



Tampereen Kaupunki

Tampereen ratikan koeajoliikenteen melumittaukset - Mittausraportti

101012828-002

Tilaaaja: Tampereen kaupunki, raitiotien kehitysohjelma

Donna-ID: 5701448

Tekijä
Tapio Lukkari
Osasto
Kestävä kehitys ja ilmasto
Puhelin
+358 (0)44 3452 294
E-mail
tapio.lukkari@afry.com
Tarkastaja
Carlo Di Napoli, AFRY Finland Oy

pvm
15/06/2021
Toimipaikka
Vantaa
Projektinumero
101012828-002

Toimipaikka
Vantaa

Tampereen Kaupunki

Tampereen ratikan koeajoliikenteen melumittaukset – Mittausraportti

Sisällys

1	Johdanto	6
2	Ympäristömelu yleisesti.....	6
2.1	Raitiotieliikenteen melu	7
3	Ympäristömeluun liittyvät vaatimukset.....	7
3.1	Valtioneuvoston ohjearvot	7
3.2	Muut sisätiloja koskevat vaatimukset.....	8
4	Mittausmenetelmät	8
4.1	Käytetty mittauslaitteisto	8
4.2	Mittausolosuhteen vaatimukset	9
4.3	Testattava raitiovaunu	10
4.4	Nopeusmittaukset	10
4.5	Seisontamittaukset.....	13
4.6	Jarrutus- ja kiihdytysmittaukset.....	14
4.7	Kaarrekirskuntamittaukset	14
4.8	Sähkönsyöttöasemien mittaukset.....	15
4.9	Mittausten epävarmuudet.....	16
5	Mittaustulokset	17
5.1	Nopeusmittaukset	17
5.2	Seisontamittaukset.....	18
5.3	Kiihdytys- ja jarrutusmittaukset.....	19
5.4	Kaarrekirskuntamittaukset	19
5.5	Sähkönsyöttöasemien mittaukset.....	21
6	Lähteet	23

Yhteenveto

Tampereen raitiotien koeajojen aikaiset melumittaukset toteutettiin AFRY Finland Oy:n toimesta huhtikuussa 2021. Mittauksien tarkoituksena oli saada kattava käsitys uusien Tampereen raitiovaunujen tuomasta ympäristömelusta. Mittauksissa mitattiin raitiovaunun käytön eri akustisia tilanteita standardin ISO 3095:2013 mukaisesti sen soveltuvien osin.

Raitiotieliikenteen melu syntyy pääosin raitiovaunun pyörien ja kiskon välisestä kontaktista. Muita melulähteitä ovat mm. moottori, jarrut, apukoneet sekä kaarrekirskunnasta syntyvä ääni. Raideliikenteen tuottama melun voimakkuus on riippuvainen äänilähteen ominaisuuksista, joita ovat liikenteen ominaisuudet (liikennemäärät, ratanopeudet, kalusto), junapyörien ja kiskojen kunto sekä vallitsevat olosuhteet. Lisäksi maastonmuodot sekä etäisyys rataa vaikuttavat yksittäisessä tarkastelupisteessä havaittavaan meluun.

Nopeusmittaukset

Raitiovaunun tuottama kasvaa suhteellisen tasaisesti nopeuden lisääntyessä. Kasvu ei ole kuitenkaan täysin lineaarista, sillä suurinta kasvu on pienemmillä nopeuksilla. Melun eri tarkastelukorkeuksien erot ovat 0,1-0,6 dB välillä, joten melulähteen suuntaavuutta voidaan pitää vähäisenä. Melumittaukset toteutettiin myös tyhjälle raitiovaunulle. Ero lastattuun vaunuun oli nopeudesta riippuen alle ± 1 dB, jota voidaan pitää maltillisina. Ero selviää mittauksissa, mutta aistivaraisesti alle 1 dB:n eroja äänenpainetasossa on vaikea havaita. Maksiminopeudella 70 km/h raitiovaunun tuottama melu 7,5 m metrin etäisyydellä oli 84 dB

Raitiovaunun nopeusmittausten äänenpainetasojen taajuusjakaumat ovat pääosin tasaisesti laajakaistaisia kaikilla nopeuksilla. Poikkeuksena on 40 km/h nopeus, jolloin 1/3 oktaavikaistojen arvoista erottuu 630 Hz taajuuskaista. Mittaukset tehtiin lähellä raitiovaunua (7,5 m). Melulähteen tuottaman melun kapeakaistaisuuden voimakkuus heikkenee tarkasteltavan etäisyyden kasvaessa.

Seisontamittaukset

Seisontamittauksen yhdistetty äänenpainetason tulos koko raitiovaunulle on 51-52 dB eri korkeuksilla tehdyille mittauksille (1,2 m ja 3,5 m). Mittausetäisyys raitiovaunun keskilinjasta oli 7,5 m.

Jäähdytinlaitteet olivat päällä kaikkien tehtyjen mittauksien aikana. Laitteiden toimintaprosessiin sisältyy erilaisia käyntisyklejä, jolloin melu on ajallisesti vaihtelevaa. Jäähdytinlaitteiden ääni sisältää kapeakaistaista ääntä suurilla taajuuksilla 2,5 – 3,15 kHz. Ääntä voi kuvailla vinkumiseksi ja se erottuu muusta paikallaan olevasta raitiovaunun huminasta selkeästi.

Kiihdytys- ja jarrutusmittaukset

Kiihdytystapahtumasta määritetty enimmäisäänitaso L_{AFmax} oli 76-77 dB ja keskiäänitaso L_{Aeq} oli 73-74 dB riippuen mittauskorkeudesta. Kiihdytys tehtiin 40 km/h nopeuteen. Kun saatuja tuloksia verrataan tasaisen nopeuden testeihin, havaitaan

kiihdytyksen keskiäänitaso L_{Aeq} jäävän 40 km/h nopeustestin keskiäänitasotuloksen (~ 77 dB) alapuolelle.

Jarrutusmittauksista määritettiin jarrutustapahtuman enimmäisäänitaso L_{AFmax} , joka oli 65-67 riippuen mittauskorkeudesta. Jarrutustapahtuman melu on tasaisesti vaimeneva. Yhdessäkään mittaustapatumassa ei havaittu jarrujen tai pyörä-kiskokontaktin kirsuntaa.

Tuloksista voidaan sanoa, että raitiovaunujen kiihdytysten ja pysähdysten tuoma melu ei lisää merkittävästi raitiovaunumelun tuottamaa ympäristömelun keskiäänitasoa tai yleistä häiritsevyyttä tai havaittavuutta.

Kaarrekirskuntamittaukset

Kaarrekirskunta ei ole Tampereen raitiovaunulle tai sen radan kaarteille ominainen piirre, joten tässä raportissa esitettyjä tuloksia tulisi käyttää vain perustelluista syistä. Lähtökohtaisesti normaalin käyttötilanteen aikana merkityksellistä kaarrekirskuntaa ei pitäisi esiintyä mm. kiskojen voitelun ja kääntyvien telien ansiosta. Esimerkiksi voitelun on koeajoliikenteen aikana vähäisempää kuin tulevan käyttötilanteen aikana, koska voitelun määrä on suoraan riippuvainen raitioliikenteen määrästä. Lisäksi voitelua voidaan tehostaa tarpeen mukaan yksittäisiin kaarteisiin.

Mittauksia varten kartoitettiin kaarrekirskuntaa koko käytössä olevalta raitiotielinjalta välillä Varikko – Pyynikintori. Vain Rieväkadun ja Hervannan valtavyöhykän risteyksen kaarteissa pystyttiin mittaamaan äänipäästöarvoja, jossa kaarrekirskunta oli toistuva, riittävän kuuluva ja josta tulokset voitiin luotettavasti laskea. Lisäksi Rieväkadun varren loivassa kaarteissa mitattiin raitiovaunun ohituksen yhteydessä ilmenevää lievempää kirskuntaa, joka ei toteudu jokaisella ohiajolla.

Saadut kaarrekirskunnan enimmäisäänitasot vaihtelivat välillä 79 – 87 dB kirskuntatapahtumasta ja mittausetäisyydestä riippuen. Raitiovaunun kirskuntamelu sisältää runsaasti korkeita taajuuksia (3150-6300 Hz). Korkeat taajuudet erottuvat liikennealueiden muista melulähteistä helposti, mutta toisaalta ne vaimenevat helpommin etäisyyden suhteen verrattuna pientaajuuksiin ääniin.

Edellä mainittujen kaarteiden lisäksi heikkoa kaarrekirskuntaa havaittiin toisinaan Hervannassa Insinöörinkadun ja Atomipolun risteyksen kaarteissa. Kirskuntaa ei toteutunut kaarrekirskunnan mittauspäivänä. Muita kaarrekirskunnan riskikohteita ei mittausviikon tarkkailun aikana havaittu.

Sähkönsyöttöasemien mittaukset

Sähkönsyöttöasemille SSA09 ja SSA12 suoritettiin mittauksia tehostetun raitiotieliikenteen aikana. Molempien mittausten aikana sähkönsyöttöaseman kuormitusalueella liikkuu neljä raitiovaunua yhtäaikaisesti. Mittaukset kohdistettiin asemien muuntajien ja IV-koneen ilma-aukoille, jotka havaittiin asemien ainoiksi melulähteiksi.

Tehtyjen mittausten perusteella havaitaan, että sähkönsyöttöasemien tuottama ympäristömelu voi vaihdella asemien kesken, vaikka asemien perusrakenne on pääosin sama. Mitatut äänenpainetasot ovat suhteellisen vähäisiä (1m etäisyydellä 48 – 59 dB) ja valtaosalla sähkönsyöttöasemien sijainneista melu ei erotu alueen taustamelusta.

Sähkönsyöttöasemien melu muuntajien osalta sisältää kapeakaistaisuutta ja IV-koneen osalta melu on havaittavaa (100% teholla) asemien läheisyydessä, jolloin ympäristölle asetetut ohjearvot lähellä olevalle asuinrakennukselle voivat ylittyä. Sähkönsyöttöasemien tuottamaan ympäristömeluun vaikuttaa etäisyyden lisäksi alueen maanpinnan muodot ja absorptiokyky. Meluun voidaan vaikuttaa myös melulähteiden suuntaamisella eli ilmanottoaukkojen sijoittelulla sähkönsyöttöaseman suunnitteluvaiheessa.

Aikaisemmat selvitykset

Tampereen raitiotiehakkeessa raitiovaunuliikenteen tuomaa melua on arvioitu väliaikaisen meluohjeen avulla, jossa raitiovaunun melupäästön arvot pohjautuivat Helsingin raitiotien Artic-vaunun tietoihin. Koeajoliikenteelle tehtyjen melumittausten perustella Tampereen raitiovaunu (ForCity Smart Artic X34) on 70km/h nopeudessa noin 5 dB Artic-vaunuja alhaisempi. Äänen nousunopeus eri ajonopeuksilla on myös pienempää X34 vaunuilla. Pienimmillään ero on 20 km/h nopeuksissa. Erot johtuvat ennen kaikkea hyvin erilaisista vaunutyypeistä. Tiedot ovat peräisin päivitetystä Tampereen raitiotieliikenteen meluohjeesta, jossa on tarkemmin esitetty raitiotieliikenteen mallintamiseen liittyviä asioita.

1 Johdanto

Tampereen raitiotien koeajojen aikaiset melumittaukset toteutettiin AFRY Finland Oy:n toimesta huhtikuussa 2021. Mittauksien tarkoituksena oli saada kattava käsitys uusien Tampereen raitiovaunujen tuomasta ympäristömelusta.

Mittaustulosten avulla voidaan tarkentaa raitiotielinjan eri osille tehtyjä melulaskelmia vastaamaan todellista toteutuvaa tilannetta. Tuloksia voidaan soveltaa myös kokonaan uusien raitiolinjojen suunnittelussa. Yhtenä työn tavoitteena olikin päivittää raitiotielle tehtyä meluohjetta, jonka tulokset esitetään erillisessä raportissa.

Raitiovaunun koeajoliikenteen meluselvityksen on tilannut Tampereen kaupungin Raitiotien kehitysohjelma. Mittaukset suunniteltiin yhteistyössä Tampereen Raitiotieallianssin, Raitiotien kehitysohjelman ja Tampereen kaupungin kaavoituksen kanssa.

2 Ympäristömelu yleisesti

Ääni on aaltoliikettä, joka tarvitsee väliaineen välittyäkseen eteenpäin. Ilmassa äänellä on nopeus, joka on riippuvainen ilman lämpötilasta. Eri väliaineissa ääniaalto kulkee eri nopeuksilla väliaineen ominaisuuksista riippuen. Normaali ympäristömelu sisältää useista kohteista peräisin olevaa yhtäaikaista ääntä, jossa äänen taajuudet ja aallonpituudet ovat jatkuvassa muutoksessa.

Melu on subjektiivinen käsite, jolla ymmärretään äänen negatiivisia vaikutuksia, ei-toivottua ääntä, josta seuraa ihmisille haittaa ja jossa kuulijan omilla tuntemuksilla ja äänenenerotuskyvyllä on ratkaiseva merkitys. Melua voidaan mitata sen fysikaalisten ominaisuuksien perusteella.

Ympäristömelu koostuu ihmisen toiminnan aiheuttamasta melusta, joka vaihtelee ajan ja paikan mukaan. Äänen (melun) voimakkuutta mitataan käyttäen logaritmistä desibeliasteikkoa (dB), jossa äänenpaineelle (eli hyvin pienelle paineenmuutokselle ilmassa) käytetään referenssipainetta 20 µPa ilmalle sekä 1 µPa muille aineille. Tällöin 1 Pa paineenmuutos ilmassa vastaa noin 94 dB:ä.

Kuuloaistin herkkyys vaihtelee eri taajuisille äänille, jolloin vaihtelevat myös melun haitallisuus, häiritsevyys sekä kiusallisuus. Nämä tekijät on otettu huomioon äänen taajuuskomponentteja painottamalla. Yleisin käytetty taajuuspainotus on A-painotus, joka perustuu kuuloaistin taajuusvasteen mallintamiseen.

Melun ekvivalenttitaso (symboli L_{eq}) tarkoittaa samanarvoista jatkuvaa äänitasoa kuin vastaavan äänienergian omaava vaihteleva äänitaso. Ohjearvot esitetään usein A-taajuuspainotettuna ekvivalenttitasona L_{Aeq} . Koska ääni käsitellään logaritmisenä suureena, on hetkellisillä korkeimmilla äänitasoilla suhteellisen suuri vaikutus ekvivalenttiseen melutasoon.

Enimmäisäänitaso L_{AFmax} kertoo valitun aikavälin äänenpaineen korkeimman arvon, kun näyte on aikapainotettu "fast" aikapainotuksella (tunnus F, integrointiaika 125ms) ja A-taajuuspainotettu. Enimmäisäänitasoa L_{AFmax} käytetään äänekkyuden arviointiin lyhytaikaisille äänitapahtumille.

2.1 Raitiotieliikenteen melu

Raitiotieliikenteen melu syntyy pääosin raitiovaunun pyörien ja kiskon välisestä kontaktista. Muita melulähteitä ovat mm. moottori, jarrut, apukoneet sekä kaarrekirskunnasta syntyvä ääni. Raideliikenteen tuottama melun voimakkuus on riippuvainen äänilähteen ominaisuuksista, joita ovat liikenteen ominaisuudet (liikennemäärät, ratanopeudet, kalusto), junapyörien ja kiskojen kunto sekä vallitsevat olosuhteet. Lisäksi maastonmuodot sekä etäisyys rataa vaikuttavat yksittäisessä tarkastelupisteessä havaittavaan meluun.

3 Ympäristömeluun liittyvät vaatimukset

3.1 Valtioneuvoston ohjearvot

Valtioneuvoston päätöksessä 993/1992 [1] on esitetty A-painotetun melun ekvivalenttitason (L_{Aeq}) ohjearvot ulkona ja sisällä (taulukko 1).

Jos melu on luonteeltaan iskumaista tai kapeakaistaista, mittaus- tai laskentatulokseen lisätään 5 dB ennen sen vertaamista taulukossa 1 mainittuihin arvoihin.

Taulukko 1. Melutason ohjearvot ulkona (VNp 993/92) [1]

Alue	Melun A-painotettu ekvivalenttitaso (keskiäänitaso), ohjearvo (L_{Aeq})	
Ohjearvot ulkona	Päivällä klo 07-22	Yöllä klo 22-07
Asumisalueet, virkistys-alueet taajamissa ja niiden välittömässä läheisyydessä sekä hoito- tai oppilaitoksia palvelevat alueet	55 dB(A)	50 dB(A) ¹⁾²⁾
Loma-asumiseen käytettävät alueet ⁴⁾ , leirintäalueet, taajamien ulkopuolella olevat virkistysalueet ja luonnonsuojelualueet	45 dB(A)	40 dB(A) ³⁾
Ohjearvot sisällä	Päivällä klo 07-22	Yöllä klo 22-07
Asuin-, potilas- ja majoitushuoneet	35 dB	30 dB
Opetus- ja kokoontumistilat	35 dB	-
Liike- ja toimistohuoneet	45 dB	-
Poikkeukset		
¹⁾ Uusilla alueilla melutason yöarvo on 45 dB(A)		
²⁾ Oppilaitoksia palvelevilla alueilla ei sovelleta yöohjearvoja		
³⁾ Yöarvoa ei sovelleta sellaisilla luonnonsuojelualueilla, joita ei yleisesti käytetä oleskeluun tai luonnon havainnointiin yöllä		
⁴⁾ Loma-asumiseen käytettävillä alueilla taajamassa voidaan soveltaa asumiseen käytettävien alueiden ohjearvoja		

3.2 Muut sisätiloja koskevat vaatimukset

Keskiäänitason ohjearvojen lisäksi melun hetkelliselle enimmäistasolle on Ympäristöoppaassa 108 [2] esitetty suositusarvo L_{AFmax} 45 dB. Arvo koskee myös yöaikaa ja se on laadittu erityisesti unta häiritsevän melun rajoittamiseen.

Rakennuksen suunnittelussa on huomioitava ympäristöministeriön asetus 796/2017 [3] rakennuksen ääniympäristöstä. Asetus määrittää, että rakennuksen, jossa on asuntoja, majoitus- tai potilashuoneita, ulkovaipan ääneneristys on suunniteltava ja toteutettava siten että ääneneristys on vähintään 30 dB. Samaa arvoa sovelletaan tässä työssä uusien koulurakennusten eri tiloille. Asetuksen mukaan opetus-, kokous-, ruokailu-, hoito-, harrastus-, liikunta- ja toimistotilojen meluntorjunta on suunniteltava ja toteutettava tilan käyttötarkoitus huomioon ottaen siten, että niissä saavutetaan toimintaa vastaava riittävän hyvä ääniympäristö.

4 Mittausmenetelmät

Mittauksissa mitataan raitiovaunun käytön eri akustisia tilanteita standardin ISO 3095:2013 mukaisesti sen soveltuvien osien. Alla olevissa kappaleissa 4.4-4.7 on esitetty eri akustisten ilmiöiden mittausten toteutustavat, jotka pohjautuvat em. standardiin ja sen liitteeseen D (Guidance for light rail vehicles measurement).

4.1 Käytetty mittauslaitteisto

Mittaukset suoritettiin luokan 1. äänitasomittauslaitteistolla, jossa standardin mukaiset päämittaukset suoritettiin Norsonic 145 äänitasomittarilla. Lisäksi äänitasomittarilla B&K 2250L tehtiin mittaukset standardin mukaisissa lisäpisteissä. Molemmat mittarit tallensivat myös 16 bit, 44-48 kHz:n ääninauhoituksen jokaisesta mittauksesta, joka mahdollistaa meluilmioiden havainnoinnin myös jälkikäteen sekä halutun tulosanalyysin. Mittarit kalibroitiin (B&K 4228) päivittäin ennen ensimmäisen mittauksen alkua. Kalibrointisignaalia nauhoitettiin ennen ja jälkeen jokaisen mittaustapahtuman ja todettiin mitaustulos muuttumattomaksi.



Kuva 1. Mittaukset toteutettiin Norsonic 145 ja B&K 2250 light äänitasomittareilla.

4.2 Mittausolosuhteen vaatimukset

Standardin ISO 3095:2013 mukaiset vaatimukset mittauspaikoille ja -olosuhteille ovat pääpiirteittäin seuraavat:

- Mittauspaikan maapinnan korkeus rataa/raitiovaunuun nähden on 0...-2 m
- Maanpinta ei saa olla ääntä absorboivaa (lunta, korkeaa kasvillisuutta)
- Maanpinta ei saa olla ääntä heijastavaa (vettä, jäätä, asfalttia tai betonia)
- Mikrofonin lähialue (3x mittausetäisyys) ei saa olla heijastavia objekteja kuten valleja, mäkiä, kiviä, siltoja, rakennuksia tai muita kulkuneuvoja.
- Sääoloilla ei saa olla vaikutusta mittaus tulokseen (ei voimakasta sadetta tai yli 5m/s tuulennopeutta mittauspaikalla)
- Muiden melulähteiden vaikutus ei saa olla merkittävä. Taustamelun mittausajalta täytyy olla 10 dB alle mitatun lopputuloksen.

4.3 Testattava raitiovaunu

Pääosa mittauksista tehtiin hiekkasäkein lastatulla raitiovaunulla TRO06. Lastauskuorman paino vastasi matkustajia täynnä olevan raitiovaunun kuormaa. Raitiovaunulla oli ennen testejä ajettu 5600km, kun standardin vaatimus vähimmäisajomäärälle on 1000 km. Kilometrimäärä on vähäinen raitiovaunulle, joten vaununpyöriä voidaan pitää uudenveroisina kuten myös testeissä käytettäviä kisko-osuuksiakin. Ajan saatossa vaununpyörä ja kisko kuluttavat toisiaan, jolloin tuotettu meluakin muuttuu. Jos kuluminen on tasaista, tuotettu melu voi vähentyä mitatusta lähtötilanteesta. Jos pyörään tai kiskoon tulee koloja (esim. lovipyörä), tuotettu ympäristömelu voi kasvaa.



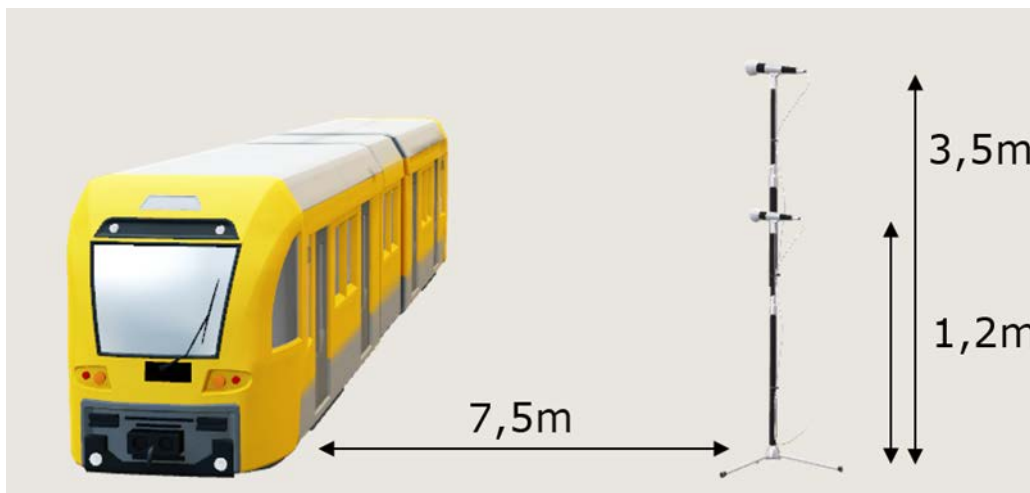
Kuva 2. Mittauskohteena toiminut raitiovaunu TRO06 lastattiin hiekkasäkein vastamaan korkeimman matkustajakapasiteetin tilannetta.

Lastatun vaunun lisäksi mittauksiin käytettiin myös tyhjiä raitiovaunuja. Kaikilla melumittauksiin osallistuneilla vaunulla oli ajettu yli 1000 km. Tyhjiä raitiovaunuja käytettiin seisonta- ja kaarrekirskuntamittauksissa. Lisäksi nopeusmittauksissa lastatun vaunun lisäksi mitattiin tyhjän vaunun tuottamaa melua referenssitiedoksi kahdella eri nopeusalueella.

4.4 Nopeusmittaukset

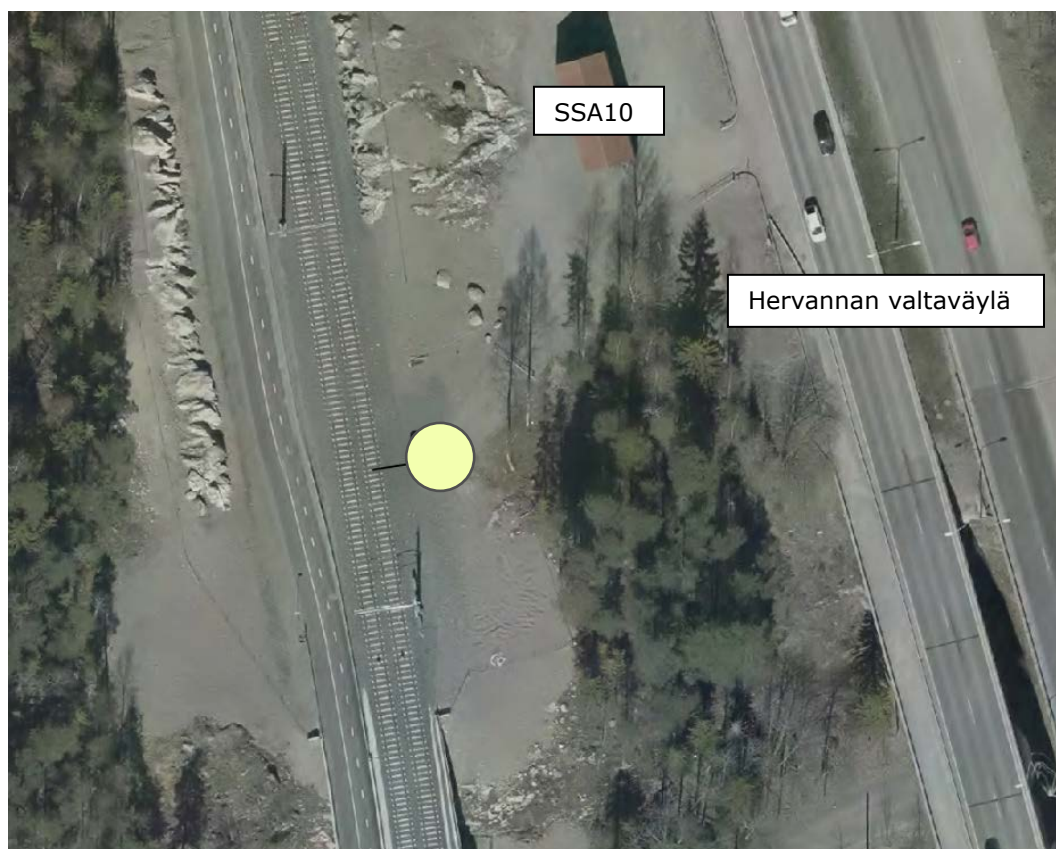
Nopeusmittaukset suoritettiin mittaamalla raitiovaunun tasaisen nopeuden ohiajoa samanaikaisesti kahdella eri korkeudella (1,2m ja 3,5m) 7,5m:n etäisyydellä radan keskilinjasta. Mittaukset suoritettiin nopeusalueille 20km/h, 30km/h . . . 70km/h ja

mittaukset toistetaan 3 kertaa (18 mittausta). Mittaukset tehtiin lastatulla vaunulla. Tuloksia täydennettiin tyhjällä vaunulla tehdyillä mittauksilla nopeuksille 40 km/h ja 70 km/h.



Kuva 3. Nopeusmittauksien mittausasetelma

Nopeusmittausten mittauspaikkana oli sähkönsyöttöasema SSA10 lähialue Pohjois-Hervannan pysäkin ja Hallilan pysäkin välillä (kuva 4). Mittauspaikalla standardin määrittämät vaatimukset mittauspaikan olosuhteille toteutuvat. Taustamelua alueelle aiheutuu Hervannan valtaväylästä, jonka vaikutusta vähennettiin ajoittamalla mittaukset ilta-yö-aikaan. Etäisyys mittauspisteestä Hervannan valtaväylän lähimmän ajokaistan reunaan oli 50 m. Testattava raitiovaunu ajoi mittauspistettä lähintä raideosuutta edestakaisin.



Kuva 4. Nopeusmittausten mittauspiste (keltainen ympyrä) sähkönsyöttöasema SSA10 lähiympäristössä.



Kuva 5. Nopeusmittauksen mittauspaikka ohitustilanteessa

Mittauksissa raitiovaunun nopeus määritetään vaunun oman nopeusmittarin avulla. Raitiovaunun nopeusmittarin mukaan kaikki ohitustilanteiden tavoiteltavat nopeudet toteutuivat lukuun ottamatta 70 km/h ohiajoja, jolloin nopeus oli kaikilla mittauskerroilla

69 km/h. Standardin sallima nopeuserot saavat olla suurimmillaan 3%, joka toteutui kaikkien mittauksien kohdalla.

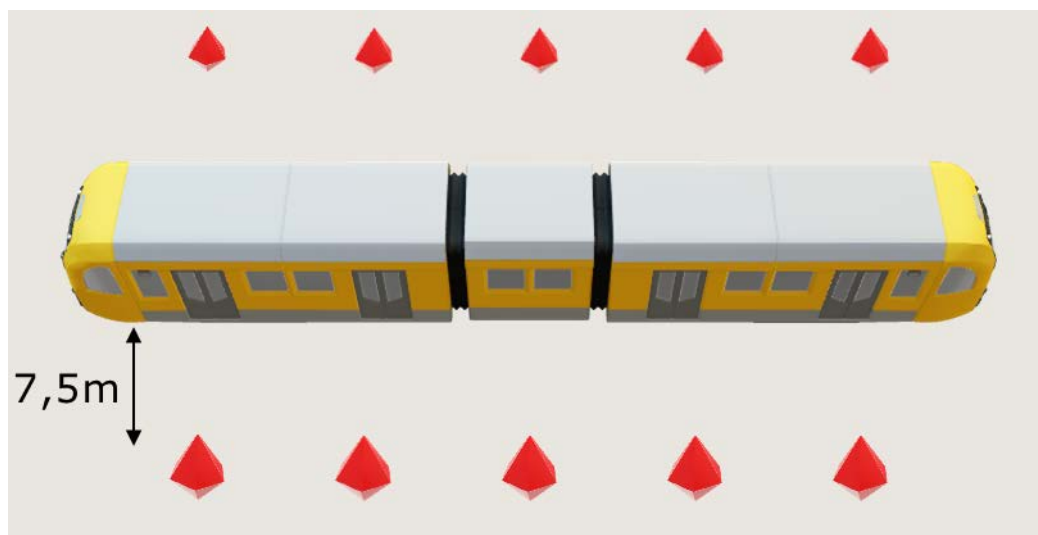
Raitiovaunua voidaan pitää symmetrisenä melulähteenä, koska vaunua voidaan ajaa molemmista päistä. Tästä syystä ohitusmittaukset suoritettiin samalle puolelle raitiovaunua.

Mittauksen tarkoituksena on määrittää ohitusajan keskiäänitaso L_{Aeq} . Ohitusaika lasketaan siitä hetkestä, kun raitiovaunun keula ohittaa mittauslinjan siihen asti, kun raitiovaunun peräpää on mittauslinjan kohdalla. Näin ollen eri nopeuksille keskiäänitason määrittävä aika vaihtelee n. 1,9s ... 6,7s välillä.

Tulosanalyysissä yksittäisiä mittautuloksia verrataan toisiinsa ja mittautulosten ero ei saa standardin mukaan olla yli 3 dB. Saaduista yksittäisten mittauksen keskiäänituloksista lasketaan aritmeettinen keskiarvo, joka kuvaa kyseisen nopeuden tuottamaa ohiajon melua.

4.5 Seisontamittaukset

Raitiovaunun seisontamittaukset suoritettiin yhtäaikaaisesti 1,2m ja 3,5m:n korkeudella 7,5m:n etäisyydellä radan keskilinjasta. Mittauspisteitä oli raitiovaunun molemmin puolin tasavälein yhteensä 10, jotka sijaitsivat kohtisuoraan raitiovaunun pituussuuntaan nähden. Mittaukset toistettiin 3 kertaa yhdessä mittauspisteessä. Raitiovaunun melua tuottavat laitteet olivat toiminnassa. Vaunun jäähdytysjärjestelmää täytyi ajaa manuaalisesti melupäästön maksimoimiseksi. Mittaus vastaa pysäkillä olon merkittävintä mahdollista melutilannetta.



Kuva 6. Seisontamittauksen mittauspisteet (punainen merkki). Mittauspisteet sijaitsivat 7,5m etäisyydellä ja mittaukset toteutettiin 1,2m ja 3,5m korkeudella jokaisessa mittauspisteessä.

Seisontamittauksen toteutuksessa havaittiin haasteita raitiovaunun jäähdytinlaitteiden käyttämisen kanssa, joten kaikkia standardin mukaisia mittauspisteitä ei toteutettu. Standardissa mittauspisteitä olisi ollut noin puolet enemmän, mutta mittausajien arvion

mukaan valitut mittauspisteet edustavat ja kuvaavat hyvin raitiovaunun tuottamaa melua sen ollessa paikallaan.

Mittaukset suoritettiin Hervantajärven pysäkin läheisyydessä, jossa oli avoin ja taustamelultaan vähäinen alue mittauksien suorittamiseen.

Mittauksissa mitattiin 20s keskiäänitaso L_{Aeq} yksittäisissä pisteissä. Yksittäisten pisteiden tulokset yhdistetään raitiovaunuun kokonaismelutulokseksi alla esitetyllä yhtälöllä (1), joka ottaa huomioon mittauspisteiden tulokset ja sekä raitiovaunun osapituuden, jota yksittäinen mittauspiste kuvaa.

$$\langle L_{pAeq,T} \rangle_{unit} = 10 \lg \left(\sum_{i=1}^n \frac{L_i}{L_{tot}} 10^{L_{pAeq,T}^i/10} \right) \quad (1)$$

$L_{pAeq,T}$	keskiäänitaso (T=20sek)
n	mittauspisteiden lukumäärä
L_i	yksittäisen mittauspisteen kuvaama raitiovaunun osapituus

Kokonaismelutulos lasketaan erikseen kaikille kolmelle mittaukselle. Saaduista tuloksista lasketaan aritmeettinen keskiarvo, joka on koko seisonnamittauksen lopputulos.

4.6 Jarrutus- ja kiihdytysmittaukset

Kiihdytys- ja jarrutusmittaukset mitattiin samanaikaisesti 1,2m ja 3,5m korkeudella 7,5m etäisyydellä radan keskilinjasta. Mittaukset toistetaan kolme kertaa täydellä vauvulla molemmissa testeissä.

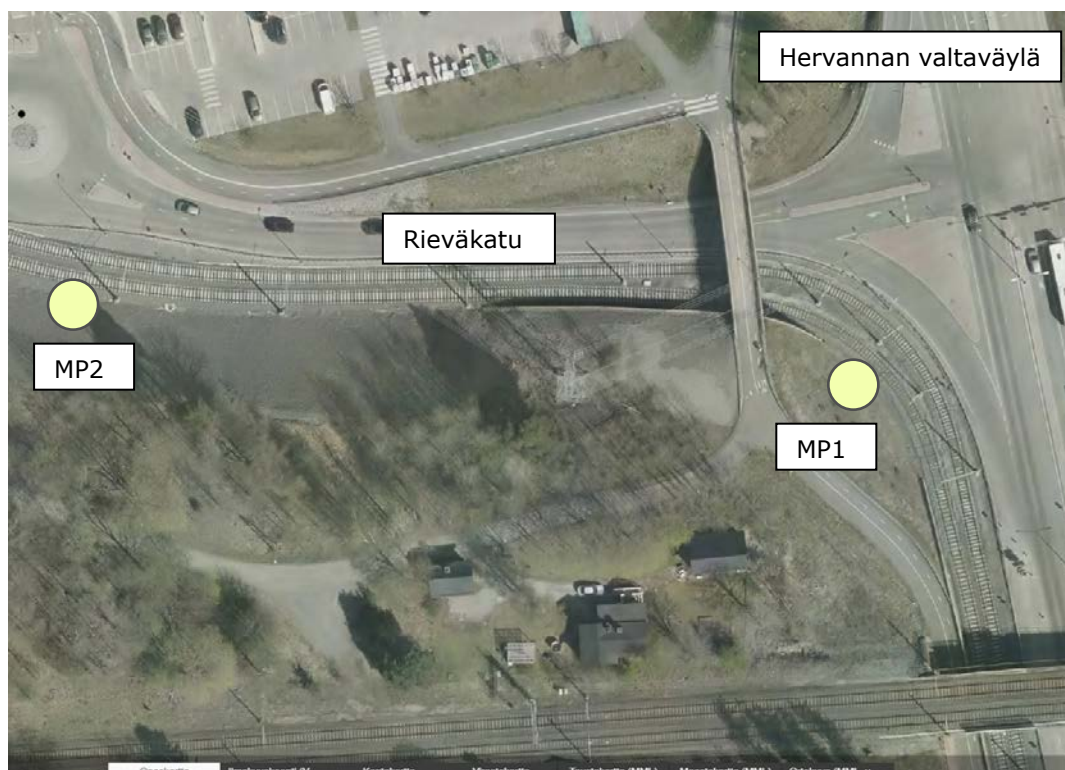
Kiihdytysmittauksissa mittarit sijoitetaan 10m:n etäisyydelle raitiovaunun lähtöpisteen etupuolelle ja kiihdytys tehdään pysähdyksestä aina 40 km/h asti. Kiihdytyksen tuottamasta melusta määritetään enimmäisäänitaso L_{AFmax} ja keskiäänitaso L_{Aeq} .

Jarrutusmittauksissa raitiovaunu pysähtyy siten, että mittareiden sijainti on raitiovaunun ensimmäisen vaunuosan keskellä ($\pm 10m$). Jarrutus tehdään 30 km/h nopeudesta pysähdykseen asti käytönaikaisella maksimijarrutusteholla, mutta ei hätäjarrulla. Jarrutustahtumasta määritetään enimmäisäänitaso L_{AFmax} .

Mittaukset toteutettiin samalla mittareiden asettelulla ja samassa sijainnissa kuin nopeusmittaukset (kappale 2.3).

4.7 Kaarrekirskuntamittaukset

Kaarrekirskuntamittauksia varten kirkunnan esiintyvyyttä tarkasteltiin koko raidelinjan matkalta. Toistuvaa kirkuntaa havaittiin vain Hervannan valtavyylän ja Rieväkadun risteyksen käännoksessä ulomalla raideosuudella (kuva 7, MP1). Käännoksen kaarresäde on 30m. Lisäksi Rieväkadun suhteellisen loivan kaarteeseen ohiajossa havaittiin toisinaan vaimeampaa kirkuntaa. Tätä ääntä mitattiin myös erillisessä mittauspisteessä (kuva 7, MP2).



Kuva 7. Kaarrekirkkunan mittauspisteet MP1 ja MP2 Rieväkadun ja Hervannan valtavyälyn risteuksen lähellä.

Mittaukset suoritettiin kuvan 7 mittauspisteissä MP1 ja MP2. Mittaukset toistettiin neljä kertaa.

Mittaustuloksista määritetään melutapahtuman enimmäisäänitaso L_{AFmax} , keskiäänitaso L_{Aeq} sekä kirkkunan taajuusjakauma.

4.8 Sähkönsyöttöasemien mittaukset

Mittaukset suoritettiin asemille SSA10 ja SSA12 asemien heijasteettoman ympäristön ja kohtuullisen taustamelun takia. Lisäksi asemia pystyttiin kuormittamaan useiden raitiovaunujen yhtäaikaisen ajon tuomalla kuormalla.

Mittaukset suoritettiin kahdella mittarilla siten, että mitattiin sekä jäähdytyspuhallinta ja muuntajayksikköä samanaikaisesti. Mittausten aikana raitiovaunujen tuoma kuormitustilanne oli noin kaksinkertainen verrattuna käytönaikaiseen tilanteeseen.



Kuva 8. Sähkönsyöttöasemien melulähteitä ovat muuntajien ja IV-koneen ilmanotto-aukot

Sähkönsyöttöasemien melua (SSA06, SSA09 ja SSA10) on mitattu aikaisemmin, mutta muuntajien tuomaa melua ei koeliikenteen puutteen vuoksi ole voitu mitata. Tehtyjen selvitysten perusteella kaikkien sähkönsyöttöasemien jäähdytyspuhaltimiin on asennettu lamellivaimennin.

4.9 Mittausten epävarmuudet

Mittausepävarmuuteen vaikuttaa käytettävä mittauslaitteisto, mittausolosuhteet, mitaustulosten hajonnat sekä mittauskohteen muutokset. Mittauslaitteistona käytettiin luokan 1. äänenpainetasomittareita, jotka kalibroitiin päivittäin. Jokaista mittaustapahumaa ennen ja jälkeen tallennettiin kalibrointisignaalia ja todettiin äänenpainetaso muuttumattomaksi. Mittauslaitteen tuoma epävarmuus arvioidaan olevan $\pm 0,5$ dB.

Kaikki mittaukset tehtiin melulähteen välittömässä läheisyydessä sekä merkittävimmät mittausstandardin määrittelemät vaatimukset olosuhteille pääosin täytettiin. Kiihdytys- ja jarrutusmittausten aikana satoi ajoittain lunta. Lumi ei jäänyt merkittävästi maahan, joten sillä ei ollut vaikutusta maaperän tuomaan vaimennukseen. Sateen takia raide oli märkä, mutta raitiovaunun pyörä-kiskokontakti ei luistanut mitatuissa käytönaikaisissa

maksimivoiman kiihdytyksissä ja jarrutuksissa. Sateen vaikutus melutapahtumiin arvioidaan vähäiseksi. Mittausolosuhteiden tuoma epävarmuus arvioidaan olevan ± 1 dB.

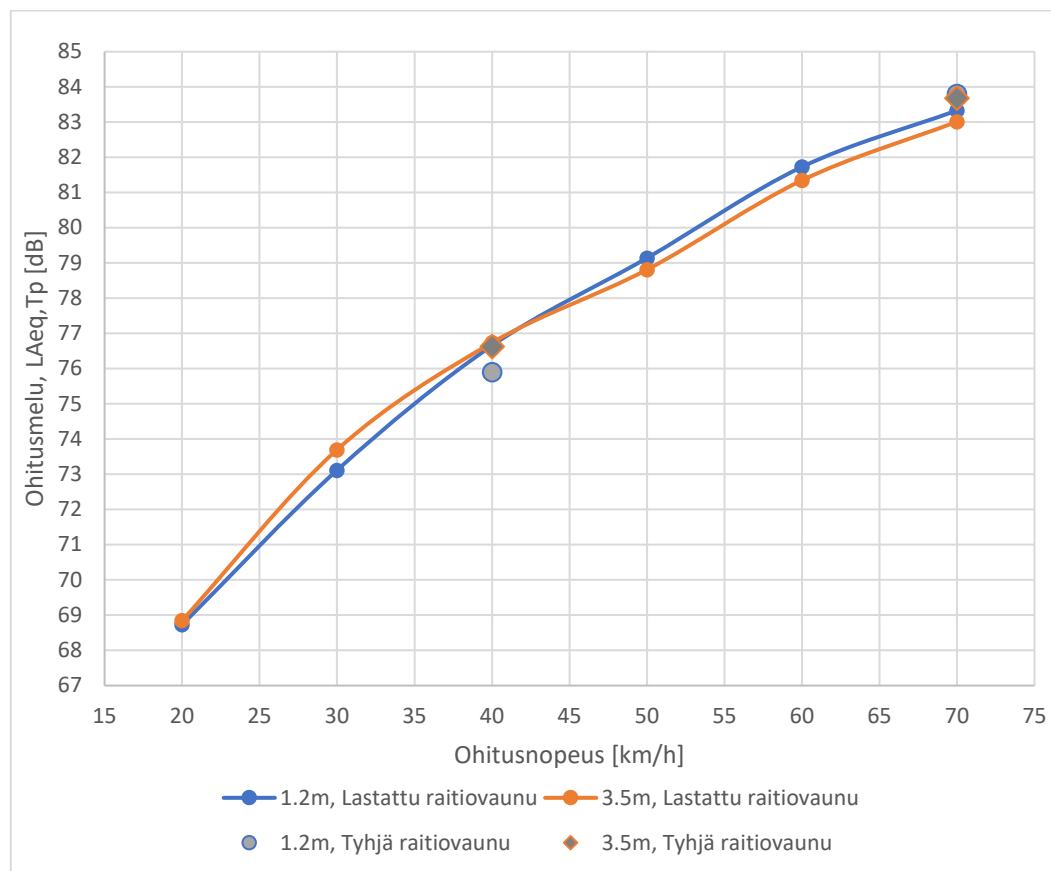
Mittauskohteen muutokset voivat olla pitkällä aikavälillä merkittäviä. Merkittävimmät muutokset tapahtuvat vaunupyörän sekä kiskon kulumisen myötä ja tuotettu melu voi vähentyä tai kasvaa. Pitkänaikavälin epävarmuuteen ei tässä raportissa voida ottaa kantaa, kun mitatut tulokset ovat uudentyypisistä raitiovaunusta, joista saatuja kokemuksia on vähän.

Tehtyjen mittauksien kokonaisepävarmuudeksi arvioidaan $\pm 1,5$ dB, kun mittauskohteen pitkäaikaisia muutoksia ei oteta huomioon.

5 Mittaustulokset

5.1 Nopeusmittaukset

Nopeusmittauksien tulokset ovat esitetty alla olevassa kuvassa 9. Mittausten tarkemmat tiedot ovat koottu liitteeseen 1, jossa on yksittäisten mittauksien ohiajon keskiäänitasotulokset sekä taajuusjakaumat nopeuksittain esitettynä 1/1 ja 1/3 oktaavitason tarkkuudella.



Kuva 9. Raitiovaunun ohiajon tuottama keskiäänitaso nopeuden muutosten (20-70 km/h) suhteen. Mittausetäisyys 7,5 m radan keskilinjasta

Raitiovaunun tuottama melu kasvaa suhteellisen tasaisesti nopeuden lisääntyessä. Kasvu ei ole kuitenkaan täysin lineaarista, sillä suurinta kasvu on pienemmillä nopeuksilla. Melun lisääntyminen on 20-40 km/h nopeusvälillä $\sim 0,4$ dB/(km/h), kun taas nopeusvälillä 40-70 km/h vastaava kasvu on $\sim 0,2$ dB/(km/h).

Melun eri tarkastelukorkeuksien erot ovat 0,1-0,6 dB välillä, joten melulähteen suuntaavuutta voidaan pitää vähäisenä. Pienemmillä nopeuksilla tulokset ovat hyvin lähellä toisiaan, mutta nopeuden kasvaessa alemmassa mittauskorkeudessa 1,2 m mitattu melu on 3,5 m korkeudessa mitattuja tuloksia suurempi. Tämä voi johtua vaunupyörien kontaktimelun lisääntymisestä nopeuden kasvaessa, joka suuntautuu hieman enemmän maanpinnan suuntaisesti.

Melumittaukset toteutettiin myös tyhjälle raitiovaunulle kahdella eri nopeudella. Nopeudessa 40 km/h saadut tulokset olivat 0,1-0,8 dB lastattua vaunua pienemmät. Vastavasti nopeudella 70 km/h tulokset olivat 0,5-0,7 dB suuremmat. Eroja voidaan pitää maltillisina, jotka voidaan havaita mittauksilla. Aistivaraisesti alle 1 dB:n eroja äänenpainetasossa on vaikea havaita.

Raitiovaunun nopeusmittausten äänenpainetasojen taajuusjakaumat (liite 1) ovat pääosin tasaisesti laajakaistaisia kaikilla nopeuksilla. Poikkeuksena on 40 km/h nopeus, jolloin 1/3 oktaavi- eli terssikaistojen arvoista erottuu 630 Hz taajuuskaista. Taajuuskaista erottuu selkeimmin lastatun vaunun 3,5m korkeudella tehdyissä mittauksissa. YM ohje 1/1995 määrittää kapeakaistaisuuden seuraavasti: "ainakin yhden terssikaistan terssipainetaso on vähintään 5 dB suurempi kuin välittömästi kyseisen kaistan ala- ja yläpuolella olevien terssikaistojen äänenpainetasot". Määritelmän mukaisesti raitiovaunun melu on kapeakaistaista 40 km/h nopeudella 3,5 m korkeudella tehdyille lastatun vaunun mittauksille (terssikaistojen ero 6,2 dB). Vastaavan nopeuden 1,2 m tehdyille lastatun vaunun mittauksille ja molemmilla korkeuksilla tehdyille tyhjän vaunun mittauksille kapeakaistaisuuden määritelmä ei toteudu. Mittaukset tehtiin lähellä raitiovaunua (7,5m). Melulähteen tuottaman melun kapeakaistaisuuden voimakkuus heikkenee tarkasteltavan etäisyyden kasvaessa.

5.2 Seisontamittaukset

Tehtyjen mittaustulosten ja kappaleessa 4.5 esitettyjen analyysin mukaan seisontamittauksen yhdistetty äänenpainetason tulos koko raitiovaunulle on 51 dB mittauksille, jotka suoritettiin 1,2m korkeudella. Vastaava luku 3,5m korkeudella tehdyille mittauksille on 52 dB. Mittausetäisyys raitiovaunun keskilinjasta oli 7,5m.

Liitteessä 2 on esitetty seisontamittausten yksittäistulokset, tulosityyppi, taajuusjakauma sekä samassa mittauspisteessä tehtyjen mittausten hajonnat.

Jäähdytinlaitteet olivat päällä kaikkien tehtyjen mittausten aikana. Laitteiden toimintaprosessiin sisältyy erilaisia käyntisyklejä, jolloin samasta mittauspisteestä saaduista mittaustuloksista on jonkin verran hajontaa. Hajonta ylittää kahdessa mittauspisteessä (A5, B5) standardin määrittämän 3 dB:n rajan. Jäähdytinsyklin käyntisykleistä johtuen tuloksien arvioidaan kuvaavan hyvin melulähdettä, joten mittauksia ei uusittu.

Jäähdytinlaitteiden ääni sisältää kapeakaistaista ääntä suurilla taajuuksilla 2,5 – 3,15 kHz. Ääntä voi kuvailla vinkumiseksi ja se erottuu muusta raitiovaunun huminasta

selkeästi. Mittaukset tehtiin lähellä raitiovaunua (7,5m). Melulähteen tuottaman melun kapeakaistaisuuden voimakkuus heikkenee tarkasteltavan etäisyyden kasvaessa.

5.3 Kiihdytys- ja jarrutusmittaukset

Kiihdytystapahtumasta määritettiin enimmäisäänitaso L_{AFmax} ja keskiäänitaso L_{Aeq} . Jarrutusmittauksista määritettiin jarrutustapahtuman enimmäisäänitaso L_{AFmax} . Tehtyjen mittausten keskiarvotulokset ovat esitetty alla olevassa taulukossa. Liitteessä 3 on esitetty kiihdytys- ja jarrutusmittausten yksittäistulokset ja tapahtumien taajuusjakauma.

Taulukko 2. Kiihdytys- ja jarrutusmittaustulokset

	Korkeus 1,2m		Korkeus 3,5m	
	L_{AFmax}	L_{Aeq}	L_{AFmax}	L_{Aeq}
Kiihdytys, yhteistulos	76	73	77	74
Jarrutus, yhteistulos	65	-	67	-

Kiihdytystapahtuman tuottama melu on tasaisesti voimistuva. Yhdessä mittauksessa havaittiin ajolankojen kontaktiääntä, joka hieman kasvatti kiihdytystapahtuman enimmäisäänitason arvoa (~ 2 dB). Kontaktiääni ei johtunut kiihdytystapahtumasta vaan SSA10 alueen johdinverkon katkosta, jonka läheisyydessä mittaukset tehtiin. Kiihdytys tehtiin 40 km/h nopeuteen. Kun saatuja tuloksia verrataan tasaisen nopeuden testeihin, havaitaan kiihdytyksen keskiäänitaso L_{Aeq} jäävän 40 km/h nopeustestin keskiäänitasotuloksen (~ 77 dB) alapuolelle.

Jarrutustapahtuman melu on tasaisesti vaimeneva. Yhdessäkään mittaustapatumassa ei havaittu jarrujen tai pyörä-kiskokontaktin kirsuntaa.

Tuloksista voidaan sanoa, että raitiovaunujen kiihdytysten ja pysähdysten tuoma melu ei lisää merkittävästi raitiovaunumelun tuottamaa ympäristömelun keskiäänitasoa tai yleistä häiritsevyyttä tai havaittavuutta.

5.4 Kaarrekirskuntamittaukset

Kaarrekirskunta ei ole Tampereen raitiovaunulle tai sen radan kaarteille ominainen piirre. Tässä kappaleessa esitettyjä tuloksia tulisi käyttää vain perustelluista syistä. Lähelläkohtaisesti normaalin käyttötilanteen aikana merkityksellistä kaarrekirskuntaa ei pitäisi esiintyä mm. kiskojen voitelun ja kääntyvien telien ansiosta. Esimerkiksi voitelu on koeajoliikenteen aikana vähäisempää kuin tulevan käyttötilanteen aikana, koska voitelun määrä on suoraan riippuvainen raitioliikenteen määrästä. Lisäksi voitelua voidaan tehostaa tarpeen mukaan yksittäisiin kaarteisiin.

Mittauksissa Rieväkadun ja Hervannan valtaväylän risteyksen kaarteissa (MP1) pystyttiin mittaamaan äänipäästöarvoja, jossa kaarrekirskunta oli riittävän kuuluva ja josta tulokset voitiin luotettavasti laskea. Lisäksi Rieväkadun varren loivassa kaarteissa mitattiin raitiovaunun ohituksen yhteydessä ilmenevää lievempää kirsuntaa (MP2), joka ei toteudu jokaisella ohiajolla.

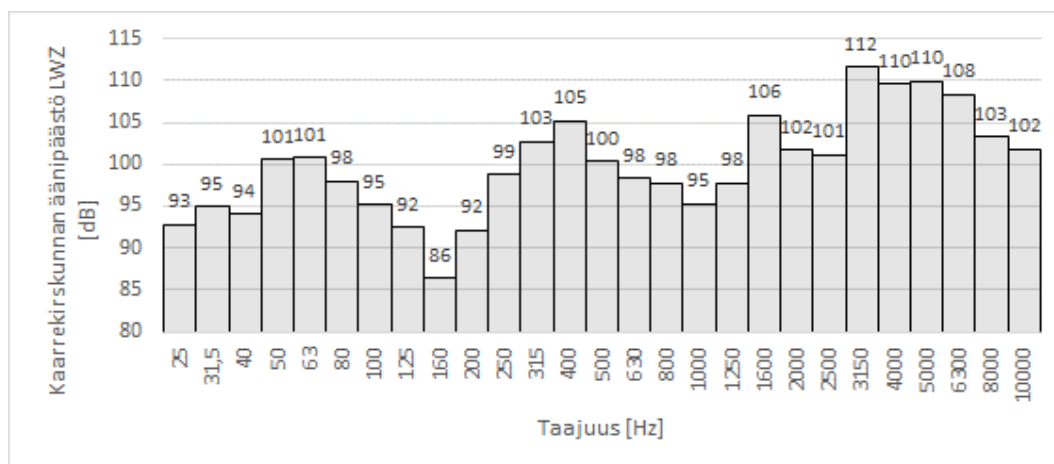
Mittaustuloksista määritettiin kirs kuntatapahtuman enimmäisäänitaso L_{AFmax} , jotka on esitetty alla olevassa taulukossa. Mittaukset toteutettiin neljän tyhjän raitiovaunun ohiajolle.

Taulukko 3. Kaarrekirs kuntamittausten enimmäisäänitasojen tulokset

	MP1, etäisyys rataan 10,6m	MP2, etäisyys rataan 6,3m
	L_{AFmax} [dB]	L_{AFmax} [dB]
Mittaus 1	84,5	ei kirs kuntaa
Mittaus 2	83,8	ei kirs kuntaa
Mittaus 3	83,1	87,4
Mittaus 4	86,7	79,2

Saaduista tuloksia tarkasteltaessa on syytä huomioida, että enimmäisäänitasoon vaikuttaa suuresti etäisyys melulähteeseen, joten eri mittauspisteissä mitattuja tuloksia ei voida suoraan verrata. Lisäksi MP2 mittauksissa kirs kuntaa tapahtui mittarin kohdalla (Mittaus 3) ja myös kauempana mittarista (Mittaus 4), jolla enimmäisäänitaso ero selittyy.

Taajuusjakauma suurimmalle mitatulle arvolla on esitetty myös alla olevassa kuvassa 10.



Kuva 10. Kaarrekirkkunan keskimääräinen taajuusjakauma korkeimman enimmäistason äänelle, L_{Wz}

Raitiovaunun kirs kuntamelu sisältää runsaasti korkeita taajuuksia (3150-6300 Hz). Korkeat taajuudet erottuvat liikennealueiden muista melulähteistä helposti, mutta toisaalta ne vaimenevat helpommin etäisyyden suhteen verrattuna pientaajuuksiin ääniin.

Mitattujen kaarteiden lisäksi heikkoa kaarrekirs kuntaa havaittiin toisinaan Hervannassa Insinöörinkadun ja Atomipolun risteyksen kaarteissa. Kirs kuntaa ei toteutunut kaarrekirs kunnan mittauspäivänä. Muita kaarrekirs kunnan riskikohteita ei mittausviikon tarkailun aikana havaittu.

5.5 Sähkösyöttöasemien mittaukset

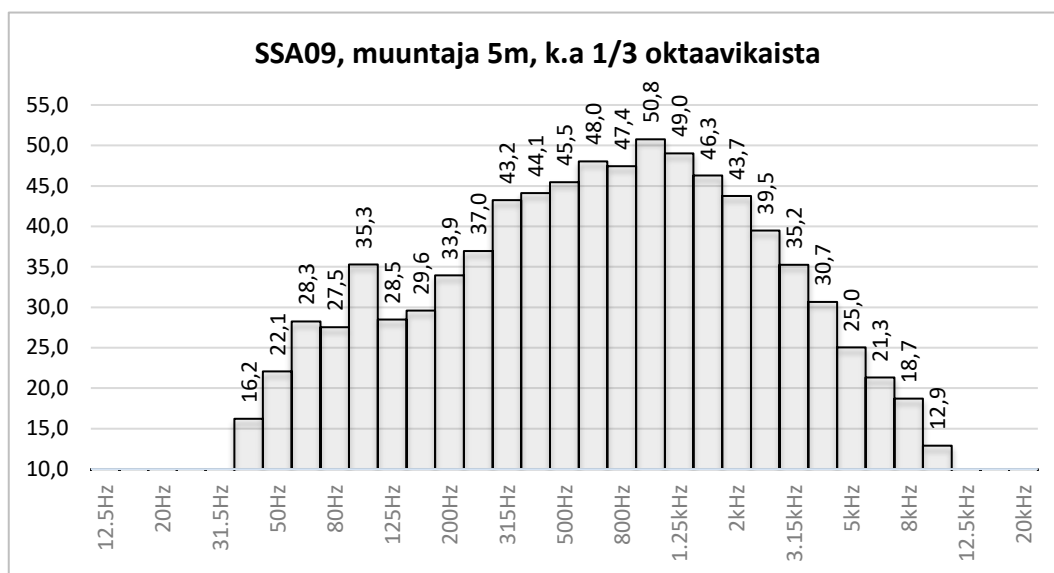
Sähkösyöttöasemille SSA09 ja SSA12 suoritettiin mittauksia tehostetun raitiotieliikenteen aikana. Molempien mittausten aikana sähkösyöttöaseman kuormitusalueella liikui neljä raitiovaunua yhtäaikaisesti.

Mittaukset kohdistettiin asemien muuntajien ja IV-koneen ilma-aukoille, jotka havaittiin asemien ainoiksi melulähteiksi. Aikaisempien melutarkastelujen perusteella molempien sähkösyöttöasemien IV-koneille oli asennettu lamellivaimennin. Mittaustulosten äänenpainetasot ovat esitetty alla olevassa taulukossa sekä muuntajien taajuusjakauma terssikaistoittain kuvissa 11 ja 12.

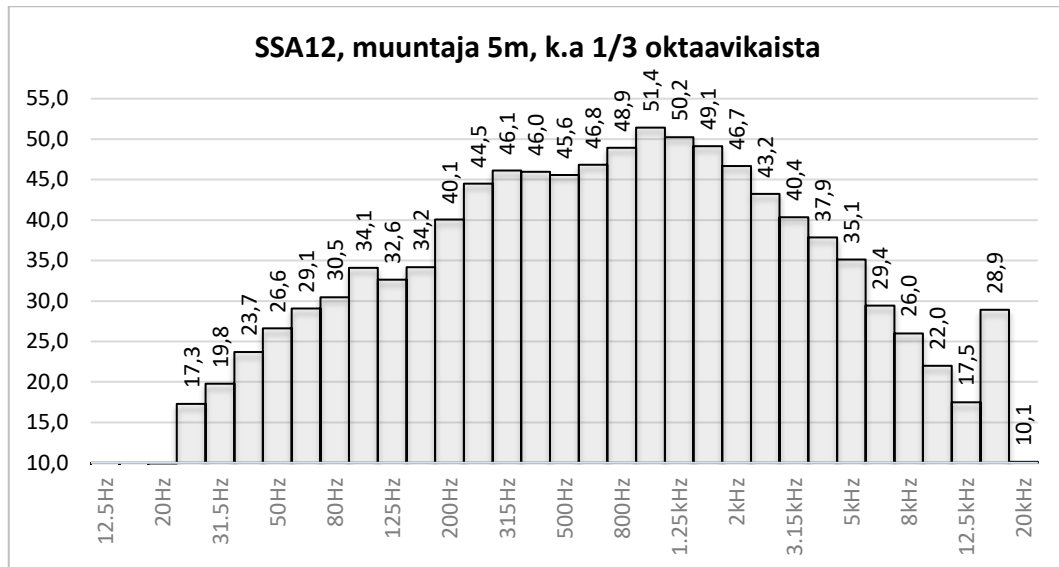
Taulukko 4. Sähkösyöttöasemien melumittausten äänenpainetasojen Lp tulokset eri etäisyyksillä

	Äänenpainetaso Lp [dB]	
	SSA09	SSA12
IV-kone 1m (seinästä)	50	48
Muuntaja 1 m	59	55
Muuntaja 5 m	52	47

IV-koneen melu lisääntyy koneelta vaaditun tehontarpeen mukaan, joka kuormituksesta huolimatta koeajoliikenteen aikana ei ollut lähellä täyttä kapasiteettiä (viileä ulkoilma). Sähkösyöttöaseman SSA09 IV-konetta lamellivaimentimen kanssa on aikaisemmissa mittauksissa ajettu manuaalisesti täydellä teholla ja tällöin äänenpainetaso 1,5m päässä (seinästä) on ollut 62 dB.



Kuva 11. SSA09 muuntajan äänenpaineen taajuusjakauma 1/3 oktaavikaistoittain. Taajuustulos sisältää runsaasti myös taustääntä, joka on pääosin tieliikenteestä.



Kuva 12. SSA12 muuntajan äänenpaineen taajuusjakauma 1/3 oktaavikaistoittain. Taajuustulos sisältää runsaasti myös taustääntä, joka on pääosin tieliikenteestä.

Äänenpainetasoltaan lähellä sähkösyöttöasemia tehdyt mittaukset ovat suhteellisen vähäisiä. Muuntajan melu sisältää kapeakaistaisuutta taajuuskaistalla 100 Hz, jolla on vaikutusta melun erottuvuuteen ja häiritsevyyteen. Lisäksi SSA12 mittausten tulostuloksissa (kuva 10) havaittiin kapeakaistaisuutta 16 kHz taajuuskaistalla. Ääntä ei havaittu tai paikallistettu mittausten aikana aistinvaraisesti. YM ohje 1/1995 määrittää sanktioitavan kapeakaistaisuuden seuraavasti: "ainakin yhden terssi-kaistan terssipainetaso on vähintään 5 dB suurempi kuin välittömästi kyseisen kaistan ala- ja yläpuolella olevien terssikaistojen äänenpainetasot". Jos määritelmä täyttyy, kapeakaistaisuus huomioidaan lisäämällä 5 dB sanktio mittaustulokseen, kun tuloksia verrataan ympäristömelun ohjearvoihin. Yöliikenteen vuoksi melun tulisi alittaa yöajan ohjearvo asuinrakennuksille 50 dB (asuinrakennusten oleskelualueet ulkona, parvekkeet).

Muuntajien tuottamat melupäästö vaihteli mittauskohteiden kesken. Syynä voi olla asemien yksilölliset erot kuten muuntajien ilmanottoaukon äänenvaimennuksen toteutus-tapa. Muuntajan melu pysyi melutasoltaan suhteellisen tasaisena kuorman muuttuessa.

Tehtyjen mittausten perusteella havaitaan, että sähkösyöttöasemien tuottama ympäristömelu voi vaihdella asemien kesken, vaikka asemien perusrakenne on pääosin sama. Mitatut äänenpainetasot ovat suhteellisen vähäisiä ja valtaosalla sähkösyöttöasemien sijainneista melu ei erotu alueen taustamelusta. Sähkösyöttöasemien melu muuntajien osalta sisältää kapeakaistaisuutta ja IV-koneen osalta melu on havaittavaa (100% teholla) asemien läheisyydessä, jolloin ympäristömelulle asetetut ohjearvot lähellä olevalle asuinrakennukselle voivat ylittyä. Sähkösyöttöasemien tuottamaan ympäristömeluun vaikuttaa etäisyyden lisäksi alueen maanpinnan muodot ja absorptiokyky. Meluun voidaan vaikuttaa myös melulähteiden suuntaamisella eli ilmanottoaukkojen sijoittelulla sähkösyöttöaseman suunnitteluvaiheessa.

6 Lähteet

ISO 3095:2013 Acoustics – Railway applications - Measurement of noise emitted by railbound vehicles. CEN, Brussels, 2013

ISO 226:2003. Acoustics - Normal equal-loudness-level contours. International Organization for Standardization, Geneva, 2003.

Melutta -hankkeen loppuraportti. Ympäristöministeriön raportteja 20/2007. Ympäristöministeriö, Helsinki, 2007.

Ympäristömelun mittaaminen, Ohje 1/1995, Ympäristöministeriö, Helsinki, 1995.

Säätiedot	Lastatun vaunun mittaukset 27.4.2021	Tyhjän vaunun mittaukset 28.4.2021
Tuuli	0-0,5m/s	0-0,5m/s
Tuulensuunta	190°	340°
Lämpötila	2,5 °C	0 °C
Paine	1012 hPa	1014 hPa
Ilmankosteus	75%	90%
Pilvisyys	7/8	8/8

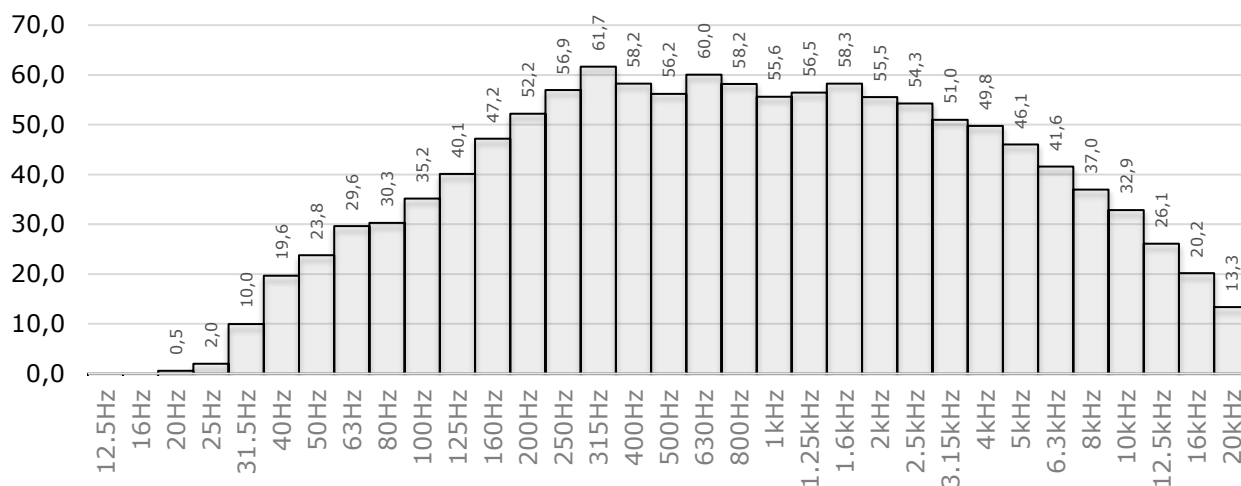
Tulokset

Lastattu vaunu, LAeq, 1,2m mittauskorkeus - Ohitustapahtuman äänenpainetaso ja taajuus 1/1 oktaavikaistoittain

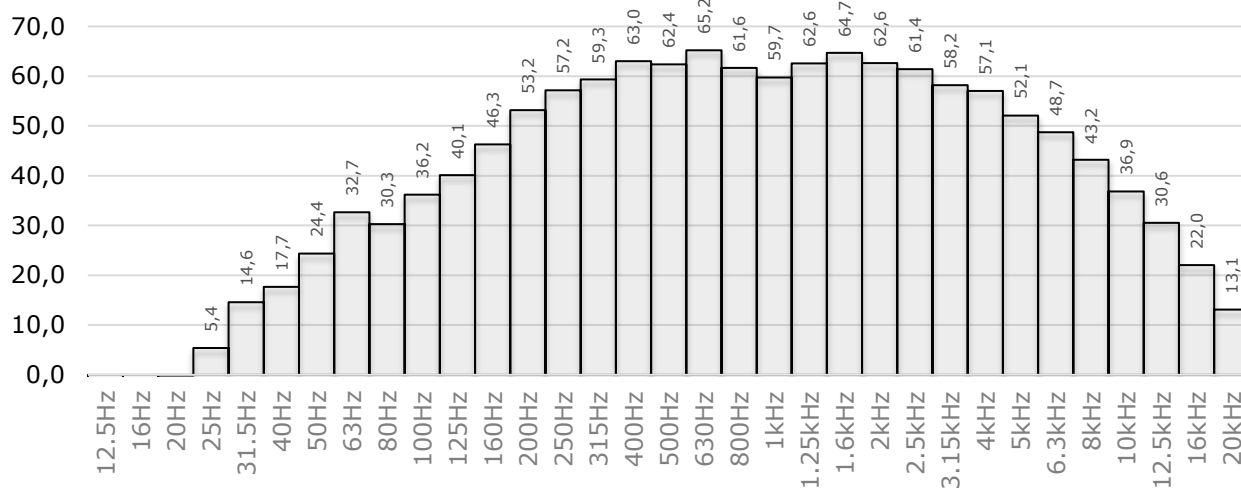
Nopeus	Mittaus nro	31.5Hz	63Hz	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz	Summa
20 km/h	1	19,7	33,1	48,5	64,4	63,7	62,0	61,1	54,1	42,6	69,2
	2	20,4	32,6	47,8	61,5	62,7	61,3	61,3	54,5	45,2	68,0
	3	20,4	34,9	48,2	64,1	63,2	61,7	61,0	53,9	42,3	68,9
	3x tulos k.a.	20,2	33,7	48,2	63,5	63,2	61,7	61,1	54,2	43,5	68,7
	St.Dev.	0,328	0,994	0,274	1,304	0,406	0,298	0,134	0,240	1,299	0,492
30 km/h	1	19,6	34,9	47,3	61,6	68,4	66,0	67,9	61,3	50,1	73,0
	2	19,8	35,5	47,7	62,5	68,9	66,7	67,9	61,2	50,0	73,4
	3	19,4	34,8	47,6	61,9	68,1	66,0	67,8	61,2	50,0	72,9
	3x tulos k.a.	19,6	35,1	47,6	62,0	68,5	66,3	67,9	61,2	50,0	73,1
	St.Dev.	0,176	0,338	0,196	0,382	0,340	0,317	0,032	0,045	0,067	0,214
40 km/h	1	22,4	35,1	48,2	64,7	71,8	70,1	71,9	66,0	55,0	76,8
	2	22,9	36,1	49,7	63,1	70,6	69,6	71,8	65,8	55,1	76,2
	3	24,6	34,8	48,2	64,5	71,7	70,2	72,1	66,0	55,2	76,9
	3x tulos k.a.	23,4	35,4	48,8	64,2	71,4	70,0	72,0	65,9	55,1	76,7
	St.Dev.	0,934	0,550	0,721	0,707	0,519	0,273	0,105	0,072	0,081	0,281
50 km/h	1	25,9	34,8	49,4	65,0	72,0	73,8	74,3	69,5	58,8	79,0
	2	26,1	35,2	49,2	65,0	71,9	74,1	74,7	69,5	58,8	79,2
	3	25,2	36,7	49,6	65,6	72,3	74,1	74,4	69,4	58,8	79,2
	3x tulos k.a.	25,8	35,6	49,4	65,2	72,1	74,0	74,5	69,5	58,8	79,1
	St.Dev.	0,388	0,783	0,174	0,264	0,170	0,153	0,146	0,060	0,026	0,083
60 km/h	1	29,1	37,8	50,0	67,4	74,5	77,2	77,0	72,8	62,2	81,9
	2	26,6	37,2	51,4	67,1	73,7	76,1	76,5	72,5	61,9	81,3
	3	28,2	37,3	50,4	67,0	74,3	77,3	77,0	72,7	62,2	81,9
	3x tulos k.a.	28,1	37,5	50,6	67,2	74,2	76,9	76,8	72,7	62,1	81,7
	St.Dev.	1,030	0,261	0,602	0,168	0,344	0,547	0,222	0,143	0,122	0,325
70 km/h	1	31,7	40,1	52,4	67,9	75,5	78,3	78,7	74,7	64,4	83,3
	2	32,9	40,2	52,7	67,7	75,3	78,4	78,7	75,0	64,6	83,4
	3	32,4	41,0	52,7	67,4	75,3	78,1	78,7	74,8	64,7	83,3
	3x tulos k.a.	32,3	40,5	52,6	67,6	75,4	78,3	78,7	74,8	64,6	83,3
	St.Dev.	0,487	0,417	0,138	0,198	0,119	0,127	0,024	0,104	0,123	0,045

Lastattu vaunu, LAeq, 1,2m mittauskorkeus - Ohitustapahtuman äänenpainetason taajuusjakauma 1/3 oktaavikaistoittain (12,5Hz - 20kHz)

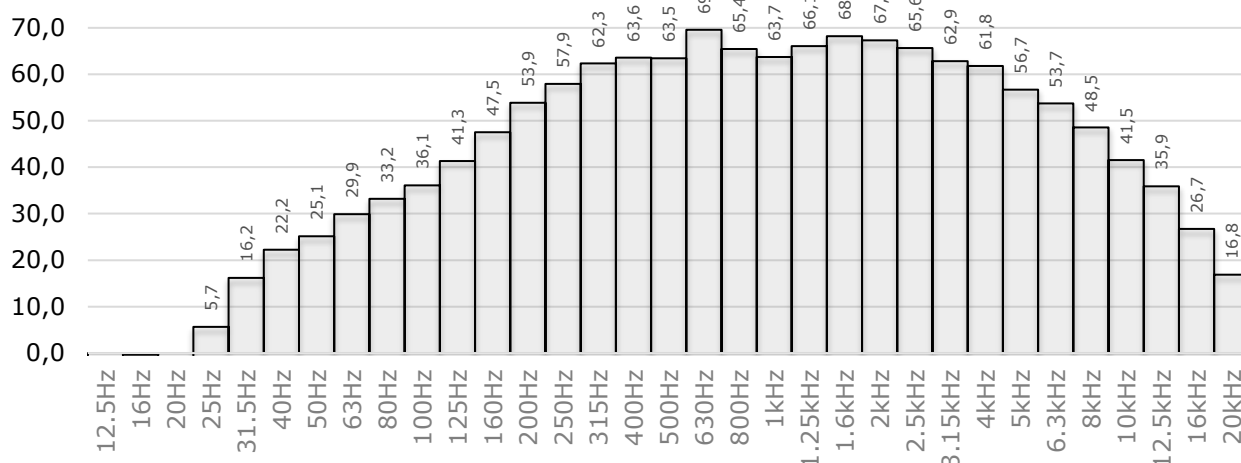
20 km/h, k.a 1/3 oktaavikaista, @1,2m



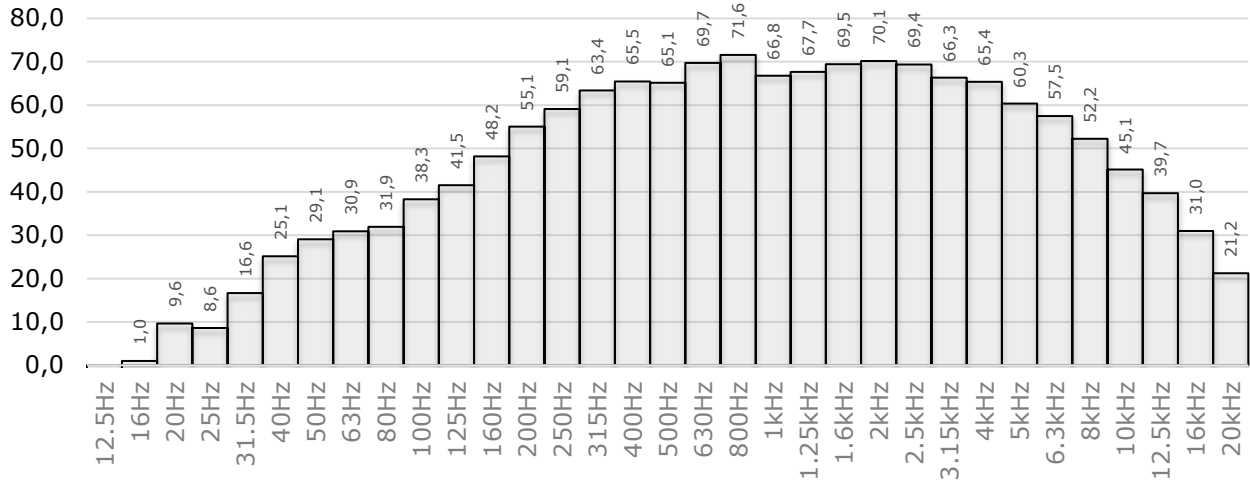
30 km/h, k.a 1/3 oktaavikaista, @1,2m



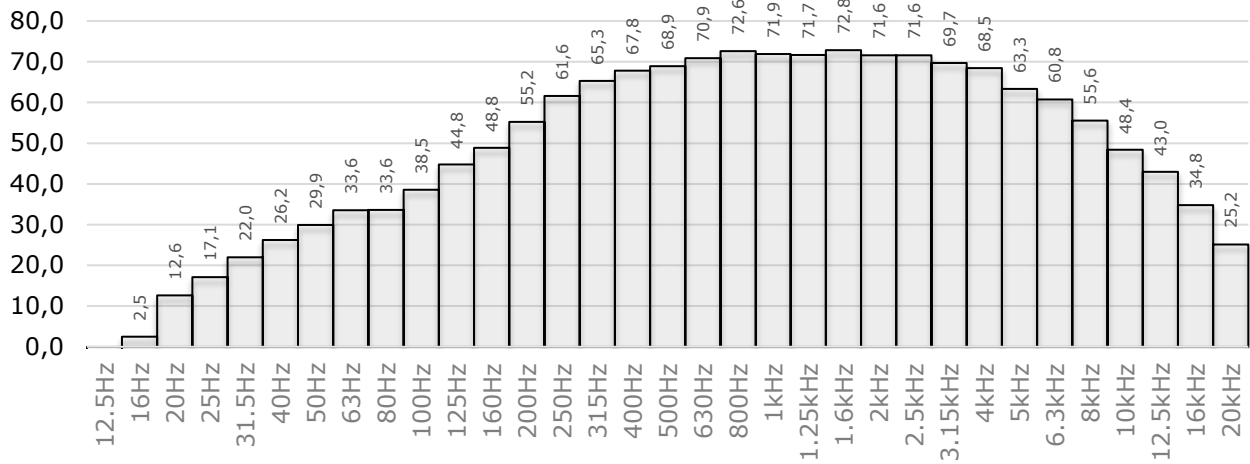
40 km/h, k.a 1/3 oktaavikaista, @1,2m



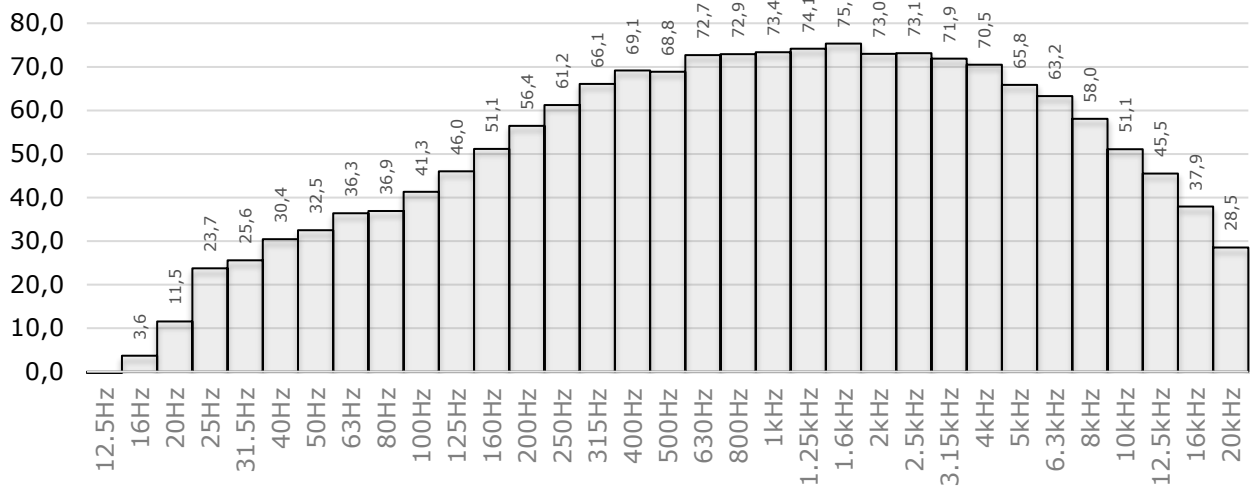
50 km/h, k.a 1/3 oktaavikaista, @1,2m



60 km/h, k.a 1/3 oktaavikaista, @1,2m



70 km/h, k.a 1/3 oktaavikaista, @1,2m

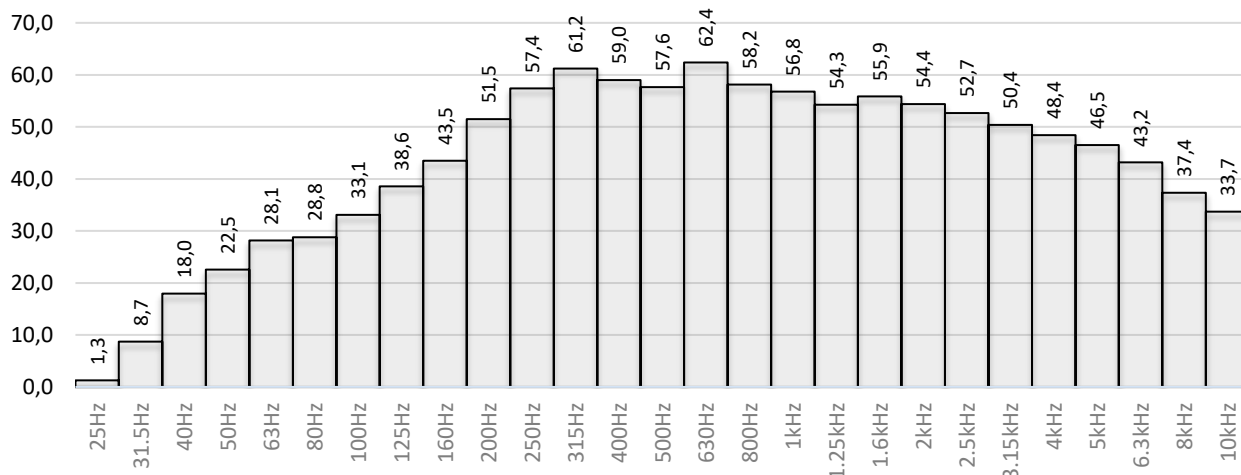


Lastattu vaunu, LAeq, 3,5m mittauskorkeus - Ohitustapahtuman äänenpainetaso ja taajuus 1/1 oktaavikaistoittain

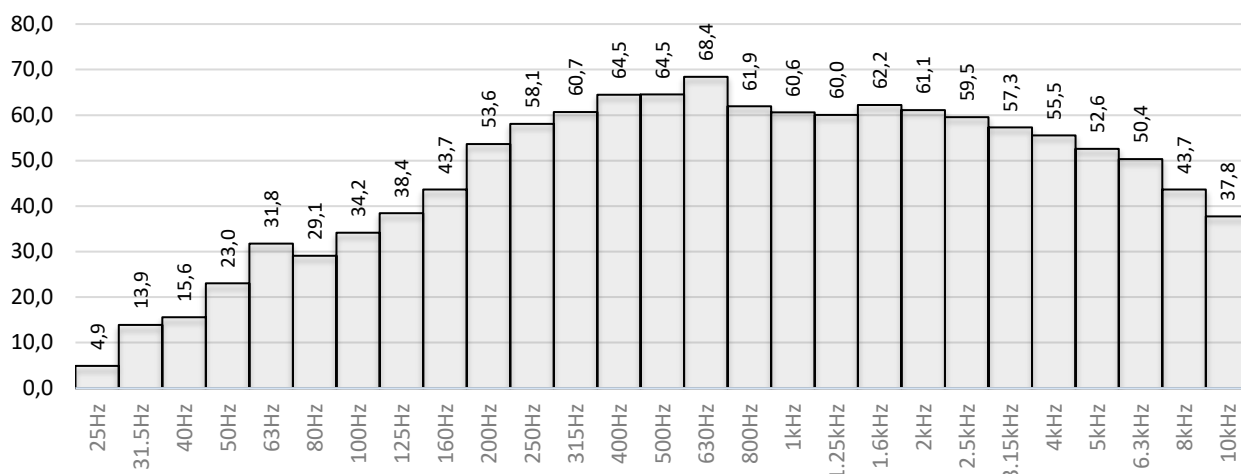
Nopeus	Mittaus nro	31.5Hz	63Hz	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz	Summa
20 km/h	1	18,0	31,9	45,5	63,9	65,4	62,0	59,4	53,6	44,1	69,3
	2	18,6	31,2	44,7	62,2	64,6	60,9	59,3	53,6	45,7	68,4
	3	19,0	33,3	44,8	63,0	64,9	61,5	59,1	53,4	44,0	68,8
	3x tulos k.a.	18,5	32,1	45,0	63,0	64,9	61,5	59,3	53,5	44,6	68,8
	St.Dev.	0,414	0,885	0,362	0,682	0,313	0,412	0,128	0,103	0,779	0,387
30 km/h	1	18,5	33,5	44,9	62,6	70,9	65,4	65,8	60,3	51,5	73,5
	2	18,2	34,1	45,2	63,7	71,6	66,1	65,9	60,3	51,3	74,1
	3	17,6	34,5	45,5	63,0	70,5	65,6	65,9	60,3	51,4	73,4
	3x tulos k.a.	18,1	34,0	45,2	63,1	71,0	65,7	65,8	60,3	51,4	73,7
	St.Dev.	0,385	0,390	0,247	0,445	0,420	0,307	0,040	0,036	0,098	0,301
40 km/h	1	20,8	33,3	45,9	64,6	73,5	69,3	70,0	65,0	56,2	76,8
	2	21,3	34,4	46,9	64,0	73,1	69,5	70,1	65,0	56,6	76,6
	3	22,7	33,4	46,3	64,7	73,4	69,7	70,1	65,1	56,4	76,8
	3x tulos k.a.	21,6	33,7	46,3	64,5	73,3	69,5	70,1	65,0	56,4	76,7
	St.Dev.	0,816	0,506	0,409	0,321	0,152	0,149	0,071	0,084	0,136	0,085
50 km/h	1	24,5	33,3	46,6	65,9	73,6	73,4	72,6	68,7	60,4	78,8
	2	24,1	34,1	45,9	65,4	73,8	73,7	72,7	68,7	60,2	78,9
	3	23,2	34,5	46,6	65,9	73,5	73,4	72,6	68,7	60,4	78,7
	3x tulos k.a.	23,9	34,0	46,4	65,8	73,6	73,5	72,7	68,7	60,3	78,8
	St.Dev.	0,563	0,494	0,339	0,244	0,110	0,144	0,062	0,022	0,114	0,074
60 km/h	1	27,9	37,2	47,1	67,6	76,4	76,9	74,9	71,7	63,5	81,7
	2	24,9	36,3	47,7	66,7	75,2	75,9	74,8	71,6	63,5	80,9
	3	27,0	35,8	47,6	67,4	75,9	76,7	74,8	71,8	63,8	81,5
	3x tulos k.a.	26,6	36,4	47,5	67,2	75,8	76,5	74,8	71,7	63,6	81,3
	St.Dev.	1,251	0,607	0,276	0,366	0,496	0,428	0,057	0,064	0,131	0,309
70 km/h	1	30,2	39,8	49,7	68,6	77,1	78,3	76,9	74,4	66,3	83,2
	2	30,5	38,7	49,8	68,1	76,7	78,2	76,8	74,2	66,0	83,0
	3	30,5	40,5	49,3	67,9	76,9	77,9	76,8	74,3	66,2	82,9
	3x tulos k.a.	30,4	39,6	49,6	68,2	76,9	78,1	76,8	74,3	66,2	83,0
	St.Dev.	0,149	0,745	0,236	0,284	0,176	0,157	0,038	0,100	0,109	0,107

Lastattu vaunu, LAeq, 3,5m mittauskorkeus - Ohitustapahtuman äänenpainetason taajuusjakauma 1/3 oktaavikaistoittain (25 Hz - 10kHz)

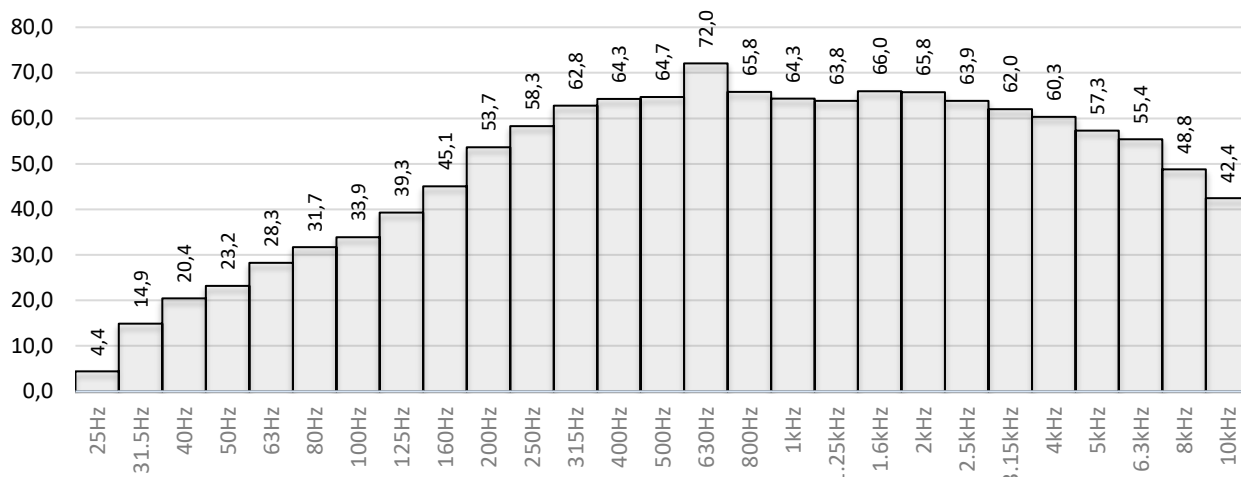
20 km/h, k.a 1/3 oktaavikaista, @3,5m



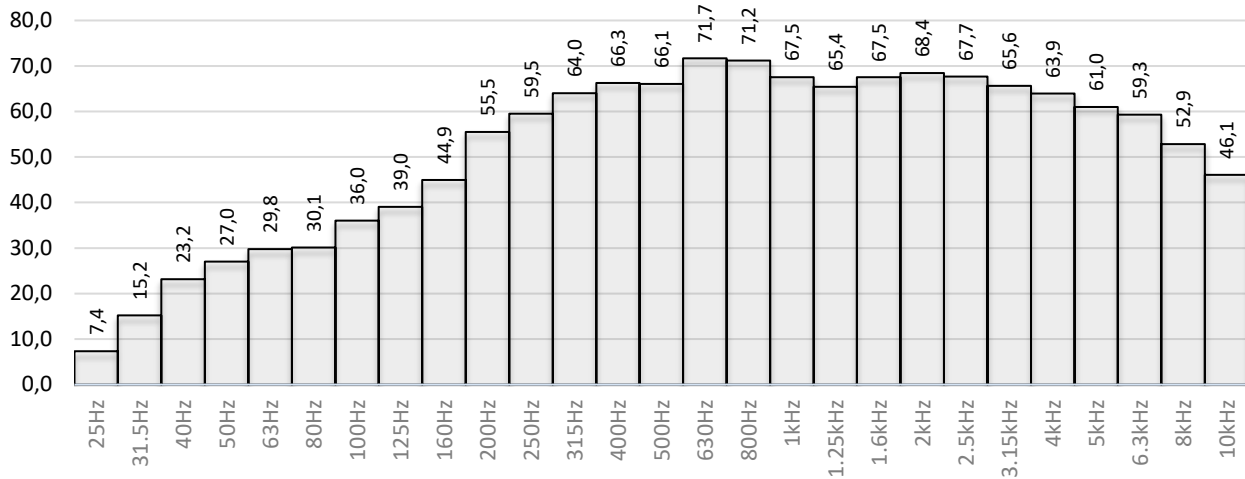
30 km/h, k.a 1/3 oktaavikaista, @3,5m



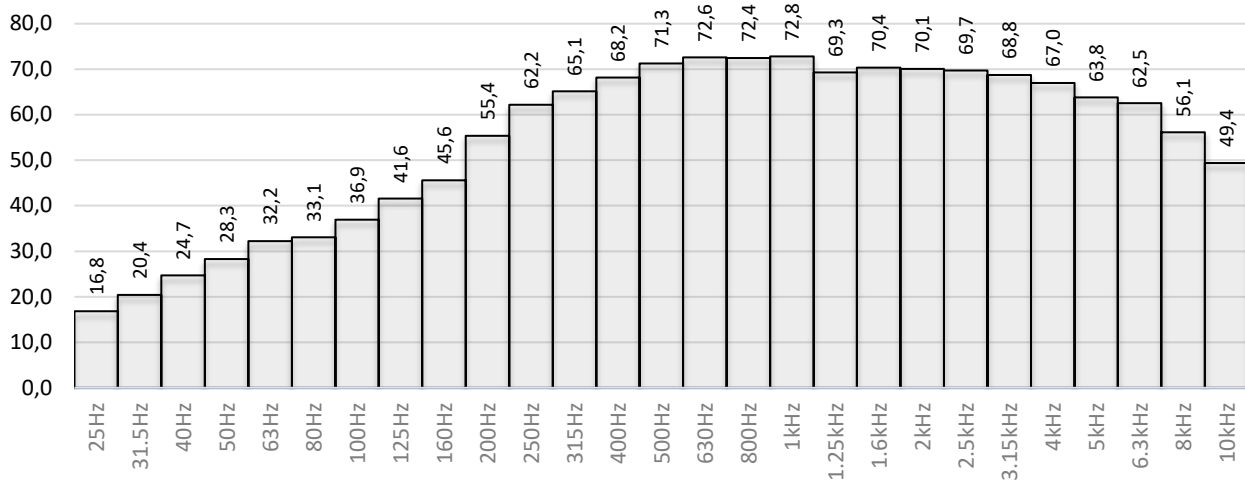
40 km/h, k.a 1/3 oktaavikaista, @3,5m



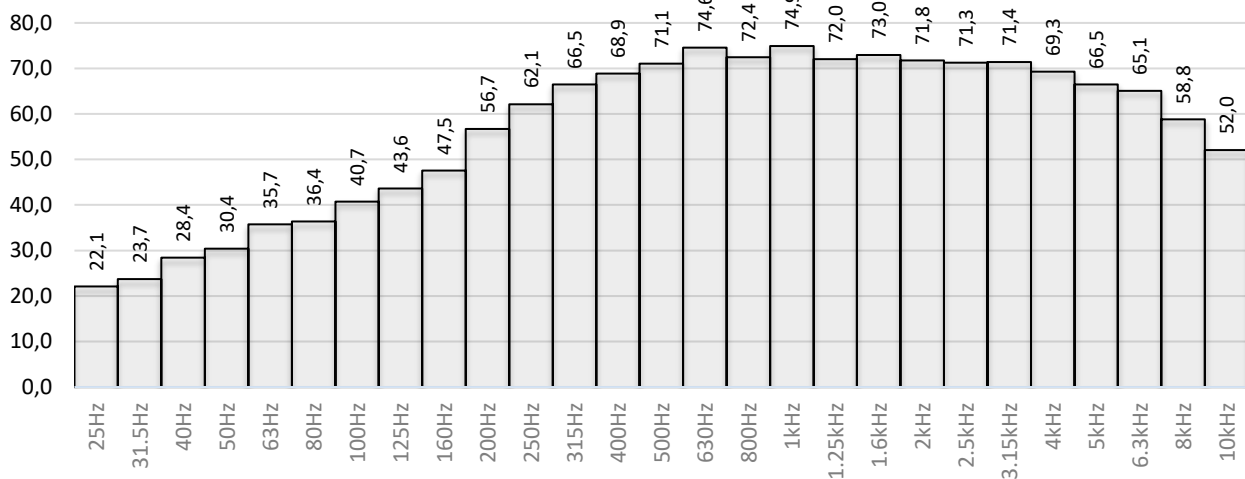
50 km/h, k.a 1/3 oktaavikaista, @3,5m



60 km/h, k.a 1/3 oktaavikaista, @3,5m



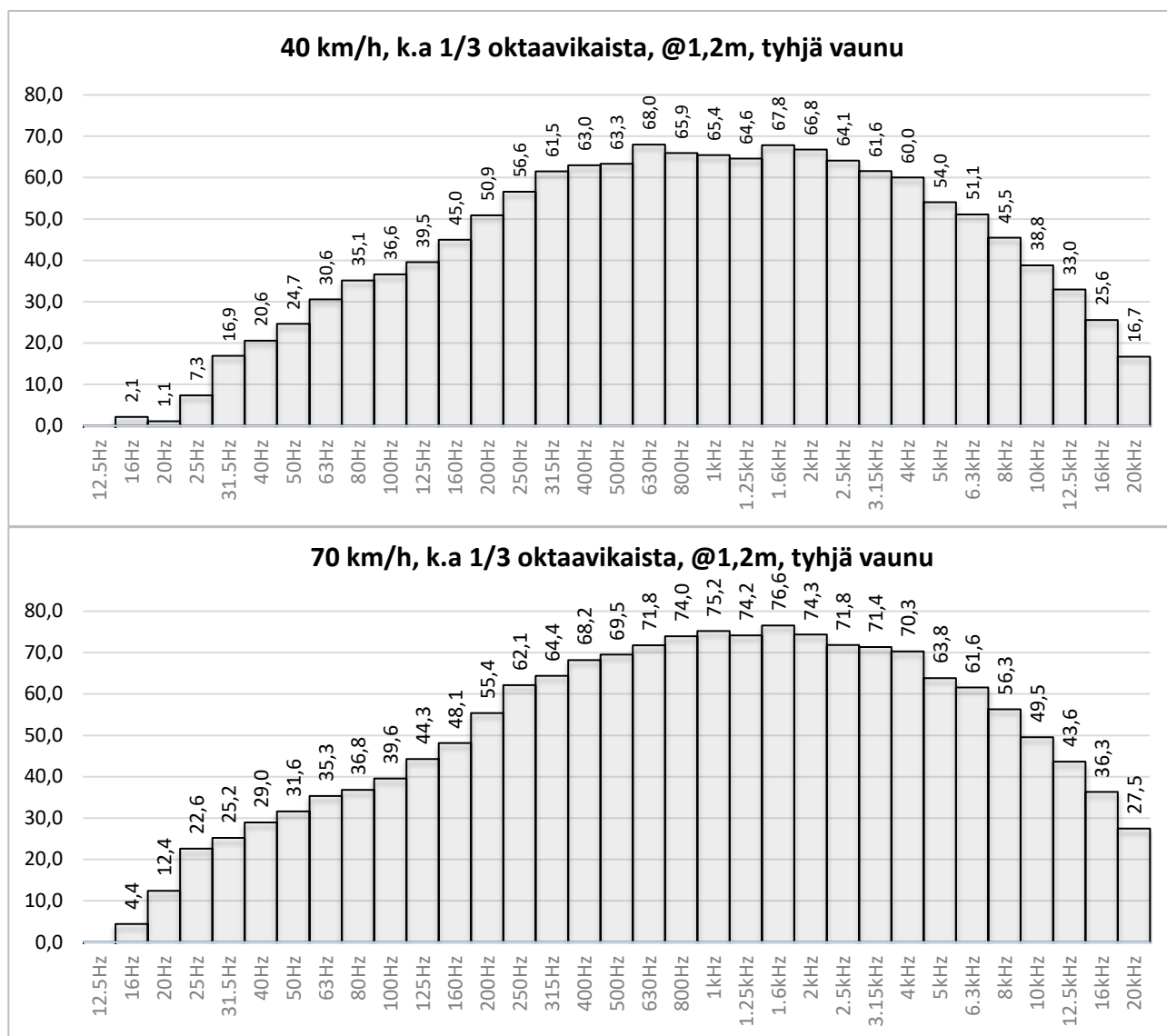
70 km/h, k.a 1/3 oktaavikaista, @3,5m



Tyhjä vaunu, LAeq, 1,2m mittauskorkeus - Ohitustapahtuman äänenpainetaso ja taajuus 1/1 oktaavikaistoittain

Nopeus	Mittaus nro	31.5Hz	63Hz	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz	Summa
40 km/h	1	21,3	36,1	46,5	63,5	70,0	70,2	71,1	64,2	52,3	75,9
	2	23,8	37,7	46,6	62,4	70,4	70,2	71,5	64,5	52,7	76,1
	3	21,7	36,4	46,5	63,2	70,1	69,9	71,3	64,3	52,0	75,9
	3x tulos k.a.	22,4	36,8	46,5	63,1	70,2	70,1	71,3	64,3	52,4	75,9
	St.Dev.	1,113	0,661	0,066	0,491	0,196	0,133	0,145	0,132	0,260	0,092
70 km/h	1	30,8	39,2	50,1	67,0	74,7	79,5	79,5	74,2	62,9	83,8
	2	31,1	40,4	49,8	66,9	75,4	79,2	79,6	74,4	62,9	83,9
	3	31,7	40,0	50,3	66,4	74,5	79,1	79,3	74,2	62,8	83,6
	3x tulos k.a.	31,2	39,9	50,1	66,8	74,9	79,3	79,5	74,3	62,9	83,8
	St.Dev.	0,357	0,506	0,182	0,233	0,376	0,179	0,104	0,072	0,043	0,126

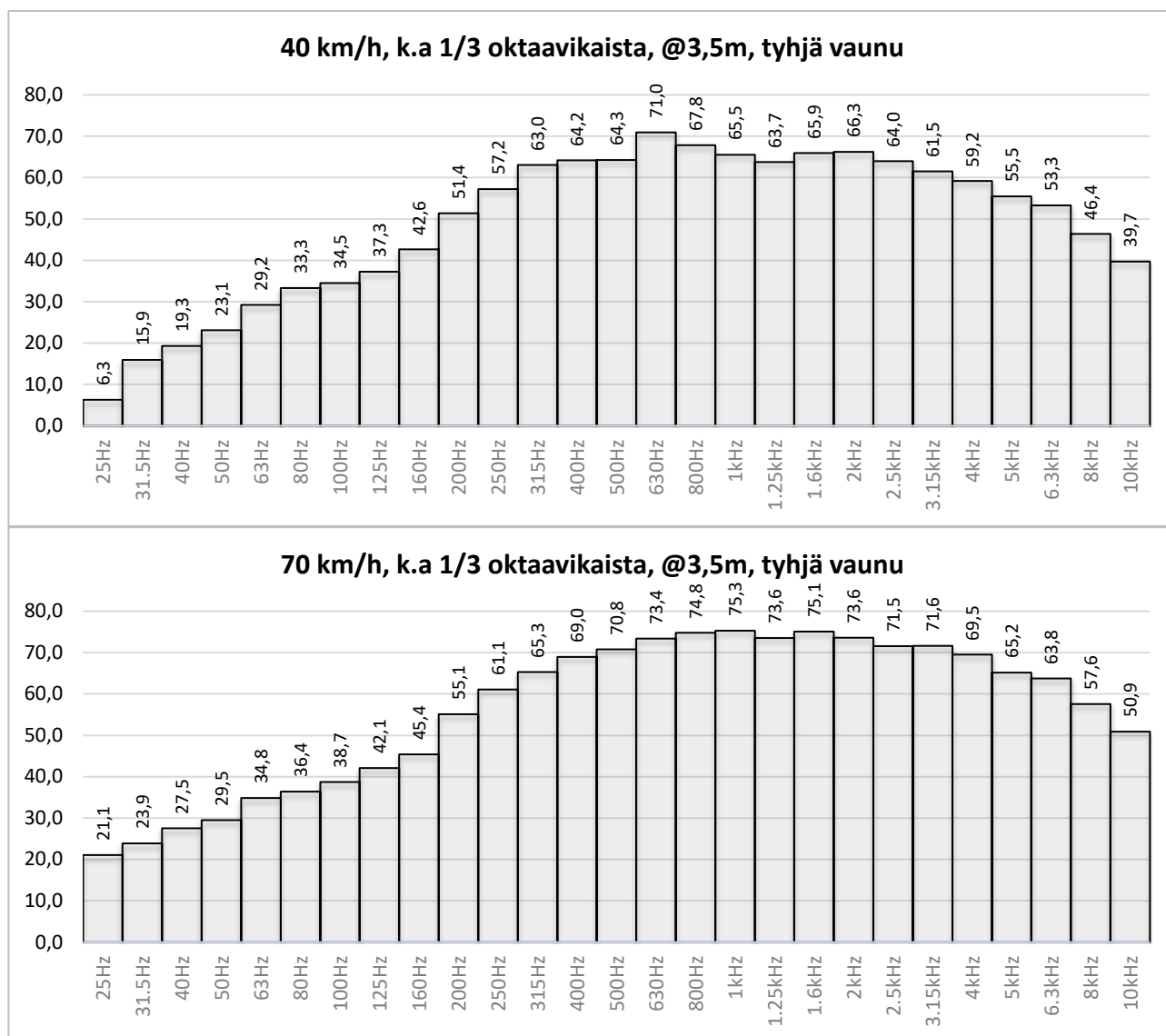
Lastattu vaunu, LAeq, 1,2m mittauskorkeus - Ohitustapahtuman äänenpainetaso taajuusjakauma 1/3 oktaavikaistoittain (12,5 Hz - 20kHz)



Tyhjä vaunu, LAeq, 3,5m mittauskorkeus - Ohitustapahtuman äänenpainetaso ja taajuus 1/1 oktaavikaistoittain

Nopeus	Mittaus nro	31.5Hz	63Hz	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz	Summa
40 km/h	1	20,3	34,9	44,0	64,7	72,7	70,9	70,3	64,3	54,3	76,8
	2	22,9	35,0	44,6	63,8	72,5	71,1	70,3	64,2	54,5	76,7
	3	20,1	35,2	44,2	64,3	72,2	70,4	70,3	64,0	54,0	76,4
	3x tulos k.a.	21,1	35,0	44,3	64,3	72,5	70,8	70,3	64,2	54,3	76,6
	St.Dev.	1,283	0,154	0,241	0,376	0,185	0,301	0,009	0,132	0,189	0,153
70 km/h	1	29,5	38,8	46,9	67,1	76,1	79,6	78,2	74,1	65,0	83,6
	2	29,8	39,4	48,1	67,3	76,7	79,3	78,8	74,5	64,9	83,9
	3	30,1	39,4	48,0	66,6	75,9	79,3	78,3	74,2	64,8	83,5
	3x tulos k.a.	29,8	39,2	47,7	67,0	76,2	79,4	78,4	74,3	64,9	83,7
	St.Dev.	0,243	0,279	0,561	0,280	0,341	0,136	0,244	0,159	0,101	0,132

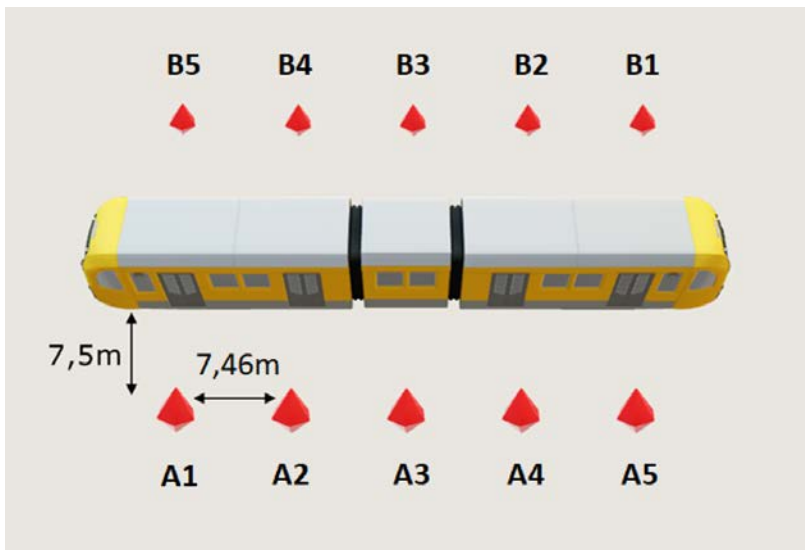
Lastattu vaunu, LAeq, 3,5m mittauskorkeus - Ohitustapahtuman äänenpainetaso taajuusjakauma 1/3 oktaavikaistoittain (25 Hz - 10kHz)



Sää tiedot	Seisonta-/paikallaolomittaukset 27.4.2021
Tuuli	0-0,5m/s
Tuulensuunta	190°
Lämpötila	2,5 °C
Paine	1012 hPa
Ilmankosteus	75%
Pilvisyys	7/8

Tulokset

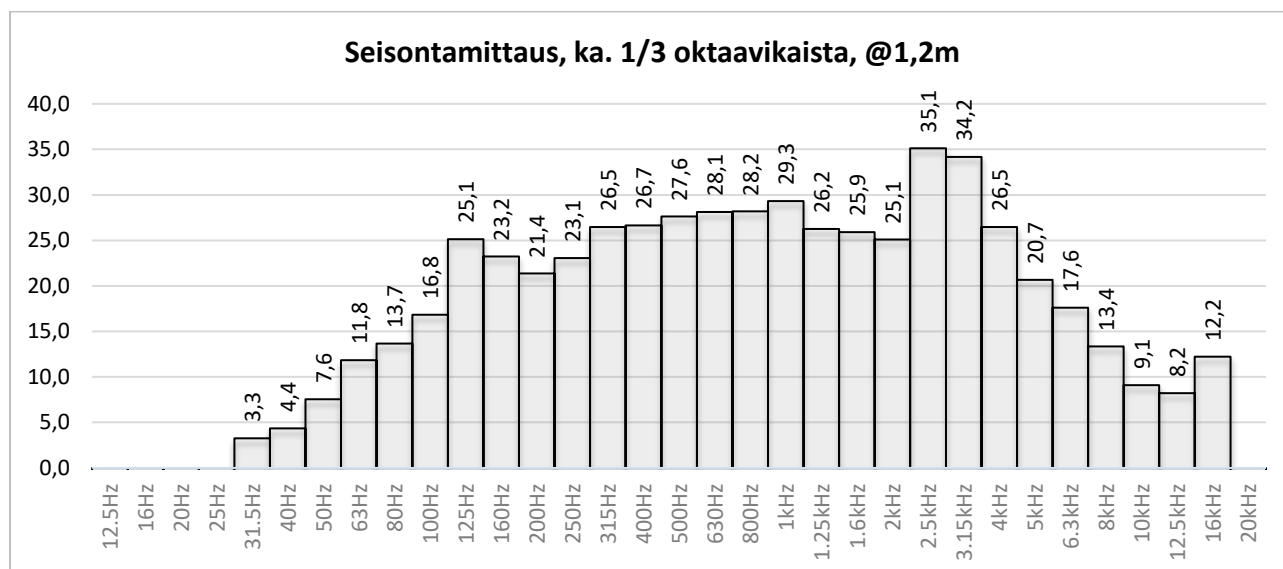
Mittauspisteitä oli 10, joiden sijoittelu oli tasavälein (7,46m). Mittaukset suoritettiin 7,5m etäisyydellä raitiovaunun keskilinjasta. Jokaisessa mittauspisteessä suoritettiin mittaukset 1,2m ja 3,5m korkeudella



Yksittäisten mittausten äänenpainetaso tulokset sekä tulosten hajonnat (max-min). Lisäksi taulukossa on esitetty ISO 3095:2013 määritetty yhteistulos mittauksittain ja yhteistuloksena.

Mittauspiste	Korkeus 1,2m				Korkeus 3,5m			
	Mittaus 1	Mittaus 2	Mittaus 3	Hajonta (max-min)	Mittaus 1	Mittaus 2	Mittaus 3	Hajonta (max-min)
A1	43,8	43,6	43,3	0,5	45,3	45,7	45,4	0,4
A2	45,8	45,8	44,0	1,8	48,0	47,9	46,7	1,4
A3	45,1	44,4	44,3	0,8	47,5	47,1	47,0	0,4
A4	46,1	45,6	48,2	2,6	47,6	47,6	48,3	0,7
A5	48,3	54,7	49,7	6,4	47,7	53,1	49,4	5,4
B1	45,8	47,1	45,5	1,6	47,4	47,8	47,0	0,8
B2	48,2	46,6	47,2	1,6	49,4	48,0	49,0	1,3
B3	48,8	48,2	51,7	3,5	49,5	49,7	50,6	1,1
B4	49,3	47,3	51,0	3,7	50,1	48,9	50,9	2,0
B5	51,4	47,1	45,9	5,5	50,0	48,2	47,0	3,1
Yhteistulos mittauksittain (ISO 3095:2013)	50,8	51,4	51,0	0,6	51,5	51,9	51,5	0,4
Yhteistulos (keskiarvo, pyöristys)	51				52			

Seisontamittausten (kaikki yhdistetty) äänenpainetason taajuusjakauma 1/3 oktaavikaistoittain (12,5Hz - 20kHz)
- 1,2m mittauskorkeus, 7,5m etäisyys melulähteestä.



Säätiiedot	Tyhjän vaunun mittaukset 28.4.2021
Tuuli	0-0,5m/s
Tuulensuunta	340°
Lämpötila	0 °C
Paine	1014 hPa
Ilmankosteus	90%
Pilvisyys	8/8

* Ajoittain mitausten aikana satoi lunta. Lumi ei jäänyt merkittävästi maahan, jolla olisi ollut merkittävää vaikutusta maanpinnan absorptioon

Tulokset

Kiihdytysmittaukset

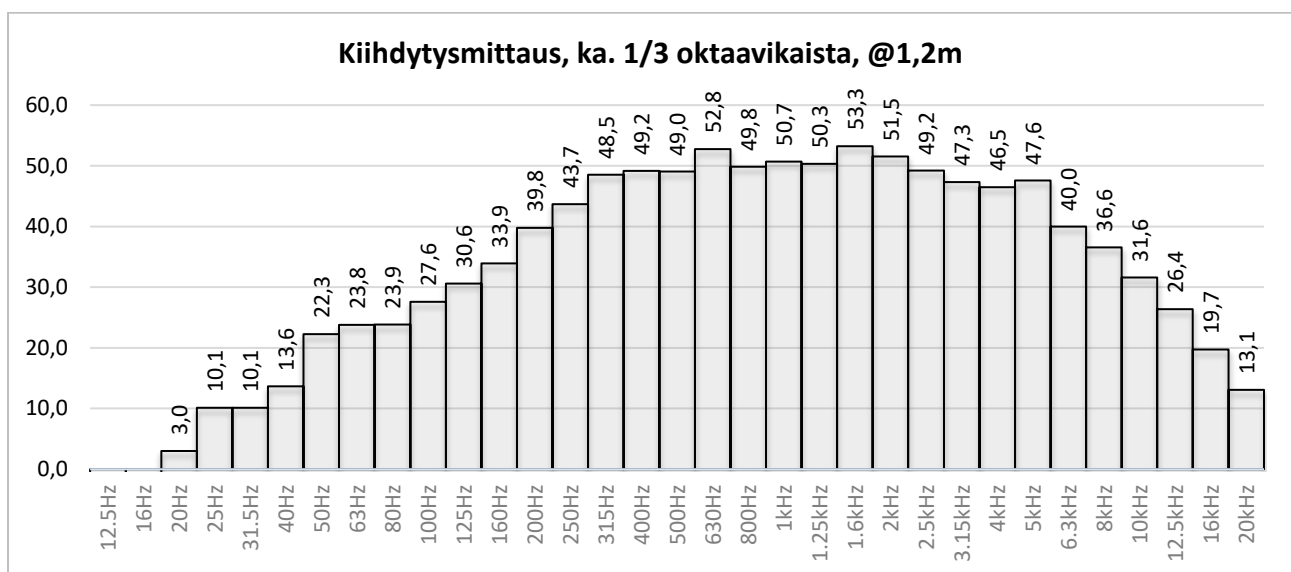
Kiihdytys 0-40kmh, mittauslinja 10m raitiovaunun lähtöpaikkaa edessä

LAeq lasketaan ohitusajasta: keula mittauslinjalla - takapää mittauslinjalla

LAfmax lasketaan aikaväliltä: liikkeellelähdestä (keula 10m mittauslinjan etupuolella) – takapää 10m etäisyyteen mittauslinjasta

Mittaus	Korkeus 1,2m		Korkeus 3,5m		Kommentit
	LAfmax	LAeq	LAfmax	LAeq	
1	77,4	73,6	79	74,9	Kiihdytyksen aikana merkittävin äänitapahtuma raitiovaunun sähköjohtimien kontaktiäänestä
2	75,2	72,9	76,6	73,9	
3	75,3	73,2	76,7	74,1	
Yhteistulos (keskiarvo, pyöristys)	76	73	77	74	

Kiihdytysmittausten (kaikki yhdistetty) äänenpainetason taajuusjakauma 1/3 oktaavikaistoittain (12,5Hz - 20kHz) - 1,2m mittauskorkeus, 7,5m etäisyys melulähteestä.



Jarrutusmittaukset

Jarrutus 30-0kmh, mittaussinja jää ensimmäisen vaunun keskikohtaan pysähdyttyessä

LAFmax lasketaan aikaväliltä: keula 20m mittaussinjan etupuolella – raitiovaunun pysähtyminen. Pysähtyessä mittaussinja jää ensimmäisen vaunun keskikohdalle ($\pm 10\text{m}$)

Mittaus	Korkeus 1,2m	Korkeus 3,5m	Kommentit
	LAFmax	LAFmax	
1	64,8	66,1	Ei jarrujen vinkumista/kirskuntaa
2	66,3	68,6	Ei jarrujen vinkumista/kirskuntaa
3	65,3	66,4	Ei jarrujen vinkumista/kirskuntaa
Yhteistulos (keskiarvo, pyöristys)	65	67	

Kiihdytysmittausten (kaikki yhdistetty) äänenpainetason taajuusjakauma 1/3 oktaavikaistoittain (12,5Hz - 20kHz)
- 1,2m mittauskorkeus, 7,5m etäisyys melulähteestä.

