

TEKNILLINEN KORKEAKOULU
Elektroniikan, tietoliikenteen ja automaation tiedekunta
Signaalinkäsittelyn ja akustiikan laitos

Jarno Kokkonen

Rengasmelun emissio ja leviäminen

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 11.1.2008

Työn valvoja
Työn ohjaaja

Professori Matti Karjalainen
TkT Tapio Lahti

Tiivistelmä

TEKNILLINEN KORKEAKOULU

Diplomityön tiivistelmä

Tekijä:	Jarno Kokkonen
Työn nimi:	Rengasmelun emissio ja leviäminen
Päivämäärä:	11.1.2008 Sivumäärä: 80
Tiedekunta:	Elektroniikan, tietoliikenteen ja automaation tiedekunta
Professori:	S-89 Akustiikka ja äänenkäsittelytekniikka
Työn valvoja:	Prof. Matti Karjalainen
Työn ohjaaja:	TkT Tapio Lahti
Työssä käsitellään tieliikennemelua: rengas- ja päällystemelua sekä tieliikennemelun laskentamalleja. Pääpaino oli hiljaisten päällysteiden vaikutuksella rengasmeluun. Melua tutkittiin sekä mittauksin että mallilaskennoin. Melun mittaukset tehtiin ohiajomenetelmällä. Nykyisen ja uuden sukupolven laskentamallien tuloksia verrattiin sekä keskenään että mitattuihin tuloksiin. Mittautuloksien perusteella hiljaiset päällysteet ovat talvella yhtä äänekkäitä kuin referenssinä olleet tavalliset päällysteet. Kesällä hiljainen päällyste oli 2 – 3 dB hiljaisempi kuin referenssipäällyste. Uuden sukupolven Nord2000-laskentamalli osoittautui merkittävästi tarkemmaksi kuin nykyinen vuoden 1996 pohjoismainen laskentamalli. Nykyisessä laskentamallissa henkilöautojen meluemissio sekä maavaimennus ovat liian pienet. Tulevissakin laskentamalleissa alkuperäiset emissiotasot ovat liian pienet. Niiden kanssa tulisi Suomessa käyttää sopivia korjaustermejä, jotka ottavat huomioon Suomen teiden ja/tai autokannan poikkeavuuden. Tulevia laskentamalleja silmälläpitäen tässä työssä tutkittiin myös rengasmelun mahdollista suuntaavuutta yläviistoon, ja tulos oli, ettei sitä esiinny merkittävästi vakioliikenteen tilanteessa.	
Avainsanat: rengasmelu, hiljaiset päällysteet, Nord2000, Harmonoise, nastarenkaiden melu	

Abstract

HELSINKI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Abstract of the Master's Thesis

Author:	Jarno Kokkonen
Name of the thesis:	Tyre/Road Noise Emission
Date:	Jan 11, 2008
	Number of pages: 80
Faculty:	Electronics, Communications and Automation
Professorship:	S-89 Acoustics and Audio Signal Processing
Supervisor:	Prof. Matti Karjalainen
Instructor:	Dr.Sc. (Tech.) Tapio Lahti
The scope of this thesis is road traffic noise: tyre/road noise and road traffic noise prediction methods. Main focus was on the effect of silent pavement on tyre noise. The noise was studied with both measurements and prediction methods. Noise measurements were done with Pass-By methods. Results from current and new-generation prediction methods were compared with each other and against to the measured values. According to the measurement results, in winter-time silent pavements are equally loud compared to the reference surfaces. On summer time silent pavements are from 2 to 3 dB more silent than the reference surfaces. The new generation Nord2000 prediction method was notably more accurate than the current Nordic prediction method. In the current Nordic prediction method sound exposure levels and ground correction of light vehicles are too low. Also, in the new prediction methods original sound exposure levels are too low. In Finland the correct correction values that take into account the different road and/or vehicle population should be used when using these new models. In addition vertical directivity of vehicle noise was studied; result being that there is not much vertical directivity.	
Keywords: tyre/road noise, silent pavement, Nord2000, Harmonoise, studded tyres noise	

ALKUSANAT

Työssä tehdyt mittaukset ja analysointi olivat osana Liikenne- ja viestintäministeriön VIEME- eli Vierintämelun vähentäminen -tutkimushanketta, joka oli käynnissä vuosina 2006–07. VIEME -hankkeen tavoitteena on rengasmelun vähentäminen ilman haittavaikutuksia, sekä saada uutta tietoa melun ja pölyn muodostuksen ja leviämisen keskinäis-suhteesta. Itse diplomityö on tehty Insinööritoimisto Akukon Oy:ssä, jonka osuutena VIEME -hankkeessa oli rengasmelun ohiajomittaukset.

Työn valvojaa, Matti Karjalaista, haluan kiittää erinomaisesta palautteesta diplomityön tekemisen aikana. Työn ohjaajalle, Tapio Lahdelle, kiitokset hyvästä ohjauksesta sekä käytännön että teorian osalta.

Kiitokset vanhemmilleni henkisestä ja taloudellisesta tuesta opiskelujeni aikana. Lopuksi tärkeimmät kiitokset kuuluvat Marjukalle, joka on ollut tärkeä tuki diplomityön tekemisen aikana.

Kauniaisissa 11.01.2008

Jarno Kokkonen

Alkusanat	III
Lyhenteet	VI
1 Johdanto	1
2 Tieliikenteen melu	2
2.1 Liikennemelun käsitteitä	2
2.1.1 Suureet	2
2.1.2 Ajoneuvojen hetkellinen melu	3
2.1.3 Melun leviäminen	4
2.2 Melun osalähteet	6
2.3 Rengasmelun syntymekanismit	7
2.3.1 Rakenteelliset/mekaaniset värähtelyt	7
2.3.2 Aerodynaamiset rengasmelumekanismit	9
2.3.3 Melua vaimentavat tai vahvistavat tekijät	13
2.3.4 Rengasmelun suuntaavuus	15
2.4 Rengasmelun emissioon vaikuttavat tekijät	17
2.4.1 Renkasiin liittyvät muuttujat	17
2.4.2 Nopeus ja tangentiaaliset voimat	23
2.4.3 Tienpinta	26
2.4.4 Ympäristötekijät	31
2.5 Yleiset mittaamenetelmät	33
2.5.1 Rullausmenetelmä (CB)	33
2.5.2 Tilastollinen ohiajomenetelmä (SPB)	34
2.5.3 Lähimittausmenetelmä-vaunumenetelmä (CPX)	35
3 Tieliikennemelun laskentamallit	36
3.1 Nykyinen Pohjoismainen vakiomalli	36
3.1.1 Melulähde ja lähtöarvot	36
3.1.2 Melun leviäminen ja vaimennukset	36
3.2 Nord2000-laskentamalli	37
3.2.1 Melulähde ja lähtöarvot	37
3.2.2 Melun leviäminen ja vaimennukset	38
3.3 Harmonoise-laskentamalli	42
3.3.1 Melulähde ja lähtöarvot	42
3.3.2 Melun leviäminen ja vaimennukset	43
3.4 Laskentamallien vertailua	44
3.4.1 Mallien tarkkuus	44
3.4.2 Laskennallinen vaativuus	45

4	Rengasmelun mittaukset	47
4.1	Mittausjärjestelyt.....	47
4.1.1	Sovellettu ohiajomittausmenetelmä (SPB)	47
4.1.2	Sovellettu rullausmenetelmä (CB)	49
4.2	Tulokset.....	50
4.2.1	Hiljaiset päällysteet.....	50
4.2.2	Rengasmelun suuntaavuus yläviistoon	51
4.2.3	Nastarenkaat vakioliikenteessä ja testiradalla.....	52
4.2.4	Tiepäällysteen ikääntymisen vaikutus	55
4.2.5	Laskentamallien ja mittaustuloksien vertailua	56
4.2.6	Harmonoise-mallin lähtötietojen vertailua tuloksiin.....	59
4.3	Virhetarkastelu	60
4.3.1	Muuttuvat olosuhteet	61
4.3.2	Mittaustuloksien normalisointi	61
5	Johtopäätökset	62
5.1	Laskentamallit	62
5.2	Päällysteet.....	62
5.3	Nastarenkaiden vaikutus.....	63
6	Viitteet	64
	Liite 1. Mittaus- ja analyysilaitteisto	66
	Liite 2. Kohdekohtaiset spektritulokset 2006	67
	Liite 3. Spektritulokset 2007 Pirkkolantie	75

LYHENTEET

3M™ safety-walk	hiekkapaperimainen liukastumiseste
AB	asfalttibetonipäällyste
CB	rullausmenetelmä (Coast-By)
CPX	lähi-/vaunumittausmenetelmä (Close-Proximity)
GBR-S	sileä päällystejäljitelmä
GRB-R	karkea päällystejäljitelmä
IEC	International Engineering Consortium
ISO	International Organization for Standardization
SMA	kivimastiksipäällyste (Split Mastic Asphalt)
SPB	tilastollinen ohiajomittausmenetelmä (Statistical Pass-By)

1 JOHDANTO

Tieliikenteen melu on ylivoimaisesti suurin ympäristömelun lähde. Tuoreen selvityksen mukaan pelkästään Helsingissä asuu yli 200 000 ihmistä tieliikennemelualueella [1]. Tieliikennemelusta valtaosa syntyy renkaan ja tienpinnan kosketuksesta.

Tässä työssä selvitetään ensin kirjallisuuskatsauksen avulla rengasmelun eri syntymekanismit ja pyritään kartoittamaan niiden merkitys kokonaismelun kannalta. Käytännön mittauksien kautta on selvitetty uusien hiljaisempien päällysteiden sekä nastarenkaiden vaikutusta rengasmeluemissioon.

Itse päällyste ja rengasmittausten sekä niiden välittömien tulosten ohella tämän työn tavoitteena on selvittää mittaustietojen kytkentää erityisesti pian käyttöön tulevaan EU:n tieliikennemelun Harmonoise-laskentamalliin. Liikennemelun haittoja arvioidaan usein erilaisilla laskentamalleilla saatujen melukarttojen avulla. Laskentatuloksien kannalta on tärkeätä, että laskentamallin lähtöarvot ja vaimennustekijät ovat mahdollisimman lähellä todellisia arvoja. Jälkimmäisessä osassa on tutkittu melun leviämistä vertaamalla laskentamalleilla saatuja tuloksia mitattuihin tuloksiin, sekä laskentamallien tuloksia keskenään.

Diplomityö liittyy Liikenne- ja viestintäministeriön VIEME- eli Vierintämelun vähentäminen -tutkimushankkeeseen, jonka aihealuetta melun osalta käsitellään tässä työssä laajemmin.

2 TIELIIKENTEN MELU

2.1 Liikennemelun käsitteitä

2.1.1 Suureet

Yhtä ajoneuvoa voidaan kuvata pistelähteenä, jolloin yksittäisten liikkuvien pistelähteiden helminauha muodostaa viivalähteen. Keskiäänitason eli ekvivalenttitason L_{eq} kanalta myös yksittäinen liikkuva pistelähde muodostaa viivalähteen. Ekvivalenttitasoa käytetään sekä lähtö- eli päästöluonteisena suurena että laskenta-suurena tieliikennemelun laskentamalleissa. Ekvivalenttitaso jatkuvalla signaalille on määritelty seuraavasti (ISO 1996/1):

$$L_{Aeq} = 10 \log \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \frac{p^2(t)}{p_0^2} dt \right] \quad (1)$$

missä:

t_1 = aloitusaika

t_2 = lopetusaika

$p(t)$ = äänipaine

p_0 = referenssiäänipaine (20 μ Pa)

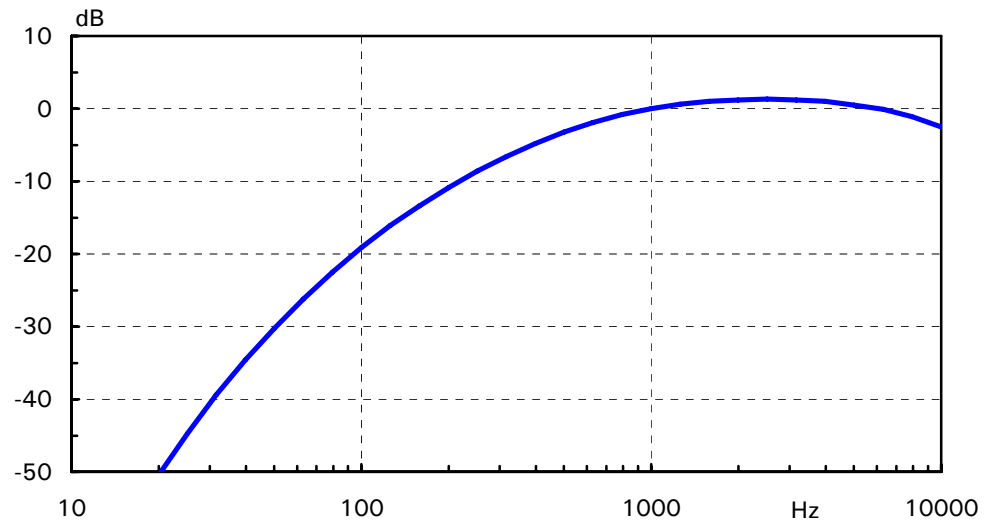
Keskiäänitaso on yleisen luulon vastaisesti äänipainesignaalin tehollisarvo eikä keskiarvo. Hetkelliselle tapahtumalle, esimerkiksi yhden auton ohitukselle, on käytännöllisempää normalisoida ekvivalenttitaso yhteen sekuntiin. Tällöin saadaan äänialtistustaso L_{AE} . Kun lasketaan SI-yksiköillä, niin äänialtistus-, eli emissiotaso voidaan määritellä ekvivalenttitasosta seuraavasti:

$$L_{AE} = L_{Aeq} + 10 \lg T \quad (2)$$

missä T on aika. Jos ekvivalenttitaso vastasi tehoa, niin äänialtistustaso vastaa meluanosta. Emissiotaso on apusuure, jonka avulla voidaan laskea muita arvoja kuten ekvivalentti- ja äänitehotaso. Äänitehotaso L_{WA} voidaan määritellä ohittavan ajoneuvon emissiotasosta seuraavasti [2]:

$$L_{WA} = L_{AE} + 10 \lg 2rv \quad (3)$$

missä nopeus v ja etäisyys ajoneuvon kulkureitin keskilinjaan r ovat SI-yksiköissä. Yleisesti on tapana ilmoittaa arvot A-painotettuina eli esimerkiksi L_{WA} , jolloin ne vastaavat suhteellisen hyvin sitä, miten häiritsevänä ihminen aistii melun. Kuvassa 1 on esitetty A-painotettu taajuusvaste 10 kHz asti.



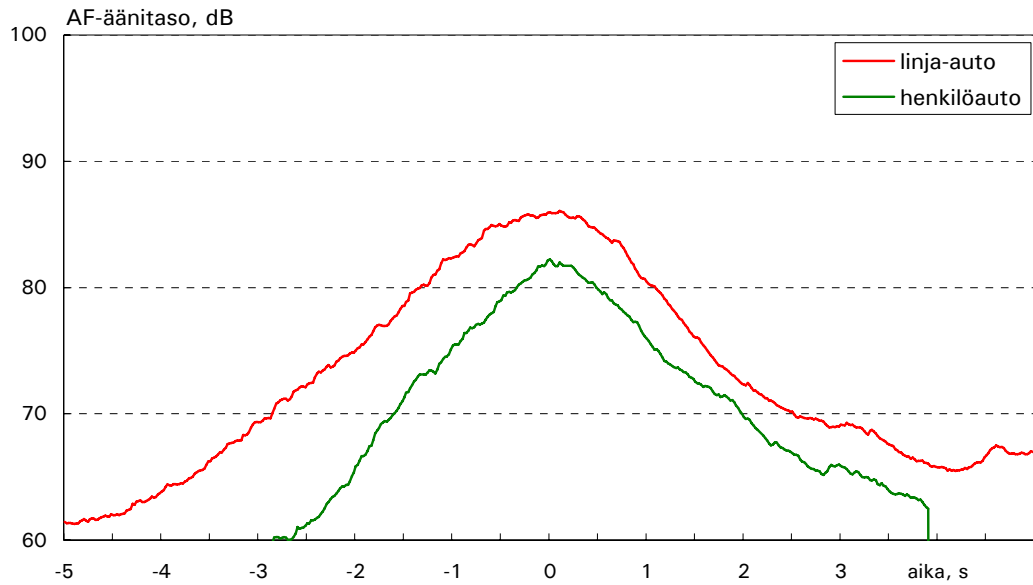
Kuva 1. Taajuusvasteen A-painotus [IEC 651, SFS 2877].

Enimmäistasolla L_{Amax} tarkoitetaan suurinta hetkellistä A-painotettua äänitasoa, jonka standardin IEC 60651 mukainen aikapainotus on F-painotus. Jos kyseessä on pistemäinen ja suuntaamaton lähde, niin L_{Amax} korreloi täysin L_{AE} :n kanssa. Tämä on varsin hyvin pitänyt paikkansa vielä kolme vuosikymmentä sitten, kun moottorimelu oli pääasiallinen melun lähde. Enimmäistason etu äänialtistustasoon verrattuna on, ettei se ole yhtä herkkä taustamelulle.

2.1.2 Ajoneuvojen hetkellinen melu

Kun ajoneuvo ohittaa tien sivussa olevan tarkkailupisteen, niin sen aiheuttama äänipainetaso nousee ensin jyrkästi saavuttaen huippunsa L_{Amax} suunnilleen tarkkailupisteen tasalla, minkä jälkeen äänipainetaso laskee hitaasti. Henkilöautoilla huippu on terävämpi kuin raskailla ajoneuvoilla.

Kuvassa 2 näkyy yksittäisen henkilö- ja linja-auton äänitaso $L_{AF}(t)$ nopeudella 51 km/h. Aika-akseli on skaalattu ohituksen L_{AFmax} arvon mukaan, joka on linja-autolla noin 0,5 s todellista ohitushetkeä aiemmin.



Kuva 2. L_{AF} äänitaso kun vastaanottopiste on 1,2 m korkeudella ja noin 7,5 m etäisyydellä äänilähteen keskilinjasta. Aika-akselin nollakohta on kohdassa L_{AFmax} .

2.1.3 Melun leviäminen

Ideaaliolosuhteessa eli vapaakentässä (ei tuulta, lämpötilagradienttia, heijastuksia, jne) pistelähteen äänipainetaso vaimenee kääntäen verrannollisena lähteen ja vastaanottopisteen välisen etäisyyden neliöön, toisin sanoen etäisyyden kaksinkertaistuessa äänipainetaso laskee 6 dB kaavan 4 mukaisesti.

$$L_x = L_R - 10 \log \left(\frac{x^2}{R^2} \right) \quad (4)$$

missä:

L_x = äänipainetaso etäisyydellä x

L_R = äänipainetaso etäisyydellä R

Pistelähteenä voidaan ajatella sellaista lähdetä, jonka dimensiot ovat pienet verrattuna vastaanottopisteen ja lähteen väliseen etäisyyteen.

Vastaavasti viivalähteellä äänen intensiteetti on kääntäen verrannollinen etäisyyteen, eli etäisyyden kaksinkertaistuessa äänipainetaso laskee 3 dB kaavan 5 mukaisesti.

$$L_x = L_R - 10 \log \left(\frac{x}{R} \right) \quad (5)$$

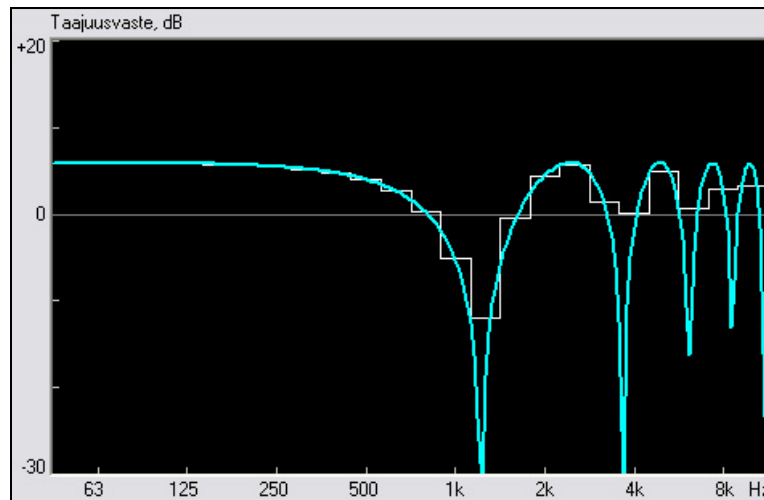
Viivalähteellä yksi dimensio on selvästi suurempi kuin muut dimensiot, tai se voi koostua suuresta joukosta lähekkäin olevia pistelähteistä, kuten vilkkaasti liikennöidyllä tiellä. Keskiäänitason kannalta myös yksi liikkuva piste muodostaa viivalähteen. Käytännössä ei kuitenkaan ole vapaakenttäolosuhteita, vaan melun leviämiseen vaikuttavat (merkittävimmän) absorptio, lämpötilagradientti, tuuli ja ilman turbulenssi.

Ilman absorptio riippuu äänen taajuudesta ja ilman kosteudesta. Korkeilla taajuuksilla absorptio on suurempi kuin matalilla taajuuksilla. Suurin absorptio saavutetaan kaikilla taajuuksilla, ilman suhteellisen kosteuden ollessa pieni (10 – 20 %).

Lähes aina kun tuulee, lähellä maanpintaa tuulee vähemmän kuin ylempänä. Tällainen tuuligradientti saa aikaan ääniaaltojen taipumista maanpintaa kohden myötätuulen puolella, ja vastaavasti vastatuulen puolella ääniaallot taipuvat ylöspäin. Vaimennus vastatuulen puolella on huomattavasti suurempi kuin vahvistus myötätuulen puolella [4]. Tuuli saa myös aikaan pyörteitä ja turbulenttisia virtauksia, eli pyörteisyyttä, joka sirottaa ääntä.

Lämpötilagradientti saa aikaan vastaavanlaisen ilmiön kuin tuuligradientti. Kun aurinko lämmittää esimerkiksi peltoa, syntyy lämpötilaero, jolloin ilman tiheys ja äänennopeus vaihtelevat korkeuden mukaan. Normaalitylanteessa ilmamassa viilenee tasaisesti ylöspäin mentäessä, jolloin pitkillä etäisyyksillä ääni kaareutuu ylöspäin. Aurinkoisena päivänä ilmamassa yleensä viilenee 10 °C ensimmäisen kilometrin matkalla ja keskimäärin stratosfäärissä lämpötila laskee 7 – 8 °C/km. Aivan tienpinnan yläpuolella voi olla hyvinkin voimakas lämpötilagradientti, joka voi joissakin tapauksissa saada aikaan ääniaallon taipumista ylöspäin tavanomaista lyhyemmällä etäisyyksillä. Pilvettömänä yönä tilanne lähellä maanpintaa (<1km) on päinvastainen, eli lämpötila 700 m voi hyvinkin olla 7 °C korkeampi kuin maanpinnalla. Riippuen vallitsevista olosuhteista voi lämpötilan muutos olla erisuuntainen riippuen korkeudesta. Lämpötilaerot ovat aurinkoisena päivänä myös hyvin paikallisia. Tietyt maastoalueet tai rakennelmat, esimerkiksi pysäköintialueet, absorboivat auringonsäteilyä ympäröivää aluetta tehokkaammin, jolloin syntyy lämpötilaeron lisäksi nousevia ilmavirtauksia/ilmapaketteja, joiden nopeus on tyypillisesti 3 – 6 m/s. Vastaavasti viileissä kohdissa esiintyy laskevia ilmavirtauksia. Kun tuuli sekoittaa nousevia ja laskevia ilmavirtauksia, syntyy pyörteitä ja turbulenttisia virtauksia. Aurinkoisena ja tuulisena päivänä ilma voi olla hyvinkin ”möykkyistä”.

Sääolosuhteiden lisäksi todellisissa tilanteissa on aina mukana heijastava pinta. Kun ääni osuu pintaan, niin osa siitä absorboituu ja toinen osa heijastuu joko saman tai vastakkaisvaiheisena riippuen pinnan virtausvastuksesta. Suora ja heijastunut ääni joko vahvistavat tai vaimentavat toisiaan vaihe-erosta riippuen. Koska vaihe-ero riippuu suoran ja heijastuneen äänen välisestä matkaerosta, niin kumoava ja vahvistava vaikutus on taajuusriippuvaista. Kuvassa 3 näkyy kampasuodinilmiö kovalla maanpinnalla 10 m etäisyydellä, kun lähde on 0,2 m korkeudella ja vastaanottopiste 4 m korkeudella.



Kuva 3. Maaheijastuksen ääntä kumoava ja vahvistava vaikutus kovalla alustalla. Kanti-
kas taajuusvaste on keskiarvoistettu terssikaistoittain. X-akselilla on taajuus (Hz)

2.2 Melun osalähteet

Ajoneuvojen melun osalähteet voidaan jakaa kolmeen pääryhmään: rengasmeluun, aerodynaamiseen meluun ja voimalähteen meluun, joista viimeksi mainittu pitää sisällään moottorin, tuulettimen, pakoputken ja voimansiirron aiheuttaman melun.

Melun osalähteiden keskinäiseen suuruuteen vaikuttaa nopeus, kiihtyvyys ja ajoneuvon ominaisuudet. Tuoreen Harmonoise-laskentamalliin liittyvän Imagine-tutkimuksen mukaan raskailla-ajoneuvoilla moottorimelun osuus olisi aiemmin oletettua suurempi [3]. Akselien lukumäärällä on suuri merkitys siihen, millä nopeudella rengasmelun osuus ylittää moottoriperäisen melun. 4-akseliset raskaat ajoneuvot ovat kookkaampia ja moottoriperäinen melu on hiukan voimakkaampaa kuin 2-akselisilla raskailla ajoneuvoilla, mutta rengasmelun logaritminen kasvu nopeuden suhteen saa aikaan sen, että useampiakselisilla raskailla ajoneuvoilla rengasmelun voimakkuus ylittää moottorimelun alhaisemalla nopeudella kuin 2-akselisilla ajoneuvoilla [3]. Taulukossa 1 on eri arviot nopeusalueista, joissa rengasmelun osuus ylittää moottorimelun.

Taulukko1. Nopeusalueita eri tilanteissa, joissa nopeuden kasvaessa rengasmelu ylittää moottorimelun [3] [4]. Nopeusalueeseen vaikuttaa mm. tien päällyste ja ajoneuvon kuorma.

Ajoneuvon tyyppi	vakionopeudella [4]	kiihdyttäen [4]	vakionopeudella [3]
autot vm. 1985-95	30-35 km/h	45-50 km/h	-
autot vm. 1996-	15-25 km/h	30-45 km/h	30 km/h
Raskaat vm. 1985-95	40-50 km/h	50-55 km/h	-
Raskaat vm. 1996-	30-35km/h	45-50 km/h	-
Raskaat 2-akseliset			75 km/h
Raskaat 4-akseliset			100 km/h

Autojen voimalähteiden melua on saatu pienennettyä lainsäädännön ja teknisen kehityksen avulla, mutta rengasmeluun on vasta viime vuosina kiinnitetty enemmän huomiota.

Aerodynaamisella melulla on vaikutusta henkilöautojen meluun vasta hyvin suurilla yli 150 km/h nopeuksilla, jotka ovat yli suurimman sallitun nopeuden. Sinänsä mielenkiintoinen ilmiö aerodynaamisessa melussa on se, että sen voimakkuus on verrannollinen nopeuden viidennestä kuudenteen potenssiin, kun rengasmelu sen sijaan kasvaa logaritmisesti, ja moottorimelu loivasti lineaarisesti nopeuden funktiona.

2.3 Rengasmelun syntymekanismit

Rengasmelun synty tapahtuma on monimutkainen ilmiö, jonka kaikkien mekanismien osuutta tai merkitystä kokonaismelun kannalta ei vielä täysin tunneta. Syntymekanismit voidaan jakaa kahteen pääryhmään; rakenteellisiin ja aerodynaamisiin, niiden syntyperiaatteen mukaan. Koska rengasmelu koostuu useasta monimutkaisestakin osalähteestä, on sen meluemissiolla suuntaavuutta [4].

2.3.1 Rakenteelliset/mekaaniset värähtelyt

Mekaaniset värähtelyt voidaan jakaa iskuista aiheutuviin lähinnä radiaalisiin värähtelyihin sekä kitkasta eli hystereesistä ja adheesiosta aiheutuviin värähtelyihin, jotka ovat lähinnä tangentiaalisia värähtelyjä. Iskuista aiheutuvat värähtelyt voidaan jakaa kolmeen osaan: kuviopaloista, tien karheudesta ja renkaan litistymisestä aiheutuviin värähtelyihin.

2.3.1.1 Kuviopalan iskut

Kuviopalan iskussa renkaan kuviopala tai muu osa, kuten nasta, iskeytyy tienpintaan aiheuttaen radiaalisia värähtelyjä, jotka leviävät myös tangentiaalisina värähtelyinä renkaan pinnassa ja vyörakenteessa, leviten renkaan kylkiin. Sama ilmiö tapahtuu myös silloin kun kontaktivoima vapautuu jättöreunan puolella.

2.3.1.2 Tien karheudesta aiheutuvat iskut

Toisena iskuvärähtelyn tyyppinä on tiepinnan karheudesta aiheutuvat iskut, jonka mekanismi on sama kuin kuviopalan iskussa, mutta jossa tienpinnan vaihtelu ”vasaroi” renkaan pintaa johtoreunan puolella ja vastaavasti vapauttaa pinnan jättöreunan puolella. Iskut ilmenevät tietyllä taajuudella, kuviopalojen välisestä etäisyydestä tai tien pinnan karheudesta sekä ajoneuvon nopeudesta riippuen. Iskuvoimien aiheuttamat perustaajuudet voidaan laskea kaavan (6) avulla

$$f = v / \lambda \quad (6)$$

missä λ on kuvioinnin tai tien pinnoitteen jakson pituus. Iskun aiheuttaman herätteen amplitudiin liittyy hyvin monimutkaisia muuttujia, kuten kuvion syvyys, leveys, kumin kovuus jne. Renkaan vyörakenteen resonanssit voivat merkittävästi vahvistaa iskusta aiheutuvia herätteitä.

2.3.1.3 Renkaan litistymisen/muokkautuminen

Kolmas iskusta aiheutuva renkaan värähtely syntyy kun rengas (renkaan vyö ja runko) painautuu kasaan johtoreunalla ja vapautuu jättöreunalla aiheuttaen värähtelyjä renkaan vyö- ja runkorakenteisiin. Tämä iskusta aiheutuva värähtely esiintyy myös silloin kun rengas ja tienpinta ovat sileät.

2.3.1.4 Tangentiaalinen takertumis-luiskahdus (stick-slip)

Kitkan aiheuttamat värähtelyt ovat lähinnä tangentiaalisia. Takertumis-luiskahdustapahtumassa kuviopalat liikkuvat suhteessa tienpintaan aiheuttaen tangentiaalista renkaan värähtelyä. Kun rengas litistyy kontaktipinnan kohdalta, radiaalinen muutos saa aikaan tangentiaalisia voimia renkaan ja tien välille. Kun näitä muutoksia vastustavien kitkavoimien - renkaan jäykkyyden ja muiden jäännös/residuaalivoimien - takertumisvoima vapautuu, renkaan kulutuspinta luiskahtaa/liukuu tienpintaa pitkin.

Kulutuspinnan ja tien välinen kitka voidaan jakaa kahteen osaan, adheesioon ja hystereesiin. Adheesion eli takertumisen kannalta on merkittävää, millainen tienpinnan mikrorakenne on. Renkaan ja tien suhteellisen luiskahduksen/liukumisen aikana adheesiositeet tien mikrorakenteiden ja kuviopalojen välillä revähtävät erilleen, jolloin kumi voi vapaasti liukua tienpintaa pitkin. Kontakti voi syntyä uudelleen kun jäännösvoimat ovat hävinneet. Hystereesi on yleinen ilmiö, joka esiintyy myös liukkailla pinnoilla. Kontaktialueella karhea tienpinta painautuu kuviopalaan, ja silloin kun se vähentää liukumista, paine on jokseenkin tasaisesti jakautunut jokaisen ”rosan” ympärille. Kun kuviopala liukuu, se kasaantuu johtoreunan puolelta tienpinnan epäsäännöllisiin rosoihin ja rikkoo kontaktin kuviopalan ja tienpinnan profiilin alaspäin johtavan luiskan välillä. Tämä johtaa epäsymmetriseen painejakaumaan ja nettovoimaan, joka on vastakkainen liukumissuun-

taan nähden. Tienpinnan makrorakenteilla on hyvin suuri merkitys hystereesin kannalta. Käytännössä puhdasta adheesio- tai hystereesi-ilmiötä ei esiinny, vaan luiskahdukseen/liukumiseen vaikuttavat kummatkin kitkavoimat.

2.3.1.5 Takertumis-napsahdus

Kun tienpinta on hyvin puhdas ja lämpötila riittävän korkea, takertuvat kuviopalat tienpintaan kiinni, joten tarvitaan voima irrottamaan kuviopala tiestä. Irrotusvoima venyttää kumia, minkä seurauksena kuviopala värähtelee radiaalisesti sen jälkeen kun irtoaminen tapahtuu. Kirjallisuudessa on eriäviä näkemyksiä näiden kitkaista aiheutuvien ilmiöiden merkityksestä rengasmelun kannalta, mutta ainakin nykyisten tietojen perusteella tämä takertumis-napsahdusprosessi ei aiheuta merkittäviä melutasoja verrattuna muihin syntymekanismeihin [5]. Ilmiöllä on merkitystä ainoastaan laboratorio-tiloissa, jossa on puhtaat olosuhteet, jolloin kun kumi takertuu rengasrumpuun ja syntyy epätavallisen suuri tarttuva liitos renkaan ja rummun välille [4].

2.3.2 Aerodynaamiset rengasmelumekanismit

Aerodynaamisia rengasmelumekanismeja ovat kaikki ilman liikkeeseen liittyvät mekanismit: turbulenssi, ilman kompressoituminen, Helmholtz- ja pilliresonanssi.

2.3.2.1 Turbulenssi

Perusturbulenssi ilmiönä syntyy, kun rengas edetessään vaakasuunnassa syrjäyttää ilmaa ja saa aikaan turbulenttisia pyörteitä. Toinen mekanismi, joka aiheuttaa turbulenttisia pyörteitä on kun kuviopalat ”kauhovat” ilmaa renkaan pyöriessä. Vastaava pyörivän kiekon ilmiö esiintyy esimerkiksi pöytätuulettimissa.

Renkaan aiheuttamaa turbulenttista ilmiötä on tutkittu jo 60- ja 70-luvulla, jolloin selvisi, että renkaan pyörimisen aiheuttamalla äänitasolla on merkitystä ainoastaan normaalin moottoritienopeuden yläpuolella, ja että melu on verrannollinen nopeuden kuudenteen potenssiin [4] [6]. Uusissa tutkimuksissa on lisäksi tarkennettu, että matalilla taajuuksilla (<500 Hz) laakereiden aiheuttama melu on dominoivaa, ja että sileän renkaan aerodynaaminen melu on vajaan 10 dB pienempi kuin kitkarenkaalla. Tutkimuksien puutteena voisi pitää sitä, että niissä mittaukset on tehty paikallaan ilmassa pyörivällä renkaalla, jolloin vaakasuoran nopeuden aiheuttamat turbulenttiset virtaukset jäävät huomiotta, mikä hiukan aliarvioi ilmiön merkitystä.

Yhteenvetona voidaan sanoa, että renkaan pyörimisestä aiheutuvalla turbulenttisella melulla ei todennäköisesti ole vaikutusta kokonaismelutasoon. Sillä saattaa olla vaikutusta korkeilla taajuuksilla silloin, kun ajetaan suurilla nopeuksilla hiljaisella huokoisella päällysteellä, missä korkeilla taajuuksilla muutoin on hiljaista.

2.3.2.2 Ilman pumppaus/kompressoituminen

Pyörivä rengas syrjäyttää ilmaa, kun se muovautuu kontaktipinnasta. Tuloreunan puo-

lalla ilma kompressoituu/pumppautuu renkaan ja tienpinnan onkaloihin/ilmataskuihin, ja sitten purkautuu, aiheuttaen merkittävästi melua 1 – 3 kHz taajuusalueella. Vastaavasti jättöreunan puolella melua syntyy, kun onkaloihin syntyvään alipaineeseen syöksyy ilmaa, kun onkalon tilavuus kasvaa nopeasti [4]. Paineen purkautuminen voi tapahtua myös jättöreunan puolella.

Renkaan kuvioinnilla voidaan hyvin paljon vaikuttaa ilmiön suuruuteen. Myös tienpinnalla on ilmiötä vahvistava tai vaimentava merkitys. Hiljaisella huokoisella päällysteellä ilma pääsee vapaammin virtaamaan pois renkaan ja tien välistä. Tiiviillä päällysteellä ilma ei pääse yhtä helposti pois, ja myös tiessä olevat pienet kuopat toimivat ilmataskuina, joihin renkaan tuloreunalla kompressoituu ilmaa.

Ilmanpumppausilmiön uskotaan olevan yksi tärkeimmistä rengasmelun aiheuttajista. Vähintäänkin se on usealla tie-rengas-yhdistelmällä dominoiva mekanismi.

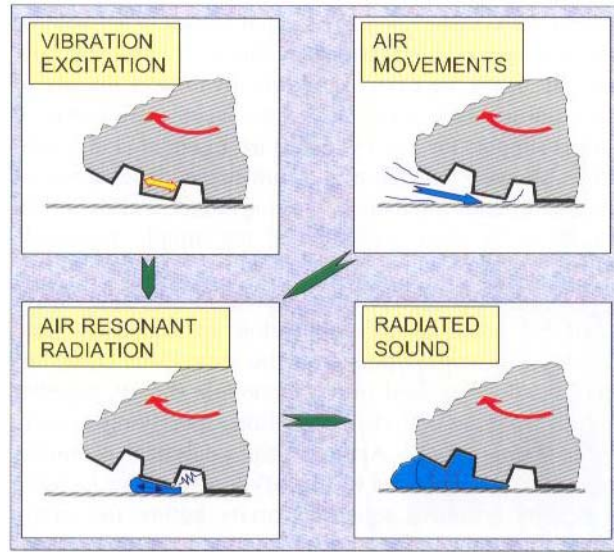
2.3.2.3 Helmholtz-resonanssi

Helmholtz-resonaattorilla tarkoitetaan yksinkertaista massa-jousi värähtelyä, jossa massa on liikkuvan ilman massa (pullonkaula) ja jousena toimii suljettu ilmatilavuus (pullon tilavuus). Yksinkertaisessa tilanteessa resonanssitaajuus voidaan laskea kaavasta

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{a}{Vl}}, \quad (7)$$

missä a on pullonsuun ympärysmitta, l kaulan pituus, V tilavuus ja c äänen nopeus.

Rengasmelussa Helmholtz-resonanssi syntyy renkaan jättöreunalla siten, että ura kuviopalojen välillä on jousi, ja massana on tien pinnasta irronneen kuviopalan ja tien välinen ilmamassa. Herätteenä ovat kuviopalan värähtely ja ilman liikkeet. Kuvassa 4 tilanne on havainnollistettuna.



Kuva 4. Havainnollistus Helmholtz-resonanssista ja sen synnystä [4].

Renkaan pyöriessä kuviopalan ja tien välisen kaulan mittasuhteet muuttuvat nopeasti, joten myös resonanssitaajuus muuttuu (ajan funktiona). Käytännössä jokainen ura aiheuttaa äänesryöpyn/-purskeen, joka alkaa ajallisesti suurella amplitudilla keskitaajuuksilla ja vaimenee pois korkeilla taajuuksilla. Lähteessä [4] on esitetty seuraava kaava 8, jolla voidaan laskea yhdensuuntaisen uran aiheuttama resonanssitaajuus renkaan kontaktipinnan jättöreunan puolella:

$$\frac{V_o}{s_1 x_1} = \frac{1 + (kx_1)^2}{\beta (kx_1)^2 \left[1 + \left(\frac{\gamma kx_1}{2\beta} \right)^2 \right]} - \frac{1 - \frac{kx_1}{\tan(kx_1)}}{(kx_1)^2}, \quad (8)$$

missä:

V_o = uran tilavuus

x_1 = jättöreunan kulman ja uran kulman välinen etäisyys

k = aaltoluku, eli $2\pi f/c$, missä f on taajuus

s_1 = pinta-ala uran reunan ja tienpinna välillä

β = korjauskerroin torven avoimiin sivuihin ja sen vaikutukseen massaimpedanssiin

γ = torven avoimien sivujen aiheuttama korjauskerroin resistiiviselle impedanssille

Nilson ym. ovat onnistuneet mittaamaan ja mallintamaan ilmiötä ja saaneet tulokseksi, että suurin osa energiasta keskittyy taajuuksille 1000 – 2500 Hz.

Periaatteessa sama Helmholtz-resonanssi-ilmiö esiintyy myös johtoreunan puolella, mutta heräte ei ole riittävän suuri. Renkaissa, joissa on yhdensuuntaiset poikittaiset urat, voi ilmiön aiheuttama melu määrätä kokonaismelun emission.

2.3.2.4 Pilliresonanssi

Pilliresonanssi ilmenee seisovina aaltolina renkaan pinnoitteen urassa. Resonanssiään perustaaajuuden aallonpituus on kaksinkertainen putken tai pillin pituuteen L verrattuna, kun pilli on molemmista päistä auki. Joissakin tapauksissa myös pillin halkaisijalla d on vaikutusta resonanssitaajuuteen:

$$f_n = \frac{n \cdot c}{2(L + 0,8 \cdot d)} \quad (9)$$

missä:

c = äänen nopeus

n = kokonaisluku

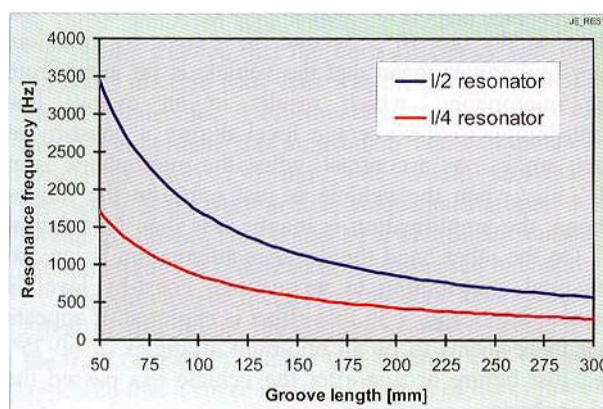
Kun $n = 1$ saadaan perustaaajuus ja suuremmilla arvoilla saadaan harmoniset taajuudet. Tätä kutsutaan $\lambda/2$ -resonaattoriksi.

Jos toinen päistä on suljettu, niin kyseessä on $\lambda/4$ -resonaattori, jonka resonanssi-taajuus on noin:

$$f_n = \frac{(n - 1/2) \cdot c}{2(L + 0,8 \cdot d)} \quad (10)$$

Jokainen rengaskuvio saa suhteellisen sileän tienpinnan kanssa aikaan pilliresonanssi-ilmiön. Resonanssitaajuudet riippuvat geometriasta, mutta eivät renkaan pyörimisnopeudesta. Käytännön mittauksissa erilaisilla sileillä ja pituussuunnassa uritetuilla renkailla on saatu hyvä korrelaatio lasketun ja mitatun pilliresonanssin välillä [4].

Kuvasta 5 nähdään resonanssitaajuudet puoli- ja neljäsosa-aaltoresonaattoreille uran pituuden funktiona. On kuitenkin huomattava, että uran efektiivistä pituutta ei voida usein tarkasti arvioida.



Kuva 5. Resonanssitaajuus renkaan urasyvyyden funktiona [4].

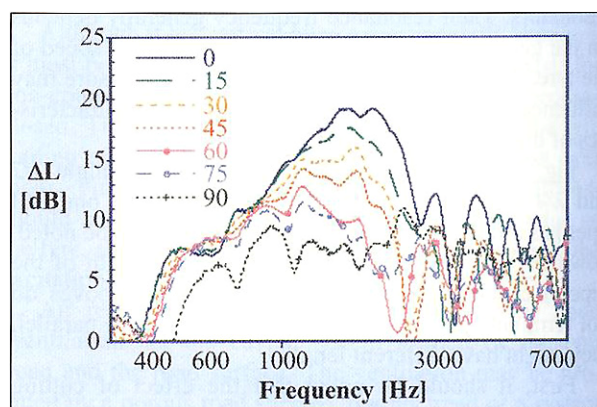
2.3.3 Melua vaimentavat tai vahvistavat tekijät

2.3.3.1 Torvi-ilmiö

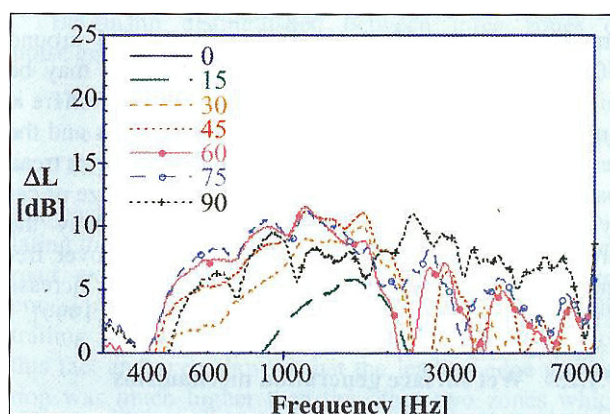
Rengas ja tienpinta muodostavat torven sekä tulo- että jättöreunan puolelle. Suurin osa rengasmelusta muodostuu juuri torven kurkkuosassa, jonka eksponentiaalisesti laajeneva akustinen torvi antaa paremman impedanssisovituksen ympäröivään akustiseen impedanssiin. Torvi-ilmiön vahvistavan vaikutuksen uskotaan olevan tärkein tekijä rengasmelun leviämisessä/säteilyssä.

Ilmiön tutkimisessa on käytetty hyväksi resiprookkisuuksiperiaatetta [7]; laittamalla äänilähde kauas ja mikrofoni lähelle ”kurkkua” renkaan kanssa ja ilman rengasta, voidaan mitata vahvistuskerroin taajuuden funktiona. Suurimmillaan vahvistus on noin 20 dB 2 kHz.

Myöhemmin on tutkittu [8], miten torvi säteilee eri suuntiin, ja osoitettu, että kun mennään kauemmaksi torven säteilysuunnasta, vahvistus pienenee ja suunnassa 90 astetta on vahvistus lähes nolla. Kuvasta 6 nähdään mitattu vahvistuskerroin eri suuntiin vakio-etäisyydellä renkaan kosketuskohdasta, kuvassa 7 on mittaustulos vahvistuskertoimelle rullaustilanteessa, jossa vastaanottopiste on paikoillaan ja etäisyys renkaaseen muuttuu kulman funktiona, eli lyhin etäisyys renkaaseen on silloin kun vahvistus on pienin. Mittauksissa käytettiin 155R13 (leveys 155 mm ja säde 13 tuumaa) rengasta tasaisella päällysteellä. Lisäksi mittauksia on tehty huokoisella päällysteellä ja havaittu, että absorboiva pinnoite vähentää torven tehokkuutta.



Kuva 6. Torvi-ilmion vaikutus vahvistuskertoimeen eri kulmilla 1,2 m korkeudella 7,5 m vakioetäisyydellä kosketuskohdan keskipisteestä [4].



Kuva 7. Vaikutus vahvistuskertoimeen eri kulmissa rullaustilanteessa, eli normaalissa rengasmelun mittaustilanteessa. Vastaanottopiste on 1,5 m korkeudella maasta ja 7,5 m päässä keskilinjasta [4].

Renkaan leveydellä on vaikutusta siihen, miten torvi pääsee vuotamaan ääntä sivuille. Torvi-ilmio on matalammilla taajuuksilla sitä voimakkaampi, mitä leveämpi rengas on kyseessä [9]. Myös renkaan profiililla on merkitystä, tarkemmin sanoen sillä, miten terävästi leikattu sylinteri on kyseessä. Kun verrataan 60-luvun korkeaprofiilista rengasta yhtä leveään nykyaikaiseen hyvin matalaprofiiliseen renkaaseen, niin ero vahvistuksessa on noin 5 dB torven säteilysuuntaan.

2.3.3.2 Mekaaninen impedanssi

Tienpinnan jäykkyyden tai mekaanisen impedanssin merkitystä rengasmelun emissioon ei ole vielä vakuuttavasti esitetty. On kuitenkin jotain näyttöä siitä, että kovempi tienpinta aiheuttaa enemmän melua kuin pehmeämpi. Tämä voisi selittää, miksi sementtinen tiepäällyste, jonka rakenne on hyvin samanlainen kuin asfaltilla, on jonkin verran

äänekkäämpi.

Mekaanisella impedanssilla on merkitystä lähinnä silloin, kun päällysteessä käytetään jotain todella pehmeää materiaalia kuten kumia. Kumipäällysteellä voidaan saada 5 dB vaimennus 800 – 1250 Hz taajuusalueella. Tällöin tiepäällysteen kestävyys on hyvin heikko.

2.3.4 Rengasmelun suuntaavuus

Kuten jo kappaleen alussa todettiin, rengasmelulla on suuntaavuutta, koska se koostuu useasta erilaisesta ja monimutkaisesta lähteestä. Suuntaavuus on kolmiulotteista, eli suuntaavuudella on sekä horisontaaliset että vertikaaliset tasot. Rengasmelun horisontaalinen eli vaakasuuntaavuus tunnetaan melko hyvin, mutta vertikaalista eli pystysuuntaavuutta ei tunneta yhtä hyvin.

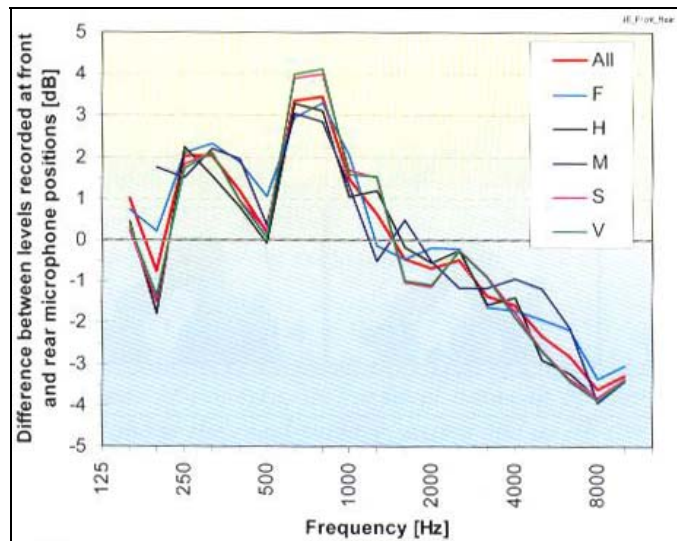
Suuntaavuutta on tutkittu lähinnä rumpu- (3M:n safety-walk päällysteellä) ja lähimitausmenetelmällä (CPX).

Suuntaavuuteen vaikuttaa sekä rengas että tienpinta.

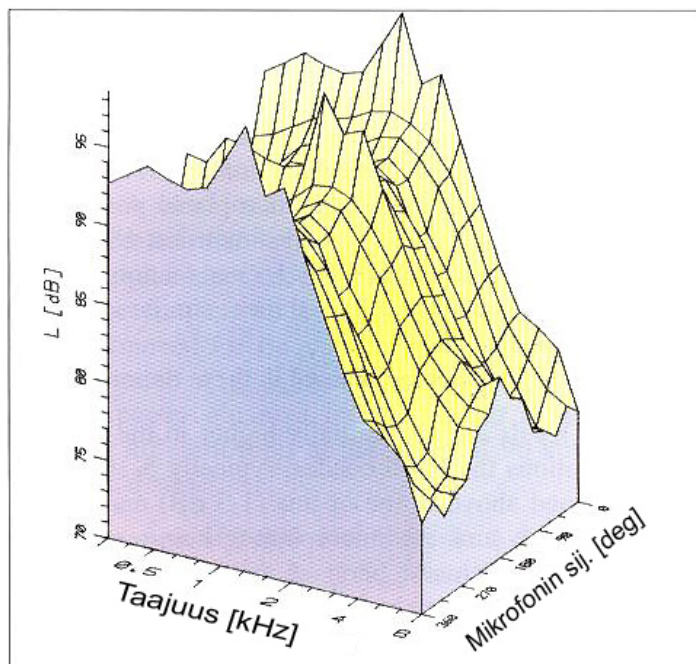
2.3.4.1 Äänen säteily renkaan etu-, sivu- ja takapuolelle

Lukuisten mittauksien perusteella on havaittu seuraavat pääominaisuudet; emissio on suurin johtoreunan etupuolella, toiseksi suurin renkaan takapuolella ja alhaisin sivuilla. Suuntaavuutta on enemmän sileällä kuin huokoisella pinnalla.

Lisäksi kuvan 8 mukaan näyttää siltä, että renkaan etupuolen spektritaso on noin 1000 Hz asti voimakkaampi, ja vastaavasti renkaan takapuolella korkeat taajuudet ovat voimakkaampia.



Kuva 8. Rengasmelun spektrien ero renkaan etu- ja takapuolen välillä sileällä GRB-S tiejäljitelmällä nopeudella 90 km/h. Kirjaimet S, H ja V tarkoittavat kesärenkaiden nopeusluokkia, F on kitkarengas ja M on maasto- ja lumirengas (mud + snow) [4].



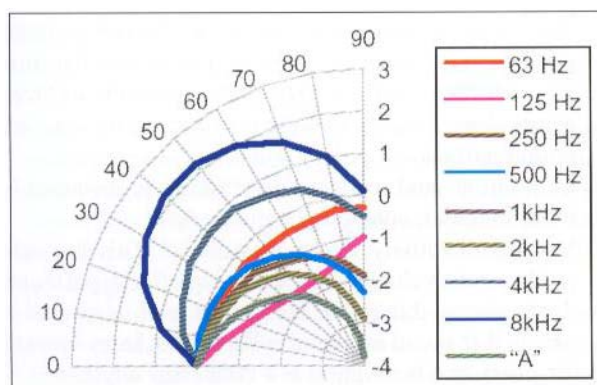
Kuva 9. Renkaan meluspektri mitattuna eri paikoista noin 0,4 m etäisyydellä kontaktikohdan keskipisteestä [4].

Renkaan etu- ja takapuolen A-painotettujen kokonaistasojen ero on keskimäärin noin 0,5 – 1 dB. CPX- menetelmällä on saatu arvio, että rengas säteilee sivulle noin 5 – 10 dB vähemmän kuin renkaan etu- ja takapuolelle. Kuvassa 9 näkyy esimerkkitapaus, jossa on

mitattu erään renkaan taajuusspektri aitoa tienpintaa jäljittelevällä rummulla.

2.3.4.2 Vertikaalinen suuntaavuus

Vertikaalista suuntaavuutta on tutkittu huomattavasti vähemmän kuin horisontaalista suuntaavuutta. Vertikaaliseen suuntaavuuteen vaikuttaa auton kori, sekä jossain määrin torvi-ilmiön fokusointi. Kuvassa 10 on esitetty keskimääräinen vertikaalinen suuntaavuus nopeusluokassa yli 110 km/h. Kuvassa on mukana voimansiirrosta aiheutuva melu, mutta se on merkityksetöntä kyseisellä nopeudella.



Kuva 10. Henkilöauton melun pystysuuntaavuus eri oktaavikaistoilla [4].

2.4 Rengasmelun emissioon vaikuttavat tekijät

2.4.1 Renkasiin liittyvät muuttujat

2.4.1.1 Renkaiden lukumäärä

Rengasmäärän kasvu lisää melua. Jos jokainen rengas on samanlainen ja kullakin renkaalla on sama kuorma, niin renkaiden lukumäärän vaikutus kokonaistason noudattaa yksinkertaista kaavaa:

$$\Delta L = 10 \cdot \log(n / n_{ref}) \quad (11)$$

missä n on renkaiden todellinen lukumäärä ja n_{ref} on referenssitilanteen renkaiden lukumäärä.

Taulukossa 2 on esitetty karkeahko arvio renkaiden lukumäärän vaikutuksesta A-painotettuun äänitasoon ideaalitapauksessa ja renkaiden etäisyyskorjauksen kanssa. Todellisuudessa ajoneuvon runko sekä ulkorengaat varjostavat sisärenkaita, joten vaikutus jää pienemmäksi kuin ideaalitapauksessa.

Taulukko 2. Renkaiden lukumäärän arvioitu vaikutus kokonaisäänitasoon. Oikean puoleinen sarake sisältää korjauksen, joka kompensoi rengaskotelon vaikutuksen [4].

Number of tyres	Example of wheel configuration	Influence on sound level in dB(A)	
		Ideal case	Corr. for wheel base
1		-6.0	-6.0
2		-3.0	-3.1
4		REFERENCE	REFERENCE
6		+1.8	+1.5
8		+3.0	+2.8
10		+4.0	+3.7
10		+4.0	+2.6
12		+4.8	+3.2
14		+5.4	+4.3
16		+6.0	+4.7
18		+6.5	+5.1
20		+7.0	+5.5
22		+7.4	+5.9

2.4.1.2 Renkaan dimensiot (leveys ja korkeus)

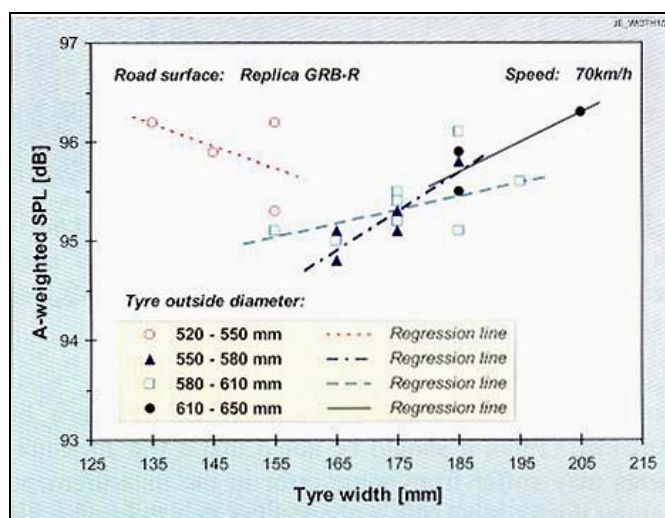
Pelkästään renkaan leveyden vaikutusta rengasmeluun on vaikea arvioida, koska renkaan leveyden muutos vaikuttaa myös muihin rengasparametreihin, kuten profiiliin, renkaan korkeuteen (tai vanteen halkaisijaan) sekä vyörakenteeseen ja kuviointiin.

Leveämmällä renkaalla on joitakin parempia ominaisuuksia kuin kapeammalla renkaalla, kuten paremmat kitka-ominaisuudet kuivalla päällysteellä ja parempi ohjaustuntuma. Leveämpi rengas on myös näyttävämmän näköinen, mikä on varmasti osaltaan edesauttanut keskimääräisen rengasleveyden kasvua. Haittapuolena renkaan leveyden kasvusta on lisääntynyt rengasmelu ja heikentyneet kitkaominaisuudet märällä tienpinnalla. Karkeasti voidaan sanoa, että melu lisääntyy 4 dB renkaan leveyden kaksinkertaistuksessa.

Myös renkaan korkeudella on merkitystä rengasmelun emissioon, mutta sen vaikutus ei ole yhtä selkeä, ja sen suuruuteen vaikuttaa melko paljon tienpinnan karheus.

Ilman syrjäyttämiseen liittyvien mekanismien suhde renkaan dimensioihin: Leveämpi rengas aiheuttaa sen, että enemmän ilmaa täytyy syrjäyttää tien ja renkaan välistä. Leveämmällä renkaalla on myös voimakkaampi torvi-ilmiö, joka on kenties lisääntynyttä ilman syrjäyttämistä merkittävämpi tekijä melun lisäyksessä. Renkaan halkaisijan kasvattaminen voimistaa myös torvi-ilmiötä, kun torven kulma ei ole liian jyrkkä.

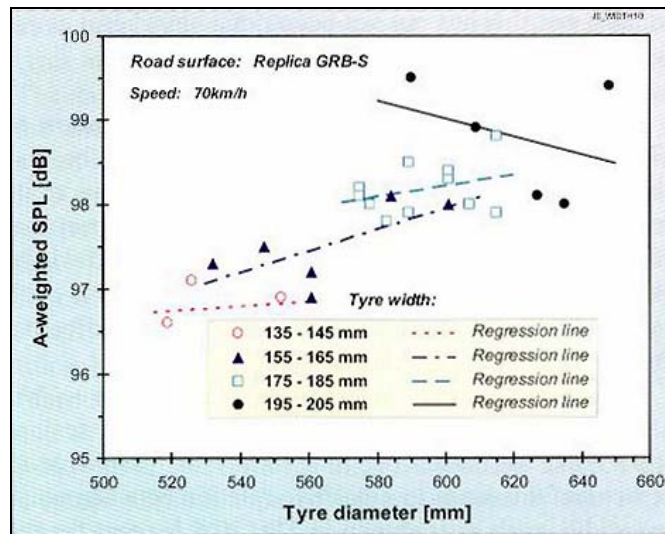
Iskuperäisen melun suhde renkaan leveyteen: Leveämmässä renkaassa on enemmän kuviopaloja, jotka iskeytyvät tienpintaan ja suurempi kontaktipinta tienpinnan suhteen lisää tien karheudesta aiheutuvia iskuja. Kuvasta 11 on rumpumenetelmällä mitattu tulos renkaan leveyden kasvun vaikutuksesta A-painotettuun äänipainetasoon. Kuvassa on mukana myös kasvanut aerodynaaminen melu.



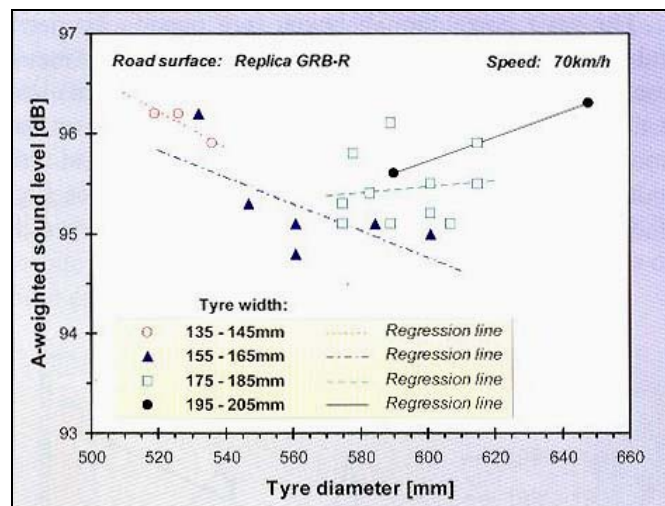
Kuva 11. Renkaan leveyden vaikutus meluun karkealla tiepäällystejäljitelmällä (GRB-R). Yksittäinen piste on keskiarvo useasta renkaasta [4].

Iskuperäisen melun suhde renkaan halkaisijaan: Karkealla päällysteellä iskuperäinen melu dominoi, ja silloin ”iskukulma” on tärkeä. Kulma riippuu pääosin renkaan säteestä. Suurempi kulma (pienemmällä säteellä) tarkoittaa, että isku tulee äkimmin. Pienempi kulma tarkoittaa vähittäisempää muutosta, kun kumi ja tienpinta kohtaavat ja muutos ensikosketuksesta maksimitunkeutumiseen kestää pidemmän ajanjakson.

Suurempi halkaisija, eli pienempi iskukulma näyttäisi kuvan 12 mukaan vähentävän rengasmelua. Toisaalta sileämmällä alustalla, jossa iskuperäisellä melulla ei ole niin suuri vaikutus ja torvi-ilmiö on merkittävämpi, on tilanne päinvastainen, eli melu lisääntyy renkaan sädettä kasvatettaessa (Kuva 13). Tämän takia renkaan halkaisijalla ei ole melun suhteen yhtä selvää suhdetta kuin renkaan leveydellä.



Kuva 12. Renkaan säteen vaikutus rengasmeluun sileällä päällysteellä (GRB-S). Yksittäinen piste on keskiarvo useasta renkaasta [4].



Kuva 13. Renkaan säteen vaikutus rengasmeluun karkealla päällysteellä (GRB-R). Yksittäinen piste on keskiarvo useasta renkaasta [4].

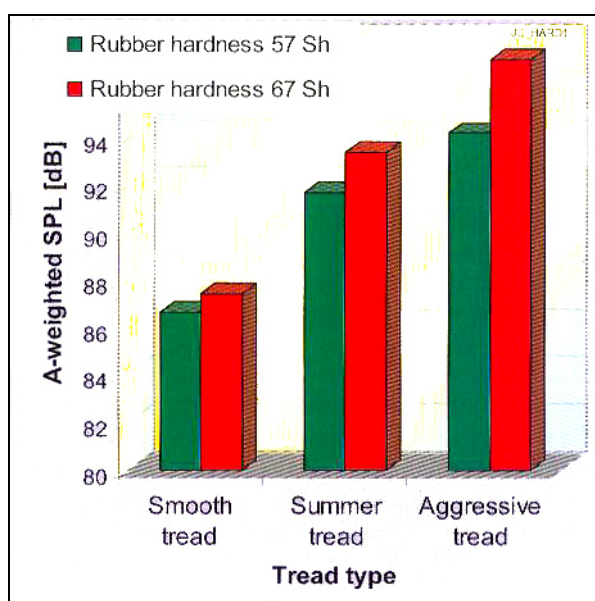
Käytännössä rengaskoon vaikutus tietyn rengasmallin sisällä riippuu siitä, miten hyvin rengas on suunniteltu kuhunkin kokoluokkaan. Rengassuunnittelun laatu voi vaihdella eri kokoluokkien välillä, jolloin jokaista rengaskokoa ei ole yksilöllisesti optimoitu akustisesti. Tällöin esimerkiksi suuremman myyntimäärän ja suunnittelupanoksen saava leveämpi rengas onkin hiljaisempi kuin saman mallin kapeampi rengas.

2.4.1.3 Kumin kovuus

Oikean kumin kovuuden valinnalla voidaan alentaa äänitasoa 2 – 3 dB. Kumin kovuuden merkitykseen vaikuttaa se kuinka ”aggressiivinen” renkaan kuviointi on.

Tämä myös selittää sen, miksi pehmeämpi kitkarengas aggressiivisella kuvioinnilla voi olla jopa hiljaisempi kuin kesärengas.

Kumin kompleksisen kimmokertoimen imaginääriosaa on häviöllinen termi ja reaali-osa on elastisuustermi. Häviöllisen ja elastisen termin välinen kulma on häviöllinen tangentti ($\tan \delta$). Usein käytetty mitta kumin kovuudelle on ”Shore”, jossa mitataan jousen painauman kumiin. Kuvassa 14 näkyy kumin kovuuden vaikutus eri kuvioinneilla A-painotettuun äänitasoon.



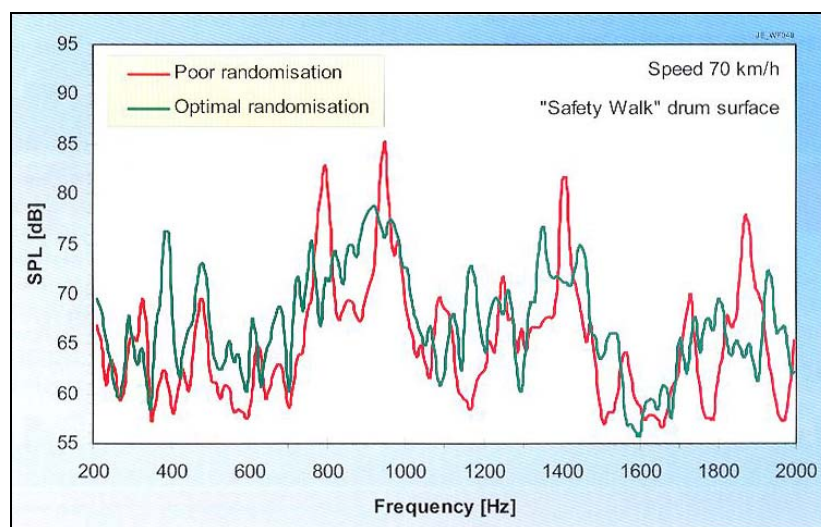
Kuva 14. Kumin kovuuden vaikutus rengasmeluun. Kukin pari edustaa tietyn tyyppistä kuviointia. Mitattu ISO-referenssipäällysteen jäljitelmällä rumpumenetelmällä nopeudella 70 km/h [4].

2.4.1.4 Renkaan kuvio

Renkaan kuviolla on merkittävä vaikutus rengasmeluun erityisesti sileillä päällysteillä. Renkaan kuvio koostuu kuviopalalohkoista, joita on jaettu renkaan kehälle. Jos renkaan kuvio on huonosti satunnaistettu, on rengasmelu voimakasta ja hyvin epämiellyttävää, luonteeltaan tonaalista. Tällöin suurin osa akustisesta energiasta on kapeilla taajuuksalueilla, ja nopeudesta riippuva spektriipiikki voidaan laskea kaavan (6) avulla.

Jotta satunnaistaminen onnistuu hyvin, on käytettävä tietokonesimulaatioita. Kuvassa 15 on kapeakaistainen spektri tilanteista, joissa kahden muuten samanlaisen renkaan kuvio on satunnaistettu silmämääräisesti, sekä spektri, joka on peräisin tietokonemallin

avulla satunnaistetusta rengaskuviosta.



Kuva 15. Satunnaistamisen vaikutus renkaan kapeakaistaspektriin. Punaisella on esitetty huonosti satunnaistettu ja vihreällä optimaalisesti satunnaistettu rengas [4].

2.4.1.5 Renkaan kulumisen ja ikääntyminen

Renkaan ikääntyminen vaikuttaa kumin ominaisuuksiin. Vanhetessaan kumista tulee kovempi. Ikääntymisen vaikutukset ovat suurempia ensimmäisten vuosien aikana ja ikääntymisen nopeuteen vaikuttaa renkaan säilytystila.

Renkaan kulumisen vaikutus rengasmeluun riippuu tiepäällysteestä ja rengastyypistä. Karkealla päällysteellä ero on suurempi lähes uuden ja puoliksi kuluneen renkaan välillä. Kesärenkaan urasyvyyden pieneneminen lisää melua, mutta kulunut kitkarengas voi joillakin päällysteillä olla jopa uutta hiljaisempi [4]. Potentiaalisesti mikä tahansa rengasmelun syntyyn liittyvä tekijä muuttuu renkaan kuluessa. Aivan uudella renkaalla voi vielä olla pinnassa erityisen pehmeää kumia, joka sitten kuluu ensimmäisten kilometrien aikana pois.

2.4.1.6 Nastarenkaat

Kun talvirenkaaseen laitetaan nastat, kasvaa A-painotettu äänitaso 3 – 10 dB riippuen nopeudesta ja nastatyyppistä. Nastan ääni on kopiseva, mikä johtuu nastan iskeytymisestä päällysteen kiveen. Kun vierimisnopeus on riittävän suuri, yksittäisiä iskuääniä ei enää pysty erottamaan, vaan ääni muuttuu korkeataajuiseksi ”sihinäksi”.

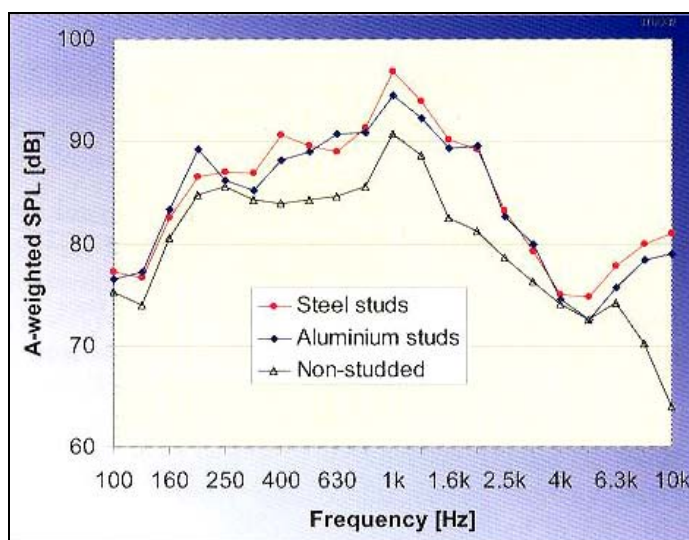
Maantienopeuksissa nastan vaikutus on suunnilleen seuraava:

- Uudehkoilla nastarenkailla:
Melu lisääntyy noin 2 – 6 dB 500 – 5 000 Hz alueella ja 5 – 15 dB 5 000 Hz yläpuolella.

- Kuluneilla nastarenkailla:

Melu lisääntyy noin 3 – 7dB yli 5 000 Hz taajuuksilla.

Alhaisemmilla nopeuksilla nastarenkaiden ero nastattomiin on suurempi. Nykyisissä nastarenkaissa nastat on valmistettu kevyemmistä materiaaleista kuin vanhoissa nastarenkaissa, mutta nastojen keveydellä ei ole havaittu olevan melun kannalta juuri merkitystä. Keskitäajuuksilla (400 Hz – 3 kHz) suurin vaikutus melun lisäykseen on ilmeisesti sillä, että nasta painautuu kumin sisään ja saa aikaan värähtelyjä. Nastojen vaikutus korkeilla taajuuksilla johtuu nastan iskusta tienpintaa vasten, ja siihen liittyvään nastan tangentiaaliseseen liikkeeseen tienpintaa vasten. Kuvasta 16 nähdään, miten nastarenkaan spektri poikkeaa nastattoman renkaan spektristä.



Kuva 16. Talvirengas uusilla nastoilla ja ilman nastoja. Punaisella on teräsnastan taajuus-spektri ja sinisellä alumiinisella nastalla saatu spektri. Mittaus on tehty lähimittausmenetelmällä rummulla ja trailerilla (CPX) [4].

2.4.2 Nopeus ja tangentiaaliset voimat

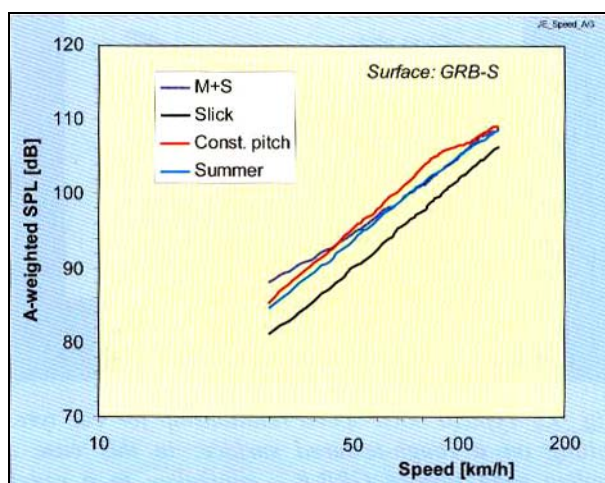
Nopeus on tärkein muuttuja, joka vaikuttaa rengas- ja tieliikennemeluun. Nopeuden valinnalla kuljettaja kontrolloi melun kokonaistasoa ja jossain määrin myös spektriä.

Yleisellä tasolla rengasmelulla on havaittu olevan logaritminen riippuvuus nopeudesta kaavan 12 mukaan.

$$L = A + B \cdot \log(V) \quad (12)$$

Kaavan kertoimilla A ja B on lineaarinen riippuvuus, $A = a + b \cdot B$. Esimerkiksi määrittäessä olosuhteissa kertoimen A on havaittu olevan suurempi ja B -kertoimen pienempi, eli märkä tienpinta lisää melua enemmän alhaisella nopeudella kuin suurella nopeudella verrattuna kuivaan tienpintaan. Kuvassa 17 on neljän erityyppisen renkaan aiheuttama

äänipainetaso mitattuna rummulla sileällä asfalttijäljitelmäpäällysteellä.



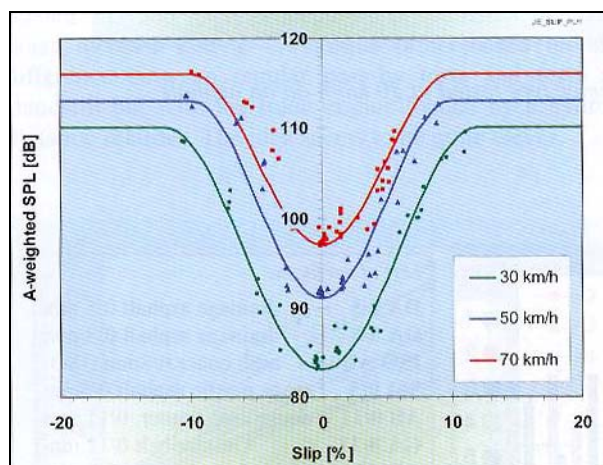
Kuva 17. Tyypillinen rengasmelun nopeusriippuvuus logaritmisella asteikolla [4].

Logaritminen riippuvuus ei aina ole tarkka. Kun tarkastellaan päällysteitä tai yksittäisiä renkaita, joilla on selvästi erottuvia taajuuksia, niin nopeuden kasvaessa A-painotetulle alueelle tulevat piikit saavat kokonaistason värähtelemään epäjatkovasti nopeuden funktiona. Lisäksi renkaan tai tien kuvioinnista johtuvat taajuudet voivat nopeuden kasvaessa mennä pois vireestä (engl. out of tune), jolloin kokonaistaso kasvamisen sijaan pieneneekin nopeuden lisääntyessä.

2.4.2.1 Tangentiaaliset voimat

Tangentiaaliset voimat ovat nopeuden jälkeen toiseksi tärkein rengasmelun tekijä, joihin kuljettaja voi vaikuttaa. Tangentiaalisia voimia esiintyy erityisesti silloin kun kuljettaja kiihdyttää, jarruttaa tai kääntää mutkaan.

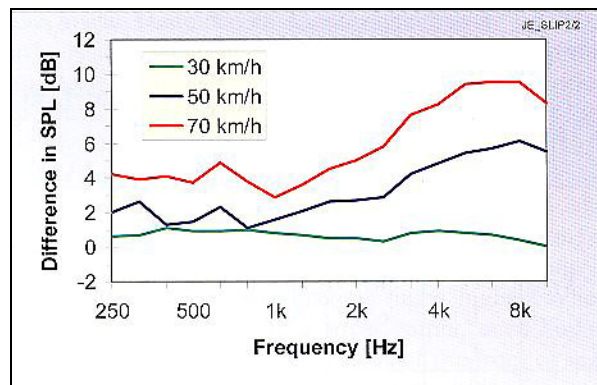
Renkaan on luistettava/hangattava tienpintaa pitkin, jotta riittävä kitkavoima syntyy renkaan ja tien välille. Ilmiö esiintyy aina kun renkaan ja tienpinnan välillä vaikuttaa tangentiaalinen voima, myös silloin kun tarvitaan voima, joka pitää ajonopeuden vakiona tasaisella tiellä. Jos kiihdyttävät ja jarruttavat voimat ovat yhtä suuret, niiden aiheuttama melu ja luistaminen ovat kummassakin tilanteessa yhtä suuret suhteessa voimaan. Kuvasssa 16 näkyy kiihdytys- ja jarrutusvoiman välinen suhde. Jos luistaminen on yli 8 – 10 %, kitkavoima ja melu eivät enää kasva vaikka luisto lisääntyy. Kiihdytyksen vaikutus melutasoon on alhaisemmilla nopeuksilla huomattavasti suurempi kuin suuremmilla nopeuksilla. Eri renkailla ja eri päällysteillä on saatu seuraavat keskimääräiset tulokset 800 Nm:n renkaan ja tienpinnan välisellä vääntömomentilla [4]: Melu lisääntyi noin 10 dB 20 km/h nopeudella, 8 dB 30 km/h nopeudella, 4,5 dB 50 km/h nopeudella ja vain 3,5 dB 70 km/h nopeudella. Kokonaismelun kannalta myös moottorimelulla on merkitystä, kun kiihdytetään alle 50 km/h nopeuksilla.



Kuva 18. Kesärenkaan luistokäyttäytyminen asfalttibetonipäällysteellä eri nopeuksilla [4].

Sivuttaisilla tangentiaalisilla voimilla on suuremmin merkitystä liukumisen ja melun kannalta, kun sivuttaiskiihtyvyyttä on noin 1 m/s^2 . Sivuttaista liukumiskulmaa on vaikea ennustaa keskihakuvoiman funktiona, koska siihen vaikuttaa renkaiden asento, paineet, tienpinta, massakeskipiste ja jousitus. Kuvassa 18 on esitetty yksinkertaistettu funktio keskihakuvoiman ja sivuttaisen luistamisen välillä. Vaunumittausmenetelmällä (CPX) on saatu seuraavia tuloksia sivuttaiselle luistamiselle [4]. Kuvassa 19 näkyy äänipainetason ero suoraan ajoon verrattuna. Keskihakukiihtyvyydellä $0,8 \text{ m/s}^2 - 1 \text{ m/s}^2$ (nopeudella 30 km/h) melu kasvoi $0 - 2 \text{ dB}$ suoraan ajoon verrattuna. Kun kiihtyvyys oli $2,4 - 3,0 \text{ m/s}^2$ niin melutaso oli $1 - 7 \text{ dB}$ suurempi ja kiihtyvyydellä $4,7 - 5,8 \text{ m/s}^2$ melutaso oli $1 - 7 \text{ dB}$ suurempi kuin suoraan ajossa. Testissä mutkan säteet olivat vakiota ja nopeus vaihteli. Mutka-ajon vaikutus spektriin on hyvin samankaltainen eri renkailla ja eri nopeuksilla.

Kaistoja on tyypillisesti kallistettu $2 - 2,5 \%$, jolloin vesi ei jää seisomaan tielle. Jotta auto kulkisi suoraan, täytyy kuljettajan hiukan kääntää keskikaistalle päin, johon riittää alle $0,1^\circ$:een luistamiskulma. Tämän ei pitäisi vaikuttaa melutasoon, mutta tutkimuksessa, jossa verrattiin kallistamattomien ja kallistettujen teiden autojen rullaustasoja (CB), erotukseksi saatiin $0,3 \text{ dB}$ [10].



Kuva 19. Kaarreajon vaikutus spektriin suoraan ajoon verrattuna [4].

2.4.3 Tienpinta

Perinteisen asfalttibetonipäällysteen (AB) seos on valmistettu seuraavista aineksista. Kiven tai murskeen maksimikoko 8 – 20 mm ja tyypillisesti osuus kokonaismassasta 40 – 55 %. Hiekanjyvien koko on 0,06 – 2 mm ja osuus kokonaismassasta 35 – 45 %. Täyteaine on hyvin hienoa hiekkaa, jonka hiekanjyvien maksimiraekoko on alle 0,06 mm ja osuus kokonaismassasta on noin 5 – 10 %. Sideaineena käytetään yleensä bitumia ja tyypillisesti sideaineen osuus on luokkaa 4 – 8 % massasta. Yleensä päällysteessä on ilmakoloja noin 3 – 5 % sen tilavuudesta ja ne eivät ole keskenään yhteydessä.

Asfaltti on siis pääosin valmistettu kivistä ja hiekasta. Nykyään bitumisideaineeseen lisätään myös muuta materiaalia kuten polymeerejä, kumijauhetta ja kuituja. Kun sideaineen bitumin sijasta käytetään sementtiä, saadaan sementtibetonipäällyste. Lisäksi sementtibetonipäällysteellä on erilainen valmistusainejakauma.

2.4.3.1 Kivimastiksiasfaltti (SMA-asfaltti)

SMA-asfaltti on kestävä päällyste, joka kehitettiin Saksassa yli neljännesvuosisata sitten estämään nastarenkaiden aiheuttamaa kulutusta. Sitä käytetään paljon risteysalueilla ja teillä joilla nopeusrajoitus on yli 80 km/h. SMA-asfaltit valmistetaan tietyn kokoisista, eli katkaistuista kiviaineslajeista. SMA-asfaltti koostuu karkeista kivirakeista, jotka muodostavat asfalttiin vahvan tukirankasiteen paksun mastiksin avulla. Paksu mastiksi koostuu bitumista, täytejauheesta, hienosta kivimurskasta ja selluloosakuiduista. Vahvan kivi kiveä vasten -rakenteen ansiosta SMA-asfaltti ei deformoidu helposti raskaan liikenteen alla.

2.4.3.2 Hiljainen asfaltti

Tienpinnan ominaisuuksia, joiden tiedetään tai uskotaan vaikuttavan rengasmeluun, on listattu taulukkoon 3.

Taulukko 3. Päällysteen ominaisuuksien vaikutus rengasmeluun [4].

ominaisuus	vaikuttavuus
mikrorakenne	vähäinen
makrorakenne	hyvin korkea
megarakenne	korkea
epätasaisuus	pieni
huokoisuus	hyvin korkea
kerroksen paksuus	korkea huokoisille päällysteille
adheesio (normaalin suuntainen)	vähäinen
kitka (tangentialinen)	vähäinen
jäykkyys	epävarmaa, lievä?

Hiljaisella asfaltilla tarkoitetaan sellaista päällystettä, jolla rengasmelun emissio on merkittävästi alhaisempi kuin perinteisellä päällysteellä. Perinteisellä päällysteellä tarkoitetaan joko AB-päällystettä tai SMA-päällystettä maksimikivirakeella 11 – 16 mm. Eräs määritelmä merkittävästi alhaisemmalle emissiolle on, että hiljaisella tienpinnalla ajoneuvon meluemissio on 3 dB alhaisempi kuin perinteisellä tiepäällysteellä [4]. Tiepäällysteen rengasmeluun vaikuttavat parametrit ovat päällysteen rakenne, huokoisuus sekä jossakin erikoistapauksissa mekaaninen impedanssi.

Päällysteen rakenne

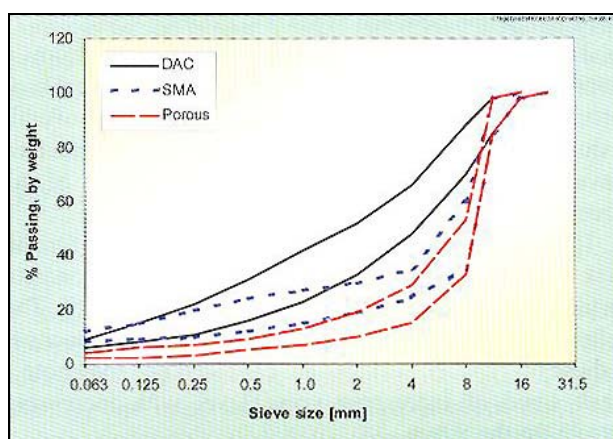
Päällysteen profiilia voidaan ajatella staattisena satunnaisena funktiona pinnan myötäiselle etäisyydelle. Funktio voidaan esittää Fourier-sarjakehitelmällä, missä termeillä on useita taajuuksia ja aallonpituuksia, kullakin tietty amplitudi (ja alkuvaihe). Päällysteen rakenteen aallonpituus saadaan paikkataajuudesta (yksikkö jaksoa/m):

$$\text{rakenteen aallonpituus} = (\text{paikkataajuus})^{-1}$$

Päällysteen rakenne on jaettu rakenteen aallonpituuden mukaan taulukon 3 mukaisesti kolmeen kokoluokkaan: mikrorakenne ($\lambda < 0,5 \text{ mm}$), makrorakenne ($0,5 \leq \lambda \leq 50 \text{ mm}$) ja megarakenne ($50 \text{ mm} \leq \lambda$).

Huokoisuus ja absorptio

Huokoisessa päällysteessä kivien, hiekan ja täyteaineiden jakauma on hyvin erilainen kuin perinteisessä asfalttibetonipäällysteessä, johon on siivilöity melko tasaisesti kaiken kokoista mursketta. Huokoisessa päällysteellä huokoisuus saadaan aikaiseksi siten, että keskikokoiset murskeet jätetään pois, jolloin ne eivät ole täyttämässä aukkoja isompien murskeiden välillä. Huokoisella päällysteellä tavoiteltu ilma-aukkojen/onkaloiden (engl. void) osuus tilavuudesta on luokkaa 15 – 25 %. Suurempikin huokoisuus olisi melun vähentämisen kannalta hyvä, mutta päällysteiden kestävyys asettaa rajat maksimihuokoisuudelle. Kuvassa 20 näkyy murskejakauma eri päällystetyyppien välillä.



Kuva 20. Tyypillinen murskejakauma eri päällystetyypeillä maksimirakekoolla 11 mm. Kaksoisviivat näyttävät raekoon toleranssit, eli ylempi maksimin ja alempi minimin [4].

Kuten edellä on todettu, niin ideaalisen akustisen pistelähteen ääni vaimenee vapaassa kentässä kääntäen suhteessa etäisyyden neliöön. Vaikka ajoneuvoa ei voi kuvata ideaalisena pistelähteenä, vastaava vaimenemisfunktio voidaan havaita kovalla pinnalla riittävän kaukana lähteestä. Geometrisella etenemisellä on kuitenkin rajoituksia, jos tapahtuu heijastuminen maanpinnasta, jolloin vastaanottopisteeseen tulee suoran äänen lisäksi kuvälähteen ääni. Huokoisilla päällysteillä pitää ottaa huomioon tienpinnan absorboiva vaikutus sekä mahdollinen vaiheen muuttuminen siitä heijastuneelle äänelle. Huokoisella päällysteellä osa energiasta heijastuu ja osa absorboituu/vaimenee. Käytännössä se tarkoittaa viskoosisia häviöitä, kun paineaalto pumppaa ilmaa sisään ja ulos tienpinnan onkaloista, sekä lämpöelastista vaimenemista. Absorptio on taajuusriippuvaista ja siihen vaikuttaa kerroksen paksuus, karkeus ja huokoisuus [5].

Ilmiö, joka tiepäällysteessä näyttää absorptiolta on Helmholtz-resonaattori, jota on kehitetty niin sanotuissa kolmannen sukupolven hiljaisissa päällysteissä.

Mekaaninen impedanssi

Mekaanisella impedanssilla ei ole havaittu olevan vaikutusta kuin erityisrakenteisilla päällysteillä, missä tie on päällystetty kumirouheella tai kumilevyillä. Tällaiset rakenteet

ovat kuitenkin hyvin heikot eivätkä kestä liikenteen kulutusta.

Taulukkoon 4 on tehty karkea yhteenveto tiepäällysteen eri parametrien vaikutuksesta rengasmelun eri syntymekanismeihin. Muuttujat eivät ole täysin itsenäisiä, vaan esimerkiksi huokoisuus vaikuttaa tiepäällysteen rakenteeseen.

Taulukko 4. Yhteenveto tien ominaisuuksien vaikutuksesta rengasmelun eri syntymekanismeihin [5].

mekanismi	tien ominaisuus		
	rakenne	huokoisuus	mekaaninen impedanssi
värähtelyt	vahva	heikko	vahva
renkaan kyljen värähtelyt	vahva	heikko	vahva
takertumis-liuku	vahva	välillisesti	?
takertumis-napsah.	vahva	välillisesti	?
ilman turbulenssi	heikko	heikko	heikko
renkaan sisäiset resonanssit	välillisesti	heikko	?
ilman pumppaus	välillisesti	vahva	?
renkaan profiilin resonanssit	välillisesti	vahva	?
torvi-ilmiö	heikko	vahva	heikko
rengasmelun absorptio	heikko	vahva	heikko
moottorimelun absorptio	heikko	vahva	heikko

2.4.3.3 Ikääntyminen ja kuluminen

Tiepäällysteen melu-ominaisuudet muuttuvat sen elinkaaren aikana. Joillakin päällysteillä muutokset ovat suurempia kuin toisilla. Tyypillisesti perinteisten äänekkäämpien päällysteiden meluominaisuudet pysyvät suhteellisen samoina ensimmäisen vuoden jälkeen.

Ikääntymiseen ja kulumiseen vaikuttavat seuraavat ilmiöt.

- Mega- ja makrorakenne ovat muuttuneet, kun partikkeleita/hiukkasia ja muuta materiaalia on kulunut pois.
- Mega- ja makrorakenne on tiivistynyt liikenteen alla.
- Mikrorakenne on muuttunut, kun renkaat ovat kiillottaneet tienpintaa (nastat voivat ehkäistä ilmiön).
- Rapautumisen kemiallinen vaikutus, missä vaikuttanee myös maantiesuola, aiheuttaen päällysteen rapautumista ja murenemista, eli hienon materiaalin häviämistä. Vaikuttaa sekä mikro- että makrorakenteeseen. Myös sade voi vaikuttaa mikrora-

kenteen muutokseen.

- Voi syntyä halkeamia (routa tms.).
- Huokoinen päällyste voi tukkiutua liasta ja näin menettää huokoisuutensa.

Päällysteen ominaisuudet voivat myös vaihdella vuodenajan mukaan. Nastarenkaiden aiheuttamat tienpinnan rosoisuudet silottuvat ensimmäisten hellepäivien jälkeen, kun kivet painautuvat pehmenneeseen bitumimassaan.

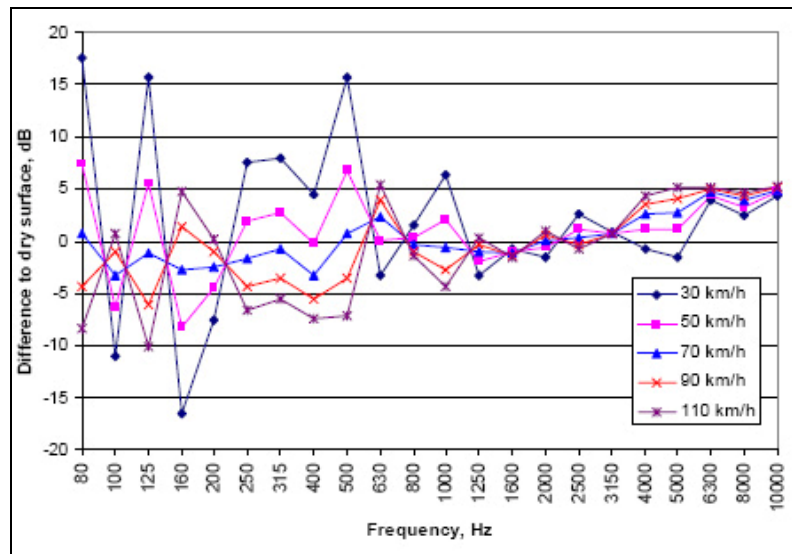
2.4.3.4 Veden määrä tienpinnalla

Tarkkaa tietoa tienpinnan veden syvyyden vaikutuksesta rengasmelun emission ei ole. Veden aiheuttama melun lisäys henkilöautoilla on suurempi pienillä nopeuksilla kuin suurilla nopeuksilla. Taulukossa 5 on karkea arvio kostean tienpinnan vaikutuksesta henkilöauton A-painotettuun äänitasoon.

Raskailla ajoneuvoilla tilanne on mahdollisesti jopa päinvastainen, eli vaikutus olisi suurempi suurilla nopeuksilla, mutta tämä tieto ei ole yhtä luotettavaa kuin henkilöautoista [11]. Kuvassa 21 on märän tienpinnan vaikutus raskaan ajoneuvon terssispektriin.

Taulukko 5. Arvio tien kosteuden määrän vaikutuksesta rengasmelun emissioon eri nopeuksilla [4].

Kosteuden määrä	0 – 60 km/h	61 – 80 km/h	81 – 130 km/h
kuiva	ref	ref	ref
kosteus, tiikusateesta tai maantiesuolasta johtuva	2 dB	1 dB	0 dB
märkä, kohtalainen sade	4 dB	3 dB	2 dB
märkä, rankka sade	6 dB	4 dB	3 dB



Kuva 21. Spektrierotus kuivalla ja märällä tiellä kaksiakselisilla raskailla ajoneuvoilla [11].

2.4.4 Ympäristötekijät

2.4.4.1 Lämpötila

Nykytietämys lämpötilan vaikutuksesta on, että lämpötilan noustessa 10 °C auton rengasmelu laskee noin 1 dB: n. Ongelmana on, että ei tarkkaan tunneta, mikä mekanismi vaikuttaa melun alenemiseen sekä se, että mitatut lämpötilan vaikutukset vaihtelevat suuresti.

Lämpötilakerroin voidaan esittää seuraavalla tavalla:

$$L = a + bT \quad (13)$$

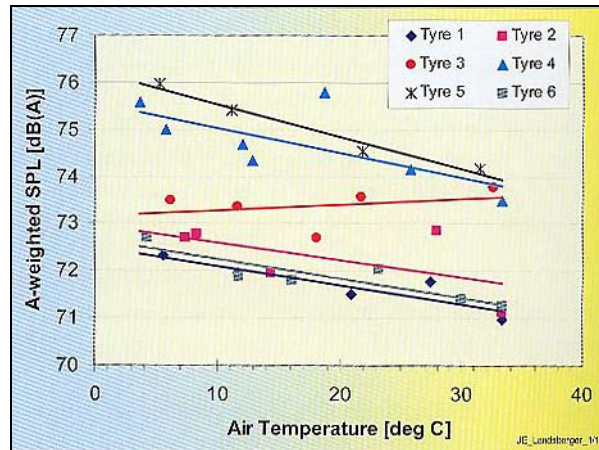
missä:

L on äänitaso [dB]

T on lämpötila [°C]

a , b on vakioita

Kulmakerrointa b kutsutaan lämpötilakertoimeksi. Kuva 22 on tutkimuksesta, jossa on mitattu äänitasoja eri renkailla lämpötilan funktiona.



Kuva 22. Ilman lämpötilan vaikutus eri renkailla henkilöauton A-painotettuun äänitasoon nopeuden ollessa 80 km/h [4].

Lämpötilakerroin voidaan määrittää joko renkaan, tien tai ilman lämpötilan mukaan. Tutkimuksissa paras korrelaatio on saatu ilman lämpötilan ja melun välillä tai tien lämpötilan ja melun välillä. On mahdollista, että huono korrelaatio renkaan lämpötilan kanssa johtuu siitä, että sitä on vaikeinta mitata. Se, käytetäänkö ilman vai tienpinnan lämpötilaa, on puhtaasti käytännön kysymys. Käytettäessä ilman lämpötilaa tulee huomata, että lämpötilakerroin on korkeampi kuin tienpinnan lämpötilalle. Musta päällyste absorboi tehokkaammin auringon säteilyä kuin vaalea päällyste ja tästä syystä musta bitumipohjainen päällyste voi olla aurinkoisena päivänä 10 °C lämpimämpi kuin betoni-asfalttipäällyste.

EU:n rengasmeludirektiivissä (2001/43/EC) on annettu seuraava lämpötilakorjaus lopullisille A-painotetuille äänitasoille.

$$L_R(\theta_{ref}) = L_R(\theta) + K(\theta_{ref} - \theta) \quad (14)$$

missä

L_r on korjattu äänitaso [dB]

θ on mitattu koeradan päällysteen lämpötila

θ_{ref} on referenssin lämpötila, 20 °C

K on A-painotettu lämpötilakerroin [dB/°C]

Henkilöautoille kerroin K on -0,03 dB/°C kun $\theta > \theta_{ref}$ ja -0,06 dB/°C kun $\theta < \theta_{ref}$. Direktiivissä kevyille kuorma-autoille kerroin K on -0,02 dB/°C ja raskaille ei ole lainkaan korjausta. Epälineaarille lämpötilakorjaukselle ei ole mitään tieteellistä perustetta, ja muutoinkin direktiivissä on otettu melko varovainen arvio lämpötilan vaikutuksesta rengasmelun emissioon. Harmonoise-laskentamallissa lämpötilakorjaus on määritelty eri päällystetyypeille [11]. Harmonoisen jatkoprojektissa Imaginessa lämpötilakerroin on määritelty ISO-standardin mukaisen tienpinnan keskimääräisen syvyyden (MPD) ja tien huokoisuuden avulla seuraavan taulukon 6 mukaisesti.

Taulukko 6. Lämpötilan korjauskerroin K kevyille eli luokan 1 ajoneuvoille. Raskaiden, eli luokkien 2 ja 3 ajoneuvojen korjauskerroin on 50 % luokan 1 korjauskertoimesta [3].

rakenteen luokka (MPD)	lämpötilakerroin luokan 1 (kevyet) ajoneuvoille		
	huokoisuusluokka		
	< 5 %	5 < huokoisuus < 15	> 15 %
< 0,5 mm	0,04	0,06	0,08
0,5 < rak. < 1,5 mm	0,08	0,07	0,06
> 1,5 mm	0,12	0,08	0,03

2.4.4.2 Ilmankosteus ja tuuli

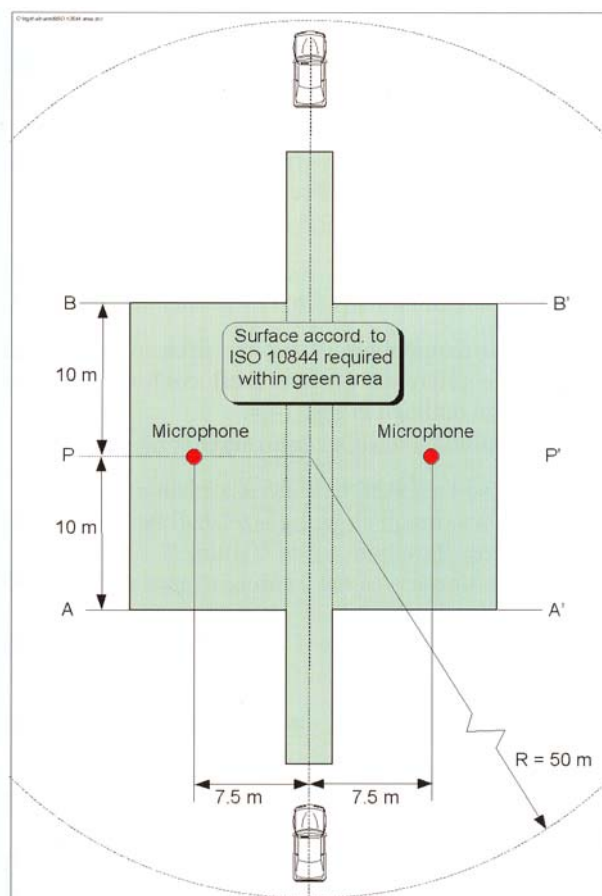
Ilmankosteudella ei ole havaittu olevan vaikutusta rengasmeluemissioon, paitsi silloin jos ilmankosteus on niin suuri, että se tiivistyy tienpintaan.

Tuulella on merkitystä mittauksen ja ajoneuvon aerodynaamisen melun, muttei rengasmelun kannalta.

2.5 Yleiset mittausmenetelmät

2.5.1 Rullausmenetelmä (CB)

Rullausmenetelmässä ajoneuvon moottori sammutetaan ja voimansiirto kytketään vapaalle juuri ennen testialueella saapumista, jolloin auto rullaa testialueen läpi. Vaikka moottori on sammutettu, nopeus ei ehdi hidastua kuin noin 1 km/h ajoneuvon rullatessa 20 m pituisen matkan. Menetelmästä on olemassa standardi ISO/DIS 13325, joka on olennaisesti sama kuin EU direktiivissä 2001/43/EC, joka määrittää raja-arvon renkaiden melutasolle. Kuvassa 23 oleva rullausmenetelmän testialue on määritelty standardissa ISO 10844. Mikrofonit on joko 7,5 tai 15 m päässä ohittavan ajoneuvon keskilinjasta ja 1,2 m korkeudella tienpinnasta. Ohituksesta mitataan äänitason A-painotettu maksimiarvo ja yleensä käytetään aikavakiota F , jolloin mitattava suure on L_{Afm} . Yleensä on tapana myös tallentaa huippuhetken terssispektri. Menetelmää käytetään sekä päällysteen että renkaiden meluvaikutuksen arvioimiseen.



Kuva 23. Testialueen vähimmäisvaatimukset. Testialue on vihreällä värillä [4].

Periaatteessa rullausmenetelmässä mitataan vain renkaan aiheuttamaa melua, mutta rengasmelun leviämiseen vaikuttaa testiauton kori, ja myös auton aerodynaaminen melu voi näkyä tuloksissa. Koska tarkoituksena on mitata rengasmelua, niin auton tulisi olla muutoin hiljainen, eli siinä ei saisi olla ylimääräisiä sivuääniä voimansiirrosta tai laakereista.

2.5.2 Tilastollinen ohiajomenetelmä (SPB)

Ohiajomittausten perusmenetelmä, tilastollinen ohiajo eli Statistical Pass-By (SPB), on kansainvälisesti standardoitu [12]. Tilastollinen ohiajomenetelmä on hyvin samanlainen kuin rullausmenetelmä, mutta siinä mitataan suuri joukko vakionopeudella ajavia ajoneuvoja vakioliikenteessä. Ajoneuvot luokitellaan muutamaan pääluokkaan koon perusteella ja ainoastaan ohitukset, joita muiden ajoneuvojen melu ei häiritse, otetaan mukaan tulokseen. Äänitasot normalisoidaan tiettyyn referenssinopeuteen käyttämällä mita-

tulla nopeusalueella olevaa äänipainetason lineaarista riippuvuutta nopeudesta. Mitattava suure on sama kuin rullausmenetelmässä eli $L_{Afm\max}$.

Mittauspaikan ympäristöllä on vähimmäisvaatimukset. Vähimmäisvaatimuksiin kuuluu esimerkiksi se, että testattavan kaistan keskilinjasta on 3,5 m (eli puoliväliin) vastaanottopisteeseen päin akustisesti tienpintaa vastaavaa materiaalia ja painaumat on peitettävä. Mittausalueen vähimmäisleveys on sama kuin rullausmenetelmässä eli 40 m.

Menetelmä sopii hyvin eri päällysteiden vertailumittauksiin, koska siinä saadaan mitattua päällysteen todellinen vaikutus vakiooliikenteen melutasoon, joka sisältää rengasmelun lisäksi myös moottoriperäistä melua. Pitkällä aikavälillä ajoneuvokanta voi muuttua ja tällöin eri aikoina tehdyt mittaukset eivät ole vertailukelpoisia. Tämä ei kuitenkaan aiheuta merkittävää virhettä, jos on tarkoitus mitata vaikka päällysteen meluominaisuuksien muuttumista sen normaalin elinkaaren aikana.

Heikkoutena SPB-menetelmässä on sen suuritöisyys ja kovat vaatimukset mittauspaikalle ja sen taustamelulle.

2.5.3 Lähimittausmenetelmä-vaunumenetelmä (CPX)

Lähimittausmenetelmä poikkeaa perinteisistä tien varrella suoritetuista melumittauksista. Menetelmässä rengas on asennettu perävaunuun, jota vedetään ajoneuvolla. Lähellä rengasta 0,1 – 0,5 m:n päässä renkaasta on yksi tai useampi mikrofoni. Yleensä renkaan ympärillä on vaimennettu kotelo, joka suojaa tuulelta ja liikennemelulta, jolloin saadaan periaatteessa mitattua vain rengasmelua. Mitattava suure on A-painotettu ekvivalenttitaso L_{Aeq} . Menetelmään on vasta standardiluonnos ja se on kehitetty erityisesti tienpintojen vertailua varten.

Lähimittausmenetelmä sopii hyvin rengasvertailumittauksiin sekä henkilöauton rengasmelun arvioimiseen eri päällysteillä. Päällystevertailussa tulee käyttää erilaisia renkaita.

CPX-menetelmä on muihin menetelmiin verrattuna pienitöinen ja nopea, mutta heikkoutena siinä on sen altistuminen taustamelulle. Ylimääräisiä taustamelun lähteitä ovat: Aerodynaaminen melu, mittausvaunun vakio pyöristä peräisin oleva melu, vaunuun kytkeytyvät tärinät, testattavan renkaan jousituksesta ja laakeroinnista peräisin oleva melu, vetävästä autosta tuleva melu sekä muu liikenne, kuten torven tööttäjät ja ohittavat ajoneuvot. Taustamelua ei voi täysin eliminoida, mutta sen suuruuteen voidaan vaikuttaa mittausvaunun suunnittelulla ja mittaustilanteen valvomisella siten, etteivät häiriöäännet pääse tuloksiin asti.

3 TIELIIKENNEMELUN LASKENTAMALLIT

3.1 Nykyinen Pohjoismainen vakiomalli

Nykyisin käytössä oleva vuoden 1996 pohjoismainen laskentamalli on säilynyt pääosin samanlaisena vuodesta 1974. Uusimmassa vuoden – 96 versiossa kevyiden ja raskaiden ajoneuvojen emissiotaso- ja nopeusriippuvuustietoja on päivitetty, sekä malliin on tullut yhden päällysteen sijaan 17 kpl tiepäällysteitä.

3.1.1 Melulähde ja lähtöarvot

Laskentamallissa liikennettä mallinnetaan viivalähteellä, joka on 0,5 m:n korkeudella maanpinnasta. Ajoneuvoluokkia on kaksi, kevyet ja raskaat ajoneuvot, millä tarkoitetaan ajoneuvoa, jonka paino on yli 3500 kg.

Mallin emissiotasotiedot perustuvat lähinnä Tanskassa tehtyihin mittauksiin 1990-luvun alussa. Kevyiden ja raskaiden ajoneuvojen melun lähtötaso 10 m päässä tien keskilinjasta 1,5 m korkeudella on määriteltä seuraavasti [13].

$$L_{AE10m}(kevyt) = 73,5 + 25 \lg\left(\frac{v}{50}\right); \quad v \geq 40 \text{ km/h} \quad (15)$$

$$L_{AE10m}(kevyt) = 71,1; \quad 30 \text{ km/h} \leq v < 40 \text{ km/h}$$

$$L_{AE10m}(raskas) = 80,5 + 30 \lg\left(\frac{v}{50}\right); \quad 50 \text{ km/h} \leq v \leq 90 \text{ km/h} \quad (16)$$

$$L_{AE10m}(raskas) = 80,5; \quad 30 \text{ km/h} \leq v \leq 50 \text{ km/h}$$

Emissiotasosta saadaan ekvivalenttitaso seuraavalla kaavalla.

$$L_{Aeq10m} = L_{AE10m} + 10 \lg\left(\frac{N}{T}\right), \quad (17)$$

missä N on ajoneuvojen lukumäärä ajassa T (s). Yhdistetty ekvivalenttitaso saadaan logaritmisin laskusäännön mukaan seuraavasti.

$$L_{Aeq}(yhdistetty) = L_1 = 10 \lg\left(10^{L_{Aeq}(kevyt)/10} + 10^{L_{Aeq}(raskas)/10}\right) \quad (18)$$

3.1.2 Melun leviäminen ja vaimennukset

Laskentamallissa on joukko korjauskertoimia, joiden avulla saadaan laskettua ekvivalenttitaso tarkastelupisteessä.

$$L_{Aeq} = L_1 + \Delta L_2 + \Delta L_3 + \Delta L_4 + \Delta L_5 \quad (19)$$

ΔL_2 on etäisyyskorjaus. Etäisyyskorjaus on -3dB etäisyyden kaksinkertaistuuessa 10 m ja se ei riipu maavaimennuksesta tai esteistä.

ΔL_3 on maa- ja estekorjaus. Maa- ja estekorjaus on jaettu kahteen tilanteeseen. Ensimmäisessä tilanteessa tie on 1,5 m alempana ja toinen tilanne sisältää kaikki muut tapaukset, joita käsitellään kuten esteitä.

Estetapaus jaetaan kahteen vaiheeseen, jossa ensin lasketaan esteen vaimennus, jonka jälkeen siihen lisätään maavaimennus esteen ja vastaanottopisteen välillä. Maavaimennukseen on kaksi vaihtoehtoa: kova ja pehmeä.

ΔL_4 on muut korjaukset. Lisätään tulokseen, jos tilanne poikkeaa yksinkertaistetuista kolmesta ensimmäisestä korjauksesta, kuten paksun esteen korjaus tai tien kaltevuus.

ΔL_5 on julkisivukorjaus. Tämän korjauksen avulla lasketaan sisämelun äänitasoja.

Pohjoismaisella mallilla voidaan laskea myös maksimitasoja, mutta koska laskentatapa on samanlainen kuin ekvivalenttitasoissa, sitä ei esitetä tässä.

3.2 Nord2000-laskentamalli

Vuonna 2002 valmistuneesta Nord2000-mallista on pyritty tekemään mahdollisimman tarkka ja todenmukainen. Siinä meluemissio ja sen leviäminen ovat täysin erilliset osat. Koska mallin leviämisoa on itsenäinen, sitä voidaan käyttää myös teollisuusmelulaskelmissa. Laskentamalli on hyvin raskas, mutta mallia suunniteltaessa on ajateltu tietokoneiden kehittyvän nopeasti, jotta melukarttoja voidaan laskea järkevässä ajassa riittävällä tarkkuudella.

Tieliikennemelun lisäksi Nord2000 sisältää emissiomallin raideliikenteen melulle, mutta tässä keskitytään lähinnä tieliikenteen melumalliin.

3.2.1 Melulähde ja lähtöarvot

Tieliikennettä mallinnetaan riittävän tiheällä pistejoukolla, missä jokaisella ajoneuvolla on vähintään kolme osalähdettä eri korkeuksilla (0,01 m, 0,30 m, 0,75 m tai 3,5 m). Osalähteiden teho määritellään terssikaistoittain (25 Hz – 10 kHz) ja lähteillä on horisontaalista suuntaavuutta. Lähteillä on viisi pääluokkaa: kevyet ajoneuvot, kaksiakseliset raskaat ajoneuvot, moniakseliset raskaat ajoneuvot, moottoripyörät ja mopot. Lisäksi ensimmäiset kolme luokkaa on jaettu 2 – 4 aliluokkaan. Mallin valmistuessa siinä oli päästöarvot ainoastaan ajoneuvoluokille 1, 2 ja 3 (kevyet ajoneuvot, 2-akseliset ja 3-akseliset raskaat) tiiviillä asfaltilla vakionopeudella. Lähtöarvoja on mitattu kaikissa pohjoismaissa, mutta ne perustuvat suurelta osin tanskalaisten tekemiin mittauksiin, joissa on mitattu yli 4000 ajoneuvoa [14]. Mittaukset jatkuvat, jotta tulevaisuudessa saadaan mallin kaikille luokille lähtöarvot.

3.2.2 Melun leviäminen ja vaimennukset

Vastaanottopisteen äänipainetaso L_R ennustetaan jokaiselle taajuuskaistalle seuraavan kaavan mukaan [15]:

$$L_R = L_W + \Delta L_d + \Delta L_a + \Delta L_t + \Delta L_s + \Delta L_r \quad (20)$$

missä

L_W = äänitehotaso kyseisellä terssikaistalla.

ΔL_d = etenemisvaimennus pistelähteelle/pallopinnalla.

ΔL_a = ilman absorptio vaikutus.

ΔL_t = maaston eli maaperän ja esteiden vaikutus (virtausvastus ja maaston ”karkeus” jne.).

ΔL_s = hajottavien/sirottavien vyöhykkeiden vaikutus.

ΔL_r = esteen vaikutus siitä heijastuvaan ääneen, eli esteen pinnan (absorptio) ja dimensioiden vaikutus.

Melun leviämisen oletetaan olevan itsenäinen/erillinen osa, ja näin ollen sen leviäminen voidaan ennustaa erikseen. Myös jokaisen etenemiseen vaikuttavan tekijän oletetaan olevan itsenäinen ja näin voidaan ennustaa erikseen. Poikkeuksena on maaston vaikutus ΔL_t , johon voi vaikuttaa hajottava vyöhyke ΔL_s pienentämällä koherenssia.

Termille L_W on tehty suuntaavuuskorjaus, eli jos pistelähteellä on suuntaavuutta, niin L_W määritellään kyseiseen suuntaan tasaisesti suuntaavana lähteenä samalla teholla kuin se olisi siihen pisteeseen suuntaavana lähteenä.

3.2.2.1 Ilman absorptio

Ilman absorptio perustuu terssikaistojen keskitaajuuksilla lasketuille ISO-9613-1 arvoille, joihin on lisäksi liitetty analyyttisellä menetelmällä saatu arvio vaimennuksesta taajuuskaistan sisällä.

3.2.2.2 Maaperän vaikutus

Maaperän vaikutusmalli on yksi Nord2000-mallin kulmakivistä. Malli ennustaa tasaisen homogeenisen maanpinnan vaikutuksen melun leviämiselle, joka perustuu geometriseen sädeteoriaan.

Ääniaalto, joka säteilee pistelähteestä, on pallomainen aalto, jossa energia on jakautunut tasaisesti joka suuntaan. Sen tähden amplitudi vaimenee etäisyyden funktiona, mikä vapaassa kentässä tarkoittaisi amplitudin vaimenemista kääntäen etäisyyteen eli $1/r$. Vaihe riippuu etäisyyden lisäksi taajuudesta, eli aallonpituuden päässä vaihe on pyörähtänyt 360° .

Kun ääni etenee lähellä maanpintaa, niin lähteestä tuleva suora ääni ja maasta heijastuva ääni vaikuttavat toisiinsa kuten kuvassa 19. Kun kyseessä on muu kuin kova maa, esimerkiksi nurmikko, niin silloin myös heijastuneen äänen vaihe kääntyy. Vaimennus ja

vaiheen muutos ilmaistaan niin sanotulla palloaallon heijastuskertoimella. Palloaallon heijastuskerroin riippuu matkasta R_2 , heijastuskulmasta Ψ_G ja maanpinnan impedanssista. Matkaeron ja heijastuksen vaihesiirron johdosta heijastuneella ja suoralla äänellä on vaihe-ero. Yleisesti ottaen vaihe-ero kasvaa taajuuden funktiona. Matalilla taajuuksilla vaihe-ero on pieni, joten ääniaallot vahvistavat toisiaan ja ilman maaperän vaimennusta saavat aikaan lähes +6dB vahvistuksen verrattuna vapaakenttätilanteeseen. Mentäessä korkeilla taajuuksilla päin vaihe-ero kasvaa 180° :en jolloin ääniaallot kumoavat toisiaan. Tosin heijastunut ääni on vaimentunut enemmän matka-eron takia ja maavaimennuksen tähden, joten täydellistä vaimennusta ei tapahdu. Kun taajuus kasvaa vielä 180° :en vaihe-erosta ylöspäin, niin vaihe-ero katoaa ja vahvistus on jälleen lähes +6 dB. Vahvistus- ja vaimennusilmiö jatkuu vielä korkeimmillakin taajuuksilla, mutta käytännössä ilmiö jää huomaamatta, koska tuloksia tarkastellaan terssikaistoittain, jolloin kaistan keskiarvoistaminen peittää ilmiön.

3.2.2.3 Maaperän impedanssi

Nord2000-mallissa maaperän akustiset ominaisuudet on määritelty normalisoidulla karakteristisella impedanssilla. Käytännöllisistä syistä on kuitenkin päätetty, että impedanssi määritellään epäsuorasti maaperän virtausvastuksen kautta. Virtausvastus on muuttuja, joka kuvaa maaperän pehmeyttä, eli pienempi virtausvastus tarkoittaa pehmeämpää maaperää. Nord2000:n impedanssimalli pohjautuu Delany-Bazley:n empiiriseen impedanssimalliin. Nord2000:ssa maaperätyypit on jaettu virtausvastuksen mukaan seitsemään luokkaan, jotka näkyvät taulukossa 7.

Taulukko 7. Maaperän luokitus virtausvastuksen mukaan [15]

Maaperän luokka	Virtausvastus σ (kNsm ⁻⁴)	Kuvaus
A	12.5	Hyvin pehmeä (lumi tai sammalmainen)
B	31.5	Pehmeä metsän maaperä (kanervikko, paksu sammalikko)
C	80	Pehmeä maaperä (nurmi, ruoho, pehmyt multa)
D	200	Normaali pehmeä maaperä (metsän maaperä, pelto)
E	500	Tiivis pelto ja hiekka (tiivistetty nurmikko, puistoalue)
F	2000	Tiivistetty maanpinta (hiekkatie, pysäköinti alue)
G	20000	Kova pinta (tiivis asfaltti, kallio, vesi)

3.2.2.4 Esteen vaikutus

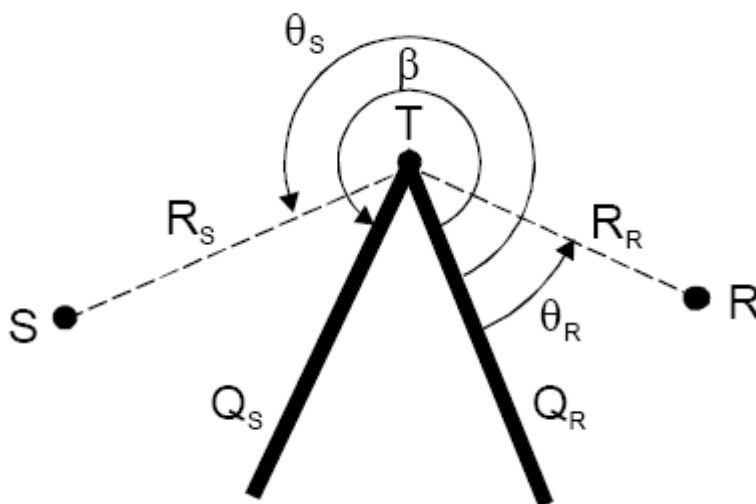
Toinen peruselementti Nord2000-leviämismallissa on varjostusvaikutuksen malli, joka ennustaa äänipainetason, kun vastaanottopiste on esteen takana. Varjostusmalli perustuu diffraktion geometriseen teoriaan.

Malli pitää paikkansa, kun este on kiilamainen, kuten kuvassa 24. Mallissa estevaikutus riippuu etäisyyksistä R_S ja R_R kiilan kärjestä lähteeseen ja vastaanottopisteeseen, sirontakulmista θ_S ja θ_R ja kiilan kulmasta β . Yleisesti varjostus kasvaa, kun $\theta_S - \theta_R$ kasvaa ja pienenee, kun R_S ja R_R kasvavat.

Kaksikulmaisen ja kahden teräväkulmaisen ”varjostimen” tapauksessa kunkin kulman vaikutus lasketaan erikseen sijoittamalla vastaanotto- tai lähdepiste toisen kulman päälle.

Nord2000 ei osaa laskea monimutkaisia meluesteitä, mutta siinä on mahdollisuus asettaa ohut este, jonka vaimennus määrätään suunnitellun erikoisesteen mukaiseksi.

Satunnaisen tuulen aiheuttama turbulenssi ja lämpötilaerot aiheuttavat sen, että osa äänestä siroaa esteen taakse erityisesti korkeilla taajuuksilla. Tämä vaikutus lisätään varjostusmallin tulokseen. Siroamiseen vaikuttavat laskentamallissa esteen geometria, turbulenssin voimakkuus ja äänen taajuus.



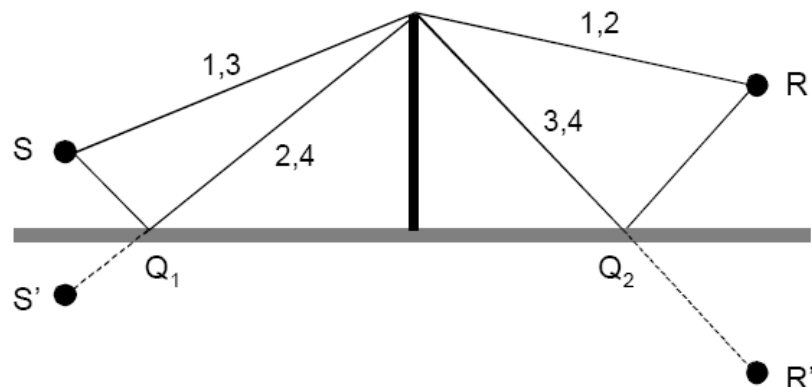
Kuva 24. Kiilamaisen esteen muuttujat [15]

3.2.2.5 Maaperän ja varjostuksen yhteisvaikutus

Kun este sijoitetaan maahan, lähtö- ja vastaanottopuolelle syntyvät kuvan 25 mukaiset kuvalähteet. Malli yhdistää kaikki neljä mahdollista diffraktiopolkua kaavan 21 mukaan

$$p = p_1 + Q_1 p_2 + Q_2 p_3 + Q_1 Q_2 p_4 \quad (21)$$

missä Q on heijastuskerroin.



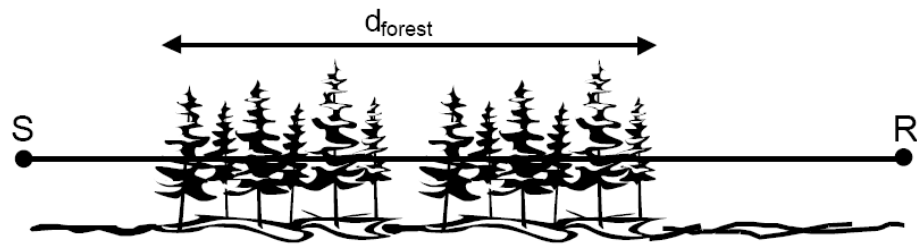
Kuva 25. Maa- ja estevaikutus yhdellä esteellä [15].

Vastaavasti kahden esteen tapauksessa tulee kaikkiaan kahdeksan eri diffraktiopolkua.

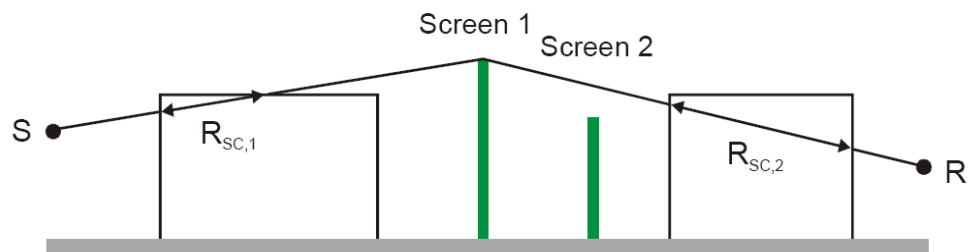
3.2.2.6 Hajottava/sirottava vyöhyke

Nord2000-mallilla on mahdollista ennustaa hajottavan vyöhykkeen, kuten kasvillisuuden tai kaupunkialueen, vaikutus melun leviämiseen. Kaupunkialueella melun leviämiseen vaikuttavat useat heijastukset, diffuusi sironta epäsäännöllisistä julkisivuista, talojen kulmien aiheuttamat diffraktiot sekä talojen ja maaperän vaimennus. Kasvillisuudesta lähinnä metsä vaikuttaa melun leviämiseen. Kun ääni heijastuu, siroaa ja absorboituu puun rungoista, oksista ja lehdistöstä, alueet ovat liian monimutkaisia deterministisille malleille, joten joudutaan käyttämään tilastollista sirontamallia. Malli ei ennusta tarkkaa äänipainetasoa, vaan paremminkin keskiarvon tietyn matkan päässä lähteestä, jolloin jätetään huomiotta esteiden varjostava vaikutus sekä kasvanut äänipaine niiden etupuolella.

Hajottavan vyöhykkeen vaikutus riippuu hajottavan vyöhykkeen halkaisijasta (kuva 26), ja tiheydestä, objektien koosta ja niiden heijastuskertoimista. Jos lähteen ja vastaanottopisteen välillä on este, joka lyhentää äänen metsässä kulkemaa matkaa, niin silloin otetaan huomioon vain hajottavan vyöhykkeen efektiivinen halkaisija, joka on lyhyempi kuin ilman estettä (kuva 27) [16].



Kuva 26. Hajottavan vyöhykkeen halkaisija [15].



Kuva 27. Hajottavan vyöhykkeen efektiivinen matka R_{SC} , kun lähetys ja vastaanotto-pisteiden välillä on este [16].

3.3 Harmonoise-laskentamalli

Harmonoise-tieliikennemelulaskentamalli valmistui vuonna 2005 ja tulee lähivuosina käyttöön, kun kaupallisia laskentaohjelmia ilmestyy markkinoille. Valmistuessaan laskentamallin emissiotiedot olivat vielä puutteelliset ja niitä on täydennetty Harmonoisen jatkoprojekti Imaginessa. Viimeisimmän Imaginenkaan tiedot eivät vielä sisällä kaikkia päällyste- ja ajoneuvotyyppä [3], mutta ovat periaatteessa riittävät normaali melukarttalaskentaa varten. Koska Harmonoise-malli pohjautuu suurelta osin pohjoismaiseen Nord2000-malliin, niin tässä kappaleessa käsitellään lähinnä mallien eroja.

Karkeasti ottaen kyseessä on kaksi hyvin samanlaista laskentamallia, joista Nord2000-malli pyrkii mallintamaan melun leviämiseen vaikuttavia akustisia ilmiöitä mahdollisimman tarkasti, kun taas Harmonoise-malli ei välitä yhtä paljon siitä miten eri siirtotermit muistuttavat todellista tilannetta, jos oikeaan lopputulokseen päästään helpompaa reittiä pitkin.

3.3.1 Melulähde ja lähtöarvot

Harmonoise-mallissa on jätetty Nord2000-mallin keskimäinen osalähde pois, jolloin

ajoneuvoilla on kolmen pistelähteen sijaan vain kaksi osalähdettä. Osalähteiden korkeudet ovat 0,01 m ja ajoneuvoluokasta riippuen 0,30 m tai 0,75 m.

Käytännössä Harmoinoise-mallissa voidaan käyttää samoja lähtöarvoja kuin Nord2000-mallissa tehospektri, vain jaetaan kolmen pisteen sijasta kahteen osalähteeseen. Alapisteessä on 80% rengasmelusta ja 20 % moottoriperäisestä melusta, loput rengas- ja moottoriperäisestä melusta sijoitetaan yläpisteeseen.

3.3.2 Melun leviäminen ja vaimennukset

Etäisyysvaimennus, ilman absorptio ja heijastusten energiahäviöt on käsitelty maleissa yhtäläisesti. Menetelmät, jolla arvioidaan maaperän vaikutusta, ovat samankaltaiset. Molemmat mallit laskevat erikseen tasaisen maan, laakson muotoisen maaston, nypyn ja esteen vaikutuksen. Eroja mallien välillä on maaston kokonaisvaikutuksen arvioinnissa käytettävissä siirtotermeissä, jotka edustavat kunkin segmentin/lohkon tärkeyttä maaperän kokonaisvaimennuksessa. Näitä siirtotermejä arvioidaan erilailla. Harmonoise laskee parametrinsa yksinkertaisella yhtälöllä, joka perustuu summaan N :stä erilaisesta Fresnel-painotetusta maaperän lohkoista. Nord2000-mallissa parametrien laskeminen perustuu lukuisiin tapahtumiin, jotka riippuvat taajuudesta, lähteen ja vastaanottopisteen sijainnista, maaperän asetelmasta, esteen ulottuvuuksista ja alueen Fresnel-painotuksesta.

3.3.2.1 Esteet

Harmonoise-mallissa esteen ja nypyn vaikutuksen laskeminen poikkeaa Nord2000-menetelmästä. Esteen lisäysvaimennus lasketaan Harmonoise-mallissa Fresnelin luvusta N_f [18].

$$N_f = \text{sgn}(h_{\text{eff}}) \frac{2(R_S + R_R - R)}{\lambda}, \quad (22)$$

missä h_{eff} on esteen efektiivinen korkeus, R_S ja R_R ovat lähteen ja esteen huipun välinen etäisyys ja huipun ja vastaanottopisteen välinen etäisyys. R on suora etäisyys esteen ja vastaanottopisteen välillä ja λ on aallonpituus. Diffraktiovaimennus määritellään seuraavasti:

$$A_{\text{diff}} = 0, \text{ kun } N_f \leq -0,25 \quad (23)$$

$$A_{\text{diff}} = 6 - 12\sqrt{-N_f}, \text{ kun } -0,25 \leq N_f < 0 \quad (24)$$

$$A_{\text{diff}} = 6 + 12\sqrt{N_f}, \text{ kun } 0 \leq N_f < 0,25 \quad (25)$$

$$A_{\text{diff}} = 8 + 8\sqrt{N_f}, \text{ kun } 0,25 \leq N_f < 1 \quad (26)$$

$$A_{\text{diff}} = 16 + 10 \lg N_f, \text{ kun } N_f \geq 1 \quad (27)$$

Menetelmä, jolla lasketaan useamman esteen vaikutus, on melko yksinkertainen. Etsitään dominoiva diffraktiokulma, esimerkiksi suurimman N_f arvon omaava kulma, ja lasketaan lisäysvaimennus A_{diff} käyttämällä lähetys- ja vastaanottopisteitä. Seuraavan esteen lisäysvaimennus määritellään käyttämällä ensimmäistä lähteenä tai vastaanottopisteenä ja riippuen toisen esteen sijainnista lasketut lisäysvaimennukset lasketaan yhteen. Tätä voidaan toistaa kunnes kaikki diffraktoivat kulmat on laskettu yhteen. Harmonoise-mallissa ei periaatteessa ole rajoituksia diffraktoivien kulmien määrän suhteen, kun Nord2000-mallissa yli kahden esteen tapauksissa vain kaksi merkittävintä estettä otetaan huomioon. Lisäksi kahdella esteellä voi olla vain yksi kulma ja yhdellä esteellä kaksi diffraktoivaa kulmaa.

Kummatkin mallit laskevat maaheijastukset samalla tavalla kuvan 25 mukaan.

3.3.2.2 Sääkorjaukset

Molemmat mallit ottavat huomioon tuuli- ja lämpötilagradientin sekä ilmakehän epävakaisuuden, mutta lähestymistavat, jolla arvioidaan äänen refraktiota eli taipumista ovat erilaiset.

Nord2000-malli ottaa pystysuoran äänennopeusgradientin huomioon korvaamalla suorat säteet taivutetuilla säteillä. Harmonoise-malli taas pitää säteet suorina ja taivuttaa maata simuloiden lämpötilagradientin vaikutusta. Myös kaarevuus lasketaan erilailla. Harmonoise-mallissa kaarevuussäde lasketaan taipuneen ääniaallon maksimikorkeudesta, joka riippuu lähteen ja vastaanottopisteen välisestä suorasta etäisyydestä ja äänennopeusprofiilista. [18]. Nord2000-mallissa kaarevuus lasketaan kaarenpituuden ja sen maanpinnan välisen kulman avulla, mikä on teoreettisesti oikeampi, mutta huomattavasti monimutkaisempi tapa [17].

3.3.2.3 Hajottavat vyöhykkeet

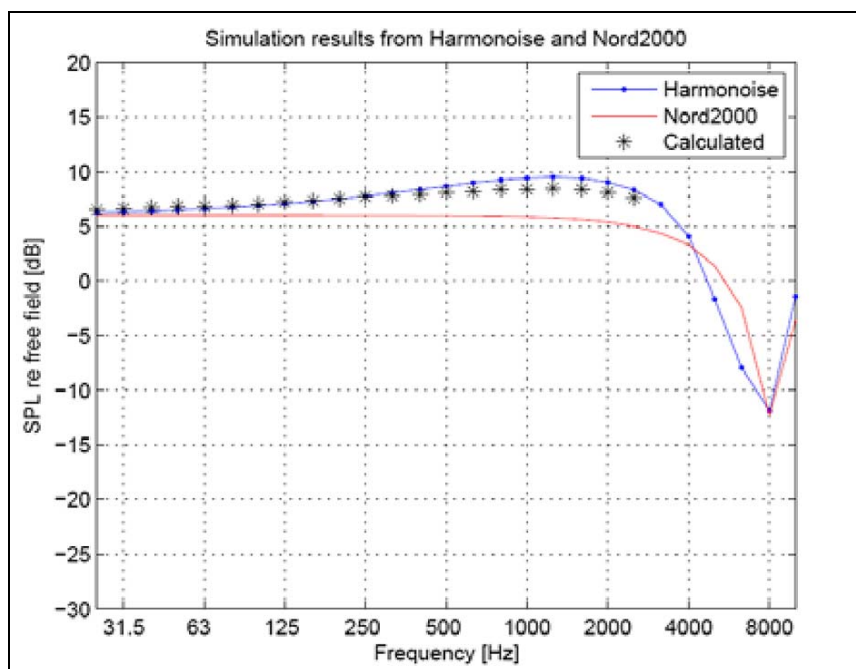
Sirottavien vyöhykkeiden, kuten metsän, vaikutus arvioidaan hiukan erilailla. Raja-arvot ovat kummassakin mallissa samat, eli suurin sirontavaimennus on 15 dB ja sirontasäteiden minimi on 3,125 m [16] [18]. Laskentatapakin on hyvin samanlainen, mutta Nord2000-malli pyrkii olemaan tarkempi ottamalla huomioon objektien heijastuskertoimet sekä arvioimaan asuinalueiden ääntä sirottavaa vaikutusta. Ilmiö on hyvin monimutkainen, eikä laskentamallien tarkkuutta hajottavan vyöhykkeen mallintamisessa ole vielä todennettu.

3.4 Laskentamallien vertailua

3.4.1 Mallien tarkkuus

Harmonoise- ja Nord2000-mallin leviämisosat ovat hyvin lähellä sekä toisiaan että mitattuja arvoja normaaleissa olosuhteissa [19]. Joissakin erikoistilanteissa Harmonoise-

malli antaa oikeamman tuloksen, kuten kuvan 28 simuloidussa tilanteessa, joka on laskettu äärettömän kovalla tasaisella pinnalla ja voimakkaalla positiivisella lämpötilagradientilla. Kuvassa 28 on verrattu Harmonoise ja Nord2000-mallin laskentatulosta numeerisella analyysillä saatuun tarkempaan tulokseen. Nord2000-mallissa maaheijastuksen aiheuttaman vahvistuksen maksimi on 6 dB, kun Harmoinoise-malli puolestaan ottaa huomioon maaheijastuksien kumuloitumisen, jolloin äärettömän kovalla tasaisella pinnalla kaukana lähteestä ja myötätuulitilanteessa maaheijastuksien vaikutus on huomioitu oikein.



Kuva 28. Laskettu ja mallinnettu äänipainetaso vastaanottopisteessä kovalla pinnalla (verrattuna vapaakenttätilanteeseen). Lähteen korkeus on 0,5 m ja vastaanottopisteen etäisyys 200 m ja korkeus 1,5 m. Lämpötilagradientti on 0,0846 K/m [19]

3.4.2 Laskennallinen vaativuus

Nykyisellä vakiomenetelmällä voi yksittäisiä pisteitä periaatteessa laskea vaikka käsin. Tulevat mallit ovat niin monimutkaisia ja työläitä, että ne on puhtaasti suunniteltu tietokoneiden laskettaviksi. Tietokoneen tehokkuuteen vaikuttaa suuresti se, miten tehokkaan koodin tai algoritmin ohjelmoija on onnistunut luomaan, mutta siitä huolimatta uudet laskentamallit ovat ainakin numeroiden valossa kova haaste tietokoneille.

Jos otetaan vertailukohteeksi nykyinen laskentamalli ja sen pistelähde, joka Nord2000-mallissa vakioliikenteessä on jakautunut neljään osalähteeseen ja kukin osalähde lasketaan terssikaistoittain, kun nykyisessä mallissa lasketaan kokonaistasoissa, saadaan tulokseksi että Nord2000 on 4 kertaa 27 eli 108 kertaa raskaampi kuin nykyinen

laskentamalli. Eikä tuloksessa ole edes huomioitu realistisemman äänen etenemisen tuomaa laskennallista monimutkaisuutta. Harmoinoise on hiukan kevyempi kuin Nord2000 jo senkin tähden, että siinä on käytännössä kolme lähdettä neljän sijaan ja äänen etenemisessä ei ole pyritty simuloimaan todellista tilannetta, vaan sellaista tilannetta joka johtaa oikeaan lopputulokseen.

Voisi hyvinkin arvioida, että melukarttojen laskenta-ajoissa mennään uusilla laskentamalleilla ajassa vähintään kymmenen vuotta taaksepäin.

4 RENGASMELUN MITTAUKSET

4.1 Mittausjärjestelyt

Diplomityön mittaustulokset perustuvat Liikenne- ja viestintäministeriön *Vierintämelun vähentäminen*-projektissa saadun laajan aineiston analyysiin. VIEME-hankkeessa on tutkittu eri renkaiden ja tiepäälysteiden aiheuttamaa melua ja sen leviämistä tavoitteena melutasojen alentaminen sekä melulle altistumisen vähentäminen taloudellisesti ilman, että pölyongelmat lisääntyvät ja liikenneturvallisuus heikkenee.

Tiepäälysteiden mittauksia tehtiin kaikkiaan 14 vuosina 2006–07. Mittauspaikat sijaitsivat Röykässä, Klaukkalassa sekä Helsingissä Konalan- ja Pirkkolanteilla. Kussakin mittauspaiassa oli samalla tieosuudella hiljainen päälyste ja referenssipäälyste. Päälystemittauksien lisäksi mitattiin melun lähileviämistä yhdellä kaukopisteellä.

Päälyste- ja leviämismittauksien lisäksi tehtiin kesällä 2006 Nokian koeradalla rengasvertailumittauksia kontrolloidulla rullaus-, eli CB-menetelmällä.

4.1.1 Sovellettu ohiajomittausmenetelmä (SPB)

Tutkimuskäyttöön tilastollinen ohiajomenetelmä on varsin rajallinen kahdesta syystä. Siinä ei määritetä melun spektriä, vaan tulos ilmoitetaan vain kokonais-A-äänitasona. Lisäksi A-äänitasoa ei mitata äänialtistustasona L_{AE} , vaan vain enimmäisäänitasona L_{AFmax} , mikä on mittausteknisesti selvästi epäluotettavampaa.

Ohiajomenetelmästä on käytettävissä laajennettu muoto, Nordtest-menetelmä NT ACOU 109 [20], joka on tarkoitettu lähinnä laskentamallien lähtöarvojen mittauksiin. Siinä käytetään kahta eri korkeuksilla olevaa mittauspistettä, mitattava raakasuure on äänialtistustaso ja mittaus tehdään spektrinä terssikaistoittain.

Tässä tutkimuksessa Nordtestin mittausten menetelmää sovellettiin edelleen hieman laajemmin. Kahden mikrofoni-pisteen sijasta käytettiin kolmea mikrofonia vakioetäisyydellä (10 m keskilinjasta) ja kolmella eri korkeudella. Niillä tavoitellaan parempaa luotettavuutta ja pystysuuntaavuuden määrittämis mahdollisuutta. Mikrofonien korkeudet olivat ISO:n vakiokorkeus 1,2 m sekä Nordtestin korkeudet 0,2 m ja 4,0 m.

Mainittujen kolmen mikrofoniin ohella käytettiin neljättä mikrofonia, joka oli edellisten takana kauempana tiestä. Tällä ”taka- eli kaukopisteellä” tavoiteltiin tietoa melun lähileviämisestä muutaman kymmenen metrin matkalla ja mahdollisuutta verrata tätä tietoa laskentamalleilla saataviin leviämisen nusteisiin. Takamikrofoniin etäisyys tiestä oli yleensä välillä 25–40 m, mutta Röykan referenssikohteessa mikrofoni oli käytännön syistä vietävä 65 m etäisyydelle tiestä.

Tallennusvaiheessa äänipainesignaalit mittauspisteissä tallennettiin digitaalisilla DAT-nauhureilla. Digitaalinen tallennus merkitsee sitä, että mikrofoni-signaalit ovat lähes täydellisinä (48 kHz 16 bit) ja vääristymättöminä käytettävissä koko jatkokäsittelyssä.

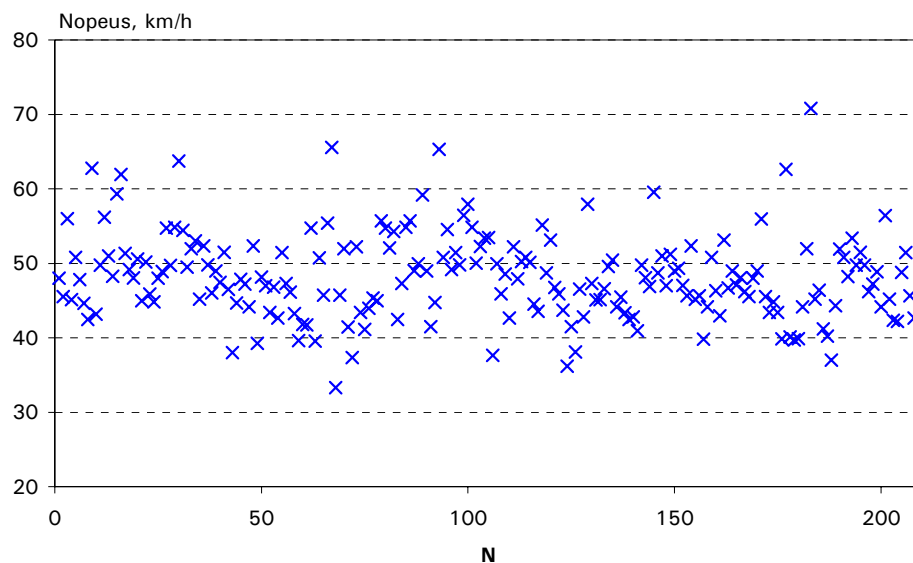
Kaikki signaalikanavat kalibroitiin äänitasokalibraattorilla ennen ja/tai jälkeen mittauksen. Mikrofonit oli varustettu tuulisuojalla. Mittauksessa ja analysoinnissa käytetyt laitteet ja välineet on lueteltu liitteen 1 taulukossa 12.

Tallennetut signaalit editoitiin jälkikäteen. Pirkkolantien aineisto luokiteltiin ja editoitiin erityisen yksityiskohtaisesti, jotta sitä voitiin analysoida tarkemmin ja jotta eri aikoina tehdyt mittaukset saatiin vertailukelpoisiksi. Mittauskohteissa ajoneuvot luokiteltiin kukin omaan luokkaansa ja ajoneuvojen suunta merkittiin ylös. Tämän lisäksi ohiajaneista autoista tehtiin riittävän yksityiskohtaiset muistiinpanot sekä videoitiin mittaustilanne, jotta kukin auto ja ohiajo voitiin jälkeinpäin yksilöidä ja tunnistaa äänisignaalien tallenteista. Muistiinpanojen ja videon avulla tallennetut ohiajot voitiin luokitella puhtaisiin ja muiden ajoneuvojen melun pilaamiin. Jälkianalyysissä ajoneuvot luokiteltiin myös omaan aliluokkaansa (esim. henkilöauto tai pakettiauto) ja videolta laskettiin kunkin ajoneuvon nopeus. Keskimääräisissä nopeuksissa ei ollut merkittävää vaihtelua eri mittauskertojen välillä.

Analyysissä tehtiin lämpötila- ja etäisyyskorjaukset. Kokonaistasot normalisoitiin nykyisen pohjoismaisen laskentamallin lähtöarvoon, eli 1000 ajoneuvoa tunnissa, ei raskaita ajoneuvoja ja nopeus 50 km/h. Lämpötilakorjauksena kaikille päällysteille käytettiin 0,1 dB/°C ja ilman referenssilämpötilana oli 20 °C. Etäisyys normalisoitiin 10 m etäisyydelle.

Jotta tulokset olisivat luotettavia, puhtaita ohituksia tulee olla riittävän paljon. Raskaiden ajoneuvojen osalta tämä kriteeri ei täyttynyt, joten niistä ei saatu yleispäteviä tuloksia. Raskaiden ajoneuvojen kanssa on sekin ongelma, että tulokset edustavat usein kyseisen mittauspajan ajoneuvokoostumusta. Esimerkiksi Pirkkolantiella raskas liikenne koostui lähinnä Ikarus E94 2- ja 3-akselisista matalalattiaisista linja-autoista. Vastaavasti muualla, esimerkiksi paperitehtaan tai sorakuopan lähistöllä, raskasajoneuvojakauma voi hyvinkin koostua lähinnä tukkirekoista tai maansiirtoautoista.

Kokonaistasojen analyysissä tulee myös huomioida ajoneuvojen todellinen keskimääräinen etäisyys mittauspisteistä. Tiettyyn aikaan toiseen suuntaan menijöitä voi olla huomattavasti enemmän kuin toiseen. Pirkkolantiella jakauma vasemmalle ja oikealle menijöiden välillä vaihteli yhtä suuresta kaksi- ja lähes kolminkertaiseen. Nopeusjakauksissa ei havaittu merkittäviä eroja.



Kuva 29. Nopeuksia Pirkkolantien hiljaisella osuudella syksyllä 2007.



Kuva 30. Mikrofonit Nokian Renkaiden koeradalla. Oikean puoleisessa kuvassa näkyy taustalla kaukopisteen mikrofoni.

4.1.2 Sovellettu rullausmenetelmä (CB)

Kontrolloidussa rullausmenetelmässä auto rullasi 40 m pitkän testialueen läpi kytkin pohjassa, jolloin saadaan mitattua lähes pelkästään rengasmelua. Kuvassa 30 näkyvä koe-radan mittausjärjestely oli sama kuin päällystevertailun sovelletuissa ohiajomittauksissa.

Nokian Renkaat Oy:n koeajoradalla Nokialla mitattiin kolmen rengastyypin melua. Renkaat olivat samat kesä-, kitka- ja nastarengas, joiden koko oli 205/55 (leveys/profiili mm) ja vanteen halkaisija 16” eli noin 0,4 m. Autona oli Mercedes-Benz 230C kompres-sor. Mittaukset tehtiin kahdella nopeudella, 50 ja 80 km/h. Koeradalla oli ISO 10844

standardin mukainen referenssipäällyste, joka on periaatteessa vastaava kuin SMA maksimiraekkoolla 8 mm.

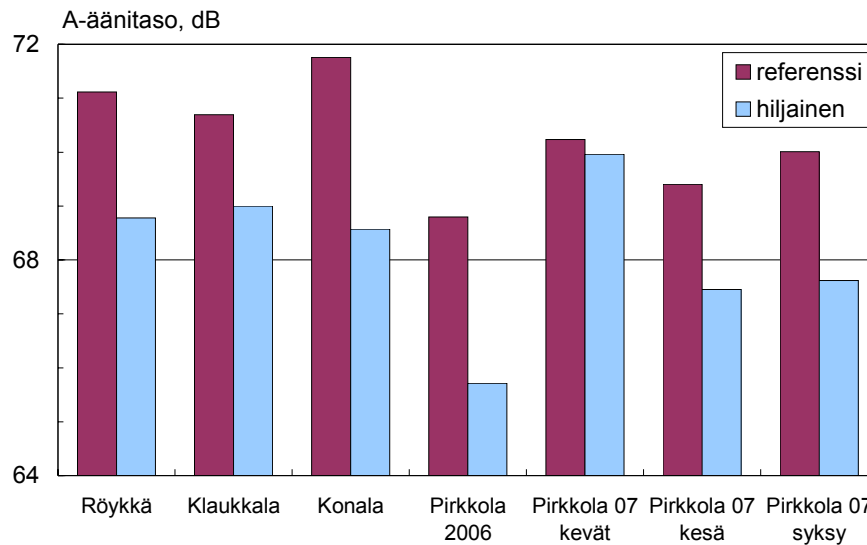
4.2 Tulokset

Mittaustuloksien analysointi tehtiin terssikaistoittain. Kapeakaista-analyysi olisi vaatinut Doppler-ilmion kompensoimista, eikä lisätarkkuudesta olisi välttämättä ollut merkittävästi hyötyä.

4.2.1 Hiljaiset päällysteet

Mitatut hiljaiset päällysteet olivat Pirkkolantietä lukuun ottamatta noin vuoden ikäisiä, eli ensimmäisen talven rasituksen käyneitä. Tällöin niiden ominaisuuksien pitäisi aikaisemman selvityksen [21] mukaan olla vakiintuneet. Hiljaisten päällysteiden perusrakenne oli samanlainen, mutta pienissä yksityiskohdissa ja valmistusmenetelmissä oli eroja. ”Pirkkolantie 2006 hiljainen päällyste” tulokset on mitattu heti kahden viikon kuluttua päällystämisestä. ”Pirkkolantie kevät 2007” on mitattu talven jälkeen, kun vielä nastarenkaat ovat liikenteessä, ja ”Pirkkolantie kesä 2007” tulokset ovat ensimmäisten hellepäivien jälkeisistä mittauksista, jotka ovat vertailukelpoisia Röykän ja Klaukkalan kanssa. Referenssipäällysteet olivat samalla tieosuudella olevia hyväkuntoisia mutta iäkkäämpiä päällysteitä kuin hiljaiset päällysteet. ”Pirkkolantie 2006 referenssi” on vanha päällyste, jonka paikalle tehtiin uusi hiljainen päällyste.

Kuvasta 31 näkyy mitattu hiljaisemman SMA-päällysteen vaikutus melutasoon normaalilla liikennevirralla. Kuvan aineistosta on siivottu häiriöt pois, mutta mukana on raskas liikenne, jonka normalisointi aiheuttaa jonkin verran epätarkkuutta. Kuvassa 37 näkyy Pirkkolantien tilanne, jossa on mukana ainoastaan kevyet ajoneuvot, jolloin tulos hiukan muuttuu. Mitattujen hiljaisten päällysteiden vaikutus liikennemeluun on 2 – 3 dB verrattuna referenssipäällysteeseen. Tarkemmat kohdekohtaiset tulokset on esitetty liitteissä 2 ja 3.

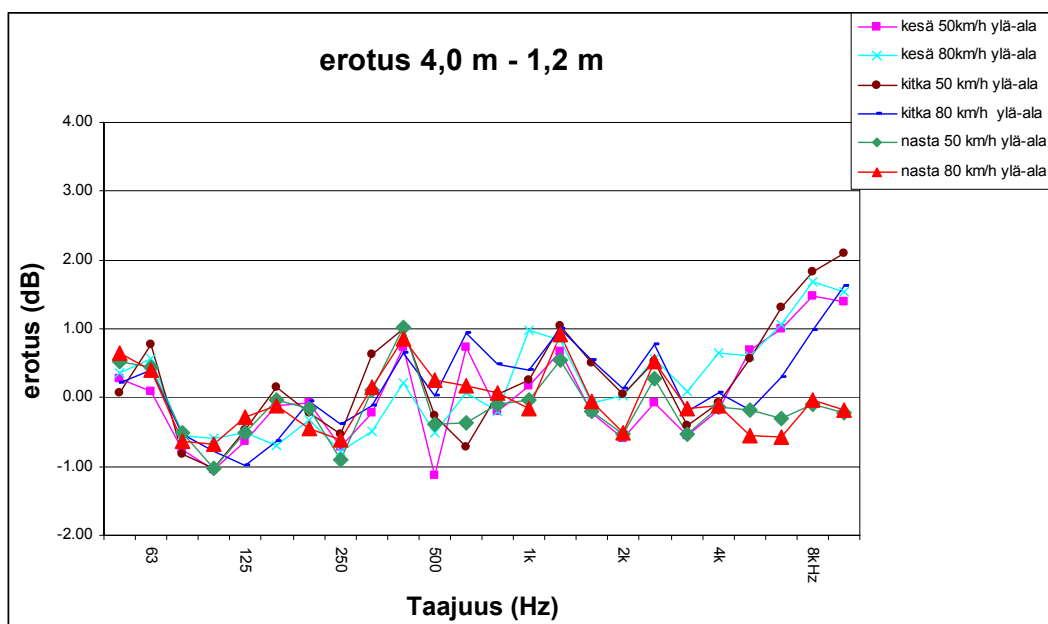


Kuva 31. Päälystevertailun kokonaistulokset koko liikennevirralle, normalisoituina nykyisen pohjoismaisen tieliikennemelun laskentamallin nimellistilanteeseen 67,9 dB:ä.

4.2.2 Rengasmelun suuntaavuus yläviistoon

Kaikissa mittauksissa on havaittavissa, että kun on tehty etäisyyskompensoinnit, niin ylämikrofonin (4 m) tasot ovat hiukan suuremmat kuin keskimikrofonin (1,2 m) ja selvästi suuremmat kuin alamikrofonin (0,2 m). Ilmiö esiintyy korkeilla taajuuksilla. Tyyppillisesti yläpisteen A-painotettu taso oli noin desibelin suurempi kuin keskimikrofonilla. Alamikrofonin tulokseen vaikutti ilmeisen paljon maavaimennus/(maaperän vaikutus). Matalilla, lähinnä moottoriperäisen melun taajuuksilla, alamikrofonin tasot olivat hiukan suurempia.

Henkilöauton rengasmelun vertikaaliseen suuntaavuuteen vaikuttanee lähinnä auton kori. Eri renkailla tai päällysteillä ei havaittu olevan vaikutusta suuntaavuuteen, lukuunottamatta tuoreita nastarenkaita, joissa keskimikrofonin ja ylämikrofonin kohdilla korkeat taajuudet olivat yhtä voimakkaat. Lisäksi ylä- ja alamikrofonin välinen ero korkeilla taajuuksilla oli suurempi nastarenkailla kuin muilla renkailla. Tälle ilmiölle ei löytynyt ilmeistä selitystä.



Kuva 32. Ylä- ja keskimikrofonin välinen erotus eri rengastyypeillä ja eri nopeuksilla. Kukin tulos on keskiarvo kahdeksasta ohituksesta.

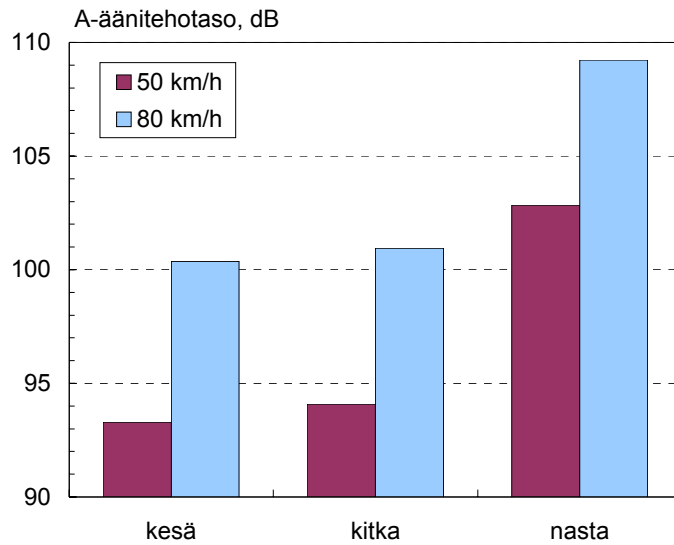
4.2.3 Nastarenkaat vakioliikenteessä ja testiradalla

Kuten jo kuvasta 31 näkyy (Pirkkola kevät), hiljainen päällyste on talvella käytännössä yhtä äänekkäs kuin tavallinen päällyste. Kuvassa 36 on esitetty nasta- ja kesärenkaiden taseroja hiljaisilla SMA-päällysteillä ja tavallisella päällysteellä. Vertailun vuoksi mukana on myös nastarenkaiden vaikutus tavallisessa vakioliikenteessä, jossa joukossa on myös kitkarenkaita ja raskaita ajoneuvoja.

Koeradalla suoritetujen mittauksien perusteella kitka- ja kesärenkaat ovat suunnilleen yhtä meluisat. Taulukossa 8 on rengasvertailun kokonaistulokset, joista havaitaan, että sisäänajamaton nastarenkaat on selvästi äänekkäämpi kuin testin muut renkaat.

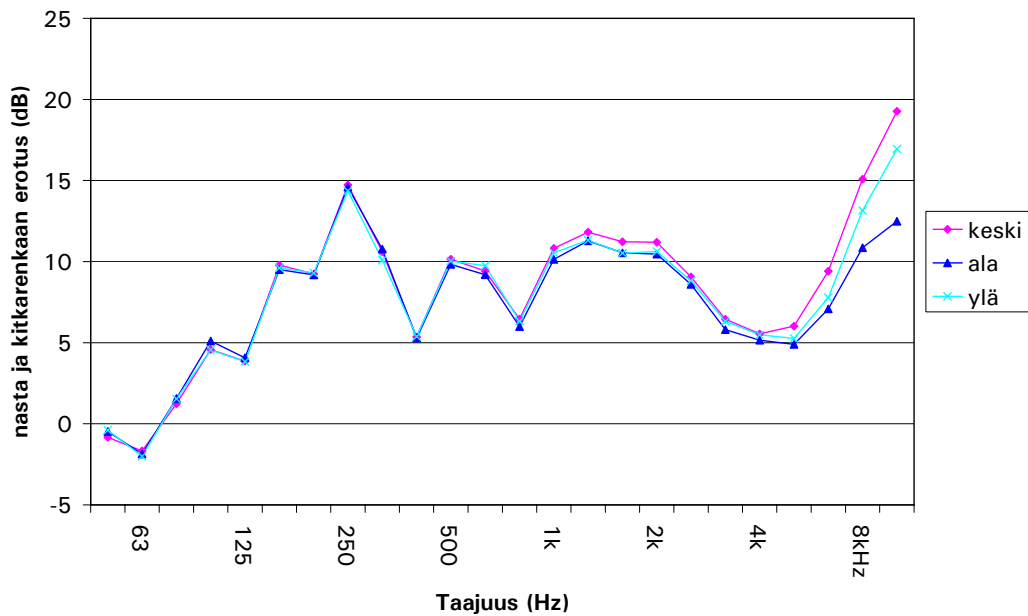
Taulukko 8. Rengasvertailun kokonaistulokset: melupäästöt (A -äänitehotasot L_{WA}) sekä vertailun vuoksi EU:n uuden Harmonoise-laskentamallin nimellislanteen vierimismelun päästöt [dB].

rengas	50 km/h	80km/h
kesä	93,3	100,4
kitka	94,1	100,9
nasta	102,8	109,2
Harmonoise vakio	93,5	99,9



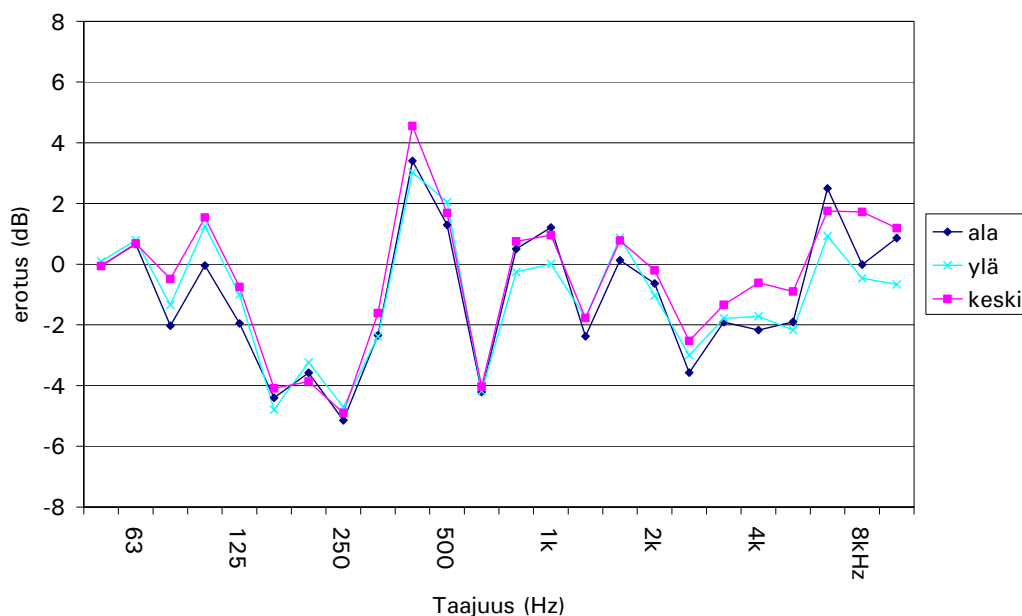
Kuva 33. Renkasvertailun kokonaistulokset koeradalla.

Koeradalla testatut kitka- ja nastarengas olivat ulkoisesti samanlaiset nastoja ja pieniä urituksia lukuun ottamatta. Todennäköisesti kitkarengas oli myös hiukan pehmeämpää kumiseosta. Pääosa meluisuuden erosta johtuu kuitenkin nastoista. Kuvassa 34 näkyy nastojen vaikutus nopeudella 50 km/h.



Kuva 34. Nasta- ja kitkarengaan terssispektrien erotus nopeudella 50 km/h

Nastarenkaan tangentiaalinen rapina tienpäällysteessä aiheuttaa piikin spektriin 6 – 7 kHz kohdasta alkaen, mutta kun tutkitaan kahden samanlaisen nasta- ja kitkarenkaan spektrien erotusta, nähdään helposti renkaan periodisen kuviopalan iskuista aiheutuva voimakas korostus terssitaajuudella 250 Hz (nastarenkaalla). Nastan painautuminen kuviopalaan saa myös kumipalan värähtelemään radiaalisesti, mikä näkyy keskitaajuuksilla. Tämä lienee pääsyy nastarenkaiden äänekkyyteen. Kun verrataan nastojen vaikutusten terssispektrierotuksia nopeuden noustessa 50 km/h:sta 80 km/h, niin nähdään myös, miten periodisen kuviopalan iskun aiheuttama piikki siirtyy nopeuden kasvaessa. Kaavan (6) avulla voidaan laskea testatun renkaan kuvioinnin jakson pituudeksi noin 56 mm, kun nopeudella 13,9 m/s taajuus on 250 Hz. Kun nopeudeksi vaihdetaan 22,2 m/s, saadaan taajuudeksi 400 Hz, joka löytyy selvänä piikkinä kuvasta 35 ja vastaavasti 250 Hz kohdalla on kuoppa. Toinen seikka, joka voidaan kuvasta 35 havaita on, että nastaperäinen melu ei juurikaan voimistu nopeuden kasvaessa.

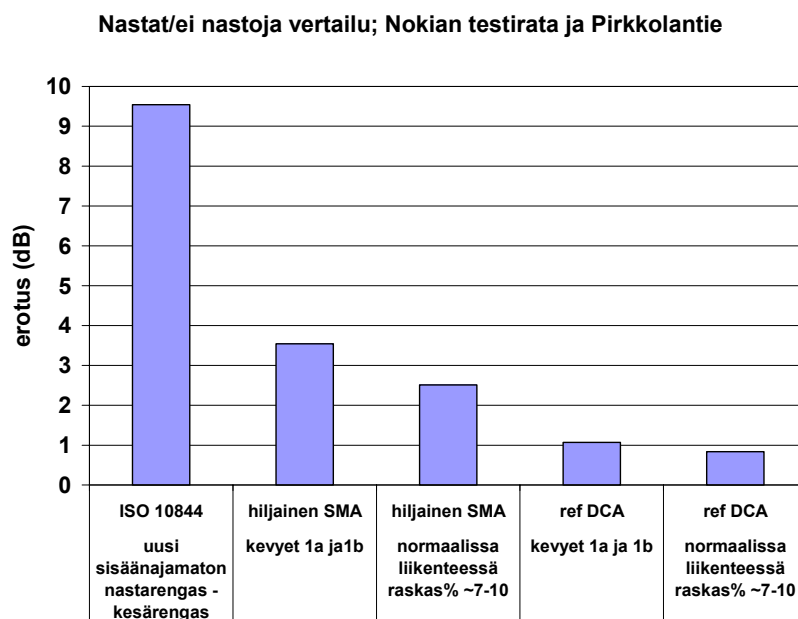


Kuva 35. Nopeuden muutoksen (50→80 km/h) vaikutus nastaperäiseen meluun testatulla renkaalla

Hyvin sileä testirata ja sisään ajamaton nastarengas osoittautuivat hyvin meluisaksi yhdistelmäksi. Kun nastarengas on hiukan kulunut ja joukossa on kitkarenkaalla varustettuja autoja sekä raskaita ajoneuvoja, niin ero ei ole niin suuri. Kuvassa 36 on esitetty nasta- ja keskärenkaiden tasoeroja hiljaisilla SMA-päällysteillä ja tavallisella päällysteellä. Vertailun vuoksi mukana on myös nastarenkaiden vaikutus tavallisessa vakioliikenteessä, jossa on joukossa myös kitkarenkaita ja raskaita ajoneuvoja. Nastojen vaikutus mitatulla

referenssipäällysteellä oli yllättävän pieni.

Pirkkolantiella keväällä 2007 tehtyjen mittauksien perusteella nastarengaskorjaukseen näyttäisi nopeuden lisäksi vaikuttavan vahvasti päällysteen ominaisuudet. Mitatulla hiljaisella päällysteellä nastakorjaus oli noin 2 – 3,5 dB ja referenssipäällysteellä noin 1dB riippuen ajoneuvojakaumasta.



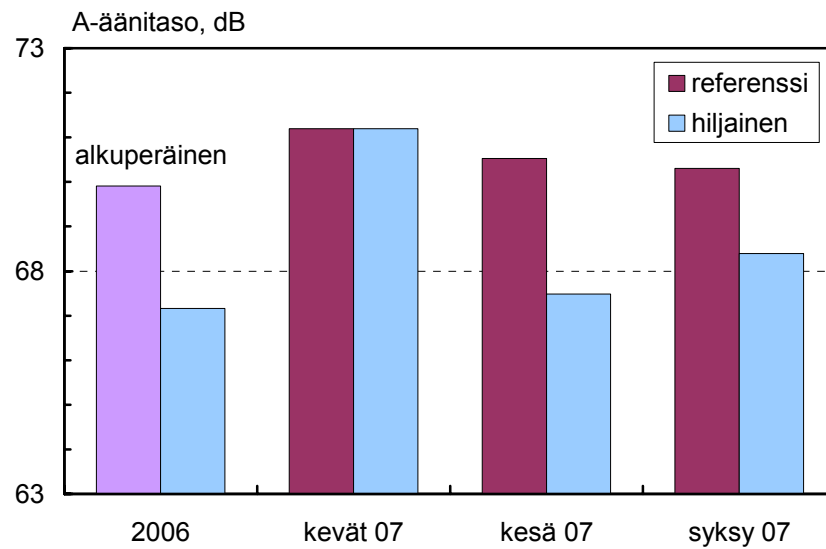
Kuva 36. Nastarenkaiden vaikutus rengasmelun emissioon. ISO 10844 pinnoite on Nokian koeradalta, muut tulokset ovat Pirkkolantielta.

4.2.4 Tiepäällysteen ikääntymisen vaikutus

Hiljaisten päällysteiden ongelma on ollut niiden nopea kuluminen ja hiljaisten ominaisuuksien nopea häviäminen.

Mittauksien ja havaintojen perusteella nykyisten hiljaisten päällysteiden makrorakenne muuttuu talvella karkeammaksi ja on nastarenkailla yhtä äänekäs kuin referenssipäällyste. Nastarenkaiden aiheuttamat tienpinnan rosoisuudet kuitenkin silottuvat ensimmäisten lämpimien päivien jälkeen kun kivet painautuvat pehmenneeseen bitumimassaan. Liitteessä 2 oleva tuoreen hiljaisen päällysteen spektri on muodoltaan pehmeämpi eli poikkeaa muista mitatuista spektreistä siten, että terävä 1 kHz huippu puuttuu. Spektriä on todennäköisesti tasoittanut tien pinnassa oleva tuore bitumi.

Referenssipäällysteen äänekkyydellä on hyvin vähäistä vaihtelua, joka mahtuu mittaustarkkuuteen. Kuvassa 37 näkyy hiljaisen ja referenssipäällysteen ero eri vuodenaikoina kevyillä ajoneuvoilla.



Kuva 37. Pirkkolantien normalisoitu keskiäänitaso kevyillä ajoneuvoilla.

4.2.5 Laskentamallien ja mittaustuloksien vertailua

Nykyisen laskentamallin tulokset laskettiin Datakustik CADNA/A 3.6 –laskentaohjelmalla, ja Nord2000 laskentatulokset ovat peräisin matlab-pohjaisesta ohjelmasta (COMPRO Version 7a, heinäkuu 30, 2002 Birger Plovsing, DELTA Acoustics & Vibration). Koska käytetyt ohjelmat eivät olleet samat, niin maaston mallinnukset poikkesivat toisistaan. Hiljaisella päällysteellä tällä ei ollut suurta merkitystä, koska maasto oli tasainen, mutta referenssipäällysteellä maasto laski noin metrin kaukopisteelle mentäessä. Mitatut ja lasketut tulokset ovat taulukossa 9.

Taulukko 9. Mitattujen ja laskettujen ekvivalenttitasojen (L_{Aeq}) vertailua.

Pirkkola	piste	mitattu	nyky-96	erotus -96	Nord2000	ero. 2000	1996-2000
Kesä 2006 vanha päällyste	keski	67.9	64.9	3.0			
	ylä	68.0	64.7	3.3			
	kauko	59.4	59.4	0.0			
Syksy 2006 hiljainen	keski	66.9	67.3	-0.4			
	ylä	65.9	66.6	-0.7			
	kauko	59.3	60.9	-1.6			
Kesä 2007 hiljainen	keski	63.7	64.6	-0.9	64.5	-0.8	0.1
	ylä	64.0	64.5	-0.5	63.9	0.1	0.6
	kauko	54.8	59.2	-4.4	55.2	-0.4	4.0
Kesä 2007 referenssi	keski	66.7	65.0	1.7	64.4	2.3	0.6
	ylä	66.9	64.8	2.1	63.8	3.1	1.0
	kauko	56.8	59.4	-2.6	55.9	0.9	3.5
Syksy 2007 hiljainen	keski	65.4	64.5	0.9	64.4	1.0	0.1
	ylä	64.9	64.3	0.6	63.7	1.2	0.6
	kauko	57.1	59.0	-1.9	57.3	-0.2	1.7
Syksy 2007 referenssi	keski	66.8	64.4	2.4	63.9	2.9	0.5
	ylä	67.0	64.1	2.9	63.2	3.8	0.9
	kauko	57.7	57.2	0.5			
Konala 2006 hiljainen	keski	66.5	66.4	0.1			
	ylä	66.1	66.4	-0.3			
	kauko	55.5	56.0	-0.5			
Konala 2006 referenssi	keski	67	64.7	2.3			
	ylä	66.8	64.4	2.4			
	kauko	59.2	59.6	-0.4			
Kouvola 2006	piste	mitattu	nyky-96	erotus	etäisyys		
Kotipolku	lähi	67.4	65.7	1.7	17		
	kauko	58.3	60.4	-2.1	42		
Messukatu	lähi	68.3	66.6	1.7	12		
	kauko	58.6	60.7	-2.1	26		

Nykyisen- ja Nord2000-laskentamallin tuloksia ei voi suoraan verrata keskenään, koska Nord2000 malliin voidaan tarkasti syöttää mittaushetken olosuhteet, kun taas vuoden 96 malli pyrkii edustamaan keskimääräisiä olosuhteita. Vaikka Nord2000- mallilla laskisi oletusarvoilla, niin silti tulokset olisivat tarkempia, koska vanhassa mallissa maaperän vaimennus on liian pieni, jolloin sen tulokset edustavat lähinnä kohtalaista myötätuuliti- lannetta. Jos Pirkkolantien kaukopisteen korkeudeksi valitaan 1,8 m sijaan 4 metrin kor- keus, niin laskentamallien välinen ero kutistuisi noin 0,5 dB.

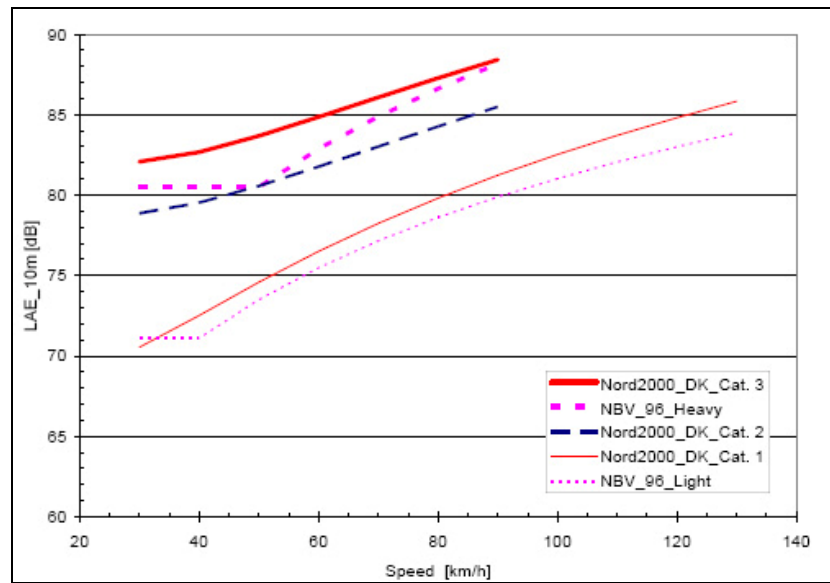
Taulukosta 9 nähdään, että nykyisen laskentamallin henkilöautojen emissioarvot ovat noin 2,5 dB liian pienet. Mitatuista päällysteistä lähinnä hiljaisella päällysteellä saadut

emissioarvot vastasivat laskentamallin arvoja. Vaikka nykyisen laskentamallin ajoneuvojen emissiotasot ovat liian pienet, niin toisaalta malli liioittelee melun leviämistä, eli tietyllä etäisyydellä tiestä (~15 – 25 m) malli antaa oikean arvon. Tätä lähempänä mallin tulos on keskimäärin liian pieni ja kauempana malli antaa todennäköisesti liian suuria arvoja riippuen todellisesta maaperänvaimennuksesta. Lisäksi siinä on vain yksi raskaiden ajoneuvojen ryhmä, mikä vääristää laskentatuloksia erityisesti kaupunkiympäristössä, jossa on paljon kaupunkilinja-autoja. Vastaavia tuloksia on havaittavissa myös aikaisemmin tehdyistä mittauksista Kouvolan seudulla.

Taulukko 10. Mitattu ja nykyisen laskentamallin henkilöauton emissio L_{AE} . Nopeudet 46,3 – 49 km/h.

Pirkkola	ref. päällyste	nyky-96	erotus	hilj. päällyste	nyky-96	erotus
2006	75,5	73,3	2,2	72,9	73,3	-0,4
keväät 07	76,3	72,6	3,7	76,8	73,1	3,7
kesä 07	75,8	73,1	2,8	73,0	73,3	-0,3
syksy 07	75,8	73,3	2,5	73,4	73,1	0,4

Taulukosta 10 nähdään mitattu ja laskentamallin emissiotaso mitatuilla keskimääräisillä ajonopeuksilla. Kuvassa 38 on verrattu nykyisen laskentamallin (NBV_96) emissiotasoa Nord2000-laskentamallin emissiotietoihin. Havaitaan, että myös alkuperäisen Nord2000-laskentamallin emissiotiedot ovat liian pienet, ainakin kevyiden ajoneuvojen osalta, vaikka ne ovatkin hiukan vuoden 1996 arvoja suurempia. Nord2000-mallin emissiotaso on noin 1 dB korkeampi 50 km/h alueella, joten kyseisen mallin emissiotasot ovat vielä noin 1,5 dB referenssipäällysteellä mitattujen arvojen alapuolella. Myös taulukon 8 CB-mittaustulokset antavat viitteitä siitä, että tulevan laskentamallin emissiotasot vastaavat sileällä ja hyväkuntoisella päällysteellä saatuja arvoja.



Kuva 38. Vanhan ja uuden mallin emissiotasot 10 m etäisyydellä [22].

4.2.6 Harmonoise-mallin lähtötietojen vertailua tuloksiin

Seuraavassa taulukossa 11 on verrattu mitattua hiljaisen ja referenssipäällysteen nastakorjausta terssikaistoittain Harmonoisen [11] ja Imaginen [3] kevyille eli luokan 1 ajoneuvoille nopeudella 50 km/h. Alle 125 Hz alapuolella tulokset ovat epäluotettavia ja siellä esiintyy lähinnä moottorimelua. Nastakorjauksella on A-painotettuihin tasoihin merkitystä 500 Hz ylöspäin.

Harmonoisen ja Imaginen nastakorjauksissa on havaittavissa 200 Hz tienoilla selvä korostus, joka saattaa olla peräisin samasta koeradatan tuloksissa [kappale 4.2.3] havaitusta jaksollisesta ilmiöstä (kuva 34). Myös referenssipäällysteen mitatusta nastakorjauksesta saattaa havaita kyseisen ilmiön. Vakioliikenteessä mitattaessa nopeus ei ole vakio, ja rengaskoko ja nastojen lukumääräkin vaihtelee tiettyjen rajojen sisällä, joten on sinänsä mielenkiintoista, jos ilmiö näkyy korjaustermeissä ja mittaustuloksissa myös koeradatan ulkopuolella. Jos kyseessä on sama ilmiö, eräs selitys voisi olla se, että koska nastojen maksimilukumäärä on sidottu rengaskokoon, ja koska renkaiden valmistajat yleensä pyrkivät käyttämään kaikki sallitut nastat, niin nastat osuisivat lähes samalla jaksolla tienpintaan riippumatta renkaan koosta. Virallisten korjaustermien terssispektrin muoto ei muutu nopeuden mukaan vaan on vakio, koska ei ole ollut riittävästi tietoa nopeuden muutoksen vaikutuksesta nastojen aiheuttaman melun terssispektrin muotoon [3].

Taulukko 11. Mitattujen nastakorjauksien vertailua Imaginen ja Harmonoisen korjauksiin.

Taajuus (Hz)	Imagine	Harmo-noise	mitattu hilj.	mitattu ref.	Harm.-hiljainen	Imag.-referenssi
50	0.0	0.0	0.1	2.4	-0.1	-2.4
63	0.0	0.0	-0.5	3.2	0.5	-3.2
80	0.0	0.0	3.6	2.6	-3.6	-2.6
100	0.0	0.0	1.2	0.4	-1.2	-0.4
125	0.9	1.1	0.8	1.7	0.3	-0.8
160	2.3	2.3	2.8	2.4	-0.5	-0.1
200	2.7	3.2	3.2	1.6	-0.1	1.2
250	1.5	0.8	2.9	0.5	-2.0	1.0
315	1.0	-0.1	2.5	0.3	-2.6	0.7
400	1.4	1.9	3.0	0.8	-1.2	0.6
500	2.6	3.3	3.4	1.4	-0.2	1.1
630	2.4	3.2	3.3	1.6	-0.1	0.8
800	1.2	3.2	3.6	1.1	-0.4	0.1
1000	1.1	3.8	3.9	0.7	-0.1	0.4
1250	1.9	3.8	3.8	0.1	0.0	1.8
1600	1.5	2.8	3.5	0.3	-0.7	1.2
2000	1.8	3.7	4.0	1.2	-0.3	0.6
2500	3.1	5.3	4.7	2.7	0.5	0.4
3150	4.0	5.4	4.1	2.9	1.2	1.1
4000	4.1	5.2	5.8	4.2	-0.6	-0.1
5000	4.9	5.3	8.7	7.7	-3.4	-2.8
6300	7.1	7.8	10.3	10.7	-2.5	-3.6
8000	8.7	11.7	12.3	12.9	-0.7	-4.1
10000	11.5	14.9	14.1	15.7	0.8	-4.2

Uusi Imaginen nastakorjaus näyttäisi olevan lähimpänä referenssipäällysteellä saatua arvoa ja vanha Harmonoise-korjaus on lähellä mitattua hiljaisen päällysteen nastakorjausta. Imaginen korjaustermit ovat ainakin korkeilla, yli 4 kHz taajuuksilla, liian pienet. Jos huomioidaan nastojen aiheuttama hiljaisen päällysteen rosoisuus talvella ja yritetään arvioida pelkästään nastojen suoraa vaikutusta, niin oikeat arvot keskitaajuuksilla olisivat hiljaisella päällysteellä jossakin Harmonoisen ja Imaginen välissä eli 2,5 dB luokkaa. Parempi tapa selvittää mikä on nastojen suora vaikutus, ja miten paljon tien karheuden kasvu lisää rengasmelua, olisi mitata kun liikenteessä on suunnilleen yhtä paljon nastatomia ja nastallisia autoja, jolloin kumpaankin rengasryhmään tulee kohtuullisella mittausajalla riittävästi puhtaita ohituksia.

4.3 Virhetarkastelu

Konalantielta ei löytynyt hyvää mittausta paikkaa, joka olisi täyttänyt standardin vaatimuksen, joten Konalan tuloksiin pitää ehkä suhtautua varauksella. Myös Pirkkolantien

vuoden 2006 referenssipäällysteen tulokseen voi suhtautua varauksella, koska mittaus tapahtui eri vuodenaikaan kuin hiljaisen päällysteen mittaus. Lisäksi se oli ensimmäinen mittaus, jolloin ohitusten dokumentointi oli osin harjoittelua.

4.3.1 Muuttuvat olosuhteet

Kun verrataan samassa paikassa ja samoissa olosuhteissa tehtyjä mittaustuloksia keskenään, mittaustarkkuus on vähintään 1 dB. Eri aikoina, mutta samoissa paikoissa tehdyissä mittauksissa, tuloksien tarkkuudet ovat lämpötilan kompensoinnin jälkeenkin hiukan huonompia muuttuvien olosuhteiden takia.

Mittauspisteistä ala- ja kaukopiste olivat eniten alttiita maaperän ja sääolojen muutoksille. Kaukopisteen mittaustulokseen vaikuttaa lähipisteitä enemmän tuuli ja maaperän ominaisuudet. Tuulen suunta ja voimakkuus vaihteli eri kerroilla. Ruohikko taas saattoi olla puolimetristä pitkää heinää tai lyhyttä märkää nurmea. Näiden vaikutus lopputulokseen on maksimissaan noin 2 dB, mutta jos tarkastellaan mittaustuloksia kokonaisuutena, niin kaikissa olosuhteissa, eli myös tilanteissa, joissa äänen etenemiselle on vallinnut suotuisat tai neutraalit olosuhteet, kaukopisteen mitattu tulos on ollut pienempi kuin laskettu tulos. Liitteinä olevista päällystekohtaisista spektrituloksista näkyy vallinneet sääolot sekä maaperän ominaisuudet.

4.3.2 Mittaustuloksien normalisointi

Röykän, Klaukkalan ja Konalan tulokset on normalisoitu olettaen, että raskaan liikenteen meluemissio vastaa pohjoismaisen laskentamallin arvoa. On kuitenkin hyvin todennäköistä, että ajoneuvokoostumukset poikkeavat toisistaan ja laskentamallilla tehty normalisointi antaa väärän painoarvon raskaille ajoneuvoille, jolloin tulokset eivät ole keskenään täysin vertailukelpoisia.

Parempi tapa vastaavissa tilanteissa on tehdä kuten Pirkkolantien mittauksissa, eli erotella pelkät kevyet ajoneuvot, ja verrata niiden emissiota tai normalisoitua keskiäänitasoa keskenään. Jos raskaiden ajoneuvojen jakauma on edustava ja niiden ohituksia on riittävästi, niin silloin myös ne voidaan ottaa tarkasteluun mukaan.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

5.1 Laskentamallit

Tuloksien perusteella nykyisen pohjoismaisen laskentamallin emissiotiedot ovat ainakin kevyillä ajoneuvoilla noin 2,5 dB liian pienet. Laskentamallin referenssitilannetta vastaavat parhaiten mitatut hiljaiset päällysteet.

Laskentamallien pienemmät lähtöarvot selittynevät sillä, että ne on suurelta osin kerätty Tanskassa tehdyistä mittauksista [14]. Tanskassa ei käytetä nastarenkaita, jolloin teitä ei tarvitse rakentaa yhtä karkeista ja kulutusta kestävästä kivilajitteista. Tienpinnat ovat todennäköisesti myös sileämpiä ja parempikuntoisia, koska ne eivät ole altistuneet nastarenkaiden kulutukselle.

Sille, miksi uudet tanskalaisten mittaamat emissiotasot ovat noin desibelin isommat kuin vuoden -96 malliin tehdyissä mittauksissa, ei ole/löydetty ilmeistä selitystä. Mahdollinen selitys voisi olla muutokset ajoneuvokannassa: ajoneuvojen keskimääräinen koko ja renkaiden leveys on kasvanut.

Ennakkoarvailujen vastaisesti uusi Nord2000-laskentamalli antoi tarkemman tuloksen verrattuna nykyiseen laskentamalliin. Tämä tuli osittain sen takia yllätyksenä, koska ei ollut tiedossa, että nykyisessä vuoden -96 mallissa olisi puutteita lyhyillä etäisyyksillä normaaleissa maasto- ja sääolosuhteissa. Nyt saadut laskentamallien kaukopisteiden vertailutulokset ovat suhteellisen karkeita, ja vertailu täytyy tehdä uudelleen kun on mahdollista käyttää samaa laskentaohjelmaa ja maastomallia. Olisi mielenkiintoista mitata myös siten, että käytetyn kaukopisteen lisäksi toinen kaukopiste olisi hiukan etäämmällä ja/tai neljän metrin korkeudella, jolloin melun leviämistä voisi arvioida paremmin.

Tulevissa laskentamalleissa on mahdollista asettaa alueellisia korjauksia emissiotietoihin. Jotta parantunut laskentatarkkuus saataisiin hyödynnettyä, myös emissiotietojen tulee olla mahdollisimman oikeat. Jotta saataisiin riittävän laajat ja luotettavat emissiotiedot, niin mittauksia pitäisi laajentaa eri päällystetyypeille ja nopeusalueille. Myös nastojen vaikutusta pitäisi selvittää laajemmin ja tutkia esimerkiksi onko nastamelu alkutalvesta samanlaista kuin loppupalvella.

Tulevissa laskentamalleissa laskenta tapahtuu keskimääräisissä olosuhteissa, jolloin Suomessa laskettaessa taulukon 6 mukaisilla lämpötilan korjaustermeillä saadaan mitattuja (20 °C referenssilämpötilaan normalisoituja) emissioarvoja suuremmat arvot.

5.2 Päällysteet

Mitatut päällysteet eivät olleet erityisen hiljaisia verrattuna referenssipäällysteisiin. Lähes vastaavaan melutason alennukseen päästään, jos esimerkiksi nopeuksia lasketaan 50 km/h:sta 40 km/h:ssa tai saadaan liikennettä vähennettyä kolmasosa. Toisaalta hiljaiset/hiljaisemmat päällysteet näyttivät säilyttävän hiljaiset ominaisuutensa hyvin, ja jos

niiden kustannukset eivät ole merkittävästi korkeammat kuin tavallisilla päällysteillä, on niiden käyttö helposti perusteltavissa. Vuoden 2008 tammikuussa julkaistavan VIEMELÖPPURAPORTIN mukaan mitatuilla hiljaisilla päällysteillä on myös hyvät kitka- ja pölyemissio-ominaisuudet.

Ikääntymisen seuranta tulisi tehdä myös siten, että se käsittäisi päällysteen koko elinkaaren, jolloin saisi paremman käsityksen kulumisen vaikutuksesta eri päällysteiden meluominaisuuksille. Nyt saadut Pirkkolantien tulokset edustavat paremminkin eri vuodenaikojen tuomaa vaihtelua kuin ikääntymisestä johtuvia muutoksia.

5.3 Nastarenkaiden vaikutus

Melun torjunnan kannalta nastarenkaat asettavat monia haasteita. Ensinnäkin teiden täytyy kestää nastojen kulutusta, joten tiepäällysteet täytyy rakentaa karkeammista kivilajitteista kuin maissa, joissa ei ole nastallisia renkaita. Tällaisilla päällysteillä rengasmeluomissio on suurempi. Myöskään kaikista hiljaisimpia huokoisia päällysteitä ei voida käyttää Suomen oloissa, vaan hiljaiset päällysteet ovat eräänlainen kompromissi hiljaisten ja nastakulutusta kestävien päällysteiden välillä. Lisäksi hiljainen päällyste ei toimi nastarenkailla, vaan se on yhtä äänekäs kuin perinteinen päällyste.

Nopeusrajoituksen alentaminen toimii myös huonosti nastarenkailla, koska niiden logaritmisuuden nopeusriippuvuuden kerroin on merkittävästi pienempi kuin nastattomilla renkailla. Vakioliikenteessä nastojen merkitys on sitä pienempi, mitä korkeampi nopeusrajoitus, ja mitä suurempi osa autoista koostuu kitkarenkaallisista henkilöautoista ja raskaista ajoneuvoista.

Talvella keskimääräiseen rengasmeluemissioon vaikuttaa nastojen ohella tien kosteus (taulukko 5) ja lämpötila. Jos käytetään lämpötilakorjauksena 0,1 dB/°C, niin silloin -10 °C verrattuna +10 °C olisi 2 dB meluisampi tilanne, ja jos talvikaudella lämpötila on nollan tietämillä, niin kuin usein on, niin tien pinnat ovat märkiä sulauksen ja lumen sulamisen takia. Etelä-Suomen pohjoispuolella, missä kaikkia teitä ei puhdisteta lumesta, varsinkin tuore pehmeä lumi vähentää hyvin tehokkaasti rengasmelua.

Näiden mittauksien perusteella uusi Imaginen nastakorjaus vastaa parhaiten tavallisen päällysteen nastakorjausta keskitaajuuksilla. Korkeilla taajuuksilla Harmonoise-mallissa esitetty korjaus on lähempänä oikeata. Hiljaisten päällysteiden kohdalla täytyisi päättää, käytetäänkö niissä omaa nastakorjausta, jolloin tulee huomioitua sekä nastojen suora että niiden epäsuora melun lisäys päällysteen karheutumisen johdosta, vai käsitelläänkö hiljaista päällystettä talviolosuhteissa tavallisena päällysteenä. Jälkimmäisessä vaihtoehdossa tulisi myös varmistua siitä, että kitkarenkaiden emissio vastaa karhealla hiljaisella päällysteellä referenssipäällysteen tilannetta. Yhden mittauksen perusteella on vielä mahdollista sanoa, kuinka yleispätevä saatu tulos on.

6 VIITTEET

1. Lahti, T.; Goutarbes, B.; Markula, T.; Helsingin kaupungin meluselvitys 2007. Helsingin kaupungin ympäristökeskus, Helsinki 2007
2. Lahti, T.; 1997, Akustinen mittaustekniikka, Teknillinen Korkeakoulu, *Akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratorio, raportti 38*, Espoo, 1997
3. Peeters, B.; Blokland, G.; 2007, The Noise Emission Model for European Road Traffic, *IMA55TR-060821-MP10 - IMAGINE Deliverable D11*, (tarkistettu 7.1.2008, ladattavissa sivuilta): <http://www.imagine-project.org/>
4. Sandberg, U.; Ejsmont, J.A.; 2002, Tyre/road Noise Reference Book, *Informex*, Kisa, Ruotsi
5. Keulen W.; van, Duškov M.; 2005, Inventory study of basic knowledge on tyre/road noise, s. 23-54, (ladattu 16.10.2006 sivulta): <http://members.home.nl/vankeulenadvies/pdf/inventorystudy.pdf>
6. Chanoud, Robert C.; 1969, Experimental study of aerodynamic sound from rotating disc, *Journal of the Acoustical Society of America (JASA)*. 45(2) s. 392-397
7. Schaaf, K.; Ronneberger, D.; 1982, Noise radiation from rolling tires – Sound amplification by the “Horn-effect”, *Inter-Noise 1982*, San Francisco
8. Kropp, W.; Bécot, F.X.; Barrelet, S.; 2000, On the Sound Radiation from Tyres, *Acta Acustica*, Vol 86 2000, s. 769-779
9. Graf, R.A.G.; Kuo, C.Y.; Dowling, A.P.; Graham, W.R.; 1999 Horn Amplification at a Tyre/Road Interface – Part I: Experiment And Computation. *Inter-Noise 1999*, Fort Lauderdale, Florida
10. Kollamthodi, S.; Phillips, S.; 2002, Revision of the 10844 vehicle noise test surface, *Inter-Noise 2002*, Dearborn, MI USA
11. Jonasson, H.; Sandberg, U.; Blokland, G.; Ejsmont, J.; Watts, G.; Luminari, M.; 2004, Harmonoise WP 1.1 Source modelling of road vehicles, Technical Report: *HAR11TR-041210-SP10* (tarkistettu 7.1.2008, ladattavissa sivuilta): <http://www.imagine-project.org/>
12. ISO 11819-1:1997. Acoustics — Method for measuring the influence of road surfaces on traffic noise — Part 1: Statistical Pass-by method. *International Organization for Standardization*, Geneve
13. Road traffic noise. Nordic prediction method. TemaNord **1996:525**, *Nordic Council of Ministers*, Kööpenhamina, 1996

14. Andersen, B.; Bendtsen, H.; Noise emission from 4000 vehicle pass-bys, *Inter-Noise 2004, Praha* (tarkistettu 9.1.2008, luettavissa sivulta): http://www.vejdirektoratet.dk/publikationer/VIrap134/html/entire_publication.htm
15. Kragh, J.; Plovsing, B.; 2002, Nordic enviromental Noise Prediction Methods, Nord2000 Summary Report General Nordic Sound Propagation Model and Applications in Source-Related Prediction Methods, *DELTA Report: AV 1719/01, Lyngby, Tanska,*
16. Plovsing, B.; Kragh, J.; 2001, Nord2000. Comprehensive Outdoor Sound Propagation Model. Part 1: Propagation in an Atmosphere without Significant Refraction, *DELTA Report: AV 1849/00, Lyngby, Tanska,* (ladattu 06.09.2007 sivulta): www.delta.dk/nord2000
17. Plovsing, B.; Kragh, J.; 2001, Nord2000. Comprehensive Outdoor Sound Propagation Model. Part 2: Propagation in an Atmosphere with Refraction, *DELTA Report: AV 1851/00, Lyngby, Tanska,* (ladattu 06.09.2007 sivulta): www.delta.dk/nord2000
18. Nota, R.; Robert, B.; Maercke, D.; 2005, Harmonoise WP 3 Engineering method for road traffic and railway noise after validation and fine-tuning, Technical Report: *HAR32TR-040922-DGMR20* (tarkistettu 7.1.2008, ladattavissa sivulta): <http://www.imagine-project.org/>
19. Jonsson, G.; Jacobsen, F.; 2007, A Comparison Of Two Models for Outdoor Sound Propagation: Harmonoise and Nord2000, *19th International Congress On Acoustics 2007, Madrid, Espanja*
20. NT ACOU 109, 2001, Vehicles: Determination of immission relevant noise emission, *Nordtest, Espoo 2001*
21. Kelkka M.; Hyypä I.; Raitanen N.; Valtonen J.; Sainio P.; 2003, *Hiljaiset päällysteet — Tuotevaatimukset ja mittarit*, TKK Tielaboratorion julkaisuja TKK-TIE-A55, Espoo 2003, s.67
22. Kragh, J.; Plovsing, B.; 2006, User's Guide Nord2000 Road, *DELTA Report: AV 1849/00, Hørsholm, Tanska*

LIITE 1. MITTAUS- JA ANALYYSILAITTEISTO

Taulukko 12. Mittaus- ja analyysilaitteisto.

äänitasokalibraattori	Brüel & Kjær	4231
Mittaukset		
kondensaattorimikrofonit	GRAS	26AK
mikrofoniesivahvistimet	GRAS	40AE
mikrofonivahvistin	GRAS	12AA
äänitasomittari	Brüel & Kjær	2230
kondensaattorimikrofoni	Brüel & Kjær	4155
äänitasomittari	Brüel & Kjær	2235
kondensaattorimikrofoni	Brüel & Kjær	4176
DAT-nauhuri	Sony	TCD-D100
DAT-nauhuri	Tascam	DA-P1
Analyysi		
äänilaite	Korg	1212 I/O
jälkikäsittelyohjelma	Adobe	Audition 1.5
spektrianalyysiohjelma	Pioneer Hill	Spectra Plus 3.0

LIITE 2. KOHDEKOHTAISET SPEKTRITULOKSET 2006

Pirkkolantie referenssi (vanha päällyste)

paikka n. 30 m Kangastien risteyksestä itään
nopeus 50 km/h

päivä 28.4.2006
klo 13.55
kesto 47 min
kaukopiste 25 m

lämpö +17 °C
pilvet 0/8
tuuli E, 5–7 m/s
maaperä kuiva

liikenne:

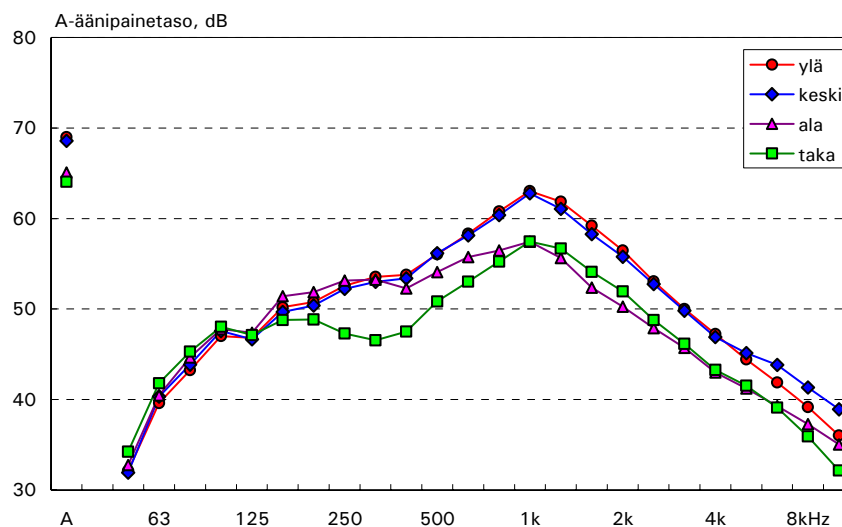
oikealle
kevyet 198
raskaat 15

vasemmalle
kevyet 169
raskaat 14

Normalisoidut A-äänitasot L_{Aeq} [dB]:

ylä 69,0
keski 68,6
ala 65,1

taka 64,1



Pirkkolantie hiljainen (uusi päällyste)

paikka sama paikka kuin edellä
päällystys viikolla 39/2006
nopeus 50 km/h

päivä 13.10.2006
klo 14.45
kesto 32 min
kaukopiste 25 m

lämpö +6 °C
pilvet 4/8
tuuli E, 1–3 m/s
maaperä märkä

liikenne:

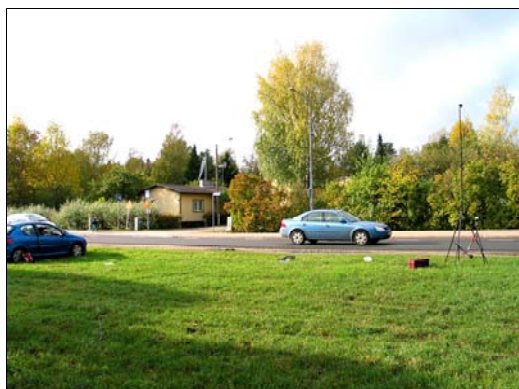
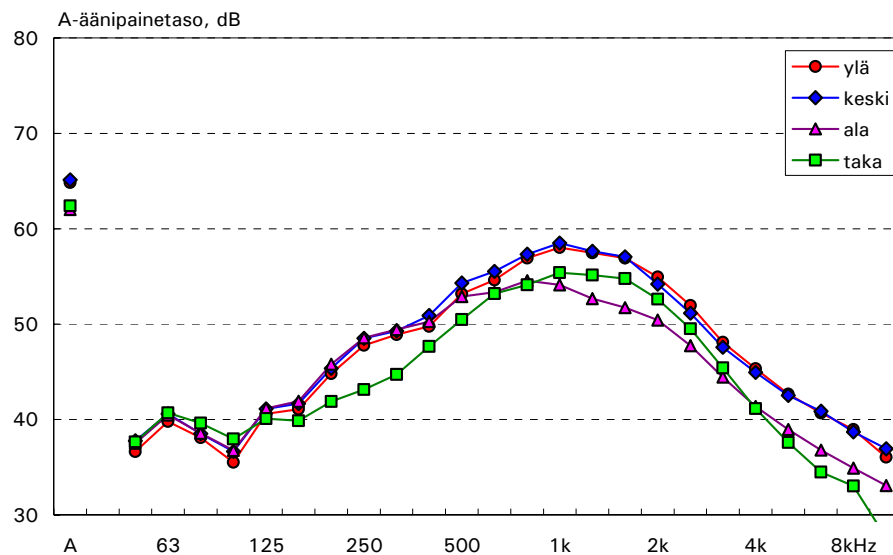
oikealle
kevyet 193
raskaat 9

vasemmalle
kevyet 118
raskaat 12

Normalisoidut A-äänitasot L_{Aeq} [dB]:

ylä 65,6
keski 65,9
ala 62,7

taka 63,1



Röykkä referenssi

paikka Vanhakylä
nopeus 80 km/h

päivä 20.6.2006
klo 13.05
kesto 19 min
kaukopiste 65 m

lämpö +30 °C
pilvet 0/8
tuuli S, 3–5 m/s
maaperä kuiva

liikenne:

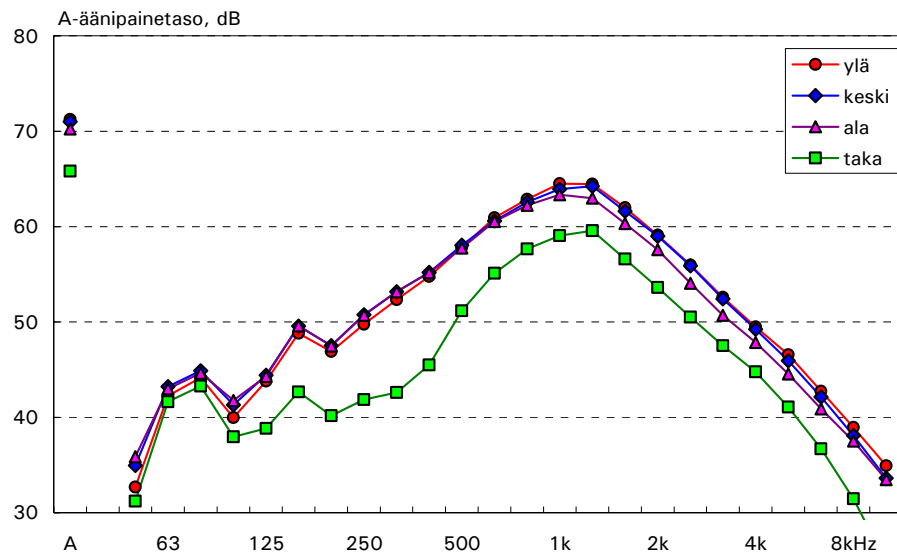
oikealle
kevyet 54
raskaat 5

vasemmalle
kevyet 38
raskaat 6

Normalisoidut A-äänitasot L_{Aeq} [dB]:

ylä 71,2
keski 71
ala 70,2

taka 65,8



Röykä hiljainen

paikka Observatoriontien risteys
nopeus 80 km/h

päivä 20.6.2006
klo 11.40
kesto 29 min
kaukopiste 40 m

lämpö +29 °C
pilvet 0/8
tuuli S, 2–4 m/s
maaperä kuiva

liikenne:

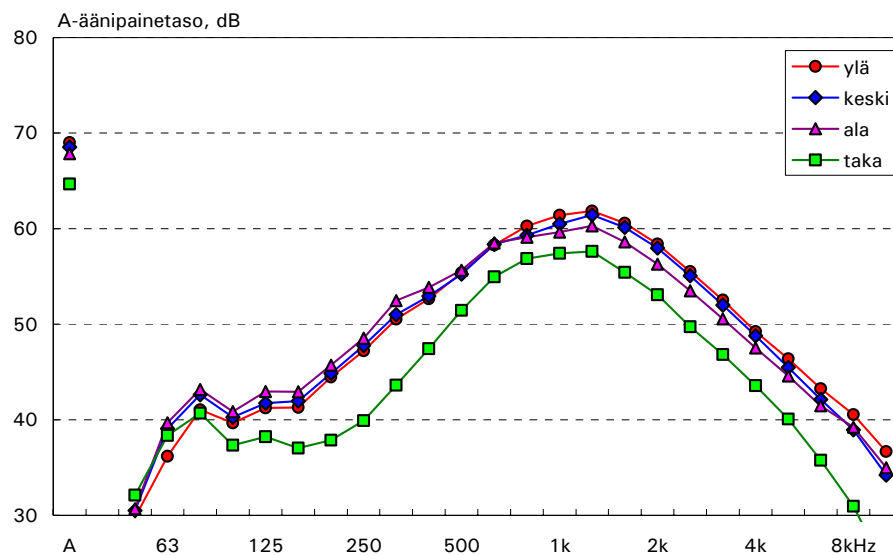
oikealle
kevyet 53
raskaat 10

vasemmalle
kevyet 39
raskaat 2

Normalisoidut A-äänitasot L_{Aeq} [dB]:

ylä 69
keski 68,5
ala 67,8

taka 64,7



Klaukkala referenssi

paikka Ylitolantien risteys
nopeus 60 km/h

päivä 20.6.2006
klo 15.15
kesto 25 min
kaukopiste 30 m

lämpö +31 °C
pilvet 0/8
tuuli S, 4–6 m/s
maaperä kuiva

liikenne:

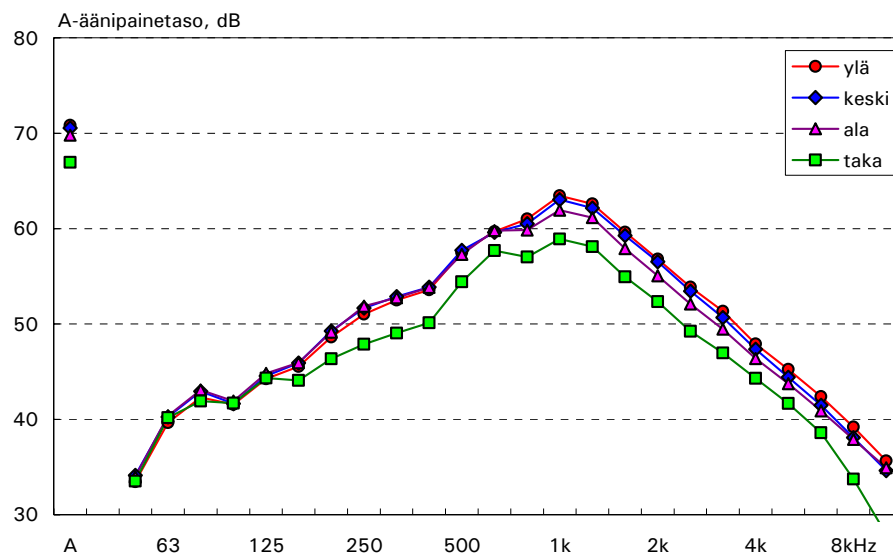
oikealle
kevyet 174
raskaat 7

vasemmalle
kevyet 225
raskaat 9

Normalisoidut A-äänitasot L_{Aeq} [dB]:

ylä 70,8
keski 70,5
ala 69,8

taka 66,9



Klaukkala hiljainen

paikka Klaukkalantie 23:n liittymä
nopeus 60 km/h

päivä 21.6.2006
klo 12.05
kesto 20 min
kaukopiste 30 m

lämpö +28 °C
pilvet 0/8
tuuli SE, 2–4 m/s
maaperä kuiva

liikenne:

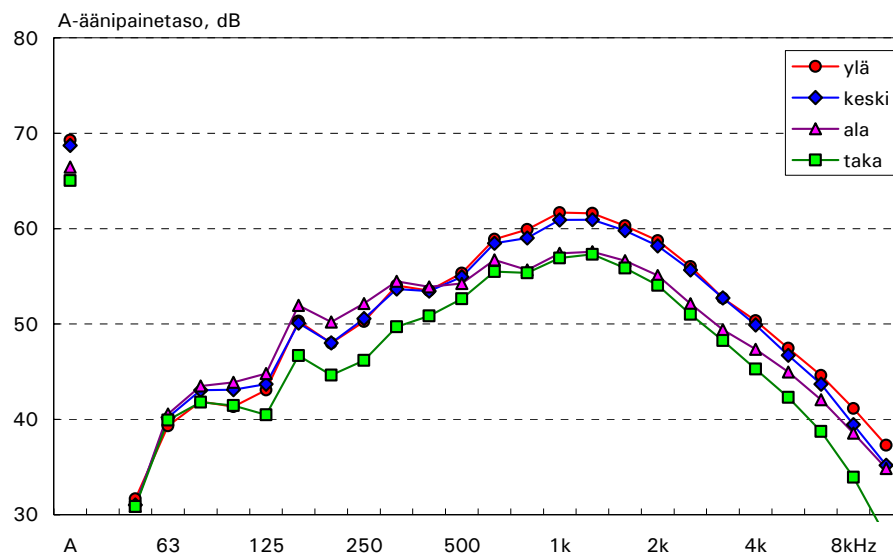
oikealle
kevyet 126
raskaat 17

vasemmalle
kevyet 108
raskaat 10

Normalisoidut A-äänitasot L_{Aeq} [dB]:

ylä 69,3
keski 68,7
ala 66,5

taka 65



Konalantie referenssi

paikka Tähkätie
nopeus 50 km/h

päivä 21.6.2006
klo 13.45
kesto 22 min
kaukopiste 25 m

lämpö +29 °C
pilvet 0/8
tuuli SE, 3–5 m/s
maaperä kuiva

liikenne:

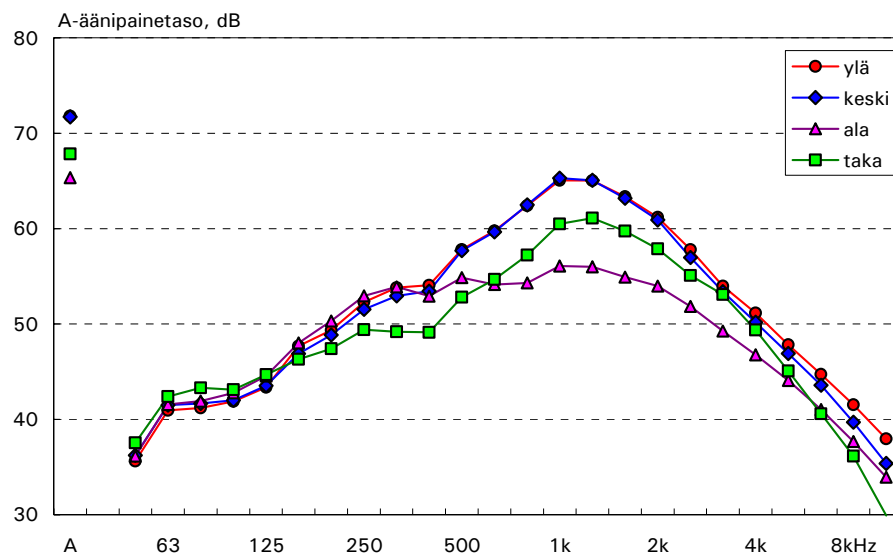
oikealle
kevyet 88
raskaat 5

vasemmalle
kevyet 62
raskaat 4

Normalisoidut A-äänitasot L_{Aeq} [dB]:

ylä 71,8
keski 71,7
ala 65,3

taka 67,8



Konalantie hiljainen

paikka Kokkokallio
nopeus 50 km/h

päivä 21.6.2006
klo 15.55
kesto 22 min
kaukopiste 40 m

lämpö +30 °C
pilvet 0/8
tuuli SE, 3–5 m/s
maaperä kuiva

liikenne:

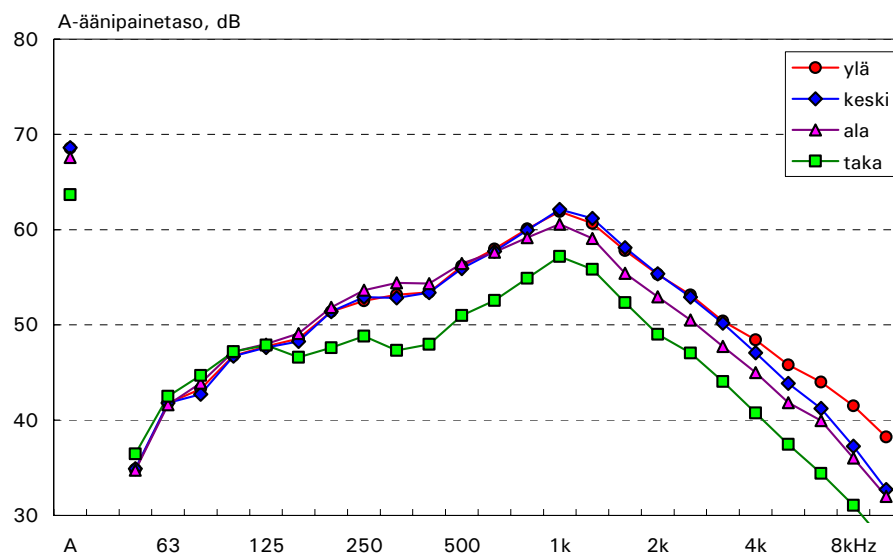
oikealle
kevyet 202
raskaat 6

vasemmalle
kevyet 107
raskaat 7

Normalisoidut A-äänitasot L_{Aeq} [dB]:

ylä 68,5
keski 68,6
ala 67,6

taka 63,7



LIITE 3. SPEKTRITULOKSET 2007 PIRKKOLANTIE

Kevät 07 Hiljainen

päivä 27.3.2007
klo 13.55
kesto 30 min
kaukopiste 25 m

lämpö +16 °C
pilvet 0/8
tuuli SW, 1–2 m/s
maaperä kostea/märkä

liikenne:
nopeus (ka) 49 km/h

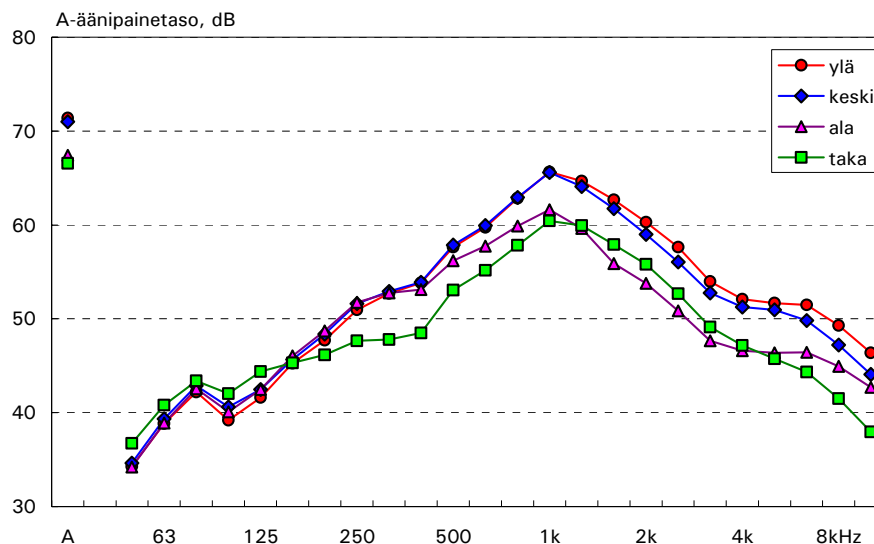
oikealle
kevyet 60

vasemmalle
kevyet 38

Normalisoidut A-äänitasot L_{Aeq} [dB]:

ylä 71,4
keski 71,0
ala 67,4

taka 66,6



Kevät 07 Referenssi

päivä 27.3.2007
klo 15.30
kesto 30 min
kaukopiste 25 m

lämpö +16 °C
pilvet 0/8
tuuli SW, 2–3 m/s
maaperä kostea/märkä

liikenne:
nopeus (ka) 46 km/h

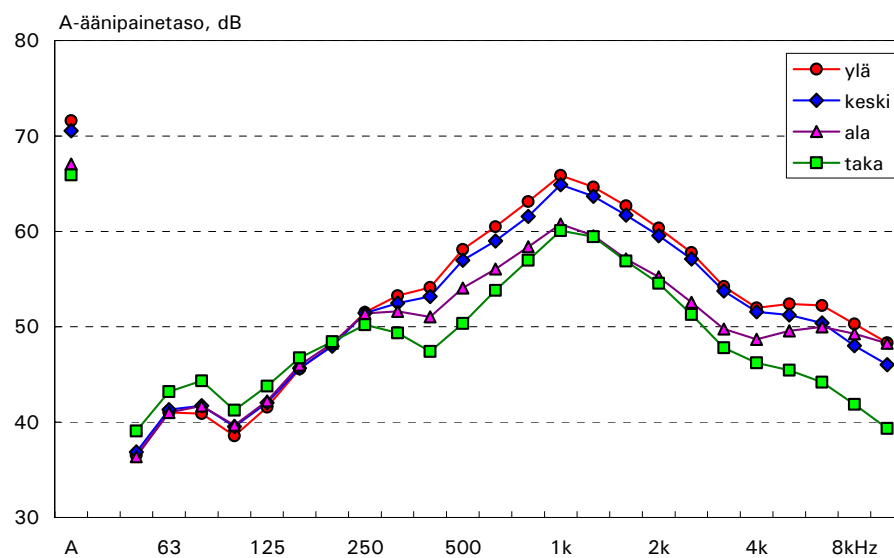
oikealle
kevyet 136

vasemmalle
kevyet 50

Normalisoidut A-äänitasot L_{Aeq} [dB]:

ylä 72,2
keski 71,1
ala 67,0

taka 66,8



Kesä 07 Hiljainen

päivä 8.6.2007
klo 12.55
kesto 30 min
kaukopiste 25 m

lämpö +25 °C
pilvet 0/8
tuuli E, 2–5 m/s
maaperä kuiva (pitkä ruoho)

liikenne:
nopeus (ka) 49 km/h

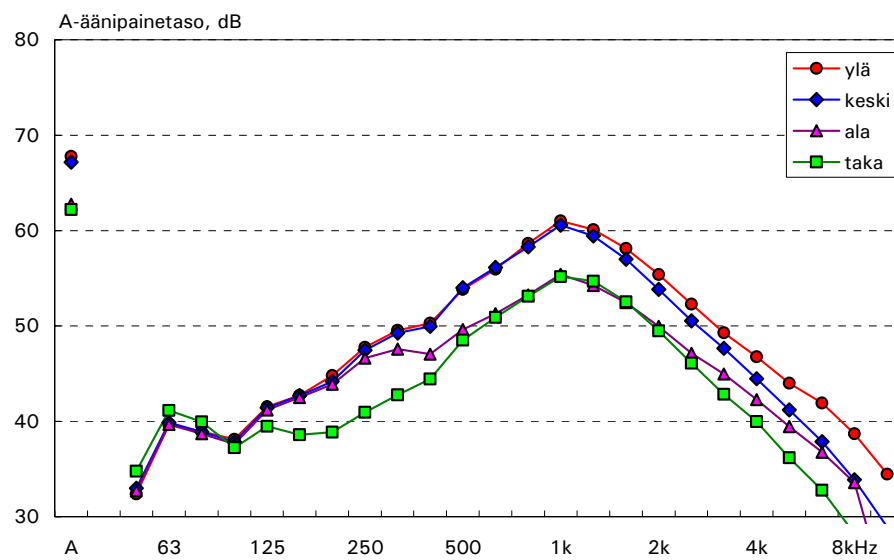
oikealle
kevyet 86

vasemmalle
kevyet 62

Normalisoidut A-äänitasot L_{Aeq} [dB]:

ylä 67,8
keski 67,2
ala 62,8

taka 62,2



Kesä 07 Referenssi

päivä 8.6.2007
klo 14.20
kesto 30 min
kaukopiste 25 m

lämpö +25 °C
pilvet 0/8
tuuli E, 2–5 m/s
maaperä kuiva

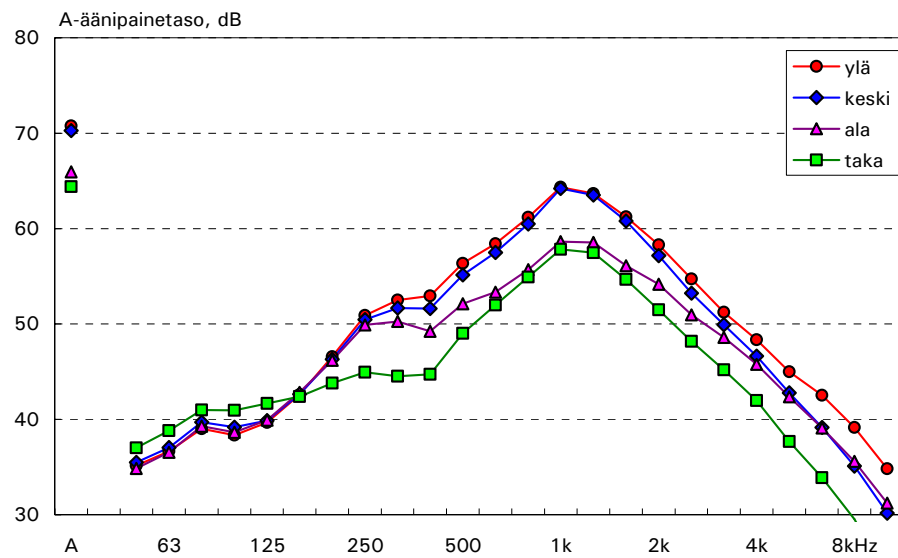
liikenne:
nopeus (ka) 49 km/h
oikealle
kevyet 86

vasemmalle
kevyet 62

Normalisoidut A-äänitasot L_{Aeq} [dB]:

ylä 70,8
keski 70,3
ala 66,0

taka 64,4



Syksy 07 Hiljainen

päivä 25.9.2007
klo 13.55
kesto 30 min
kaukopiste 25 m

lämpö +17 °C
pilvet 0/8
tuuli SW, 5–7 m/s
maaperä märkä

liikenne:
nopeus (ka) 48 km/h

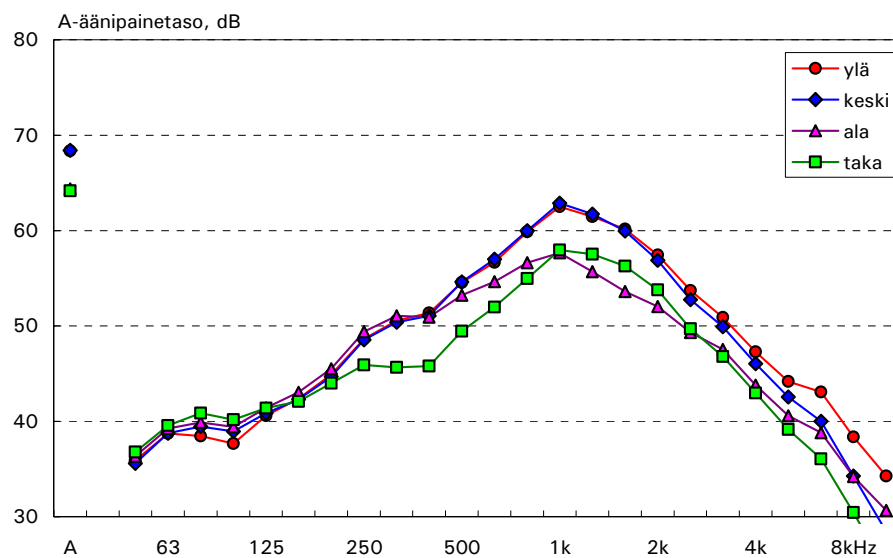
oikealle
kevyet 76

vasemmalle
kevyet 83

Normalisoidut A-äänitasot L_{Aeq} [dB]:

ylä 68,4
keski 68,4
ala 64,4

taka 64,2



Syksy 07 Referenssi

päivä 26.9.2007
klo 11.30
kesto 30 min
kaukopiste 30 m

lämpö +14 °C
pilvet 8/8
tuuli SW, 4–5 m/s
maaperä hyvin märkä

liikenne:
nopeus 49 km/h

oikealle
kevyet 71

vasemmalle
kevyet 52

Normalisoidut A-äänitasot L_{Aeq} [dB]:

ylä 70,6
keski 69,9
ala 66,3

taka 65,6

