



Lauri Mäki

# Henkilöauton sisämelun vaimentaminen

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Ajoneuvotekniikan tutkinto-ohjelma

Insinöörityö

22.3.2022

## Tiivistelmä

Tekijä: Lauri Mäki  
Otsikko: Henkilöauton sisämelun vaimentaminen  
Sivumäärä: 44 sivua + 1 liite  
Aika: 22.3.2022

Tutkinto: Insinööri (AMK)  
Tutkinto-ohjelma: Ajoneuvotekniikan tutkinto-ohjelma  
Ammatillinen pääaine: Autosähkötekniikka  
Ohjaajat: Lehtori Pasi Oikarinen

---

Työssä selvitettiin mittausten perusteella, miten ajoneuvon sisätilojen äänieristys vaikuttaa sisään kuuluvaan melun määrään ja laatuun.

Työ toteutettiin eristämällä ajoneuvon sisäpuolen peltiosat kauttaaltaan butyylikumisella eristysmatolla sekä pehmytmatolla ja vertaamalla äänitason mittaustuloksia ennen ja jälkeen eristysten. Mittaukset suoritettiin pääpiirteittäin Iso 5128 -standardia noudattaen.

Mittaustuloksista huomataan, että sisämelun taso on selkeästi alentunut, minkä lisäksi korkeimmat taajuudet saatiin eliminoitua lähes kokonaan. Kokonaisuudessaan ajoneuvon sisämelu laski muutamalla desibelillä, mitä voidaan pitää hyvänä tuloksena.

Lisätutkimuksia voitaisiin kohdentaa siihen, kuinka paljon enemmän vaimennusmateriaalia kyseiseen ajoneuvoon voisi jälkikäteen lisätä ja vaikuttaisiko se merkittävästi sisämeluun.

Avainsanat: ajoneuvo, äänieristys, henkilöauto, butyylikumi, melutaso, melu, rengasmelu, sisämelu, vaimennus

## Abstract

Author: Lauri Mäki  
Title: Soundproofing of a Station Wagon  
Number of Pages: 44 pages + 1 appendix  
Date: 22 March 2022

Degree: Bachelor of Engineering  
Degree Programme: Automotive Engineering  
Professional Major: Automotive Electronics Engineering  
Supervisors: Pasi Oikarinen, Senior Lecturer

---

This Bachelor's thesis examines how sound deadening material affects the interior noise in a passenger car.

The thesis was started by removing all interior panels from the car, so the bare metal body of the car was available for modifications. After removing grease and dirt off the surface, application of the deadening material could be started.

After the soundproofing was done the car had to be reassembled and given a good amount of test runs for statistically reliable measurements.

It was discovered that overall interior noise levels dropped by few decibels. That can be interpreted as a valid result and as a noticeable difference inside the car.

Keywords: automotive, car, noise insulation, sound deadening, tire noise, vibrations

# Sisällys

1	Johdanto	1
2	Äänen teoria	2
2.1	Taajuus	2
2.2	Resonanssit	3
2.3	Voimakkuus	5
2.4	Paine	7
2.5	Äänten vaimentaminen	8
2.6	Massan vaikutus taajuuteen	9
2.7	Äänilähteet	11
2.8	Äänen havainnointi ja eri painotukset	12
3	Mittausmenetelmät	13
3.1	ISO 5128 -standardi	13
3.2	Käytetyt mittalaitteet	15
3.3	Mittauksen kohde	17
3.4	Taajuusmittausten toteutus	18
3.5	Äänenpainemittausten toteutus	19
3.6	Mittauspaikka	19
4	Vaimennus	20
4.1	Standartplast (StP)	20
4.1.1	StP Black Gold	20
4.1.2	StP AeroFlex	21
4.1.3	StP Biplast 10	22
4.1.4	StP Bitoplast Tape	23
4.2	Vaimennustyö	23
4.2.1	Vaimennustyön perusteet	23
4.2.2	Varapyöräkotelo ja tavaratila	24
4.2.3	Ajoneuvon lattia	26
4.2.4	Sisäkatto	28
4.2.5	Ajoneuvon luukut	30
5	Tutkimustulokset	36

5.1	Äänenpainetasot	36
5.2	Äänentaajuus	38
6	Yhteenveto	43
	Lähteet	44
	Liitteet	
	Liite 1: Taajuusmittauksen parametrit	

## 1 Johdanto

Opinnäytetyön tarkoituksena on tutkia, miten ajoneuvon sisäinen äänimaailma muuttuu erilaisissa ajotilanteissa äänieristyksen jälkeen. Tutkimus suoritettiin yhdellä henkilöautolla, josta mitattiin äänitasoja ennen äänieristystä sekä eristysten jälkeen. Mittauksissa keskityttiin äänenvoimakkuuteen sekä -taajuuteen.

Työssä pyritään selvittämään saatuja mittaustuloksia käyttäen, miten butyyliikumimatto sekä pehmytmatto toimivat henkilöauton äänieristeinä. Tavoitteena on asentaa eristeitä mahdollisimman moneen paikkaan autossa, kuten lattiaan, kattoon sekä luukkuihin.

Työ aloitettiin tekemällä referenssimittaukset alkuperäiskuntoiseen henkilöautoon. Mittauksissa mitattiin äänenvoimakkuutta sekä äänentaajuutta. Tämän jälkeen sisustasta poistettiin kaikki tarvittava materiaali, jotta päästiin käsiksi vaimennettavaan materiaaliin eli runkopeltiin. Huolellisesti suoritettujen vaimennuksen jälkeen ajoneuvo koottiin sisustaltaan vastaamaan alkuperäistä henkilöautoa, minkä jälkeen suoritettiin toiset mittaukset.

Tavoitteena oli selvittää, vaikuttaako äänieristys merkittävästi äänimaailmaan, ja näkyykö se mittauksissa vai ovatko erot havaittavissa lähinnä ihmiskorvalla.

Tutkimuksessa perehdyttiin ainoastaan vaimennusmatolla tehtävien vaimennusten tehoon eikä työssä oteta kantaa renkaiden tai alustan vaikutuksesta sisämeluun.

## 2 Äänen teoria

Ääntä syntyy, kun kappale värisee. Tämä värinä saa aikaan aaltoliikettä ilmassa, jolloin ilmamolekyylit liikkuvat, mikä aiheuttaa liikettä myös sitä seuraavissa molekyyleissä ja tämä saa äänen etenemään. On tärkeää huomata, että ääni voi liikkua myös kiinteässä aineessa samalla periaatteella. (1, s. 1.)

Ääni syntyy siis samalla periaatteella, mutta ei kuitenkaan ole samantekevää, millaisena ääni koetaan. Henkilöautossa voi olla mukavaa kuunnella musiikkia, mutta samaan aikaan toisenlaiset äänet esimerkiksi renkaista tai sisustan resonoinnista voidaan kokea epämiellyttävinä.

Eri äänilähteistä kaikkoavat äänet voivat kantautua eri taajuuksilla ja voimakkuuksilla.

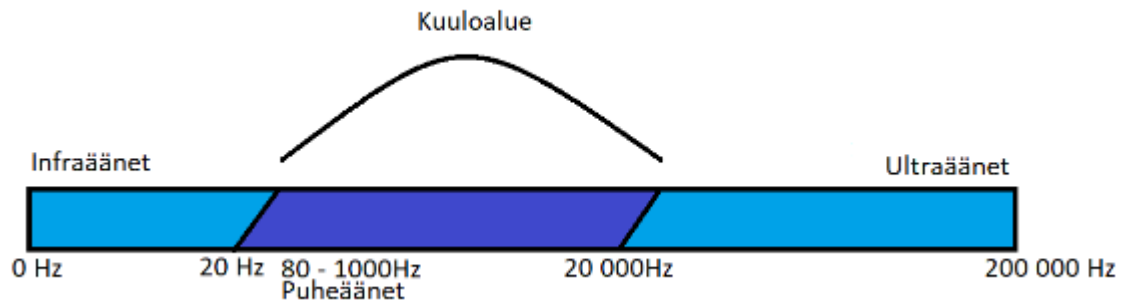
### 2.1 Taajuus

Ääni syntyy värähtelystä ja etenee väliaineessa. Mikäli näitä värähtelyitä havaitaan useita tihentymiä sekunnissa, puhutaan äänelle ominaisesta taajuudesta, eli äänentaajuudesta. Äänentaajuus on tihentymien lukumäärä sekunnissa, ja sen SI-yksikön mukainen yksikkö on hertsi, Hz. Tavallisemmin puhutaan kilohertseistä, ja 1 kHz sisältää tuhat värähtelyä sekunnissa. (2.)

Ihmisen korva aistii värähtelyt äänenä, mikäli värähtelyn taajuus on välillä 16–20 000 hertsiä. Tuota alarajaa harvemmin värähtelevät äänet ovat infraääniä, joita ihminen ei varsinaisesti kuule, mutta ne voivat vaurioittaa kuuloaistia. Tällaisia ääniä kuuluu tyypillisesti teollisuudessa sekä laivoilla, mutta myös henkilöautossa, mikäli sivuikkuna on sopivasti raollaan ajon aikana. Infraääniä voidaan todentaa ainoastaan mittalaitteilla. (2.)

Ihmisen kuuloalueen yläpuolella on puolestaan ultraääniä, joita esimerkiksi eläimet voivat kuulla, muun muassa lepakot (2). Ultraääniä käytetään myös ajoneuvoissa pysäköintititkissa mittaamaan äänen kulkemaa matkaa auton puskurin

ja esteen välillä. Erilaiset äänentaajuudet havainnollistettu kuvassa 1.



Kuva 1. Äänentaajuus (1.)

On syytä panna myös merkille, että ihmisen tuottaman puheäänen taajuusalue on noin 80–1000 hertsiä; miehen äänen taajuus on noin 100 Hz ja naisten äänen tyypillisesti 200 Hz. Mitä korkeampi taajuus äänellä on, sitä korkeampana ääni tulkitaan. (2.)

Tätä tietoa voi käyttää hyödyksi työn myöhemmässä vaiheessa, mikäli pyritään eristämään tämän taajuusalueen äänet, jotta ajoneuvossa olisi miellyttävämpi keskustella.

## 2.2 Resonanssit

Syntyessään ääni on yleensä vaimea, eikä se kannu kauas. Resonanssien kanssa äänet voimistuvat tehokkaasti, jolloin ääni havaitaan helpommin.

Resonansseja on ympärillämme jatkuvasti. Asunnoissa ja ajoneuvoissa on myös resonansseja, ja tavaroilla on ominaisresonanssit. Ajoneuvon resonanssitaajuudeksi kutsutaan sitä taajuutta, jolla taajuudella muut äänet voimistuvat ajoneuvossa. (3.)

Tavallisesti autoissa on pyritty välttämään moottoritilasta lähteviä resonansseja valmistamalla muut, esimerkiksi alustan ja voimansiirron, osakokoonpanot siten, ettei niiden ominaistaajuus ole sama kuin moottorin värähtelytaajuus. Mikäli



resonanssit saavuttavat matkustamon, niin tärinät voidaan vaihtoehtoisesti pyrkiä minimoimaan korin jäykkyyttä lisäämällä. (7, s. 267.)

Mikäli ajoneuvon koria ei haluta muokata jäykemmäksi rakenteensa puolesta, niin taajuuksia voidaan laskea lisäämällä massaa hyvin eristävillä materiaaleilla, jolloin saavutetaan samankaltainen lopputulos, kuin koria jäykistämällä.

Heißing kuvaa ajoneuvon erilaisten osakokonaisuuksien ominaistajuuksia seuraavassa taulukossa.

Taulukko 1. Ajoneuvossa esiintyvien värähtelyjen ominaistajuuksia (5, s. 422).

Oscillatory phenomenon	Frequency (Hz)		Excitations		
	From	To	Roadway	Imbalance	Engine
Body vibrations	0.5...	...5	++		
Freeway hop	2...	...5	++		
Body fore / aft bucking	4...	...10			++
Stutter, shake	7...	...15	++	+	
Axle fore / aft oscillation	10...	...15	++	++	
Ferraria effect, jerk	8...	...20			++
Wheelfight, nibble	10...	...20		++	
Wheel shimmy, wobble				++	
Chatter	7...	...25			
Brake judder	15...	...25		++	
Shiver, jitter	15...	...40			++
Body drone	30...	...70	++	+	++
Axle harshness	30...	...80	++		
Rolling	30...	...300	++		
Powertrain noise	70...	...1000			++

Taulukosta 1 nähdään, että suurimmaksi osaksi ajoneuvossa esiintyy melkoisen matalia taajuuksia, mutta esimerkiksi jarruista voi lähteä vikatilanteissa hyvinkin korkeita taajuuksia. Laskemalla eri puslista ja kannakkeista staattiset jousivakiot sekä dynaamiset jäykkyydet saadaan kuvattua alustan osia värähtelyjen välittäjinä, missä funktiona on herätetaajuus sekä syntyvä äänentaajuus.

Värähtelyitä voidaan perinteisten elastisten kumipuslien sijaan pyrkiä vaimentamaan hydraulisilla kannakkeilla. Tällöin esimerkiksi moottorinkannakkeen rakenteessa voi olla sekä kumia että nestettä, mikä vaimentaa värähtelyitä. Usein tällaisissa konstruktioissa on etuna se, että niiden käyttäytymistä voidaan ohjata tilanteiden mukaan. Usein moottorin joutokäydessä kannakkeet halutaan dynaamisesti pehmeämmäksi ja kovemmissa kiihdytyksissä kannakkeilta vaaditaan jäykkyyttä. (5, s. 426.)

### 2.3 Voimakkuus

Äänenvoimakkuutta mitataan desibelien avulla, jonka tunnus on dB. Ihmisen kuulokynnys on tavallisesti 0 desibeliä, mutta käytännössä tämä raja ylittyy helposti. Esimerkkinä alla olevasta taulukosta 2 nähdään, että pelkästään lehtien havina on jo 10 desibeliä. (4.)

Taulukko 2. Desibeliasteikko tavallisille äänenvoimakkuuksille (4).

<b>Äänenvoimakkuus</b>	<b>Äänilähde</b>
0 dB	Kuulokynnys
10 dB	Lehtien havina
20 dB	Tyhjän huoneen kohina
30 dB	Kuiskaus
40 dB	Tietokoneen käyntiääni
50 dB	Kovaääninen keskustelu
70 dB	Radion kuuntelu
85 dB	Tehdasympäristö
100 dB	Rock-konsertti
130 dB	Kipuraja
> 130 dB	Vaarallinen melu

Desibeliasteikosta on hyvä huomata, että asteikko on logaritminen. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että ihmisen korva havaitsee äänenvoimakkuuden kaksinkertaistuvan, kun voimakkuus kasvaa 10 dB.

Logaritmisuus nähdään tässä tapauksessa myös siitä, että mikäli äänilähde tuottaa 60 dB:n äänen, niin kaksi samankaltaista äänilähdettä tuottaa yhteensä noin 63 dB:n äänenvoimakkuuden. (4.)

## 2.4 Paine

Desibelien logaritmisuudesta johtuen ne otettiin käyttöön alun perin äänenpaineen tilalle niiden helpomman ymmärrettävyyden vuoksi.

Aiemmin mainittu 0 dB:n kuulokynnys tarkoittaisi  $2 * 10^{-5}$  ( $= 20\mu Pa$ ) pascalin painetta ja kuuloa vaurioittava desibelilukema noin 120 pascalin painetta. Nämä lukemat ovat huomattavasti helpommin käsiteltävissä desibeliasteikolla. (1, s. 3.)

Desibelilukemat ovat aina siis ilmoitettuna paineen referenssitason nähden, joka on edellä mainittu  $20 \mu Pa$ . Desibelien ja paineen välinen yhteys muodostuu kaavalla 1:

$$dB = 20 \log \frac{P}{P_0}, \text{ missä } P_0 \text{ on referenssitaso, } 20\mu Pa. \quad (1)$$

Alla olevassa taulukossa 3 havainnollistetaan desibelien ja pascalien yhteyttä toisiinsa.

Taulukko 3. Desibelien ja paineen yhteys (1, s. 3).

<b>dB</b>	<b>P</b>	<b>Äänitaso</b>
<b>-6</b>	$10 \mu Pa$	Ihmiskorvalle kuulumaton ääni
<b>0</b>	$20 \mu Pa$	Kuulokynnys
<b>40</b>	$2000 \mu Pa$	Hiljainen keskustelu
<b>80</b>	$0,2 Pa$	Kovaääninen ihminen
<b>100</b>	$2 Pa$	Vaurioittaa kuuloa pitkässä rasituksessa
<b>120</b>	$20 Pa$	Alkaa olla kivuliasta

## 2.5 Äänten vaimentaminen

Suurimmat epämukavuutta aiheuttavat tekijät ovat sellaiset eri lähteistä tulevat värähtelyt, jotka pääsevät vaimentamattomina tai vain vähän vaimennettuna ajoneuvon matkustamoon asti. Tällaiset värähtelyt aiheuttavat useimmiten melua sekä tärinöitä tai niiden yhdistelmiä. (5, s. 421.)

Haitallisten värähtelyjen synty pisteet sijaitsevat lähes aina matkustamon ulkopuolella, esimerkiksi moottorissa tai voimansiirrossa. Näiden värinöiden syntyä ja siirtymistä sisätiloihin pyritäänkin ajoneuvoissa estämään tähän suunnitelluilla komponenteilla. Ajoneuvojen moottorinkannattimet sekä alustan erilaiset kumista ja metallista valmistetut puslat ovat mukana häiriöäänten vaimennuksessa. (5, s. 421.)

Autonvalmistajat valitsevat tarkkaan alustarakenteiden materiaalit sen mukaan, millaisia värähtelyjä he haluavat välittää kuljettajalle. Alustan kulumisen vaikuttaa myös värinöiden johtumiseen ajoneuvossa; esimerkiksi kumipuslat haurastuvat ikääntyessään eivätkä vaimenna tien pinnasta johtuvia epätasaisuuksia samalla tavalla kuin ennen. Nämä värähtelyt saattavat tuntua tärinäinä taikka meluna riippuen värähtelyn taajuuksista. (5, s. 421.)

- Heiðingin (5, s. 425) mukaan äänten kulkuun ajoneuvossa vaikuttaa pitkälti seuraavat asiat:
- renkaat
- jouset, vakautusjärjestelmä
- iskunvaimentimet ja tärinää poistavat osat
- sähköinen alustansäätö
- jousituksen kitkat
- alustan elastiset puslat ja kiinnikkeet
- moottorin- ja vaihteistonkannattimet
- korin jäykkyys
- äänieristeet
- istuinten jousitus ja vaimennus.

Yksi ajoneuvosuunnittelun haasteista onkin materiaalien ja alustan suunnittelu siten, etteivät elastiset osat menettäisi elastisuuttaan ajan mittaan ja ajoneuvon ominaisuudet muutu alkuperäisestä. (5, s. 428.)

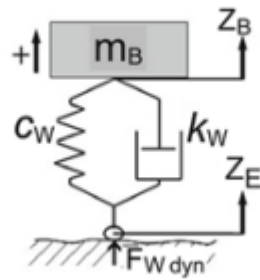
Kumin ominaisuudet vaimentavana tekijänä perustuvat pitkälti äänennopeuteen kiinteässä aineessa. Pehmeässä kumissa ääni etenee noin  $50 \text{ m/s}$ , kun teräksessä ja alumiinissa ääni etenee sata kertaa nopeammin, yli  $5000 \text{ m/s}$ . Kumi-seoksissakin on eroja, sillä kovassa kumissa ääni etenee noin kuusi kertaa nopeammin, kuin pehmeässä kumissa. (5, s. 428.)

## 2.6 Massan vaikutus taajuuteen

Kappaleen värähtelytaajuuteen voidaan vaikuttaa esimerkiksi massaa lisäämällä. Massan lisäys värähtelevään kappaleeseen laskee värähtelyn taajuutta sekä voimakkuutta. Mikäli ajoneuvon moottori värähtelee samalla taajuudella matkustamon ominaistaajuuden kanssa, voidaan matkustamossa kokea suurta epämukavuutta värähtelyjen ja melun muodossa (5, s. 423). Juuri tällaisissa tilanteissa matkustamon pintojen massaa kasvattamalla, esimerkiksi butyylikumi-seoksella, voidaan ulkopuolelta tulevien värähtelyjen taajuutta laskea niin, ettei sitä enää koeta häiritseväksi tai että värinät lakkaavat kokonaan.

Seuraavaksi tarkastellaan hyvin yksinkertaista 1. vapausasteen systeemiä ja siinä massan vaikutusta taajuuteen. Tässä Heißingin (5, s. 74) esimerkissä oletetaan ajoneuvon ainoan jouston tapahtuvan renkaassa. Koko systeemin massa vastaisi autossa yhden renkaan normaalisti kannattelevaa massaa, mutta tässä akselin massa lasketaan ajoneuvon runkoon kuuluvaksi. Seuraavassa kuvassa

on esitetty 1. vapausasteen systeemin malli.

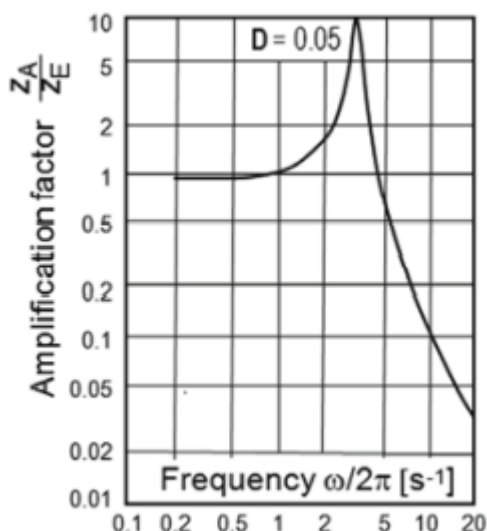


Kuva 2. Ensimmäisen vapausasteen vaimennuksen malli (5, s. 74).

Kuvassa 2 näkyvän systeemin voisi löytää esimerkiksi raskaasta työmaakalustosta, jossa ei välttämättä ole erillistä jousitusta tai iskunvaimennusta. Systeemille voidaan laskea ominaistaajuus  $\omega_e$  kaavalla 2 (5, s. 74):

$$\omega_e = \sqrt{\frac{c_W}{m_B}} \quad (2)$$

Seuraavassa kuvassa näkyy, miten rengas reagoi herätetaajuuteen 1. vapausasteen mallissa.



Kuva 3. Yksimassamallin vahvistusfunktio (5, s. 75).

Kuvasta 3 nähdään, kuinka rajoittuneet vaimennusominaisuudet renkaalla on. Systemin ominaistajuus riippuukin korin ja akselin massasta sekä renkaan jousivakiosta. Mikäli ominaistajuus asettuu 3–4 Hz:n alueelle, se tulisi pyrkiä vaimentamaan tehokkaasti, sillä ihminen havaitsee kyseiset taajuudet epämiellyttäväksi. (5, s. 75.)

## 2.7 Äänilähteet

Heiðingin ym. (2011) mukaan merkittävin tärinöiden ja värähtelyiden lähde on tienpinnan ja renkaan välisessä kohdassa. Rengas seuraa tien pintaprofiilia ja välittää nousut ja laskut alustan kautta ohjaamoon. Renkaan liikehdintään tien päällä vaikuttaa ajoneuvon ominaisuudet, kuten renkaan koko, jousittamattoman massan määrä sekä alustanosien muodonmuutokset

Toisaalta Sheng (7, s. 288) toteaa, että auton sisään kuuluvan melun aiheuttaa isompi kokonaisuus, johon kuuluu moottorissa syntyvät mekaaniset äänet, kuten sylinteristä tulevat äänet, venttiilikoneisto, apulaitteet ja hihnat, polttosysteemin ruiskutusjärjestelmä sekä kampiakselin välitön läheisyys. Sisämeluun vaikuttavat myös muut äänet, kuten rengas- ja tiemelu, ilmanvastus, ilmanotto,



pakoäänet, vinkunat ja rätinät, voimansiirron äänet sekä polttoaineen palamisesta syntyvä ääni.

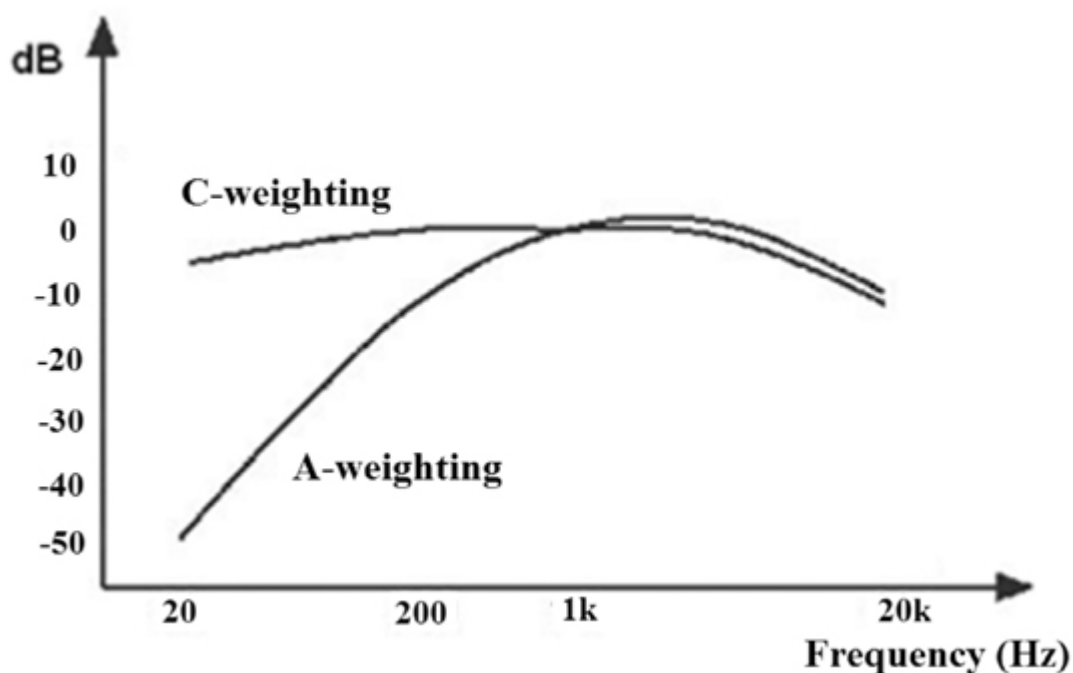
## 2.8 Äänen havainnointi ja eri painotukset

Aiemmissa luvuissa on käynyt ilmi, että äänenvoimakkuus on ihmisille subjektiivinen kokemus. Tätä varten on pyritty kehittämään erilaisia painotuksia äänenvoimakkuusmittauksiin, jotta saataisiin tarkemmat tulokset erityyppisissä olosuhteissa.

Ihminen havaitsee parhaiten äänet, joiden taajuudet ovat 250 Hz – 8000 Hz:n alueella. Erityisesti alle 100 Hz:n taajuudet ovat vaikeammin havaittavissa. Näiden kuuloalueen ominaisuuksien myötä pyrittiin simuloimaan äänimittareilla ihmiskorvaa, jonka seurauksena kehitettiin A, B ja C -suotimet.

A-suotimella pyritään simuloimaan ihmiskorvan kuuloaistia erityisesti alhaisilla, alle 55 dB:n, äänenpaineilla. A-suodinta käytetään paljolti melumittauksissa. B- ja C-suotimet kehitettiin pääasiassa yli 55 dB:n äänenpaineille ja erityisesti C-suodinta käytetään äänentaajuusmittauksissa. Yleinen trendi näyttää siirtyvän

laajalti kohti A-suotimen käyttöä mittauksissa. (7, s. 35.) Kuvassa 4 näkyy A- ja C-suotimien välinen yhteys.



Kuva 4. A- ja C-painotukset Hz/dB-asteikossa (7, s. 36).

Tuloksia tarkasteltaessa on syytä ottaa huomioon, millä suotimella mittauksia on tehty. Suotimia on myös mahdollista simuloida jälkikäteen kertaalleen mitattuun aineistoon.

### 3 Mittausmenetelmät

#### 3.1 ISO 5128 -standardi

Tehdyt mittaukset tehtiin pääpiirteittäin seuraten International Organization for Standardization (ISO) -standardia numero 5128.

Standardissa säädetään käytettävistä mittalaitteista ja mittaustavoista. Mittalaitteet täyttivät standardin vaatimat arvot, mutta muutoksia tehtiin mittausten käytännön toteutuksiin. Standardin luvussa 7 todetaan, että tienpinnan tulisi olla kova sekä mahdollisimman sileä ja tasainen. Tehdyissä mittauksissa asfaltin

pinta oli kulunut, minkä lisäksi mittaradalle tuli pientä nousua ja laskua. Nämä eivät kuitenkaan vaikuta suuresti tutkimustuloksiin, sillä kaikki vertailukelpoiset mittaukset suoritettiin samoissa paikoissa.

Standardissa säädetään myös mikrofonin sijainnista auton sisällä. Tutkimuksessa oli käytössä vain yksi mikrofoni, minkä takia takapenkkien sekä tavaratilan mittaukset jätettiin toteuttamatta. Kuvassa 5 näkyy standardin mukainen sijainti mikrofonille.

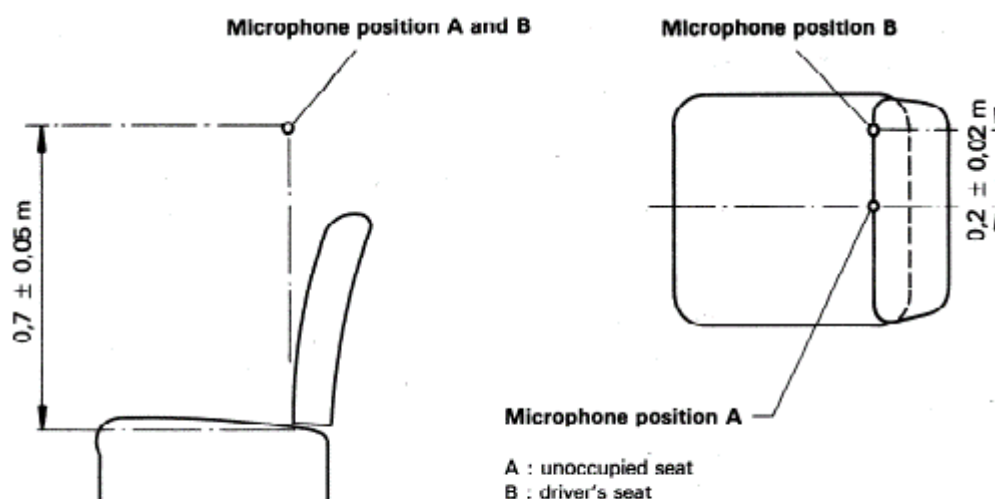


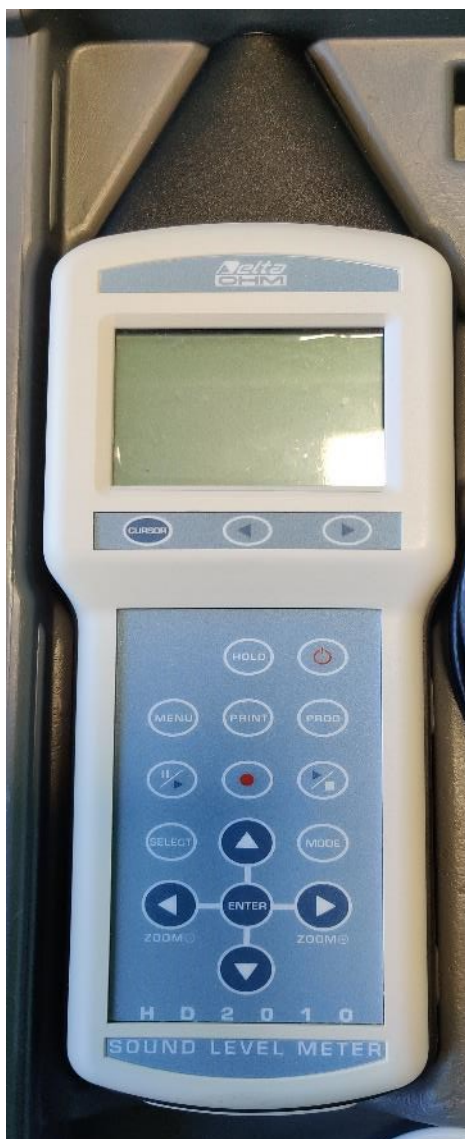
Figure – Microphone position with respect to a seat

Kuva 5. ISO 5128 -standardin mukainen sijainti mikrofonille sisämelumittauksissa

Standardissa on erikseen mittaukset täyskiihdytyksille, mutta niihin ei paneuduttu tässä tutkimuksessa.

### 3.2 Käytetyt mittalaitteet

Testaukseen valikoitui käytettäväksi italialaisvalmisteinen Delta Ohmin HD 2010 -desibelimittari sekä laitteen mittauksia analysoivat ohjelmistot DataLog5 ja NoiseStudio samalta valmistajalta. Tutkimuksessa käytetty äänimittari näkyy kuvassa 6.



Kuva 6. Delta Ohm HD2010 -äänitasomittari.

Mittauksissa käytössä olleet parametrit ovat luettavissa liitteestä 1.

Desibelimittari kalibroitiin Delta Ohmin HD 9101 -kalibrointilaitteella (kuva 7) ennen mittauksia. Kalibrointi tehtiin 94 desibeliin 1000 Hz:n taajuudella. Kalibrointina mittari kykenee 0,5 dB:n tarkkuuteen.



Kuva 7. Delta Ohm HD9101 -kalibrointilaitte

Äänenvoimakkuutta mitattaessa käytettiin nopean intervallin mittauksia, jossa äänimittari poimii ympäristön arvot kahdeksan kertaa sekunnissa, minkä jälkeen se näyttää pyydetyt arvot valittujen parametrien mukaisesti, esimerkiksi keskiarvot, minimi ja maksimi.

Äänentaajuutta tutkittaessa mittari laskee keskiarvon ennalta määritetyille taajuusalueille oktaaveittain, alkaen 16 Hz:n taajuudesta päättyen 16 kHz:iin. Oktaavilla tarkoitetaan taajuusaluetta, jonka aikana taajuus kaksinkertaistuu. Esimerkiksi taajuusväli 16 Hz – 32 Hz on yksi oktaavi samalla tavalla kuin 220 Hz – 440 Hz.

Sekä mittari että kalibrointilaitte ovat hyväksytyjä luokan 1 tarkkuuteen saakka standardien IEC 60651:2001, IEC 60804:2000, IEC 61672-1:2002, IEC 61672-1:2013 sekä ANSI S1.4–1983 mukaisesti.

Mittaukset suoritettiin edellä kuvatulla kokoonpanolla, minkä jälkeen mitattu data tuotiin laitteen muistista Windows-pohjaiselle kannettavalle tietokoneelle aineiston jälkikäsittelyä varten. Datan jälkikäsittely tehtiin pääosin Delta Ohmin omilla ohjelmistoilla, mutta etenkin DeltaLog5:n ikä näkyi ohjelmiston helppokäyttöisyyden puutteissa, sillä ohjelman viimeisin päivitys on vuodelta 2004. Microsoft Exceliä käytettiin datankäsittelyyn, koska sen oli huomattavasti käyttäjäystävällisempi ja dynaamisempi ohjelmisto.

Varsinaisten mittausten lisäksi tuloksia verrattiin myös subjektiivisesti korvakuvalla. Lisäksi kuunneltiin myös sitä, kuinka hyvin ohi ajavien autojen äänet kuuluvat ajoneuvon sisätiloihin, sekä sitä, kuinka paljon moottorin käyntiääni kuuluu matkustamoon eri kierros- ja ajonopeuksilla.

### 3.3 Mittauksen kohde

Vaimennettavaksi ajoneuvoksi valikoitui vuoden 2008 Volkswagen Golf -henkilöauto farmarimallisena. Moottorina toimi kaksilitrainen turbodiesel, ja voimansiirrosta vastasi manuaalivaihteisto. Tarkemmat tekniset tiedot on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Vaimennettavan ajoneuvon tiedot.

<b>Merkki</b>	Volkswagen
<b>Malli</b>	Golf
<b>Vuosimalli</b>	2008
<b>Käyttövoima</b>	Diesel
<b>Moottorin iskutilavuus</b>	1968 cm <sup>3</sup>
<b>Sylinterien lukumäärä</b>	4
<b>Mittarilukema</b>	235 000 km
<b>Vaihteisto</b>	Manuaali

Ajoneuvossa oli mittausten suorittamishetkellä Nokian Nordman 7 -nastarennat, joiden rengaspaineiden vahvistettiin ennen mittauksia olevan 2,2 baaria. Rengaskoko oli 205/55 R 16 94 T XL, jossa 205 kertoo renkaan leveyden millimetreissä ja 55, että renkaan korkeus on 55 % leveydestä. Merkintä R kertoo renkaan rakenteen, tässä tapauksessa vyörengas, ja luku 94 kuormitusluokan. T on nopeusluokka, jossa suurin sallittu nopeus on 190 km/h. XL-merkintä tarkoittaa korotettua kuormitusluokkaa.

### 3.4 Taajuusmittausten toteutus

Mittaukset pyrittiin toteuttamaan ennen ja jälkeen äänieristyksen toisilleen hyvin samankaltaisissa olosuhteissa samoja mittaustapoja käyttäen. Mittaustapa muistutti hyvin läheisesti Tekniikan Maailman käyttämää tapaa mitata ajoneuvon sisämelua.

Mittausten aikana kuljettaja pyrki ajamaan tasaista nopeutta vakionopeudensäädintä tarvittaessa apunaan käyttäen. Apukuljettaja toimi mittaajana ja hallinnoi mittalaitteita siten, että mittausaikana olisi kaikilla mittauksilla vähintään 30 sekuntia.

Erillisissä taajuusmittauksissa käytössä oli C-painotus, koska se ei pyri vastaamaan ihmiskorvan kuuloaluetta. Tällöin mittaustuloksissa ei tapahdu leikkauksia, vaan äänentaajuudet saadaan selvitettyä tarkemmin ja virheettömämmin.

Ennen mittauksia sammutettiin ilmastointi, radio sekä kaikki muut mukavuuslaitteet. Ajoneuvosta poistettiin myös kaikki ylimääräiset mittauksiin kuulumattomat esineet.

Taajuusmittaukset suoritettiin 60, 80, 100 ja 120 kilometrin tuntinopeudella. Nämä mittaukset toistettiin kolme kertaa, jolloin tutkimukselle saatiin parempi tilastollinen pätevyys eivätkä yksittäiset mahdolliset virhemittaukset vaikuttaneet tuloksiin niin merkittävästi. Mittari oli sijoitettu kuljettajan ja apukuljettajan penkkien väliin kuljettajan korvan korkeudelle.

### 3.5 Äänenpainemittausten toteutus

Äänenpainemittaukset suoritettiin muutoin samalla tavalla kuin taajuusmittaukset, mutta äänimittariin laitettiin A-suodin päälle, koska se vastaa lähinnä ihmisen kuuloaistiin perustuvaa mittaustapaa ja sama tapa on laajalti käytössä myös suurilla autonvalmistajilla. Nämä mittaukset toteutettiin 10 km/h -välein nopeuksilla 10–120 km/h.

Subjektiiivisesti arvioitavat kohteet olivat lähinnä hieman poikkeavia tietyypppejä, kuten soratie, mukulakivikatu sekä päällystetty tie, jonka päällä oli hiekoitushiekkaa talven jäljiltä. Sisätilaan kantautuvia resonansseja ja ilmavirran aiheuttamaa ääntä tulkittiin myös subjektiiivisesti.

Kaikki mittaukset toistettiin sellaisenaan myös vaimennusten jälkeen.

### 3.6 Mittauspaikka

Mittauspaikaksi valittiin kantatie 50 sekä Katriinantie Vantaalla. Kummassakin mittauspaikassa tehtiin omat mittauksensa nopeusrajoitusten puitteissa. Huomioitavaa oli, että asfaltit olivat erittäin kuluneet mittauspaikoilla.

Vaimennusten jälkeen mittaukset toistettiin samoilla paikoilla samoja kaistoja ajettaessa.

Tieosuus on päällystettyä asfalttietä. Mittausten aikana tie oli kuivahko, mutta paikoitellen tienpinnassa näkyi kosteutta, mikä ei näkynyt mittaustuloksissa, eikä sitä kuullut auton sisään ajettaessa. Muuta liikennettä tiellä ei mittausaikana ollut.



## 4 Vaimennus

### 4.1 Standartplast (StP)

Itse vaimennukseen valikoitui venäläisen Standartplastin valmistamat materiaalit. Näihin tuotteisiin päädyttiin niiden hyvien ominaisuuksien ja aiempien käyttäjien antamien arvostelujen perusteella. Valintaa puolsi myös autohifin erikoisliike, joka osasi neuvoa juuri oikeanlaisten tuotteiden valitsemisen kyseiseen projektiin.

#### 4.1.1 StP Black Gold

StP Black Gold on alumiinipäällysteinen butyylikumista valmistettu matto (kuva 8). Matto on 2,3 mm paksua, ja siinä on toisella puolella valmiina liimapinta, mikä helpotti asennusta. Toinen puoli on päällystetty mustalla kuvioidulla alumiinilla, joka kestää sekä öljyä että vettä.



Kuva 8. Black Gold -pohjamatto, jota voi käyttää myös ilman muita mattoja.

Tuote asennettiin öljystä ja muusta liasta huolellisesti puhdistetulle pinnalle rullaamalla tuotteen päältä erillisellä pienellä telalla kohtalaista painetta kohdistuen itse mattoon.

#### 4.1.2 StP AeroFlex

AeroFlex on pehmeä, erittäin kevyt, vettä ja öljyä hylkivä matto, jolla on korkea lämmöneristyskyky. Tässä tuotteessa on toisella puolella pitävä liimapinta. Mattoa käytettiin ajoneuvossa kahden paksuisena, 6 mm:n sekä 10 mm:n paksuisena eri käyttökohteissa. 10 millimetriä paksua mattoa laitettiin kaikkialle, mihin se helposti mahtui, esimerkiksi kattoon ja etuoviin. Ohuempaa mattoa asennettiin ahtaampiin paikkoihin, kuten takaoviin ja lattiaan. Kuvassa 9 näkyy päällekkäin AeroFlex 10 ja 6.

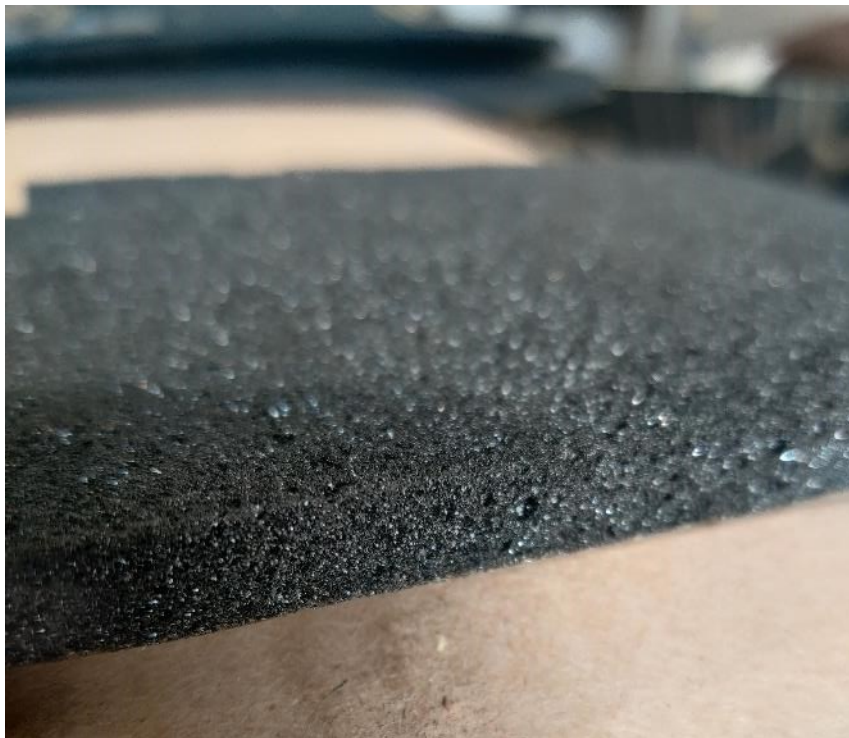


Kuva 9. Alempana 10 mm:n ja ylempänä 6 mm:n paksuista AeroFlexiä.

Tätä mattoa asennettiin pääosin vain Black Goldin päälle tuomaan lisää vaimennustehoa ja vähentämään resonointeja. Tuote asennettiin painamalla liimapintaa tukevasti alustaa vasten niin, ettei maton alle jäisi ilmakuplia. Lopuksi mattoa rullailtiin telalla, jotta voitiin varmistua liiman kiinnityksestä.

#### 4.1.3 StP Biplast 10

Biplast-matto on kaikista työhön käytettävistä matoista huokoisinta ja täten kevyintä, koska se on elastista polyuretaania, jonka kääntöpuolella on liimapinta. Työhön käytettiin tätä mattoa ainoastaan 10 millimetrin paksuisena, mutta sitä saa myös eripaksuisina. Kyseessä on elastinen polyuretaani, joka puristuu parhaimmillaan noin yhden millimetrin paksuiseksi. Tämä ominaisuus tekee matosta hyvän paikkoihin, joihin ei välttämättä mahdu paksumpaa ja raskaampaa mattoa. Kuvassa 10 näkyy Biplast 10 mm:n paksuisena.



Kuva 10. 10 mm:n Biplast-matto, joka toimii hyvin oven sisuksissa.

Tämän vaimennusmaton kohdalla on syytä kiinnittää erityistä huomiota käyttökohteisiin, sillä tämä matto saattaa imeä vettä itseensä, joten tarkkana tulee olla muun muassa kondenssivesien kanssa.

#### 4.1.4 StP Bitoplast Tape

Viimeisenä vaimennusmateriaalina toimi 15 mm leveä huokoinen teippi, jota käytetään kahden kovan materiaalin välissä estämään kolinat ja natinat. Tässä työssä ei teippiä tarvittu, mutta sitä oli varmuuden vuoksi hyvä olla mukana ajoneuvossa, mikäli sisustan purkamisen ja uudelleen kokoamisen jälkeen olisi syntynyt välyksiä sisustan elementtien väliin, jotka ilmenevät vasta myöhemmin käytön lisääntyessä.

### 4.2 Vaimennustyö

Vaimennettaviksi alueiksi oli aiemmin valittu kaikki ajoneuvon luukut, lattia sekä katto. Jokaisen alueen kohdalla toimittiin lähtökohtaisesti saman toimintamallin mukaan.

#### 4.2.1 Vaimennustyön perusteet

Ensiksi autosta piti purkaa sisustaa tarpeeksi, jotta päästään käsiksi puhtaaseen peltiin, johon vaimennusmateriaalit liimataan kiinni. Sisustan purkamisen on suoraviivaista purkamista esimerkiksi autonvalmistajan laatimien korjaamohjeiden mukaisesti.

Toisena vaiheena oli vaimennettavan peltipinnan perusteellinen puhdistaminen. Paikoitellen autosta oli poistettava alkuperäiset eristeet ja vaimennusmateriaalit, minkä jälkeen käsiteltiin peltipinnat. Ajoneuvon sisällä olevissa peltipinnoissa on rasvaa, jolla pyritään estämään korroosiota. Sen poistamiseen jarrunpuhdistusspray ja kangasliinat osoittautuivat tehokkaiksi. Jarrupuhdistusspray sisältää isopropyylialkoholia, asetonia sekä hiilivetyjä (6, s. 3), minkä takia se tehoaa rasvaan.

Puhdistuksen jälkeen peltipintoihin liimataan vaimennusmattoa. Käyttöön oli valikoitunut vain sellaisia materiaaleja, joissa itsessään oli valmiina liimapinta, joten erillisiä liimoja ei tarvittu asennuksessa. Tavallisesti ensiksi liimataan

butyylikumimattoa, jonka päälle valinnaiset kerrokset muita pehmytmattoja koh-teista riippuen.

Lopuksi ajoneuvosta purettu sisusta asennettiin takaisin paikoilleen, eikä vai-mennuksista jäänyt sisustaan jälkiä tai kohoumia.

#### 4.2.2 Varapyöräkotelo ja tavaratila

Työ aloitettiin varapyöräkotelosta ja tavaratilasta purkamalla kaikki sisustan osat pois tavaratilasta. Kuvassa 11 näkyy purettu tavaratila, jossa on reunoilla van-haa, eristevillaa muistuttavaa eristysmattoa. Varapyöräkotelossa taas oli van-haa, kovahkoa eristemattoa.



Kuva 11. Varapyöräkotelo ja tavaratila purettuna.



Peltiin liimattiin StP Gold -butyylikumimatto sekä sen päälle 10 mm:n StP AeroFlex -pehmytmattoa. Tämän jälkeen sisusta asennettiin paikoilleen. Kuvassa 12 näkyy StP Gold asennettuna.



Kuva 12. Ensimmäinen kerros vaimennusmattoa.

Toiseksi kerrokseksi tuli 10 millimetrin StP AeroFlex. Kuvassa 13 näkyy pehmytmatto asennettuna aiemman kerroksen päälle sekä tavaratilan välipohjan runkoa.



Kuva 13. Varapyöräkotelon ja tavaratilan toinen vaimennuskerros.

Tämän jälkeen varapyöräkoteloon lisättiin tunkki ja muut tarvikkeet rengasrikon varalle sekä tavaratilan verhoilu.

#### 4.2.3 Ajoneuvon lattia

Seuraavaksi työssä edettiin auton lattian vaimentamiseen. Työ aloitettiin tälläkin kertaa sisustan purkamisella. Sisustan purkamisen jälkeen auto imuroitiin, sillä lattian vaimennusmateriaalista irtosi auton sisälle huomattava määrä pölyä, joka olisi haitannut rasvanpoistoa sekä vaimennusmateriaalin kiinnitystä. Kuvassa 14 näkyy lattiassa oleva alkuperäinen eriste.





Kuva 14. Alkuperäinen matto lattialla.

Maton poistamisen jälkeen pelti puhdistettiin ja siihen kiinnitettiin ensin StP Gold, jonka päälle vielä 6 mm StP AeroFlexiä. Kuvassa 15 näkyy ajoneuvon lattia vaimennettuna kahdella edellä mainitulla materiaalilla.





Kuva 15. Ajoneuvon lattia kahdella vaimennusmatolla.

Vaimennuksen jälkeen lattialle asennettiin alkuperäinen eristevilla, jonka päälle vielä sisustaan kuuluva huopamatto.

#### 4.2.4 Sisäkatto

Tässä ajoneuvossa katon vaimentaminen oli yksiselitteinen ja selkeä tehdä. Kun kattoverhoilu oli poistettu takakontin kautta, kattopellin alkuperäinen pähkäläinen eristemateriaali poistettu liimoineen ja pelti puhdistettu, niin kattoon oli helppo asentaa vaimennusmateriaalia isoissa paloissa. Katon asennusta helpotti, ettei siinä ollut hankalia muotoja kuten lattiassa ja tavaratilassa. Kuvasta

16 käy ilmi, että kattoon sai kiinnitettyä vaivattomasti paljon kahta eri vaimennusmattoa.



Kuva 16. Vaimennusmatot kattoverhoilun ja -pellin välissä.

Kattoon käytettiin myös StP Goldia sekä 10 mm StP AeroFlexiä. Tilasta ei ollut puutetta, joten kattoon olisi voinut laittaa myös kolmannen kerroksen mattoa.

#### 4.2.5 Ajoneuvon luukut

Auton ovet, tavaratilan luukku sekä konepelti vaimennettiin seuraavana. Tavaratilan luukun vaimentamiseen ei mennyt paljoakaan vaimennusmattoa, mutta vaimentamisesta teki haastavaa luukun rakenne. Mattoa piti leikata pieniksi palloiksi, jolloin työtahti hidastui huomattavasti. Kuvassa 17 tavaratilan luukku vaimentamattomana.



Kuva 17. Tavaratilan luukun rakenne, joka hankaloitti vaimennusmaton asennusta.

Peräluukun vaimentamisen jälkeen siirryttiin sivuoviin. Kyseisen automallin etuovien vaimennusta helpotti se, että pintapellin irrotus on suunniteltu tehtäväksi helposti. Kuvassa 18 näkyy apukuljettajan ovi ilman pintapeltiä.



Kuva 18. Pintapelti irrotettuna etuovesta.

Ovien vaimennuksessa oli otettava huomioon, ettei pehmytmattoa laita ovesa poikittain kulkevan runkopalkin päälle, sillä se tekee kokoonpanosta liian tiiviin, sekä saattaa muodostaa vedelle otollisia paikkoja jäädä oven sisään.

Etuoven pintapelti puhdistettiin perusteellisesti, minkä jälkeen asennettiin butyylikumimatto ja sen päälle edelleen 6 mm pehmytmattoa. Kuvassa 19 näkyy etuovi vaimennettuna; kahvan mekanismille on jätettyliikkumavaraa sekä hieman tilaa runkopalkille.





Kuva 19. Etuoven pintapellin vaimennus, joka suoritettiin irrallaan.

Oven sisäosan vaimennus suoritettiin kahdella erilaisella pehmytmatolla ilman butyylikumimattoa. Ensin laitettiin 10 mm:n AeroFlex, jonka päälle mahtui hyvin ohueksi puristuva StP BiPlast 10 mm:n paksuisena. Tällä tavoin varmistettiin oven riittävä vaimennus sekä kiinnikkeiden toiminta. Kuvassa 20 näkyy etuoven sisäosan vaimennus pääpiirteissään.



Kuva 20. Ovipahvin vaimennus ennen viimeistelyä.

Lopuksi etuovi viimeisteltiin täyttämällä aukot vaimennusmatolla.

Takaovien vaimennus on samankaltainen toimenpide kuin etuovien, mutta työtä hidastaa, ettei takaovien pintapeltiä saanut irrotettua. Takaovet olivatkin helpompi vaimentaa poistamalla ensin oven sisäosa ja ikkunamekanismi. Tämän jälkeen tehtiin puhdistukset sekä lisättiin StP Gold -pintaan ja sitten vielä 10-milimetristä StP AeroFlexiä. Kuvassa 21 näkyy takaovi ilman pehmytmattoa.



Kuva 21. Takaovi, josta joutui irrottamaan ikkunamekanismin asennusta helpottamaan.

Ovien vaimennus kävi nopeasti, sillä niihin sai lopulta asennettua mattoa suhteellisen suurina paloina.

Viimeisenä vaimennettiin ajoneuvon konepelti. Konepellin alapinnalta irrotettiin ensin alkuperäinen eristematto. Puhdistuksen jälkeen peltiin kiinnitettiin StP Gold -vaimennusmattoa. Muita mattoja ei nähty tarpeellisena vaimennuksen suhteen. Kuvassa 22 näkyy konepelti, jossa on kiinnitettynä ensimmäinen kerros vaimennusmattoa.





Kuva 22. Ajoneuvon konepelti vaimennettuna.

Lopulta koko auton vaimennukseen oli kulunut 9 m<sup>2</sup> StP Goldia, 5 m<sup>2</sup> 10 mm:n StP AeroFlex, 1,5 m<sup>2</sup> 6 mm:n AeroFlexia sekä 1,9 m<sup>2</sup> 10 mm:n Biplastia. Käytettyjen materiaalien massa oli yhteensä noin 42 kg.

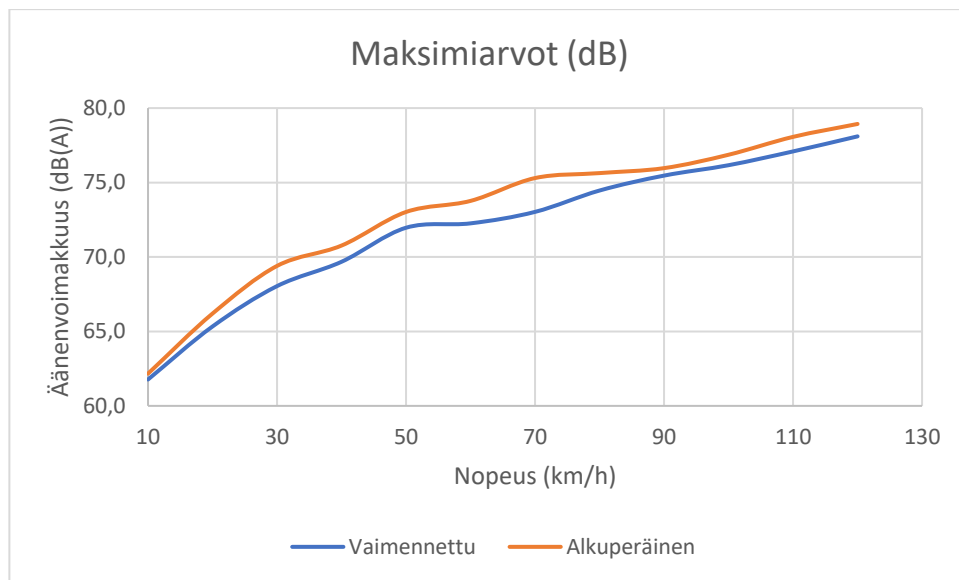


## 5 Tutkimustulokset

### 5.1 Äänenpainetasot

Äänimittarilla tehdyistä tuloksista nähdään, että vaimennuksen jälkeen äänitasot olivat laskeneet odotetusti. Keskimäärin ajoneuvon sisämelun taso laski kolme desibeliä vaimentamattomaan ajoneuvoon verrattuna.

Alla olevasta kuvaajasta (kuva 23) nähdään, miten desibelilukemien maksimiarvot muuttuivat.

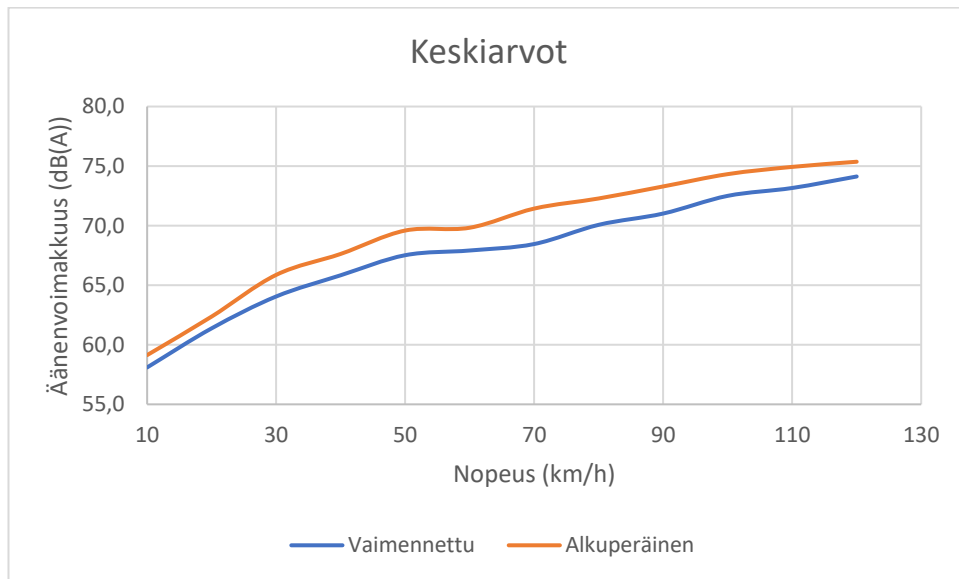


Kuva 23. Äänenvoimakkuus nopeuden funktiona.

Kuvaajasta näkyy vaimennetun ja vaimentamattoman ajoneuvon erot äänenvoimakkuudessa mitausten maksimiarvoja tutkiessa. Maksimiarvojen tulkinnassa tulee kuitenkin olla tarkkana, sillä kyseinen arvo on herkkä reagoimaan ulkoisiin häiriötekijöihin.

Pääasiassa erot vaihtelivat puolen desibelin ja kolmen desibelin välillä, missä suurin vaikutus näkyi alueella 50–90 km/h.

Seuraavassa kuvaajassa (kuva 24) näkyy tehtyjen mittausten desibelien keskiarvot ennen ja jälkeen vaimennuksen.



Kuva 24. Äänenvoimakkuuden kuvaaja nopeuden funktiona mittausten keskiarvoista.

Kuvaajasta nähdään, että keskiarvot ovat jo huomattavasti matalampia arvoja kuin maksimiarvot. Äänenvoimakkuuden keskiarvot ovat noin neljä desibeliä matalampia kuin maksimiarvot.

Keskiarvojen kuvaajassa trendi on samanlainen kuin maksimiarvoissakin, mutta vaimennuksen vaikutus näkyy hieman laajemmalla nopeusalueella. Desibelit vaihtelivat vähiten matalissa nopeuksissa, joissa eroa oli pienimmillään yhden desibelin verran nopeudessa 10 km/h. Parempaa vaimennustehoa näkyy nopeuksissa 30–110 km/h, joissa suurin erotus äänenvoimakkuudessa havaitaan nopeudessa 70 km/h, jolloin eroa syntyi 2,9 dB.

Sheng (7, s. 35) toteaaakin, että kolmen desibelin muutos äänenvoimakkuudessa on juuri huomattava. Mikäli muutos on esimerkiksi viisi desibeliä, niin tällöin voidaan puhua jo merkittävästä muutoksesta. Alla olevaan taulukkoon 5 on merkitty äänitasojen ja koettujen melutasojen välisiä riippuvuuksia.

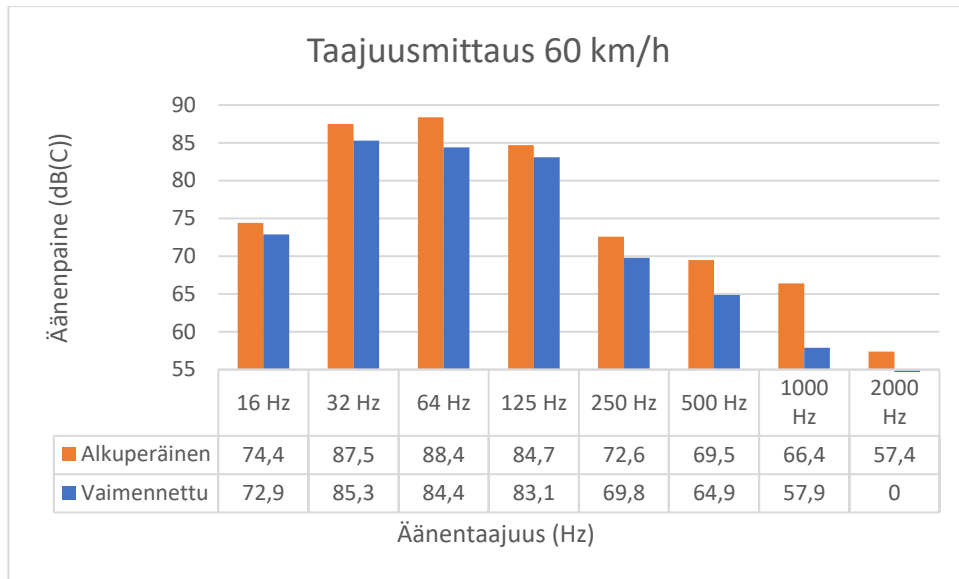
Taulukko 5. Desibelien ja havaitun äänenvoimakkuuden välinen yhteys (7, s. 35).

<b>Desibelitason muutos (dB)</b>	<b>Havaittu muutos</b>
<b>3</b>	Huomattava
<b>5</b>	Merkittävä muutos
<b>10</b>	Kaksi kertaa voimakkaampi ääni tai $\frac{1}{2}$ alkuperäisestä
<b>15</b>	Suuri muutos
<b>20</b>	Neljä kertaa voimakkaampi ääni tai $\frac{1}{4}$ alkuperäisestä

Kuten taulukosta näkyy, voidaan sanoa, että vaimennuksella saavutettiin toivotut tavoitteet.

## 5.2 Äänentaajuus

Taajuusmittausten tuloksista nähdään samankaltaisia päälinjoja kuin äänenpainetasoissa. Maantienopeuksissa saatiin suurempia eroja aikaiseksi kuin moottoritienopeuksissa. Seuraavasta kuvaajasta (kuva 25) nähdään, kuinka taajuusalue on muuttunut vaimennuksen myötä nopeudessa 60 km/h.

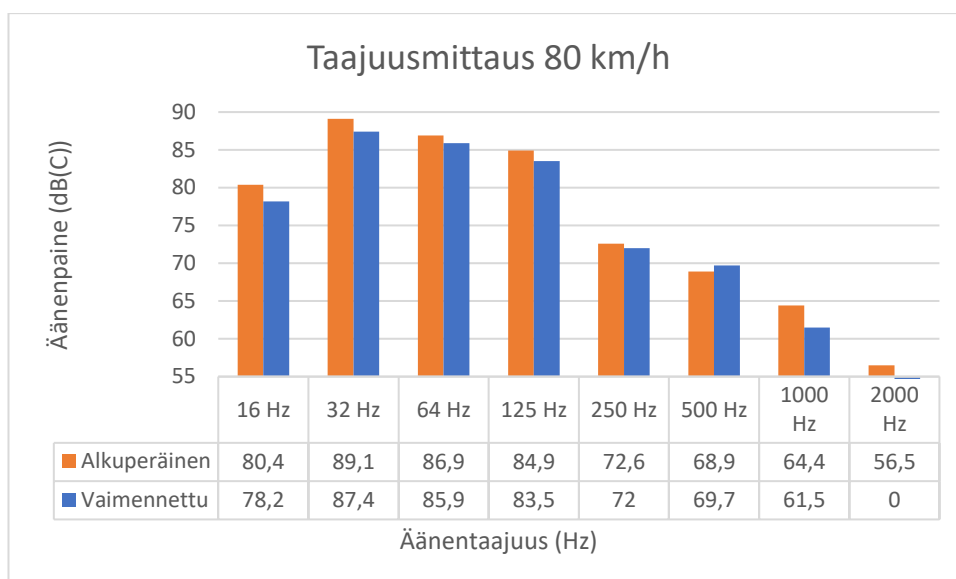


Kuva 25. Taajuusmittaus nopeudessa 60 km/h C-suotimella.

Nopeudella 60 km/h ajettaessa taajuudet ovat laskeneet kiitettävästi. Esimerkiksi yhden ja kahden kilohertsin taajuuksilla on tapahtunut merkittäviä muutoksia. Ennen vaimennusta ajoneuvon sisällä havaittiin 2 kHz:n taajuuksia hieman, mutta vaimennusten jälkeen ne olivat käytännössä kokonaan poissa. Toinen erittäin huomattava pudotus tapahtui 1 kHz:n taajuudella, jolloin kyseisen taajuuden äänenpaine laski 66,4 desibelistä 57,9 desibeliin. Tätä 8,5 dB pudotusta voidaan pitää erittäin merkittävänä, sillä se tarkoittaa käytännössä melun lähes puolittumista alkuperäiseen verrattuna.

Pääasiassa tässä nopeudessa saatiin vaimennettua eri taajuuksia hieman vajaa viisi desibeliä, mikä on kiitettävä tulos.

Seuraavassa kuvaajassa (kuva 26) näkyy taajuusmittaus aiempaa nopeammassa vauhdissa.

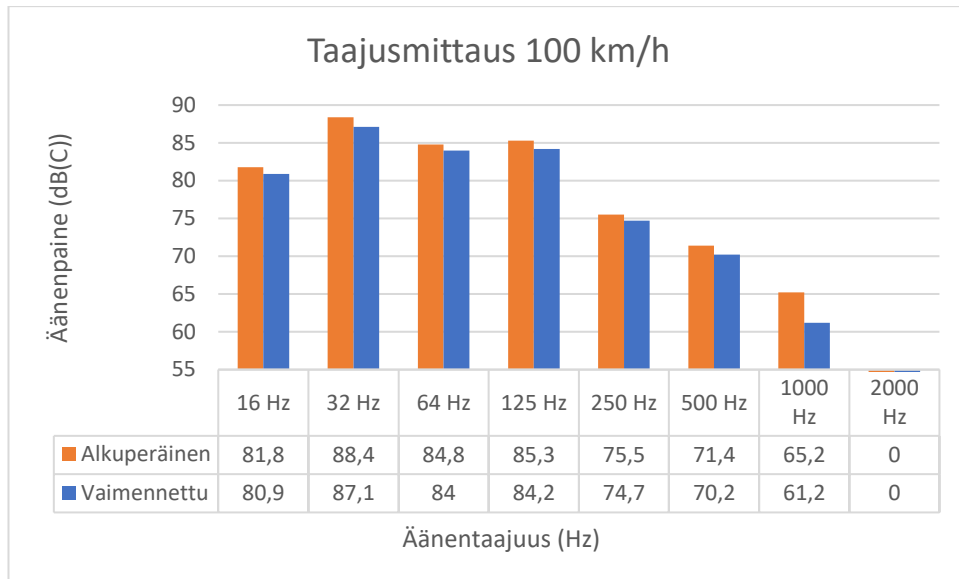


Kuva 26. Taajuusmittaus 80 km/h nopeudessa C-suotimella.

Tässä nopeudessa näkyy samankaltainen trendi kuin matalammissakin nopeuksissa. Korkeat taajuudet ovat madaltuneet selkeästi, ja 2kHz:n taajuudet saatiin käytännössä eliminoitua kokonaan. Myös matalammissa taajuuksissa on tapahtunut selkeästi vaimentumista, mutta pääosin on pysytty muutamissa desibeleissä.

Huomiota herättää myös 500 Hz:n taajuudella tapahtunut vajaan desibelin nousu. Lienee mahdollista, että 1 kHz:n taajuuksia on saatu laskettua, jolloin se näkynee 500 Hz:n luokassa käytössä olevalla mittarilla. Kyseessä voi olla myös mittavirhe, mutta nämä arvot lasketaan laajasta aineistosta keskiluvuilla, joten absoluuttinen nousu äänenpaineessa mutta lasku äänentaaajuudessa kuulostaa vartenotettavalta selitykseltä.

Seuraavassa kuviossa (kuva 27) näkyy taajuusmittaus, jossa nopeutta nostettiin edelleen 20 km/h edellisestä mittauksesta.

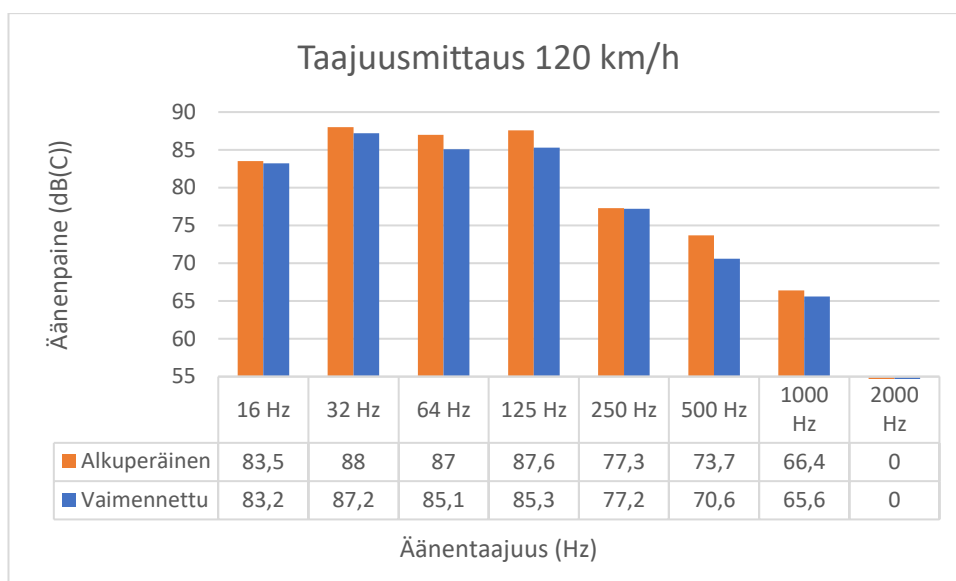


Kuva 27. Taajuusmittaus 100 km/h nopeudella C-suotimella.

Kuvasta nähdään, kuinka päälinjat pysyvät aiempiin taajuusmittauksiin verraten samankaltaisina mutta erot jatkavat pienentymistään. Kun lähestytään moottorin nopeuksia, niin erot ovat maksimissaan neljä desibeliä yhden kilohertsin taajuudella, mutta pääosin erot ovat yhden desibelin luokkaa.

Kuvasta havaitaan myös, että korkeammat taajuudet ovat kadonneet kokonaan myös alkuperäisellä vaimentamattomalla kokoonpanolla, mutta silti suurin vaimennus havaitaan edelleen korkeilla taajuuksilla.

Kuvassa 28 on havainnollistettu ajoneuvon sisältä mitattuja taajuuksia nopeudessa 120 km/h.



Kuva 28. Taajuusmittaus 120 km/h nopeudella ja C-suotimella.

Kuvasta nähdään, ettei suuria muutoksia tapahtunut enää edes korkeilla taajuuksilla, joissa niitä matalammilla nopeuksilla oli havaittu poikkeuksetta. Pääosin korkeimmilla nopeuksilla havaittiin alle yhden desibelin vaimentumista eri taajuuksilla.

Ilmiötä selittää ainakin osin se, että ajoneuvon ympärillä kulkeva ilmassa aiheuttaa korkeissa nopeuksissa huomattavan määrän melua, mikä kantautuu voimakkaasti ajoneuvon sisätiloihin lasipinnoilta, joita ei voi vaimentaa tässä opinnäytetyössä käytetyin menetelmin.

Muut ajo-olosuhteet arvioitiin subjektiivisesti korvakuulolla. Ajoneuvo tuntui hiljaisemmalta erityisesti hiekkatiellä ja mukulakivetyksellä ajaessa. Vaimennuksen jälkeen sateen ropina ei aiheuttanut kattopellissä kaikua. Moottoriäänet olivat vaimentuneet tyhjäkäynnillä vain hieman, mutta ajon aikana moottoriäänet katosivat tehokkaasti varsinkin pienellä kuormalla ajettaessa. Moottorin kuormaa lisäämällä dieselmoottorin jyrinä saavutti matkustamon edelleen.

## 6 Yhteenveto

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin, millainen vaikutus vaimennusmateriaaleilla on henkilöauton sisämeluun. Tutkimustuloksista selviää, että keskimäärin kolmen desibelin vaimennustasoon päästiin laajalti. Nopeudesta riippuen vaimennustehon suuruus vaihteli laajalti vajaasta yhdestä desibelistä melkein kymmeneen desibeliin, mikä on todella laaja skaala, mutta subjektiivisesti asiaa arvioiden voinee sanoa, että ero vaimentamattoman ja vaimennetun auton välillä on merkittävä.

Itsessään työn toteutus oli suoraviivainen, sillä tiedonhankinta aiheesta oli suhteellisen yksinkertaista ja aihetta on paljon tutkittu. Erittäin hankalia työvaiheita ei toteutuksessa ollut, mutta huolellisuutta ja pitkäjänteisyyttä vaadittiin eikä työtä voinut suorittaa kiireessä.

Loppujen lopuksi näyttää siltä, että mikäli ajoneuvostaan haluaa hiljaisemman, niin kannattaa nähdä hieman vaivaa ja asentaa huolellisesti ja laaja-alaisesti vaimennusmateriaaleja auton sisään.

Tulevaisuuden kannalta voisi tehdä vertailua liimattavien äänieristysmattojen sekä pursotettavien eristysmassojen välillä. Voisi olettaa, että helposti levittyvällä massalla saisi suuremman pinta-alan eristemateriaalia auton peltipintoihin kuin kiinteämmillä eristysmatoilla.

Lisätutkimusta kaivataan myös ajoneuvon ikkunoiden sekä alustanosien osuuteen sisämelun määrässä. Hankalaa näiden tutkimisesta tekee heikko saataavuus alkuperäisestä poikkeavissa ikkunoissa ja tukikumeissa. Ajoneuvon matkustamon pintamateriaaleilla voidaan myös vaikuttaa sisämelun määrään, joten sitä kannattanee myös tutkia tulevaisuudessa.



## Lähteet

- 1 Ian R. Sinclair. 2000. Audio & Hi-Fi Handbook Revised Edition. Oxford: Newnes.
- 2 Korpinen, Pertti. 2005. Äänen taajuus. Verkkoaineisto. <[https://webpages.tuni.fi/aanipaa/taajuu\\_1.htm](https://webpages.tuni.fi/aanipaa/taajuu_1.htm)>. Luettu 28.3.2022.
- 3 Korpinen, Pertti. 2005. Resonanssi. Verkkoaineisto. <[https://webpages.tuni.fi/aanipaa/taajuu\\_1.htm](https://webpages.tuni.fi/aanipaa/taajuu_1.htm)>. Luettu 28.3.2022.
- 4 Korpinen, Pertti. 2005. Desibeliasteikko. Verkkoaineisto. < [https://webpages.tuni.fi/aanipaa/voima\\_1.htm](https://webpages.tuni.fi/aanipaa/voima_1.htm)>. Luettu 28.3.2022.
- 5 Heißing, Bernd ym. 2011. Chassis Handbook. Berlin: MercedesDruck.
- 6 CRC Industries Europe bvba. 2011. Zele: CRC Industries.
- 7 Sheng, Gang. 2012. Vehicle Noise, Vibration, and Sound Quality. Warrendale, Pennsylvania, USA: SAE International.

## Taajuusmittauksen parametrit

parameters

Param

Param

16 k

Spectrum Type: AVERAGE

Spectrum Avg: LINEAR

INSTRUMENT PARAMETERS

STATUS: Reset

Acoustic Field: RI

Profile Time: 0,125 s

Exchange Rate: 3 dB

Dose Threshold: 30 dB

Overload Level: 140 dB

Percentile L2: 10 %

Percentile L3: 50 %

Percentile L4: 99 %

SECTION PARAMETERS

Spectrum Type: AVERAGE

Spectrum Avg: LINEAR

Spectrum Avg. Weight: ---