



Tampereen Kaupunki

Tampereen raitiotieliikenteen meluohje ympäristömelumallinnuksia varten
101012828-001

Raportin versiot

- | | |
|-----------|---|
| 15.6.2021 | <i>Alkuperäinen raportti</i> |
| 5.11.2024 | <i>Raporttia päivitetty tehdyn kaarrekirskuntaselvityksen tulosten mukaan</i> |
| | <i>- Muutokset alkuperäiseen kappaleissa 1, 2.4 ja 3.4</i> |

Tekijä
Tapio Lukkari
Osasto
Efterklang Finland
Puhelin
+358 (0)443452294
E-mail
tapio.lukkari@afry.com
Tarkastaja
Carlo Di Napoli

pvm
05/11/2024
Toimipaikka
Vantaa
Projektinumero
101012828-001

Toimipaikka
Vantaa

Tampereen Kaupunki

Tampereen raitiotieliikenteen meluohje ympäristömelu-
mallinnuksia varten

Sisällys

1	Johdanto	3
2	Yhteenveto melumittaustuloksista	3
2.1	Nopeusmittaukset	3
2.2	Seisontamittaukset	4
2.3	Kiihdytys- ja jarrutusmittaukset	5
2.4	Kaarrekirskuntamittaukset	5
2.4.1	Kirskuntamittausten tulokset	5
2.4.2	Kirskuntaan vaikuttavat tekijät	5
3	Mallinnusohje	7
3.1	Aikaisemmat selvitykset	7
3.2	Pohjoismaisen raideliikennemallin kertoimet Tampereen raitiotieliikenteelle	7
3.3	Paikallaan seisovan vaunun melu	8
3.4	Kaarrekirskunta	8
3.5	Muut raidekorjaukset	9
3.5.1	Ristikon- ja vaihteen yliajomelu	9
3.6	Mallinnuskertoimien a ja b validointi	9
3.6.1	Esimerkkilaskelma	10
3.7	Vertailu väliaikaisiin meluohjeisiin	11
3.8	Tulosepävarmuuden huomiointi	12
4	Lähteet	12

1 Johdanto

Keväällä 2021 Tampereen raitiotieliikenteen koeajovaiheen aikana toteutettiin raitiotieliikenteen melumittauksia eri ajotilanteille sekä kaarrekirskunnalle. Mittaustulosten pohjalta laskettiin uudet a ja b kertoimet pohjoismaista raideliikenteen melumallia varten. Työn tilaajana on Tampereen kaupunki (tilausnumero 4500477042).

Dokumentin aluksi esitetään mittaustulokset lyhyesti. Varsinainen mittausraportti on valmisteltu erikseen (dokumentti Tampereen_Ratikan_Koeajoliikenteen_Melumittaukset_Mittausraportti.pdf). Kappaleesta 3 eteenpäin alkaa varsinainen meluohje.

Meluohjetta on päivitetty marraskuussa 2024 Tampereen raitiotielle tehdyn kaarrekirskuntaselvityksen mukaan (Efterklang – AFRY 2024). Muutokset ovat tehty kappaleisiin 2.4 ja 3.4.

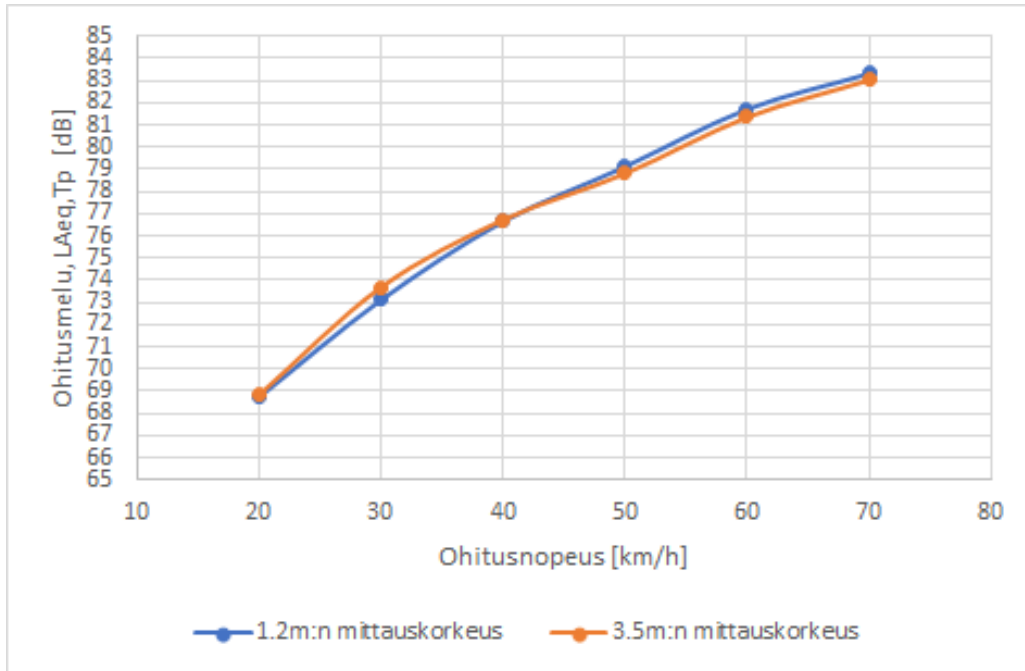
Meluohje on tarkoitettu erityisesti maankäytön suunnittelussa laadittavien melumallinnusten lähtötiedoiksi.

2 Yhteenveto melumittaustuloksista

Tampereen raitiotien koeajojen aikaiset melumittaukset toteutettiin AFRY Finland Oy:n toimesta huhtikuussa 2021. Mittauksien tarkoituksena oli saada kattava käsitys uusien Tampereen raitiovaunujen (Skoda Transtech ForCity Smart Artic X34) tuomasta ympäristömelusta. Mittaustulosten avulla voidaan tarkentaa raitiotielinjan eri osille tehtyjä melulaskelmia vastaamaan todellista toteutuvaa tilannetta. Tuloksia voidaan soveltaa myös kokonaan uusien raitiolinjojen suunnittelussa. Alla on esitetty lyhyesti mittaustulokset alkuperäisestä mittausraportista.

2.1 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 toistettiin 3 kertaa (18 mittausta). Mittaukset tehtiin lastatulla vaunulla.



Kuva 1. Nopeusmittausten ohiajamelun $LA_{eq,Tp}$ tulokset lastatulla vaunulla

Raitiovaunun nopeusmittausten äänenpainetasojen taajuusjakaumat 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 toteutunut. Mittaukset tehtiin kuitenkin lähellä raitiovaunua (7,5m) ja melulähteen tuottaman melun kapeakaistaisuuden voimakkuus heikkeneekin tarkasteltavan etäisyyden kasvaessa. Melussa ei korvakuulolla havaittu merkityksellistä kapeakaistaisuutta eli tulos näkyi ennen kaikkea vain 3,5m:n mittauskorkeuden 1/3 oktaavikaistan mittauksissa. Tämän vuoksi tässä ohjeessa ei suositella kapeakaistaisuuskorjauksen käyttöä ko. nopeudessa.

2.2 Seisontamittaukset

Raitiovaunun seisontamittaukset suoritettiin yhtäaikaaisesti 1,2m ja 3,5m:n korkeudella 7,5m:n etäisyydellä radan keskilinjasta. Mittauspisteitä oli raitiovaunun molemmilla puolilla 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.

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. Mittaustäisyys raitiovaunun keskilinjasta oli 7,5m.

2.3 Kiihdytys- ja jarrutusmittaukset

Kiihdytystapahtumasta 0 km/h => 40 km/h määritettiin enimmäisäänitaso LAFmax ja keskiäänitaso LAeq. Jarrutusmittauksista 30 km/h => 0 km/h määritettiin jarrutustapahtuman enimmäisäänitaso LAFmax. Tehtyjen mittausten energiakeskiarvon LAeq sekä enimmäistason LAFmax tulokset ovat esitetty alla olevassa taulukossa ja ne ovat vastaavia nopeusmittaustuloksia alhaisempia.

Taulukko 1. Kiihdytys- ja jarrutusmittausten enimmäistason keskimääräiset tulokset

	Korkeus 1,2m		Korkeus 3,5m	
	LAFmax	LAeq	LAFmax	LAeq
Kiihdytys, yhteistulos	76 dB	73 dB	77 dB	74 dB
Jarrutus, yhteistulos	65 dB	-	67 dB	-

2.4 Kaarrekirskuntamittaukset

Tampereen raitiovaunujen aiheuttamaa kaarrekirskuntaa on kartoitettu mittauksiin perustuvassa selvityksessä elokuussa 2024 (Efterklang - AFRY 2024), jolloin raitiotie on ollut noin kolme vuotta liikennöintikäytössä. Meluselvityksessä kartoitettiin kirskuntasijainteja asettamalla melumittari kahteen raitiovaunuun ja lisäksi mitattiin kirskuntamelun voimakkuutta ulkona kirskuvien kaarteiden luona.

2.4.1 Kirskuntamittausten tulokset

Kaarrekirskuntakartoituksen mukaan raitiovaunulinjoilla on selkeitä sijainteja, joissa kirskuntaa voidaan havaita. Kaarresäteeltään alle 300 m kaarteita tai kaarreyhdistelmiä on linjoilla yhteensä 23. Näistä kaarteista kahdeksassa voidaan havaita kirskuntaa toistuvasti tai runsaasti. Runsaasti kirskuntaa havaitaan Hervantajärvellä Ruskonkehän alikulussa sekä sen eteläpuoleisessa kaarteessa. Näissä sijainnissa myös kirskunnan melutaso on havaittu korkeammaksi kuin muissa kirskuntakohteissa.

Toistuvasti kirskuntaa havaitaan Hallilassa pysäkin molemmin puolin, Rieväkadun pitkässä kaarteessa, TAYS:n pysäkin itäpuolella sekä Santalahdessa Paasikivenkadun pitkässä kaarteessa ja Tikkutehtaan pysäkin itäpuolisessa kaarteessa. Toistuvasti kirskuntaa aiheuttaneet kaarteet ovat pääosin nopeavauhtisia, mutta loivia kaarteita. Kaarresäteeltään linjojen pienimmät kaarteet eivät aiheuttaneet kirskuntaa.

Kirskuntamelun voimakkuusmittausten perusteella merkittävin melutaso (7,5m etäisyydellä) toteutui ruskonkehän alikulkutunnelin eteläpuolella, jossa selkää kirskuntaa aiheuttavien ohitusten enimmäisäänitaso LAFmax oli 100 dB (ohitusten mediaaniarvo). Tässä kaarteessa kirskunnan esiintyvyys oli 67 % kaikista ohituksista. Muissa kaarteissa, joissa esiintyi selkeää kirskuntaa enimmäismelutasot olivat 85 - 89 dB ja kirskunnan esiintyvyys 5 - 40 % kaikista ohituksista.

2.4.2 Kirskuntaan vaikuttavat tekijät

Tässä kappaleessa esitetyt asiat pohjautuvat kahden päivän mittauksiin kahdelle eri raitiovaunulle sekä rajatuille määrälle mitaustuloksia yksittäisistä kaarteista. Kaarrekirskunta ilmiönä on monimutkainen ja riippuvainen monesta eri tekijästä, joita kaikkia ei

voida kenttämittauksissa poissulkea tai vakioida (sääolosuhteet, kuljettajan ajotapa, yksittäisen kiskopyörän kuluminen). Tässä kappaleessa on esitetty mittausanalyyseissä esiin tulleita huomioita ja niiden jatkokäytännössä on huomioitava tuloksiin pohjautuvan tiedon rajallisuus.

Kaarresäde ja nopeus

Kaarrekirskuntakartoitusten tulosten mukaan on kuitenkin havaittavissa, että pelkääntään lyhyt kaarresäde ei yksistään aiheuta kirskuntaa. Tuloksien mukaan raitiovaunun nopeudella on merkitystä kirskunnan toteutumiseen. Tulosten perusteella kaarreno-peuksien ollessa alle 25 km/h voidaan olettaa, että kaarre ei aiheuta kirskuntaa kaarresädestä riippumatta (ks. kappale *Voitelu*). Nopeuden ollessa yli 50 km/h kaarre aiheuttaa hyvin todennäköisesti kirskuntaa, jos kaarresäde on alle 300 metriä. Nopeusvälillä 25 – 50 km/h kirskunnan toteutumiseen ei voida tehdä suoria päätelmiä nopeuden ja kaarresäteen perusteella. Esimerkiksi merkittävin kirskuntakohde on Ruskonkehän alikulku, jossa nopeus on maltillinen 30-37 km/h, mutta silti linjoilla on useita ei-kirskuvia kaarteita, jossa nopeudet ovat suurempia ja kaarresäteet pienempiä.

Kirskunnan voimakkuuteen ei kaarresäteellä tai nopeudella ole selkeää riippuvuutta. (yksittäiset kirskuntatulokset, liite 3). Kirskuntaa voidaan ajatella on/off tyyliseksi ilmi-öksi, joka tuottaa tietyn melutason ympäristöön silloin kun kirskuntailmiö toteutuu. Tästä poikkeuksen muodostaa Ruskonkehän alikulun aiheuttamat melutasot, jotka ovat muita kaarteita selkeästi suurempia.

Sorvauksesta kulunut kilometrimäärä

Sorvauksesta kuluneella kilometrimäärällä ei ole kriittistä vaikutusta kirskunnan toteutumiseen. On kuitenkin havaittavissa, että raitiovaunujen kilometrimäärän kasvaessa kasvaa myös ohitusten määrä, joissa ei synny häiritsevää ääntä. Havaintoa tukee myös ”Ei ääntä” tapahtumien korkeampi kilometrimäärien keskiarvo. Tietojen perusteella myös juuri sorvatut pyörät eivät aiheuta usein kirskuntaa, mutta jo 10000 kilometrin ajon jälkeen kirskuntaa tapahtuu.

Voitelu

Raitiovaunuihin on asennettuna pyörän laipan ja kulkupinnan voitelujärjestelmä. Järjestelmä pystyy lisäämään voiteluainetta vaunun sijainnin perusteella ja se on asetettu lisäämään voiteluainetta lähes jokaiseen jyrkempään kaarteeseen. Levitettävät voitelu-ainemäärät ovat pienet yksittäisen kaarteiden ajon aikana, mutta ainetta levitetään useamman raitiovaunun (ei kaikkien) toimesta ja ajot yksittäisten kaarteiden osalta toistuvat useaan kertaan. Voitelu voi osaltaan selittävä tekijä, miksi pienimpien kaarresäteiden kaarteet eivät aiheuttaneet merkittävää kirskuntaa. Tosin myös nopeudet ovat pieniä näissä kaarteissa.

Pituuskaltevuus, Case - Ruskonkehän alikulku

Ruskonkehän alikulun kaarreyhdistelmä erottuu kirskuntatuloksissa selkeästi kirskuntatapahtumien esiintyvyyden kuin melun voimakkuuden osalta. Kaarresäteet eivät ole erityisen lyhyitä ja ajonopeuskin on melko maltillinen. Ero muihin kaarteisiin on rataosan pituuskaltevuudessa. Ruskonkehän alikulun eteläpuolella pituuskaltevuus muuttuu noin 6 % lyhyellä matkalla ja rata on pystysuunnassa kaareva (kovera). Kun raitiovaunu ajaa alikulun alitse ja alkaa nousemaan vastarinnettä, niin takaosa on vielä alamäessä (sama toiseen suuntaan). Pystysuuntaisten muutoksien ja vaakasuuntaisten kaarteiden

yhdistelmä tekee ratakohdasta muihin linjojen kaarteisiin verrattuna erityisen, joka voi selittää myös kirkunnan aiheutumisen.

3 Mallinnusohje

3.1 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.

3.2 Pohjoismaisen raideliikennemallin kertoimet Tampereen raitiotieliikenteelle

Pohjoismaisen raideliikennemallin mallinnuskertoimet a ja b on esitetty alla olevassa taulukossa koskien Tampereen raitiotieliikennettä vaunutyyppille Transtech ForCity Smart Artic X34. Tulokset perustuvat sepelirataosuudella tehtyihin mittauksiloksiin ja kertoimet on johdettu suoraan 1,2m:n mittauksilosten taajuuspainottoman äänialtistustason L_{Em} oktaavikaistoista (30km/h nopeuksissa 3,5m:n tuloksista) ja tuloksia on korjattu ohjeen -97 mukaisilla normalisointiarvoilla sekä iterointituloksen erotuksella.

Tulokset edustavat suurimpia mitattuja tuloksia, sillä tulokset 3,5m:n korkeudessa olivat pääosin tasoltaan pienempiä (pois lukien 30km/h nopeus). Kertoimiin ei sisälly mitatausepävarmuuksia. Kertoimilla laskettujen tilanteiden validointi on esitetty kappaleessa 3.4.

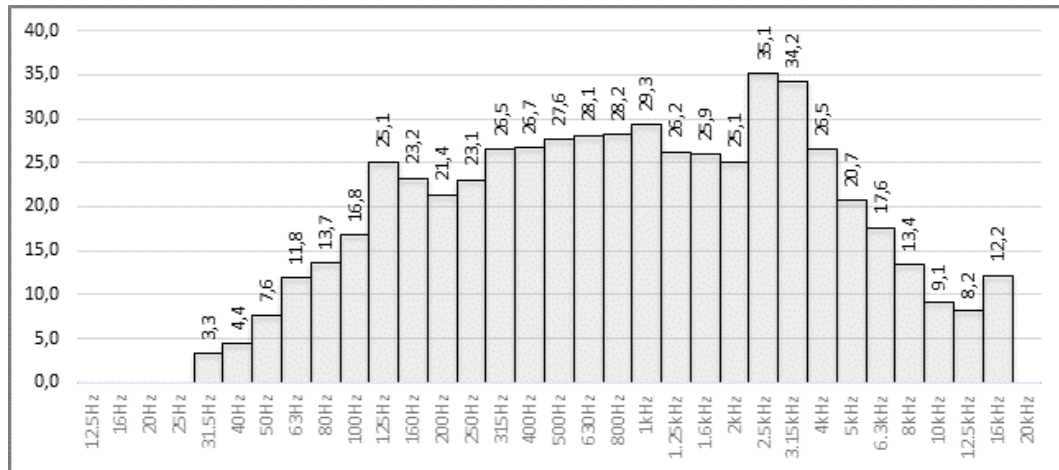
Taulukko 3. Tampereen raitiovaunutyyppin X34 mittauksista johdetut mallinnuskertoimet a ja b

a ja b kertoimet	1.2m:n mittauskorkeus	
Taajuus	a	b
63 Hz	1,225	16,151
125 Hz	-0,358	18,545
250 Hz	-1,313	26,655
500 Hz	10,100	31,677
1000 Hz	22,384	33,007
2000 Hz	23,577	32,667
4000 Hz	28,980	29,717

Kertoimet syötetään mallinnusohjelman äänilähdetietoon ja tällä tavoin saadaan Tampereen raitiovaunun äänilähde eri nopeuksilla ja liikennöintitiheyksillä. Vertailu väliaikaisiin kertoimiin on tehty luvussa 3.7. Vaunupituutena on käytetty on 37,3m.

3.3 Paikallaan seisovan vaunun melu

Paikallaan seisovan vaunun melutaso on vähäinen verrattuna vaunun liikkeellä olon aikaan meluun. Katolla olevien jäähdytys- ja ilmanvaihtolaitteiden melu vaimenee etäisyyden kasvaessa ja on alle yöajan ohjearvon LAeq 45 dB arviolta yli 20 metrin etäisyydellä radan keskilinjasta laskettuna. Tällöin oletuksena on, että vaunu seisoo paikoillaan. Paikallaan seisovan vaunun taajuuskaistana voidaan käyttää alla olevia arvoja ja äänitasona LAeq 52 dB 7,5m etäisyydellä radan keskilinjasta laskettuna. Vaunu voidaan mallintaa viivalähteenä pysäkillä, jonka pituus on 37m ja korkeus 3,3m.



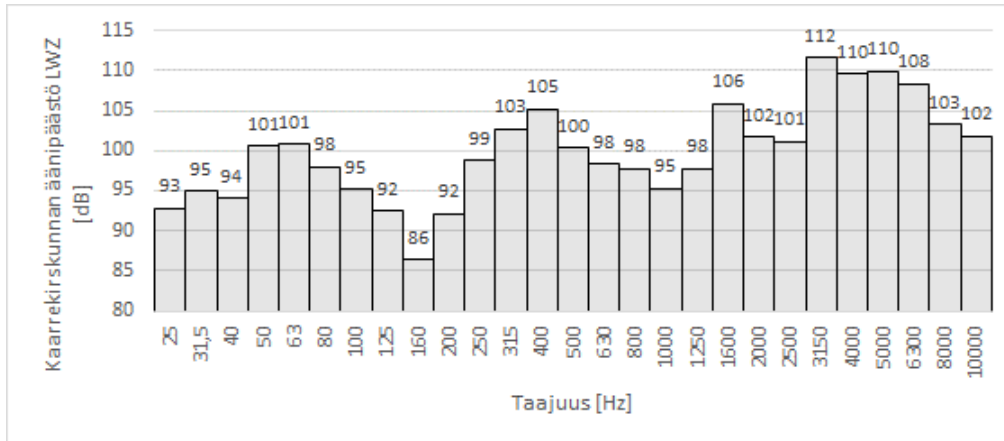
Kuva 2. Paikallaan seisovan vaunun mittaustuloksien keskimääräinen taajuuskaistajakauma, A-painotettu äänitaso LpA etäisyydellä 7,5m radan keskilinjasta

3.4 Kaarrekirskunta

Kaarrekirskuntaa mallinnettaessa tulee arvioida tarkasteltavan kaarteiden potentiaalia kirskumiselle nykyisen tiedon perusteella, joka on tiivistetysti esitetty kappaleessa 2.4 sekä raportissa *Tampereen Raitiotie Oy – Kaarrekirskuntaselvitys 2024* (Efterklang - AFRY 2024). Kirskunnan melua tarkastellaan mallintamalla melun enimmäistaso LAFmax ja keskiäänitase LAeq. Kirskuntamelu mallinnetaan kaikille kaarresäteeltään alle 300 m kaarteille. Vain hyvin perustellusta syystä voidaan olettaa, että kaarre ei aiheuta kirskuntaa. Kirskunnan taajuusjakauma esitetty alla olevassa kuvassa.

Taulukko 4. Mitatut kaarrekirskunnan arvot äänipäästönä LWA

Kohde	Äänipäästö LWA
Tavanomainen kirskunta	114 dB
Voimakas kirskunta	123 dB
- käytetään, kun radan pituuskaltevuus ja muoto (kovera) ovat samankaltaiset Ruskonkehän alikulun kanssa	



Kuva 3. Kaarrekirskunnan keskimääräinen taajuusjakauma, L_{wz}

Mallinnus tehdään sijoittamalla pistelähde kaarteeseen molempien kiskojen kohdalle kaarteeseen keskiosaan 0,1 metrin korkeudelle ja laskemalla niistä aiheutuvat LAF_{max} ja LA_{eq} tasot halutuissa kohteissa. Erityisesti pitkien kaarteiden osalta tarkkaa kirs-kunta-sijaintia on mahdoton ennustaa, mikä mallinnuksessa huomioidaan asettamalla kirs-kunta tutkittavan kohteen kannalta epäedullisimpaan sijaintiin tai asettamalla kaarteeseen useampia kirs-kuntapisteitä 15 m välein. Keskiäänitason mallinnuksessa yksittäisen kaarreohituksen kirs-kunnan kestoksi asetetaan kolme sekuntia (3s/kisko). Jos kaarre jaetaan useaan kirs-kuntapisteeseen, myös kirs-kunta-aika jaetaan pisteiden kesken.

3.5 Muut raidekorjaukset

Muiden raidekorjauksien osalta (vaihteet, kiskojen risteykset, jne.) pyydetään käyttämään ohjeen -97 mukaisia vakioituja korjauksia ΔL_c (ohjeen kpl 3.2.3). Vaihteet tai risteysalueet eivät olleet mittausten kohteena.

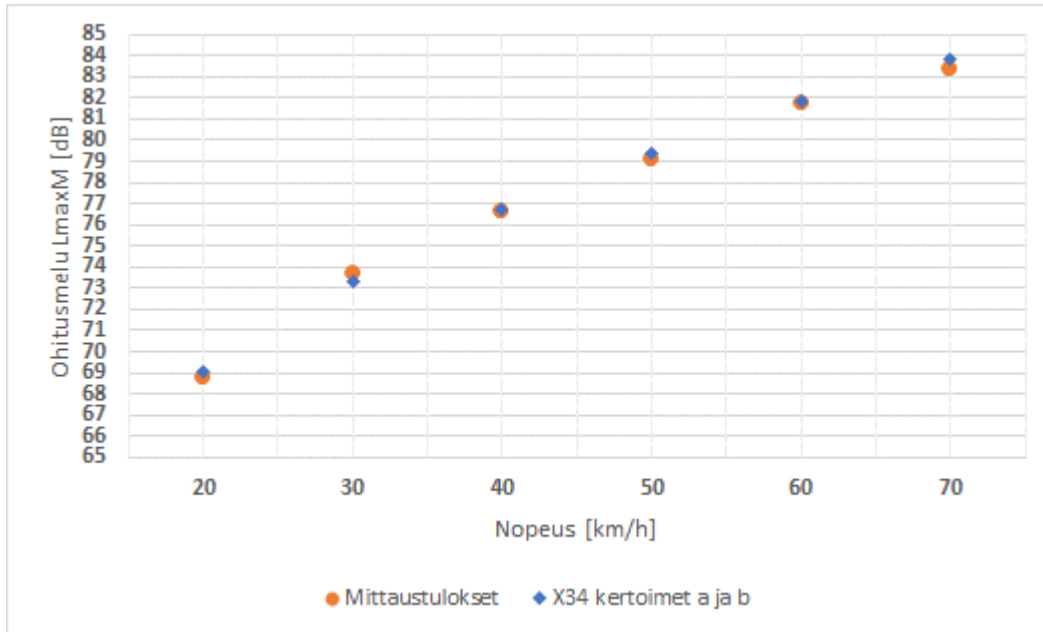
3.5.1 Ristikon- ja vaihteen yliajomelu

Ristikon ja vaihteiden yliajomelu nostaa keskimääräistä melutasoa Ympäristöministeriön ohjeen -97 mukaan +6 dB. Ristikon ja vaihteiden yliajomelun raidekorjauksia käytetään 10 metrin mittaisella rataosalla vaihteen tai ristikon kohdalla. Raidekorjaus voidaan tehdä pohjoismaisessa laskentamallissa sinne erikseen syöttämällä.

3.6 Mallinnuskertoimien a ja b validointi

Mallinnuskertoimien validointi suoritettiin Soundplan v.8.1 melumallinnusohjelmalla suoralle raideosuudelle yhden raitiovaunun ohiajon tilanteelle 1,2m:n mallinnuskorkeudelle, joka vastaa mittauskorkeutta ja etäisyyttä 7,5m radan keskilinjasta. Lähtökohtana oli ohitusmelun enimmäistason L_{maxM} validointi (97 ohje kpl 3.2.2) saaduilla a ja b kertoimilla eri vakionopeuksilla suhteessa mittaustuloksiin, joka vastaa standardin ISO 3095 ohitusmelun arvoa koko raitiovaunu geometrialle $LA_{eq,Tp}$.

Sekaannuksen välttämiseksi on huomioitava, että ohjeen -97 termi "enimmäistaso" L_{maxM} vastaa koko raitiovaunun geometrian mukaisen ohitustilanteen äänen energia-keskiarvoa, mutta ei ohitusmelun enimmäistasoa LAF_{max} , jolla on omat mittaustulokset sekä ohjeen -97 lisäyhtälöt L_{maxF} arvolle koskien sähkö- tai dieselvetoisia junia.



Kuva 4. Mallinnustuloksen L_{maxM} (käyttäen uusia a ja b kertoimia) ja mittaustulosten vertailu

Validoinnin perusteella a ja b kertoimien avulla lasketut eri nopeusalueiden tulokset 1,2m:n mittauskorkeuden tuloksiin nähden ovat varsin tarkat. Suurin ero oli +0,5 dB nopeudella 70 km/h (mallinnustulos on suurempi), joka on selkeästi mittaus- ja mallinnusepävarmuuden sisällä. Keskimäärin eroa oli vain 0,1 dB.

3.6.1 Esimerkkilaskelma

Alla olevaan taulukkoon on laskettu uusia mallinnuskertoimia a ja b hyödyntäen muutama esimerkki Tampereen raitiovaunun keskiäänitason L_{Aeq} tuloksista kahdella eri nopeusalueella akustisesti puolikovan ($G=0,5$) ja tasaisen maanpinnan ympäristössä. Laskenta on suoritettu vain yhdelle raiteelle. Lisäksi taajuuskaistavertailu väliaikaisiin kerroimiin nähden näitä lähtötietoja hyödyntäen on kuvattu kappaleessa 3.6.

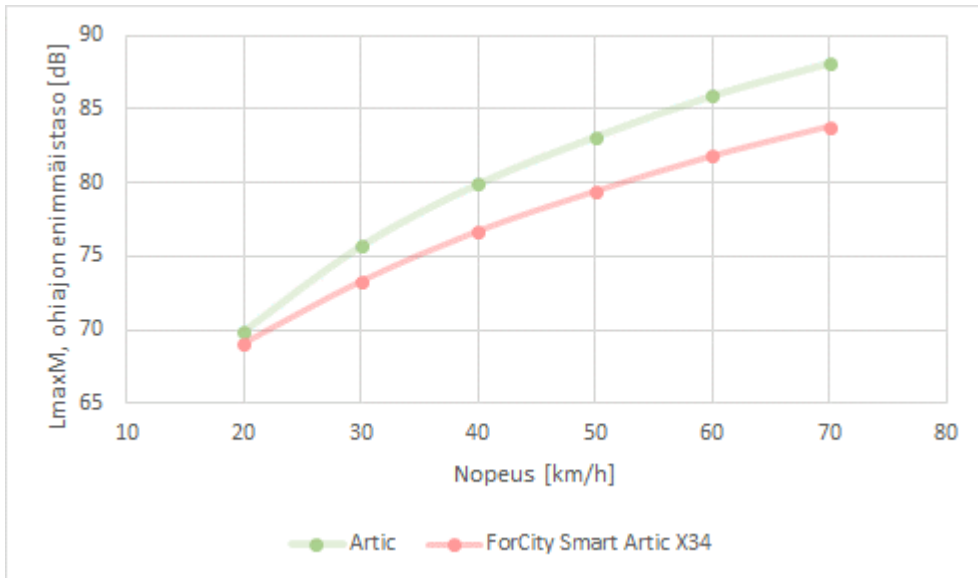
Alla olevia tuloksia ei kuitenkaan voida käyttää yleisinä arvoina, vaan keskiäänitason tilanne on aina ratkaistava meluselvityksissä tapauskohtaisesti ottamalla huomioon liikennetiheys, sallittu liikennöintinopeus, ratageometria sekä mallinnusalueen ympäristön tila kuten ympäröivien rakennusten geometriat ja maanpinnan akustiset kovuuskertoimet.

Taulukko 5. Esimerkkilaskelmia uusien mallinnuskertoimien a ja b avulla laskettuna tasaiselle ja akustisesti puolikovalle maanpinnalle

L_{Aeq} ($G=0.5$)	40 km/h		60 km/h	
Aikajakso	klo 07-22	klo 22-07	klo 07-22	klo 22-07
Liikennemäärä (yh- dellä raiteella)	112	30	112	30
50m:n etäisyydellä	45 dB	41 dB	48 dB	45 dB
100m:n etäisyydellä	41 dB	38 dB	45 dB	41 dB

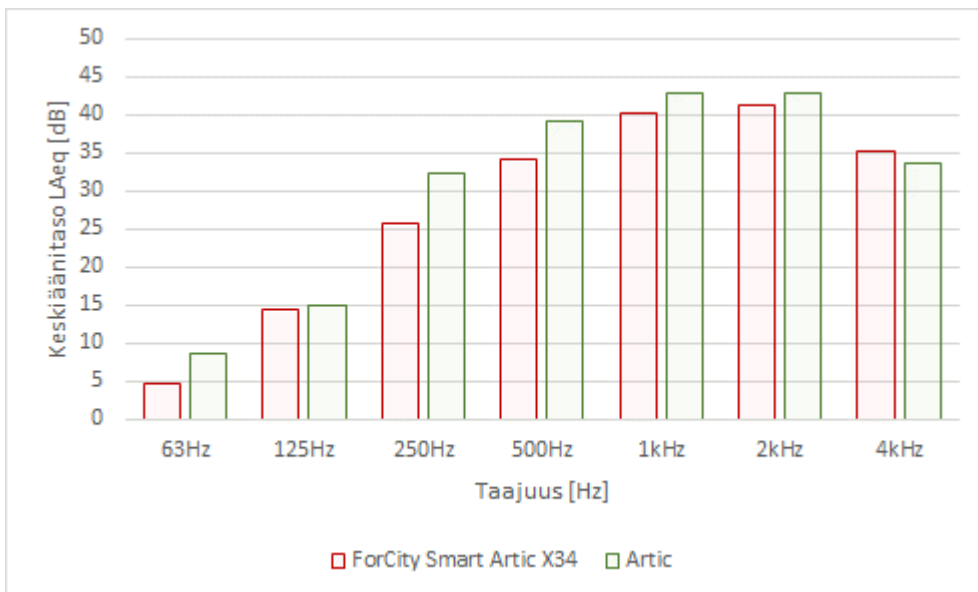
3.7 Vertailu väliaikaisiin meluohjeisiin

Vertailulaskenta väliaikaisiin a ja b kertoimiin (Helsingissä käytössä olevat Artic -vaunut) osoittaa, että äänitasoltaan 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.



Kuva 5. Vertailu väliaikaisilla mallinnuskertoimilla ja uusilla kertoimilla laskettujen mallinnustilanteiden ohitusmelu LmaxM (ISO 3095 mukainen LAeq,Tp)

Taajuuskaistavertailu kappaleen 3.4.1 lähtötiedoilla on kuvattu alla. Artic vaunun pituutena käytettiin 27,6m. Suurimmillaan äänitasoero (Artic – Artic X34) eri taajuuksilla oli +7 dB (250 Hz) ja pienimmillään -1,5 dB (4 kHz).



Kuva 6. Keskiäänitason LAeq taajuuskaistavertailu eri vaunutyyppien mallinuksissa, kun lähtötietoina käytetään kappaleen 3.6.1 lähtötietoja päiväajan liikenteelle yhdellä raiteella ja 100m:n laskentaetäisyyttä

3.8 Tulosepävarmuuden huomiointi

Mallinnuskertoimien a ja b arvot eivät itsessään sisällä lainkaan mittaus- tai mallinnusepävarmuuksia. Kaikkiaan mittausten tuloshajonnat ja epävarmuudet jäivät hyvin vähäisiksi ja 95%:n luottamusvälin mukaan laskettuna mittausepävarmuudet olivat tasolla $\pm 1,5$ dB, missä suurin epävarmuus muodostui ohjeen 1/1995 mukaan mittariepävarmuudesta luokan 1. mittarille (keskihajonta on ohjeen mukaan 0,8 dB). A ja b kertoimien vertailu osoitti, että niiden suurin hajonta mittaustuloksiin nähden oli vain noin 0,2 dB. Lisäksi Artic X34 vakioajonopeussäätimen epävarmuus $\pm 3\%$ tarkoittaa noin 0,2 dB:n mallinnusepävarmuutta.

Raitiotieallianssi ei kuitenkaan suosittele tässä vaiheessa tulosepävarmuuden huomiointia melutarkasteluissa äänipäästön lisänä, sillä mittaus suoritettiin avo-/sepeliradalla ja melun leviämisen kannalta suotuisissa olosuhteissa lämpötilan ja ilmankosteuden osalta. Uudet a ja b kertoimet antavat lisäksi pääosin hieman mittaustuloksia korkeampia laskentatuloksia mallinnoissa.

4 Lähteet

Efterklang – AFRY 2024. Tampereen Raitiotie Oy – Kaarrekirkuntaselvitys 2024. Raportti 101025406-001. 11/2024

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.

Raitiotieliikenteen melupäästö ja suositus väliaikaisista arvoista käytettäväksi Tampereella maankäytön ja rakentamisen suunnittelussa. Raportti 1510040835. Ramboll Finland Oy, 2018.

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

Ympäristöopas 97, Raideliikennemelun laskentamalli. Ympäristöministeriö, Helsinki, 2002.