



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

TONI AROLA
MELUNTORJUNTARATKAISUN PARAMETRINEN
SUUNNITTELMALLI

Diplomityö

Tarkastaja: professori Asko Ellman
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
7. helmikuuta 2018

TIIVISTELMÄ

TONI AROLA: Meluntorjuntaratkaisun parametrinen suunnittelumalli

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 63 sivua, 4 liitesivua

Helmikuu 2018

Konetekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Konejärjestelmien suunnittelu

Tarkastaja: professori Asko Ellman

Avainsanat: opinnäytetyö, meluntorjunta, parametrinen suunnittelu, akustiikka, Matlab, Excel

Tässä diplomityössä rakennetaan akustiikan teorian avulla laskentapohja, jolla suunnitellaan ääntä eristävä kaksiosainen seinärakenne. Rakenteita suunnitellaan kaksi erilaista, toisessa käytetään terästä ja villaa, toisessa vaneria. Ennen mallin rakentamista perehdytään ääneen ilmiönä ja akustiikan teoriaan. Tässä osuudessa käydään läpi keskeisiä akustiikan kaavoja ja melua psykoakustiikan näkökulmasta, eli sitä, miten ihminen kokee kuulemansa äänen. Joitain akustiikan tunnuslukuja ja niiden määrittystapoja esitellään niitäkin. Teoriaosuuden loppupuolella käsitellään hiukan rakentamisen ja asumisen lainsäädäntöä. Teoriaosuuden viimeisenä asiana käydään läpi tässä työssä käytettävä meluntorjuntamenetelmä eli massalaki. Massalaki perustuu melun vaimennukseen (vs. absorptio) ja siinä keskeisimmät vaimennusmateriaalin ominaisuudet ovat ainevahvuus ja tiheys.

Teoriaosuudessa esiteltävää tietoa sitten sovelletaan parametrisoinnissa ja hyödynnetään EDA (Engineering Design Analysis) -työkalua, jonka käyttöliittymä on rakennettu Excel-dokumenttiin. Excelistä EDA-työkalu lähettää käyttäjän määrittämiä suunnitteluparametrien arvoja Matlabiin, joka laskee lähtöarvoista tuloksia. Matlab-osuudessa tätä työtä esitellään käytettävä Matlab-koodi ja joitain vinkkejä erilaisiin mahdollisiin ongelmatilanteisiin. Tulokset lähetetään takaisin Exceliin, jossa ne arvioidaan herkkyys- ja korrelaatiomatriisien avulla. Herkkyysmatriisi esittää suunnitteluparametrien muuttamisen vaikutuksia järjestelmään. Korrelaatiomatriisi esittää järjestelmäominaisuuksien keskinäisiä korrelaatioita. Suunnitteluparametreja iteroimalla pyritään luomaan vaihe vaiheelta optimaalisin rakenne määrättyyn suunnittelutehtävään. Lopuksi valmiin laskentatuloksien luotettavuutta arvioidaan sovelletun teorian ja laskentamallien heikkouksien ja vahvuuksien näkökulmasta.

Laskentamallia tehtäessä joudutaan tekemään joitain yksinkertaistuksia, jotta akustiikan teoria saadaan sovitettua malliin. Yhtälöt eivät ole itsessään monimutkaisia, mutta ongelmatilanteita syntyy silti. Laskentamallin rajoitukset hyväksytään, muistaen, että mallin tarkoituksena on saada suuntaa-antavaa tietoa eri parametrien varioinnin vaikutuksista.

ABSTRACT

TONI AROLA: Parametric design of noise reduction solution
Tampere University of Technology
Master of Science Thesis, 63 pages, 4 Appendix pages
February 2018
Master's Degree Programme in Mechanical Engineering
Major: Design of machine systems
Examiner: Professor Asko Ellman

Keywords: thesis, noise reduction, parametric design, acoustics, Matlab, Excel

In this thesis work, a calculation model is built based on acoustics theories. That model is used to design sound insulating structure that is made of two separate elements. The design is made for two different constructions, first one for a metal plate and wool fiber, second one is made of plywood. First, some theory related to acoustics and sound as a phenomenon are presented. In this part of the thesis work some basic and advanced acoustics formulae are presented. Acoustics is viewed also from the perspective of psychoacoustics, where the subjective aspect of noise is studied. Some characteristics related to acoustics and how they are defined are presented. Laws and regulations are important part of construction of houses so some of them are showcased briefly as well. The final part of the theory section of this thesis work is the mass law that is based on insulation (vs. absorption) and here the most fundamental material properties are thickness and density.

The theories in acoustics are applied into a tool in EDA (Engineering Design Analysis) tool that is basically a user interface built into an Excel document. Design parameters are defined, and their values are being varied using the Excel user interface. The parameter values are sent into Matlab, that does the actual calculation and where the acoustics theories are applied, using the parameter values and then the results are sent back into Excel that is used to optimize the system. EDA has some tools that help iterating the parameters. The sensitivity matrix shows what relative changes happen in the system while any parameter is changed. The characteristic correlation matrix shows correlation between the system properties. Using these tools, the design is being iterated and made as optimal as possible, phase by phase. Finally, the reliability of the calculations is being assessed from the point of view of the acoustics theory and strengths and weaknesses of the design.

While building the model used in the calculations, some simplifications must be made to implement the complicated acoustics theories to the model. The equations themselves are not that complex, but problems arise in any case. The limitations in the model are accepted as part of the research and design process, remembering that the point of the model is to be a low-fidelity model to give estimations based on variation of the design parameters.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty professori Asko Ellmanin tarjoamasta aiheesta parametrinen suunnittelu. Ajatus toteuttaa työ akustiikkaan liittyvästä suunnittelutehtävästä oli kirjoittajan itsensä, akustiikkaan liittyvän mielenkiinnon pohjalta. Työn perusta on Tampereen teknillisen yliopiston Konetekniikan laitoksella kehitetty EDA-työkalu (Engineering Design Analysis) ja siihen liittyvä julkaisu.

Työssä sovellettavalle akustiikan teorialle on hyvin pitkälti käytetty lähteenä yliopistolta opetuksesta saatua tietoa ja materiaalia. Erilaisia tietolähteitä on käytetty kuitenkin melko kattavasti, eri akateemisista lähteistä teollisuuteen.

Haluan kiittää professori Asko Ellmania mielenkiintoisesta aiheesta ja vapauksista tehtävän määrittelyn suhteen. Lisäksi kiitokset kaikille akustiikkaa tai parametristä suunnittelua tutkineille erityisesti Tampereen teknillisessä yliopistossa ja Teknillisessä korkeakoulussa.

Tampereella, 31.1.2018

Toni Arola

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	MELUN TORJUMINEN	2
2.1	Akustiikan perusteita	2
2.1.1	Ääni	2
2.1.2	Melun mittaus	5
2.1.3	Muita tasokaavoja	10
2.1.4	Suljetun tilan akustiikka	10
2.2	Kuulo	16
2.2.1	Korvan rakenne	17
2.2.2	Psykoakustiikka	19
2.2.3	Kuulovaurio ja melun haittavaikutukset	23
2.2.4	Infra- ja ultraäänet	24
2.2.5	Lainsäädäntö ja standardit	25
2.3	Äänieristys	27
2.3.1	Massalaki	27
2.3.2	Kahden seinämän äänieristys	29
3.	PARAMETRINEN SUUNNITTELU	32
3.1	EDA-työkalu	32
3.1.1	Päänäkymä	33
3.1.2	Sivunäkymät	35
3.1.3	Huomioita käyttöliittymästä	36
3.2	Laskentamalli	37
3.2.1	Matlab ja EDA	39
3.3	Laskentamalli, materiaaleina teräs ja villa	40
3.3.1	Input-muuttujat	41
3.3.2	Output-muuttujat	45
3.4	Laskentamalli, materiaalina vaneri	47
3.4.1	Input-muuttujat	47
3.4.2	Output-muuttujat	49
4.	TULOKSET	50
4.1	Rakenteen mitoitus, materiaalina teräs ja villa	50
4.2	Rakenteen mitoitus, materiaalina vaneri	56
4.3	Arvio tulosten tarkkuudesta ja perusteluja valinnoille	57
4.4	Johtopäätökset	59
5.	YHTEENVETO	60
	LÄHTEET	62

LYHENTEET JA MERKINNÄT

EDA	engl. Engineering Design Analysis, suunnittelun tarkastelu tai analysointi
λ	aallonpituus
S	absorptiopinta-ala
t	aika
$L_{A,eq,T}$	A-painotettu ekvivalenttitaso
L_{pA}	A-painotettu äänenpainetaso
ΔA	A-painotus
$L'_{n,w}$	askeläänitasoluku
r	etäisyys
Hz	hertsi, taajuuden yksikkö
R'_w	ilmääneneristävyysluku
L_1	intensiteetti
I_0	intensiteetin vertailuarvo
T_{60}	jälkikaiunta-aika
E	kimmomoduli
f_c	koinsidenssitaajuus
ω	kulmanopeus
D	laattavakio
ρ	materiaalin tiheys
h	materiaalin paksuus
A	pinta-ala
ν	poissonin vakio
f	taajuus
L_w	ääniteho
$L_{eq,T}$	äänien ekvivalenttitaso eli keskiäänitaso
c	äänien nopeus
L_p	äänienpainetaso
p	äänienpaine
p_0	äänienpaineen vertailuarvo
R	ääneneristävyys
P	äänien tehotaso
Q	äänilähteen suuntaavuus
L_w	ääniteho
P_0	äänitehon vertailuarvo

1. JOHDANTO

Tämän diplomityön tarkoituksena on soveltaa parametrsta suunnittelua meluntorjuntaan. Työn alkupuolella käsiteltävä akustiikan teoria antaa tarvittavat tiedot, jotta voidaan rakentaa luvussa 3 tarkemmin esitelty laskentapohja, jossa parametreja muuttelemalla pyritään saamaan nopeasti suunnittelijan tarvitsemaa tietoa. Työn suurimpia haasteita olivat akustiikan monimutkaisten teorioiden sovittaminen käytäntöön siten, että laskentamallista saataisiin kohtuullisella tarkkuudella tuloksia. Työssä käsitelty teoria ja parametrinen suunnittelun työvälineet laitetaan koetukselle pienen suunnittelutehtävän muodossa. Eri-laiset valinnat ja perustelut niin laskentamallin rakentamisessa, kuin varsinaisessa suunnittelutehtävässä ovat olennainen osa tätä työtä. Työssä on käytetty apuna materiaalia julkaisusta, jossa EDA-työkalua on käsitelty ja esitelty esimerkki toisesta aiheesta [1].

Tavoitteena on soveltaa EDA (Engineering Design Analysis) -työkalua siten, että lukija pystyy tarvittaessa luomaan oman laskentapohjansa joko toiselle akustiikan tehtävälle, tai käyttämällä jonkin ihan muun aihepiirin teoriaa ja ratkaisemaan itse määrittämänsä ongelman. EDA-työkalun varsinaisen laskentapuolen tapahtuessa Matlabissa, ongelma voi olla käytännössä mikä tahansa. Ainoat rajoitukset ovat, että yhtälöiden pitää olla siinä mielessä yksittäisiä, että rajallisella määrällä suunnitteluparametreja (haarukoitavat arvot) palautetaan yksittäisiä arvoja (järjestelmän ominaispiirteet). Näiden kahden välissä tapahtuvassa laskennassa voi tapahtua mitä tahansa, mihin Matlab vaan taipuu. Erilaisia vakioita ja lähtötietoja voi tietenkin koodata Matlabiin ja varioida sieltä käsin tarvittaessa, mutta tällöin EDA-työkalun optimointiominaisuudet jäävät käyttämättä.

Tutkimuskysymyksenä tässä työssä on selvittää EDA-työkalun käyttöä meluntorjuntarakenteen mallintamisessa. Varsinaista suunnittelutehtävää ei oteta tutkimuskysymykseksi, koska suunniteltavasta rakenteesta ei tämän työn puitteissa tehdä mittauksia, eikä mallia voida täten testata. Tutkimusmenetelmänä on käytetty ensinnäkin kirjallista selvitystä akustiikkaan ja meluntorjuntaan. Laskentakaavojen soveltamista varten katsottiin tarpeelliseksi perehtyä akustiikan teorioihin koneensuunnittelijan näkökulmasta. Riittävällä taustatiedolla varustettuina voitiin sitten käyttää apuvälineenä toista tutkimusmenetelmää eli simulointia, jolloin hankittua taustatietoa käyttämällä kirjoitettiin teoriaa hyödyntävä laskentamalli.

2. MELUN TORJUMINEN

Haitallinen tai häiritsevä meteli on hyvin yleinen teollisuuteen ja arkeen liittyvä ongelma. Erilaisia mahdollisia ongelmatilanteita on ääretön määrä. Äänilähteet, äänen kulkeutumiseen ja vahvistumiseen tai vaimenemiseen vaikuttavat tilat, sekä erilaiset vaatimukset on huomioitava. Kaikki erilaiset tilanteet ja mahdollisuudet on ehkä mahdotonta rakentaa saman laskentamallin sisään kohtuullisessa ajassa. On kuitenkin järkevää pyrkiä rakentamaan työkalu, jolla voitaisiin huomioida mahdollisimman suuri osa näistä eri tilanteista.

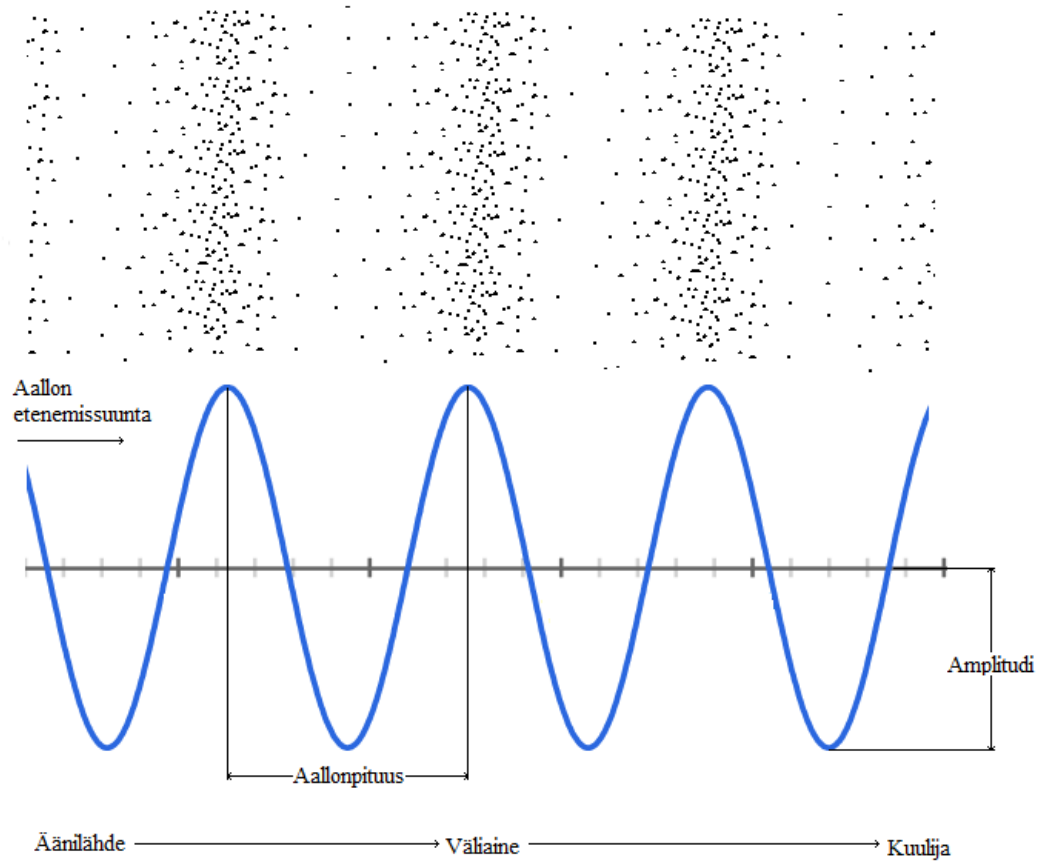
Meluntorjunnan suunnitteluun käytetään tässä diplomityössä apuvälineenä parametriseen suunnittelun keinoja. Parametrisessä suunnittelussa yksittäisiä suunnitteluparametreja muuttelemalla teoreettisella laskentamallilla lasketaan, miten tutkittu järjestelmä toimii. Luvussa 2 perehdytään akustiikan ja meluntorjunnan teoriaan. Nämä tiedot hyödynnetään työn myöhemmässä vaiheessa, kun kirjoitetaan esiteltyjä yhtälöitä laskentamalliin ja edelleen kun saatuja tuloksia analysoidaan.

2.1 Akustiikan perusteita

Ongelman ymmärtämiseksi on syytä ensimmäisenä perehtyä ääneen ilmiönä ja selittää muutamia termejä. Tämän kappaleen runko on rakennettu Juha Toivolan laatiman luentomateriaalin [2], Veli-Matti Järvenpään oman luentomateriaalin (joka perustuu muihin tässä mainittuihin lähteisiin) ja Internet-lähteen pohjalta [3]. Monet tämän opinnäytetyön kuvat on saatu edellä mainitusta Internet-lähteestä, kuvat lienevät alunperin Matti Karjalaisen ja Ville Pulkin teoksesta *Communication Acoustics*. Tästä teoksesta löytyy paljon tietoa erityisesti psykoakustiikasta [4]. Lisäksi apuna on käytetty Robert Hildebrandin ja Timo Karvisen laatimaa materiaalia nimeltä *Noise Control* [5]. Kaavojen lähdemateriaalina on käytetty em. opintomonisteita.

2.1.1 Ääni

Ääni on fysikaaliselta olemukseltaan väliaineessa etenevää aaltoliikettä. Väliaine voi olla olomuodoltaan kiinteää, kaasumaista tai nestemäistä. Tässä työssä käsiteltävien ongelmien kohdalla kyse on ilman välityksellä etenevästä äänestä. Äänen synnyttää yleensä kappaleiden mekaaninen värähtely tai ilmapirtaus, joka aiheuttaa ilmaan aaltoliikkeen. Ilmiötä voi kuvata kansantajuisesti vertaamalla sitä meren aallokkoon. Äänen tapauksessa "aalto" tarkoittaa ilmassa eteneviä tiheämpiä kohtia eli aallon harjoja ja aallonpohjia, joissa ilma on pakkaantunut harvemmin. Alla olevassa kuvassa fysikaalinen malli ja ilman tiheyttä kuvaava esitystapa aallon harjoineen ja pohjineen.



Kuva 1. Ääniaalto, aallonpituus ja amplitudi, perustuu lähteeseen [6].

Äänen aallonpituus λ tarkoittaa aallonharjojen välistä matkaa metreinä. Se lasketaan alla olevan kaavan mukaisesti

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad (3)$$

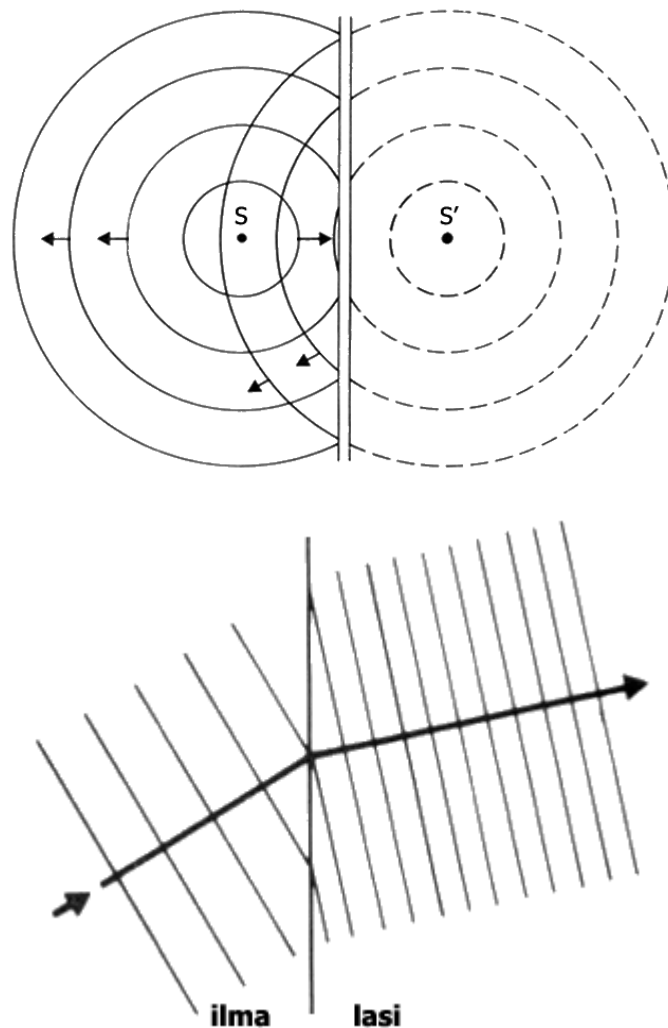
missä c tarkoittaa äänen nopeutta ja f taajuutta. Äänen nopeus on ilman ollessa väliaineena 343 m/s, kun lämpötila on 20 °C. Äänen nopeus eri väliaineissa vaihtelee huomattavasti, tiheimmissä aineissa se on suurempi, vähemmän tiheissä pienempi. Amplitudi kuvaa äänen voimakkuutta, fysikaalisen mallin aallon korkeutta.

Taajuus f ilmoitetaan hertseinä (Hz tai 1/s) ja sillä tarkoitetaan äänen korkeutta (aistimus) tai ääniaaltojen tiheyttä (fysikaalinen selitys). Taajuus on aallonpituuden kanssa käänteisesti verrannollinen eli iso aallonpituus tarkoittaa pientä taajuutta. Ihmisen kuuloalue on suunnilleen 20 Hz ... 20 000 Hz. Alle 20 Hz ääniä kutsutaan infraääniksi ja yli 20 kHz ääniä ultraääniksi. Alla olevassa kaavassa ilmenee taajuuden yleinen määrittäminen, jolla tarkoitetaan esimerkiksi värähdyksien määrää jossain ajassa (t). Tässä tapauksessa kyse on ajasta, jossa ääniaalto etenee yhden aallonpituuden verran.

$$f = \frac{1}{t} \quad (2)$$

Ihmisen kuuloalueen taajuuskaista jaetaan usein sopiviksi osiksi aloittamalla jostain taajuudesta, esimerkiksi 125 Hz, jolloin seuraava osa on edellinen kerrottuna kahdella, tässä tapauksessa 250 Hz. Yhtä tällaista väliä kutsutaan oktaaviksi. Oktaavikaistoihin jakaminen helpottaa taajuuskaistan käsittelyä, koska äänen eri ominaisuudet ja materiaalien vaikutus niihin riippuvat voimakkaasti taajuudesta. Usein akustiikassa vastaantulevalla käsitteellä 'terssikaista' tarkoitetaan oktaavikaistan kolmasosaa. [7]

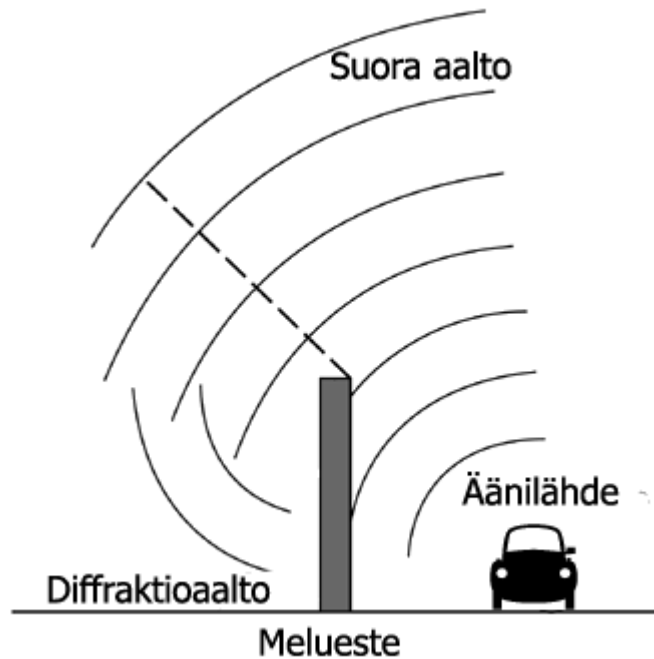
Äänellä on aaltoliikkeenä samankaltaisia ominaisuuksia kuin valolla. Etenevä ääniaalto kohdatessaan esteen heijastuu, välittyy ja absorboituu siihen, kuten valokin. Alla olevassa kuvassa 2 ylempänä on esitetty valon heijastuminen kovasta pinnasta ja alla aaltorintaman taittuminen tiheämpään väliaineeseen siirryttäessä.



Kuva 2. Äänen heijastuminen (yläpuolella) ja äänirintaman taittuminen (alapuolella) [3].

Äänellä on myös muita valon kanssa vastaavia ominaisuuksia. Ääniaallot taipuvat tai venyvät samalla tavalla, kuin valon diffraktiossa, jolloin ääni kulkee pienestä raosta tai jonkin esteen ympäri. Ilmiön voimakkuus riippuu aallonpituuden suhteesta esteen mittoihin.

Suurilla aallonpituuksilla (suhteessa ko. esteeseen) esteen taakse syntyy varjoalueita, pienen aallonpituuden ääniaallot taas taittuvat tehokkaammin. Alla kuvassa 3 yksi esimerkitapaus äänen diffraktiosta.



Kuva 3. Äänen eteneminen esteen ympäri [3].

Äänen etenemiseen liittyy pari termiä, joita käytetään akustiikassa paljon ja jotka ovat hyvässä yhteydessä mainita. Ilmäänellä tarkoitetaan ilman välityksellä etenevää ääntä ja runkoäänellä tarkoitetaan rakenteessa mekaanisesti etenevää värähtelyä, joka aiheuttaa värähdellessään ilmaääntä.

2.1.2 Melun mittaus

Äänenvoimakkuuden mittaamiseen käytetään desibeliasteikkoa. Desibeli on dimensioton suure, jonka arvo saadaan vertaamalla mitattua äänenpaineen arvoa referenssiarvoon, jonka suuruudeksi on valittu $20 \mu\text{Pa}$, pienin mahdollinen kuultavissa oleva äänenpaine. Äänenvoimakkuus lasketaan alla olevan kaavan avulla

$$L_p = 20 \log \frac{p}{p_0}, \quad (3)$$

missä L_p on äänenpaine desibeleinä, p on mitattu äänenpaine ja p_0 yllä mainittu vertailuarvo.

Asteikko on valittu siten, että se kuvaisi mahdollisimman tarkasti ihmisen kuuloa. Kun sijoitetaan paineen p paikalle aiemmin mainittu vertailuarvo, saadaan voimakkuudeksi 0 dB. 1 dB muutos on pienin mahdollinen erotettavissa oleva muutos äänenvoimakkuudessa. Ylipäätään ihmisen kuulo on niin tarkka, että pelkkä paineen arvoihin perustuva

asteikko olisi epäkäytännöllinen. Jo 20 desibelin nousu nolasta desibelistä olisi paineen arvona satakertainen. 20 desibelin voimakkuus on usein mainittu tavallisen taustamelun voimakkuudeksi. Nolasta desibelistä sataan desibeliin verrattuna paineen arvo nousisi 10^5 -kertaiseksi. Kuvassa 4 on listattu äänenvoimakkuuksia, joista näkee joitain arvoja erilaisista arkisista tilanteista. Huomion arvoinen lukema aiemmin mainittujen lisäksi meluraja 85 dB.

DESIBELIASTEIKKO ARKIELÄMÄN ÄÄNILLE	
0 dB	kuulokynnys
10 dB	lehtien havina
20 dB	tyhjän studion kohinat
30 dB	kodin pohjahäly
40 dB	konserttisalissa hiljaisin pianissimo
50 dB	hiljainen keskustelu
60 dB	kovaääninen keskustelu
70 dB	radion kuunteluvoimakkuus, keskim.
85 dB	diskon meluraja
100 dB	telakka, kova melu katupora
130 dB	kipuraja
yli 130 dB	kuulolle vaarallinen melu

Kuva 4. Eri melulähteitä ja niitä vastaavat melutasot desibeleinä [8].

Seuraavaksi tutkitaan tilannetta, jossa äänilähteitä on useita. Esimerkiksi kahden eri koneen mitattuja melutasoja ei suinkaan voida noin vain laskea yhteen johtuen asteikon logaritmisesta luonteesta. Tähän laskutoimitukseen on olemassa joitakin helpottavia nyrkkisääntöjä. Esimerkiksi kahden 60 dB äänenvoimakkuuden yhdistämisestä seuraa lopullinen melutaso 63 dB. Alla olevasta taulukosta nähdään joitakin tilanteita, joissa säästetään erilliseltä laskutoimitukselta.

Taulukko 1. Desibeliarvojen yhteenlasku.

Kahden eri desibeliarvon välinen erotus	Montako desibeliä lisätään isompaan arvoon
0 tai 1	3
2 tai 3	2
4 ... 9	1
10 tai enemmän	0

Tilanteessa, jossa esimerkiksi äänilähteitä on useampia kuin kaksi, tarvitaan kuitenkin tehokkaampaa tai tarkempaa tapaa laskea yhteen eri melutasoja. Tämä onnistuu alla olevalla summakaavalla

$$L_{p_{tot}} = 10 \log \sum_{n=1}^N 10^{L_{pn}/10} \quad (4)$$

mistä em. taulukon arvotkin on mahdollista laskea. Kaavassa $L_{p_{tot}}$ on yhteenlaskettu äänenpainetaso, L_{pn} yhteenlaskettava äänenpainetaso desibeleinä ja summalausekkeen N viittaa yhteenlaskettavien äänenvoimakkuuksien lukumäärään. Kaava pätee epäkoherenteille äänilähteille. Koherentit äänilähteet olisivat esimerkiksi kaksi identtistä moottoria käymässä samalla kierrosluvulla. Jos moottorit on käynnistetty täsmälleen samalla hetkellä ja moottorin kierrokset käyvät samassa vaiheessa, niiden äänenpainetasot vahvistavat toisiaan. Jos vaiheet ovat vastakkaiset, tapahtuu vaimenemista.

Äänenvoimakkuuksia voidaan laskea yhteen myös mitatun äänenpaineen avulla taajuuksittain. Aikaisemmin mainittu kaava 3 kääntyy alla olevaan muotoon

$$p = p_0 \times 10^{L_p/20}, \quad (5)$$

millä saatavat äänenpaineet saadaan sellaiseen muotoon, jossa ne voidaan laskea yhteen ja sen jälkeen muuttaa takaisin desibeleiksi kaavalla 3. Varsinainen yhteenlasku tapahtuu alla olevan kaavan periaatteen mukaisesti

$$\tilde{p}_{kok}^2 = \sum_{n=1}^N \tilde{p}_n^2, \quad (6)$$

missä \tilde{p}_{kok} tarkoittaa kaikkien äänilähteiden painekomponenttien yhteisvaikutusta, n on painekomponenttien lukumäärä ja \tilde{p}_n tarkoittaa yksittäisen äänilähteen painekomponentteja taajuuksittain.

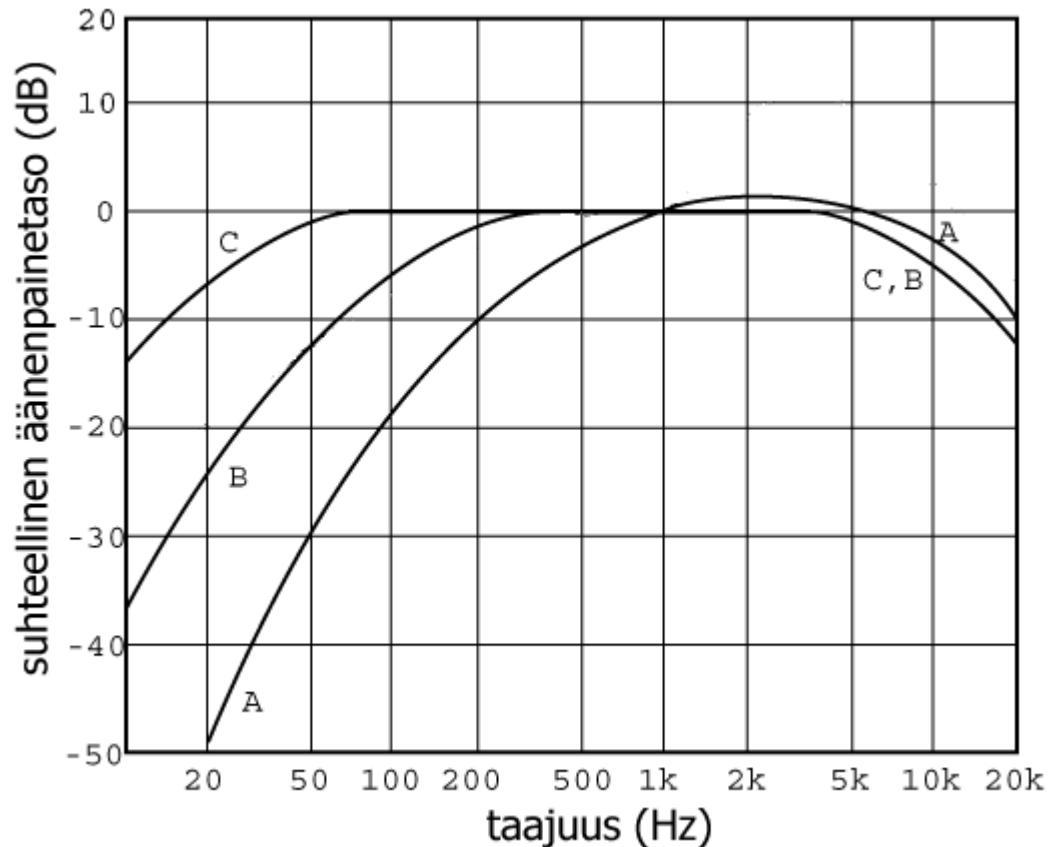
Ihmisen korva ei kuule jokaista taajuutta yhtä voimakkaasti. Tätä varten on luotu erilaisia painotuksia, jotta saadaan ihmiskorvan kuulemaa vastaava arvo. Metelin arvot mitataan taajuuskaistoittain ja niihin tehdään painotuksen mukainen korjaus. Näistä painotuksista

yleisin on A-painotus, jonka tärkeimmät mittauksissa käytetyt taajuudet ja niitä vastaavat korjaukset ovat näkyvillä alla olevassa taulukossa 2.

Taulukko 2: A-painotuksen arvoja taajuuksittain [4].

Taajuus (Hz)	A-painotus (dB)	Taajuus (Hz)	A-painotus (dB)
100	-19,1	630	-1,9
125	-16,1	800	-0,8
160	-13,4	1000	0
200	-10,9	1250	0,6
250	-8,6	1600	1,0
315	-6,6	2000	1,2
400	-4,8	2500	1,3
500	-3,2	3150	1,2

Alla näkyvässä kuvassa 5 vielä erilaisten painotusten arvot graafisessa muodossa koko kuuloalueelta. Korvan niin sanottu taajuusvaste on kaikkea muuta kuin tasainen.



Kuva 5. A-, B-, ja C-painotukset [3].

Lopullisen desibeliarvon laskemiseksi tarvitaan siis mitatut voimakkuudet taajuuksittain, alla olevassa kaavassa

$$L_{pA} = 10 \log \sum_{n=1}^N 10^{(L_{pn} + \Delta A_n)/10}, \quad (7)$$

jossa L_{pA} on A-painotettu äänenpainetaso, jonka lisäksi tarvitaan vastaavilta taajuuksilta A-painotuksen korjaus, kaavassa ΔA_n . Kyseisellä summakaavalla saadaan vertailukelpoinen arvo esimerkiksi liikennemelun tai tehdasolosuhteiden melun tasosta, kun voimakkuuksia on n kappaletta mitattuna.

A-painotus ei ole mikään täydellinen tapa mitata äänen häiritsevyyttä. Alun perin se on suunniteltu käytettäväksi suhteellisen matalille äänenvoimakkuustasoille. Etenkin matalat taajuudet ovat suurilla voimakkuuksilla huomattavasti häiritsevempiä, kuin mitä A-painotuksen käyrä antaa ymmärtää. A-painotusta periaatteeltaan vastaavat B- ja C-painotukset on suunniteltu käytettäväksi kovemmille äänenvoimakkuuksille nostamalla matalien taajuuksien painotusten arvoja (kts. kuva 5). Ne ovat kuitenkin syystä tai toisesta poistuneet enimmäkseen käytöstä ja A-painotusta käytetään yleensä tilanteesta riippumatta.

2.1.3 Muita tasokaavoja

Listataan vielä muita äänentasa kuvaavia suureita. Äänen intensiteetti kuvaa äänilähteen tehoa hajaantumispinta-alaa kohden, yksikössä W/m^2 . Intensiteetti saadaan laskettua alla olevasta kaavasta ja sen referenssiarvo I_0 on 10^{-12} W/m^2 .

$$L_I = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right) \quad (8)$$

Laitevalmistajien käyttämä tasosuure on äänen tehotaso ja sille on määrätty referenssiarvo P_0 , jonka suuruus on 10^{-12} W . Ääniteho lasketaan alla olevalla kaavalla.

$$L_W = 10 \log\left(\frac{P}{P_0}\right) \quad (9)$$

Molemmat näistä kaavoista antavat äänenvoimakkuuden desibeleinä. Referenssiarvot on valittu siten, että ne ovat yhteensopivia desibeliasteikon kanssa. Täten niitä voidaan käyttää eri laskelmissa esimerkiksi A-painotuksien ja vaimennuksen kautta. Näiden lisäksi käytetään nopeustasoa L_v , mikä ilmaisee nimensä mukaisesti ääniaallon ilman hiukkasten nopeutta.

2.1.4 Suljetun tilan akustiikka

Määritellään joitakin suljetun tilan akustiikassa käytettäviä termejä ja esitellään niiden laskukaavoja. Teollisuuden tai vaikka asumisen olosuhteissa ollaan lähes aina sisätiloissa, jolloin erilaiset suljetun tilan aiheuttamat vaikutukset tulee huomioida. Ympärillä olevat seinät voivat vaikuttaa merkittävästi melun voimakkuuteen eri taajuuksilla.

Esitellään ensimmäisenä tilanne, jossa täytyy saada tietää esimerkiksi koneen aiheuttama meteli toiselle puolelle huonetta. Hyödyllinen ja helppo apuväline, kun tehdään vaikkapa laitossuunnittelua, jossa määritetään työpisteiden ja koneiden paikkoja ja olosuhteita. Äänilähteen aiheuttama äänenvoimakkuus jollain tietyllä etäisyydellä äänilähteestä saadaan alla olevalla kaavalla

$$L_p = L_W + 10 \log\left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{S}\right), \quad (10)$$

jossa L_W on aiemmin määritetty äänilähteen ääniteho, Q äänilähteen suuntaavuus, r tutkittavan pisteen etäisyys äänilähteestä ja S kyseessä olevan tilan absorptiopinta-ala neliömetreissä. Suuntaavuus saa ympärisäteilevälle (esimerkiksi koneen runkomelu sopii tähän) melulle arvon 1, mutta erilaisille tilanteille suuntaavuus voi saada arvoja yli tai alle yhden.

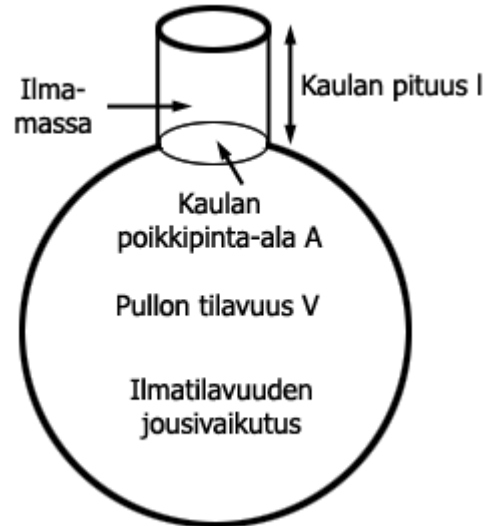
Suljetulle tilalle, esimerkiksi huoneelle, saadaan tietty ominaisvärähtelytaajuus alla olevalla kaavalla

$$f_{ijk} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{i}{x}\right)^2 + \left(\frac{j}{y}\right)^2 + \left(\frac{k}{z}\right)^2}, \quad (11)$$

missä f_{ijk} on ominaistajuus, x, y ja z ovat huoneen mitat kolmessa eri ulottuvuudessa ja i, j ja k ovat lukuja $0, 1, 2, \dots$ jne. järjestyksessä. Luvut aloitetaan nolasta, kun halutaan laskea alin ominaistajuus ja ykkösestä, kun halutaan toinen ominaistajuus ja niin edelleen. Äänen luonteen kannalta alimmat ominaistajuudet ovat kaikkein häiritsevimpiä. Korkeimmat ominaistajuudet ovat yleensä hyvin lähellä toisiaan, jolloin niitä ei edes välttämättä korvakuulolta erota toisistaan. Kaava pätee ainoastaan suorakulmaiselle ja kovaseinäiselle tilalle. Tällä kohtuullisen yksinkertaisella kaavalla saadaan tietoa tilan ominaisuuksista. Huoneen matalien ominaistajuuksien ympäristö tulisi huomioida erityisen tarkasti, jos vaimennetaan vaikkapa tilassa olevaa koneen melua. Jo rakennuksen suunnitteluvaiheessa voidaan tehdä joitain ennaltaehkäiseviä toimenpiteitä huoneakustii-kan suhteen. Nyrkkisääntönä voidaan todeta, että huoneen mitat eivät saisi olla toistensa monikertoja. Häiritseviä resonansseja syntyy esimerkiksi silloin, kun huoneessa tai tilassa käy moottori, jonka käyntinopeus on lähellä ominaistajuuksia.

Yksittäinen matemaattinen kaava ei tällaisessa analyysissä toki kannu kovin pitkälle, varsinkin jos kohteena on vaikkapa tavallinen olohuone. Tällöin tarvittaisiin jo hyvin yksityiskohtaista mallintamista ja simulointiohjelmiston käyttöä. Toinen vaihtoehto on suorittaa mittaus, jossa huoneeseen tehdään taajuuspyyhkäisy koko kuuloalueen taajuuskaisalta ja mikrofonilla mitataan huonevaste, josta nähdään millä taajuuksilla syntyy vaimennuksia tai korostuksia. Mittaustulos vaihtelee voimakkaasti huoneen eri paikoissa mitattaessa, seiniä lähellä ja nurkissa saadaan ominaismuotojen painemaksimit.

Akustiikkaa tutkiessa törmää usein ns. Helmholtz-resonaattoriin. Ilmiössä syntyy jousisysteemin kanssa analoginen tilanne, jossa pullomaisessa tilassa ilman kokoonpuristuminen ja laajeneminen luovat liikkuvan jousimaisen liikkeen “pullon” kaulaan. Ilmiötä voi testata käytännössä puhaltamalla pulloon, jolloin eri tilavuuksilla (pullossa eri määriä nestettä) ääni kuulostaa korkeammalta tai matalammalta. Alla on esitetty periaatekuva Helmholtz-resonaattorista ja värähtelytaajuuteen vaikuttavista tekijöistä.



Kuva 6. Helmholtz-resonaattorin toimintaperiaate [3].

Helmholtz-resonaattorin ominaisuuksia hyödynnetään esimerkiksi kaiuttimien rakentamisessa. Refleksi- tai kaksitieketelossa löytyy vastaavanlainen rakenne, jossa kaiuttimen äänenlaatua voidaan muokata kotelon tilavuuden ja refleksiputken mittojen kautta. Yleensä kotelo mitoitetaan siten, että resonanssi vahvistaa toiston matalia taajuuksia. Resonanssitaajuus saadaan alla olevalla kaavalla

$$f_{res} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{A_k}{Vl}}, \quad (12)$$

missä f_{res} on ominaistaajuus, A_k kaulan poikkipinta-ala, V astian tilavuus ja l kaulan pituus.

Tärkeä standardeissa ja lainsäädännössä käytetty huoneakustiikan suure on jälkikaiunta-aika. Sillä mitataan, miten nopeasti tilassa tuotettu ääni vaimenee 60 dB verran herätteen päätymisestä lukien. Varsinaisiin suosituksiin ja laissa määrättyihin arvoihin palataan työn myöhemmässä vaiheessa. Jälkikaiunta-aika T_{60} lasketaan alla olevalla kaavalla

$$T_{60} = 0,161 \frac{V}{S}, \quad (13)$$

jossa V on huoneen tilavuus ja S on absorptiopinta-ala, joka tarkoittaa laskennallista täydellisesti absorboivan pinnan alaa neliömetreinä. Absorptiopinta-ala S saadaan alla olevasta kaavasta

$$S = \sum a_i A_i, \quad (14)$$

missä a_i viittaa yksitellen jokaisen pinnan absorptiokertoimeen ja A_i vastaaviin pinta-aloihin. Huoneen kaikki i kappaletta absorptiopinta-alaa lasketaan siis yhteen tässä laskutoimituksessa, tavallisessa huoneessa pintoja olisi 6 kpl, seinät, lattia ja katto. Absorptiopinta-alaa laskettaessa on huomioitava, että absorptiokerroin riippuu taajuudesta.

Huomattava on, että kaava 13 pätee ainoastaan diffuusille äänikentälle. Diffuusilla äänikentällä tarkoitetaan sitä, että mitattavan huoneen kaikissa pisteessä on sama äänenpaine-taso tai ääntä saapuu tasaisesti kaikista tulokulmista. Tämä edellyttää, että huoneen mitat ovat selkeästi suurempia, kuin mitattavat aallonpituudet. Ihmisen kuuloalueen alimmilla taajuuksilla aallonpituudet ovat jo yli 17 metrin luokkaa, joten tämä kannattaa huomioida, ennen kaavan 13 soveltamista. Diffuusin äänikentän syntyminen mahdollistavia tilan ominaispiirteitä on muitakin. Huoneessa sijaitsevien kovien pintojen määrä auttaa, eli kun heijastavia pintoja on enemmän, kuin pehmeitä, absorboivia pintoja. Diffuusia äänikenttää suosii myös epäsäännöllinen geometria huoneen sisällä, samoin kuin useat satunnaisesti sijaitsevat, pienet heijastavat pinnat.

Alla olevaan taulukkoon on listattu esimerkin vuoksi muutamia absorptiokertoimia eri materiaaleista. Arvot ovat lähinnä suuntaa-antavia, sillä ne riippuvat monesta eri asiasta, kuten materiaalin paksuudesta tai kosteudesta. Vaimennusmateriaalia valmistavat yritykset tekevät mittaukset standardoidusti, jolloin niiden ilmoittamat arvot ovat tarkempia ja keskenään vertailukelpoisia. Kuten arvoista näkee, tietyillä materiaaleilla on hyvin voimakkaasti absorboiva ja toisilla taas heijastava rakenne. Korkeiden taajuuksien suurempi absorptiokerroin on yleinen monilla materiaaleilla.

Taulukko 3: Eri materiaalien absorptiokertoimia taajuuksittain [4].

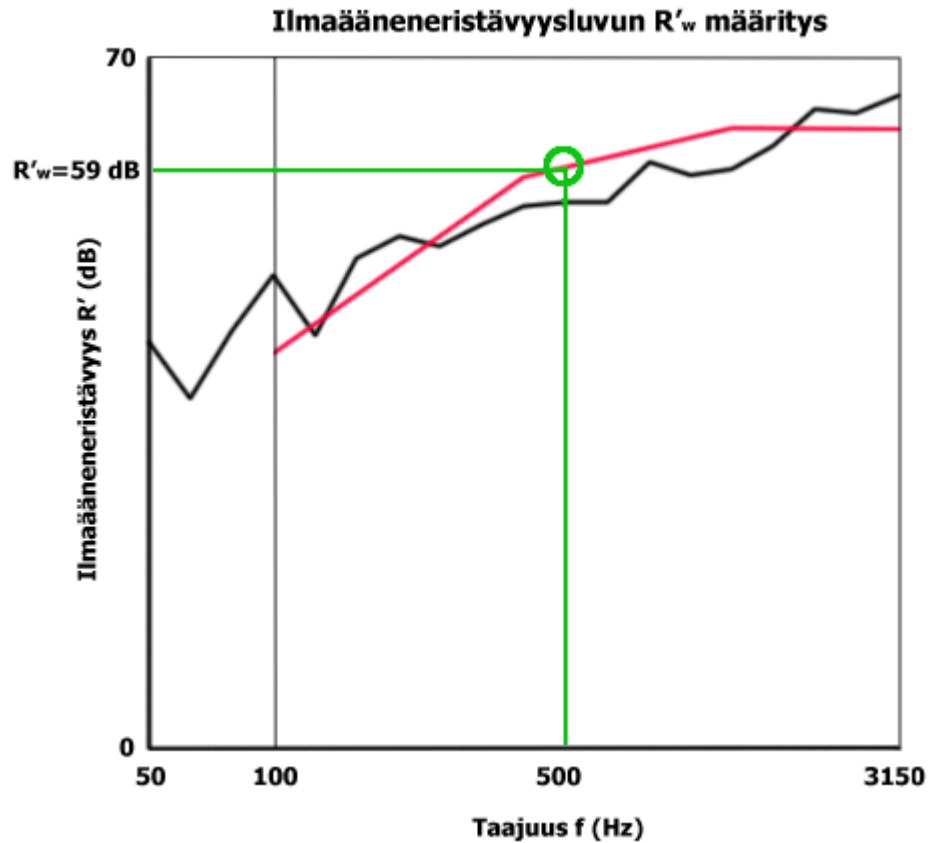
materiaali	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
betoni	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05
teräs	0,05	0,10	0,10	0,10	0,07	0,02
puu	0,15	0,11	0,10	0,07	0,06	0,07
lasi	0,12	0,10	0,05	0,04	0,02	0,02
vaahtomuovi 50mm	0,15	0,35	0,70	0,90	1,00	1,00
verhot las- kostettuna	0,07	0,37	0,49	0,81	0,65	0,54

Ilmaääneneristävyydellä tarkoitetaan kahden tilan välisen seinän ääneneristävyyttä ja sille käytetään merkintää R'_w , kun rakenne on mitattu rakennuksessa paikan päällä ja

merkintää R_w , siis ilman pilkkua silloin, kun rakenne on mitattu laboratoriossa. Ilma-eneristävyyksluvun tarkoitus on mitata rakenteen todellinen ääneneristävyys ottaen huomioon seinien erilaiset heikentävät ominaisuudet, kuten esimerkiksi johtojen ja putkien läpiviennit ja ilmanvaihto. Laboratoriossa mitatut arvot ovatkin yleensä ihanteellisia todelliseen tilanteeseen verrattuna eli käytännössä tositilanteessa ääni kulkeutuu jostain toista kautta tilasta toiseen ja mittaustuloksetkin ovat tällöin heikompia. Laboratoriossa on kuitenkin suhteellisen helppo saada keskenään vertailukelpoisia tuloksia esimerkiksi eri rakennusmateriaaleille, oville ja elementeille. Suure on taajuusriippuvainen ja sen yksikkö on desibeli. Itse tunnusluku ääneneristävyys eli R'_w määritetään standardin ISO 717-1 [9] mukaisesti ensin laskemalla R :n eli ääneneristävyyden arvo alla olevasta kaavasta

$$R = L_1 - L_2 + 10 \log S - 10 \log \left(0,161 \frac{V}{T_{60}} \right), \quad (15)$$

missä L_1 on äänenpainetaso lähetyshuoneessa ja L_2 äänenpainetaso vastaanottohuoneessa. Kaavalla saadut arvot sovitetaan vertailukäyrään, josta luetaan varsinainen ilma-ääneneristävyyden arvo 500 Hz kohdalla. Esimerkkitapaus määrittämisestä on nähtävissä alla olevassa kuvassa 7. Kuvassa punaisella on vertailukäyrä, joka sovitetaan standardissa määritetyllä tavalla mittaustuloksiin. Toisessa kuvassa näkyvässä käyrässä on mittaustulokset taajuuden funktiona eli ääneneristävyyden arvot, laskettuna yllä mainitulla kaavalla. Mitä suurempi luku saadaan, sen parempi ääneneristävyys. Mittaukset suoritetaan kummassakin huoneessa vähintään kahdesti viidessä eri mittauspisteessä. Lisäksi vastaanottohuoneessa määritetään jälkikaiunta-aika, jonka avulla mittaustulos tarkentuu vastaanottohuoneen kalustuksen yms. irtaimiston absorboivan vaikutuksen poistuessa laskutoimituksesta.



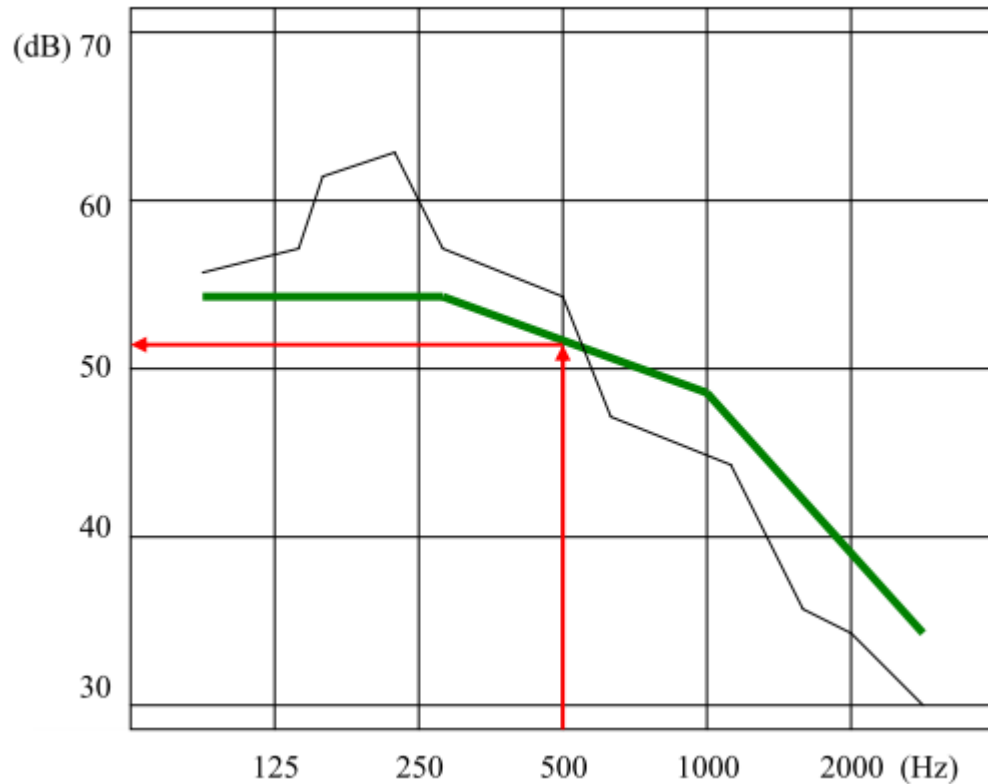
Kuva 7. Esimerkki ilmaääneneristävyyden määrittämisestä [10].

Erilaisia melulähdetyyppejä varten on määritetty kaksi sovitustermiä, C ja C_{tr} , joita käytetään lisäapuna ilmaääneneristävyyden määrittämisessä. Ensimmäinen edustaa normaalia asumisesta syntyvää ääntä, sekä yleisimpiä liikennemelusta ja teollisuudesta syntyviä äänilähteitä, joissa äänentaajuudet ovat korkeita tai keskikorkeita. Termiä C_{tr} sovelletaan tapauksiin, joissa melulähteenä on vaikkapa taajamaliikenne, diskomusiikki ja tehtaot, joiden äänihaitat ovat matalia tai keskikorkeita taajuudeltaan. Näiden termien määrittäminen ja soveltaminen löytyvät ISO standardista 717-1, eikä niitä käydä tämän tarkemmin tässä läpi.

Askeläänitasoluku $L'_{n,w}$ on otettu käyttöön, jotta saataisiin mitattua asuintalojen rakenteiden kykyä vaimentaa kävelystä ja esimerkiksi huonekalujen siirtelystä syntyvää melua. Rakenteiden tulisi olla sellaisia, etteivät normaalin elämisen äänet häiritsisi naapureita. Suure on erityisen tarpeellinen kerrostaloissa ja mittaukset tehdäänkin usein siten, että melu tuotetaan yläkerrassa ja mitataan melua tuottavan huoneiston alapuolella sijaitsevassa asunnossa. Mittauksessa käytetään standardoitua askeläänikonetta, jossa 5 kappaletta puolen kilon painoisia vasaroita lyö lattiaan 40 millimetrin korkeudelta kaksi kertaa sekunnissa. Askelääniluvun määrittämisessä käytetään ilmanääneneristävyyden kanssa yhtenevää menetelmää, jossa mittauksessa saatavalla datalla lasketaan ensin askeläänitaso, joka sitten yhdistetään sovituskäyrään. Askeläänitaso saadaan alla olevasta kaavasta

$$L_n = L_2 + 10 \log \frac{S}{S_0}, \quad (16)$$

missä L_2 on taso vastaanottohuoneessa ja S_0 referenssipinta-ala, jonka suuruudeksi on määritetty 10 m^2 . Näin määritetään askeläänitason arvot eri taajuuksilla ja niiden perusteella asetetaan sovituskäyrä standardissa määrättyllä tavalla. Tästä kuvassa 8 esimerkki alapuolella.



Kuva 8. Esimerkki askelääniluvun määrittämisestä [10].

Lopullinen askeläänitasoluku luetaan jälleen sovituskäyrältä 500 Hz kohdalta. Kuvassa sovituskäyrä on merkitty vihreällä. Mitä pienempi askelääniluku, sen parempi ääneneristävyyden rakenteessa on. Askeläänitasoluvulle käytetään merkintää $L_{n,w}$, jos se on määritetty laboratorioissa ja $L'_{n,w}$ eli pilkun kanssa, jos kyse on paikan päällä mitattu rakenne. Myös askeläänitasolukua varten on olemassa C-kirjaimella merkittäviä sovitustermejä erilaisiin tapauksiin sopivien painotuksien. Sovitustermien käyttöön ja määrittämiseen ei tässä työssä sen kummempin perehdytä, niistä löytyy lisää akustiikan ISO standardista 717-1.

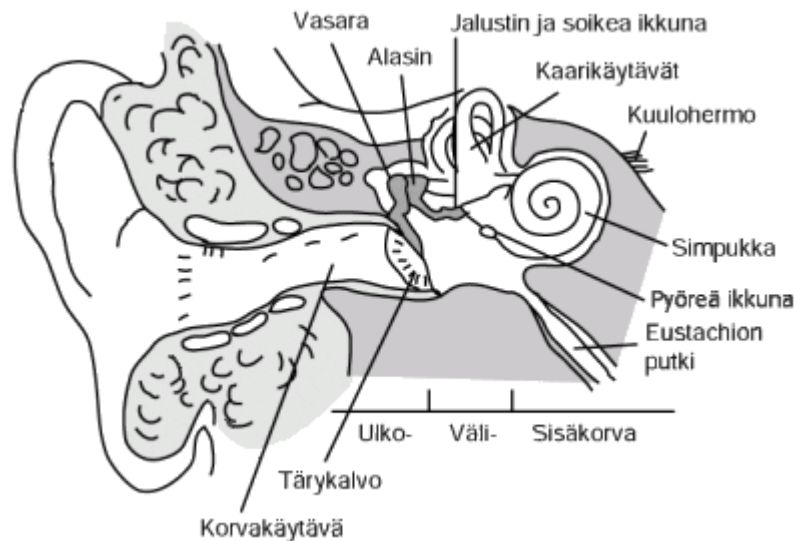
2.2 Kuulo

Tutkittaessa melua ja sen haittavaikutuksia äänen fysikaalisen olemuksen ja matemaattisen käsittelyn lisäksi ja vastapainoksi on syytä perehtyä jonkin verran myös äänen sub-

jektiiviseen ja inhimilliseen puoleen. Tässä luvussa tutustutaan lyhyesti ihmiskorvan rakenteeseen, kuuloon ja siihen miten se toimii, sekä ääneen sellaisenaan, miten ihminen sen aistii.

2.2.1 Korvan rakenne

Ihmisen korva koostuu kolmesta osasta: ulko-, väli- ja sisäkorvasta. Korvan tehtävänä on vastaanottaa tulevat ääniaallot kuulohermostoa varten. Korvan rakenne on esitetty kuvassa 9 alapuolella.

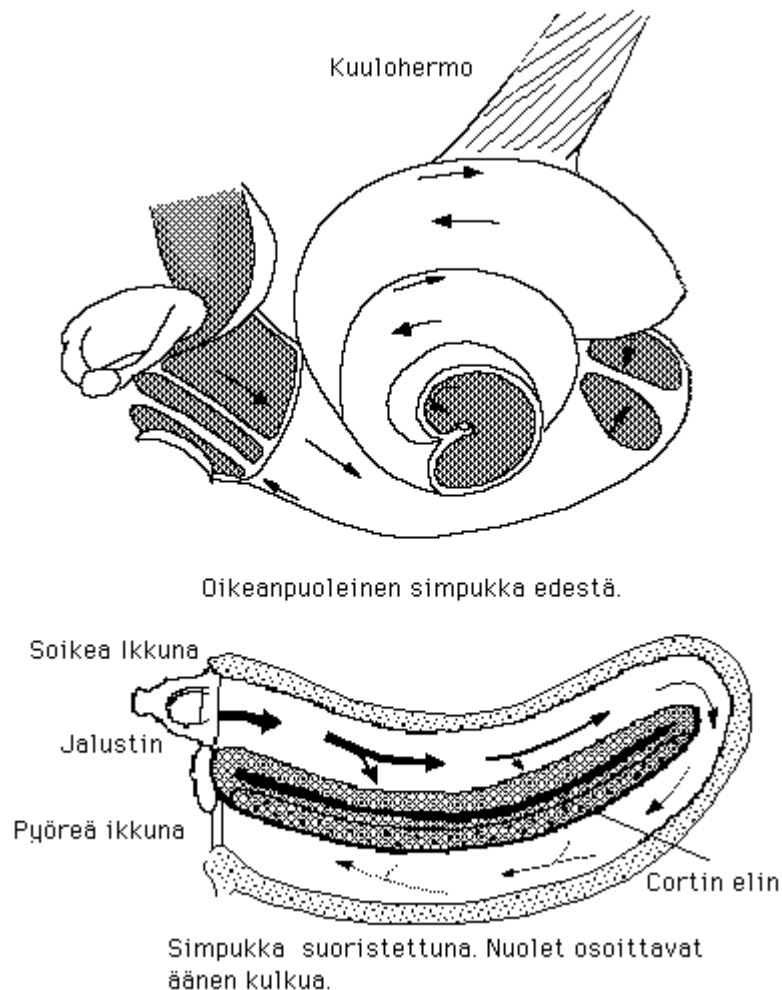


Kuva 9. Korvan rakenne [3].

Ulkokorvaan kuuluu korvakäytävä ja korvalehti. Ihmisen ulkokorvassa ei itsessään ole mitään kuuloa edistäviä aktiivisia osia. Korvakäytävän voidaan ajatella olevan kovaseinäinen akustinen putki. Koska ihmisillä on kaksi korvaa, niitä voidaan käyttää äänen tulosuunnan määrittämiseen. Äänilähdettä lähempänä oleva korva kuulee etenkin korkeat, yli 1,5 kHz taajuudet voimakkaammin, kuin kauempana oleva korva. Tämän lisäksi ihmisen pää muodostaa verhon, joka vahvistaa tätä ilmiötä. Matalammilla taajuuksilla korvien vastaanottamassa äänenvoimakkuuksissa ei ole niin suurta eroa, joten äänissä havaittava vaihe-ero toimii suuntatiedon antajana alle 1,5 kHz taajuuksilla.

Välikorvassa, korvakäytävän päässä tärykalvo vastaanottaa ääniaaltojen värähtelyn ja muuttaa sen mekaaniseksi värähtelyksi. Korvatorvi tasapainottaa ilmanpainetta tärykalvon eri puolilla. Tärykalvolta värähtely etenee järjestyksessä kuuloluille, eli vasaralle, alasimelle ja viimeisenä jalustimelle. Kuuloluita koossa pitävät lihakset säätelevät etenevää äänenvoimakkuutta. Kuuloluiden tehtävä kokonaisuudessaan on muuntaa ilmassa kulkeva ääniaalto, jossa on pieni paine ja suuri hiukkasnopeus, sopivaksi sisäkorvan nestelle, jossa ääniaallolla on suurempi paine ja pienempi hiukkasnopeus.

Sisäkorvassa nesteessä kulkevan ääniäällön värähtely muunnetaan hermoimpulsseiksi ja täten aivojen tulkittavaksi ääneksi simpukka-nimisessä elimessä. Simpukka on kierteellä oleva putki, jonka jakaa kahteen osaan, eteis- ja kuulokäytävään ns. basilaarikalvo. Basilaarikalvon jäykkyys pienenee simpukan alkupäästä loppupäähän, jolloin sen taivutusjäykkyys pienenee vastaavasti. Alkupäässä korkeat taajuudet saavat basilaarikalvon värähtelemään ja loppupäässä matalammat taajuudet kiertävät kohti pyöreää ikkunaa. Rakenne mahdollistaa sen, että eri taajuudet erotetaan toisistaan. Värähtely saa basilaarikalvon karvasolut aistimaan värähtelyn ja ns. cortin elin muuntaa sen hermoimpulsseiksi. Kuulohermoa pitkin aistittu ääni siirretään aivoille tulkittavaksi. Simpukan vieressä sijaitsevat kaarikäytävät toimivat tasapainoelimenä. Simpukan rakenne alla olevassa kuvassa 10 yläpuolella sellaisenaan ja alapuolella suoristettuna, jotta sen toiminta näkyisi selkeämmin [11] [12].

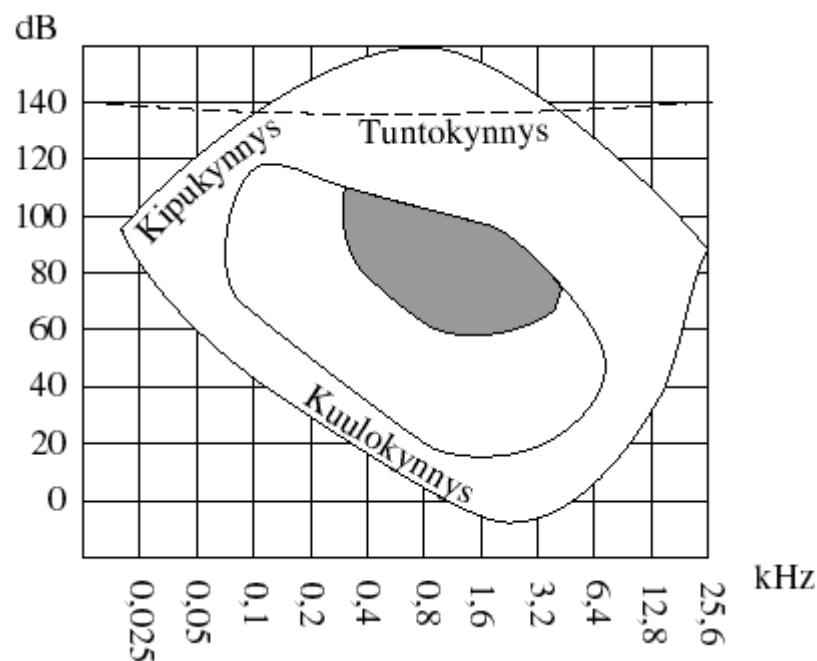


Kuva 10. Korvan simpukan rakenne [11].

Simpukka on herkkä elin ja kuulovauriot tapahtuvat yleensä karvasolujen väsymisen takia. Korva on varsin herkkä etenkin 4 kHz taajuuden ympäristössä ja juuri tältä taajudelta kuulovauriot on helpointa havaita. Kuulovaurio etenee sitä mukaa, kun altistuminen jatkuu ja näin vaurio alkaa näkymään voimakkaammin myös muilla taajuuksilla 4 kHz

ympäristössä. Ongelmallista kuulovaurioissa on taajuusalueen sijaitseminen puhealueen lähellä, jolloin puheen tunnistaminen vaikeutuu.

Ihmisen kuuloalue ulottuu suunnilleen 20 hertsistä 20 kilohertsiin ja kuulokynnys on 1 kHz taajuudella 20 μPa eli 0 dB ja kipuraja samalla taajuudella noin 130 dB. Kuuloalueen rajat tosin vaihtelevat mm. ihmisen iästä riippuen reilusti. Vanhat ihmiset eivät esimerkiksi välttämättä kuule yli 10 kHz ääniä ja nuorilla kuuloalue saattaa olla yli ilmoitettujen arvojen. Joillakin eläimillä kuuloalue ulottuu reilusti yli ihmisen kuuloalueen. Esimerkiksi lepakot kuulevat jopa 150 kHz ääniä. Ihmisen puheen taajuudet vaihtelevat välillä 300 Hz ... 4000 Hz. Kuvassa 11 näkyy ihmisen kuulo- ja kipurajat taajuuksittain. Tummallalla varjostettu alue esittää ihmisen puheen käyttämää kuuloaluetta.



Kuva 11. Kuuloalueen eri rajat [11].

Tuntokynnyksellä tarkoitetaan rajaa, jonka yläpuolella äänet voidaan aistia kutinana korvassa. Kuuloalueen ulkopuolisia taajuuksia voidaan myös havaita ilman varsinaista kuuloaistimusta, mikäli äänenpaine on tarpeeksi voimakas.

2.2.2 Psykoakustiikkaa

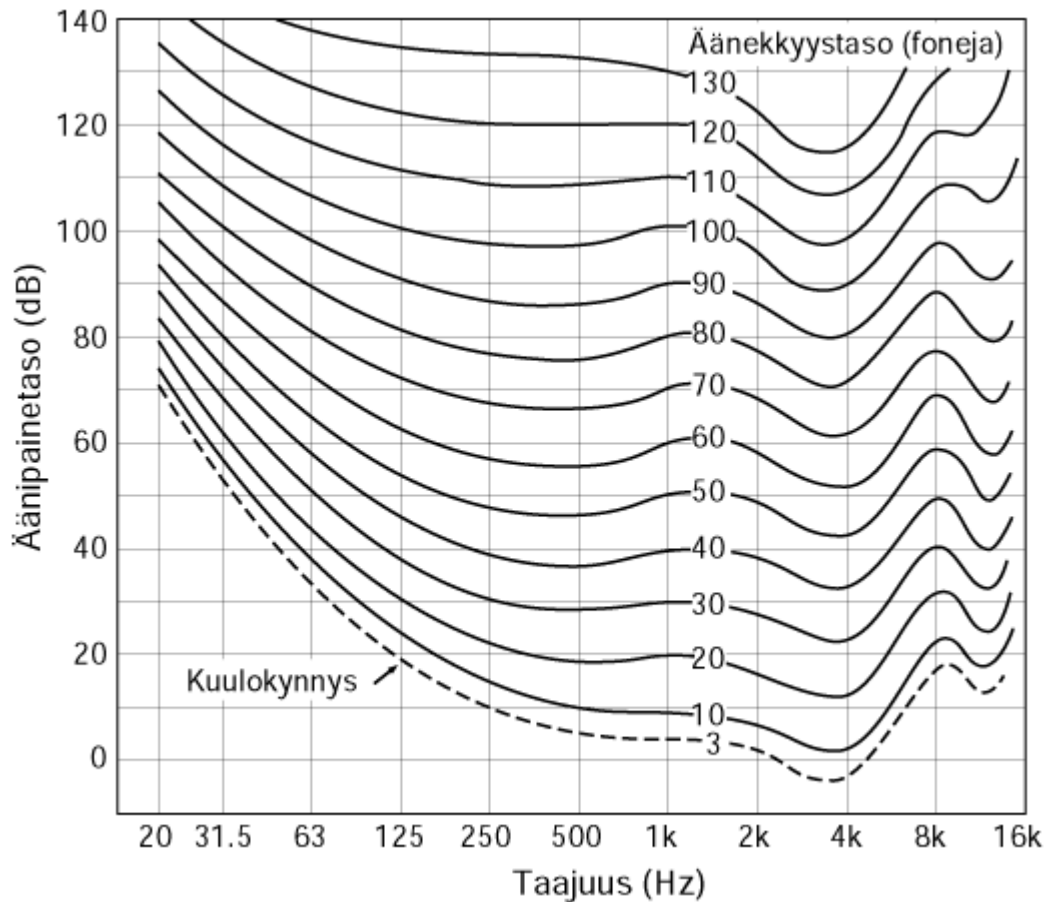
Psykoakustiikassa tutkitaan ihmisten subjektiivisia kokemuksia äänestä tarkkojen mitauksiin perustuvien matemaattisten johtopäätösten sijasta. Tässä luvussa käsitellään lyhyesti psykoakustiikkaan liittyviä käsitteitä ja ilmiöitä. Kyseisistä opeista voi olla suurestikin apua, kun pyritään arvioimaan ihmisen korvalle aiheutuvia haittoja tai häiritsevyyden tasoa.

Äänekkyydelle on oma yksikkönsä, soni. Yksi soni vastaa 1000 Hz siniaallon äänekkyyttä 40 dB äänenpainetasolla. Toinen käytetty yksikkö, foni taas määritellään 1000 Hz tasoallon avulla. Suuruus on tällä taajuudella sama, kuin vastaava äänenpainetaso desibeleissä. Soni on asteikkona lineaarinen ja foni desibeliasteikon tavoin logaritminen. Taulukossa 4 fonien ja sonien keskinäinen vertailutaulukko [12].

Taulukko 4: Sonin ja fonin toisiaan vastaavat arvot.

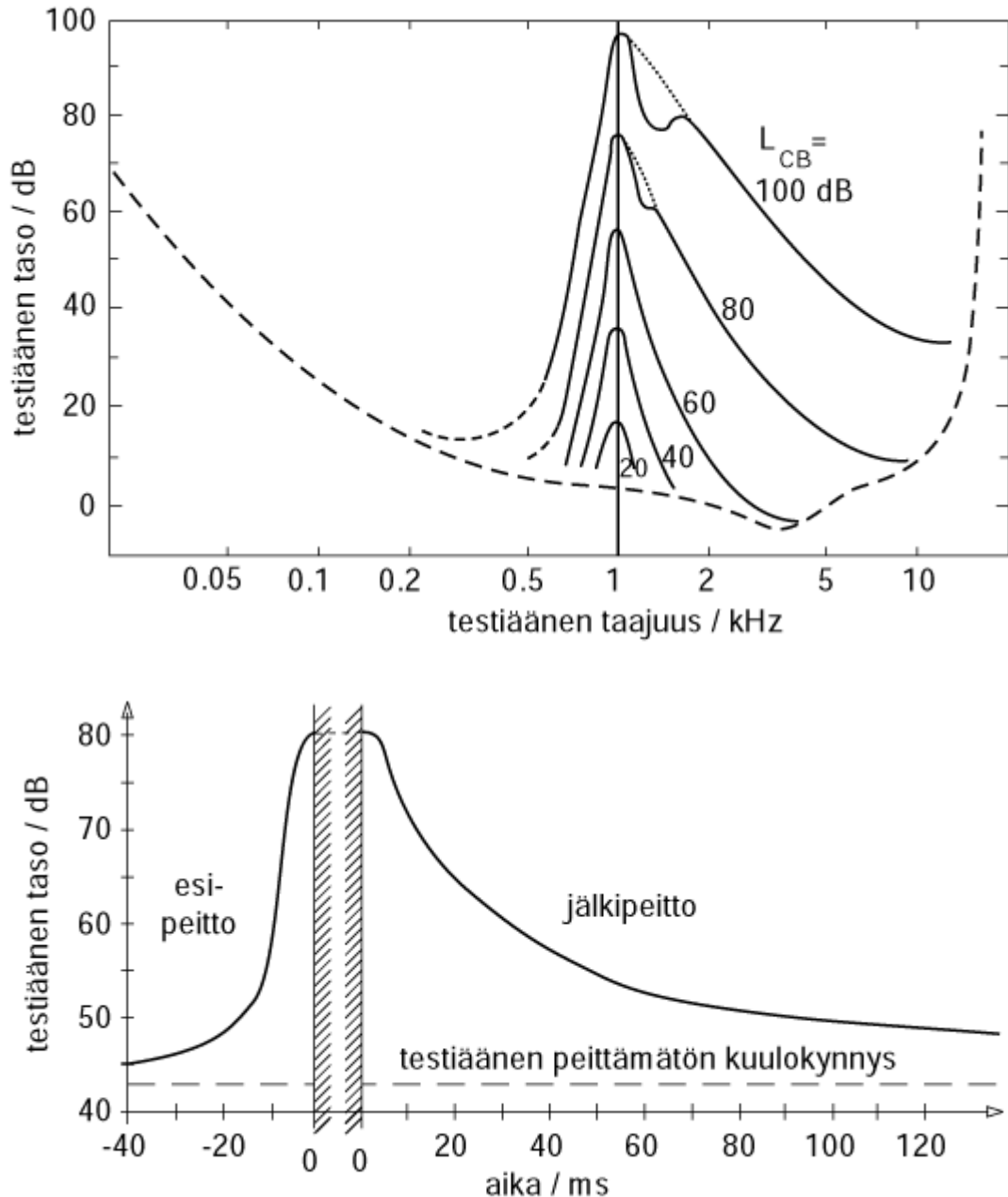
soni	1	2	4	8	16	32	64	128	256
foni	40	50	60	70	80	90	100	110	120

Kuvassa alapuolella on esitetty ns. vakioäänekkyyssäyrästä, joka kuvaa sitä, miten voimakkaan aistimuksen äänet aiheuttavat ihmisellä taajuuksittain. Kuvassa on taajuuskais-tana ihmisen kuuloalue ja äänenpainetasoa vastaavat käyrästöt foneina esitettynä. Kuvasta voidaan esimerkiksi todeta aiemmin mainittu herkkyys ihmisen puhealueella 300 ja 4000 hertsin välillä. Kannattaa vertailun vuoksi katsoa myös aiemmin esitelty kuva 5, jossa esiteltiin A-, B- ja C-painotukset.



Kuva 12. Vakioäänekkyysskäyrästä [3].

Mikäli ihmisen korva altistetaan kovalle äänelle jollain tietyllä taajuudella, tämä ääni heikentää muiden äänien havaitsemista kyseisen taajuuden ympäristössä. Mitä voimakkaampi ääni, sitä suuremmalla taajuusalueella ja voimakkaammin muut taajuudetkin vaimenevat korvassa. Peittoilmiö tapahtuu taajuuskaistan lisäksi myös aikatasolla. Nk. esi- peitto tapahtuu ennen kuuloaistimuksen muodostamista ja jälkipeitto sen jälkeen loivasti heiketen huomattavasti pidempään. Esipeitto kestää joitain kymmeniä millisekunteja ja jälkipeitto n. 200 ms. Kuvassa 12 on yläpuolella peittoilmiö taajuuden funktiona eri voimakkuuksilla ja alapuolella ajan funktiona.



Kuva 13. Taajuuspeitto (yläpuolella) ja esipeitto, sekä esi- ja jälkipeitto (alapuolella) [3].

Äänenkorkeudella tarkoitetaan ihmisen aistimaa äänen korkeutta. Äänen korkeus voidaan rinnastaa taajuuteen, mutta ihmisen tapa aistia eri äänen korkeuksia on huomattavasti monimutkaisempi. Äänen eri komponentit yhdistyvät ihmisen kokemina samaksi ääneksi ja yksittäisten komponenttien poistaminen ei aina muuta aistimusta. Korkeutta varten on olemassa muutamia kokeellisia asteikkoja, kuten Mel-, Bark- ja ERB-asteikot. Näistä ERB (Equivalent Rectangular Bandwidth) on uusin ja tarkempaan pidetty äänenkorkeuden asteikko. Asteikko perustuu korvan rakenteeseen ja se on johdettu sisäkorvan basilaarikalvon resonointipaikan ja äänenkorkeuden välisestä suhteesta.

Muita huomionarvoisia käsitteitä ovat äänenväri, äänen subjektiivinen kesto, terävyys, vaihteluvoimakkuus, karheus, tonaalisuus ja häiritsevyys. Osalle näistä on olemassa omat asteikkonsa pyrkien muuttamaan subjektiiviset ilmiöt mitattaviksi arvoiksi.

2.2.3 Kuulovaurio ja melun haittavaikutukset

Kuulovaurion eteneminen on verrannollinen altistumisen keston ja sen voimakkuuteen nähden. Melun aiheuttamat oireet voivat olla myös väliaikaisia tai pysyviä. Pienemmästä vauriosta palautuminen vie noin kaksinkertaisen ajan melu-altistumiseen kuluneen ajan verran. Kuulon herkkyys voi laskea jo 70 dB altistumisen johdosta, mikäli kuormitus on pitkäkestoista ja palautumista ei pääse syntymään tarpeeksi. Reilusti 100 dB ylittävä ääni saattaa aiheuttaa vaurion jo minuuteissa. Alla olevassa taulukossa on listattu eri melutasoja vastaavat ajanjaksot, kun kuulovaurioita alkaa syntyä.

Taulukko 5: Esimerkkejä erilaisista äänilähteistä ja niiden voimakkuuksista, sekä altistumisajoista, joilla kuulovaurioita voi syntyä [13].

Äänilähde (esim.)	Melutaso (dB)	Aika
Liikenne	85	8h
MP3-soitin	88	4h
Disco	91	2h
Kohina moottoripyöräilijän kypärän sisällä	94	1h
Moottorisaha	100	15min
Rock-konsertti	106	4 min
	112	1 min
Suihkukone	115	0 min

Taulukon mukainen altistuminen päivästä ja viikosta toiseen aiheuttaa vaikeuksia mm. puheen tunnistamiseen. Tämä voi tapahtua hitaasti vuosien aikana, jolloin vaurion toteaminen ajoissa voi olla hankalaa. Melusta johtuva vaurio tapahtuu sisäkorvassa, joko simpukassa tai kuulohermoissa. 130 dB tasolla saavutetaan kipuraja, jonka voimakkuudella syntyy pysyviä vaurioita jo hyvin lyhyessä ajassa. Tätä isommat voimakkuudet tasolla 140-150 dB vaurioittavat simpukan ja kuulohermojen lisäksi tärykalvoa ja kuuloluita. Neljännes kuulovaurioista johtuu Suomessa melusta. Melun lisäksi kuulovaurioita syntyy erilaisten sairauksien ja ikääntymisen vuoksi.

Melua ja ihmisen sietokykyä voidaan mitata päivittäisenä energia-annoksena käyttäen ns. ekvivalenttitasoa $L_{eq,T}$, jonka kaava on annettu alla

$$L_{eq,T} = 10 \log \frac{\sum t_i 10^{L_i/20}}{8 \text{ h}}, \quad (17)$$

jossa t_i on altistumisen kesto, L_i äänitaso altistumisen aikana ja jakajana altistumisen pituuden vertailuarvo, tässä 8 h. Näin saadaan numeerisesti määritettyä erilaisia kuormitus-tilanteita tason ja keston suhteen.

2.2.4 Infra- ja ultraäänet

Kuuloalueen ulkopuolella olevat infra- ja ultraäänet jätetään varsinaisessa tutkimuksessa tämän opinnäytetyön aihealueen ulkopuolelle, mutta käsitellään niitä kuitenkin tässä lyhyesti. Kuten aiempana on mainittu, ihmisen kuuloalue on noin 20 Hz ... 20 kHz kuitenkin yksilökohtaisesti kuuloalue voi olla suurempi tai pienempi riippuen esimerkiksi kuulijan iästä. Infraääniä, siis alle 20 Hz ääniä pystyy ihmiskorvakin kuulemaan, mikäli voimakkuudet ovat tarpeeksi suuria. Kuvan 12 vakioäänekkyyskäyrästä alinta kuulokynnyksen käyrää voidaan lineaarisesti ekstrapoloida 4-5 Hz alueelle asti. 20 Hz kohdalla kuulokynnys on hieman alle 80 dB eikä kuulo tällä taajuudella välittömästi katkea.

Infraäänten vaikutus ihmiskehoon ja ympäristöön nousi tuulivoiman yleistyttyä kiistan aiheeksi ja asiaa onkin alettu tutkia tarkemmin [14]. Toki infraäänien vaikutuksia on tutkittu vuosikymmeniä, mutta väitetyt haittavaikutukset ja sairastapaukset ovat tuoneet asian jälleen esille. Standardi ISO 9996:1996 käsittelee koneiden mekaanista värähtelyä ja sen vaikutuksia ihmiskehoon. Ilmassa etenevää infraääntä standardi ei kuitenkaan käsittele. Kuormitustyyppi on periaatteessa kuitenkin samanlaista, matalien taajuuksien värähtelyä, jolle ihmiskeho altistetaan. Standardissa todetaan, että matalan amplitudin värähtely ei ole haitallista [15]. Työ- ja elinkeinoministeriön teettämässä tutkimuksessa todetaan, että kuuloalueen alapuolelle jäävät infraäänet eivät ihmiseen vaikuta, mikäli niitä ei aistita. Tutkimuksessa on kattavasti mitattu ja vertailtu tuulivoimaloiden ja tavallisten asuinympäristöjen melutasoja välillä 0,1 Hz ... 10 kHz. Monesti kaupunkiympäristössä infraäänien taso on korkeampi, kuin tuulivoima-alueiden läheisyydessä. Lisätutkimuksille nähtiin myös tarvetta. Syy tuulivoiman lähellä asuvien ihmisten oireisiin on edelleen selvittämättä [16].

Ultraäänet eli hyvin korkeataajuuksiset äänet eivät kohtuullisilla tasoilla ihmiskorvaa tai kehoa häiritse, sillä ne vaimenevat jo ilman välityksellä kulkiessaan sitä nopeammin, mitä korkeammasta taajuudesta on kyse. Nesteissä ja kiinteissä aineissa ultraäänet kulkeutuvat pidemmälle. Ultraääntä sovelletaan teollisuudessa ja lääketieteessä. Esimerkiksi ultraäänilaitteella voidaan tutkia ihmisen elimiä ja sikiön kehittymistä, ultraäänipesu taas hyödyntää kavitaatiota synnyttäen pieniä paineiskuja irrottaen lian halutulta pinnalta.

2.2.5 Lainsäädäntö ja standardit

Meluun liittyy monenlaisia säädöksiä ja standardeja liittyen esimerkiksi asumiseen, liikennemeluun ja työolosuhteisiin. Tässä luvussa käydään lyhyesti läpi niistä tärkeimpiä.

Käsitellään ensimmäisenä asumisympäristöihin liittyvää lainsäädäntöä. Valtioneuvoston päätöksessä numero 993/1992 määrätään melutason ohjearvoista, jotka on annettu A-painotettuina ekvivalenttitasoina (lyhyesti $L_{A,eq,T}$) [17]. Koska kyse on ekvivalenttitasoina, päätökseen on erikseen lisätty pykälä, jonka mukaan mittaus- tai laskentatulokseen lisätään 5 dB, mikäli melu on luonteeltaan iskumaista tai kapeakaistaista. Päätöksen mukaiset asuinalueita, asumistiloja ja toimistoja koskettavat ohjearvot ovat näkyvissä alla olevassa taulukossa. Taulukossa listattu lain melutasoina ainoastaan tämän työn aihealueeseen nähden kiinnostavat melurajat. Mainitsemisen arvoista lienee se, että olemassa oleville asuinalueille sallitaan 50 dB melutaso, mutta uusille asuinalueille vaaditaan 5 dB matalampi melutaso. Toimistohuoneistoille ei ole erikseen määrätty yöaikaista melurajaa, koska niiden oletetaan olevan silloin tyhjiä.

Taulukko 6: A-painotetut ekvivalenttitasot yöllä ja päivällä.

Ympäristö	$L_{A,eq,T}$ päivällä klo. 7-22 (dB)	$L_{A,eq,T}$ yöllä klo 22-7 (dB)
Ulkona, asuinalueet yms.	55	50
Ulkona, asuinalueet yms., uudet alueet		45
Sisällä, asuintilat yms.	35	30
Liike- ja toimistohuoneistot	45	-

Sosiaali- ja terveysministeriöllä on oma ohjeistus nimeltä Asumisterveysohje 2003:1, jossa on säädetty lukuisia asumisterveyteen liittyviä raja-arvoja [18]. Ohjeessa on säädetty samat melurajat, kuin laissa, mutta sisältää myös joitain tarkennuksia. Yllä mainitut arvot ovat A-painotettuja arvoja. A-painotuksen yhteydessä luvussa 2.1.2 todettiin, että matalien taajuuksien häiritsevyys ei tule kaikissa tilanteissa tarpeeksi esille, kun käytetään kyseistä painotusta. Matalille taajuuksille onkin annettu erikseen nukkumistiloille yöaikaiset raja-arvot välillä 20 Hz ... 200 Hz. Arvot ovat näkyvissä alla olevassa taulukossa terssikaistoittain.

Taulukko 7: Nukkumiseen tarkoitettujen tilojen A-painotetut ekvivalenttitasorajat yöaikaan.

Taajuus (Hz)	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200
$L_{A,eq,T}$ (dB)	74	64	56	49	44	42	40	38	36	34	32

Viimeisenä rakentamismääräämiskokoelma C1 (1998), jossa käsitellään asuntojen akustisten tunnuslukujen raja-arvoja uudisrakennuksessa [19]. Näihin kuuluu huoneiston erilaisten laitteistojen melutasojen lisäksi luvussa 2.1.4 esitellyt tunnusluvut jälkikaiunta-aika, ilmajäneneristävyys sekä askelääniluku.

Jälkikaiunta-aika on tunnusluku, jolle on tarpeen määrittää sekä ylä- että alaraja. Liian pitkä jälkikaiunta-aika tarkoittaisi melualtista ja huonosti ääntä absorboivaa huonetta. Liian pieni jälkikaiunta-aika taas vaimentaa tärkeät puheen taajuusalueen äänenvoimakkuudet liian nopeasti. Tämä on ongelmallista varsinkin luokka- ja kokoustiloissa. Toisaalta porraskäytäviä varten on määritetty ainoastaan yläraja. Rajat onkin laadittu huoneiden käyttötarkoituksen mukaan, arvot ovat ohjeellisia. Alla olevaan taulukkoon on kerätty niistä muutama.

Taulukko 8: Ohjearvot jälkikaiunta-ajalle eri tiloissa.

Tila tai käyttötarkoitus	Jälkikaiunta-aika, enimmäisarvo (s)
Porraskäytävä	1,3
Ruokala	1,0 ... 1,3
Luokkahuone tms.	0,6 ... 0,9
Päiväkodin leikkihuone	0,6

Ilmajäneneristävyyden ohjearvot ovat minimiarvoja. Laissa määrätyt arvot ovat velvoittavat ja tämän työn kannalta kiinnostavimmat raja-arvot ovat asumista koskevia. Asunnon ja sitä ympäröivien tilojen välillä vaaditaan vähintään 55 dB vaimennus ja asunnon ja porraskäytävän välille vaaditaan vähintään 39 dB vaimennus, kun välissä on ovi. Rappukäytävän uloskäyntinä toimivalla ovella tai oviyhdistelmällä on oltava vähintään 30 dB luokitus.

Askeläänitasolukujen tapauksessa ilmoitetut arvot ovat suurimpia sallittuja. Ensimmäinen raja-arvo on tarkoitettu sovellettavaksi asuinhuoneistoihin, makuutilat, keittiö, oleskelutilat yms. mukaan luettuna. Näitä tiloja koskeva maksimi on 53 dB ja se ei kosketa mm. wc- tai kylpyhuonetiloja. Käytävälle, joista on käynti asuntoihin eli esimerkiksi kerrostalon rappukäytävälle, suurin sallittu arvo on 63 dB.

LVIS- ja niitä vastaaville laitteille on määritetty melun ylärajat A-painotetulle ekvivalentitasolle, sekä A-painotetulle maksimitasolle. Rajat on annettu erikseen keittiölle ja muulle asunnolle. Keittiössä rajat ovat hiukan sallivammat. Lisäksi tasoihin ei huomioida veden laskemisesta syntyvää ääntä ja tehostetun ilmanvaihdon ollessa käytössä sallitaan 10 dB ylitykset tasorajoituksiin. Rajat ovat näkyvissä taulukossa 9.

Taulukko 9: LVIS-järjestelmien tuottaman melun rajat huoneistoissa.

Tila	$L_{A,eq,T}$ (dB)	$L_{A,max}$ (dB)
Keittiö	33	38
Muut asuinhuoneet	28	33

Tässä esitellyt rakentamismääräämiskokoelman melurajat ja muut määrytykset perustuvat nimensä mukaisesti luokitukseen C1. Luokituksia on myös väljempää ja tiukempia. D-luokitusta sovelletaan lähinnä vanhempiin rakennuksiin ja A- ja B-luokitukset ovat tiukempia vaatimuksiensa puolesta. Rakennuksen virallinen luokitus hankitaan mittaustulosten perusteella.

2.3 Äänieristys

Yksi tehokkaimmista keinoista estää melun kulkeutumisen ihmisasuntoihin tai vaikkapa työpaikalle on eristää melulähde ympäristöstään. Äänieristys ei tarkoita samaa asiaa, kuin absorptio. Absorptiossa äänen energiaa ”imeytyy” materiaaliin, eristettäessä ääntä estetään yksinkertaisesti sen eteneminen. Ääntä absorboivat tai eristävät ominaisuudet ovat materiaaleilla osittain toisiaan poissulkevia, hyvässä eristeessä ääni heijastuu pois ja hyvässä absorptiomateriaalissa se imeytyy materiaaliin. Seinän ääneneristävyys on laskettavissa nk. massalain avulla ja siitä esitellään kaksi eri menetelmää tässä luvussa.

2.3.1 Massalaki

Tässä luvussa esitellään lyhyesti yhden seinämän ääneneristävyyskaavoja. Ääneneristävyyskannalta merkittäviä ominaisuuksia ovat seinämän paksuus, tiheys, sekä äänen tulokulma. Tulokulman voidaan konservatiivisesti olettaa olevan kohtisuora, jolloin äänen läpäisevyys on suurin. Seinämän ääneneristävyys saadaan alla olevasta kaavasta

$$R = 10 \log \left(1 + \left[\frac{\omega \rho_p h \cos \theta}{2 \rho_0 c} \right]^2 \right) \approx 20 \log \left(\frac{\omega \rho_p h \cos \theta}{2 \rho_0 c} \right), \quad (18)$$

missä ρ_p on seinämämateriaalin tiheys, h seinämämateriaalin paksuus, θ äänen tulokulma, ρ_0 ilman tiheys, sekä ω kulmanopeus,

$$\omega = 2\pi f, \quad (19)$$

missä f viittaa kuhunkin eri taajuuteen. Näin saadaan siis yksittäin laskettua R jokaiselle eri taajuudelle. Kaavan 18 logaritmin sisällä olevan lausekkeen jaettavan osan taajuuden, paksuuden tai tiheyden tuplaantuminen lisää vaimennusta 6 dB verran. Kätevä nyrkkisääntö, kun haarukoi eri arvoja. Tätä työtä tehdessä huomattiin, että kaavan 18 jälkimmäinen approksimoitu versio on siitä ongelmallinen, että joillain taajuuden ja ainevahvuuden yhdistelmillä kaava antaa negatiivisia arvoja. Tällöin voidaan olettaa, että ääneneristys on 0 dB tai lähellä sitä. Kaavan ensimmäinen versio antaa aina positiivisen arvon, edellä kuvatussa tapauksessa arvo olisi lähellä nollaa desibeliä.

Diffuusille äänikentälle pätee seuraava kaava

$$R_d = R(0) - 3 \text{ dB}, \quad (20)$$

missä R_d on diffuusin äänikentän vaimentuma ja $R(0)$ käytännössä kaavalla 18 saatava arvo. Diffuusista äänikentästä katso lisää luvusta 2.1.4 kaavan 13 yhteydestä.

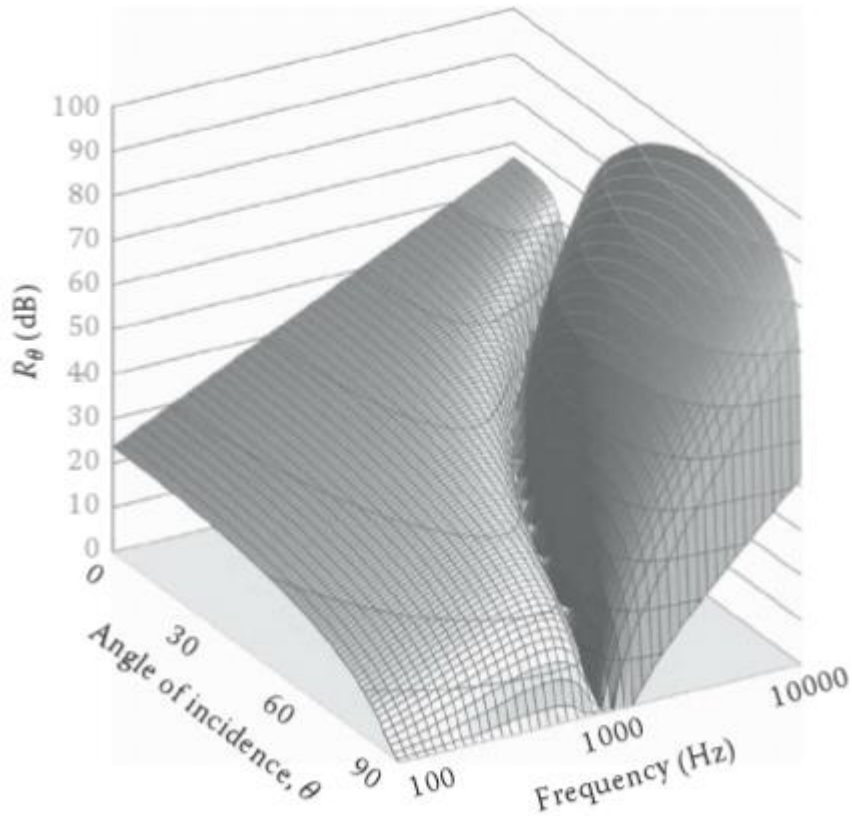
Seinämän koinsidenssitaajuuden f_c yläpuolella seinämän äänieristys heikkenee merkittävästi. Koinsidenssitaajuus voidaan laskea alla olevasta kaavasta

$$f_c = \frac{c^2}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho_p h}{D}}, \quad (21)$$

missä h on seinämän paksuus, ρ_p seinämateriaalin tiheys ja D laattavakio. Laattavakio lasketaan alla olevalla kaavalla

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}, \quad (22)$$

missä E on materiaalin kimmomoduuli ja ν poissonin vakio. Seinämä kannattaa mitoittaa yleensä siten, että rakenteen koinsidenssitaajuus olisi ihmisen kuulon puhealueen yläpuolella eli vähintään 3000 ... 4000 Hz. Koinsidenssi-ilmiö koskee ohuita levyjä, kuten kipsi-, teräs tai betonilevyjä. Massalakeja ei voida käyttää rakenteelle samalla tai korkeammalla taajuusalueella, kuin määritetty koinsidenssitaajuus. Moniseinäisen rakenteen tapauksessa koinsidenssitaajuus täytyy määrittää joka seinämälle erikseen, mikäli seinämiä ei ole esimerkiksi liimattu toisiinsa. Kuvassa 14 näkyvässä koinsidenssitaajuuden vaikutus materiaalin vaimennuskykyyn. Vaimennus ei heikkene samanaikaisesti jokaiselle taajuudelle, vaan koinsidenssitaajuuden vaikutus riippuu äänen tulosuunnasta. Kuten kuvasta nähdään, vaimennus heikkenisi tasan koinsidenssitaajuuden kohdalta silloin, kun teoreettinen tulosuunta normaaliin nähden olisi 90 astetta eli rakenteen pinnan suuntainen. Muille tulokulmille heikkeneminen tapahtuu koinsidenssitaajuutta korkeammille taajuuksille. Äänen heijastuessa eri pinnoilta tulosuuntaa eri taajuuksille ei voida yleensä tietää etukäteen, joten koinsidenssitaajuutta korkeammat taajuudet vaimennuksessa on jätettävä huomioita.



Kuva 14. Vaimennus ja koinsidenssitaajuuden vaikutus siihen äänen tulokulman ja taajuuden funktiona. Esimerkkirakenteen massa on 25 kg/m^2 ja koinsidenssitaajuus 1000 Hz [20].

2.3.2 Kahden seinämän äänieristys

Kahden seinämän massalain ajatuksena on tehokkaampi ääneneristys yhteen seinään verrattuna ja massaa lisäämättä. Seinämien väliin jää ilmarako, joka auttaa kokonaisuuden tehostamisessa. Yleensä seinämän materiaalit valitaan siten, että toinen materiaaleista on raskasta eli tiheää ja toinen kevyttä. Raskas materiaali eristää tehokkaasti äänen matalia taajuuksia ja kevyt materiaali korkeita taajuuksia. Kahden seinämän rakenteen ääneneristävyys R_{\perp}^{tupla} saadaan kaavasta

$$R_{\perp}^{tupla} = 20 \log \left(\frac{\omega \rho_1 h_1}{2 \rho_0 c} \right) + 20 \log \left(\frac{\omega \rho_2 h_2}{2 \rho_0 c} \right) = 20 \log \left(\frac{\omega^2 \rho_1 h_1 \rho_2 h_2}{4 \rho_0^2 c^2} \right), \quad (23)$$

missä ρ_1 ja ρ_2 ovat kahden seinämämaterialin tiheydet, sekä h_1 ja h_2 niiden paksuudet. Kaavan ensimmäinen muoto on siitä hyödyllinen, että kummankin seinämän ääneneristävyys saadaan erotettua laskennassa. Koinsidenssitaajuus on huomioitava tässäkin kaavassa, eli mikäli käsiteltävä taajuusalue on samankokoinen tai suurempi, kuin kyseisen seinämän koinsidenssitaajuus, niin tällöin ääneneristävyys heikkenee merkittävästi. Koinsidenssitaajuus voi esimerkiksi ylittyä toiselle seinämälle, muttei toiselle. Kaava on

johdettu suoraan kaavasta 18, josta on esitetty kaksi eri versiota, joista tähän on sovellettu sitä jälkimmäistä.

Seinien välissä oleva tila on oltava käytännössä ilmatiivis ja seinien värähtely tätä ilmassaa vasten aiheuttaa resonanssin tietyllä taajuudella. Ilma on kokoonpuristuvaa ja muodostaa seinien väliin jousen kaltaisen ilmiön, hieman kuten Helmholtz-resonaattorin tapauksessa (kts. luku 2.1.4). Tämä ilman resonanssitaajuuden f_0 arvo saadaan laskettua alla olevalla kaavalla

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho_0 c^2 (\rho_1 h_1 + \rho_2 h_2)}{h_{\text{väli}} (\rho_1 h_1 \rho_2 h_2)}}, \quad (24)$$

missä $h_{\text{väli}}$ on seinien väliin jäävän ilmaraon leveys. Kun tarkastellaan yllä olevaa kaavaa, on helppo todeta, että ilmaraon suurentamisella tai pienentämisellä pystytään vielä vaikuttamaan resonanssitaajuuteen vielä senkin jälkeen, kun seinämateriaalit ja niiden paksuudet on lyöty lukkoon. Ihmisen kuulon kannalta ominaistajuus kannattaa mitoittaa ihmisen korvalle herkän kuuloalueen alapuolelle, esimerkiksi alle 100 hertsiin.

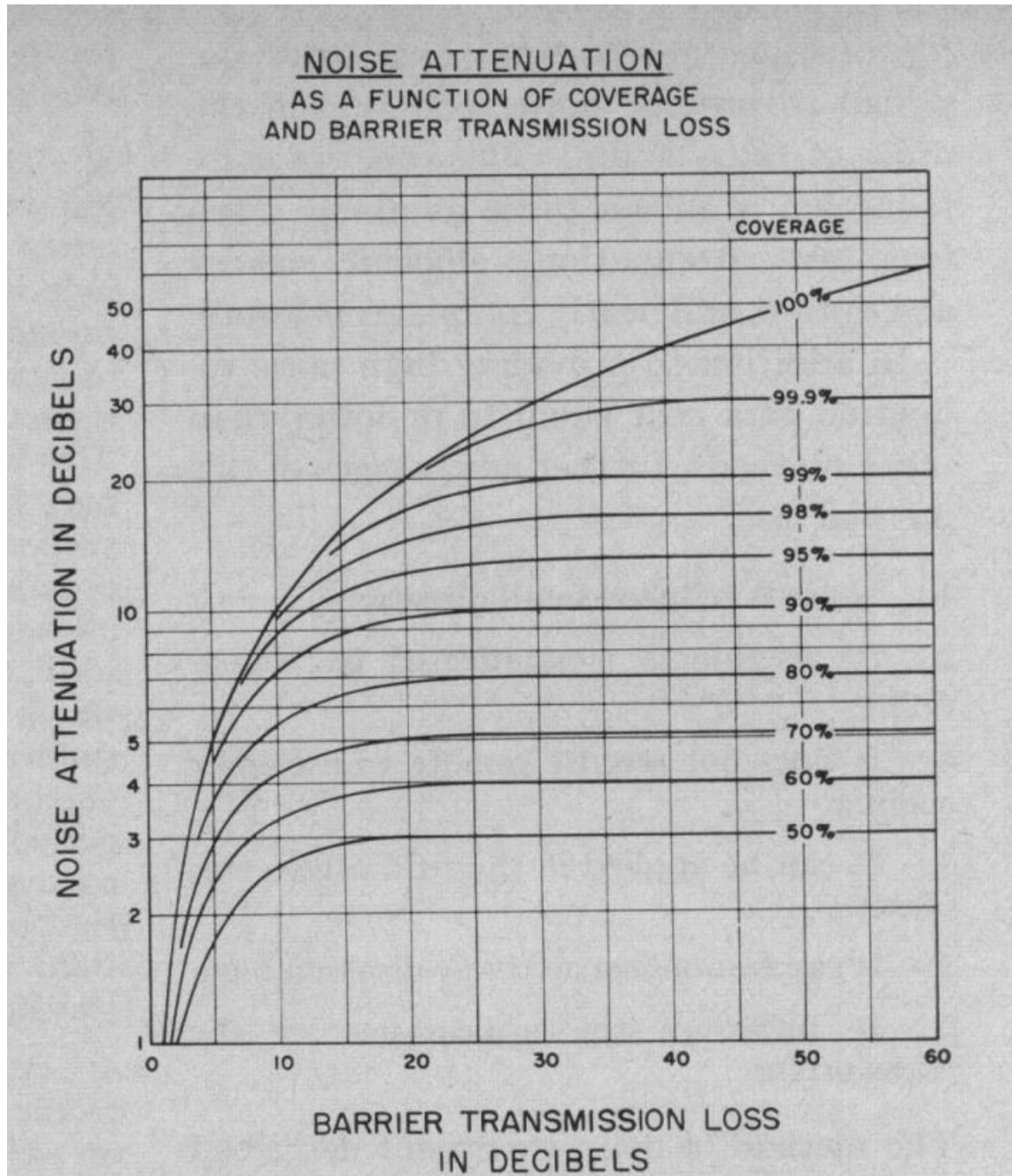
Tähän mennessä on käyty läpi ääneneristävyyttä ja siitä heikentäviä ja vahvistavia tekijöitä. Seuraavaksi esitellään laskukaava, jolla saadaan melutaso huoneessa melulähteen ja eristävän seinän takana. Kaava pätee diffuusille äänikentälle. Huoneessa 1 sijaitsee äänilähde, näiden välissä on eristävä seinämä ja halutaan tietää melutaso huoneessa 2. Se saadaan laskettua alla olevalla kaavalla

$$L_{p,2} = L_{p,1} - 10 \log \left(1 + \frac{A_2}{S \tau_d} \right) \approx L_{p,1} - R_d - 10 \log \left(\frac{A_2}{S} \right), \quad (25)$$

missä $L_{p,1}$ ja $L_{p,2}$ ovat äänenpainetasot huoneissa 1 ja 2, A_2 on huoneen 2 kokonaispinta-ala, S jo aiemmin esitelty huoneen absorptiopinta-ala ja τ_d äänen välityskerroin. Tästä kaavasta sovelletaan tässä työssä kaavan jälkimmäistä osaa, jolloin voidaan hyödyntää massalain ja diffuusin äänikentän kaavoja.

Tässä vaiheessa, kun käytettävät kaavat on esitelty, on hyvä todeta muutama asia liittyen kaavojen paikkansapitävyyteen todellisissa rakennuksissa. Rakennettaessa esimerkiksi seinää tilan ja melulähteen väliin, tulee huomioida, että ääni saattaa päästä jotain kiertotietä tilaan, josta sitä pyritään eristämään. Esimerkiksi pelkkä seinä ei estä äänen kulkeutumista, jos eristävän seinän molemmin puolin on vaikkapa ikkuna rakennuksen ulkopuolelle tai muu ääntä lävistävä rakenne, mitä pitkin ääni pääsee kiertämään. Varsinaisen eristävän seinämärakenteenkin eristävä vaikutus heikkenee, mikäli siinä on jonkinlaisia poikkeamia. Esimerkiksi johtojen tai putkien läpiviennit ja muut vastaavat heikentävät ääneneristävyyttä. Eristävän seinämän aukkojen pinta-ala suhteessa koko eristävän rakenteen pinta-alaan vaikuttaa rakenteen eristämiskykyyn. Tietyllä aukkojen suhteellisella määrällä voidaan saavuttaa rajallinen ääneneristävyys desibeileissä. Esimerkiksi 0,1%

aukkojen määrä rakenteessa tarkoittaisi sitä, että eriste pystyy enintään 30 dB vaimenukseen. Alla olevassa kuvassa näkyvissä muutamia esimerkkejä tästä. Tässä luvussa aiemmin esiteltyjä laskentakaavoja voidaan siis käyttää karkeassa mitoituksessa, mutta tarkemmat laskennat tulisi suorittaa esimerkiksi simulointiohjelmistolla ennen rakentamista. Lisäksi mittaukset paikan päällä varmistavat ääneneristeen toimivuuden.



Kuva 15. Esimerkkejä suurimmasta mahdollisesta ilmanääneneristävyydestä erilaisilla suhteellisilla peittävyksillä [21].

3. PARAMETRINEN SUUNNITTELU

Tässä luvussa käsitellään tämän työn pääaihetta, eli parametrista suunnittelua, jota sovelletaan akustiikka-aiheisessa suunnittelutehtävässä. Tarkoituksena on hyödyntää massalasketta laskettaessa äänilähteen eristämistä ympäristöstään. Akustiikan teoriaa siis sovelletaan parametriseen suunnitteluun, jolloin saadaan karkea mitoitus, jota voidaan edelleen käyttää suunnittelun seuraavassa vaiheessa. Parametrisellä suunnittelulla ei ole tarkoituskaan tuottaa yhdellä napinpainalluksella valmista tuotetta tyhjästä, vaan auttaa haarukoimaan suunnittelun kannalta tärkeimpiä muuttujia seuraavia suunnitteluvaiheita varten. Tämän työn aihepiiri olisi siis todellisessa suunnittelutehtävässä ensimmäisiä vaiheita ongelman määrittämisen ja reunaehtojen asettamisen jälkeen. Seuraavat toimenpiteet karkean mallintamisen jälkeen olisi kerättyjen tietojen perusteella joko tarkempi simulointi simulointiohjelmistoa käyttäen tai vaihtoehtoisesti prototyypin rakentaminen ja mittaukset teoreettisen laskennan tueksi.

Matalan tason malleja voidaan alkaa rakentaa monesta eri lähtökohdasta. Mallin pohjana voidaan pitää esimerkiksi geometriaa, johon 3D-suunnitteluohjelmistoissa löytyy tarvittavia välineitä. Tämän työn parametrsointi tehdään täysin laskentaan perustuvana mallina, jolloin tiettyjä parametreja muuttamalla pyritään etsimään optimaalinen rakenne annettuun tehtävään.

3.1 EDA-työkalu

Työssä käytetään apuna EDA-työkalua, joka on otettu käyttöön helpottamaan suunnittelun parametrien tarkastelua ja niiden vuorovaikutusta. EDA tulee englannin kielen sanoista Engineering Design Analysis ja tarkoittaa suomeksi suunnittelun tarkastelua. EDA-työkalu on Tampereen teknillisen yliopiston kone- ja tuotantotekniikan laitoksen kehittämä apuväline parametriseen suunnittelun laskennalliseen toteuttamiseen. EDA-työkalun käyttöliittymä on rakennettu Exceliin. Tässä taulukkolaskentaohjelmassa on hyvät työkalut jo ennestään optimointiin, joten se on pääsyyntä tähän valintaan. Teknisten ongelmien ratkaisumallien rakentamiseen Excel ei ole kuitenkaan erityisen kätevä ja sitä varten EDA työkalu hyödyntääkin Matlabia. Matlabiin voidaan koodata käytännössä minkälainen laskentamalli tahansa, joten käyttökohteita on periaatteessa rajattomasti. Näiden kahden ohjelmiston välisen tiedonkulun mahdollistaa niiden väliin asennettava ohjelma, nk. pipe app. Kyseessä on taustalla toimiva ohjelmistotekninen ratkaisu, johon ei EDA-työkalua käytettäessä tarvitse puuttua.

Tarvittavat työkalut siis ovat Matlab ja Excel, johon tarvitsee olla solver-lisäosa asennettuna, sekä pipe app. Matlab osio EDA-työkalusta sisältää koodin puolesta joitain vaatimuksia, joihin perehdytään tarkemmin myöhemmin tässä työssä, luvussa 3.2. Seuraavaksi tarkastellaan Exceliin rakennettua käyttöliittymää hiukan tarkemmin.

3.1.1 Päänäkymä

Käyttöliittymässä ensimmäisenä vasemmalta ylhäältä löytyy suunnitteluparametrien listaus. Parametreille on määrätty yksikkö, arvo, sekä ylä- ja alaraja. Yksikkö ja nimi ei itsessään vaikuta laskentaan, mutta ne kannattaa kuitenkin selkeyden vuoksi laittaa samaksi, kuin vastaava muuttuja ja yksikkö varsinaisessa laskentamallissa. Muuttujan tämänhetkinen arvo, joko käyttäjän asettama tai optimoinnin tuloksena saatu on laskentamallille lähetettävä arvo, jolle on määrätty erikseen rajat, joita EDA-työkalu noudattaa. Eli kuvassa 16. näkyvät muuttujat a , b , ja c voivat saada vain arvoja välillä 0-10 m. Jos haluttaisiin, että muuttujan a pitää olla jokin tietty arvo, asetetaan kyseinen arvo sekä ylärajaksi, että alarajaksi.

Name	Units	Value	Lower limit	Upper limit
a	m	1,12	0,00	10,00
b	m	1,57	0,00	10,00
c	m	0,74	0,00	10,00

Kuva 16. Suunnitteluparametrit.

Suunnitteluparametrien alapuolella on lista järjestelmän ominaispiirteistä. Nämä ovat laskettavassa kokonaisuudessa suunnitteluparametrejä muokkaamalla syntyvät lopulliset arvot joita Excel optimoi. Ensimmäisenä suunnitteluparametrien tavoin on muuttujan nimi, yksikkö ja tämänhetkinen arvo. *Target Value* tarkoittaa arvoa, mihin optimoinnissa halutaan pyrkiä. Eri muuttujia voidaan myös painottaa viimeisessä pystysarakkeessa. Kuvassa 17 alapuolella esimerkki siitä, miltä osio kokonaisuudessaan näyttää. *Aim* tarkoittaa sitä, pyritäänkö optimoinnissa suureen vai pieneen arvoon eli minimoidaanko vai maksimoidaanko sitä ja tämä ilmaistaan käyttämällä joko arvoa -1 tai 1.

Name	Units	Value	Targ. Value	Aim (sign)	Weight
x	m	2,69	2	-1	10,00
y	m	4,31	5	1	10,00
z	m	3,00	3	-1	1,00

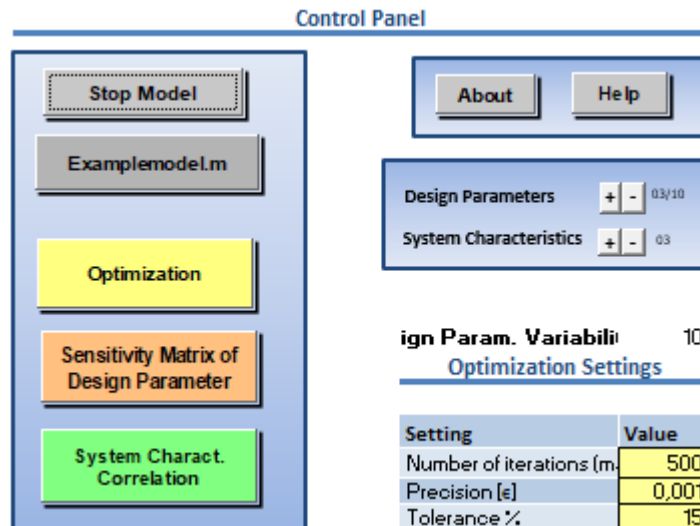
Kuva 17. Järjestelmän ominaispiirteet-osio.

Oikealla käyttöliittymästä löytyy hallintapaneeli eli englanniksi Control Panel. *Start Model / Stop Model* -painikkeesta käynnistetään ja pysäytetään laskenta. Nappia painettaessa pipe app käynnistää Matlab-laskennan. Mallin käynnistäminen ei kuitenkaan vielä sen

kummemmin lähde optimoimaan parametreja. Mallin ollessa käynnissä voidaan kuitenkin suunnitteluparametreja muuttaa käsin, jolloin ominaispiirteiden arvot muuttuvat vastaavasti. Mallin käynnistymispainikkeen alapuolella olevasta painikkeesta painamalla voidaan hakea tiedostojärjestelmästä Matlab-tiedosto, johon koodi on tallennettu. Tämä tarvitsee siis tehdä ainoastaan kerran.

Suunnitteluparametrien optimointi käynnistetään *Optimization*-painikkeesta. Tämä käynnistää numeroiden murskaamisen Matlabissa, kun Excel lähettää eri suunnitteluparametrien arvoja ja Matlab-funktio ratkaisee arvoja ja lähettää niitä takaisin Excelille. Malli täytyy siis olla käynnistettynä ylimmästä painikkeesta ennen, kuin optimointia voidaan aloittaa. Käynnistymisen jälkeen optimointi jatkuu niin kauan, kun Excelissä määritetyt reunaehdot ominaispiirteissä toteutuvat mahdollisimman hyvin. Optimoinnin alapuolella olevista painikkeista saadaan auki näkymät suunnitteluparametrien herkkyySMatriisille ja järjestelmän ominaispiirteiden välisille korrelaatioille. Näitä tarkastellaan paremmin luvussa 3.1.2.

Hallintapaneelin oikeassa reunassa voidaan lisätä tai vähentää rivejä suunnitteluparametreille ja järjestelmän ominaispiirteille. Näillä painikkeilla siis varmistetaan, että Matlab-koodissa EDA-funktion *input*-muuttujien määrä vastaa suunnitteluparametrien määrää ja *output*-muuttujien määrä vastaa järjestelmän ominaispiirteiden lukumäärää. Alhaalta ohjauspaneelin oikeasta reunasta voidaan myös muokata optimoinnin asetuksia, kuten iteraatioiden määrää, laskennan tarkkuutta ja sallittua suhteellista virhettä. *About*-painikkeesta löytyy lisätietoja ohjelmiston kehittäjistä ja *Help*-painikkeesta löytyy lyhyt muistilista käyttöliittymän eri osista. Kuvassa 18 käyttöliittymän hallintapaneeli.



Kuva 18. Hallintapaneeli.

Kuvassa laskentamalli on juuri käytössä eli ylimmässä painikkeessa on teksti ja toiminnallisuus mallin pysäyttämiseksi. Tällöin kolme alinta painiketta ovat käytössä. Laskennan ollessa pysäytettynä kolme alinta painiketta poistuvat käytöstä, jolloin niiden teksti muuttuu häivytytyksi.

3.1.2 Sivunäkymät

Tässä luvussa käsitellään lyhyesti EDA-työkalun Excel-käyttöliittymän sivunäkymät. Herkkyysmatriisi saadaan näkyviin painamalla ohjauspaneelin toiseksi alinta painiketta. Esimerkkitapauksen herkkyysmatriisi on alapuolella kuvassa 19.

Relative Sensitivity Matrix of the Design Parameters

		a	b	c	
		m	m	m	
Actual value		1,12	1,57	0,74	
x	m	2,69	0,42	0,58	0,00
y	m	4,31	0,16	0,74	0,10
z	m	3,00	0,00	0,82	0,18
		0,58	2,14	0,29	

(*)System Design Parameter Priorities

Kuva 19. Herkkyysmatriisi.

Tämä matriisi esittää suunnitteluparametrien suhteellisen vaikutuksen järjestelmän ominaispiirteisiin. Kuvan 16 tapauksessa esimerkiksi parametria c muuttamalla vaikutetaan järjestelmään kovin vähän tai ei ollenkaan, koska suhteelliset arvot ovat muuttujille x , y ja z joko nolla tai muulloinkin melko matalat suuruudeltaan. Parametria b muuttamalla

vaikutetaan eniten muuttujaan z ja vähiten muuttujaan x . Lukeman lisäksi taulukon solujen väri havainnollistaa suhteellisen herkkyyden arvoa. Näin saadaan tietoa siitä, miten suunnitteluparametreja muuttamalla vaikutetaan järjestelmän toimintaan. Tästä on eniten hyötyä, kun parametreja hienosäädetään. Tutkittavat funktiot saattavat olla epälineaarisia, jolloin parametrien vaikutus ja näin herkkyydsmatriisin arvot voivat muuttua paljonkin eri pisteissä eli silloin, kun suunnitteluparametrejä muutetaan merkittävästi.

Käyttöliittymän hallintapaneelin alimmaisesta painikkeesta saadaan näkyville järjestelmäominaisuuksien välinen korrelaatiotaulukko. Siitä voidaan tarkastella ominaisuuksien keskinäistä suhteellista vuorovaikutusta. Kuvassa 20 esimerkitapauksen taulukko.

Adjusted System Characteristics Correlation Table (ASCC)

		+ - ~			
		m m m			
		Actual value	2,69	4,31	3,00
x	m	2,69	1,00	-0,91	0,80
y	m	4,31		1,00	-0,97
z	m	3,00			1,00

Kuva 20. Korrelaatiotaulukko järjestelmän ominaispiirteiden välillä.

Esimerkin taulukosta voidaan esimerkiksi nähdä, että jos y saisi isompia arvoja, tällöin muuttujan z arvo laskee lähes samassa suhteessa. Taulukon tiedoilla voidaan siis päätellä, pyrkivätkö ominaisuudet muuttamaan samaan vai eri suuntiin. Tiedosta on apua eri ominaisuuksien välisistä ristiriidoista tai myötävaikutuksesta, jolloin voidaan tehdä päätöksiä siitä, mitä ominaisuutta uhraamalla päästään lähemmäksi haluttuja tavoitteita.

3.1.3 Huomioita käyttöliittymästä

Käyttöliittymä painikkeineen on laadittu suhteellisen itsestään selväksi käyttää ja tehdä laskentaa. Käytettäessä esiintyy jossain määrin pientä hidastelua, varsinkin laskentamallin käynnistyminen aiheuttaa pienen hidastuksen pipe appin ja Matlabin käynnistyessä. Silloin kun käyttäjä ei ole itse tehnyt virheitä käyttäminen on kuitenkin sujuvaa. Mikäli esimerkiksi suunnitteluparametrien tai järjestelmän ominaisparametrien määrä ei täsmää Matlab-funktion kanssa tai siinä suoritettavassa laskentakoodissa on vikaa, on odotettavissa erilaisia ongelmia. Matlab-ikkuna ja Excel saattavat kaatua hidastaen koko käyttöjärjestelmän toimintaa hetkellisesti. Lisäksi on pidettävä mielessä, että käynnistettäessä laskentamallia aukeaa Matlab-ikkuna taustalle, ja jos sen sulkee tai sen toimintaan puutuu, voi seurata erilaisia virhetilanteita. Matlab-ikkuna kannattaa sulkea laskentamallin pysäyttämisen jälkeen kirjoittamalla tekstikenttään ”exit”. Mitään pysyviä ongelmia eivät

tätä työtä tehdessä eri kaatumiset ja virhetilanteet ole aiheuttaneet laskentamallille tai Excel-dokumentille, eli kaatuneen ohjelman sulkeminen ja uudelleenkäynnistäminen pelastavat näistä tilanteista.

3.2 Laskentamalli

EDA-työkalun käyttöön kuuluu olennaisesti Matlabin hyödyntäminen, jossa varsinainen tutkittavan ilmiön laskenta tapahtuu. Matlab on siitä kätevä työkalu, että monet oppilaitokset käyttävät sitä opetuksessa ja yliopisto-opiskelijoilla on usein vähintään välttävää tuntuma ko. ohjelmistolla laskemiseen. Lisäksi Internetistä löytyy englanniksi ja suomeksi kattavasti eri tasoisia oppaita alkuun pääsemiseksi ja apua, sekä esimerkkejä monenlaisien ongelmien ratkaisemiseksi. Ennen EDA-työkaluun siirtymistä kannattaa koeajaa oma laskentakoodi ilman myöhemmin esiteltävää EDA-funktiota joillain lähtöarvoilla laskettuna, jotta voidaan todeta itse laskennan menevän oikein.

Matlab eroaa merkittävästi joistakin insinöörien käyttämistä työkaluista (kuten MathCad tai Excel) siten, että suoritettavat toimenpiteet kirjoitetaan riveittäin kuten ohjelmakoodi. Matlabia käytettäessä ohjelmointikokemuksesta voikin olla hyötyä, tosin luonnollisesti erilaiset matemaattiset operaatiot taipuvat Matlabissa huomattavasti ketterämmin ja joskus täysin eri tavalla.

Tässä luvussa käsitellään tämän työn puitteissa käytettäviä funktiota ja erilaisia lausekkeitä. Pari muistutusta tai varoittavaa esimerkkiä tulisi huomioida hieman tarkemmin, jotta ne käsitellään tässä ennen varsinaisia laskentamallien esimerkkejä. Nämä ovat siis kirjoittajan tätä työtä tehdessä toteamia mahdollisia ongelmakohtia.

Akustiikassa käytetään desibelin määritelmän vuoksi paljon logaritmfunktioita. Ne ovat kenelle tahansa matematiikkaa opiskelevalle tuttuja funktioita. Matlab-koodissa logaritmi kirjoitetaan alla olevalla tavalla.

$\log(x)$;

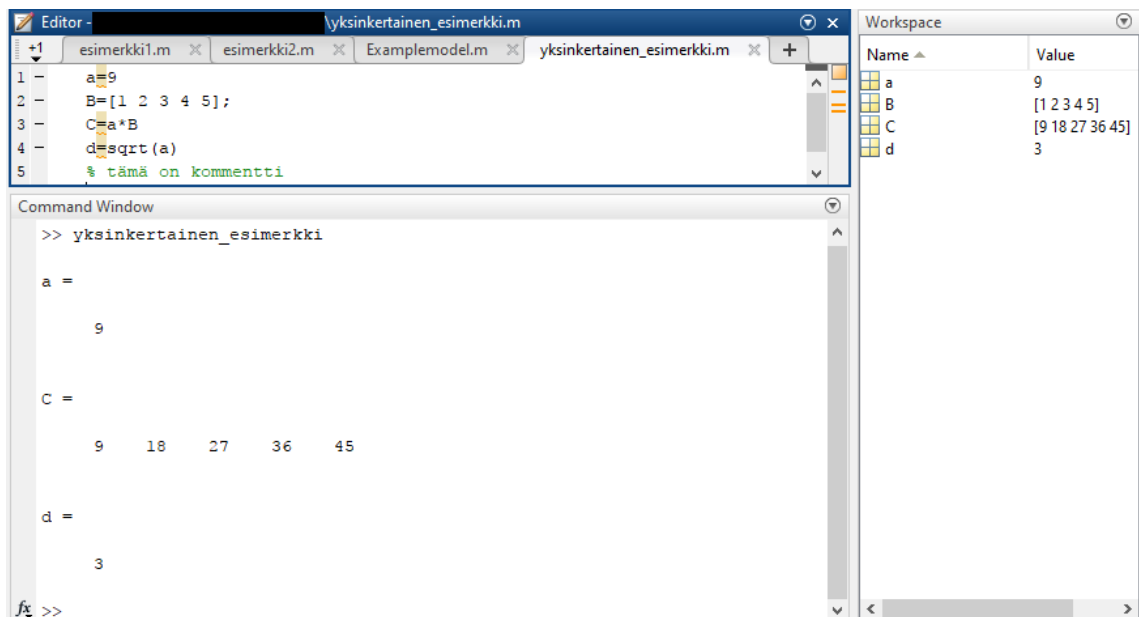
Lausekkeessa x on luku, muuttuja tai lauseke, jolle operaatio suoritetaan. Yllä oleva muoto on kirjoitettu samalla tavalla, kuin esimerkiksi laskimissa usein käytetty ilmaismuoto kymmenkantaiselle logaritmille. Tämä muoto Matlab-koodissa tarkoittaa kuitenkin luonnollista logaritmia eli kantaluku on tässä Neperin luku, eikä 10. Kymmenkantainen logaritmi kirjoitetaan alla olevalla tavalla.

$\log_{10}(x)$;

Tähän on syytä kiinnittää huomiota sen takia, että kumpikin operaatio toimii periaatteessa samalla tavalla, mutta ylempi antaa väärän vastauksen, mikäli käyttäjä olettaa sen olevan kymmenkantainen logaritmi.

Tämän pienen esimerkin ohessa mainittakoon, että Matlab-koodissa käytetään yleensä rivin lopussa puolipistettä ilmaisemaan ohjelmalle rivin päättymisestä. Tämä ei ole kuitenkaan pakollista joka tilanteessa. Mikäli puolipiste jätetään kirjoittamatta, näiden rivien operaatiot ja esimerkiksi laskutoimitukset ja niiden tulokset näkyvät Matlabin komentoikkunassa. Tästä voi olla suuresti apua, kun etsitään mahdollisia virheitä koodista tai halutaan saada joitain välituloksia näkyviin. EDA-työkalu on iteratiivinen ja lopullisessa ohjelmassa tulisi laittaa puolipisteet paikalleen, koska ohjelmaa käytettäessä piilottamat tomot arvot vilisevät turhaan useita kymmeniä tai satoja kertoja Matlab-ikkunassa.

Alla olevassa kuvassa on havainnollistettu tätä ja siitä nähdään myös joitain yksinkertaisia esimerkkejä siitä, miten Matlabissa tehdään erilaisia operaatioita. Huomaa, miten Matlab korostaa rivejä, joista puolipiste puuttuu, sivun vierityspalkissa ja yhtäsuuruusmerkin kohdalla. Editorin koodi ajetaan sen yläpuolelta löytyvästä vihreästä *Run*-painikkeesta, kuvassa 21 ei näy tätä painiketta, se sijaitsee Editor-ikkunan yläpuolella. Prosentti-merkillä alkavat rivit ovat kommentointia varten ja niitä ei huomioida ollenkaan koodia ajettaessa. Kommentteja voi kirjoittaa myös laskutoimitusten perään samalle riville.



Kuva 21. Matlab päänäkymä. Yläpuolella tekstieditori eli tila johon talletettava koodi kirjoitetaan, alhaalla komentoikkuna, jossa koodin suoritus näkyy ja oikealla työtilassa lista käytetyistä muuttujista ja niiden arvoista koodin suorittamisen jälkeen.

Erilaisia keinoja ja mahdollisia ongelmia on matematiikassa ja Matlabissa lähes loputtomasti, näiden kaikkien listaaminen tässä ei ole kannattavaa. Kuitenkin yksi operaatio osoittautui tätä työtä tehdessä käteväksi. Alla oleva koodinpätkä sisältää monta erilaista asiaa.

```
x(x<0)=0;
```

Tässä muuttujan x suuruus tarkistetaan ja muutetaan, sen ollessa nollaa pienempi, nol-laksi. Lausekkeen kummankin muuttujan tai nollan tilalle voidaan valita eri muuttuja tai eri arvo, kaikki voivat olla myös muuttujia. Lisäksi esimerkin x voi olla matriisi, vektori tai yhden alkion sisältävä muuttuja. Eli operaation jälkeen matriisi x ei sisältäisi yhtäkään alkioita, jonka arvo on pienempi kuin nolla. Vastaavan operaation suorittaminen esimerkiksi C++-ohjelmointikielellä vaatisi IF-lauseen ja silmukan käyttöä, kun Matlab tekee kaiken tarvittavan yhdellä yksinkertaisella operaatiolla.

3.2.1 Matlab ja EDA

EDA-työkalulla on tietyt vaatimukset suoritettavalta Matlab-koodilta. EDA-työkalun Matlabin osuuden tiedon kulkeminen varmistetaan funktion avulla, johon syötetyt suunnitteluparametrit tuottavat laskukaavojen avulla halutut tulokset ja lähettävät ne takaisin Exceliin. Excelissä tulokset arvioidaan ja mahdollisesti iteroidaan suunnitteluparametreja. Ohjelmakoodi 1 esittelee yksinkertaisimmillaan, millaiselta EDA-työkalun Matlab-koodi näyttää.

```
function out = esimerkki(in)
VECTOR_LEN = 3; % in(x)-vektorin alkioiden lukumäärä siis oltava sama, kuin
                % tämä arvo, tässä tapauksessa 3

assert(vector_length(in) == VECTOR_LEN, 'Input vector not correct size');

a = in(1); % Näiden lukumäärä siis oltava sama, kuin VECTOR_LEN.
b = in(2); % Arvot tulevat Excelistä, joko optimoinnin kautta
c = in(3); % tai käyttäjän asettamana.

% Tähän suoritettavat laskutoimitukset
x = ...;
y = ...;
z = ...;

% Funktion tuottamat arvot
out = [x, y, z]; % Nämä lähetetään takaisin Exceliin
```

Ohjelma 1. EDA-työkalun käyttämä funktio Matlabissa.

Ensimmäisellä rivillä koodissa on funktion määrittäminen antamalla sille nimi, tässä tapauksessa *esimerkki(in)*. Sen jälkeen tarkistetaan $in(x)$ -vektorin pituus. Vektorin pituudeksi on käyttäjän merkittävä $in(1)$, $in(2)$, ..., $in(n)$ alkioiden lukumäärä, tämän esimerkin tapauksessa 3. Nämä muuttujat ovat siis kuvassa 16 näkyvät suunnitteluparametrit, design parameters, samassa järjestyksessä ja niiden lukumäärän täytyy täsmätä keskenään vektorin pituuteen ja muuttujien lukumäärään. Nyt voidaan näiden *input*-muuttujien a , b ja c arvoja käyttämällä laskea koodissa määrättyjen laskutoimituksien kautta suunnittelijaa kiinnostavat arvot, eli *output*-muuttujat x , y ja z . Nämä vastaavat EDA-työkalun Excelissä järjestelmän ominaisuuksia, eli system characteristics -osion muuttujia järjestyksessä ja näiden määrä on jälleen täsmättävä keskenään (kts. kuva 17).

Joitain arvoja voi olla intuitiivista antaa Excelin puolella eri yksiköissä, kuin millä suorittaa varsinaisen laskennan. Esimerkiksi mittoja voi haluta syöttää millimetreinä, mutta laskenta kannattaa suorittaa metreinä, jotta yksiköt eivät mene sekaisin. Tällöin *input*-muuttujaa määritettäessä kannattaa välittömästi suorittaa tarvittava muunnos. Esimerkkinä alla millimetreinä syötetty arvo metreinä tehtävään laskutoimitukseen.

```
input1 = in(1)/1000;
```

Muuttujille kannattaa muutenkin asettaa kuvaavimmat nimet, kuin *input1* tai *output1*, jotta laskenta monimutkaisemmilla yhtälöillä on selkeämpää. Käytettäviä kaavoja vastaava tai sitä lähin mahdollinen merkintätapa on suositeltava. Kreikkalaisia aakkosia tai alaindeksejä Matlab ei tunne, mutta muuttujien nimeämisessä on muuten suhteellisen suuri vapaus. Muuttujan nimet voivat olla pitempiäkin merkkijonoja sisältäen sekä numeroita, että kirjaimia. Muutettavien suunnitteluparametrien määrä on EDA-työkalussa varsin rajallinen ja todellisessa tehtävässä erilaisia materiaaliominaisuuksia yms. voi hyvinkin olla paljon enemmän. Esimerkiksi eri luonnonvakiot ja muut vastaavat voidaan kirjoittaa sisään Matlab-koodiin vakioina. Niitä ei voida tällöin ottaa mukaan Excelissä tapahtuvaan optimointiin, joten kannattaa miettiä laskentamallia rakentaessa, että mitä ominaisuuksia haluaa muokata lennossa. Joitain päätöksiä joutuu tekemään jo laskentamallia rakentaessa.

EDA-työkalun käyttämiseen totuteltaessa kannattaa ensimmäisenä pyrkiä rakentamaan jonkinlainen oma malli alusta loppuun ja katsoa miten se käyttäytyy. Mahdollisuuksia erilaisiin virheisiin mallinnusvaiheessa niin Matlabin, kuin Excelin puolella on jonkin verran. Kun saa laskentamallin keskeneräisenäkin toimimaan ja palauttamaan arvoja, sitä on helppo laajentaa. Näin minimoidaan se aika, mitä kuluu taisteltaessa virhetilanteiden takia kaatuvien ohjelmistojen takia. Mikäli myös Matlab on vieras työkalu, tarkkuutta tarvitaan vielä huomattavasti lisää. Koodi kannattaa kommentoida kohta kohdalta, mitä milloinkin laskentamalli on tekemässä, koodinpätkät eivät avaudu varsinkaan ulkopuoliselle ilman lisäselvityksiä kovin helposti.

3.3 Laskentamalli, materiaaleina teräs ja villa

Tässä luvussa käsitellään Matlab-koodi, mitä käytetään EDA-työkalussa työssä alla määritellyn ongelman ratkaisemiseksi. Tämän tehtävän koodi löytyy kokonaisuudessaan liitteestä A. Tehtävä on seuraavanlainen. Teollisuushallin, jonka lattian pinta-ala on 20x30 m² ja korkeus 5 m, päätyseinän viereen sijoitetaan kone, jonka tuottama meteli on annettu taulukossa 10. Hallin sisäpuolella käytetty materiaali on seinissä ja lattiassa betoni, katossa teräs. Taulukossa on annettu laskennassa käytettävä taajuuskaista ja koneen tuottama äänenpainetaso jokaisella taajuudella. Tarkoituksena on suunnitella ja rakentaa koneen ja hallin välille hallin päätyyn seinämä, joka mahdollisimman tehokkaasti eristää

hallin koneen tuottamalta melulta. Saavutettu vaimennus ja melutason vaikutukset vaimennuksen valmistumisen jälkeen arvioidaan tämän työn teoriaosuuden avulla. Lisäksi pyritään arvioimaan laskennan luotettavuutta.

Taulukko 10: Koneen tuottama melu taajuuksittain.

Taajuus (Hz)	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
Taso (dB)	80	84	94	94	92	87	87	81	79	77

Seinä rakennetaan kahdesta eri materiaalista ja niiden väliin jätetään ilmarako, jolloin laskennassa voidaan hyödyntää massalain kahden seinämän kaavoja. Lisäksi tässä työssä oletetaan, että äänikenttä on tilassa diffuusi. Käytettävät seinämän materiaalit ovat villa ja teräs. Terästä käytetään vaimentamaan melun matalat taajuudet ja sitä pyritään käyttämään mahdollisimman ohut kerros. Villan tarkoituksena on eristää korkeita taajuuksia ja sen materiaalipaksuuden ylärajaksi on määritetty 20 cm. Koko seinärakenne saa olla maksimissaan 25 cm paksu. Tähän paksuuteen ei lasketa villan tai levyn asentamiseen tarvittavia tukirakenteita tai muutenkaan mitään kantavia rakenteita. Paksuuteen on muistettava huomioida ilmaraon viemä tila materiaalivahvuuksien lisäksi. Rakenteesta ja suunnitteluparametreista, jotka esitellään tarkemmin seuraavassa luvussa, poikkileikkauskuvana näkyvissä alla. Kuvassa esimerkkivahvuudet tapauksessa, jossa rakenne suunnitellaan teräslevystä ja villasta.



Kuva 22. Rakenteen suunnitteluparametrit.

3.3.1 Input-muuttujat

Määritellään ensimmäisenä EDA-funktio ja lisätään sen vaatimat tarkistukset. Suunnitteluparametreja määritellään kolme kappaletta, seinämän yksi ja kaksi paksuudet ja niiden väliin jäävän ilmaraon paksuus. *Input*-muuttujia on siis kolme kappaletta ja tarkistusvektorin pituus on tällöin 3.

```
function out = akustiikka(in)
```

```
% INPUT Vector length parameter used for checking
VECTOR_LEN = 3;
```

Seuraavaksi varsinainen tarkistus ja *input*-muuttujien määrittäminen. Kaikki mitat halutaan antaa millimetreinä Excelissä, mutta laskenta suoritetaan Matlabissa metreinä. Kaikki kolme muuttujaa muunnetaan siis metreiksi jo määrittämisen yhteydessä. Materiaali 1 viittaa teräslevyyn ja materiaali 2 villaan.

```
% Test that vector has correct length
assert(vector_length(in) == VECTOR_LEN, 'Input vector not correct size');
h1 = in(1)/1000;
h2 = in(2)/1000;
hgap = in(3)/1000;
```

Seuraavaksi määritetään käytettävä taajuuskaista, A-painotukset jokaista taajuutta varten ja taulukosta 10 koneen äänenpainetaso jokaisella taajuudella. Kaikki kolme muuttujaa annetaan vektoreina Matlabiin. Tämä on tapa, jolla tässä työssä käsitellään akustiikan taajuusriippuvaisia tilanteita, kun halutaan laajasti käsitellä taajuuskaistan koko aluetta. EDA-työkalun rajoitusten vuoksi taajuusvektorin ja äänenpainetason määrittäminen joudutaan tekemään suoraan koodiin sisälle, koska EDA-työkalun muuttujien maksimimäärä tulee muuten vastaan nopeasti. Tämä ei sinällään heikennä juurikaan laskentatyökalun tehoa, toisenlaisen melukuormituksen tapauksessa voidaan yksinkertaisesti kopioida tässä käytetty dokumentti ja ajaa rinnalla toista analyysiä eri *LP*-vektorin arvoilla. A-painotuksen arvot ovat määritetty aikaisemmin tässä työssä, katso taulukko 2 ja kuva 5 luvussa 2.1.2.

```
f=[31.5 63 125 250 500 1000 2000 4000 8000 16000];
A=[-39.4 -26.2 -16.1 -8.6 -3.2 0 1.2 1 -1.1 -6.6];
LP=[80 84 94 94 92 89 89 81 79 77];
```

Vektorista *LP* lasketaan A-painotettu äänenpainetaso koneen tuottamasta melutasosta. Tätä käytetään lähinnä, jotta voidaan verrata alkuperäistä melutasoa lopputulokseen, vaimennettuun melutasoon. Laskenta suoritetaan kaavan 7 mukaisesti. Tämä muuttuja tuodaan EDA-työkaluun *output*-muuttujana, ilmaisemaan alkuperäistä melutasoa.

```
LPAtaso=10*log10(sum(10.^((LP+A)/10)));
```

Seuraavaksi määritetään äänen nopeus ilmassa ja ilman tiheys. Oletetaan normaali ilmanpaine ja n. 20 °C lämpötila.

```
c=343; % äänen nopeus (m/s)
rooilma=1.23; % ilman tiheys (kg/m^3)
```

Materiaalien tiheydet määritetään seuraavaksi. Mainittakoon tässä, että villan tiheys on suunnilleen sama, kuin polyuretaanin, joten helposti ahtaisiin väleihin ruiskutettavaa ainetta voitaisiin käyttää rakennusvaiheessa erilaisten läpivientien tai muiden välien tiivis-

tämiseen ilman, että laskentatulokset menettäisivät merkitystään. Tiheydestä tai materiaaliominaisuuksista muutenkaan ei tehdä tässä suunnitteluparametria. Mikäli suunnittelija haluaakin vaihtaa materiaalia, on siis muutettava koodia!

```
roo1=7850; % teräs (kg/m^3)
roo2=30; % villa ja polyuretaani (kg/m^3)
```

Koinsidenssitaajuuden laskemista varten täytyy ensiksi laskea laattavakio, johon tarvitaan teräksen kimmokerroin ja poissonin vakio. Materiaalia vaihdettaessa johonkin toiseen mahdollista rinnakkaislaskentaa varten täytyy myös tämä huomioida. Koinsidenssitaajuus täytyy huomioida silloin, kun määritetään vaimennusta levymäiselle tiheälle rakennuslevylle massalain avulla. Villalle tai polyuretaanille tätä ei siis tarvitse huomioida. Huomioi siis, laattavakion kaavassa ainoastaan h /mainittuna. Lasketaan laattavakio alla kaavan 22 mukaisesti.

```
% laattavakion määrittäminen
E=210*10.^9; % teräksen kimmokerroin
v=0.3; % poissonin vakio
D=(E*h1.^3)/(12*(1-v.^2)); % laattavakio
```

Seuraavaksi lasketaan laattavakion ja aiemmin määritettyjen arvojen avulla metallilevyn koinsidenssitaajuus kaavan 21 mukaisesti.

```
fc=((c.^2)/(2*pi))*sqrt((roo1*h1)/D);
```

Koinsidenssitaajuuden vaikutus huomioidaan siis ainoastaan teräslevylle. Seuraavana koodissa erotetaan taajuusfunktio f kahdeksi eri vektoriksi, teräslevylle ja villalle kummallekin omansa. Tuplaseinän vaimennuksen kaavasta 23 käytetään ensimmäistä versiota, josta yhteenlaskettavat erotetaan muuttujiksi $R1$ ja $R2$. Näin koinsidenssitaajuuden ylittävälle muuttujan $f1$ eli teräslevyn taajuusfunktion arvot nollataan, koska massalakia ei voida tällöin käyttää. Näissä tapauksissa kuitenkin villan vaimennus huomioidaan. Tästä syystä siis jako kahteen eri taajuusriippuvaiseen muuttujaan on välttämätöntä. Matlabissa voi toki olla jokin tyylikkäämpikin tapa toteuttaa tämä toimenpide, mutta tämä on ainakin selkeä Matlab-maallikonkin ymmärtää ja soveltaa. Ensimmäisenä siis erotettu taajuusvektori.

```
f1=f;
```

Seuraavaksi tämän taajuuden koinsidenssitaajuutta suuremmat alkioit muutetaan nolllaksi.

```
f1(f1>fc)=0;
```

Taajuusvektorin $f2$ määrittäminen alkuperäisen taajuusvektorin avulla. Tälle ei tehdä mitään sen kummempia operaatioita.

```
f2=f;
```

Seuraavana kumpaakin taajuusvektoria vastaavat pikku-omegan arvot kaavan 19 mukaisesti.

$$\begin{aligned}\omega_1 &= f_1 * 2 * \pi; \\ \omega_2 &= f_2 * 2 * \pi;\end{aligned}$$

Sitten on vaimennuksien laskemisen vuoro. Vaimennus R_1 on siis kaavasta 23 ensimmäisen version ensimmäinen ja R_2 toinen yhteenlaskettava. Kaavoissa on kuitenkin sovellettu kaavan 18 ensimmäistä versiota kyseisen kaavan yhteydessä mainitusta syystä. Ajatus on kuitenkin sama, kaavan kirjoitustavassa ainoastaan on pieni ero. Ensimmäinen vaimennus lasketaan teräslevyn paksuudella ja taajuusfunktiolla f_1 saadulla pikku-omegan arvolla ja toinen vastaavasti villan paksuudella ja taajuusfunktiolla f_2 saadulla pikku-omegan arvolla.

$$\begin{aligned}R_1 &= 10 * \log_{10}(1 + ((\omega_1 * r_{o1} * h_1) / (2 * r_{o1} * l * c))^2); \\ R_2 &= 10 * \log_{10}(1 + ((\omega_2 * r_{o2} * h_2) / (2 * r_{o2} * l * c))^2);\end{aligned}$$

Kaavan 23 toteuttava lopullinen kahden seinämän vaimennus.

$$R = R_1 + R_2;$$

Oletetaan diffuusi äänikenttä, kaavan 20 mukaisesti ja tehdään varmistus, jotta lopullinen vaimennuksen vektori on kaikkine alkioineen arvoltaan vähintään nolla. Mikäli vaimennus R olisi ennen seuraavaa laskutoimitusta jo valmiiksi arvoltaan 0, alla oleva vähennyslasku tekisi siitä negatiivisen.

$$\begin{aligned}R_d &= R - 3; \\ R_d(R_d < 0) &= 0;\end{aligned}$$

Nyt on siis saatu määritettyä kaavan 25 muuttuja R_d , vielä tarvitaan logaritmfunktion sisään jäävä osuus. Sitä varten tarvitaan hallin sisätilan seinien pinta-alat ja niiden absorptiokertoimet. Materiaalien absorptio on periaatteessa riippuvainen taajuudesta, mutta tässä on kuitenkin päätetty käyttää yhtä ja ainoaa arvoa kaikille taajuuksille, koska absorptiokerroin on joka tapauksessa epätarkka ja riippuu paljon myös olosuhteista. Mikäli haluttaisiin, ei sen lisäämien laskentateknisesti olisi kovinkaan monimutkainen tehtävä. Esimerkiksi jos mittaamalla hankittaisiin tarkat tiedot eri taajuuksilta rakennettavasta tilasta, voitaisiin taajuusriippuvuuden huomioimista myös tässä laskennassa pitää järkevänä. Alla teräksen ja betonin absorptiokertoimille määritetyt muuttujat. Arvojen suuruusluokka on saatu taulukosta 3.

$$\begin{aligned}a_{teras} &= 0.10; \quad \% \text{ teräs} \\ a_{betoni} &= 0.04; \quad \% \text{ betoni}\end{aligned}$$

Seuraavaksi lasketaan kumpaakin materiaalia tilassa sisältävien pinta-alojen suuruus. Jos edellä mainittujen absorptiokertoimien approksimointi yhteen yleispätevään arvoon vaikuttaa turhan optimistiselta tai liian isoilta suuruudeltaan, tässä kohtaa tulee sitä tasapai-

nottava konservatiivinen tekijä. Isohkon hallin pinta-ala lasketaan levymäisenä päämittojen mukaan. Todellisuudessa absorptiota aiheuttavaa pinta-alaa on tämänkokoisessa hallissa aina huomattavasti enemmän. Rakenteista ja sisustan eri yksityiskohdista syntyvää pinta-alaa voisi laskennallisesti pitää siis huomattavasti isompanakin. Alla laskettuna katon terästä sisältävä pinta-ala, sekä seinien ja lattian betonia sisältävä yhteispinta-ala.

```
Ateras=20*30;
Abetoni=20*30+2*20*5+2*30*5;
```

Seuraavana lasketaan vielä tarvittava absorptiopinta-ala kaavan 14 mukaisesti, sekä hallin kokonaispinta-ala A_2 .

```
S=ateras*Ateras+abetoni*Abetoni;
A2=2*20*30+2*20*5+2*30*5;
```

Määritetään kaavan 25 viimeiselle vähennettävälle oma muuttujansa laskukaavojen selkeyttämiseksi. Muuttujan nimeksi annetaan R_{tila} ja sen arvo lasketaan alapuolella. Lisäksi lasketaan kaavan lopullinen vaimentunut äänenpainetaso LP_2 tähän mennessä määritettyjen muuttujien eli LP , R_d ja R_{tila} avulla. Tämän jälkeen tehdään vielä varmistus, että vektorin kaikki arvot ovat positiivisia.

```
Rtila=10*log10(A2/S);
LP2=LP-Rd-Rtila;
LP2(LP2<0)=0;
```

Kaavan 7 mukainen A-painotettu melutaso vaimennuksen jälkeen laskettuna alla.

```
LP2A=10*log10(sum(10.^((LP2+A)/10)));
```

Vielä on muutama muuttuja laskettavana. Seinien välisen ilmaraon aiheuttama ominaistaajuus halutaan tietää ja mitoittaa siten, että se ei ole ihmisen kuuloalueen kannalta herkällä taajuusalueella. Resonanssitaajuus f_0 lasketaan siis seuraavaksi kaavan 24 mukaisesti.

```
f0=(1/(2*pi))*sqrt((rooilma*c.^2*(roo1*h1+roo2*h2))/(hgap*roo1*h1*roo2*h2));
```

Koska vaimentavan rakenteen maksimipaksuudeksi haluttiin 25 cm, pysytään parhaiten mitoitettaessa tästä selvillä, kun lasketaan sille selkeästi näkyvä arvo. Kerrotaan muuttuja tuhannella, jotta saadaan lopullinen arvo Exceliin millimetreinä.

```
hmax=(h1+h2+hgap)*1000; % rakenteen paksuus (mm);
```

3.3.2 Output-muuttujat

Sitten onkin jäljellä enää EDA-funktion viimeinen rivi, jossa määritetään takaisin Exceliin lähetettävien järjestelmän ominaispiirteiden muuttujat. Niihin kuuluvat alla esite-

tyssä järjestyksessä melutaso vaimennuksen jälkeen, seinien välisen ilmaraon ominais-
taajuus, alkuperäinen melun A-painotettu äänenpainetaso, koinsidenssitaajuus, sekä sei-
närakenteen lopullinen paksuus.

```
% Set the output
out = [LP2A, f0, LPAtaso, fc, hmax];
```

Seuraavaksi katsotaan miltä tämä laskenta näyttää Excelissä EDA-työkalun käyttöliitty-
mästä käsin. EDA-työkalun käyttöliittymä on käyty melko yksityiskohtaisesti läpi aiem-
min tässä työssä luvussa 3.2, joten sieltä voi katsoa lisätietoa EDA-työkalun Excel-osuu-
desta. Laskennan tuloksia tarkastellaan luvussa 4. Suunnitteluparametrit on Excelin puo-
lella nimetty samalla tavoin, kuin Matlabissa. Parametrit ovat listattuna kuvassa 23.

Major Design Parameters				
Name	Units	Value	Lower limit	Upper limit
h1	mm	1,00	1,00	50,00
h2	mm	10,00	10,00	200,00
hgap	mm	1,00	1,00	200,00

Kuva 23. Tehtävän suunnitteluparametrit.

Teräslevyn paksuudelle eli muuttujalle *h1* on annettu alarajaksi 1 mm ja ylärajaksi 50 mm. Rajoiksi pyritään tässä antamaan melko iso alue, koska oletetaan, että tässä vaiheessa järjestelmän toiminnasta ei ole paljoa tietoa. Laskentaa lähdetään tekemään alkuarvolla 1 mm. Villan paksuudelle *h2* on annettu rajat 10 mm ... 200 mm ja lähtöarvo on asetettu taas alarajalle. Viimeinen suunnitteluparametri *hgap* eli seinämien välisen ilmaraon pak-
suus on mitoitettu välille 1 mm ... 200 mm. Seuraavaksi on vuorossa järjestelmän omi-
naispiirteiden muuttujien listaus, jotka ovat näkyvissä kuvassa 24.

System Characteristics					
Name	Units	Value	Targ. Value	Aim (sign)	Weight
LP2A	dB		30	-1	1,00
f0	Hz		100	-1	1,00
LPAtaso	dB		95	1	1,00
fc	Hz		4000	1	1,00
hmax	mm		250	-1	1,00

Kuva 24. Järjestelmän ominaispiirteet.

Ensimmäisenä tärkein eli *LP2A*, äänenpainetaso hallissa vaimennuksen jälkeen. Tälle määritetään kohdearvoksi matalin, mitä voidaan toivoa. 30 dB melutaso tarkoittaisi peri-
aatteessa, että tätä tilaa voitaisiin käyttää esimerkiksi nukkumiseen koneen ollessa käyn-
nissä, ainakin rakennusmääräysten mukaan (katso kappale 2.2.5 ja taulukko 6). Tämän
muuttujan arvo halutaan mahdollisimman pieneksi, eli sen kohdalle laitetaan *Aim*-pys-
tysarokkeeseen arvo -1. Laskennan alkuvaiheessa asetetaan jokaisen muuttujan painoar-
voksi luku 1, näitä muokataan sitten tarpeen mukaan iteroinnin edetessä. Muuttuja *f0* ta-
voitearvo määritetään 100 Hz kohdalle ja sitäkin minimoidaan. Seuraavaksi listalla oleva

muuttuja *LPAtaso* ei suunnitteluparametreja muuttamalla muutu miksiäkään, koska se on ainoastaan vertailun vuoksi tuotu tähän ja se lasketaan koneen tuottaman melun A-painotettuna tasosuureena. Koinsidenssitaajuudelle *fc* on annettu tavoitearvo 4000 hertsiin ja sitä halutaan maksimoida. Näin se saisi ideaalitulanteessa ihmisen kuuloalueen kannalta herkkiä taajuuksia suurempia arvoja. Toisaalta koinsidenssitaajuus koskettaa ainoastaan teräslevyn vaimennusta, joten koinsidenssitaajuuden vaikutusta ei pidä yliarvioida, mikäli kokonaisvaimennus saadaan tarpeeksi suureksi, ainakin teoriassa. Viimeinen muuttuja *hmax* eli rakenteen kokonaispaksuus halutaan minimoida ja sen tavoitearvo on 250 mm.

3.4 Laskentamalli, materiaalina vaneri

Seuraavaksi testataan hiukan tämän suunnittelumallin muuttamista siten, että rakenteen materiaali vaihdetaankin toiseen. Tämä koodi löytyy myös kokonaisuudessaan liitteessä B. Teräksestä ja villasta rakennettu väliseinä lienee tehokas ratkaisu, mutta se voi olla haastava toteuttaa. Isot teräslevyt voidaan kyllä hitsata toisiinsa, mutta toteuttaminen ei kuitenkaan ole helpoin mahdollinen. Vaneri on helppo ja halpa ratkaisu, tosin tällöin saumojen tiivistäminen on erittäin ratkaisevaa lopullisen ääneneristävyyden kannalta. Tehävä pysyy muuten samana. Koodia joudutaan hiukan muuttamaan, mutta muutokset ovat melko pieniä. Esitetään selkeyden säilyttämiseksi koodi tässä kokonaisuudessaan, tosin hieman lyhennettynä ja jätetään toiston vuoksi osa kommentteista pois. Vanerin materiaaliominaisuudet on saatu erilaista puutavaraa toimittavan yrityksen teettämistä oppaista [22] [23].

Tähän esimerkkiin muutetaan hiukan sitä, miten laskentamalli käsittelee koinsidenssitaajuutta. Nyt sitä ei käytetä ollenkaan vaimennuksen laskemisessa, vaan se lasketaan erilliseksi suureksi ja taajuuksien arvoista tehdään tarvittavat johtopäätökset. Tämän takia tulokset 3.3 ja 3.4 esimerkeissä eivät ole suoraan vertailukelpoisia!

3.4.1 Input-muuttujat

Tämän mallin *input*-muuttujat ovat edelliseen malliin verrattuna identtiset, kummankin levyn paksuus ja levyjen välisen ilmaraon paksuus. EDA-funktion tarvittavat tarkistukset ja tarvittavat muuttujat koodissa alla.

```
function out = akustiikka2(in)
VECTOR_LEN = 3;
assert(vector_length(in) == VECTOR_LEN, 'Input vector not correct size');
h1 = in(1)/1000;
h2 = in(2)/1000;
hgap = in(3)/1000;
```

Seuraavaksi määritetään taajuuskaista, A-painotus ja alkuarvoja samoin, kuten edellisessä esimerkissä.

```
f=[31.5 63 125 250 500 1000 2000 4000 8000 16000];
A=[-39.4 -26.2 -16.1 -8.6 -3.2 0 1.2 1 -1.1 -6.6];
LP=[80 84 94 94 92 89 89 81 79 77];
LPAtaso=10*log10(sum(10.^((LP+A)/10)));
c=343;
rooilma=1.21;
```

Käytettävä materiaali on havuviilusta valmistettu vaneri, määritetään sen tiheys.

```
roo1=520; % havuviilu
```

Koska levyjä on kaksi, niille molemmille on määritettävä koinsidenssitaajuus. Muuten täsmälleen samanlainen laskutoimitus laattavakiolle, kuin edellisessä tehtävässä, mutta lähtöarvot osittain erilaiset. Lasketaan ensin laattavakiot.

```
E=7E9; % kimmokerroin vanerille
v=0.3; % poissonin vakio
D1=(E*h1.^3)/(12*(1-v.^2)); % laattavakio 1
D2=(E*h2.^3)/(12*(1-v.^2)); % laattavakio 2
```

Seuraavaksi lasketaan koinsidenssitaajuuksien arvot kummallekin levyille.

```
fc1=((c.^2)/(2*pi))*sqrt((roo1*h1)/D1);
fc2=((c.^2)/(2*pi))*sqrt((roo1*h2)/D2);
omega=f*2*pi; % Pikku-omegan arvot
```

Vaimentuma lasketaan tässä samalla tavalla, kuin teräksen ja villan tapauksessa.

```
R1=10*log10(1+((omega*roo1*h1)/(2*rooilma*c)).^2);
R2=10*log10(1+((omega*roo1*h2)/(2*rooilma*c)).^2);
R=R1+R2; % lasketaan yhteen kummankin seinämän vaimennukset
Rd=R-3; % oletetaan: diffuusi äänikenttä
```

Absorptiopinta-ala yms. lasketaan kuten edellisessä esimerkissä.

```
ateras=0.10;
abetoni=0.04;
Ateras=20*30;
Abetoni=20*30+2*20*5+2*30*5;
S=ateras*Ateras+abetoni*Abetoni;
A2=2*20*30+2*20*5+2*30*5;
Rtila=10*log10(A2/S);
```

Edelleen melutaso eristyksen jälkeen, ilmaraon ominaistajuus ja rakenteen kokonaispak-
suus kuten aiemmassakin esimerkissä.

```
LP2=LP-Rd-Rtila;
LP2(LP2<0)=0;
LP2A=10*log10(sum(10.^((LP2+A)/10)));
f0=(1/(2*pi))*sqrt((rooilma*c.^2*(roo1*h1+roo1*h2))/(hgap*roo1*h1*roo1*h2));
hmax=(h1+h2+hgap)*1000;
```

Tehdään pieni lisäys edelliseen laskentamalliin nähden. Lasketaan vaimennuksen arvot parille eri taajuudelle, 125 Hz ja 4000 Hz kohdille. Näin saadaan lisätietoa siitä, miten vaimennus käyttäytyy näille kuulon kannalta olennaisilla taajuuksilla.

```
Rd_125=Rd(3);  
Rd_4000=Rd(8);
```

3.4.2 Output-muuttujat

Output-muuttujiksi otetaan samat muuttujat, kuin edellisessäkin mallissa, nyt koinsidenssimuuttujia on kaksi kappaletta ja lisäksi otetaan vaimennukset 125 ja 4000 Hz kohdalla.

```
% Set the output  
out = [LP2A, f0, LPAtaso, fc1, fc2, hmax, Rd_125, Rd_4000];
```

Koodia tarvitsi muuttaa loppujen lopuksi melko vähän tähän malliin. Suurimmat muutokset tulivat koinsidenssitajuuden käsittelyn erilaisuudesta. Jos oltaisiin muokattu mallia esimerkiksi siten, että ensimmäisestä mallista vaihdetaan ainoastaan teräs vaneriin, olisi tarvinnut muuttaa pelkästään teräksen tiheys ja kimmokerroin (poissonin vakio on sama teräkselle ja vanerille). Koodin kommentointi auttaa huomattavasti tilanteissa, joissa koodia tarvitsee muokata uudelleen tilanteeseen sopivaksi.

4. TULOKSET

Nyt on päästy työssä siihen vaiheeseen, että luvussa 2 rakennetun teorian pohjalta ja luvussa 3 määritetyn suunnitteluongelman ja ratkaisumenetelmän avulla voidaan alkaa käsittelemään laskentamallilla saatuja tuloksia. Luvussa 4.1 ja 4.2 tarkastellaan laskentamallin antamia tuloksia ja erilaisia ratkaisuja eli rakenteita, joita näiden perusteella voitaisiin alkaa toteuttamaan. Iterointi käydään vaihe vaiheelta läpi ja pyritään mahdollisimman yksityiskohtaisesti samalla selostamaan, miksi mikäkin ratkaisu on tehty missäkin vaiheessa. Tämän työn puitteissa pidetään muutenkin tärkeämpänä sitä, miten ratkaisuun päästään ja millä perustein. Lopputulos on itsessään melko yhdentekevä matkan varrella tehtyihin johtopäätöksiin verrattuna, koska lopputuloksen rakenne ei ole menossa minnekään tuotantoon. Luvussa 4.3 pohditaan hiukan teorian ja menetelmien osalta ratkaisumallin mahdollisia ongelmia arvioidaan näiden virheiden merkitystä. Samalla perustellaan tarkemmin joitain valintoja, mitä eri vaiheissa on tehty. Luvussa 4.4 pohditaan vastausta alkuperäiselle tutkimusongelmalle, eli EDA-työkalun avulla tehtävää suunnittelu-prosessia ja työkalun soveltuvuutta sille.

4.1 Rakenteen mitoitus, materiaalina teräs ja villa

Nyt on aika alkaa haarukoimaan arvoja seinärakenteen eri mitoille. Lähtötilanne on kuvien 22 ja 23 mukainen. Suunnitteluparametrien haarukointi tulee sisältämään monta eri vaihetta. Arvoja lähdetään tässä kokeilemaan käsin, tämä on mahdollista, kun suunnitteluparametreja ei ole kovin montaa. Kuvassa 25 suunnitteluparametrien arvot. Teräslevyn paksuudeksi valitaan ensiksi 1 mm, villan paksuudeksi suurin mahdollinen eli 200 mm ja seinien välinen ilma-avaruus paksuudeksi 50 mm.

Name	Units	Value	Lower limit	Upper limit
h1	mm	1,00	1,00	50,00
h2	mm	200,00	10,00	200,00
hgap	mm	50,00	1,00	200,00

Kuva 25. Suunnitteluparametrit, vaihe 1.

Kuvassa 26 järjestelmäominaisuudet kuvan 25 suunnitteluparametreilla laskettuna. Äänenvoimakkuus on lähellä tavoitetta, mutta ilma-avaruuden ominaisvärähtelytaajuus f_0 on hieman liian korkea. Tarvitaan lisätietoa, jotta voidaan tehdä jatkotoimenpiteitä. Lasketaan herkkyysohmatriisi seuraavaksi tässä pisteessä.

System Characteristics					
Name	Units	Value	Targ. Value	Aim (sign)	Weight
LP2A	dB	38,03	30	-1	1,00
f0	Hz	145,63	100	-1	1,00
LPAtaso	dB	95,11	95	1	1,00
fc	Hz	11963,13	4000	1	1,00
hmax	mm	251,00	250	-1	1,00

Kuva 26. Järjestelmän ominaispiirteet, vaihe 1.

Herkkyysmatriisista nähdään (kuva 27), miten iso vaikutus teräslevyn paksuudella on sekä vaimennukseen, että koinsidenssitaajuuteen. Melutasoon näyttäisi olevan suhteessa sama vaikutus kummallakin seinämänpaksuudella. Muutaman millimetrin uhraaminen villan paksuudesta teräslevylle lienee siis järkevää. Koinssidenssitaajuus on reilusti yli tavoitteen, joten teräslevyä voidaan vaihtaa paksummaksi senkin puolesta. Ilmaraon paksuus vaikuttaa ainoastaan muuttujaan f_0 ja konstruktion kokonaispaksuuteen, näiden kahden kanssa on siis tasapainoteltava, jotta saavutetaan tavoiteltu maksimipaksuus. Melutasoon eli muuttujaan $LP2A$ ilmaaron paksuus ei siis suoranaisesti vaikuta (sitä ei huomioida lopullisen melutason kaavassa missään vaiheessa), mutta lopputuloksen kannalta ominaisvärähtelytaajuus tulee mitoittaa alle 100 hertsiin mahdollisimman kauas ihmisen kuulolle herkstä taajuusalueesta.

Relative Sensitivity Matrix of the Design Parameters

			h1	h2	hga p
			mm	mm	mm
Actual value			1,00	200,00	50,00
LP2A	dB	38,03	-0,50	-0,50	0,00
f0	Hz	145,63	-0,21	-0,28	-0,50
LPAtaso	dB	95,11	0,00	0,00	0,00
fc	Hz	11963,13	-1,00	0,00	0,00
hmax	mm	251,00	0,00	0,80	0,20
			1,72	1,58	0,70

(*)System Design Parameter Priorities

Kuva 27. Herkkyysmatriisi, vaihe 1.

Järjestelmän ominaispiirteiden välinen korrelaatio on kuvassa 28. Tästä kuvasta saadaan lähinnä visuaalinen vahvistus sille, että rakenteen maksimipaksuus ja ilmaaron ominaisvärähtelytaajuus, sekä melutaso ovat voimakkaasti toistensa kanssa ristiriidassa.

Adjusted System Characteristics Correlation Table (ASCC)

			LP2A	f0	LPAtaso	fc	hmax
			dB	Hz	dB	Hz	mm
Actual value			38,03	145,63	95,11	11963,13	251,00
LP2A	dB	38,03	1,00	0,57	0,00	-0,71	-0,69
f0	Hz	145,63		1,00	0,00	-0,35	-0,64
LPAtaso	dB	95,11			0,00	0,00	0,00
fc	Hz	11963,13				1,00	0,00
hmax	mm	251,00					1,00

Kuva 28. Järjestelmän ominaispiirteiden korrelaatiotaulukko, vaihe 1.

Aloitetaan toinen vaihe iteroinnista teräslevyn paksuuden muokkaamisella. Pidetään muuten suunnitteluparametrien arvot samalla tavoin, kuin kuvassa 25, mutta asetetaan $h1$ arvoksi 6 mm. Saadut tulokset alla olevassa kuvassa.

System Characteristics						
Name	Units	Value	Targ. Value	Aim (sign)	Weight	
LP2A	dB	42,13	30	-1	1,00	
f0	Hz	116,41	100	-1	1,00	
LPAtaso	dB	95,11	95	1	1,00	
fc	Hz	1993,86	4000	1	1,00	
hmax	mm	256,00	250	-1	1,00	

Kuva 29. Järjestelmän ominaispiirteet, vaihe 2.

Kävikin siten, että vaimennus heikkeni, eli melutaso $LP2A$ kasvoi muutaman desibelin verran. Voidaan päätellä, että koinsidensitaajuuden pienenemisellä ratkaisevasti juuri 6 mm paksuiselle levyille on laskentamallin mukaan melko kriittinen vaikutus ääneneristävyydelle. Kuten luvussa 2.3.1 todettiin, massalakia ei voida käyttää koinsidensitaajuutta ylempillä taajuuksilla, jolloin teräslevyn ääneneristävyys sitä korkeammilla taajuuksilla on käytännössä olematon. Lasketaan herkkyysmatriisi uudelleen tässä pisteessä, jotta saadaan lisätietoa (kuva 30).

Relative Sensitivity Matrix of the Design Parameters

			h1	h2	hgap
			mm	mm	mm
Actual value			6,00	200,00	50,00
LP2A	dB	42,13	-0,01	-0,99	0,00
f0	Hz	116,41	-0,06	-0,44	-0,50
LPAtaso	dB	95,11	0,00	0,00	0,00
fc	Hz	1993,86	-1,00	0,00	0,00
hmax	mm	256,00	0,02	0,78	0,20
			1,09	2,21	0,70

(*)System Design Parameter Priorities

Kuva 30. Herkkyysmatriisi, vaihe 2.

Huomataan heti melko iso ero edelliseen herkkyysmatriisiin (kuvassa 27). Nyt teräslevyn kasvattaminen parantaisi ääneneristävyyttä, mutta suhteessa hyvin vähän. Tässä vaiheessa herää mielenkiinto laajemmin siitä, miten levyn paksuuden kasvattaminen vaikuttaa ääneneristävyyteen. Millimetri kerrallaan kasvatettaessa paksuutta, melutason arvot pienenevät hiljaksen ja muutamien millimetrien välein eristävyys heikkenee aina huomattavasti ja sen jälkeen taas paranee taas millimetri kerrallaan. Epäily vahvistuu, että tässä on kyse koinsidenssitaajuuden vaikutuksesta ja etenkin siitä, miten se on laskentamalliin rakennettu. Tähän aiheeseen palataan vielä luvussa 4.3, kun tuloksien tarkkuutta pohditaan syvällisemmin. Valitaan levyn paksuudeksi eli muuttujan *h1* arvoksi 5 mm. Tällöin saadaan samankaltaiset tulokset, kuin kuvassa 26. Seurataan erityisen tarkasti muuttujan *fc* arvoa. Se saa näillä parametreilla arvon 2392,63 Hz. Pienennetään teräslevyn paksuutta niin kauan, että saadaan *fc* arvoksi haluttu eli vähintään 4000 Hz. Teräslevyn paksuudella 2,5 mm saadaan alla olevat tulokset.

System Characteristics					
Name	Units	Value	Targ. Value	Aim (sign)	Weight
LP2A	dB	30,41	30	-1	1,00
f0	Hz	125,28	100	-1	1,00
LPAtaso	dB	95,11	95	1	1,00
fc	Hz	4785,25	4000	1	1,00
hmax	mm	252,50	250	-1	1,00

Kuva 31. Järjestelmän ominaispiirteet, vaihe 2, lopullinen.

Näin saadaan koinsidenssitaajuuden arvo haluttuun suuruusluokkaan ja laskennallinen vaimennus saatiin jopa paremmaksi. Materiaalipaksuudella 2,5 mm teräslevy on vielä kohtuullisen helppoa työstää.

Vielä on jäljellä kokonaispaksuuden sovittaminen tehtävässä määritettyyn maksimiin, eli 200 millimetriin. Teräslevyn paksuus on jo lyöty lukkoon tämän suunnittelun osalta ja

vaihtoehdoiksi jää pienentää joko ilma- tai villaseinämän paksuutta. Ennen, kuin aletaan muuttamaan näiden parametrien arvoja, kannattaa tarkastella herkkyysmatriisia tämän kolmannen vaiheen lähtötilanteessa. Herkkyysmatriisi on näkyvässä alla olevassa kuvassa.

Relative Sensitivity Matrix of the Design Parameters

		h1			h2			hgap					
		mm			mm			mm					
		Actual value			2,50			200,00			50,00		
LP2A	dB	30,41	-0,49	-0,51	0,00								
f0	Hz	125,28	-0,12	-0,38	-0,50								
LPAtaso	dB	95,11	0,00	0,00	0,00								
fc	Hz	4785,25	-1,00	0,00	0,00								
hmax	mm	252,50	0,01	0,79	0,20								
			1,62	1,68	0,70								

(*)System Design Parameter Priorities

Kuva 32. Herkkyysmatriisi, vaihe 3.

Suunnittelijaa kiinnostaa tässä vaiheessa, se että miten muuttujien $h2$ ja $hgap$ muutokset vaikuttavat muihin järjestelmän ominaisuuksiin. Matriisista nähdään, miten villakerroksen ohentaminen heikentää ääneneristävyyttä samalla, kun ilma- tai villaseinämän paksuutta pienentämällä tällaista vaikutusta ei ole ainakaan suoranaisesti. Näillä kahdella parametrilla on merkittävä vaikutus ilma- tai villaseinämän ominaistuuksiin, ilma- tai villaseinämän suuruudella vielä isompi. Huomioidaan vielä ennen haarukoinnin aloittamista, että villalevyjen paksuuksia on saatavilla tässä kokoluokassa 25 mm välein.

Nyt on yllämainitun perusteella tehtävä valinta, että tehdäänkö kompromissi ilma- tai villaseinämän ominaistuuksien vai kokonaisuuden kustannuksella. Ominaisuuden pitäminen mahdollisimman alhaalla, mielellään ihmisen kuulolle herkän taajuusalueen 100 Hz ... 4000 Hz ulkopuolella priorisoidaan tässä suunnittelussa. Ominaisuuden tulosta laskentamallissa voidaan pitää muutenkin tarkempana, kuin muuttujan $LP2A$ arvoja. Tätä toteamusta ja valintaa perustellaan tarkemmin luvussa 4.3.

Kokeillaan vaihtaa muuttujan $h2$ arvoksi 200 mm pienempiä levy-paksuuksia, ensin 175 mm ja sitten 150 mm. Samalla täytyy muistaa muuttaa muuttujan $hgap$ arvoja vastaavasti, jotta $hmax$ saa arvon 250 mm. Parin kokeilun jälkeen päädytään seuraavassa kuvassa näkyviin suunnitteluparametrien arvoihin.

Name	Units	Value	Lower limit	Upper limit
h1	mm	2,50	1,00	50,00
h2	mm	150,00	10,00	200,00
hgap	mm	97,50	1,00	200,00

Kuva 33. Suunnitteluparametrien arvot, vaihe 3.

Kuten alla olevasta kuvasta nähdään, edellä mainituilla parametreilla päästään todella hyviin tuloksiin. Edelliseen vaiheeseen verrattuna ääneneristävyyttä menetetään vain muutamien desibelin verran ja ominaistaajuus saadaan todella lähelle maalia eli 100 hertsiä. Paras tilanne olisi tietenkin saada ominaistaajuus selkeästi alle sadan hertsin, mutta tätä ei kuitenkaan nähty tarpeelliseksi. Ihmisen kuulon herkkyys kuuloalueen alataajuuksilla ei ole niin kriittinen, kuin ylärajalla. Tähän liittyen kannattaa katsoa vakioäännekkyyssäyrästä, joka on esitelty luvussa 2.2.2 kuvassa 12. Samasta kuvasta voidaan todeta myös se, miksi koincidenssitaajuuden arvo sitten päätettiin haarukoida noinkin korkeaksi, eikä pelkästään 4000 hertsin tuntumaan.

Name	Units	Value	Targ. Value	Aim (sign)	Weight
LP2A	dB	32,79	30	-1	1,00
f0	Hz	100,51	100	-1	1,00
LPAtaso	dB	95,11	95	1	1,00
fc	Hz	4785,25	4000	1	1,00
hmax	mm	250,00	250	-1	1,00

Kuva 34. Järjestelmän ominaispiirteet, vaihe 3.

Tässä suunnittelutehtävässä tuli käytettyä EDA-työkalun optimointi-apuvälinettä melko vähän. Toisaalta herkkyysmatriisista saatiin paljon hyödyllistä informaatiota siitä, että mikä vaikuttaa mihinkin ja missä tilanteissa ja suhteissa. Tämä tieto nopeutti merkittävästi parametrien hienosäätöä ja toi ikään kuin merkitystä ja perusteluja tehdyille valinnoille. Herkkyysmatriisi auttoi myöskin herättämään ajatuksia laskentamallista ja taustalla vaikuttavista ilmiöistä paljon enemmän, kuin lukujen valitseminen umpimähkään tai järjestelmällisesti alkaen alimmasta edeten kohti ylärajaa. Vaikka suunnitteluparametreja ei tässä työssä edes ollut kovin montaa, silti EDA-työkalun käytössä oli siis paljon etuja ja ellei muuta, niin sen potentiaali tuli osoitettua melko hyvin.

Huomattavaa on myös se, että samalla työkalulla voidaan päätyä täysin erilaiseen lopputulokseen, jos päätetään priorisoida eri asioita. Jos otetaan koko suunnittelun lähtökohdaksi ainoastaan muuttujan *LP2A* minimointi pitäen kaikki muut muuttujat toisarvoisena, rakenne olisi varmaankin melko toisenlainen. Näitä päätöksiä ja niiden taustalla vaikuttavia tekijöitä selostetaan lisää seuraavassa luvussa.

4.2 Rakenteen mitoitus, materiaalina vaneri

Käydään tässä vielä lyhyesti läpi, millaisilla materiaalipaksuuksilla saataisiin kohtalainen vaimennus rakennettua, kun materiaalina käytetään vaneria. Laskentamallin *input*-muuttajat eli suunnitteluparametrit ja niiden arvot alla olevassa kuvassa.

Name	Units	Value	Lower limit	Upper limit
h1	mm	6,50	1,00	50,00
h2	mm	18,00	1,00	50,00
hgap	mm	200,00	1,00	200,00

Kuva 35. Suunnitteluparametrien arvot, kun materiaalina vaneri.

Tässä esitelyjen tuloksien ja mittojen haarukoinnissa lähtökohtana oli se, että haetaan kahdella eri levypaksuudella vaimennettua rakennetta. Vanerin ominaisuuksien vuoksi koinsidenssitaajuutta on käytännössä mahdoton mitoittaa 4000 hertsin yläpuolelle, sillä tällöin jouduttaisiin käyttämään niin ohuita materiaalivahvuuksia, että niillä ei melua tarpeeksi saada vaimennettua. Käytettäessä kahta eri paksuutta kummankin levyn koinsidenssitaajuudet eli heikosti vaimentavat taajuudet ovat kaukana toisistaan ja tällöin kumpikin levy vaimentaa paremmin toisen levyn heikosti vaimentavia taajuuksia. Tässä mallissa siis ei nollata vaimennuksen arvoja taajuuksittain koinsidenssitaajuuden perusteella. Painotetaan edelleen konstruktiolle tarvittavien mittausten suorittamista tuloksien vahvistamiseksi.

Output-muuttujia eli järjestelmän ominaispiirteitä tähän laskentaan saatiin hieman useampi. Koinssidenssitaajuudet on laskettu kummallekin levyille erikseen ja kokonaan uusina muuttujina erikseen rakenteen vaimennus taajuuksilla 125 ja 4000 hertsiä. Rakenteen eristyskykyä näillä kahdella eri taajuudella haluttiin korostaa tähän laskentaan, syy tähän löytyykin jo alla olevasta kuvasta. Vaneri eristää korkeita taajuuksia paljon paremmin, kuin matalia taajuuksia. Kuulon kannalta tärkeällä taajuuskaistalla tapahtuu melko suuri muutos tässä, kun 4000 hertsin taajuudella eristävyys on yli 80 desibeliä ja 125 hertsin taajuudella alle 30 desibeliä.

System Characteristics					
Name	Units	Value	Targ. Value	Aim (sign)	Weight
LP2A	dB	41,77	30	-1	1,00
f0	Hz	85,21	100	-1	1,00
LPAtaso	dB	95,11	95	1	1,00
fc1	Hz	2594,53	4000	1	1,00
fc2	Hz	936,91	4000	1	1,00
hmax	mm	224,50	250	-1	1,00
Rd_125	dB	26,04	30	-1	1,00
Rd_4000	dB	86,25	30	-1	1,00

Kuva 36. Järjestelmän ominaispiirteet, kun materiaali on vaneri.

Lisätään vielä kuva herkkyyismatriisista tässä tapauksessa. Matalien taajuuksien eristävyyttä ei pysty tällä materiaalilla korjaamaan, vaan tarvittaisiin jokin raskaampi materiaali, tai sitten huomattavasti paksumpaa levyä.

Relative Sensitivity Matrix of the Design Parameters

			h1	h2	hgap
			mm	mm	mm
Actual value			6,50	18,00	200,00
LP2A	dB	41,72	-0,49	-0,51	0,00
f0	Hz	85,21	-0,37	-0,13	-0,50
LPAtaso	dB	95,11	0,00	0,00	0,00
fc1	Hz	2594,53	-1,00	0,00	0,00
fc2	Hz	936,91	0,00	-1,00	0,00
hmax	mm	224,50	0,03	0,08	0,89
Rd_125	dB	26,04	0,50	0,50	0,00
Rd_4000	dB	86,25	0,50	0,50	0,00
			2,89	2,72	1,39

(*)System Design Parameter Priorities

Kuva 37. Herkkyyismatriisi, vaneri.

4.3 Arvio tulosten tarkkuudesta ja perusteluja valinnoille

Ihan ensimmäisenä käsitellään hiukan ongelmallinen käsite koinsidenssitaajuus. Se, miten tämä on huomioitu laskentamallissa, on nollata teräslevyn ääneneristävyys koinsidenssitaajuuden ylittävillä taajuuksilla. Taajuus koneen tuottamalle melulle ja täten myös eristävyydelle on käsitelty matemaattisesti diskreettinä funktiona, jossa on 10 tarkastelupistettä (taulukko 10). Tästä 10 alkion vektorista sitten nollataan ääneneristävyyden arvoja juoksevan yksittäisen muuttujan, siis koinsidenssitaajuuden perusteella. Tämän kai-

ken perusteella ei olekaan yllättävää, että EDA-työkalun optimointifunktio löytää ääneneristävyydelle paikallisen maksimin (siis melutasolle *LP2A* paikallisen minimin) juuri koinsidenssitaajuuden ollessa tasan 2000 hertsiä, jolloin yhdenkin hertsin pienempänä ääneneristävyydestä putoaisi yksi komponentti kokonaan pois. Tämä selittää myös suunnittelun ensimmäisessä vaiheessa mainittua ääneneristävyyden pykälämäistä käytöstä teräslevyn paksuutta kasvatettaessa. Nämä asiat mielessä tehtiin päätös yksinkertaisesti mitoittaa teräslevy pienentämällä paksuutta siten, että koinsidenssitaajuus nousi reilusti yli 4000 hertsin, varsinkin kun laskennallinen A-painotettu melutaso kasvoi tästä toimenpiteestä hyvin vähän. Ääneneristävyyttä selkeästi heikentävä tekijä täytyi saada puhealueen taajuuskaistan ulkopuolelle.

Koinsidenssitaajuuden pykälämäinen vaikutus ei toimi todellisuudessa laskentamallin osoittamalla tavalla, vaan enemmänkin jatkuvan funktion tapaisesti. Ongelma vain syntyy siitä, että laskenta täytyisi silloin suorittaa moninkertaisella määrällä alkioita jaettuna koko taajuuskaistalle, siten että diskreetti laskenta sisältää niin paljon tarkastelupisteitä, että se alkaa muistuttaa enemmän jatkuvaa funktiota. Tällainen laskenta vaatisi huomattavasti enemmän laskenta-aikaa. Suurempi ongelma on kuitenkin se, että koneiden aiheuttama melu ilmoitetaan usein samalla tavoin, kuin tämän työn tehtävänannossa. Taulukon 10 datasta tietenkin voitaisiin interpoloimalla (ja ekstrapoloimalla, jotta taajuusalue kattaisi koko 20-20 000 hertsin kuuloalueen) luoda lisää tarkastelupisteitä. Toisaalta, kun tunnetaan tutkittava ilmiö ja taustalla vaikuttava teoria hyvin, voidaan laskentamallia käyttäessä väistää pahimmat kompastuskivet. Kuten todettua, EDA-työkalun herkkyysmatriisista ja järjestelmän ominaisuuksien riippuvuussuhteita esittävästä taulukosta voi olla enemmän apua, kuin aluksi voisi kuvitella. Vanerilla toteutettu suunnittelutehtävä on epätarkempi siinä mielessä, että koinsidenssitaajuus päätettiin jättää huomioimatta. Vanerin matalien taajuuksien heikko ääneneristävyys näkyy muutenkin tuloksissa, todellisuudessa siis eristävyys on isolla todennäköisyydellä vielä heikompi.

Varsinaisten äänieristeiden välissä oleva ilmamassa aiheuttaa tietyllä taajuudella melua vahvistavan värähtelyn taajuudella f_0 . Tämän värähtelyn varsinaista vaikutusta ei ole tässä laskentamallissa huomioitu sikäli, ettei sitä näy muuttujassa *LP2A* mitenkään. Siitä tuleekin ensimmäinen epäily melutason eli muuttujan *LP2A* arvon paikkansapitävyydelle tositilanteessa. Nämä asiat huomioon ottaen onkin paljon tärkeämpää saada värähtelytaajuus mahdollisimman kauas ihmisen kuuloalueelle tärkeältä taajuuskaistalta, kuin huolehtia muutaman desibelin menetyksestä teoreettisessa ääneneristävyydessä.

Ominaisvärähtelyn aiheuttaman värähtelyn lisäksi tässä suunnitellun ääntä eristävän elementin pitäisi toimia laboratorio-olosuhteissa suhteellisen hyvin, kuten on mitoitettu. Ominaisvärähtely aiheuttanee muutaman desibelin lisäyksen A-painotettuun äänenpaine-tasoon. Tämän lisämelun pitäisi olla kuitenkin mitoituksen ansiosta ärsyttävyydeltään mahdollisimman pieni. Kokonaan toinen kysymys on se, miten tällainen elementti toimisi sitten asennettuna tehtävänannossa mainittuun halliin. Lukuun 33,09 Hz ei varmaankaan näissä olosuhteissa tulisi juuri luottaa ja nukkumisen tässä hallissa voinee unohtaa, vaikka

rakennusmääräyksissä ilmoitettu arvo onkin kovin lähellä. Melun kulkeutuminen jotain muuta kautta tilaan ja kuulijan korvaan on mahdollinen ja hyvin todennäköinen. Melu voi kulkeutua omasta tilastaan seinän takaa ulos ja vaikkapa avonaisesta ikkunasta sisään. Kenties ääneneristävyydeltään hyviksi oletetut hallin seinät osoittautuvat tässä mielessä kehnoiksi vaikkapa jonkin yksittäisen johdon tai putken läpiviennin vuoksi. Melu voi kulkeutua myös runkomeluna koneen alustasta lattiaa tai muita rakenteita pitkin ympäri hallia. Koneen ja sen kiinnityspisteen välinen vaimennus tulisikin asennettaessa huolehtia varsinkin kriittisimpien taajuuksien eristämisen varmistamiseksi. Rakenteiden ääneneristävyys on tarkalleen niin hyvä, kuin niiden heikoin kohta.

4.4 Johtopäätökset

EDA-työkalu tuntui toimivan tämänkaltaisessa suunnittelutehtävässä melko hyvin. Ongelmakohdat liittyivät enimmäkseen teorian soveltamisen ympärillä pyöriin kysymyksiin. Joitain virheitä korjattiin laskentamallista vielä ihan loppumetreillä, kun kaavan 18 jälkimmäisen version huomattiin aiheuttavan joillain arvoilla negatiivisia vaimennuksen arvoja. Ajallisesti suurin osa, yli 90% tähän työhön kuluneesta työmäärästä kului teorian tutkimiseen ja laskentamallin rakentamiseen (tai korjauksiin). Valmiilla laskentamallilla haarukointi ja ratkaisut syntyivät tämän jälkeen hyvin nopeasti. Laskentamallin rakenteen vuoksi materiaalin vaihtuessa jouduttiin osa koodista kirjoittamaan uudelleen. Tämäkin kuitenkin tapahtui melko nopeasti, koska mallin toiminta ja teoria olivat tekijälle tässä vaiheessa hyvin tuttuja. Muutokset olivat lähinnä tuttujen koodin osien muokkaamista tai kopioimista, mitään teorian kannalta uutta tässä vaiheessa ei laskentamalliin tehty. Tästä voi vetää sellaisen johtopäätöksen, että EDA-työkalun parissa työskentely tehostuu merkittävästi, kun sen toiminta on jo ennestään tuttua. Laskentamalli kannattaa pyrkiä rakentamaan mahdollisimman monipuoliseksi ja toisaalta muokattavaksi. Lisäksi käyttäjältä, vaikka tämä ei koodiin koskisikaan, vaaditaan vähintään pintapuolista ymmärrystä taustalla vaikuttavasta teoriasta ja Matlabissa tapahtuvasta laskennasta. Tämä siksi, että käyttäjän on ymmärrettävä mihin tilanteisiin laskentamalli soveltuu ja mihin ei. Miksikään myyntikonfiguraattoriksi EDA-työkalusta siis ei kirjoittajan mielestä ole, ellei myyjä ja suunnittelija ole yksi ja sama henkilö tai vähintään tee hyvin tehokasta ja tiivistä yhteistyötä.

5. YHTEENVETO

Suunnittelun tarkoituksena on saada aikaiseksi toteuttamiskelpoinen tuote soveltamalla ilmiöön liittyvää teoriaa, tehdä valintoja käytettävissä olevien tietojen ja työkalujen, sekä valmistusmenetelmien avulla. Tässä diplomityössä akustiikan teoriaa soveltaen käytetään EDA-työkalusta saatavaa dataa tehden sen perusteella päätöksiä. Lopputuloksena ei ole tuote, vaan seuraavalle suunnitteluvaiheelle sopiva malli. Parametrinen suunnittelu on vaihe osana suunnitteluprosessia, jossain ongelman määrittelyn ja valmistuksen suunnittelun välivaiheilla. Tässä työssä on otettu tehtäväksi suunnitella laskentamalli meluntorjunnan tehtävään ja arvioida laskentamallin rakentamiseen ja soveltamiseen liittyvä prosessi ja valmis malli mahdollisimman monesta näkökulmasta.

Akustiikkaa käsittelevässä osiossa lähdettiin perusasioista liikkeelle, kerrottiin äänen fyysikaalisesta luonteesta lähtien melun mittaamiseen käytettävistä menetelmistä, ihmiskorvan rakenteesta ja äänen subjektiivisista vaikutuksista, lainsäädännöstä ja lopulta yhdestä menetelmästä eli massalaista, millä ääneneneristys voidaan toteuttaa. Tietojen perusteella voidaan kirjoittaa tarvittavat laskentakaavat, sekä tulkita niistä saatavat tulokset ja suhteuttaa saatavat desibeliarvot aiemmin tutuksi tulleeseen teoriaan ja säädöksiin. Saatavia tuloksia kun verrataan esimerkiksi vakioäännekkyyssäyrästäihin tai lainsäädäntöön ja erilaisiin suosituksiin, saadaan hyvä kuva siitä, miten suunniteltu malli voisi toimia.

Tässä työssä käsitellyt akustiikan kaavat eivät ole näennäisesti kovin monimutkaisia, mutta taustalla vaikuttavat ilmiöt ovat sitä. Näitä kaavoja soveltaessa tosielämän sovelluksiin, joudutaan tekemään approksimaatioita ja yksinkertaistuksia, jotta laskenta ei mene liian monimutkaiseksi. Laskentamallissa ja joissain osissa teorian soveltamista nämä approksimaatiot voivat vaikuttaa lopputulokseen, tämä on pyritty kuitenkin tiedostamaan ja tekemään valinnat huomioiden mahdolliset heikkoudet laskentamallissa. Tässä työssä käsitellyt teoriaosuudet olivat pääpiirteittään tekijälleen tuttuja jo ennestään, mutta ymmärrys teoriapuoleen on syventynyt huomattavasti ja osittaiset epäselvyydet tuli käsiteltyä ja selvitettyä. Mikäli lukijaa kiinnostaa akustiikka tai meluntorjunta, niin tällöin erityisesti lähteet [4] ja [20] kannattaa ottaa luettavaksi. Internet-lähteestä [3] löytyy nopeasti tietoa kaipaavalle akustiikan tietouden täsmäisku.

Valmiilla laskentapohjalla suunnitteluparametrien haarukointi oli kirjoittajan mielestä melko suoraviivaista ja nopeata EDA-työkalun apuvälineiden ansiosta. Työkalun eri välineiden ansiosta raportointi on helppoa ja siihen pystyy myös vaivattomasti sisällyttämään perusteluja tehdyille päätöksille. Herkkyysmatriisista saatava tieto oli erityisesti hyödyksi. EDA-työkalun optimointi-ominaisuutta ei tässä työssä juuri käytetty, koska laskentamallissa oli ongelma tai ominaisuus (näkökannasta hieman riippuen), jonka optimointityökalu poimi ensimmäisenä löytäen käsiteltävästä funktiosta paikallisen minimin. Minimi asettui sellaiseen pisteeseen, ettei sillä ollut tulosten kannalta paljon merkitystä,

mutta se vaikutti kuitenkin siten, että optimointityökalua ja tuloksia tässä pisteessä ei voitu käyttää. Laskentamallin ongelma ratkaistiin tavallaan toista suunnittelutehtävää (kun vaimennusmateriaali oli vaneri) varten poistamalla koinsidenssitaajuuden vaikutus vaimennukseen. Kumpikin malli on teorian näkökulmasta aavistuksen verran ongelmallinen, mutta akustiikan soveltaminen etenkin yksinkertaistuilla malleilla on väistämättä ongelmallista. Akustiikan suunnittelutehtävään kuuluu olennaisilta osin rakenteen testaaminen mittauksin, joka kuitenkin jäi tämän työn rajauksen ulkopuolelle.

LÄHTEET

- [1] Ellman A, Pajunen S, Laine I, Coatanea E. Engineering Design Analysis Tool for Early Design Phase With Low-Fidelity Models: A Case of Hydraulic Crane. ASME. International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, Volume 1: 37th Computers and Information in Engineering Conference ():V001T02A017. doi:10.1115/DETC2017-67493.
- [2] J. Toivola, Koneakustiikan perusteita, TTKK/Koneensuunnittelu, opintomoniste, Tammikuu 2001, 76 s.
- [3] Akustiikkaa ja äänenkäsittelyä, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 29.1.2018): <http://piisami.net/tietosivut.htm>.
- [4] V. Pulkki, M. Karjalainen, Communication acoustics: An introduction to Speech, Audio and Psychoacoustics, 2015, 456 s.
- [5] R. Hildebrand, T. Karvinen, Noise Control, opintomoniste, 182 s.
- [6] How sound waves work, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 23.1.2018): <http://www.mediacollege.com/audio/01/sound-waves.html>.
- [7] Intervalli, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 23.1.2018): <https://fi.wikipedia.org/wiki/Intervalli>.
- [8] Äänen voimakkuus, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 23.1.2018): http://www.aanipaa.tamk.fi/voima_1.htm.
- [9] SFS-EN ISO 717-1. Akustiikka. Rakennusten ja rakennusosien ääneneristävyyden luokitus. Osa 1: Ilmaääneneristävyys, Suomen Standardoimisliitto, 1996, 40 s.
- [10] P. Taina, Pientalon huoneakustiikan parantaminen, opinnäytetyö, Teknillinen Korkeakoulu, 2006, 75 s. Saatavissa: lib.tkk.fi/Dipl/2006/urn007857.pdf.
- [11] Korvan rakenne, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 23.1.2018): <https://www.biomag.hus.fi/braincourse/L7.html>.
- [12] M. Karjalainen, Hieman akustiikkaa, Teknillinen korkeakoulu, 2000, 54 s.
- [13] Kuulovauriot ja niiden synty, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 23.1.2018): <http://www.kuulohansa.fi/kuulovauriot.htm>.
- [14] Melututkija: Infraääni on ymmärretty väärin – "Linkoavan pesukoneen infraääni voimakkaampi kuin tuulivoimalan", verkkosivu. Saatavissa (viitattu 23.1.2018):

<https://www.tekniikkatalous.fi/tpaiva/melututkija-infraaani-on-ymmarretty-vaarin-lin-koavan-pesukoneen-infraaani-voimakkaampi-kuin-tuulivoimalan-6655489>.

[15] ISO 9996:1996, Mechanical vibration and shock - Disturbance to human activity and performance – Classification, International Organization for Standardization, 1996, 8 s.

[16] Työ- ja elinkeinoministeriö, Tuulivoimaloiden tuottaman äänen vaikutukset terveyteen, Helsinki, 2017, 164 s. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-327-229-3>.

[17] Valtioneuvoston päätös melutason ohjearvoista, 993/1992, 1992. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/1992/19920993>.

[18] Asumisterveysohje 2003:1, Sosiaali- ja terveysministeriö, Helsinki, 2003, 88 s. Saatavissa: https://www.finlex.fi/data/normit/14951/asumisterveysohje_pdf.pdf.

[19] Ympäristöministeriö: C1 Ääneneristys ja meluntorjunta rakennuksessa -Määräykset ja ohjeet 1998, 04.06 1998 Suomen rakentamismääräyskokoelma, 1998. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/viranomaiset/normi/700001/1917>.

[20] J. Rindel, Sound Insulation in Buildings, 2017, 450 s.

[21] P. Adkins, Transformer Noise Reduction with a Close-Fitting Mass-Law Enclosure, julkaisussa IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Volume 82, Issue 66, 1963, s. 302-308. Saatavissa: <http://ieeexplore.ieee.org.libproxy.tut.fi/document/4072798/>.

[22] Vanerikäsikirja, Lahti, 2005, 68 s. Saatavissa (viitattu 25.1.2018): <http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/Vanerik%C3%A4sikirja.pdf>.

[23] T. Lahtela, M. Lahikainen, Ääneneristys puutalossa, Puurakenteisen asuinrakennuksen ääneneristävyyden suunnitteluohje, 2004, 114 s. Saatavissa (viitattu 25.1.2018): <http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/content/rakentaminen/suunnitteluohjeet/aaneneristys-puutalossa/koko-ohje.pdf>.

LIITE A: ENSIMMÄISEN SUUNNITTELUKÄYTÄVÄN MATLAB-KOODI

```

% Example model for Matlab implementation in EDA-tool
% File name need to be same as function name
% Syntax
% out_vector function(in_vector)
% user is assumed to take care of out and in vector sizes
% they need to match the system characteristics and design parameters
% in the corresponding Excel optimisation program.

% INPUTS are only Design parameters
% OUTPUTS are only System characteristics

function out = akustiikka(in)
% INPUT Vector length parameter used for checking
VECTOR_LEN = 3;

% Test that vector has correct length
assert(vector_length(in) == VECTOR_LEN, 'Input vector not correct size');
h1 = in(1)/1000;
h2 = in(2)/1000;
hgap = in(3)/1000;

% taajuusvektori
f=[31.5 63 125 250 500 1000 2000 4000 8000 16000];

% A-painotusvektori
A=[-39.4 -26.2 -16.1 -8.6 -3.2 0 1.2 1 -1.1 -6.6];

% LP-vektori, äänenvoimakkuudet taajuksittain desibeleinä
LP=[80 84 94 94 92 89 89 81 79 77];

% lasketaan LP(A) taso
LPAtaso=10*log10(sum(10.^((LP+A)/10)));

% äänen nopeus (m/s)
c=343;

% ilman tiheys (1.21 kg/m^3)
rhoilma=1.21;

% seinämien tiheydet (kg/m^3)
rho1=7850; % teräs
rho2=30; % villa yms.

% laattavakion määrittäminen
E=210*10.^9; % teräksen kimmokerroin
v=0.3; % poissonin vakio
D=(E*h1.^3)/(12*(1-v.^2)); % laattavakio

% koinsidenssitaajuus
fc=((c.^2)/(2*pi))*sqrt((rho1*h1)/D);

```

```

% Omegan arvo:
% Tässä osiossa määritetään pikku omegan arvo.
% Lisäksi erotellaan kumpaakin seinämää varten f ja omega.
% Näin saadaan terässeiniä varten huomioitua koinsidenssitaajuuden
% vaikutus.
f1=f;
f1(f1>fc)=0; % Koinsidenssitaajuutta suuremmat taajuudet nollataan,
% mutta ainoastaan teräslevyä koskevasta taajuusvektorista!
f2=f; % Samanlaista tarkastelua ei tehdä toista materiaalia varten, koska
% oletetaan, että sen materiaalipaksuus on niin suuri, ettei
% koinsidenssitaajuus vaikuta eristävyyteen.
omega1=f1*2*pi; % Pikku-omegan arvot f1 ja f2 avulla
omega2=f2*2*pi;

% R1 ja R2 laskeminen. R1 saa em. mukaisesti koinsidenssitaajuuden
% ylittävälle taajuuksille arvon 0.
R1=10*log10(1+((omega1*roo1*h1)/(2*rooilma*c)).^2);
R2=10*log10(1+((omega2*roo2*h2)/(2*rooilma*c)).^2);
R=R1+R2; % lasketaan yhteen kummankin seinämän vaimennukset
Rd=R-3; % oletetaan: diffuusi äänikenttä

Rd;
Rd(Rd<0)=0;

% absorptiokertoimet teräkselle ja betonille
ateras=0.10;
abetoni=0.04;

% tilan eri materiaalien pinta-alat
Ateras=20*30;
Abetoni=20*30+2*20*5+2*30*5;

% absorptiopinta-ala ja kokonaispinta-ala
S=ateras*Ateras+abetoni*Abetoni;
A2=2*20*30+2*20*5+2*30*5;

Rtila=10*log10(A2/S);

% Äänenpainetaso tilassa vaimennuksen johdosta taajuuksittain
LP2=LP-Rd-Rtila;
LP2(LP2<0)=0;

% Äänenpainetaso A-painotettuna desibeleinä
LP2A=10*log10(sum(10.^((LP2+A)/10)));

% Resonanssitaajuus
f0=(1/(2*pi))*sqrt((rooilma*c.^2*(roo1*h1+roo2*h2))/(hgap*roo1*h1*roo2*h2));

% rakenteen paksuus (mm)
hmax=(h1+h2+hgap)*1000;

% Set the output
out = [LP2A, f0, LPAtaso, fc, hmax];

```

LIITE B: TOISEN SUUNNITTELUKÄYTÄVÄN MATLAB-KOODI

```

% Example model for Matlab implementation in EDA-tool
% File name need to be same as function name
% Syntax
% out_vector function(in_vector)
% user is assumed to take care of out and in vector sizes
% they need to match the system characteristics and design parameters
% in the corresponding Excel optimisation program.

% INPUTS are only Design parameters
% OUTPUTS are only System characteristics

function out = akustiikka2(in)
% INPUT Vector length parameter used for checking
VECTOR_LEN = 3;

% Test that vector has correct length
assert(vector_length(in) == VECTOR_LEN, 'Input vector not correct size');
h1 = in(1)/1000;
h2 = in(2)/1000;
hgap = in(3)/1000;

% taajuusvektori
f=[31.5 63 125 250 500 1000 2000 4000 8000 16000];

% A-painotusvektori
A=[-39.4 -26.2 -16.1 -8.6 -3.2 0 1.2 1 -1.1 -6.6];

% LP-vektori, äänenvoimakkuudet taajuksittain desibeleinä
LP=[80 84 94 94 92 89 89 81 79 77];

% lasketaan LP(A) taso
LPAtaso=10*log10(sum(10.^((LP+A)/10)));

% äänen nopeus (m/s)
c=343;

% ilman tiheys (1.21 kg/m^3)
rhoilma=1.21;

% seinämien tiheydet (kg/m^3)
rho1=520; % havuviilu

% laattavakion määrittäminen
E=7E9; % teräksen kimmokerroin
v=0.3; % poissonin vakio
D1=(E*h1.^3)/(12*(1-v.^2)); % laattavakio 1
D2=(E*h2.^3)/(12*(1-v.^2)); % laattavakio 2

% koinsidenssitaajuuksien kummallekin levyille
fc1=((c.^2)/(2*pi))*sqrt((rho1*h1)/D1);
fc2=((c.^2)/(2*pi))*sqrt((rho1*h2)/D2);

```



```

omega=f*2*pi; % Pikku-omegan arvot

R1=10*log10(1+((omega*roo1*h1)/(2*rooilma*c)).^2);
R2=10*log10(1+((omega*roo1*h2)/(2*rooilma*c)).^2);
R=R1+R2; % lasketaan yhteen kummankin seinämän vaimennukset
Rd=R-3; % oletetaan: diffuusi äänikenttä

% absorptiokertoimet teräkselle ja betonille
ateras=0.10;
abetoni=0.04;

% tilan eri materiaalien pinta-alat
Ateras=20*30;
Abetoni=20*30+2*20*5+2*30*5;

% absorptiopinta-ala ja kokonaispinta-ala
S=ateras*Ateras+abetoni*Abetoni;
A2=2*20*30+2*20*5+2*30*5;

Rtila=10*log10(A2/S);

% Äänenpainetaso tilassa vaimennuksen johdosta taajuuksittain
LP2=LP-Rd-Rtila;
LP2(LP2<0)=0;

% Äänenpainetaso A-painotettuna desibeleinä
LP2A=10*log10(sum(10.^((LP2+A)/10)));

% Resonanssitaajuus
f0=(1/(2*pi))*sqrt((rooilma*c.^2*(roo1*h1+roo1*h2))/(hgap*roo1*h1*roo1*h2));

% rakenteen paksuus (mm)
hmax=(h1+h2+hgap)*1000;

Rd_125=Rd(3); % määritetään pari output-muuttujaa,
Rd_4000=Rd(8); % melutaso herkimmän kuuloalueen
           % ylä- ja alarajalta, 125 Hz ja 4000 Hz

% Set the output
out = [LP2A, f0, LPAtaso, fc1, fc2, hmax, Rd_125, Rd_4000];

```