and F. Fontana. Auditory navigation with a tubular acoustic model for interactive distance cues and personalized head-related transfer functions. *Journal on Multimodal User Interfaces*, 10(3):273–284, 2016.

[7] R. Simionato, J. Liski, V. Välimäki, and F. Avanzini. A virtual tube delay effect. In *Proc. International Conference on Digital Audio Effects (DAFx-18)*, pages 361–368, Aveiro, Portugal, Sep. 2018.

[8] J. Pakarinen and D. T. Yeh. A review of digital techniques for modeling vacuum-tube guitar amplifiers. *Computer Music Journal*, 33(2):85–100, 2009.

[9] A. Farina. Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique. In *Proc. AES 108th Convention*, Paris, France, Feb. 2000.

[10] G.R.A.S. Sound & Vibration A/S. 40SA/40SC Probe Microphones. `https://www.gras.dk/files/m/a/man_40SA_40SC.pdf`, 2016. Instruction manual, [accessed Aug. 22, 2019].

[11] J. O. Smith. Physical modeling using digital waveguides. *Computer Music Journal*, 16(4):74–91, 1992.

[12] B. Friedlander and B. Porat. The modified Yule-Walker method of ARMA spectral estimation. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, AES-20(2): 158–173, Mar. 1984.

PÖLYN JA MAALIN VAIKUTUS KIPSILEVYRAKENTEISEN KAIUNTAHUONEEN JÄLKIKAIUNTA-AIKAAN

Anttoni Kananen

Helimäki Akustikot
Temppelikatu 6 B
00100
Helsinki
anttoni.kananen@helimaki.fi

Tiivistelmä

Helimäki Akustikoilla on akkreditoitu laboratorio ilmaääneneristysluvun R_w mittaamiseen. Mittaukset koostuvat pääosin kevyt- ja raskasrakenteisista väliseinistä, jolloin asennustyöstä aiheutuu tilaan runsaasti pölyä. Tämän tutkimuksen tarkoitus on selvittää kuinka paljon laboratorion puhdistaminen ja seinäpintojen ylimaalaus vaikuttaa verrattuna pölyisen tilanteen jälkikaiunta-aikaan. Oletus on, että vaikutus on huomattava suurilla taajuuksilla ja mitätön pienillä taajuuksilla, mutta rajataajuudesta ei ole ennakkotietoa. Tulokset tukevat aikaisempaa oletusta ja mittausten perusteella pölyn vaikutus pestyyn tilanteeseen nähden oli merkittävää vasta 1600 hertsistä ylöspäin ja maalatun tilanteen vaikutus pestyyn tilanteeseen 315 hertsistä ylöspäin.

1 JOHDANTO

Helimäki Akustikoilla on käytössään akkreditoidut laboratoriotilat ilmaääneneristysluvun R_w mittaamiseen (yhteistyössä Aulis Lundell Oy:n kanssa). Tilat koostuvat kahdesta vierekkäin olevasta kaiuntahuoneesta, joiden välille tutkittava rakenne/-osa rakennetaan. Laboratoriossa tehtävät mittaukset koostuvat pääosin kevyt- ja raskasrakenteisista väliseinistä, jolloin asennustyöstä aiheutuu tilaan runsaasti pölyä. Laboratoriossa ei ollut tehty kunnollista siivousta hiljattain suoritetun kivirakenteisen seinämittauksen jälkeen, joten kaiuntahuoneissa oli paljon pölyä. Lisäksi laboratoriotiloja oli päätetty kehittää viihtyisämmiksi käyttäjän kannalta, mikä tarkoitti esim. tilojen valoisuuden parantamista maalaamalla seinät valkoisiksi. Tämä tilanne antoi mahdollisuuden lähteä tutkimaan pölyn ja maalin vaikutusta kaiuntahuoneiden jälkikaiunta-aikaan. Kirjallisuudessa [1] on esitetty eriäviä absorptiokertoimia esim. maalaamattomalle ja maalatulle kiviseinälle, mutta pölyn absorptiokertoimia ei ole helposti löydettävissä. Kuitenkin on yleisesti tiedossa, että pöly absorboi ääntä.

2 LABORATORION RAKENTEET JA MUUTOKSET

Tilat koostuvat kahdesta vierekkäin olevasta kaiuntahuoneesta, joita yhdistää betoninen kehikko. Kaiuntahuoneiden kaikki pinnat, paitsi betonikehikko, ovat kipsilevyrakenteisia

© 2019 Anttoni Kananen. Tämä on avoimesti julkaistu teos, joka noudattaa Creative Commons NIMEÄ 4.0 Ei sovitettu –lisenssiä (CC BY 4.0). Teosta saa kopioida, levittää, näyttää ja esittää julkisesti ja siitä saa luoda johdannaisteoksia, kunhan tekijän nimi ja lähde mainitaan asianmukaisesti.

(kolminkertainen kipsilevytys seinissä ja katossa). Huoneiden seinä- ja kattopintoja ei ole viimeistelty, vaan ne ovat alkuperäisellä kipsilevypinnalla. Lattialevyjen päälle on asennettu teräksinen levy kestävyyden kannalta. Huoneiden diffuusoreina on käytetty katosta ripustettuja ovilevyjä (3 kpl per huone). Laboratorion yhteistilavuus (lähetys- ja vastaanottohuone, sekä mittausaukko) on noin 220 m^3.

Ensimmäisessä mittauksessa mitattiin kaiuntahuoneet nykyisellään, pölyisinä (kts. kuva 1). Ennen toista mittauskertaa huoneiden pinnat ja diffuusorit pyyhittiin puhtaaksi. Kolmatta mittausta varten kummankin huoneen seinäpinnat ylimaalattiin. Kattoa ei maalattu ja diffuusorit olivat jo valmiiksi maalatut.

Kuva 1. Lähtötilanteen kuva lattian pölyisestä pinnasta.

3 ÄÄNIABSORPTIO JA ABSORPTIOSUHDEKERROIN

Ääniabsorption mittaaminen ja laskenta kaiuntahuoneessa on esitetty standardissa ISO 354:2003 [2]. Mitatusta jälkikaiunta-ajasta saadaan laskettua tilan ääniabsorption määrä sabineissa seuraavasti:

$$A = \frac{55.3 * V}{c * T} - 4 * V * m, \quad (1)$$

jossa V on huoneen tilavuus kuutiometreissä, c on äänennopeus (c = (331 + 0,6*t/°C) m/s), T on jälkikaiunta-aika sekunneissa ja m on tehovaimennuskerroin standardin ISO 9613-1:1993 [3] mukaan tietyssä lämpötilassa ja suhteellisessa kosteudessa.

Materiaalin aiheuttama lisäabsorptio tilaan lasketaan seuraavasti:

$$A_T = A_2 - A_1, \quad (2)$$

jossa A_1 kaavan 1 mukainen tulos, kun kaiuntahuone on tyhjä, ja A_2, kun tutkittava materiaali on tuotu kaiuntahuoneeseen.

Materiaalin absorptiosuhdekertoimet saadaan laskettua jakamalla absorption muutos tutkittavan materiaalin pinta-alalla.

$$\alpha_s = \frac{A_T}{S}, \tag{3}$$

jossa A_T on kokonaisabsorption muutos sabineissa ja S on materiaalin pinta-ala neliömetreissä.

4 MITTAUKSET

Mittaukset suoritettiin laboratoriolla kolmena päivänä: 6.8., 12.8. ja 3.9.2019. Kaikissa mittauksissa kaiuntahuoneiden välinen aukko oli auki, joten tiloissa mitattiin kummankin tilan yhteinen jälkikaiunta-aika. Jälkikaiunta-aikamittaukset suoritettiin standardin ISO 354:2003 [2] mukaan. Mittauksissa käytettiin kahta kaiutinpaikkaa ja kuutta mikrofonipistettä per kaiutinpaikka ja jokaisesta mikrofonipaikasta otettiin kaksi mittausta. Mittausten yhteydessä mitattiin myös huoneiden lämpötila, suhteellinen kosteus ja staattinen ilmanpaine, jotka on esitetty taulukossa 1. Mittaukset suoritettiin Helimäki Akustikkojen työntekijöiden toimesta.

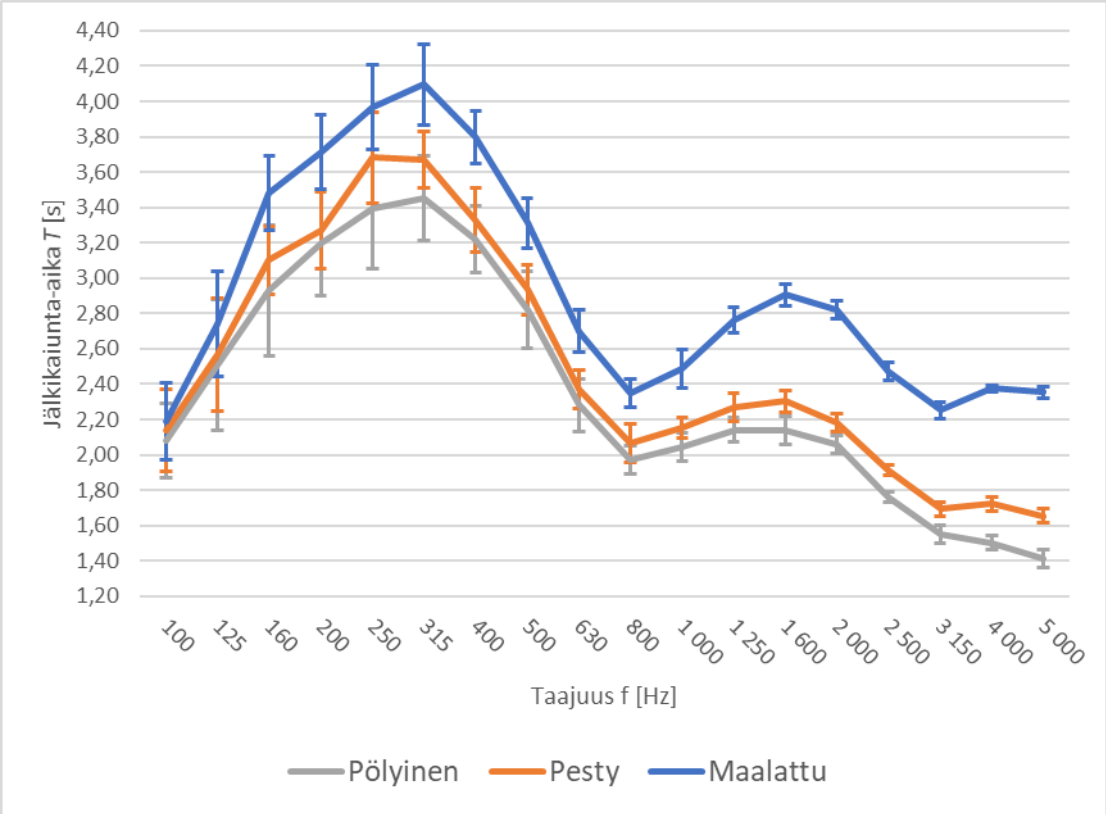
Taulukko 1. Mittauspäivinä mitatut sääolosuhteet laboratorion sisällä.

Päivä	*T* [°C]	*RH* [%]	*P* [hPa]
6.8.2019	21	49	1006,1
12.8.2019	20	60	1010,1
3.9.2019	20	65	1015

5 TULOKSET

Tilan lämpötila ja suhteellinen kosteus vaikuttavat sen jälkikaiunta-aikaan (kaava 1), jolloin tämän tutkimuksen yhteydessä tehdyt mittaukset tulee normeerata, jotta niiden vertaaminen toisiinsa olisi luotettavampaa. Mittaustulokset normeerattiin lähtötilanteen pyöristettyihin sääolosuhteisiin: lämpötila 20 °C ja suhteellinen kosteus 50 %. Pyöristykset johtuvat standardin 9613-1 [3] taulukkoarvojen puutteista (lämpötilat on esitetty viiden asteen välein ja suhteellinen kosteus vaihtelevasti 5-10 % välein). Kolmannen päivän mittauksen (maalattu tilanne) normeerausta varten taulukkoarvot jouduttiin interpoloimaan 60 ja 70 % suhteellisen kosteuden väliltä, koska taulukoissa ei ole suoraa arvoa 65 % suhteelliselle kosteudelle.

Normeeratut jälkikaiunta-ajat standardipoikkeamineen on esitetty kuvassa 2. Kuvaajista nähdään, että normeerattujen tulosten keskiarvot poikkeavat selvästi toisistaan jo 125 hertsistä alkaen, mutta merkittävä eroavaisuus (standardipoikkeamat eroavat toisistaan) ilmenee pölyisen ja pestyn tilanteen välillä 1600 hertsistä ylöspäin ja pestyn ja maalatun välillä 315 hertsistä ylöspäin. Peseminen pidentää lähtötilanteen jälkikaiunta-aikaa merkittävän eron alueella noin 0,1-0,2 sekuntia ja maalaaminen verrattuna pestyyn tilanteeseen noin 0,3-0,7 sekuntia merkittävän eron alueella riippuen taajuudesta.



Kuva 2. Pölyisen tilanteen sääolosuhteisiin normeeratut jälkikaiunta-ajat ja tulosten standardipoikkeamat.

6 ABSORPTIOKERTOIMET

Akustiikkasuunnittelijaa eniten hyödyttävä osuus tästä tutkimuksesta olisi tietää pölyn absorptiokertoimet sekä maalauksen vaikutus kipsilevyseinän absorptiokertoimiin. Näiden mittausten perusteella ei kuitenkaan voida määrittää kyseisiä termejä (ainakaan luotettavasti) johtuen poikkeamista verrattuna standardiin ISO 354 [2] sekä pölyn määrän määrittämisen vaikeudesta. Johdetaan kuitenkin kuriositeettina absorptiokertoimet edellä esitetyille tapauksille ja tehdään pölyn tapauksessa seuraavat oletukset:

- kaikki pöly laboratoriossa sijaitsee pelkästään lattialla sekä diffuusoreiden päälipinnoilla ja

- pölyä on kyseisillä pinnoilla yhtä paljon kaikkialla.

Tutkittavan materiaalin pinta-alana käytetään pölyn tapauksessa äskeisten oletusten perusteella lattian ja diffuusoreiden yhteistä pinta-alaa (noin 68 m^2) ja maalauksen tapauksessa maalattujen seinäpintojen pinta-alaa (noin 141 m^2).

Tällöin kaavan 3 mukaan lasketut pölyn absorptiokertoimet ja maalauksen vaikutus kipsilevyjen absorptiokertoimiin on esitetty taulukossa 2. Maalauksen vaikutus on esitetty muutoksena todellisin absorptiokertoimiin, koska käytetyllä mittaustavalla saadaan esiin ainoastaan kahden tilanteen välinen ero, joka näiden mittausten välillä oli maalaaminen. Kipsilevytys seinillä ei muuttunut mihinkään mittausten välillä.

Taulukko 2. Mittaustuloksista johdetut absorptiokertoimet pölylle ja absorptiokertoimien muutokset kipsilevyille maalauksesta johtuen.

f [Hz]	Pölyn absorptiokertoimet α	Maalauksen vaikutus kipsilevyjen absorptiokertoimiin Δα
100	0,01	0,00
125	0,00	-0,01
160	0,01	-0,01
200	0,00	-0,01
250	0,01	0,00
315	0,01	-0,01
400	0,01	-0,01
500	0,01	-0,01
630	0,01	-0,01
800	0,01	-0,01
1 000	0,01	-0,02
1 250	0,01	-0,02
1 600	0,02	-0,02
2 000	0,01	-0,03
2 500	0,02	-0,03
3 150	0,03	-0,04
4 000	0,05	-0,04
5 000	0,05	-0,05

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Mittaustulosten perusteella voidaan todeta, että pöly lisää tilan absorption määrää ja kipsilevyjen maalaaminen taas vähentää tilan absorption määrää. Pölyn vaikutus (merkittävä) alkaa näiden mittaustulosten perusteella 1600 hertsistä ylöspäin ja maalauksen vaikutus taas 315 hertsistä ylöspäin. Mittaustuloksista johdetut absorptiokertoimet pölylle ja absorptiokertoimien muutokset maalatuille kipsilevyille ovat esitetty vain kuriositeettina, eikä niitä tule käyttää suunnittelussa niiden epävarmuuksista johtuen.

8 KIITOKSET

Haluan kiittää Aulis Lundell Oy:tä tutkimuksen mahdollistamisesta järjestäen tilojen siivouksen ja maalauksen ja Helimäki Akustikot Oy:tä saadessani tehdä tutkimusta työn ohessani. Lisäksi haluan kiittää Aleksi Mikkolaa mittausten suorittamisesta, jotta itse pystyin keskittymään muuhun työhön.

VIITTEET

[1] Egan, M. David. Architectural Acoustics. McGraw-Hill, Inc., s. 52, 1988.

[2] ISO 354: Acoustics - Measurement of sound absorption in a reverberation room. International organization for standardization, 2003.

[3] ISO 9613-1: Acoustics – Attenuation of sound during propagation outdoors. International organization for standardization, 1993.

UUSIEN ÄÄNENVAIMENNINRATKAISUJEN KEHITTÄMINEN JA AINETTA LISÄÄVÄ VALMISTUS

Jukka Tanttari[1,a], Antti Hynninen[1,b], Heikki Isomoisio[1,a], Erin Komi[2], Seppo Uosukainen[3], Virpi Hankaniemi[4] ja Mikko Matalamäki[4]

[1] Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy
[a] PL 1300, 33101 Tampere; [b] PL 1000, 02044 VTT
etunimi.sukunimi@vtt.fi

2 Etteplan
Kytäjänkatu 23 A, P.O. BOX 1300, 05830 Hyvinkää
etunimi.sukunimi@etteplan.com

[3] SU Akustiikka
Lehmustie 1B, 00780 Helsinki
etunimi.sukunimi@pp.inet.fi

[4] Wärtsilä Finland Ltd Energy Solutions
PL 252, 65101 Vaasa
etunimi.sukunimi@wartsila.com

Tiivistelmä

Äänenvaimennin tulee etukäteen suunnitella täyttämään sille asetetut suorituskykyvaatimukset kustannustehokkaasti. Ainetta lisäävä valmistus (AM) on avaamassa uusia mahdollisuuksia kehitysprosessin nopeuttamiseen ja uusien, riskipitoisten ratkaisujen kokeelliseen todentamiseen. Rajoitteet geometrisille muodoille ovat olennaisesti vähäisempiä kuin perinteisillä valmistusmenetelmillä. Metodisesti kysymys on täyden koon vaihetta edeltävästä pienoismallitutkimuksesta. Aiheessa on kertynyt kokemusta mm. mikroperforoituja rakenteita hyödyntävistä Cremer-vaimentimista sekä helicoid-moodifilttereistä. Herschel-Quicke -vaimentimet ovat parhaillaan suunnittelupöydällä.

1 JOHDANTO

Mallinnus ja simulointi on korvannut kokeilukulttuurin uusien äänenvaimenninratkaisujen kehittämisessä. Ominaisuuksien kokeellisen todentamisen merkitys on kuitenkin säilynyt. Kokeet voivat tuoda esiin asioita, joita simuloinnissa ei osata huomioida. Fyysisen koekappaleen valmistaminen voi olla kallista ja aikaa vievää. Valmistusmenetelmien rajoitteiden huomioon ottaminen on perinteisesti rajoittanut kehittämisvaiheen ratkaisuavaruutta. Ainetta lisäävä valmistus (Additive Manufacturing, AM, ”tulostaminen”) on avaamassa uusia mahdollisuuksia äänenvaimentimen kehitysprosessin nopeuttamiseen ja uusien ratkaisujen löytämiseen.

© 2019 Jukka Tanttari, Antti Hynninen, Heikki Isomoisio, Erin Komi, Seppo Uosukainen, Virpi Hankaniemi, Mikko Matalamäki. Tämä on avoimesti julkaistu teos, joka noudattaa Creative Commons NIMEÄ 4.0 Ei sovitettu –lisenssiä (CC BY 4.0). Teosta saa kopioida, levittää, näyttää ja esittää julkisesti ja siitä saa luoda johdannaisteoksia, kunhan tekijän nimi ja lähde mainitaan asianmukaisesti.

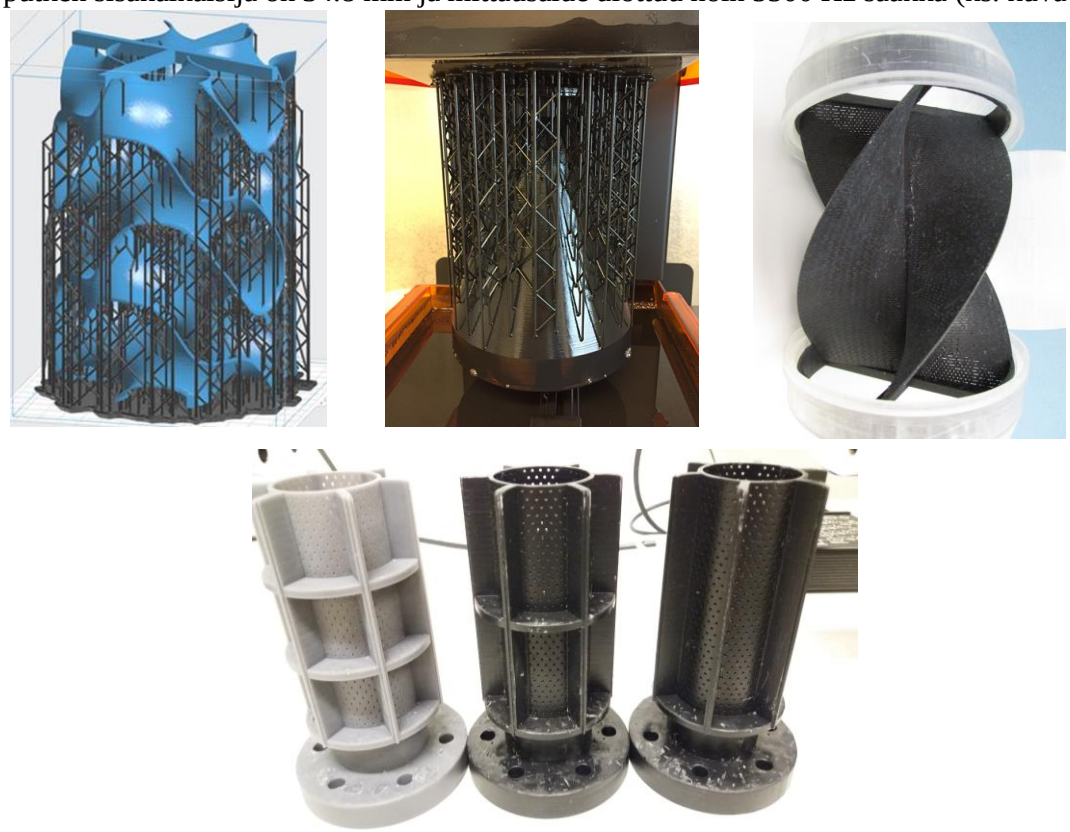
2 ÄÄNENVAIMENTIMIEN KEHITTÄMINEN JA AM

Äänenvaimennin tulee etukäteen suunnitella täyttämään sille asetetut suorituskykyvaatimukset kustannustehokkaasti [1]. Nykyiset simulointityökalut mahdollistavat tämän varsin hyvin. Toisaalta jotkut materiaaliparametrit voivat olla epätarkkoja, valmis vaimennin voi mitoiltaan ja muodoltaan poiketa nimellisestä ja siinä voi esiintyä ennakoimattomia ilmiöitä. Näistä syistä kokeellinen todentaminen tulee jatkossakin olemaan tärkeä vaihe uuden vaimentimen kehitysprosessin loppupäässä.

Ensimmäisen vaimenninyksilön valmistaminen voi olla korkeiden valmistuskustannusten ja/tai täysin uusien, todentamattomien ratkaisujen vuoksi liian riskipitoista. Tällaisten seikkojen vuoksi on hyödyksi, jos vaimennin voidaan ensin valmistaa pienin kustannuksin hyvin kevyellä tuotantokoneistolla ja lopullista kokoa pienempänä.

AM mahdollistaa kustannustehokkaan uudentyyppisten ratkaisujen todentamisen [2]. Vaimentimen ”tulostaminen” muovista stereolitografiatulostimella (stereolithography apparatus, SLA) on nopeaa ja halpaa ja rajoitteet geometrisille muodoille ovat olennaisesti vähäisempiä kuin muilla menetelmillä. Edullisilla pöytämallisilla (Kuva 1) tulostimilla voidaan tulostaa enintään noin 15x15x15 cm kokoisia kappaleita.

Monissa tapauksissa tulostetun vaimentimen mittaustulokset voidaan skaalata aaltolukusuhteiden avulla toiseen kokoon ja taajuusalueeseen. Läpäisyvaimennusmittaukset (Transmission Loss TL) tasoaaltoalueella voidaan tehdä esimerkiksi ACUPRO-putkella [3], jossa putken sisähalkaisija on 34.8 mm ja mittausalue ulottuu noin 5500 Hz saakka (ks. kuva 3).



Kuva 1. Vaimentimen komponentin tasokolmiopintamalli eli STL-malli, tulostusta SLA-laitteella (Formlabs Form 2) sekä tulostettuja komponentteja.

3 ESIMERKKEJÄ

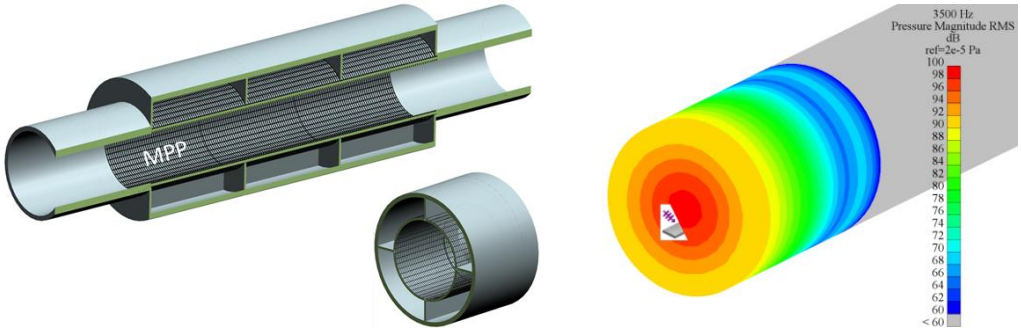
3.1 Cremer-vaimennin

Cremer-vaimentimessa on ideana synnyttää putken reunapinnalle hyvin pieni äänenpaine. Tällöin erityisesti tasoaallon eteneminen hankaloituu, koska tasoaallon äänenpaine on vakio putken poikkipinnalla. Idean on ensimmäisenä esitellyt Cremer [4].

Pienen äänenpaineen synnyttämiseen voidaan käyttää mikroperforoidun levyn (MPP) ja sen takana olevan pienen ontelon muodostamaa resonanssijärjestelmää. MPP:n rei'issä olevat "kaasutulpat" toimivat massana ja ontelo jousena. Kun ontelot ovat aksiaali- ja kehän suunnassa pieniä aallonpituuteen nähden, toimii putken pinta paikallisesti reagoivasti.

Kuvassa 2 on Cremer-vaimentimen rakenne auki leikattuna sekä simuloitu äänenpainetason jakauma vaimentimen sisällä. Äänenpainetaso voi pienentyä kahden putkihalkaisijan matkalla jopa 50 dB. Tämän jälkeen vaimentuminen yleensä hidastuu, mikä johtuu mm. korkeampien aaltomuotojen osuudesta, vuodoista onteloiden välillä sekä äänen etenemisestä vaimentimen rakenteessa. Tällöin pituuden kasvattaminen ei tietyn rajan jälkeen lisää TL:ää niin voimakkaasti kuin putken alkuosassa.

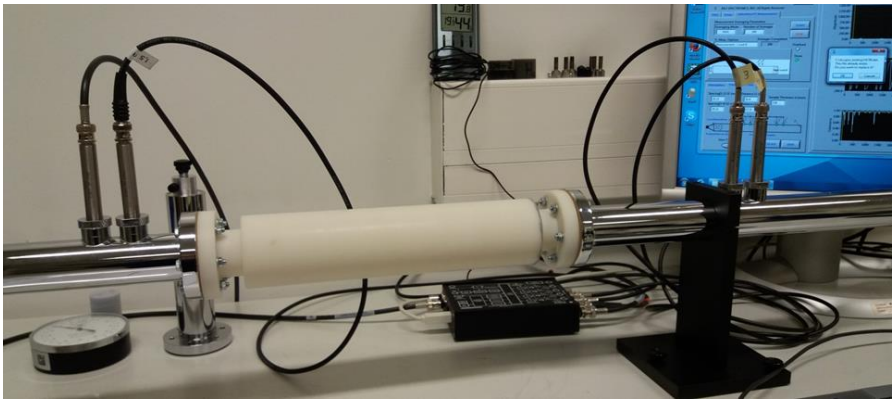
Resonanssialueella putken pinnan impedanssin imaginääriosa on pieni. TL:n kannalta optimaalinen reaaliosa on myös pienehkö. Cremer-vaimennin onkin ensisijaisesti reaktiivinen vaimennin, eikä MPP:n käytöllä tavoitella suurta absorptiosuhdetta, vaan hyvin reagoivaa pintaa. Siten Cremer-vaimennin on vaimennusominaisuuksiltaan kapeakaistainen. Vaimennintyypin lisäetuna on se, että vaimentimessa ei ole irtoavaa kuitumateriaalia.

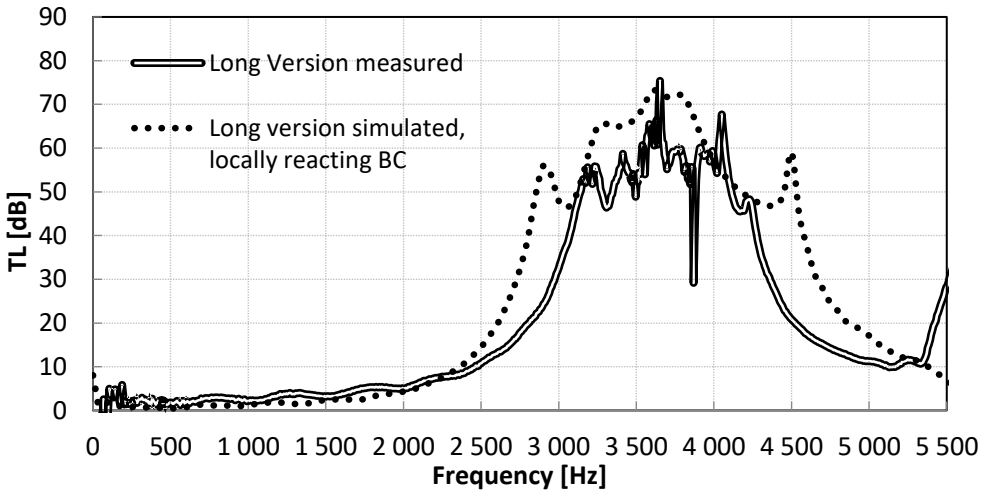


Kuva 2. Tasoaaltoalueelle viritetyn Cremer-vaimentimen rakenneperiaate sekä äänenpainetason jakauma vaimentimen alkupäässä.

Kuvassa 3 on eräs tulostettu Cremer-vaimennin mitattavana ACUPRO -putkessa ja vaimentimen TL-käyrät.

Tasoaaltoalueen yläpuolella Cremer-vaimentimen toiminta heikkenee. TL-huippu viritystaajuudella madaltuu ja levenee. Toisaalta vaimentimella on kokemustemme mukaan mahdollista saavuttaa kohtuullinen suorituskyky suurillakin taajuuksilla (so. tasoaaltoalueen yläpuolella), mikäli vaimennin on riittävän pitkä ja takatilan mitat on oikein valittu.





Kuva 3. Cremer-vaimennin mitattavana ACUPRO-putkessa sekä vaimentimen mitattu ja laskettu TL. Nimellinen viritystaajuus oli 3500 Hz.

3.2 Moodifiltterit ja huokoiset metallit

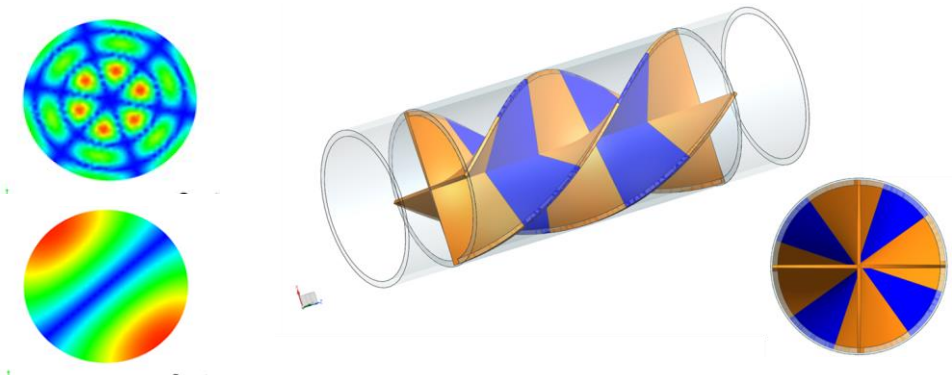
Tasoaaltoalueen yläpuolella etenevien aaltomuotojen lukumäärä kasvaa nopeasti taajuuden mukana. Tällöin painejakaumat ovat sellaisia, että niiden etenemiseen voi olla vaikea vaikuttaa kanavan tai solan reunoilta. Suurille taajuuksille on kehitelty ns. moodifilttereitä [5]. Niissä ideana on järjestää poikkipinnalle esimerkiksi MPP-paneeleita siten, että häviöt paneelien rei'issä vaimentavat eteneviä aaltoja. Vaimennin on tyypiltään resistiivinen.

Haasteena valmistuksen kannalta on se, että reikien tulee olla pieniä riittävän häviön aiheuttamiseksi. Käytettävissä olevilla tulostimilla noin 0.4-0.5 mm reikäkoko on onnistunut kohtalaisen luotettavasti [2]. Pienempien reikien tulostus on ollut epäluotettavaa. Tulostettujen moodifiltterien suorituskyky on tämän vuoksi jäänyt toistaiseksi vaatimattomaksi. Tehokkaaseen toimintaan vaadittava reikä on tapauksesta riippuen jopa alle 0.2 mm.

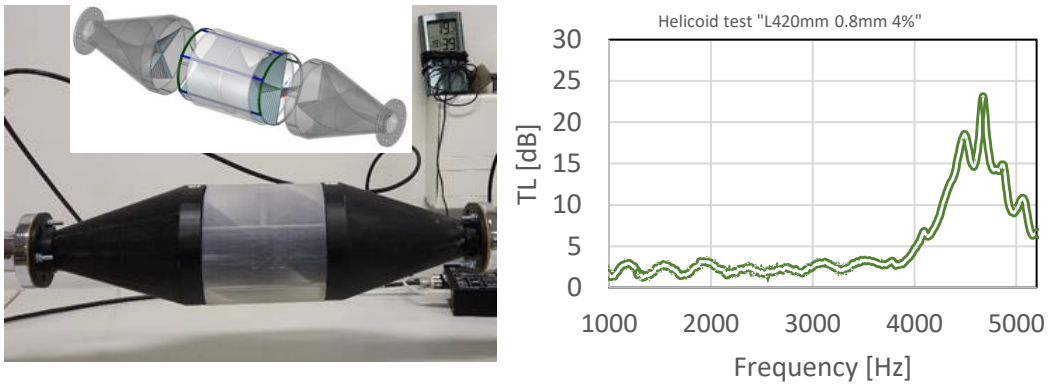
VTT on hakenut patenttia kuvassa 4 olevan kaksois-helicoid -muotoon perustuvan ratkaisun valmistustavalle [6]. Kuvassa 5 on eräs tulostettu versio helicoid-moodifiltteristä ja sen TL. Kyseisessä filtterissä reiät olivat halkaisijaltaan noin 0.8 mm ja toiminta siksi vaatimatonta alle 4500 Hz taajuuksilla.

Erään hyvin mielenkiintoisen mahdollisuuden uudentyyppisten resistiivisten tai hybridivaimenninten kehittämiseen tarjoavat huokoiset metallit. Mikrorakenteen ei tarvitse eikä

pidäkään syntyä sattumanvaraisesti, vaan se voidaan luoda nimenomaan haluttujen akustisten makro-ominaisuuksien saavuttamiseksi. Mikro- ja makrotasojen kytkemiseksi on tehty mittavaa teoreettista pohjatyötä [7] ja ensimmäisiä askeleita huokoisten metallien tulostamisessa on otettu.



Kuva 4. Korkeampien moodien painejakaumia sekä patentoimamme [6] helicoid-tyyppinen moodifiltteri. Oranssit ja siniset kappaleet ovat MPP-liuskoja.

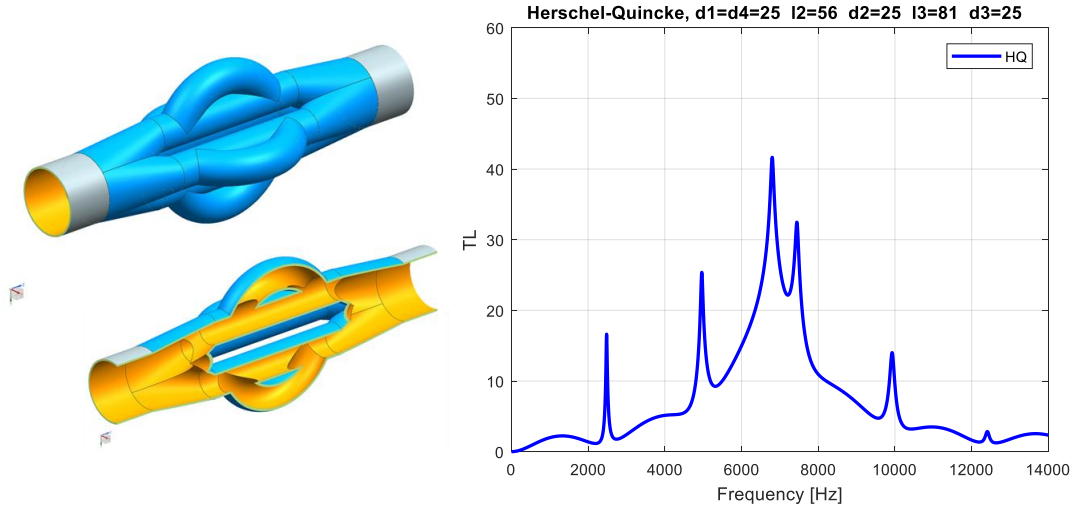


Kuva 5. Eräs tulostettu moodifiltteriproto ja sen mitattu TL.

3.3 Herschel-Quincke -vaimennin

Herschel-Quincke -vaimentimen toiminta perustuu siihen, että putki ja siinä etenevä tasoaalto jaetaan kahteen tai useampaan osakanavaan, jotka ovat eri pituisia. Pituusero tuottaa viiveen tai vaihe-eron ja vaihe-ero tuottaa osakanavien yhtymäkohdassa destruktiivisen interferenssin. Idea on esitelty jo 1800-luvulla, mutta sen kiinnostavuus on kasvussa [8]. Uusilla valmistusmenetelmillä eivät geometriset rajoitteet eivät ole niin keskeisiä kuin aiemmin. Sama akustinen toiminta on mahdollista tuottaa monin erilaisin tavoin.

Herschel-Quincke -vaimentimen toiminnassa on eräs mielenkiintoinen ja huonosti tunnettu piirre. Vaimentimessa on kaksi interferenssimekanismia, I ja II [9]. Usein näistä mainitaan vain mekanismi I, kahden haaran pituuserosta (puolen aallon vaihe-erosta) niiden yhtymäkohdassa syntyvä. Mekanismi II liittyy aallonpituuden ja haarojen muodostaman silmukan pituuden suhteeseen. Optimaalisessa ratkaisussa I ja II yhdistämällä voidaan saavuttaa erityisen leveä vaimennus. Kuvassa 6 on esimerkki suunnittelupöydällä olevasta vaimentimesta. Samassa kuvassa esimerkki optimoidulla, mekanismit I (7000 Hz) ja II (n*2500Hz) hyödyntävällä geometrialla saavutettavasta TL:stä.



*Kuva 6. Eräs 50 mm kanavaan suunniteltu Herschel-Quincke -vaimennin sekä ennakoitu TL viritettynä noin 7000 Hz (mekanismi I) ja n*2500 Hz (mekanismi II) taajuuksille.*

4 YHTEENVETO JA KIITOKSET

Paperissa esiteltiin ainetta lisäävän valmistuksen tuomia mahdollisuuksia uusien äänenvaimenninratkaisujen kehittämisessä. Voidaan todeta, että ensiaskelia on otettu ja oppirahoja maksettu. Ratkaisujen edelleen kehittäminen jatkuu rahoituksen jatkuessa.

Työtä ovat tukeneet Wärtsilän SOPEVA-hanke sekä VTT:n omarahoitteiset projektit.

VIITTEET

[1] Tanttari J., Isomoisio H., Uosukainen S., Hynninen A., Nousiainen E., Hankaniemi V. & Veijanen V. Pakoäänenvaimentimen kehitysprosessi. Akustiikkapäivät 2013.

[2] Tanttari J., Komi E., Hynninen A., Isomoisio H., Uosukainen S., Hankaniemi V., & Matalamäki M. (2018). Additive Manufacturing of Silencers with Microperforates. Advances in Acoustics and Vibration, 2018. https://doi.org/10.1155/2018/7649756.

[3] http://spectronics.net/products/acupro.html.

[4] Cremer L., Theory regarding the attenuation of sound transmitted by air in a rectangular duct with an absorbing wall, and the maximum attenuation constant produced during this process. Acustica, vol. 3, pp. 249–263, 1953.

[5] Sack S. and Åbom, M. Modal filters for mitigation of in-duct sound. Proceedings of the 172nd Meeting of the Acoustical Society of America, Vol 29, Honolulu, Hawaii, 2016.

[6] VTT527/PC18061FI. Method for constructing MPP helicoid filter sound attenuators.

[7] Uosukainen, S. Multi-scale computation of sound absorbing materials. Research report VTT-R-05212-16. http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2016/VTT-R-05212-16.pdf, 2016.

[8] Ghaffarivardavagh, R., Nikolajczyk, J., Anderson, S. & Zhang, X. Ultra-open acoustic metamaterial silencer based on Fano-like interference. Physical Review B 99, 024302 (2019).

[9] Selamet, A., Dickey, N. & Novak J., The Herschel-Quincke tube: A theoretical, computational, and experimental investigation. J. Acoust. Soc. Am. 96 (1994) 5, Pt 1. p. 3177-3185.

OPTIMIZING NOISE BARRIERS WITH COMSOL MULTIPHYSICS

Patrick Grahn[1], **Mads Herring Jensen** [2]

[1] COMSOL Oy
Arabiankatu 12
00560 Helsinki
patrick@comsol.fi

[2] COMSOL A/S
Diplomvej 381
2800 Kgs. Lyngby
mads@comsol.dk

Abstract

Road noise is a major concern in urban environments. A common countermeasure is installation of roadside noise barriers. However, the effectiveness of barriers is limited by a number of restrictive factors such as cost, maximum height, materials and surrounding infrastructure. Thus, there is a need to design the optimal wall structure for different situations. In this article, we model the sound attenuation by four different noise barrier designs and compare their performance with in situ measurements. We find that numerical simulations enable efficient optimization of barrier designs and, thereby, greatly reduces the need for physical prototypes.

1 INTRODUCTION

The increasing concern about noise pollution has pushed the development of new methods that mitigate traffic-borne noise in residential areas. One of the most efficient methods is the use of noise barriers. In fact, there exists a wide variety of designs to choose from, ranging from absorbing and dispersive barriers to vegetation and barriers with novel tops [1]. In order to optimize the noise reduction per invested money, it is important to understand how different barrier designs perform in the desired environment. For this purpose, numerical modeling is an invaluable tool when deciding upon the best barrier design.

In this paper, we start by presenting the diffraction theory that describes the basic operation of noise barriers. Then, we introduce noise tops that can be placed on top of the barriers in order to further improve noise reduction. Finally, a numerical model built with COMSOL Multiphysics is used to investigate the performance of four different top designs: L-top, Watts-top and two sizes of T-tops. The model's results are compared to experimental data published by the Danish Road Directorate [2].

© 2019 Patrick Grahn and Mads Herring Jensen. This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License. To view a copy of this license, visit http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/ or send a letter to Creative Commons, PO Box 1866, Mountain View, CA 94042, USA.

2 MODELING NOISE BARRIERS

In its simplest form, a noise barrier is a vertical wall that reflects or absorbs acoustic waves. At first, one could think that if a large vertical wall blocks the view to noise sources, then complete silence exists behind the wall. Unfortunately, this is not the case. Noise consists of acoustic pressure waves that have a finite wavelength. These waves experience diffraction at the edges of an obstruction and, thereby, secondary pressure waves are scattered into the geometrical shadow of the wall. Consequently, noise is observed behind an impenetrable noise barrier. In order to quantify this noise, we will take a brief look at the theory of scalar wave diffraction.

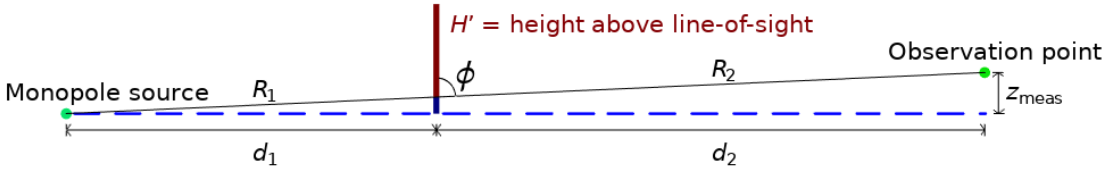


Figure 1. Diffraction by a thin vertical wall. The black line that connects source and observation point is the line-of-sight. The wall cuts the line-of-sight into two segments of lengths R_1 and R_2. The part of the barrier that is above the line-of-sight has a length H'.The source radiates into the upper half-space: the blue dashed line depicts ground.

The noise levels behind a thin vertical wall can be described by the Fresnel-Kirchhoff formulation of knife-edge diffraction [3]. Consider the setup shown in Figure 1. A monopole source is positioned at the origin, radiating a spherical wave of the following form

$$p_{\text{source}}(r) = p_0 \frac{r_{\text{ref}}}{r} e^{-\mathrm{j}kr}, \tag{1}$$

where $k = 2\pi/\lambda$ is the wave number and p_0 is the pressure magnitude at a reference distance r_{ref}. In the absence of ground reflections, the field behind the wall is obtained by the knife-edge diffraction solution

$$p_{\text{diff}}(\mathbf{r}) = \left(\frac{1+\mathrm{j}}{2}\right) p_0 \frac{r_{\text{ref}}}{R_1 + R_2} e^{-\mathrm{j}k(R_1+R_2)} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \mathrm{F}\left(H' \sin\phi \sqrt{\frac{k}{2}\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)} \right), \tag{2}$$

where the geometrical lengths R_1, R_2 and H' are defined in Figure 1. The Fresnel integral $\mathrm{F}(\cdot)$ can be expressed in the following form

$$\mathrm{F}(u) = \left(\sqrt{\frac{\pi}{8}} - \int_0^u \cos(x^2)\, dx\right) - \mathrm{j}\left(\sqrt{\frac{\pi}{8}} - \int_0^u \sin(x^2)\, dx\right). \tag{3}$$

These integrals can be evaluated numerically.

If one assumes the ground to be a hard wall (infinite impedance), the ground reflections can be included by adding the solution in the mirror image of the observation point. For a coordinate system with z-axis normal to the ground plane, one obtains the equation

$$p_{\text{with ground}}(x, y, z) = p_{\text{diff}}(x, y, z) + p_{\text{diff}}(x, y, -z). \tag{4}$$

For both cases, with and without ground reflections, we define the insertion loss of the wall by comparing the sound pressure level behind the barrier to the sound pressure level in the absence of a barrier. In units of decibel, the insertion loss becomes

$$IL(\mathrm{dB}) = -20\log_{10}\left(\frac{|p(\mathbf{r})|}{|p_{\mathrm{source}}(r)|}\right), \tag{5}$$

where $p(\mathbf{r})$ can be evaluated from either Eq. (2) or Eq. (4). The insertion loss clearly depends on the location of measurement.

In the following, we consider a wall of 4 m total height, $d_1 = 13.5$ m, $d_2 = 20$ m and $z_{\mathrm{meas}} = 1.5$ m. Inserting these values into equations (1-5), allows us to plot the insertion loss in Figure 2. The figure shows that, in the absence of ground reflections, the insertion loss grows steadily with increasing frequency. At high frequencies the growth is fixed at 3 dB per octave. The same behavior generally holds when including the ground reflections, but now additional interference is added on top of the spectrum as can be seen by the green dashed line in Figure 2. The interference is caused by waves reaching the observation point by two distinct paths; directly from the wall or by reflection from the ground. Looking at the frequencies 280 Hz, 850 Hz, 1420 Hz, 1990 Hz and 2560 Hz, we have destructive interference and the insertion loss is exceptionally high. In contrast, at approximately 540 Hz, 1120 Hz, 1690 Hz and 2260 Hz, we have constructive interference, which reduces the insertion loss by about 5 dB compared to the blue curve. In principle, a maximum of 6 dB reduction is possible, if the two pressures in equation (4) are of equal amplitude and phase.

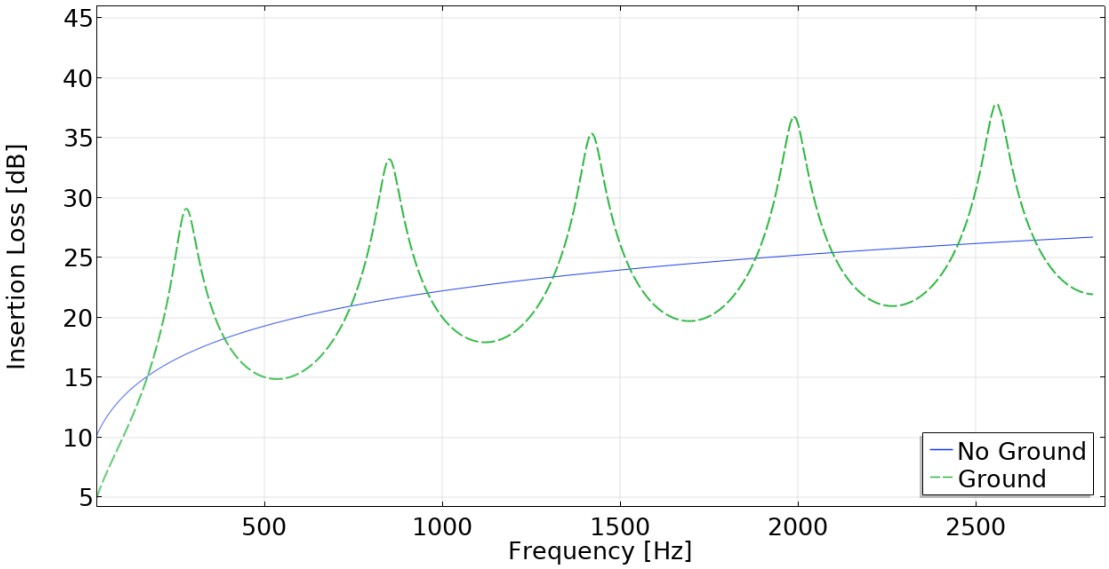


Figure 2. Insertion loss of a thin vertical wall calculated by equations (1-5). The blue solid line shows the case with no ground reflections. The green dashed line shows the case with reflecting hard ground.

Using the analytical equations, we can check that increasing the wall by 1 meter would increase insertion loss by approximately 2 dB. As growing the wall height to improve insertion loss may eventually get problematic, other options are sought after. One such option is to use barrier tops. These tops are placed at the top of the wall with the aim of suppressing the diffracted wave. Figure 3 depicts the noise tops considered in this work.

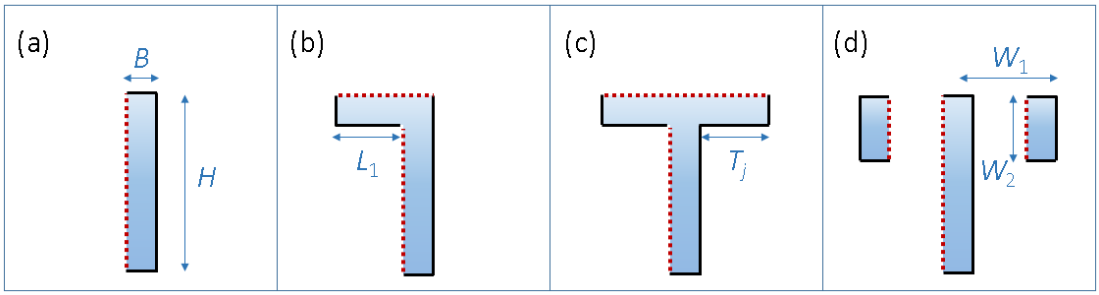


Figure 3. Cross sections of the noise barrier designs. The red dotted surfaces depict interfaces to sound-absorptive material (stone wool), whereas the black solid lines depict hard (metal) surfaces. The noise source is considered to be on the left side of the barrier. We consider the cases of (a) noise barrier without top, (b) L-top, (c) T-top of two variants and (d) Watts-top. The dimensions are $B = 0.16$ m, $H = 4$ m, $L_1 = 1$ m, $T_1 = 0.5$ m, $T_2 = 1$ m, $W_1 = 1$ m and $W_2 = 0.5$ m. We will refer to the two T-tops as the T1-top and T2-top based on whether T_1 or T_2 is used. All dimensions were chosen based on the project carried out by the Danish Road Directorate [2].

As the noise tops are of rather complicated shape, understanding their impact on the diffracted wave is rather difficult using only analytical equations. Instead, it is better to use finite-element models that accurately compute how the acoustic waves interact with the noise barrier. In contrast to analytical equations, the following effects can straightforwardly be included into a finite-element model: (I) interaction of pressure waves with noise tops of arbitrary geometrical shape, (II) absorbing materials in the noise barrier or top, (III) ground reflections using a realistic frequency-dependent impedance, (IV) use of different ground impedance models in different locations.

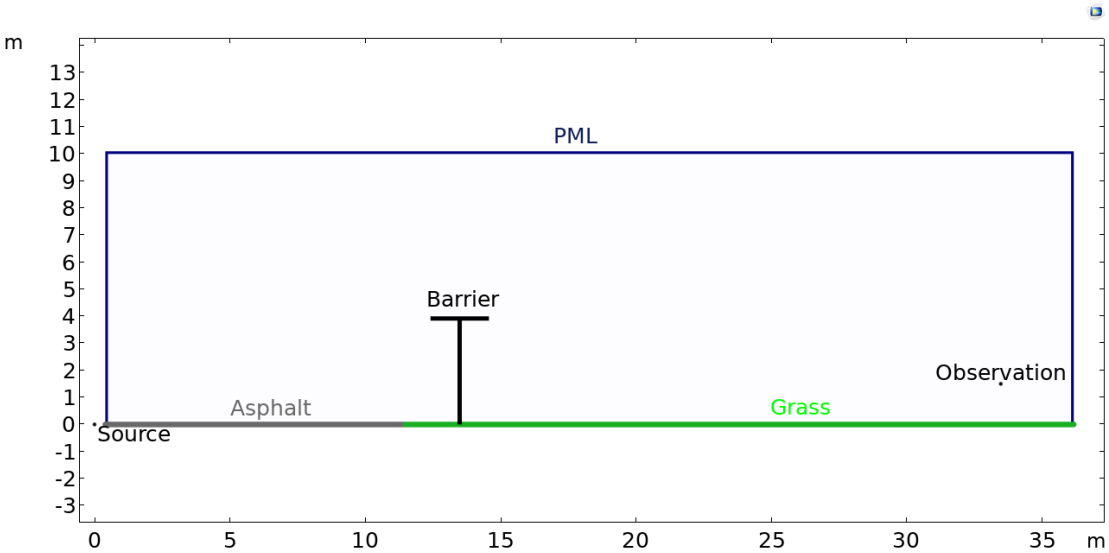


Figure 4. Geometry of the computational model. The figure shows a cross-section of the axisymmetric system in (ρ, z)-cylindrical coordinates. Impedance conditions are used to describe the asphalt, grass and sound-absorbing surfaces of the barrier. Perfectly matched layers (PML) are used to achieve impedance-matching to free-space for all waves escaping the modeling domain. The source lies outside the modeling domain. Therefore, its field is prescribed using a scattered-field formulation.

The setup of the finite-element model built with COMSOL Multiphysics is depicted in Figure 4. We employ a 2D-axisymmetric formulation in order to greatly reduce required

computational resources compared to a 3D model. The 2D-axisymmetric formulation allows us to define a noise source that creates spherical waves according to Eq. (1). A slight drawback is that the axisymmetric formulation makes the noise barrier curved. This approximation has a small influence on the absolute noise levels, but should not affect the conclusions presented in this work. It is also worth noting that noise barriers installed at real sites have finite lengths and may follow a curved road.

The sound absorbing surfaces are modeled with an impedance boundary condition. The frequency-dependent impedance is defined by the Attenborough model [4] that is a built-in feature in COMSOL. It is a semiempirical model with four parameters. They are the porosity ε_p, flow resistivity R_f, tortuosity factor τ_∞ and fitting parameter b. For the road, we consider 4 cm of asphalt with $\varepsilon_p = 0.2$, $R_f = 20000\ \mathrm{kPa \cdot s/m^2}$ and $\tau_\infty = 1.2$. The grass-covered ground is treated as a 20 cm layer of $\varepsilon_p = 0.7$, $R_f = 200\ \mathrm{kPa \cdot s/m^2}$ and $\tau_\infty = 1.2$. The barrier's absorptive surfaces were characterized by $\varepsilon_p = 0.8$, $R_f = 200\ \mathrm{kPa \cdot s/m^2}$ and $\tau_\infty = 1.5$, which are reported values from previous studies [5,6]. The fitting parameter $b = 1$ in all cases.

The model is solved up to the 2500 Hz third-octave band using 60 frequency samples in each third-octave band. We also consider the case without any barrier. The solution without a barrier is used to evaluate the insertion loss by equation (5), where in the place of p_{source} we use the computed pressure that is influenced by the asphalt and grass interfaces. For the solution process, the required computational resources grow with increasing frequency, because the acoustic field is described by a finite-element mesh that must resolve the wavelength. However, we were able to successfully solve the model using a single desktop computer with capacity to proceed even beyond 5000 Hz. The decision to stop at 2500 Hz was motivated by the experimental results.

3 RESULTS

The following results are obtained using a wall of 4 m total height, $d_1 = 13.5$ m, $d_2 = 20$ m and $z_{\text{meas}} = 1.5$ m (see Figure 1)**.** The calculated sound pressure level (SPL) distribution depends on the frequency of the noise. As an example, the distribution at 1200 Hz is shown in Figure 5. The SPL at the observation point is seen to be significantly smaller than close to the source. The spreading of the spherical wave as it propagates to the observation point corresponds to about 30 dB reduction of SPL. The barrier adds additional reduction on the order of 20 dB. The reflection from the ground makes the SPL rather inhomogeneous, so the absolute SPL will strongly depend on the location of the observation point. However, the octave- or third-octave-averaged SPL is expected to be somewhat less sensitive on the exact location. In Figure 5(b), the T2-top has been added to the barrier. This brings additional 6 dB reduction of SPL at this particular frequency, which can be seen by the blue color being darker in the Figure 5(b) compared to Figure 5(a).

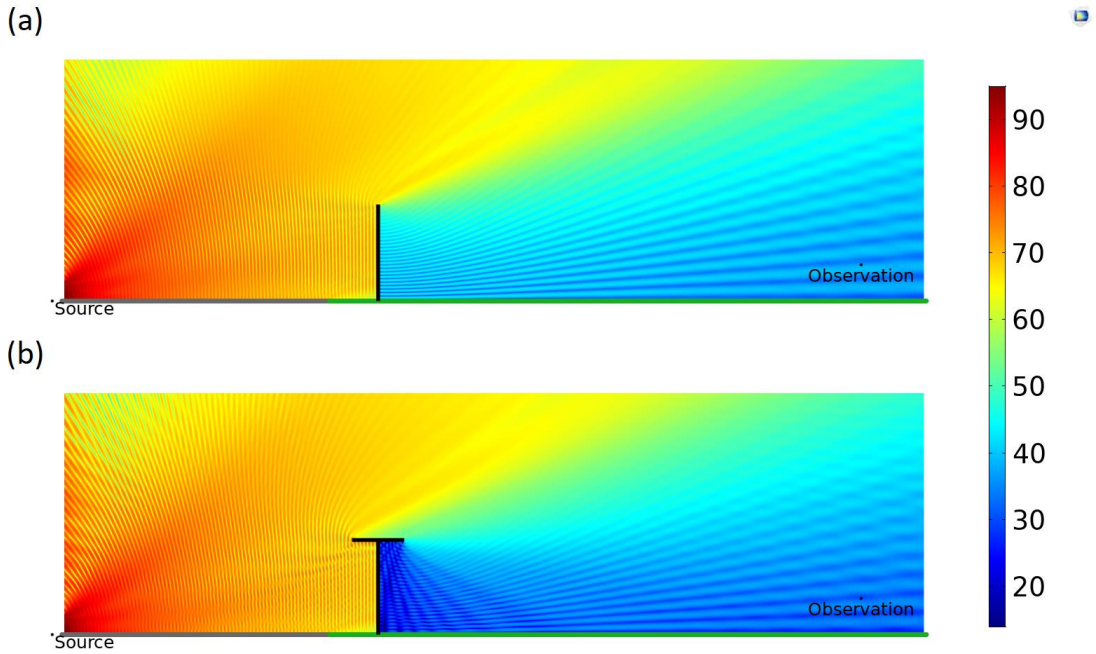


Figure 5. Computed sound pressure level in dB at 1200 Hz. The cases of (a) no top and (b) T2-top are shown. The ground is divided into asphalt (gray) and grass (green).

The insertion loss (IL) of the barrier design can be defined by Eq. (5). Figure 6 shows the computed IL as a function of frequency for five different cases. The considered cases are a barrier without a top and barriers with L-top, T1-top, T2-top and Watts-top.

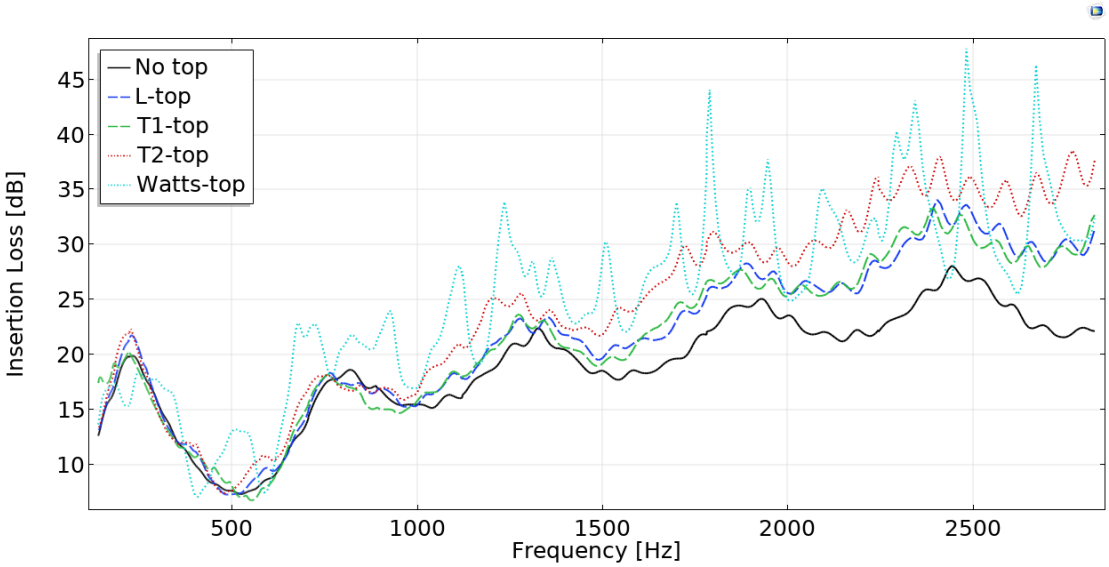


Figure 6. Computed insertion loss as a function of frequency. The black solid line is a 4-meter vertical wall with an absorptive surface towards the road. The colored dashed and dotted lines are for the same wall, but with the addition of one of the noise tops of Figure 3.

In the absence of a noise top, the computed insertion loss shares many features with the theoretical results of Figure 2. The constructive interference caused by ground reflections are clearly seen at the minima 540 Hz, 1120 Hz, 1690 Hz and 2260 Hz, but the effects are less pronounced due to the damping by the grassy terrain. Adding an L-top or T-top is seen to consistently increase insertion loss, especially at high frequencies. The wider T2-top is clearly more effective than its 1-meter counterpart. The results for the Watts top is interesting. Its three-part structure introduces additional interference effects that can greatly suppress the noise at selected frequencies. This interference can also reduce the insertion loss as observed within two narrow bands at 400 Hz and 570 Hz. However, this local reduction is small compared to the benefits obtained at frequencies around 1000 Hz, where A-weighted traffic noise is expected to be most prominent.

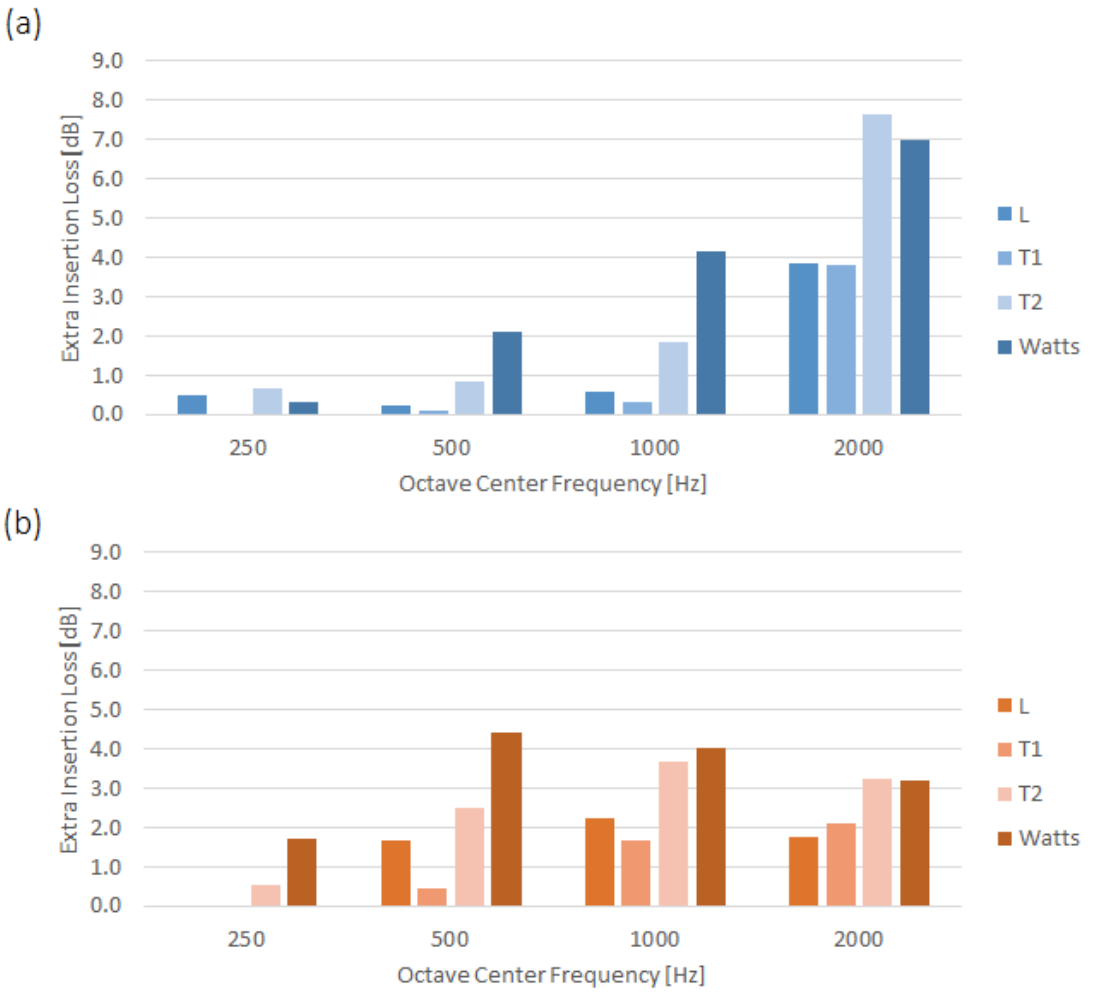


Figure 7. Extra insertion loss per octave obtained by adding a noise top to the barrier. Figure (a) shows the results obtained from the finite element model. Figure (b) shows the experimental results reported in Ref. [2]. The model defines the insertion loss as seen by an ideal omnidirectional microphone, whereas the experiments recorded the noise with a highly directional 2.4 m parabol system.

In order to get an overview of the noise tops' performance, we calculate the difference between the insertion loss of the barrier with a noise top and the loss of the barrier without a top. This difference is the extra insertion loss provided by the top. We are interested in comparing the extra insertion loss to the experimental values reported in Ref. [2]. In the experiment, the noise source was a wide motorway with four lanes. The two southbound lanes can be represented by a spherical wave source at a distance of $d_1 = 13.5$ m in front of the barrier, whereas the two northbound lanes would be at a distance of $d_1 = 25$ m. In order for the model to better represent the experimental setup, we perform two separate computations, one with $d_1 = 13.5$ m and one with $d_1 = 25$ m. Assuming the traffic noise to be nearly equal on the north- and southbound lanes, we can average the pressure magnitude of the two computations and use that to evaluate the insertion loss. The obtained motorway-insertion-loss is then collected into four octaves and plotted in Figure 7(a). For comparison, the experimental results for the same tops are shown in Figure 7(b).

There are some general trends that can be seen from both model and experiments. First, we see that the tops are ineffective in the 250 Hz band, but increase in effectiveness as the frequency increases. Second, we can see that the L-top and the T1-top are similar in performance. In the 500 Hz and 1000 Hz octaves, the Watts top is clearly the best choice, but at higher frequencies the T2-top is of similar or better performance. The choice between these two tops would be determined by the noise source spectrum. If noise suppression for a wide residential area is desired, it would also be necessary to average the extra insertion loss over many observation points. This could favor one top over another, as their diffraction patterns are rather different.

Looking at Figure 7, it is apparent that significant differences between model and experiment are seen in the 2000 Hz octave band. This difference is caused by the different ways of measuring noise. The parabol antenna used in the experimental setup had a very high directivity, especially at higher frequencies. At frequencies above 500 Hz, the parabol microphone was seen to suppress the ground effect interference patterns [2]. It was believed that the observed frequency dependence was a combination of the actual noise level in the sound field behind the barrier and the parabol amplification of the noise signal. In contrast, the finite element model did not include any amplification caused by a measurement system and hence it gives the noise level seen by an ideal omnidirectional microphone. This difference in measurement explains the observed discrepancy. These findings suggest that for a human listener, the performance of the noise tops at high frequencies is actually better than what was seen in the experiment. It should be emphasized that the influence of the ground effect on the overall noise will depend on the local terrain. Therefore, for most accurate results, we recommend to compute finite element models with source positions and terrains that match the final installation site of the barriers.

4 CONCLUSIONS

We have shown how the performance of noise barriers is determined by wave diffraction and reflection. Using COMSOL Multiphysics, we computed the performance of different noise tops situated on top of noise barriers. We saw that the noise tops can significantly improve the performance of a noise barrier, especially at frequencies beyond 1000 Hz. Our computed performance was compared to experimental data and some agreement was observed. Deviations between experiments and modeling were argued to originate from the directivity of the measurement microphone. The results suggest that noise tops have both frequency-dependent and directional noise suppression, which emphasizes that the best choice of noise top will always be situational. Using the presented computational model, we can rapidly create virtual prototypes in advance of a noise protection project. This will ensure that optimal noise suppression is achieved, prior to assembling the costly barrier on-site.

ACKNOWLEDGMENTS

We thank Gilles Pigasse, former member of Danish Road Directorate and COMSOL Multiphysics GmbH, for developing earlier versions of the simulation model and for sharing deep insight about the barrier elements and their material properties.

REFERENCES

[1] Pigasse G, Kragh J, "Optimised noise barriers – a state-of-the-art report", Vejdirektoratet (Danish Road Directorate), Report 194 (2011).

[2] Kragh J, Skov R S H, "Modified barrier tops – In-situ measurements of traffic noise attenuation by barriers with special tops", Vejdirektoratet (Danish Road Directorate), Report 539 (2015).

[3] Durgin G D, "The Practical Behavior of Various Edge-Diffraction Formulas", IEEE Antennas and Propagation Magazine 51 (2009), 24-35.

[4] Attenborough K, Bashir I, Taherzadeh S, "Outdoor ground impedance models", J. Acoust. Soc. Am. 129 (2011), 2806-2819.

[5] Pigasse G, "BEM calculations – Explanations of the Matlab code and the simulations", Vejdirektoratet (Danish Road Directorate), Internal Note (2010).

[6] Pigasse G, Kragh J, "Validation of the BEM program", Vejdirektoratet (Danish Road Directorate), Internal Note (2010).

NOISE MITIGATION OF OLD ÅRSTA RAILWAY STEEL BRIDGE

René Smidt Lützen[1], **Anders Olsen** [2]

[1] Lloyd's Register
Strandvejen 104A,
DK-2900 Hellerup, Denmark
rene.smidtluetzen@lr.org

[2] Vibratec Akustikprodukter ApS
Hejreskovvej 18 C
DK-3490 Kvistgård, Denmark
ao@vibratec.dk

Abstract

With its central role in Stockholm's railway infrastructure, the Old Årsta bridge is busy around the clock. This 1929 steel bridge is owned and operated by the Swedish Transport Administration (Trafikverket) and recently underwent renovation work. Subsequently, a need for noise mitigation was identified. However, the infrastructural role made it a pre-requisite that traffic could not be affected neither during investigation nor installation of mitigation means. A comprehensive pre-study of the noise issue was previously published at Internoise 2017. It led to the installation of a multi-component CLD solution (Constrained Layer Damping). This paper presents findings from measurements of noise and structural properties after the CLD installation. A satisfactory noise reduction was obtained, and various learning points are presented. The applied mitigation strategy, using different layers of temperature dependent viscoelastic polymers, appeared to be both efficient and practical.

© 2019 René Smidt Lützen & Anders Olsen. Tämä on avoimesti julkaistu teos, joka noudattaa Creative Commons NIMEÄ 4.0 Kansainvälinen –lisenssiä (CC BY 4.0). Teosta saa kopioida, levittää, näyttää ja esittää julkisesti ja siitä saa luoda johdannaisteoksia, kunhan tekijän nimi ja lähde mainitaan asianmukaisesti.

1 INTRODUCTION

The Old Årsta bridge in Stockholm (Sweden) was constructed in 1920 to 1929, and continues to play a central role in one of the main railway lines. It is a double track steel bridge with a main span of 151 m. Recent refurbishment of the bridge, including deck retrofitting, led to reports of increased noise from train passages. On that basis, the Swedish Transport Administration initiated a project with focus on noise reduction. Due to continuous traffic, any related measurement work and installation work had to be done in a non-intrusive manner, without access to the top of the bridge deck. On this background, Vibratec and the consulting branch of Lloyd's Register (LR) carried out a comprehensive pre-study (1).

After careful consideration of the pre-study findings, the Swedish Transport Administration with Vibratec and LR decided to implement the recommended add-on mitigation solution based on multi-patch Constrained Layer Damping (CLD), which were found to be the preferable solution with respect to performance, practicality and economy. This differs from past mitigation approaches involving modifications of the track (2, 3). However, the CLD solution could be installed without affecting the traffic and without access to the top side of the deck. Thompson (2) lists several examples of targeting the bridge steel structure directly, with varying results in terms of noise reduction. In the discussion, it is mentioned that the achieved reduction was limited in general by the amount of damping already present in the untreated structure. Furthermore, the balance between rolling noise and noise radiated by the bridge structure plays a limiting role.

In certain cases, structural damping may be added using vibration absorbers (4). This solution is, however, quoted as being suitable only for frequencies below 150 Hz.

In a previous industrial context, LR and Vibratec successfully designed and applied a CLD solution to a vibration problem (5). This design was further developed for the Old Årsta bridge case. Based on laboratory climate chamber testing, an appropriate CLD configuration was found. Vibratec provided and installed the solution on the Old Årsta bridge. After concluded installation, measurements of noise, vibration, and structural damping were taken by LR. The obtained results as well as other findings are described in this paper.

Vibratec's commercially aimed video (6) is recommended for a good overview of the study.

2 SUMMARY OF PRE-STUDY

The pre-study described previously in (1) involved both in-situ measurements and numerical modelling. Measurements included train passage noise registered at the New Årsta bridge (Pos A), located approximately 45 m to the west of Old Årsta bridge, see Figure 1. Also from the Old Årsta bridge, passages were captured using LR's in-house, 56 microphone array. Furthermore, vibration measurements on multiple components of the Old Årsta bridge were taken for each vehicle passage. For both noise and vibration, precise timing of vehicle passage was determined using accelerometers mounted to the underside of the deck at each end of the Old Årsta bridge.

Figure 1. View from South East. In front, Old Årsta bridge. In the back, New Årsta bridge. Photo from April 2017.

During times with no vehicles on the bridge, point mobility was measured for several bridge components.

Based on the empirical findings, numerical models were constructed to describe the radiated noise. In the commercial Statistical Energy Analysis (SEA) software VAOne a simplified representation of the bridge structure without hangers and arches was constructed, assuming excitation by a line of vertical, uncorrelated point sources along the centre line of one railway track. The force sources were assigned with white noise with unit amplitude, and the bridge components had structural damping corresponding as measured on the unmitigated bridge. The model results were used for ranking the noise contributions of individual bridge components to a virtual receiver at 45 m to the side, corresponding to the real-world measurement position Pos A on the New Årsta bridge. Subsequently, structural damping in the SEA model was updated corresponding to lab testing of numerous CLD solutions in a climatic chamber, leading to a prediction of the corresponding noise insertion loss.

In addition, a simple, combined prediction model for the noise at Pos A was established, which in absolute numbers predicted the partial contribution from the main bridge components (deck, longitudinal girders, flanges of longitudinal girders, etc.). To this end, the model combined measured vibration spectra with sound radiation indices.

Passage of the steel bridge was typically around 6 s, with average overall LAeq,T (A-weighted, equivalent continuous sound pressure level, for time interval T) 83 dB(A). The 1/3-octave noise spectrum was dominated by the 500-800 Hz range, see Figure 2.

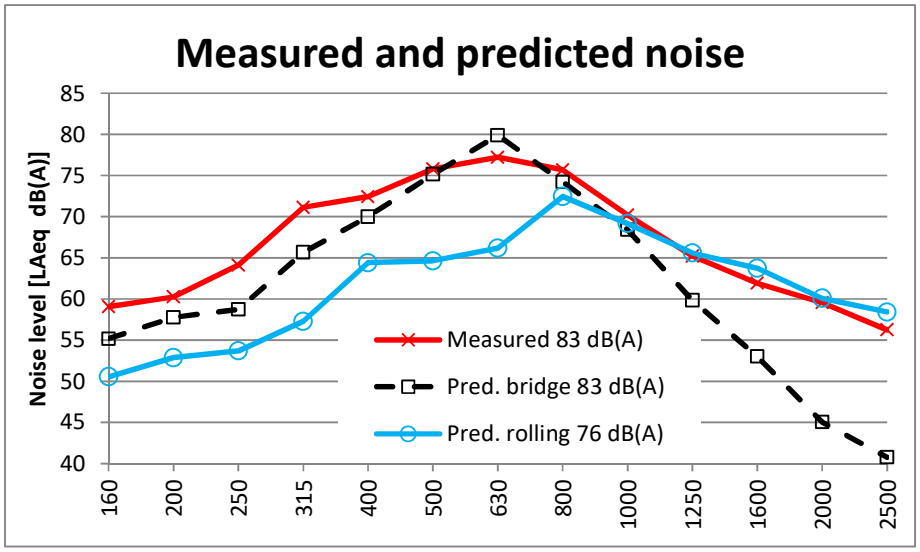


Figure 2. 1/3-octave noise spectra at Pos A for unmitigated bridge, predicted and measured

MDOF curve fitting of impact based point mobility measurements provided structural damping ratio estimates of the bridge components before mitigation. These were typically 0.5-1% of critical damping, and lowest flexural natural frequencies were found in the 50-100 Hz range.

Using the numerical models it was found that frequency range up to 800 Hz was dominated by noise radiated by the bridge structure, "bridge noise", see Figure 2. Above 800 Hz, the "train", or rolling, noise took over and dominated. The deck and longitudinal girders were identified as the most significant contributors to the noise at Pos A.

A maximum obtainable noise reduction at Pos A of approximately 6 dB was found, in the hypothetical case of ideal damping of the bridge structure without mitigating the vehicle part of the noise.

When considering the combined noise from the bridge structure as well as vehicle noise, this potential was found to be maximum 4 dB using CLD techniques.

3 DESCRIPTION OF THE INSTALLED CLD SOLUTION

3.1 Decided CLD solution

Following the pre-study of (0), more detailed considerations were taken as to which CLD solution to be installed, as well as installation details.

In particular, the temperature dependence of the numerous (>10) CLD solutions from the lab testing was an issue. It was decided to seek a solution with consistent noise reduction performance regardless of summer or winter climate. This was a compromise, as "optimum" CLD solutions had indeed been found that might reduce the noise even a few dB more, but only in either the summer or winter scenario.

The Swedish Transport Administration decided to install the CLD type described as follows:

The applied CLD system consists of a single layer concept using two different polymers with glue optimized for -10 ° C and + 20 ° C.

Each type of material of a CLD is normally considered as a single layer.

However, note that the current design is in fact a 3-layer system, since glue as well as bitumen layer have viscoelastic behavior. System and method were previously described in (0). Constraining steel sheets were of thickness 4 or 5 mm depending on specific CLD patch, and deck/girder thickness.

Figure 1. Mounting of CLD element onto transverse plate.

3.2 Size considerations for CLD elements

Other topics that were addressed were surface coverage scenarios, and CLD element sizes. Due to the complex construction details of the bridge (see e.g. photo in Figure 2), it was unrealistic to assume perfect coverage of all steel plates. Vibratec conducted a detailed geometric survey of the as-built bridge structure. It was found that approximately 80% of the plating could in practise be treated with CLD elements.

Figure 2. Point mobility measurement of transversal plate with installed CLD solution.

The established numerical models from the pre-study were used to find a CLD element distribution according to the available plating surface, which would lead to the optimum noise reduction.

Ideally, the individual CLD elements would be tailor made to each and every intended position. Considering the size of the bridge and the complexity of the bridge design, this was however not realistic. Furthermore, the CLD elements were to be handled and installed manually from below the deck, putting significant restrictions on size and weight of the element. A good impression of the installation is obtained from the YouTube video (0). On one hand, the CLD elements must be small enough for practical handling, while at the same time being sufficiently large to provide structural damping.

As a rough guideline for CLD element sizing, the structural wavelengths were assessed for the bridge plates. Noise is mostly radiated by flexural waves, and as a rule-of-thumb, at least 80% of a wavelength must be covered by the CLD in order to obtain significant damping. Plate thickness of the bridge components was 18 mm and 30 mm for girders and deck. Bottom flanges of longitudinal girders was 50 mm. Considering idealised steel plates, Table 1 shows the relation between frequency, flexural wave speed C_B, and wavelength λ for the predominant thickness cases.

	t=18 mm		t=30 mm		t=50 mm	
Frequency [Hz]	**C_B [m/s]**	**λ [m]**	**C_B [m/s]**	**λ [m]**	**C_B [m/s]**	**λ [m]**
100	133	1.3	171	1.7	221	2.2
200	188	0.9	242	1.2	313	1.6
300	230	0.8	297	1.0	383	1.3
400	265	0.7	343	0.9	442	1.1
500	297	0.6	383	0.8	494	1.0
600	325	0.5	420	0.7	542	0.9

Table 1. Estimated wavelengths for predominant thicknesses t of bridge plates. C_B is bending wave speed, λ is wavelength of the bending wave.

A maximum, basic CLD element size of 1.0 m x1.0 m was deemed practical for manual handling. From Table 1 it follows that target wavelengths of 1.0 m / 80% = 1.25 m would correspond to frequencies of approximately 100 Hz to 400 Hz for the considered base plate thicknesses. In other words, the 1 m by 1 m CLD element would be expected to provide damping for frequencies above this approximate range. Since the pre-study indicated that the noise was dominated by the frequency range approximately 500-800 Hz (see **Error! Reference source not found.**), the 1 m by 1 m CLD element size was selected as the design basis, with allowance for practical adjustments where needed.

In further support for the selected element size, it is noted that the pre-study indicated that the lowest flexural modes (or natural frequencies) occurred in the 50-100 Hz range for the unmitigated plates. Hence, the target frequency range was significantly higher, implying a reasonable modal density. Vibratec created a 3D structural Finite Element model of a section of the bridge, using commercial software MIDAS NFX. A numerical modal analysis was performed for 200-900 Hz, and as expected a high modal density was found. Plots of modal patterns like the examples in Figure 3 were used to confirm that wavelengths for the 100-400 Hz range were indeed less than 1.25 m, as indicated by the coarse calculations of Table 1.

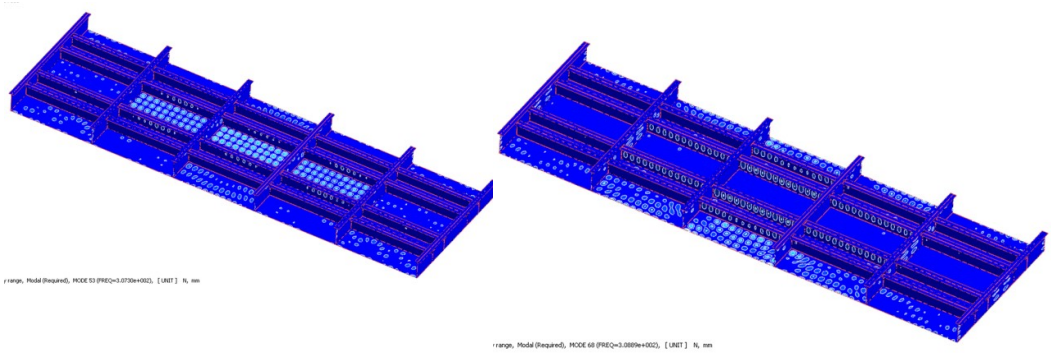


Figure 3. Examples of local modal patterns calculated using Finite Element. Left is 307.3 Hz. Right is308.9 Hz. Bridge deck with girders is seen from below.

4 MEASUREMENT CONDITIONS

When the installation of the CLD elements was completed, measurements of noise from the mitigated bridge were taken on 6th June 2018. Weather conditions were comparable to those of the pre-study in April 2017, see Table 2. From an acoustical point of view, it is assessed that the meteorological conditions for the two measurement times were comparable. All measurements were taken in daytime in dry weather, with background noise from urban activities.

Parameter	April 2017	June 2018
Wind	2-4 m/s, W	<4 m/s, NW
Temperature	7-10 °C	11-17 ◦C
Clouds	4-7 oktas	1-6 oktas

Table 2. Weather conditions during measurements.

Due to the short distance (approx. 45 m) between noise source and receiver, it is assumed that the wind speed contribution to the measurement uncertainty was small.

Bridge vibration and point mobility were measured on 26 July 2018 under similar temperature conditions.

5 MEASUREMENT RESULTS

5.1 Noise results

Noise was recorded at Pos A using Brüel & Kjær sound level meters BK2250, with maximum useable frequency 3300 Hz, in 24 bit quality. Start and stop timing of train passages on the Old Årsta bridge were detected using an insensitive accelerometer mounted to the underside of the deck, at each end of the bridge. This "train detector" system was recorded at sample frequency 6400 Hz using a laptop computer with a National Instruments data acquisition system. The noise for each train passage was analysed in terms of LAeq,T, where time interval T was the passage time of the steel bridge as identified by the "train detector" system.

Measurements were only taken at times without trains passing on the other tracks of the two Årsta bridges. The background noise was generally 50-60 dB(A), which was always more than 10 dB below the measured train noise. Hence, no correction for background noise was necessary for the overall values.

Passage speeds and noise levels before and after CLD installation are seen in Table 3 and Table 4, respectively.

Run ID	NB1	NB2	NB3	NB4	NB5	NB6	NB7	NB8	Mean
Speed [km/h]	82	84	95	86	87	95	92	87	88
Noise [dB(A)]	81.9	81.7	84.7	81.5	82.4	82.2	82.7	82.2	**82.4**

Table 3. Speed and noise at Pos A from April 2017, before CLD installation. Noise levels are overall LAeq,T [dB(A)] for the passage of the steel bridge.

Run ID	NA1	NA2	NA3	NA4	NA5	NA6	NA7	NA8	NA9	Mean
Speed [km/h]	84	90	90	96	98	93	98	86	84	91
Noise [dB(A)]	72.7	78.0	78.7	75.8	77.2	82.9	79.8	76.6	75.2	**77.4**

Table 4. Speed and noise at Pos A from June 2018, after CLD installation. Noise levels are overall LAeq,T [dB(A)] for the passage of the steel bridge.

The 8 runs before CLD installation showed an arithmetic average of 82 dB, at an average train speed of 88 km/h. The standard deviation was 1.0 dB. A coarse assessment of the associated measurement uncertainty assuming coverage factor k=1.3 (corresponding to 80% level-of-confidence) is then approximately 1.3 dB.

The 9 runs after CLD installation showed an arithmetic average of 77 dB, at an average train speed of 91 km/h. The standard deviation was 3.0 dB. A coarse assessment of the measurement uncertainty using coverage factor k=1.3 (corresponding to 80% level-of-

confidence) is approximately 3.8 dB. The measurement uncertainties are in both cases most likely dominated by variations in the noise source, such as wheel roughness, with a minor contribution from atmospheric conditions such as wind.

Comparison of the averaged noise levels before and after CLD installation shows an obtained noise reduction of 5 dB.

Similar to Pos A, noise measurements were taken on the facade of a multi-story compartment building at a certain distance from the bridge. Based on arithmetic mean of the measured noise levels during passage, a noise reduction of 5 dB was obtained also in this position.

All steel bridge passage noise spectra are plotted in Figure 4, where continuous lines refer to before CLD installation, and dashed lines are after. The thick red lines are average spectra, before and after CLD installation. It is seen that spectra after CLD installation are generally below those before, for frequencies below approximately 1250 Hz. The reduction is particularly large in the range 400 to 800 Hz. Two of the spectra after CLD installation present an additional peak around 1.6 kHz, possibly due to wheel tread defects. Ignoring these peaks would only affect the reduction estimate by approximately 0.2 dB.

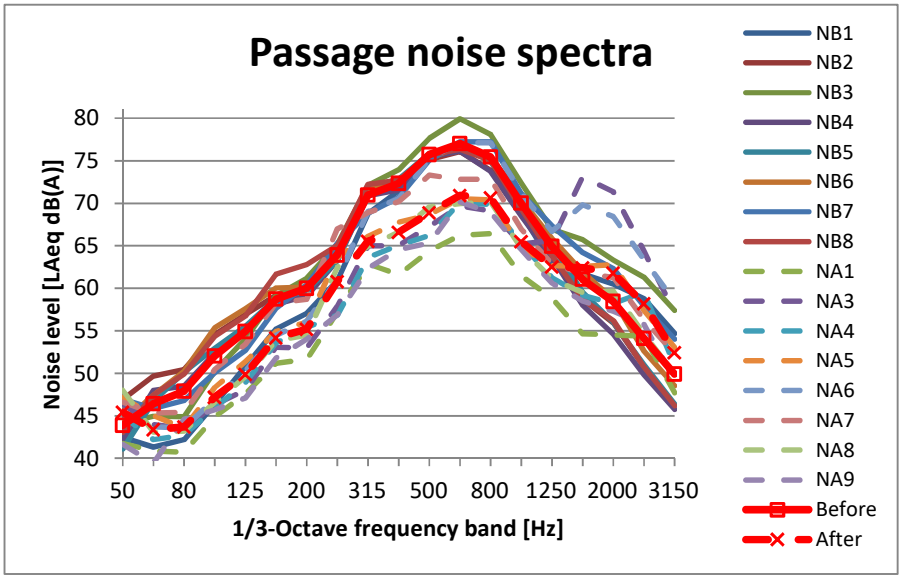


Figure 4. 1/3-octave band spectra at Pos A for all passages.

From the pre-study (0) a maximum potential of 6 dB noise reduction was determined, see also Section **Error! Reference source not found.**. In that light, the obtained 5 dB reduction seemed satisfactory.

5.2 Structural damping results

Point mobility measurements were taken before CLD installation 5-7 April 2017, and after CLD installation 26 July 2018. Measurements were taken with a 1.1 Kg PCB086D20 impact hammer with a plastic tip, and a B&K 100 mV/m/s^2 accelerometer. Measurements were taken on all main bridge components, and curve fitted using B&K PULSE Reflex Modal software, MDOF curve fitter type RFP-z.

As an example, the point mobility of the longitudinal girder is shown in Figure 5, for the same measurement position before and after CLD installation. Plate modes appear with natural frequency at about 100 Hz. Clearly, the mobility curve seems to have been reduced in level after CLD installation, and particularly above approximately 300 Hz the peaks have been broadened out due to increased damping. Application of the MDOF curve fitter identified the natural frequencies and corresponding damping ratios as shown in Figure 6. A clear damping increase is seen, from roughly 1% before to 2% after. No modal shape information was available from the measurements, since only a single hammer/accelerometer position was investigated. It seems likely, however that modes with practically the same natural frequency and damping ratio before and after CLD installation were not bending modes. Hence, they probably do not have significant noise radiation during vibration.

Measurement results from the transverse plate (not included) showed a significantly increased damping ratio, in line with the longitudinal girder.

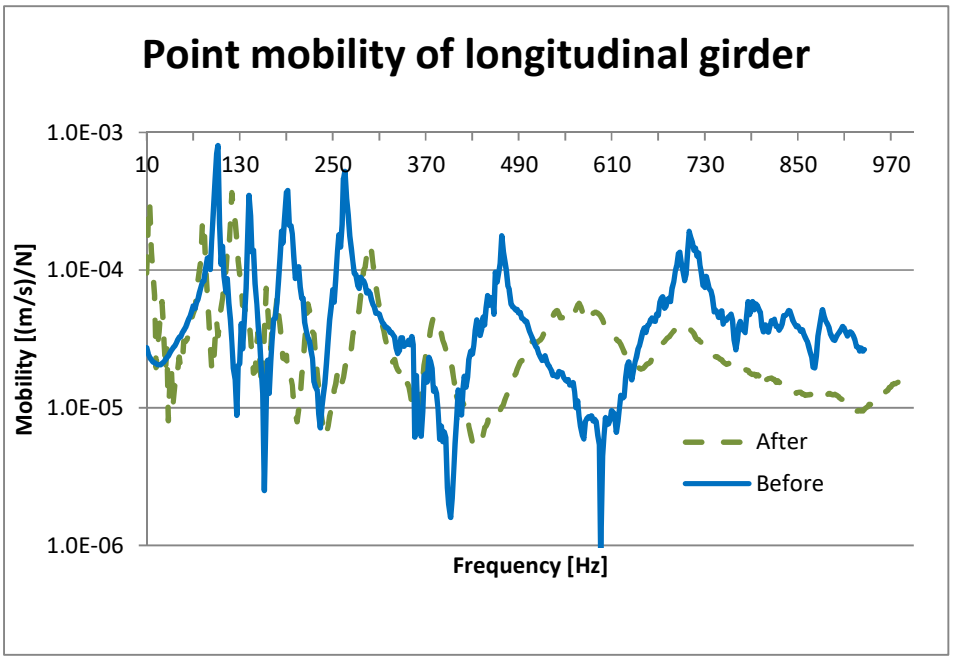


Figure 5. Narrow-band point mobility spectrum of longitudinal girder.Frequency resolution is 2 Hz. No data window was applied. Mobility units are accelerance [(m/s^2)/N). Average of 10 impacts.Curves are before and after CLD installation.

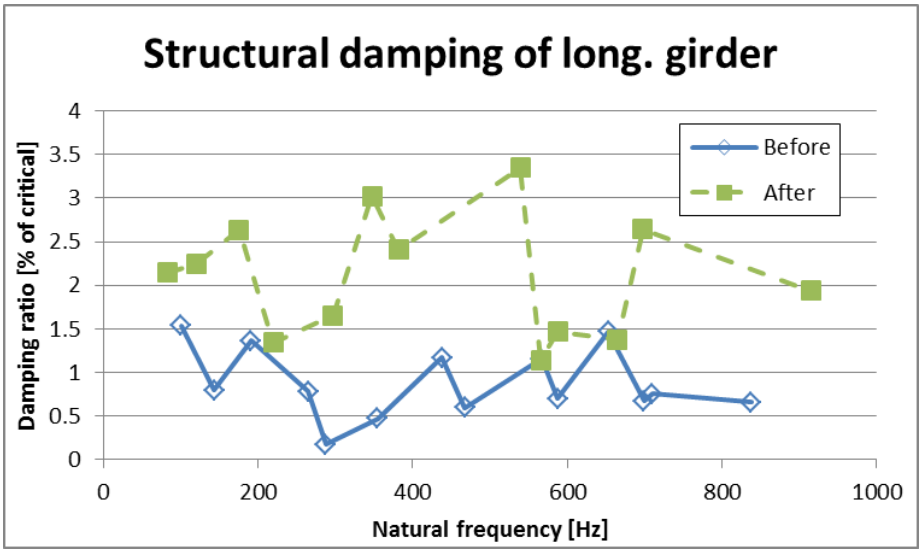


Figure 6. Structural damping ratio of longitudinal girder in per cent of critical damping, before and after CLD installation..

Similarly, Figure 7 shows the structural damping for one of the steel deck fields. As the example illustrates, the damping improvement for the deck was found to be less pronounced (about 0.5% increase for 400 to 800 Hz), and less consistent across frequency. This was also found for other deck fields.

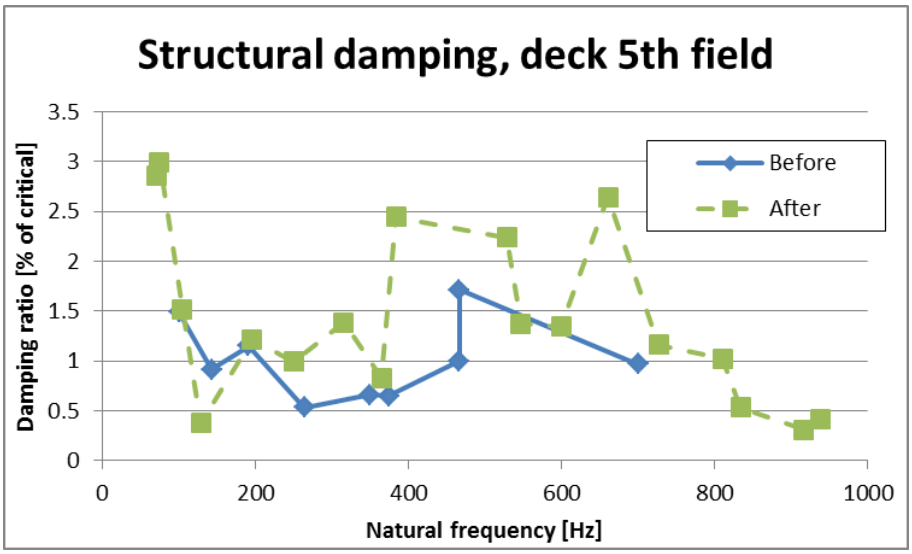


Figure 7. Structural damping ratio of deck field in per cent of critical damping, before and after CLD installation.

6 CONCLUSIONS

Following a comprehensive pre-study (1), a multi-component Constrained Layer Damping (CLD) solution was selected and installed on the Old Årsta railway bridge. The specific CLD design was selected with priority given to consistent damping performance across frequency and environmental temperature.

The installation was achieved without any interruption of the intense railway traffic, and without access to the topside of the deck.

Measurements taken after the CLD installation showed an obtained noise reduction of 5 dB, which was deemed satisfactory. Also, structural dynamic measurements on various bridge components showed a significant increase of the structural damping after the CLD installation.

Furthermore, the pre-study approach combining on-site noise and structural dynamic measurements with numerical modelling was found useful. In combination with climate chamber testing of candidate CLD configurations, this was found to provide a good basis for choosing an efficient noise mitigation strategy for the bridge.

7 ACKNOWLEDGEMENTS

This study was financed by the Swedish Transport Administration and SKANSKA, and the authors wish to express their gratitude to these organisations for constructive collaboration. In addition, thanks to the many colleagues at Vibratec and LR who helped with the project.

REFERENCES

[1] A. Olsen, R.S. Lützen, and S. Holmes, "Noise radiation from steel bridge structure – Old Årsta bridge Stockholm," in *Proceedings of the Internoise* 2017, Hong Kong, China

[2] David Thompson, "*Railway Noise and Vibration. Oxford*", Elsevier, (2009)

[3] Steve Cox, "Railway noise: some case studies of different problems with different solutions," in *Proceedings of the AusRAIL PLUS* 2007, Sydney, Australia.

[4] Railway steel bridges [Internet]. 2019 [accessed 24th January 2019]. Available from: https://sundv.de/wp-content/uploads/2018/03/SV_BridgeDamper_eng_Int.pdf

[5] A. Olsen, and R.S. Lützen, "Vibration Damping of air intake filter for gas" engine, using constrained layer damping (CLD," in *Proceedings of Baltic-Nordic Acoustic Meeting (BNAM)* 2016, Stockholm, Sweden

[6] Vibratec Akustikprodukter, "Constrained Layer Damping on old steel bridge". [Internet] 3rd October 2018. Available from: https://www.youtube.com/watch?v=n56oSxd3jV0

ISOLATED FITNESS & GYM FLOORS - THE NEXT GENERATION

Innovations in Lightweight Floating Floors in Gym and Sport Applications

Pinto, Paulo[1], **Rodrigues, Marina** [1], **Horváth, Zoltán**[1]

[1] CDM Group
9-11 Reutenbeek
Overijse B-3090
Belgium
general@cdm.be

Abstract

Gym and fitness spaces in residential / commercial buildings, pose a great challenge for integration into their environment and are a well-known conundrum to acoustical consultants. Multi-disciplinary gym activities generate a large range of noise and vibration in terms of induced energy level and frequency content. Lightweight gym floor solutions, where a variety of impact levels is generated, remains quite challenging for acousticians.

In order to improve the isolation efficiency and making the gym floors less dependent on the impact level, a new concept has been developed. Laboratory and in-situ testing has been completed under different drop weight energy levels showing significant improvement of structure-borne noise isolation.

1 INTRODUCTION

1.1 General

Over these past years, a clear evolution of solutions has been seen with golden standards for structure borne noise isolation solutions for gym & sport floors, being:

- ✓ "Dry solutions": when fast installation and removability / replaceability are at stake – in combination with integrated flooring / impact tiles,
- ✓ "Wet solutions": when high performance structure-borne noise isolation with limited deformation (e.g. according to sport performance criteria) is an issue – poured in situ floating floor solutions on bespoke resilient support systems.

In the last 5 years, acoustic comfort awareness has increased consistently and as a result more and more "unacceptable noise" complaints in spaces neighbouring gym & sport facilities with golden standard dry solutions were noted.

CDM has a long-term return of experience since the 1970´s in gym and sport floor isolation, mainly with high performance floating floor systems for gym and multi-disciplinary sport halls installed in immediate vicinity of spaces with specific high performance acoustic requirement. By

© 2019 Paulo Pinto, Marina Rodrigues ja Zoltán Horváth. Tämä on avoimesti julkaistu teos, joka noudattaa Creative Commons NIMEÄ 4.0 Kansainvälinen –lisenssiä (CC BY 4.0). Teosta saa kopioida, levittää, näyttää ja esittää julkisesti ja siitä saa luoda johdannaisteoksia, kunhan tekijän nimi ja lähde mainitaan asianmukaisesti.

combining (1) wet floating floor solutions for gym & sport floors, (2) dry floating floor solutions for the building renovation and (3) an extensive research program started in 2014 to better understand the main driving parameters behind structure borne noise isolation, innovative high performance "dry solutions" were successfully introduced [1].

The extensive research program was split in 2 main phases

- ✓ Phase 1 (2014-2016): understanding the impact of each of the constituting elements (laboratory and in field measurements) based upon vibration transmission techniques (10 to 2000 Hz) with own developed test bench – results reported at Euronoise 2018 [1].
- ✓ Phase 2 (2017-2018): with Phase 1, findings an in depth continued research program to understand: (1) the influence of number and damping degree of light weight panels, (2) resilience of the support system, (3) the impact energy level, and (4) the importance of an innovative system letting the floating floor "free float" with reduced friction on the resilient support system. This phase integrated extensive measurements in lab (more guided by normalized structure borne noise isolation parameters in function of energy impact levels) and in situ experience.

Today, high performance dry solutions based upon a combination of load distributing light weight panels and added damping & resilience are becoming commonplace and accepted as new golden standard capable of meeting the evolved acoustic comfort criteria more and more defined by the lower part of the frequency spectrum and in function of energy impact levels.

In this paper, we present the main results of the Phase 2 project focused on dry solutions.

1.2 Typical Light Weight Gym/Sport floor Set Up

A typical dry gym & sport floating floor set-up has 4 layers – each having their impact on functionality, user comfort and structure borne noise isolation (Fig. 1).

- ✓ Layer 1: aesthetics are taken care by the floor covering (rubber or plastic roll-out, seamless poured finish and hard wood)
- ✓ Layer 2: impact isolation & shock absorption are taken care by the impact isolation layers (mainly resin bonded rubber crumb products in different shapes)
- ✓ Layer 3: load distribution towards the supporting structural floor is taken care by light (plywood, chipboard, fibre-cement...) or heavy (poured in situ concrete) weight panels introducing bending stiffness to the overall system.
- ✓ Layer 4: the resilient support interface above the structural floor (springs, elastomer pads,..).

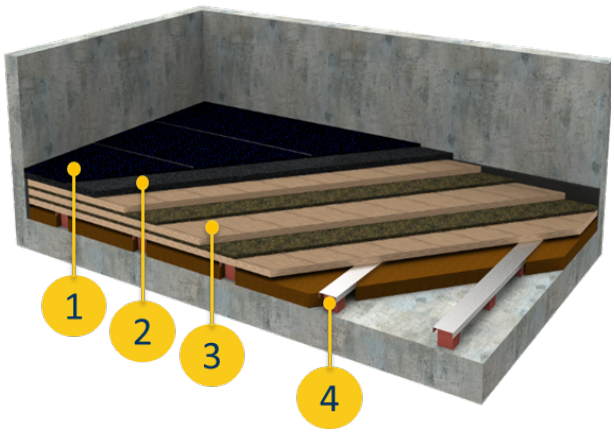


Fig. 1 - Essential elements in a dry floating floor for sport & gym applications

1.3 dBooster™ technology

A dry floating floor is made of a combination of different panels where the bottom panel always must be ductile with sufficient bending strength to support the other panels. To reduce the noise radiation under impact loads, it is best to provide the combination of panels with as low radiation efficiency as possible.

Panels with best ductility / strength ratio are wood based panels (plywood, chipboard, MDF). These panels have low damping and show dips in the coincidence and resonance controlled regions of transmission loss (Fig. 2).

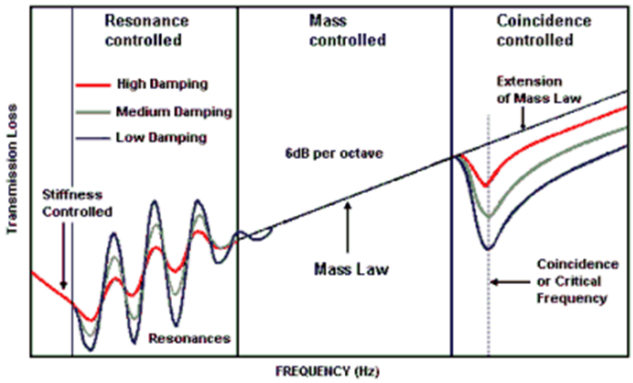
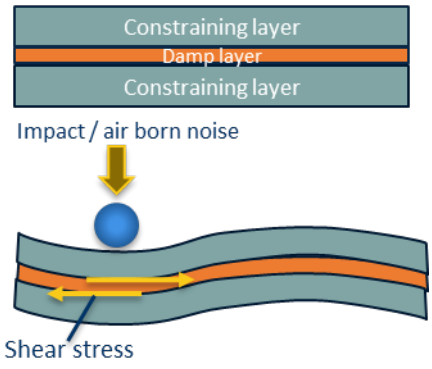


Fig. 2 – Damping effects on transmission loss in resonance and coincidence controlled regions

These dips in the resonance and coincidence controlled region are mitigated by well-known CLD (constrained layer damping) techniques with high damping viscoelastic acoustic membranes [5] (Fig. 3).

The combination of wood-based panels with CLD membranes offers best mix of bending strength with high ductility, high damping and low radiation efficiency (Fig. 3). The impact on the panels results in shear stress of the damping layer that controls the panel displacement and converts the mechanical energy (vibration) to heat [3].



Panel composition	Overall Thickness (mm)	Surface weight (kg/m³)	Rw (dB)
Plywood (15 mm)	15	8,4	18
Plywood(6 mm) + CDM-DAMP-1 + Plywood(6 mm)	15	9,4	29
Plywood(6 mm) + CDM-DAMP-2 + Plywood(6 mm)	15	8,3	30
Plywood(6 mm) + CDM-DAMP-3 + Plywood(6 mm)	15	9,5	30

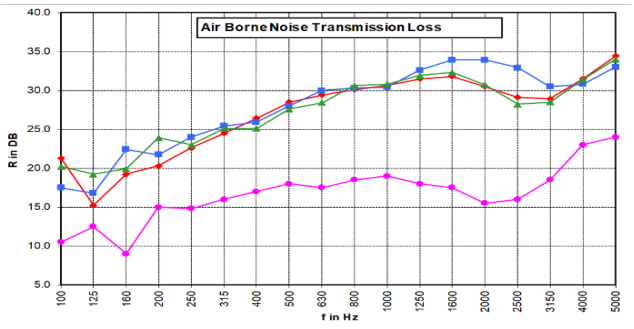


Fig. 3 – Left: CLD (constrained layer damping) mechanism on converting impact energy to heat by shear stress, Right: Effect of CLD on transmission loss (internal CDM).

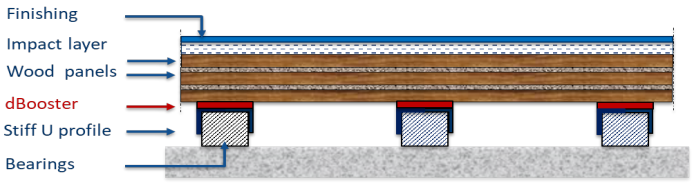


Fig. 4 – conceptual detailed section with constituting elements

Reducing the panel fixation conditions by leaving it free floating with reduced friction in the interface with the supports, results in acoustically more efficient performance[6].

This mechanism boosts the structure borne noise isolation (hence "dBooster™" technology) in the resonance and coincidence controlled regions of the floating floor set-up. The "dBooster™" resilient strip materializes the free-float/reduced friction condition between a stiff U profile with the capacity to withstand the imposed impact energy and the lightweight load distribution panels. The dry floating floor is thus kept in place by limited but sufficient friction between the bottom panel and the resilient support.

To evaluate the proposed "free floating / reduced friction" concept different mock-ups has been tested in-situ [7]. The free-floating system ("dBooster"™) showed an additional 5 dBA improvement of the noise reduction (Fig. 5).

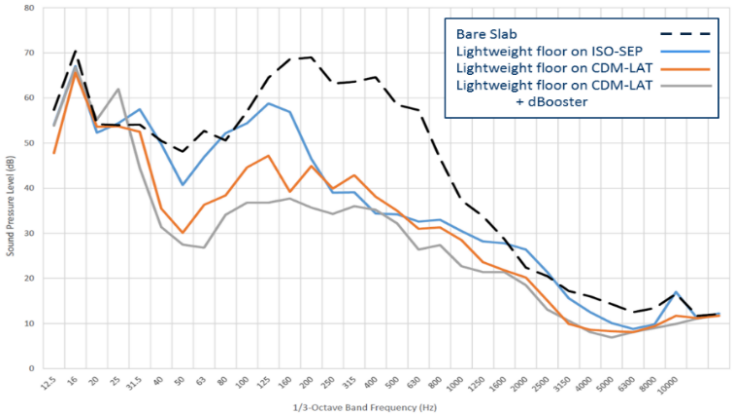


Fig. 5 – Sound pressure level measured in a bedroom in The Hill, Toronto (2016) [7].

The interest was awaken to further investigate these seemingly positive results. Additional in-house testing in CDM confirmed this result.

During Phase 1 of Research 1, two types of CLD acoustic membranes were tested:

- ✓ Heavy mass layer with 10 kg/m²
- ✓ Light weight high damping layer with 5 kg/m²

The results showed the effect of different CLD materials on panel vibration was similar (Fig. 6). As a result, only light weight high damping layers (type DAMP) were used in this study.

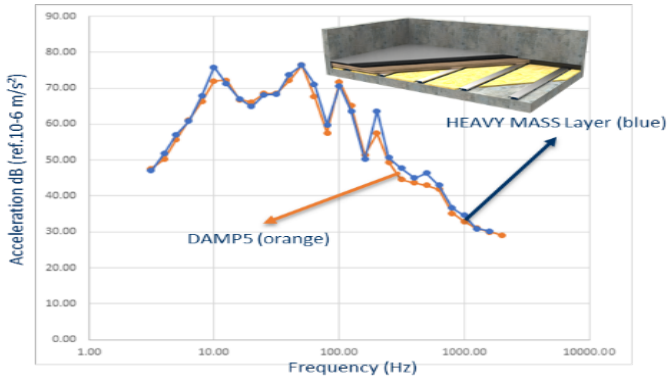


Fig. 6 – CLD effect comparison between a 10 kg/m² heavy mass layer (blue line) and a 5 kg/m² light weight high damping layer DAMP5 (orange line)

2 EXPERIMENTAL DROP WEIGHT TESTS

The measurement campaign was conducted at Riverbank Acoustical Laboratory (RAL) in Geneva, IL 60134-3302 in USA in 2017. For each floor assembly, a series of weights were dropped using a predetermined configuration of weight, drop height, and location on the specimen. Two weights were dropped from three heights at two locations (Fig. 7 and 8).

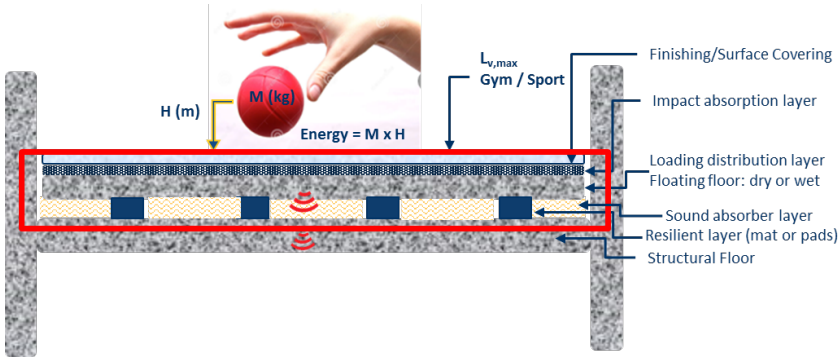


Fig. 7 – Drop test configuration: conceptual cross section of the essential elements of floating floor setup for sport & gym applications

2.1 Impact Energy Level

The impact energy level E is the quintessential source generating the acoustic nuisance in neighbouring spaces: the product of mass M in terms of force [N] and the drop height H [m].

Typical dumbbells weigh up to 25 kg are dropped from typical height up to 1 m, meaning energy levels up to 250 Nm. The test program in Phase 2 was conducted up to energy levels of 25 kg dropping from 1,5 m (373 Nm). There seems to be a tendency to take 20 kg dropped from 1 m as a standard for new normalization – this would conduct to a standardized energy level of 200 Nm.

Fig. 8 – (a) typical dumbbells weigh and, (b) drop weight test set up used in RAL

Table 1 – Applied energy levels throughout the Phase 2 research program in RAL

Drop weight (kg)	11,5	25,0	11,5	11,5	25,0	25,0
Drop height (m)	0,2	0,2	0,9	1,5	0,9	1,5
Energy levels (Nm)	23	50	102	170	224	373

2.2 Measurements Setup

Two microphone positions were used to measure the peak A-weighted Fast Response Sound Pressure Level ($L_{A,peak}$, F) at three positions by dropping the weight once, then moving one of the positions and dropping the weight again at the same location. Measurements were taken using a B&K Type 3160-A-042 frequency analyzer and B&K Pulse Labshop. The microphone was a B&K Type 4943-B-1 microphone. The $L_{A,peak}$, Fast for the three microphone positions and two drop positions were then averaged together for each weight-height configuration, giving 6 data points for each of the 6 weight-height configurations. The tested specimens are described in Table 2. The orange highlighted lines are discussed and presented in this paper. RAL used the recommendations supplied by Sato and Yoshimura [4].

Table 2 – The lightweight floating floor configuration

tested set-ups	Finishing		Load distribution system					Resilient support		
	rubber rollout 10mm	CDM-IMPACT 15/20mm	PW 18mm	DAMP 5/10/20	PW 18mm	DAMP 5/10/20	PW 18mm	Mat MTX	GYMLAT	dBOOSTERLAT
#1 CDM-GYM-SP, 25/7 - 98mm (3-27/32")	Y	20	Y	5	Y			25/7		
#2 CDM-GYM-HP-M30 - 103mm (4")	Y	20	Y	5	Y				M30	
#3 CDM-GYM-HP-L30 - 118mm (4,6")	Y	20	Y	20	Y				L30	
#4 CDM-GYM-XP-dB-L55 - 162mm (6,4")	Y	20	Y	10	Y	10	Y			L55
#5 CDM-GYM-HP-M50 - 98mm (4")	Y		Y		Y				M50	
#6 CDM-GYM-XP-L50 - 157mm (6,2")	Y	20	Y	10	Y	10	Y		L50	
#7 CDM-GYM-XP-L50 - 157mm (6,2")	Y	20	Y	10	Y	10	Y		L50	
#8 CDM-GYM-XP-dB-L75 - 182mm (7,2")	Y	20	Y	10	Y	10	Y			L75
#9 CDM-GYM-XP-dB-L75 172mm (6,8")	Y	20	Y	5	Y	5	Y			L75
#10 CDM-GYM-XP-dB-L60 167mm (6,6")	Y	20	Y	10	Y	10	Y			L60
#11 CDM-GYM-HP-dB-L40 - 113mm (4,4")	Y	20	Y	5	Y					L40
#12 CDM-GYM-HP-dB-SL-L40 108mm (4,3")	GT100	15	Y	5	Y					L40
#13 CDM-GYM-HP-L50 98mm (4")	Y		Y		Y				L50	
#14 CDM-GYM-HP-dB-L60 - 138mm (5,4")	Y	20	Y	10	Y					L60

3 MEASUREMENTS RESULTS

Two different comparison studies are shown related to the "dBooster"™ technology (Phase 2 research program). Results are presented in terms of insertion loss: the difference between the noise level measured in the receiving room below source room with (1) bare slab and (2) specimen

- ✓ Top graph shows the overall average insertion loss as a function of energy impact level
- ✓ Bottom graphs show the insertion loss in function of 1/3rd octave bands (31.5-2 kHz) for 3 different energy impact levels (23, 102 and 373 Nm)

3.1 The effect of "dBooster"™ (with and without #6 vs. #10)

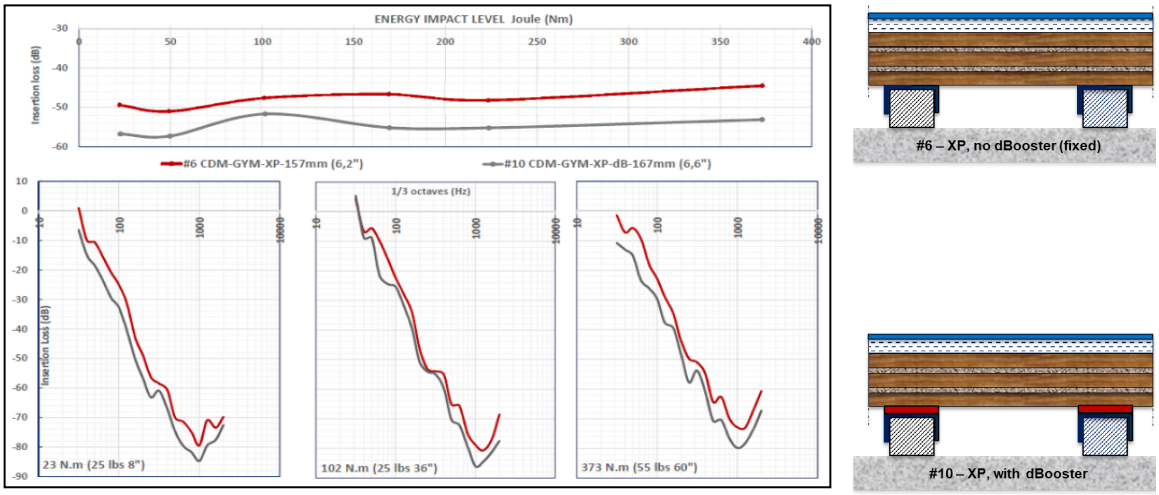


Fig. 9 – Comparison between insertion loss obtained for test setup #6 without "dBooster"™ and that of setup #10 with "dBooster"™.

It can be observed that for a 3-layer damped panel combination "dBooster"™ clearly improves the insertion loss by 5 to 10 dB and that the improvement remains consistently constant in function of energy impact levels and is consistent in the whole frequency spectrum

3.2 The effect of "dBooster"™ on the floor thickness (#6 vs. #14)

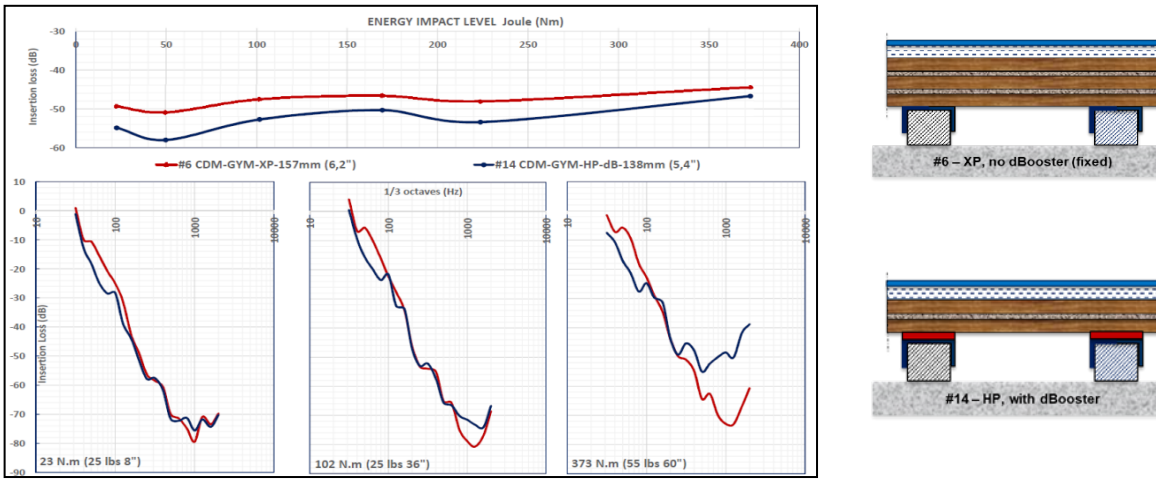


Fig. 10 – Comparison between insertion loss obtained for test setup #6 with 3 layers of Plywood but without "dBooster"™ and that of setup #14 with 2 layers of Plywood with "dBooster"™

This particular comparison shows that "dBooster"™ can compensate the positive effect of an extra panel (included damping) in the floor combination, reducing thus the overall thickness of the set-up. However, this positive effect is less pronounced at high energy impact levels and frequencies above 800 Hz.

4. CONCLUSIONS

To improve the structure borne noise isolation efficiency of CDM lightweight floating floors, different panel configurations with and without "dBooster"™ technology were experimentally investigated as part of an ongoing in-house research program.

The following conclusions have been drawn:

- ✓ "dBooster"™ is an innovative technology allowing to improve the structure borne noise isolation performance of dry floating floors under heavy impacts.
- ✓ For a same dry floating floor set-up, the overall structure borne noise isolation improves by 5-10 dB when comparing the performance with and without "dBooster"™ .
- ✓ For the same lightweight panel combination "dBooster"™ implementation guarantees the consistent improvement over all tested energy impact levels. This makes the technology interesting to be implemented in multi-disciplinary fitness clubs floors with high isolation performance demands as a unique support technology for the whole surface.
- ✓ "dBooster"™ can compensate the positive effect of an extra panel (included damping) in the floor combination, reducing thus the overall thickness of the set-up.

REFERENCES

[1] H. Masoumi, P. Pinto, P. Carels "Improvements in Acoustical Performance of LW FF for Gym/Sports Applications" – Euronoise (2018)

[2] N. Hashimoto "Measurement of sound radiation efficiency by the discrete calculation method", Applied Acoustics 62, 429-446 (2001)

[3] B. Shafer and B. Tinianov "Use of damped drywall in architectural acoustics", Journal of the Acoustical Society of America 130, 2388 (2011)

[4] Sato, Yoshimura "Classification scheme of floor impact sounds with the standard rubber ball in dwellings", Inter-Noise (2014)

[5] L. Garibaldi and H.N. Onah "Viscoelastic Material Damping Technology" – Becchis Osiride – Torino (1996)

[6] N.B. Roozen , H. Muellner , L. Labelle , M. Rychtarikova, C. Glorieux "Influence of panel fastening on the acoustic performance of light-weight building elements: study by sound transmission and laser scanning vibrometry" – Journal of Sound and Vibration 346 (1)- (2015)

[7] HGC Engineering measurement report for different CDM gymfloor setups "The Hill – 925-935 Eglinton Avenue West, Toronto January 25, 2017 Gym Floor Testing Review"