

Helsingin raitiovaunut Risteys- ja vaihdemelun mittaukset

Tapio Lahti



Helsingin raitiovaunut

Risteys- ja vaihdemelun mittaukset

tilaaja: Helsingin kaupunki, HKL-liikelaitos
tilaus: 4100017879, 3.10.2011
yhdyshenkilöt: Pentti Myllymäki, Jarno Portti

Tiivistelmä

Helsingin kaupungin ns. EU-meluselvitys tehdään vuoden 2012 alkupuoliskolla toisen kerran. Raitioliikenteen melu muodostaa osan selvityksen liikennemelun osuudesta. Raitiovaunujen melun keskeistä piirrettä, risteys- ja vaihdekolinan ei edellisellä kerralla otettu mukaan selvitykseen, koska siitä ei ollut mittaustietoja. Tämän vuoden selvitykseen kolina otettiin mukaan, ja laskennan lähtöarvojen saamiseksi oli tarpeen tehdä uusia melupäästömittauksia raitiotieverkon risteyskohteissa.

Tässä raportissa esitetään syksyllä ja talvella 2011–12 tehty risteys- ja vaihdekolinan melupäästötutkimus. Tavoitteena oli määrittää mittaamalla kolinan ja, mikäli mahdollista, myös kaarrekirskunnan melupäästöt siinä laajuudessa, että niitä voitiin käyttää EU-selvityksen mallilaskennan lähtötietoina. Mittauksia tehtiin yhdeksässä risteys- ja yhdellä kääntöpaikalla. Kelvollisia raitiovaunujen ohiajoja tallennettiin 190 kpl, ja niistä analysoitiin ohiajojen A-äänienergiatasot L_{QA} sekä keskimääräiset spektrit. Vaunujen nopeus risteyksissä mitattiin.

Tutkimuksen tuloksina esitetään risteysmelun melupäästöt eli äänienergiatasot L_{QA} eri vaunu- ja risteystyypeille nopeuden funktiona. Keskimäärin yhden ohituksen melupäästö oli **119 dB**. Tyypillisessä vaihteessa Variotram-vaunu osoittautui n. 3 dB meluisammaksi kuin nivelvaunutyyppit. Vaunujen tuottama äänienergia oli verrannollinen noin nopeuden potenssiin $2,4...3$; eli melupäästö riippui voimakkaasti nopeudesta. Havaittu keskinopeus risteyksissä oli 16 km/h. Jyrkän nopeusriippuvuuden takia nopeuden pienentäminen olisi tehokas meluntorjuntakeino. Kirskunnan esiintyminen osoittautui hyvin sattumanvaraiseksi. Tutkimuksen havainnoista ei ollut mahdollista muodostaa johdonmukaista tulosta kirskunnalle.

Sisällys

1	Johdanto	3
2	Raitiovaunut ja rataverkon risteykset	3
2.1	Vaunutyyppit	3
2.2	Vaunujen aikaisemmat melupäästötiedot	3
2.3	Raideristeystyyppit	4
3	Järjestelyt ja menetelmät	5
3.1	Mittauspaikat	5
3.2	Olosuhteet	6
3.3	Vaunujen nopeus	6
3.4	Tallennus ja analyysi	7
3.5	Melupäästön määrittäminen	7
3.6	Melupäästön käyttö melutason laskennassa	8
3.7	Tilastollinen käsittely	9
4	Tulokset	9
4.1	Risteysten melupäästöt, äänitasokäyrät ja spektrit	9
4.2	Melupäästöjen nopeusriippuvuus	10
5	Tulosten tarkastelu	12
5.1	Vaunutyyppit	12
5.2	Nopeus	13
5.3	Kaarrekirskunta	13
5.4	Hetkellinen enimmäismelu	14
5.5	Spektrien jatkokäyttö	14
	Viitteet	15
Liite A:	Mittauspaikat ja A-tasotulokset	
Liite B:	AF-äänitason käyriä	
Liite C:	Melupäästöjen spektrejä	

I Johdanto

EU:n ympäristömeludirektiivi ja ympäristönsuojelulaki [1, 2, 3] edellyttävät, että jäsenvaltiot laativat meluselvityksiä viiden vuoden välein. Selvitykset tehdään mm. suurimmista kaupungeista. Vuonna 2012 tämä ns. EU-meluselvitys tehdään toisen kerran, nyt vuoden 2011 melutilanteesta. Helsingin kaupunki oli mukana jo ensimmäisellä kerralla selvityksessä, joka tehtiin 2006–07 [4].

Yhtenä osana katuliikenteen melua selvityksiin sisältyy raitioliikenteen melu. Meluselvitysten laatimisen yleisohje, ns. "Good Practice Guide" [5], edellyttää, että raitiovaunujen risteys- ja vaihdekolina sekä kaarrekirskunta tulee sisällyttää melulaskentaan omina erillisinä melulähteinä.

Edellisellä kerralla näitä osameluja ei kuitenkaan otettu mukaan mallinnukseen, koska niistä ei ollut käytettävissä mitattuja melupäästötietoja. Jotta nämä osamelut voitaisiin sisällyttää tämän kertaiseen selvitykseen, katsottiin tarpeelliseksi tehdä niitä koskevia erillisiä uusia melupäästömittauksia.

Tässä raportissa esitetään syksyllä ja talvella 2011–12 tehty risteys- ja vaihdekolinan sekä kaarrekirskunnan melupäästötutkimus. Työ muodostaa taustatutkimuksen Helsingin raitioliikenteen EU-meluselvitykselle, joka raportoidaan viitteessä [6]. Tutkimuksen tavoitteena oli määrittää mittaamalla kolinan ja, mikäli mahdollista, kirskunnan melupäästöt siinä laajuudessa, että niistä saatiin riittävän edustavat tiedot käytettäväksi selvityksen mallilaskennan lähtötietoina.

2 Raitiovaunut ja rataverkon risteykset

2.1 Vaunutyyppit

Tällä hetkellä Helsingin raitiovaunukalusto koostuu pääosin kolmesta vaunutyyppistä

- vanha lyhyt nivelvaunu NRV I
- pidennetty (matalalla välisosalla jatkettu) nivelvaunu MLNRV II
- uudempi matalalattiavaunu eli Variotram

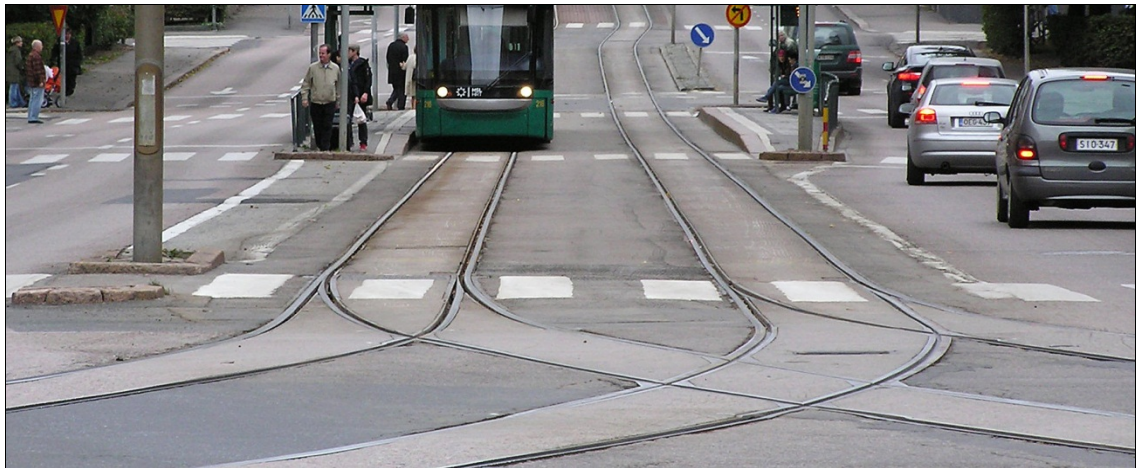
Matalalattiaisia Variotram-vaunuja on noin kolmasosa koko kalustosta (2011). Tässä tutkimuksessa mitatuista ohiajoista Variotramin ohituksia oli kuitenkin yli puolet.

2.2 Vaunujen aikaisemmat melupäästötiedot

Helsingin raitiovaunujen melusta tunnetaan ennalta melupäästö silloin, kun vaunut kulkevat suoralla ja sileällä rataosalla. Insinööritoimisto Akukon Oy on tehnyt mittauksia HKL:n toimeksiannoista vanhalle nivelvaunulle vuosina 1994–95 ja 2004. Mittauksia täydennettiin edellisen EU-meluselvityksen valmisteluvaiheessa syksyllä 2006 molemmille silloisille vaunutyypeille [7].

Vaunujen kahden perustyyppin melupäästöt olivat vuoden 2006 mittauksissa suoralla ja tasaisella raiteella sekä nimellisellä 50 km/h nopeudella seuraavat:

vanha nivelvaunu (Nr I ja Nr II)	$L_{WA} = 113 \text{ dB}$
uusi matalalattiavaunu (Variotram)	$L_{WA} = 109 \text{ dB}$



Kuva 1. Tyypillinen raitiotievaihte: ns. poikkeavat raiteet erkanevat kuvassa alas oikealle ja suoraan jatkavat raiteet kääntyvät hetkeä myöhemmin alas vasemmalle. Koko vaihteessa on kaikkiaan kymmenen mahdollista kolinamelun syntykohtaa. Kuvassa ylinnä on kussakin ylhäältä tulevassa kiskossa vaihteen kielisovituksen puolikas eli yhteensä neljä pistettä. Seuraavaksi kummassakin ajosuunnassa on yksi pikku- eli Y-ristikko, jossa on yksi risteyskappale, ja alinna keskellä on raideristeys, iso eli X-ristikko, jossa on neljä risteyskappaletta.

Vanha nivelvaunu oli tasaisella raiteella ajaessaan selvästi uutta Variotram-vaunua meluisampi. Tämä tieto näyttäisi olevan ristiriidassa sen yleisön keskuudessa tiettävästi vallitsevan subjektiivisen käsityksen kanssa, jonka mukaan Variotram olisi meluisampi kuin vanha vaunu.

EU-meluselvitysten raitioliikenteen melun peruslaskennat perustuivat sekä edellisellä että tällä selvityskerralla näihin melupäästötietoihin.

2.3 Raideristeystyyppit

Risteyskolinaa syntyy periaatteessa kaikissa raiteiden epäjatkuvuuskohdissa. Niiden perustyyppit ovat vaihde ja raideristeys [8]. Tyypillisessä yksinkertaisessa linjojen risteyskohdassa eli vaihteessa (kuva 1) esiintyy kahdenlaisia kiskojen risteämiä:

Y- eli pikkuristikko

Kun tarkastellaan vain yhteen suuntaan kulkevia raiteita kerrallaan, poikkeava raide erkanee suorasta raiteesta. Viitteen [8] terminologiaa soveltaen kyseessä on vaihteen perustyyppi, joka koostuu *syntyvän melun kannalta* kahdesta osasta: varsinaisesta vaihteesta (*kielisovitus*) ja ns. *pikkuristikosta*. Ristikon kohdalla poikkeavan raiteen ulompi kisko risteää suoran raiteen sisemmän kiskon kanssa.

Pikkuristikossa on yksi ns. *risteyskappale*. Tässä työssä tätä rakennetta kutsutaan *Y-ristikoksi*. Koko risteyksessä on kaksi Y-ristikkoa, yksi kummassakin kulkusuunnassa.

X- eli iso ristikko

Kun tarkastellaan vastakkaisiin suuntiin kulkevia raiteita, sisemmän suoraan jatkavan raiteen molemmat kiskot risteävät ulomman poikkeavan raiteen molempien kiskojen kanssa. Tämä kohta vaihteesta on ns. *iso ristikko*, jossa on yhteensä neljä risteyskappaletta. Tässä tutkimuksessa tätä rakennetta kutsutaan *X-ristikoksi*. Perusristeyksessä on siis yksi X-ristikko.

Lisäksi raitiotieverkolla voi esiintyä varsinaisia raideristeyksiä, joissa kaksi raidetta risteävät suurin piirtein suorassa kulmassa (ks. kansikuva). Tässä tutkimuksessa ison ristikon ja varsinaisen raideristeyksen välillä ei tehty eroa. Molemmat tulkittiin melun kannalta suunnilleen samanlaisiksi, sillä molemmissa on neljä risteyskappaletta eli kohtaa, joissa voi syntyä melua. Molempia kutsutaan tässä tutkimuksessa X-ristikoksi.

Perusvaihteen läpi kulkevilla raitiolinjoilla voi suunnasta riippuen olla seuraavia ristikkoyhdistelmiä: suoraan jatkava raidepari: $Y+X$ tai Y sekä poikkeava raidepari: Y tai $X+Y$.

Helsingin raitiotieverkossa risteysten kohdalla olevat epäjatkuvuuskohdat ylitetään seuraavasti: Kiskon uran pohja nousee epäjatkuvuuskohdan luona. Pyörän kehä, jonka varassa pyörä normaalisti kulkee kiskoa pitkin, nousee irti kiskosta. Pyörä siirtyy kulkemaan poikkeavan kiskon uran yli pyörän kehän sijasta urassa olevan laipan varassa. Tämä merkitsee samalla sitä, että melun syntykohta ei ole aivan pistemäinen (samaa tapaan kuin esimerkiksi rautateillä hitsaamattomien kiskojen saumakohdissa).

Tässä tutkimuksessa lähdettiin alunperin oletuksesta, että melua syntyy sekä varsinaisen vaihteen (kielisovitusten) kohdalla että ristikoissa. Jo tutkimukseen mukaan otettavien risteysten alustava tarkkailu kuitenkin osoitti, että valtaosa melusta syntyy ristikoiden kohdalla ja että kielisovitusten kohdat voidaan analyysissä jättää vähälle huomiolle. Myöskään ajosuunnalla eli ajolla ns. myötä- tai vastavaihteeseen ei havaittu olevan olennaista merkitystä melun synnyssä kielisovitusten kohdalla.

3 Järjestelyt ja menetelmät

3.1 Mittauspaikat

Tutkimuksen mittaussarjaan valittiin 10 kohdetta. Pyrkimyksenä oli koota edustava joukko keskenään erilaisia risteyskohtia, vaihteita ja kaarteita. Pääpaino oli risteys- ja vaihdekohteilla, koska kolinaa syntyy risteyskohtissa aina. Kaarrekirskunnan esiintymisen arvioitiin sen sijaan olevan harvinaisempaa ja sattumanvaraista. Risteyskohteita valittiin 9 kpl ja niitä täydensi yksi kääntöpaikkakohde. Kaarrekirskunnan esiintymistä tarkkailtiin kuitenkin myös kaikissa risteyskohteissa.

Tutkimuksen suurimman ongelman muodosti autojen aiheuttama taustamelu. Sen takia katsottiin, että suuri osa meluisimmista tai muuten kiinnostavista risteyskohtista täytyi hylätä. Tällä perusteella vaikeiksi tai sopimattomiksi mittauskohteiksi arvioitiin esimerkiksi Mannerheimintien, Kaisaniemenkadun, Hakaniemen, Hämeentien, Mäkelänkadun, Nordenskiöldinkadun ja Pasilan aseman risteyskohtat. Tästä huolimatta mukaan otettiin kuitenkin yksi erityisen hankala ja toinen hankalahkona pidetty risteys eli Oopperan ja Stockmannin risteyskohtat.

Autojen aiheuttamien häiriöiden minimointi oli syynä myös siihen, että useat mittauksista tehtiin lauantaina iltapäivällä tai sunnuntaina keskipäivällä. Näinä aikoina auto liikenteen määrä on selvästi pienempi kuin arkipäivänä.

Risteyskohtat ja mittausajankohdat on lueteltu taulukossa 1. Mittauspaikat ja -pisteet on esitetty liitteiden A karttakuvissa. Mittauspisteet olivat yleensä jalkakäytävällä raideristikon tai -ristikoiden kohdalla. Mittausetäisyydet olivat pienimmillään 14 m lähimmästä raideristikosta ja suurimmillaan 26 m kauimmasta raideristikosta tai -risteyskohtasta.

Taulukko 1. Mittauspaikat ja -ajat. Tunnus on tässä tutkimuksessa risteyksestä käytetty lyhyt nimi.

tunnus	risteys	aika	
Calonius	Runeberginkatu – Caloniuksenkatu – Museokatu	sunnuntai	2.10.2011
Ruusula	Runeberginkatu – Ruusulankatu	lauantai	15.10.2011
Brahe	Helsinginkatu – Läntinen Brahenkatu	”	15.10.2011
Kaarle	Helsinginkatu – Kaarlenkatu	lauantai	22.10.2011
Porthan	Porthaninkatu – Siltasaarenkatu – Toinen Linja	”	22.10.2011
Senaatti	Aleksanterinkatu – Snellmaninkatu – Katariinankatu	perjantai	4.11.2011
Ooppera	Mannerheimintie – Runeberginkatu – Helsinginkatu	perjantai	11.11.2011
Sture	Sturenkatu – Aleksis Kiven katu	”	11.11.2011
Stocka	Mannerheimintie – Aleksanterinkatu	sunnuntai	13.11.2011
kääntöpaikka			
Arabia	Kaj Franckin aukio (Arabiankatu – Kaj Franckin katu)	torstai	5.1.2012

3.2 Olosuhteet

Tallennusvaiheessa tavoitteena oli saada kussakin kohteessa hyvälaatuiset näytteet vähintään noin 10:stä häiriöttömästä ohiajosta ja vielä siten, että joukossa olisi kummas-takin perusvaunutyyppistä vähintään useita ohiajoja. Tallennettuja ohiajoja kertyi yhteensä 211 kpl.

Häiriöiden aiheuttajia olivat raitiovaunun ohiajon kuluessa lähellä liikkuvat autot. Jos auto ajoi raitiovaunun ja mikrofonin välistä, näyte hylättiin. Raitiovaunun takaa ajava kevyt auto ei yleensä aiheuttanut havaittavaa taustamelua. Mutta lähistöllä millä tahansa puolella liikkunut bussi tai muu raskas ajoneuvo aiheutti poikkeuksetta niin paljon melua, että tallenne hylättiin.

Hyväksytyjä ohiajoja oli 190 kpl. Useimmat hylkäykset koskivat Mannerheimintien Oopperan risteystä.

Hyväksytyissä ohiajoissa oli Variotram-vaunuja 102 kpl. Vanhoja lyhyitä nivelvaunuja oli 26 ja jatkettuja välipalavaunuja 59. Vanhoja saksalaisia vaunuja GT6 ”Mannheim” sattui mukaan ohiajoihin kolme näytettä. Määrä on liian pieni tilastolliseen käsittelyyn, ja siksi niiden melusta esitetäänkin tulosten tarkastelussa vain lyhyt kommentti.

Mittauksen aikana vallinneilla sääolosuhteilla ei ollut vaikutusta mittauksiin. Mittaus-etäisyydet olivat sään mahdollisten vaikutusten kannalta hyvin pieniä ja lisäksi kohteiden akustinen ympäristö oli poikkeuksetta kovapintaista, mikä myös merkitsee, että sään vaikutus on tältä osin vähäisimmillään.

3.3 Vaunujen nopeus

Vaunujen nopeus risteyskohdassa mitattiin sekuntikellolla. Kello käynnistettiin, kun vaunun etupää tuli merkittävimmän raideristikon kohdalle, ja pysäytettiin kun takapää ylitti sen. Kellon resoluutio oli 0,01 s ja ohitusajan mittauksen kokonaisepävarmuuden arvioitiin olleen enintään n. $\pm 0,2$ s. Tällä perusteella nopeuden epävarmuus oli enintään n. ± 1 km/h.

3.4 Tallennus ja analyysi

Äänipainesignaalit mittauspisteissä tallennettiin digitaalitallentimella. Tallennusvaiheessa äänitasomittari toimi tallentimen esivahvistimena. Laitteisto kalibroitiin ennen ja jälkeen mittauksen äänitasokalibraattorilla. Signaalitiedostot siirtyivät tallentimen muistista analyysiin käytettyyn tietokoneeseen digitaalimuodossa ilman muutoksia. Mittauksissa ja analysoinnissa käytetyt laitteet on lueteltu taulukossa 2.

Taulukko 2. Tärkeimmät mittalaitteet.

äänitasomittari	Brüel & Kjær	2235
kondensaattorimikrofoni	Brüel & Kjær	4155
digitaalitallennin	Olympus	LS-10
jälkikäsitteilyohjelma	Adobe	Audition CS 5.5
analyysiohjelma	Pioneer Hill	Spectra Plus 5.0

Hyväksytyille ohiajoille tehtiin analyysin aluksi äänipaineen A-äänialtistustason L_{AE} määrittäminen sekä painottamattoman äänialtistustason L_E taajuusanalyysi terssikaistoittain välillä 25 Hz – 10 kHz. Äänialtistustaso lasketaan analyysiohjelmassa äänipainesignaalin neliöstä $p^2(t)$ integroimalla melutapahtuman keston yli:

$$L_E = 10 \lg \int_{t_1}^{t_2} p^2(t) dt$$

missä t on aika, t_1 on tapahtuman alku- ja t_2 sen loppuhetki.

3.5 Melupäästön määrittäminen

Tämän tutkimuksen tulosten ensisijainen käyttötarkoitus on tarjota lähtötiedot melun laskentamalleilla tehtäviin melutason vyöhykelaskentoihin. Mallinnuksen lähtötiedoiksi tarvitaan melulähteiden melupäästöt ja laskentatuloksina saadaan tavallinen melutaso laskettavalla alueella tai tarkasteltavissa pisteissä.

Ohiajojen varsinainen melupäästö muodostettiin äänipainemittauksista soveltaen yleisiä (jatkuvan melun) melupäästön mittaamenetelmiä seuraavasti. Kun mallinnettava melutapahtuma eli ohiajo on ajallisesti rajoitettu eli lyhytaikainen, melulähteenä toimivan risteyskohdan melupäästö on määriteltävä lähteen *äänienergiatasona* (L_{QA}).

Analyysin raakatuloksena saatu melutasosuure oli äänialtistustaso L_{AE} tavallisen melutason eli ekvivalentin äänitason L_{Aeq} sijasta, jolloin tulossuure on äänienergiataso L_{QA} tavallisen melupäästösuureen, äänitehotason L_{WA} sijasta. Tarkemmin tuloksina saatiin kolinatapahtumien melun äänienergiatasot kokonais-A-tasoina L_{QA} ja terssispektreittäin $L_Q(f)$.

Yksinkertaistaen äänienergiataso saadaan äänialtistustasosta kaavalla

$$L_{QA} = L_{AE} + 10 \lg 2\pi r^2$$

jossa r on mittausetäisyys.

Äänienergiataso saa tavalliseen melutasoon eli A-äänipainetasoon (L_{pA} tai L_{Aeq}) verrattuna huomattavasti suurempia lukuarvoja. Tässä tapauksessa äänienergiataso kaikki lukuarvot olivat selvästi yli 100 dB.

3.6 Melupäästön käyttö melutason laskennassa

Tämän tutkimuksen päätavoite oli määrittää mittaamalla raitiovaunujen melupäästöt risteyskohdissa. Syy siihen, miksi ei vain tyydytty mittaamaan tavallisia melutasoja, on seuraava:

- Tavallinen melutaso liittyy pelkästään mittauspisteeseen; se on melulähteen ja melun leviämistapahtuman yhteinen ominaisuus. Melutaso riippuu melulähteen ohella mm. etäisyydestä mittauspisteeseen ja mittauspaikan akustisesta ympäristöstä. Melutason mittaustulosta ei voi suoraan yleistää muihin kohteisiin ja muille etäisyyksille.
- Melupäästö on melulähteen oma ominaisuus, tässä tapauksessa siis raitiovaunu+risteys -yhdistelmän ominaisuus. Sen avulla melulähteen tuottama melutaso voidaan yleistää mittauspisteestä muille etäisyyksille ja muihin kohteisiin. Yleistäminen tehdään melulaskentamallia käyttäen.

Kun melupäästöä lasketaan tarkastelupisteen tavallinen melutaso, tässä raitiovaunukolman tapauksessa Suomessa käytetään yleistä yhteispohjoismaista ympäristömelun laskentamallia [9]. Karkeasti yksinkertaistaen laskenta tapahtuu seuraavasti:

Oletetaan, että risteys ohittaa laskettavana ajanjaksona (esimerkiksi vakiopäivän klo 7–22 aikana) N kpl samanlaisia vaunuja, joiden tuottaman kolman melupäästö risteyskohdalla on L_{QA} . Oletetaan lisäksi, että ohiajot tapahtuvat melupäästöä vastaavalla nimellisuopeudella. Koko päivän tavallinen melutaso eli äänipaineen A-keskiäänitaso $L_{Aeq,d}$ pisteessä, joka on etäisyydellä r risteyskseen, on

$$L_{Aeq,d} = L_{QA} - 10 \lg 2\pi r^2 + 10 \lg N - 10 \lg T \quad [\text{dB}]$$

missä T on päivän kesto sekunteina ($15 \text{ h} = 54\,000 \text{ s}$). Laskentamallia tarvitaan ennen kaikkea siihen, että melun leviämistä yhtälössä edustava pelkistetty termi $10 \lg 2\pi r^2$ on todellisuudessa huomattavasti mutkikkaampi.

Numeerinen esimerkki:

Oletetaan, että risteys ohittaa päivän aikana 200 Variotram-vaunua. Vaunujen nimellinen nopeus on 10 km/h . Risteyskseen on vain yksi X-ristikko. Melun tarkastelupiste on lähimmän asuintalon julkisivulla 30 m etäisyydellä ristikosta. Yhden Variotramin melupäästö eli äänienergiataso L_{QA} on X-ristikossa ja nimellisuopeudella 112 dB (ks. taulukko 5).

Sijoitetaan lukuarvot yhtälöön:

$$\begin{aligned} L_{Aeq,d} &= 112 - 10 \lg 2\pi - 20 \lg 30 + 10 \lg 200 - 10 \lg 54000 \quad [\text{dB}] \\ &= 112 - 8 - 29,5 + 23 - 47,3 \\ &= 50 \text{ dB} \end{aligned}$$

Todellisessa tilanteessa tärkein ero tähän yksinkertaistettuun laskuesimerkkiin on, että akustinen ympäristö on mutkikkaampi, mm. rakennusten seinistä tapahtuvat heijastukset vahvistavat kokonaismelua. Muita eroja ovat, että risteyskseen on yleensä useampia kuin yksi ristikko ja että vaunujen nopeus on suurempi, jolloin melupäästökin on suurempi.

3.7 Tilastollinen käsittely

Ohiajojen melupäästöanalyysin jälkeen tulokset jaoteltiin risteysittain sekä vaunu- ja ristikkotyypeittäin, säilyttäen jokaisen ohitustapahtuman kytkös siihen liittyvään nopeustietoon. Kuten edellä kohdassa 2.3 todettiin, eri luokkien lukumäärän supistamiseksi päätettiin yhdistää ison ristikon ja varsinaisen raideristikon tulokset yhdeksi luokaksi, joka nimettiin X-ristikoksi.

Risteyskohtaisten ohiajojen keskimääräiset kokonaistulokset laskettiin per ohiajon kokonaismelu, riippumatta siitä, montako raideristikkoa risteysen eri kulkusuunta- ja reittivaihtoehtoisissa oli. Vaunu+ristikko -yhdistelmien jakautumat ja keskimääräiset tulokset laskettiin sen sijaan per raideristikko. Jos risteysen tietyllä kulkureitillä oli useampia kuin yksi ristikko, äänienergia jaettiin ristikoiden lukumäärällä ennen regressioiden tai keskiarvojen muodostamista.

Koska tarkasteltava perussuure oli äänienergia, keskiarvot laskettiin energiakeskiarvoina.

Melupäästön nopeusriippuvuudet analysoitiin tekemällä vaunu+ristikko -yhdistelmien jakautumille logaritminen regressioanalyysi. Toisin sanoen regressioanalyysi oli tavallinen lineaarinen, kun vaaka- eli nopeusakseli oli ensin muutettu logaritmiseksi.

Arabian kääntöpaikalla melu ei syntynyt epäjatkuvuuskohdissa, vaan jatkuvasti ja suhteellisen tasaisesti koko kääntöympyrän kaarella. Tässä tapauksessa äänienergiataso ei ole sopivin tulosten esittämistapa, vaan jatkuvan melun tavallinen melupäästö eli ääni-tehotaso L_{WA} on luontevampi.

4 Tulokset

4.1 Risteysten melupäästöt, äänitasokäyrät ja spektrit

Risteyksissä mitattujen ohiajojen kokonaismelupäästöt (keskimääräiset A-äänienergiatasot L_{QA}) sekä vaunu- ja ristikkotyypin melupäästöjen jakautumat nopeuden funktiona on esitetty risteyskohtaisissa liitteissä A1–A10. Risteysien yhdellä luvulla ilmoitettavat kokonaismelupäästöt on lisäksi koottu taulukkoon 3.

Taulukossa 4 on esitetty vaunujen ja risteystyyppien keskimääräiset melupäästöt laskettuna ohiajokohtaisista päästöistä. Tämän taulukon tuloksia käytettiin EU-selvityksen laskennan lähtöarvoina.

Liitteissä B on esitetty esimerkkejä melun liukuvan A-taajuuspainotetun ja F-aikapainotetun äänipainetason eli lyhyesti AF-äänitason $L_{AF}(t)$ käyrästä. Näillä käyrillä ei ole tulosten jatkokäytön kannalta merkitystä. Sen sijaan ne tarjoavat kvalitatiivista eli laadullista lisäinformaatiota ohiajojen melutapahtumien luonteesta ja risteysten lähellä esiintyvistä enimmäismelusta. A- ja F-painotukset vastaavat hyvin ihmisen kuuloaistin toimintaa spektrin ja ajallisten vaihteluiden suhteen.

Liitteissä C on esitetty keskimääräisiä äänienergiatason terssispektrejä: tämän tutkimuksen koko aineiston keskimääräinen spektri sekä vaunu+ristikko -yhdistelmien melun spektrejä. Lisäksi liitteessä C3 on kaksi esimerkkiä kaarrekiiskunnan spektreistä.

Taulukko 3. Melupäästöjen risteyskohtaiset keskimääräiset kokonaistulokset, risteyksille äänienergiataso L_{QA} , kääntöpaikalle äänitehotaso L_{WA} ; melupäästöt per ohiajo.

risteys	ohiajoja N	keskinopeus v, km/h	melupäästö L_{QA} , dB
Calonius	27	18	119
Ruusula	13	19	119
Brahe	19	15	119
Kaarle	23	15	117
Porthan	20	16	117
Senaatti	38	13	116
Ooppera	17	15	121
Sture	12	17	122
Stocka	13	17	120
kaikki risteykset yht.	182	16	119
kääntöpaikka			L_{WA} , dB
Arabia	8	12	102

Taulukko 4. Vaunujen ja risteystyyppien keskimääräinen melupäästö (A-äänienergiataso L_{QA}); melupäästöt per ohiajo.

vaunu	risteys	ohiajoja N	keskinopeus v, km/h	melupäästö L_{QA} , dB
v	lyhyt nivelvaunu	X	18	118
”	”	Y	8	115
w	pitkä nivelvaunu	X	47	118
”	”	Y	9	116
m	Variotram-vaunu	X	62	121
”	”	Y	33	114

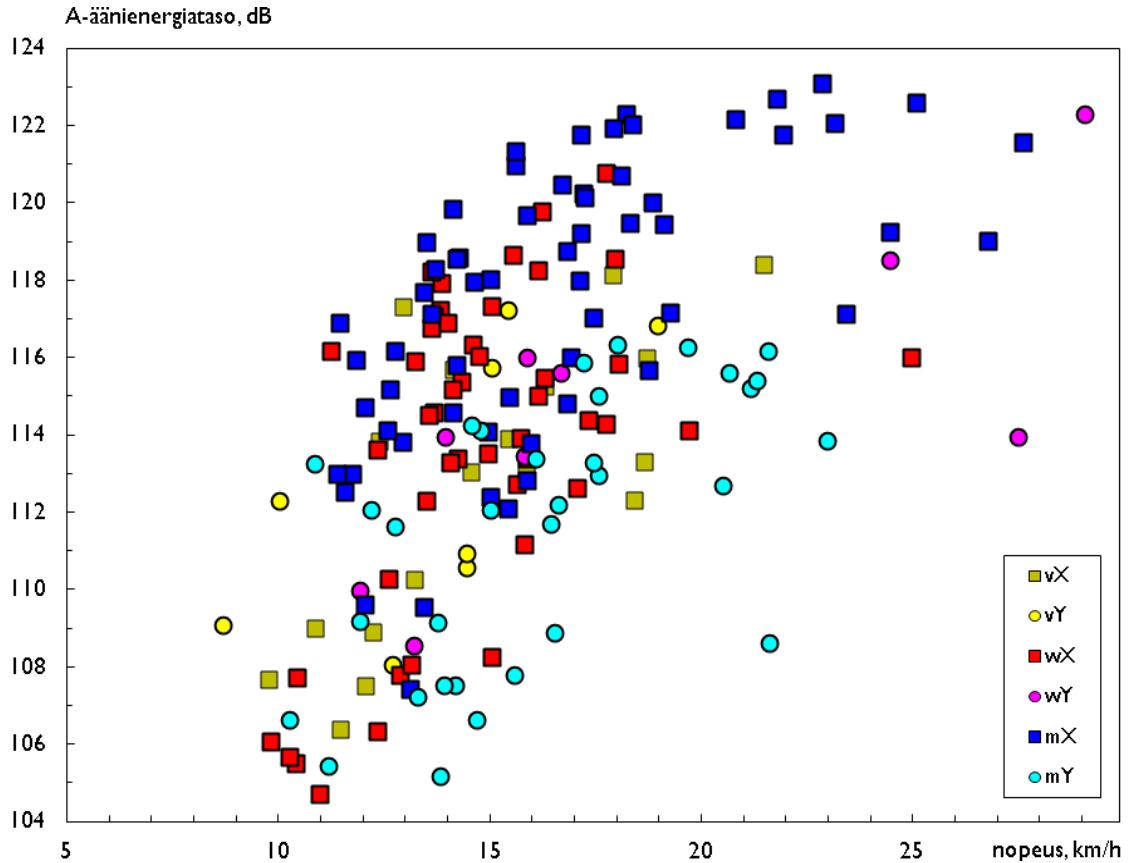
4.2 Melupäästöjen nopeusriippuvuus

Tutkimuksen kaikki A-äänienergiatasojen L_{QA} nopeusjakautumien tulokset on esitetty koottuna yhteen kaavioon kuvassa 2.

Kuvasta nähdään ristikkokohtaisten melupäästöjen ja risteysten kohdalla mitattujen nopeuksien vaihteluvälit: A-äänienergiatasot vaihtelivat välillä 105 –123 dB ja nopeudet välillä 9 – 29 km/h. Satunnaisvaihtelu oli varsin suurta, mutta vaunu- ja ristikkotyyppien meluisuudessa voidaan kuitenkin havaita selviä systemaattisia eroja.

Nopeusriippuvuuden logaritmisien regressioanalyysin tulokset kuvassa 3 esittävät näitä eroja kvantitatiivisesti. Käyräsovituksen matemaattiset esitykset on lisäksi koottu taulukkoon 5.

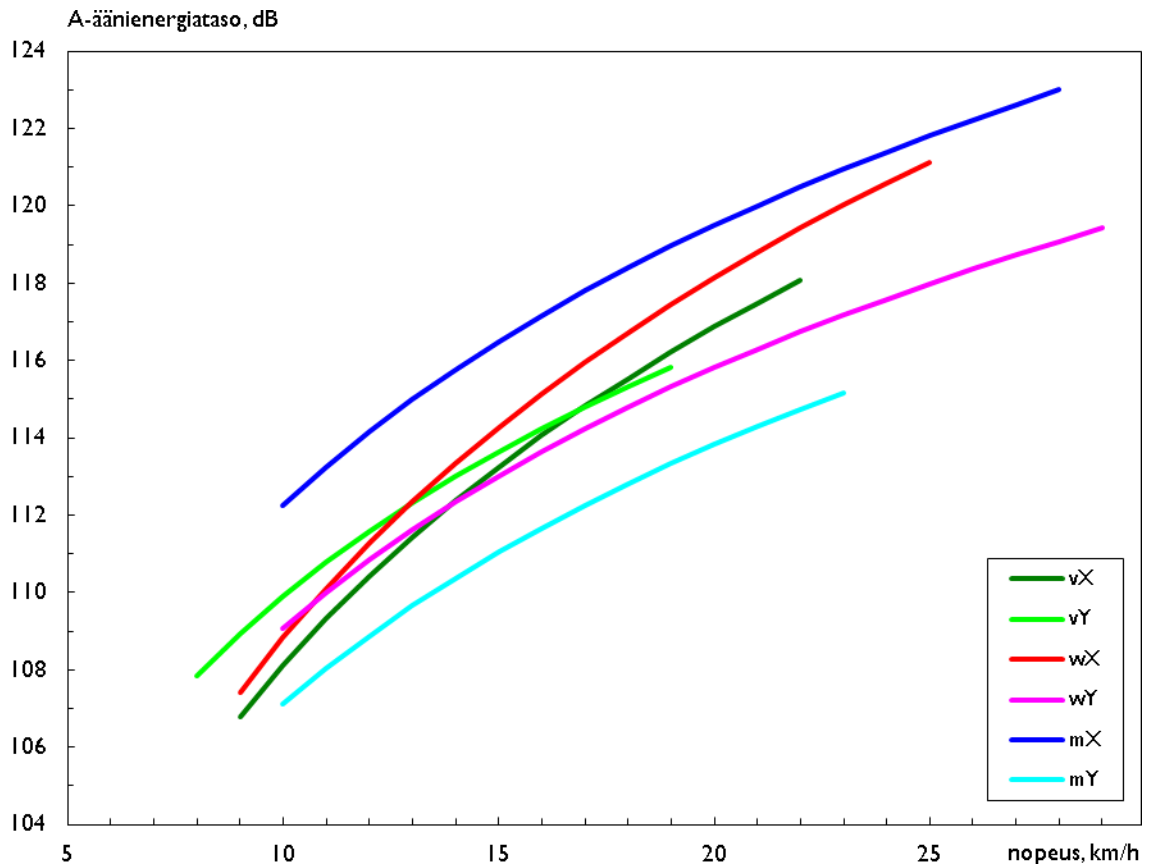
Kuvan 3 käyrät ja taulukon 5 yhtälöt ovat tämän tutkimuksen lopputulos. Niistä nähdään, mikä on vaunujen ja risteysten keskimääräinen melupäästö, jos vaunut kulkevat nimellistä 10 km/h nopeutta, ja miten päästö muuttuu, jos vaunut liikkuvat nopeammin.



Kuva 2. Kaikki 182 risteysten melupäästön ristikkokohtaista tulosta koottuna samaan kaavioon. A-äänienergiataso L_{QA} nopeuden funktiona, parametrina vaunu- ja ristikkotyyppi. Melupäästöt per raideristikko.

Taulukko 5. Kuvan 2 melupäästöaineiston logaritmisen regressioanalyysin ja kuvan 3 sovitettujen käyrien matemaattinen esitys. Käyräsovituksen yhtälöiden ensimmäinen termi on melupäästö (A-äänienergiataso L_{QA}) nimellisellä nopeudella 10 km/h ja toinen termi melupäästön riippuvuus nopeudesta v [km/h].

vaunu		ristikko	N	käyräsovitus [dB]
v	lyhyt nivelvaunu	X	18	$L_{QA} = 108 + 29 \lg(v/10)$
”	”	Y	8	$L_{QA} = 110 + 21 \lg(v/10)$
w	pitkä nivelvaunu	X	47	$L_{QA} = 109 + 31 \lg(v/10)$
”	”	Y	9	$L_{QA} = 109 + 22 \lg(v/10)$
m	Variotram-vaunu	X	62	$L_{QA} = 112 + 24 \lg(v/10)$
”	”	Y	33	$L_{QA} = 107 + 22 \lg(v/10)$



Kuva 3. Melupäästön vaunu- ja ristikkokohtaisten nopeusriippuvuuksien logaritminen regressioanalyysi. A-äänienergiataso L_{QA} nopeuden funktiona, parametrina vaunu- ja ristikkotyyppi.

5 Tulosten tarkastelu

5.1 Vaunutyytit

Variotram on X-ristikon kohdalla selvästi, keskimäärin noin 3 dB meluisampi kuin vanhat nivelvaunut. Tässä on ilmeisesti selitys sille, miksi yleisö pitää matalalattiavaunua meluisampana kuin vanhaa vaunua. Suoran sileän rataosan pienemmällä melupäästöllä ei ole merkitystä, vaan kokonaiskäsitys meluisuudesta on syntynyt risteyskolinan perusteella.

Y-ristikossa Variotram näyttäisi päinvastoin olevan vaunuista hiljaisiin. Tosin nivelvaunujen Y-ristikko-ohitusten lukumäärät olivat melko pieniä, jolloin niiden tilastollinen merkitsevyyskin on heikompi.

Variotramin kolinan äänienergia näyttäisi suurinpiirtein vastaavan suoraan ristikoissa olevien risteyskappaleiden lukumäärää. Sen sijaan nivelvaunujen kolina näyttäisi riippuvan selvästi heikommin risteyskappaleiden määrästä, eli X- ja Y-ristikoiden melu on nivelvaunuilla lähempänä toisiaan, ainakin nopeusalueella 10 – 15 km/h.

Vanhan saksalaisen ”Mannheim”-vaunun ohiajoja sattui tallennuksiin kolme kappaletta, risteyksissä Kaarle ja Porthan. Näissä havaituissa tapauksissa vaunujen melupäästö oli hyvin pieni.

Subjektiiivisesti eli kuulonvaraisesti arvioituna vaunutyyppien risteyskolinan välillä on selvä laadullinen eli äänen luonteeseen liittyvä ero.

- vanhan nivelvaunun melu kuulostaa ”tukevasti kolisevalta” mutta samalla sävyltään ”ontolta”.
- uuden Variotram-vaunun melu kuulostaa ”helisevältä” tai ”rämisevältä”.

Samantapainen ero oli havaittavissa myös suoralla sileällä rataosalla syntyvän vierintämelun kohdalla [7]. Äänenvärien erot voitaneen liittää melun spektreihin. ”Onttous” on suoraan seurausta vanhan nivelvaunun spektreissä näkyvästä kuopasta taajuusalueella 80 – 200 Hz. Variotram-vaunun melun spektri on tasainen ja pienille taajuuksille päin lievästi nouseva.

Vaunutyyppien väliset äänensävyjen erot ilmeisesti selittyvät telien ja niiden lähellä olevien muiden rakenneosien kykyyn säteillä eritaajuisia ääniä, riippumatta siitä, mikä on äänen syntyyn johtanut mekanismi (kuten pyörän tasainen vieriminen tai risteyskosen epäjatkuvuuskohdat).

5.2 Nopeusriippuvuus

Vaunujen risteyskolinan melupäästö riippuu voimakkaasti nopeudesta. Taulukon 5 yhtälöiden perusteella Variotram-vaunun X-ristikoissa syntyvän kolinan äänienergia on verrannollinen nopeuden potenssiin 2,4 ja nivelvaunujen noin nopeuden potenssiin 3. Y-ristikoissa nopeusriippuvuudet ovat hieman pienempiä. Tämän tutkimuksen tuloksena on siten saatu konkreettiset lukuarvot sinänsä laadullisesti jo muuten hyvin ymmärretylle riippuvuudelle.

Helsingin raitioliikenteen sisäisiin ohjeisiin tiettävästi sisältyy 10 km/h nopeusrajoitus vaihteissa ja risteyksissä [8]. Tämän tutkimuksen nopeusmittaukset osoittivat, että vaunut liikkuvat risteyksissä keskimäärin selvästi suuremmalla nopeudella. Ohiajoja, joiden nopeus mitattiin, oli yhteensä 211. Niistä vain neljässä nopeus oli alle 10 km/h. Keskinopeus oli 16 km/h ja suurin mitattu nopeus 29 km/h.

Taulukon 5 perusteella voidaan välittömästi todeta, että jos vaunut olisivat keskimäärin liikkuneet toteutuneen nopeuden sijasta nimellisoikeudella 10 km/h, raitioliikenteen melu olisi risteysten lähialueilla ollut noin **6 dB** alhaisempaa. Tämän suuruinen parannus melutilanteeseen olisi erittäin merkittävä.

Eri vaunutyyppien välillä oli havaittavissa pieniä eroja siinä, miten paljon nopeuden alentaminen vähentäisi melua. Matalalattiaisen Variotramin melu on vähiten herkkä nopeuden muutoksille. Vaunu kolisee suhteellisen voimakkaasti X-tyyppisissä ristikoiden myös pienillä nopeuksilla. Sen sijaan molempien nivelvaunutyyppien melu risteyskosen riippuu jyrkemmin nopeudesta eli varsinkin näiden vaunujen on edullista ajaa ristikoiden yli pienellä nopeudella.

5.3 Kaarrekirskunta

Kirskunnan esiintyminen oli hyvin sattumanvaraista. Näennäisesti hyvinkin samanlaiset ohiajot joko synnyttivät kirskuntaa tai huomattavastikin useammin eivät synnyttäneet. Tämän tutkimuksen havainnoista ei ollut mahdollista muodostaa mitään johdonmukaista tulosta kirskunnalle. Vain esimerkkejä ilmitulleista tapauksista esitetään liitteissä.

Risteyskohteissa oli yhteensä 10 ohiajajaa, joissa esiintyi varsinaista kirs kuntaa. Tapauksista 9 oli nivelvaunun ja yksi Variotram-vaunun aiheuttamia. Jälkimmäisten pienempi alttius kirs kunnalle johtuu siitä, että niiden pyörillä on jokaisella oma moottorinsa, jolloin sisä- ja ulkokaarten pyörät voivat pyöriä eri nopeuksilla. Nivelvaunujen pyöräkerroissa on kiinteät akselit, mikä johtaa helpommin kirs kuntaa synnyttävään pyörien liikkeeseen.

Liitteen C3 spektreissä kirs kunta erottuu erittäin korkeina piikkeinä kahdella taajuuskaistalla. Kuvan C3a esimerkissä taajuudet ovat 500 Hz ja 1,25 kHz ja kuvan C3b tapauksessa 1,25 kHz ja 2 kHz.

Arabian kääntöpaikkakohteessa esiintyi lievää ajoittaista kirs kuntaa molemmilla vau nutyypeillä ja lukumääräisesti neljässä tapauksessa kahdeksasta. Kun kirs kuntaa esiin tyi, melu oli keskimäärin 5 dB voimakkaampaa kuin ilman sitä.

5.4 Hetkellinen enimmäismelu

Liitteen B liukuvan AF-äänitason käyristä nähdään, mitä suuruusluokkaa tavallinen kuultava melutaso on risteysten luona, mittauspisteiden etäisyydellä. Pisteet olivat yleensä jalkakäytävällä, joten esimerkkikäyrät edustavat sellaisinaan jalankulkijan kuulemaa melua.

Molempien vaunujen päätyyppien melutaso oli samaa luokkaa ja kävi suurimmillaan noin 80 – 85 dB välillä ristikoissa Y ja X. Sen sijaan jos risteyksessä on useita perättäisiä X-ristikoita (joista kuvien B1c ja B2c esimerkeissä kaksi ristikkoo ovat suorakulmaisia raideristeyksiä), Variotram on vaunuista selvästi meluisampi. Sen melu kävi tyypillisesti yli 85 dB tasolla, kun pitkän nivelvaunun melu pysyi yleensä alle 80 dB.

Voimakas kaarrekirs kunta on enimmäismelutasoltaan omaa luokkaansa. Liitteen B3 esimerkeissä maksimimelutaso on noin 95 dB tienoilla.

5.5 Spektrien jatkokäyttö

Spektrianalyysin tuloksia eli liitteen C terssispektrejä voidaan myöhemmin haluttaessa käyttää liikennemelun ja rakennusten julkisivujen äänieristyksen arvioinnissa. Tässä yhteydessä olennainen tieto koskee raitiovaunujen kolinamelun spektrin muotoa.

Äänieristyksen arvioinnissa raitiovaunuja ei tule sijoittaa samaan ryhmään autoliikenteen kanssa. Katuliikenteen äänieristystä arvioidaan käyttäen kansainvälisen standardin ISO 717 spektritermiä C_{tr} . Helsingin raitiovaunujen melu kuuluu autoliikenteestä poiketen selvästi toiseen eli spektritermin C ryhmään. Tämä merkitsee sitä, että rakennusten julkisivujen tavanomaiset rakenteet eristävät risteyskolinan melua selvästi paremmin kuin autoliikenteen melua. Tätä tietoa ei ole aikaisemmin ollut käytettävissä.

Kuvien ja liitteiden lyhenteiden selitykset

m	matalalattiavaunu eli Variotram
v	lyhyt (vanha) nivelvaunu NRV I
w	pidennetty (välíosalla varustettu) nivelvaunu MLNRV II
X	kahden raiteen risteys: varsinainen raideristeys tai iso ristikko, joissa neljä risteyskappaletta, taikka pikkuristikon ja ison ristikon yhdistelmä, jossa yhteensä viisi risteyskappaletta
Y	pikkuristikko, jossa vaihteen lisäksi vain toisessa kiskossa yksi risteyskappale

Viitteet

1. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi **2002/49/EY** ympäristömelun arvioinnista ja hallinnasta. EYVL L 189, 18.7.2002, s. 12.
2. Laki ympäristönsuojelulain muuttamisesta (**459/2004**). Helsinki 2004.
3. Valtioneuvoston asetus Euroopan yhteisön edellyttämistä meluselvityksistä ja meluntorjunnan toimintasuunnitelmista (**801/2004**). Helsinki 2004.
4. LAHTI T, GOUATARBÈS B & MARKULA T, Helsingin kaupungin meluselvitys 2007. *Helsingin kaupungin ympäristökeskuksen julkaisuja 6/2007*. Helsinki 2007. 26 s + liitt.
5. Good practice guide for strategic noise mapping and the production of associated data on noise exposure. Position paper, final draft, version 2, 13 January 2006. European Commission Working Group, Assessment of Exposure to Noise (WG-AEN). 129 s.
Internet: ec.europa.eu/environment/noise/pdf/wg_aen.pdf
6. LAHTI T & KILPI L, Helsingin kaupunki, meluselvitys 2012. Raitoliikenne. *TL Akustiikka 11209*, Helsinki 27.4.2012.
7. LAHTI T, GOUATARBÈS B & MARKULA T, Helsingin kaupungin meluselvitys 2007, taustatietoja. *AKUKON 2700-4*, Helsinki 29.11.2007.
8. PELTOLA J, Selvitys syväuraisten vaihteiden ja raideristeysten käyttöönoton hyödyistä ja edellytyksistä Helsingin raitiotieverkolla. *HSL:n julkaisuja 4/2011*. HSL Helsingin seudun liikenne, Helsinki 22.2.2011, 68 s.
9. KRAGH J, ANDERSEN B & JACOBSEN J, Environmental noise from industrial plants. General prediction method. *Danish Acoustical Laboratory, report 32*. Lyngby 1982. 54 s. + liitt. 35 s.

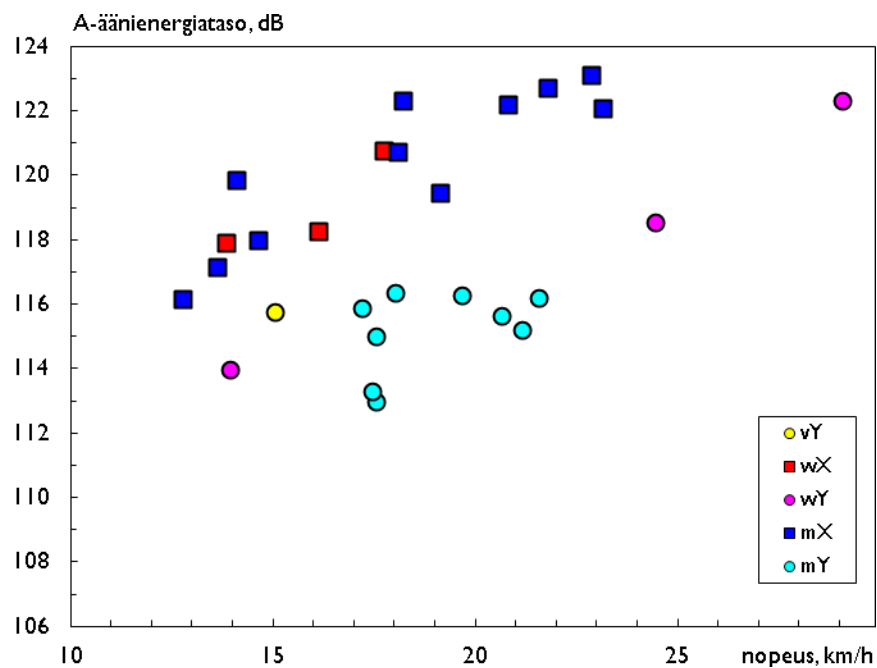
Liite A: Mittauspaikat ja A-tasotulokset

Calonius

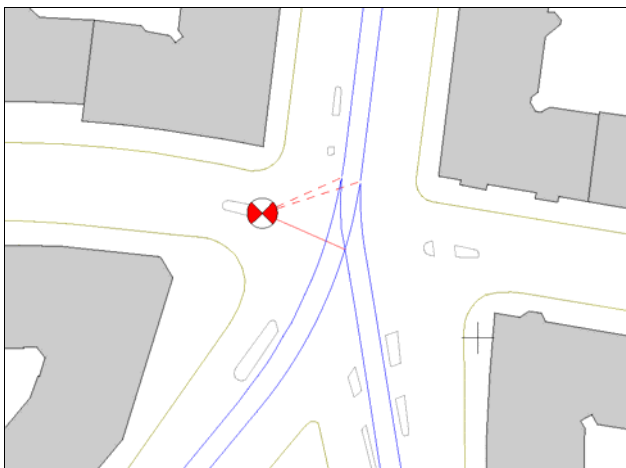
Risteys	Runeberginkatu – Caloniuksenkatu – Museokatu
Raitiolinjat	3T, 8
Mittauspäivä	2.10.2011
Mittausetäisyydet	14–16 m
Mitattuja ohiajoja	27
Keskinopeus	18 km/h

Ohiajon keskimääräinen kokonais-A-äänienergiataso $L_{QA} = 119$ dB

Vaunu- ja ristikkotyypin A-äänienergiataso L_{QA} nopeuden funktiona



Mittauspaikka ja -piste

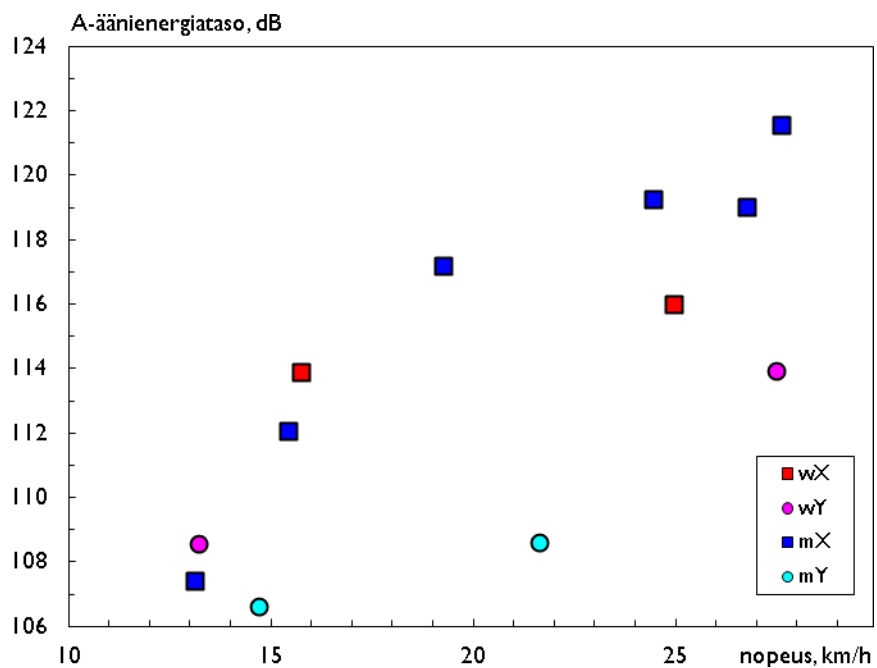


Ruusula

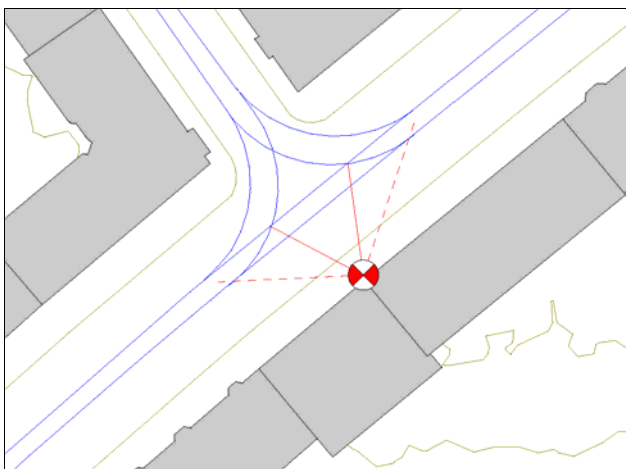
Risteys	Runeberginkatu – Ruusulankatu
Raitiolinjat	3T, 8
Mittauspäivä	15.10.2011
Mittausetäisyydet	17–19 m
Mitattuja ohiajoja	13
Keskinopeus	19 km/h

Ohiajon keskimääräinen kokonais-A-äänienergiataso $L_{QA} = 119 \text{ dB}$

Vaunu- ja ristikkotyypin A-äänienergiataso L_{QA} nopeuden funktiona



Mittauspaikka ja -piste

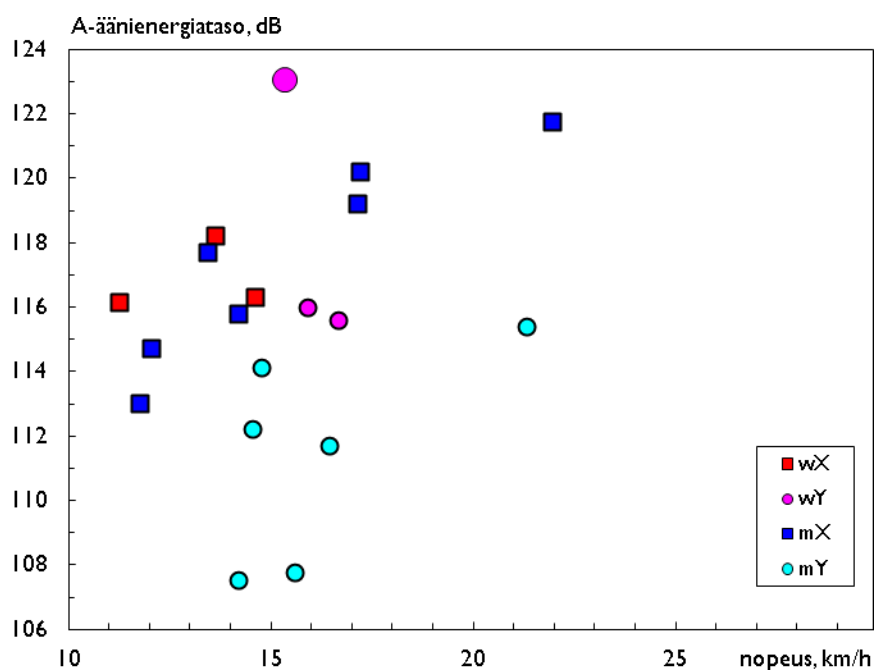


Brahe

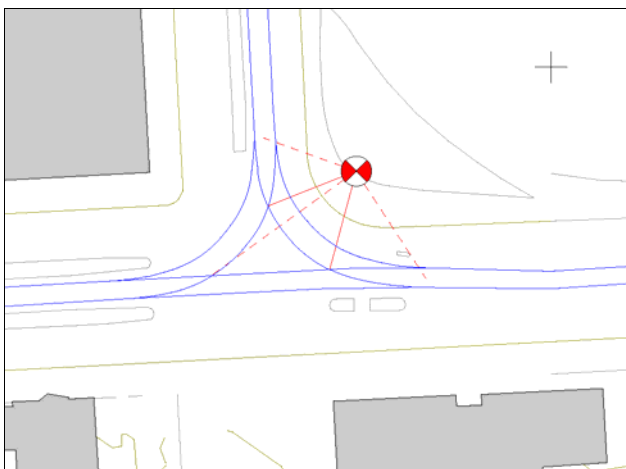
Risteys	Helsinginkatu – Läntinen Brahenkatu
Raitiolinjat	I, 3B, 8
Mittauspäivä	15.10.2011
Mittausetäisyydet	14–20 m
Mitattuja ohiajoja	19
Keskinopeus	15 km/h

Ohiajon keskimääräinen kokonais-A-äänienergiataso $L_{QA} = 119 \text{ dB}$

*Vaunu- ja ristikkotyypin A-äänienergiataso L_{QA} nopeuden funktiona
(suurella ympyrällä merkitty wY-näyte sisältää voimakasta kirs kuntaa)*



Mittauspaikka ja -piste

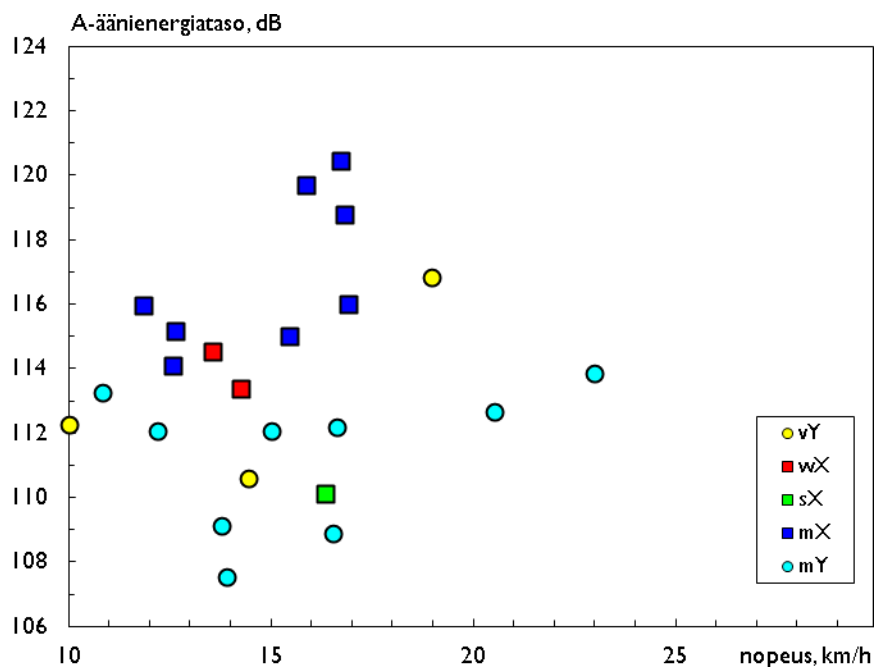


Kaarle

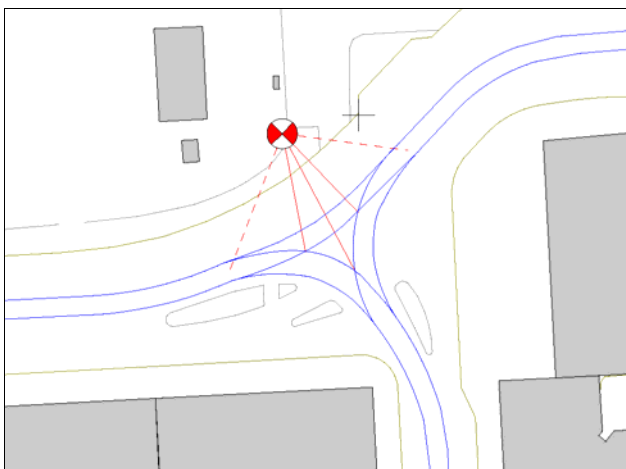
Risteys	Helsinginkatu – Kaarlenkatu
Raitiolinjat	1, 3B, 8, 9
Mittauspäivä	22.10.2011
Mittausetäisyydet	18–22 m
Mitattuja ohiajoja	23
Keskinopeus	15 km/h

Ohiajon keskimääräinen kokonais-A-äänienergiataso $L_{QA} = 117 \text{ dB}$

Vaunu- ja ristikkotyypin A-äänienergiataso L_{QA} nopeuden funktiona



Mittauspaikka ja -piste

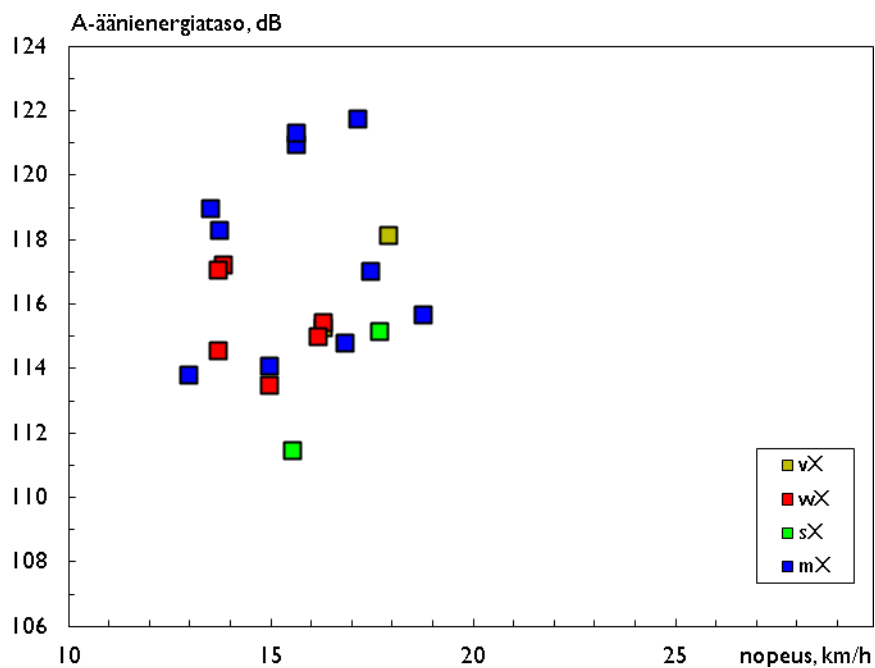


Porthan

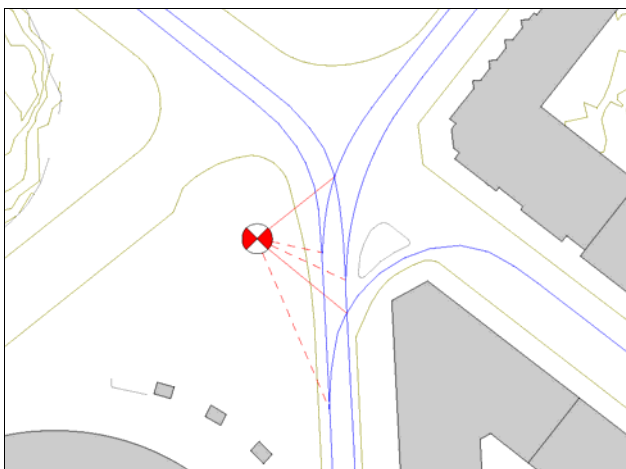
Risteys	Porthaninkatu – Siltasaarenkatu – Toinen Linja
Raitiolinjat	I, 3B, 9
Mittauspäivä	22.10.2011
Mittausetäisyydet	16–19 m
Mitattuja ohiajoja	20
Keskinopeus	16 km/h

Ohiajon keskimääräinen kokonais-A-äänienergiataso $L_{QA} = 117$ dB

Vaunu- ja ristikkotyypin A-äänienergiataso L_{QA} nopeuden funktiona



Mittauspaikka ja -piste

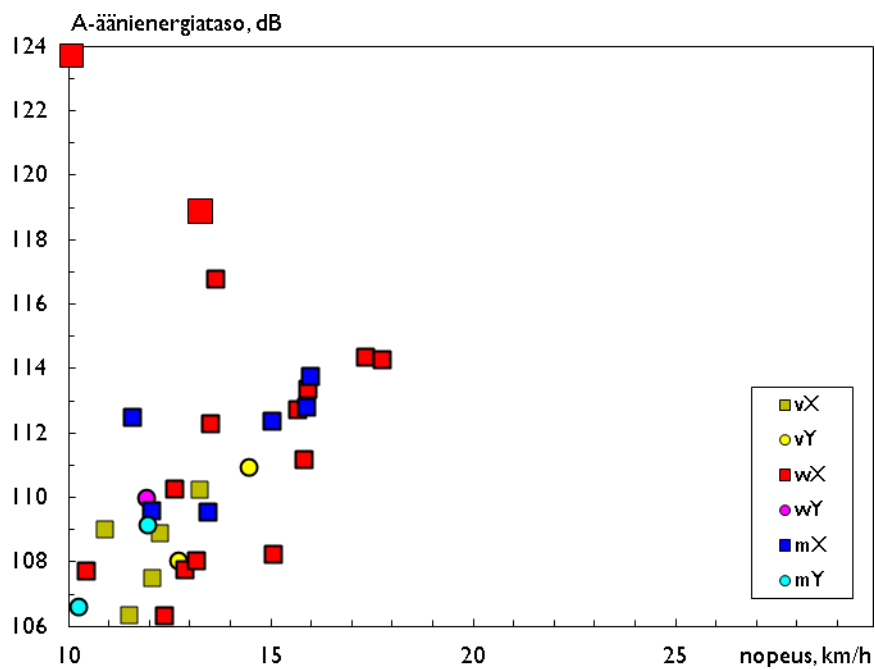


Senaatti

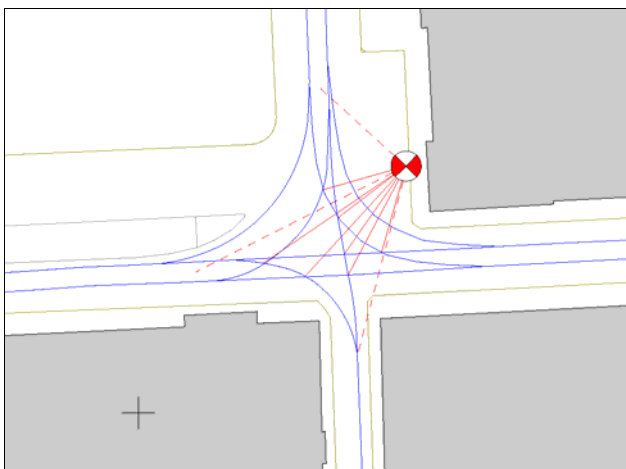
Risteys	Aleksanterinkatu – Snellmaninkatu – Katariinankatu
Raitiolinjat	1, 3T, 4, 7
Mittauspäivä	4.11.2011
Mittausetäisyydet	14–24 m
Mitattuja ohiajoja	38
Keskinopeus	13 km/h

Ohiajon keskimääräinen kokonais-A-äänienergiataso $L_{QA} = 116 \text{ dB}$

*Vaunu- ja ristikkotyypin A-äänienergiataso L_{QA} nopeuden funktiona
[suurilla neliöillä merkityt wX-näytteet (linja 3T) sisältävät voimakasta kirsikuntaa]*



Mittauspaikka ja -piste

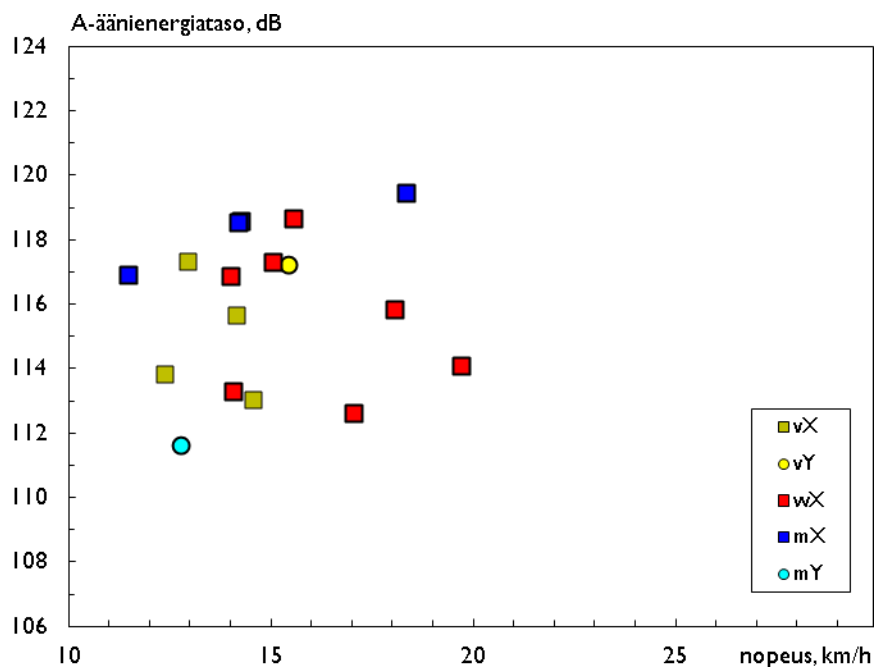


Ooppera

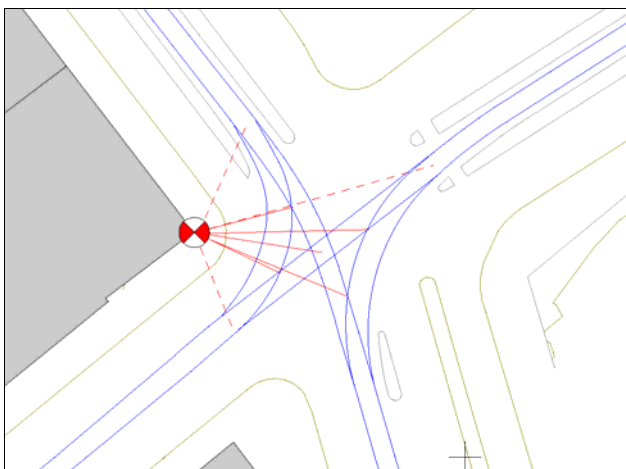
Risteys	Mannerheimintie – Runeberginkatu – Helsinginkatu
Raitiolinjat	3T, 4, 7, 8, 10
Mittauspäivä	11.11.2011
Mittausetäisyydet	14–23 m
Mitattuja ohiajoja	17
Keskinopeus	15 km/h

Ohiajon keskimääräinen kokonais-A-äänienergiataso $L_{QA} = 121$ dB

Vaunu- ja ristikkotyypin A-äänienergiataso L_{QA} nopeuden funktiona



Mittauspaikka ja -piste

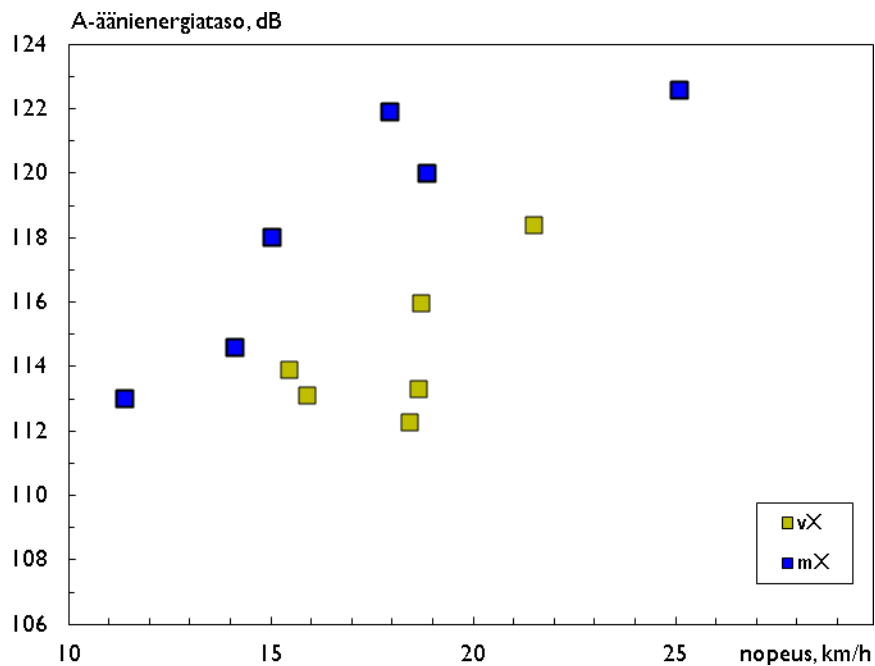


Sture

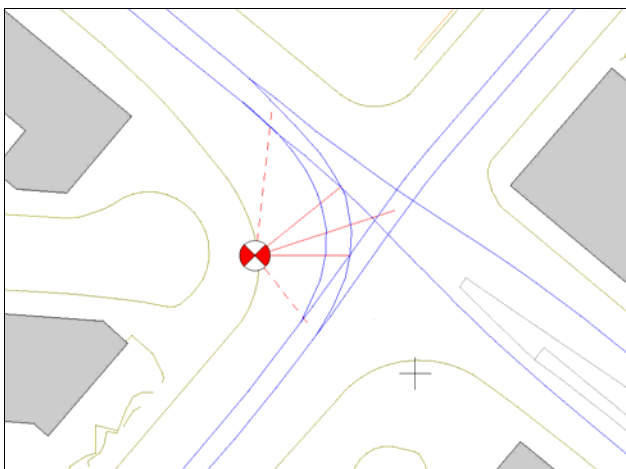
Risteys	Sturenkatu – Aleksis Kiven katu
Raitiolinjat	I, 9
Mittauspäivä	11.11.2011
Mittausetäisyydet	20–26 m
Mitattuja ohiajoja	12
Keskinopeus	17 km/h

Ohiajon keskimääräinen kokonais-A-äänienergiataso $L_{QA} = 122 \text{ dB}$

Vaunu- ja ristikkotyypin A-äänienergiataso L_{QA} nopeuden funktiona



Mittauspaikka ja -piste

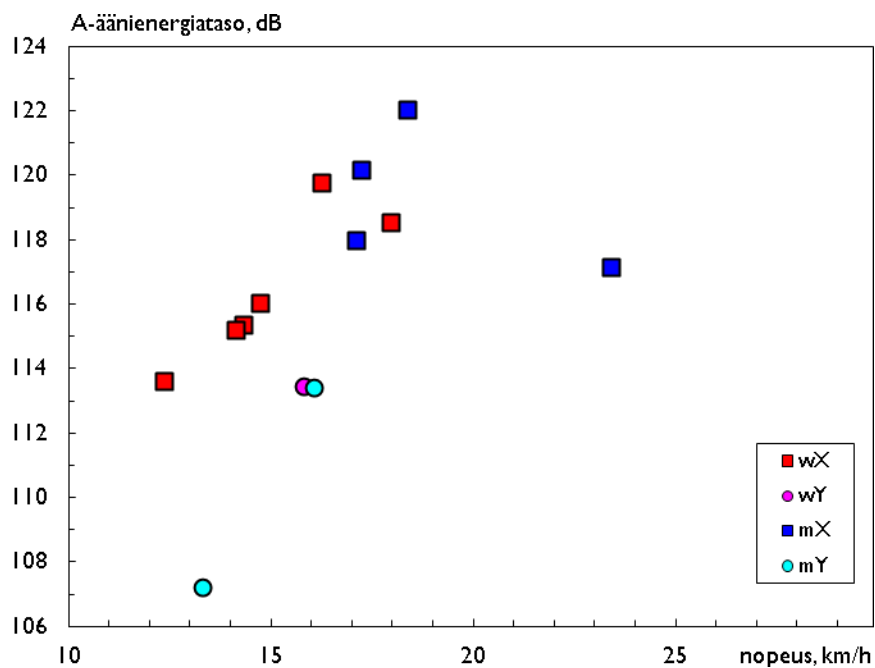


Stocka

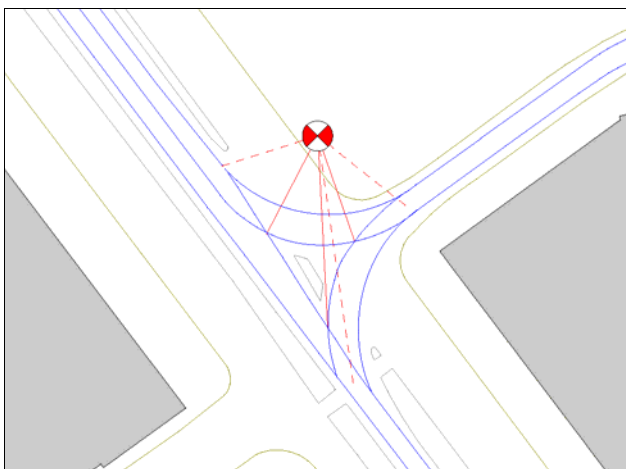
Risteys	Mannerheimintie – Aleksanterinkatu
Raitiolinjat	3B, 4, 6, 7, 9, 10
Mittauspäivä	13.11.2011
Mittausetäisyydet	15–24 m
Mitattuja ohiajoja	13
Keskinopeus	17 km/h

Ohiajon keskimääräinen kokonais-A-äänienergiataso $L_{QA} = 120$ dB

Vaunu- ja ristikkotyypin A-äänienergiataso L_{QA} nopeuden funktiona



Mittauspaikka ja -piste



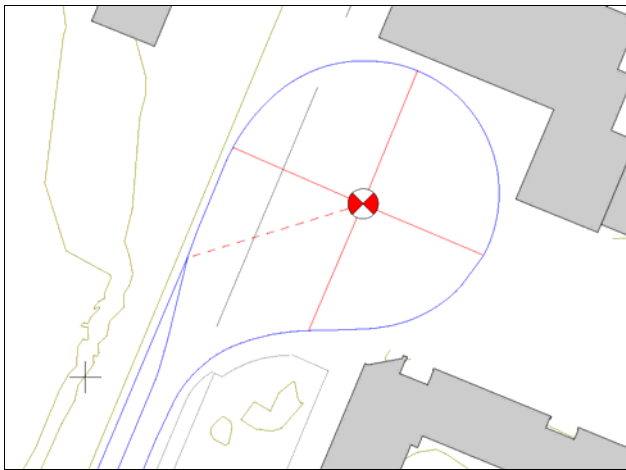
Arabia

Kääntöpaikka	Kaj Franckin aukio (Arabiankatu – Kaj Franckin katu)
Raitiolinjat	6, 8
Mittauspäivä	5.1.2012
Mittausetäisyys	22 m
Mitattuja ohiajoja	8
Keskinopeus	12 km/h

Keskimääräinen A-äänitehotaso L_{WA} kääntöpaikalla:

– kirkuntaa esiintyi	$L_{WA} =$	103 dB	(1 pidennetty vanha, 3 Variotram)
– kirkuntaa ei esiintynyt	$L_{WA} =$	98 dB	(4 Variotram)

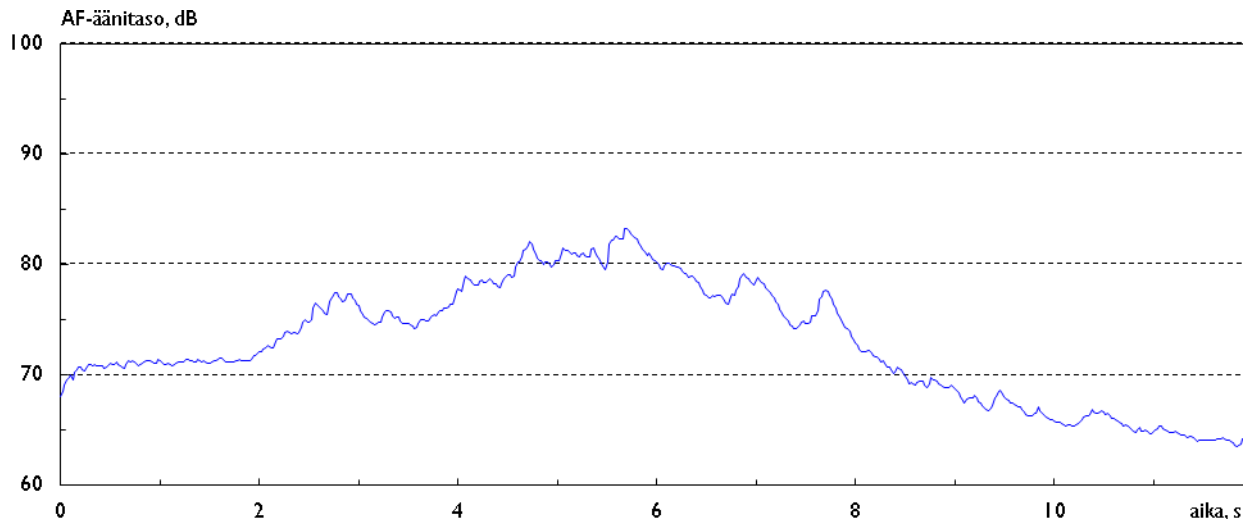
Mittauspaikka ja -piste



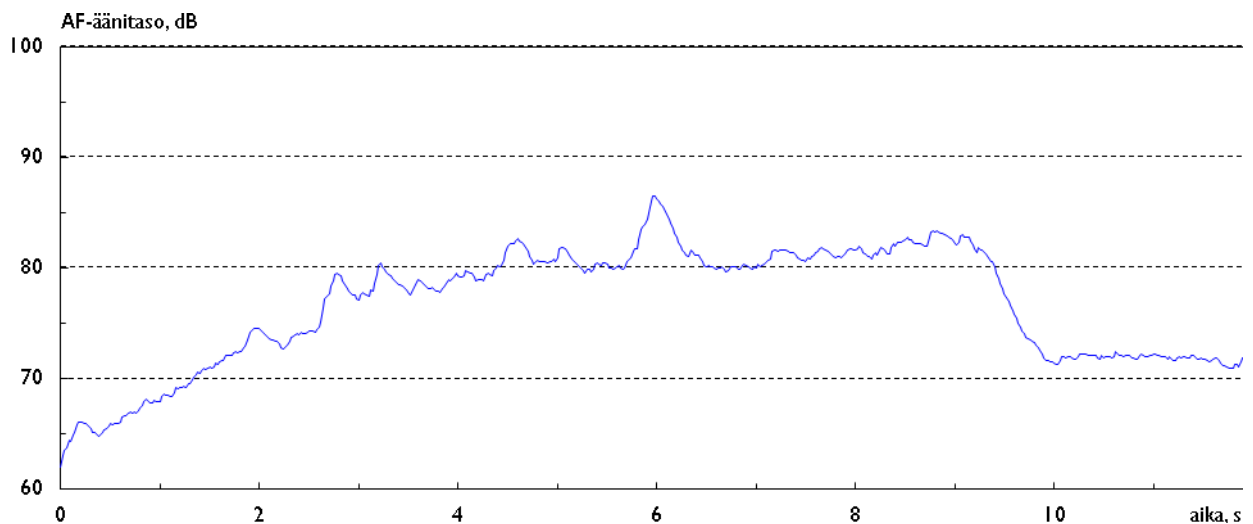
□

Liite B: AF-äänitason käyriä

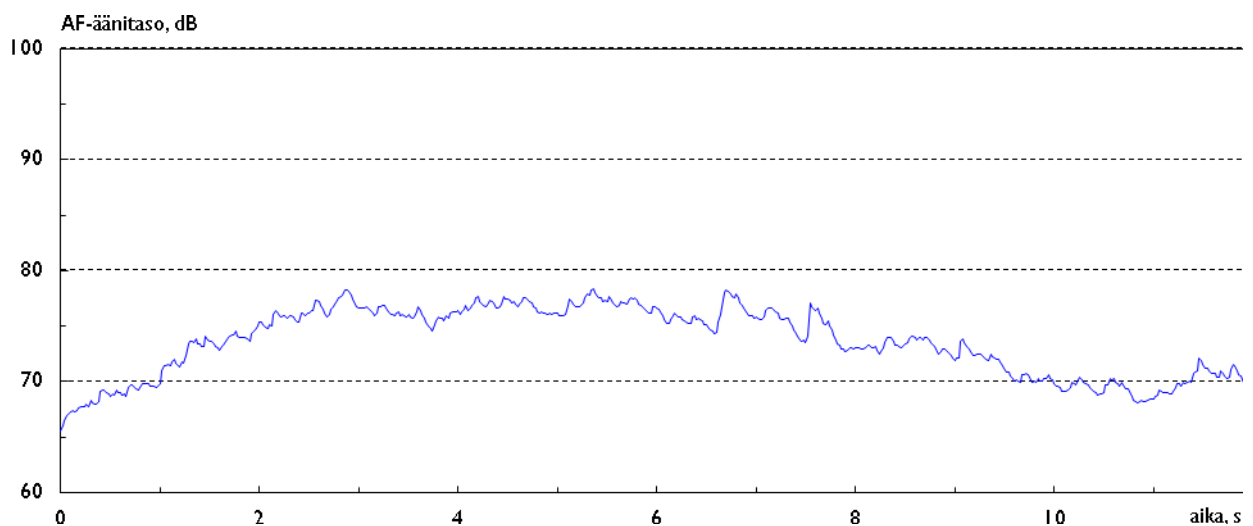
Esimerkkejä liukuvan A- ja F-painotetun äänipainetason eli AF-äänitason $L_{pAF}(t)$ käyristä (äänitaso mittauspisteissä, etäisyyksiä risteyksestä mittauspisteeseen ei ole normalisoitu)



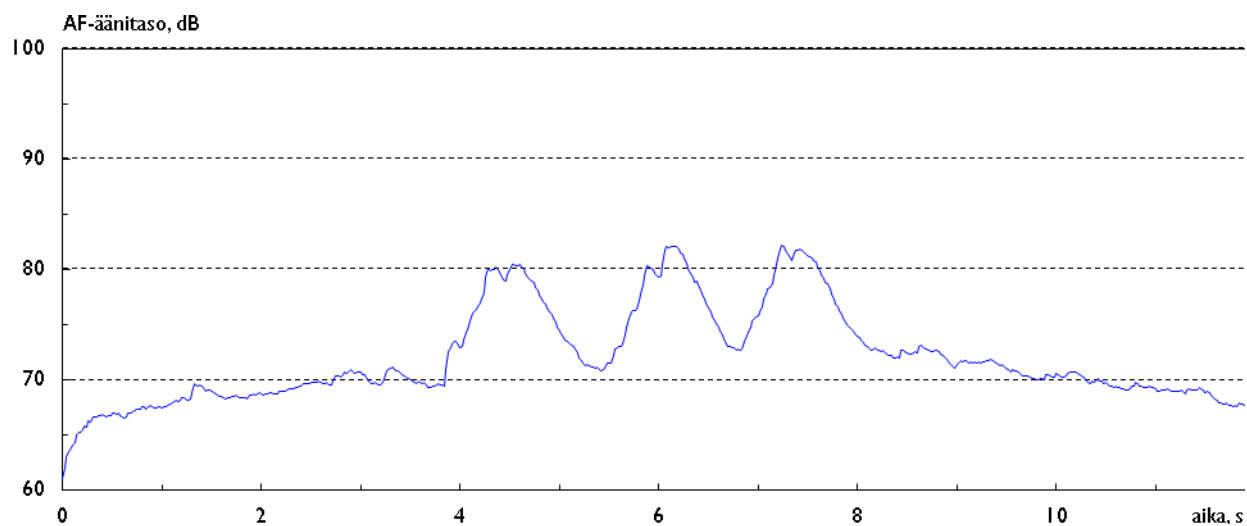
Kuva B1a. **Calenius**, linja 3T, pitkä nivelvaunu (w) pohjoiseen, Y-ristikko, nopeus 24 km/h



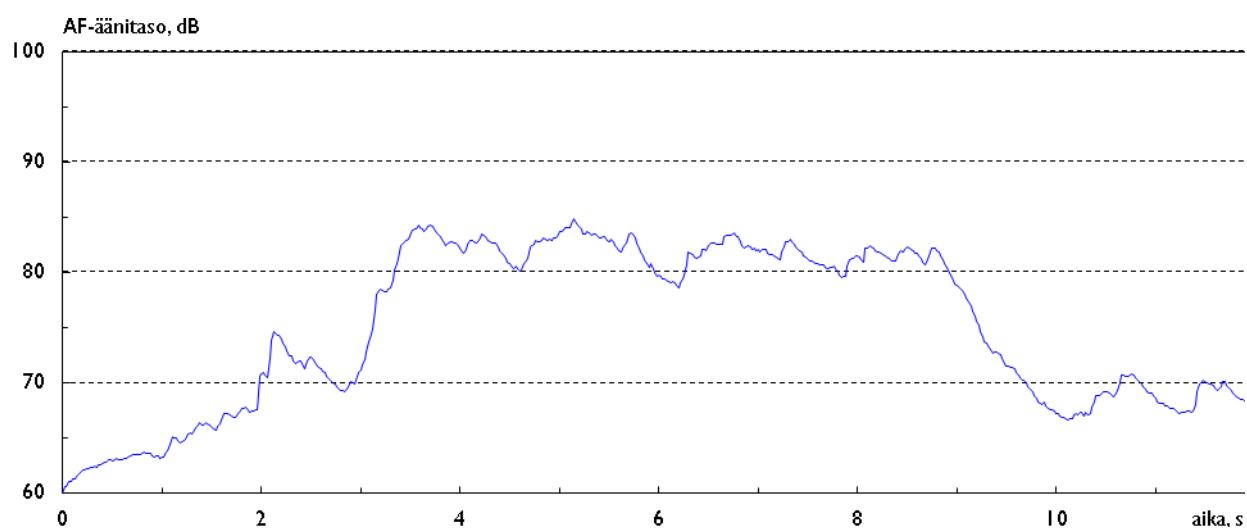
Kuva B1b. **Calenius**, linja 3T, pitkä nivelvaunu (w) etelään, Y- ja X-ristikot, nopeus 18 km/h



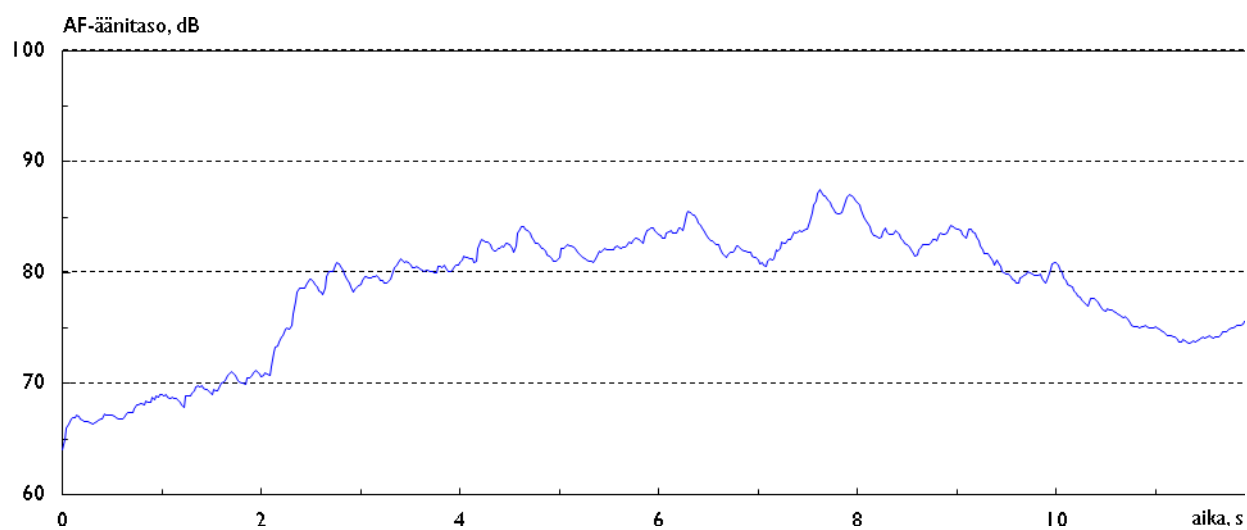
Kuva B1c. **Ooppera**, linja 4, pitkä nivelvaunu (w) etelään, 3 X-ristikkoa, nopeus 17 km/h



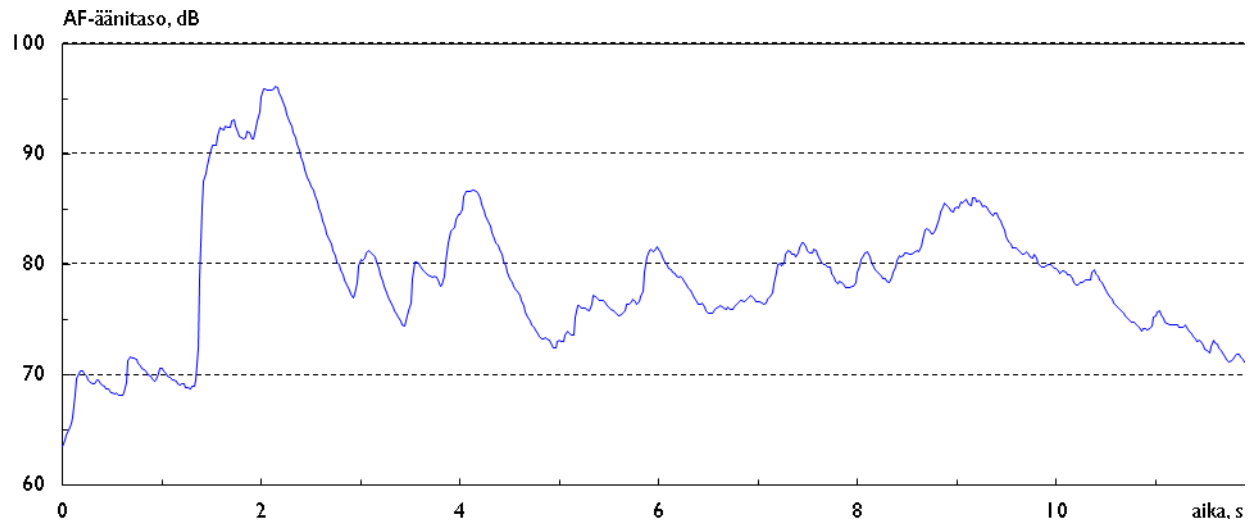
Kuva B2a. **Calonius**, linja 8, Variotram-vaunu (m) etelään, Y-ristikko, nopeus 21 km/h



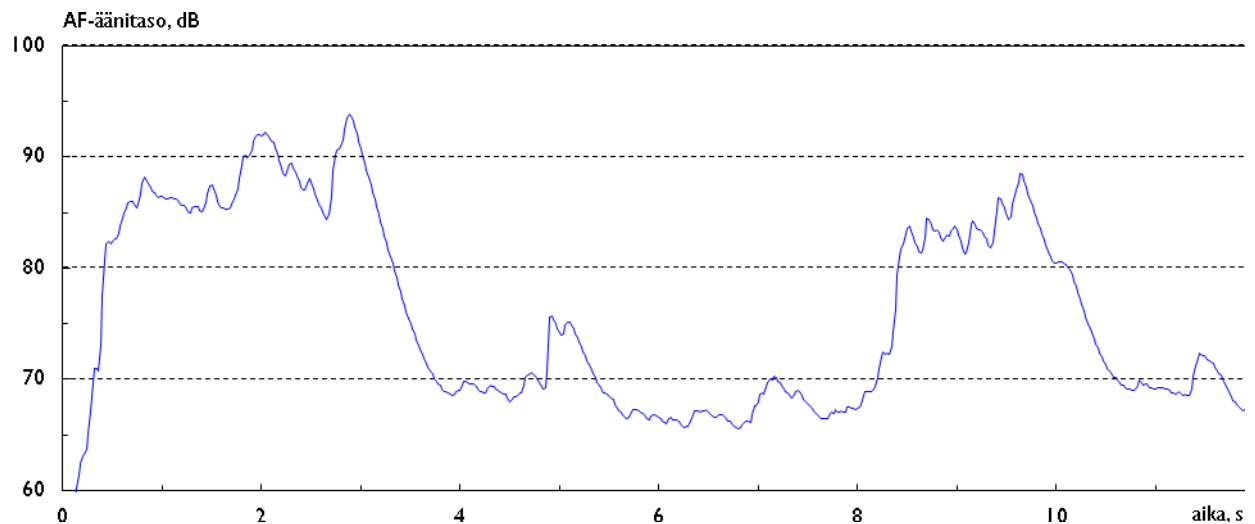
Kuva B2b. **Calonius**, linja 3T, Variotram-vaunu (m) etelään, Y- ja X-ristikot, nopeus 18 km/h



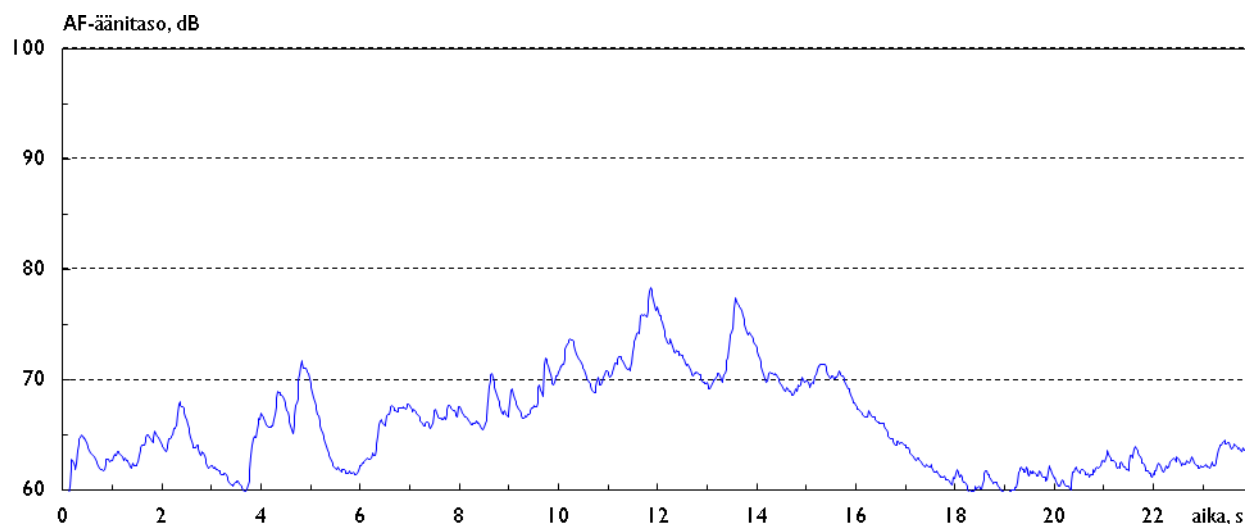
Kuva B2c. **Ooppera**, linja 8, Variotram-vaunu (m) länteen, 3 X-ristikkoo, nopeus 18 km/h



Kuva B3a. **Brahe**, linja 3B, pitkä nivelvaunu (**w**) pohjoiseen, 2 **Y**-ristikkoo, nopeus 15 km/h;
alussa 3 s kirs kuntaa

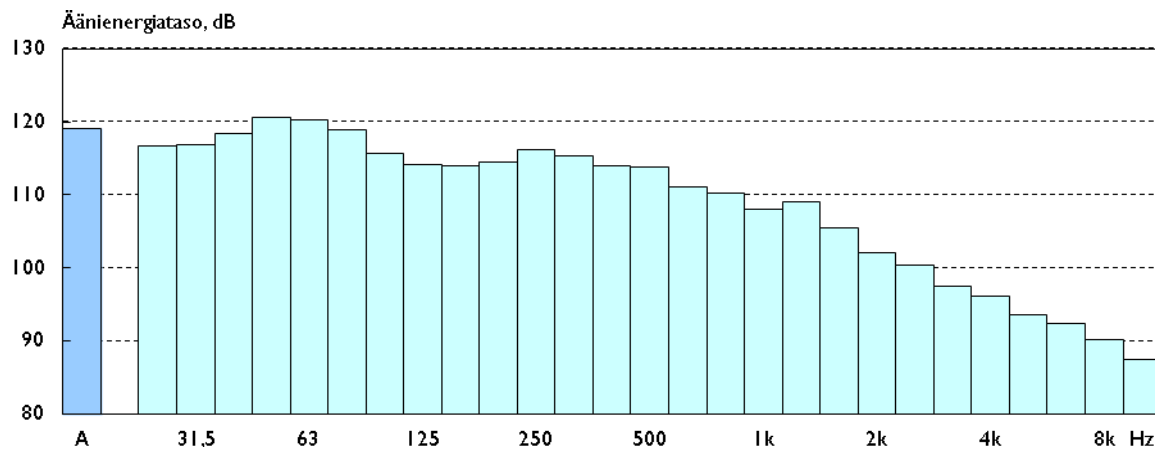
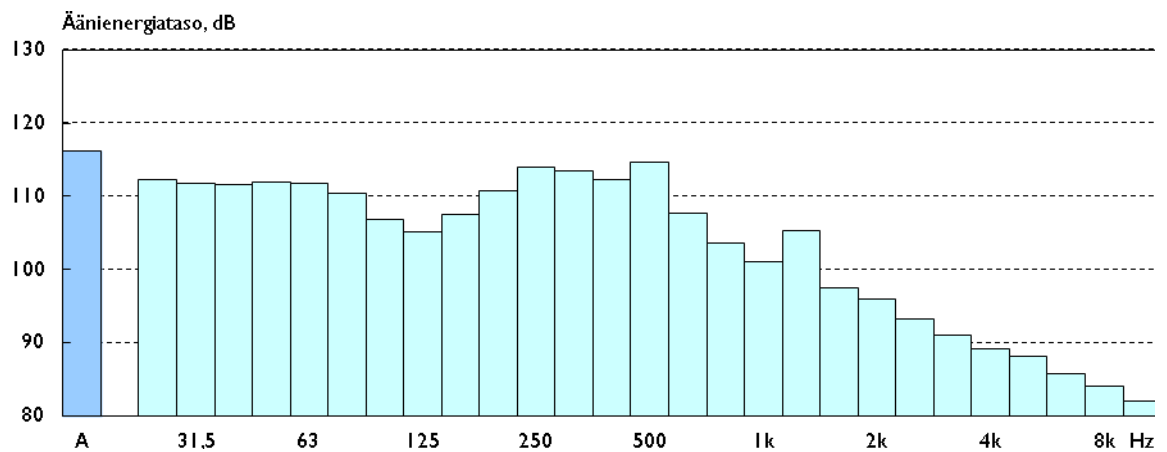
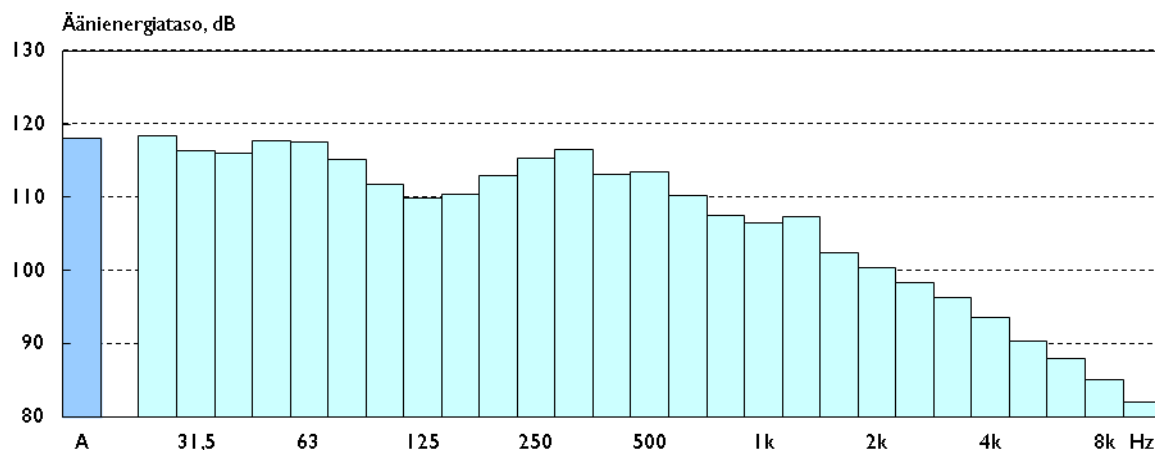


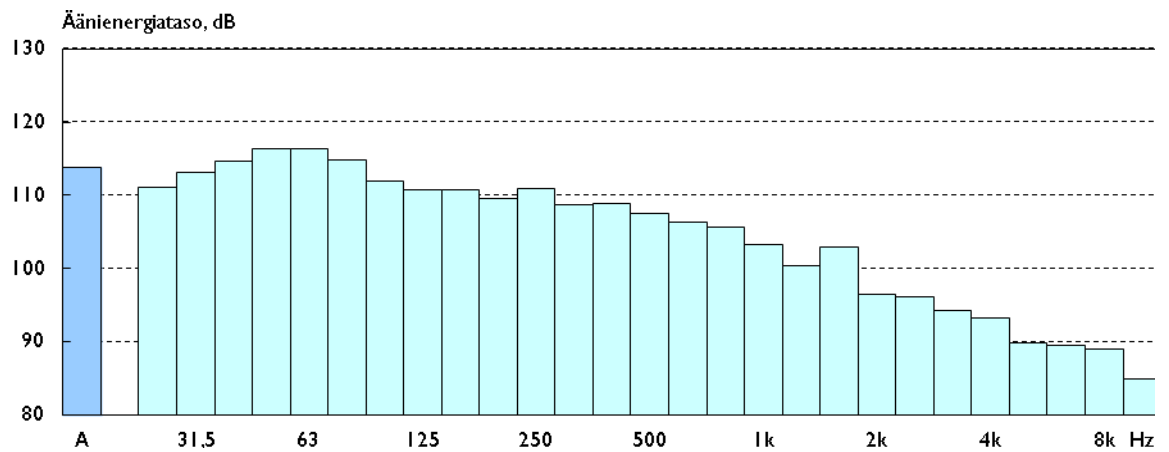
Kuva B3b. **Senaatti**, linja 3T, pitkä nivelvaunu (**w**) länteen, 2 **X**- ja 2 **Y**-ristikkoo, nopeus 10 km/h;
alussa 3 s ja lopussa 2 s kirs kuntaa



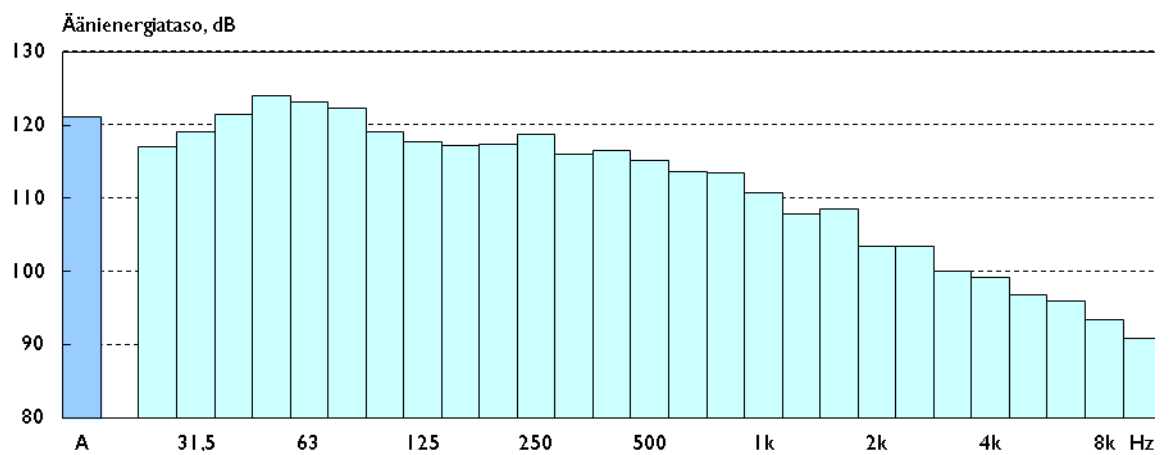
Kuva B3c. **Arabia**, linja 6, Variotram-vaunu (**m**) kääntöpaikan ympyrällä, nopeus 12 km/h;
ajoittaista heikkoa kirs kuntaa

Liite C: Melupäästöjen spektrejä

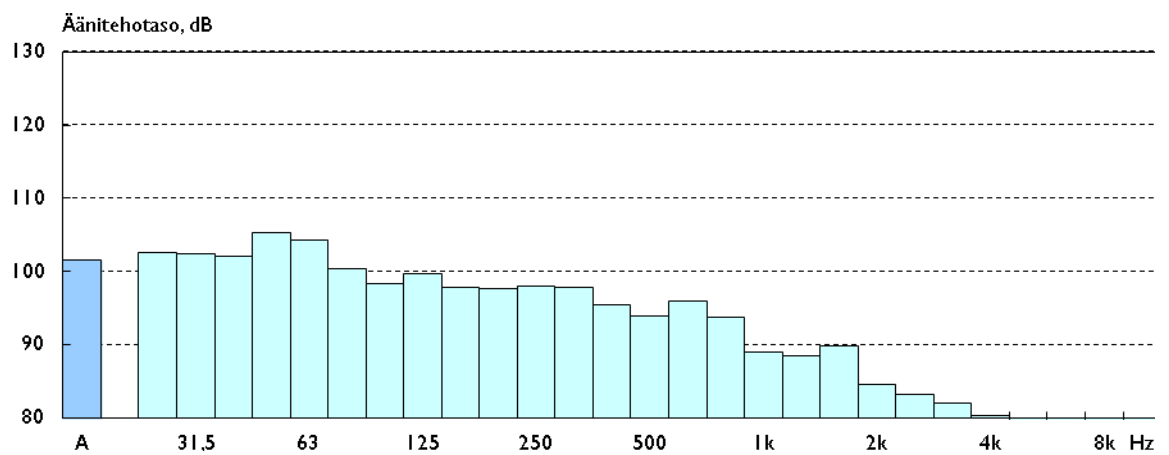
Äänienergiatason L_Q terssispektrejä (energiakeskiarvoja)Kuva C1a. Kaikki risteys-ohiajat, $N = 182$ Kuva C1b. Pitkät nivelvaunut (w), Y -ristikot, $N = 9$ Kuva C1c. Pitkät nivelvaunut (w), X -ristikot, $N = 47$



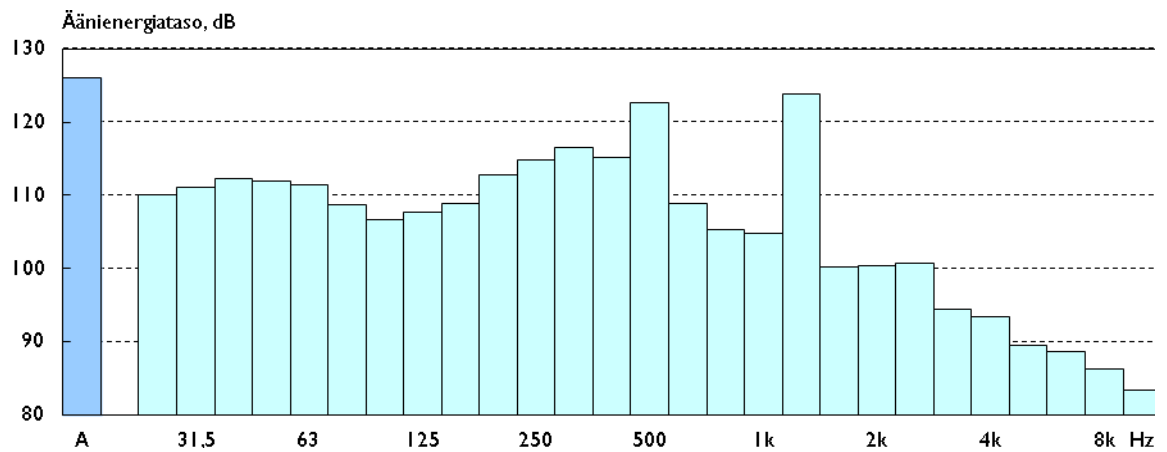
Kuva C2a. Variotram-vaunut (m), Y-ristikot, $N = 33$



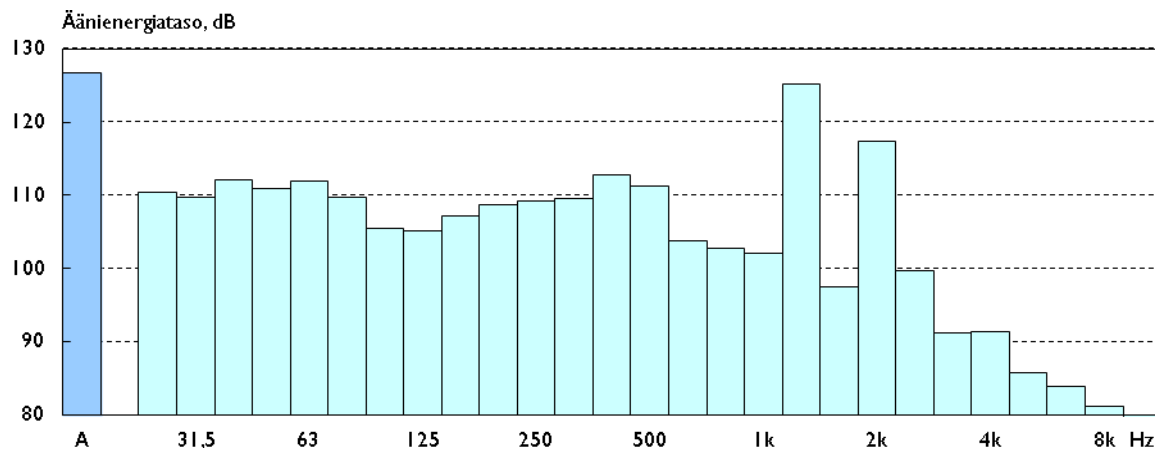
Kuva C2b. Variotram-vaunut (m), X-ristikot, $N = 62$



Kuva C2c. **Äänitehotaso: Arabia** kääntöpaikka, kaikki vaunut, $N = 8$



Kuva C3a. Esimerkki kirskunnasta: **Brahe**, linja 3B, pitkä nivelvaunu (w) pohjoiseen (sama näyte kuin liitteen B3 kuvassa B3a)



Kuva C3b. Esimerkki kirskunnasta: **Senaatti**, linja 3T, pitkä nivelvaunu (w) länteen (sama näyte kuin liitteen B3 kuvassa B3b)

□