



Aalto-yliopisto
Insinöörityönsä korkeakoulu

Eveliina Vahtera

Raidemelun vaimennuskyky matalien melusteiden
tuotevaatimuksena

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

Espoossa 28.11.2011

Valvoja: professori Terhi Pellinen

Ohjaaja: diplomi-insinööri Tuomo Viitala

AALTO-YLIOPISTO INSINÖÖRITIEIDEIDEN KORKEAKOULU PL 12100, 00076 Aalto http://www.aalto.fi		DIPLOMITYÖN TIIVISTELMÄ	
Tekijä: Eveliina Vahtera			
Työn nimi: Raidemelun vaimennuskyky matalien melusteiden tuotevaatimuksena			
Korkeakoulu: Insinööritieteiden korkeakoulu			
Laitos: Yhdyskunta- ja ympäristötekniikka			
Professori: Tietekniikka		Koodi: Yhd-10	
Työn valvoja: professori Terhi Pellinen			
Työn ohjaaja: diplomi-insinööri Tuomo Viitala			
<p>Matalalla melusteella tarkoitetaan lähellä raidetta sijaitsevaa melustetta, jonka korkeus kiskon selästä on 85 cm. Este vaimentaa erityisesti pyörän ja kiskon kohtaamisesta syntyvää melua. Matalat melusteet eroavat sijainnin ja maisemavaikutusten osalta yleensä käytetyistä meluaidoista. Suomessa matalia melusteita on toistaiseksi rakennettu vain testauskäyttöön.</p> <p>Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, kuinka hyvin pohjoismaiseen raidemelun laskentamalliin perustuvalla melunlaskentaohjelmalla voidaan arvioida matalan melusteen vaimennuskykyä. Tutkimus suoritettiin mittaamalla melusteen vaimennuskyky maastossa ja sen jälkeen sama meluste mallinnettiin Datakustik CadnaA-melunlaskentaohjelmalla. Laskentaohjelman soveltuvuutta arvioitiin vertaamalla laskentaohjelman antamia tuloksia kenttämittauksissa saatuihin tuloksiin.</p> <p>Kenttämittausten perusteella matala meluste oli toimiva meluntorjuntaratkaisu, koska se alensi melutasoja standardin SFS-EN ISO 3095 mukaisissa tarkastelupisteissä noin 5,5-12 dB. Kun kenttämittausten tuloksia verrattiin laskentaohjelman tuloksiin, huomattiin melunlaskentaohjelmalla saatujen vaimennuksen arvojen olleen vain 3-5,5 dB. Tämän tutkimuksen tulosten perusteella pohjoismaiseen raidemelun laskentamalliin perustuva laskentaohjelma ei sovellu sellaisenaan matalan melusteen vaimennuskyvyn arviointiin, koska matala este sijaitsee lähempänä raidetta kuin tavallisesti käytetty meluaita. Luotettavimmin matalan melusteen vaimennuskyky voidaan selvittää kenttämittauksilla.</p>			
Päivämäärä: 28.11.2011		Kieli: suomi	Sivumäärä: 95+28
Avainsanat: raideliikennemelu, matala meluste, meluntorjunta			

AALTO UNIVERSITY SCHOOL OF ENGINEERING PO Box 12100, FI-00076 AALTO http://www.aalto.fi		ABSTRACT OF THE MASTER'S THESIS
Author: Eveliina Vahtera		
Title: Attenuation of rail noise as a product requirement for low-height noise barriers		
School: School of Engineering		
Department: Transportation and Environmental Engineering		
Professorship: Highway Engineering		Code: Yhd-10
Supervisor: professor Terhi Pellinen		
Instructor: M.Sc. (tech) Tuomo Viitala		
<p>A low-height noise barrier can be used as noise mitigation measure for railway traffic. A low-height noise barrier is located near the rail and its height from the top of the rail is 85 cm. The barrier attenuates especially the rolling noise radiated by the connection between the wheels and the rail. Low-height noise barriers differ in placement and landscape impacts from generally used soundwalls. In Finland, low-height noise barriers have only been built for test use so far.</p> <p>The aim of this study was to find out if the attenuation of noise by the low-height noise barriers can be evaluated by noise modelling software that is based on the Nordic prediction methodology for railway noise. The study was conducted by measuring the noise attenuation in a field experiments and by modelling the installed low-height barrier with Datakustik CadnaA noise modelling software. The applicability of the software was evaluated by comparing the results obtained from the software to those obtained from the field measurements.</p> <p>The field measurements demonstrated that a low-height noise barrier reduced the noise levels about 5,5 to 12 dB in measurement points according to the standard SFS-EN ISO 3095. However, the noise modelling software predicted only 3 to 5,5 dB noise reduction. Based on this study, the modelling software with Nordic prediction methodology for the railway noise cannot be applied for the evaluation of the low-height noise barriers' attenuation. The reason is that the low-height barrier is located closer to the rail than a typical acoustic barrier, for which the software has been developed. More reliable results for the attenuation of noise by the low-height noise barriers can be obtained via field measurements.</p>		
Date: 28.11.2011	Language: Finnish	Number of pages: 95+28
Keywords: railway noise, low-height noise barrier, noise abatement		

Alkusanat

Tämä diplomityö on tehty Aalto-yliopiston Insinööritieteiden korkeakoulun liikenne- ja tietekniikan tutkimusryhmässä. Diplomityön tilaajana oli Liikennevirasto, jonka edustaja diplomi-insinööri Tuomo Viitala toimi työn ohjaajana. Diplomityön valvoja oli professori Terhi Pellinen Aalto-yliopistosta. Haluan kiittää heitä molempia työn mahdollistamisesta sekä saamastani rakentavasta palautteesta.

Haluan kiittää dosentti Jarkko Valtosta, joka vastasi monista työhöni liittyvistä käytännön asioista sekä toimi suurena apuna työni aikana. Kiitos kuuluu myös Koneenrakennustekniikan laitoksen Panu Sainiolle, joka lainasi melumittarin tutkimukseen sekä opasti mittarin käytössä. Haluan kiittää koko tietekniikan laboratorion henkilökuntaa avusta, jonka sain työhöni. Suuri kiitos kuuluu myös kaikille kesätyöntekijöille, jotka auttoivat minua kenttämittauksissa. Lisäksi kiitoksen ansaitsevat kaikki henkilöt, jotka eri tavoin auttoivat minua eteenpäin diplomityöni aikana.

Eriyiskiitokset kaikesta saamastani tuesta ja hyvistä elämänohjeista kuuluvat isälleni ja äidilleni. Lopuksi haluan kiittää Artoa kannustuksesta ja kärsivällisyydestä tätä työtä kohtaan.

Espoossa 28.11.2011

Eveliina Vahtera

Sisällysluettelo

Alkusanat.....	3
Käsitteitä	6
1 Johdanto	7
1.1 Työn tausta.....	7
1.2 Tutkimusongelma.....	10
1.3 Työn tavoite ja aiheen rajausta	10
1.4 Työn rakenne	11
2 Akustiikka	12
2.1 Ääni	12
2.2 Äänen eteneminen ympäristössä.....	17
2.3 Melu	22
2.4 Meluntorjunnan lainsäädäntö ja ohjeavot	23
3 Raideliikenteen melu.....	25
3.1 Melun lähteet raideliikenteessä.....	25
3.2 Raideliikennemelun erityispiirteet	28
3.3 Raideliikennemelulle altistuminen Suomessa	33
3.4 Raideliikennemelun torjunta.....	34
4 Matalat meluesteet	43
4.1 Määritelmä ja alustavat tuotevaatimukset	43
4.2 Ulkomailla käytetyt matalat meluesteet	48
5 Kenttätutkimus matalan meluesteen vaimennuskyvystä.....	50
5.1 Mittausten tavoitteet ja mittauspaikka.....	50
5.2 Tutkimusmenetelmät	54
5.2.1 Mittauskalusto	54
5.2.2 Mikrofonien sijainnit	55
5.2.3 Mittausmenettely	57
5.3 Mittaustulokset ja tulosten tarkastelu	59
5.4 Mittaustulosten luotettavuus	69
6 Matalan meluesteen vaimennuskyvyn määrittäminen melunlaskentaohjelmalla.....	72
6.1 Melulaskennan tarkoitus ja laskentaohjelma	72

6.2 Mallinnus	75
6.3 Tulokset	77
6.4 Melunlaskentamallin luotettavuus	87
7 Yhteenveto, päätelmät, suositukset.....	88
Lähteet.....	92
Liiteluettelo	96

Käsitteitä

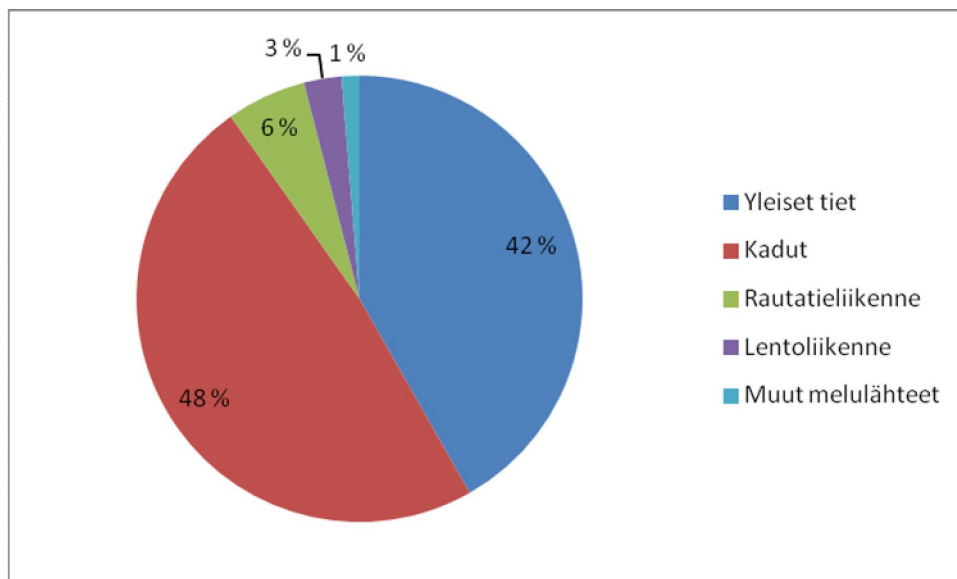
Absorptio	Energiahäviöiden aiheuttama ääniaallon vaimeneminen sen edessä väliaineessa tai heijastuessa rajapinnasta.
Absorboiva melueste	Meluesteen pinta on ääntä imevä, joten melu ei heijastu sen pinnasta.
A-taajuuspainotus	Taajuuspainotus, joka ottaa huomioon ihmisen kuulon erilaisen herkkyyden eri taajuuksille.
Aukean tilan ulottuma (ATU)	Pitkin raidetta ulottuva tila, jonka sisäpuolella ei saa olla kiinteitä rakenteita tai laitteita.
Desibeli	Kahden tehoon verrannollisen suureen suhteen kymmenkantaisten logaritmin arvo kymmenellä kerrottuna. Esimerkiksi tehojen P1 ja P2 suhde desibeleinä on $10\lg(P1/P2)$.
Enimmäistaso	Mittausaikana vallinnut suurin äänitaso.
Keskiäänitaso	Äänenpaineen keskimääräistä tehollisarvoa vastaava äänitaso tietyllä ajanjaksolla.
Melu	Ääni, jonka ihminen kokee epämiellyttävänä tai häiritsevänä tai joka on muulla tavoin ihmisen terveydelle vahingollista tai hänen muulle hyvinvoinnilleen haitallista.
Melualtistus	Tilanne, jossa ihminen on äänienergian vaikutuksen kohteena.
Melutaso	Melun äänitaso, usein A-painotettu keskiäänitaso.
Taustamelu	Muu kuin tarkasteltava melu.
Ympäristömelu	Yleisnimitys kaikelle ihmisen asuin- ja elinympäristössä esiintyvälle melulle.

1 Johdanto

1.1 Työn tausta

Melu tarkoittaa ääntä, jonka ihminen kokee epämiellyttävänä tai häiritsevänä. Melua ei voida määrittää vain fysikaalisesti, koska myös fysiologiset vaikutukset ja häiritsevyys vaikuttavat siihen, mitkä äänet koetaan meluksi. Melulla on monia haitallisia vaikutuksia ihmisen terveyteen ja se heikentää ympäristön laatua. (Heinonen-Guzejev 2007.) Lisäksi liikennemelu aiheuttaa vuosittain yhteiskuntataloudellisia kustannuksia, jotka ovat Euroopassa 0,2-0,5 prosenttia bruttokansantuotteesta. Suomessa tämä tarkoittaa noin 250–700 miljoonan kustannuksia vuodessa. (Ympäristöministeriö 2004.)

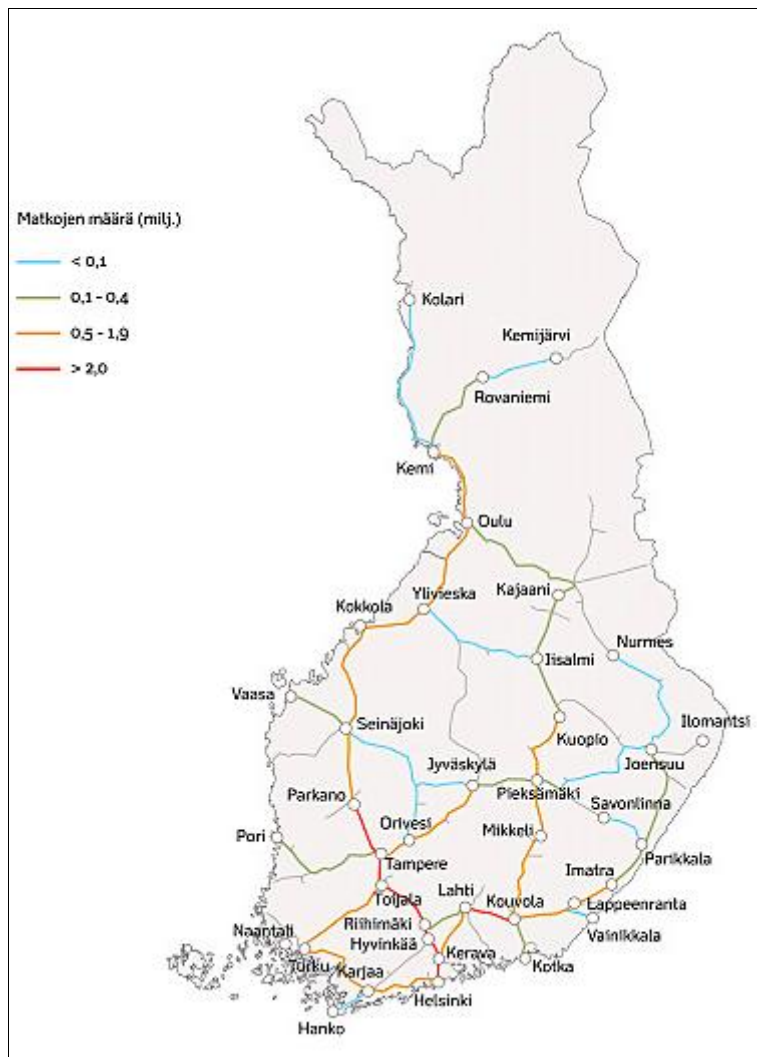
Päiväajan yli 55 dB ympäristömelualueilla asuu noin 800 000 – 900 000 suomalaista, eli 17 % Suomen asukkaista. Kuvassa 1 on esitetty melualueilla asuvien prosenttiosuudet melulähteittäin. Raideliikenteen melualueilla asuu koko Suomessa noin 48 500 henkeä. Raideliikenteen melulle altistuu vähemmän ihmisiä kuin tieliikenteen melulle, koska raideliikenteen verkon pituus on noin 10 % maanteiden verkon pituudesta. (Liikkonen & Leppänen 2005.)



Kuva 1. Melualueilla asuvien prosenttiosuudet melulähteittäin.

Raideliikenteen meluhaitat keskittyvät vilkkaimmin liikennöidyille rataosuuksille. Siksi raideliikenteen melulle altistutaan etenkin YTV- alueella (Helsinki, Vantaa, Espoo ja Kauniainen) sekä Tampereen seudulla (Liikkonen & Leppänen 2005). Suomen kaukoliikenteen matkustajavirrat on esitetty kuvassa 2 ja rataverkko liitteessä A. Tulevaisuudessa rautatieliikenteen kasvu tulee keskittymään henkilöliikenteessä pääkaupunkiseu-

dun lähiliikenteeseen ja tavaraliikenteessä Kotka-Kouvola-Vainikkala rataosuuden läpikulkuliikenteeseen. Myös raideliikenteen meluhaitat keskittyvät näille rataosuuksille. (Ympäristöministeriö 2004.)



Kuva 2. Kaukoliikenteen matkustajavirrat (Liikennevirasto 2009).

Raideliikenteen melu on kasvava ympäristöongelma. Suomessa veturikilometrien määrä on lisääntynyt noin prosentin vuosivauhdilla ja liikennemäärien kasvun myötä yhä useammat radan läheisyydessä asuvat kokevat melun ongelmana (Ympäristöministeriö 2004). Lisäksi kaupunkirakenteen tiivistäminen kestävä kehityksen periaatteiden mukaisesti on aiheuttanut sen, että uusia asuinalueita kaavoitetaan yhä enemmän rautateiden läheisyyteen (Innanen & Soosalu 2009). Tulevaisuudessa Suomen rataverkko ei tule juuri laajenemaan, mutta olemassa olevan runkoverkon palvelutasoa pyritään nostamaan liikennöintinopeuksia nostamalla. Nopeuden kasvu lisää raideliikenteestä syntyvää melua ja sille altistuvien määrää. (Ympäristöministeriö 2007b).

Raideliikenteen meluhaitat tulevat lisääntymään tulevaisuudessa muuallakin Euroopassa, koska sekä matkustajamäärien että rautateiden tavarakuljetusten oletetaan kasvavan. Raideliikenteen kasvavat liikennemäärät ovat seurausta Euroopan unionin tavoitteesta

siirtää matkustajia muista kulkumuodoista raideliikenteelle sekä kasvavasta tavarankuljetustarpeesta. ERRAC (The European Rail Research Advisory Council) on esittänyt tavoitteeksi kolminkertaistaa matkustajaliikenteen määrät ja lisätä tavarankuljetuksia yli kolminkertaisesti vuodesta 2000 vuoteen 2020 mennessä. Tavoitteen saavuttaminen edellyttäisi 15 prosentin markkinaosuutta tavarankuljetuksista ja 12 prosentin markkinaosuutta henkilökuljetuksista. (ERRAC 2002.) Myös kansainvälinen rautatieliitto UIC (The International Union of Railways) on esittänyt samansuuruisia kasvutavoitteita raideliikenteelle. UIC arvioi 10 prosentin markkinaosuutta rautateiden henkilöliikenteelle ja 15 prosentin markkinaosuutta tavaraliikenteelle vuoteen 2020 mennessä. (UIC 2001.) Jos raideliikenteen kasvuennustukset toteutuvat, aiheuttavat ne ympäristövaikutuksia sekä olemassa olevalla rataverkolla että liikennemäärien kasvun myötä rakennetuille uusille ratayhteyksille. Karkean arvion mukaan raideliikenteen kasvu voi lisätä kokonaismelutasoa noin 5 dB ja kolminkertaistaa melutapahtumien määrän öisin. (Ögren 2006.)

Raideliikenteen kasvavien meluongelmien myötä myös tarve raidemelun torjumiselle tulee kasvamaan. Lisäksi Suomessa melulle altistuvien määrää pyritään vähentämään valtakunnallisella meluntorjunnan toimintaohjelmalla. Tavoitteena on vähentää ympäristömelua niin, että vuonna 2020 yli 55 desibelin melualueilla asuisi 20 % vähemmän ihmisiä kuin vuonna 2003. Raideliikenteen osalta tavoite tarkoittaa sitä, että melualueilla asuvien määrää tulisi vähentää 30 prosentilla vuodesta 2003 vuoteen 2020 mennessä. Silloin raideliikenteen melualueilla asuisi enintään 25 000 asukasta. (Ympäristöministeriö 2004.)

Raideliikenteen meluntorjuntaan tarvitaan uusia toimivia ja kustannustehokkaita ratkaisuja, joilla voidaan taata ihmisten terveellinen asuinympäristö. Meluntorjunnan ensisijainen tavoite on aina vähentää syntyvän melun määrää. Tämä voidaan toteuttaa esimerkiksi parantamalla kiskojen ja pyörien kuntoa. Lisäksi kehitteillä on erilaisia junakalustoon liittyviä teknisiä ratkaisuja. Nämä keinot eivät kuitenkaan ole vielä osoittautuneet riittävän tehokkaiksi ja siksi raideliikenteen meluhaittoja joudutaan torjumaan erilaisilla rakenteellisilla ratkaisuilla kuten meluaidoilla. Vaikka meluaita on toiminnallisesti hyvä vaihtoehto, ei se silti sovellu meluntorjuntaratkaisuksi kaikissa kohteissa. Meluaidat ovat maisemakuvallisesti hallitsevia ja niitä pidetään rakentamiskustannuksiltaan kalliina vaihtoehtona. (Innanen & Soosalu 2009.) Meluaidat voivat rajoittaa näkymiä ihmisten asunnoista ja lisäksi ne peittävät junamatkustajille aukenevia näköaloja junien ikkunoista.

Meluaita voidaan korvata tietyissä tapauksissa kaupunkikuvaan paremmin sopivalla matalalla melusteellä. Matalalla melusteellä tarkoitetaan estettä, jonka nimelliskorkeus kiskon pinnasta on 850 mm + 10 mm -20mm. Matala meluste sijaitsee ratapenkeeseen päällä lähellä kiskoja, jolloin se vaimentaa parhaiten kiskon ja pyörän kohtaamisesta syntyvää melua. (Innanen & Soosalu 2009.) Matala meluste on uudentyypinen meluntorjuntaratkaisu, josta on vain vähän tutkimustietoa olemassa. Suomessa matalia melusteitä on toistaiseksi rakennettu vain koekäyttöön.

Matalille melusteille on laadittu vasta alustavat tuotevaatimukset, joissa annetaan ohjeet esteen mitoille, painolle, erilaisten kuormien kantokyvyille, perustamiselle, kaapeloinnille ja maadoitukselle. Lisäksi tuotevaatimusten luonnosversion mukaan melusteella saavutettava hyöty (melutason alenema ja suojattavien kohteiden määrä) on selvitettävä. (Destia 2009.)

1.2 Tutkimusongelma

Matalien melusteiden alustavissa tuotevaatimuksissa ei oteta kantaa siihen, miten melusteelta saavutettava melutason alenema tulisi selvittää. Melutason alenema voidaan selvittää esimerkiksi maastomittausten avulla. Maastomittauksia varten tehtävä koerakentaminen vaatii kuitenkin resursseja ja lisää kustannuksia.

Yleensä melusteelta saavutettava hyöty selvitetään kaupallisella melunlaskentaohjelmalla. Suomessa käytettävien melunlaskentaohjelmien on perustuttava yhteispohjoismaiseen raideliikenteen laskentamalliin, jonka kehitystyöstä vastaavat Pohjoismaiden ympäristö- ja liikenneviranomaiset sekä akustiikka-alan ammattilaiset. Suomessa yleisesti käytetyt melunlaskentaohjelmat ovat SoundPlan ja CadnaA. Pohjoismainen raide-melun laskentamalli soveltuu meluaitojen mallinnukseen, mutta aiemmin ei ole tutkittu, soveltuuko pohjoismaiseen laskentamalliin perustuva melunlaskentaohjelma yhtä hyvin myös uudentyypin, lähellä raidetta olevan matalan melusteen mallintamiseen. Ei siis tiedetä, saadaanko laskentaohjelmalla samoja tuloksia matalan melusteen melunvaimennuskyvyille kuin kenttämittauksissa.

1.3 Työn tavoite ja aiheen rajaus

Tämän työn päätavoitteena oli selvittää, kuinka hyvin pohjoismaiseen raide-melun laskentamalliin perustuva laskentaohjelma soveltuu matalan melusteen vaimennuskyvyn arviointiin. Työn tarkoituksena oli verrata kenttämittauksista saatua aineistoa melunlaskentaohjelman tuloksiin ja näin arvioida melunlaskentaohjelman soveltuvuutta matalan melusteen melunvaimennuskyvyn todentamiseen. Melunlaskentaohjelmana käytettiin pohjoismaiseen raide-melun laskentamalliin perustuvaa CadnaA-ohjelmaa.

Työssä otettiin kantaa vain melusteen akustisiin tuotevaatimuksiin. Tutkimuksen kenttäsuudessa suoritettiin mittauksia ainoastaan yhdelle kaupalliselle matalan melusteen koerakenteelle. Tämän tutkimuksen tulokset koskevat vain koerakennetta, jolle mittaukset suoritettiin.

1.4 Työn rakenne

Tämä diplomityö koostuu kirjallisuusselvitykseen pohjautuvasta teoriaosasta, kenttätutkimuksesta sekä melunlaskentaohjelman käytöstä. Teoriaosassa käsitellään akustiikkaa, perehdytään tarkemmin raideliikenteen meluun ja tutustutaan matalien melusteiden ominaisuuksiin ja käyttömahdollisuuksiin. Kokeellinen osuus koostuu kenttämittauksista ja melunlaskentaohjelman käytöstä. Kenttätutkimukset suoritettiin kesällä 2011 Tuusulan Kytömaalla, jossa oli matalan meluesteen koerakenne. Melumittausten avulla selvitettiin melutasot eri pisteissä junan ohiajon aikana. Vertailemalla meluesteen kohdalla ja ulkopuolella olleiden tarkastelupisteiden melutasoja pystyttiin arvioimaan matalan meluesteen melunvaimennuskyky. Kenttätutkimuksen tekotapaa ja tuloksia on käsitelty luvussa 5.

Luvussa 6 on käsitelty CadnaA-melunlaskentaohjelman käyttöä, esitetty melunlaskentaohjelman tulokset ja verrattu näitä tuloksia kenttämittausten tuloksiin. Melunlaskentaohjelmalla mallinnettiin meluste, jonka ominaisuudet vastasivat kenttätutkimuksessa käytetyn matalan meluesteen ominaisuuksia. Junan ohiajosta syntyviä melutasoja tarkasteltiin samoissa pisteissä kuin kenttämittauksissa. Näin pystyttiin arvioimaan vastaavatko kenttämittausten ja melunlaskentaohjelman tulokset toisiaan. Luvussa 7 esitetään työn yhteenveto ja suositukset.

2 Akustiikka

2.1 Ääni

Ääni on aaltoliikkeenä etenevää ilmahiukkasten värähtelyä. Ääniaallot etenevät väliaineessa, joka voi olla nestettä, kaasua tai kiinteää ainetta. Kun ääniaalto etenee ilmassa, aiheuttaa se pieniä muutoksia ilmanpaineeseen. Ilmanpaineen pienet muutokset taas synnyttävät kuuloaistimuksen. Äänitasomittareissa käytettävien mikrofonien toiminta perustuu myös ilmanpaineen tasojen vaihtelun mittaamiseen. (Rossing et al. 2002.) Äänenpaineella tarkoitetaan paineen vaihtelua staattisen ilmanpaineen suhteen. Värähtelyn ja aaltoliikkeen aiheuttama ilmanpaineenvaihtelu on erittäin pientä normaaliin ilmanpaineeseen verrattuna. Esimerkiksi miljoonasosan vaihtelu normaalista noin 100 kPa ilmanpaineesta vastaa äänen voimakkuutta 74 dB. (Lahti 1995.)

Äänen fysikaaliseen luonnehdintaan tarvitaan kolme ulottuvuutta: äänen taso, äänen taajuus ja aika. Äänen taso kuvaa äänen voimakkuutta. Erilaisia tasoja ovat esimerkiksi äänenpainetaso ja äänitehotaso. Akustiikassa tasot ovat 10-kantaiseen logaritmiin perustuvia suureita, joiden yksikkönä on desibeli (dB). Akustiikassa käytetään logaritmiin perustuvia suureita, koska ihmisen kuuloaisti toimii logaritmisesti eli se aistii esimerkiksi äänenpainetaso suhteelliset muutokset samansuuruisina (Lahti 2003). Ihminen kykenee aistimaan noin 2-3 dB suuruisin melutason muutoksen. Melun koetaan kaksinkertaistuvan, jos melutason muutos on 8-10 dB. (Tiehallinto.) Taulukossa 1 on esitetty äänitasojen muutoksia, jotka ihminen pystyy havaitsemaan.

Taulukko 1. Ihmiskorvin kuultavat äänitaso muutokset.

Muutos (dB)	Vaikutus
1-2	Tuskin havaittava muutos
3-4	Havaittava, melko pieni muutos
5-6	Selvästi havaittava, oleellinen muutos
7-8	Suuri muutos
yli 10	Hyvin suuri muutos

Äänenpainetaso määrää ihmisen aistimuksen ja siten myös haittojen ja häiritsevyyden suuruuden. Äänitasomittari eli melumittari mittaa havaintopisteen äänenpainetasoa. Äänenpainetaso suuruus riippuu äänilähteen melupäästöstä (äänitehotasosta), äänilähteen etäisyydestä ja ympäristön ominaisuuksista. (Hänninen & Tiihinen 1997.)

Äänenpainetaso L_p voidaan määrittää yhtälöllä

$$L_p = 20 \lg \left(\frac{p}{p_0} \right), \quad (1)$$

jossa p on tarkasteltavan äänen äänenpaineen tehollisarvo [Pa]

p_0 vertailuäänepaine 2×10^{-5} Pa.

Vertailuarvona käytetään äänenpainetta $20 \mu\text{Pa}$, koska se on normaalikuuloisen ihmisen kuulokynnys noin 1 kHz taajuudella. (Rossing et al. 2002.) Erialaisten äänien äänenpainetasoja on esitelty taulukossa 2.

Taulukko 2. Eri lähteiden äänenpainetasoja (Hänninen & Tiihinen 1997.)

Äänenpainetaso (dB)	Esimerkki
140	lähellä suihkukonetta
130	kipukynnys, paineilmasara
120	
110	iso orkesteri
100	konepaja, kivipora
90	
80	vilkasliikenteinen katu
70	
60	ravintola, tavaratalo
50	toimisto
40	hiljainen asuntoalue yöllä
30	hiljainen asunto
20	taustamelu tyhjässä TV-studiossa
10	
0	kuulokynnys (1000 Hz)

Ääniteho ilmoittaa kuinka suuren akustisen tehon tietty äänilähde tuottaa. Ääniteho ei riipu sijoituspaikasta eikä ympäristöstä, vaan se on äänilähteen oma perusominaisuus. (Lahti 1995.) Erialaisten äänilähteiden äänitehoja on esitetty taulukossa 3. Ääniteho määritellään yhtälöllä

$$L_w = 10 \lg \frac{W}{W_0} \quad (2)$$

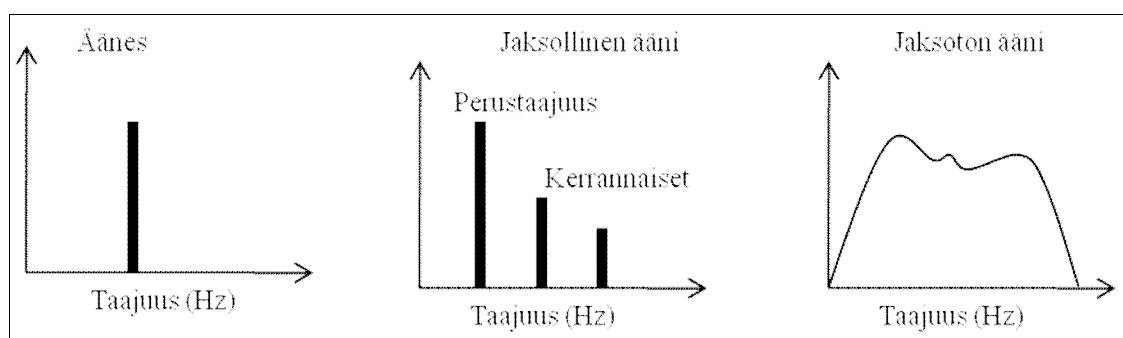
jossa P on mitattu ääniteho [W]

P_0 vertailuteho 10^{-12} W. (Rossing et al. 2002.)

Taulukko 3. Erilaisten äänien äänitehotasoja (Hänninen & Tiihinen 1997).

Äänentehotaso (dB)	Esimerkki
195	raketti
180	suihkukone
150	4-potkurinen lentokone
130	suuri orkesteri
100	auto maantiellä
90	huutaminen
70	normaali puhe
30	kuiskaus

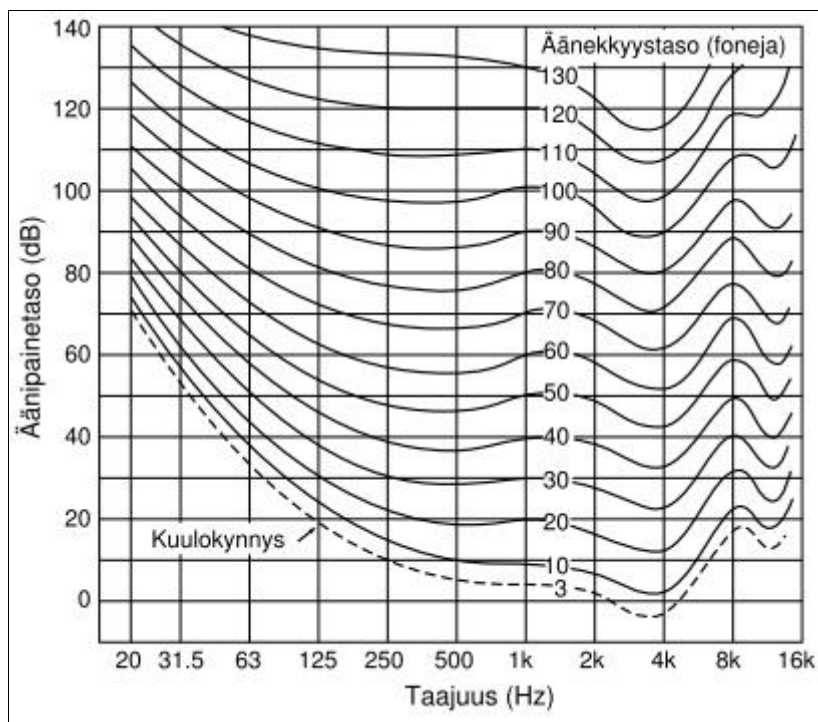
Äänen taajuus tarkoittaa äänen jaksojen lukumäärää sekunnissa. Äänen taajuussisältö vaikuttaa äänen tason lisäksi äänen synnyttämään aistimukseen. Taajuuden yksikkö on hertsi (Hz) ja taajuusjakaumaa kutsutaan spektriksi. Taajuusjakaumaltaan erilaisia ääniä ovat äänes, jaksollinen ääni ja jaksoton ääni (kuva 3). Äänes muodostuu vain yhdestä taajuudesta ja sen taajuusjakauma sisältää vain tällä taajuudella olevan viivaspektrin. Jaksollinen ääni taas sisältää perustaajuuden ja sen kerrannaiset. Jaksollisia ääniä muodostavat monet musiikki-instrumentit. Rautatieliikenne taas aiheuttaa jaksotonta ääntä eli sen taajuusjakauma on jatkuva ja sisältää lukemattoman määrän eri taajuuskomponentteja. Taajuusalue esitetään aina logaritmisella asteikolla ja mittaukset tehdään käyttämällä tietyn levyisiä kaistoja. Yleisemmin käytetyt kaistat ovat oktaavi- ja terssikaista. Oktaavikaistan rajataajuuksien suhde on 2. Terssikaista taas saadaan jakamalla oktaavikaista kolmeen osaan. Terssikaistan rajataajuuksien suhde on $\sqrt[3]{2}$. (Hänninen & Tiihinen 1997.)



Kuva 3. Erilaisten äänien taajuusjakaumat.

Ihmisen kuulo on kehittynyt vastaanottamaan ilmassa eteneviä ääniaaltoja tietyltä taajuus- ja äänenpainetasoalueelta, joka on esitetty kuvassa 4. Normaalikuuloisen ihmisen kuuloalue käsittää taajuusalueen 20 – 20 000 Hz. Kuuloaluetta matalampitaajuisia il-

manpainevärähtelyjä kutsutaan infraääniksi ja korkeampitaajuisia värähtelyjä ultraääniksi. Kuulokynnys tarkoittaa heikoimman kuultavissa olevan äänen äänenpainetasoa. Kipuraja taas on voimakkain ääni, minkä kuulo pystyy käsittelemään (130 dB, 1kHz). Tätä voimakkaammat äänet voivat välittömästi vaurioittaa kuuloa ja ne koetaan usein kipuaistimuksena. Kuvaa 4 voidaan kutsua myös vakioäänekkyyskäyrästöksi, koska sen jokaisella käyrällä vallitsee tietty äänekkyystaso. Äänekkyystaso kuvaa kuuloaistimuksen voimakkuutta ja sen yksikkö on foni. Äänen äänekkyystaso on lukuarvona sama kuin yhtä äänekkään 1 kHz:n äänksen äänenpainetaso desibeleinä. Siksi esimerkiksi 60 fonin äänekkyystaso taajuudella 20 Hz edellyttää lähes 100 dB:n äänenpainetasoa, kun 1kHz:n taajuudella riittää 60 dB. (Karjalainen 2008.)



Kuva 4. Vakioäänekkyyskäyrästö (Karjalainen 2008).

Ihmisen korvan herkkyys eri taajuuksille vaihtelee siten, että kuulo on herkimmillään taajuusalueella 2 000 – 5 000 Hz. Kuuloalueen päissä kuulokynnys on useita kymmeniä desibelejä korkeammalla kuin herkimmillä alueilla. Jos äänen tasoa arvioitaessa halutaan ottaa huomioon ihmisen kuulon herkkyys eri taajuuksille, käytetään A-taajuuspainotusta. Taajuuspainotus tarkoittaa periaatetta, jonka mukaan äänenpainetason mittauksissa huomioidaan eri taajuuskomponenttien osuus. A-taajuuspainotuksessa matalia taajuuksia vaimennetaan ihmisen kuulokynnyksen mukaisesti ja se on yleisemmin käytetty taajuuspainotus. Lineaarinen taajuuspainotus ei taas painota mitään taajuutta vaan on suora taajuuden suhteen. Muita taajuuspainotuksia ovat B-, C- ja D-painotus. B- ja C-painotusta käytetään työsuojelullisissa mittauksissa ja D-painotusta suihkukoneiden melumittauksissa. (Hänninen & Tiihinen 1997.)

Taajuus vaikuttaa myös äänen aallonpituuteen. Meluntorjunnassa tähän on kiinnitettävä huomiota, kun mitoitetaan esteitä, koska este vaimentaa ainoastaan ääntä, jonka aallonpituus on pienempi kuin esteen korkeus. (Suomen kuntatekniikan yhdistys 1997.) Äänen aallonpituus eri taajuuksilla on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Äänen taajuuden ja aallonpituuden väliset suhteet ilmassa, lämpötila 20 °C (Björk 1991).

Taajuus (Hz)	Aallonpituus (m)
20	17
50	6,9
100	3,4
500	0,69
1k	0,34
5k	0,069
20k	0,017

Ympäristössä esiintyvät äänet vaihtelevat ajan kuluessa ja tämän takia äänien mittaamiseksi on käytettävä erilaisia tarkastelujaksoja. Enimmäistasolla L_{\max} tarkoitetaan mittausaikana vallinnutta suurinta äänenpainetasoa. Melun voimakkuutta voidaan kuvata myös mittausjakson tehollisarvon eli keskiäänitason avulla. (Hänninen & Tiihinen 1997.) Keskiäänitasosta käytetään myös nimitystä ekvivalenttitaso. A-painotetun äänenpaineen keskimääräistä tehollisarvoa määritetyllä ajanjaksolla (T) vastaava A-äänitaso $L_{Aeq,T}$ voidaan määrittää yhtälöllä

$$L_{Aeq,T} = 10 \times \lg \left(\frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} 10^{\frac{L_{pA}(t)}{10}} dt \right), \quad (3)$$

jossa t_1 on määrätyn ajanjakson T alkuhetki

t_2 määrätyn ajanjakson T loppuhetki

$L_{pA}(t)$ tarkasteltavan äänen A-äänitason hetkellisarvo (dB).

Jos usean ajanjakson keskiäänitasot tunnetaan, niitä vastaava kokonaisajan keskiäänitaso voidaan määrittää yhtälöllä

$$L_{Aeq,T} = 10 \lg \left(\frac{1}{T} \sum_{i=1}^M 10^{\frac{L_{Aeq,T_i}}{10}} \right), \quad (4)$$

jossa M on ajanjaksojen lukumäärä

T_i ajanjakson i kesto

T kokonaisaika ($\sum T_i$)

L_{Aeq,T_i} ajanjakson i keskiäänitaso.

Jos kaikki ajanjaksot T_i ovat samanpituisia, yhtälö yksinkertaistuu muotoon

$$L_{Aeq,T} = 10 \lg \left(\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M 10^{\frac{L_{Aeq,T_i}}{10}} \right) \quad (5)$$

(Ympäristöministeriö 1995.)

Melutasojen ohjearvot ilmoitetaan A-painotettuina keskiäänitasoina. Päiväajan ohjearvona käytetään keskiäänitasoa aikavälillä 7-22 ja yöajan ohjearvo tarkoittaa keskiäänitasoa aikavälillä 22-7. (Vnp933/92.) Melutasojen ohjearvoja on käsitelty tarkemmin luvussa 2.4.

2.2 Äänen eteneminen ympäristössä

Tarkastelukohteen melutaso riippuu äänilähteen ominaisuuksien lisäksi ympäristön olosuhteista. Äänen eteneminen ympäristössä perustuu aaltoliikeopin lakeihin. Ääniaalto esimerkiksi taittuu kun väliaineen ominaisuudet muuttuvat. Lisäksi ääni taipuu esteiden taakse, heijastuu rajapinnoista ja siroaa pienten kappaleiden vaikutuksesta. Ääni vaimenee kun etäisyys äänilähteestä kasvaa. Tätä ilmiötä kutsutaan etenemisvaimennukseksi, joka koostuu leviämistä vaimennuksesta ja lisävaimennuksesta. (Björk 1991. Hänninen & Tiihinen 2007.)

Leviämistä vaimennus aiheutuu äänen hajautumisesta. Äänilähde säteilee ympärilleen pois päin etenevän ääniaallon, jossa ääniteho leviää laajemmalle pinnalle etäisyyden kasvaessa. Silloin myös äänipaine pienenee. Äänitehon ja -paineen pieneneminen riippuu äänilähteen muodosta. Tarkasteluetäisyyteen verrattuna pieni melulähde on pistelähde. Esimerkiksi auto ja lentokone ovat pistelähteitä. Yhtenäinen autojono ja pitkä juna ovat taas viivalähteitä. (Lahti 2003.)

Pistemäinen äänilähde aiheuttaa ympärilleen pallomaisen äänikentän. Kun etäisyys kasvaa, pistemäisen äänilähteen säteilemä äänienergia hajautuu suurenevalle pallopinnalle. Etäisyysvaimennus voidaan laskea palloaaltojen pinta-alojen suhteena. Kahden eri etäisyyden välinen etäisyysvaimennus pistelähteelle lasketaan kaavalla:

$$\Delta L_{ei} = 10 \times \lg \left(\frac{r_1}{r_2} \right) = 10 \times \lg \left(\frac{4\pi r_1^2}{4\pi r_2^2} \right) = 10 \times \lg \left(\frac{r_1^2}{r_2^2} \right) = 20 \times \lg \left(\frac{r_1}{r_2} \right) \quad (6)$$

Pistemäisille äänilähteille etäisyysvaimennus on noin -6 dB, kun etäisyys kaksinkertaistuu. Viivamainen äänilähde aiheuttaa ympärilleen sylinterimäisen äänikentän. Jos viivamaisen äänilähteen pituus on L , hajautuu äänienergia sylinteripinnalle, jonka pinta-ala on $2\pi rL$. Kun etäisyys äänilähteen ja tarkastelupisteen välillä kasvaa, äänienergia hajau-

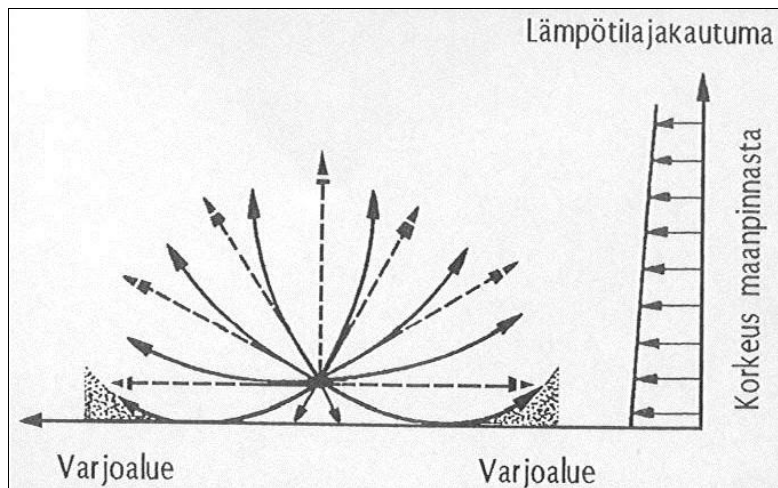
tuu aina suurenevalle sylinteripinnalle. Kahden eri etäisyyden välinen etäisyysvaimennus viivalähteelle voidaan laskea kaavalla:

$$\Delta L_{et} = 10 \times \lg \left(\frac{r_1}{r_2} \right) = 10 \times \lg \left(\frac{2\pi r_1 L}{2\pi r_2 L} \right) = 10 \times \lg \left(\frac{r_1}{r_2} \right) \quad (7)$$

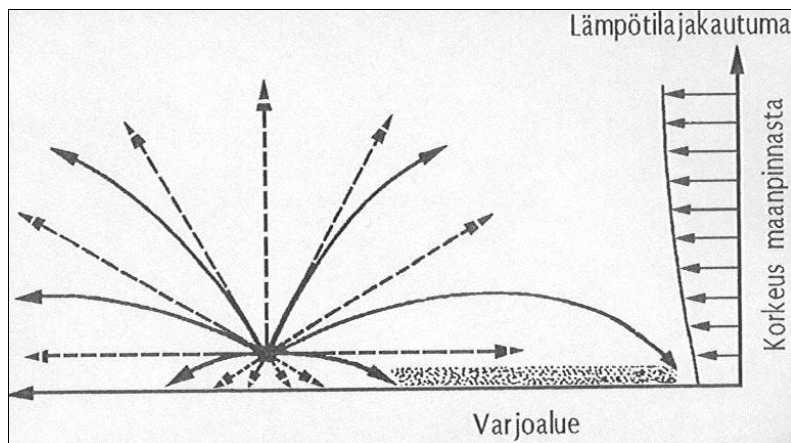
Kun etäisyys kaksinkertaistuu, etäisyysvaimennus on noin -3 dB. Esimerkki viivamaisesta äänilähteestä on tie, jossa liikennevirta on jatkuvaa. Tasolähteet muodostavat ympärilleen tasomaisen äänikentän. Tasolähteiden kohdalla etäisyysvaimennusta ei tapahdu, koska äänienergia ei pysty hajautumaan. (Hänninen & Tiihinen 2007.)

Lisävaimennus voi aiheutua ilman absorptiosta, sääolojen, kasvillisuuden, esteiden tai maanpinnan vaikutuksesta. Sääolojen vaikutus ääniaallon etenemiseen on sitä suurempi, mitä pidempi on äänen kulkema matka. Merkittävimmät äänen etenemiseen vaikuttavat säätilamuuttujat ovat tuuli ja ilman lämpötila sekä näiden tekijöiden muuttuminen korkeuden kasvaessa maanpinnasta. Sateella tai sumulla ei ole merkittävää vaikutusta äänen etenemiseen. (Björk 1991.)

Ilmakehän lämpötilan muuttuminen korkeuden muuttuessa määräytyy vallitsevista auringon säteilyolosuhteista. Jos taivas on pilvetön, auringon säteet lämmittävät päiväaikaan ilmakerroksia lähellä maanpintaa. Tällöin lämpötila laskee korkeuden kasvaessa eli syntyy negatiivinen lämpötilagradientti. Äänisäde taipuu aina kohti kylmempää ilmamassaa, joten negatiivisen lämpötilagradientin tapauksessa äänisäteet taipuvat pois päin maanpinnasta (kuva 5). Lähelle maanpintaa voi syntyä varjoalue, johon ääni etenee huonommin kuin neutraalin säätilan vallitessa. Päinvastainen tilanne syntyy, kun lämpötila kasvaa korkeuden kasvaessa. Jos taivas on pilvetön yöaikaan, maanpinta säteilee lämpöä ylöspäin ja maanpintaa lähellä olevat ilmakerrokset jäähtyvät. Koska äänen nopeus kasvaa lämpötilan noustessa, äänisäteet taipuvat kohti maanpintaa, jolloin ne voivat kulkea keinotekoisten ja luonnollisten esteiden yli (kuva 6). Positiivisen lämpötilagradientin tapauksessa voi tarkastelupisteessä olla neutraalia tilannetta suurempi äänitaso. Pilvisellä säällä lämpötilagradientit ovat pienempiä.



Kuva 5. Äänisäteet taipuvat pois päin maanpinnasta, jos lämpötila laskee korkeuden kasvaessa (Eurasto 2003).



Kuva 6. Positiivisen lämpötilagradientin tapauksessa äänisäteet taipuvat kohti maanpintaa (Eurasto 2003).

Äänen todellinen etenemisnopeus ulkona on äänennopeuden ja tuulennopeuden summa. Tuulennopeus kasvaa aina ylöspäin mentäessä, koska maanpinnan muodot ja maanpinnan aiheuttama vastus pienentävät tuulen nopeutta. Tuulen nopeuden voimistuminen korkeuden kasvaessa aiheuttaa sen, että ääniaalto taipuu vastatuulella ylöspäin ja myötätuulella alaspäin. Vastatuulella maanpinnan läheisyyteen voi syntyä varjoalueita ja myötätuulella monet lisävaimennustekijät eliminoituvat eli olosuhteet ovat vähän ääntä vaimentavat. Myötätuulella äänitasot ovat usein suurempia ja vastatuulella pienempiä kuin tyynellä säällä. (Eurasto 2003. Björk 1991.)

Tuuli- ja lämpötilagradientit vaikuttavat yleensä aina samanaikaisesti ja niiden yhteisvaikutus määrää, miten ääni etenee ympäristössä neutraaliin säätilaan verrattuna. Tuuli- ja lämpötilagradientin vaikutus riippuu äänilähteen ja tarkastelupisteen korkeuksista sekä niiden välisestä etäisyydestä. Yleensä gradienttien vaikutus alkaa vasta, kun tarkas-

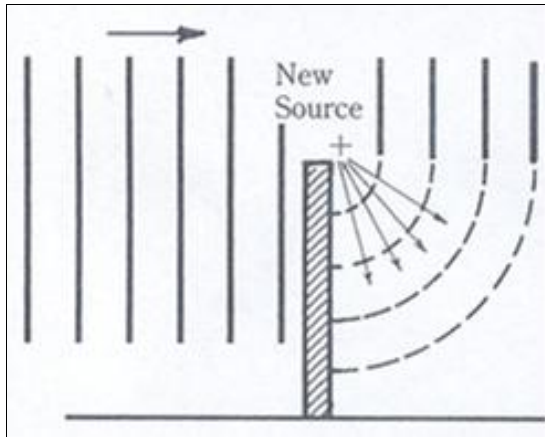
telupisteen ja melulähteen etäisyys on yli 25 metriä. Eri tutkimuksien mukaan vaikutus voi olla suurimmillaan +10 dB. (Eurasto 2003.)

Maanpinnan ominaisuuksilla on vaikutusta äänen etenemiseen maastossa. Havaintopisteen kokonaisäänepainetaso muodostuu lähellä maanpintaa suoraan kulkeneesta ja heijastuneesta äänestä. Heijastuneen äänen osan suuruuteen vaikuttavat maanpinnan ominaisuudet. Pehmeä maa, kuten lumi tai ruoho, vaimentavat ääntä. Lumipeitteen vaikutus voi olla jopa 5 dB rakennetussa ympäristössä, missä on paljon heijastuksia. Akustisesti kova pinta (esimerkiksi kallio tai vesi) taas vahvistaa ääntä.

Riittävän tiheä ja tiivis kasvillisuusvyöhyke melulähteen ja kohteen välissä vaimentaa ääntä. Kasvillisuuden ääntä vaimentava vaikutus perustuu äänen heijastumiseen ja siirontaan. Yleensä kasvillisuus vaikuttaa äänen vaimenemiseen vain korkeilla äänillä (yli 1 000 Hz) eli silloin kun aallonpituus on riittävän lyhyt. Kasvillisuusvyöhykkeen sisällä sääolot voivat poiketa merkittävästi avoimen maaston sääoloista. Tuuli on usein esimerkiksi metsässä heikompa eikä lämpötilagradienttia esiinny. Muuttuvien säätilatekijöiden vaikutukset äänen etenemiseen voivatkin olla merkittävämpiä kuin itse kasvillisuuden vaikutus. (Björk 1991. Hänninen & Tiihinen 2007.)

Ilman absorptio aiheuttaa äänen vaimenemista. Absorption suuruus riippuu etäisyydestä, lämpötilasta, ilman suhteellisesta kosteudesta, ilmanpaineesta sekä äänen taajuudesta. Pakkasella ilman absorptio kasvaa suhteellisen kosteuden kasvaessa kun taas yli 0°C lämpötilassa absorptio pienenee suhteellisen kosteuden kasvaessa. Ilman absorptio on pienimmillään silloin, kun sekä ilman lämpötila että suhteellinen kosteus ovat alhaisia. Yleensä ilman absorptiolla on merkitystä vasta, kun äänen taajuus on korkea (yli 1 000 Hz) ja etäisyys on yli 100 metriä. Esimerkiksi 1 kHz:n taajuudella absorption vaimenusvaikutus on 5 dB/km ja 10 kHz:n taajuudella 90 dB/km, kun ilman lämpötila on 20 °C ja suhteellinen kosteus 70 %. Raideliikenteen melua tarkasteltaessa ilmakehän absorptiolla ei yleensä ole vaikutusta, koska etäisyydet ovat pieniä. (Eurasto 2003. Hänninen & Tiihinen 2007.)

Äänen kulkutiellä on maastossa erilaisia esteitä kuten mäkiä, rakennuksia ja melusteitä. Esteen mitat ja äänen taajuus vaikuttavat siihen, miten hyvin ääni vaimenee. Myös esteen sijainnilla on vaikutusta vaimennuskykyyn: mitä lähempänä este on melulähdettä tai kuulijaa, sitä tehokkaammin se toimii. (Hänninen & Tiihinen 2007.) Kun ääniaalto kohtaa esteen, se pyrkii taipumaan esteen taakse. Tämä on esimerkki ilmiöstä, jota kutsutaan diffraktioksi (kuva 7). Äänen diffraktio riippuu äänen aallonpituudesta: mitä lyhempi aallonpituus (ja korkeampi taajuus), sitä vähemmän diffraktoitumista tapahtuu. (Everest 2001.) Melusteitä on käsitelty tarkemmin luvussa 3.4.



Kuva 7. Äänen diffraktio. Kuvassa ääni kääntyy esteen taakse. (Everest 2001.)

2.3 Melu

Melulla tarkoitetaan häiritsevää tai haitallista ääntä. Melulähteen voimakkuutta kutsutaan melupäästöksi. Täsmällisesti määritettynä se on äänilähteen säteilemä ääniteho, tavallisesti ilmaistuna äänitehotasona. Paikassa tai tarkastelupisteessä, joka on melun kohteena, esiintyy taas tietty melutaso. Melutasolla tarkoitetaan melun äänenpainetta, joka tavallisesti ilmaistaan painotettuna äänenpainetasona. (Lahti 1995.)

Meluun liittyy aina subjektiivinen tulkinta sen häiritsevyydestä kun taas ääni on pelkkä fysikaalinen käsite. Sama ääni voi tarkoittaa toiselle ulkoilmakonserttia ja toiselle melua. Jos millään äänellä ei olisi haitallisia vaikutuksia ihmiseen, ei käsitettä melu olisi olemassa. Melun lähde, merkityssisältö, laatu, voimakkuus, kesto, jatkuvuus, satunnaisuus ja hallittavuus vaikuttavat siihen, kuinka häiritsevänä ääni koetaan. Toisaalta myös yksilön piirteet, kuten meluherkkyys, ikä, sukupuoli ja terveydentila, vaikuttavat siihen, mitkä äänet koetaan meluksi. (Heinonen-Guzejev et al. 2007.)

Melu on yleisin ympäristön laatua heikentävä tekijä. Lyhytkestoisena, tilapäisenä ja satunnaisena ilmiönä melu on pääosin viihtymiskysymys, mutta pitkään jatkuessaan se vaikuttaa ihmisen terveyteen. Elinympäristömme on täynnä erilaisia melulähteitä, joilla on tyypillisiä ominaisuuksia vuorokauden ajan, keston, toistuvuuden, säännöllisyyden, leviämisen, merkityssisällön ja hallittavuuden kannalta. (Heinonen-Guzejev et al. 2007.) Ihmisen elinympäristössä esiintyvää melua kutsutaan ympäristömeluksi. Ympäristömelua aiheuttavat liikenteen, teollisuuden, rakentamisen ja vapaa-ajan toimintojen äänet. (Ympäristöministeriö 1995.)

Melulla on monia kielteisiä vaikutuksia ihmisten terveyteen, hyvinvointiin ja elinympäristön viihtyvyyteen. Meluisassa ympäristössä puheen erotuskyky heikkenee. Kognitiiviset toiminnot, kuten ajattelevuus ja havainnointi, vaikeutuvat äänitason noustessa. Melu aiheuttaa myös stressiä, häiritsee unta ja heikentää elinympäristön laatua. (Liikkonen & Leppänen 2005.) Melun aiheuttamat unihäiriöt sekä melun häiritsevyys voivat pitkän ajan kuluessa johtaa sydän- ja verisuonitauteihin. Sydän- ja verisuonitautien riski kasvaa, jos keskiäänitaso L_{den} (Level Day Evening Night) on yli 65 dB. Vaikka kuulija ei kokisikaan ääntä ärsyttävänä tai liian voimakkaana, on melu silti terveydelle haitallista. (Ögren 2006.)

Melun haittavaikutuksista vakavin on kuulovaurio. Kuulovaurio on aina peruuttamaton, koska siihen ei ole olemassa hoitoa tai lääkettä. Kuulovaurion voi saada esimerkiksi meluisalla työpaikalla, ampumisen tai sähköisesti vahvistetun musiikin yhteydessä. Käytännössä kuulovaurion riski ilmaantuu, kun oleskellaan ilman kuulosuojausta yli 80-85 dB melussa koko päivä useiden vuosien ajan. Ympäristömelun äänitaso ei yleensä ole kuulolle vaarallinen. Lentokoneet ja suuret työkonet ovat ainut poikkeus, mutta ulkopuolinen ei yleensä altistu näille melulähteille ja työntekijöiden edellytetään käyttävän kuulosuojausta. (Lahti 2003.)

Melun terveyshaitat korostuvat meluherkillä. Meluherkkyys on yksilöllinen ominaisuus, joka kuvaa henkilön tapaa kokea melu ja reagoida siihen. Siksi tietyllä äänenpainotasolla voi olla yksilöitä, jotka kokevat melun erittäin häiritsevänä ja toiset taas eivät edes huomaa samaa ääntä. Meluherkät kokevat melun uhkaavampana ja reagoivat siihen voimakkaammin. He myös tottuvat meluun hitaammin kuin ei-meluherkät. Huomattava osa väestöstä on meluherkkiä iästä tai sukupuolesta riippumatta: tutkimusten mukaan noin 38 % Suomen väestöstä on meluherkkiä. Meluherkkyys on merkittävä tekijä, joka tulee ottaa huomioon meluselvityksissä, koska se ennakoii melun terveysvaikutuksia ja unihäiriöitä paremmin kuin pelkkä melutaso. (Heinonen-Guzejev et al. 2007.)

2.4 Meluntorjunnan lainsäädäntö ja ohjearvot

Melu kuuluu lainsäädännössä päästöihin, jotka voivat aiheuttaa ympäristön pilaantumista. Siksi keskeiset meluntorjuntaa koskevat säännökset sisältyvät ympäristönsuojelulakiin (86/2000). Suomessa meluntorjuntatarve määritetään Valtioneuvoston päätöksellä (Vnp 993/92) annettujen melutason ohjearvojen mukaisesti (taulukko 5). Ohjearvot tarkoittavat A-taajuuspainotettua keskiäänitasoa L_{Aeq} ja ne on annettu erikseen päivä- (klo 7-22) ja yöajalle (klo 22-7). Melutasoa koskevat ohjearvot on annettu meluntorjuntalain (382/1987) nojalla ja ne tulivat voimaan 1.1.1993. Meluntorjuntalain tavoitteena on meluhaittojen ehkäiseminen ja viihtyisän ympäristön turvaaminen. Meluntorjuntalaki tulee ottaa huomioon maankäytön, liikenteen ja rakentamisen suunnittelussa. Maankäyttö- ja rakennuslaki (132/1999) on myös keskeinen meluntorjuntalaki. Lain tavoitteena on vaikuttaa alueidenkäyttöön ja rakentamiseen siten, että luodaan edellytykset hyvälle elinympäristölle ja edistetään kestävästä kehitystä. Meluntorjuntaa koskevia säädöksiä on lisäksi useissa muissa laeissa, kuten terveydensuojelulaissa (734/1994), naapurussuhdeloissa (26/1920), ympäristövaikutusten arvioinnista annetussa laissa (468/1994), maantielaisissa (503/2005), maastoliikennelaissa (1710/1995), vesiliikennelaissa (493/1996) ja ilmailulaissa (1242/2005). (Ympäristöministeriö 2007a.)

Taulukko 5. Melutasojen ohjearvot (Vnp993/92).

	Melun A-painotettu keskiäänitaso (ekvivalenttitaso), L_{Aeq} , enintään	
	Päivällä klo 7-22	Yöllä klo 22-7
Ulkona		
Asumiseen käytettävät alueet, virkistys-alueet taajamissa ja niiden välittömässä läheisyydessä sekä hoito- ja oppilaitoksia palvelevat alueet	55 dB	45-50 dB*
Loma-asumiseen käytettävät alueet, leirintäalueet, virkistysalueet taajamien ulkopuolella ja luonnonsuojelualueet	45 dB	40 dB**
Sisällä		
Asuin-, potilas- ja majoitushuoneet	35 dB	30 dB
Opetus- ja kokoontumistilat	35 dB	-
Liike- ja toimistohuoneet	45 dB	-

*Uusilla alueilla melutason yöohjearvo on 45 dB. Oppilaitoksia palvelevilla alueilla ei sovelleta yöohjearvoa.

**Taajamien ulkopuolella, taajamissa tai läheisyydessä olevilla loma-asunnoilla ja virkistysalueilla käytetään asuntoalueiden ohjearvoja.

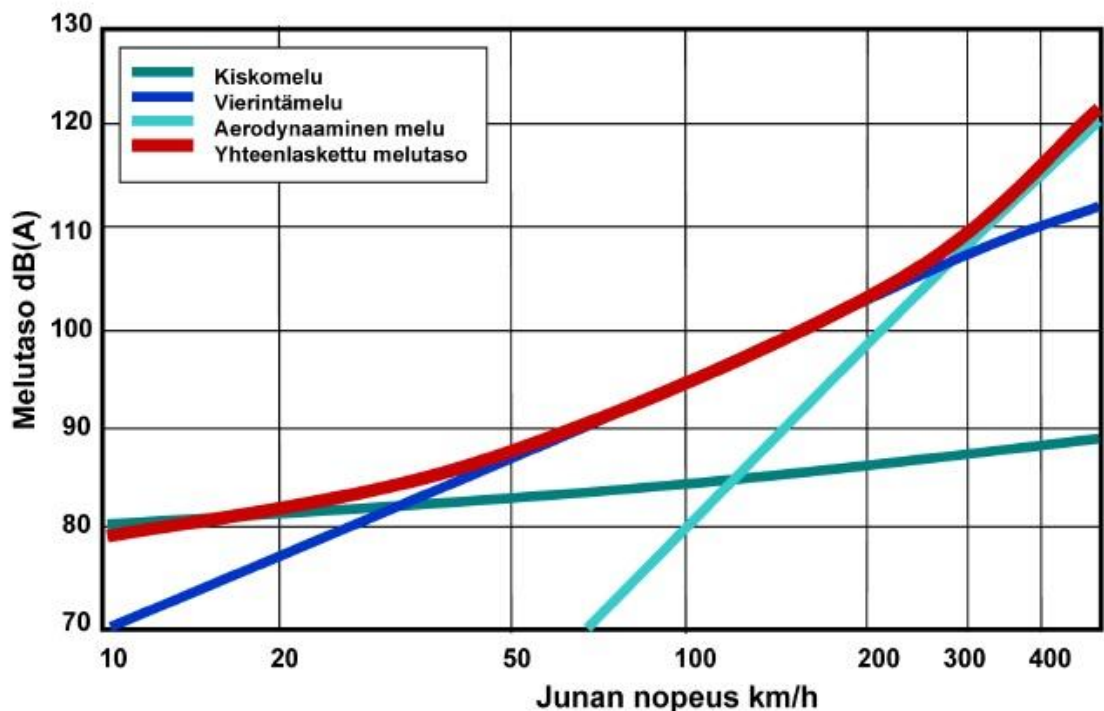
Melutasoja koskevia ohjearvoja pidetään yleisesti jokapäiväisessä elinympäristössä hyväksyttävänä suurimpina melutasoina. Todellisuudessa ohjearvot sellaisinaan eivät kuitenkaan takaa laadullisesti hyväksyttävää ja häiriötöntä ääniympäristöä. Esimerkiksi keskimäärin joka kymmenes pitää 55 dB:n ja joka toinen 65 dB:n melua häiritseväenä. Suunnittelussa ja päätöksenteossa olisikin tärkeää kiinnittää huomiota keskiäänitasojen lisäksi myös muihin melun ominaisuuksiin. Melusta saadaan riittävän monipuolinen käsitys vain, jos otetaan huomioon meluhuiput, melun toistuvuus, melun ajallinen jakauma, taajuusjakauma sekä melun lähde. Melukysymysten hallinta edellyttää monitahoista yhteistyötä ja vuorovaikutusta eri toimijoiden välillä. Sekä viranomaisten että asukkaiden on toimittava yhdessä, jotta meluntorjuntatavoitteet voidaan saavuttaa. Vastuu meluntorjunnasta on kuitenkin aina ensisijaisesti melun aiheuttajalla. (Ympäristöministeriö 2001.)

Suunnittelun lähtökohdaksi on hyvä asettaa ohjearvoja selvästi alhaisemmat melutasot ulkona. Tällöin on mahdollista saavuttaa riittävän alhainen melutaso myös sisätiloissa, vaikka ikkunoita pidettäisiin auki. Jo rakennetussa ympäristössä ohjearvojen mukaisten melutasojen saavuttaminen ei aina ole mahdollista. Yksittäisissä tapauksissa tätä voidaan pitää hyväksyttävänä, mutta ohjearvojen ylittäminen vaatii aina erityiset syyt ja perusteelliset selvitykset. (Ympäristöministeriö 2001.)

3 Raideliikenteen melu

3.1 Melun lähteet raideliikenteessä

Raideliikenteen melu syntyy monien eri lähteiden yhteisvaikutuksesta ja sen taajuus vaihtelee välillä 20 – 20 000 Hz (Thompson 2009). Junan nopeus vaikuttaa siihen, mikä melulähde on vallitsevin. Tätä ilmiötä on havainnollistettu kuvassa 8. Lisäksi veturin ja vaunujen tyypillä, junan nopeudella ja pituudella sekä radan ominaisuuksilla ja kaluston kunnolla on vaikutusta syntyvään melupäästöön. Myös junien yksilölliset ominaisuudet, kuten pyörien epätasaisuuserot, aiheuttavat ääntä. (Innanen & Soosalu 2009.)



Kuva 8. Junan nopeuden kasvun vaikutus melutasoon melulähteittäin.

Raidemelun merkittävin osatekijä on junan pyörän ja kiskon välisen kontaktin aiheuttama ääni. Pyörän ja kiskon kosketuksesta syntyvä melu riippuu paljon näiden pintojen ominaisuuksista, koska pintojen ominaisuudet vaikuttavat sekä syntyvän melun äänitasoon että taajuusjakaumaan. Näistä kahdesta pinnasta kiskot ovat usein huonommassa kunnossa, koska pyörät hiotaan tai vaihdetaan uusiin jo turvallisuussyiden takia. Paikallisesti huonokuntoiseen raideosaan puututaan usein vasta tämän jälkeen. (Eurasto 1995b.)

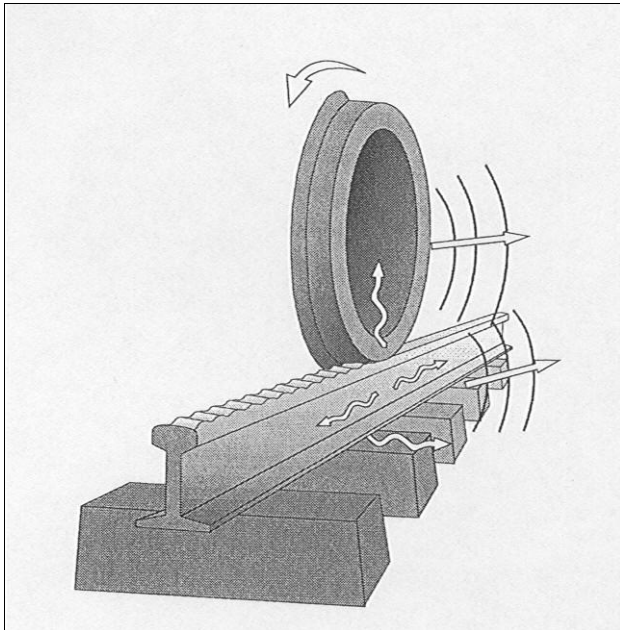
Pyörän ja kiskon välisestä kosketuksesta syntyy melua, koska molemmilla pinnoilla esiintyy epätasaisuuksia, jotka aiheuttavat värähtelyä. Melua aiheuttavien pyörien ja kiskojen epätasaisuuksien aallonpituudet ovat 5-500 mm. Epätasaisuuksien aiheuttaman värähtelyn taajuus f voidaan määrittää yhtälöllä

$$f = \frac{v}{\lambda}, \quad (8)$$

jossa λ on epätasaisuuden aallonpituus (m)

v on junan nopeus (m/s). (Thompson 2009.)

Junan liikkeessa pyörä makaa kiskon selän päällä siten, että kontaktipinnan pituus on noin 10–15 mm ja leveys on samansuuruinen. Pyörän liikkeessa kiskoja pitkin pienet epätasaisuudet sekä kiskon että pyörän pinnassa synnyttävät voimia molempiin pintoihin (kuva 9). Nämä voimat taas aiheuttavat värähtelyä, josta syntyy kuultavaa ääntä. Värähtelyenergiaa muuttuu myös lämmöksi ja rakenteita pitkin kulkevaksi värinäksi. Sekä pyörän että kiskon värähtely on yhtä merkittävää kokonaismelutason kannalta. Kiskojen ja pyörien epätasaisuuksista ja karheudesta syntyvää ääntä kutsutaan vierintä- tai kulkumeluksi. (Ögren 2006.)



Kuva 9. Pyörän ja kiskon kosketuksesta syntyy värähtelyenergiaa (Thompson 2009).

Kaarteisilla rataosuuksilla kokonaismelutasoa nostaa merkittävästi kaarrekirskunta. Kaarrekirskunta on erittäin voimakasta melua, jonka ihmiset kokevat usein hyvin häiritseväksi. Mitä pienempi on radan kaarresäde, sitä voimakkaampaa kirskunta on. Kaarremelu on ongelma erityisesti kaupunkialueilla, joissa tilanpuutteen takia on käytettävä pieniä kaarresäteitä. (Thompson 2009). Suomessa kaarresäteet ovat yleensä niin suuria, ettei kaarrekirskunta aiheuta merkittävää meluhaittaa (Björk 1991).

Kaarremelua syntyy jyrkissä kaarteissa, kun junan telit eivät pysty muuttamaan kulkuuntaansa tangentiaalisesti kiskoja vasten. Tällöin joidenkin pyörien laipat hankaa-

vat kiskoja ja toiset pyörät liukuvat kiskojen päällä. Nelipyöräisen telistön etumainen sisäkaarten puolella oleva pyörä aiheuttaa usein voimakkainta kirskuntaa. Kaarremelun ehkäisyssä tehokkain tapa on estää sen syntyminen kokonaan eli suunnitella kaarresäteet riittävän suuriksi. Jos tämä ei ole mahdollista, voidaan kaarrekirskuntaa vähentää voiteluaineilla, kuten vedellä tai erilaisilla öljyillä. (Thompson 2009.)

Ilmanvastuksesta syntyvä aerodynaaminen melu on merkittävä tekijä vasta suurilla nopeuksilla. Aerodynaaminen melu muuttuu vallitsevaksi melunlähteeksi kun junan nopeus on yli 300 km/h. Aerodynaaminen melu on lähinnä korkeiden taajuuksien melua, joten vierintämelu säilyy merkittävänä alempien taajuuksien melunlähteenä, vaikka nopeudet olisivatkin korkeita. Nopeuden kasvaessa aerodynaamisen melun osuus kasvaa huomattavasti nopeammin kuin vierintämelun: vierintämelu kasvaa yleensä nopeudella $30\log_{10}V$ kun taas aerodynaaminen melu kasvaa nopeudella $60\log_{10}V$ (V = nopeus km/h). Aerodynaamisen melun syntymiseen vaikuttavat turbulentit ilmavirtaukset, joita telit, virran johtimet, vaunujen välit, veturin keula, tuulettimien säleiköt sekä muut junan ulkopuoliset osat aiheuttavat. (Iwniki 2006. Ögren 2006.)

Aerodynaamista melua, joka syntyy esimerkiksi virran johtimista, ei pystytä torjumaan melusteilla, koska melulähde sijaitsee korkealla. Rataosilla, joilla on melusteita, voi aerodynaaminen melu olla merkittävää alhaisillakin nopeuksilla. Melusteet torjuvat vain kiskon ja pyörän välisestä kontaktista syntyvää melua ja tavallisesti kulkumelu peittää alleen aerodynaamisen melun. Suurnopeusjunilla aerodynaaminen melu on merkittävä melulähde myös junan sisäpuolella. (Ögren 2006.)

Junan tullessa sillalle melutasot nousevat huomattavasti. Radalla oleva silta voi nostaa melutasoa paikallisesti 10 dB. Melutason nousu johtuu värähtelyenergian siirtymisestä kiskoista sillan rakenteisiin. Sillat nostattavat erityisesti alimpien taajuuksien äänitasoja, joita ei oteta huomioon mitattaessa A-painotettua äänitasoa. Eri materiaalista valmistetut sillat vaikuttavat melupäästöihin eri tavalla. Esimerkiksi terässilta synnyttää enemmän melua kuin betonisilta. (Thompson 2009.)

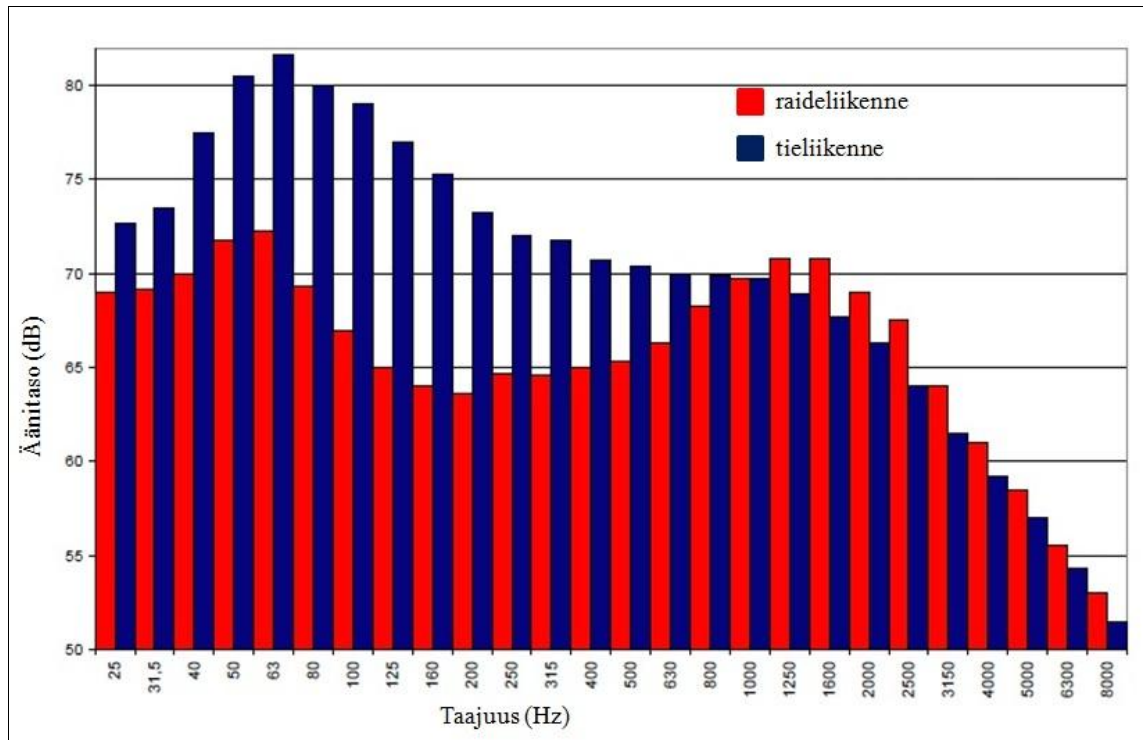
Toissijaisia melunlähteitä ovat tuulettimet, voimansiirtokalusto ja moottorit. Etenkin vanhoista diesel-vetureista syntyy paljon melua, mutta uusien veturien suunnittelussa on kiinnitetty huomiota melupäästöihin. Toissijaisilla melulähteillä on merkitystä, kun junan nopeus on hyvin alhainen tai juna seisoo paikoillaan. Tällöin vierintämelu ei peitä alleen muista lähteistä syntyvää melua. (Iwniki 2006. Ögren 2006.) Lisäksi ratapihoilla melua aiheuttavat monet eri tekijät kuten vaunujen törmäykset, jarrulaitteet sekä erilaiset merkki- ja varoitusäänet. Aiemmin myös kiskonjatkoksista syntyvät kolahdusäänet olivat merkittävä melulähde, mutta nykyään Suomessa käytetään pääosin yhteenhitsattuja kiskoja. (Björk 1991.)

Melun lisäksi raideliikenne aiheuttaa tärinää radan läheisyydessä. Tärinän voimakkuus riippuu junan nopeudesta, pituudesta ja painosta sekä raiteen kunnosta ja maapohjan sekä radan jäykkyydestä. (Suomen kuntatekniikan yhdistys 1997.) Tärinä koetaan eri-

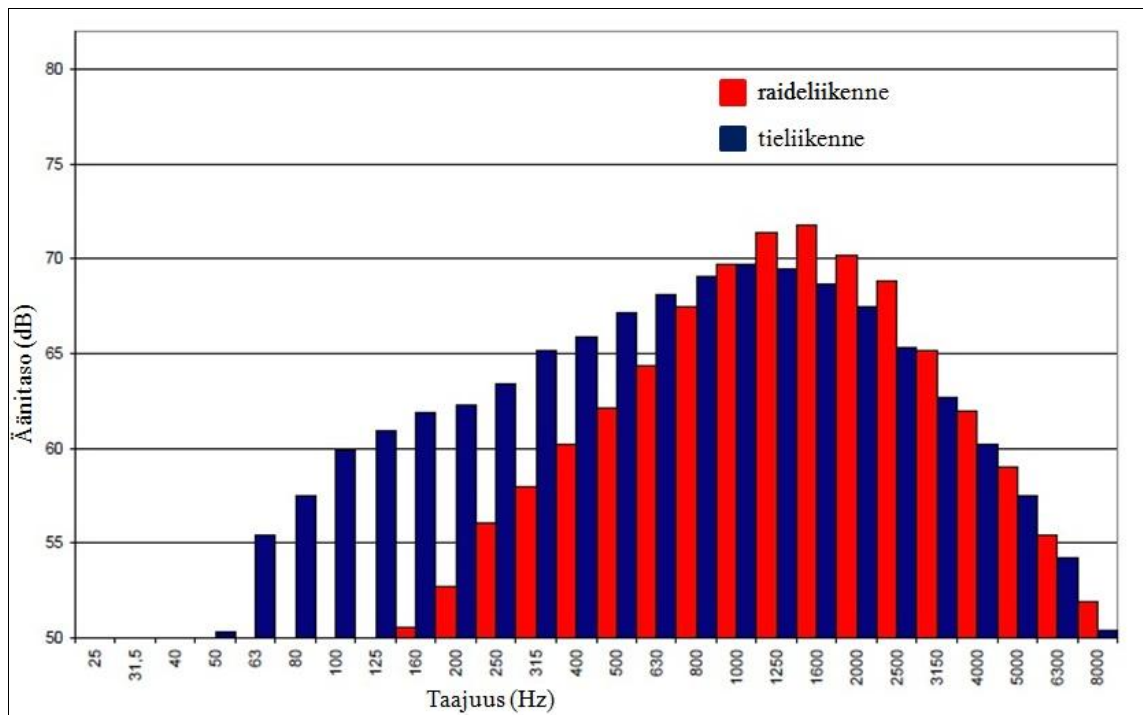
tyisen häiritseväksi, jos alueen melutasot ovat muuten alhaisia. Tärinä vaikuttaa myös siihen, kuinka häiritsevänä raideliikenteen melu koetaan: jos raideliikenne aiheuttaa alueella melun lisäksi tärinää, koetaan melu vielä häiritsevämpänä. Jos taas sekä melutasot että tärinä ovat voimakasta, tärinää ei usein huomata, koska melu peittää sen alle. (Jerson et al. 2007.)

3.2 Raideliikennemelun erityispiirteet

Raideliikenteestä syntyvällä melulla on monia erityispiirteitä, jotka erottavat sen muista ympäristömelulähteistä. Raideliikennemelu esimerkiksi koostuu selvästi erillisistä melutapahtumista, kun taas tieliikenteen melu on tasaisempaa ja syntyy usean ajoneuvon yhteisvaikutuksesta. Raideliikenteestä syntyvä melu on laajakaistaista, eli siinä on enemmän äänienergiaa korkeilla taajuuksilla kuin tieliikenteestä syntyvässä melussa. (Björk 1991.) Raide- ja tieliikennemelujen taajuusjakaumien eroja on havainnollistettu lineaarisena kuvassa 10 ja A-painotettuna kuvassa 11. Melua arvioidaan usein A-painotettuna, jolloin pienitaajuiset komponentit suodattuvat raideliikennemelusta pois, eivätkä ne silloin vaikuta myöskään raideliikenteen keskiäänitasoihin. Tieliikennemelulla on taas suurempi taso pienillä taajuuksilla, jonka takia pienitaajuiset komponentit vaikuttavat vaikka äänitasoa tarkasteltaisiin A-painotettuna. Samalla desibeliarvolla määritetyllä melutasolla raide- ja tieliikenteen äänekkyydet, eli se kuinka kovana ääni havaitaan, vaihtelevat. Tämän takia tieliikennemelu voidaan kokea raideliikennemelua häiritsevämpänä. (Eurasto et al. 2011.)



Kuva 10. Tyypilliset taajuusjakautumat lineaarisena.



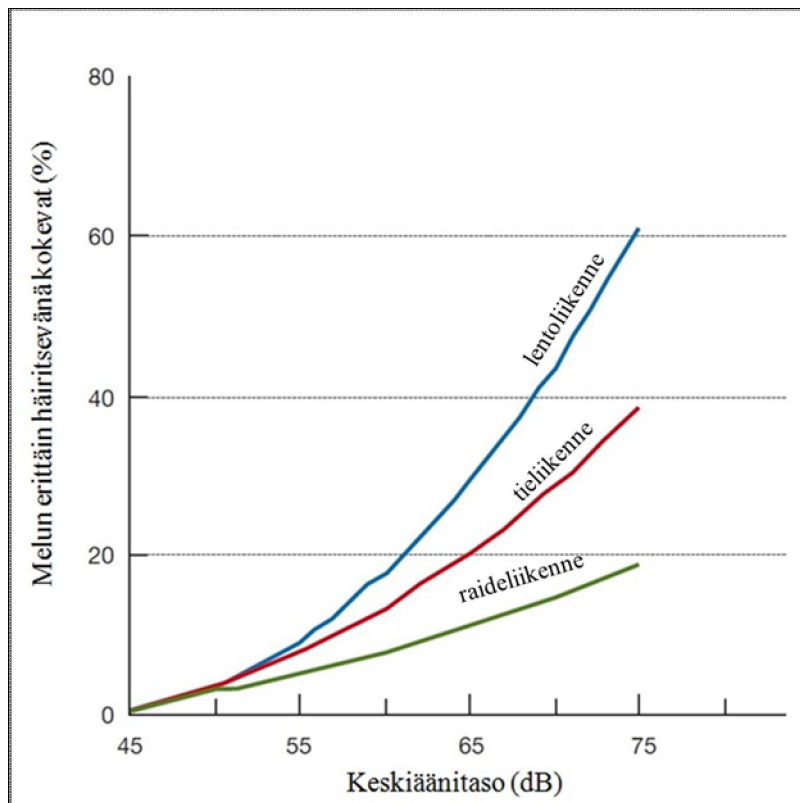
Kuva 11. Tyypilliset taajuusjakautumat A-painotettuna.

Raideliikennemelu on myös homogeenisempää kuin tieliikennemelu. Vaikka radalla liikennöi erilaisia junatyyppejä, on niiden aiheuttama melu kuitenkin luonteeltaan hyvin samanlaista. Tieliikenteessä on taas monia erilaisia melulähteitä: esimerkiksi moottori-

pyörien aiheuttamat hetkelliset enimmäistasot erottuvat selkeästi muusta melusta. (Eurasto et al. 2011.) Lisäksi kauempana melulähteestä raideliikenteen melu vaimenee tieliikenteen melua nopeammin. Esimerkiksi 200-1 000 metrin etäisyydellä melulähteestä raideliikenteen melu laskee noin 6 dB etäisyyden kaksinkertaistuessa ja tieliikenteen melu vaimenee noin 3 dB. Raideliikenteen melun etäisyysvaimennus radan läheisyydessä on 3-4 dB. (LVM 2007.)

Liikenne jakautuu eri vuorokauden ajoille tie- ja raideliikenteessä. Tieliikenne on selvästi keskittynyt päiväaikaan: vain noin 10 % tieliikenteestä kulkee yöaikaan (klo 22-7) ja 90 % päiväaikaan (klo 7-22). Raideliikenteessä taas pitkät ja raskaat tavaraliikenteen junat kulkevat pääasiassa öisin. Raideliikenteessä päivä- ja yöajan keskiäänitasot ovatkin melko samankaltaiset, koska tavarajunien melupäästöt ovat paljon henkilöliikenteen junia suuremmat. (Eurasto et al. 2011.)

Useiden tutkimusten mukaan raideliikennemelu koetaan vähemmän häiritseväksi kuin tieliikenteen melu. Tämä selittyy esimerkiksi sillä, että raideliikenteestä syntyvä melu on erillinen tapahtuma, joka kestää vain junan ohiajan eli noin 10–20 sekunnin ajan kerrallaan. Melutaso nousee siis vain hetkellisesti korkealle kun taas tieliikenteen melu on jatkuvaa. Lisäksi raideliikenne perustuu aikataulun mukaisiin tapahtumiin ja tutkimustulosten mukaan melun säännöllisyys tekee melusta vähemmän häiritsevää. Ihmiset suhtautuvat raideliikenteeseen usein positiivisemmin kuin tieliikenteeseen: raideliikenne koetaan ympäristöystävällisempänä, vaarattomampana ja terveellisempänä vaihtoehtona. Asutus sijaitsee usein kauempana rautateistä kuin teistä ja tutkimusten mukaan lähellä melulähdettä asuvat kokevat melun häiritsevämpänä kuin kauempana asuvat, vaikka melutasot todellisuudessa olisivat samansuuruiset. Melun häiritsevyyttä ei siis voida arvioida pelkästään desibeliarvojen perusteella. (Eurasto et al. 2011. UIC 2010a.) Lisäksi on otettava huomioon, että noin 40 % Suomen väestöstä on meluherkkiä ja he kokevat alhaisetkin desibeliarvot häiritsevinä (Heinonen-Guzejev 2001). Kuvassa 12 on esitetty melun erittäin häiritseväksi kokevien prosenttiosuudet liikennemuodoittain.



Kuva 12. Melun häiritsevyys riippuu melulähteestä.

Eri melulähteiden aiheuttaman häiritsevyyden vaihtelua on pyritty tasamaan niin kutsutun railway bonuksen avulla. Railway bonuksella tarkoitetaan raide- ja tieliikennemelun raja- tai ohjearvojen eroa tai erikseen desibeleissä annettua korjausta. Koska raide liikennemelu koetaan vähemmän häiritseväksi kuin tieliikennemelu, voisivat raideliikennettä koskevat melutasojen ohjearvot olla myös korkeammat kuin tieliikenteen ohjearvot. Bonuksen tarkoitus on tasavertaistaa eri liikennemuotojen asemaa ja pienentää meluntorjuntakustannuksia. Bonuksen suuruus vaihtelee eri maissa välillä 2-15 dB, mutta yleisin arvo on 5 dB. Bonus on erisuuruinen eri maissa, koska sen arvoon vaikuttavat liikenteen koostumus, liikennemäärät, junien nopeudet, vuorokaudenajat, melutason suuruus, toiminta melulle altistumisen aikana, asenteet sekä radan ympäristön paikalliset ominaisuudet. Esimerkiksi oppilaitosten läheisyydessä ei suositella railway bonuksen käyttöä, koska raideliikennemelun on todettu häiritsevän ihmisten välistä kommunikointia enemmän kuin tieliikennemelu. Taulukossa 6 on esitetty railway bonusta käyttävät Euroopan maat sekä bonuksen suuruus eri maissa. Saksassa ja Sveitsissä railway bonus sisällytetään melun laskentamalliin, kun taas muissa maissa se sisältyy ohjearvoon. (Eurasto et al. 2011. UIC 2010a.)

Taulukko 6. Railway bonusta käyttävät maat Euroopassa (Eurasto et al. 2011).

Maa	Bonuksen suuruus (dB)	Melusuure
Alankomaat	5-7	L _{den}
Belgia	5	L _{Aeq}
Bulgaria	5	L _{den}
Iso-Britannia	2-3	
Itävalta	5	L _{Aeq6-22} , L _{Aeq22-6}
Ranska	3	L _{Aeq6-22} , L _{Aeq22-6}
Ruotsi	5	L _{Aeq24h}
Saksa	5	L _{Aeq6-22} , L _{Aeq22-6}
Slovakia	5 (yöaikaan)	L _{Aeq}
Tanska	6	L _{den}
Tšekki	5 (yöaikaan)	L _{night}
Norja	3	L _{den}
Sveitsi	5-15	L _{Aeq6-22} L _{Aeq22-6}

Railway bonuksen käyttöä ja mahdollisia arvoja on tutkittu monissa eri maissa osittain ristiriitaisin tuloksin. Tutkimustuloksiin vaikuttavat tutkimustapa eli se, tehdäänkö tutkimus kentällä vai laboratoriossa, tutkittava alue sekä liikenteen koostumus. (Eurasto et al. 2011.) Japanissa tutkittiin pystyttäisiinkö maassa soveltamaan railway bonusta samalla tavalla kuin Euroopassa. Tutkimustulosten perusteella huomattiin kuitenkin, että ihmiset kokevat rautatieliikennemelun jopa hieman tieliikennemelua häiritsevämpänä. Lisäksi bonuksen sisällyttäminen ohjearvoihin koettiin haastavaksi. (Kaku et al. 1996). Japanilaisen ja eurooppalaisten tutkimustulosten ristiriitaisuus voi johtua tiheimmästä ja nopeammasta liikenteestä sekä kulttuuriin ja elintapoihin liittyvistä eroista. Japanissa esimerkiksi asunnot ovat lähempänä rataa kuin Euroopassa ja tämä vaikuttaa koetun melun häiritsevyyteen. (Eurasto et al. 2011.)

Suomessa railway bonus ei ole vielä käytössä, mutta Liikennevirasto aloitti syksyllä 2010 tutkimuksen sen soveltamismahdollisuuksista. Railway bonuksen käyttö Suomessa edellyttäisi häiritsevyytutkimuksia sekä tutkimuksia eri junatyypin aiheuttamien melupäästöjen ominaisuuksista. Mahdolliseksi ajankohdaksi, jolloin Suomessa voitaisiin ryhtyä soveltamaan bonusta, on esitetty ajankohtaa, jolloin ympäristömelutarkaste- luissa siirrytään ympäristömeludirektiivin mukaisten meluindeksien L_{den} ja L_{night} käyttöön. (Eurasto et al. 2011.)

Termiä railway bonus voidaan pitää myös harhaanjohtavana. Ihmiset mieltävät termin helpolla poliittiseksi päätöksenteoksi eikä se kuvaa riittävän hyvin todellista tarkoitusta tasoittaa tie- ja rautatiemelun häiritsevyyden eroja. UIC onkin antanut suosituksen, jonka mukaan railway bonus-termin sijaan tulisi käyttää termiä noise annoyance correction factor (NACF). Lisäksi UIC suosittelee korjaustermin sijoittamista ohjearvoihin laskentamallin sijaan, koska näin voidaan lisätä päätöksentekoprosessin läpinäkyvyyttä. (UIC 2010a.)

3.3 Raideliikennemelulle altistuminen Suomessa

Suomessa melulle altistuvilla tarkoitetaan ihmisiä, jotka asuvat melumittausten tai -laskelmien mukaan yli 55 dB:n alueella sijaitsevassa rakennuksessa. Meluselvityksien tekeminen kuuluu nykyään Liikennevirastolle (kuului ennen Ratahallintokeskukselle), joka käyttää selvitystyössä apunaan kuntia ja pääkaupunkiseudun yhteistyövaltuuskuntaa (YTV). Raideliikenteen melualueella asuu koko Suomessa noin 48 500 ihmistä. Eniten ihmisiä altistuu YTV-alueella, Etelä- sekä Länsi-Suomessa. Raideliikenteen melualueilla asuvien määrät on esitetty taulukoissa 7 ja 8. Meluselvitysten eri vaiheisiin liittyy monenlaista epävarmuutta, minkä takia melulle altistumista on vaikeaa arvioida tarkasti. Useat selvitykset ovat vain suuntaa antavia eikä niissä oteta huomioon maaston tai rakennuksien vaikutusta melun leviämiseen. Taulukoiden 7 ja 8 viimeisissä sarakkeissa on esitetty virhemarginaalin (10 %) vaikutus altistuvien määriin. (Liikkonen & Leppänen 2005.)

Taulukko 7. Raideliikenteen melulle altistuvien määrät päivällä (klo 7-22).

	55 - 60 dB	60 - 65 dB	yli 65 dB	Yhteensä	Vaihteluväli
YTV-alue	7 121	1 818	125	9 064	8 000-10 000
Etelä-Suomi*	10 152	2 351	398	12 901	11 500 - 14 000
Länsi-Suomi	13 418	3 836	929	18 183	16 500 - 20 000
Itä-Suomi	4 509	977	192	5 678	5 000 - 6 000
Pohjois-Suomi**	2 146	449	102	2 697	2 500 - 3 000
Yhteensä	37 346	9 431	1 746	48 523	43 500 - 53 000

*Poislukien YTV **Oulun ja Lapin läänit

Taulukko 8. Raideliikenteen melulle altistuvien määrät yöllä (klo 22-7).

	55 - 60 dB	60 - 65 dB	yli 65 dB	Yhteensä	Vaihteluväli
YTV-alue					
Etelä-Suomi*	8 329	1 431	283	10 043	9 000 - 11 000
Länsi-Suomi	12 787	3 299	917	17 003	15 500 - 19 000
Itä-Suomi	4 550	919	203	5 672	5 000 - 6 000
Pohjois-Suomi**	2 333	449	106	2 888	2 500 - 3 000
Yhteensä	27 999	6 098	1 509	35 606	31 500 - 39 000

*YTV:n alueelta ei ole yöliikenteen tietoja **Poislukien YTV ***Oulun ja Lapin läänit

Jos verrataan taulukoiden 7 ja 8 arvoja, huomataan raideliikenteen erityispiirre: melulle altistuvien määrät öisin ja päivisin ovat lähes yhtä suuret. Pohjois-Suomessa yöajan raideliikenteen melulle altistuneiden määrä on jopa suurempi. Tämä johtuu siitä, että tavarajunaliikenne on vilkkaampaa yöaikaan. (Liikkonen & Leppänen 2005.)

3.4 Raideliikennemelun torjunta

Meluntorjunta voidaan toteuttaa ehkäisemällä melun syntymistä sen lähteessä, estämällä melun leviäminen, sijoittamalla toiminnot melun kannalta tarkoituksenmukaisesti tai suojaamalla melulle altistuvia kohteita. Toimenpiteiden tavoitteena on luoda ihmisille terveellinen, viihtyisä ja vähämeluinen ympäristö. (Ympäristöministeriö 2007a.) Suomessa meluntorjuntatoimenpiteistä vastaa Liikennevirasto, jos kyse on uuden radan tai muuttuneiden raideliikenneolosuhteiden aiheuttamasta melusta. Jos taas kunta kaavoittaa jo olemassa olevan radan läheisyyteen, on kunta tai rakennushankkeesta vastaava vastuussa meluntorjuntatoimenpiteistä. (LVM 2007.)

Meluntorjunta on otettava huomioon jo ratojen suunnitteluvaiheessa, koska meluntorjuntaratkaisujen toteuttaminen jälkikäteen on usein kalliimpaa. Esimerkiksi meluvallien rakentaminen myöhemmin on hankalaa, koska ne vaativat paljon tilaa. Lisäksi kaavoitusvaiheessa voidaan vaikuttaa ihmisten liikkumistarpeeseen ja toimintojen sekä rakennusten sijoitteluun. (Suomen kuntatekniikan yhdistys 1997.) Meluntorjunnan kannalta keskeisiä paikkoja ovat asunnot ja muut melulle herkäät kohteet, kuten hoitolaitokset, päiväkodit ja oppilaitokset (Liikkonen & Leppänen 2005).

Meluntorjunnan lähtökohdana on pyrkimys estää sen syntyminen. Melun syntyä voidaan ehkäistä erilaisilla junakalustoon tai raiteisiin liittyvillä teknisillä ratkaisuilla. Pääosa raideliikenteen melusta syntyy kiskon ja pyörän välisestä kontaktista. Epätasaisuudet kiskon ja pyörän pinnassa aiheuttavat junan liikkumisen värähtelyä, joka taas synnyttää ääntä. Kulkumelua voidaan ehkäistä tasoittamalla kontaktipintoja. Tönkkäjarrujen valu-

rautaisten jarruanturoiden aiheuttamilta pyörän epätasaisuuksilta voidaan välttyä käyttämällä tekoainejarruanturoita (composite brake block). Komposiittijarruiksi kutsutuilla ratkaisuilla pystytään vaimentamaan raidemelua noin 8-10 dB ja ne ovat melusteitä kustannustehokkaampi meluntorjuntavaihtoehto. Jarruanturoiden uusia materiaaleja ei ole kuitenkaan vielä testattu riittävästi pohjoismaisissa talviolosuhteissa eikä niiden turvallista toimivuutta ole pystytty vielä vakuuttavasti todentamaan. (Ympäristöministeriö 2004. UIC 2010b.)

Kiskojen hionta on yksi tapa tasoittaa epätasaisuuksia kiskon pinnasta ja näin vähentää syntyvää melua. Kiskojen hionta tarkoittaa epätasaisuuksien poistoa kiskon hamarasta pyörivän hiomakiven avulla. Kiskojen hionta suoritetaan usein osana radan kunnossapitotoimenpiteitä, koska hionnan on todettu pidentävän kiskon käyttöikää. Kiskojen hionta maksaa noin 5 €/raidemetri ja hionta tulee uusia muutaman vuoden välein, jotta sen melua vaimentava vaikutus säilyisi. (LVM 2007.) Kiskojen hionnan vaikutuksista melutasoihin on saatu monenlaisia tuloksia ja osassa vaimennuskyky on vain muutaman desibelin verran. Hionnan vaimennusvaikutus riippuu paljon kiskojen kunnosta ennen hiontaa. (UIC 2010b.)

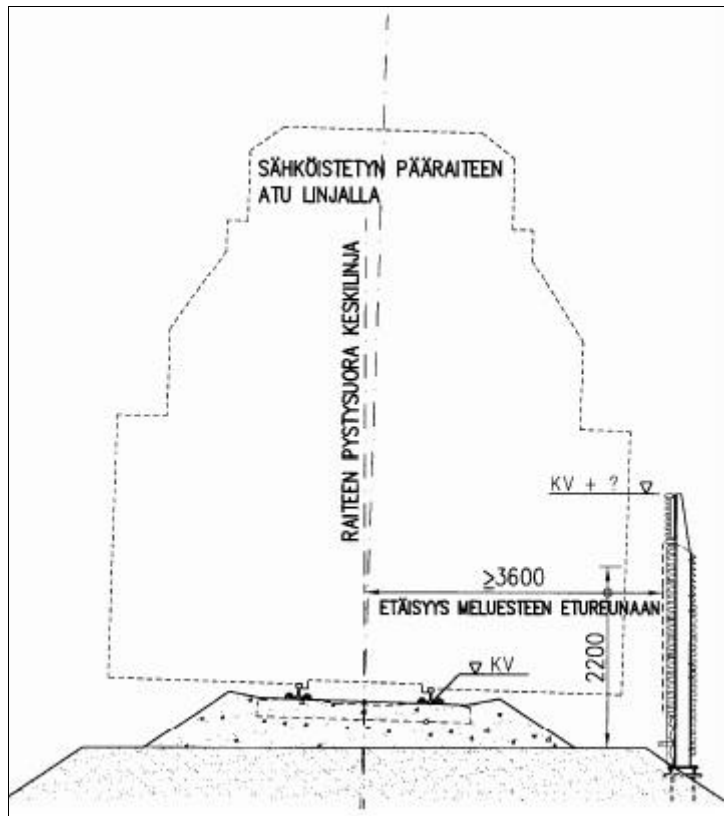
Erilaisilla kiskoihin ja pyöriin kiinnitettävillä vaimentimilla pyritään estämään rakenteiden resonointi ja näin vähentämään syntyvää melua. Pyörän muodon optimoinnilla, viskoelastisen kerroksen lisäämisellä pyörän keskiosaan, pyörän koon pienentämisellä sekä erilaisilla pyöriin kiinnitettävillä elementeillä voidaan vaimentaa syntyvää melua. Kiskonvaimentimilla tarkoitetaan vaimennuselementtejä, jotka kiinnitetään molempiin kiskoihin (kuva 13). (Iwnicki 2006.) Kun melulähteeseen kohdistuvat torjuntakeinot monipuolistuvat ja kehittyvät, on tärkeää päivittää myös melunmallinnusohjelmat vastaamaan uusia meluntorjuntakeinoja (Uudenmaan liitto 2007).



Kuva 13. Kumiset kiskovaimentimet Kytömaalla.

Junakalusto vaikuttaa syntyvään meluun. Uudet Pendolino-junat, InterCity2-vaunut, uudet sähköveturit ja uudet Sm4-lähiliikennejunat aiheuttavat vähemmän melua kuin vastaavat vanhempaan kalustoon kuuluvat junat. (Ympäristöministeriö 2004.) Venäläiset tavarajunat ovat usein meluisampia kuin suomalaiset tavarajunat, koska venäläisten junien pyörät ovat kuluneempia. (LVM 2007.) Venäläisistä tavaravaunuista koostuvien junien melu poikkeaa muista junista siinä määrin, että myös melulaskennoissa niitä käsitellään omana ryhmänä (Ympäristöministeriö 2002).

Suomessa käytettävien rautateiden meluseinä- ja meluaita – tyyppisten rakenteiden suunnittelu- ja rakentamisohjeet on annettu Rautateiden meluesteen-julkaisussa. Melueste on sijoitettava radan poikkileikkaukseen siten, että sen etäisyys viereisen raiteen keskilinjasta on vähintään 3,6 metriä (kuva 14). Silloin jää turvallinen kulkutila meluesteen ja viereisen raiteen aukean tilan ulottuman väliin. Meluesteen tarve, sijainti, korkeus, pituus, saavutettu melun alenema ja tehokkuus on aina selvitettävä melulaskelmilla. Meluesteessä käytettävien materiaalien tulee olla säänkestäviä ja lisäksi niiden valinnassa on otettava huomioon ilkvallan ja puhdistettavuuden asettamat vaatimukset. Meluesteet valmistetaan yleensä betonista, teräksestä, puusta, absorboivista melukaseteista tai läpinäkyvistä rakenteista. Lisäksi meluesteiltä edellytetään tiettyjä ominaisuuksia niiden akustiikan, ulkonäön ja kuormankantokyvyn suhteen. (Ratahallintokeskus 2004.)



Kuva 14. Meluesteen sijainti ratapoikkileikkauksessa (Ratahallintokeskus 2004).

Meluesteen ja -seinän tulee vaimentaa ääntä sekä eristää rakenteen läpi menevää ääntä. Ääneneristävyys on usein helposti saavutettavissa, mutta meluesteen vaimennuskykyyn vaikuttavat myös monet muut tekijät. Esimerkiksi melulähteen, tarkasteltavan kohteen sekä meluesteen sijainnit vaikuttavat siihen, kuinka suuri vaimennus melusteeltä saavutetaan. Myös meluesteen korkeus vaikuttaa esteen vaimennuskykyyn. (Suomen kuntatekniikan yhdistys 1997.) Melutaso esteen takana riippuu esteen ylitse ja sivuitse diffraktoituneen äänen, ympäröivistä pinnoista kohteeseen heijastuneen äänen, ilmasta sironneen äänen ja esteen läpi menneen äänen määrästä.

Meluesteen rakennusmateriaalin valinnassa on kiinnitettävä huomioita äänen heijastumiseen. Jos meluste suunnitellaan akustisesti kovasta pintamateriaalista, kuten betonista, voi ääni heijastua vastakkaiselle puolelle. Silloin meluesteen rakentaminen lisää vastakkaisen puolen melutasoa. Meluesteen pintamateriaaliksi kannattaakin usein valita ääntä imevää eli absorboivaa materiaalia. (Uudenmaan liitto 2007.)

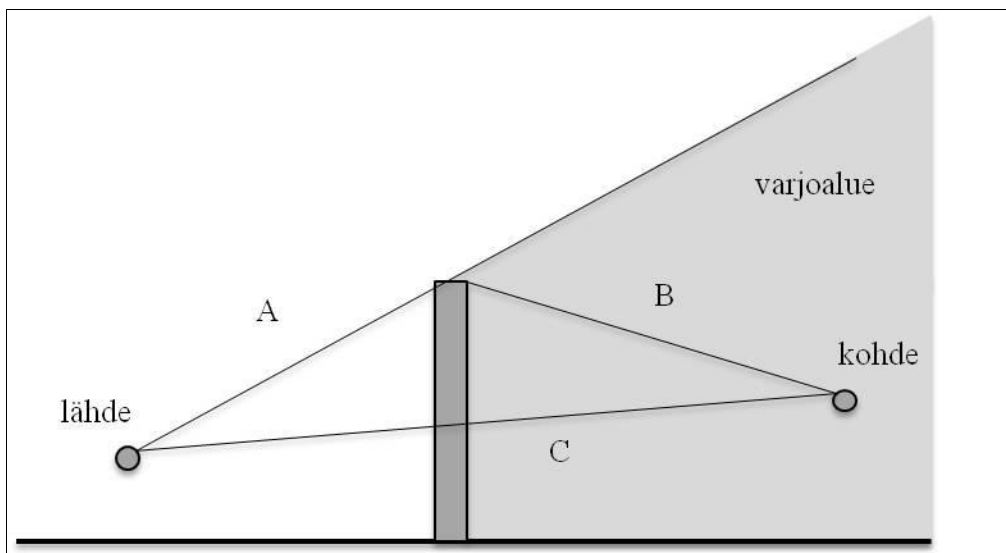
Meluesteen taakse voi syntyä varjoalue, jos esteen koko on riittävän suuri äänen aallonpituuteen verrattuna (kuva 15). Äänivarjo ei kuitenkaan ole koskaan täydellinen, koska matalat äänet diffraktoituvat esteen taakse. Suurilla taajuuksilla (aallonpituus pieni) taas vain pieni määrä ääntä diffraktoituu esteen reunan yli. Meluuste toimii sitä tehokkaammin, mitä jyrkemmin ääni joutuu taipumaan päästäkseen esteen taakse. Tehokas meluuste on riittävän pitkä ja korkea. (Ihalainen 2000.) Meluesteen diffraktiovoimennus riippuu Fresnelin luvusta N , joka voidaan määrittää yhtälöllä

$$N = 2(A + B - C)/\lambda, \quad (9)$$

jossa λ on aallonpituus

$A + B$ kuvaa esteen yli kulkeneen äänen matkaa

C kuvaa ilman estettä suoraan kulkeneen äänen matkaa (Björk 1991).



Kuva 15. Meluesteen taakse syntyvä varjoalue.

Melusteilla on vaikutusta myös visuaalisen ympäristöön. Ne rajaavat näkymiä ja voivat heikentää tai parantaa ympäristön esteettistä laatua. Ihmiset suhtautuvat meluaitoihin ja –valleihin kielteisesti, jos ne rajoittavat näkymiä eikä niiden suunnittelussa ole otettu huomioon estetiikkaa. Parhaimmillaan melusteet taas voivat toimia ympäristön jäsentäjinä ja viihtyvyyden lisääjinä. (Ympäristöministeriö 2007a.) Raideliikenteen melua voidaan torjua matalammilla melusteilla kuin tieliikenteen melua, koska pääosa rautatieliikenteen melusta syntyy kiskon ja pyörän kosketuksesta (LVM 2007).

Meluste on tehokkain meluntorjuntaratkaisu silloin, kun melulähde sijaitsee selvästi muuta ympäristöä korkeammalla sillalla tai penkereellä. Meluste toimii vielä tehokkaammin, jos ympäröivä maasto viettää pois päin melulähteestä. Jos taas maasto nousee

viistosti ylöspäin ja näköyhteys melulähteeseen säilyy, jää meluesteen tehollinen korkeus pieneksi, eikä melutaso välttämättä laske riittävästi. (Uudenmaan liitto 2007.)

Tietyn rataosan melutasoja voidaan alentaa laskemalla nopeusrajoituksia. Lisäksi radan ja kaluston kunnosta huolehtiminen vähentää syntyvää melua. Esimerkiksi erittäin kuluneet kiskot tai pyörät voivat lisätä melua 4-6 dB. Myös ratapölkkyjen ja kiskojen vaihdolla sekä siltojen uusimisella voidaan alentaa lähtömelutasoja. Kiskonjatkokset kasvattavat äänenpainetasoa noin 3 dB. Ratojen sähköistäminen taas vähentää melua. (LVM 2007. Uudenmaan liitto 2007.) Suomen rataverkosta noin puolet on sähköistetty (Liikennevirasto 2010). Jos radan kunnossapitotehtävät laiminlyödään, voivat rataosan melupäästöt kasvaa jopa 20 dB. Usein toimivin ja kustannustehokkain lopputulos saavutetaan yhdistelemällä erilaisia meluntorjuntatoimenpiteitä. (UIC 2010b.) Taulukossa 9 on vertailtu erilaisten meluntorjuntatoimenpiteiden vaikutuksia.

Taulukko 9. Useimmin käytetyt meluntorjuntatoimenpiteet. (Ympäristöministeriö 2004. UIC 2010b.)

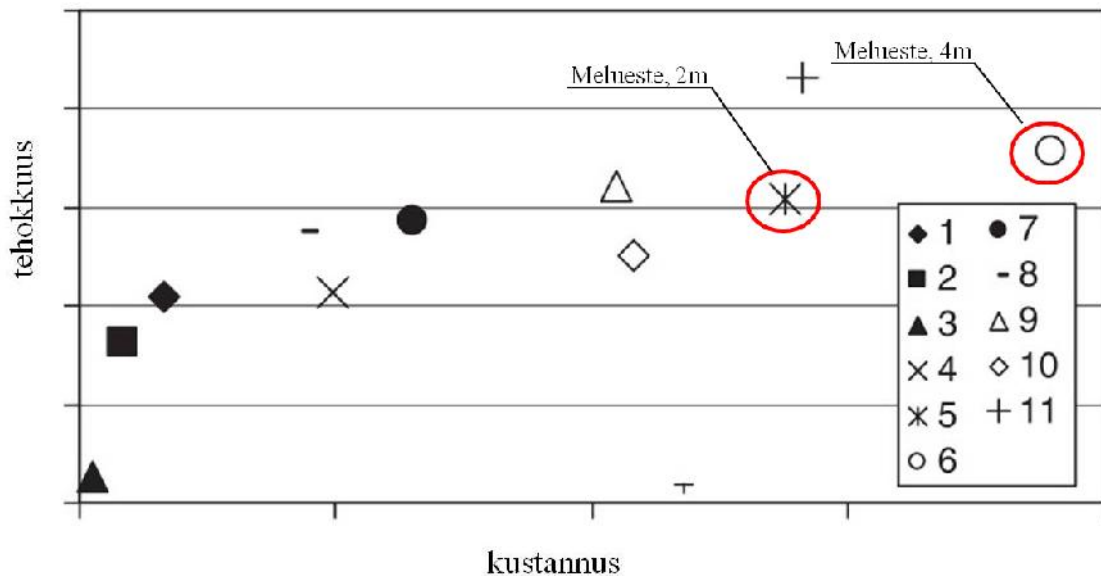
Meluntorjuntamenetelmä	Vaimennus (dB)	Toimenpiteiden vaikutusalue	Huomioitavaa
Melueste	5-15	Paikallinen	Vaimennuskyky riippuu esteen korkeudesta ja paikallisesta maastosta, negatiivinen vaikutus maisemaan, vaikuttaa radan kunnossapitotoimiin.
Äänieristetyt ikkunat	10-30	Paikallinen	Vaimennus saavutetaan vain, kun ikkunat pidetään kiinni.
Kiskojen hionta	1-3	Paikallinen	Toimenpiteen vaikutus riippuu hiotavan kiskon kunnosta ennen hiontaa.
Kiskonvaimentimet	1-3	Paikallinen	Voi mahdollisesti vaikeuttaa kiskojen kunnossapitotoimia, vaikutus riippuu voimakkaasti paikallisista oloista.
Pyöriin kiinnitettävät vaimentimet	1-3	Koko rataverkko	Vaimennus riippuu paikallisista olosuhteista, pyörien huoltotoimet voivat vaikeuttaa.
Komposiittijarrut (composite brake blocks)	8-10	Koko rataverkko	Materiaalien toimivuutta talviolosuhteissa ei ole vielä testattu riittävästi.

Rautateiden meluntorjuntatoimenpiteet voivat olla uhka raideliikenteen taloudelliselle kannattavuudelle, jos eri toimenpidevaihtoehtojen kustannuksia ja hyötyjä ei vertailla tarkkaan. Meluntorjuntatoimenpiteellä saavutettava kustannus-hyötysuhde voidaan laskea kaavalla:

$$\text{Kustannus - hyötysuhde} = \frac{\text{meluntorjuntatoimenpiteiden kustannukset}}{\text{toimenpiteiden hyöty}} \quad (10)$$

Meluntorjuntatoimenpiteiden hyöty riippuu saavutetusta melutason alenemasta sekä toimenpiteistä hyötyvien ihmisten määrästä. Alhainen kustannus-hyötysuhteen arvo tarkoittaa toimenpiteiden olevan kannattavia. Sveitsissä tehdyssä tutkimuksessa selvitetiin kannattavinta meluntorjuntatoimenpiteiden yhdistelmää, kun huomioon otettiin maan taloudelliset resurssit. Tutkimuksen mukaan Sveitsissä meluntorjuntaan varatuista rahoista 65 prosenttia kannattaa käyttää kulkumelun ehkäisyyn, 30 prosenttia melusteiden rakentamiseen ja 5 prosenttia äänieristettyihin ikkunoihin. (Oertli, J. 2000.)

Vuosina 1998-1999 tehtiin kansainvälisen rautatieliiton (UIC) toimeksiantona tutkimus erilaisten meluntorjuntatoimenpiteiden hyödyistä ja kustannuksista tavaraliikenne ratojen varsilla. Tutkimus perustui hyötyjen ja kustannuksien arviointiin eurooppalaisella rataverkolla. Laskelmat perustuivat noin 1 670 ratakilometrin analysointiin. Toimenpiteiden tehokkuuden mittarina käytettiin ihmismäärää, joka ei enää meluntorjuntatoimenpiteiden jälkeen altistuisi yli 60 dB:n melutasolle. Tarkastellulla rataverkolla asui noin 250 ihmistä/km sellaisilla alueilla, joissa melutaso oli yli 60 dB ilman mitään meluntorjuntatoimenpiteistä. Tutkimuksen mukaan korkeiden (4 metriä) melusteiden käyttö ei ole kustannustehokasta. Kuvassa 16 on esitetty tutkimuksen tuloksia eri torjuntatoimenpiteiden hyödyistä ja kustannuksista. Tulosten perusteella 2 metriä korkeiden melusteiden kustannustehokkuus on parempi kuin 4 metriä korkeiden melusteiden. (Oertli 2006.) Edellä esitetyssä tutkimuksessa käsiteltiin vain meluntorjuntatoimenpiteitä tavaraliikenteen radoilla, eivätkä kaikki vaihtoehdot ole käyttökelpoisia henkilöliikenteessä.



Kuva 16. Eri meluntorjuntakeinojen kustannushyötysuhde (Oertli 2006).

1. Tavaravaunujen rakenteellinen vaimennus 10 dB
2. Komposiittimateriaalista tehdyt jarruanturat (K-anturat)
3. Kiskonhionta
4. Kiskonvaimentimet
5. 2 m korkeat meluesteet
6. 4 m korkeat meluesteet
7. K-anturat, pyörien vaimennus ja kiskonvaimentimet
8. K-anturat ja kiskonvaimentimet
9. K-anturat ja 2 m korkeat meluesteet
10. Kiskonhionta ja 2 m korkeat meluesteet
11. K-anturat, pyörien vaimennus, kiskonvaimentimet, kiskonhionta ja 2 m korkeat meluesteet

Suomessa raideliikenteen melua on pystytty vähentämään uusimalla kalustoa, kunnostamalla rataverkkoa ja rakentamalla meluesteit. Tulevaisuudessa melua pyritään torjumaan ratojen kunnossapidolla, kiskojen hionnalla ja pahimmilla ongelmapaikoilla meluesteillä. (Ympäristöministeriö 2007b.) Ratahallintokeskus käytti vuosien 2000–2004 aikana meluntorjuntainveistoihin noin 8,4 miljoonaa euroa. Lisäksi kunnat ovat samalla aikavälillä käyttäneet raidemelun torjuntaan noin 4 miljoonaa euroa. Vuosina 2005–2020 Suomessa rakennettavien meluesteiden rakennuskustannuksiksi on arvioitu 23 miljoonaa euroa raideliikenteen osalta. Väylälaitosten meluntorjuntainvestoinnit vuosina 2000–2004 on esitetty taulukossa 10. (Ympäristöministeriö 2007a.)

Taulukko 10. Väylälaitosten meluntorjuntainvestoinnit vuosina 2000-2004.

Meluntorjuntainvestoinnit (milj. euroa/vuosi)						
	2000	2001	2002	2003	2004	Yhteensä
Tiehallinto	5	1,4	4,9	2,5	-	13,8
Ratahallintokeskus	1,3	2,8	1,6	1,5	1,2	8,4
Ilmailulaitos	0,25	0,25	0,25	0,25	0,45	1,45

4 Matalat melusteet

4.1 Määritelmä ja alustavat tuotevaatimukset

Matalalla melusteella tarkoitetaan melustetta, jonka nimelliskorkeus kiskon pinnasta on 850 mm + 10 mm -20mm (kuva 17) (Destia 2009). Matala meluste on Suomessa uudentyypinen meluntorjuntavaihtoehto, joka soveltuu erityisesti kaupunkeihin sekä alueille, joissa talot ovat lähellä raidetta. Tällä hetkellä rautatieliikenteen melua torjutaan pääasiassa meluaidoilla. Meluaidat ovat kuitenkin maisemallisesti hallitsevia ja rakenteina kalliita. Matala meluste eroaa meluaidasta sijainnin, korkeuden, perustamis- ja rakentamiskustannusten sekä taajamakuullisen näkyvyyden suhteen. (Innanen & Soosalu 2009.)



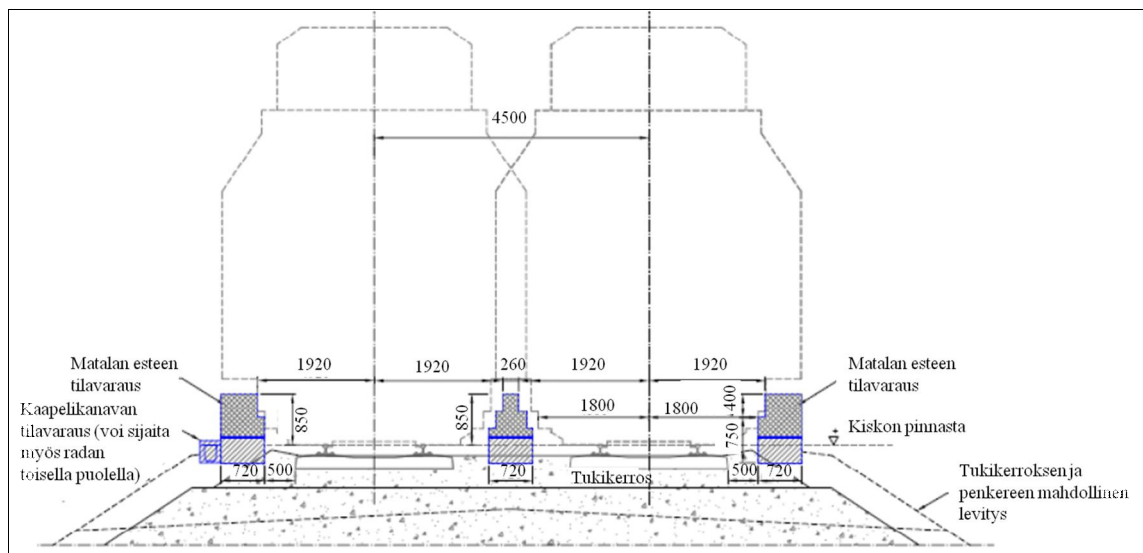
Kuva 17. Suomessa koekäytössä oleva matala meluste. Esteen korkeus kiskon pinnasta on 85 cm.

Matalat melusteet soveltuvat rautatiemelun torjuntaan kohteissa, joissa korkeat meluseinät koetaan maisemallisesti liian hallitseviksi. Esimerkiksi kaupunkialueilla matalat esteet herättävät vähemmän huomiota kuin meluaidat. (Innanen & Soosalu 2009.) Jos asutus on lähellä rataa ja se sijoittuu rataan nähden alemmalle tai samalle korkeustasolle, on matala meluste toimiva meluntorjuntaratkaisuksi (Destia 2009). Ihmiset voivat suhtautua kielteisesti lähelle asuntoja rakennettaviin meluaitoihin, koska ne peittävät näkymiä asuntojen ikkunoista. Sellaisissa tapauksissa matala meluste mahdollistaisi nä-

kymien säilymisen. Matalat melusteet eivät peitä näkymiä myöskään junien ikkunoista katsottuna. Junamatkustajien viihtyvyys voi parantua, jos ikkunoista avautuu meluseinän sijaan näkymä esimerkiksi kaupungin keskustaan.

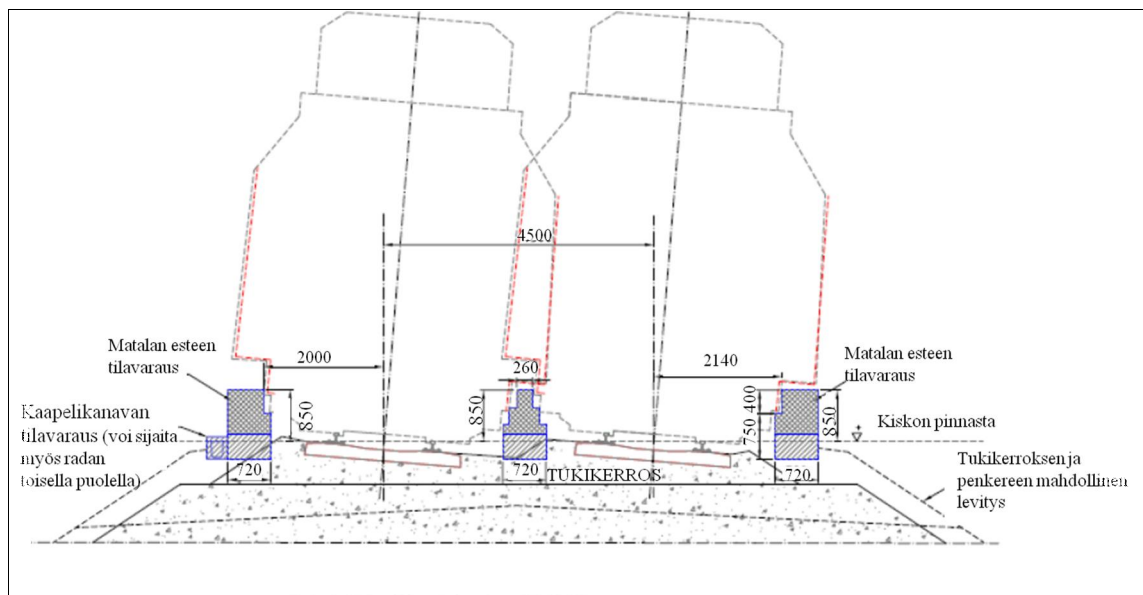
Matalien melusteiden perustamis- ja rakentamiskustannusten on arvioitu olevan meluaitojen kustannuksia alhaisemmat. Kokonaiskustannukset riippuvat käytettävästä rakennusmateriaalista, asennustyöstä ja mahdollisesta penkereen levityksestä. Betonisen matalan melusteiden valmistus- ja rakentamiskustannuksiksi on arvioitu 400–800 €/jm. (Innanen & Soosalu 2009.)

Melusteiden sijainti ilmoitetaan aina kohtisuorana etäisyytenä viereisen raiteen keskilinjasta melusteiden lähinnä raidetta olevaan rakenneosan pintaan. Esteiden melunsuojavaikutus on sitä tehokkaampi, mitä lähempänä raidetta eli melulähdettä este sijaitsee. Matalan melusteiden sijainnin ratapoikkileikkauksessa määrää aukean tilan ulottuma, jonka sisäpuolella este ei saa olla. Aukean tilan ulottumalla (ATU) tarkoitetaan pitkin raidetta ulottuvaa tilaa, jonka sisäpuolella ei saa olla kiinteitä rakenteita eikä laitteita. Matalan melusteiden sallittu etäisyys radan keskilinjasta suoralla rataosuudella on 1 920 millimetriä. (Destia 2009.) Meluseinät on taas sijoitettava vähintään 3,6 metrin etäisyydelle viereisen raiteen keskilinjasta (Ratahallintokeskus 2004). Ero sijainneissa johtuu siitä, että meluseinät ovat korkeampia ja ne jäisivät lähempänä raidetta ATU:n sisäpuolelle. Lisäksi matalat melusteet ovat usein rakenteina kevyempiä ja ne voidaan perustaa ratapenkereelle. Kuvassa 18 on esitetty matalan melusteiden sijainti ratapoikkileikkauksessa suoralla rataosuudella. Aukean tilan ulottuma määrää myös matalan melusteiden korkeuden.



Kuva 18. Matalalle melusteelle varattu tila ratapoikkileikkauksessa, kun rata on suora. Kuva ei ole mittakaavassa (Destia 2009).

Aukean tilan puolileveyden mitat muuttuvat, jos raiteissa on kaarre tai kallistus. Muutoksen aiheuttaa kaarteissa kaluston oikaisu ja kallistuksessa myös junakalusto kallistuu. Silloin melueste on sijoitettava kauemmaksi radan keskilinjasta, jolloin esteen meluntorjuntaominaisuudet heikkenevät. Liikennepaikkojen ulkopuolella minimikaarresäde on käytännössä 300 m ja maksimikallistus 150 mm. Siellä meluesteen korkeus kiskon pinnasta voi olla maksimissaan 940 mm ja etäisyys sisäkaarten puolella voi olla radan keskilinjasta minimissään 2 140 mm (kuva 19). Vastaavassa tilanteessa minimietäisyys ulkokaaren puolella on 2 000 mm keskilinjasta. Matalan meluesteen sijainti on siis suunniteltava aina tapauskohtaisesti, koska radan geometria muuttuu jatkuvasti. Este voidaan sijoittaa myös raiteiden välissä olevaan tilaan, jos raideväli on vähintään 4 100 mm. Matalasta meluesteestä on suunniteltava erillinen versio, jos se ei muuten sovellu tähän käyttötarkoitukseen. (Innanen & Soosalu 2009.)



Kuva 19. Esimerkki matalan esteen tilavaruksen muuttumisesta, kun radassa on kaarre tai kallistus. Kuva ei ole mittakaavassa (Destia 2009).

Suomessa käytettäville matalille melusteille on laadittu vasta alustavat tuotevaatimukset, joiden mukaan matalien melusteiden on akustisten laatuvaatimusten osalta noudatettava Ratahallintokeskuksen julkaisua Rautateiden melusteet (2004). Matalan meluesteen on täytettävä vaatimuksia äänen eristävyyden ja absorption suhteen. (Destia 2009.) Meluesteen eristävyyttä kuvataan eristävyydellä DL_R . Meluesteen ääneneristävyyttä kuvaa esteen kykyä eristää rakenteen läpi menevää ääntä. Esteen eristävyydelle on olemassa luokitus, joka on esitetty taulukossa 11. Matalan meluesteen on saavutettava eristävyydellä B3. Esteen eristävyyden määrittäminen on laboratorio-olosuhteissa standardoitu. Elementtien saumakohtat, mahdolliset kulkuportit sekä esteen ja maan väliin jäävä rako voivat aiheuttaa ongelmia eristävyydenvaatimusten saavuttamisessa. (Destia 2009.) Eristävyydellä on 25 dB esimerkiksi seuraavilla rakenteilla: vähintään 20 mm vanerilla, 1+1 mm teräslevyllä ja betonilla (Suomen kuntatekniikan yhdistys 1997).

Taulukko 11. Luokitus meluesteen eristävyydelle.

Luokitus	Eristävyys
B1	> 5 dB
B2	> 15 dB
B3	> 25 dB

Absorptiolla tarkoitetaan äänen imevyyttä ja sen avulla voidaan estää melun heijastuminen esteen, junan tai muiden rakenteiden kautta esteen yli. Absorptiokykyä kuvataan absorptioluvulla DL_{α} ja absorptiokyvyllä on olemassa oma luokitus (taulukko 12). Matalan meluesteen on täytettävä vähintään luokka A3 ja esteen absorptiokyky on osoitettava standardin EN 1793-2 mukaisin laboratoriomittauksin. Jos matala melueste sijoitetaan radan molemmille puolille, korostuu esteen absorptiokyvyn merkitys. (Destia 2009.) Tavallisesti käytetty ääntä imevä rakenne on puu-, metalli- tai muoviritilällä, reikälevyllä tai verkolla suojattu lasi- tai vuorivilla. Tällöin saavutetaan usein luokka A3 tai A4. (Suomen kuntatekniikan yhdistys 1997.)

Taulukko 12. Luokitus absorptiokyvyllä.

Luokitus	Absorptio
A0	ei testattu
A1	1-3 dB
A2	4-7 dB
A3	8 - 11 dB
A4	> 12 dB

Matalan meluesteen suunnitteluvaiheessa on syytä kiinnittää huomiota siihen, ettei melueste ole liian herkkä kulumiselle tai säävaihteluille, koska absorptiokyky eikä eristävyys saa alentua ajan myötä. (Destia 2009.)

Alustavien tuotevaatimusten mukaan matalan meluesteen on oltava kaksiosainen siten, että esteen yläosa ja perustuselementit ovat erillisiä. Vaatimus johtuu siitä, että este on pystyttävä madaltamaan tasolle +120 mm kiskon pinnasta erikoiskuljetuksen ajaksi. Lisäksi koko esteen on oltava purettavissa, koska raidesepelin seulonta ei ole muuten mahdollista. Matalan meluesteen suunnittelussa on otettava huomioon myös esteen purkamisen ja raivaus onnettomuustilanteissa. Yhden este-elementin pituus saa olla maksimissaan neljä metriä. Esteen yläosan maksimipaino on 2 000 kg ja perustuselementtien 3 000 kg. (Destia 2009.)

Matalan meluesteen muotoa ei ole määrätty alustavissa tuotevaatimuksissa, mutta esteen kaikkien osien on mahduttava sille varatun tilan sisäpuolelle. Esteen suunnittelussa on lisäksi otettava huomioon melunvaimennusominaisuudet, kunnossapidon vaatimukset sekä vedenohjaus pois päin radalta. Esimerkiksi graffitien tekoa voidaan vaikeuttaa asentamalla 15–20 cm etäisyydelle esteen ulkopinnasta suojaverkko. Ulkonäöltään ja väriykseltään esteen on sovelluttava rataympäristöön. Matalalle melusteelle on määritetty alustavia vaatimuksia myös käyttöään, kuormitusten, materiaalien, perustamisen, maadoituksen, kaapeloinnin ja kunnossapidon suhteen. (Destia 2009.)

Vaikka matalan meluesteen sijainti lähellä kiskoja parantaa merkittävästi esteen melunvaimennuskykyä, aiheuttaa sijainti aukean tilan ulottuman lähellä kunnossapitoon ja teknisiin laitteisiin liittyviä rajoituksia. Matalan meluesteen käyttökohde onkin aina vaarallinen huolellisesti, koska matala meluste voi hankaloittaa radan huoltotöitä ja lisätä radanpidon kustannuksia. Onnettomuustilanteissa matala este voi hankaloittaa junasta ja radalta poistumista, vaikeuttaa pelastustoimia ja suistumistilanteessa törmäys voi heittää este-elementtejä kauaksi radalta. Etenkin liikuntaesteisten poistuminen junasta ilman apuvälineitä voi olla vaikeaa. Matala este ei kuitenkaan estä kokonaan junasta poistumista esimerkiksi pelastushenkilökunnan avustuksella ja liikuntaesteisten osalta poistuminen junasta on vaikeaa myös tavallisella rataosuudella. (Innanen & Soosalu 2009.)

Matala meluste voi vaikeuttaa radan talvikunnossapitoa. Vaikutusten arviointi on kuitenkin hankalaa, koska ainut Suomeen rakennettu matala meluste ei ole vielä ollut pysytettynä yhtä kokonaista talvea. Lisäksi matalan meluesteen koerakenne on lyhyt (60 m) ja vain toisella puolella rataa, joten lumen mahdollisen kinostumisen arvioiminen on mahdotonta. Tilanne voi olla toinen, jos meluste on raiteen molemmilla puolilla tai useampiraiteisilla osuuksilla raidevälissä.

4.2 Ulkomailla käytetyt matalat melusteet

Zbloc Norden AB on kehittänyt matalan melusteetin Ruotsissa. Ensimmäinen Zbloc-meluste rakennettiin Ruotsissa Sollentunan rautatieasemalle vuonna 1999, jonka jälkeen tuotekehitystä on jatkettu ja markkinoille on tullut uusia versioita matalasta melusteesta. Zbloc generation 3a:n valmistus aloitettiin vuonna 2009. Zbloc on valmistettu betonista ja raiteen puolella olevassa sisäpinnassa on käytetty kumirouhetta absorptiokyvyn parantamiseksi (kuva 20). Jokaisessa este-elementissä on kaksi ääntä absorboivaa levyä, joiden koko on 620 x 1 743 mm. Melusteetin korkeus on 730 mm kiskon selän pinnasta ja se sijaitsee 1 700 mm etäisyydellä raiteen keskijonasta. Yhden 3 500 mm pitkän este-elementin paino on 3 404 kg. Zbloc-melusteetin vaimennuskyky on noin 6-11 dB. (Zbloc Norden AB. Nilsen et al. 2009.)



Kuva 20. Zbloc on Ruotsissa kehitetty matala meluste (Zbloc Norden AB).

Jos melulta suojattava kohde sijaitsee vain raiteen toisella puolella, riittää että melusteikin sijoitetaan vain raiteen toiselle puolelle. Jos taas esimerkiksi asutusta on kahden raiteen molemmilla puolilla, on raiteiden väliin sijoitettava kaksi Zbloc-melustetta, koska ääntä absorboiva kumirouhe on vain esteen toisella puolella. Kuvassa 21 meluste on sijoitettu raiteen molemmille puolille. (Zbloc Norden AB.)



Kuva 21. Zbloc-melueste radan molemmilla puolilla. (Zbloc Norden AB).

Zbloc-melueste on kustannustehokkaampi meluntorjuntakeino kuin tavallinen melueste. Matalan meluesteen asennuskustannukset ovat 50 % alhaisemmat kuin tavallisen meluesteen eikä valmistajan mukaan huoltotoimenpiteitä tarvitse suorittaa 50 vuoteen esteen pystytyksestä. Meluesteen asennus on yksinkertaista, koska se sijoitetaan jo olemassa olevalle ratapenkereelle. Zbloc ei aiheuta maisemallista haittaa, koska se on 73 cm korkea. Matala melueste ei myöskään aiheuta samanlaista tunneli-efektiä junan kuljettajalle ja matkustajalle, kuin tavalliset meluesteet radan molemmilla puolilla tekevät. Meluesteeseen voidaan rakentaa hätäpoistumisteitä ja onnettomuustilanteessa meluestettä voidaan käyttää askelmana poistuttaessa junasta. (Zbloc Norden AB.)

Jos ulkomailla valmistettuja matalia meluesteitä käytetään Suomessa, tulee varmistaa esteen soveltuvuus Suomen ilmastoon, sääoloihin, ja turvallisuusmääräyksiin. Esimerkiksi lumen poisto ja sen kinostuminen voivat aiheuttaa ongelmia, jos niitä ei ole otettu huomioon meluesteiden suunnittelussa. Lisäksi on otettava huomioon suunnitteluohjeiden erityisvaatimukset meluesteille. Useimmat ulkomailla kehitetyt matalat meluesteet eivät sovellu niiden mitoituksen tai rakenteellisen kestävyuden suhteen sellaisinaan Suomen oloihin. (Innanen & Soosalu 2009.)

5 Kenttätutkimus matalan meluesteen vaimennuskyvystä

5.1 Mittausten tavoitteet ja mittauspaikka

Kenttämittausten tavoitteena oli tutkia melutasoja sekä meluesteen kohdalla että sen ulkopuolella junan ohiajon aikana. Kenttätutkimuksella haluttiin selvittää matalan meluesteen todellinen melunvaimennuskyky maastossa ja verrata tätä arvoa melunlaskentaohjelmalla saatavaan arvoon. Näin pystyttiin arvioimaan antaako melunlaskentaohjelma samansuuruisia arvoja matalan meluesteen vaimennukselle. Melumittaukset suoritettiin kesällä 2011 kuutena eri päivänä:

- 18.7.2011
- 21.7.2011
- 25.7.2011
- 26.7.2011
- 27.7.2011
- 1.8.2011

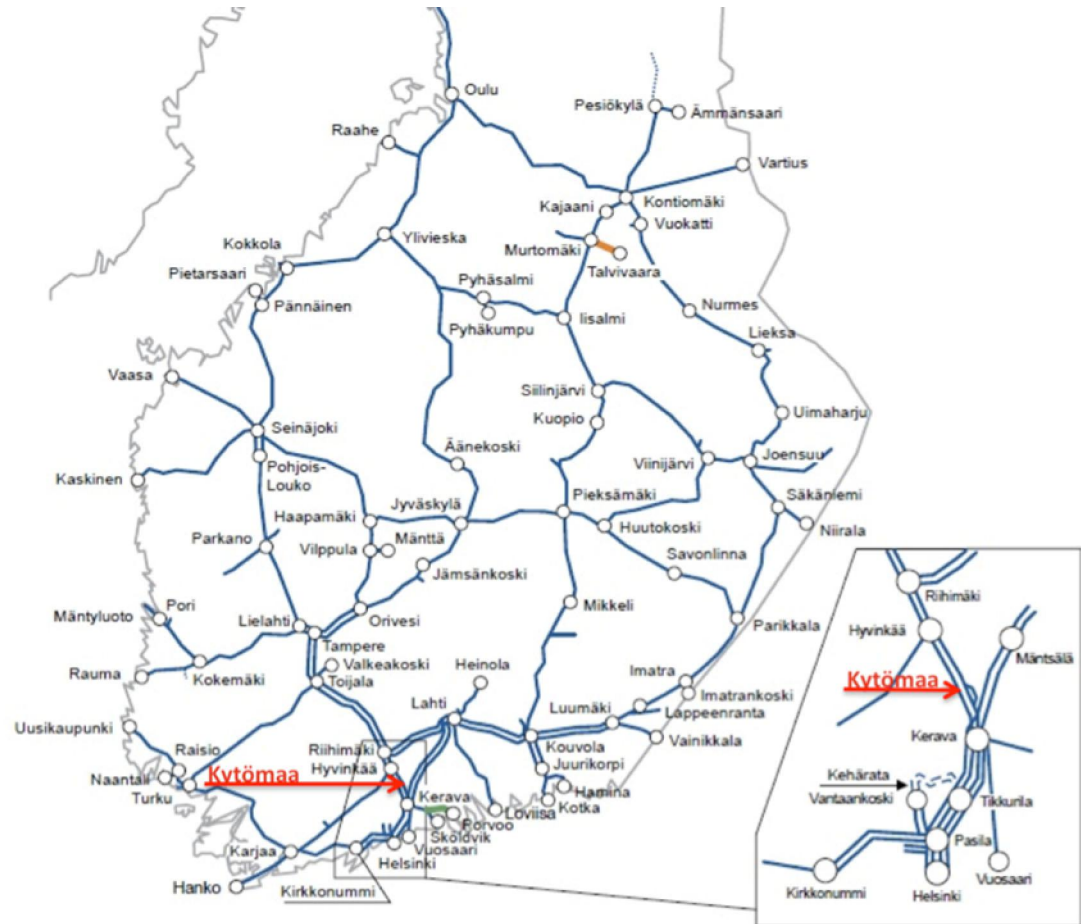
Mittauskohteeksi valittiin pääradan varrella sijainnut matalan meluesteen kaupallinen koerakenne (kuva 22 ja 23). Mittaukset suoritettiin vain yhdentyyppiselle meluesteelle, koska Suomessa ei kesällä 2011 ollut muita matalia melusteitä rakennettuna. Meluste sijaitsi Kytömaalla Keravan ja Kyrölän asemien välisellä rataosuudella noin kilometrin päässä oikoradan erkanemiskohdasta pohjoiseen (kuva 24). Kyseinen meluste oli rakennettu vain testauskäyttöön ja se täytti matalan meluesteen alustavat tuotevaatimukset. Esteen korkeus kiskon selästä oli 85 cm ja esteen pituus oli 60 metriä.



Kuva 22. Matala meluste päiradan varrella Kytömaalla.



Kuva 23. Matala meluste radan puolelta kuvattuna.



Kuva 24. Matala melueste sijaitsi Tuusulan Kytömaalla.

Kytömaan kohdalla rata oli kaksiraiteinen. Raiteet kulkivat etelä-pohjois-suunnassa ja mittauspaiikalla ne olivat suoria. Itäpuolen raiteen kiskoissa oli kumiset kiskonvaimentimet noin 70 metrin matkalla. Mittauspisteistä eteläisempi sijaitsi kohdassa, josta kiskonvaimentimet alkoivat. Myös toisen mittauspisteiden kohdalla oli vaimentimet. Raiteiden ominaisuudet on esitetty tarkemmin taulukossa 13.

Taulukko 13. Raiteiden ominaisuudet Kytömaalla (Liikennevirasto 2010. Liikennevirasto 2011).

Kunnossapitotaso	1A
Palvelutasoluokka henkilöliikenteessä	H1 (korkein mahdollinen)
Palvelutasoluokka tavarajunaliikenteessä	T1 (korkein mahdollinen)
Päällysrakenneluokka	D
Kiskotus	60 E1
Suurin sallittu akselipaino	250 kN
Suurin sallittu nopeus	200 km/h
Raideleveys	1524 mm
Jatkuvakiskoraiteet	
Ratapölkkyt betonia	
Rata sähköistetty	

Matalan meluesteen sijainti oli valittu siten, että taustamelu kohteessa oli mahdollisimman vähäistä. Esteen läheisyydessä ei ollut asutusta ja ainut tieliikennemelun lähde oli radan suuntaisesti kulkenut vähäliikenteinen Kytömaantie. Kerava-Lahti-oikorata kulki pääradan itäpuolelta lähellä mittauspaikkaa. Mittauspaikka sijaitsi peltoaukealla ja radan molemmilla puolilla oli jonkin verran matalaa kasvillisuutta sekä pensaikkoa (kuva 25). Kytömaantien ja pellon välisellä penkereellä kasvoi tiheä pensaikko, joka kaadettiin ennen mittauksia. Mittauspaikan viereisillä pelloilla kasvoi heinää ja viljaa.



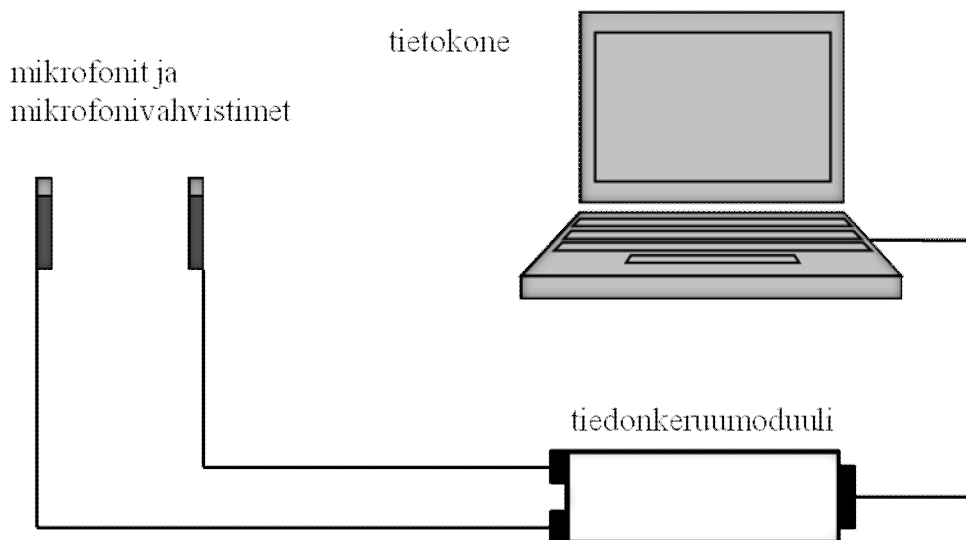
Kuva 25. Näkymä mittauspaikalta etelään.

Mittauspaikan ohitse kulki Pendolino- InterCity-, pika- ja tavarajunia sekä lähiliikenteen Sm1-, Sm2- ja Sm4-sähkömoottorijunia. Eri junatyypit on esitetty liitteessä B. Sm1- ja Sm2-junia käsiteltiin yhtenä ryhmänä, koska melunlaskentamalli olettaa niiden melupäästöjen olevan samanlaisia. Arkipäivisin lähiliikenteen junia kulki tunnissa yhteen suuntaan noin kaksi ja kaukoliikenteen junia yksi. Hiljaisempina vuorokauden aikoina ja öisin junia kulki harvemmin.

5.2 Tutkimusmenetelmät

5.2.1 Mittauskalusto

Melumittauksissa käytettiin Insinööritieteiden korkeakoulun Autolaboratorion laitteistoa, joka oli alun perin kehitetty rengasmelun mittaamiseen. Mittauslaitteisto koostui kahdesta mikrofonista (Brüel & Kjør Type 4188), kahdesta mikrofonin vahvistimesta (Brüel & Kjør Type 2671), tiedonkeruunoduulista (National Instruments NI ENET-9163), kannettavasta tietokoneesta sekä liitäntäkaapeleista. Mikrofonit nostettiin halutulle korkeudelle mikrofonitelineiden ja puurimojen avulla. Mikrofonien päissä käytettiin tuulisuojia. Laitteiston rakenne on esitetty kuvassa 26.



Kuva 26. Melumittauslaitteiston kokoonpano.

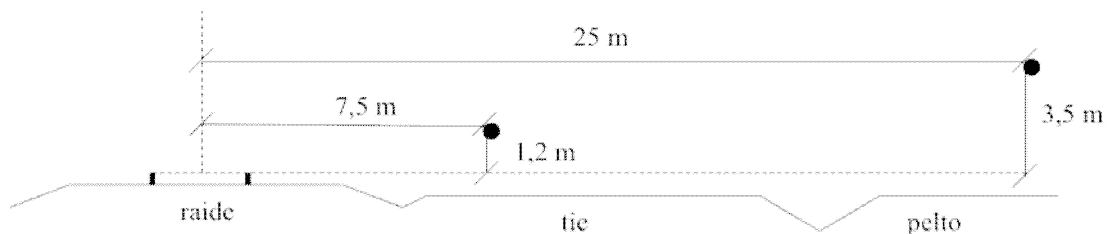
Melumittauslaitteistoa käytettiin tietokoneeseen asennetun Notra Sound Level-ohjelman avulla. Mittausohjelman avulla pystyttiin molemmilta mikrofoneilta tulevat äänisignaalit A-painottamaan. Ohjelman avulla melumittaus käynnistettiin ja lopetettiin sekä seurattiin mittauksen etenemistä. Mittausohjelma tallensi jokaisen mittauksen tekstitiedostoksi, joka myöhemmin siirrettiin Excel-taulukkolaskentaohjelmaan datan käsittelyä varten. Tekstitiedostoihin tallentui mittauksen jokaisen sekunnin pituisen ajanjakson keskiäänitaso $L_{Aeq,1s}$ 0,01 dB:n tarkkuudella sekä äänen spektri molemmilta mikrofoneilta erikseen. Lisäksi ohjelma tallensi wav-äänitiedoston jokaisen junan ohiajosta.

Junien nopeudet mitattiin doppler-ilmiöön perustuvalla Tribar Muni-Quip T3 tutkalla. Tutka ilmoitti junan nopeuden tarkkuudella 1 km/h. Mittauspaikan säätä tarkkailtiin Fine Offset Electronics Co., LTD:n WH1080-sääasemalla. Sääasema mittasi ilman lämpötilaa ja kosteutta, tuulen nopeutta ja suuntaa sekä ilmanpainetta. Lisäksi vallitsevista sääoloista tehtiin aistinvaraisia havaintoja.

5.2.2 Mikrofonien sijainnit

Mittauksissa käytettiin jokaisella kerralla kahta mikrofonia samanaikaisesti, koska junan ohiajosta syntyvää äänitasoa haluttiin tarkastella sekä meluesteen takana että ulkopuolella. Meluesteen vaimennuskyky laskettiin kahden mikrofonin äänitasojen erotuksena. Molemmat mikrofonit sijoitettiin aina yhtä kauaksi raiteen keskilinjasta ja samalle korkeudelle. Äänitasoja haluttiin tarkastella kahdella eri etäisyydellä melulähteestä, koska näin saatiin parempi kuva äänen leviämisestä. Mikrofonien etäisyydet raiteiden keskilinjasta sekä korkeudet kiskon selästä määritettiin raideliikenteen melun mittaamista käsittelevän standardin SFS-EN ISO 3095:2005 mukaisesti. Mikrofonit sijaitsivat seuraavilla paikoilla:

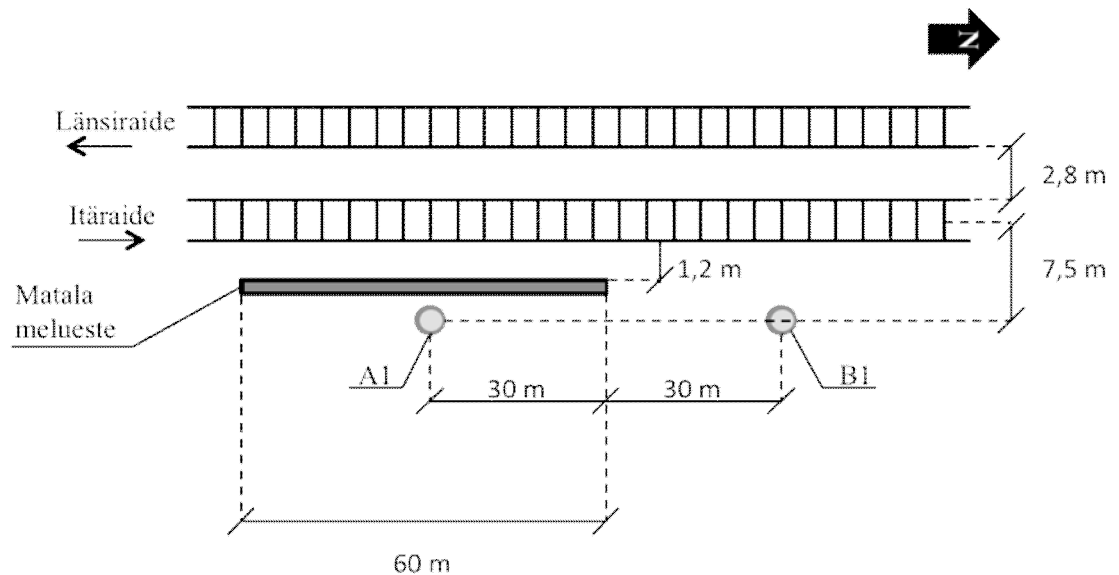
- 7,5 metrin etäisyydellä raiteen keskilinjasta, $1,2 \pm 0,2$ metriä kiskon selän korkeuden yläpuolella
- 25 metrin etäisyydellä raiteen keskilinjasta, $3,5 \pm 0,2$ metriä kiskon selän korkeuden yläpuolella (kuva 27). (Suomen standardisoimisliitto 2006.)



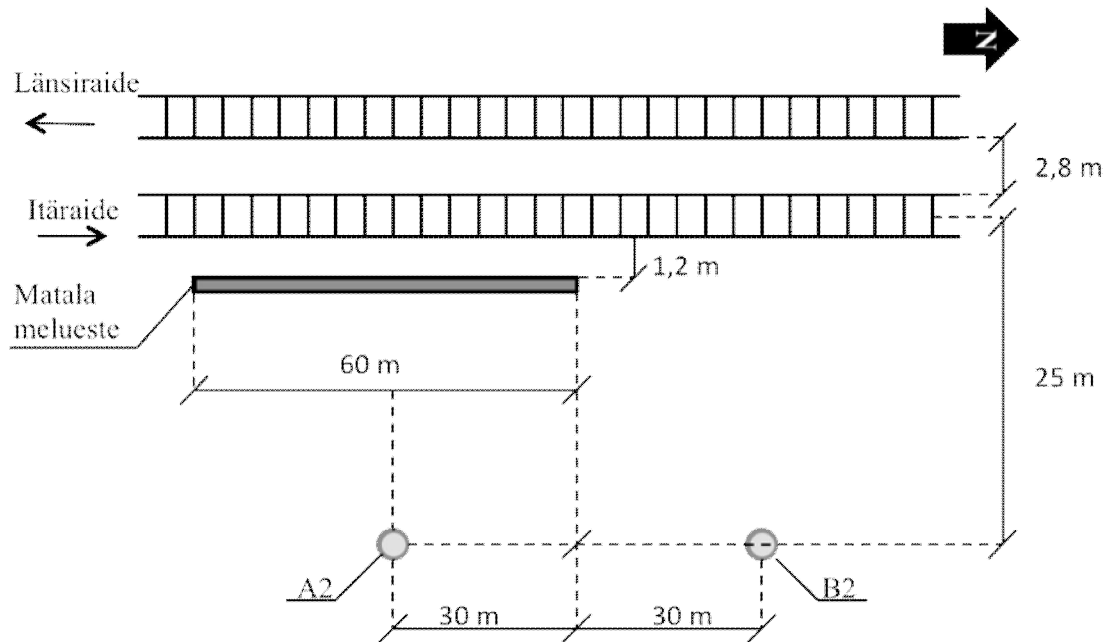
Kuva 27. Mikrofonien sijainnit poikkileikkauksessa.

Jokaisen mittauksen aikana käytettiin kahta mikrofonia, jotka olivat aluksi 7,5 metrin etäisyydellä raiteen keskilinjasta ja myöhemmin ne siirrettiin 25 metrin etäisyydelle. Toinen mikrofoni sijaitsi matalan meluesteen takana siten että mikrofonin kohdalta esteen molempiin päihin oli 30 metriä matkaa. Meluesteen ulkopuolella ollut mikrofoni sijaitsi 60 metriä kauempana eli 30 metrin päässä esteen päästä. Kuvissa 28 ja 29 on havainnollistettu mikrofonien sijainteja mittausten aikana. Meluesteen takana olleisiin mikrofoneihin on viitattu tunnuksella A ja meluesteen ulkopuolella olleisiin mikrofoneihin tunnuksella B. Lähempään tarkastelupisteeseen on viitattu tunnuksella 1 ja kauempaan tarkastelupisteeseen tunnuksella 2. Tulosten käsittelyssä A1 tarkoittaa 7,5 met-

rin etäisyydellä esteen takana ollutta mikrofonia ja B1 samalla etäisyydellä meluesteen ulkopuolella ollutta mikrofonia. Vastaavasti 25 metrin etäisyydellä meluesteen takana olleeseen mikrofoniin on viitattu tunnuksella A2 ja toiseen mikrofoniin tunnuksella B2. Itäraiteella tarkoitetaan lähempänä meluestettä ollutta raidetta, jossa junat kulkivat etelästä pohjoiseen. Länsiraide taas oli meluesteestä katsottuna kauempi raide, jota käyttivät pohjoisesta etelään kulkeneet junat. Liitteessä C on esitetty lisää kuvia mittauspai-
kalta.



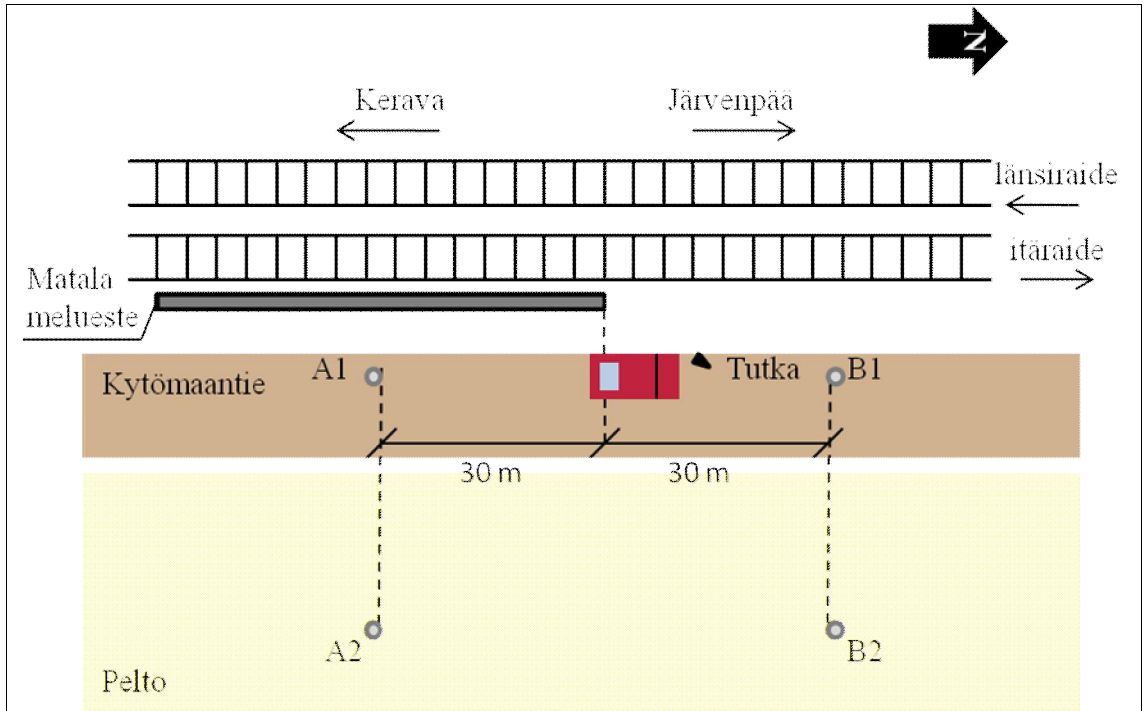
Kuva 28. Mikrofonit 7,5 metrin etäisyydellä raiteen keskilinjasta. Kuva ei ole mittakaavassa.



Kuva 29. Mikrofonit 25 metrin etäisyydellä raiteen keskilinjasta. Kuva ei ole mittakaavassa.

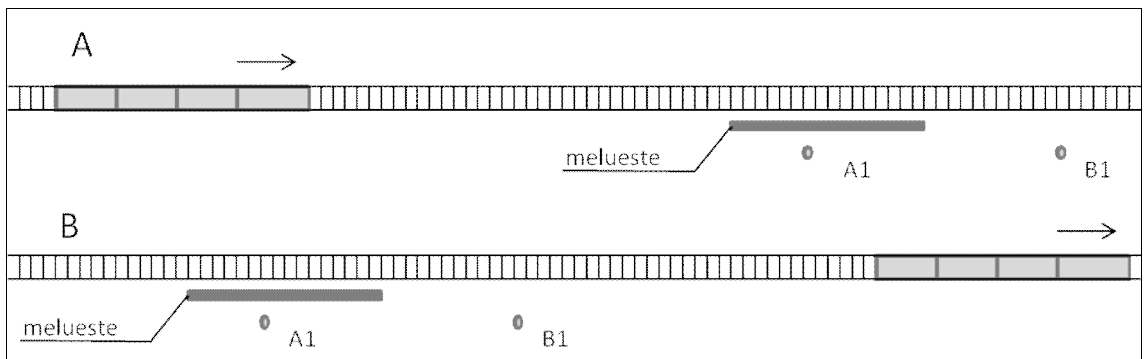
5.2.3 Mittausmenettely

Jokainen mittauspäivä aloitettiin tarkistamalla mikrofonien toiminta äänilähteellä, joka tuotti 1 000 Hz:n taajuista ääntä 94,0 dB:n voimakkuudella. Tämän jälkeen mikrofonien sijainnit määritettiin laseretäisyysmittaria ja rullamittaa apuna käyttäen. Mikrofonit nostettiin haluttuun korkeuteen mikrofonitelineiden ja puurimojen avulla. Mikrofonit suunnattiin silmämääräisesti kohtisuoraan kiskoja nähden. Sääsama pystytettiin läheiselle pellolle ja sen antamia tuloksia pystyttiin lukemaan erilliseltä näytöltä, jota pidettiin autossa. Myös kannettava tietokone, jolla mittaus käynnistettiin ja lopetettiin, sijoitettiin autoon. Tutka sijaitsi auton läheisyydessä ja sillä mitattiin jokaisen junan nopeus ennen meluestettä. Kuvassa 30 on havainnollistettu mittauskaluston sijaintia mittausten aikana.



Kuva 30. Järjestelyt mittauspaikalla ja auton sijainti, kun tarkastelupisteiden etäisyydet raiteen keskilinjasta olivat 7,5 metriä. Kun mittauksia tehtiin kauemmissa tarkastelupisteissä pellon puolella, oli auto pysäköity samaan kohtaan, mutta eri puolelle tietä.

Mittaus aloitettiin noin 200 metriä ennen kun juna oli melusteen kohdalla ja lopetettiin kun juna oli noin 300 metrin päässä toiselta mikrofonilta (kuva 31). Mittaukset tehtiin molempiin suuntiin kulkevista junista. Kustakin junasta kirjattiin mittauspäiväkirjaan junatyyppi, tutkan näyttämä junan nopeus, vaunujen lukumäärä sekä kellonaika, jolloin juna ohitti melusteen. Lisäksi mittauspäiväkirjaan kirjattiin huomioita mittauksien aikana vallinneista erityisolista. Esimerkiksi mittauksen aikana vaikuttaneista muista melulähteistä kuin junista tehtiin huomautus. Ohiajon jälkeen Notra Sound Level-ohjelman tulokset tallennettiin tekstitiedostoksi datan myöhempää käsittelyä varten. Varsinaisten mittauksen lisäksi tehtiin referenssimittauksia, jolloin mitattiin mittauspaikan taustamelua ilman junaliikennettä.

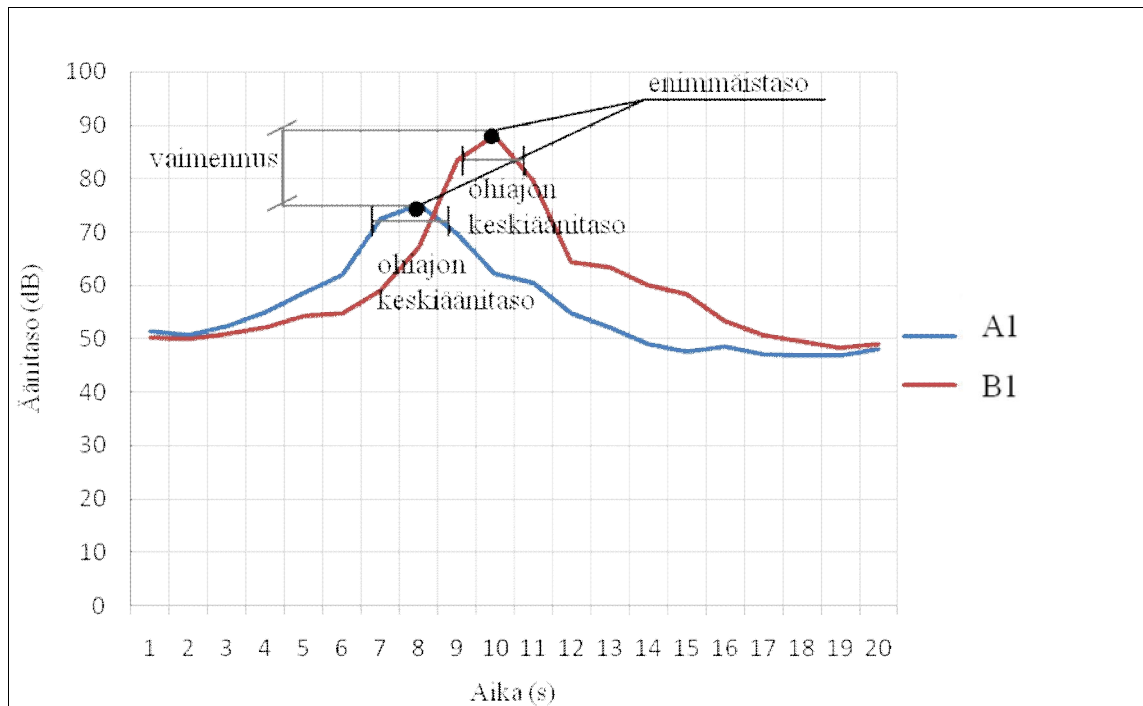


Kuva 31. Mittaus aloitettiin ennen kuin juna oli melusteen kohdalla (A) ja lopetettiin, kun juna noin 300 metrin päässä toiselta mikrofonilta (B). Kuva ei ole mittakaavassa.

5.3 Mittaustulokset ja tulosten tarkastelu

Kenttämittausten mittausaineisto koostui tekstitiedostoista, joissa oli molemmilta mikrofoneilta mitatut sekunnin pituiset keskiäänitasot koko mittausajalta sekä äänen spektri oktaavin kolmanneksen levyisiltä taajuuskaistoilta. Mittausaineiston käsittely aloitettiin siirtämällä Notra Sound Level-ohjelmasta tallennetut tekstitiedostot taulukkolaskenta-ohjelmaan. Mittausaineistosta poistettiin ne mittauskerrat, joiden aikana mitattuun melutasoon vaikuttivat muutkin äänilähteet kuin ohiajanut juna. Esimerkiksi, jos ajoneuvo ajoi Kytömaantiellä samaan aikaan kun mittaus oli käynnissä, ei mittaustulosta voitu käyttää. Lisäksi sellaiset mittauskerrat, jolloin meluesteen kohdalla oli kaksi junaa samanaikaisesti, poistettiin. Myöskään mittauskertoja, jolloin junan nopeus ei pysynyt tasaisena mikrofonien välillä, ei voitu käyttää, koska junan nopeus vaikuttaa junan melupäästöön. Yksi mittauskerta jouduttiin poistamaan, koska junan kuljettaja soitti torvea meluesteen kohdalla.

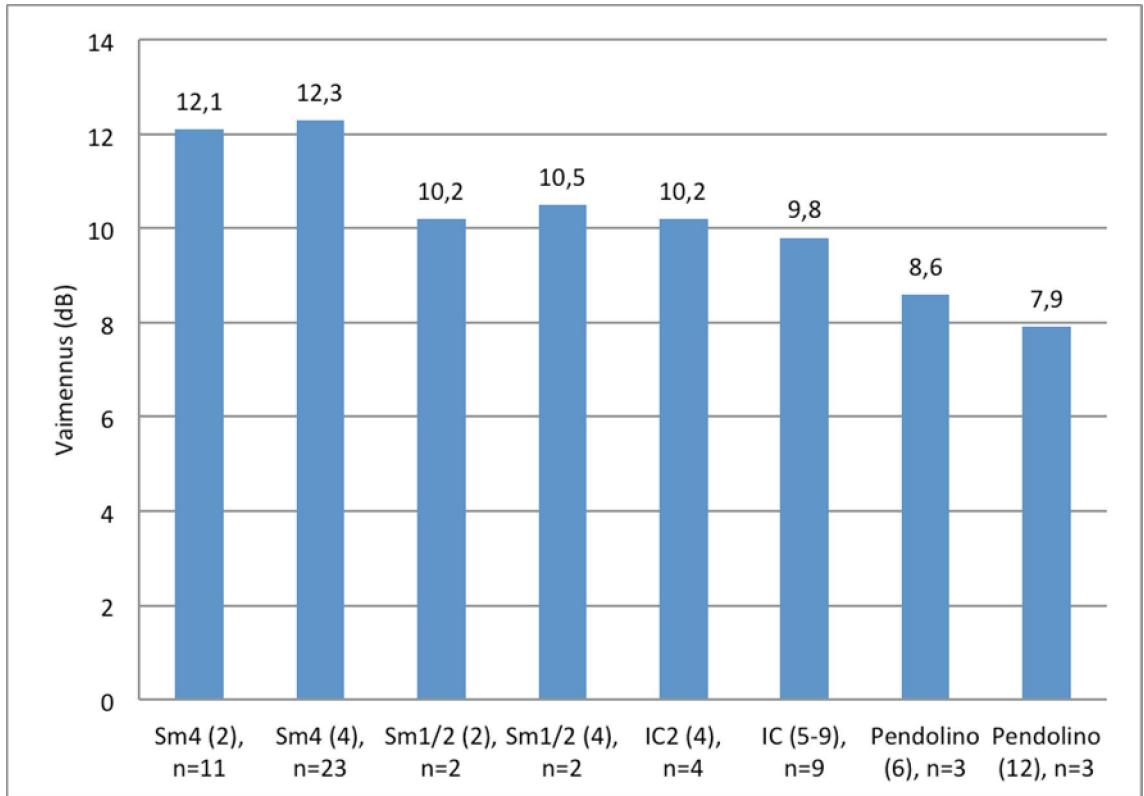
Jokaisen mitatun junan ohiajon sekunnin pituisista keskiäänitasoista piirrettiin kuvaajat ajan funktiona siten, että molemmilta mikrofoneilta mitatut äänitasot olivat samassa kuvaajassa. Kuvassa 32 on esitetty esimerkki yhden Sm4-junan ohiajon mittausaineistosta piirretystä kuvaajasta. Mittaus on aloitettu noin 200 metriä ennen meluestettä ja tällöin äänitasot molemmilla mikrofoneilla olivat noin 50 dB. Itäraidetta kulkenut juna ohitti ensin meluesteen takana olleen mikrofonin A1, jonka takia mikrofonilta A1 mitattu äänitaso saavuttaa korkeimman arvonsa ennen kuin mikrofonilla B1 mitattu äänitaso. Tarkasteluaikana vallinneesta suurimmasta äänitasosta käytetään nimitystä enimmäistaso. Kuvan 32 esimerkkitapauksessa koko mittausajan kesto oli 20 sekuntia. Ohiajon keskiäänitaso on laskettu siltä ajalta, kun juna oli mikrofonin kohdalla. Meluesteen vaimennusta voidaan tarkastella sekä enimmäistasojen että keskiäänitasojen erotuksena.



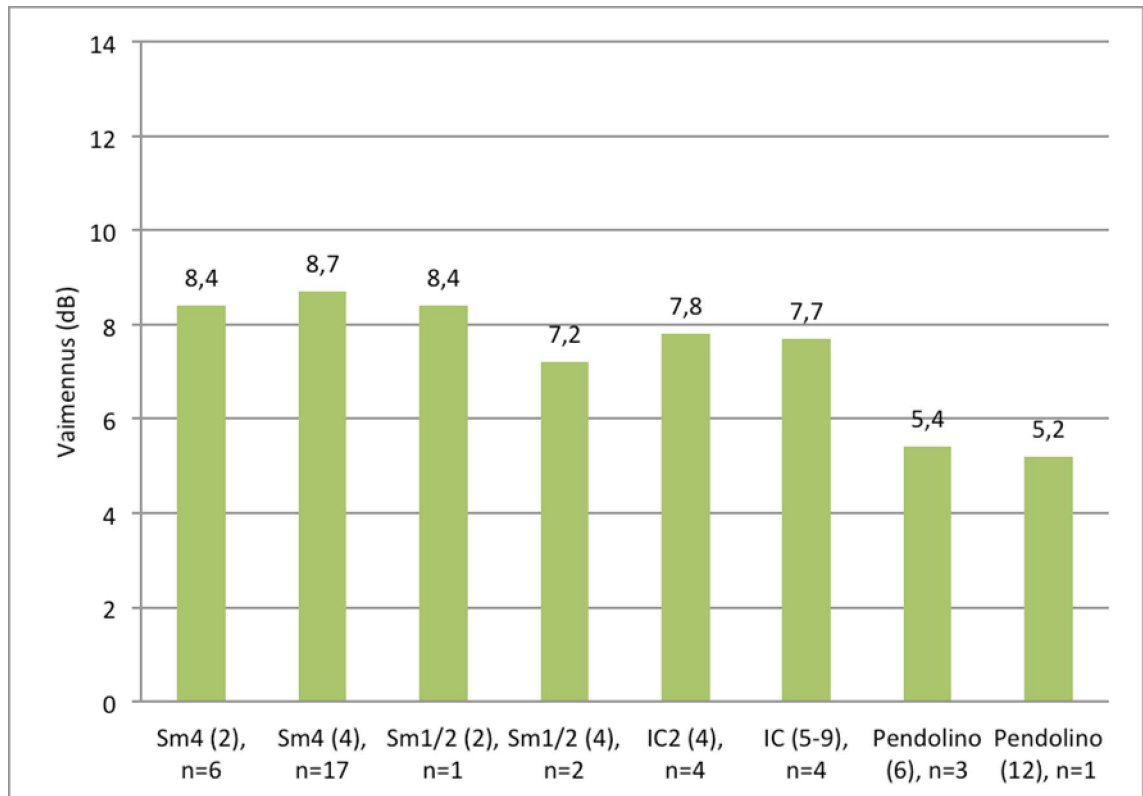
Kuva 32. Sm4-junan ohiajo, nopeus 119 km/h.

Aluksi matalan meluesteen vaimennuskykyä arvioitiin enimmäistasojen erotuksena. Tulokset luokiteltiin sen mukaan, kulkiko juna meluestettä lähemmällä (itäraide) vai kauemmalla (länsiraide) raiteella. Tämän jälkeen tulokset luokiteltiin tarkastelupisteiden etäisyyksien ja junatyypin mukaan. Samaan junatyypin kuuluvat junat luokiteltiin lopuksi niiden vaunumäärien mukaan. Ne junatyypit ja vaunujen määrät, joiden mitattujen ohiajojen määrä oli suurempi kuin yksi, tuloksista laskettiin aritmeettiset keskiarvot ja keskihajonnat. Tulosten keskiarvot ja – hajonnat on esitetty liitteen D taulukoissa 1-4.

Enimmäistasaan voivat vaikuttaa yksittäiset äänet, jotka erottuvat junan ohiajon melupäästöstä. Tämän takia tulosten tarkempaa käsittelyä varten mittausaineistosta laskettiin jokaisen junan ohiajon keskiäänitaso siltä ajalta, kun juna oli mikrofonin kohdalla. Matalan meluesteen vaimennuskykyä arvioitiin laskemalla ohitusajan keskiäänitasojen erotus. Keskiäänitasot jokaisen junan ohiajon osalta on esitetty liitteen D taulukoissa 5-8 käytetyn raiteen ja tarkastelupisteiden etäisyyksien mukaan luokiteltuina. Kuvissa 33 ja 34 on esitetty itäraiteen tuloksista lasketut aritmeettiset keskiarvot junatyypin ja vaunujen määrän mukaan eriteltyinä. Tulosten tarkastelussa on otettava huomioon, että Intercity-juniin kuului vaunujen lisäksi Sr2-veturi, jonka pituus oli 18,7 metriä. Keskiarvot laskettiin vain niistä ohiajoista, joissa mittausausten määrä oli vähintään kaksi ja muissa tapauksissa kuvissa on esitetty vain yhden ohiajon tulos.



Kuva 33. Itäraiteella kulkeneiden junien keskiäänitasojen keskiarvot 7,5 metrin etäisyydellä raiteen keskilinjasta. Suluissa oleva numero tarkoittaa vaunujen määrää ja n mitattujen ohiajojen määrää.



Kuva 34. Itäraiteella kulkeneiden junien keskiäänitasojen keskiarvot 25 metrin päässä raiteen keskilinjasta. Suluissa oleva numero tarkoittaa vaunujen määrää ja n mitattujen ohiajojen määrää.

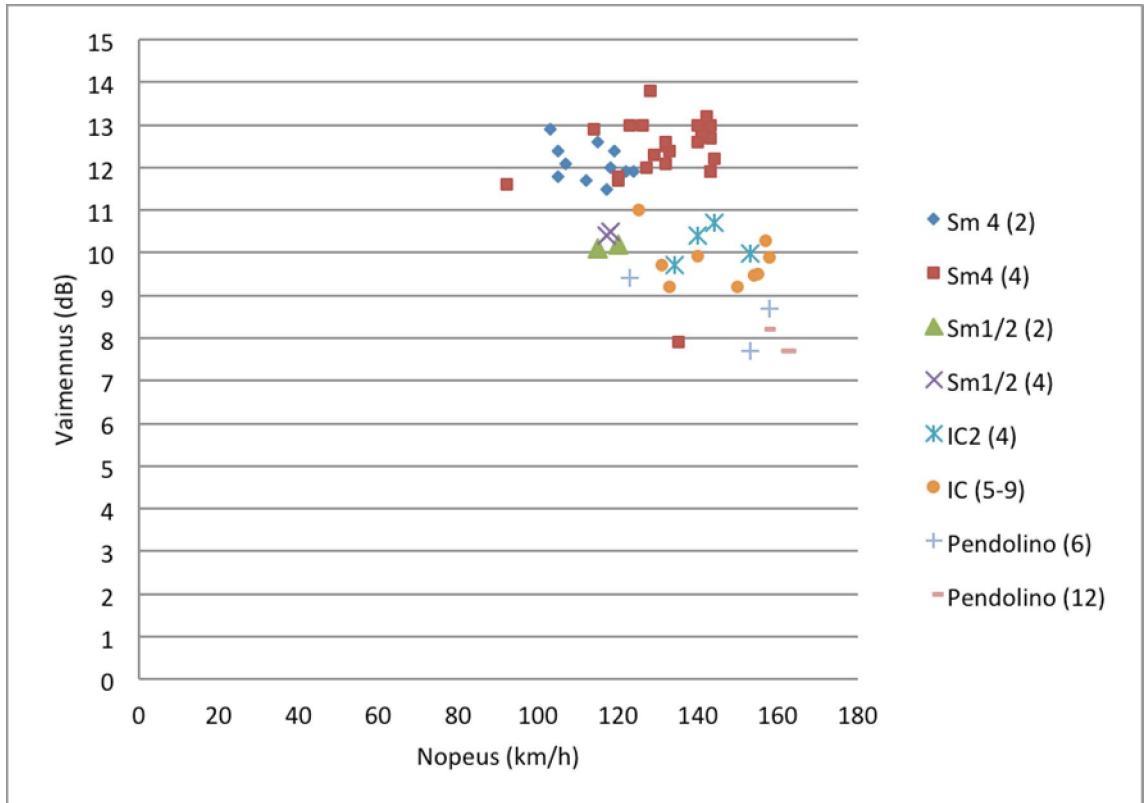
Tulosten perusteella melutaso laski lähemmässä tarkastelupisteessä noin 8-12 dB ja kauemmassa mittauspisteessä noin 5,5-8,5 dB. Matalan meluesteen vaimennuskyky oli noin 3 dB parempi lähemmässä mittauspisteessä. Melu pääsi leviämään kauempaan mittauspisteeseen myös esteen ulkopuolelta, koska este oli vain 60 metriä pitkä ja se laski vaimennuksen arvoja. Kauemmat mittauspisteet sijaitsivat korkeammalla, joten ääni pääsi leviämään paremmin myös meluesteen takana olleeseen tarkastelupisteeseen. Lisäksi mittauksen tarkkuus heikkeni, kun etäisyys melulähteestä kasvoi. Esimerkiksi sääolomuuttujat vaikuttivat kauempien mittauspisteiden tulosten tarkkuuteen enemmän. Junien nopeuksissa oli suurta hajontaa, mutta se ei vaikuttanut vaimennuksien arvoihin. Vaimennuksen keskihajonta oli alle 1 dB kaikkien junatyyppien kohdalla.

Junien nopeus sen sijaan vaikuttaa tarkastelupisteiden keskiäänitasoihin. Lisäksi junatyyppillä oli vaikutusta junan melupäästöön. Nopeuden vaikutusta keskiäänitasoon tarkasteltiin lineaarisen regressiomallin avulla. Oletuksena oli, että junan ohiajon keskiäänitaso voidaan selittää junan nopeudella. Keskiäänitasoista piirrettiin kuvaajat nopeuden funktiona ja malleihin sovitettiin regressiosuorat. Tarkastelu tehtiin erikseen kaikille junatyypeille vaunujen määrien mukaan eriteltyinä. Regressioanalyysiä ei tehty sellaisille junatyypeille, joiden mitattujen ohiajojen määrä oli kaksi tai vähemmän. Eri vaunujen määrille piirrettiin erilliset kuvaajat, koska vaunujen määrä vaikutti keskiääni-

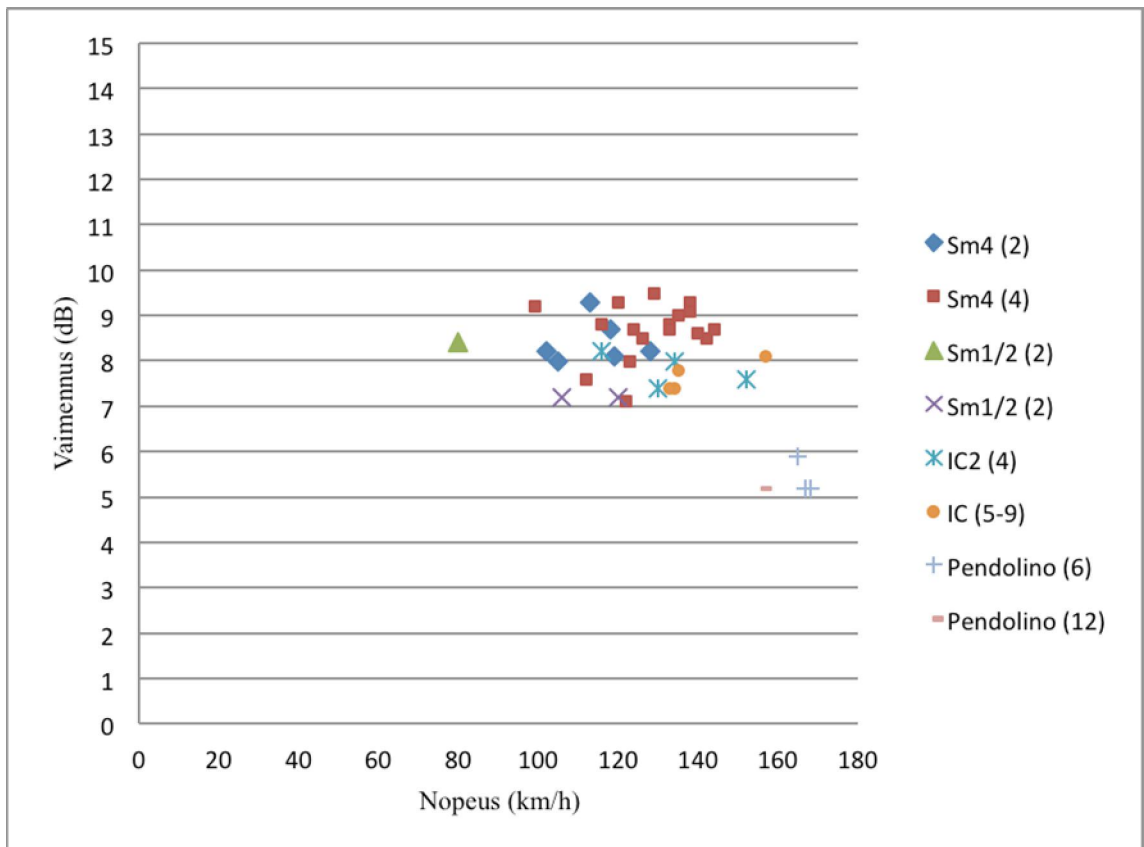
tason määrittelyjakson pituuteen. Regressioanalyysin kuvaajat on esitetty liitteen D kuvissa 1-9.

Oletuksena oli, että korrelaatio on positiivista eli junan ohiajon keskiäänitaso on sitä suurempi, mitä suurempi on junan nopeus. Oletus osoittautui kuitenkin vääräksi kauempien tarkastelupisteiden neljän vaunun InterCity-junien ohiajojen kohdalla. Keskiäänitasot laskivat, kun junien nopeudet kasvoivat. Yksittäisten junien ominaisuudet, kuten epätasaisuudet pyörien pinnoissa, voivat vaikuttaa junan melupäästöön, jolloin nopeuden ja keskiäänitason välinen korrelaatio ei välttämättä ole positiivista. Lisäksi etäisyys vaikutti keskiäänitasoon: kauemmissa mittauspisteissä keskiäänitasot olivat alhaisempia etäisyysvaimennuksen vuoksi. Etäisyysvaimennus ei kuitenkaan vaikuta tuloksista laskettuihin vaimennuksen arvoihin.

Kuvissa 35 ja 36 on tarkasteltu matalan meluesteen vaimennuskykyä eri junatyypeillä. Tulosten perusteella korkeimmat vaimennuksen arvot saavutettiin Sm4-junilla. Tämän tutkimuksen perusteella ei voida kuitenkaan todeta matalan esteen vaimentavan parhaiten Sm4-junien melua, koska muita junatyyppejä mitattiin selvästi vähemmän. Lisäksi kauemmassa mittauspisteessä vaimennuksen arvojen erot eri junatyypeillä olivat pienempiä. Pendolino-junien ohiajoista lasketut vaimennuksen arvot olivat alhaisimmat. Tämä ei kuitenkaan tarkoita sitä, ettei matala melueste soveltuisi Pendolino-junien melupäästöjen vaimentamiseen, vaan pienempi vaimennuksen arvo johtui junan pituudesta. Matalan meluesteen koerakenne oli 60 metriä pitkä ja kuuden vaunun Pendolino-junan pituus oli 159 metriä. Pitkän junan ohiajon aikana osa junasta oli samaan aikaan meluesteen kohdalla ja osa ulkopuolella. Silloin melu pääsi leviämään mittauspisteeseen myös esteen ulkopuolelta ja vaikutti mitattuihin keskiäänitasoihin siten, että saavutettu vaimennus on pienempi kuin lyhyillä junilla. Neljän ja kahden vaunun junilla vaimennus oli noin 10-13 dB lähempien tarkastelupisteiden perusteella laskettuna ja noin 7-9 dB kauempien tarkastelupisteiden perusteella.

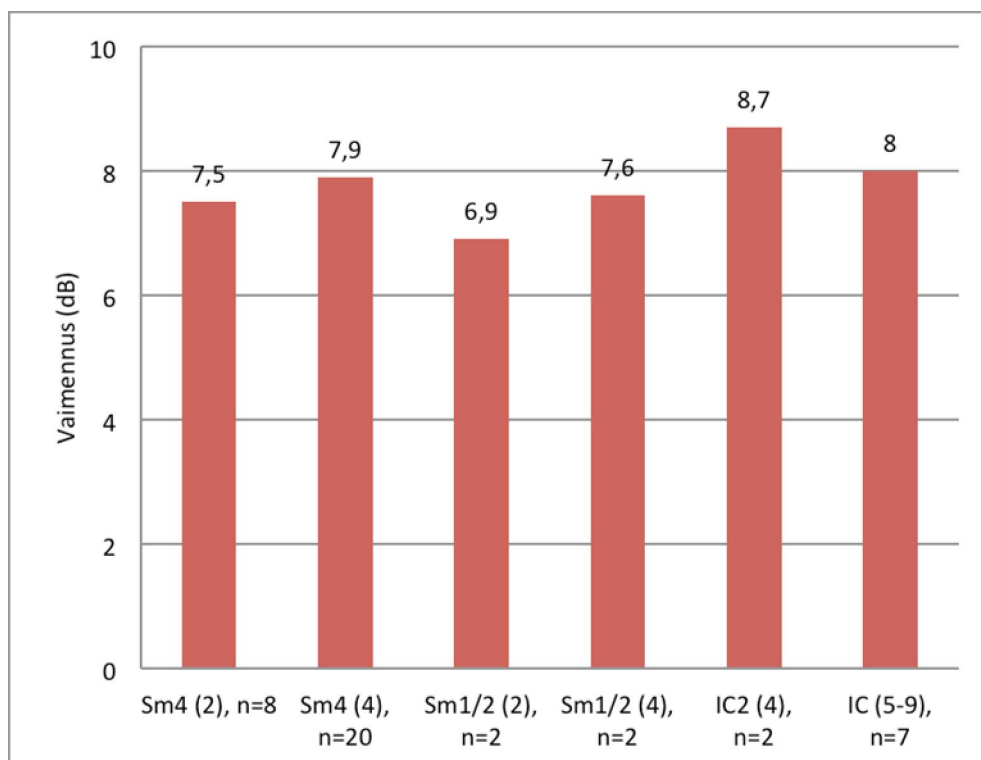


Kuva 35. Matalan meluesteen vaimennuskyky eri junatyypeillä, kun tarkasteluetaäisyys on 7,5 metriä raiteen keskilinjasta. Suluissa oleva numero kertoo vaunujen määrän.

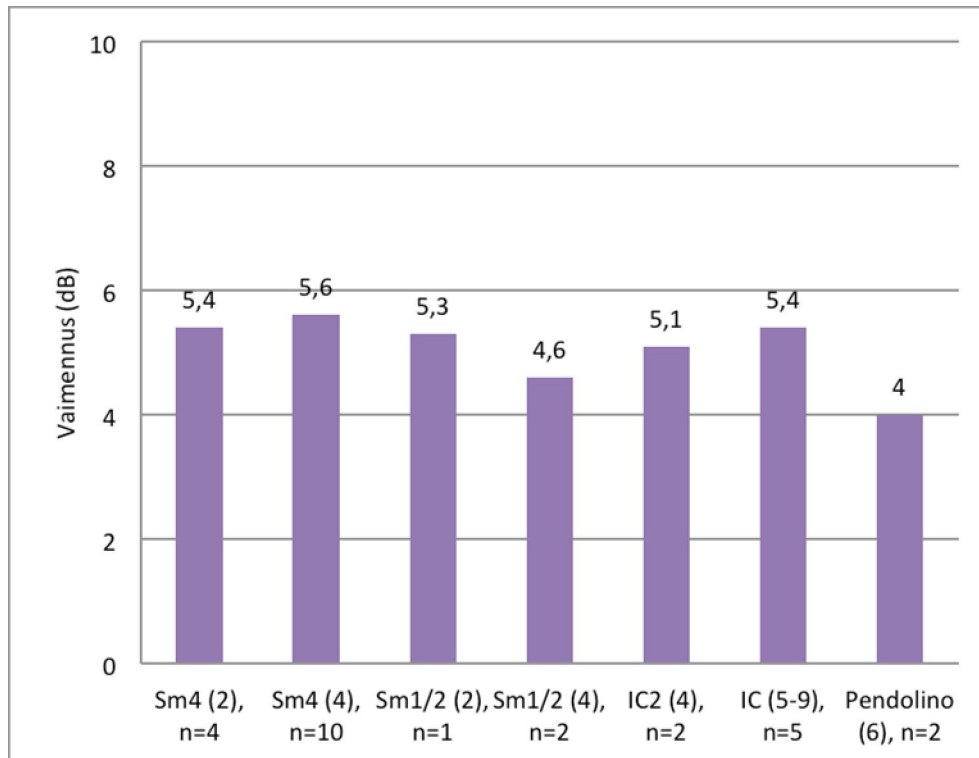


Kuva 36. Matalan meluesteen vaimennuskyky eri junatyypeillä, kun tarkasteluetaäisyys on 25 metriä raiteen keskilinjasta. Suluissa oleva numero kertoo vaunujen määrän.

Länsiraidetta käyttäneiden junien ohiajot mitattiin, koska haluttiin tarkastella meluesteen sijainnin vaikutusta äänen leviämiseen. Kun tarkastellaan länsiraidetta kulkeneiden junien tuloksia, on tärkeää ottaa huomioon, että mikrofonit oli sijoitettu standardin SFS-EN ISO 3095 mukaisesti itäraiteen osalta. Mikrofonit sijaitsivat noin 4 metriä kauempana länsiraiteesta kuin itäraiteesta. Kuvissa 37 ja 38 on esitetty länsiraiteen tuloksista lasketut aritmeettiset keskiarvot junatyypin ja vaunujen määrän mukaan eriteltyinä. Matala meluaste vaimensi länsiraiteella kulkeneiden junien melupäästöjä lähemmissä tarkastelupisteissä noin 7-8 dB ja kauemmassa tarkastelupisteessä noin 5 dB. Meluesteen takana olleiden tarkastelupisteiden (A1 ja A2) keskiäänitasot olivat länsiraiteella kulkevilla junilla korkeampia kuin itäraiteella kulkeneilla junilla. Tämä johtui siitä, että melu pääsi leviämään meluesteen yläpuolella sijainneeseen tarkastelupisteeseen taaemmalta raiteelta paremmin. Siksi melutaso laski vähemmän, kun juna kulki länsiraidetta.

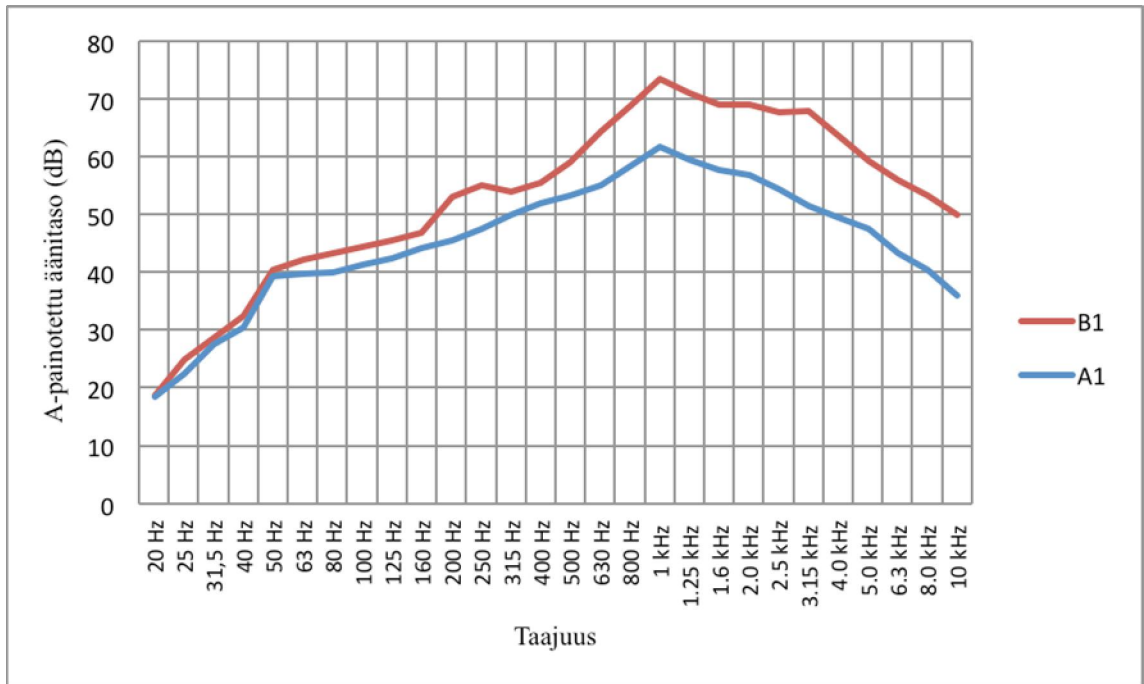


Kuva 37. Länsiraiteella kulkeneiden junien keskiäänitasojen keskiarvot 7,5 metrin etäisyydellä itäraiteen keskilinjasta. Suluissa oleva numero tarkoittaa vaunujen määrää ja n mitattujen ohiajojen määrää.

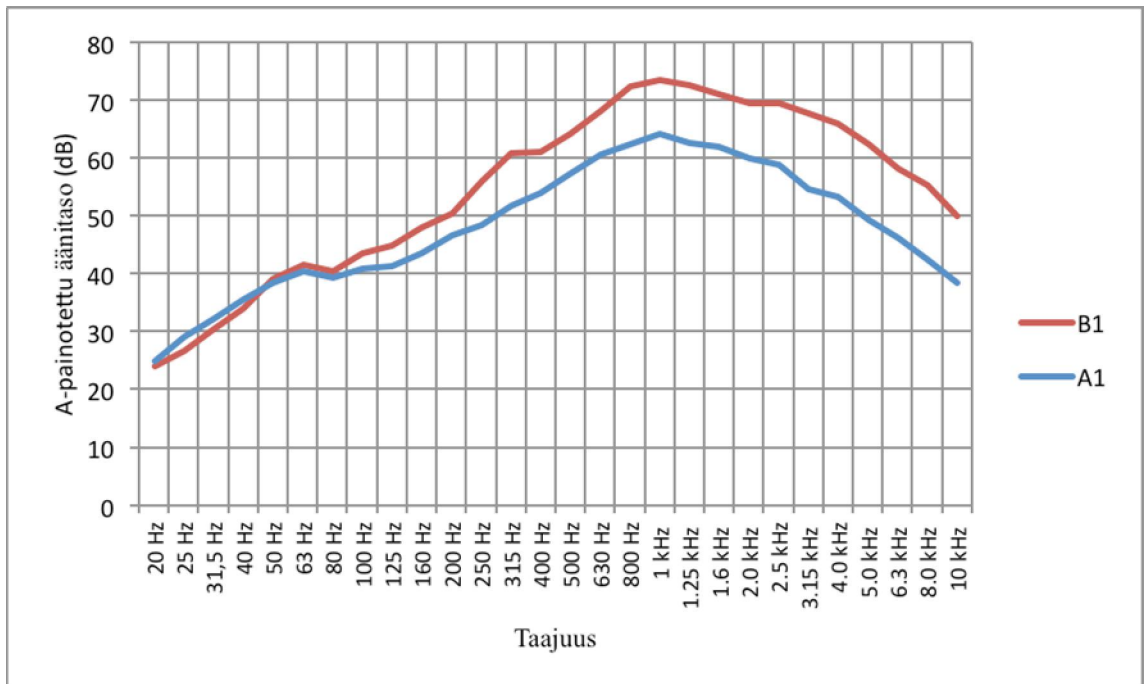


Kuva 38. Länsiraitteella kulkeneiden junien keskiäänitasojen keskiarvot 25 metrin etäisyydellä itäraiteen keskilinjasta. Suluissa oleva numero tarkoittaa vaunujen määrää ja n mitattujen ohiajojen määrää.

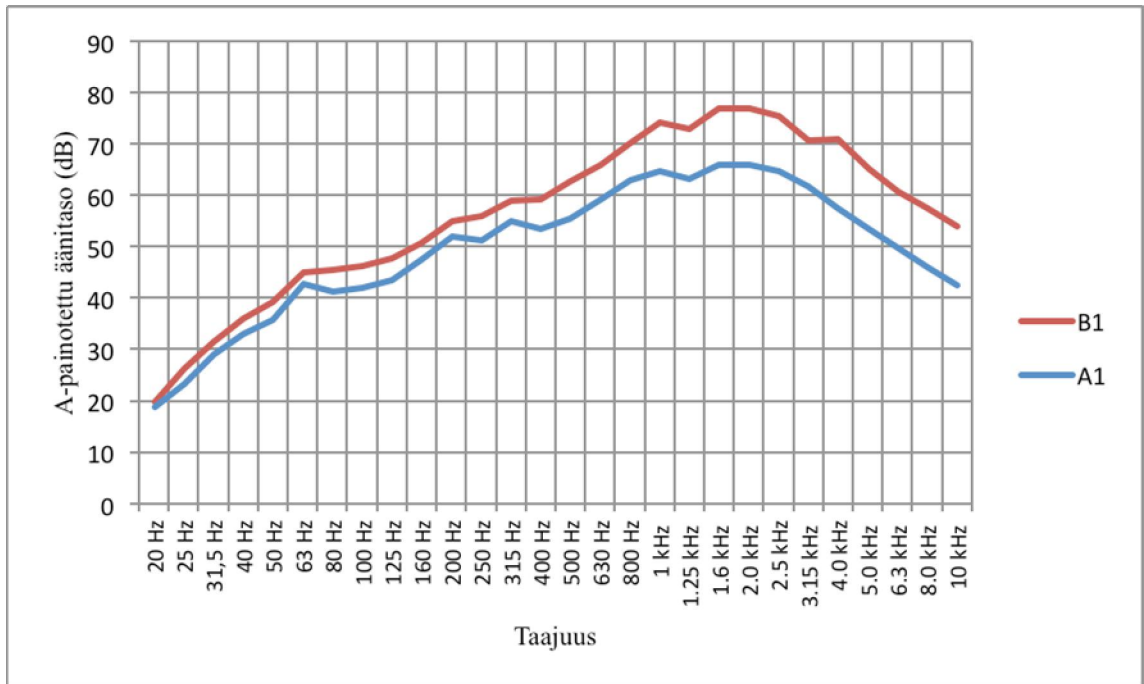
Mittauslaitteisto tallensi jokaisen junan ohiajon osalta myös äänen spektrin terssikaistan levyisiltä taajuuskaistoilta, joiden avulla pystyttiin tarkastelemaan, mitä taajuuksia matala melu este vaimensi parhaiten. Tarkastelu suoritettiin piirtämällä kuvaajat terssikaistaspektreistä, niin että samassa kuvaajassa oli aina molemmilta mikrofoneilta mitattu taajuus. Terssikaistaspektrit piirrettiin jokaisen ohiajon osalta erikseen. Oletuksena oli, että matala este vaimentaa parhaiten korkeita ääniä, koska matalat äänet taittavat korkeita ääniä tehokkaammin esteen taakse. Kuvissa 39-42 on esitetty esimerkkejä eri junatyyppien terssikaistaspektreistä. Tunnuksella A1 on viitattu meluesteen takana olleeseen mikrofoniin ja tunnuksella B1 meluesteen ulkopuolella olleeseen mikrofoniin. Eri junatyyppien taajuusjakaumissa ei havaittu merkittäviä eroja. Terssikaistaspektrien perusteella matala melu este vaimensi oletuksen mukaisesti korkeita taajuuksia enemmän kuin matalia taajuuksia. Kiskojen ja pyörien tuottama raideliikennemelu on usein voimakkaimmillaan 1000 Hz:n taajuuskaistalla (Ympäristöministeriö 2002). Tämän tutkimuksen tulosten perusteella mitattujen ohiajojen melupäästö oli voimakkainta yleensä noin 1000 Hz:n taajuuskaistan kohdalla, joten mitattujen junien melupäästö syntyi pääasiassa pyörän ja kiskon kohtaamisesta.



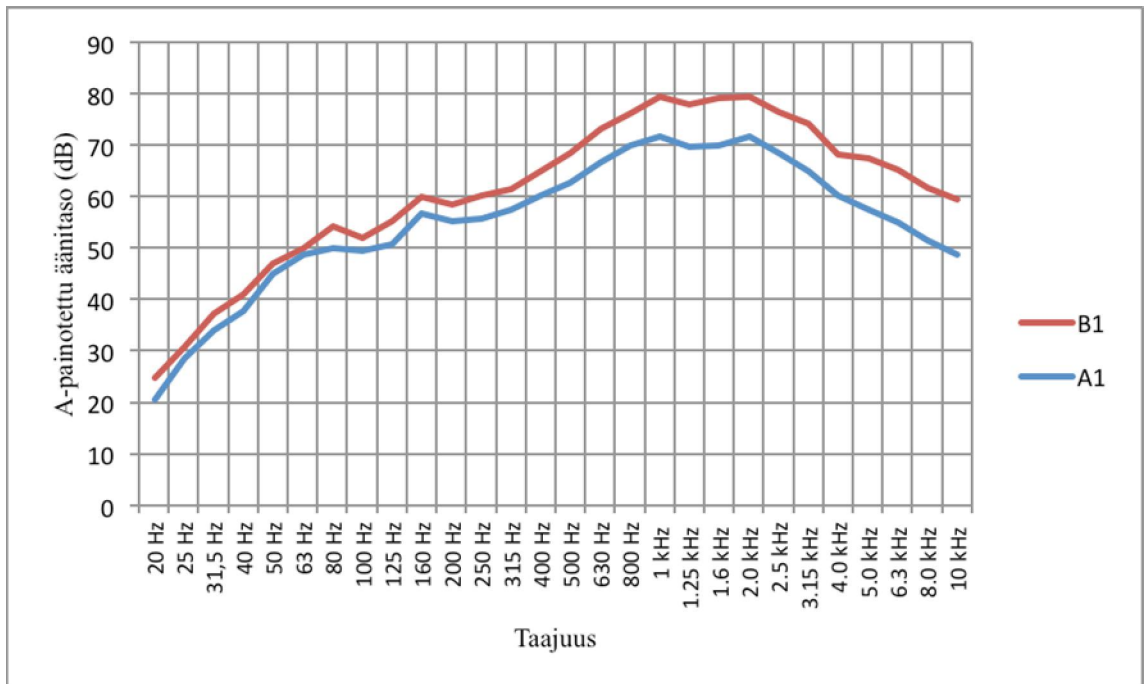
Kuva 39. Sm4-junan terssikaistaspektri.



Kuva 40. Sm1/2-junan terssikaistaspektri.



Kuva 41. InterCity2-junan terssikaistaspektri.



Kuva 42. Pendolinon terssikaistaspektri.

5.4 Mittaustulosten luotettavuus

Mittaustulosten luotettavuuteen vaikuttavat monet eri tekijät. Tulosten tarkkuus riippuu esimerkiksi:

- mittauslaitteiston ominaisuuksista
- säätilasta
- mittauspaikan ympäristöstä ja taustamelusta mittausten aikana
- junien ominaisuuksien vaihtelusta

Mittauslaitteiston toiminta varmistettiin aina ennen virallisia mittauksia kalibroidulla äänilähteellä. Mikrofonien äänitasot vaihtelivat muutamia kymmenyksiä äänilähteen nimellisäänitasosta ja tämä aiheutti pientä virhettä mittaustuloksiin. Virhe ei kuitenkaan ollut merkittävä kenttämittausten pohjalta tehtyjen päätelmien kannalta. Junien nopeudet mitattiin tutkalla, jonka mittaustarkkuus oli 1 km/h. Nopeuden mittaaminen toteutettiin siten, että mittaaja piti tutkaa kädessään ja tutkan suuntauksessa on voinut olla pieniä eroja mittauskertojen välillä. Junan nopeus mitattiin vain ennen meluestettä. Ne junien ohiajot, joissa nopeus muuttui selvästi mittauspisteiden välillä, poistettiin ennen tulosten käsittelyä. Jos junan nopeus muuttui vain hieman tarkastelupisteiden välillä, ei sillä ollut merkittävää vaikutusta tämän tutkimuksen tuloksiin.

Ilman paine, kosteus ja lämpötila sekä tuuli vaikuttavat äänen etenemiseen ympäristössä. Nämä muuttujat kirjattiin ylös jokaisena mittauspäivänä eikä niissä esiintynyt merkittävää vaihtelua mittauspäivien välillä. Mittauspäivinä oli aamuisin usein hyvin tyynä, mutta tuuli voimistui iltapäiväksi. Jokaisena mittauspäivänä tuulen nopeus oli kuitenkin alle 5 m/s, jos yksittäisiä tuulenpuuskia ei oteta huomioon. Raideliikenteen melumittaustandardin mukaan raidemelumittauksissa tuulen nopeuden tulee olla alle 5 m/s (Suomen standardisoimisliitto 2006). Tuulen suunta oli jokaisella mittauskerralla etelästä, jolloin voidaan puhua mittauspisteen suhteen sivuttaistuulesta. Säätilamuuttujat vaikuttivat enemmän kauempien mittauspisteiden tulosten tarkkuuteen, koska etäisyys melulähteen ja tarkastelupisteen välillä oli pidempi.

Kasvillisuus alueella oli matalaa ja mittauspaikan ympäristö oli hyvin samanlaista molempien mikrofonien kohdalla. Alueen maasto oli tasaista eikä mittauspaikan läheisyydessä ollut esimerkiksi rakennuksia, joista ääni olisi voinut heijastua. Meluesteen päistä sekä autosta, jossa mittauslaitteiston tietokonetta pidettiin mittausten aikana, voisi kuitenkin syntyä äänen heijastuksia. Auto pysäköitiin jokaisena mittauspäivänä samaan kohtaan, jotta eri päivinä tehdyt mittaukset olisivat vertailukelpoisia mahdollisista äänen heijastuksista huolimatta. Kun mikrofonit oli sijoitettu lähempiin tarkastelupisteisiin, oli auto pysäköity Kytömaantielle meluesteen puolelle. Kun mikrofonit sijaitsivat kauemmissa mittauspisteissä, piti auto pysäköidä Kytömaantien toiselle puolelle, koska muiden mikrofonien kaapelit olisivat menneet tien poikki.

Mittaustuloksista otettiin mukaan tutkimukseen vain ne, joiden aikana ainut merkittävä melulähde oli ohiajanut juna. Taustamelun vaikutusta arvioitiin tekemällä referenssimittauksia silloin kun juna ei ollut lähistöllä ja mittauspaikalla oli vain alueelle tyypillistä taustamelua. Taulukossa 14 on esitetty jokaisen mittauspäivän taustamelumittauksista poimitut sekunnin mittaisista keskiäänitasoista suurimmat. Raideliikenteen melumittausstandardin (SFS-EN ISO 3095:2005) mukaan taustamelusta johtuvaa korjauskerointia ei tarvitse käyttää, jos taustamelu mittauskohteessa on vähintään 10 dB alhaisempi kuin junan ohijasta mitattu äänitaso. Tämä vaatimus täyttyi jokaisena mittauspäivänä, joten taustamelulla ei ollut vaikutusta mittauksisiin.

Taulukko 14. Taustamelumittauksista poimitut sekunnin mittaisista keskiäänitasoista suurimmat $L_{Aeq,1s}$.

Mittauspäivä	$L_{Aeq,1s}$ (dB)	
	A1/A2	B1/B2
18.7.2011	47,5	50,0
21.7.2011	47,8	48,1
25.7.2011	47,0	47,2
26.7.2011	42,1	41,9
27.7.2011	43,5	45,2
1.8.2011	45,3	45,3

Junien ominaisuudet vaikuttavat niiden aiheuttamaan melupäästöön. Vaikka junien nopeus ja pituus pysyisivät samoina, voi samaan junatyyppiin kuuluvien junien melu vaihdella huomattavasti. Tämä johtuu siitä, että junien ja kiskojen kunto sekä ominaisuudet vaikuttavat niiden melupäästöön. Tämän tutkimuksen tuloksiin kiskojen kunnolla ei ollut merkittävää vaikutusta, koska mittaukset suoritettiin samoista radan kohdista jokaisena mittauspäivänä. Kiskojen kunnossa ei myöskään havaittu eroja mittauspisteiden välillä. Itäraiteeseen oli asennettu kiskonvaimentimet, jotka alkoivat meluesteen takana olleen mikrofonin kohdalta ja jatkuivat toisen mikrofonin ohi noin 10 metriä. Kiskonvaimentimien äänenvaimennuskyky oli noin 1 dB (Promethor 2011). Kiskonvaimentimet alensivat molemmilta mikrofoneilta mitattuja äänitasoja. Mittaustulosten perusteella laskettuun meluesteen vaimennuskykyyn tällä ei kuitenkaan ollut vaikutusta, koska kiskonvaimentimet alensivat äänitasoja molempien mikrofonien kohdalla.

Junien ominaisuuksien vaikutus niiden melupäästöön on tässä tutkimuksessa otettu huomioon ryhmittelemällä tulokset junatyyppeihin mukaan. Vaikka samaan junatyyppiin kuuluvissa junissa voi olla eroja esimerkiksi pyörien pintojen tasaisuuksissa, ei se vaikuta mittausaineiston perusteella laskettuun meluesteen vaimennuskykyyn, joka laskettiin kahden tarkastelupisteen erotuksena. Vaimennus laskettiin sekä enimmäistasojen että ohituksen keskiäänitasojen erotuksena. Keskiäänitasojen perusteella laskettuja vaimennuksen arvoja voidaan pitää luotettavampina, koska enimmäistasoihin ovat voineet

vaikuttaa yksittäiset, junan normaalista melupäästöstä poikkeavat äänet. Koska meluste oli vain 60 metriä pitkä, vaikuttivat junien pituudet äänitasojen erotuksena laskettuun vaimennuksen arvoon. Junan pituuksien vaikutus on otettu huomioon tarkastelemalla samaan junatyyppiin kuuluvien junien eri vaunumääriä aina omina ryhminään. Tulosten tarkastelussa on lisäksi otettava huomioon, että Sm4-junia mitattiin huomattavasti enemmän kuin muita junatyyppejä.

Melunmittauksissa mittaustulos kuvaa aina tietyssä paikassa tiettyä aikana vallinnutta melutasoa. Tarkastelupisteessä vallitsevaan melutasoon vaikuttavat äänilähde (esimerkiksi liikenteen koostumus ja junan pyörän sekä kiskojen kunto), maasto ja tarkastelupisteiden sijainti (Ympäristöministeriö 2002). Myös meluesteen vaimennuskyvyille saadaan erilaisia arvoja, jos tarkastelupisteiden sijainteja muutetaan. Tämän tutkimuksen tuloksiin mittauspisteiden valinnalla oli merkittävä vaikutus. Jos mikrofonin korkeus- asemaa tai etäisyyttä melulähteestä olisi muutettu, olisi se vaikuttanut myös mittaustuloksista laskettuihin vaimennuksen arvoihin. Jos meluesteen takana sijainnut mikrofoni olisi sijoitettu esimerkiksi alemmaksi, olisi vaimennukselle saatu suurempia arvoja. Tämän tutkimuksen tuloksien perusteella laskettuja vaimennuksen arvoja voidaan verrata toisen meluesteen vaimennuksen arvoihin vain, jos mittaukset suoritetaan samoissa pisteissä. Lisäksi on otettava huomioon, että tässä tutkimuksessa mittaukset suoritettiin vain yhdenlaiselle matalalle meluesteelle eikä tämän tutkimuksen tuloksia voida yleistää koskemaan muita matalia melusteitä.

Mikrofonien sijainnit oli määritetty standardin SFS-EN ISO 3095 mukaisesti siten, että etäisyydet oli mitattu itäraiteesta. Itä- ja länsiraidetta käyttäneiden junien tuloksien vertailussa on kiinnitettävä huomiota siihen, että mikrofonit sijaitsivat kauempana länsiraideteesta kuin itäraiteesta eivätkä tulokset ole täysin vertailukelpoisia. Itä- ja länsiraidteen korkeusasemat eivät kuitenkaan eronneet toisistaan. Tässä tutkimuksessa haluttiin ensisijaisesti selvittää matalan meluesteen vaikutusta itäraiteella kulkeneiden junien melutasoon ja tästä syystä länsiraidteen tuloksia on tarkasteltu vähemmän.

6 Matalan meluesteen vaimennuskyvyn määrittäminen melunlaskentaohjelmalla

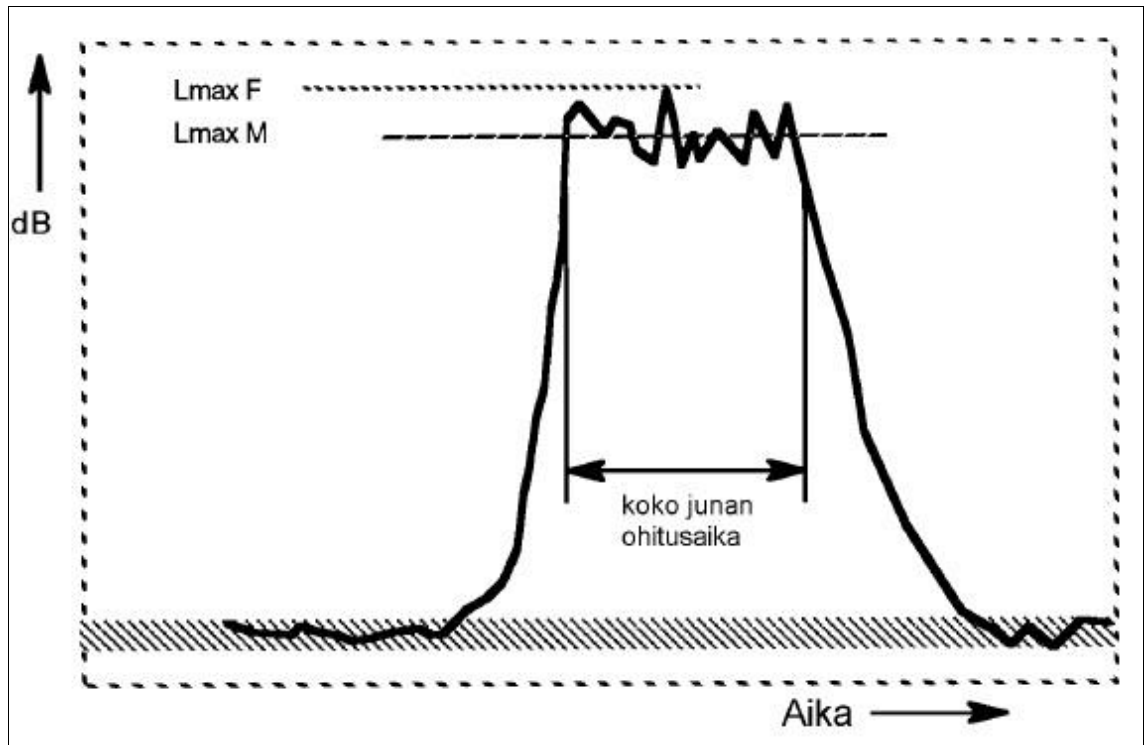
6.1 Melulaskennan tarkoitus ja laskentaohjelma

Melulaskennan tavoitteena oli määrittää matalan meluesteen vaimennuskyky mahdollisimman samanlaisissa oloissa kuin kenttämittauksissa Kytömaalla. Erilaisten muuttujien mallintaminen kenttämittausten oloja ja maastoa vastaaviksi oli tärkeää, koska tutkimuksen tarkoitus oli vertailla kenttämittausten ja melulaskennan tuloksia. Vertailun avulla haluttiin selvittää saadaanko melunlaskentaohjelmalla vaimennukselle samansuuruisia arvoja kuin kenttämittauksissa saatiin. Melunlaskentaohjelmalla mallinnettiin vain matalaa meluestettä lähempi raide eli kenttämittausten itäraide.

Tässä tutkimuksessa käytettäväksi melunlaskentaohjelmaksi valittiin Datakustik CadnaA 4.1, koska se on käytössä useassa suomalaisessa meluselvityksiä tekevässä yrityksessä. CadnaA:lla pystytään mallintamaan teollisuuslaitoksista sekä tie-, lento- ja raide liikenteestä syntyvää melua. Tässä tutkimuksessa käytettiin vain raideliikenteen melua mallintavaa moduulia ja laskentamalliksi valittiin yhteispohjoismainen raideliikenteen laskentamalli.

Suomen Ympäristöministeriö on laatinut raidemelun laskentamallin, joka on Suomen oloihin tehty sovellus yhteispohjoismaisesta raideliikennemelun laskentamallista. Raidemelun laskentamalli sisältää Suomen junakalustoa vastaavat tyyppivakiot, jotka mahdollistavat suomalaisten junatyyppien mallintamisen. Raidemelun laskentamalli tuli voimaan 1.5.2002 ja se on voimassa toistaiseksi. Laskentamallia käytetään melukuormituksen laskemiseen sekä meluntorjuntatoimenpiteiden arviointiin. (Ympäristöministeriö 2002.)

Pohjoismaista raidemelun laskentamallia voidaan käyttää vuorokauden keskiäänitason (L_{eq24}) sekä yksittäisen junan ohiajosta syntyvän enimmäistason L_{max} määrittämiseen. Tässä tutkimuksessa melunlaskentamallin ja kenttämittausten tulosten vertailu perustui junien ohiajoista syntyvien enimmäistasojen vertailuun. Enimmäistaso L_{max} määräytyy sellaisen junatyyppin, junan nopeuden ja junan pituuden yhdistelmän mukaan, joka tuottaa korkeimman ohiajon melutason. Enimmäisäänitaso voidaan laskea melunlaskentamallilla joko junan ohitusajan tehollisarvona (L_{maxM}) tai suurimpana tasona määritettynä aikapainotuksella F (L_{maxF}) (kuva 43). (Nordic council of ministers 1996.) Tässä tutkimuksessa mallinnettiin enimmäistasot L_{maxM} ja laskentamallin antamia tuloksia verrattiin maastomittausten aineistosta laskettuihin junien ohiajojen keskimääräisiin tehollisarvoihin eli keskiäänitasoihin.



Kuva 43. Junan ohiajosta syntyvä hetkellinen äänitaso (Ympäristöministeriö 2002).

Enimmäistasoja määritettäessä pohjoismainen raidemelun laskentamalli mallintaa junan viivalähteenä, jonka pituus on sama kuin junan pituus. Malli jakaa junan perusosiin, joiden pituuden tulee olla vähemmän kuin puolet raiteen ja tarkastelupisteen välisestä etäisyydestä. Laskentamalli käsittelee junan osan pistelähteenä ja kuvaa perusosan aiheuttaman äänitehon perusosan keskipisteeseen sijoitetulla pistelähteellä. Malli antaa pistelähteen korkeudelle arvoja sen mukaan, millä taajuusalueella eri osalähteistä syntyvän melun vaikutus on vallitsevin. Eri pistelähteitä ovat kiskot, pyörät, moottorit, kaarekirskunta, vaunut ja jarrutus. Malli laskee jokaiselle pistelähteelle erikseen äänen etenemisestä raiteesta tarkastelupisteeseen aiheutuvat vaikutukset. Laskentamalli ottaa huomioon etäisyyden, raidekorjauksen, ilman absorption, maanpinnan, kasvillisuuden ja esteiden aiheuttamat vaikutukset.

Laskentamalli olettaa kunkin junan pituuden perusosan tuottavan samansuuruisen äänienergian. Äänen säteily metrin pituista junan osaa kohti saadaan kaavasta

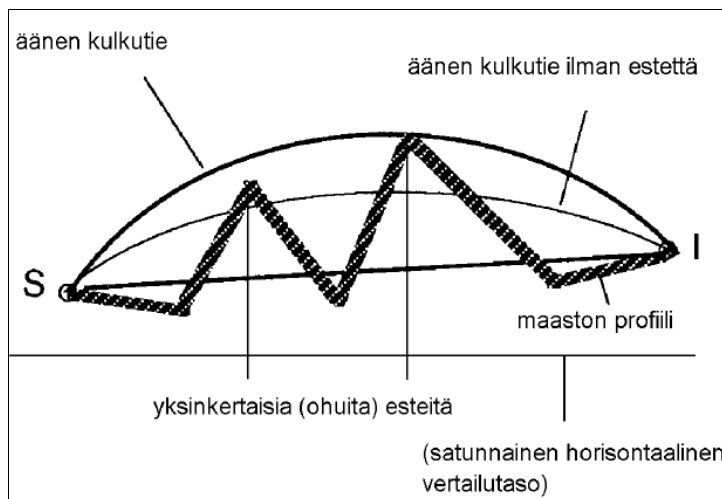
$$L_{1r} = a \lg\left(\frac{r}{100}\right) + 10 \lg(v) + 43,8 + b, \quad (11)$$

jossa a ja b ovat junatyypistä riippuvia vakioita

v junan nopeus (km/h).

Geometrinen leviäminen (ΔL_d) riippuu äänilähteen ja tarkastelupisteen välisestä etäisyydestä. Ilmakehän aiheuttaman absorptioin vaikutus (ΔL_a) kasvaa taajuuden kasvaessa ja on sitä suurempi, mitä pidempi on äänilähteen ja tarkastelupisteen välinen etäisyys. Ilmakehän aiheuttama vaimennus ja etäisyysvaimennus saavat aina negatiivisia arvoja. Raidekorjaukselle (ΔL_c) ohjelman käyttäjä voi itse määrittää arvoja väliltä -6 - 6 dB. Raidekorjauksen arvo riippuu radan kunnosta, junien pyörien pinnoista ja siitä, ovatko raideosat sillalla. Negatiivisen raidekorjauksen käytön tulee perustua hyvin dokumentoituin ja asianmukaisiin kenttämittauksiin.

Estekorjaus (ΔL_s) riippuu esteen sijainnista ja korkeudesta. Kuvassa 44 on havainnollistettu esteiden vaikutusta äänen kulkutiehen (S=lähde, I=tarkastelupiste). Jos melulähteen ja tarkastelupisteen välisen viivan SI leikkaa useampi kuin yksi este, käytetään laskennassa vain suurimman estevaimennuksen antavaa estettä. Esteiden vaikutus kasvaa taajuuden kasvaessa ja laskennassa oletetaan esteen pituuden olevan suurempi kuin esteen korkeuden. Maakorjaus (ΔL_g) riippuu maanpinnan tyypistä ja maatekijästä, jolle ohjelman käyttäjä voi syöttää arvoja sen mukaan, onko maanpinta akustisesti kovaa vai huokoista. Jos tarkastelupiste sijaitsee rakennuksen läheisyydessä, vaikuttaa suoraan äänilähteestä saapuvan äänen lisäksi myös rakennuksen julkisivusta heijastunut ääni tarkastelupisteen äänitasoon. Heijastavien pintojen vaikutus (ΔL_r) riippuu tarkastelupisteen ja heijastavan pinnan välisestä etäisyydestä.



Kuva 44. Esteiden vaikutus äänen kulkutiehen (Ympäristöministeriö 2002).

Malli yhdistää edellä esitetyn tekijöiden vaikutukset äänen etenemiseen ja tekee laskennat erikseen jokaiselle seitsemälle oktaavikaistalle taajuusalueella 63 Hz – 4 000 Hz. Lopuksi jokaisen lähde-elementin vaikutukset yhdistetään kullakin oktaavikaistalla, minkä jälkeen malli voi määrittää A-painotettu enimmäistason. (Ympäristöministeriö 2002. Nordic council of ministers 1996.)

6.2 Mallinnus

Ennen enimmäistasojen laskentaa ohjelman muuttujille annettiin erilaisia arvoja, jotta mallinnustilanne vastaisi mahdollisimman hyvin kenttämittausoloja Kytömaalla. Käsin syötettyjen muuttujien arvot kuvasivat junan, meluesteen ja maaston ominaisuuksia. Lisäksi määritettiin tarkastelupisteiden sijainnit, joissa enimmäistasoja tarkasteltiin. Melunlaskenta tehtiin erikseen jokaiselle kenttämittauksissa mitatulle junan ohiajolle.

Mallinnus aloitettiin määrittämällä Suomessa käytössä olevien junien tyypit, koska CadnaA:n valmiit junatyypit eivät sellaisinaan vastaa Suomen junakalustoa. Melulaskentojen varten voidaan Suomessa käytössä olevat henkilöliikenteen junat jakaa viiteen ryhmään ja tavaraliikenteen junat kahteen ryhmään. Kuhunkin ryhmään kuuluvien junien melupäästöjen voidaan olettaa olevan samanlaisia. Henkilöliikenteen junista ensimmäisen ryhmän muodostavat Sm1- ja Sm2 tyyppiset sähkömoottorijunat, toinen ryhmä koostuu Sm4-tyyppisistä sähkömoottorijunista, kolmas ryhmä koostuu Sr1- tai Sr2-veturin vetämistä pikajunista ja paikallisliikenteen junista, neljännen ryhmän muodostavat Sr2-veturin vetämät kaksikerroksiset IC-vaunuista koostuvat junat ja viidennen ryhmän muodostavat Pendolinot. Tavaraliikenteen junat jaetaan kahteen ryhmään: suomalaisista vaunuista koostuvat tavarajunat muodostavat yhden ryhmän (F-TaJu) ja venäläisistä tavaravaunuista koostuvat junat toisen ryhmän (R-TaJu). (Ympäristöministeriö 2002).

Yhteispohjoismaisessa raideliikennemelun laskentamallissa junan meluemissiota kuvaa ns. lähtöarvo, joka perustuu Norjassa ja Tanskassa suoritettuihin melumittauksiin. Lähtöarvo ei ota huomioon esimerkiksi ilmakehän tai ympäröivän maaston vaikutusta. Junan melupäästöön vaikuttaa kuitenkin junatyypin ominaisuudet, jonka takia erimaiden junatyypeille on käytettävä junatyypikohtaisia korjauksia. Suomessa tehtyjen melumittausten perusteella on määritetty junatyypikorjaukset yleisimmille Suomessa käytössä oleville junatyypeille ja ne on normalisoitu laskentamallin lähtöarvoa vastaaviksi. (Eurasto 1995a.) Junatyypikorjauksesta käytetään myös nimitystä junatyypivakio. Suomalaisen junien junatyypivakiot on esitelty taulukossa 15. (Ympäristöministeriö 2002).

Taulukko 15. Junatyypikorjaukset a ja b suomalaisille junille.

Junatyyppi	Sm 1/2		Sr		Pen		F-TaJu		R-Taju		Sm4		IC2	
	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
Vakio Taajuus (Hz)														
63	-3	30	4	29	15	28	-4	36	-1	39	0	26	23	28
125	1	28	6	29	16	27	-27	35	18	45	0	27	5	28
250	-3	32	11	32	-14	35	-12	39	9	46	-12	28	2	31
500	13	35	22	36	-6	33	30	46	17	48	11	34	-3	35
1000	23	35	27	36	15	31	40	43	30	47	36	37	11	34
2000	21	32	27	35	29	32	21	37	29	45	20	31	37	34
4000	20	27	24	29	21	29	18	33	21	39	22	24	22	25

Suomalaiset junatyypit määritettiin mallinnohjelmaan raidemelun laskentamallin mukaisesti vakioiden a ja b avulla. Tarkasteltavat junatyypit olivat Sm1- ja Sm2-tyyppiset sähkömoottorijunat, Sm4-sähkömoottorijunat, neljän vaunun InterCity-junat sekä Pendolino. Laskennassa otettiin huomioon vain neljän vaunun InterCity-junat, koska jos vaunujen määrä junayksikössä oli suurempi kuin neljä, mukana oli myös yksikerroksisia junavaunuja. Junatyyppivakiot on määritetty vain kaksikerroksisille InterCity-junille. Jokaisella laskentakerralla määritettiin erikseen junan nopeus ja pituus. Junan nopeudeksi syötettiin kenttämittauksissa tutkalla mitattu nopeus. Kenttämittauksissa kirjattiin ylös jokaisen ohiajaneen junan vaunujen lukumäärä ja taulukon 16 avulla laskettiin junan pituus, joka syötettiin ohjelmaan. InterCity-juniin kuului vaunujen lisäksi Sr2-veturi, jonka pituus oli 18,7 metriä.

Taulukko 16. Junatyyppien vaunujen pituudet. (www.vr.fi, www.transtech.fi)

Junatyyppi	Vaunun pituus
Sm4	27,4 m
Sm1/2	26,6 m
Pendolino	26,0 m
InterCity	26,4 m

Alueen maasto mallinnettiin maaston korkotasojen perusteella. Mallinnuksen nollatasoksi valittiin Kytömaantien vieressä ollut pelto, koska se oli alin maastonkohta. Kytömaantie mallinnettiin metrin korkuiselle penkereelle. Rata mallinnettiin penkereelle, jonka korkeus 2,5 metriä. Maasto Kytömaalla oli hyvin tasaista. CadnaA:ssa maanpinnan tyyppiä kuvataan maatekijän avulla. Mittauspaikalla maanpinta oli kasvillisuuden kasvualustaksi sopivaa eli akustisesti huokoista. Raidemelun laskentamallin mukaan

huokoisen maanpinnan tyyppiä kuvaava maatekijä G saa arvon yksi. Raidekorjauksen arvoksi määritettiin nolla, koska kenttämittauspaikan radan kunnon oletettiin olevan tyyppillinen verrattuna muualla Suomessa oleviin ratoihin. Kiskot olivat myös yhteenhit-satut ja ne oli kiinnitetty betonipölkkyihin.

Meluesteen sijainti ja korkeus määritettiin vastaamaan tilannetta kenttämittauskohteessa Kytömaalla. Meluste sijaitsi 2 m päässä lähimmän raiteen keskilinjasta ja sen korkeus oli 85 cm kiskojen tasosta. Lisäksi meluesteen absorptiokyky määritettiin vastamaan kenttämittauksissa käytetyn meluesteen ominaisuuksia.

Melunlaskentaohjelman käyttäjä voi itse määrittää pisteet, joissa melutasoja tarkastel-laan. Tässä tutkimuksessa tarkastelupisteet sijoitettiin samoille paikoille kuin mikrofonit olivat kenttätutkimuksessa, koska tarkastelupisteen sijainti vaikuttaa pisteestä mitattuun äänitasoon. Äänitason lisäksi tarkastelupisteiden valinnalla oli vaikutusta myös lasket-tuun vaimennuksen arvoon. Tulosten käsittelyssä meluesteen takana olleisiin tarkastelu-pisteisiin on viitattu lyhenteillä A1 sekä A2 ja meluesteen ulkopuolella olleisiin tarkas-telupisteisiin lyhenteillä B1 ja B2 (taulukko 17).

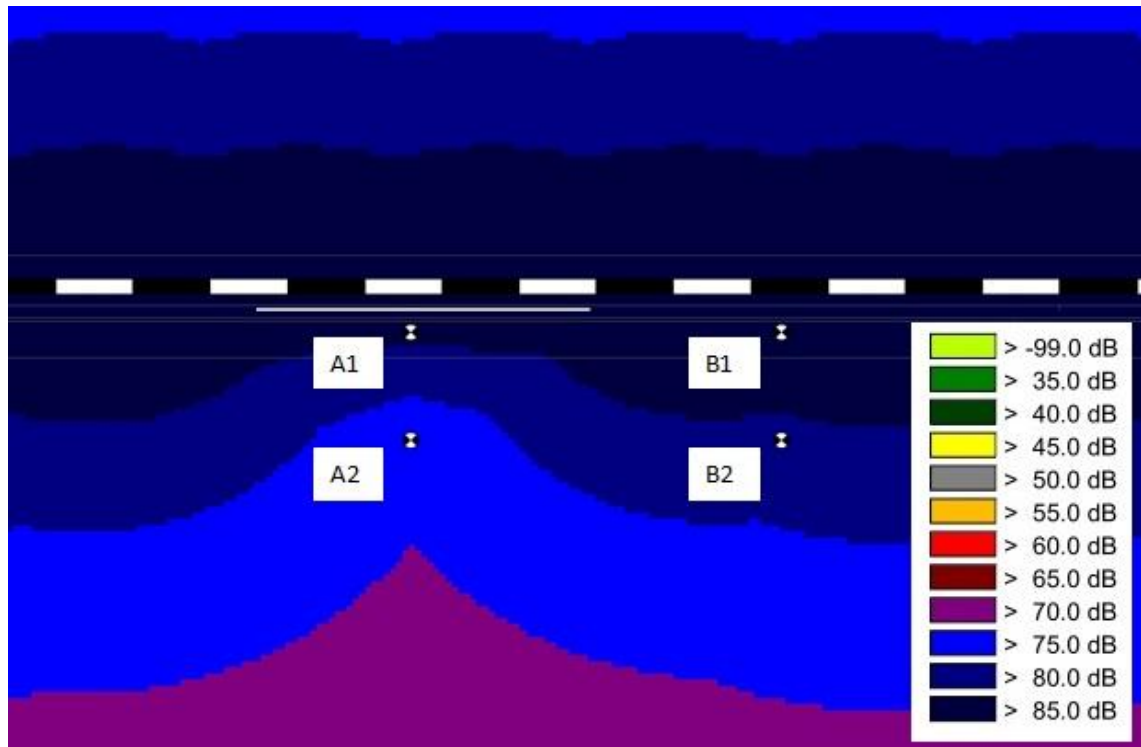
Taulukko 17. Tarkastelupisteiden sijainnit.

Tarkastelupiste	Etäisyys raiteen keskilin-jasta (m)	Korkeus kiskon se-lästä (m)
A1 (meluesteen kohdalla)	7,5	1,2
A2 (meluesteen kohdalla)	25	3,5
B1 (meluesteen ulkopuolella)	7,5	1,2
B2 (meluesteen ulkopuolella)	25	3,5

6.3 Tulokset

Laskentaohjelman tulokset olivat A-painotettuja äänitasoja, jotka perustuivat oktaavi-kaistoittain tehtyihin laskelmiin. Melunlaskentaohjelman tulokset koostuivat junien ohiajojen enimmäistasojen tehollisarvoista $L_{\max M}$ eri tarkastelupisteissä. Matalan meluesteen vaimennuskykyä arvioitiin laskemalla samalla etäisyydellä olleiden tarkastelu-pisteiden tehollisarvojen erotus. Tarkastelupisteiden sijainteja ja matalan meluesteen vaikutusta melun leviämiseen on havainnollistettu kuvassa 45. Melunlaskentaohjelmalla saadut tulokset tarkastelupisteissä A1 ja B1 (7,5 metriä raiteen keskilinjasta) on esitelty liitteen E taulukossa 1 ja tulokset pisteissä A2 ja B2 (25 metriä raiteen keskilinjasta) on esitelty liitteen E taulukossa 2. Koska mallinnettu meluste vastasi ominaisuuksiltaan

vain kenttämittauksissa käytettyä meluestettä, eivät tämän tutkimuksen tulokset päde muille matalille melusteille.



Kuva 45. Tarkastelupisteet ja matalan meluesteen vaikutus äänen leviämiseen.

Jos melunlaskentaohjelmalla saatuja junien ohiajojen keskiäänitasoja meluesteen ulkopuolella verrataan vastaaviin kenttämittauksien keskiäänitasoihin, huomataan melunlaskentaohjelman antavan suurempia arvoja. Tämä johtuu siitä, ettei laskentaohjelmalla pystytty mallintamaan kiskonvaimentimia. Lisäksi on otettava huomioon melunlaskentaohjelman tarkkuus. Laskentamallin tulosten perusteella keskiäänitasot kasvoivat aina nopeuden kasvaessa. Myös junatyypillä oli vaikutusta melutasoon. Esimerkiksi 110 km/h nopeudella neljän vaunun Sm1/2-junan aiheuttama melutaso tarkastelupisteessä B1 on 88,6 dB, Sm4-junan 89,3 dB ja InterCity-junan 88,8 dB.

Kun verrattiin eri junatyypin melunlaskentaohjelmalla ja kenttämittauksissa saatuja melutasoja tarkastelupisteissä, jotka eivät olleet meluesteen takana, huomattiin Sm4-junien keskiäänitasojen eroavan toisistaan eniten. Tämä voidaan selittää sillä, että junatyypin a ja b vakioiden määrittämisessä junien päästömittauksia on tehty vain tietyillä nopeuksilla ja melunlaskentamallia tulisi käyttää vain tällä nopeusalueella (Ympäristöministeriö 2002). Junatyypin nopeusalueet on esitetty taulukossa 18. Kun verrattiin mitattujen Sm4-junien nopeuksia taulukon arvoihin, huomattiin, että suurin osa ylittää nopeusrajan 115 km/h. Tulosten perusteella melunlaskentamalli antoi liian suuria arvoja nopeusrajan ylittävien Sm4-junien melupäästöille.

Taulukko 18. Junatyypin nopeusalueet raidemelun laskentamallissa (Ympäristöministeriö 2002).

Junatyyppi	Nopeusalue (km/h)
Sm1/2	20-135
Sm4	35-115
IC2	60-150
Pendolino	60-185
Sr	35-165
F-TaJu	45-105
R-TaJu	40-100

Taulukoissa 19 ja 20 on vertailtu kenttämittausten ja laskentaohjelman perusteella laskettuja vaimennuksen arvoja junatyypin ja vaunujen lukumäärien mukaan luokiteltuna. Vaimennus on laskettu kenttämittausten ja melunlaskentamallin tulosten aritmeettisena keskiarvona jokaiselle junatyypille ja vaunujen lukumäärälle erikseen.

Taulukko 19. Matalalla melusteella saavutettu vaimennus 1,2 metriä kiskon selän yläpuolella ja 7,5 metrin päässä raiteen keskilinjasta.

Juna	Vaunuja	Mitattujen ohiajojen määrä	Vaimennuksen keskiarvo (dB)	
			Kenttämittaus	Laskentamalli
Sm4	2	11	12,1	5,5
Sm4	4	23	12,3	5,0
Sm1/2	2	2	10,2	5,3
Sm1/2	4	2	10,5	4,8
InterCity2	4	4	10,2	4,4
Pendolino	6	3	8,6	4,0
Pendolino	12	3	7,9	3,8

Taulukko 20. Matalalla melusteella saavutettu vaimennus 3,5 metriä kiskon selän yläpuolella ja 25 metrin päässä raiteen keskilinjasta.

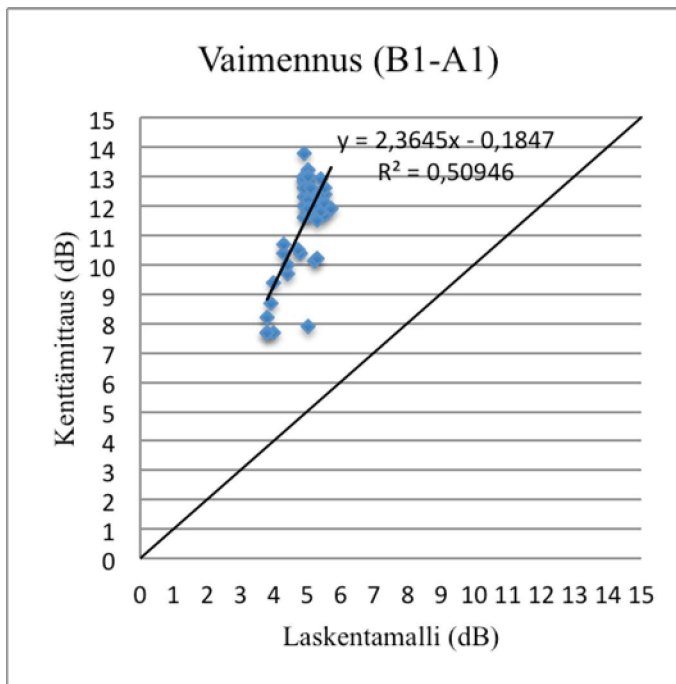
Juna	Vaunuja	Mitattujen ohiajojen määrä	Vaimennuksen keskiarvo (dB)	
			Kenttämittaus	Laskentamalli
Sm4	2	6	8,4	4,7
Sm4	4	17	8,7	3,3
Sm1/2	2	1	8,4	4,2
Sm1/2	4	2	7,2	3,2
InterCity2	4	4	7,8	2,9
Pendolino	6	3	5,4	2,4
Pendolino	12	1	5,2	2,0

Taulukoissa 19 ja 20 esitettyjen vaimennusten keskiarvojen perusteella laskentamallilla ja kenttämittauksissa saadut vaimennuksen arvot erosivat toisistaan. Lähemmässä tarkastelupisteessä kenttämittausten perusteella matalalla melusteella saavutettiin noin 8-12 dB:n vaimennus ja melunlaskentamallin tulosten perusteella vaimennus oli noin puolet pienempi eli noin 4-5,5 dB. Kauemmassa mittauspisteessä kenttämittausten perusteella vaimennus oli noin 5,5-8 dB ja laskentaohjelman perusteella noin 2,5-4,7 dB. Maastomittausten tuloksissa oli enemmän eroa eri junatyyppeiden välillä kuin laskentamallin tuloksissa. Myös vaimennuksen arvoissa oli suurempi hajonta maastomittausten tuloksissa. Tulosten perusteella matalan melusteiden vaimennuskyky oli sitä parempi, mitä lyhyempi juna oli kyseessä. Tämä voidaan selittää sillä, että tarkasteltava meluste oli 60 metriä pitkä ja esimerkiksi 12-vaunun Pendolino-junan pituus oli 318 metriä. Pidempien junien tapauksissa ääni pääsi leviämään melusteiden päistä tarkastelupisteeseen ja siksi vaimennuksen arvot jäivät alhaisemmiksi. Melunlaskentamallin tulosten perusteella voidaan todeta, että 60 metriä pitkän esteen vaimennus laskee lähemmissä tarkastelupisteissä, jos junissa oli enemmän kuin neljä vaunua. Kauemmissa tarkastelupisteissä vaimennuksen arvo laskee, jos juna ei mahtunut kerralla esteen taakse, eli siinä oli yli 2 vaunua.

Kauempien tarkastelupisteiden perusteella lasketut vaimennuksen arvot olivat alhaisempia kuin lähempien tarkastelupisteiden perusteella lasketut vaimennuksen arvot. Melusteiden takana olleeseen kauempaan tarkastelupisteeseen ääni pääsi leviämään paremmin, koska se oli korkeammalla. Lisäksi tarkastelupiste sijaitsi kauempana melulähteestä, joten ääni pääsi leviämään myös esteen ulkopuolelta tarkastelupisteeseen. Vaimennuksen arvot laskivatkin jo neljän vaunun tapauksissa, vaikka lähemmän tarkastelupisteiden perusteella kahden ja neljän vaunun junilla saavutettiin lähes samat vaimennuksen arvot.

Tarkastelupisteiden sijaintien vaikutusta melunlaskentaohjelmalla saatuihin vaimennuksen arvoihin tutkittiin muuttamalla tarkastelupisteiden korkeutta. Kun lähemmät tarkastelupisteet sijoitettiin matalan meluesteen reunan tasolle, saavutettiin kahden vaunun Sm4- ja Sm1/2-junilla noin 6,8 dB:n vaimennus. Jos tarkastelupiste sijoitettiin 20 cm esteen yläreunan alapuolelle, oli vaimennus noin 7,5 dB. Jos tarkastelupiste sijaitsi esteen puolivälissä eli 40 cm yläreunan alapuolella, oli vaimennus noin 8 dB. Jos näitä arvoja verrataan maastomittausten tuloksiin, joissa tarkastelupiste sijaitsi 35 cm esteen yläpuolella, ovat melunlaskentamallilla saadut vaimennuksen arvot siltikin alhaisempia.

Melunlaskentamallin ja maastomittausten tulosten korrelaatiota tutkittiin regressioanalyysin avulla. Oletuksena oli, että maastomittausten ja laskentamallin tulokset olisivat lineaarisesti korreloituneita. Regressioanalyysin avulla haluttiin tutkia pystyttäisiinkö laskentaohjelman tulosten perusteella selittämään kenttämittausten tuloksia. Regressioanalyysissä otettiin huomioon kaikkien junien ohiajot ja analyysi tehtiin erikseen eri etäisyyksillä sijainneille tarkastelupisteille. Kuvassa 46 on esitetty regressioanalyysi, joka on tehty tarkastelupisteiden A1 ja B1 tulosten perusteella. Tarkastelupisteiden A2 ja B2 tulosten perusteella tehty regressioanalyysi on esitetty kuvassa 47. Kuvien x-akselien arvo on laskentamallilla saatu vaimennus ja y-akselin arvo on kenttämittausten saatu vaimennuksen arvo.



Kuva 46. Regressioanalyysi matalan meluesteen vaimennuskyvystä 7,5 metrin etäisyydellä raiteen keskilinjasta.



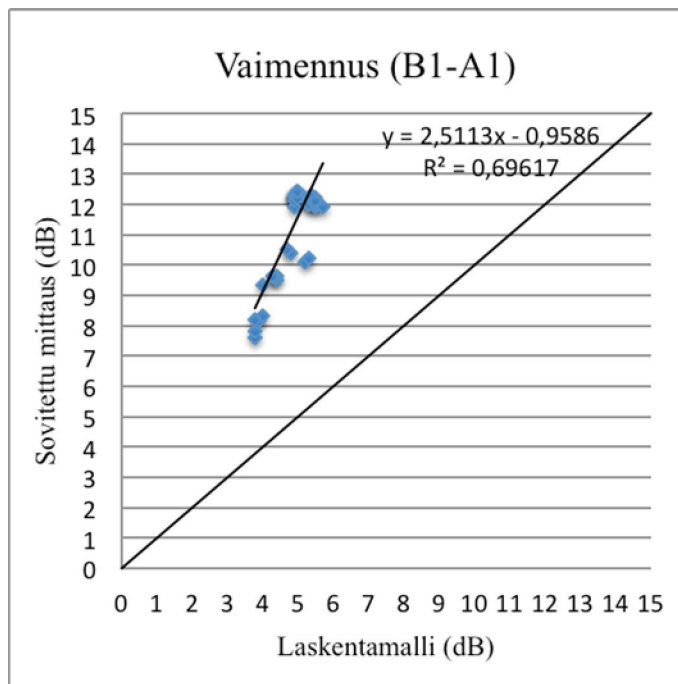
Kuva 47. Regressioanalyysi matalan meluesteen vaimennuskyvystä 25 metrin etäisyydellä raiteen keskilinjasta.

Tarkastelupisteiden A1 ja B1 tulosten perusteella tehdyn regressiomallin selitysaste oli kohtalainen (51 %). Tarkastelupisteiden B2 ja A2 tulosten pohjalta tehdyn mallin selitysaste oli taas selvästi heikompi (28 %). Kun etäisyys tarkastelupisteiden ja melulähteen välillä kasvoi, heikkeni myös maastosta mitattujen tulosten tarkkuus. Lisäksi säätilamuuttujat vaikuttivat enemmän kauempänä olleiden mittauspisteiden tulosten tarkkuuteen ja siksi kauempien mittauspisteiden tuloksista tehdyn regressiomallin selitysaste oli alhaisempi.

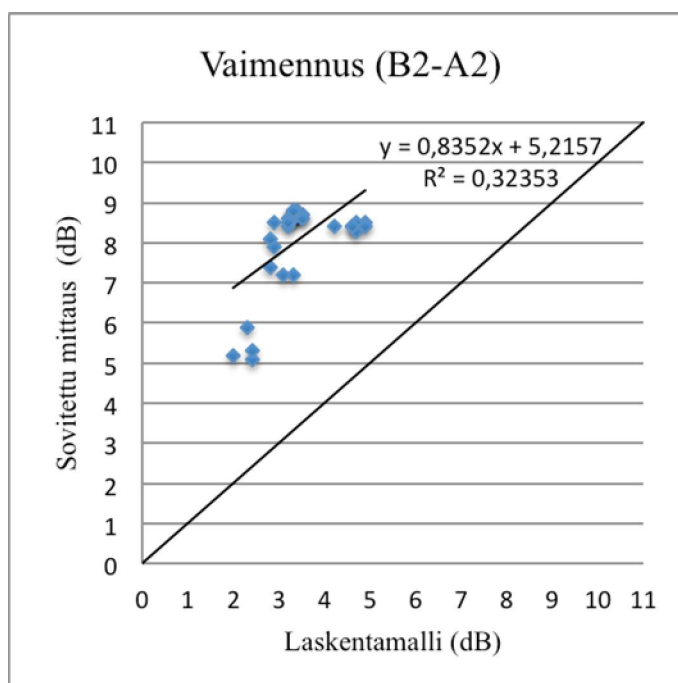
Maastomittausten tuloksiin vaikuttivat yksittäisten junien ominaisuudet ja mittaushetkellä vallinneet sääolot. Näiden yksittäisten muuttujien vaikutusta vaimennuksen arvoihin pyrittiin vähentämään tekemällä maastomittausten keskiäänitasoista lineaariset regressiomallit nopeuden funktiona junatyypeittäin. Regressiomallit on esitetty liitteen D kuvissa 1-9. Regressioanalyysin kuvaajista poimittiin regressiosuorien yhtälöt molemmilta mikrofoneilta ja yhtälöiden avulla määritettiin jokaisen junan ohiajon keskiäänitaso mitattua ohiajoa vastaavalla nopeudella. Vaimennus laskettiin regressioanalyysillä saatujen keskiäänitasojen erotuksena.

Kuvissa 48 ja 49 on esitetty regressioanalyysit, joissa selitettävä muuttuja on keskiäänitasojen regressiomallista laskettu vaimennus eli sovitetun mittauksen tulos. Selittäjänä muuttujana on käytetty edelleen melunlaskentaohjelmalla saatua vaimennuksen arvoa. Regressiomallien selitysasteet nousivat molempien tarkasteluetäisyyksien kohdalla, kun kenttämittausten vaimennuksen arvona käytettiin sovitetun mittauksen arvoa.

Mallin selitysaste oli hyvä (70 %) lähempien tarkastelupisteiden mallissa ja välttävä (32 %) kauempien tarkastelupisteiden mallissa.



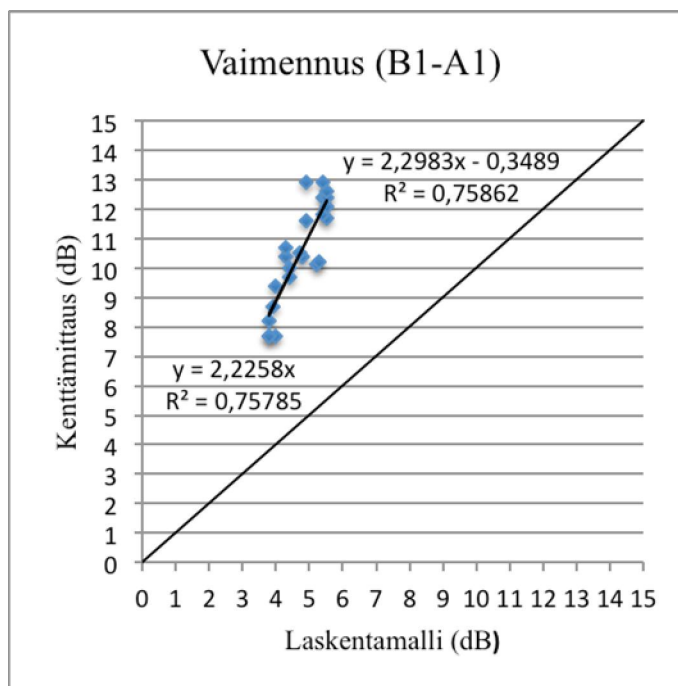
Kuva 48. Regressioanalyysi matalan meluesteen vaimennuskyvystä 7,5 metrin etäisyydellä raiteen keskilinjasta. Selitettävänä muuttujana on käytetty keskiäänitasojen regressiomallista laskettua vaimennusta.



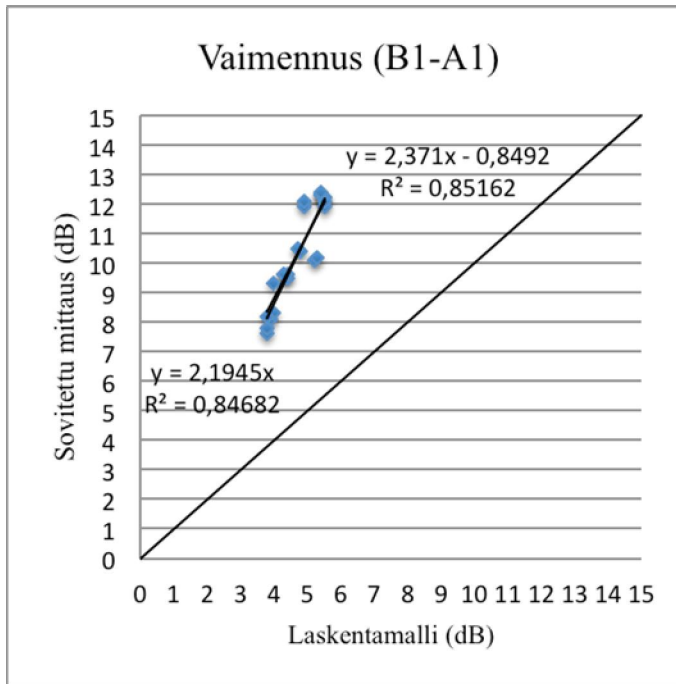
Kuva 49. Regressioanalyysi matalan meluesteen vaimennuskyvystä 25 metrin etäisyydellä raiteen keskilinjasta. Selitettävänä muuttujana on käytetty keskiäänitasojen regressiomallista laskettua vaimennusta.

Vaimennuksen arvot olivat alhaisimpia Pendolinojen keskiäänitasojen perusteella laskettuina, koska Pendolinot olivat tarkastelluista junista muita pidempiä. Jos kenttämittausten ja melunlaskentamallin vaimennuksien regressiomalleista jätetään Pendolinot pois, huononevat regressiomallien selitysasteet. Tämä johtuu siitä, että melunlaskentamallilla saadut vaimennuksen arvot erosivat vain vähän tosistaan, jos tarkasteluissa junissa oli vaunuja neljä tai vähemmän.

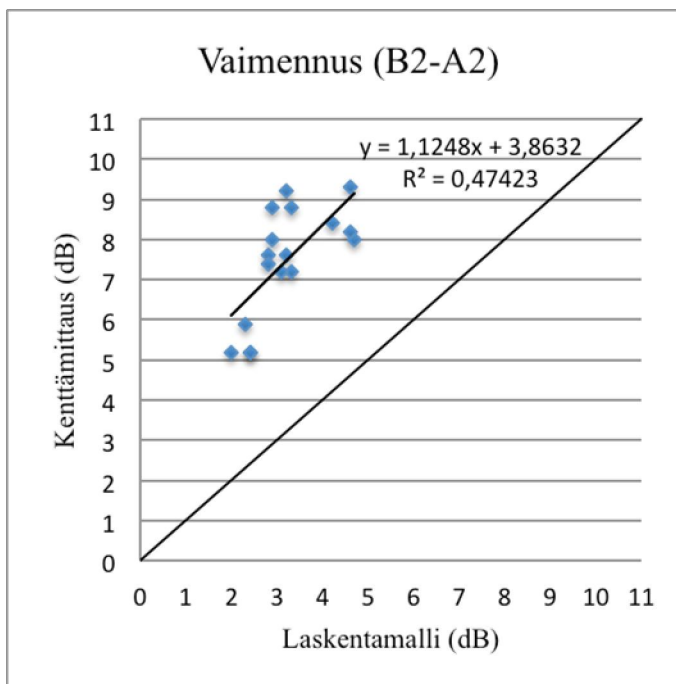
Melunlaskentamallia tulisi käyttää vain tietyillä junatyypikohtaisilla nopeusalueilla, koska vakioiden a ja b määrittämiseksi tehtyjä melupäästömittauksia on tehty vain tietyillä nopeusalueilla. Kenttämittauskohteessa Sm4-junien nopeudet ylittivät usein nopeusrajan 115 km/h. Kenttämittausten ja melunlaskentamallin tuloksia tarkasteltiin myös niin, että tuloksista poistettiin sellaisten junien ohiajot, joiden nopeus ei ollut junatyypikohtaisella nopeusalueella. Tuloksista tehtiin uudet regressioanalyysit, jotka on esitetty lähempien tarkastelupisteiden osalta kuvissa 50 ja 51 sekä kauempien tarkastelupisteiden osalta kuvissa 52 ja 53.



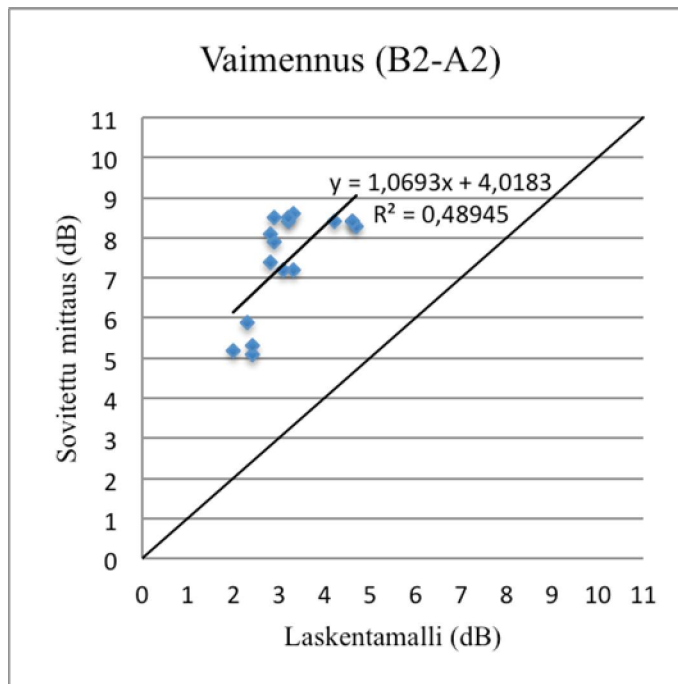
Kuva 50. Regressioanalyysi matalan meluesteen vaimennuskyvystä 7,5 metrin etäisyydellä raiteen keskilinjasta. Tuloksista poistettu ohiajot, joiden nopeus ylitti junatyypikohtaisen nopeusalueen.



Kuva 51. Regressioanalyysi matalan meluesteen vaimennuskyvystä 7,5 metrin etäisyydellä raiteen keskilinjasta. Tuloksista poistettu ohiajojot, joiden nopeus ylitti junatyypikohtaisen nopeusalueen. Selitettävänä muuttujana on käytetty keskiäänitasojen regressiomallista laskettua vaimennusta.



Kuva 52. Regressioanalyysi matalan meluesteen vaimennuskyvystä 25 metrin etäisyydellä raiteen keskilinjasta. Tuloksista poistettu ohiajojot, joiden nopeus ylitti junatyypikohtaisen nopeusalueen.



Kuva 53. Regressioanalyysi matalan meluesteen vaimennuskyvystä 25 metrin etäisyydellä raiteen keskilinjasta. Tuloksista poistettu ohiajoj, joiden nopeus ylitti junatyypikohtaisen nopeusalueen. Selitettävänä muuttujana on käytetty keskiäänitasojen regressiomallista laskettua vaimennusta.

Regressiomallien (kuvat 50-53) selitysasteet nousivat, kun tuloksista poistettiin ne ohiajoj, joiden nopeus ylitti junatyypikohtaisen nopeusalueen. Kaikissa tapauksissa mallien selitysasteet olivat korkeampia, kun kenttämittausten vaimennuksena käytettiin keskiäänitasojen regressioanalyysien pohjalta laskettuja vaimennuksen arvoja. Jos verrataan lähempien ja kauempien tarkastelupisteiden regressiomalleja, huomataan selvä ero mallien regressiosuorien yhtälöissä. Lähempien tarkastelupisteiden perusteella laskentamallilla saatu arvo tulisi kertoa luvulla 2,2, jotta saataisiin kenttämittauksen tulosta vastaava arvo. Kauempien tarkastelupisteiden perusteella taas ohjelman tulokseen tulisi lisätä noin 4 dB, jotta saataisiin kenttämittauksen tulosta vastaava arvo. Kauempien tarkastelupisteiden tuloksista tehtyjen regressiomallien selitysasteet jäivät kuitenkin alhaisiksi (alle 50 %), vaikka tuloksista poistettiin ohiajoj, joiden nopeus oli liian korkea. Koska kauempien tarkastelupisteiden perusteella tehtyjen mallien selitysasteet jäivät alhaisiksi, ei melunlaskentamallilla saatujen tulosten perusteella pystytty luotettavasti selittämään kenttämittauksissa saatuja vaimennuksen arvoja.

Nopeusalueen ylittävien ohiajojien poistaminen nosti lähimpien tarkastelupisteiden perusteella tehtyjen regressiomallien selitysasteet erittäin hyväksi. Kun regressioanalyysi tehtiin melunlaskentamallin ja kenttämittausten tuloksista, oli mallin selitysaste 76 % (kuva 50). Malliin sovitettiin origon leikkaava regressiosuora ja mallin selitysaste säilyi erittäin hyvänä. Kun kenttämittausten vaimennuksena käytettiin keskiäänitasojen regressioanalyysien pohjalta laskettuja vaimennuksen arvoja, oli mallin selitysaste erittäin hyvä (85 %) (kuva 51). Myös tähän malliin sovitettiin origon leikkaava regressiosuora

ja mallin selityskaste säilyi erittäin hyvänä. Kuvien 50 ja 51 regressioanalyysien perusteella tässä tutkimuksessa käytetyn 60 metriä pitkän matalan meluesteen vaimennusta voidaan suuntaa antavasti arvioida 7,5 metrin etäisyydellä raiteen keskilinjasta ja 1,2 metrin korkeudella kiskon selästä yhtälöllä

$$y = 2,2x, \quad (12)$$

jossa y on todellinen vaimennuksen arvo (dB)

x CadnaA-melunlaskentaohjelman antama vaimennuksen arvo (dB).

6.4 Melunlaskentamallin luotettavuus

Junan ohiajosta syntyvä melutaso riippuu aina monista eri tekijöistä, kuten junan ja kiskon ominaisuuksista sekä vallitsevista oloista mittauspaiikalla. Laskentamalli on aina vain yksinkertaistettu mallinnus todellisuudesta, eikä sillä voida ottaa huomioon kaikkia melun syntyyn ja leviämiseen vaikuttavia tekijöitä. Merkittävin puute melunlaskentamallissa on se, ettei se pysty ottamaan huomioon säätilan vaihtelun vaikutusta melun leviämiseen. Mallin tarkkuus enimmäistasojen ($L_{\max M}$) mallinnuksessa on arvioitu olevan noin ± 3 dB (Ympäristöministeriö 2002). On myös syytä muistaa, että todellisuudessa samaan junatyyppiin kuuluvien junien ohiajojen aiheuttamissa äänitasoissa voi olla huomattavia eroja. Erot johtuvat esimerkiksi junan pyörien ja kiskojen kunnosta. Samaan junatyyppiin kuuluvien junien ohiajojen aiheuttamassa normalisoiduissa melutasossa voi olla eroa ± 5 dB (Ympäristöministeriö 2002).

Jos raidekorjauksen arvo olisi poikennut nolasta, olisi sen vaikuttanut laskennassa saatuun enimmäistason arvoon. Myös maatekijä vaikutti enimmäistasojen arvoihin: jos maatekijälle olisi annettu arvo nolla, olisivat enimmäistasot olleet noin 4 dB suuremmat. Raidekorjaus ja maatekijä eivät kuitenkaan vaikuttaneet tuloksista laskettuihin vaimennuksen arvoihin.

Melunlaskentaohjelmalla ei pystytty mallintamaan mittauspaiikalla olleita kiskonvaimentimia. Siksi melunlaskentaohjelmalla saadut keskiäänitasojen arvot olivat suurempia kuin kenttämittauksissa saadut arvot.

7 Yhteenveto, päätelmät, suositukset

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, miten pohjoismaiseen raidemelun laskentamalliin pohjautuva melunlaskentaohjelma soveltuu matalan meluesteen vaimennuskäytön arviointiin. Tutkimus suoritettiin tekemällä kenttämittauksia ja mallintamalla sama meluste CadnaA-melunlaskentaohjelmalla. Tutkimuksessa tehdyt päätelmät perustuvat kenttämittausten ja melunlaskentaohjelman tulosten vertailuun. Lisäksi tämän tutkimuksen kirjallisuusosiossa perehdyttiin tarkemmin ääniaaltojen käyttäytymiseen sekä raideliikenteestä syntyvän melun ominaisuuksiin ja vaikutuksiin.

Kenttämittaukset toteutettiin kesän 2011 aikana pääradan varrella Tuusulan Kytömaalla, jossa oli matalan meluesteen koerakenne. Meluste oli rakennettu vain testikäyttöön ja sen sijainti oli valittu niin, että taustamelu kohteessa oli mahdollisimman vähäistä. Koerakenteen pituus oli 60 metriä ja korkeus kiskoja tasosta 0,85 metriä. Kenttämittauksessa mitattiin junien ohiajoista syntyviä melutasoja kahdessa eri tarkastelupisteessä siten, että toinen tarkastelupiste sijaitsi meluesteen takana ja toinen ulkopuolella. Tarkastelupisteet sijaitsivat aluksi 7,5 metrin etäisyydellä lähemmän raiteen keskilinjasta ja myöhemmin tarkastelupisteet siirrettiin 25 metrin etäisyydelle. Kauemmissa tarkastelupisteissä mikrofonit sijaitsivat korkeammalla kuin lähemmissä tarkastelupisteissä. Mittausaineistosta poimittiin molemmilta mikrofoneilta ohiajojen enimmäistasot sekä laskettiin keskiäänitaso. Keskiäänitasojen laskennassa tarkastelujakson pituutena käytettiin junan ohiajoon kulunutta aikaa. Meluesteen vaimennus laskettiin tarkastelupisteiden äänitasojen erotuksena.

Kun mikrofonit sijaitsivat 7,5 metrin etäisyydellä raiteen keskilinjasta ja 1,2 metrin korkeudella kiskon selästä, oli vaimennus noin 8-12 dB. Kun tarkastelupisteet sijaitsivat kauempana (25 metriä raiteen keskilinjasta, 3,5 metriä kiskon selän yläpuolella), saatiin noin 5,5-8,5 dB vaimennus. Matala meluste vaimensi melutasoja merkittävästi, koska ihminen havaitsee yli 5 dB muutokset selvästi. Jos melutason lasku on noin 8-10 dB, ihminen kokee melun puolittuvan. Kauempien tarkastelupisteiden tuloksista lasketut vaimennuksen arvot olivat alhaisempia, koska tarkastelupisteet sijaitsivat korkeammalla. Silloin ääni pääsi leviämään paremmin matalan meluesteen takana olleisiin tarkastelupisteisiin. Lisäksi meluesteen päistä levinnyt ääni vaikutti enemmän, kun tarkastelupiste sijaitsi kauempana melusteesta. Tulosten perusteella meluesteen on oltava sitä pidempi, mitä kauempana suojattavat kohteet sijaitsevat melulähteestä.

Kun verrattiin vaimennuksen arvoja eri junatyyppeiden välillä, olivat Pendolinojen keskiäänitasoista lasketut vaimennukset alhaisimpia. Meluste oli 60 metriä pitkä ja pisimpien junien kohdalla meluesteen päistä levinnyt ääni vaikutti meluesteen takana olleiden tarkastelupisteiden äänitasoihin. Mitatuista junatyypeistä Pendolinot olivat pisimpiä.

Luotettavimmat tulokset syntyivät siis lyhyiden junien ohiajoista. Jos junassa oli vaunuja neljä tai vähemmän saatiin vaimennuksen arvoiksi lähemmissä tarkastelupisteissä noin 10-13 dB ja kauemmissa tarkastelupisteissä noin 7-9 dB.

Kenttämittauskohteessa rata oli kaksiraiteinen ja meluste oli rakennettu vain radan toiselle puolelle. Tutkimuksessa mitattiin myös melusteesta kauemman raiteen (länsiraide) junien ohiajojen äänitasot ja vaimennus laskettiin äänitasojen erotuksena. Tulosten tarkastelussa on otettava huomioon, että mikrofonien sijainnit oli määritetty standardin SFS-EN ISO 3095 mukaisesti melustetta lähemmän raiteen (itäraide) sijainnin perusteella. Siksi mikrofonit sijaitsivat noin neljä metriä kauempana länsiraiteesta kuin itäraiteesta. Länsiraiteen lähempien tarkastelupisteiden tulosten perusteella laskettuna vaimennus oli noin 7-8 dB ja kauempien pisteiden perusteella noin 5 dB.

Oletusten mukaisesti länsiraiteen tuloksista lasketut vaimennuksen arvot olivat alhaisempia kuin itäraiteen tuloksista lasketut vaimennukset. Tulosten perusteella matalalla melusteella saavutettu vaimennus on sitä parempi, mitä lähempänä este on melun lähdettä. Aukean tilan ulottuma kuitenkin rajoittaa matalan melusteen sijaintia siten, että esteen etäisyyden lähimmän raiteen keskilinjasta on oltava vähintään 1,92 metriä. Matalalla melusteella pystytään torjumaan paremmin melun leviämistä, jos meluste sijoitetaan kaksiraiteisilla rataosuuksilla myös raiteiden väliin. Lisäksi on otettava huomioon, etteivät melusteet aina ole molemmilta puolilta ääntä absorboivia. Esimerkiksi Zbloc-melusteessa absorboiva kumirouhe on vain esteen toisella puolella. Jos matala meluste on ääntä imevä vain toiselta puolelta ja melulta suojattavat kohteet sijaitsevat kaksiraiteisen radan molemmilla puolilla, on raiteiden väliin sijoitettava kaksi melustetta

Melusteen vaimennuskykyyn vaikuttaa esteen koon ja sijainnin lisäksi äänen taajuus. Mittaustuloksista tehdyn taajuusanalyysin perusteella matala meluste vaimensi parhaiten korkeita taajuuksia. Korkeilla taajuuksilla aallonpituudet ovat lyhyempiä eivätkä ne diffraktoidu melusteen yläreunasta. Matalat taajuuden sen sijaan taipuvat helpommin esteen taakse.

Tässä tutkimuksessa käytettäväksi melunlaskentaohjelmaksi valittiin CadnaA ja laskentamallina käytettiin yhteispohjoismaista raidemelun laskentamallia. Melunlaskentaohjelmalla mallinnettiin kenttämittauskohteessa olleen melusteen ominaisuuksia vastaava matala meluste ja junien ohiajoista syntyviä melutasoja tarkasteltiin samoissa pisteissä kuin mikrofonit olivat kenttämittauksissa. Junan ohiajosta syntyvä äänitaso laskettiin junan ohitusaikaa vastaavana tehollisarvona ($L_{\max M}$). Vaimennus laskettiin tarkastelupisteiden $L_{\max M}$ arvojen erotuksena. Lähempien tarkastelupisteiden tulosten perusteella vaimennus oli noin 4,5-5,5 dB ja kauempien tarkastelupisteiden tulosten perusteella noin 3-4,7 dB. Kun näitä arvoja verrattiin kenttämittausten tuloksiin, huomattiin laskentaohjelmalla saatujen vaimennuksen arvojen olleen pienempiä. Koska vaimennuksen arvot kenttämittausten ja laskentamallin tulosten perusteella erosivat selvästi toisistaan, ei pohjoismainen raidemelun laskentamalli tämän tutkimuksen tulosten perusteella sovellu sellaisenaan matalan melusteen vaimennuskykyyn arviointiin. Pohjoismainen rai-

demelun laskentamalli ei mallinna matalaa meluestettä oikein, koska matala meluste sijaitsee lähempänä raidetta kuin tavallisesti käytetty meluseinä.

Tulosten tarkastelussa on tärkeää ottaa huomioon, että mittauksissa ja mallinnuksessa on tarkasteltu vain yhtä matalan meluesteen kaupallista koerakennetta, eikä tämän tutkimuksen tuloksia voida yleistää koskemaan muita matalia melusteitä. Lisäksi tässä tutkimuksessa saadut vaimennuksen arvot kuvaavat melutason laskua vain tietyissä tarkastelupisteissä. Tulosten tarkastelussa on lisäksi otettava huomioon meluesteen pituuden olleen 60 metriä, ja pisimpien junien tapauksissa vaimennuksen arvot olisivat olleet korkeampia, jos este olisi ollut pidempi.

Tämän tutkimuksen tulokset tukevat Ruotsissa tehtyä tutkimusta, jossa mallinnettiin matala Zbloc-meluste CadnaA-melunlaskentaohjelmalla ja laskentaohjelman tuloksia verrattiin maastosta mitattuihin arvoihin. Laskentaohjelmalla arvioitiin enimmäistasoja aikapainotuksella $L_{\max F}$. Tutkimuksessa melunlaskentaohjelmalla saatiin noin 7 dB vaimennus, kun kenttämittausten perusteella vaimennus oli noin 11 dB. Tutkimuksessa päädyttiin siihen, ettei pohjoismainen raidemelun laskentamalli ole luotettava työkalu, kun arvioidaan matalan meluesteen vaimennuskykyä. Matala meluste sijaitsee lähellä raidetta, jonka takia ohjelma ei pysty ottamaan huomioon kokonaista melutason alenemaa. Lisäksi pohjoismainen raidemelun laskentamalli sijoittaa junan ohiajossa vaikuttavat melulähteet tietyillä taajuuksilla niin korkealle, ettei matala este pysty niitä vaimentamaan. (Markstedt & Nilsson 2005.)

Tämän tutkimuksen tulosten perusteella luotettavin tapa määrittää matalan meluesteen vaikutus äänen leviämiseen on tehdä kenttämittauksia. Kenttämittauksia varten matalasta melusteestä on rakennettava koerakenne. Koerakennuskohteen valinta tulee tehdä harkiten, koska mittauspaikan olot vaikuttavat melumittausten tuloksiin. Kenttämittauskohde tulee valita siten, että taustamelu kohteessa on mahdollisimman vähäistä. Etenkin, jos matalan meluesteen vaimennusta arvioidaan enimmäistasojen perusteella, tulisi varmistaa, että mitattu enimmäistaso on todella raideliikenteen aiheuttama eikä johdu jostain muusta hetkellisesti kovasta äänestä. Enimmäistasoja luotettavampi tapa selvittää meluesteen vaimennus on määrittää junien ohiajojen keskiäänitasot ja laskea vaimennus keskiäänitasojen perusteella. Mittaukset tulisi tehdä aina sellaisessa ympäristössä, jossa äänen heijastumiset eivät merkittävästi vaikuta tarkastelupisteiden äänitasoihin. Esimerkiksi rakennuksia ei saisi olla mittauspaikan läheisyydessä, koska ääni voi heijastua rakennusten ulkosivuista. Mittauskohteessa radan tulee olla suora.

Junan nopeuden on pysyttävä vakiona tarkastelupisteiden välillä ja tästä syystä koerakennetta ei tulisi sijoittaa esimerkiksi asemien läheisyyteen. Melumittauksia on helpompaa tehdä enemmän, jos koerakenne sijoitetaan vilkkaasti liikennöidylle rataosalle. Lisäksi on otettava huomioon, että tarkastelupisteiden sijaintien valinta vaikuttaa siihen, millainen vaimennuksen arvo mittauksista saadaan. Jos halutaan vertailla kahden meluesteen vaimennuskykyä, on tarkastelupisteiden sijaittava molempien melusteiden mittauksissa samoissa kohdissa. Lisäksi vertailtavien esteiden tulisi olla samanpituisia,

koska esteen pituudella on merkitystä meluesteen takana sijaitsevan tarkastelupisteen äänitasoon. Esteen pituudella on sitä enemmän merkitystä, mitä kauempana tarkastelupisteet sijaitsevat. Mittauksia tehdessä tulisi ottaa huomioon säätilan vaikutus eikä mittauksia tulisi suorittaa esimerkiksi silloin, kun maassa on lunta. Jotta eri esteiden vaimennuskyvyn arvot olisivat vertailukelpoisia, tulisi mittaukset suorittaa mahdollisimman samanlaisissa ympäristöissä.

Jos matalien melusteiden käyttö Suomessa ja muissa pohjoismaissa yleistyy, olisi tärkeää pystyä arvioimaan esteen vaimennuskykyä ilman maastossa tehtyjä mittauksia. Koerakentaminen vie aina resursseja ja lisäksi eri melusteiden vaimennuskyvyn vertaaminen edellyttäisi mittauksien suorittamista aina mahdollisimman samanlaisissa ympäristöissä. Tulevaisuudessa tulisi tutkia pystytäänkö pohjoismaiseen raidemelun laskentamalliin tekemään sellaisia muutoksia, joiden avulla matalan meluesteen mallintaminen oikein olisi mahdollista. Malliin tehtävien muutoksien läpivienti voi kuitenkin olla pitkäaikainen prosessi. Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin vain pohjoismaisen raidemelun laskentamallin soveltuvuutta matalan meluesteen mallintamiseen. Myös muiden maiden laskentamallien soveltuvuutta tulisi tutkia.

Lähteet

Björk, E. 1991. Meluntorjunta. Kuopio. Kuopion yliopisto, Ympäristöterveyden laitos. ISBN 951-780-930-1.

Destia. 2009. Matalan meluesteen käyttäminen rautatiemelun torjumiseen, meluesteen tuotevaatimukset. Luonnos 12.10.2009.

ERRAC (The European Rail Research Advisory Council). 2002. Strategic Rail Research Agenda 2020. First Report of the European Rail Research Advisory Council. [Viitattu 12.9.2011] Saatavilla: http://www.errac.org/IMG/pdf/ERRAC_SRRA_Official.pdf

Eurasto, R. 1995a. Raideliikennemelun laskentamallin parametrit. VTT tiedotteita 1718. ISBN 951-38-4873.

Eurasto, R. 1995b. Kiskon pinnan vaikutus raidemelun laskentamallin lähtöarvoihin. VTT tiedotteita 1719. Espoo. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. ISBN 951-38-4874-4.

Eurasto, R. 2003. Ympäristömeludirektiivin vaikutukset melun arviointimenetelmiin. Suomen ympäristö 610. Helsinki. Ympäristöministeriö. ISBN 952-1342-1.

Eurasto R., Määttä A. & Parviainen S. 2011. Railway bonuksen käyttökokemukset EU-maissa ja railway bonuksen sovellettavuus Suomessa. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 11/2011. Helsinki. [viitattu 24.8.2011]. Saatavissa: http://alk.tiehallinto.fi/julkaisut/pdf3/lts_2011-11_railway_bonuksen_web.pdf. ISBN 978-952-255-632-5 (painettu) ISBN 978-952-255-633-2 (verkkojulkaisu).

Everest, F.A. 2001. Master Handbook of Acoustic. 4th Edition. New York. McGraw-Hill. ISBN 0-07-136097-2.

Heinonen-Guzejev, M & Vuorinen, H. 2001. Meluherkkyys sekä liikennemelun raportointi ja häiritsevyys. Suomen ympäristö 471. Helsinki. Ympäristöministeriö. ISBN 952-11-0877-0.

Ihalainen, E. 2000. Ympäristönsuojelutekniikan perusteet. 2. painos. Turun yliopiston täydennyskoulutuskeskuksen julkaisuja A: 76. ISBN 951-29-1626-6.

Innanen, H-M. & Soosalu, L. 2009. Matalat meluesteet raidemelun torjunnassa. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 10/2009. ISBN 978-952-445-300-4.

Iwniki, S. 2006. Handbook of Railway Vehicle Dynamics. Boca Raton. Taylor & Francis Group. ISBN 978-0-8493-3321-7.

Jerson, T., Ögren, M. & Öhrström, E. 2007. Combined Effects of Noise and Vibration-from Train and road Traffic. 9th IWRN International Workshop on Railway Noise, Munich 2007.

Kaku, J. & Yamada, I. 1996. The possibility of a bonus for evaluating railway noise in Japan. Journal of Sound and Vibration. Vol 193:1. S. 445-450.

Karjalainen, M. 2008. Kommunikaatioakustiikka. Teknillinen korkeakoulu, Elektroteknikka, tietoliikenne ja automaation tiedekunta, Signaalikäsittelyn ja akustiikan laitos. 2. painos. Espoo. Multiprint Oy. ISBN 978-951-22-9749-8.

Lahti, T. 1995. Akustinen mittaustekniikka. Espoo. Teknillinen korkeakoulu, sähkötekniikan osasto, akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratorio. ISBN 951-22-2901-3.

Lahti, T. 2003. Ympäristömelun arviointi ja torjunta. Ympäristöopas 101. Helsinki. Ympäristöministeriö. ISBN 952-11-1353-7.

Liikenne- ja viestintäministeriö (LVM). 2007. Tie- ja rautatieliikenteen meluntorjunnan teemapaketti 2008-2012. Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisuja 28/2007. Helsinki. [Viitattu: 21.9.2011] Saatavissa: http://www.lvm.fi/fileserver/LVM_2807.pdf. ISBN 978-952-201-884-7 (painettu) ISBN 978-052-201-885-4 (sähköinen).

Liikennevirasto. 2009. Rautateiden kaukoliikenteen matkustajavirrat 2009.

Liikennevirasto. 2010. Rataverkon keskeiset ominaisuudet 31.12.2010. [Viitattu: 8.7.2011] Saatavissa:

http://portal.liikennevirasto.fi/sivu/www/f/liikennevirasto/tilastot/vaylatilastot/rataverkko_keskeiset_ominaisuudet

Liikennevirasto. 2011. Rataverkon kuvaus 1.7.2011. Liikenneviraston väylätietoja 1/2011. Helsinki. [Viitattu 19.10.2011] Saatavissa: http://portal.liikennevirasto.fi/portal/page/portal/f/liikenneverkko/rautatiet/lv_2011-01_rataverkon_kuvaus_web.pdf. ISBN 978-952-255-696-7.

Liikkonen, L. & Leppänen, P. 2005. Altistuminen ympäristömelulle Suomessa, tilannekatsaus 2005. Suomen ympäristö 809. Helsinki. Ympäristöministeriö. ISBN 951-731-356-X.

Markstedt, O. & Nils-Åke Nilsson, N-Å. Östra Gymnasiet i Skogås – a school with new acoustic technology. Bygg & Teknik. Vol: 3/05. S 43-46.

Miedema, H. M. E. & Vos, H. 1998. Exposure-response relationships for transportation noise. Journal of the Acoustical Society of America. Vol. 104:6. S. 3432-3445

Nilsen, J., Lundberg, O. & Renard, N. 2009. In-field measurements of the influence of low barrier on railway noise. Quiet City Transport. Subproject 5: Design & implementation of solution at validation sites. Work 5.9: Performance report of applied measures-

Malmö. [Viitattu 15.9.2011] Saatavissa: http://www.qcity.org/downloads/SP5/D5-02-2_TTE_48M.pdf

Nordic council of ministers. 1996. Railway Traffic Noise- The Nordic Prediction Method. TemaNord1996:534. 1st Edition. Copenhagen. ISBN 92-9120-837-X.

Oertli, J. 2000. Cost-Benefit Analysis in Railway Noise Control. Journal of Sound and Vibration. Vol 231:13, S. 505-509.

Oertli, J. 2006. Developing noise control strategies for entire railway networks. Journal of Sound and Vibration. Vol 293. S 1086-1090.

Promethor Oy. 2011. Matalan meluesteen vaikutus melutasoon. Mittausraportti. Mittaukset suoritettu Tuusulan Kytömaalla 4.7.2011.

Ratahallintokeskus. 2004. Rautateiden meluesteet. Ratahallintokeskuksen julkaisuja B 11. Helsinki. ISBN 952-445-103-4.

Rossing, T.D, Moore, F.R & Wheeler, P.A. 2002. The science of sound. 3rd edition. Addison-Wesley. ISBN 0-8053-8565-7.

Suomen kuntatekniikan yhdistys. 1997. Meluestekäsikirja. Julkaisu 18/97. Jyväskylä. ISBN 952-9710-02X.

Suomen standardisoimisliitto SFS. 2006. Kiskoliikenne. Akustiikkaa. Kiskoajoneuvon aiheuttaman melun mittaus. SFS-ISO 3095:2005.

Tiehallinto. Tieliikenteen melu. Perustietoa tieliikenteen melusta ja sen torjunnasta.

Tiihinen, J. & Hännien O. 1997. Meluntorjunnan perusteet, meluntorjunnan koulutusaineisto ja käsikirja. Ympäristöopas 18. Kuopio. Ympäristöministeriö, Pohjois-Savon ympäristökeskus. ISBN 952-11-0583-6.

Thompson, D. 2009. Railway noise and vibration: mechanism, modeling and means of control. Amsterdam. Elsevier. ISBN 978-0-08-045147-3.

UIC (The International Union of Railways). 2001. A Joint Strategy for European Rail Research 2020, Towards a Single European Railway System. [Viitattu 12.9.2011] Saatavissa: http://www.errac.org/IMG/pdf/Joint_Strategy.pdf

UIC (The International Union of Railways). 2010a. The railway noise bonus. Discussion paper on the noise annoyance correction factor - Final Report. [Viitattu 15.9.2011] Saatavissa: http://www.uic.org/IMG/pdf/the_railway_noise_bonus_report-2.pdf. ISBN 978-2-7461-1903-1.

UIC (The International Union of Railways). 2010b. Railway noise in Europe, A 2010 report in the state of the art. Pariisi. [Viitattu 31.8.2011]

http://www.uic.org/IMG/pdf/20101130railway_noise_in_europe_en_ld.pdf ISBN 978-2-7461-1880-5.

Uudenmaan liitto. 2007. Esiselvitys pääradan melu- ja tärinähaitoista rataosilla Kerava - Riihimäki ja Riihimäki – Hausjärvi. Uudenmaan liiton julkaisuja C 58 – 2007. Helsinki. [Viitattu: 22.9.2011] Saatavissa:

http://www.hameenliitto.fi/content/HameenLiitto/liitetiedostot/Maakuntakaava2/paaradan_tarina_ja_meluselvitys.pdf?from=13266372343174995. ISBN 978-952-448-204-2 (painettu) ISBN 978-952-448-205-9 (sähköinen)

Valtioneuvoston päätös melutason ohjearvoista. Vnp993/92. 1992.

Ympäristöministeriö. 1995. Ympäristömelun mittaaminen. Ympäristöministeriön ympäristösuojeluosaston ohje 1/1995. Helsinki. ISBN 951-731-082-X.

Ympäristöministeriö. 2001. Liikennemelun huomioon ottaminen kaavoituksessa, LIME-työryhmän mietintö. Suomen ympäristö 493. ISBN 951-37-3526-5.

Ympäristöministeriö. 2002. Raidemelun laskentamalli. Ympäristöopas 97. Helsinki. ISBN 952-11-1162-3.

Ympäristöministeriö. 2004. Meluntorjunnan valtakunnalliset linjaukset ja toimintaohjelma. Suomen ympäristö 696. Helsinki. ISBN 952-11-1670.

Ympäristöministeriö. 2007a. Valtioneuvoston periaatepäätös meluntorjunnasta. Ympäristöministeriön raportteja 7/2007. Helsinki. ISBN-952-11-2618-5.

Ympäristöministeriö. 2007b. MELUTTA –hankkeen loppuraportti. Ympäristöministeriön raportteja 20/2007. Helsinki. ISBN-978-952-11-2831-8.

Zbloc Norden AB. Valmistajan kotisivut. <http://zbloc.se>

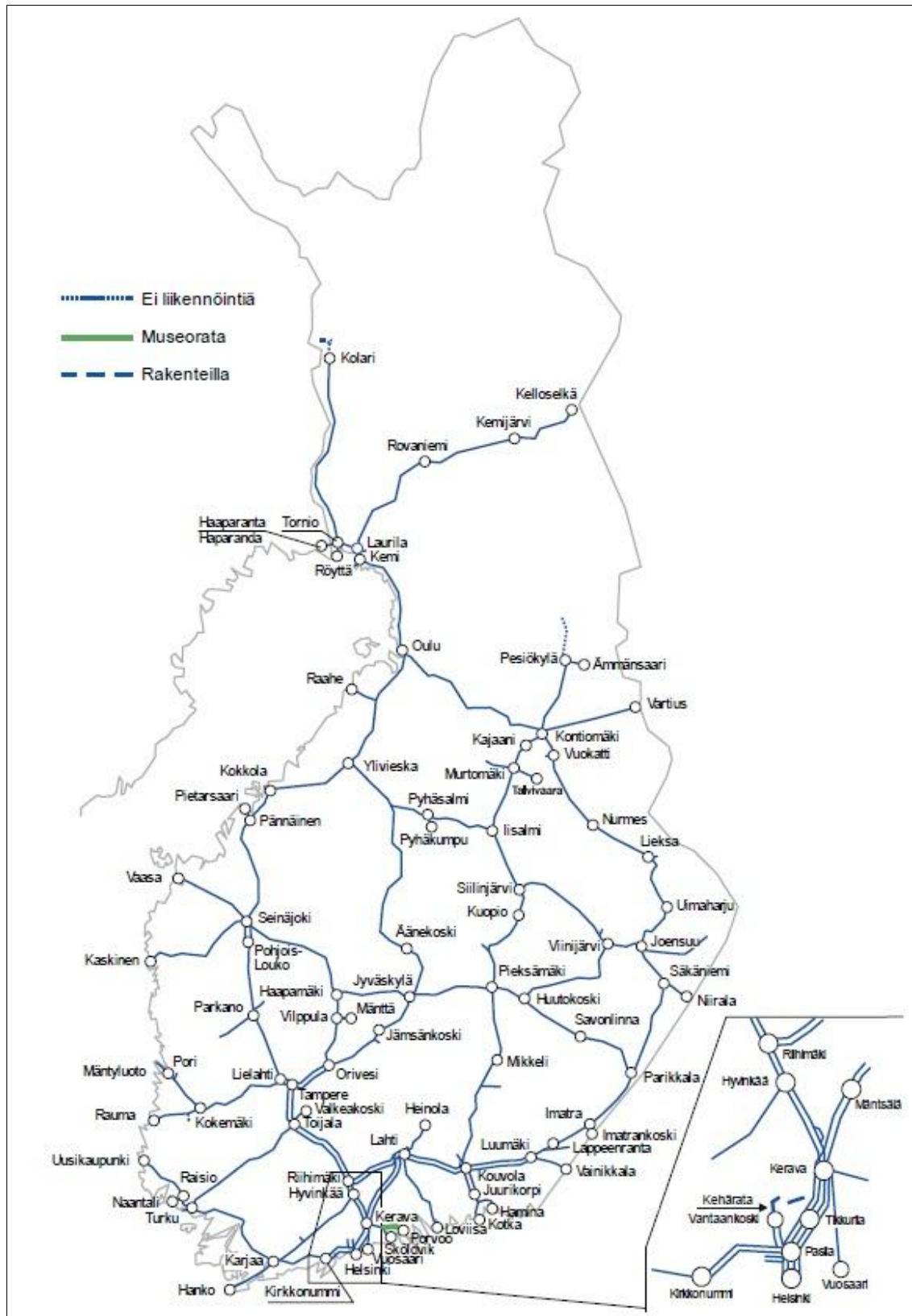
Ögren, M. 2006. Noise emission from railway traffic. VTI rapport 559A. ISSN: 0347-6030.

Liiteluettelo

Liite A	Suomen rataverkko
Liite B	Suomessa käytössä olevat henkilöliikenteen junatyypit
Liite C	Kuvia mittauspaikalta
Liite D	Kenttämittausten tulokset
Liite E	Melunlaskentaohjelman tulokset

Liite A. Suomen rataverkko

Kuva 1. Suomen rataverkko (Liikennevirasto 2011).



Liite B. Suomessa käytössä olevat henkilöliikenteen junatyypit



Kuva 1. Sm1-sähkömoottorijuna.



Kuva 2. Sm2-sähkömoottorijuna.



Kuva 3. Sm4-sähkömoottorijuna.



Kuva 4. Pikajuna.



Kuva 5. InterCity-juna.



Kuva

6.

Pendolino-juna.

Liite C. Kuvia mittauspaikalta



Kuva 1. Näkymä mittauspaikalta etelään. Kuvassa raivataan pensaikkoa tien ja pellon väliseltä pientareelta. (kuva: Jarkko Valtonen)



Kuva 2. Mittauskalusto Kytömaantiellä.



Kuva 3. Säätasema mittauspaikalla.



Kuva 4. Mikrofonin lähemmässä tarkastelupisteessä meluesteen takana (7,5 metrin etäisyydellä raiteen keskilinjasta ja 1,2 metriä kiskon selän korkeuden yläpuolella).



Kuva 5. Näkymä kohti pohjoista. Mikrofoni on 7,5 metrin etäisyydellä raiteen keskilinjasta ja 1,2 metriä kiskon selän korkeuden yläpuolella.



Kuva 6. Mikrofoni 25 metrin etäisyydellä raiteen keskilinjasta ja 3,5 metriä kiskon selän korkeuden yläpuolella. Taustalla Kerava-Lahti-oikorata.

Liite D. Kenttämittausten tulokset

Taulukko 1. Itäraidetta käyttäneiden junien enimmäistasoista lasketut keskiarvot ja -hajonnat 7,5 metrin etäisyydellä itäraiteen keskilinjasta.

	Nopeus (km/h)	Enimmäisäänitaso LAeq,1s (dB)		Vaimennus (dB)
		A1 (meluste)	B1 (ei meluestettä)	
Sm4, vaunuja 2				
Mitattujen ohiajojen määrä (n) 11				
Keskiarvo	113	74,0	86,8	12,8
Keskihajonta	7	1,3	1,5	0,5
Sm4, vaunuja 4				
Mitattujen ohiajojen määrä (n) 23				
Keskiarvo	131	77,1	90,0	12,7
Keskihajonta	12	1,3	1,4	1,0
Sm1/2, vaunuja 2				
Mitattujen ohiajojen määrä (n) 2				
Keskiarvo	118	79,4	89,7	10,2
Keskihajonta	3	0,2	0,1	0,0
Sm1/2, vaunuja 4				
Mitattujen ohiajojen määrä (n) 2				
Keskiarvo	118	78,8	89,2	10,5
Keskihajonta	1	0,4	0,2	0,3
InterCity2, vaunuja 4				
Mitattujen ohiajojen määrä (n) 4				
Keskiarvo	143	82,6	92,7	10,1
Keskihajonta	7	1,3	1,0	0,6
InterCity, vaunuja 5-9				
Mitattujen ohiajojen määrä (n) 9				
Keskiarvo	145	83,5	93,0	9,4
Keskihajonta	12	1,8	1,8	0,6
Pendolino, vaunuja 6				
Mitattujen ohiajojen määrä (n) 3				
Keskiarvo	145	80,7	89,5	8,9
Keskihajonta	15	3,1	2,1	1,1
Pendolino, vaunuja 12				
Mitattujen ohiajojen määrä (n) 3				
Keskiarvo	160	83,2	91,7	8,5
Keskihajonta	2	0,9	0,8	0,2

Taulukko 2. Itäraidetta käyttäneiden junien enimmäistasoista lasketut keskiarvot ja –hajonnat 25 metrin etäisyydellä itäraiteen keskilinjasta.

	Nopeus (km/h)	Enimmäisäänitaso LAeq,1s (dB)		Vaimennus (dB)
		A2 (meluste)	B2 (ei meluestettä)	
Sm4, vaunuja 2 Mitattujen ohiajojen määrä (n) 6				
Keskiarvo	114	71,5	80,5	9,0
Keskihajonta	9	1,6	1,5	0,7
Sm4, vaunuja 4 Mitattujen ohiajojen määrä (n) 17				
Keskiarvo	128	74,2	83,1	8,9
Keskihajonta	12	1,5	1,7	0,7
Sm1/2, vaunuja 2 Mitattujen ohiajojen määrä (n) 1	80	68,4	76,8	8,4
Sm1/2, vaunuja 4 Mitattujen ohiajojen määrä (n) 2				
Keskiarvo	113	74,6	82,5	7,9
Keskihajonta	7	0,6	0,2	0,4
InterCity2, vaunuja 4 Mitattujen ohiajojen määrä (n) 4				
Keskiarvo	133	79,3	86,9	7,6
Keskihajonta	13	1,1	1,1	0,4
InterCity, vaunuja 5-9 Mitattujen ohiajojen määrä (n) 4				
Keskiarvo	140	79,1	86,9	7,8
Keskihajonta	10	1,7	1,3	0,5
Pendolino, vaunuja 6 Mitattujen ohiajojen määrä (n) 3				
Keskiarvo	167	78,9	84,3	5,4
Keskihajonta	1	0,6	1,0	0,6
Pendolino, vaunuja 12 Mitattujen ohiajojen määrä (n) 1	156	78,3	83,7	5,4

Taulukko 3. Länsiraidetta käyttäneiden junien enimmäistasoista lasketut keskiarvot ja -hajonnat 7,5 metrin etäisyydellä itäraiteen keskilinjasta

	Nopeus (km/h)	Enimmäisäänitaso LAeq,1s (dB)		Vaimennus (dB)
		A1 (meluste)	B1 (ei meluestettä)	
Sm4, vaunuja 2				
Mitattujen ohiajojen määrä (n) 8				
Keskiarvo	112	77,2	85,2	8,0
Keskihajonta	9	2,0	1,9	0,7
Sm4, vaunuja 4				
Mitattujen ohiajojen määrä (n) 20				
Keskiarvo	129	79,4	87,6	8,3
Keskihajonta	12	1,5	1,6	1,0
Sm1/2, vaunuja 2				
Mitattujen ohiajojen määrä (n) 2				
Keskiarvo	110	78,7	85,8	7,1
Keskihajonta	2	0,7	0,9	0,2
Sm1/2, vaunuja 4				
Mitattujen ohiajojen määrä (n) 2				
Keskiarvo	113	78,6	86,2	7,6
Keskihajonta	25	1,2	0,7	0,4
InterCity2, vaunuja 4				
Mitattujen ohiajojen määrä (n) 2				
Keskiarvo	146	81,5	90,2	8,7
Keskihajonta	13	1,2	1,2	0,0
InterCity, vaunuja 5-9				
Mitattujen ohiajojen määrä (n) 7				
Keskiarvo	143	83,6	91,6	8
Keskihajonta	18	2,4	3	0,8

Taulukko 4. Länsiraidetta käyttäneiden junien enimmäistasoista lasketut keskiarvot ja -hajonnat 25 metrin etäisyydellä itäraiteen keskilinjasta

	Nopeus (km/h)	Enimmäisäänitaso LAeq,1s (dB)		Vaimennus (dB)
		A2 (meluste)	B2 (ei meluestettä)	
Sm4, vaunuja 2 Mitattujen ohiajojen määrä (n) 4				
Keskiarvo	121	73,7	79,9	6,2
Keskihajonta	7	0,7	0,8	0,6
Sm4, vaunuja 4 Mitattujen ohiajojen määrä (n) 10				
Keskiarvo	135	76,3	82,1	5,8
Keskihajonta	14	1,6	1,5	0,5
Sm1/2, vaunuja 2 Mitattujen ohiajojen määrä (n) 1	117	74,18	79,78	5,6
Sm1/2, vaunuja 4 Mitattujen ohiajojen määrä (n) 2				
Keskiarvo	95	74,0	78,9	4,9
Keskihajonta	17	2,0	2,5	0,5
InterCity2, vaunuja 4 Mitattujen ohiajojen määrä (n) 2				
Keskiarvo	128	77,7	82,2	4,6
Keskihajonta	3	1,7	1,1	0,5
InterCity, vaunuja 5-9 Mitattujen ohiajojen määrä (n) 5				
Keskiarvo	147	80,2	85,9	5,7
Keskihajonta	9	2,2	2,8	0,9
Pendolino, vaunuja 6 Mitattujen ohiajojen määrä (n) 2				
Keskiarvo	135	78,3	82,6	4,3
Keskihajonta	8	2,9	3,5	0,6

Taulukko 5. Itäraidetta käyttäneiden junien ohiajojen keskiäänitasot. Tarkastelupisteiden etäisyys itäraiteen keskilinjasta 7,5 metriä.

Päivämäärä	Kello	Juna	Vaunuja	Keskiäänitason määrittysjakson pituus (s)	Nopeus (km/h)	A-painotettu keskiäänitaso tarkastelupisteessä (dB)		Vaimennus (dB)	
						A1 (meluste)	B1 (ei meluestettä)		
18.7.2011	12:47	Sm4	2	2	112	74,3	86,0	11,7	
18.7.2011	13:47	Sm4	2	2	118	75,1	87,1	12,0	
21.7.2011	12:47	Sm 4	2	2	124	72,7	84,6	11,9	
21.7.2011	13:47	Sm 4	2	2	117	74,5	86,0	11,5	
25.7.2011	9:47	Sm4	2	2	105	71,3	83,6	12,3	
25.7.2011	12:13	Sm4	2	2	119	74,0	86,4	12,4	
25.7.2011	12:47	Sm4	2	2	105	71,8	83,6	11,8	
25.7.2011	13:48	Sm4	2	2	107	71,8	83,9	12,1	
26.7.2011	9:48	Sm 4	2	2	103	72,1	85,0	12,9	
26.7.2011	12:14	Sm 4	2	2	122	74,3	86,2	11,9	
26.7.2011	12:50	Sm 4	2	2	115	74,7	87,3	12,6	
					Keskiarvo	113	73,3	85,4	12,1
					Keskihajonta	7	1,3	1,3	0,4
18.7.2011	12:43	Sm4	4	3	133	77,0	89,4	12,4	
18.7.2011	13:45	Sm4	4	3	132	77,1	89,6	12,5	
21.7.2011	10:14	Sm 4	4	4	92	73,3	84,9	11,6	
21.7.2011	10:43	Sm 4	4	3	143	77,0	88,9	11,9	
21.7.2011	11:14	Sm 4	4	3	120	76,0	87,8	11,8	
21.7.2011	13:13	Sm 4	4	3	127	76,6	88,6	12,0	
21.7.2011	13:44	Sm 4	4	3	120	75,7	87,5	11,8	
25.7.2011	9:14	Sm4	4	3	128	75,3	89,0	13,7	
25.7.2011	10:43	Sm4	4	3	143	76,7	89,4	12,7	
25.7.2011	11:44	Sm4	4	3	143	77,3	90,3	13,0	
25.7.2011	12:42	Sm4	4	3	126	77,3	90,3	13,0	
25.7.2011	13:13	Sm4	4	3	132	75,9	88,0	12,1	
25.7.2011	13:44	Sm4	4	3	129	76,4	88,7	12,3	
25.7.2011	14:16	Sm4	4	3	135	79,4	87,3	7,9	
25.7.2011	14:43	Sm4	4	3	141	77,4	90,2	12,8	
26.7.2011	9:43	Sm 4	4	3	140	76,6	89,6	13,0	
26.7.2011	10:14	Sm 4	4	3	114	74,9	87,8	12,9	
26.7.2011	10:44	Sm 4	4	3	140	77,6	90,2	12,6	
26.7.2011	11:14	Sm 4	4	3	132	76,4	89,0	12,6	
26.7.2011	11:44	Sm 4	4	3	144	78,3	90,5	12,2	
26.7.2011	12:44	Sm 4	4	3	142	77,1	90,3	13,2	
26.7.2011	13:14	Sm 4	4	3	123	74,6	87,6	13,0	
26.7.2011	13:43	Sm 4	4	3	143	77,4	89,3	11,9	
					Keskiarvo	131	76,6	88,9	12,3
					Keskihajonta	12	1,3	1,3	1,1
18.7.2011	14:48	Sm1/2	2	2	120	78,7	88,9	10,2	
25.7.2011	14:51	Sm1/2	2	2	115	77,8	87,9	10,1	
					Keskiarvo	118	78,3	88,4	10,2
					Keskihajonta	3	0,5	0,5	0,1

Päivä- määrä	Kello	Juna	Vaunuja	Keskiäänitason määrittäjäjakson pituus (s)	Nopeus (km/h)	A-painotettu keskiäänitaso tarkastelupisteessä (dB)		Vaimennus (dB)
						A1 (meluaste)	B1 (ei melustettua)	
18.7.2011	14:16	Sm1/2	4	3	117	77,5	87,9	10,4
25.7.2011	14:14	Sm1/2	4	3	118	78,4	88,9	10,5
Keskiarvo					118	78,0	88,4	10,5
Keskihajonta					1	0,5	0,5	0,1
25.7.2011	11:32	InterCity2	4	3	134	81,2	90,9	9,7
25.7.2011	14:33	InterCity2	4	3	153	83,0	93,0	10,0
26.7.2011	9:32	InterCity2	4	3	140	80,7	91,1	10,4
26.7.2011	11:33	InterCity2	4	3	144	81,1	91,8	10,7
Keskiarvo					143	81,5	91,7	10,2
Keskihajonta					7	0,9	0,8	0,4
18.7.2011	13:33	InterCity	8	5	154	84,0	93,5	9,5
21.7.2011	10:34	InterCity	9	7	150	82,5	91,7	9,2
21.7.2011	12:31	InterCity	5	4	133	81,2	90,4	9,2
21.7.2011	13:33	InterCity	11	7	155	84,3	93,8	9,5
25.7.2011	9:31	InterCity	6	5	125	78,1	89,1	11,0
25.7.2011	12:32	InterCity	5	4	157	82,4	92,7	10,3
25.7.2011	13:34	InterCity	8	5	158	83,3	93,3	10,0
26.7.2011	10:34	InterCity	9	5	131	81,4	91,1	9,7
26.7.2011	12:32	InterCity	7	5	140	81,9	91,8	9,9
Keskiarvo					145	82,1	91,9	9,8
Keskihajonta					12	1,7	1,5	0,5
25.7.2011	9:57	Pendolino	6	4	123	77,1	86,5	9,4
26.7.2011	9:56	Pendolino	6	4	158	79,2	87,9	8,7
26.7.2011	13:00	Pendolino	6	4	153	82,9	90,6	7,7
Keskiarvo					145	79,7	88,3	8,6
Keskihajonta					15	2,4	1,7	0,7
18.7.2011	12:57	Pendolino	12	7	162	81,8	89,5	7,7
21.7.2011	12:56	Pendolino	12	7	161	82,8	90,5	7,7
25.7.2011	12:57	Pendolino	12	7	157	80,9	89,1	8,2
Keskiarvo					160	81,8	89,7	7,9
Keskihajonta					2	0,8	0,6	0,2

Taulukko 6. Itäraidetta käyttäneiden junien ohiajojen keskiäänitasot. Tarkastelupisteiden etäisyys itäraiteen keskilinjasta 25 metriä.

Päivämäärä	Kello	Juna	Vaunuja	Keskiäänitason määrittysjakson pituus (s)	Nopeus (km/h)	A-painotettu keskiäänitaso tarkastelupisteessä (dB)		Vaimennus (dB)	
						A1 (meluste)	B1 (ei meluestettä)		
27.7.2011	9:47	Sm4	2	2	105	69,2	77,2	8,0	
27.7.2011	12:14	Sm4	2	2	128	72,7	80,9	8,2	
27.7.2011	12:47	Sm4	2	2	102	69,7	77,9	8,2	
27.7.2011	13:54	Sm4	2	2	119	70,8	78,9	8,1	
1.8.2011	12:49	Sm4	2	2	118	72,8	81,5	8,7	
1.8.2011	13:48	Sm4	2	2	113	70,7	80,0	9,3	
					Keskiarvo	114	71,0	79,4	8,4
					Keskihajonta	9	1,4	1,5	0,5
27.7.2011	9:14	Sm4	4	3	133	74,0	82,8	8,8	
27.7.2011	10:13	Sm4	4	3	116	71,4	80,2	8,8	
27.7.2011	10:45	Sm4	4	3	138	74,5	83,8	9,3	
27.7.2011	11:14	Sm4	4	3	122	73,7	80,8	7,1	
27.7.2011	11:43	Sm4	4	3	129	73,9	83,4	9,5	
27.7.2011	12:43	Sm4	4	3	142	74,0	82,5	8,5	
27.7.2011	13:16	Sm4	4	3	124	72,8	81,5	8,7	
27.7.2011	13:43	Sm4	4	3	140	74,9	83,5	8,6	
1.8.2011	9:14	Sm4	4	3	133	74,8	83,5	8,7	
1.8.2011	9:43	Sm4	4	3	123	73,7	81,7	8,0	
1.8.2011	10:14	Sm4	4	3	126	74,5	83,0	8,5	
1.8.2011	11:15	Sm4	4	3	120	72,9	82,2	9,3	
1.8.2011	11:45	Sm4	4	3	135	74,5	83,5	9,0	
1.8.2011	12:14	Sm4	4	2	99	69,5	78,7	9,2	
1.8.2011	13:14	Sm4	4	4	112	72,4	80,0	7,6	
1.8.2011	13:43	Sm4	4	3	138	75,8	84,9	9,1	
1.8.2011	14:43	Sm4	4	3	144	76,3	85,0	8,7	
					Keskiarvo	128	73,7	82,4	8,7
					Keskihajonta	12	1,6	1,7	0,6
1.8.2011	14:47	Sm1/2	2	2	80	68,3	76,7	8,4	
27.7.2011	14:13	Sm1/2	4	3	120	75,0	82,2	7,2	
1.8.2011	14:16	Sm1/2	4	4	106	73,4	80,6	7,2	
					Keskiarvo	113	74,2	81,4	7,2
					Keskihajonta	7	0,8	0,8	0,0
27.7.2011	9:33	InterCity2	4	3	134	76,7	84,7	8,0	
27.7.2011	11:31	InterCity2	4	3	152	78,4	86,0	7,6	
27.7.2011	12:32	InterCity2	4	3	130	79,5	86,9	7,4	
1.8.2011	14:32	InterCity2	4	4	116	78,8	87,0	8,2	
					Keskiarvo	133	78,4	86,2	7,8
					Keskihajonta	13	1,0	0,9	0,3

Päivä- määrä	Kello	Juna	Vaunuja	Keskiäänitason määrittysjakson pituus (s)	Nopeus (km/h)	A-painotettu keskiäänitaso tarkastelupisteessä (dB)		Vaimennus (dB)
						A1 (meluete)	B1 (ei melustettä)	
1.8.2011	9:31	InterCity	5	4	135	75,8	83,6	7,8
1.8.2011	12:31	InterCity	5	3	157	78,9	87,0	8,1
27.7.2011	10:37	InterCity	6	5	134	79,6	87,0	7,4
1.8.2011	10:32	InterCity	9	7	133	78,6	86,0	7,4
Keskiarvo					140	78,2	85,9	7,7
Keskihajonta					10	1,4	1,4	0,3
27.7.2011	9:55	Pendolino	6	3	168	78,0	83,2	5,2
1.8.2011	9:33	Pendolino	6	3	165	77,4	83,3	5,9
1.8.2011	14:54	Pendolino	6	3	167	78,9	84,1	5,2
Keskiarvo					167	78,1	83,5	5,4
Keskihajonta					1	0,6	0,4	0,3
1.8.2011	12:47	Pendolino	12	7	156	77,8	83,0	5,2

Taulukko 7. Länsiraidetta käyttäneiden junien ohiajojen keskiäänitasot. Tarkastelupisteiden etäisyys itäraiteen keskilinjasta 7,5 metriä.

Päivämäärä	Kello	Juna	Vaunuja	Keskiäänitason määritysjakson pituus (s)	Nopeus (km/h)	A-painotettu keskiäänitaso tarkastelupisteessä (dB)		Vaimennus (dB)	
						A1 (meluste)	B1 (ei meluestettä)		
18.7.2011	13:12	Sm4	2	2	116	77,5	84,9	7,4	
18.7.2011	14:12	Sm4	2	2	118	77,5	84,8	7,3	
21.7.2011	10:13	Sm4	2	2	114	75,8	83,3	7,5	
21.7.2011	13:12	Sm4	2	2	114	76,7	85,0	8,3	
25.7.2011	10:13	Sm4	2	2	114	75,6	83,1	7,5	
25.7.2011	14:12	Sm4	2	2	113	76,1	82,2	6,1	
26.7.2011	10:13	Sm4	2	2	88	71,0	79,8	8,8	
26.7.2011	13:12	Sm4	2	2	118	77,3	84,6	7,3	
					Keskiarvo	112	75,9	83,5	7,5
					Keskihajonta	9	2,0	1,7	0,7
18.7.2011	13:18	Sm4	4	3	135	79,6	87,0	7,4	
18.7.2011	14:45	Sm4	4	3	121	78,5	85,2	6,7	
21.7.2011	10:27	Sm4	4	3	138	78,8	87,9	9,1	
21.7.2011	10:51	Sm4	4	3	119	78,7	86,3	7,6	
21.7.2011	11:17	Sm4	4	3	155	80,9	88,2	7,3	
21.7.2011	12:45	Sm4	4	3	125	78,0	85,6	7,6	
21.7.2011	13:22	Sm4	4	3	132	79,3	87,0	7,7	
25.7.2011	9:18	Sm4	4	3	117	76,9	85,6	8,7	
25.7.2011	10:45	Sm4	4	3	116	76,9	85,8	8,9	
25.7.2011	11:18	Sm4	4	3	150	82,5	89,5	7,0	
25.7.2011	12:15	Sm4	4	3	118	77,4	85,0	7,6	
25.7.2011	12:49	Sm4	4	3	122	78,0	85,9	7,9	
25.7.2011	14:44	Sm4	4	3	118	77,4	86,1	8,7	
26.7.2011	10:17	Sm4	4	3	145	80,3	88,8	8,5	
26.7.2011	11:18	Sm4	4	3	141	79,8	88,3	8,5	
26.7.2011	11:55	Sm4	4	3	136	80,0	88,8	8,8	
26.7.2011	12:18	Sm4	4	3	126	77,9	85,7	7,8	
26.7.2011	12:45	Sm4	4	3	128	79,3	86,7	7,4	
26.7.2011	13:16	Sm4	4	3	114	77,6	85,1	7,5	
26.7.2011	14:12	Sm4	4	3	118	77,0	84,2	7,2	
					Keskiarvo	129	78,7	86,6	7,9
					Keskihajonta	12	1,4	1,5	0,7
21.7.2011	13:49	Sm1/2	2	2	111	77,8	84,1	6,3	
25.7.2011	13:46	Sm1/2	2	2	108	78,3	85,7	7,4	
					Keskiarvo	110	78,1	84,9	6,9
					Keskihajonta	2	0,3	0,8	0,6
25.7.2011	9:45	Sm1/2	4	3	138	78,9	86,5	7,6	
26.7.2011	9:40	Sm1/2	4	4	88	77,0	84,5	7,5	
					Keskiarvo	113	78,0	85,5	7,6
					Keskihajonta	25	1,0	1,0	0,1
25.7.2011	14:30	InterCity2	4	3	133	79,6	88,2	8,6	
26.7.2011	12:29	InterCity2	4	3	158	82,2	90,9	8,7	
					Keskiarvo	146	80,9	89,6	8,7
					Keskihajonta	13	1,3	1,3	0,1

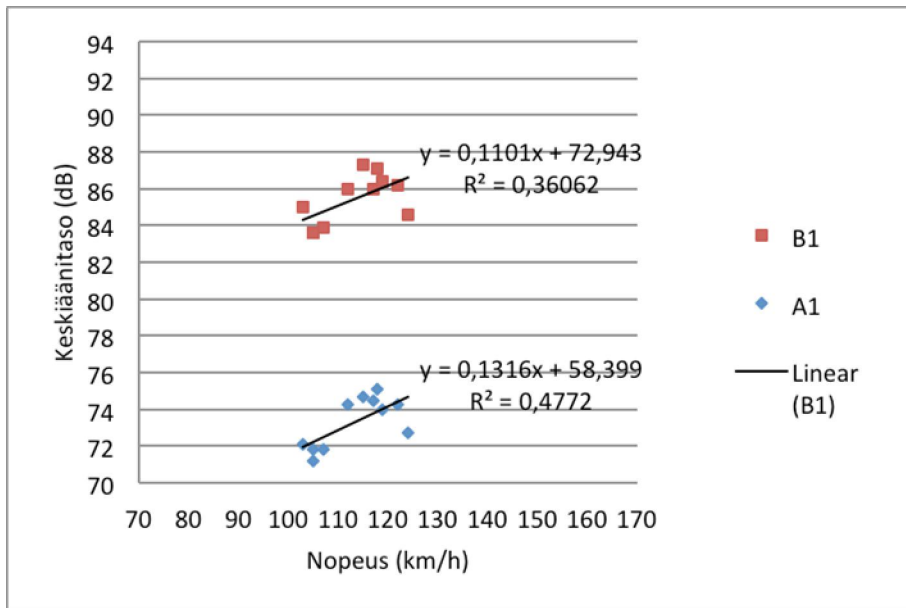
Päivä- määrä	Kello	Juna	Vaunuja	Keskiäänitason määritysjakson pituus (s)	Nopeus (km/h)	A-painotettu keskiäänitaso tarkastelupisteessä (dB)		Vaimennus (dB)
						A1 (meluste)	B1 (ei melustetta)	
25.7.2011	9:28	InterCity	5	4	139	79,9	88,2	8,3
25.7.2011	10:27	InterCity	6	5	134	80,5	88,3	7,8
26.7.2011	10:25	InterCity	6	4	149	82,7	91,2	8,5
26.7.2011	11:28	InterCity	6	6	104	79,9	86,3	6,4
18.7.2011	13:26	InterCity	9	6	160	84,3	92,2	7,9
21.7.2011	13:30	InterCity	9	6	155	84,6	93,1	8,5
25.7.2011	13:26	InterCity	9	6	157	83,8	92,4	8,6

Keskiarvo	143	82,2	90,2	8,0
Keskihajonta	18	1,9	2,4	0,7

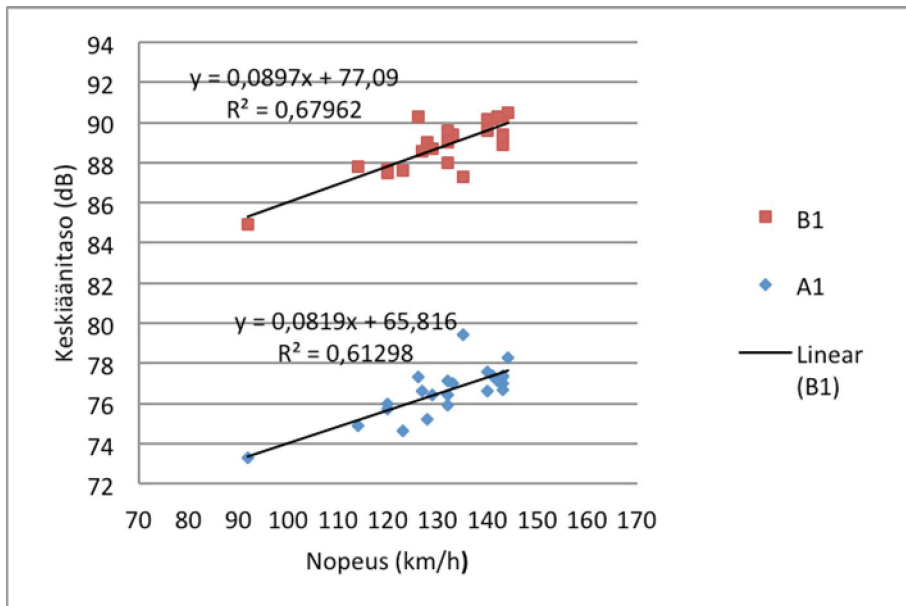
Taulukko 8. Länsiraidetta käyttäneiden junien ohiajojen keskiäänitasot. Tarkastelupisteiden etäisyys itäraiteen keskilinjasta 25 metriä.

Päivämäärä	Kello	Juna	Vaunuja	Keskiäänitason määritysjakson pituus (s)	Nopeus (km/h)	A-painotettu keskiäänitaso tarkastelupisteessä (dB)		Vaimennus (dB)
						A2 (meluste)	B2 (ei meluestettä)	
27.7.2011	10:17	Sm4	2	2	133	74,8	78,9	4,1
27.7.2011	13:12	Sm4	2	2	118	72,6	77,9	5,3
1.8.2011	10:13	Sm4	2	2	118	72,9	79,0	6,1
1.8.2011	14:13	Sm4	2	2	114	71,9	77,8	5,9
Keskiarvo					121	73,1	78,4	5,4
Keskihajonta					7	1,1	0,6	0,8
27.7.2011	9:18	Sm4	4	3	155	78,3	82,5	4,2
27.7.2011	11:17	Sm4	4	3	131	75,8	80,9	5,1
27.7.2011	12:45	Sm4	4	3	129	75,4	81,3	5,9
1.8.2011	10:45	Sm4	4	3	128	75,7	81,8	6,1
1.8.2011	11:18	Sm4	4	3	132	74,7	80,6	5,9
1.8.2011	11:50	Sm4	4	3	125	75,2	81,9	6,7
1.8.2011	12:16	Sm4	4	3	155	76,6	82,0	5,4
1.8.2011	13:16	Sm4	4	3	121	73,0	79,0	6,0
1.8.2011	14:17	Sm4	4	3	155	77,0	82,8	5,8
1.8.2011	14:44	Sm4	4	3	115	74,4	79,7	5,3
Keskiarvo					135	75,6	81,3	5,6
Keskihajonta					14	1,4	1,2	0,6
27.7.2011	13:46	Sm1/2	2	2	117	74,1	79,4	5,3
27.7.2011	9:44	Sm1/2	4	5	78	71,5	75,4	3,9
1.8.2011	9:46	Sm1/2	4	3	112	75,6	80,8	5,2
Keskiarvo					95	73,6	78,1	4,6
Keskihajonta					17	2,1	2,7	0,7
27.7.2011	12:27	InterCity2	4	4	130	78,1	83,1	5,0
1.8.2011	14:27	InterCity2	4	4	125	75,2	80,3	5,1
Keskiarvo					128	76,7	81,7	5,1
Keskihajonta					3	1,5	1,4	0,1
1.8.2011	9:28	InterCity	5	4	139	77,5	83,7	6,2
27.7.2011	10:27	InterCity	6	4	138	78,9	83,0	4,1
1.8.2011	11:25	InterCity	7	5	158	81,8	87,6	5,8
1.8.2011	11:35	InterCity	7	5	158	80,5	86,1	5,6
27.7.2011	13:25	InterCity	9	6	144	78,1	83,6	5,5
Keskiarvo					147	79,4	84,8	5,4
Keskihajonta					9	1,6	1,8	0,7
27.7.2011	10:04	Pendolino	6	4	142	79,2	83,4	4,2
27.7.2011	11:02	Pendolino	6	5	127	74,6	78,4	3,8
Keskiarvo					135	76,9	80,9	4,0
Keskihajonta					8	2,3	2,5	0,2

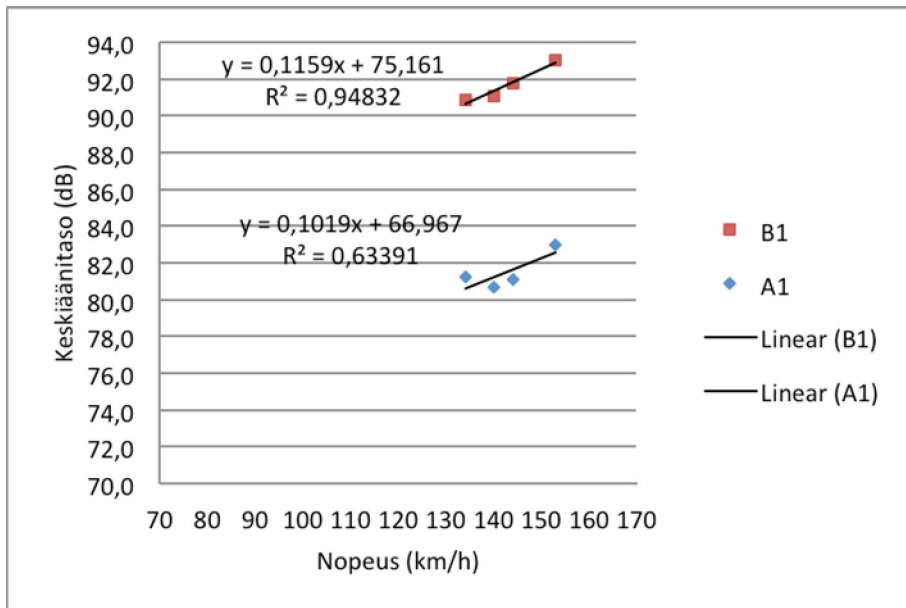
Kuva 1. Kahden vaunun Sm4-junien ohiajojen keskiäänitasot lähemmässä tarkastelupisteessä.



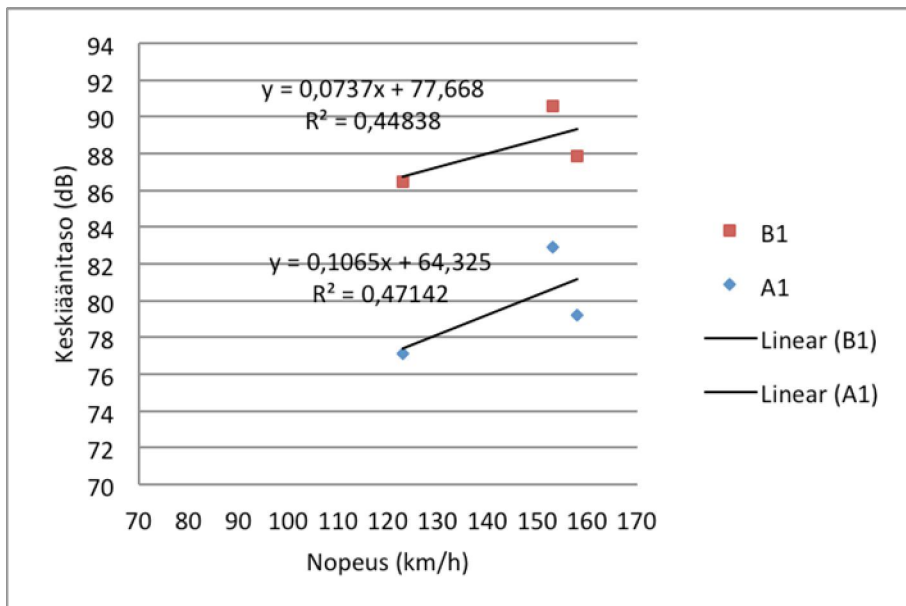
Kuva 2. Neljän vaunun Sm4-junien ohiajojen keskiäänitasot lähemmässä tarkastelupisteessä.



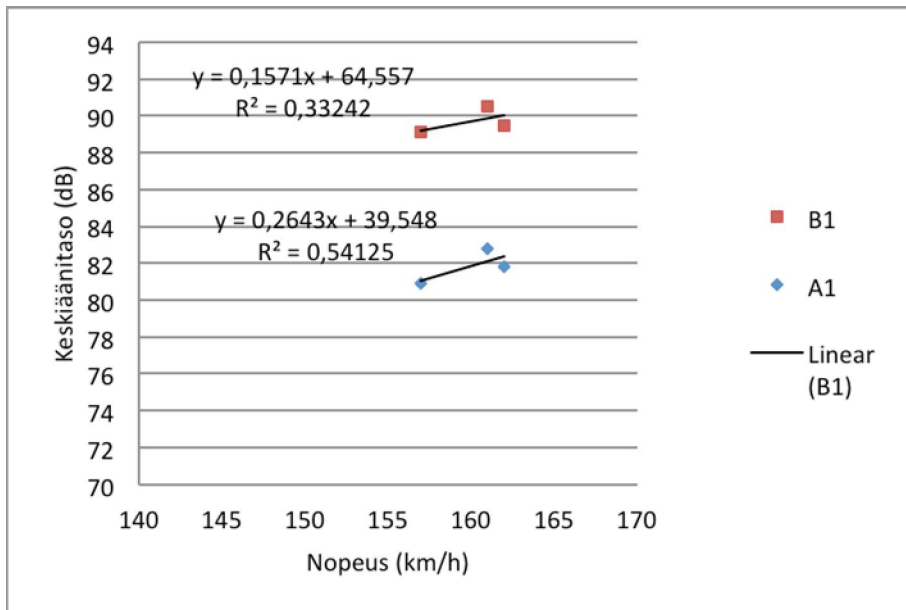
Kuva 3. Neljän vaunun InterCity-junien ohiajojen keskiäänitasot lähemmässä tarkastelupisteessä.



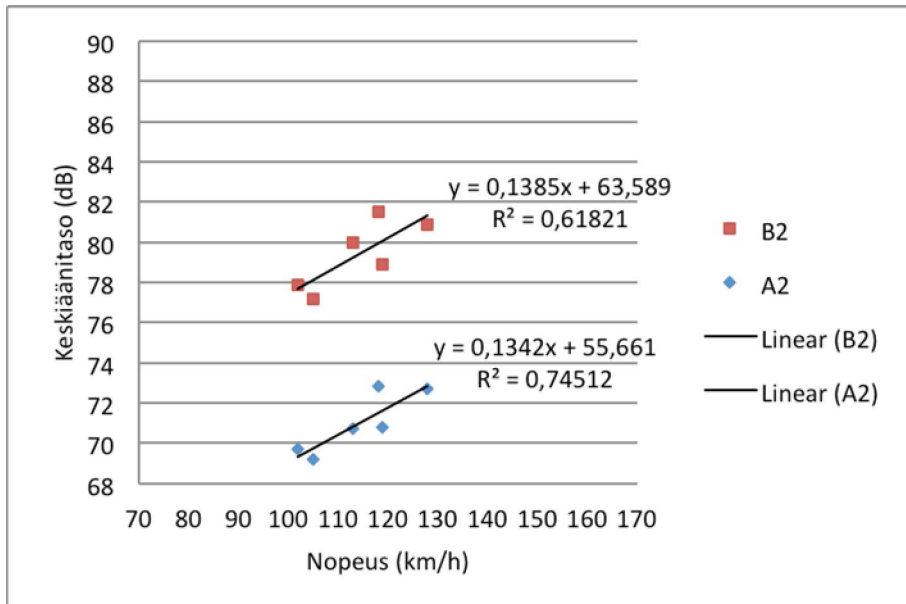
Kuva 4. Kuuden vaunun Pendolino-junien ohiajojen keskiäänitasot lähemmässä tarkastelupisteessä.



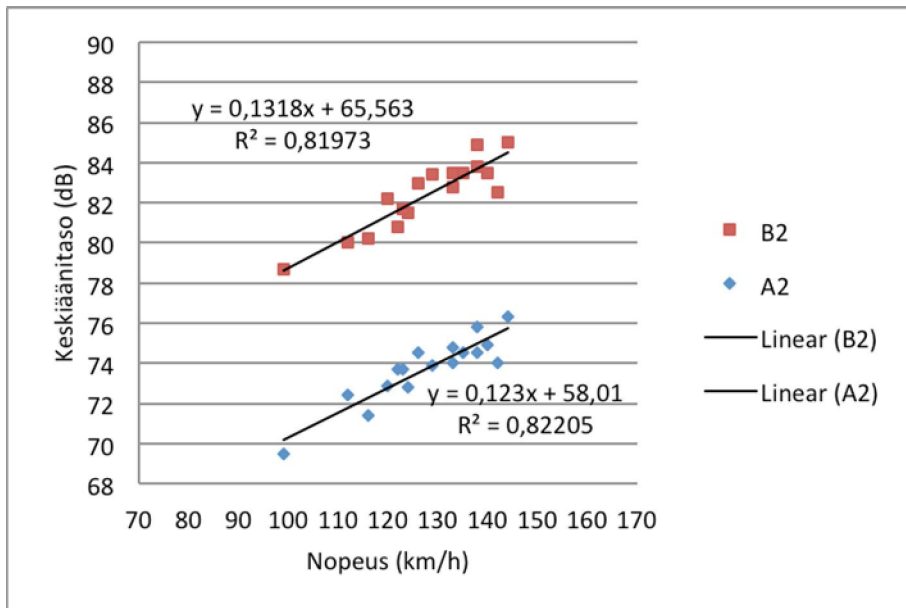
Kuva 5. Kahdentoista vaunun Pendolino-junien ohiajojen keskiäänitasot lähemmässä tarkastelupisteessä.



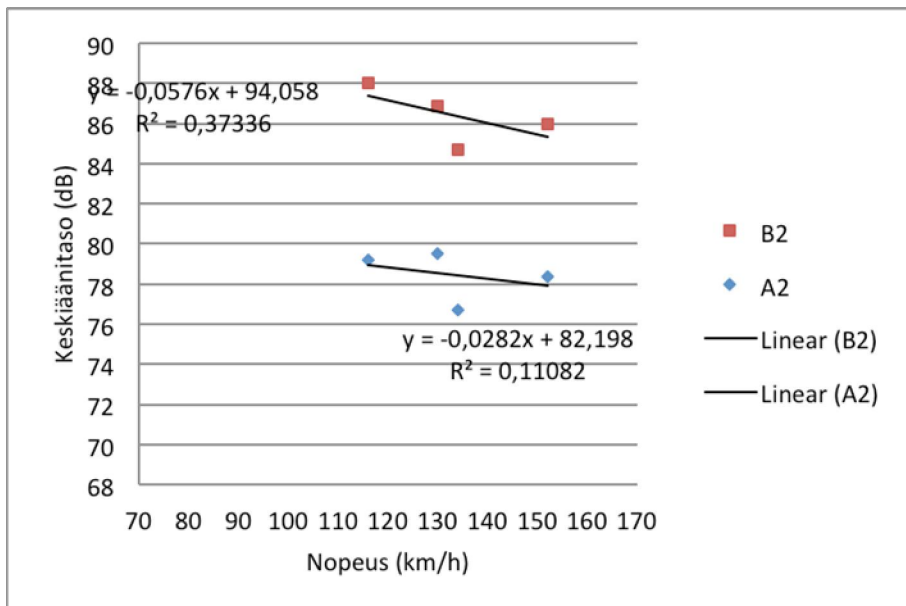
Kuva 6. Kahden vaunun Sm4-junien ohiajojen keskiäänitasot kauemmassa tarkastelupisteessä.



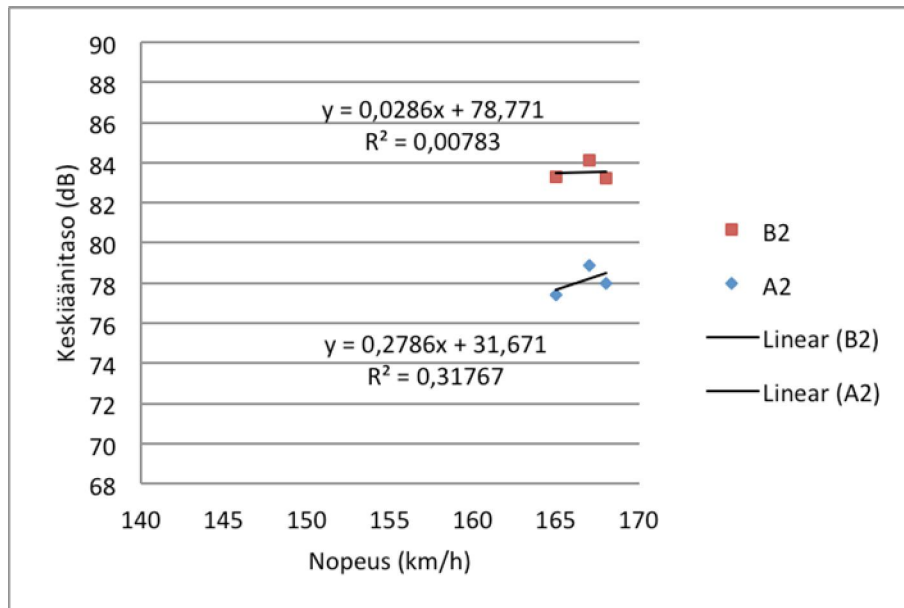
Kuva 7. Neljän vaunun Sm4-junien ohiajojen keskiäänitasot kauemmassa tarkastelupisteessä.



Kuva 8. Neljän vaunun InterCity-junien ohiajojen keskiäänitasot kauemmassa tarkastelupisteessä.



Kuva 9. Kuuden vaunun Pendolino-junien ohiajojen keskiäänitasot kauemmassa tarkastelupisteessä.



Liite E. Melunlaskentaohjelman tulokset

Taulukko 1. Junien ohiajojen enimmäistasot L_{maxM} . Tarkastelupisteiden etäisyys raiteen keskilinjasta 7,5 metriä ja korkeus kiskon selästä 1,2 metriä.

Juna	Vaunuja	Nopeus (km/h)	L_{maxM} (dB)		Vaimennus (dB)
			A1 (meluste)	B1 (ei meluestettä)	
Sm4	2	112	83,8	89,3	5,5
Sm4	2	118	84,6	89,9	5,3
Sm4	2	124	85,5	91,0	5,5
Sm4	2	117	84,6	89,9	5,3
Sm4	2	105	82,8	88,2	5,4
Sm4	2	119	84,6	90,1	5,5
Sm4	2	105	82,8	88,2	5,4
Sm4	2	107	83,0	88,5	5,5
Sm4	2	103	82,4	87,8	5,4
Sm4	2	122	85,1	90,8	5,7
Sm4	2	115	84,2	89,7	5,5
Sm4	4	133	87,6	92,7	5,1
Sm4	4	132	87,5	92,6	5,1
Sm4	4	92	81,5	86,4	4,9
Sm4	4	143	88,9	93,9	5,0
Sm4	4	120	85,8	90,8	5,0
Sm4	4	127	86,9	91,8	4,9
Sm4	4	120	85,8	90,8	5,0
Sm4	4	128	87,0	91,9	4,9
Sm4	4	143	88,9	93,9	5,0
Sm4	4	143	88,9	93,9	5,0
Sm4	4	126	86,7	91,7	5,0
Sm4	4	132	87,5	92,6	5,1
Sm4	4	129	87,1	92,0	4,9
Sm4	4	135	87,9	92,9	5,0
Sm4	4	141	88,7	93,6	4,9
Sm4	4	140	88,6	93,5	4,9
Sm4	4	114	85,0	89,9	4,9
Sm4	4	140	88,6	93,5	4,9
Sm4	4	132	87,5	92,6	5,1
Sm4	4	144	89,0	94,0	5,0
Sm4	4	142	88,8	93,8	5,0
Sm4	4	123	86,3	91,3	5,0
Sm4	4	143	88,9	93,9	5,0

Juna	Vaunuja	Nopeus (km/h)	$L_{\max M}$ (dB)		Vaimennus (dB)
			A1 (meluste)	B1 (ei meluestettä)	
Sm1/2	2	115	83,6	88,8	5,2
Sm1/2	2	120	83,9	89,2	5,3
Sm1/2	4	117	84,6	89,4	4,8
Sm1/2	4	118	84,8	89,5	4,7
InterCity2	4	134	87,4	91,8	4,4
InterCity2	4	153	89,6	94,0	4,4
InterCity2	4	140	88,1	92,4	4,3
InterCity2	4	144	88,6	92,9	4,3
Pendolino	6	123	84,7	88,7	4,0
Pendolino	6	158	88,2	92,1	3,9
Pendolino	6	153	87,7	91,7	4,0
Pendolino	12	162	88,7	92,5	3,8
Pendolino	12	161	88,7	92,5	3,8
Pendolino	12	157	88,3	92,1	3,8

Taulukko 2. Junien ohiajojen enimmäistasot $L_{\max M}$. Tarkastelupisteiden etäisyys raiteen keskilinjasta 25 metriä ja korkeus kiskon selästä 3,5 metriä.

Juna	Vaunuja	Nopeus (km/h)	$L_{\max M}$ (dB)		Vaimennus (dB)
			A2 (meluste)	B2 (ei meluestettä)	
Sm4	2	105	76,0	80,7	4,7
Sm4	2	128	79,2	84,1	4,9
Sm4	2	119	78,0	82,7	4,7
Sm4	2	118	77,8	82,7	4,9
Sm4	2	113	77,3	81,9	4,6
Sm4	2	102	75,6	80,2	4,6
Sm4	4	133	82,5	86,0	3,5
Sm4	4	116	80,4	83,7	3,3
Sm4	4	138	83,4	86,7	3,3
Sm4	4	122	81,2	84,5	3,3
Sm4	4	129	82,2	85,5	3,3
Sm4	4	142	83,9	87,2	3,3
Sm4	4	124	81,6	84,8	3,2
Sm4	4	140	83,6	87	3,4
Sm4	4	133	82,5	86	3,5
Sm4	4	123	81,4	84,7	3,3
Sm4	4	126	81,8	85,1	3,3
Sm4	4	120	80,8	84,3	3,5
Sm4	4	135	82,9	86,3	3,4

Sm4	4	99	77,7	80,9	3,2
Sm4	4	112	79,8	83	3,2
Juna	Vaunuja	Nopeus (km/h)	L _{maxM} (dB)		Vaimennus (dB)
			A2 (meluste)	B2 (ei meluestettä)	
Sm4	4	138	83,4	86,7	3,3
Sm4	4	144	84,1	87,4	3,3
Sm1/2	2	80	72,2	76,4	4,2
Sm1/2	4	120	79,7	83,0	3,3
Sm1/2	4	106	78,4	81,5	3,1
InterCity2	4	134	82,4	85,3	2,9
InterCity2	4	152	84,5	87,3	2,8
InterCity2	4	130	82,0	84,8	2,8
InterCity2	4	116	80,2	83,1	2,9
Pendolino	6	168	84,2	86,6	2,4
Pendolino	6	165	84,0	86,3	2,3
Pendolino	6	167	84,1	86,5	2,4
Pendolino	12	156	84,0	86,0	2,0