

**TEKNILLINEN KORKEAKOULU**

Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto

Mika Hanski

Raidemelun vaimentaminen kiskoon kiinnitettävin vaimennuselementein

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin  
tutkintoa varten Espoossa 8.3.2004

Työn valvoja

Professori Matti Karjalainen

Työn ohjaaja

Dipl.ins. Tuomo Viitala

# Tiivistelmä

TEKNILLINEN KORKEAKOULU

Diplomityön tiivistelmä

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                      |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| Tekijä:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Mika Hanski                                                          |
| Työn nimi:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | Raidemelun vaimentaminen kiskoon kiinnitettävien vaimennuselementein |
| Päivämäärä:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 8.3.2004                                                             |
| Sivumäärä:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 119                                                                  |
| Osasto:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto                              |
| Professuuri:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | S-89 Akustiikka ja äänenkäsittelytekniikka                           |
| Työn valvoja:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Matti Karjalainen, prof.                                             |
| Työn ohjaaja:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Tuomo Viitala, dipl.ins.                                             |
| <p>Tässä työssä käsitellään raideliikenteen aiheuttaman melun vaimentamista kiskoon kiinnitettävien vaimennuselementein. Työn tavoitteena on selvittää kahden erilaisen prototyyppelementin vaimennuskyky sekä laboratorio-olosuhteissa että kenttäolosuhteissa.</p> <p>Työ on kaksijakoinen. Ensimmäisen osan on tarkoitus toimia johdatuksena akustiikan perusilmiöihin sekä perehdyttää lukija raideliikenteen aiheuttaman melun oleellisimpiin lähteisiin ja meluntorjuntakeinoihin. Toisessa osassa käsitellään vaimennuselementtien laboratorio- ja kenttätutkimuksia. Laboratoriotutkimuksissa määritettiin lyhyen koekiskon impulssivaste kaiuttomassa huoneessa sekä vaimentamattomana että vaimennettuna molemmilla prototyyppelementeillä. Koekiskoon kohdistettiin impulssivasaraheräte, ja värähtelyvaste ja äänensäteily mitattiin. Kenttätutkimuksissa määritettiin toisen prototyyppelementin vaimennuskyky vertailemalla junien ohiajojen aiheuttamia äänitasoja ja melun taajuuskäyttäytymistä vaimentamattomalla ja vaimennetulla raiteella.</p> <p>Laboratoriomittauksien tulokset viittaavat merkittävään vaimennuskykyyn molemmilla vaimennuselementeillä, mutta koejärjestelyn olosuhteet poikkeavat oleellisesti todellista raiteista, joten mittauksien edustavuus ei ole hyvä. Kenttämittauksien tuloksien perusteella voidaan todeta toisen vaimennuselementin kyenneen vaimentamaan ohiajojen aiheuttamaa <math>A</math>-painotettua äänitasoa n. 1-2 dB.</p> |                                                                      |
| Avainsanat:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Raideliikennemelu, meluntorjunta, vaimennuselementti.                |

# Abstract

**HELSINKI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY**    Abstract of the Master's Thesis

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Author:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Mika Hanski                                             |
| Name of the Thesis:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Railway Noise Abatement Using Rail-Mounted Dampers      |
| Date:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 8.3.2004                                                |
| Number of pages:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 119                                                     |
| Department:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Department of Electrical and Communications Engineering |
| Professorship:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | S-89 Acoustics and Audio Signal Processing              |
| Supervisor:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Matti Karjalainen, Prof.                                |
| Instructor:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Tuomo Viitala, M.Sc.                                    |
| <p>The scope of this thesis is railway noise abatement by the use of rail-mounted dampers. The objective is to determine the damping capabilities of two different prototype dampers in both laboratory and field conditions.</p> <p>The thesis is split into two sections. The purpose of the first section is to provide a short introduction to basic acoustic phenomena, and to familiarize the reader with the most important sources of railway noise and noise abatement methods. The laboratory and field tests of the dampers are explained in the second section. In the laboratory tests, the impulse response of a short test rail was determined in an anechoic chamber with no damping and with both prototype dampers. Impulse hammer excitation was applied to the rail, and the vibration response and the sound radiation of the rail were measured. The other prototype damper was tested in field conditions by comparing the sound levels and frequency domain behavior of train pass-by noise on undamped and damped track.</p> <p>The results of the laboratory tests show significant damping results for both dampers, but the test conditions were radically different compared to actual track installations, so the results are not representative. According to the results of the field tests, the prototype damper was able to reduce the <i>A</i>-weighted sound levels of pass-by noise by 1-2 dB.</p> |                                                         |
| Keywords:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Railway noise, noise abatement, rail-mounted damper.    |

# Esipuhe

Tämä työ tehtiin kesäkuun 2003 ja helmikuun 2004 välisenä aikana Teknillisen korkeakoulun akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratoriossa Ratahallintokeskuksen tilauksesta. Työn valvoi professori Matti Karjalainen ja ohjaajana toimi ylitarkastaja (dipl.ins.) Tuomo Viitala Ratahallintokeskuksesta.

Haluan kiittää valvojaa ja ohjaajaa saamastani rakentavasta kritiikistä ja opastuksesta työn aikana. Kiitokset myös Teknikum Oy:n Pentti Tiensuulle yhteistyöstä vaimennuselementtejä koskien sekä VR:n Timo Mäkelälle kenttämittauksiin liittyvistä järjestelyistä.

Suurkiitos kuuluu vanhemmilleni sekä henkisestä että taloudellisesta tuesta opintojeni aikana.

Viimeisenä ja kaikkein tärkeimpänä haluan lausua hartaat kiitoksen sanat Sirkulle kärsivällisyydestä, myötätunnosta ja loputtomasta kannustuksesta erityisesti tämän työn aikana.

Espoo, 8.3.2004

Mika Hanski

|                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------|----|
| 1 Johdanto .....                                              | 1  |
| 2 Melu ja kuulo .....                                         | 3  |
| 2.1 Äänen synty ja äänilähteet.....                           | 4  |
| 2.2 Äänen eteneminen väliaineessa .....                       | 5  |
| 2.3 Ihmisen kuulojärjestelmän rakenteesta ja toiminnasta..... | 6  |
| 2.4 Äänen voimakkuus ja kuulo .....                           | 8  |
| 2.5 Psykoakustiikkaa .....                                    | 10 |
| 2.6 Melun laatu .....                                         | 12 |
| 3 Raideliikenteen aiheuttama melu.....                        | 14 |
| 3.1 Raideliikennemelun lähteet .....                          | 14 |
| 3.1.1 Kisko ja pyörä.....                                     | 14 |
| 3.1.2 Kaarremelu .....                                        | 19 |
| 3.1.3 Aerodynaaminen melu .....                               | 22 |
| 3.1.4 Ratapölkkyt .....                                       | 23 |
| 3.2 Raideliikennemelun torjuminen.....                        | 24 |
| 3.2.1 Meluesteet.....                                         | 24 |
| 3.2.2 Kiskojen hionta ja pyörien sorvaaminen.....             | 27 |
| 3.2.3 Telien peittäminen .....                                | 27 |
| 3.2.4 Pyörän ja kiskon säteilyn vaimentaminen.....            | 29 |
| 3.2.5 Aktiivinen melunvaimennus .....                         | 31 |
| 4 Laboratoriomittaukset .....                                 | 33 |
| 4.1 Koekisko .....                                            | 33 |
| 4.2 Vaimennuselementit .....                                  | 33 |
| 4.3 Mittauskalusto .....                                      | 35 |
| 4.4 Mittauksen kulku.....                                     | 37 |
| 4.5 Analyysimenetelmät .....                                  | 37 |
| 4.6 Tulokset .....                                            | 39 |
| 4.6.1 Vaakasuuntainen ilmaääni .....                          | 39 |
| 4.6.2 Pystysuuntainen ilmaääni .....                          | 42 |
| 4.6.3 Vaakasuuntainen värähtely .....                         | 44 |
| 4.6.4 Pystysuuntainen värähtely.....                          | 46 |

|                                                   |    |
|---------------------------------------------------|----|
| <b>4.6.5 Siirtofunktioiden koherenssi</b> .....   | 47 |
| <b>5 Kenttämittaukset</b> .....                   | 50 |
| <b>5.1 Mittauspisteet</b> .....                   | 51 |
| <b>5.2 Sääolosuhteet mittauspäivinä</b> .....     | 52 |
| <b>5.3 Mittauskalusto</b> .....                   | 53 |
| <b>5.4 Mittauksen kulku</b> .....                 | 53 |
| <b>5.5 Analyysimenetelmät</b> .....               | 54 |
| <b>5.5.1 Aikatason tunnusluvut</b> .....          | 54 |
| 5.5.1.1 Aika- ja taajuuspainotetut äänitasot..... | 54 |
| 5.5.1.2 Äänialtistustaso.....                     | 54 |
| <b>5.5.2 Aika-taajuustason analyysi</b> .....     | 55 |
| <b>5.5.3 Taajuustason analyysi</b> .....          | 55 |
| <b>5.6 Tulokset</b> .....                         | 55 |
| <b>5.6.1 Suora rataosuus</b> .....                | 55 |
| 5.6.1.1 Aikatason tunnusluvut .....               | 56 |
| 5.6.1.2 Taajuustason analyysi .....               | 59 |
| 5.6.1.3 Aika-taajuustason analyysi .....          | 60 |
| <b>6 Yhteenveto</b> .....                         | 63 |
| <b>7 Jatkotutkimusehdotukset</b> .....            | 66 |
| <b>8 Viitteet</b> .....                           | 68 |

# Symboliluettelo

|                          |                                                                   |
|--------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| $c$                      | Äänen nopeus ilmakehässä                                          |
| $C_{22}$                 | Kalkarin vakio                                                    |
| $D_{\text{IR}}$          | Meluesteen eristävyys                                             |
| $D_{\text{la}}$          | Meluesteen absorptio                                              |
| $f$                      | Taajuus                                                           |
| $F_0$                    | Pinnan normaalin suuntainen voima                                 |
| $G$                      | Teräksen leikkausmoduuli                                          |
| $\hat{G}_{\text{xx}}(f)$ | Herätesignaalin autospektriestimaatti                             |
| $\hat{G}_{\text{xy}}(f)$ | Herätteen ja vasteen ristispektriestimaatti                       |
| $\hat{G}_{\text{yx}}(f)$ | Vasteen ja herätteen ristispektriestimaatti                       |
| $\hat{G}_{\text{yy}}(f)$ | Vasteen autospektriestimaatti                                     |
| $h_e$                    | Meluesteen efektiivinen korkeus                                   |
| $\hat{H}''(f)$           | Systeemin siirtofunktioestimaatti                                 |
| $l$                      | Kappaleen karakteristinen pituus                                  |
| $L_A$                    | Äänipainetaso $A$ -taajuuspainotuksella                           |
| $L_{\text{AE}}$          | Äänialtistustaso $A$ -taajuuspainotuksella                        |
| $L_{\text{AF}}$          | Äänipainetaso $A$ -taajuuspainotuksella ja $F$ -aikapainotuksella |
| $L_F$                    | Äänipainetaso $F$ -aikapainotuksella                              |
| $L_E$                    | Äänialtistustaso                                                  |
| $L_{\text{eq}}$          | Ekvivalenttitaso                                                  |
| $L_p$                    | Äänipainetaso                                                     |
| $p$                      | Äänipaine                                                         |
| $p_0$                    | Äänipainetason referenssi, 20 $\mu\text{Pa}$                      |
| $Re$                     | Reynoldsin luku                                                   |
| $s$                      | Sivusuuntainen luisuma                                            |
| $St_l$                   | Strouhalin luku                                                   |
| $t$                      | Aika                                                              |
| $U_0$                    | Virtausnopeus                                                     |
| $v$                      | Nopeus                                                            |
| $v_0$                    | Kulkunopeus                                                       |
| $v_{\text{sy}}$          | Sivusuuntainen nopeus                                             |

|           |                                             |
|-----------|---------------------------------------------|
| $\lambda$ | Aallonpituus                                |
| $\mu_0$   | Staattinen kitkakerroin                     |
| $\mu(s)$  | Luisumasta riippuva dynaaminen kitkakerroin |
| $\tau_W$  | Junan pyörän materiaalin leikkauslujuus     |
| $\tau_R$  | Kiskon leikkauslujuus                       |
| $\nu$     | Väliaineen viskositeetti                    |
| $\omega$  | Kulmataajuus                                |



# 1 Johdanto

Yhä suurempi osa väestöstä kärsii ympäristömelun haitoista varsinkin kaupunkialueilla. Tie-, lento- ja raideliikenteen aiheuttama melu on tavanomaisin taajama-alueiden melutyyppejä, ja se on valitettavan useassa kohteessa vaikeasti torjuttavissa. Liikennemelu on myös liikennemäärien kasvun myötä ollut jo pitkään nousussa. Raideliikenteen aiheuttama melu on muiden liikennemelutyyppejä tavoin riippuvainen kaluston nopeudesta, joten nykyisen henkilöjunaliikenteen nopeuksien nostamistrendin myötä melu luonnollisesti kasvaa.

Tämän työn tavoitteena on selvitys raideliikennemelun lähteistä ja sen torjuntakeinoista sekä tutkia kiskoon kiinnitettävien vaimennuselementtien kykyä vaimentaa raideliikennemelua. Kiskoon kiinnitettävien vaimennuselementtien tehokkuutta meluntorjuntakäytössä ei ole laajalti tutkittu, joten olemassa olevia tuloksia elementtien toiminnasta on hyvin vähän. Työn kokeellisessa osassa tutkittavat vaimennuselementit peittävät koko kiskon jalan eli kiskon värähtelykäyttäytymisen muokkaamisen lisäksi pyritään vaimentamaan kiskon säteilemää ääntä.

Työn rakenne on kaksijakoinen: luvuissa 2 ja 3 perehdytetään lukija tutkimuksen kannalta oleellisiin taustatietoihin ja ilmiöihin, ja luvut 4 ja 5 muodostavat työn kokeellisen osion, joissa on esitetty tutkimusmenetelmät sekä tulokset.

Luvun 2 sisällön on tarkoitus perehdyttää lukija akustiikan perusilmiöihin ja käsitteisiin. Luvussa käsitellään äänen syntyä ja etenemistä väliaineessa sekä ihmisen kuulon toimintaa fysiologisesta ja lyhyesti myös psykologisesta näkökulmasta.

Raideliikennemelun lähteisiin ja meluntorjuntakeinoihin syvennyttään luvussa 3. Oleellimmat melulähteet esitellään luvussa 3.1 ja yleisimmät meluntorjuntakeinot sekä uudempia, kokeellisia meluntorjuntakeinoja luvussa 3.2.

Kokeellisen osan ensimmäinen osio, laboratoriomittaukset, on käsitelty luvussa 4. Koekiskolle tehtiin impulssivastemittauksia sekä vaimentamattomana että molemmilla vaimennuselementtiprototyypeillä varustettuna. Pyrkimyksenä oli määrittää kiskon värähtelyvaste ja äänen säteilyvaste annetulle herätesignaaliin, ja siten myös selvittää eri vaimennuselementtiprototyyppien käyttäytymistä.

Toisen vaimennuselementtiprototyypin toimintaa tutkittiin myös kenttäolosuhteissa Ypajällä. Luvussa 5 keskitytään kenttäkokeisiin ja niiden tuloksiin. Kokeissa mitattiin

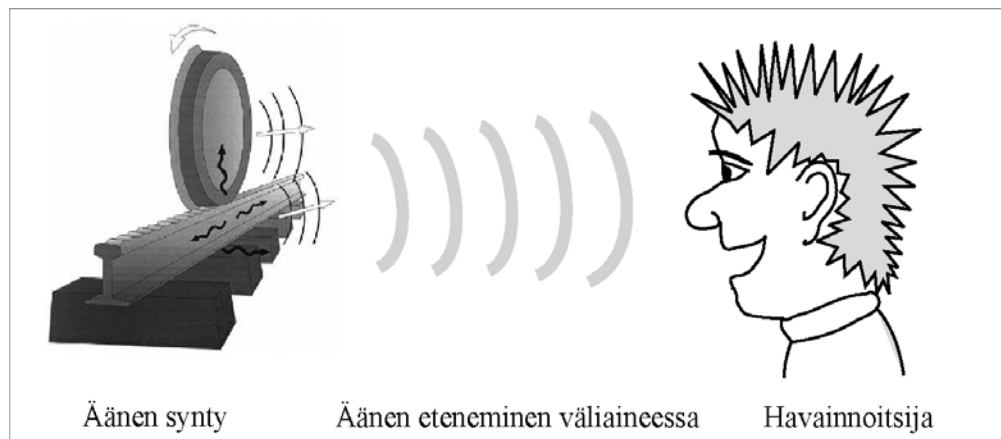
junien ohiajojen aiheuttama melu suoralla rataosuudella sekä vaimentamattomalla että vaimennetulla raiteella.

Työn yhteenveto on esitetty luvussa 6, ja luku 7 sisältää ehdotuksia mahdollisia jatkotutkimuksia silmällä pitäen.

## 2 Melu ja kuulo

Melu on ääntä, jonka ihminen kokee epämiellyttävänä tai häiritseväenä, tai joka on muulla tavoin terveydelle tai hyvinvoinnille haitallista. Melun fysikaalinen määrittely on vaikeaa, koska suoranaista elimistölle haitallisia muutoksia aiheuttavaa melua lukuun ottamatta melun haitallisuus perustuu yksilön subjektiiviseen arviointiin. Melututkimukset ovatkin hyvin usein haastattelututkimuksia. Väestönkasvu, teollistuminen, tekninen kehitys ja näiden myötä jatkuvasti lisääntynyt liikenne on lisännyt meluhaittoja huomattavasti.

Ääni sellaisena ilmiönä, jona se useimmiten koetaan, on väliaineen värähtelyä, joka syntyy jonkin kappaleen mekaanisesta värähtelystä. Äänitapahtumaan liittyy useimmiten äänilähde, ääniaallon eteneminen väliaineessa ja äänitapahtuman havainnoiminen eli kuvan 1 mukaisesti ja täysin analogisesti minkä tahansa informaationsiirtomenetelmän tavoin lähde, siirtotie ja vastaanottaja. Tässä luvussa käsitellään äänen syntyä, sen etenemistä väliaineessa, kuulojärjestelmän toimintaa ja melun ominaisuuksia.



*Kuva 1. Äänitapahtuman osatekijät [14, 32].*

## 2.1 Äänen synty ja äänilähteet

Eräs äänen määritelmä on aikariippuva poikkeama väliaineen tiheydessä, jonka saa aikaan värähtelevä kappale. Tiheyspoikkeama etenee väliaineen molekyylilyylien välityksellä, ja syntyy ääniaalto. Vastaanottajan havainnoima äänitapahtuma riippuu vahvasti lähteen ominaisuuksista kuten suuntaavuudesta ja äänitehosta sekä siirtotien häviömekanismeista.

Äänilähteet, jotka useimmiten ovat meluakustiikan osa-alueella mekaanisesti värähteleviä kappaleita, synnyttävät lähteen koosta, muodosta ja värähtelyn aallonpituudesta riippuen erimuotoisia aaltorintamia. Aallonpituuteen nähden pienikokoisen lähteen, jota kutsutaan myös pistelähteeksi, synnyttämä aaltorintama on pallomainen eli lähde säteilee tasaisesti jokaiseen avaruuden suuntaan. Ideaalisen palloaallon aiheuttama äänipainetaso vaimenee 6 dB etäisyyden kaksinkertaistuessa.

Pitkät ja kapeat viivalähteet synnyttävät sylinteriaallon, jonka pääakseli on lähteen suuntainen. Näin tapahtuu aallonpituuksilla, jotka ovat pieniä lähteen pituuteen verrattuna. Ideaalinen äärettömän pituinen viivalähde synnyttää sylinteriaallon kaikilla aallonpituuksilla. Sylinteriaallon tärkein ominaisuus meluntorjunnan kannalta on sen vaimeneminen etäisyyden funktiona: äänipainetaso vaimenee vain 3 dB etäisyyden kaksinkertaistuessa.

Piste- ja viivalähteet ovat vain teoreettisia ja ideaalisia lähteitä. Reaalilähteiden dimensiot ovat aina äärellisiä, joten suuntaavuus on vahvasti taajuudesta riippuva. Hyvin pitkiä juna ja jatkuvaa tieliikennevirtaa tarkasteltaessa voidaan tosin kohtuullisella tarkkuudella approksimoida äänilähteitä viivalähteillä. Kaukokentässä ts. riittävän kaukana mistä tahansa lähteestä etenevä aaltorintama on likimain tasoaalto pienellä pinnalla tarkasteltuna.

Meluksi luokiteltava ääni syntyy lähes poikkeuksetta kappaleiden mekaanisen värähtelyn yhteydessä. Poikkeuksena voidaan mainita esim. salamaniskussa syntyvä ääni, joka syntyy purkauksen aiheuttamasta äkillisestä ilman lämpölaajenemisesta. Ampumaratamelun lähteet ovat myös räjähdystapahtuman aiheuttamia: laukauksen aiheuttama ääni syntyy ruutikaasujen purkautuessa asepiipun suusta piipussa matkaavan luodin tiivistysvaikutuksen loppuessa.

## 2.2 Äänen eteneminen väliaineessa

Ääni on siis aaltoliikettä, joka syntyy poikkeamasta ilmanpaineen staattisesta arvosta, ja joka etenee väliaineessa nopeudella  $c$ . Äänen nopeus ilmassa on n. 340 m/s ja riippuu lämpötilasta. Äänen käyttäytymistä homogeenisessa väliaineessa kuvataan yleisellä yksiulotteisella aaltoyhtälöllä

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (1)$$

missä  $x$  on paikka,  $t$  on aika ja  $p$  on äänipaine. Äänipaine edustaa ilmanpaineen poikkeamaa tasapainoarvostaan, ja sen mittayksikkö on Pascal (Pa). Äänipaineen muutokset, jotka ovat ihmisen havaittavissa, ovat hyvin pieniä verrattuna staattiseen ilmakehän paineeseen, joten on luontevaa ilmoittaa äänen voimakkuus äänipainetasona  $L_p$ . Äänipainetaso määritellään

$$L_p = 10 \log_{10} \left( \frac{p^2}{p_0^2} \right) \quad (2)$$

missä  $p_0$  on referenssiarvo 20  $\mu\text{Pa}$ , joka vastaa likimain hiljaisinta kuultavissa olevaa ääntä taajuudella 1 kHz.

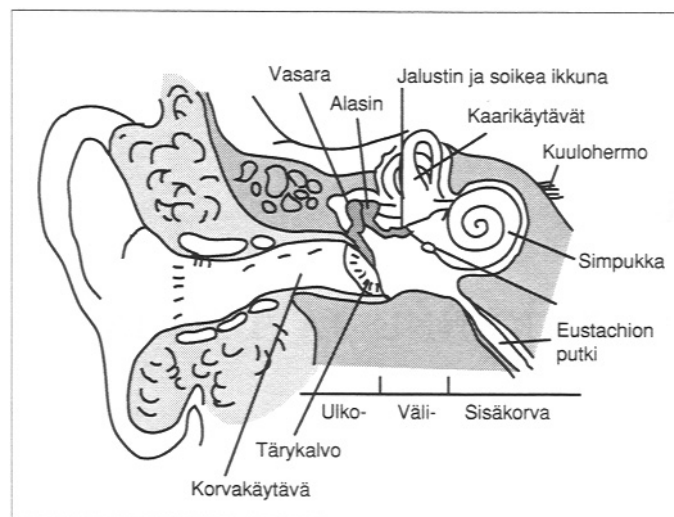
Ääni saattaa edetessään kohdata esteitä kuten kovia seiniä tai äkillisiä maastoprofilimuutoksia. Aaltoliikkeen energia voi esteen kohdatessaan heijastua, absorboitua tai läpäistä esteen riippuen esteen ominaisuuksista. Esteen mittojen ollessa aaltoliikkeen aallonpituuden suuruusluokkaa tapahtuu diffraktio. Meluesteet perustuvat diffraktioilmiöön. Hyvin pienillä taajuuksilla eli suurilla aallonpituuksilla este ei pysty vaimentamaan ääniaaltoja, mutta suurilla taajuuksilla esteen taakse syntyy varjoalue. Osa ääniaallosta pääsee kiertämään esteen, jonka mitat ovat ääniaallon aallonpituuden kokoluokkaa tai sitä pienempiä.

Saapuessaan kahden eri väliaineen rajapintaan ääniaalto heijastuu ja taittuu Snellin lain mukaisesti. Tulo- ja lähtökulman sinien suhde riippuu äänen nopeudesta väliaineissa. Mikäli väliaine tai sen ominaisuudet muuttuvat asteittain, aaltoliike pyrkii muuttamaan kulkuaan eli taipumaan kohti väliainetta, jossa äänen nopeus on pienempi.

## 2.3 Ihmisen kuulojärjestelmän rakenteesta ja toiminnasta

Ihmisen korvien tehtävänä on vastaanottaa ääniaalto ja muodostaa kuuloaistimus välittämällä akustinen informaatio sopivien mekanismien avulla kuulohermoston kautta aivoihin. Korva voidaan jakaa kolmeen osioon: ulko, väli- ja sisäkorva. Kullakin on oma tehtävänsä muunnoksessa ääniaallosta hermoimpulssiksi. Korvan halkileikkaus on esitetty kuvassa 2.

Ulkokorva käsittää korvalehden ja korvakäytävän. Ulko- ja välikorvan rajapintana toimii tärykalvo. Ulkokorva on passiivinen ja lineaarinen järjestelmä ts. ulkokorva ei reagoi ääneen, vaan suodattaa ja välittää ääntä välikorvaan. Kuulon toimintaan vaikuttaa myös pää ja hartiat. Pään aiheuttama diffraktio viivästyttää ja vaimentaa saapuvaa ääniaalloa ja saa aikaan ns. interauraalisen (korvien välisen) aika- ja tasoeron, joihin suuntakuulo vahvasti perustuu. Korvalehdellä on merkittävä vaikutus suuntakuuloon korkeilla taajuuksilla. Korvakäytävä on approksimatiivisesti kovaseinäinen akustinen putki, jonka keskimääräinen pituus on noin 22,5 mm ja halkaisija noin 7,5 mm. Korvakäytävän muodostama akustinen siirtolinja on päätetty tärykalvon akustisella impedanssilla.



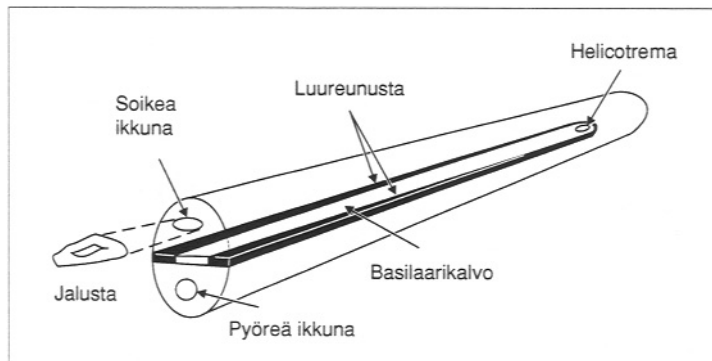
*Kuva 2. Korvan halkileikkaus [14].*

Korvakäytävän alin resonanssi (neljännesaallon resonanssi) on likimain taajuudella 4 kHz; kuulon herkkyys on suurimmillaan juuri tämän resonanssin ansiosta. Tärykalvo

toimii muuntimena, joka muuntaa ilmassa etenevän aaltoliikkeen mekaaniseksi värähtelyksi ja välittää sen edelleen kuuloluuketjuun.

Välikorva ulottuu tärykalvosta sisäkorvan ns. soikeaan ikkunaan. Välikorvan oleellisin funktionaalinen kokonaisuus on kuuloluiden (vasaran, alasimen ja jalustimen) muodostama impedanssimuuntaja ulkokorvan ilman ja sisäkorvan nesteen välillä. Sisäkorvan nesteen karakteristinen impedanssi on noin 4000-kertainen ilman karakteristiseen impedanssiin nähden. Ilman impedanssisovitusta soikealla ja pyöreällä ikkunalla olisi sama paine, jolloin sisäkorvaan välittyvä äänienergia olisi hyvin pieni.

Sisäkorvan simpukka on yhteydessä välikorvaan soikean ja pyöreän ikkunan välityksellä. Nestetäytteisen simpukan soikeaa ikkunaa peittää jalustin ja pyöreää ikkunaa kimmoisa kalvo. Jalustimen liike soikealla ikkunalla saa simpukan sisällä olevan nesteen värähtelemään. Tällöin myös simpukan basilaarikalvo alkaa värähdellä. Basilaarikalvon laidalla oleva Cortin elin sisältää aistinsoluja, jotka toimivat värähtelyantureina eli muuntavat liikeinformaation hermoimpulsseiksi, jotka etenevät kuulohermoja pitkin aivon kuulokeskukseen. Simpukan yksinkertaistettu rakenne oikaistuna on esitetty kuvassa 3.



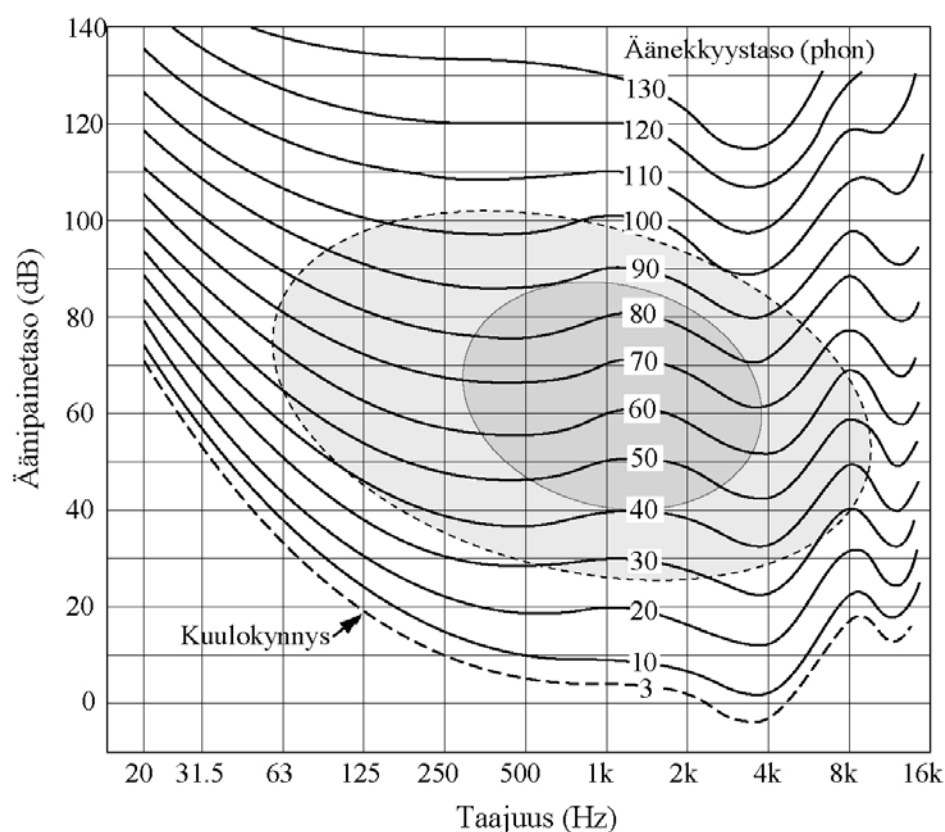
Kuva 3. Yksinkertaistettu piirros oikaistusta simpukasta [14].

Basilaarikalvon ominaisuudet muuttuvat tarkastelukohdan mukaan. Lähellä ikkunoita se on kapea ja kevyt, ja loppupäässä leveä ja raskas. Kalvo toimii siis mekaanisena siirtolinjana, jonka mekaaninen pituusimpedanssi ja aallon etenemisnopeus muuttuvat paikan funktiona. Kuuloluiden välityksellä soikeaan ikkunaa saapuva ääniaalto aiheuttaa basilaarikalvoon kulkuaallon, joka etenee kohti simpukan päätä. Kalvon kukin kohta resonoi eri taajuuksilla: korkeilla taajuuksilla resonanssi sijoittuu kalvon alkupäähän ja matalilla taajuuksilla kalvon loppupäähän. Resonanssi välittyy

aistinsoluihin, jotka lähettävät kuulohermoon impulsseja. Basilaarikalvo ja aistinsolut toimivat siis eräänlaisena spektrianalysaattorina.

## 2.4 Äänen voimakkuus ja kuulo

Ihmisen kuulo on kehittynyt vastaanottamaan ilmassa eteneviä ääniaaltoja. Kuuloalue on taajuuden ja äänipaineen suhteen rajoitettu. Terve nuori ihminen kuulee ääniä likimain taajuuskaistalla 20 Hz – 20 kHz, jota nimitetään audiokaistaksi. Kuulokynnys eli pienin havaittavissa oleva äänipaine  $p_0$  on 20  $\mu\text{Pa}$  taajuudella 1 kHz, ja tämä arvo on valittu desibeliasteikon nollakohdaksi äänipainetasoa  $L_p$  mitattaessa. Voimakkainta ääntä, jota kuulo pystyy käsittelemään, kutsutaan kipurajaksi, ja sen äänipainetaso on likimain 130 dB (63 Pa taajuudella 1 kHz). Voimakkaammat äänet koetaan vain kipuaistimuksena, ja kuulon välittömän vaurioitumisen riski on hyvin suuri. Vakioäänekkyyskäyrät taajuuden ja äänipainetason funktiona on esitetty kuvassa 4. Tummennetuista alueet edustavat akustisen musiikin (vaaleampi alue) ja puheen (tummempi alue) tyypillistä äänekkyys- ja taajuusaluetta.



Kuva 4. Vakioäänekkyyskäyrät [14,37].



Kuulokynnyksen ja kipurajan välinen alue määrittelee kuulon dynamiikan eli voimakkuusvaihtelualueen.

Kuulon taajuuserottelukyky ei ole vakio yli audiokaistan, vaan noudattaa karkeasti logaritmista asteikkoa. Tämän vuoksi äänisignaaleita kuvataan taajuustasossa usein logaritmisella asteikolla. Akustisissa mittauksissa noudatetaan myös logaritmista asteikkoa, ja lisäksi tuloksia esitettäessä pyritään noudattamaan määrättyjä taajuuskaistoja ja niiden keskitaajuuksia [10]. Oktaavi- ja terssikaistojen keskitaajuudet on kerätty taulukkoon 1. Oktaavilla tarkoitetaan taajuuden kaksinkertaistumista ja terssillä puolestaan kolmasosaa oktaavista.

*Taulukko 1. Suositeltavat keskitaajuudet oktaavi- ja terssikaistoille.*

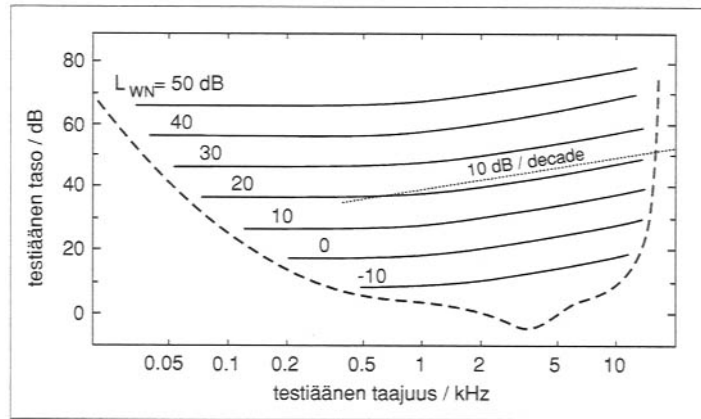
| <b>Keskitaajuus</b> | <b>1/1</b> | <b>1/3</b> | <b>Keskitaajuus</b> | <b>1/1</b> | <b>1/3</b> |
|---------------------|------------|------------|---------------------|------------|------------|
| 16                  | x          | x          | 630                 |            | x          |
| 20                  |            | x          | 800                 |            | x          |
| 25                  |            | x          | 1000                | x          | x          |
| 31,5                | x          | x          | 1250                |            | x          |
| 40                  |            | x          | 1600                |            | x          |
| 50                  |            | x          | 2000                | x          | x          |
| 63                  | x          | x          | 2500                |            | x          |
| 80                  |            | x          | 3150                |            | x          |
| 100                 |            | x          | 4000                | x          | x          |
| 125                 | x          | x          | 5000                |            | x          |
| 160                 |            | x          | 6300                |            | x          |
| 200                 |            | x          | 8000                | x          | x          |
| 250                 | x          | x          | 10000               |            | x          |
| 315                 |            | x          | 12500               |            | x          |
| 400                 |            | x          | 16000               | x          | x          |
| 500                 | x          | x          | 20000               |            | x          |

## 2.5 Psykoakustiikkaa

Kuulon toiminnan tutkiminen perustuu sekä fysiologisiin mittauksiin ja kokeisiin että psykofyysisiin tutkimuksiin. Psykoakustiikka on nimenomaan jälkimmäiseen menetelmään perustuva tieteenhaara, joka tutkii kuulijan subjektiivisia vasteita eli aistimuksia objektiivisesti arvioitaviin ärsykkeisiin [14]. Psykoakustisissa kokeissa on tavoitteena tuottaa tunnettuja ja mitattavissa olevia äänitapahtumia ja rekisteröidä niitä vastaavat kuulotapahtumat. Näiden avulla voidaan määrittää koeasetelmassa käytettyjen ärsykkeiden ja kuulotapahtumien välinen kuvaus eli psykofyysinen funktio.

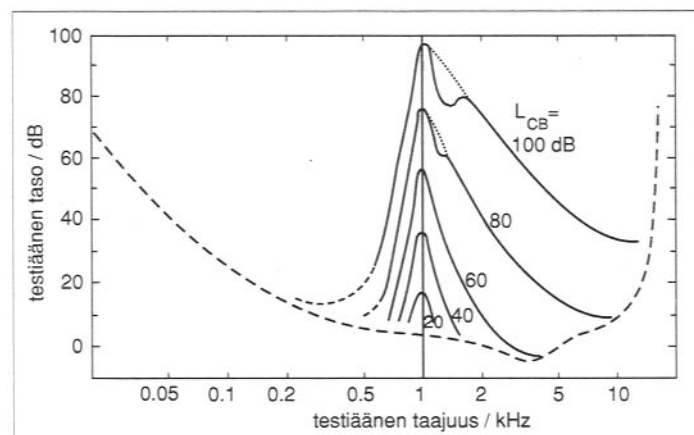
Psykoakustisten kokeiden perusteella on määritelty joukko käsitteitä. Yksinkertaisimpia tutkittavia käsitteitä ovat ns. kynnysarvot. Kynnysarvoja tutkimalla selvitetään, aiheuttaako äänitapahtuma halutunlaisen kuulotapahtuman. Erotuskynnyksiä on kahta päätyyppiä: absoluuttiset kynnysarvot ja erotuskynnysarvot. Absoluuttisen kynnysarvon tapauksessa tutkitaan, syntyykö kuulotapahtumaa. Erotuskynnykset tarkoittavat juuri havaittavissa olevaa muutosta vertailtavissa ärsykkeissä (just noticeable difference, JND). Psykoakustiikan keskeisimpiä käsitteitä ovat äänekkyyys, äänenkorkeus, äänenväri ja äänen subjektiivinen kesto. Näihin aistimuksiin vaikuttavat kaksi kuulolle ominaista ilmiötä: peittoilmiö ja kuulon taajuusselektiivisyys.

Peittoilmiö merkitsee heikomman äänen peittymistä osittain tai kokonaan voimakkaamman äänen läsnäollessa esimerkiksi melun estäessä puheen kuulumisen. Ilmiö esiintyy sekä aika- että taajuustasossa. Taajuustason peittoilmiö on havainnollisemmin esitetty kuvassa 4, jossa esiintyy tasaisen spektrin omaavan valkoisen kohinan aiheuttamia peittokuulokynnyskäyriä kohinan eri voimakkuustasoilla.



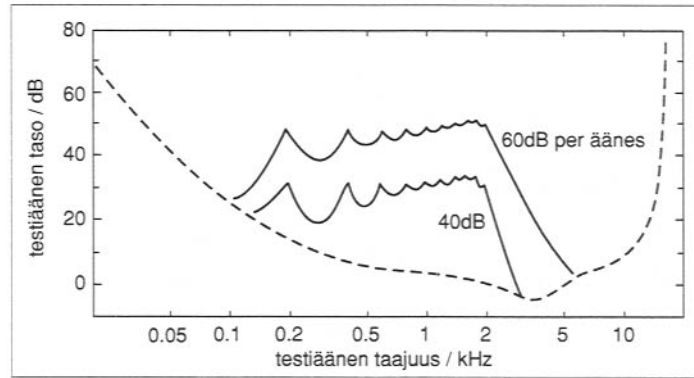
Kuva 4. Valkoisen kohinan aiheuttamia peittokuulokynnyskäyriä [14].

Testiäänenä on siniäänes. Kapeakaistaisen kohinan aiheuttamia peittokuulokynnyskäyriä on esitetty kuvassa 5. Katkoviiva kuvaa molemmissa kuvissa kuulokynnyskäyrää ilman peittävää ääntä.



Kuva 5. Kapeakaistaisen kohinan aiheuttamia peittokuulokynnyskäyriä [14].

Yhdistelmä-äänien aiheuttama peittovaikutus noudattaa samoja periaatteita kuin edellä mainitut kohinatapaukset. Kun peittoäänenä on siniäänes ja sen yhdeksän alinta yhtä voimakasta harmonista eli kerrannaistaajuutta, synnyttää kukin harmoninen oman peittovaikutuksensa, ja vaikutukset summautuvat. Kuvassa 6 on esitetty kyseisen tapauksen aiheuttama peittokuulokynnyskäyrä kahdella eri voimakkuustasolla.



Kuva 6. Yhdistelmä-äänen aiheuttamia peittokuulokynnyskäyriä [14].

## 2.6 Melun laatu

Melu, kuten edellä todettiin, on haitallista tai ei-toivottua ääntä. Akustisesti luokiteltuna melu on yleensä seosääntä eli kohinan ja äänesten kombinaatio. Melun fysikaalisten piirteiden määrittäminen ei välttämättä suoranaisesti johda käsitykseen siitä, millaisen aistimuksen melu aiheuttaa. Hyvänä esimerkkinä tästä on pelkän  $A$ -painotetun äänitason mittaaminen, yleisin virallinen melun arviointimenetelmä, joka on puhtaasti kvantitatiivinen eikä ota kantaa subjektiiviseen aistimukseen vaikuttaviin tekijöihin. Meluakustiikassa äänipaineen tehollisarvon tasosta käytetään nimitystä ekvivalenttitaso, joka määritellään

$$L_{eq} = 10 \lg \frac{1}{T} \int_T \frac{p^2(t)}{p_0^2} dt = 20 \lg \sqrt{\frac{1}{T} \int_T \frac{p^2(t)}{p_0^2} dt}, \quad (3)$$

missä  $T$  on melutapahtuman kesto,  $p(t)$  on mitattu äänipaine ajan funktiona ja  $p_0$  on referenssiäänipaine 20  $\mu\text{Pa}$ . Melutapahtuman kesto, normalisointiaika  $T$ , on eri tapauksissa erilainen. Työympäristömelun kuulovaurioriskiä arvioitaessa aika on 8 h, tieliikennemelua päiväsaikaan arvioitaessa 15 h ja yöaikaan arvioitaessa 9 h. Ekvivalenttitason määritelmään sisältyvä neliöön korotus korostaa keskimääräistä suurempia äänipaineita eli suurimmat hetkelliset äänitasot korostuvat [16]. Ekvivalenttitasoa käytetään arvioitaessa ympäristömelun häiritsevyyttä tai työmelun aiheuttamaa kuulovaurion vaaraa.

Aikarajoitettuja melutapahtumia, kuten raide- ja lentoliikennemelua, arvioidaan äänialtistustason avulla. Äänialtistustaso on eräänlainen meluannoksen mitta, ja se on

täsmälleen sama kuin melutapahtuman ekvivalenttitaso, jos tapahtuman kesto normalisoidaan yhden sekunnin kestoiseksi [16]. Äänialtistustaso määritellään

$$L_E = 10 \lg \frac{1}{t_0} \int_T \frac{p^2(t)}{p_0^2} dt = 20 \lg \sqrt{\frac{1}{t_0} \int_T \frac{p^2(t)}{p_0^2} dt}, \quad (4)$$

missä  $t_0$  on 1 s.

Tärkeimmät melun laatua kuvaavat ”suureet” ovat melun häiritsevyys ja ärsyttävyys. Ärsyttävyyden rinnakkaistermi on kiusallisuus. Häiritsevä melu on luonteeltaan sellaista, että se tarkastelutilanteessa häiritsee tai jopa estää jotakin toimintaa. Ärsyttävä tai kiusallinen melu puolestaan aiheuttaa negatiivisen tuntemuksen, joka ei välttämättä häiritse tai estä toimintaa [36]. Sama luokittelu on käytössä mm. valaistustekniikassa; valaistusasennuksia arvioitaessa käytetään termejä esto- ja kiusahäikäisy.

Melun häiritsevyyttä tutkitaan pääasiassa kuuntelukokein, ja koska kyseisissä kokeissa käytetyt koehenkilöt ovat useimmiten kokemattomia, käytetään koemenetelmänä A/B-parivertailua, jolloin melusignaalit saadaan asetettua jonkinlaiseen häiritsevyysjärjestykseen. Kokeiden tuloksia voidaan verrata ääninäytteistä laskettuihin tunnuslukuihin. Tunnusluvut voidaan jakaa akustisiin eli puhtaasti kvantitatiivisiin tunnuslukuihin ja psykoakustisiin tunnuslukuihin, jotka pyrkivät määrittelemään subjektiiviseen tuntemukseen vaikuttavia laatutekijöitä kuten äänekkyys, vaihteluvoimakkuus, terävyys, karheus, tonaalisuus ja impulsiivisuus [14,13]. Ääninäytteiden tunnusluvuista muodostetun mallin ja kuuntelukokeiden avulla voidaan määrittää häiritsevyysindeksi, joka pyrkii objektiivisesti tulkitsemaan melun häiritsevyyttä.

## 3 Raideliikenteen aiheuttama melu

Tässä kappaleessa käsitellään raideliikenteen synnyttämän melun luonnetta, sen syntymiseen vaikuttavia tekijöitä sekä mahdollisia meluntorjuntakeinoja. Raideliikenne on melunlähteenä hankala meluntorjunnan näkökulmasta. Äänitasot ovat hyvinkin korkeita radan läheisyydessä ohiajon aikana. Junaa voidaan pitää akustisena linjalähteenä, jonka säteilykuvio on sylinterimäinen, joten tällaisen lähteen synnyttämä ääni vaimenee teoreettisesti vain 3 dB etäisyyden kaksinkertaistuessa. Varsinkin raideliikenteen aiheuttaman matalataajuisen melun vaikutusalue on siis hyvinkin suuri. Ilmaäänien lisäksi raideliikenne aiheuttaa tärinää, joka välittyy maaperän kautta rakennuksiin. Tärinän välittyminen maaperän ja rakennuksien rakenteiden kautta synnyttää usein ns. sekundäärisiä melunlähteitä. Kaarteisten rataosuuksien tuntumassa on havaittavissa melun fokusoitumista, ts. raiteen kaarevuussädetä vastaavan ympyrän keskipisteeseen muodostuu lokaali äänitason maksimi.

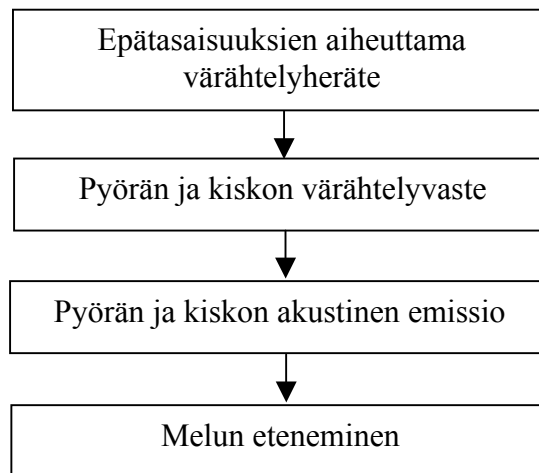
Raideliikenteen kaluston aiheuttama melu koostuu monen yksittäisen lähteen synnyttämästä melusta. Yksittäisen junan tapauksessa lähteiden vaikutus kokonaismeluun riippuu mm. junan nopeudesta. Pääasiallinen lähde on kuitenkin lähes kaikilla nopeuksilla rataiskun ja junan pyörien kontakti (kulkumelu, rolling noise). Alhaisilla nopeuksilla ( $v < 50$  km/h) merkittävän osan raideliikenteen melusta aiheuttavat junien moottorit, tuulettimet ym. pyörivät laitteet. Hyvin suurilla nopeuksilla ( $v > 250$  km/h) dominoivana melunlähteenä ovat junan ilmanvastuksesta aiheutuneet turbulenttiset ilmavirtaukset. Aerodynaaminen melu ei kuitenkaan vielä ole Suomen rataosuuksilla liikennöivällä kalustolla merkittävää.

### 3.1 Raideliikennemelun lähteet

#### *3.1.1 Kisko ja pyörä*

Raidemelun pääasiallinen komponentti on kaikilla juna- ja kiskotyypeillä junan pyörien ja kiskon välisen kontaktin aiheuttama melu. Melun voimakkuuteen vaikuttavat sekä kiskon että pyörän kosketuspinnan tasaisuus, ja luonnollisesti myös junan nopeus. Kokonaismelu raiteen läheisyydessä on kahden komponentin, kiskon ja pyörän

meluemission, summa. Yleisesti ei voida tarkasti määritellä, kumpi komponentti dominoi kokonaismelua, mutta pyörän meluemissio noudattaa selkeää trendiä: mitä suurempi pyörän halkaisija ja junan nopeus sitä suurempi meluemissio. Mikäli junan pyörien ja/tai kiskon epätasaisuus on suurta, on myös melu vastaavasti suurempi. Kontaktin aiheuttama melu voidaan karkeasti jaotella kuvan 7 mukaisesti neljään vaiheeseen [7].



*Kuva 7. Kontaktimelun syntyvaiheet.*

Suorilla rataosuuksilla korrugaatio on yleisin aaltomuodostuma. Korrugaatiolle on luonteenomaista melkein säännöllinen muodostelma kiiltäviä korkeampia kohtia ja tummia matalampia kohtia kiskojen pinnassa. Kulkumelun synnyn kannalta oleelliset korrugaation aallonpituudet ovat välillä 10 mm – 300 mm ja amplitudi välillä 0,1 µm – 30 µm [26]. Korrugaation kehittyessä kiskon pintaan äänitaso junan ohiajojen aikana kasvaa vähitellen ja kiskon aiheuttama ääni muuttuu viheltäväksi. Äänitaso kasvaa melko kapealla taajuusalueella, joka on verrannollinen korrugaation aallonpituuteen ja junan nopeuteen yhtälön 5 mukaisesti; useimmiten kyseinen taajuusalue sijaitsee välillä 100 Hz – 5 kHz, ja voimakkaimmillaan korrugaation aiheuttama melu on taajuusalueella 500 Hz – 2,5 kHz.

$$f = \frac{v}{\lambda} \quad (5)$$

Nopeudella 40 m/s (n. 144 km/h) taajuusalue 100 Hz – 5 kHz vastaa korrugaation aallonpituuksia 400 mm – 8 mm.

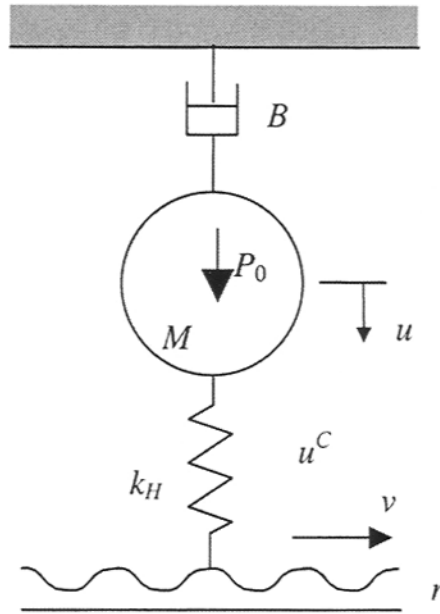
Kontaktipintojen epätasaisuuksien, jotka ilmoitetaan joko mikrometreinä tai epätasaisuustasona (dB re 1  $\mu$ m) ja raideliikennemelun äänitason välinen riippuvuus oletetaan teoreettisissa malleissa lineaariseksi. Lineaarisuus pätee tosin vain yksittäisellä herätetaajuudella, eikä samaa oletusta voida tehdä laajakaistaisella herätteellä. Kun tarkoituksena on verrata epätasaisuustason aiheuttamaa A-äänitasoa, täytyy epätasaisuuden olla määritelty laajalta alueelta ja niin, että se vastaa A-painotusta.

Junan pyörän ja kiskon välisen kontaktipinnan ominaisuuksilla on vaikutusta kulkumelun syntyyn. Kontaktipinnan dimensiot riippuvat pyörän säteestä ja kuormitusvoimasta sekä kiskon ja pyörän poikkileikkauksen kaarevuussäteestä, ja pinnan muoto on yleensä ellipsi.

Äärellisestä kontaktijäykkyydestä (Hertzin kontaktijousi) johtuva paikallinen elastinen deformaatio absorboi korkeataajuisia värähtelyä. Kontaktipinnan pituus on tyypillisesti n. 10 mm kiskon pituussuunnassa, ja sitä pienempien epätasaisuusaallonpituuksien aiheuttama värähtelyheräte on oleellisesti pienempi kuin kontaktipinnan dimensioita suurempien aallonpituuksien aiheuttama heräte. Kontaktipinnan pituus on myös kiskon poikittaissuunnassa n. 10 mm, ja kiskon profiilin epätasaisuus keskiarvoistuu kontaktipinnan leveyden matkalla. Vaihtelut kiskon kaksikulotteisessa pintaprofiilissa voivat aiheuttaa kontaktipinnan sivusuuntaista ”vaeltamista”, vaikka pyörän ja kiskon välillä ei esiintyisikään sivusuuntaista liikettä. Junan kiskoon kohdistama kuormitus kohdistuu kontaktipinnalle, ja pinnan vaeltaminen nimellisen kontaktipinnan sijainnin ympärillä saattaa aiheuttaa värähtelyä ja siten myös melua.

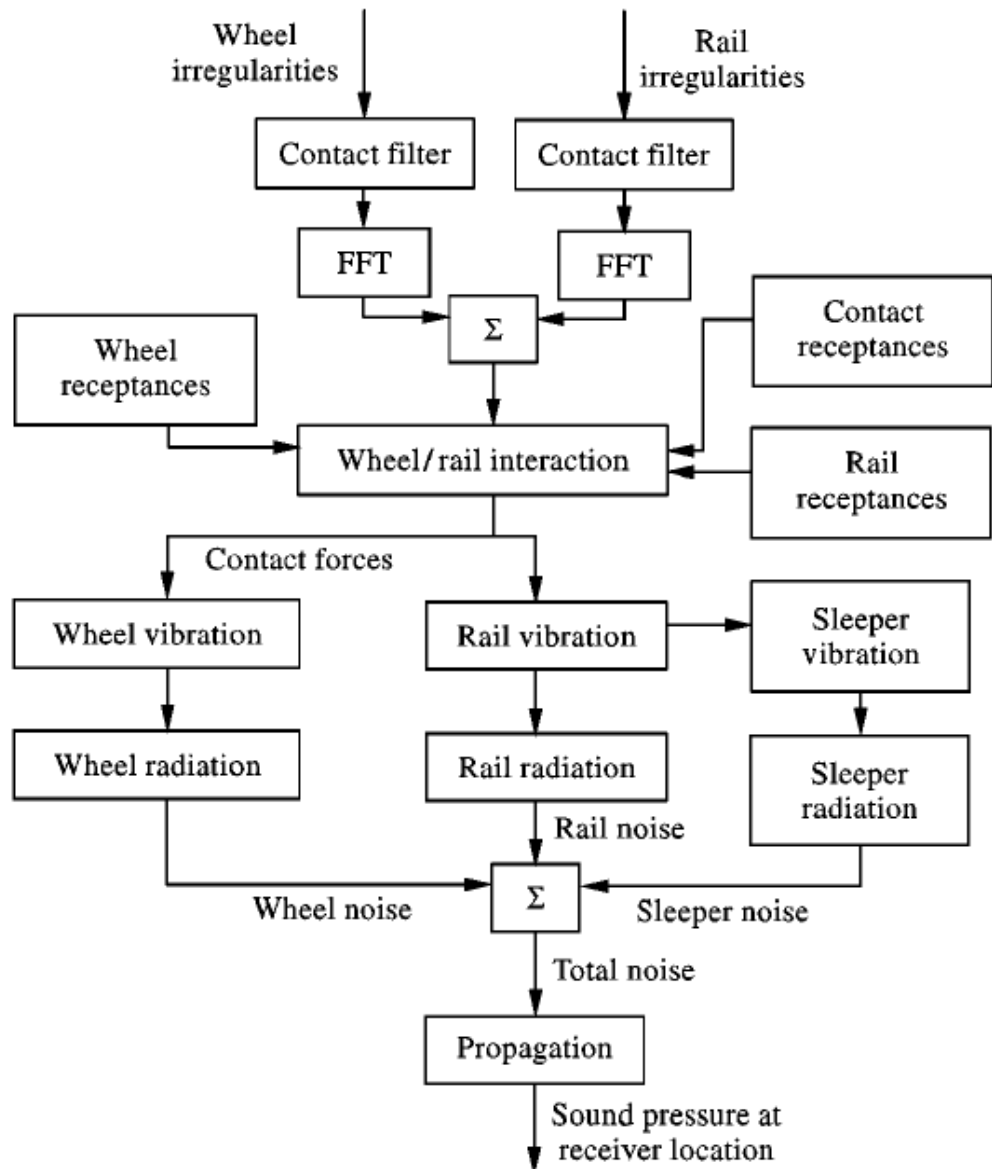
Kontaktipinnan dimensioista aiheutuvaa suodatusilmiötä voidaan mallintaa joko johtamalla kontaktisuotimelle analyttinen siirtofunktio [22] tai numeerisella DPRS-mallilla (distributed point reacting spring) [23]. DPRS-mallin perustana on kontaktialueen approksimaatio joukolla epälineaarisia pistereaktiivisia jousia, joiden jäykkyyskäyttäytyminen määritellään taipuman neliöjuureen verrannollisen voiman avulla. Sekä pyörä että kisko oletetaan jäykiksi kappaleiksi. Approksimaatiota on paranneltu tutkimuksessa [28] korvaamalla täysin jäykkä pyörä massalla ja vaimentimella kuvan 8 mukaisesti.





Kuva 8. Kontaktialueen DPRS-malli [28].

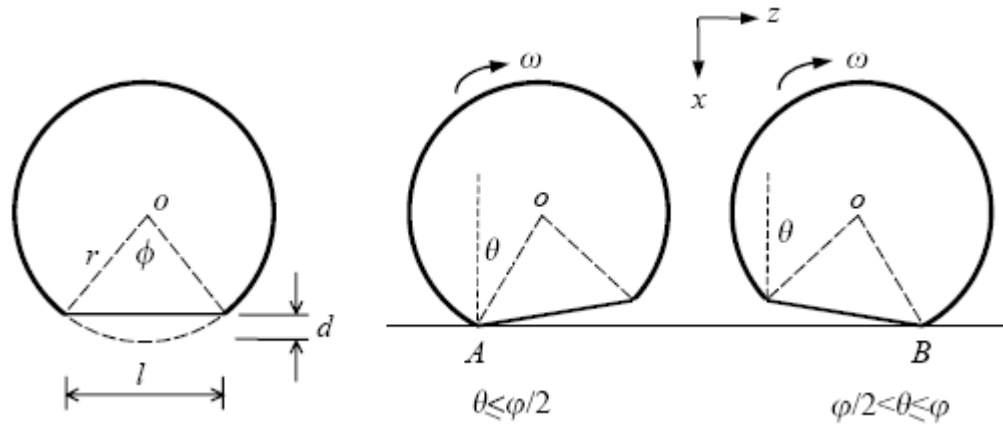
Kun käytetään kiskon ja pyörien epätasaisuuden mittauksia melun laskennallisessa ennustamisessa, tulee ottaa huomioon, että kiskon pinnanmittauksessa käytetyt mittapääat seuraavat pieniä epätasaisuuksia huomattavasti tarkemmin kuin junan pyörä. Mittapään kaarevuuden tulisi olla samaa luokkaa kuin junan pyörän kehän kaarevuus, jotta välttyttäisiin virheellisiltä melulaskelmilta. Koska useimmat mittapääat ovat kuitenkin kooltaan pienehköjä, tulee epätasaisuusmittauksia suodattaa niin, että tulokset vastaavat junan pyörän ”näkemää” epätasaisuutta. Raideliikennemelun mallintamiseen tarkoitetun TWINS-ohjelmiston [25,27] mallinnusprosessi mukaan lukien mittaustuloksien hyödyntäminen on esitetty kuvassa 9. Sekä pyörien että kiskon pintojen epätasaisuudet suodatetaan ensin kontaktipinnan dimensioiden määräämällä suotimella. Mallinnusprosessi tehdään taajuustasossa, joten suodatetuille epätasaisuussignaaleille suoritetaan nopea Fourier-muunnos (FFT), jonka jälkeen ne summataan. Pyörän, kiskon ja kontaktipinnan ominaisuuksista johdetaan pyörään ja kiskoon kohdistuvat kontaktivoimat, joiden avulla voidaan määrittää pyörän, kiskon ja ratapölkyn värähtely ja kunkin säteilemä ääniteho. Kokonaismelu on luonnollisesti osatekijöiden summa, ja kun kokonaismeluun lisätään vielä äänen etenemiseen vaikuttavat tekijät, voidaan laskennallisesti määrittää raideliikennemelun aiheuttama äänitaso halutussa havaintopisteessä.



Kuva 9. TWINS –ohjelmiston mallinnusprosessi [25].

Kiskojen jatkokohdissa saattaa esiintyä myös iskumelua, mikäli kiskojen päiden välinen etäisyys ja/tai korkeusero on merkittävä. Kiskojen päiden välinen etäisyys jatkokohdissa on tyypillisesti suuruusluokkaa 5 – 20 mm ja päiden välinen korkeusero puolestaan 0 – 2 mm. Kiskojen päät ovat myös yleensä taipuneet alaspäin jatkokohdan molemmin puolin, ja taipuma saattaa olla useita millimetrejä. Jopa ns. jatkuvalla kiskolla eli kiskoilla, joiden jatkokohdat on hitsattu yhteen, esiintyy tällaista taipumaa ja siten myös iskumelua. Jatkokohdat voivat saada aikaan hyvinkin suuria impulssimaisia voimia pyörän ja kiskon välillä [35].

Iskumelua saattavat aiheuttaa myös nk. lovipyörät (wheel flats). Lovipyöräksi luokitellaan sellaiset pyörät, joihin on syntynyt lukkojarrutuksen aikaansaama tasainen kohta (lovi). Lovet ovat yleensä n. 50 mm pitkiä, mutta ääritapauksissa pituus voi olla jopa yli 100 mm [34]. Kuvassa 10 on esitetty ideaalisen lovipyörän pyörimisliike loven kohdalla.

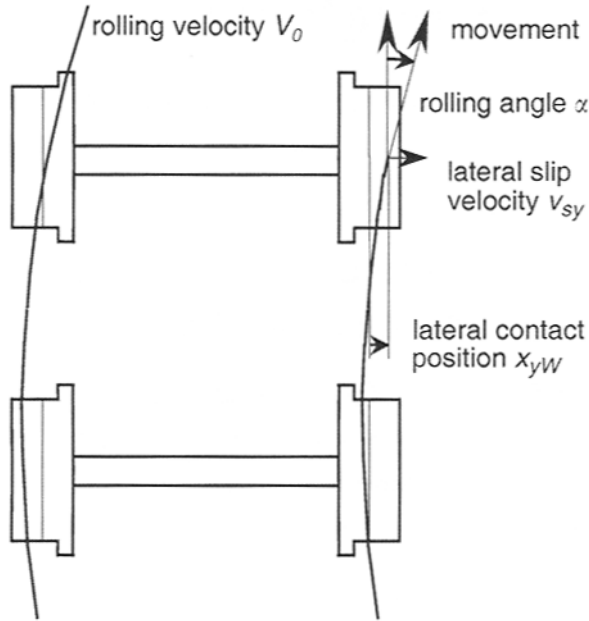


Kuva 10. Lovipyörän pyörimisliike [34].

Pyörän pyöriessä pisteen  $A$  yli on seuraavana kontaktipisteenä piste  $B$ , joka kiskoon osuessaan aiheuttaa hyvin voimakkaan impulssimaisen herätteen kiskoon. Lovipyöriä esiintyy kaikilla kalustotyypeillä, mutta yleisin tästä ongelmasta kärsivä kalustotyyppi on tavaraliikennevaunut, joiden jarrut ovat huonokuntoiset tai huonosti säädetty.

### 3.1.2 Kaarremelu

Kaarteisella rataosuudella esiintyvä raidemelu koostuu normaalista suoralla rataosuudella esiintyvistä kiskon ja pyörän välisen interaktion aiheuttamasta melusta sekä kaarrekirskunnasta. Kaarrekirskunnan aiheuttajamekanismeja on useita, jotka kaikki liittyvät kuitenkin kiskon ja pyörän väliseen interaktioon. Kaarteissa joidenkin pyörien laipat hankaavat kiskoa, ja muut pyörät luisuvat kiskon päällä johtuen pyörän orientaation ja sisemmän raiteen tangentin välisen kulman erosta. Kaaviokuva syntymekanismeista on esitetty kuvassa 11. Yleensä luisuminen on voimakkainta nelipyöräisen telin etummaisella sisäkaarten puoleisella pyörällä [2].



Kuva 11. Kaarremelun syntymekanismit [2].

Pyörän sivusuuntainen luisuminen kiskon päällä saa pyörän värähtelemään hyvin voimakkaasti ja siten myös emittoimaan hyvin voimakasta ääntä. Tutkimuksessa [2] on määritetty kontaktimekaniikan ja –dynamiikan sekä pyörän ja kiskon dynamiikan avulla taajuusalueen malli kaarremelulle.

Luisuma  $s$  määritellään sivusuuntaisen nopeuden  $v_{sy}$  ja kulkunopeuden  $v_0$  suhteena yhtälön 6 mukaisesti. Luisuma voidaan ilmoittaa myös vierimissuunnan ja kiskon tangentiaalivektorin välisen kulman avulla.

$$s = \frac{v_{sy}}{v_0} = \tan(\alpha) \quad (6)$$

Luisuma aiheuttaa sivusuuntaisen kitkavoiman, joka on normaalin suuntaisen voiman ja kitkakertoimen tulo. Staattisen luisumakitkakertoimen määrittäminen [8] on esitetty yhtälössä 7. Kitkakertoimeen vaikuttavat pyörän ja kiskon materiaalien leikkauslujuudet  $\tau_w$  ja  $\tau_R$ , normaalivoima  $F_0$  ja Hertzin ellipsin muotoisen kontaktipinnan puoliakselien pituudet  $a$  (vierimissuunta) ja  $b$  (poikittaissuunta).

$$\mu_0 = \frac{\tau_R \tau_w}{\tau_R + \tau_w} \frac{\pi ab}{F_0} \quad (7)$$

Luisuma itsessään vaikuttaa kitkakertoimeen  $\mu(s)$ , joten staattisen kertoimen  $\mu_0$  lisäksi resultanttikertoimen määrittämisessä on tehtävä yhtälöiden 8 ja 9 mukaisesti. Yhtälössä 8 esiintyvä apumuuttuja  $s'$  on määritelty yhtälössä 10. Yhtälö 8 pätee, kun apumuuttuja  $s' \leq 3$  ja vastaavasti yhtälö 9 pätee tilanteissa, joissa  $s' > 3$ .

$$\mu(s) = -\mu_0 \left( s' - \frac{1}{3} s'^2 + \frac{1}{27} s'^3 \right) \left( 1 - 0,5 \cdot e^{\frac{-0,138}{|sv_0|}} - 0,5 \cdot e^{\frac{-6,9}{|sv_0|}} \right) \quad (8)$$

$$\mu(s) = -\mu_0 \left( 1 - 0,5 \cdot e^{\frac{-0,138}{|sv_0|}} - 0,5 e^{\frac{-6,9}{|sv_0|}} \right) \quad (9)$$

$$s' = \frac{sGabC_{22}}{\mu_0 F_0} \quad (10)$$

Apumuuttujan  $s'$  lausekkeessa esiintyvä termi  $G$  on teräksen leikkausmoduuli ja termi  $C_{22}$  on nk. Kalkarin vakio, joka riippuu kontaktialueen geometriasta. Kaarremelun esiintymisen aikana pysty- ja vaakasuuntaiset kontaktivoimat sekä vaakasuuntainen luisuminen koostuvat vakiokomponentista ja aikariippuvasta komponentista yhtälön 11 mukaisesti.

$$F_0 \mu(s_0) + f_y(t) = (F_0 + f_x(t)) \mu \left( s_0 + \frac{v_{sy}(t)}{v_0} \right) \quad (11)$$

Yhtälössä 11 esiintyvillä termeillä  $f_y(t)$  ja  $f_x(t)$  merkitään pysty- ja vaakasuuntaisia kontaktivoimia. Kaarremelun syntyvaiheessa värähtelyamplitudi on vielä niin pieni, että epälineaarinen kitkakerroin  $\mu(s)$  voidaan linearisoida. Linearisoitu tasapainoyhtälö noudattaa yhtälön 12 muotoa.

$$F_0 \mu(s_0) + f_y(t) \approx F_0 \mu(s_0) + f_x(t) \mu(s_0) + \frac{F_0}{v_0} \frac{\partial \mu(s_0)}{\partial s} v_{sy}(t) \quad (12)$$

Aikariippuva osa yhtälöstä 12 Fourier-muunnetaan, jolloin saadaan lausuttua sivusuuntainen voima pystysuuntaisen voiman, luisuman ja kitkakertoimen mukaisesti. Taajuusalueen tasapainoyhtälö on esitetty yhtälössä 13.

$$F_y(\omega) = F_x(\omega)\mu(s_0) + \frac{F_0}{v_0} \frac{\partial \mu(s_0)}{\partial s} V_{sy}(\omega) \quad (13)$$

### 3.1.3 Aerodynaaminen melu

Suurilla nopeuksilla raideliikennemelua alkaa dominoida junan ilmanvastuksesta johtuvien turbulenttisten ilmavirtauksien aiheuttama melu. Tämä aerodynaaminen melu alkaa tosin olla huomattavaa vasta yli 300 km/h nopeuksilla, mutta nopea junaliikenne yleistyy jatkuvasti, joten junan aerodynamiikkaa voidaan pitää merkittävänä melulähteenä ja meluntorjunnan kannalta oleellisena kohteena. Aerodynaaminen melu on pyrittävä torjumaan ehkäisemällä sen synty, koska suurin osa lähteistä on hyvin korkealla, ja meluesteet eivät rajallisen korkeutensa takia välttämättä pysty vaimentamaan lähteiden aiheuttamaa melua.

Normaalin pyörän ja kiskon kontaktin aiheuttaman mekaanisen kulkumelun ja aerodynaamisen melun vaikutussuhteet vaihtuvat tietyllä kynnysnopeudella  $v_t$ . Modernit vaimennustoimenpiteet ovat johtaneet mekaanisen kulkumelun vaikutuksen pienenemiseen ja täten myös kynnysnopeuden alenemiseen. Esimerkkinä magneettiseen levitaatioon perustuvalla Maglev-kalustolla kynnysnopeus on vain 225 km/h [24].

Junan kulkiessa sen ympärille kehittyy monimutkaisia turbulenttisia ilmavirtauksia, jotka törmäilevät junan rakenteisiin (virroittimet, telit). Turbulenttiset ilmavirtaukset ovat jo itsessään äänilähde, ja lisäksi ilmavirtaukset voivat saada aikaan junan pintojen värähtelyä ja siten myös ääntä. Aerodynaamisen melun lähteiden määrittäminen on hankalaa, koska lähteet ovat samaa väliainetta kuin missä ääni etenee. Ei ole siis helppoa erotella aerodynaamisen painevaihtelun lähdealuetta ja akustisen painevaihtelun eli äänen etenemisen aluetta.

Raideliikennemelun lähteitä voidaan pyrkiä paikantamaan mittaamalla ohiajoja mikrofoni-ryhmällä. Turbulenttisia ilmavirtauksia voidaan puolestaan analysoida laser-Doppler-nopeusmittausmenetelmällä. Näillä menetelmillä on määritelty useissa eri

tutkimuksissa nopeiden junien oleelliset aerodynaamiset melun lähteet (virroitin ja sen ympäristö, vaunujen välit, telit, veturin keula, peräveturin perä, tuulettimet ja niiden säleiköt).

Junan katolla olevien laitteistojen kuten virroitin aiheuttama aerodynaaminen melu on peräisin rakenteiden ohi kulkevan ilmamassan pyörrevirtauksista. Pyörteisen virtauksen erkaneminen kapean kappaleen pinnalta aiheuttaa ympäröivän ilmamassan periodisen värähtelyn, jota voidaan kuvata yhtälön 14 mukaisella ns. Strouhalin luvulla:

$$St_l = \frac{fl}{U_0} \quad (14)$$

Yhtälössä 14  $f$  on värähtelyn taajuus,  $l$  on kappaleen karakteristinen pituus ja  $U_0$  on virtausnopeus. Kyseinen ilmiö syntyy, kun Reynoldsin luku on likimain  $3 \times 10^5$ . Reynoldsin luvun määritelmä tässä tapauksessa on esitetty yhtälössä 15.

$$Re = \frac{U_0 l}{\nu} \quad (15)$$

Yhtälössä 15 esiintyvä  $\nu$  on väliaineen viskositeetti. Reynoldsin luvulla kuvataan virtausnopeutta, jolla väliaineen laminaarinen virtaus muuttuu turbulentiksi virtaukseksi.

Veturin ja vaunujen katteissa sekä tuulettimien säleiköissä esiintyvät onkalomaiset muodostelmat yhdessä vaunujen välien kanssa muodostavat yhteisen melunlähderyhmän. Onkalon ohi virtaava ilmamassa voi saada aikaan erilaisia ilmiöitä riippuen onkalon mittasuhteista.

### 3.1.4 Ratapölkkyt

Raideliikennemelun dominoiva tekijä on pyörän ja kiskon välinen interaktio. Kontaktivoimat kuitenkin välittyvät kiskon ja välilevyn kautta myös ratapölkkyyn, joka säteilee ääntä pienillä taajuuksilla ( $< 500$  Hz). Vaikka pölkyn säteily voi olla huomattavaakin, sen vaikutus ohiajon aikaiseen A-äänitasoon on pieni [20]. Pölkyn emissiota voidaan pyrkiä vähentämään pienentämällä sen säteilypinta-alaa ja

ehkäisemään kiskosta pölkkyyn johtuvaa värähtelyä pehmeillä välilevyillä. Toisaalta hyvin jäykät välilevyt pienentävät kiskon säteilyä, joka yleensä keskittyy korkeammille taajuuksille ja siten vaikuttaa myös voimakkaammin A-äänitasoon.

Suurimmaksi osaksi käytöstä poistuneet puiset ratapölkkyt saattavat säteillä jopa merkittävästi, mikäli kisko on kiinnitetty suoraan pölkkyihin.

## 3.2 Raideliikennemelun torjuminen

Tässä osiossa käsitellään erilaisia menetelmiä raideliikennemelun torjumiseksi. Menetelmien yhteydessä on pyritty huomioimaan Suomen rataverkoston ja kaluston sekä lainsäädännön puitteissa toteutuskelpoiset menetelmät. Viitattaessa äänitasoihin ja meluun on kyse A-painotetuista äänitasoista, mikäli ei toisin mainita.

### 3.2.1 Meluesteet

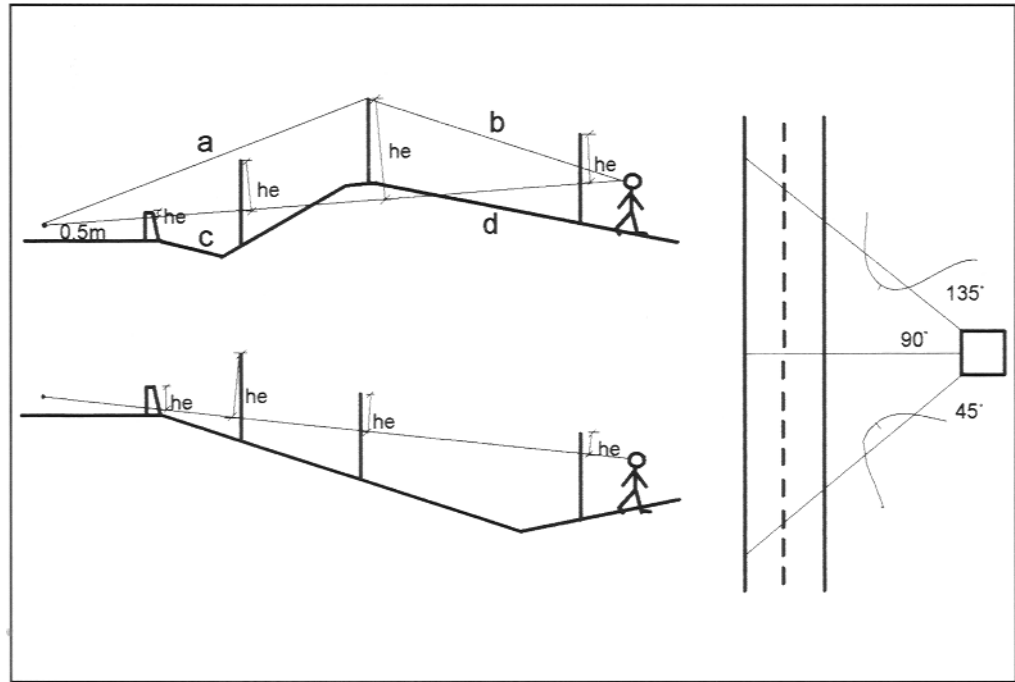
Meluesteet ovat yksi tehokkaimmista liikennemelun vaimennuskeinoista. Tieliikenteessä kevytrakenteiset meluesteet ja rampeihin integroidut maavalliesteet ovat hyvinkin yleisiä. Meluesteet useimmiten suunnitellaan liikenneväylän suunnittelutyön yhteydessä, ja rakennus toteutetaan myös samanaikaisesti. Suurempien meluvallien rakentaminen jälkikäteen on usein hankalaa vallin suuren tilantarpeen vuoksi. Kevyempirakenteisia meluseiniä voidaan toki helposti asentaa jälkikäteenkin. Meluesteiden massiivisuuden vuoksi suunnitteluvaiheessa tulee ottaa esteen akustisten ominaisuuksien lisäksi huomioon myös esteen ulkonäkö ja maisemointi.

Melueste on erään määritelmän [31] mukaan liikenneväylän ja läheisen asuinalueen välissä oleva merkittävän pituinen ja korkuinen kappale, joka ei ulotu liikenneväylän keskilinjan yli, ja jonka tarkoituksena on alentaa liikenneväylän aiheuttamaa melutasoa asuinalueella.

Meluesteen dimensioiden ja materiaalin lisäksi sen sijainti liikenneväylään ja tarkastelupisteeseen nähden vaikuttaa oleellisesti esteen vaimennuskykyyn. Meluesteen sijainnin vaikutusta vaimennukseen voidaan arvioida joko laskentamallien avulla tai karkeammin määrittelemällä esteen efektiivinen korkeus  $h_e$  [18]. Esteen efektiivinen korkeus lasketaan äänilähteen ja tarkasteltavan pisteen välisen suoran avulla. Tarkempi metodi esteen sijainnin vaikutuksen laskemiseen on matkaeron  $(a+b) - (c+d)$



laskeminen. Molempien metodien periaatteet ovat esitetty kuvassa 12. Äänilähde raideliikenteen tapauksessa on n. 0,2 m korkeudella ratapohjan tasosta, ja tarkastelupiste on sekä tie- että raideliikennemelua arvioitaessa yleensä joko 2 m maanpinnasta tai asuintalon ylimmän kerroksen ikkunan tasalla.



Kuva 12. Meluesteen efektiivisen korkeuden määrittäminen [18].

Meluesteille, kuten mille tahansa muullekin rakennelmalle, asetetaan luonnollisesti laatuvaatimuksia, jotka voidaan jaotella kahteen luokkaan: akustisiin laatuvaatimuksiin ja rakenteellisiin laatuvaatimuksiin. Akustiset laatuvaatimukset määrittelevät meluesteen luokituksen kahden ominaisuuden, eristävyys ja absorption, suhteen.

Meluesteen eristävyttä kuvataan eristävyysluvulla  $DI_R$ , jonka määrittäminen laboratorio-olosuhteissa on standardoitu [5]. Eristävyyden laskennassa käytettävän melun spektri on myöskin standardoitu [6]. Spektri jäljittelee tyypillistä liikenteen aiheuttamaa melua taajama-alueen läheisyydessä. Standardi [5] jakaa meluesteet eristävyys mukaan kolmeen luokkaan; luokkajako on esitetty taulukossa 3.

*Taulukko 3. Standardin [5] eristävyysluokitukset.*

| <b>Luokitus</b> | <b>Eristävyys</b> |
|-----------------|-------------------|
| B1              | > 5 dB            |
| B2              | > 15 dB           |
| B3              | > 25 dB           |

Eristävyysluokituksen yhteydessä voidaan määritellä sallittu eristävyysaleneva tietyn ajan kuluessa. Tavallisimmin eristyslukuvaatimus on suuruusluokkaa 25 dB uutena, ja aikariippuvaksi alenemaksi sallitaan 0 – 5 dB.

Melusteille määritellään luokitus myös absorption suhteen. Aitamaiset ja kovat melusteet heijastavat melua takaisin sen tulosuuntaan, mutta huokoisella materiaalilla päällystetyt melusteet absorboivat osan melusta. Melusteiden absorptioluku  $Dl_{\alpha}$  määritetään laboratorio-olosuhteissa (kaiuntahuoneessa) standardin [4] mukaisesti, ja esteet jaotellaan absorptioluvun perusteella taulukon 4 mukaisesti.

*Taulukko 4. Standardin [4] absorptioluokitukset.*

| <b>Luokitus</b> | <b>Absorptio</b> |
|-----------------|------------------|
| A0              | ei testattu      |
| A1              | 1 – 3 dB         |
| A2              | 4 – 7 dB         |
| A3              | 8 – 11 dB        |
| A4              | $\geq 12$ dB     |

Tavanomaisin absorboiva rakenne on jonkinlaisella suojaavalla verkko- tai reikälevyrakenteella suojattu raskas lasi- tai vuorivillakerros. Tällaisilla rakenteilla absorptioluokitus on useimmiten A3 tai A4. Huokoisella betonilla, kevytbetonilla ja vastaavilla materiaaleilla saavutetaan A2- tai A3-luokitus. Huono säänkestävyys on huokoisten materiaalien heikoin ominaisuus, ja toisaalta paksun ja säänkestävän pinnoituksen lisääminen vähentää absorptiota.

Meluesteen absorptio ja eristävyys ovat esteen rakenteen ja materiaalien ominaisuuksia, ja nämä tunnusluvut eivät ota kantaa meluesteen lopulliseen vaimennuskykyyn asennuskohteessa. Esteen dimensiot ja maastoprofiili vaikuttavat vaimennuskykyyn voimakkaasti.

Meluesteiden soveltaminen raideliikennemelun vaimentamisessa ei ole yhtä mutkatonta kuin tieliikenteen aiheuttaman melun vaimentamisessa. Raiteen keskilinjän molemmin puolin on määritelty turvaetäisyys, jonka sisäpuolelle ei saa sijoittaa pysyviä rakennelmia. Suomessa turvaetäisyyttä kutsutaan ratateknisellä termillä aukean tilan ulottuvuus (ATU), joka on raiteen keskilinjasta mitattuna 2900 mm molemmin puolin raidetta [12]. Turvaetäisyys vaihtelee muualla Euroopassa välillä 2500 m – 4750 mm kalustosta ja kulkunopeudesta riippuen [31]. Meluesteen korkeus on myös rajoitettu, koska huoltohenkilökunnalla on oltava näköyhteys raiteelle.

### *3.2.2 Kiskojen hionta ja pyörien sorvaaminen*

Juuri hiotun kiskon ja sorvatun pyörän välisen kontaktin aiheuttama äänitaso voi olla jopa 10 – 20 dB alhaisempi kuin hyvin huonokuntoisien pyörien ja kiskon tapauksessa [30]. Kiskon hionnassa pyritään tasoittamaan lyhytaaltainen korrugaatio, joka aiheuttaa suurimman osan kontaktimelusta. Hionta on kuitenkin melko kallis toimenpide, ja siitä saatava melunvaimennushyöty ei välttämättä ole merkittävä, mikäli rataosuuden kiskon epätasaisuus on pientä kaluston pyörien epätasaisuuteen nähden [3].

Pyörän kulutuspinnan tasaisuuteen vaikuttaa oleellisesti junavaunuissa käytössä olevien jarrujen tyyppi. Anturajarrut, joiden toiminta perustuu kitkaan valurautaisen jarrupalan ja pyörän kulutuspinnan välillä, kuluttavat pyörää merkittävästi. Kuluminen on myös hyvin epätasaista, ja epätasaisuuden kasvaminen aiheuttaa kulkumelun voimistumista. Pyörien kulumista voidaan hidastaa joko korvaamalla valurautaiset jarrupalat jonkinlaisella komposiittimateriaalilla tai asentamalla toisella toimintaperiaatteella toimivat jarrut. Levyjarruilla varustetun raideliikennekaluston aiheuttaman äänitason on käytännössä todettu olevan 5 – 10 dB alhaisempi verrattuna anturajarruilla varustetun kaluston aiheuttamaan meluun [30].

### *3.2.3 Telien peittäminen*

Junan pyörien ja osittain myös kiskon meluemissiota voidaan pyrkiä vähentämään asentamalla vaunujen kylkiin telien kohdalle absorboivalla materiaalilla vuoratut katerakenteet. Tällaisia rakenteita on tutkittu mm. METARAIL-projektin Round Robin Test –osion yhteydessä [32]. Projektin alkuperäisenä tarkoituksena oli tehdä

tyyppitestausta melun suhteen erilaisilla vaunutyypeillä, ja telikatteilla varustettu vaunutyyppi oli konttien kuljetukseen tarkoitettu levyjarruilla varustettu vaunu, joka on esitetty kuvassa 13.



*Kuva 13. METARAIL –projektin yhteydessä tutkitut telikatteet.*

Round Robin –testin vaunutyyppit on kerätty taulukkoon 5. Sgs-vaunuihin oli asennettu telisuojuukset vain toiselle puolelle vaunua. Testissä havaittiin Faccs-vaunujen aiheuttavan suurimman äänitason. Kovametallianturajarruilla varustettujen Sgjss- ja Rkqss-vaunujen aiheuttama äänitaso oli n. 6 – 8 dB alhaisempi verrattuna Faccs-vaunujen äänitasoon, ja selkeästi hiljaisin vaunutyyppi oli levyjarruilla ja telikatteilla varustettu Sgs, jonka aiheuttama äänitaso oli n. 10 – 12 dB alhaisempi verrattuna Faccs-vaunujen äänitasoon. Vaihtelut lukemissa aiheutuvat koemittauspaikoista; mittauksia tehtiin Itävallassa, Ranskassa, Hollannissa ja Italiassa. Sgs –vaunujen telikatteiden havaittiin vaimentavan ohiajon äänitasoa 4 – 7 dB.

*Taulukko 5. Round Robin –testin vaunutyyppit.*

| <b>Vaunutyyppi</b> | <b>Tunnus</b> | <b>Maksiminopeus</b> | <b>Jarrut</b>     |
|--------------------|---------------|----------------------|-------------------|
| ÖBB Hopper         | Faccs         | 100 km/h             | Valurauta-antura  |
| ÖBB Flat           | Sgjss         | 100 km/h             | Kovametalliantura |
| ÖBB Flat           | Rkqss         | 140 km/h             | Kovametalliantura |
| DB Container       | Sgs           | 140 km/h             | Levyjarrut        |

### *3.2.4 Pyörän ja kiskon säteilyn vaimentaminen*

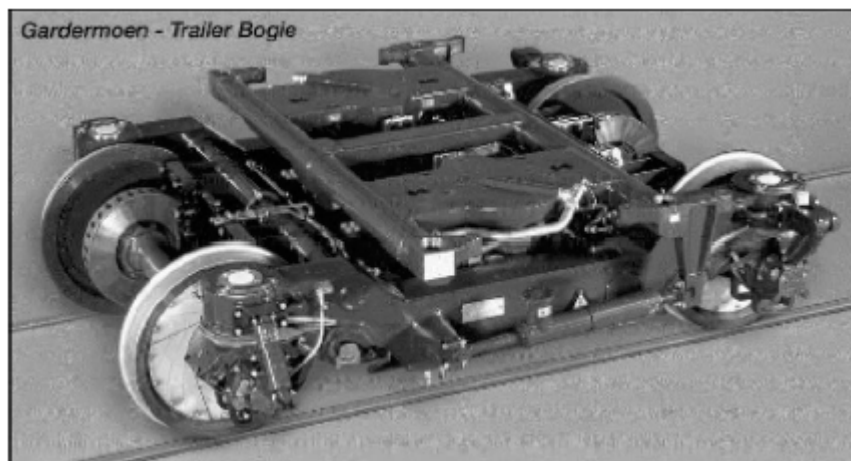
Melu radan läheisyydessä on sekä pyörän että kiskon emittoiman äänen summa. Näiden kahden komponentin erillinen vaikutus kokonaismeluun on tunnettava, mikäli halutaan arvioida jompaankumpaan komponenttiin kohdistuvan vaimennustoimenpiteen vaikutus kokonaismeluun. Jos pyörän meluemissio dominoi, ei kiskoon kohdistuvilla meluntorjuntatoimenpiteillä ole suurta vaimentavaa vaikutusta kokonaismeluun nähden. Tilanne on vastaava kiskon meluemission dominoidessa.

Pyörän säteilemä ääni koostuu kulutuspinnan ja pyörälevyn värähtelyn aiheuttamasta säteilystä. Kulutuspinnan värähtely on pyörän säteen suuntaista ja pyörälevyn värähtely pyörän akselin suuntaista. Pyörän säde vaikuttaa näiden kahden komponentin suhteeseen; mitä suurempi säde, sitä suurempi pyörälevyn värähtely. Pyörän muodolla voidaan vaikuttaa levyn värähtelyyn, ja muodon optimointi värähtelyn minimoimiseksi vaikuttaa järkevältä meluntorjuntatoimenpiteeltä, koska pyörän materiaaliin ei tarvitse tehdä muutoksia eikä pyörään lisätä ulkoisia esineitä. Ennustettu melun vaimeneminen on välillä 3 – 6 dB suurisäteisillä pyörillä.

Pyörän säteilyä voidaan pyrkiä vähentämään myös asentamalla vaimennuselementtejä pyörälevyyn. Vaimennuselementeillä pyritään vaimentamaan pyörän luonnollisia värähtelymoodeja taajuusalueella 1 kHz – 5 kHz. Suurin osa pyörän säteilemästä äänienergiasta aiheutuu juuri näistä moodeista. Vaimennuselementeillä voidaan saavuttaa jopa 8 – 9 dB vaimennus pyörän säteilyyn optimitapauksessa, jossa pyörään lisätään painoa n. 15 % sen alkuperäisestä painosta. Vaimennuselementtien varjopuolena mainittakoon, että ne eivät sovellu asennettaviksi tavaraliikennekalustoon, joka on varustettu valurautablokkijarruilla pyörien korkean lämpötilan vuoksi kovissa jarrutustilanteissa.

Eräs vaimennuskeino on päällystää pyörän kulutuspinna kimmoisalla materiaalilla. Optimaalisilla materiaalikerroksen ominaisuuksilla voidaan saavuttaa vaimennusta sekä pyörän että kiskon säteilyssä. Kulkumelun kokonaisvaimennus on 4 dB:n luokkaa. Päällystys ei luonnollisestikaan sovi meluntorjuntakeinoksi kalustolla, jonka jarrut perustuvat kulutuspinnan ja jarrupalan väliseen kitkaan. Lisäksi kimmoisan kerroksen ominaisuuksien optimointi on vaivalloista, ja materiaaliparametrien virheellinen valinta voi johtaa jopa melun voimistumiseen.

Pyörälevyn molemminpuolinen päällystäminen vaimennetulla teräslevyrakenteella voi vaimentaa pyörän säteilyä 3 – 6 dB. Rakenne on esimerkiksi kolmikerroksinen, jonka uloimmat kerrokset koostuvat ohuista teräslevyistä, joiden välissä on elastomeeria tai muuta värähtelyä absorboivaa materiaalia. Melunvaimennus perustuu pyörälevyn peittymiseen sekä säteittäisen värähtelyn lievään vaimenemiseen, joka aiheutuu teräslevyrakenteen kiinnityksestä pyörän navalla ja kehällä. Vuonna 2003 tehdyssä tutkimuksessa testattiin Oslon ja Gardermoenin välillä vuonna 1998 avatulla radalla Airport Express Train –kalustolla pyörään kiinnitettäviä vaimentimia, joiden rakenne koostuu kahdesta alumiinilevystä ja niiden välissä olevasta ohuesta viskoelastisesta kerroksesta [9]. Vaimentimet on viritetty optimaaliselle toiminnalle pyörän oleellisimpien värähtelymoodien taajuusalueella. Kuvassa 14 on esitetty vaimentimilla varustettu teli. Tutkimuksen [9] lopputuloksena todettiin pyörävaimentimien aiheuttaman vaimennuksen olevan 3 dB ohiajonopeudella 200 km/h ja 1 dB nopeudella 80 km/h.



*Kuva 14. Välillä Oslo – Gardermoen liikennöivän Airport Express Train:n teli [9].*

Raiteen säteilemä melu koostuu sekin kahdesta osatekijästä: kiskon ja ratapölkyn emissiosta. Näistä kahdesta kiskon emissio on selkeästi dominoiva. Nykyiset kiskon emission vähentämiseen tähtäävät menetelmät pyrkivät minimoimaan kiskon efektiivisen säteilypituuden vähentämällä värähtelyn etenemistä kiskossa. Etenemisen vähentämistä voidaan pyrkiä saavuttamaan optimoimalla kiskon ja ratapölkyn välilevyn ominaisuuksia tai kiinnittämällä absorboivaa materiaalia kiskoon. Välilevyn pystysuuntaisen jäykkyyden tulisi olla hyvin suuri, jotta raiteen emissio pienenesi, mutta

jäykkä välilevy välittää värähtelyn tehokkaammin ratapölkyn kautta ratapohjaan, jolloin ohiajojen aiheuttama värähtely lähiympäristössä voimistuu.

Tutkimuksessa [29] on todettu kahden kiskoon kiinnitettävän yhdelle taajuudelle viritetyn vaimennuselementin vaimentavan  $A$ -äänitasoa maksimissaan 2,2 dB (pituusmassan lisäys: 14 %) ja 2,8 dB (pituusmassan lisäys: 28 %). Vaimennuselementtien toiminta perustui massanlisäyksen kautta saavutettuun muutokseen kiskon värähtelykäyttäytymisessä, ja elementeillä pyrittiin pääasiallisesti vaimentamaan ratapölkkyvälin mukaan määräytyvä kiskon ensimmäinen värähtelymoodi. Arvot ovat TWINS-raidemelu-mallinnusohjelman tuloksia tapauksessa, jossa käytettiin melun kannalta optimoitua välilevyä. Tutkimuksessa oli myös arvioitu kahden eri taajuudelle viritetyn elementin yhteisvaimennusta, mutta samalla välilevyllä mallinnusohjelma ei ennustanut lisävaimennusta. Hieman pehmeämmällä välilevyllä oli havaittavissa alle 1 dB lisävaimennusta, ja vaimennuksen oletettiin lisääntyvän hieman, jos vaimennuselementin massa kaksinkertaistettaisiin.

### *3.2.5 Aktiivinen melunvaimennus*

Aktiivisen melunvaimennuksen peruseriaate on pyrkiä minimoimaan jonkin lähteen aiheuttama melu käyttämällä hyväksi akustisia säteilijöitä (kaiuttimia), joiden avulla tuotetaan täsmälleen samanlaista, mutta vastakkaisvaiheista melusignaalia kuin alkuperäinen melulähde. Ideaalisessa tapauksessa näiden kahden lähteen säteilemien ääniaaltojen interferenssi on täysin destruktiivista ja melulähteen vaikutus kumoutuu. Periaatetta on sovellettu mm. autojen [1], lentokoneiden [11] ja hissien [17] sisämelun vaimennukseen sekä ympäristömelun vaimennukseen [33].

Aktiivinen melunvaimennus on adaptiiviseen suodattamiseen perustuva ongelma, ja ajateltaessa raideliikenteen aiheuttaman melun vaimentamista on adaptiivisen suodinalgoritmin kyettävä muuttamaan vastettaan hyvinkin nopeasti. Junan ohiajo saattaa kestää vain muutamia sekunteja, ja äänitapahtuma ei ole ajan eikä taajuuden suhteen stationäärinen. Yleisimmät algoritmit perustuvat LMS-algoritmiin (least mean squares), joka pyrkii minimoimaan melutapahtuman ja vaimennusjärjestelmän ulostulon summan keskimääräisen neliövirheen. Alkuperäisessä muodossaan LMS-algoritmi konvergoi liian hitaasti kohti optimiratkaisua, mutta sen pohjalta on kehitetty nopeammin konvergoivia ja stabiilimpia algoritmeja [15,19].

Aktiivisen melunvaimennuksen soveltaminen raideliikennemelun torjuntaan ei välttämättä ole kannattavaa, koska suora raideliikennemelu sijoittuu pääasiassa taajuuskaistalle 500 Hz – 5 kHz. Aktiiviset melunvaimennusjärjestelmät toimivat parhaiten pienillä taajuuksilla (alle 500 Hz), jolloin saadaan luotettavaa vaiheinformaatiota vaimennustoimenpiteen kohteena olevasta äänisignaalista.



## 4 Laboratoriomittaukset

Teknillisen korkeakoulun akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratorion suuressa kaiuttomassa huoneessa tutkittiin ratakiskon värähtelyä ja sen säteilemää ääntä, kun herätteenä käytettiin impulssivasaraa. Laboratoriomittauksissa tutkittiin Teknikum Oy:n toimittamien vaimennuselementtien kykyä vaimentaa kiskon värähtelyä ja sen säteilemää ääntä. Kyseessä on vertailumittaus, jonka perusteella valittiin suorituskyvyltään parempi elementti kenttäkokeisiin.

### 4.1 Koekisko

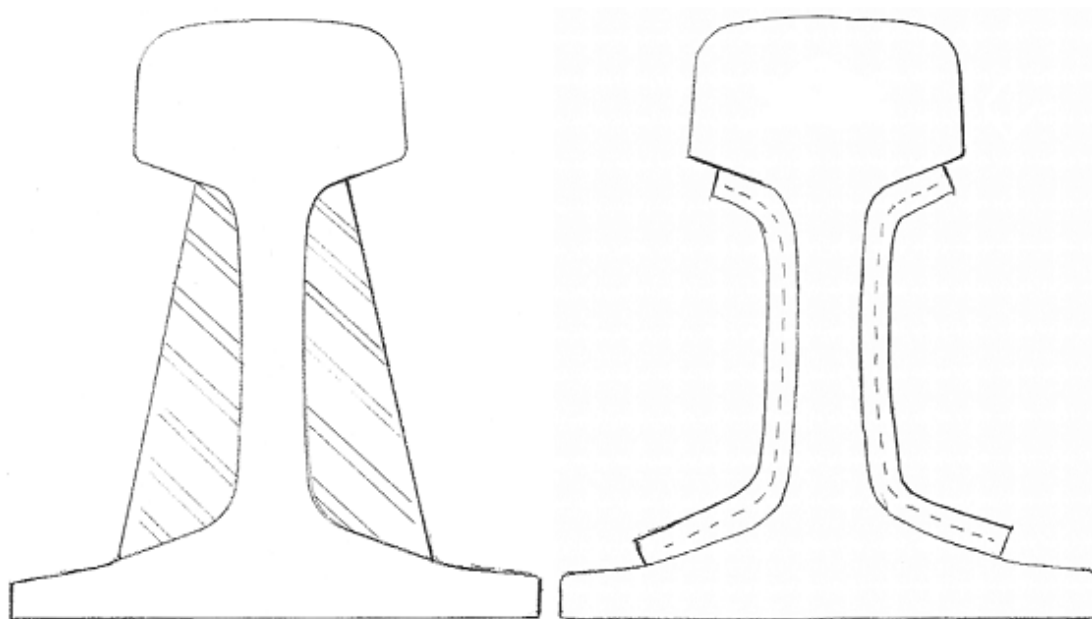
Koekiskon, jonka Teknikum Oy toimitti vaimennuselementtien kera, kiskoprofiili oli 54 E 1 (54 kg/m). Kiskon pituus oli 2,4 m, mikä määräytyi toisen tutkittavan vaimennuselementin pituuden (1200 mm) ja Suomessa käytettävän ratapölkkyvälin (600 mm) mukaan. Kiskon toisessa päädyssä sen varressa oli kaksi reikää, joiden halkaisija oli 35 mm. Reikien keskipisteiden etäisyydet olivat 183 mm ja 368 mm kiskon päädyistä. Kyseisestä päädyistä käytetään jatkossa nimitystä pääty 1. Kiskon pinta oli kauttaaltaan kevyen ruosteen peitossa. Kisko eristettiin kaiuttoman huoneen vaijeriverkkolattiasta puulankkujen sekä Teknikum Oy:n toimittamien kumilevyjen avulla. Lankkuja tarvittiin korottamaan kisko riittävästi verkkolattiasta, jotta vaimennuselementtien kiinnikkeet saatiin asennettua.

### 4.2 Vaimennuselementit

Teknikum Oy toimitti kahta eri vaimennuselementtityyppiä laboratorionkokeisiin. Elementti 1 (jatkossa E1) on vulkanoitu ja muotoon valettu kumiseoselementti, jonka ominaispaino on 7 kg/m. Seosta käytetään Teknikum Oy:n muissakin meluntorjuntatuotteissa. Yksittäisen elementin pituus oli n. 1200 mm.

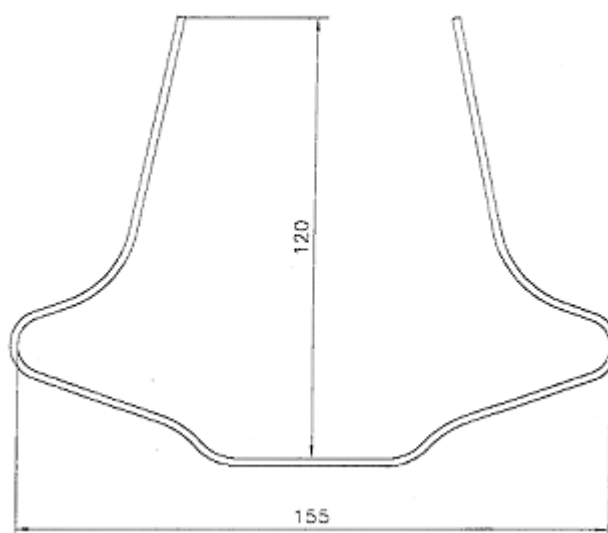
Elementti 2 (jatkossa E2) on prässätty kerroslevyrakenne, joka on taivutettu kiskon varren profiilin mukaiseksi. Kerrosrakenne on kolmiosainen: kiskoa lähinnä oleva kerros on samaa kumiseosta kuin E1, ulommainen kerros on lujempaa ja sääolosuhteita kestävämpää kumia, ja kumikerrosten välissä on n. 1 mm:n paksuinen teräksinen

reikälevy. Reiän silmäkoko on n. 2 mm. E2:n ominaispaino on 3 kg/m. Elementit olivat pituudeltaan vain n. 1000 mm, joten mittauksissa jouduttiin käyttämään neljää täysimittaista ja kahta n. 400 mm pitkää elementtiä koko koekiskon varren peittämiseksi. Hahmotelma molempien elementtien poikkileikkauksesta kiskoon asennettuna on esitetty kuvassa 15.



*Kuva 15. Vaimennuselementtien ja kiskon poikkileikkaukset. E1 vasemmalla, E2 oikealla.*

Molemmat elementit kiinnitetään kiskoon erikoiskiinnikkein. Kiinnike on jousiteräsnauhasta (paksuus 1,5 mm, leveys 30 mm) muotoiltu U-levy, jonka päät puristavat vaimennuselementin kiinni kiskoon. Asennus tapahtuu alakautta levittämällä kiinnikkeen päät kiskon jalan yli ja kääntämällä kiinnike pystysuuntaan. Kiinnikkeen piirros on esitetty kuvassa 16.



*Kuva 16. Jousikiinnike.*

Taulukkoon 6 on kerätty vaimennuselementtien kiinnikkeiden kiinnityspisteet. Etäisyydet on mitattu kiskon päädyistä 1.

*Taulukko 6. Vaimennuselementtien kiinnityspisteet*

| <b>Elementti</b> | <b>Piste 1</b> | <b>Piste 2</b> | <b>Piste 3</b> | <b>Piste 4</b> | <b>Piste 5</b> |
|------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| <b>E1</b>        | 200 mm         | 700 mm         | 1200 mm        | 1700 mm        | 2200 mm        |
| <b>E2</b>        | 150 mm         | 720 mm         | 1100 mm        | 1800 mm        | 2160 mm        |

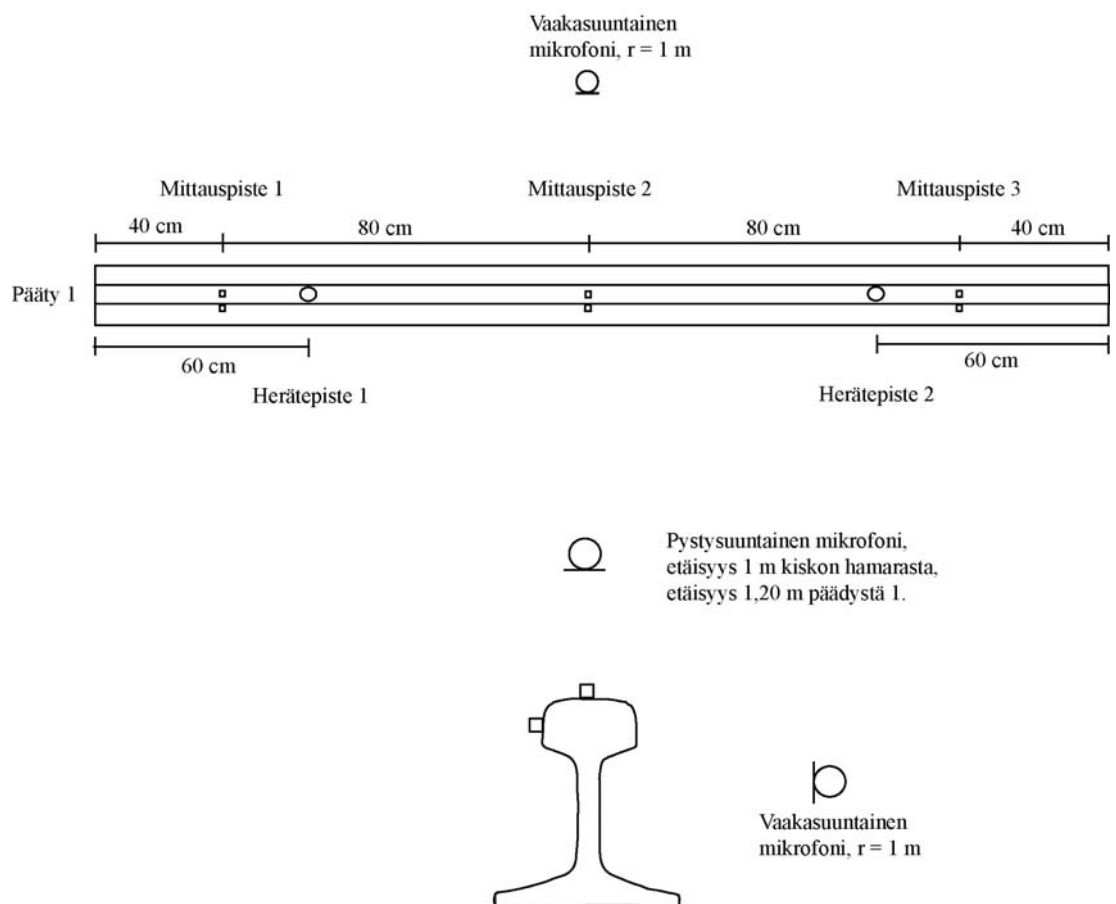
E2-elementtien kiinnityspisteet valittiin niin, että saavutettiin optimaalinen kiskon varren ja elementtien välinen kontakti. E1-elementit olivat riittävät pitkiä, ja optimaalinen kontakti saavutettiin kiinnikkeiden tasavälisellä sijoittelulla. Molemmat vaimennuselementit koputeltiin vasaralla tiiviisti kiskoon kiinni.

### 4.3 Mittauskalusto

Kiskon säteilemä ääni mitattiin kiskon puolivälin kohdalta kahdella mikrofonilla kohtisuorasti sekä kiskon yläpuolelta että kiskon sivulta. Mikrofonien asennusetäisyys oli 1 m. Asennuspisteet on esitetty kuvassa 17. Molemmat mikrofonit olivat vapaan kentän kondensaattorimikrofoneja tyyppiä Brüel & Kjær 4191. Mikrofonien tekniset tiedot ja kalibrointitodistukset ovat liitteessä 1. Mikrofonikapselit liitettiin Brüel & Kjær 2669 –mikrofoniesivahvistimiin, joilta signaali vietiin edelleen kaksikanavaiselle Brüel

& Kjær Nexus 2690 A 0F2 –vahvistimelle. Mikrofonien herkkyydet aseteltiin kalibrointitodistuksien mukaisesti ja ulostulotasoksi valittiin molemmille kanaville 100 mV/Pa. Vahvistimen sisäänrakennettujen suotimien rajataajuudet olivat molemmilla kanavilla 20 Hz ja 22,4 kHz. Vahvistetut mikrofonisignaalit tallennettiin PC-pohjaisella Hewlett-Packard E1432A –tiedonkeruujärjestelmällä.

Kiskon värähtely mitattiin kiihtyvyysantureilla. Anturit asennettiin kiskon hamaran päälle ja kylkeen. Asennus kiskon pituussuuntaan ja poikkileikkaukseen nähden on esitetty kuvassa 17.



*Kuva 17. Kiihtyvyysantureiden kiinnityspisteet ja mikrofonien sijainti.*

Kiskon pinta hiottiin puhtaaksi asennuspaikkojen kohdalta hiomapaperilla (karheusluokitus: 1600) ja anturit kiinnitettiin kiskoon syanoakrylaattipohjaisella liimageelillä valmistajan ohjeiden mukaisesti. Anturit olivat PCB 333A32 –tyyppisiä pietsoantureita, joille syötettiin käyttöjännite tiedonkeruujärjestelmältä. Antureiden kalibrointitodistukset ja tekniset tiedot on esitetty liitteessä 1.

Herätteenä mittauksissa käytettiin impulssivasaran iskuja. Impulssivasara oli tyyppiä PCB 086C50. Vasaran kalibrointitodistus on liitteessä 1. Impulssivasaran signaali johdettiin siihen kuuluvan esivahvistimen, PCB 480E09, kautta tiedonkeruujärjestelmään. Vahvistin aseteltiin yksikkövahvistukselle, ja sen paristot vaihdettiin ennen mittauksia.

## 4.4 Mittauksen kulku

Laboratoriokokeiden tarkoituksena oli määrittää koekiskon siirtofunktio vaimentamattomassa ja vaimennetuissa tapauksissa. Mittaukset suoritettiin 17.7.2003. Mikrofonien signaalitaso tarkistettiin Brüel & Kjær 4231 –kalibraattorilla, joka tuottaa 94 dB äänipainetasoa taajuudella 1 kHz. Heräte iskettiin kaikissa kolmessa tapauksessa kahteen eri pisteeseen kiskon hamaraan (etäisyydelle 600 mm ja 1800 mm päädyistä 1 m mitattuna), ja mitattiin 20 impulssivastetta molempiin pisteisiin isketyistä herätteistä. Impulssivasteet luettiin mittaushetkellä tiedonkeruujärjestelmästä suoraan Matlab-ohjelmaan. Vasteet tarkastettiin visuaalisesti ennen tallentamista, jotta saturoituminen ym. karkeat virheet saatiin eliminoidua.

## 4.5 Analyysimenetelmät

Laboratoriokokeen tavoitteena oli määrittää siirtofunktio herätteestä kuhunkin mitattuun vasteeseen. Systeemin siirtofunktio määritellään aikatasossa

$$y(t) = x(t) * h(t - \tau), \quad (16)$$

missä  $y(t)$  on systeemin vaste,  $x(t)$  on systeemiin syötetty heräte ja  $h(t-\tau)$  on ajan suhteen käännetty systeemin impulssivaste. Systeemin ulostulo eli vaste on siis herätteen ja systeemin impulssivasteen konvoluutio. Siirtofunktioiden estimaatit laskettiin taajuustasossa. Sekä mitatut vasteet että impulssivasaran signaalit ikkunoitiin Hamming-ikkunalla, jonka pituus oli 65536 näytettä. Jokaisesta ikkunoidusta vasteesta laskettiin 65536-pisteinen FFT, jolloin siirtofunktio saatiin määritettyä jokaiselle mittauskanavalle. Teoreettisessa tapauksessa siirtofunktio voitaisiin määritellä suoraan

yhtälön 17 mukaisesti, mutta käytännössä siirtofunktiota on estimoitava hieman monimutkaisemmilla menetelmillä.

$$H(f) = \frac{Y(f)}{X(f)} \quad (17)$$

Yhtälössä 17 esiintyvillä termeillä  $H(f)$ ,  $Y(f)$  ja  $X(f)$  merkitään impulssivasteen, systeemin vasteen ja systeemiin syötetyn herätteen Fourier-muunnoksia. On oletettavissa, että sekä systeemin tulosignaalin  $x(t)$  että lähtösignaalin  $y(t)$  on kohinaa, koska molemmat signaalit kulkevat vahvistinasteiden läpi. Tällöin siirtofunktion optimiestimaatti on muotoa

$$\hat{H}_{xy}''(f) = \sqrt{\frac{\hat{G}_{xy}(f)\hat{G}_{yy}(f)}{\hat{G}_{xx}(f)\hat{G}_{yx}(f)}} \quad (18)$$

missä  $\hat{G}_{xy}(f)$  on tulo- ja lähtösignaalin ristispektrin estimaatti,  $\hat{G}_{yy}(f)$  on lähdön autospektrin estimaatti,  $\hat{G}_{xx}(f)$  on tulon autospektrin estimaatti ja  $\hat{G}_{yx}(f)$  on lähdön ja tulon ristispektrin estimaatti [16]. Estimaatit määritellään yhtälöiden (19) – (22) mukaisesti,

$$\hat{G}_{xy}(f) = \frac{2}{n} \sum_{k=1}^k X_k^*(f) Y_k(f) \quad (19)$$

$$\hat{G}_{xx}(f) = \frac{2}{n} \sum_{k=1}^k |X_k(f)|^2 \quad (20)$$

$$\hat{G}_{yx}(f) = \frac{2}{n} \sum_{k=1}^k Y_k^*(f) X_k(f) \quad (21)$$

$$\hat{G}_{yy}(f) = \frac{2}{n} \sum_{k=1}^k |Y_k(f)|^2 \quad (22)$$

missä  $X_k(f)$  ja  $Y_k(f)$  ovat kompleksilukuvektoreita.

Kiihtyvyyssantureiden ylärajataajuus on n. 4,5 kHz, joten tuloksien tarkastelussa taajuuskaista on rajoitettu välille 400 Hz – 4 kHz. Kyseinen taajuuskaista on myös oleellisin tarkasteltaessa kiskon ja pyörän kontaktin aiheuttamaa melua.

Vasteiden edustavuuden tarkastelu tehtiin jokaisen heräte-vaste-sarjan koherenssin avulla. Koherenssifunktio määritellään

$$\gamma_{xy}^2(f) = \frac{|G_{xy}(f)|^2}{G_{xx}(f)G_{yy}(f)}, \quad (23)$$

missä  $G_{xy}(f)$  on tulon ja lähdön välinen ristispektri,  $G_{xx}(f)$  on tulon autospektri ja  $G_{yy}(f)$  on lähdön autospektri. Koherenssifunktio saa arvot välillä  $[0,1]$  ja saa triviaalisti arvon 1 aina, jos mittaussarjan pituus on 1. Korkea koherenssifunktion arvo merkitsee järjestelmän vasteen vahvaa riippuvuutta vain herätesignaalista. Vastaavasti alhainen koherenssifunktion arvo osoittaa, että mittauksissa on ylimääräistä kohinaa, spektrien estimaateissa on systemaattisia resoluutiovirheitä, mitattava järjestelmä ei ole lineaarinen tai vaste aiheutuu herätteen lisäksi myös yhtäaikaaisesti muista herätteistä [16].

## 4.6 Tulokset

Siirtofunktioille käytetään jatkossa merkintää  $H_{xyz,Ei}(f)$ , missä alaindeksi määräytyy seuraavasti:  $x$  = kyseisen siirtofunktion mitatun suureen orientaatio ( $h$  = vaaka,  $v$  = pysty),  $y$  = suure ( $s$  = ääni;  $a1$  = kiihtyvyys, mittauspiste 1;  $a2$  = kiihtyvyys, mittauspiste 2;  $a3$  = kiihtyvyys, mittauspiste 3),  $z$  = piste, johon heräte on kohdistettu ( $z = 1$  tai  $z = 2$ ) ja  $i$  = kiskon vaimennus ( $0$  = vaimentamaton,  $1$  = vaimennettu E1:llä,  $2$  = vaimennettu E2:lla). Siirtofunktioiden kuvaajien taajuus- ja magnitudiasteikot ovat lineaariset, jotta resonanssit ja vaimennuselementtien vaikutus olisivat havainnollisemmin esillä.

### 4.6.1 Vaakasuuntainen ilmaääni

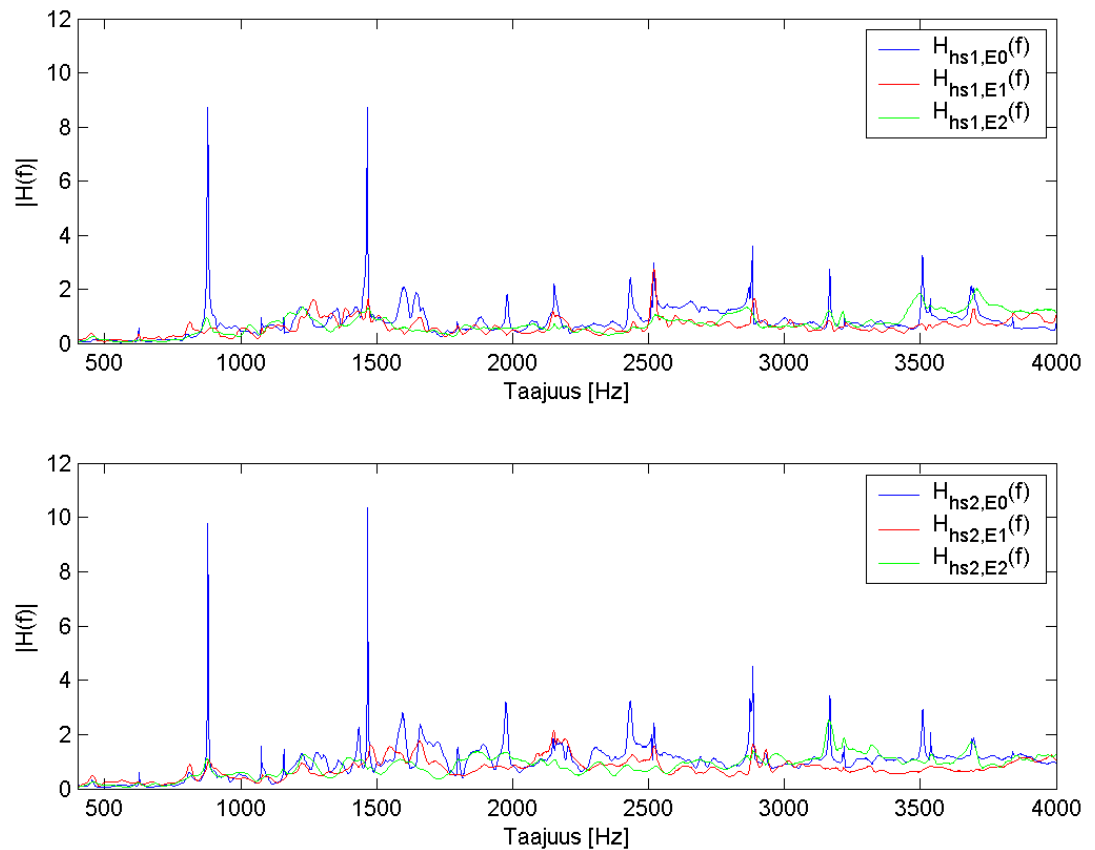
Kiskon säteilemää ääntä mitattiin vaakasuunnassa kuvan 17 mukaisesta pisteestä. Kiskon siirtofunktio impulssivasaran herätteestä vaakasuuntaiseen ääneen

vaimentamattomassa ja vaimennetuissa tapauksissa on esitetty kuvassa 18. Ylemmän kuvan siirtofunktioissa heräte on kohdistettu herätepisteeseen 1 ja alemman kuvan siirtofunktioissa herätepisteeseen 2. Taulukkoihin 7 ja 8 on kerätty vaimentamattoman kiskon siirtofunktion resonanssien amplitudit sekä eri elementeillä vaimennettujen kiskojen siirtofunktioiden amplitudit vastaavilla taajuuksilla.

Vaimentamattoman kiskon siirtofunktiossa näkyy useita teräviä resonansseja, joista voimakkaimmat esiintyvät taajuuksilla 879 Hz ja 1466 Hz sekä pisteeseen 1 että pisteeseen 2 kohdistetulla herätteellä. Molemmat vaimennuselementit vaimensivat näitä resonansseja huomattavan paljon. Elementit vaimensivat myös muita heikompia resonansseja selvästi.

Taulukoissa 7 ja 8 on esitetty myös arvio siirtofunktioiden kokonaistehosta tarkastelukaistalla. Kokonaistehoarvio on summa siirtofunktion itseisarvon neliön arvoista kussakin FFT-pisteessä tarkastelukaistalla, ja arvo on skaalattu niin, että vaimentamattoman kiskon siirtofunktion teho on 1 kussakin mittauspisteessä. Vaakasuuntaisen ilmäänen tapauksessa vaimennuselementti E1 antaa hieman paremman kokonaistehon vaimennuksen verrattuna elementtiin E2. Tulos pätee molempien herätepisteiden tapauksessa.





Kuva 18. Siirtofunktiot herätteestä vaakasuuntaiseen ääneen.

Taulukko 7. Siirtofunktioiden oleelliset resonanssitaajuuudet ja niiden amplitudit, vaakasuuntainen ääni, herätepiste 1.

| Taajuus [Hz]      | 879 | 1466 | 2883 | 3508 | 2520 | 3166 | Kok.teho |
|-------------------|-----|------|------|------|------|------|----------|
| $ H_{hs1,E0}(f) $ | 8,7 | 8,7  | 3,6  | 3,2  | 3,0  | 2,7  | 1,00     |
| $ H_{hs1,E1}(f) $ | 0,6 | 1,6  | 1,6  | 0,7  | 2,7  | 0,8  | 0,48     |
| $ H_{hs1,E2}(f) $ | 1,0 | 1,3  | 1,3  | 1,8  | 1,1  | 1,2  | 0,67     |

Taulukko 8. Siirtofunktioiden oleelliset resonanssitaajuuudet ja niiden amplitudit, vaakasuuntainen ääni, herätepiste 2.

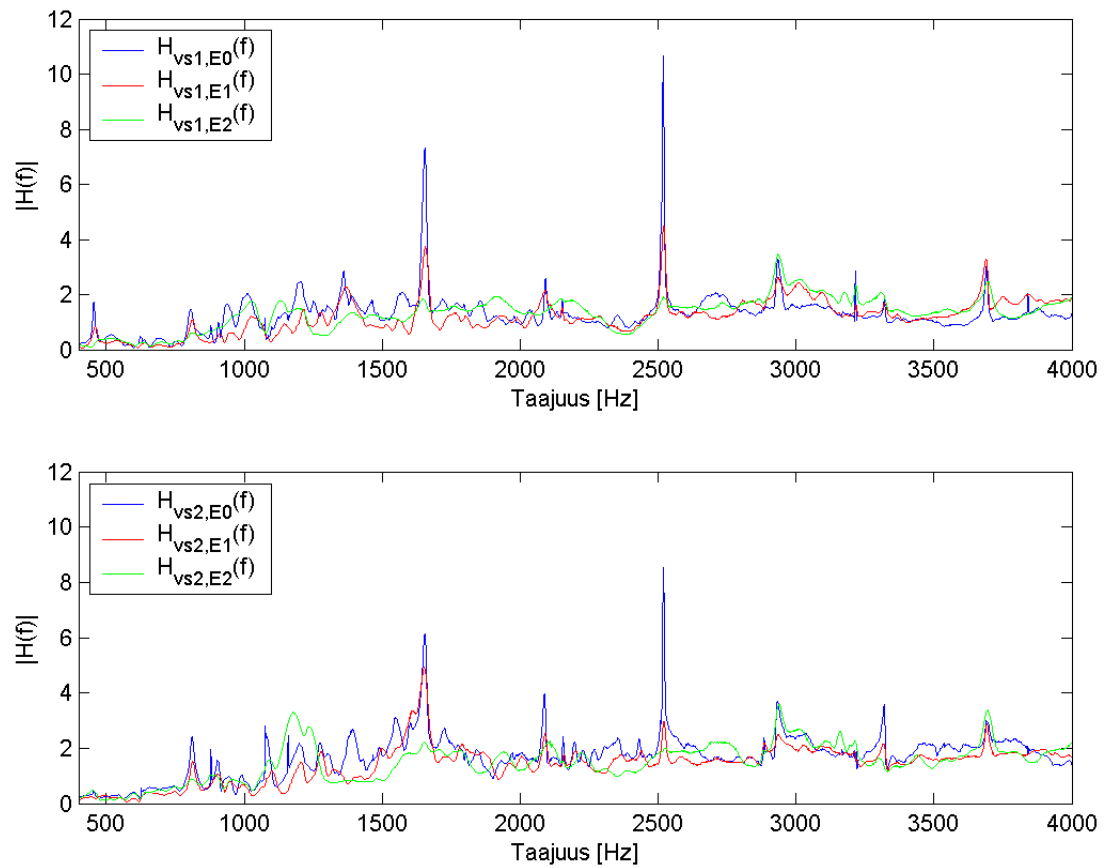
| Taajuus [Hz]      | 1467 | 879 | 2884 | 3167 | 2433 | 1977 | Kok.teho |
|-------------------|------|-----|------|------|------|------|----------|
| $ H_{hs2,E0}(f) $ | 10,5 | 9,8 | 4,5  | 3,4  | 3,2  | 3,2  | 1,00     |
| $ H_{hs2,E1}(f) $ | 1,6  | 1,1 | 1,6  | 0,7  | 1,3  | 0,8  | 0,50     |
| $ H_{hs2,E2}(f) $ | 0,8  | 1,1 | 1,4  | 2,5  | 0,9  | 1,3  | 0,63     |

#### *4.6.2 Pystysuuntainen ilmaääni*

Kiskon säteilemää ääntä mitattiin pystysuunnassa kuvan 17 mukaisesta pisteestä. Kiskon siirtofunktio impulssivasaran herätteestä pystysuuntaiseen ääneen vaimentamattomassa ja vaimennetuissa tapauksissa on esitetty kuvassa 19. Ylemmän kuvan siirtofunktioissa heräte on kohdistettu herätepisteeseen 1 ja alemman kuvan siirtofunktioissa herätepisteeseen 2. Taulukkoihin 9 ja 10 on kerätty vaimentamattoman kiskon siirtofunktion resonanssien amplitudit sekä eri elementeillä vaimennettujen kiskojen siirtofunktioiden amplitudit vastaavilla taajuuksilla. Myös kokonaistehon vaimennus on esitetty molemmissa taulukoissa.

Pystysuuntaisen ilmaäänen siirtofunktioissa on nähtävissä vahvat ja terävät resonanssit taajuuksilla 1655 Hz ja 2519 Hz. Näitä resonansseja elementti E2 vaimensi paremmin kuin elementti E1. Siirtofunktioissa ei ole nähtävissä muita vahvoja resonansseja, ja elementtien vaikutus muualla kuin edellä mainituilla taajuuksilla on vähäistä.

Kokonaistehon vaimennuksessa elementti E1 oli niukasti parempi, kuten vaakasuuntaisen ilmaäänenkin tapauksessa. Vaimennukset olivat tosin heikompia, mutta näin voidaan olettaakin, koska kiskon hamara ei ole vaimennuselementin peitossa ja täten äänen säteilyä ei voida estää.



Kuva 19. Siirtofunktiot herätteestä pystysuuntaiseen ääneen.

Taulukko 9. Siirtofunktioiden oleellisimmat resonanssitaajuuudet ja niiden amplitudit.

| Taajuus [Hz]      | 2519 | 1655 | 2934 | 3690 | 1361 | 3215 | Kok.teho |
|-------------------|------|------|------|------|------|------|----------|
| $ H_{vs1,E0}(f) $ | 10,7 | 7,3  | 3,3  | 3,0  | 2,9  | 2,9  | 1,00     |
| $ H_{vs1,E1}(f) $ | 4,5  | 3,7  | 2,6  | 3,3  | 2,3  | 1,6  | 0,82     |
| $ H_{vs1,E2}(f) $ | 1,9  | 1,8  | 3,5  | 2,5  | 1,3  | 2,3  | 0,94     |

Taulukko 10. Siirtofunktioiden oleellisimmat resonanssitaajuuudet ja niiden amplitudit.

| Taajuus [Hz]      | 2520 | 1655 | 2088 | 2933 | 3320 | 3690 | Kok.teho |
|-------------------|------|------|------|------|------|------|----------|
| $ H_{vs2,E0}(f) $ | 8,5  | 6,1  | 4,0  | 3,7  | 3,6  | 3,0  | 1,00     |
| $ H_{vs2,E1}(f) $ | 3,0  | 4,9  | 2,5  | 2,5  | 2,2  | 2,9  | 0,71     |
| $ H_{vs2,E2}(f) $ | 2,0  | 2,2  | 2,3  | 3,6  | 1,6  | 3,4  | 0,77     |

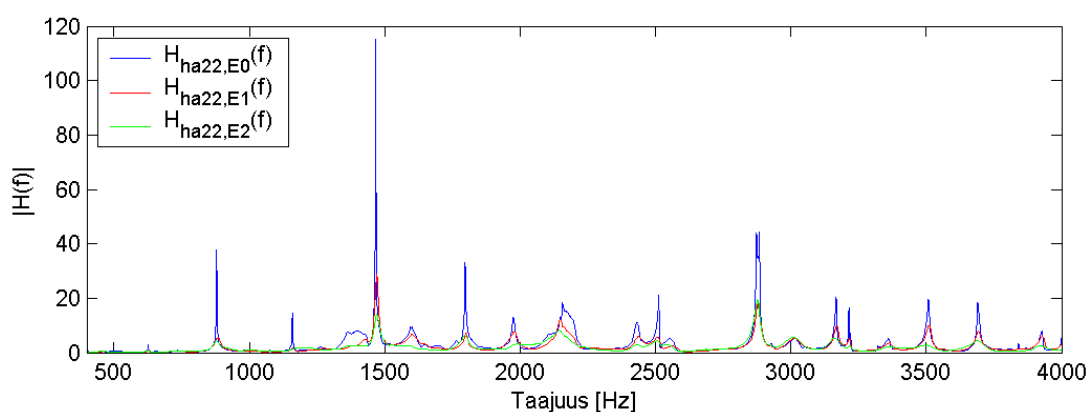
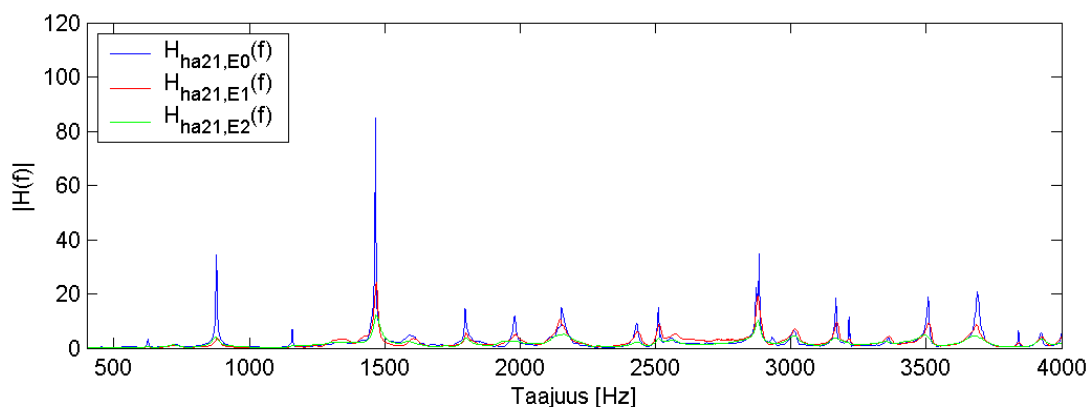
### *4.6.3 Vaakasuuntainen värähtely*

Kiskon vaakasuuntaista värähtelyä mitattiin kuvan 17 mukaisista pisteistä. Kiskon siirtofunktio impulssivasaran herätteestä mittauspisteestä 2 mitattuun vaakasuuntaiseen värähtelyyn vaimentamattomassa ja vaimennetuissa tapauksissa on esitetty kuvassa 20. Ylemmän kuvan siirtofunktioissa heräte on kohdistettu herätepisteeseen 1 ja alemman kuvan siirtofunktioissa herätepisteeseen 2. Taulukkoihin 11 ja 12 on kerätty vaimentamattoman kiskon siirtofunktion resonanssien amplitudit, eri elementeillä vaimennettujen kiskojen siirtofunktioiden amplitudit vastaavilla taajuuksilla sekä siirtofunktioiden kokonaistehoarvio.

Kuvassa 20 esitetyssä siirtofunktiossa herätepisteestä 1 vaakasuuntaiseen värähtelyyn vahvimmat resonanssit ovat taajuuksilla 879 Hz, 1466 Hz ja 2883 Hz. Näistä alimmalla resonanssitaajuudella elementtien vaimennuskyky oli samaa luokkaa, mutta kahdella korkeammalla ja lopuilla taulukossa 11 esitetyillä resonanssitaajuuksilla elementin E2 vaimennus oli lähes kaksinkertainen.

Kuvan 20 siirtofunktiossa herätepisteestä 2 vaakasuuntaiseen värähtelyyn on havaittavissa selkeää vaimennusta molempien elementtien tapauksessa, mutta erot elementtien välillä ovat pienemmät kuin herätepisteen 1 tapauksessa. Myös liitteessä 2 esitetyissä siirtofunktioissa molempiin pisteisiin kohdistetusta herätteestä mittauspisteisiin 1 ja 3 on havaittavissa vastaavanlainen ilmiö.

Siirtofunktioiden kokonaistehoarvioissa on havaittavissa huomattava ero vaimennuselementtien välillä. Elementti E2 kykeni vaimentamaan vaakasuuntaista värähtelyä selkeästi paremmin kuin elementti E1. Liitteen 2 siirtofunktioiden yhteydessä esitetyistä taulukoista havaitaan vastaava ilmiö myös muissa mittauspisteissä.



Kuva 20. Siirtofunktiot herätteestä mittauspisteen 2 vaakasuuntaiseen värähtelyyn.

Taulukko 11. Siirtofunktioiden oleellisimmat resonanssitaajuuudet ja niiden amplitudit.

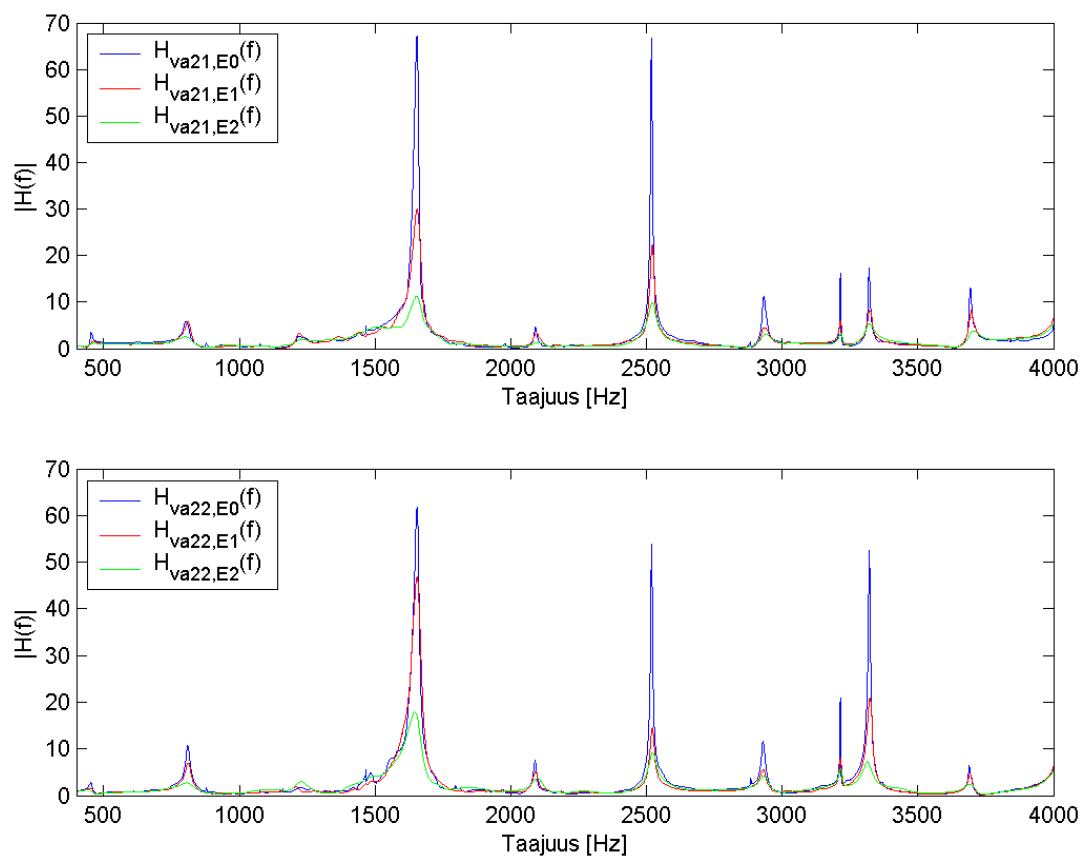
| Taajuus [Hz]       | 1466 | 2883 | 879  | 3689 | 3508 | 3166 | Kok.teho |
|--------------------|------|------|------|------|------|------|----------|
| $ H_{ha12,E0}(f) $ | 84,8 | 34,6 | 34,4 | 20,6 | 18,9 | 18,3 | 1,00     |
| $ H_{ha12,E1}(f) $ | 24,2 | 19,1 | 4,1  | 8,6  | 9,3  | 9,6  | 0,73     |
| $ H_{ha12,E2}(f) $ | 12,3 | 10,1 | 3,5  | 4,6  | 4,9  | 3,8  | 0,26     |

Taulukko 12. Siirtofunktioiden oleellisimmat resonanssitaajuuudet ja niiden amplitudit.

| Taajuus [Hz]       | 1467  | 2884 | 879  | 1797 | 2512 | 3167 | Kok.teho |
|--------------------|-------|------|------|------|------|------|----------|
| $ H_{ha22,E0}(f) $ | 115,2 | 44,2 | 37,6 | 33,0 | 21,0 | 20,4 | 1,00     |
| $ H_{ha22,E1}(f) $ | 28,8  | 17,9 | 5,8  | 7,0  | 5,8  | 9,9  | 0,32     |
| $ H_{ha22,E2}(f) $ | 14,1  | 19,7 | 4,3  | 6,4  | 4,4  | 5,3  | 0,25     |

#### 4.6.4 Pystysuuntainen värähtely

Kiskon pystysuuntaista värähtelyä mitattiin kuvan 17 mukaisista pisteistä. Kiskon siirtofunktio impulssivasaran herätteestä mittauspisteestä 2 mitattuun pystysuuntaiseen värähtelyyn vaimentamattomassa ja vaimennetuissa tapauksissa on esitetty kuvassa 21. Ylemmän kuvan siirtofunktioissa heräte on kohdistettu herätepisteeseen 1 ja alemman kuvan siirtofunktioissa herätepisteeseen 2. Taulukkoihin 13 ja 14 on kerätty vaimentamattoman kiskon siirtofunktion resonanssien amplitudit sekä eri elementeillä vaimennettujen kiskojen siirtofunktioiden amplitudit vastaavilla taajuuksilla. Mittauspisteitä 1 ja 3 vastaavat siirtofunktiot ovat esitetty liitteessä 2.



Kuva 21. Siirtofunktiot herätteestä mittauspisteeseen 2 pystysuuntaiseen värähtelyyn.

*Taulukko 13. Siirtofunktioiden oleelliset resonanssitaajuudet ja niiden amplitudit.*

| Taajuus [Hz]       | 1655 | 2519 | 3321 | 3215 | 3694 | 2933 | Kok.teho |
|--------------------|------|------|------|------|------|------|----------|
| $ H_{va12,E0}(f) $ | 67,1 | 66,8 | 17,4 | 16,2 | 12,9 | 11,1 | 1,00     |
| $ H_{va12,E1}(f) $ | 30,3 | 22,2 | 8,3  | 6,0  | 8,2  | 4,7  | 0,54     |
| $ H_{va12,E2}(f) $ | 11,2 | 9,9  | 5,4  | 3,2  | 3,9  | 3,1  | 0,25     |

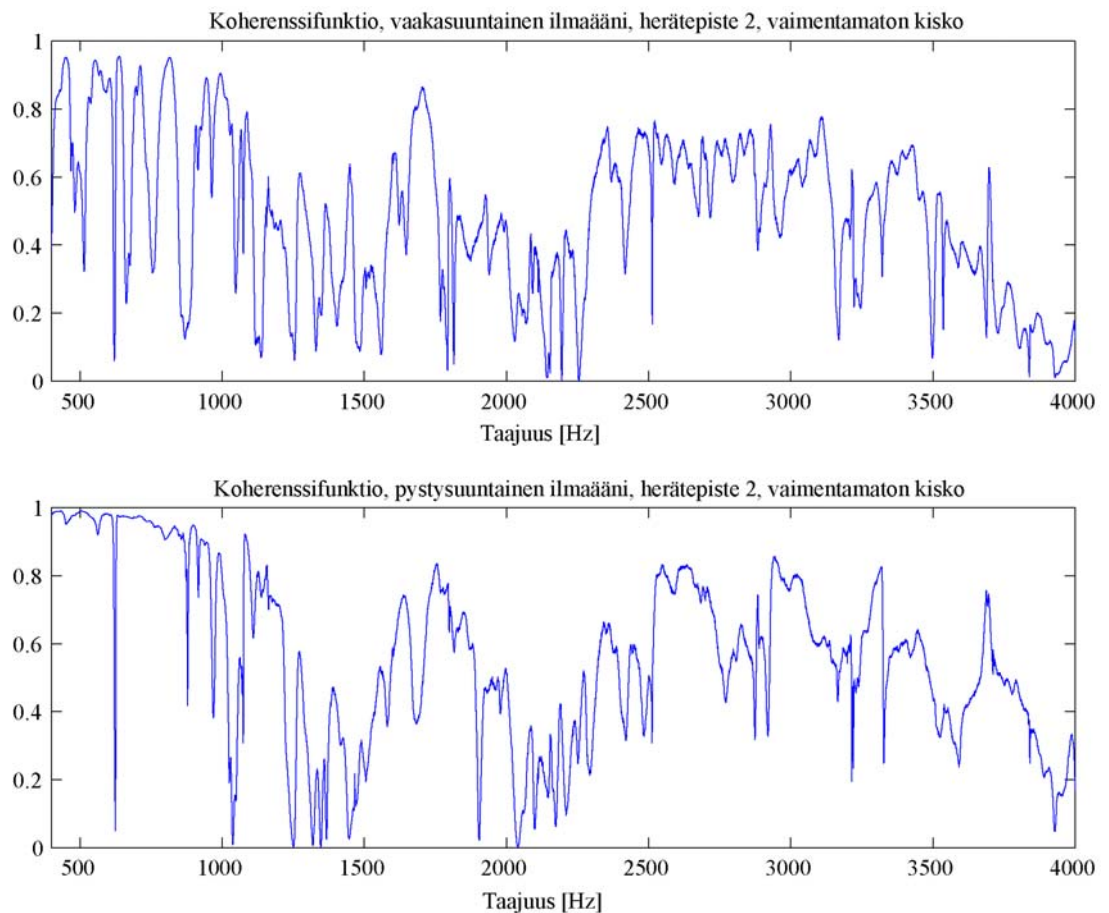
*Taulukko 14. Siirtofunktioiden oleelliset resonanssitaajuudet ja niiden amplitudit.*

| Taajuus [Hz]       | 1655 | 2520 | 3322 | 3215 | 2930 | 810  | Kok.teho |
|--------------------|------|------|------|------|------|------|----------|
| $ H_{va22,E0}(f) $ | 61,7 | 54,0 | 52,5 | 20,8 | 11,6 | 10,8 | 1,00     |
| $ H_{va22,E1}(f) $ | 46,9 | 14,5 | 20,8 | 8,1  | 5,5  | 7,1  | 0,66     |
| $ H_{va22,E2}(f) $ | 18,0 | 9,2  | 7,2  | 5,7  | 4,3  | 2,8  | 0,30     |

#### 4.6.5 Siirtofunktioiden koherenssi

Koherenssifunktion avulla voidaan arvioida vasteen riippuvuutta herätteestä. Alhainen koherenssifunktion arvo kertoo vasteen riippuvan myös joistakin muista tekijöistä kuin pelkästään herätteestä, mutta se ei ota muulla tavoin kantaa järjestelmän ominaisuuksiin. Järjestelmä voi olla epälineaarinen, herätteessä ja/tai vasteessa voi olla huomattavan paljon kohinaa tai vaste voi riippua mitatun herätteen lisäksi samanaikaisesti muista herätteistä. Myös spektriestimaattien laskennassa aiheutuneen systemaattiset resoluutiovirheet vaikuttavat koherenssin arvoon.

Vaaka- ja pystysuuntaisen ilmaäänen koherenssifunktiot vaimentamattomalla kiskolla on esitetty kuvassa 19. Heräte on kyseisissä tapauksissa kohdistettu pisteeseen 2.

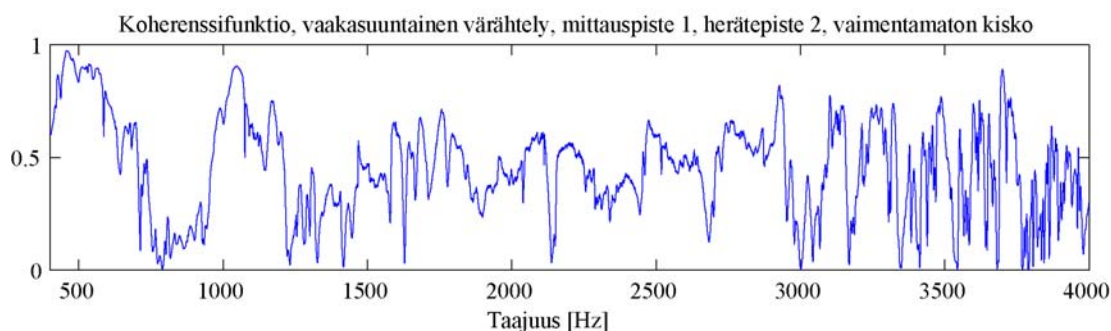


*Kuva 19. Vaaka- ja pystysuuntaisen ilmaäänen koherenssi, herätepiste 2, vaimentamaton kisko.*

Pystysuuntaisen ilmaäänen koherenssi on kohtuullisen hyvä matalilla taajuuksilla ( $f < 1$  kHz), mutta heikkenee ja vaihtelee voimakkaasti suuremmilla taajuuksilla. Vaakasuuntaisen ilmaäänen koherenssi on hyvin voimakkaasti vaihteleva tarkasteltavalla taajuuskaistalla. Syy heikkoon koherenssiin saattaa osittain olla herätteen generoimiseen käytetyn impulssivasaran kovamuovinen pää, joka ei välttämättä herättänyt riittävän voimakkaasti kiskon korkeampia värähtelymoodeja.

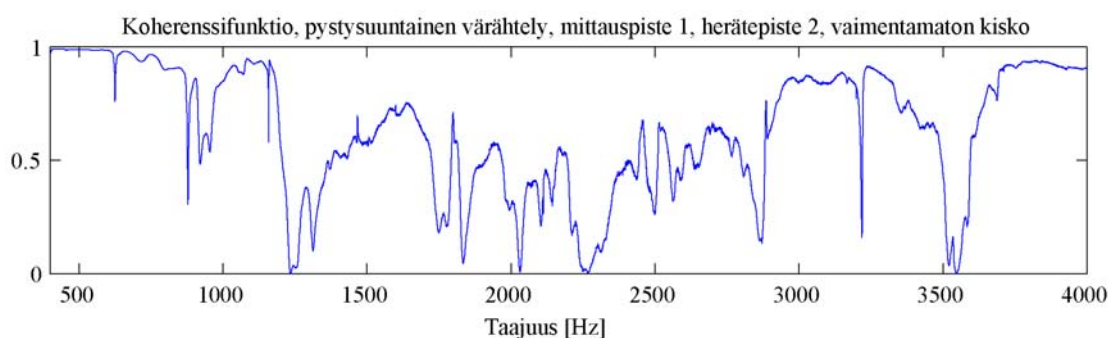
Mittauspisteestä 1 mitatun vaakasuuntaisen värähtelyn koherenssifunktio pisteeseen 2 kohdistetulla herätteellä on esitetty kuvassa 20.





*Kuva 20. Vaakasuuntaisen värähtelyn koherenssi, herätepiste 2, mittauspiste 1, vaimentamaton kisko.*

Vaakasuuntaisen värähtelyn koherenssi on myöskin hyvin voimakkaasti vaihteleva. Mittauspisteestä 1 mitatun pystysuuntaisen värähtelyn koherenssifunktio pisteeseen 2 kohdistetulla herätteellä on esitetty kuvassa 21.



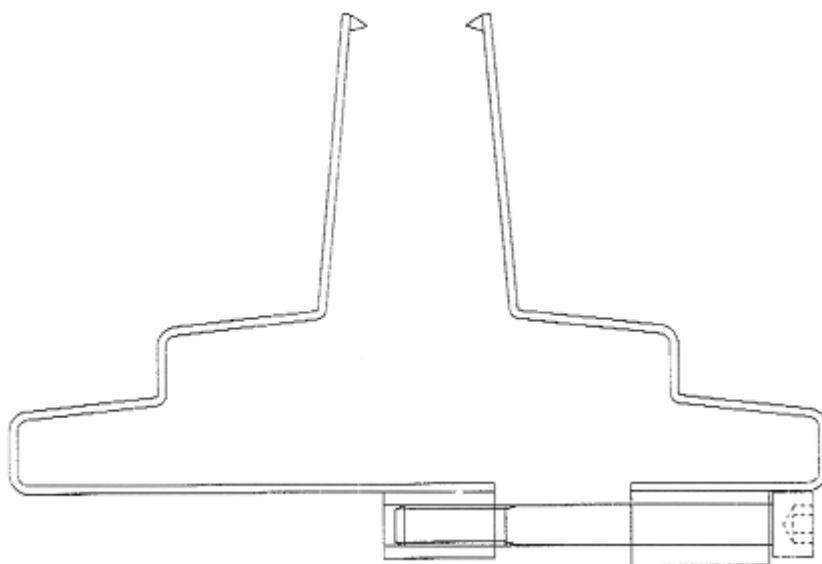
*Kuva 21. Pystysuuntaisen värähtelyn koherenssi, herätepiste 2, mittauspiste 1, vaimentamaton kisko.*

Kaikkien mitattujen vasteiden koherenssifunktiot on esitetty liitteessä 3. Muut koherenssifunktiot ovat hyvin samankaltaisia kuvissa 19, 20 ja 21 esitettyjen koherenssifunktioiden kanssa. Heikosta koherenssista voidaan päätellä, että laboratoriomittauksien tulokset eivät edusta pelkästään herätteen ja kunkin mitatun vasteen välistä riippuvuutta.

## 5 Kenttämittaukset

Vaimennuselementti E2 osoittautui suorituskyvyltään paremmaksi laboratoriomittauksissa ja valittiin kenttäkokeisiin jatkotutkimuksia varten. Kokeet suoritettiin loka-marraskuussa 2003 Turku-Tampere-rataosuudella Ypäjänselän ylikäytävän itäpuolella. Elementtien vaimennuskykyä oli alun perin tarkoitus arvioida sekä suoralla että kaarteisella rataosuudella, mutta päädyttiin kaarteeseen suuren kaarresäteen ( $r = 1767$  m) vuoksi arvioimaan elementtien toimintaa vain suoralla rataosuudella. Elementtejä asennettiin sadan metrin matkalle ja mittauspisteet sijaitsivat vaimennetun raideosion puolessavälissä.

Vaimennuselementtien kiinniketyyppi vaihdettiin kenttäkokeisiin. Kiinnikkeen muotoilulla pyritään välttämään suoraa metallikontaktia kiskon ja kiinnikkeen välillä, koska kiskon värähdellessä junan ohiajon aikana on mahdollista, että kiinnikkeet säteilevät ääntä. Kiinnike on myös kiristettävissä ruuvimekanismilla toisin kuin laboratoriomittauksissa käytetty jousivoimaan perustuva kiinnike. Parannellun kiinnikkeen piirros on esitetty kuvassa 19.



*Kuva 19. E2-elementin kiinnikkeet kenttäkokeissa.*

## 5.1 Mittauspisteet

Junan ohiajon aiheuttama melu mitattiin molemmilta puolin raidetta. Mittauspisteiden sijainti määritettiin sekä rataa reunustavien pylväiden että kiskon varteen piirrettyjen etäisyysmerkintöjen perusteella. Pylväs, jonka itäpuolella mittauspisteet sijaitsivat, oli merkitty muovilaatalla ”198-8” ja liitumerkinnällä ”474”. Mittauspisteiden kohdalla oli myös kiskossa merkintä ”460”.

Mikrofonit sijaitsivat etäisyydellä 7,5 m raiteen keskilinjasta ja korkeudella 1,2 m kiskon hamaran yläreunasta mitattuna. Kyseisen mittauspisteen sijainti on määritelty raideliikennemelun mittausmenetelmiä määrittelevässä standardissa [21]. Standardin mukaisesta pisteestä, joka sijaitsee etäisyydellä 25 m raiteen keskilinjasta ja korkeudella 3,5 m kiskon hamarasta, ei voitu mitata maasto-olosuhteiden vaikeuden vuoksi. Kenttäkoepaikka sijaitsi keskellä peltoaukeaa, ja molemmin puolin raidetta oli n. 15 m leveät ratapenkereet, joita reunustivat hyvin syvät ja leveät ojat. Mittausjärjestely suoralla rataosuudella on esitetty kuvassa 20.



*Kuva 20. Mittausjärjestely suoralla rataosuudella.*

Kiskojen kunto oli melko huono kenttäkoepaikalla. Kulutuspinnoissa oli selkeästi havaittavissa olevaa korrugaatiota (aaltomuodostumaa), jonka aallonpituus oli n. 4 cm. Korrugaatio on selkeästi nähtävissä kuvassa 21.



*Kuva 21. Korrugaatiota kiskon kulutuspinnoissa.*

## 5.2 Sääolosuhteet mittauspäivinä

Mittauspäivien valinta vuodenaikaan nähden oli vaikeaa. Tuuli, lämpötila ja ilman suhteellinen kosteus (RH) sekä sadeolosuhteet rajoittivat mittauspäivien lukumäärää. Sääolosuhteet vaihtelivat hieman mittauspäivien kesken, mutta yksittäisten päivien aikana säätila pysyi hyvin vakaana. Taulukossa 15 on esitetty säähavainnot kultakin mittauspäivältä.

*Taulukko 15. Sääolosuhteet mittauspäivinä.*

| <b>Päivämäärä</b> | <b>Pilvisyys</b> | <b>Lämpötila</b> | <b>RH</b> | <b>Tuuli</b> | <b>Ilmanpaine</b> |
|-------------------|------------------|------------------|-----------|--------------|-------------------|
| 5.12.03           | Selkeää          | 0,4 °C           | 81 %      | NW, 4 m/s    | 1000 hPa          |
| 9.12.03           | Selkeää          | -6,3 °C          | 94 %      | NW 1 m/s     | 998 hPa           |
| 19.12.03          | Pilvistä         | 2,8 °C           | 93 %      | SW 6 m/s     | 995 hPa           |

## 5.3 Mittauskalusto

Mittauspisteiden tuntumaan oli vaikea järjestää verkkojännitettä, joten mittauskaluston oli oltava täysin akkukäyttöinen. Mittauksissa käytettiin täsmälleen samoja mikrofoniapseleita ja -etuvahvistimia sekä Brüel & Kjær Nexus –vahvistinta kuin laboratoriokokeissakin. Nexus-vahvistimen ali- ja ylipäästösuotimet aseteltiin molemmille kanaville taajuuksille 20 Hz ja 22,4 kHz, ja ulostulotasoksi valittiin 31,6 mV/Pa. Mikrofonien herkkyystiedot aseteltiin vahvistimeen mikrofonien kalibrointitodistusten mukaisesti. Signaalit tallennettiin Apple PowerBook G3 -kannettavan tietokoneen avulla käyttäen tietokoneen omaa kaksikanavaista äänisisäänmenoa, joka täytti mittauksen edellyttämät laatuvaatimukset (dynamiikka 90 dB, taajuusvaste 30 Hz – 15 kHz  $\pm 0,5$  dB).

## 5.4 Mittauksen kulku

Mikrofonien signaalitaso tarkistettiin mittauspäivän alussa Brüel & Kjær 4231 –kalibraattorilla, joka tuottaa äänipainetason 94 dB (äänipaineen 1 Pa) taajuudella 1 kHz. Akkujen säästämiseksi Nexus-vahvistin sammutettiin ja PowerBook asetettiin Sleep-tilaan ohiajojen väliseksi ajaksi. Junien nopeudet saatiin VR:n kulkutiedoista junien pituuksien ja ohiajojen mitattujen kestojen avulla.

## 5.5 Analyysimenetelmät

Ohiajojen äänisignaalit kaistarajoitettiin Brüel & Kjær Nexus –vahvistimella, mutta signaaleille ei tallennusvaiheessa tehty muunlaista suodatusta. Näin meneteltiin, koska ohiajojen analyysi suoritettiin Matlab-ohjelmistolla jälkikäteen. Tässä kappaleessa esitetään analyysivaiheessa signaaleista lasketut tunnusluvut.

### 5.5.1 Aikatason tunnusluvut

#### 5.5.1.1 Aika- ja taajuuspainotetut äänitasot

Kuulo ei toimi huippuarvoilmaisimena, vaan eräänlaisena integraattorina äänipainesignaalin suhteen. Ohiajon aikaisen melun maksimiäänitasoa laskettaessa kuulon aikaominaisuudet tulisi ottaa huomioon. Melumittauksissa käytetään standardoituja aikapainotuksia, joista nk. *F*-painotus (fast) vastaa parhaiten kuulon toimintaa. *F*-painotussuotimen nousuaika on 125 ms ja kokonaisintegrointiaika 250 ms. *F*-painotettu äänitaso  $L_F$  lasketaan yhtälön 2 mukaisesti, äänisignaali  $p^2$  korvataan neliöidyllä äänisignaallilla, josta on laskettu liukuva keskiarvo aikaikkunalla, jonka pituus on 250 ms.

Melumittauksissa ylivoimaisesti yleisimmin käytössä oleva taajuuspainotus on nk. *A*-painotus, joka jäljittelee karkeasti kuulon herkkyyssäyrää taajuuden funktiona. Yleisesti liikennemelumittauksien tulokset ilmoitetaan *F*-aikapainotettuina *A*-äänitasoina  $L_{AF}$ . Tässä tutkimuksessa laskettiin melutapahtumista *AF*-painotettu maksimiäänitaso  $L_{AF,max}$  sekä ohiajon aikainen keskimääräinen *AF*-painotettu äänitaso  $L_{AF,mean}$ .

#### 5.5.1.2 Äänialtistustaso

Kertaluonteisien äänitapahtumien, kuten junien ohiajojen, aiheuttamaa ”meluannosta” kuvataan äänialtistustason  $L_E$  avulla. Äänialtistustaso on määritelty yhtälössä (4). Yleisesti äänialtistustaso ilmoitetaan myös taajuuspainotettuna muiden melua kuvaavien tunnuslukujen tapaan. Ohiajojen analyysissä on määritelty *A*-painotettu äänialtistustaso  $L_{AE}$ .

### *5.5.2 Aika-taajuustason analyysi*

Junan ohiajon aikainen melu ei ole lähietäisyydeltä mitattuna taajuuden eikä ajan suhteen stationääristä. Tarkasteltaessa melusignaalin spektriä ajanhetkillä, joilla junan telit ovat mittauspisteen kohdalla, on havaittavissa huomattavasti enemmän energiaa korkeilla taajuuksilla. Tämä johtuu pyörien ja kiskon säteilystä. Koska tutkimuksen tarkoituksena on tarkastella vaimennuselementtien toimintaa, ohiajoista on laskettu myös spektrogrammit, joista nähdään melun taajuuskäyttäytyminen ajan funktiona. Spektrogrammien laskennassa on käytetty Matlab-ohjelmiston *specgram*-funktia, jossa ikkunaksi määriteltiin Hamming-ikkuna (4096 näytettä eli ajassa n. 93 ms), ikkunoiden päällekkäisyydeksi 50 %, analyysikehyksen pituudeksi myöskin 4096 näytettä ja FFT:n kooksi 16384 pistettä.

### *5.5.3 Taajuustason analyysi*

Edellä mainittiin ohiajon melun epästationäärisyys. Kiinnostavia ajanhetkiä tämän tutkimuksen kannalta ovat ne hetket, jolloin junavaunujen telit ohittavat mittauspisteen eli hetket, jolloin äänitaso on suurimmillaan. Kaluston (junan pyörien) kunto saattaa vaihdella huomattavasti, mutta eräänlainen ohiajomelun spektriestimaatti saadaan keskiarvoistamalla telin ohituksen keskikohdalta lyhyen aikajakson ajalta (8192 näytettä, n. 186 ms) lasketut spektrit junatyypikohtaisesti. Spektrien laskennassa käytettiin FFT:n kokoa 65536 sekä *A*-painotettuja ohiajosignaaleita.

## 5.6 Tulokset

### *5.6.1 Suora rataosuus*

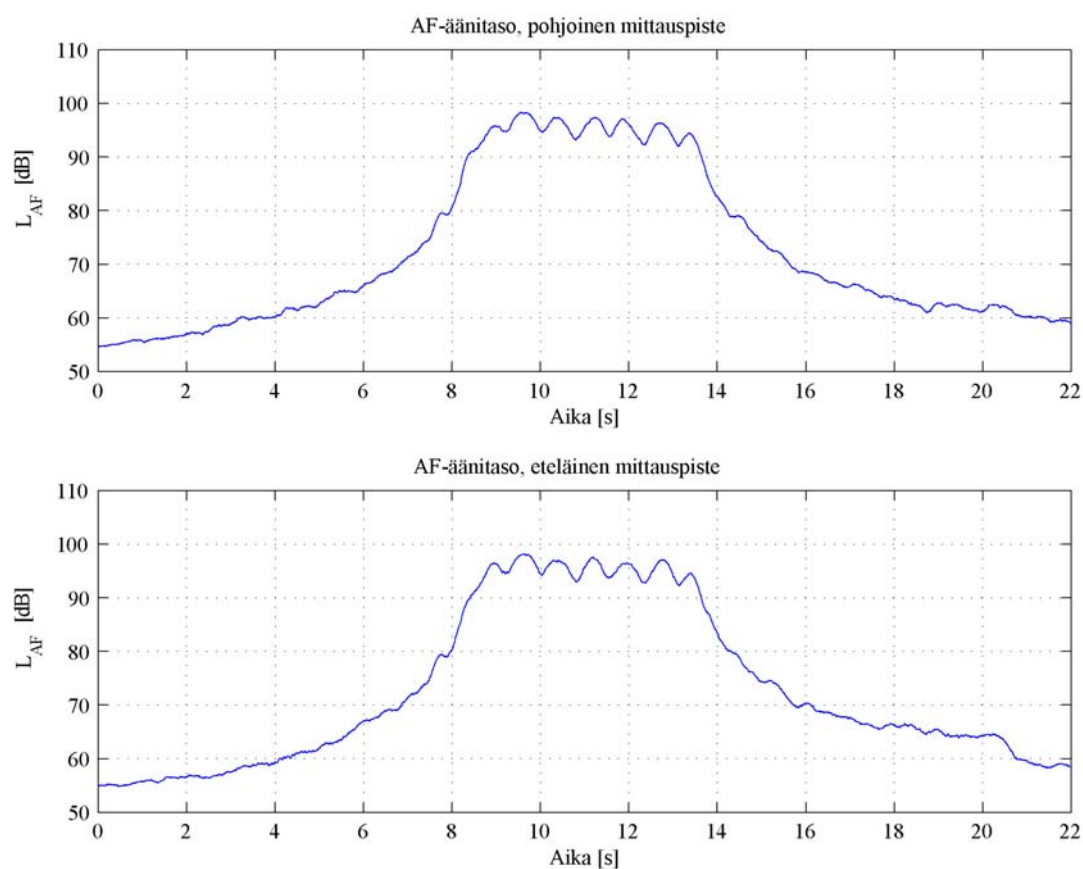
Suoran rataosuuden melumittaukset vaimennetuilla kiskoilla suoritettiin 5. ja 9.12.2003, ja vaimentamattomilla kiskoilla 19.12.2003. Vaimennettujen kiskojen mittauspäivinä maa oli vielä paljas, mutta vaimentamattomien kiskojen mittauspäivänä oli maassa n. 8 cm lumipeite. Raiteen ja mikrofonien välisen lyhyen etäisyyden vuoksi

lumipeitteen vaikutus mittauksiin on oletettavissa pieneksi. Kaikkina mittauspäivinä pohjoisemmassa mittauspisteessä käytettiin mikrofoniakapselia ja esivahvistinta, joiden sarjanumerot olivat 201351 ja 201950. Eteläisemmässä mittauspisteessä käytettyjen mikrofoniakapselin ja esivahvistimen sarjanumerot olivat 201377 ja 201949.

Mitatuista ohiajoista saatiin eriteltyä viisi hyvin samankaltaista paria, joilla vaimennuselementtien toimintaa voitiin suoranaisesti tarkastella. Kaikkien mitattujen ohiajaneiden junien tiedot ja ohiajoista lasketut tunnusluvut on esitetty liitteessä 4.

### 5.6.1.1 Aikatason tunnusluvut

Ohiajojen äänitasoista laskettiin  $L_{AF,mean}$ ,  $L_{AF,max}$  ja  $L_{AE}$ . Kuvassa 22 on esitetty esimerkkitapaus *AF*-painotetuista äänitasoista molemmista mittauspisteistä ajan funktiona. Ohiajanut juna oli pikajuna, jonka pituus oli 158 m ja nopeus 107 km/h. Kuvassa nähdään hyvin jokaisen telin aiheuttama äänitason nousu mittauspisteissä.



Kuva 22. Pikajunan aiheuttama *AF*-äänitaso suoralla, vaimentamaton kisko.  
Junan nopeus: 107 km/h, junan pituus: 158 m.



Taulukossa 16 on esitetty parivertailu viiden samankaltaisen junatyypin ohiajon *AF*-keskiäänitason osalta sekä vaimennetulla että vaimentamattomalla raiteella. Vaimennuselementtien toiminta on havaittavissa, mutta vertailuparien vähäisen lukumäärän vuoksi vahvoja johtopäätöksiä ei voida vetää niiden vaimennuskyvystä.

*Taulukko 16. AF-keskiäänitasojen parivertailu, pohjoisempi mittauspiste.*

|                | <b><math>L_{AF,mean}</math>, vaimentamaton</b> | <b><math>L_{AF,mean}</math>, vaimennettu</b> | <b>Vaimennus</b> |
|----------------|------------------------------------------------|----------------------------------------------|------------------|
| Vertailupari 1 | 94,6 dB                                        | 92,0 dB                                      | 2,6 dB           |
| Vertailupari 2 | 97,4 dB                                        | 96,1 dB                                      | 1,3 dB           |
| Vertailupari 3 | 97,2 dB                                        | 96,2 dB                                      | 1,0 dB           |
| Vertailupari 4 | 94,9 dB                                        | 92,6 dB                                      | 2,3 dB           |
| Vertailupari 5 | 95,0 dB                                        | 93,5 dB                                      | 1,5 dB           |

Taulukossa 17 on esitetty *AF*-keskiäänitasojen parivertailu raiteen eteläpuolelta mitattuna.

*Taulukko 17. AF-keskiäänitasojen parivertailu, eteläisempi mittauspiste.*

|                | <b><math>L_{AF,mean}</math>, vaimentamaton</b> | <b><math>L_{AF,mean}</math>, vaimennettu</b> | <b>Vaimennus</b> |
|----------------|------------------------------------------------|----------------------------------------------|------------------|
| Vertailupari 1 | 94,8 dB                                        | 91,2 dB                                      | 3,6 dB           |
| Vertailupari 2 | 97,3 dB                                        | 95,7 dB                                      | 1,6 dB           |
| Vertailupari 3 | 97,5 dB                                        | 96,1 dB                                      | 1,4 dB           |
| Vertailupari 4 | 94,9 dB                                        | 92,3 dB                                      | 2,6 dB           |
| Vertailupari 5 | 95,2 dB                                        | 93,0 dB                                      | 2,2 dB           |

Tasoero mittauspisteiden välillä vaimennetuissa äänitasoissa selittyy pohjoisemman ja eteläisemmän kiskon erilaisesta kuluneisuudesta ja mahdollisesti myös eroista vaimennuselementtien asennuksessa.

Maksimiäänitasojen vaimennus oli hieman vaihtelevampaa kuin keskiäänitasojen. Tämäkin selittyy suurelta osin vaihtelusta ohiajaneessa kalustossa. Taulukossa 18 on esitetty pohjoisemman mittauspisteen maksimiäänitasot sekä vaimennukset vertailupareille.

*Taulukko 18. AF-maksimiäänitasojen parivertailu, pohjoisempi mittauspiste.*

|                | <b><math>L_{AF,max}</math>, vaimentamaton</b> | <b><math>L_{AF,max}</math>, vaimennettu</b> | <b>Vaimennus</b> |
|----------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------------|------------------|
| Vertailupari 1 | 97,8 dB                                       | 95,4 dB                                     | 2,4 dB           |
| Vertailupari 2 | 100,7 dB                                      | 99,8 dB                                     | 0,9 dB           |
| Vertailupari 3 | 100,2 dB                                      | 99,6 dB                                     | 0,6 dB           |
| Vertailupari 4 | 98,3 dB                                       | 95,3 dB                                     | 3,0 dB           |
| Vertailupari 5 | 97,9 dB                                       | 96,7 dB                                     | 1,2 dB           |

Taulukossa 19 on esitetty eteläisemmän mittauspisteen vastaavat maksimiäänitasot ja vaimennukset.

*Taulukko 19. AF-maksimiäänitasojen parivertailu, eteläisempi mittauspiste.*

|                | <b><math>L_{AF,max}</math>, vaimentamaton</b> | <b><math>L_{AF,max}</math>, vaimennettu</b> | <b>Vaimennus</b> |
|----------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------------|------------------|
| Vertailupari 1 | 98,4 dB                                       | 93,8 dB                                     | 4,6 dB           |
| Vertailupari 2 | 100,7 dB                                      | 99,2 dB                                     | 1,5 dB           |
| Vertailupari 3 | 100,9 dB                                      | 99,3 dB                                     | 1,6 dB           |
| Vertailupari 4 | 98,2 dB                                       | 95,4 dB                                     | 2,8 dB           |
| Vertailupari 5 | 97,7 dB                                       | 96,7 dB                                     | 1,0 dB           |

Ohiajojen aiheuttamaa ”meluannosta” arvioitiin äänialtistustasojen avulla. Taulukossa 20 on esitetty pohjoisemman mittauspisteen äänialtistustasot ja vaimennukset vertailupareittain.

*Taulukko 20. A-äänialtistustasojen parivertailu, pohjoisempi mittauspiste.*

|                | <b><math>L_{AE}</math>, vaimentamaton</b> | <b><math>L_{AE}</math>, vaimennettu</b> | <b>Vaimennus</b> |
|----------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------|------------------|
| Vertailupari 1 | 102,5 dB                                  | 100,2 dB                                | 2,3 dB           |
| Vertailupari 2 | 106,3 dB                                  | 104,9 dB                                | 1,4 dB           |
| Vertailupari 3 | 105,6 dB                                  | 104,5 dB                                | 1,1 dB           |
| Vertailupari 4 | 102,7 dB                                  | 100,7 dB                                | 2,0 dB           |
| Vertailupari 5 | 103,1 dB                                  | 101,5 dB                                | 1,6 dB           |

Taulukossa 21 on esitetty äänialtistustasot ja vaimennukset vertailupareittain eteläisemmässä mittauspisteessä.

*Taulukko 21. A-äänialtistustasojen parivertailu, eteläisempi mittauspiste.*

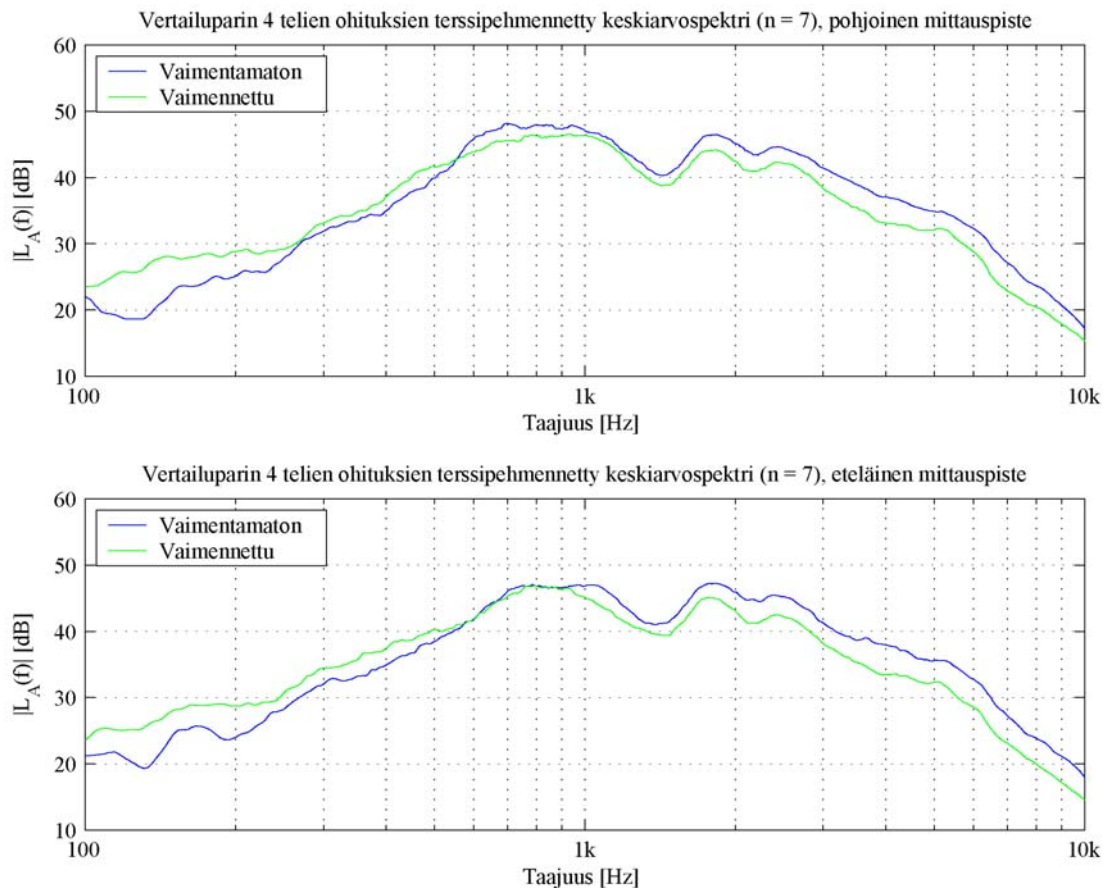
|                | <b><math>L_{AE}</math>, vaimentamaton</b> | <b><math>L_{AE}</math>, vaimennettu</b> | <b>Vaimennus</b> |
|----------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------|------------------|
| Vertailupari 1 | 102,7 dB                                  | 99,5 dB                                 | 3,2 dB           |
| Vertailupari 2 | 106,2 dB                                  | 104,5 dB                                | 1,7 dB           |
| Vertailupari 3 | 105,9 dB                                  | 104,4 dB                                | 1,5 dB           |
| Vertailupari 4 | 102,8 dB                                  | 100,4 dB                                | 2,4 dB           |
| Vertailupari 5 | 103,2 dB                                  | 101,0 dB                                | 2,2 dB           |

Vertailuparin 1 kohdalla havaittava suurempi vaimennus selittyy erolla vaimentamattoman ja vaimennetun äänitason mittauksen aikana ohiajaneen kaluston kunnossa.

#### **5.6.1.2 Taajuustason analyysi**

Yllämainittujen vertailuparien ohiajoista laskettiin myös keskiarvospektri jokaisen telin ohituksen ajalta. Vertailupareja käytettiin spektrien laskennassa, koska sekä ohiajomelun äänitaso että spektri riippuvat aina junan nopeudesta ja etenkin, jos kisko on voimakkaasti korrugoitunut. Spektrien laskennassa on käytetty *A*-painotettuja ohiajosignaaleita.

Vertailuparien terssipehmenneistä spektreistä nähdään, että vaimennuselementit alkavat vaikuttaa vasta taajuuden 1 kHz yläpuolella, ja matalammilla taajuuksilla vaikutus on hyvin vähäinen tai jopa vahvistava. Kuvassa 23 on esitetty vertailuparin 2 telien ohitusten terssipehmenneistä keskiarvospektrit molemmista mittauspisteistä.



Kuva 23. Vertailuparin 4 keskiarvospektrit.

Muiden vertailuparien vastaavat spektrit on esitetty liitteessä 5. Vaimennusta on havaittavissa yli 1 kHz:n taajuuksilla kaikissa spektreissä.

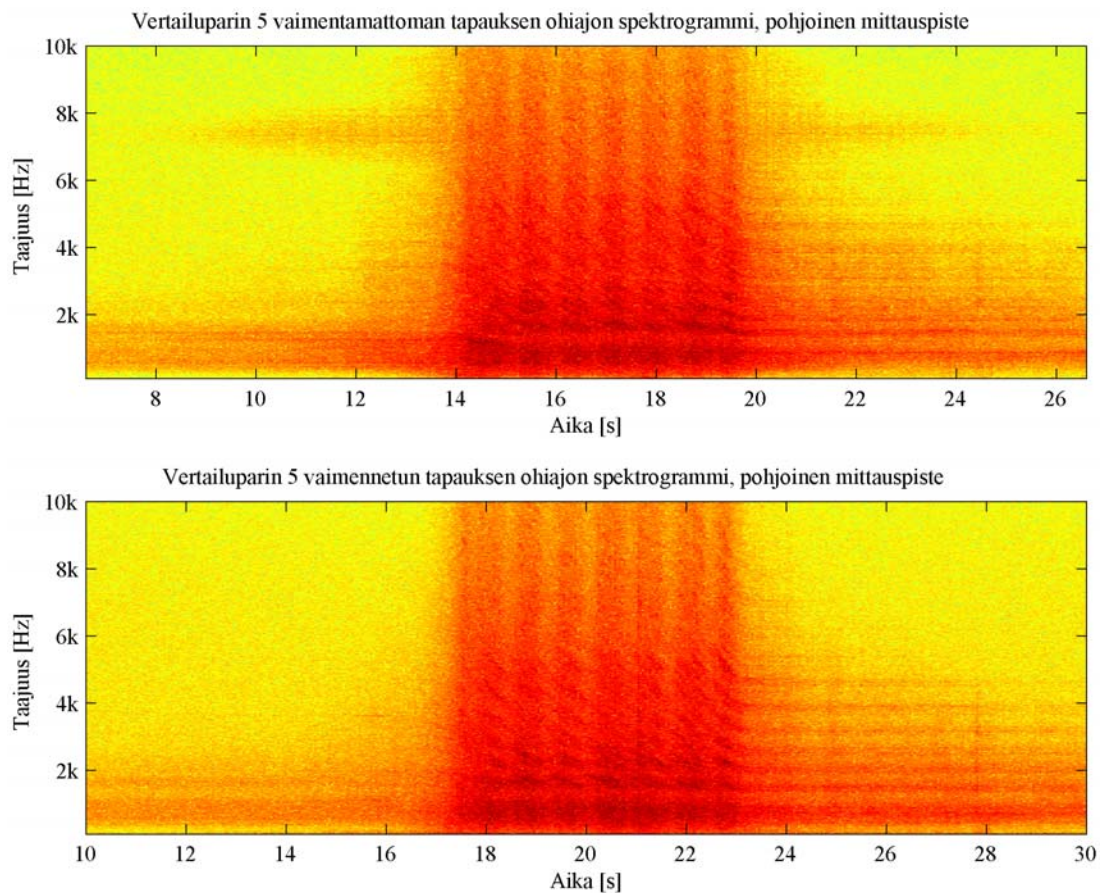
Vaimennusta on juuri sellaisella taajuusalueella, jolla kuulo on herkimmillään, joten lähietäisyydellä vaimennuselementtien vaikutus on ilmeisesti melun häiritsevyyttä pienentävä.

Vahvistusilmiö pienillä taajuuksilla saattaa johtua kevyen ja vaikeasti valmistusvaiheessa muotoiltavan vaimennuselementin huonosta kontaktista kiskon kanssa. Ohiajon aikana kisko ja vaimennuselementti saattavat muodostaa resonaattorin eli vaimennuselementti tärisee kiskon jalkaa vasten tietyillä taajuuksilla.

### 5.6.1.3 Aika-taajuustason analyysi

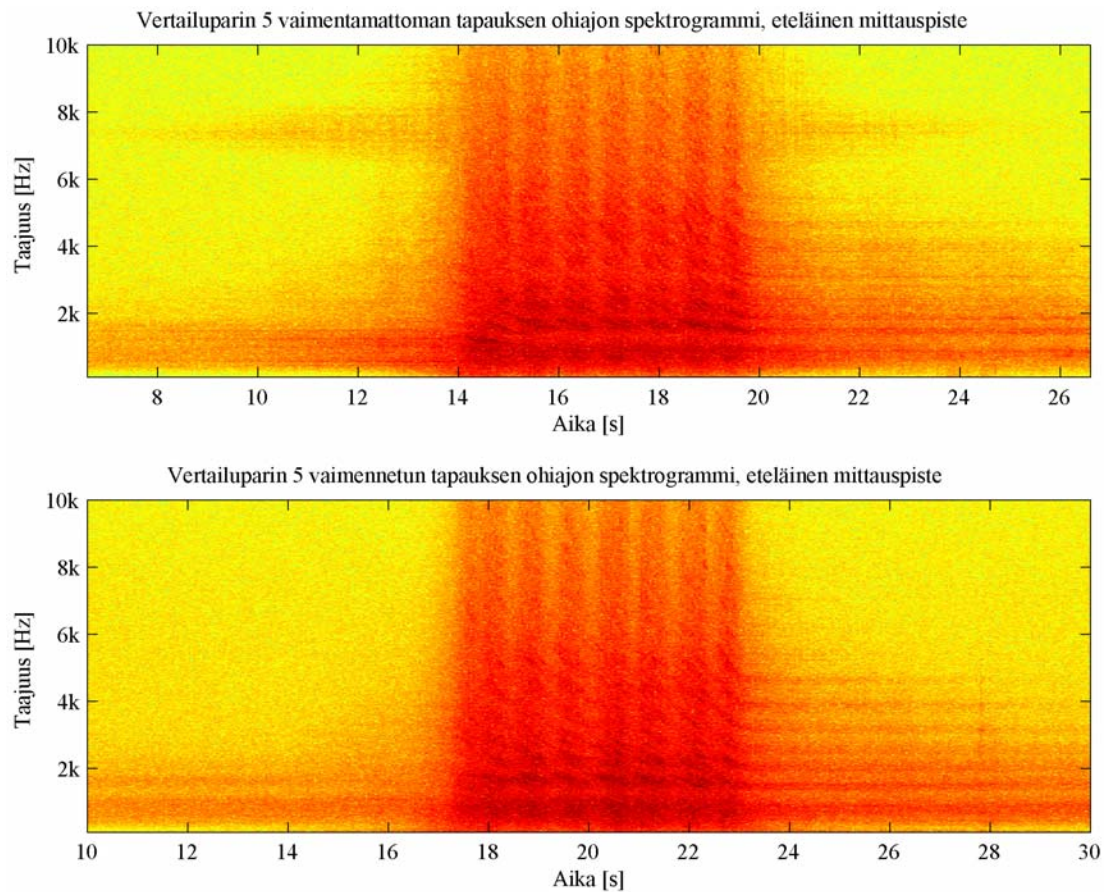
Ohiajomelun taajuuskäyttäytyminen ajan funktiona on voimakkaasti vaihtelevaa. Telien ohitusten kohdalla on ohiajon spektrissä huomattavasti energiaa suurilla taajuuksilla ja telien ohitusten välissä puolestaan vähemmän. Kuvassa 24 on esitetty

vertailuparin 5 ohiajojen pohjoisen mittauspisteen signaalista lasketut spektrogrammit. Laskennassa on käytetty *A*-painotettua ohiajosignaalia.



*Kuva 24. Vertailuparin 5 ohiajon spektrogrammit, pohjoinen mittauspiste.*

Spektrogrammeista on havaittavissa, että vaimentamaton kisko ”soi” taajuusalueella 6 kHz – 8 kHz ennen kuin juna saapuu mittauspisteen kohdalle sekä myös mittauspisteen ohittamisen jälkeen. Kiskon soiminen on selkeästi kuultavissa lähellä raidetta, mutta suurehkon taajuuden vuoksi soiminen vaimenee melko nopeasti etäisyyden funktiona. Kuvassa 25 on esitetty vastaavanlainen spektrogrammi vertailuparin 5 ohiajosignaalista eteläisessä mittauspisteessä.



*Kuva 25. Vertailuparin 5 ohiajon spektrogrammit, eteläinen mittauspiste.*

Tarkasteltaessa vaimennetun raiteen ohiajojen spektrogrammeja havaitaan, että kiskon soiminen on vaimentunut ja että telien ohituksien välillä suuret taajuudet ovat myös vaimeampia. Myös telien kohdalla äänitaso on hieman alhaisempi.

## 6 Yhteenveto

Raideliikenteen aiheuttaman melun syntymekanismeja on useita, ja lähes kaikki mekanismit ovat meluntorjunnan kannalta melko ongelmallisia. Pääasiassa raideliikennemelu aiheutuu kiskon ja junan pyörän välisestä kontaktivuorovaikutuksesta, ja junan ohiajon aiheuttamaan äänitasoon vaikuttaa hyvin oleellisesti sekä pyörän että kiskon kulkupinnan epätasaisuus. Erityisesti korrugoituneella kiskolla on havaittavissa melua, joka on sekä korrugaation aallonpituudesta että junan nopeudesta riippuvan taajuuden ympärille keskittynyttä. Sekä junan pyörät että kisko säteilevät ääntä.

Hyvin pitkiä junia voidaan käsitellä tietyllä tarkkuudella akustisena viivalähteenä, jonka säteilykuvio on sylinteriaalto. Ideaalisen viivalähteen säteilemän äänitehon aiheuttama äänipainetaso vaimenee vain 3 dB etäisyyden kaksinkertaistuessa. Koska ideaalisen viivalähteen pituus on ääretön, etäisyysvaimeneminen on kuitenkin käytännössä suurempi, mutta pistelähteen etäisyysvaimenemista (6 dB) pienempi.

Eräs syntymekanismiltaan hyvin monimutkainen raideliikennemelun tyyppi on kaarremelu, joka aiheutuu junan pyörän luisumisesta kiskon hamaran päällä; kaarteissa raiteen tangentin ja junan pyörän kulkusuunnan välille muodostuu kaarevuussäteestä riippuva kulma. Junan pyörän laippa saattaa myös hangata kiskon hamaran sivuun kaarteissa, joissa on hyvin pieni kaarresäde. Kaarremelu on luonteeltaan hyvin häiritsevää kirskuntaa.

Junien ilmanvastuksesta johtuva aerodynaaminen melu ei ole vielä tämänhetkisellä suomalaisella kalustolla huomattava raideliikennemelun lähde. Aerodynaaminen melu alkaa olla huomattavaa vasta yli 250 km/h nopeuksilla. Suomen rataverkon lyhyiden asemavälien vuoksi hyvin nopeiden junien aiheuttama säästö matkustusajassa on marginaalinen, ja sekä kalustolle että raiteille asetettavat vaatimukset nousevat, joten aerodynaaminen melu tuskin tulee olemaan huomattavaa tulevaisuudessakaan.

Raideliikennemelun vaimentamiseen voidaan soveltaa erilaisia menetelmiä kohteesta riippuen. Meluvalleilla päästään usein hyviin vaimennustuloksiin, mutta tehokkaat vallit ovat massiivisia ja kalliita rakentaa, joten ne eivät sovellu kaikkialle. Itse kaluston ja raiteen kulutuspiintojen huoltamisella voidaan saavuttaa huomattavaa vaimennusta. Kiskojen hionta on valitettavasti myöskin kallis toimenpide, ja junien pyöriäkin sorvataan melko pitkin määräväleihin ja vakavien lovipyörien tapauksissa. Uusia

vaimennusmenetelmiä on tutkittu viime aikoina, ja tulokset ovat olleet lupaavia. Pyörän säteilyn vaimentamista on menestyksekkäästi kokeiltu, ja kiskoon kiinnitettävät vaimennuselementit, jotka tähtäävät kiskon värähtelykäyttäytymisen muuttamiseen massanlisäyksen avulla, vaimentavat myös hieman kulkumelua. Pyörän säteilyn vaimentamista on myös tutkittu asentamalla junavaunuihin telien kohdalle ääntä absorboivalla materiaalilla vuorattuja katteita, ja vaimennukset A-äänitasoilla ovat olleet huomattavia (jopa 10 dB).

Tämän työn kokeellisessa osassa tutkittiin Teknikum Oy:n kehittämien kiskoon kiinnitettävien vaimennuselementtien kykyä vaimentaa raideliikennemelua. Kokeita suoritettiin sekä laboratorio-olosuhteissa että kentällä. Laboratoriossa mitattiin kiskon siirtofunktio impulssivasaraherätteestä pysty- ja vaakasuuntaiseen värähtelyyn sekä pysty- ja vaakasuuntaiseen ilmaääneen. Mittaustulokset kertovat vaimennuselementtien vaimentavan sekä kiskon säteilemään ääntä että kiskon värähtelyä, mutta mittaustuloksien edustavuus on lopulta heikko: herätteen ja vasteen suorasta riippuvuudesta kertovat koherenssifunktiot ovat hyvin vaihtelevia. Pystysuuntaisen värähtelyn koherenssi on pienillä taajuuksilla ( $f < 1$  kHz) hyvä, mikä saattaa viitata herätteen antamiseen käytetyn impulssivasaran kovamuovisen pään kyvyttömyydestä herättää kiskon korkeampia värähtelymoodeja. Laboratoriomittauksien tekeminen tällaisenaan ei ole hyvä keino arvioida vaimennuselementtien toimintaa. Koekisko oli hyvin lyhyt verrattuna kenttäolosuhteisiin ja tuettu vain päistään, kun taas todellisessa asennuksessa kiskon hyvin jäykkä kiinnitys ratapölkkyihin 60 cm:n välein muuttaa oleellisesti kiskon värähtelykäyttäytymistä. Toisaalta ratapölkkyjä ei voida tuoda kaiuttomaan huoneeseen verkkolattian rajallisen kantavuuden vuoksi.

Vaimennuselementti E2 valittiin koeasennukseen Turku-Tampere-rataosuudelle Ypäjänselän tuntumaan. Elementin toimintaa arvioitiin vain suoralla rataosuudella aikataulullisten ja sääolosuhteiden aiheuttamien ongelmien vuoksi. Alkuperäisen suunnitelman mukainen kaarreosuus oli tosin kaarevuussäteeltään niin suuri ( $r = 1767$  m), ettei kaarremelua välttämättä olisi edes syntynyt merkittävästi. Mitatuista ohiajoista saatiin valittua viisi vertailuparia. *AF*-painotetuilla keskiäänitasoilla ohiajomelun vaimennus oli 1,0-3,6 dB, *AF*-painotetuilla maksimiäänitasoilla 0,6-4,6 dB ja *A*-painotetuilla äänialtistustasoilla 1,1-3,2 dB. Vertailuparien vähäisen määrän vuoksi tilastollista merkittävyyttä ei voida mittaustuloksille mielekkäästi määrittää, mutta tulokset ovat oikeansuuntaisia ja lupaavia. Elementillä E2 saavutetaan vaimennusta suurilla taajuuksilla ( $f > 1$  kHz), joten vaimennuselementillä saattaa olla melun



häiritsevyyttä pienentävä vaikutus, koska ihmisen kuulojärjestelmä on herkimmillään taajuusalueella 2 kHz – 4 kHz. Pienillä taajuuksilla oli havaittavissa jopa vahvistusta, mikä saattaa johtua elementin resonoinnista kiskoa vasten ohiajon aikana. Mittauskohteen kiskojen huonon kunnon vuoksi elementin E2 mitattu vaimennus saattaa olla pienempi kuin hyväkuntoisella kiskolla, koska kiskon epätasaisuus aiheuttaa myös junan pyörään vahvemman herätteen ja siten myös voimakkaamman värähtelyn.

Tämän työn loppuvaiheilla kävi ilmi, että vaimennuselementtiä E2 ei voida asentaa pysyvästi raiteeseen, koska sen muotoilu haittaa erään raiteen huoltotoimenpiteissä käytettävän koneen toimintaa.

## 7 Jatkotutkimusehdotukset

Vaimennuselementtien laboratoriotutkimus ei osoittautunut hyväksi keinoksi arvioida vaimennuselementtien toimintaa, koska kiskoa ei saada kaiuttomassa huoneessa asennettua realistisia olosuhteita vastaavalla tavalla. Mikäli tässä työssä tutkittuja vaimennuselementtejä aiotaan tutkia myös jatkossa, tutkimus olisi syytä suunnata nimenomaan kenttäolosuhteisiin, joissa pystytään luotettavammin arvioimaan elementtien vaimennuskykyä. Koska vaimennuselementtiä E2 ei voida käyttää pysyväisasennettuna, olisi hyvä tehdä koeasennus myös elementillä E1 ja mitata sen avulla saavutettava ohiajomelun vaimennus. Elementillä E1 saatetaan päästä parempiin vaimennuslukemiin, koska elementin pituusmassan (7 kg/m) aiheuttama kiskon pituusmassan lisäys vaikuttanee merkittävästi kiskon värähtely-käyttäytymiseen. Kuten kappaleessa 3.2.4 todettiin, pelkkään massanlisäykseen (14 % - 28 %) perustuvilla värähtelyvaimentimilla on saavutettu suuruusluokkaa n. 2 dB vaimennus. Elementin E1 aiheuttama pituusmassan lisäys on juuri tätä suuruusluokkaa 54 E 1 –kiskolla.

Kenttämittauksissa tulisi mitata suuri määrä ohiajoja sekä vaimentamattomalla että vaimennetulla raiteella, sillä mittausdatan tilastollisen analysoinnin mahdollistamiseksi on saatava riittävä määrä samankaltaisia vertailupareja. Mittauskohteessa olisi hyvä suorittaa kiskojen hionta ennen melumittauksia, jotta pystyttäisiin paremmin arvioimaan vaimennuselementtien kykyä vaimentaa kiskon värähtelyä ja sen säteilemää ääntä. Kohteen maasto-olosuhteiden tulisi mielellään mahdollistaa mittaamisen myös 25 m:n etäisyydeltä raiteen keskilinjasta ja 3,5 m:n korkeudelta kiskon hamarasta; tämän mittauspisteen avulla voitaisiin paremmin arvioida melua tyypillisen havainnointitilanteen kannalta. Suoralla rataosuudella melumittaukset voidaan suorittaa yhdeltä puolen rataa, mikäli kiskojen kuluneisuus on yhdenmukainen mittauskohteessa. Jos kaarremelun vaimennusta halutaan tutkia, tulisi mittauskohteeksi valita kaarre, jonka kaarevuussäde on riittävän pieni, jotta kaarremelua varmasti syntyy. Kaarremittauksissa on mielekästä mitata ohiajomelu molemmiin puoliin raidetta. Mittaukset tulee suorittaa kesäaikaan siten, että eri mittauskerroilla olosuhteet ovat riittävän samanlaiset.

Tässä työssä tehtyjen havaintojen perusteella kiskoon kiinnitettävistä vaimennuselementeistä on pientä hyötyä raidemelun vaimentamisessa. Vaimennuselementti E2:n tapauksessa saavutettu hyöty on juuri kuultavissa, jos

ohiajoja vertailtaisiin välittömästi lähietäisyydellä. Jotta melutapahtuman havainnoitsija havaitsisi eron kahden pitkän aikajakson erottaman melutapahtuman välillä, tulisi vertailtavien melutapahtumien äänitasojen erotuksen olla selvästi suurempi kuin se erotus, joka saavutetaan vaimennuselementti E2:n avulla. Siksi olisikin syytä tutkia vaimennuselementtien ja luvussa 3.2 mainittujen muiden meluntorjunta-toimenpiteiden, kuten pyörävaimentimien tai telikatteiden, yhteiskäyttöä raideliikenteen aiheuttaman melun torjunnassa.

## 8 Viitteet

1. Bai, M.R.; Chen, H.; 2000, Active cancellation of noise in a car cabin using the zero spillover controller, *Journal of Sound and Vibration*, 235 (5), s. 787-800.
2. de Beer, F.G.; Janssens, M.H.A.; Kooijman, P.P.; 2003, Squeal noise of rail-bound vehicles influenced by lateral contact position, *Journal of Sound and Vibration*, 267, s. 497-507.
3. Dings, P.; Verheijen, E.; Kootwijk-Damman, C.; 2000, A traffic-dependent acoustical grinding criterion, *Journal of Sound and Vibration*, 231 (3), s. 941-949.
4. EN 1793-1, Road traffic noise reducing devices. Test method for determining the acoustic performance. Intrinsic characteristics of sound absorption.
5. EN 1793-2, Road traffic noise reducing devices. Test method for determining the acoustic performance. Intrinsic characteristics of airborne sound insulation.
6. EN 1793-3, Road traffic noise reducing devices. Test method for determining the acoustic performance. Normalized traffic noise spectrum.
7. Eurasto, R.; 1995, Kiskon pinnan vaikutus raideliikennemelun laskentamallin lähtöarvoihin, *VTT Tiedotteita*, 1719.
8. Fingberg, U.; 1990, A model of wheel-rail squealing noise, *Journal of Sound and Vibration*, 143, s. 365-377.
9. Färm, J.; 2003, Evaluation of wheel dampers on an intercity train, *Journal of Sound and Vibration*, 267, s. 739-747.
10. Harris, C.M.; 1991, *Handbook of Acoustical Measurements and Noise Control*, 3. painos, McGraw-Hill.

11. Jayachandran, V.; Meyer, N.E.; Westervelt, M.A.; Sun, J.Q.; 1999, Piezoelectrically driven speakers for aircraft interior noise suppression, *Applied Acoustics*, 56, s. 263-277.
12. *Junaturvallisuuksääntöön liittyvät tekniset määräykset ja ohjeet (Jtt)*, 8. painos, Ratahallintokeskus, Helsinki 2002.
13. Järveläinen, H.; Karjalainen, M.; Maijala, P.; Saarinen, K.; Tanttari, J.; *Työkoneiden ohjaamomelun häiritsevyys ja sen vähentäminen*, ISBN 951-22-3967-1, Espoo 1998, ss. 173.
14. Karjalainen, M.; *Kommunikaatioakustiikka*, ISBN 951-22-4597-3, Otamedia Oy, Espoo 2000, ss. 237.
15. Kim, H-S.; Park, Y.; 1998, Delayed-X algorithm: an efficient ANC algorithm utilizing robustness of cancellation path model, *Journal of Sound and Vibration*, 212 (5), s. 875-887.
16. Lahti, T., *Akustinen mittaustekniikka*, ISBN 951-22-2901-3, Otaniemi 1997, ss. 152.
17. Landaluze, J.; Portilla, I.; Pagalday, J.M.; Martínez, A.; Reyero, R.; 2003, Application of active noise control to an elevator cabin, *Control Engineering Practice*, 11, s. 1423-1431.
18. *Meluestekäsikirja*, 1997, Suomen Kuntatekniikan Yhdistyksen julkaisu, ISBN 952-9710-02-X, ss. 121.
19. Mosquera, C.; Pérez-González, F.; 2000, Convergence analysis of the multiple-channel filtered-U recursive LMS algorithm for active noise control, *Signal Processing*, 80, s. 849-856.
20. Nielsen, J.C.O.; 2000, Acoustic optimization of railway sleepers, *Journal of Sound and Vibration*, 231 (3), s. 753-764.

21. prEN ISO 3095: Acoustics, Measurement of noise emitted by railbound vehicles, European Committee for Standardisation, 1999.
22. Remington, P.J.; Wheel/Rail Noise – IV: rolling noise, *Journal of Sound and Vibration*, 46, s. 419-436.
23. Remington, P.; Webb, J.; 1996, Estimation of wheel/rail interaction forces in the contact area due to roughness, *Journal of Sound and Vibration*, 196 (1), s. 83-102
24. Talotte, C.; 2000, Aerodynamic Noise: A Critical Survey, *Journal of Sound and Vibration*, 231 (3), s. 549-562.
25. Thompson, D.J.; Hemsworth, B.; Vincent, N.; 1995, Experimental validation of the TWINS prediction program for rolling noise, part 1: description of the model and method, *Journal of Sound and Vibration*, 193 (1), s. 123-135.
26. Thompson, D.J.; 1996, On the relationship between wheel and rail surface roughness and rolling noise, *Journal of Sound and Vibration*, 193 (1), s. 149-160
27. Thompson, D.J.; Jones, C.J.C; 2000, A review of the modelling of wheel/rail noise generation, *Journal of Sound and Vibration*, 231 (3), s. 519-536.
28. Thompson, D.J.; 2003, The influence of the contact zone on the excitation of wheel/rail noise, *Journal of Sound and Vibration*, 267, s. 523-535.
29. Vincent, N.; Bouvet, P.; Thompson, D.J.; Gautier, P.E.; 1996, Theoretical optimization of track components to reduce rolling noise, *Journal of Sound and Vibration*, 193 (1), s. 161-171.
30. Vincent, N.; 2000, Rolling noise control at source: state-of-the-art survey, *Journal of Sound and Vibration*, 231 (3), s. 865-876.
31. de Vos, P.H.; Lammers, I.S.; 1995, Noise Barriers: State of the Art, *EUROECRAN Project Report*, ss. 41.

32. Wirnsberger, M.; Dittrich, M.; 1999, *The METARAIL Project – Final Report for Publication*, ss. 105.
33. Wright, S.E.; Vuksanovic, B; 1996, Active control of environmental noise, *Journal of Sound and Vibration*, 190 (3), s. 565-585.
34. Wu, T.X.; Thompson, D.J.; 2002, A hybrid model for the noise generation due to railway wheel flats, *Journal of Sound and Vibration*, 251 (5), s. 115-139.
35. Wu, T.X.; Thompson, D.J.; 2003, On the impact noise generation due to a wheel passing over rail joints, *Journal of Sound and Vibration*, 267, s. 485-496.
36. Jauhiainen, T.; Vuorinen, H.; Heinonen-Guzejev, M.; Paikkala, S-L; *Ympäristömelun vaikutukset*, ISBN 952-11-0122-9, Oy Edita Ab, Helsinki 1997.
37. ISO 226:2003, Acoustics – Normal equal loudness contours.

## Liite 1: Kalibrointitodistukset



# Free-field 1/2" Microphone

Type 4191

Calibration Chart

Serial No: 2017377

Open-circuit Sensitivity,  $S_e$ :

-38.3 dB re 1V/Pa

12.2 mV/Pa

Equivalent to:

Uncertainty, 95 % confidence level

Capacitance:

Valid At:

Temperature:

Ambient Static Pressure:

Relative Humidity:

Frequency:

Polarization Voltage, external:

Sensitivity Traceable To:

DPLA: Danish Primary Laboratory of Acoustics

NIST: National Institute of Standards and Technology, USA

IEC 1094-4: Type WS 2 F

Environmental Calibration Conditions:

101.7 kPa

24 °C

31 % RH

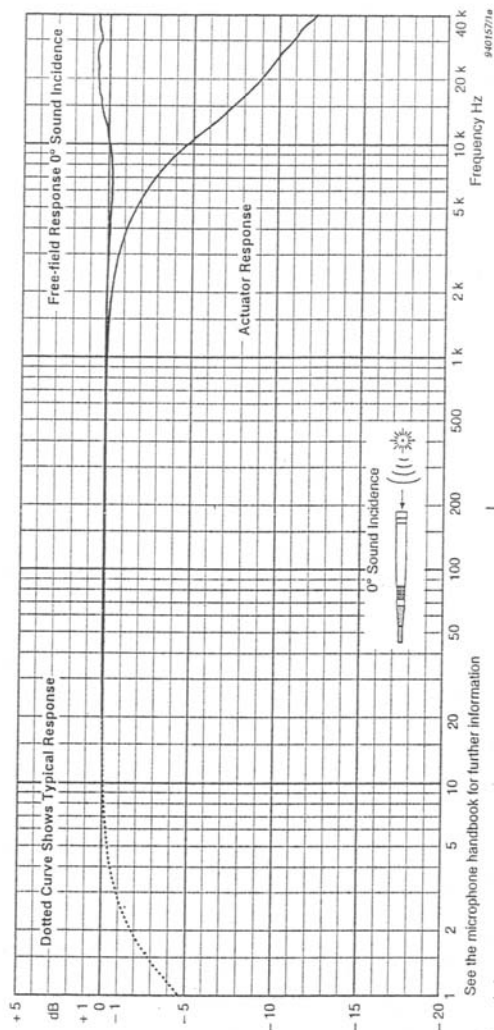
Procedure: 704217

Date: 29 Jan. 1998

Signature:

\* $K_0 = -26 - S_0$  Example:  $K_0 = -26 - (-38) = +12$  dB

BC 0226 - 12



## Free-field 1/2" Microphone Type 4191

Calibration Chart

Serial No: 2017351

Open-circuit Sensitivity,  $S_e$ :

-37.9 dB re 1V/Pa

12.8 mV/Pa

Equivalent to:

Uncertainty, 95 % confidence level

Capacitance:

Valid At:

Temperature:

Ambient Static Pressure:

Relative Humidity:

Frequency:

Polarization Voltage, external:

Sensitivity Traceable To:

DPLA: Danish Primary Laboratory of Acoustics

NIST: National Institute of Standards and Technology, USA

IEC 1094-4: Type WS 2 F

Environmental Calibration Conditions:

101.7 kPa

24 °C

31 % RH

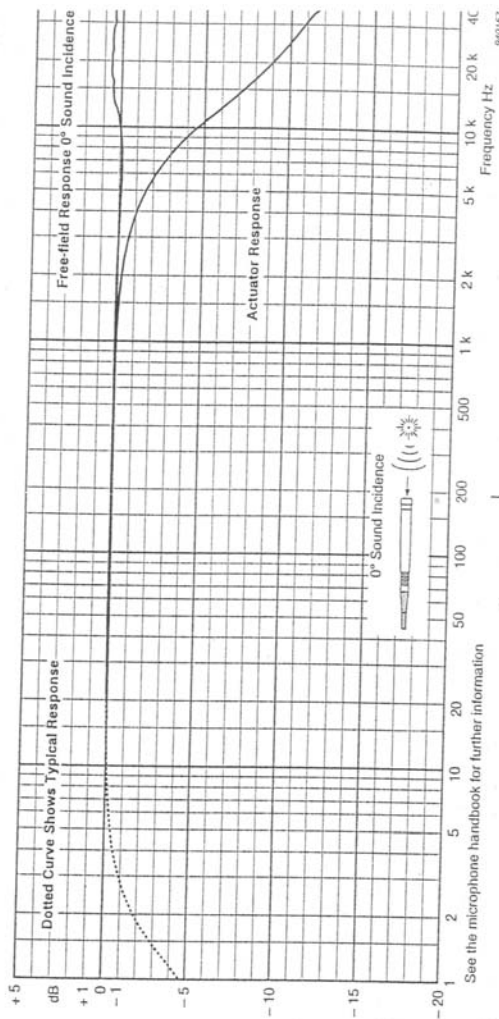
Procedure: 704217

Date: 29 Jan. 1998

Signature:

\* $K_0 = -26 - S_0$  Example:  $K_0 = -26 - (-38) = +12$  dB

BC 0226 - 12



# — Calibration Certificate —

Per ISA-RP37.2

Model No. 333A32

Serial No. 7659

PO No. \_\_\_\_\_ Customer \_\_\_\_\_

Calibration traceable to NIST thru Project No. 822/256889

**ICP® ACCELEROMETER**  
with built-in electronics

Calibration procedure is in compliance with  
ISO 10012-1, and former MIL-STD-45662A  
and traceable to NIST.

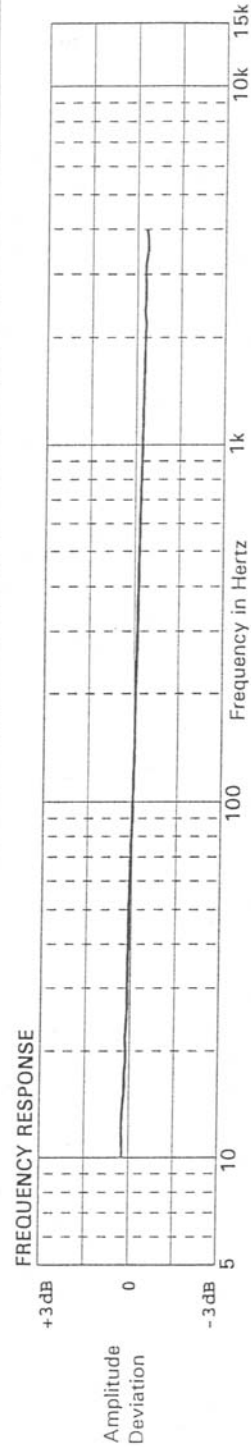
## CALIBRATION DATA

Voltage Sensitivity **99.5** mV/g  
Transverse Sensitivity **1.2** %  
Resonant Frequency **35.5** kHz  
Output Bias Level **10.3** V  
Time Constant **1.6** s

## KEY SPECIFICATIONS

Range **50**  $\pm g$   
Resolution **0.0003** g  
Temp. Range **-65/+250** °F  
METRIC CONVERSIONS:  
 $ms^{-2} = 0.102 g$   
 $^{\circ}C = 5/9 \times (^{\circ}F - 32)$

| Frequency           | Hz | Reference Freq. |     |     |     |     |      |      |      |      |      |
|---------------------|----|-----------------|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|
|                     |    | 10              | 15  | 30  | 50  | 100 | 300  | 500  | 1000 | 3000 | 4000 |
| Amplitude Deviation | %  | 2.8             | 2.2 | 1.5 | 1.1 | 0.0 | -1.1 | -1.6 | -2.4 | -3.0 | -3.4 |



**PCB®**

Piezotronics, Inc. 3425 Walden Avenue Depew, NY 14043-2495 USA  
716-684-0001

Calibrated by Thomas Witnauer  
Date 04-15-1998

# — Calibration Certificate —

Per ISA-RP37.2

Model No. 333A32

Serial No. 7655

PO No. \_\_\_\_\_ Customer \_\_\_\_\_

Calibration traceable to NIST thru Project No. 822/256889

## ICP® ACCELEROMETER

with built-in electronics

Calibration procedure is in compliance with  
ISO 10012-1, and former MIL-STD-45662A  
and traceable to NIST.

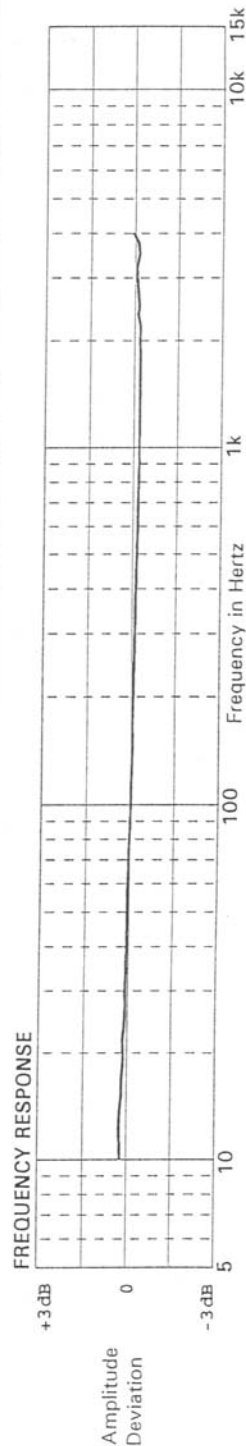
### CALIBRATION DATA

Voltage Sensitivity **101.0** mV/g  
Transverse Sensitivity **2.3** %  
Resonant Frequency **34.5** kHz  
Output Bias Level **10.5** V  
Time Constant **1.7** s

### KEY SPECIFICATIONS

Range **50**  $\pm$  g  
Resolution **0.0003** g  
Temp. Range **-65/+250** °F  
METRIC CONVERSIONS:  
ms<sup>-2</sup> = 0.102 g  
°C = 5/9 x (°F - 32)

| Frequency           | Hz | Reference Freq. |     |     |     |     |      |      |      |      |      |
|---------------------|----|-----------------|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|
|                     |    | 10              | 15  | 30  | 50  | 100 | 300  | 500  | 1000 | 3000 | 4000 |
| Amplitude Deviation | %  | 2.8             | 2.3 | 1.4 | 1.0 | 0.0 | -1.1 | -1.6 | -2.1 | -0.7 | 1.1  |



Piezotronics, Inc. 3425 Walden Avenue Depew, NY 14043-2495 USA

716-684-0001

Calibrated by Chuck Dimaggio

Date 04-15-1998

# — Calibration Certificate —

Per ISA-RP37.2

Model No. 333A32

Serial No. 7371

PO No. \_\_\_\_\_ Customer \_\_\_\_\_

Calibration traceable to NIST thru Project No. 822/256889

**ICP® ACCELEROMETER**  
with built-in electronics

Calibration procedure is in compliance with  
ISO 10012-1, and former MIL-STD-45662A  
and traceable to NIST.

## CALIBRATION DATA

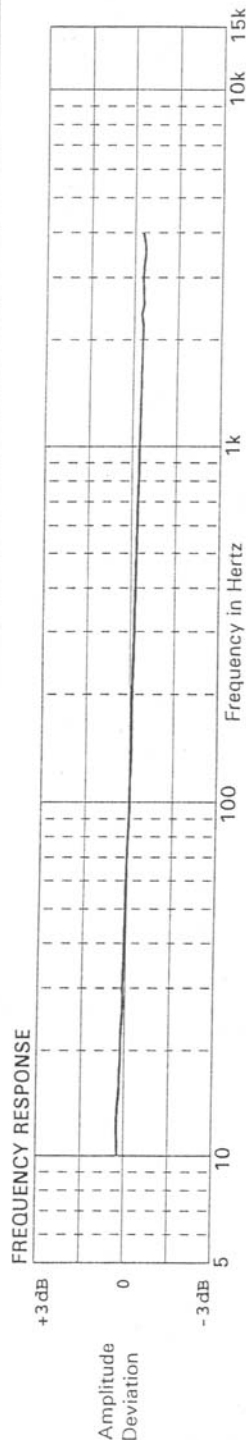
Voltage Sensitivity **102.9** mV/g  
Transverse Sensitivity **2.1** %  
Resonant Frequency **30.5** kHz  
Output Bias Level **10.3** V  
Time Constant **1.7** s

## KEY SPECIFICATIONS

Range **50**  $\pm g$   
Resolution **0.0003** g  
Temp. Range **-65/+250** °F

METRIC CONVERSIONS:  
 $ms^{-2} = 0.102 g$   
 $^{\circ}C = 5/9 \times (^{\circ}F - 32)$

| Frequency           | Hz | Reference Freq. |     |     |     |     |      |      |      |      |      |
|---------------------|----|-----------------|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|
|                     |    | 10              | 15  | 30  | 50  | 100 | 300  | 500  | 1000 | 3000 | 4000 |
| Amplitude Deviation | %  | 2.8             | 2.3 | 1.3 | 0.8 | 0.0 | -1.4 | -1.9 | -2.6 | -3.1 | -2.9 |



**PCB®**

Piezotronics, Inc. 3425 Walden Avenue Depew, NY 14043-2495 USA

Calibrated by Scott Skibniewski  
Date 04-01-1998

716-684-0001

# — Calibration Certificate —

Per ISA-RP37.2

Model No. 333A32

Serial No. 7649

PO No. \_\_\_\_\_ Customer \_\_\_\_\_

Calibration traceable to NIST thru Project No. 822/256889

**ICP® ACCELEROMETER**  
with built-in electronics

Calibration procedure is in compliance with  
ISO 10012-1, and former MIL-STD-45662A  
and traceable to NIST.

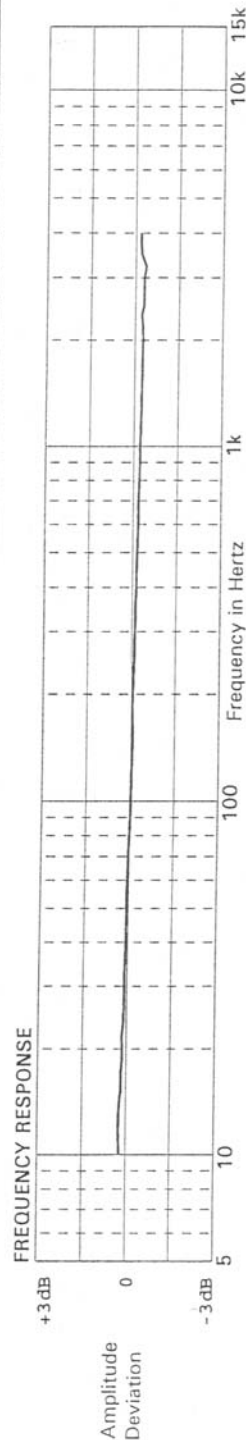
## CALIBRATION DATA

Voltage Sensitivity **100.2** mV/g  
Transverse Sensitivity **0.2** %  
Resonant Frequency **33.5** kHz  
Output Bias Level **10.1** V  
Time Constant **1.9** s

## KEY SPECIFICATIONS

Range **50**  $\pm g$   
Resolution **0.0003** g  
Temp. Range **-65/+250** °F  
METRIC CONVERSIONS:  
ms<sup>-2</sup> = 0.102 g  
°C = 5/9 x (°F - 32)

| Frequency           | Hz | Reference Freq. |     |     |     |     |      |      |      |      |      |
|---------------------|----|-----------------|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|
|                     |    | 10              | 15  | 30  | 50  | 100 | 300  | 500  | 1000 | 3000 | 4000 |
| Amplitude Deviation | %  | 2.9             | 2.4 | 1.4 | 1.0 | 0.0 | -1.1 | -1.7 | -2.4 | -3.3 | -1.9 |



Piezotronics, Inc. 3425 Walden Avenue Depew, NY 14043-2495 USA  
716-684-0001

Calibrated by Chuck Dimaggio  
Date 04-15-1998

# — Calibration Certificate —

Per ISA-RP37.2

Model No. 333A32

Serial No. 7648

PO No. \_\_\_\_\_ Customer \_\_\_\_\_

Calibration traceable to NIST thru Project No. 822/256889

## ICP® ACCELEROMETER

with built-in electronics

Calibration procedure is in compliance with ISO 10012-1, and former MIL-STD-45662A and traceable to NIST.

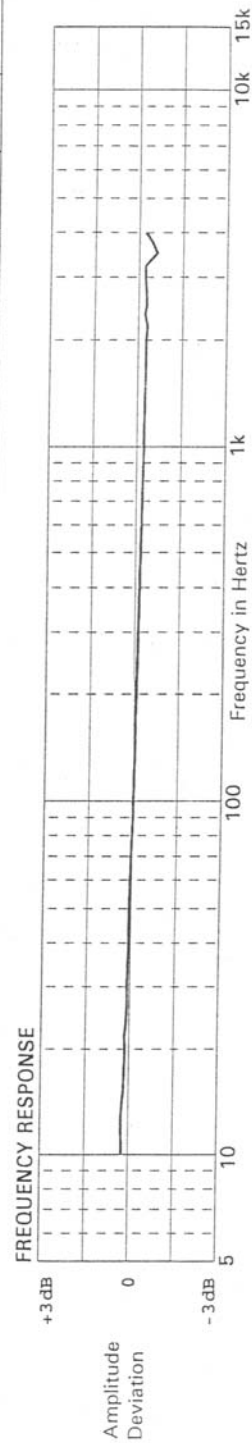
### CALIBRATION DATA

Voltage Sensitivity 99.5 mV/g  
 Transverse Sensitivity 2.9 %  
 Resonant Frequency 30.0 kHz  
 Output Bias Level 10.7 V  
 Time Constant 1.7 s

### KEY SPECIFICATIONS

Range 50 ± g  
 Resolution 0.0003 g  
 Temp. Range -65/+250 °F  
 METRIC CONVERSIONS:  
 ms<sup>-2</sup> = 0.102 g  
 °C = 5/9 x (°F - 32)

| Frequency           | Hz | Reference Freq. |     |     |     |     |      |      |      |      |      |
|---------------------|----|-----------------|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|
|                     |    | 10              | 15  | 30  | 50  | 100 | 300  | 500  | 1000 | 3000 | 4000 |
| Amplitude Deviation | %  | 2.9             | 2.4 | 1.4 | 0.9 | 0.0 | -1.3 | -1.8 | -2.5 | -2.3 | -2.4 |



Piezotronics, Inc. 3425 Walden Avenue Depew, NY 14043-2495 USA  
 716-684-0001

Calibrated by Chuck Dimaggio  
 Date 04-15-1998

# — Calibration Certificate —

Per ISA-RP37.2

Model No. 333A32

Serial No. 7647

PO No. \_\_\_\_\_ Customer \_\_\_\_\_

Calibration traceable to NIST thru Project No. 822/256889

## ICP® ACCELEROMETER

with built-in electronics

Calibration procedure is in compliance with  
ISO 10012-1, and former MIL-STD-45662A  
and traceable to NIST.

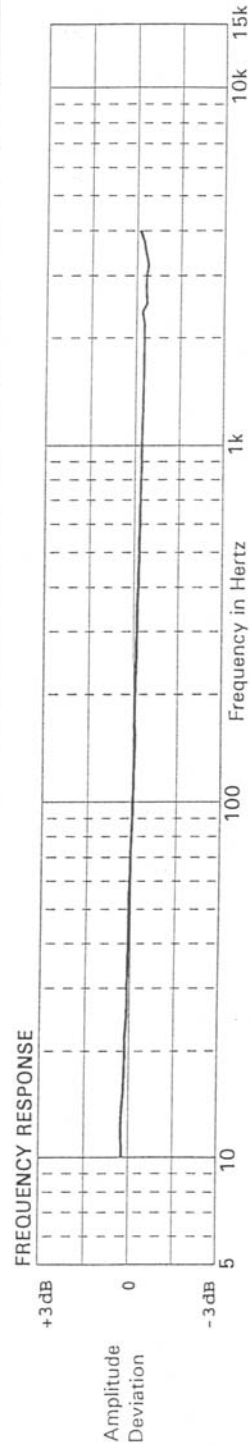
### CALIBRATION DATA

Voltage Sensitivity **102.2** mV/g  
Transverse Sensitivity **1.6** %  
Resonant Frequency **32.0** kHz  
Output Bias Level **10.1** V  
Time Constant **1.8** s

### KEY SPECIFICATIONS

Range **50**  $\pm g$   
Resolution **0.0003** g  
Temp. Range **-65/+250** °F  
METRIC CONVERSIONS:  
ms<sup>-2</sup> = 0.102 g  
°C = 5/9 x (°F - 32)

| Frequency           | Hz | Reference Freq. |     |     |     |     |      |      |      |      |      |  |
|---------------------|----|-----------------|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|--|
|                     |    | 10              | 15  | 30  | 50  | 100 | 300  | 500  | 1000 | 3000 | 4000 |  |
| Amplitude Deviation | %  | 2.9             | 2.4 | 1.3 | 1.0 | 0.0 | -1.1 | -1.7 | -2.4 | -3.6 | -1.0 |  |



**PCB®**

Piezotronics, Inc. 3425 Walden Avenue Depew, NY 14043-2495 USA  
716-684-0001

Calibrated by Chuck Dimaggio  
Date 04-15-1998

# CALIBRATION CERTIFICATE

## IMPULSE FORCE HAMMER

Model No. 086C50 Customer \_\_\_\_\_  
 Serial No. 11718 \_\_\_\_\_  
 Range 0 - 5000 lb.  
 Linearity error <2.0 % Invoice No. \_\_\_\_\_  
 Discharge Time Constant 2000 s Invoice Date \_\_\_\_\_  
 Output Impedance 100 ohms  
 Output Bias 10.47 volts  
 Traceable NIST project No. 822/256889 in compliance with ISO 10012-1,  
 and former MIL-STD 45662A.  
 Technician Travis Lodyga TL Date 09-28-1998  
 Accelerometer Model No. 308B11 Serial No. 8865 Sensitivity 50.4 mV/g  
 Pendulous Test Mass 118.0 lbs ( 53.5 k grams) including accelerometer.

### HAMMER SENSITIVITY:

|                                      |          |              |  |  |
|--------------------------------------|----------|--------------|--|--|
| Hammer Configuration                 | Tip      | MEDIUM (RED) |  |  |
|                                      | Extender | NONE         |  |  |
| Hammer Sensitivity (S <sub>f</sub> ) | mV/lb    | 1.05         |  |  |
|                                      | (mV/N)   | 0.24         |  |  |

Above data is valid for all supplied tips.

### NOTES:

1. To convert a measurement (typically mV) to engineering units (lbs or g's), each channel must be divided by its sensitivity (mV/lb or mV/g).
2. Each specific hammer configuration has a different sensitivity. The difference is a constant percentage which depends on the mass of the cap and tip assembly relative to the total mass of the head. Calibrating the specific hammer structure being used automatically compensates for mass effects.
3. PCB hammers 086B02, B03 and B04 may be calibrated by mounting the Model 302A07 Accelerometer on the back of the hammer head, impacting a convenient surface and measuring the output of both hammer (V<sub>f</sub>) and accelerometer (V<sub>a</sub>):

Hammer sensitivity  $S_f = S_a \left( \frac{V_f}{V_a} \right) \frac{1}{m}$  where 'm' is the *Effective Mass* and 'S<sub>a</sub>' is *Accelerometer Sensitivity*.

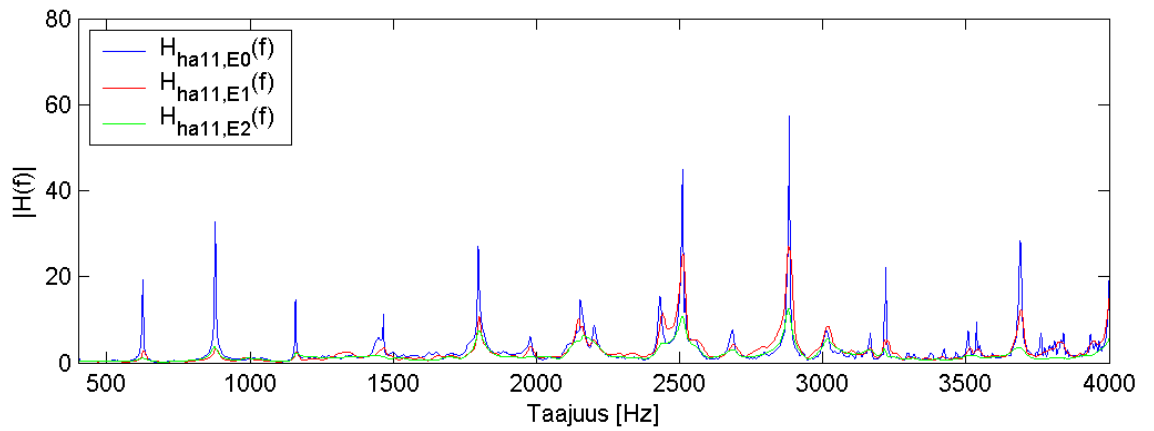
Effective mass N/A with 302A07 attached and vinyl-capped plastic tip.

PCB PIEZOTRONICS, INC. 3425 WALDEN AVENUE DEPEW, NY 14043-2495 PHONE 716-684-0001 TWX 710-263-1371 FAX 716-684-0987

IFH001Rev.N/R



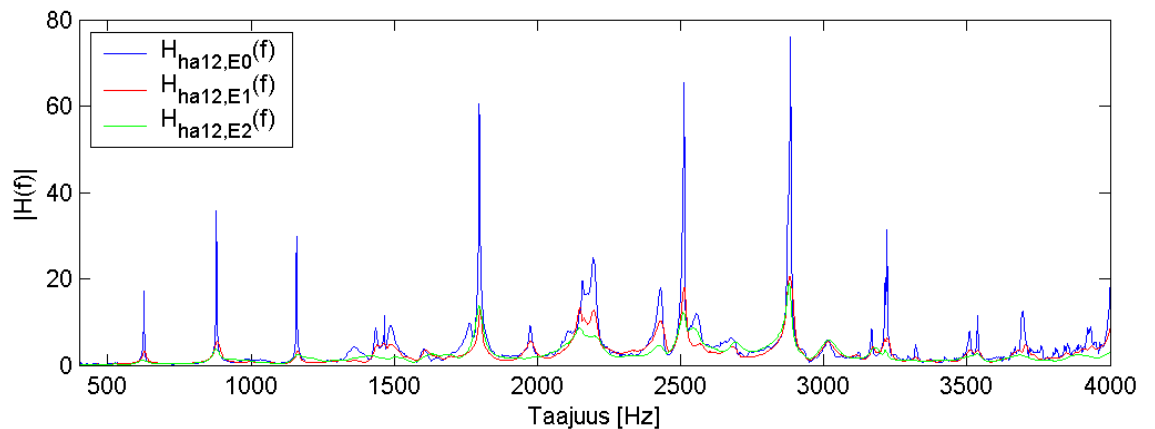
## Liite 2: Laboratoriossa mitatut siirtofunktiot



Kuva 1. Siirtofunktio, vaakasuuntainen värähtely, mittauspiste 1, herätepiste 1.

Taulukko 1. Siirtofunktioiden  $H_{ha11,xx}(f)$  oleellisimmat resonanssitaajuuudet ja niiden amplitudit.

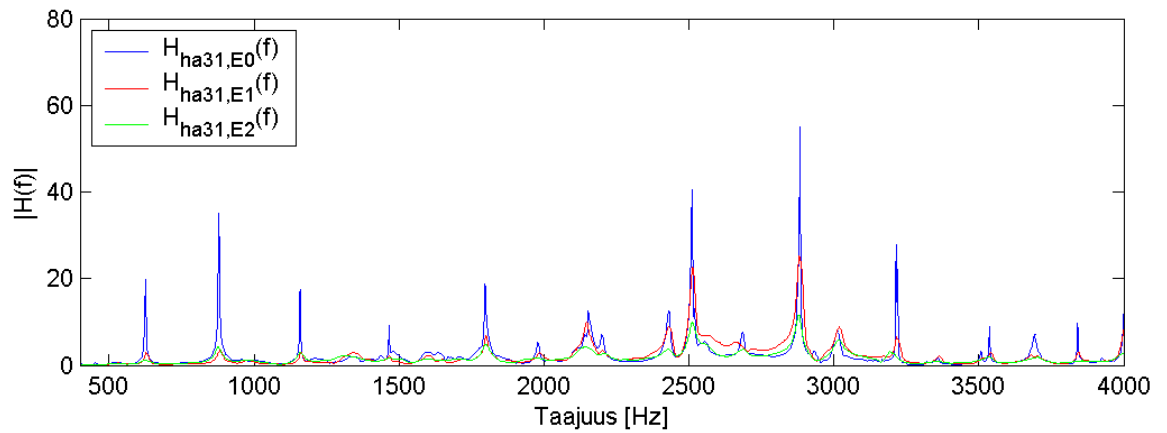
| Taajuus [Hz]       | 2883 | 2511 | 879  | 3690 | 1797 | 3221 | Kok.teho |
|--------------------|------|------|------|------|------|------|----------|
| $ H_{ha11,E0}(f) $ | 57,3 | 44,8 | 32,7 | 28,4 | 27,0 | 22,1 | 1,00     |
| $ H_{ha11,E1}(f) $ | 27,2 | 25,4 | 3,3  | 12,3 | 10,7 | 5,3  | 0,73     |
| $ H_{ha11,E2}(f) $ | 12,5 | 10,7 | 3,8  | 3,6  | 7,6  | 3,2  | 0,26     |



Kuva 2. Siirtofunktio, vaakasuuntainen värähtely, mittauspiste 1, herätepiste 2.

Taulukko 2. Siirtofunktioiden  $H_{\text{ha}12,\text{xx}}(f)$  oleellisimmat resonanssitaajuuudet ja niiden amplitudit.

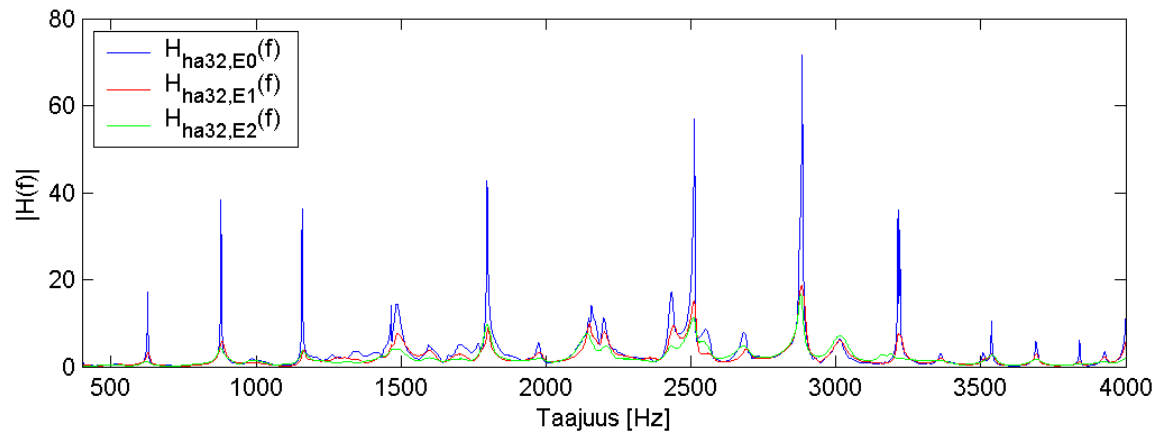
| Taajuus [Hz]                     | 2883 | 2512 | 1797 | 879  | 3221 | 1160 | Kok.teho |
|----------------------------------|------|------|------|------|------|------|----------|
| $ H_{\text{ha}12,\text{E}0}(f) $ | 80,0 | 61,3 | 60,5 | 35,8 | 31,4 | 29,9 | 1,00     |
| $ H_{\text{ha}12,\text{E}1}(f) $ | 20,6 | 17,9 | 12,9 | 5,6  | 6,4  | 3,3  | 0,32     |
| $ H_{\text{ha}12,\text{E}2}(f) $ | 18,9 | 12,3 | 13,8 | 3,8  | 3,5  | 2,6  | 0,25     |



Kuva 3. Siirtofunktio, vaakasuuntainen värähtely, mittauspiste 3, herätepiste 1.

Taulukko 2. Siirtofunktioiden  $H_{\text{ha}31,\text{xx}}(f)$  oleellisimmat resonanssitaajuuudet ja niiden amplitudit.

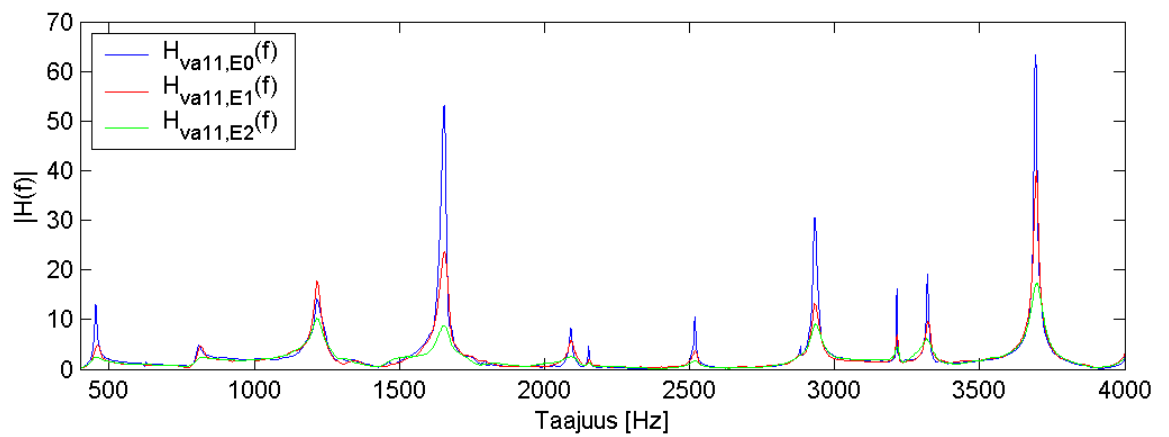
| Taajuus [Hz]                     | 2883 | 2511 | 879  | 3215 | 626  | 1797 | Kok.teho |
|----------------------------------|------|------|------|------|------|------|----------|
| $ H_{\text{ha}31,\text{E}0}(f) $ | 55,0 | 40,4 | 35,2 | 27,8 | 19,9 | 18,9 | 1,00     |
| $ H_{\text{ha}31,\text{E}1}(f) $ | 25,1 | 22,7 | 3,5  | 6,5  | 3,1  | 6,9  | 0,77     |
| $ H_{\text{ha}31,\text{E}2}(f) $ | 11,7 | 9,9  | 4,2  | 3,1  | 1,2  | 5,0  | 0,28     |



Kuva 4. Siirtofunktio, vaakasuuntainen värähtely, mittauspiste 3, herätepiste 2.

Taulukko 4. Siirtofunktioiden  $H_{ha32,xx}(f)$  oleellisimmat resonanssitaajuuudet ja niiden amplitudit.

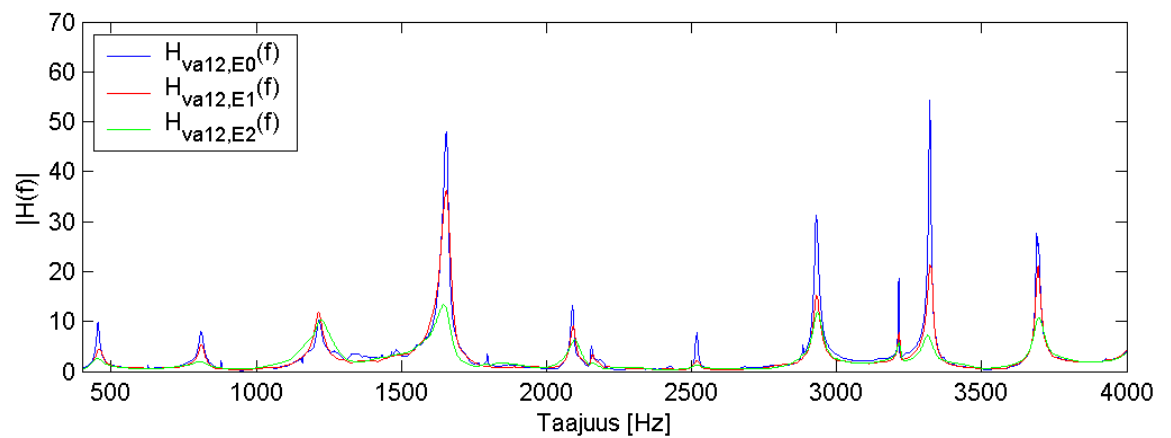
| Taajuus [Hz]       | 2883 | 2512 | 1797 | 879  | 3215 | 1159 | Kok.teho |
|--------------------|------|------|------|------|------|------|----------|
| $ H_{ha32,E0}(f) $ | 71,7 | 56,8 | 42,7 | 38,2 | 36,0 | 36,2 | 1,00     |
| $ H_{ha32,E1}(f) $ | 18,6 | 15,0 | 8,8  | 5,7  | 7,7  | 3,9  | 0,31     |
| $ H_{ha32,E2}(f) $ | 16,6 | 11,2 | 9,7  | 4,3  | 3,0  | 3,7  | 0,24     |



Kuva 5. Siirtofunktio, pystysuuntainen värähtely, mittauspiste 1, herätepiste 1.

Taulukko 5. Siirtofunktioiden  $H_{va11,xx}(f)$  oleellisimmat resonanssitaajuuudet ja niiden amplitudit.

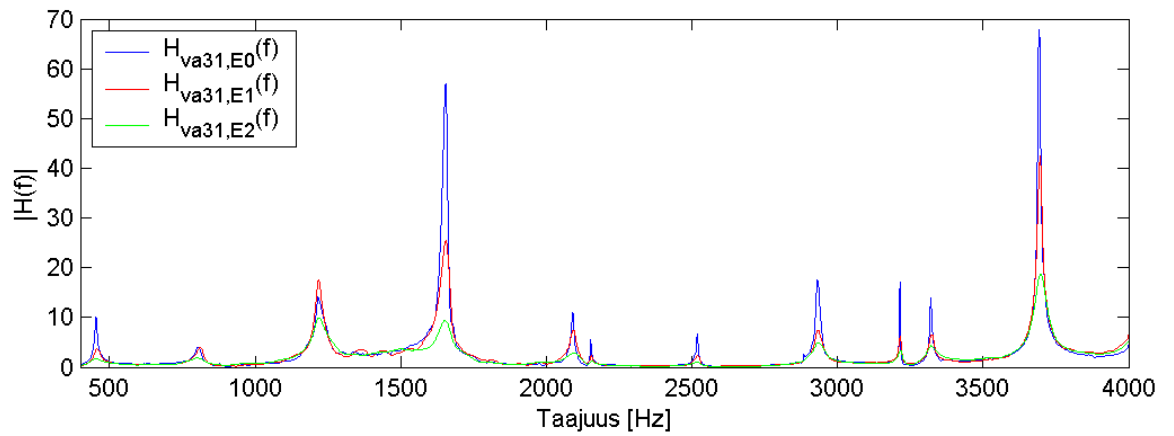
| Taajuus [Hz]       | 3693 | 1655 | 2932 | 3320 | 3215 | 1216 | Kok.teho |
|--------------------|------|------|------|------|------|------|----------|
| $ H_{va11,E0}(f) $ | 63,2 | 53,1 | 30,5 | 19,1 | 16,2 | 14,3 | 1,00     |
| $ H_{va11,E1}(f) $ | 39,9 | 23,8 | 13,3 | 9,7  | 7,0  | 17,7 | 0,54     |
| $ H_{va11,E2}(f) $ | 17,3 | 8,8  | 9,1  | 6,1  | 4,6  | 10,2 | 0,25     |



Kuva 6. Siirtofunktio, pystysuuntainen värähtely, mittauspiste 1, herätepiste 2.

Taulukko 6. Siirtofunktioiden  $H_{va12,xx}(f)$  oleellisimmat resonanssitaajuuudet ja niiden amplitudit.

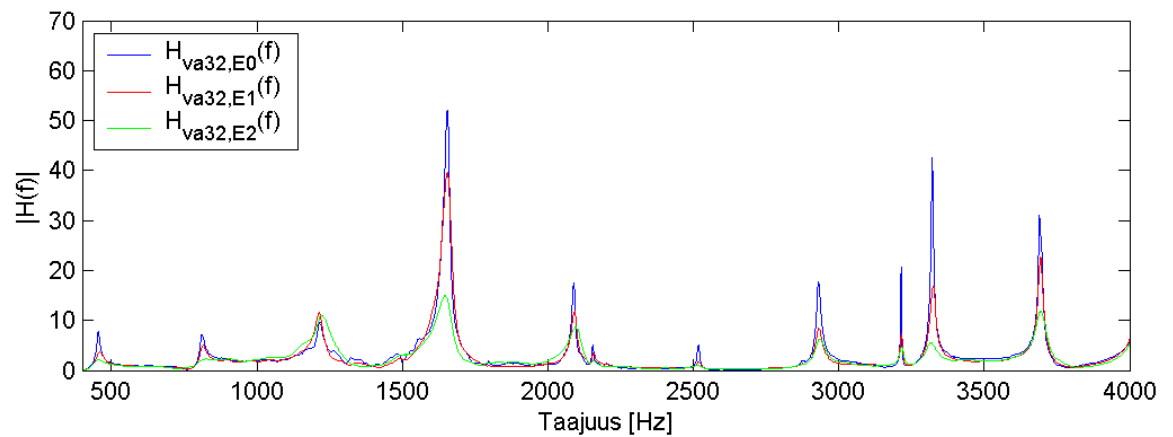
| Taajuus [Hz]       | 3322 | 1655 | 2930 | 3690 | 3215 | 2090 | Kok.teho |
|--------------------|------|------|------|------|------|------|----------|
| $ H_{va12,E0}(f) $ | 54,2 | 47,9 | 30,4 | 27,6 | 18,7 | 13,1 | 1,00     |
| $ H_{va12,E1}(f) $ | 21,4 | 36,3 | 15,2 | 21,0 | 7,9  | 9,1  | 0,66     |
| $ H_{va12,E2}(f) $ | 7,3  | 13,4 | 11,7 | 10,7 | 5,7  | 6,4  | 0,30     |



Kuva 7. Siirtofunktio, pystysuuntainen värähtely, mittauspiste 3, herätepiste 1.

Taulukko 7. Siirtofunktioiden  $H_{va31,xx}(f)$  oleellisimmat resonanssitaajuuudet ja niiden amplitudit.

| Taajuus [Hz]       | 3693 | 1655 | 2932 | 3215 | 1217 | 3321 | Kok.teho |
|--------------------|------|------|------|------|------|------|----------|
| $ H_{va31,E0}(f) $ | 67,9 | 56,9 | 17,6 | 17,0 | 14,1 | 14,0 | 1,00     |
| $ H_{va31,E1}(f) $ | 42,5 | 25,5 | 7,5  | 6,2  | 17,5 | 6,7  | 0,56     |
| $ H_{va31,E2}(f) $ | 18,7 | 9,4  | 5,0  | 3,3  | 9,9  | 4,4  | 0,25     |

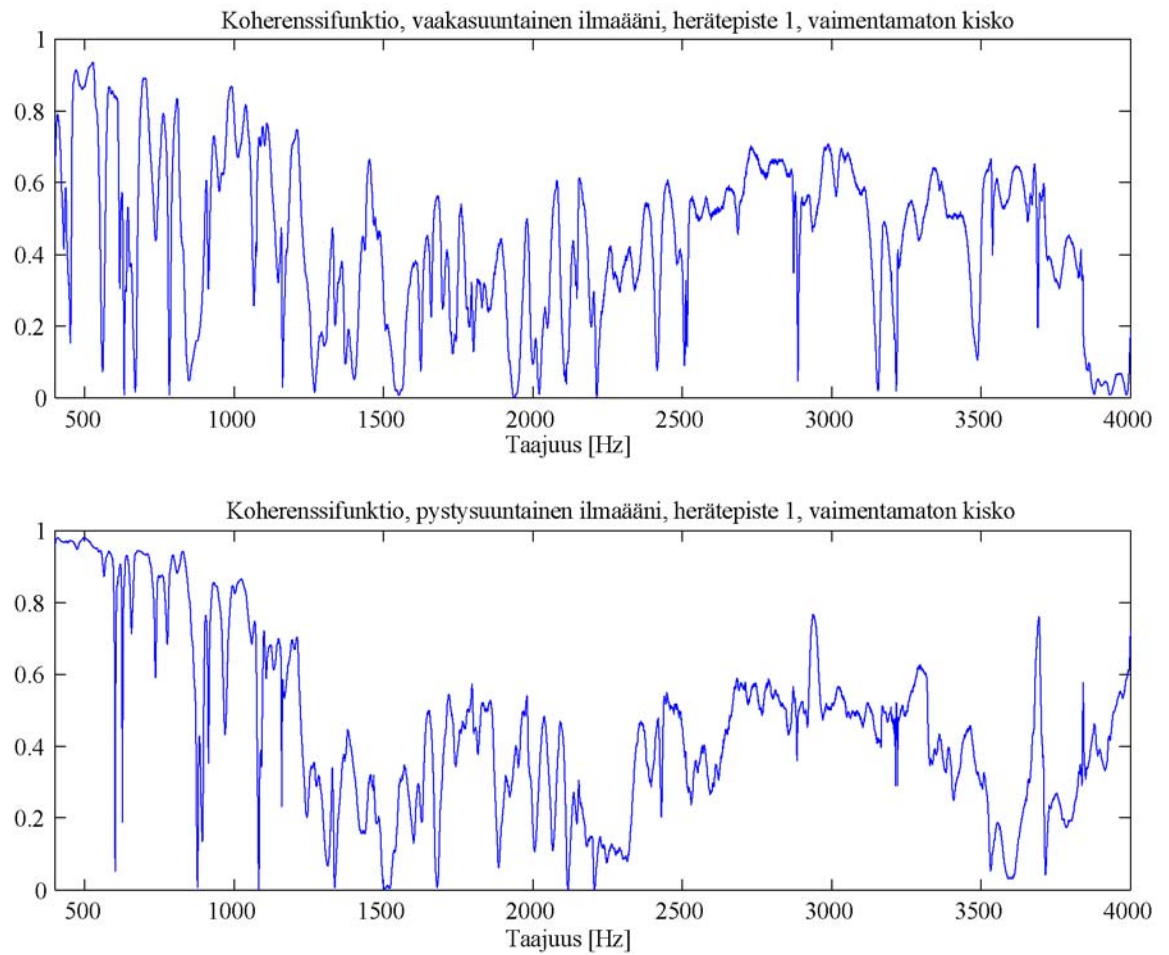


Kuva 8. Siirtofunktio, pystysuuntainen värähtely, mittauspiste 3, herätepiste 2.

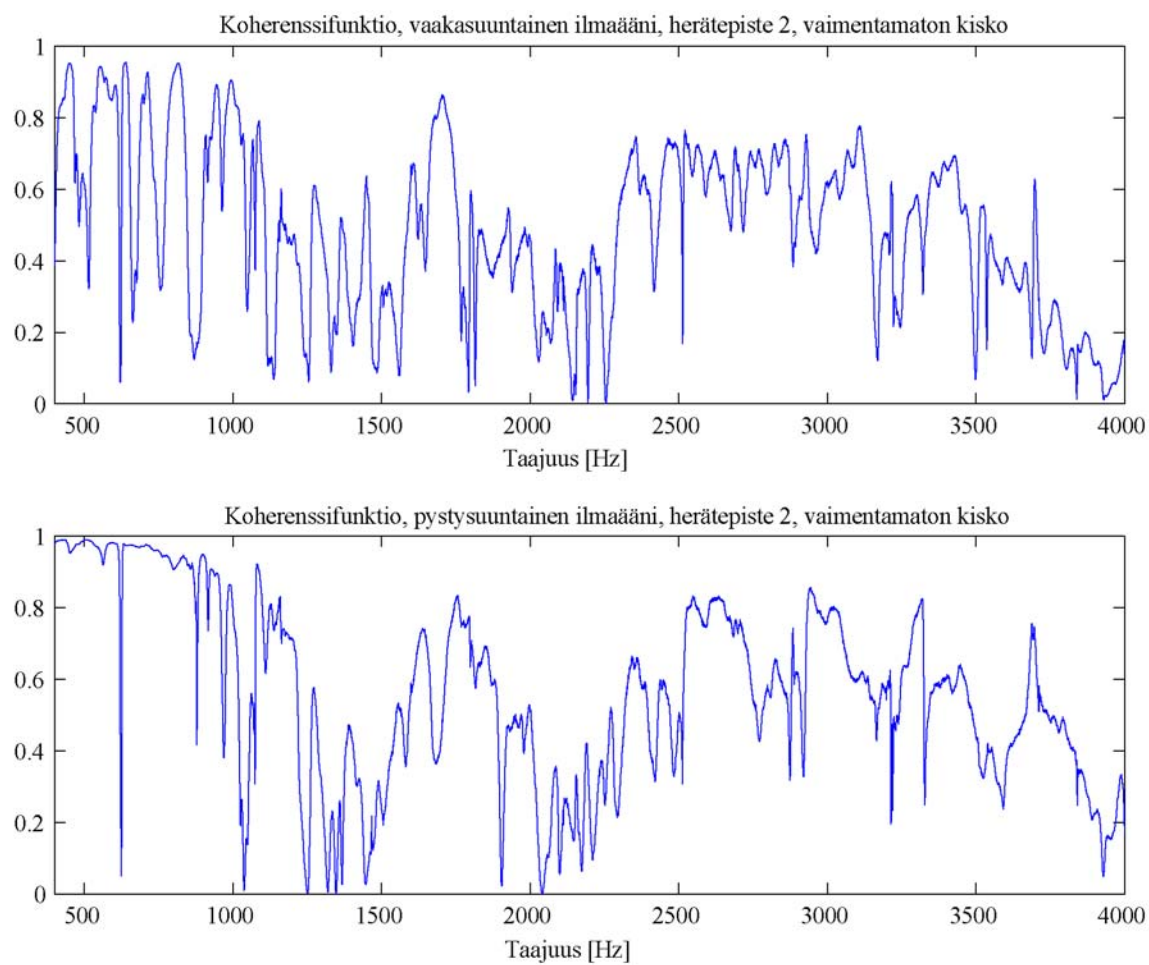
*Taulukko 6. Siirtofunktioiden  $H_{va32,xx}(f)$  oleellisimmat resonanssitaajuuudet ja niiden amplitudit.*

| <b>Taajuus [Hz]</b> | 1655 | 3322 | 3690 | 3215 | 2930 | 2090 | <b>Kok.teho</b> |
|---------------------|------|------|------|------|------|------|-----------------|
| $ H_{va32,E0}(f) $  | 52,1 | 42,5 | 31,1 | 20,7 | 17,7 | 17,6 | 1,00            |
| $ H_{va32,E1}(f) $  | 39,5 | 16,8 | 22,8 | 7,4  | 8,4  | 11,8 | 0,74            |
| $ H_{va32,E2}(f) $  | 15,0 | 5,6  | 11,9 | 4,7  | 6,3  | 8,7  | 0,32            |

## Liite 3: Siirtofunktioiden koherenssit

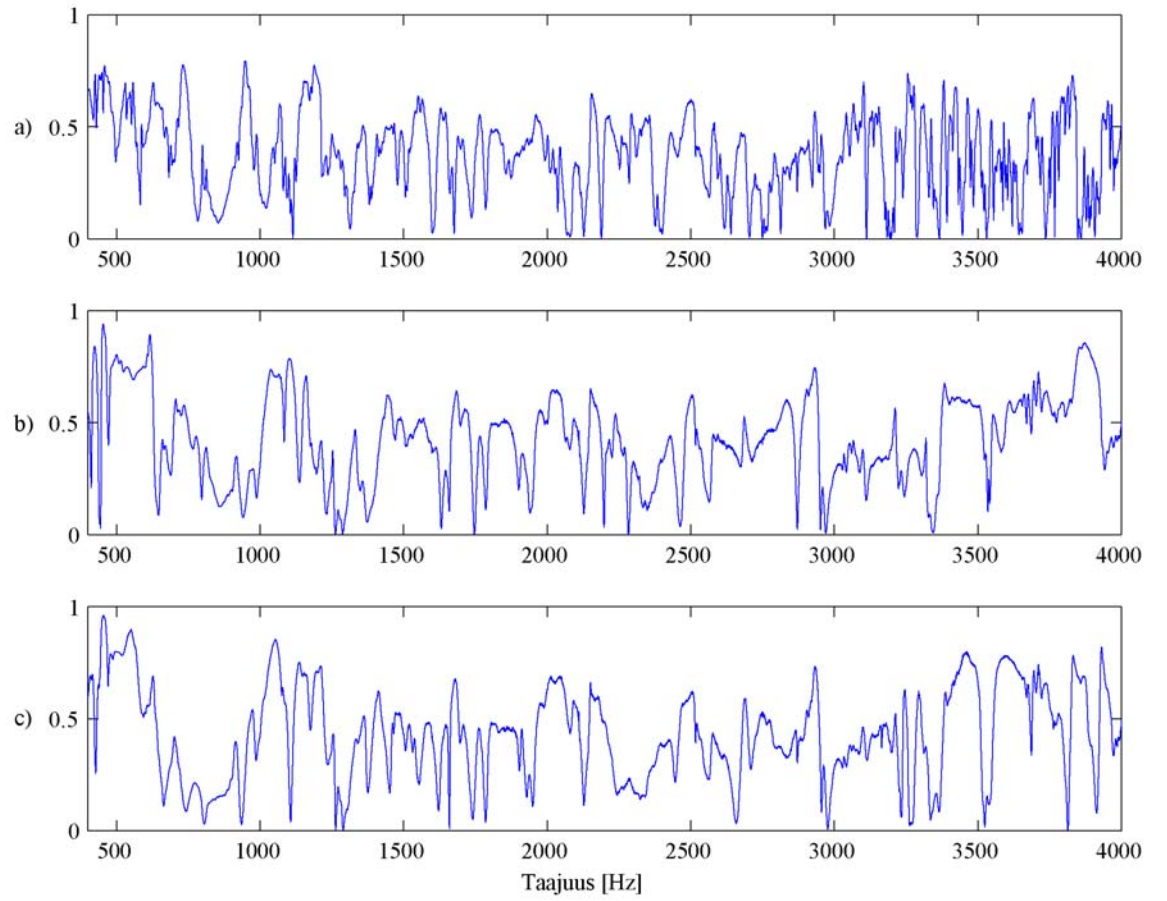


Kuva 9. Siirtofunktioiden  $H_{hs1,E0}(f)$  ja  $H_{vs1,E0}(f)$  koherenssi.

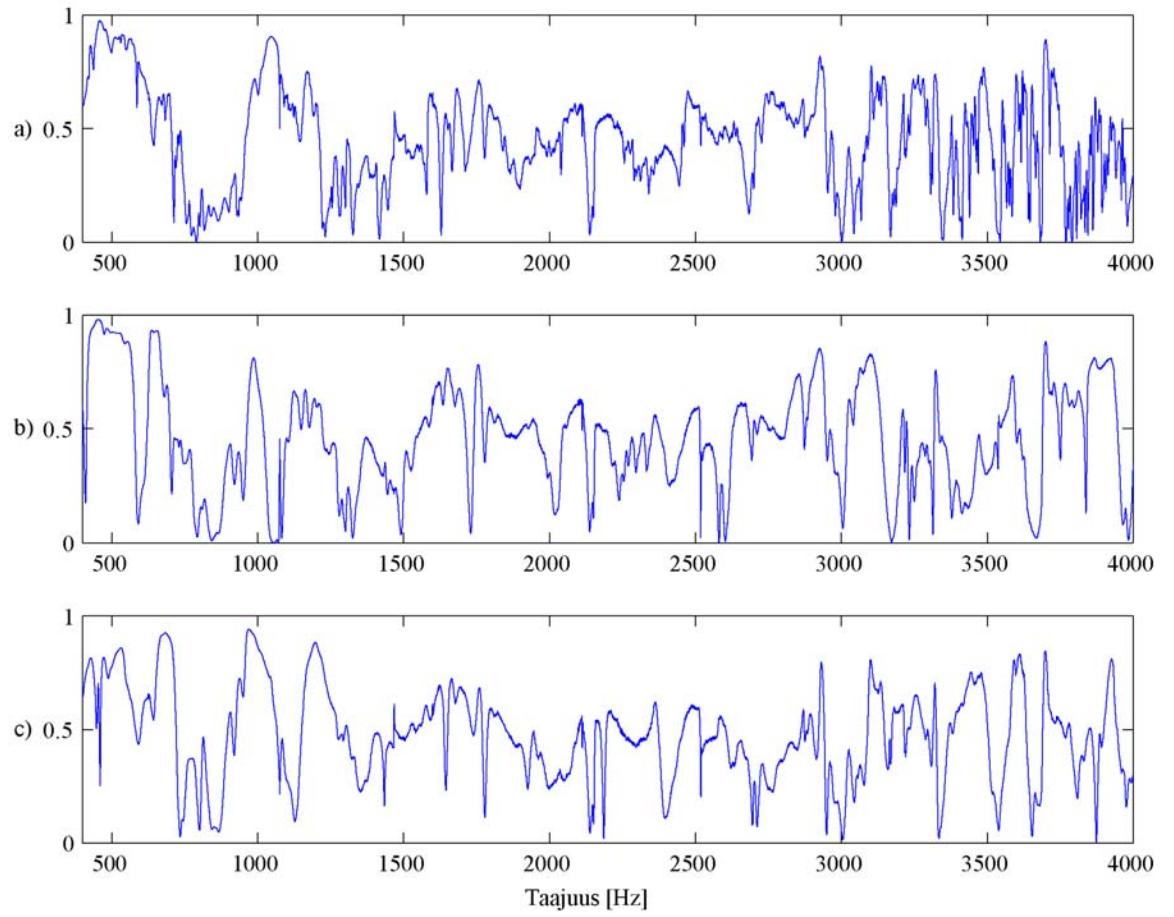


Kuva 10. Siirtofunktioiden  $H_{hs2,E0}(f)$  ja  $H_{vs2,E0}(f)$  koherenssi.

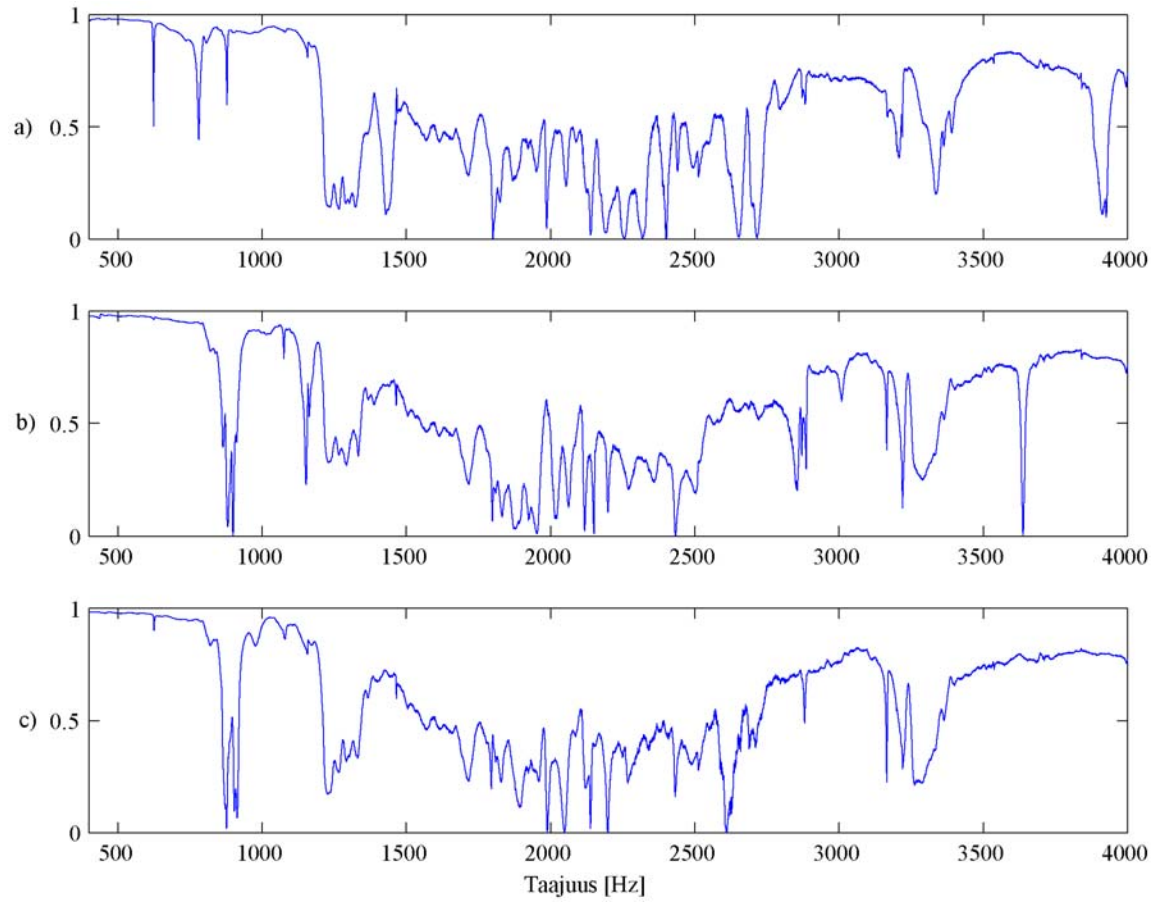




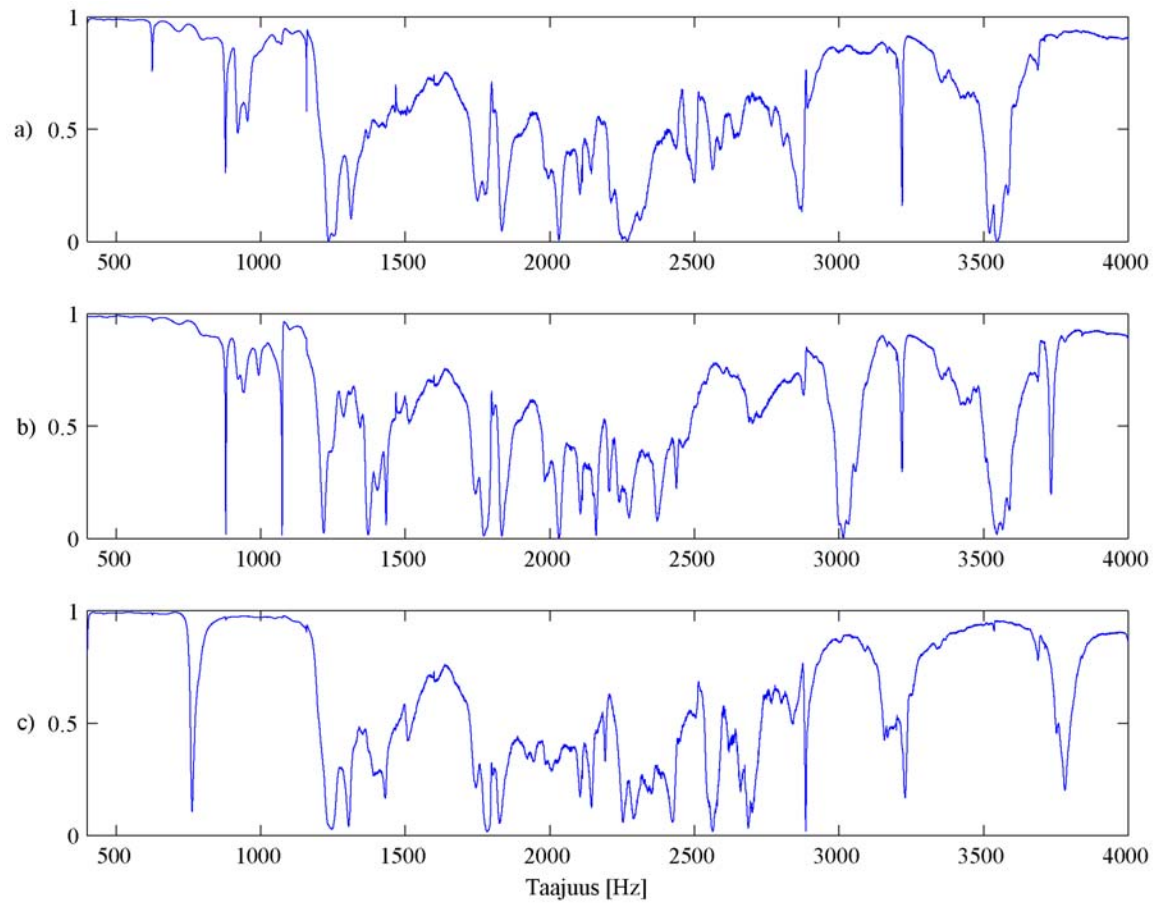
Kuva 11. Siirtofunktioiden  $H_{ha11,E0}(f)$ ,  $H_{ha21,E0}(f)$  ja  $H_{ha31,E0}(f)$  koherenssi.



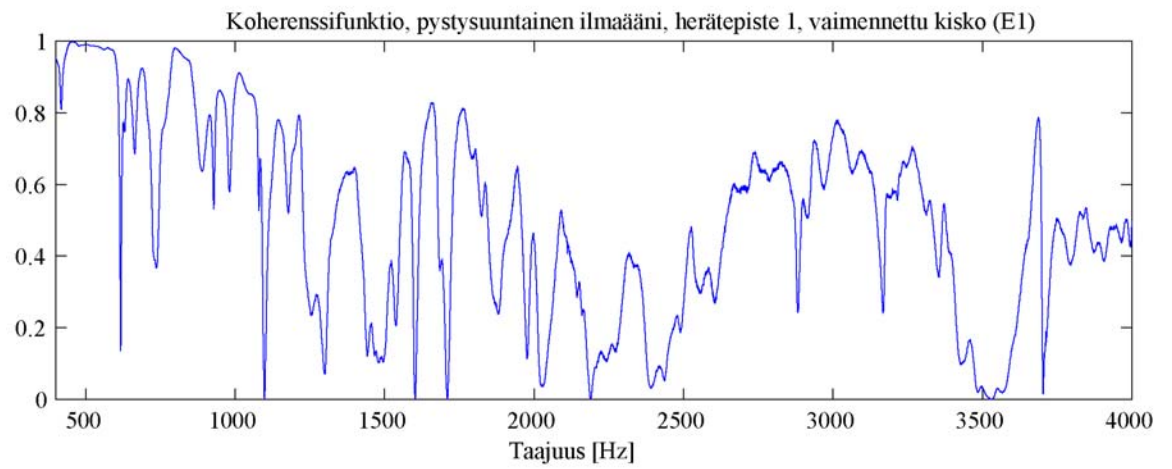
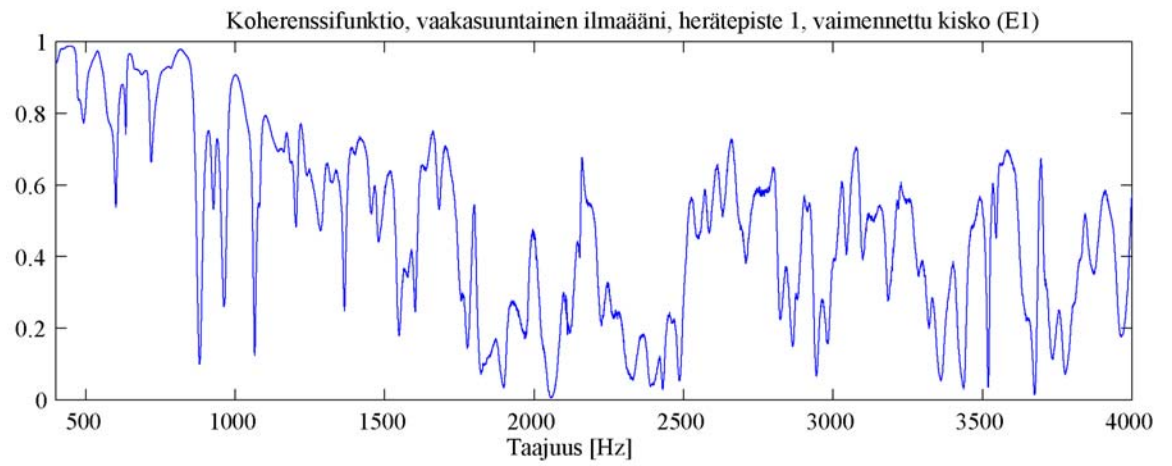
Kuva 12. Siirtofunktoiden  $H_{ha12,E0}(f)$ ,  $H_{ha22,E0}(f)$  ja  $H_{ha32,E0}(f)$  koherenssi.



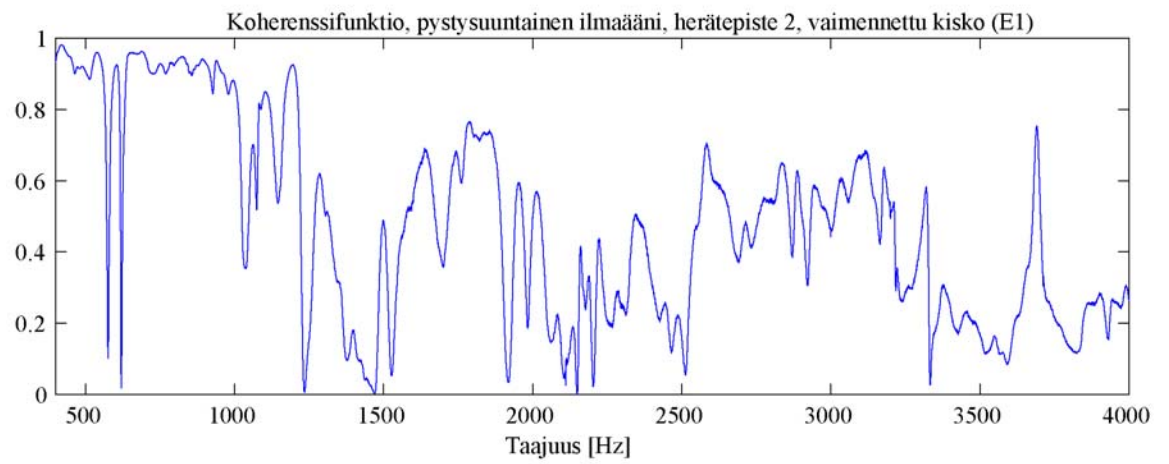
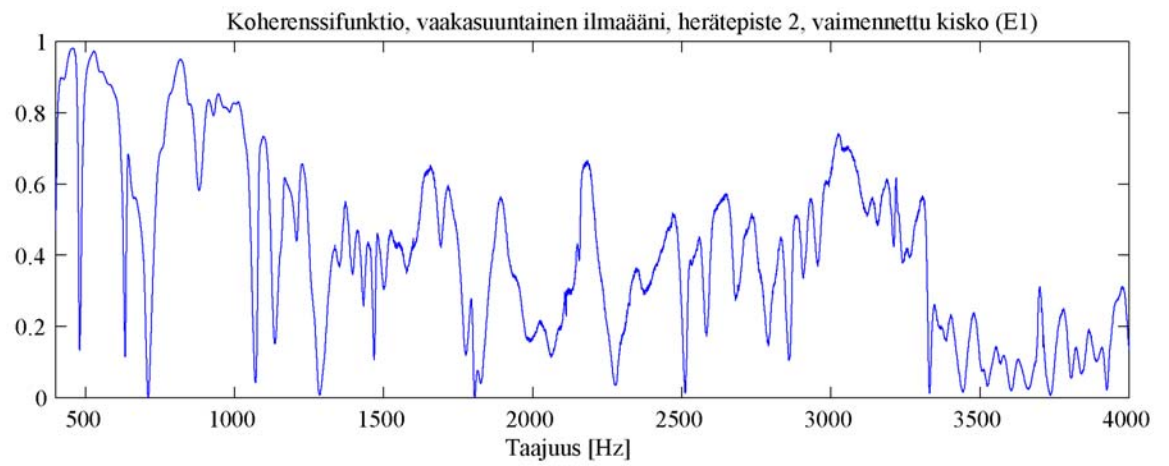
Kuva 13. Siirtofunktioiden  $H_{va11,E0}(f)$ ,  $H_{va21,E0}(f)$  ja  $H_{va31,E0}(f)$  koherenssi.



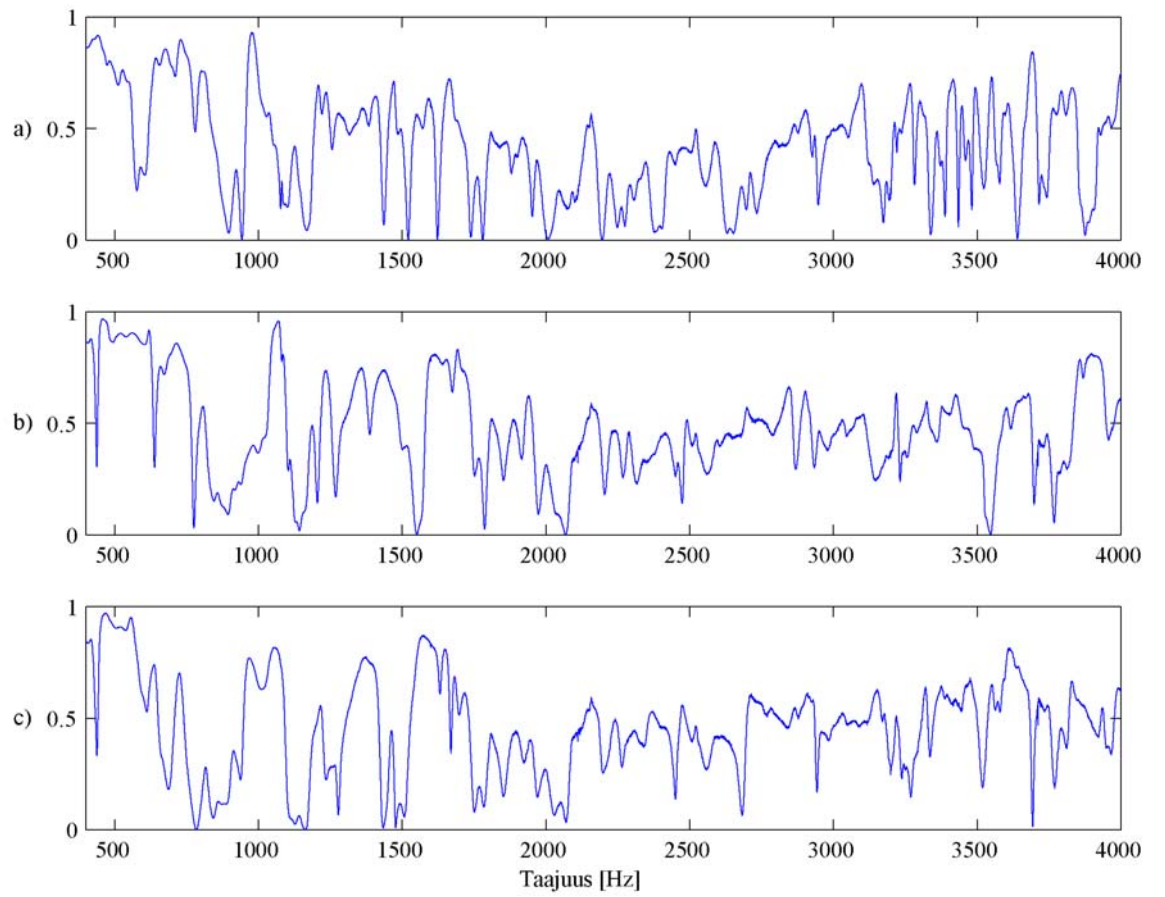
Kuva 14. Siirtofunktoiden  $H_{v12,E0}(f)$ ,  $H_{v22,E0}(f)$  ja  $H_{v32,E0}(f)$  koherenssi.



Kuva 15. Siirtofunktioden  $H_{hs1,E1}(f)$  ja  $H_{vs1,E1}(f)$  koherenssi.

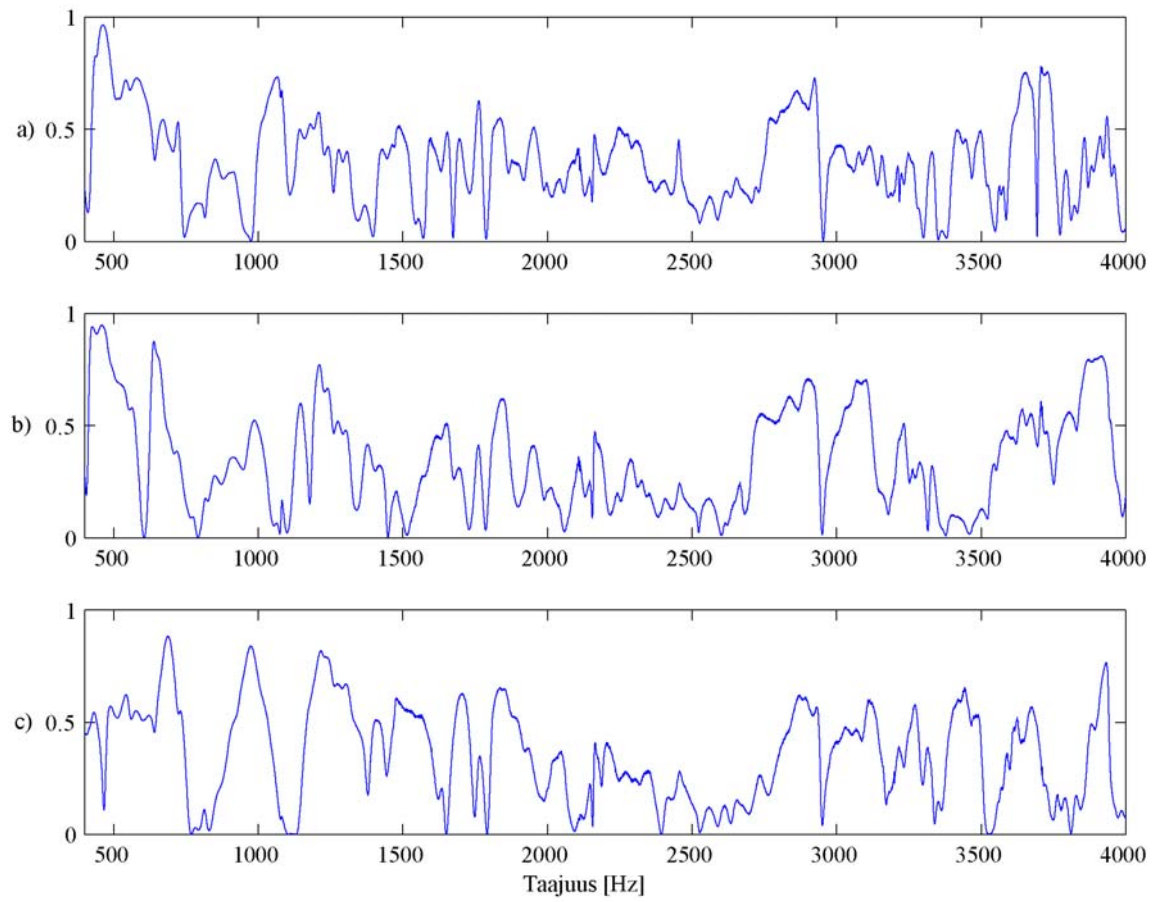


Kuva 16. Siirtofunktioiden  $H_{hs2,E1}(f)$  ja  $H_{vs2,E1}(f)$  koherenssi.



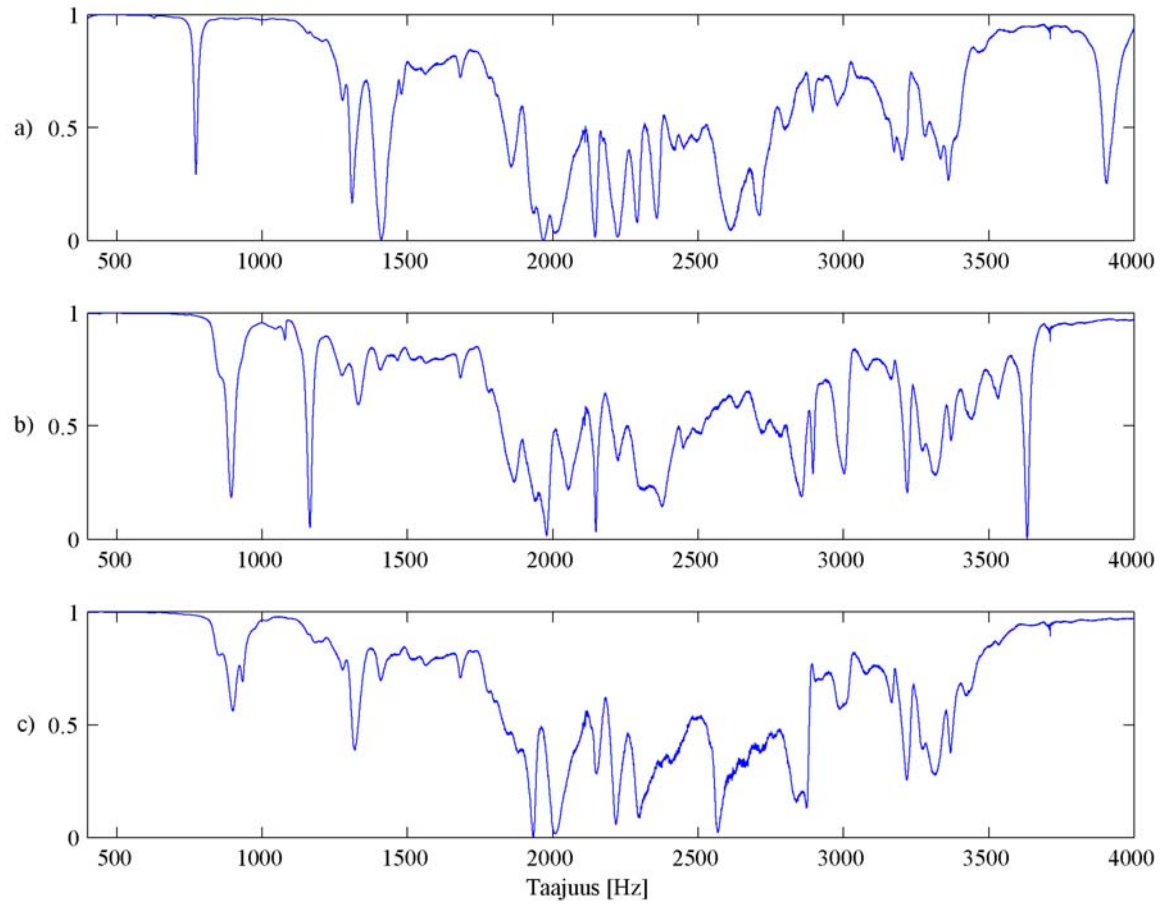
Kuva 17. Siirtofunktioiden  $H_{ha11,E1}(f)$ ,  $H_{ha21,E1}(f)$  ja  $H_{ha31,E1}(f)$  koherenssi.



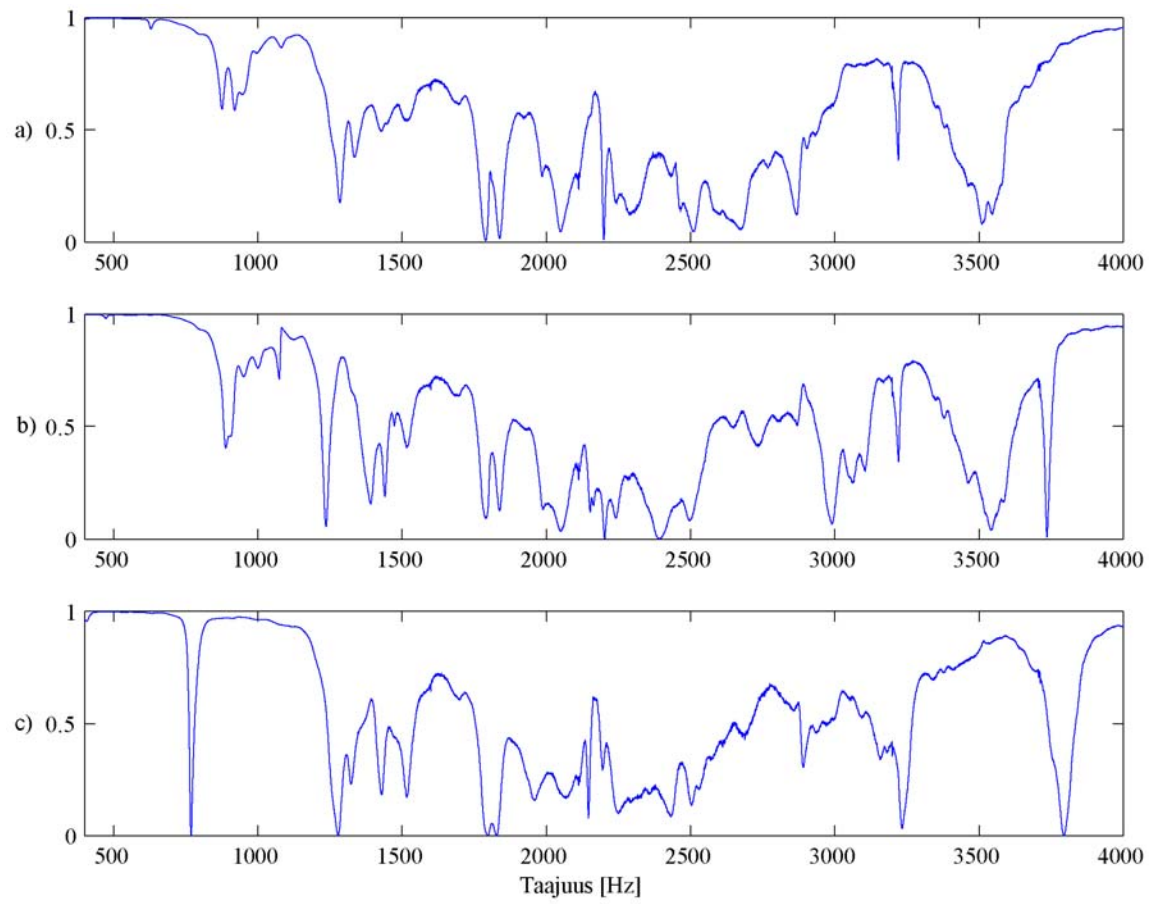


Kuva 18. Siirtofunktoiden  $H_{ha12,E1}(f)$ ,  $H_{ha22,E1}(f)$  ja  $H_{ha32,E1}(f)$  koherenssi.

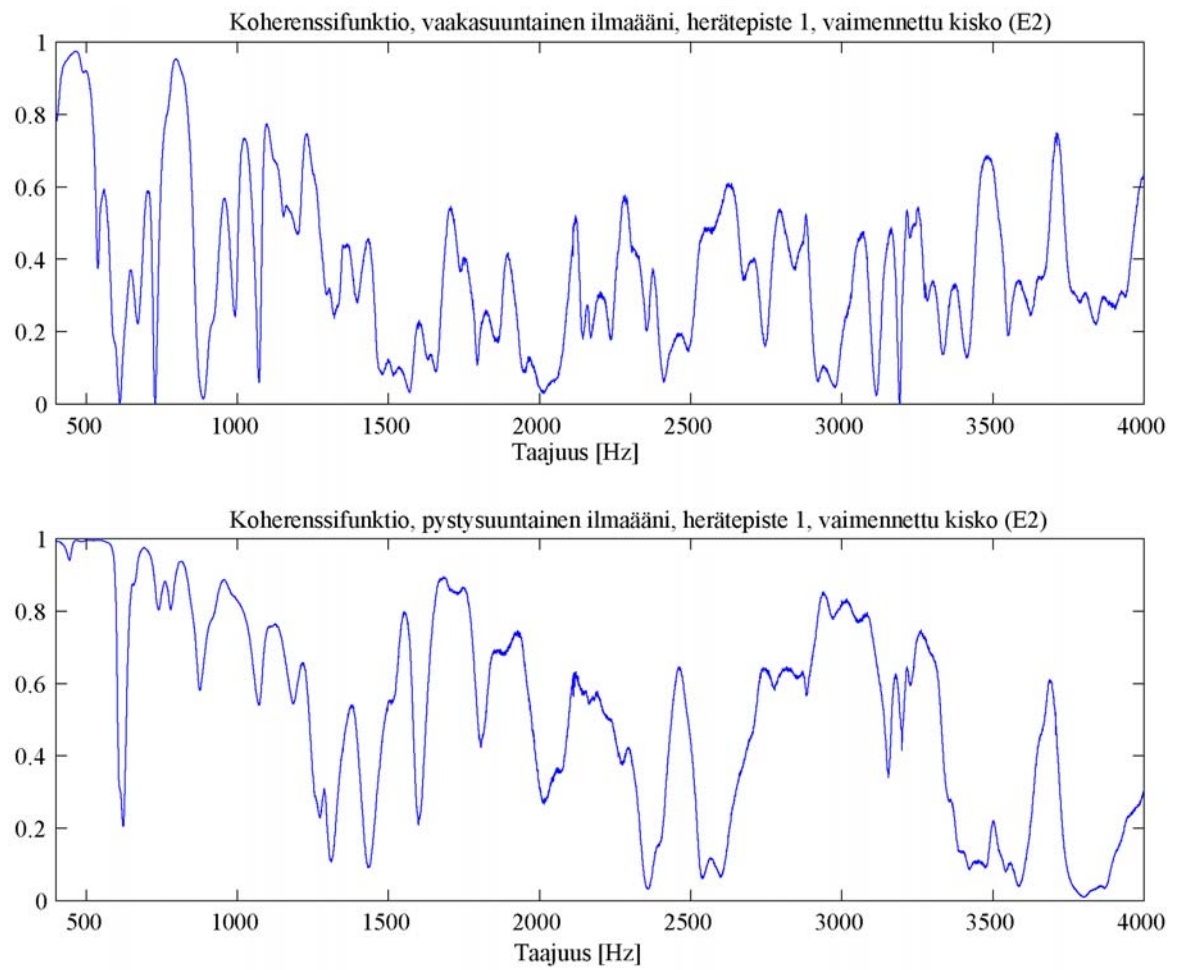




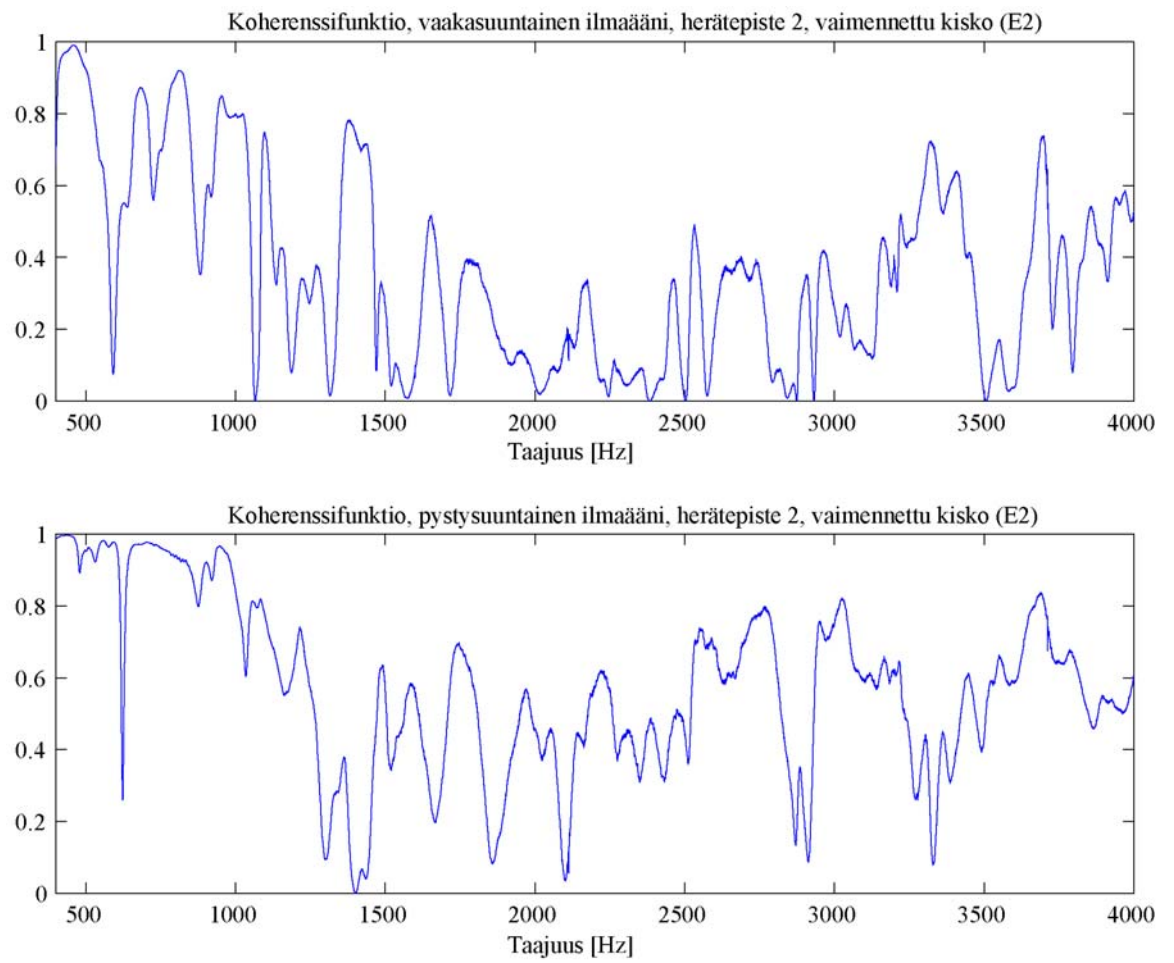
Kuva 19. Siirtofunktoiden  $H_{va11,E1}(f)$ ,  $H_{va21,E1}(f)$  ja  $H_{va31,E1}(f)$  koherenssi.



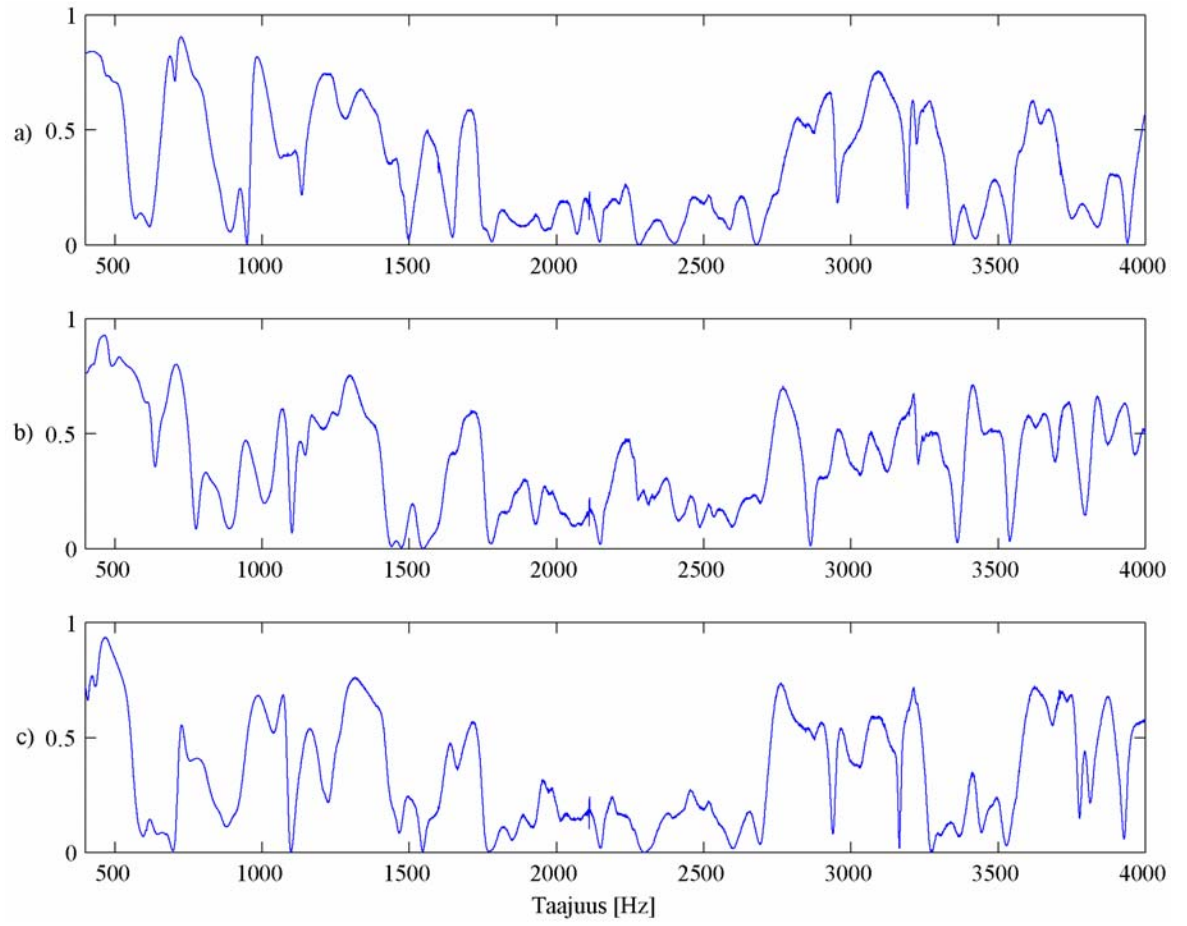
Kuva 20. Siirtofunktoiden  $H_{va12,E1}(f)$ ,  $H_{va22,E1}(f)$  ja  $H_{va32,E1}(f)$  koherenssi.



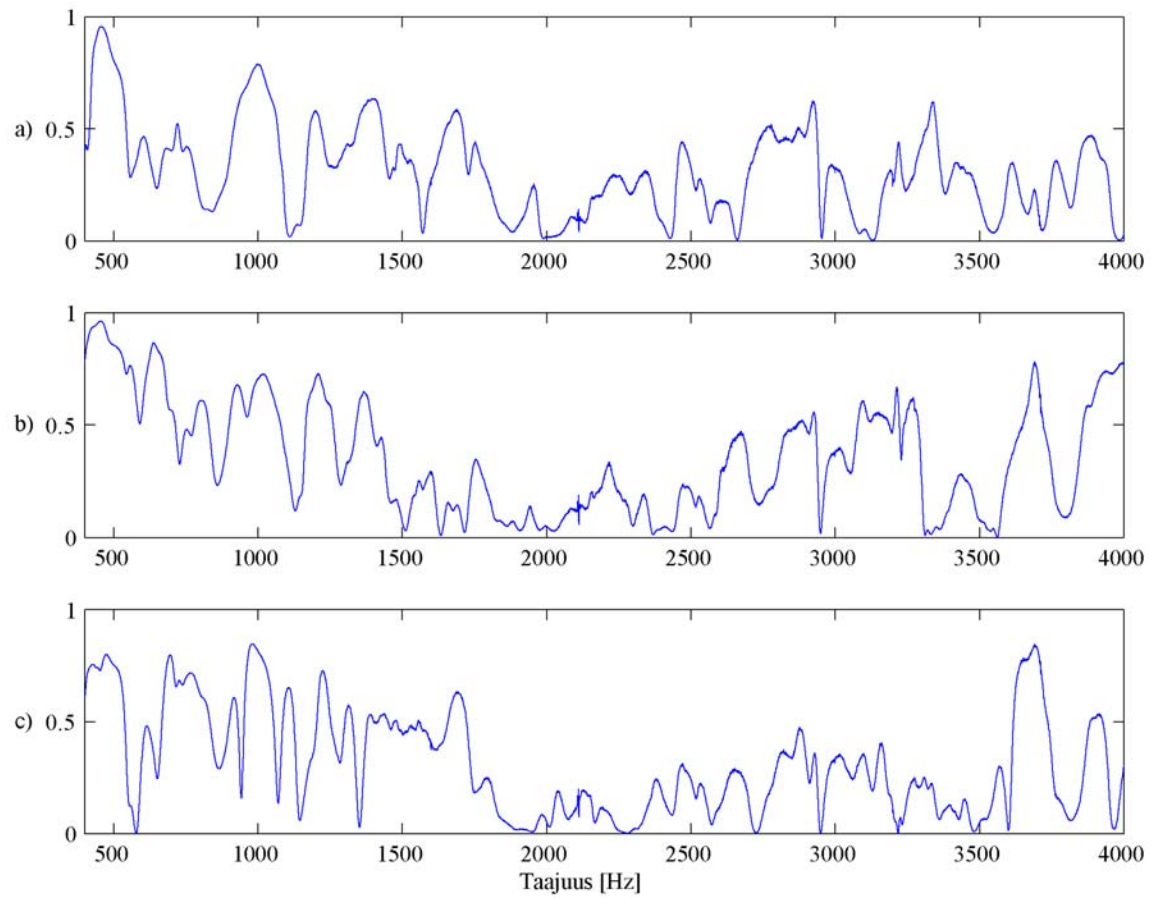
Kuva 21. Siirtofunktioiden  $H_{hs1,E2}(f)$  ja  $H_{vs1,E2}(f)$  koherenssi.



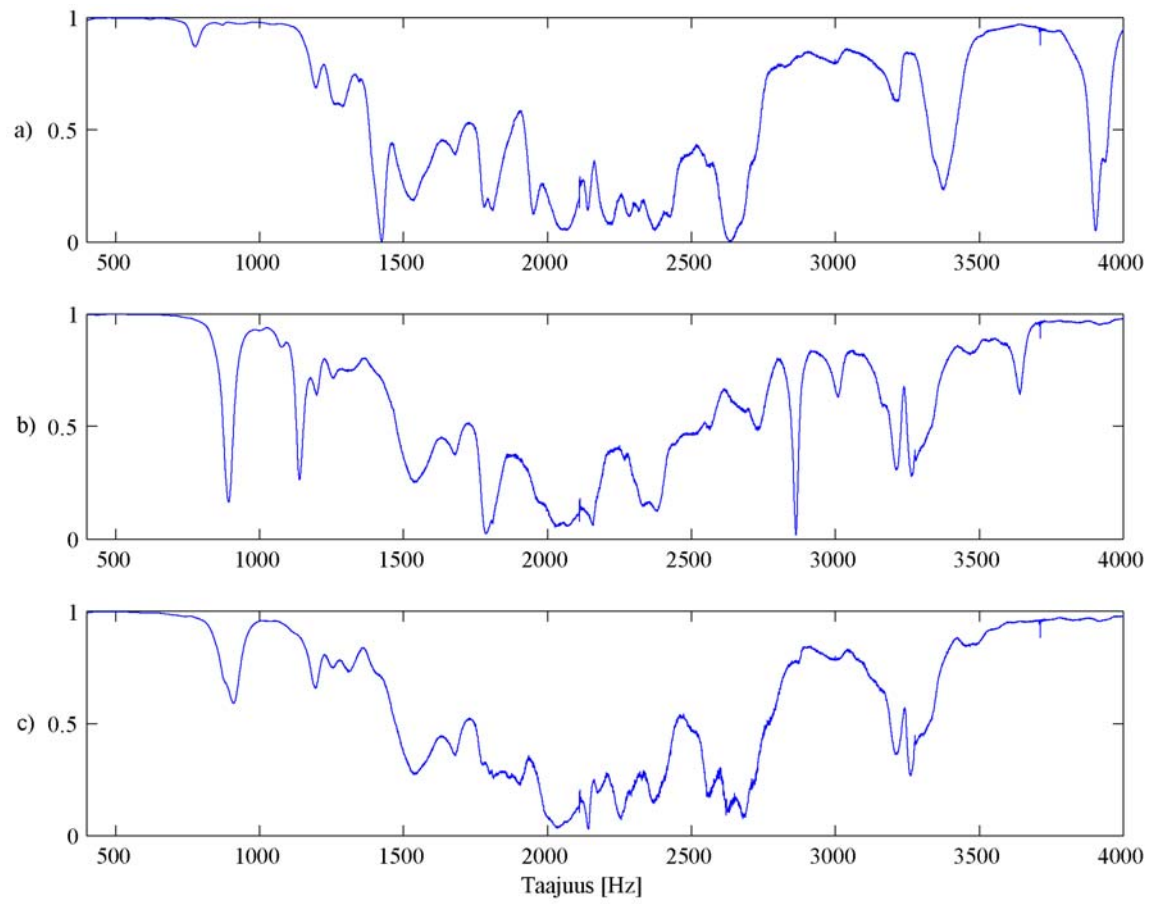
Kuva 21. Siirtofunktioiden  $H_{hs2,E2}(f)$  ja  $H_{vs2,E2}(f)$  koherenssi.



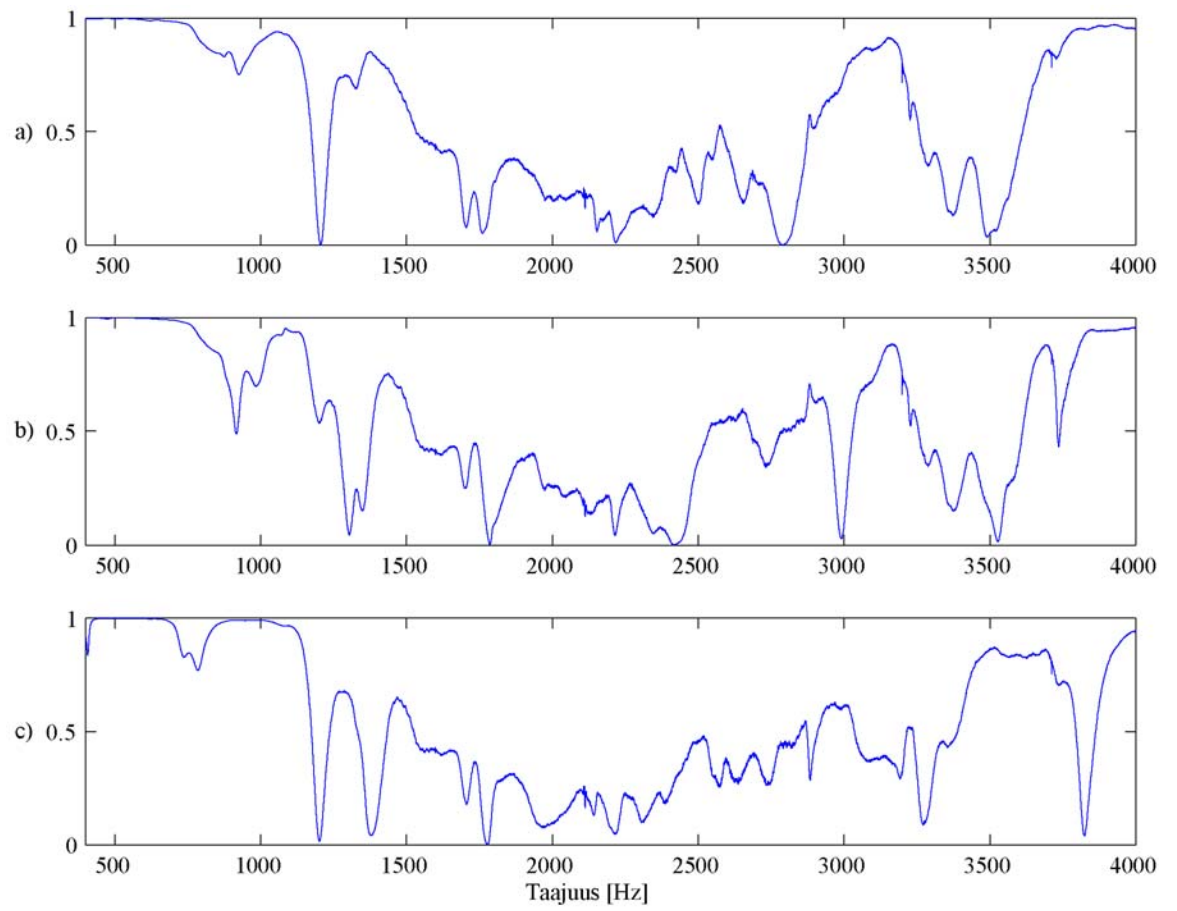
Kuva 22. Siirtofunktoiden  $H_{ha11,E2}(f)$ ,  $H_{ha21,E2}(f)$  ja  $H_{ha31,E2}(f)$  koherenssi.



Kuva 23. Siirtofunktoiden  $H_{ha12,E2}(f)$ ,  $H_{ha22,E2}(f)$  ja  $H_{ha32,E2}(f)$  koherenssi.



Kuva 24. Siirtofunktioiden  $H_{va11,E2}(f)$ ,  $H_{va21,E2}(f)$  ja  $H_{va31,E2}(f)$  koherenssi.



Kuva 25. Siirtofunktoiden  $H_{va12,E2}(f)$ ,  $H_{va22,E2}(f)$  ja  $H_{va32,E2}(f)$  koherenssi.



## Liite 4: Ohiajaneiden junien kulkutiedot

### 5.12.03 Vaimennettu suora (Ch1: 201351/201950, Ch2: 201377/201949)

| Nro | Aika  | Juna  | Akselilkm. | Kok.paino [t] | Pituus [m] |
|-----|-------|-------|------------|---------------|------------|
| 1   | 9.05  | M806  | 24         | 276           | 158        |
| 2   | 9.50  | M809  | 24         | 279           | 158        |
| 3   | 10.50 | M811  | 36         | 416           | 238        |
| 4   | 11.05 | M810  | 24         | 313           | 158        |
| 5   | 11.40 | T3510 | 64         | 635           | 349        |
| 6   | 13.05 | M814  | 32         | 368           | 211        |
| 7   | 13.50 | M817  | 36         | 417           | 238        |
| 8   | 14.35 | T1011 | 216        | 1839          | 652        |

| Nro | Ohiajoaika [s] | Nopeus [km/h] | Huom.  |
|-----|----------------|---------------|--------|
| 1   | 4.5            | 126           |        |
| 2   | 5.8            | 98            |        |
| 3   | 6.9            | 124           |        |
| 4   | 5.4            | 105           | Pari 1 |
| 5   | 16.7           | 75            |        |
| 6   | 5.9            | 129           |        |
| 7   | 6.6            | 130           | Pari 2 |
| 8   | 32.0           | 73            |        |

| Nro | Ch1 L <sub>AF,mean</sub> | Ch1 L <sub>AF,max</sub> | Ch1 L <sub>AE</sub> |
|-----|--------------------------|-------------------------|---------------------|
| 1   | 95.8                     | 98.6                    | 103.1               |
| 2   | 92.0                     | 96.1                    | 100.2               |
| 3   | 95.0                     | 98.1                    | 103.8               |
| 4   | 92.0                     | 95.4                    | 100.2               |
| 5   | 88.9                     | 91.9                    | 101.5               |
| 6   | 96.5                     | 99.6                    | 104.8               |
| 7   | 96.1                     | 99.8                    | 104.9               |
| 8   | 88.4                     | 93.6                    | 103.7               |

| Nro | Ch2 L <sub>AF,mean</sub> | Ch2 L <sub>AF,max</sub> | Ch2 L <sub>AE</sub> |
|-----|--------------------------|-------------------------|---------------------|
| 1   | 95.4                     | 97.9                    | 102.7               |
| 2   | 91.6                     | 95.2                    | 99.9                |
| 3   | 94.5                     | 97.4                    | 103.4               |
| 4   | 91.2                     | 93.8                    | 99.5                |
| 5   | 88.6                     | 91.1                    | 101.1               |
| 6   | 96.1                     | 99.4                    | 104.5               |
| 7   | 95.7                     | 99.2                    | 104.5               |
| 8   | 88.5                     | 93.6                    | 103.8               |

**9.12.03 Vaimennettu suora (Ch1: 201351/201950, Ch2: 201377/201949)**

| Nro | Aika  | Juna  | Akselilkm. | Kok.paino [t] | Pituus [m] |
|-----|-------|-------|------------|---------------|------------|
| 1   | 9.05  | M806  | 32         | 368           | 211        |
| 2   | 9.50  | M809  | 24         | 279           | 158        |
| 3   | 10.50 | M811  | 28         | 326           | 185        |
| 4   | 11.05 | M810  | 24         | 313           | 158        |
| 5   | 11.40 | T3510 | 74         | 1000          | 420        |
| 6   | 13.05 | M814  | 28         | 343           | 185        |
| 7   | 13.50 | M817  | 24         | 279           | 158        |

| Nro | Ohiajoaika [s] | Nopeus [km/h] | Huom.  |
|-----|----------------|---------------|--------|
| 1   | 6.0            | 127           | Pari 3 |
| 2   | 5.4            | 105           | Pari 4 |
| 3   | 5.3            | 126           |        |
| 4   | 5.0            | 114           |        |
| 5   | 20.5           | 74            |        |
| 6   | 5.2            | 128           |        |
| 7   | 5.4            | 105           | Pari 5 |

| Nro | Ch1 L <sub>AF,mean</sub> | Ch1 L <sub>AF,max</sub> | Ch1 L <sub>AE</sub> |
|-----|--------------------------|-------------------------|---------------------|
| 1   | 96.2                     | 99.6                    | 104.5               |
| 2   | 92.6                     | 95.3                    | 100.7               |
| 3   | 95.0                     | 97.8                    | 102.9               |
| 4   | 93.8                     | 97.1                    | 101.6               |
| 5   | 89.1                     | 92.2                    | 102.7               |
| 6   | 95.6                     | 98.4                    | 103.5               |
| 7   | 93.5                     | 96.7                    | 101.5               |

| Nro | Ch2 L <sub>AF,mean</sub> | Ch2 L <sub>AF,max</sub> | Ch2 L <sub>AE</sub> |
|-----|--------------------------|-------------------------|---------------------|
| 1   | 96.1                     | 99.3                    | 104.4               |
| 2   | 92.3                     | 95.4                    | 100.4               |
| 3   | 94.7                     | 98.0                    | 102.7               |
| 4   | 93.4                     | 96.6                    | 101.2               |
| 5   | 89.0                     | 92.6                    | 102.6               |
| 6   | 95.3                     | 99.1                    | 103.4               |
| 7   | 93.0                     | 96.7                    | 101.0               |

**19.12.03 Vaimentamaton suora (Ch1: 201351/201950, Ch2: 201377/201949)**

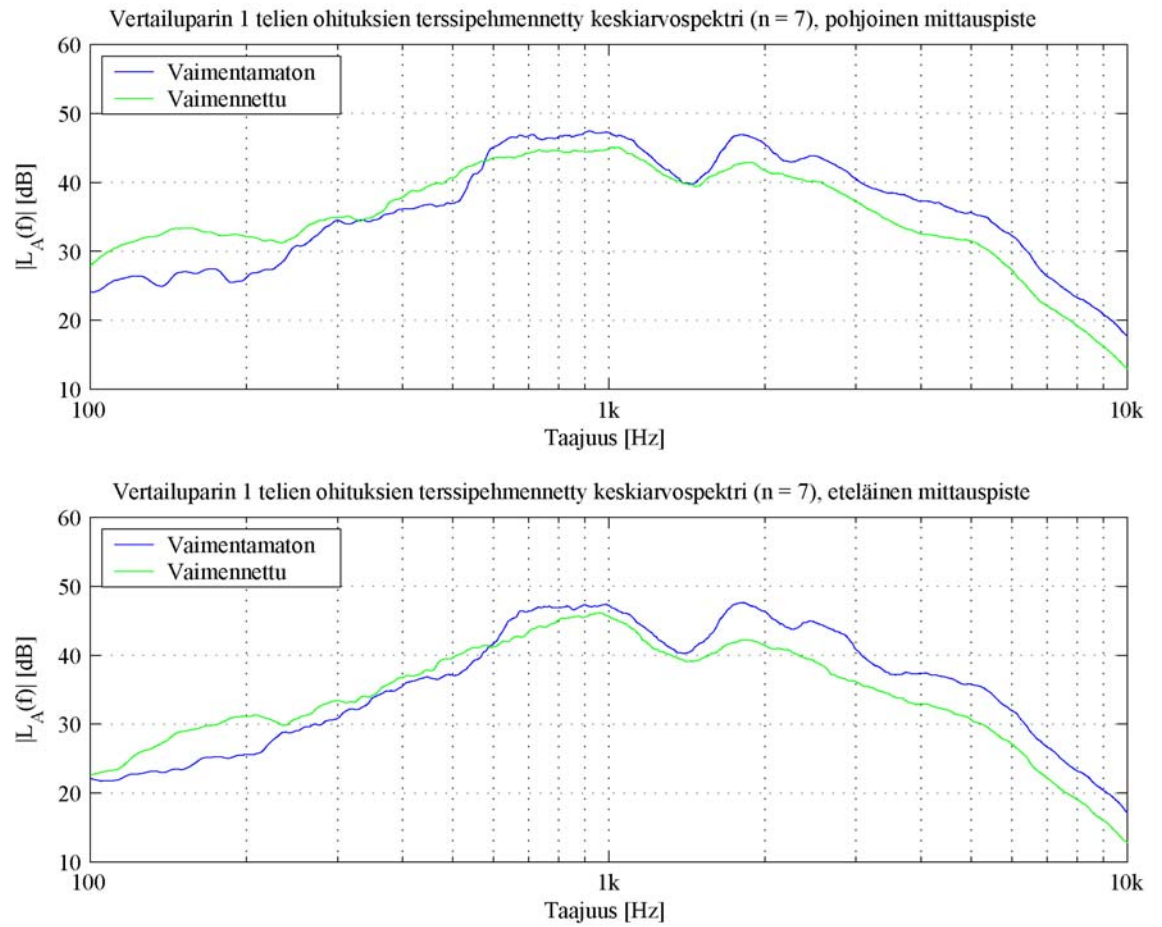
| Nro | Aika  | Juna  | Akselilkm. | Kok.paino [t] | Pituus [m] |
|-----|-------|-------|------------|---------------|------------|
| 1   | 9.05  | M806  | 24         | 276           | 158        |
| 2   | 9.50  | M809  | 24         | 279           | 158        |
| 3   | 10.50 | M811  | 40         | 458           | 264        |
| 4   | 11.05 | M810  | 24         | 295           | 158        |
| 5   | 11.40 | T3510 | 30         | 229           | 162        |
| 6   | 13.05 | M814  | 24         | 294           | 158        |
| 7   | 13.50 | M817  | 36         | 417           | 238        |
| 8   | 14.40 | T1011 | 196        | 1671          | 622        |
| 9   | 15.50 | M821  | 24         | 279           | 158        |
| 10  | 16.05 | M820  | 32         | 392           | 211        |

| Nro | Ohiajoaika [s] | Nopeus [km/h] | Huom.  |
|-----|----------------|---------------|--------|
| 1   | 4.6            | 124           |        |
| 2   | 5.3            | 107           | Pari 4 |
| 3   | 7.2            | 132           |        |
| 4   | 5.5            | 103           |        |
| 5   | 8.1            | 72            |        |
| 6   | 5.4            | 105           | Pari 1 |
| 7   | 6.7            | 128           | Pari 2 |
| 8   | 29.5           | 76            |        |
| 9   | 5.4            | 105           | Pari 5 |
| 10  | 6.0            | 127           | Pari 3 |

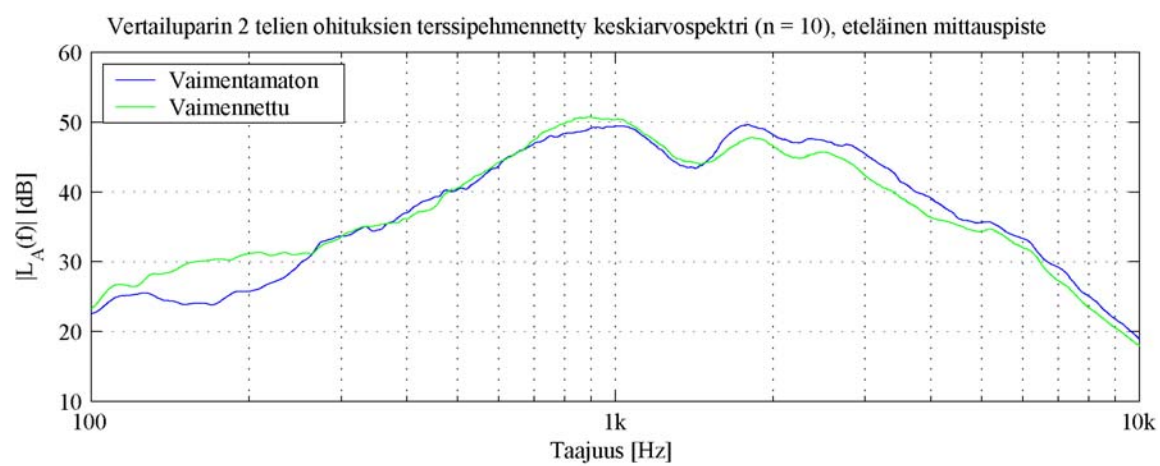
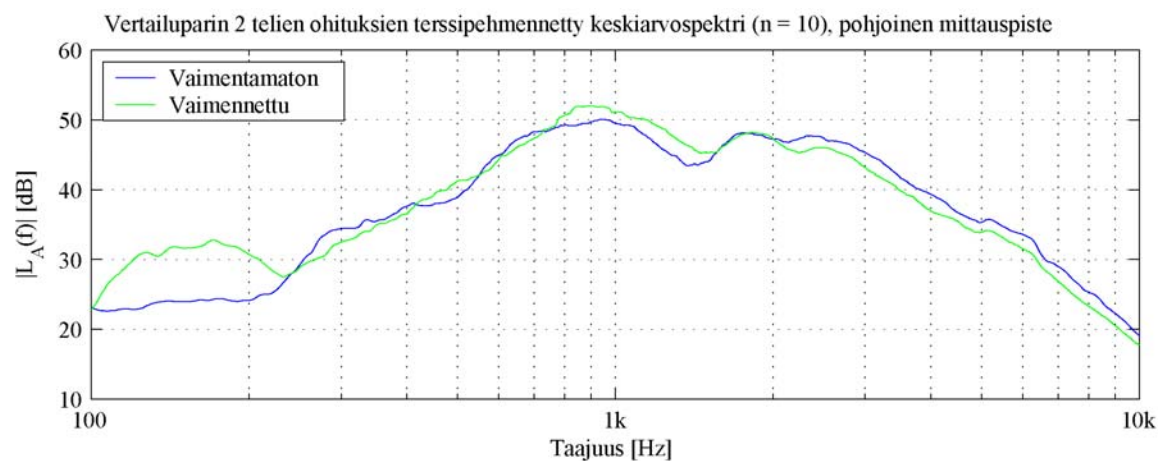
| Nro | Ch1 L <sub>AF,mean</sub> | Ch1 L <sub>AF,max</sub> | Ch1 L <sub>AE</sub> |
|-----|--------------------------|-------------------------|---------------------|
| 1   | 96.7                     | 99.7                    | 104.2               |
| 2   | 94.9                     | 98.3                    | 102.7               |
| 3   | 96.5                     | 99.3                    | 105.6               |
| 4   | 92.3                     | 95.4                    | 100.7               |
| 5   | 87.6                     | 90.3                    | 97.3                |
| 6   | 94.6                     | 97.8                    | 102.5               |
| 7   | 97.4                     | 100.7                   | 106.3               |
| 8   | 88.9                     | 93.5                    | 103.8               |
| 9   | 95.0                     | 97.9                    | 103.1               |
| 10  | 97.2                     | 100.2                   | 105.6               |

| Nro | Ch2 L <sub>AF,mean</sub> | Ch2 L <sub>AF,max</sub> | Ch2 L <sub>AE</sub> |
|-----|--------------------------|-------------------------|---------------------|
| 1   | 96.8                     | 101.1                   | 104.4               |
| 2   | 94.9                     | 98.2                    | 102.8               |
| 3   | 96.7                     | 100.2                   | 105.8               |
| 4   | 92.3                     | 95.3                    | 100.7               |
| 5   | 87.7                     | 90.2                    | 97.4                |
| 6   | 94.8                     | 98.4                    | 102.7               |
| 7   | 97.3                     | 100.7                   | 106.2               |
| 8   | 89.2                     | 92.5                    | 104.1               |
| 9   | 95.2                     | 97.7                    | 103.2               |
| 10  | 97.5                     | 100.9                   | 105.9               |

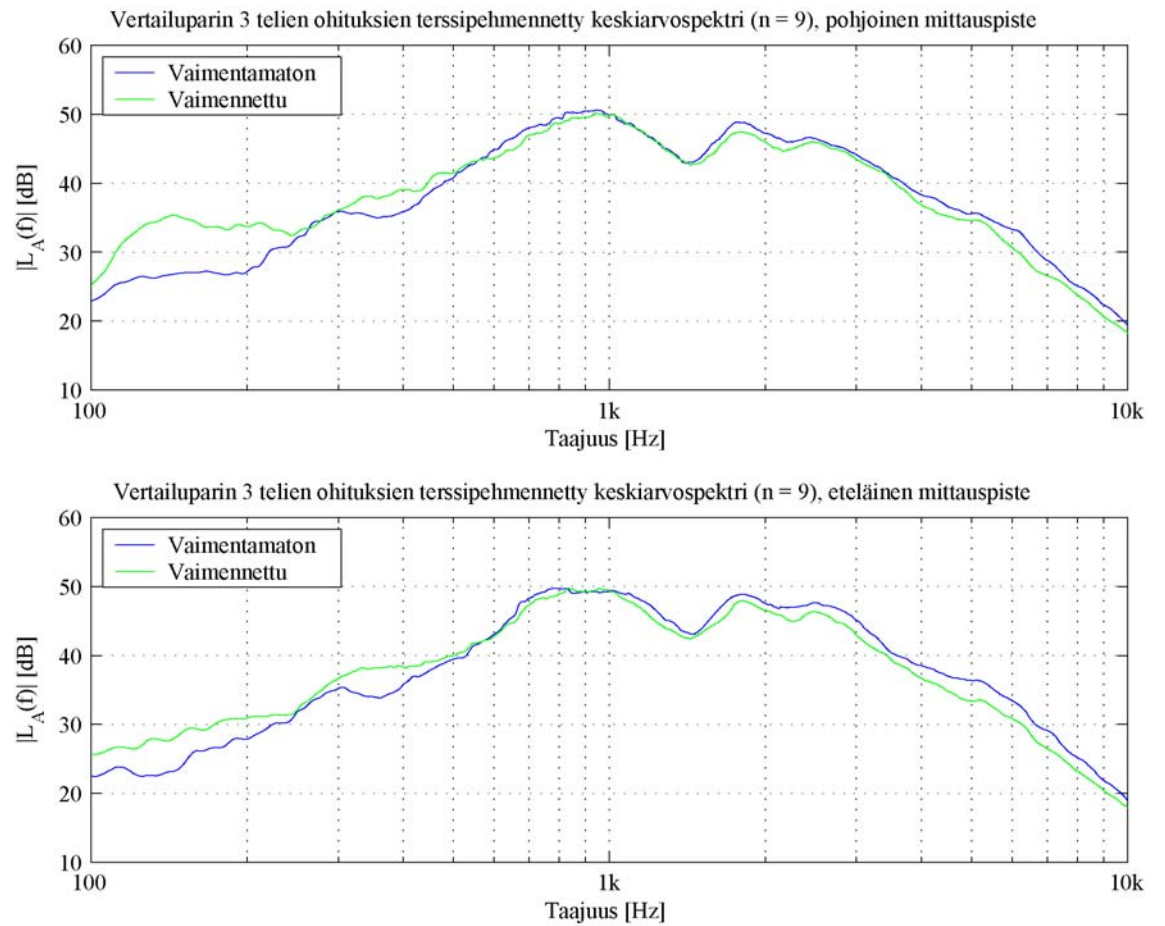
## Liite 5: Kenttämittauksien vertailuparien keskiarvospektrit



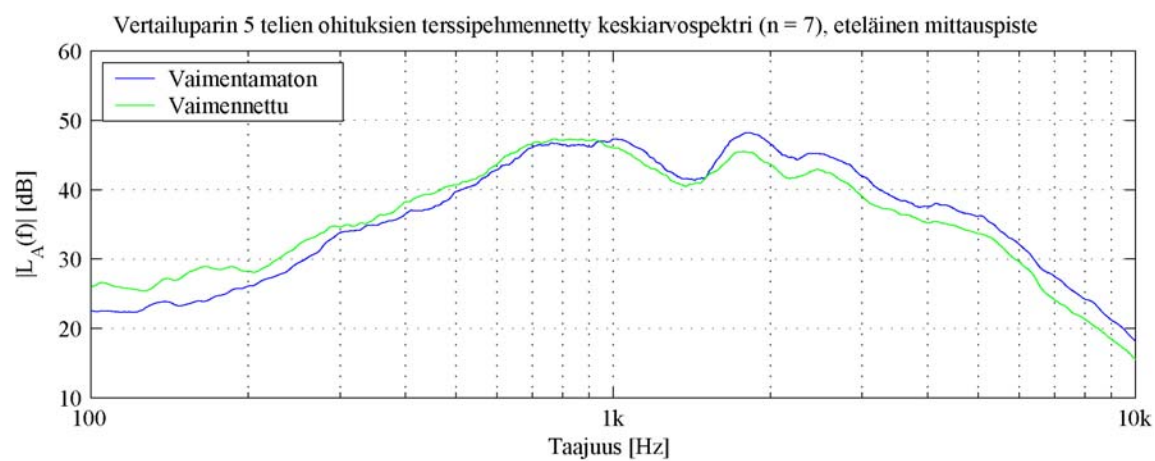
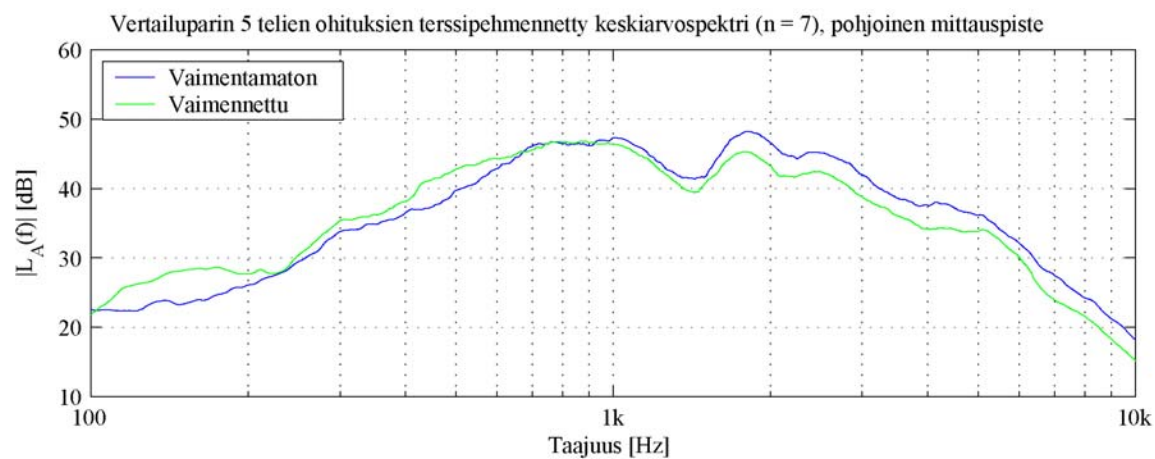
Kuva 26. Vertailuparin 1 keskiarvospektrit.



Kuva 27. Vertailuparin 2 keskiarvospektrit.



Kuva 28. Vertailuparin 3 keskiarvospektrit.



Kuva 29. Vertailuparin 5 keskiarvospektrit.