

ÄÄNENERISTYSVANERIN OMINAISUUDET JA NIIDEN KEHITTÄMINEN

Koskisen Oy

Tiivistelmä

Tekijä(t) Viili, Asko	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK Sivumäärä 41	Valmistumisaika Syksy 2019
Työn nimi Ääneneristysvanerin ominaisuudet ja niiden kehittäminen Koskisen Oy		
Tutkinto Insinööri (AMK)		
Tiivistelmä <p>Opinnäytetyön tarkoituksena oli syventää tietämystä äänieristevanerin ominaisuuksista toimeksiantajana toimivalle Koskisen Oy:lle. Työssä keskityttiin selvittämään taustatietoja tarkasti ja monipuolisesti, sillä ääneneristysominaisuuksien kehittäminen vaatii tietoa äänen käyttäytymisestä. Ääneneristysvanerin rakenteeseen on lisätty aina erillinen lisämateriaali, jolla vaikutetaan ominaisuuksiin.</p> <p>Taustatietojen perusteella kehitettiin kolme uutta versiota nykyisen ääneneristysvanerin rinnalle. Vanerin ääneneristävyys parantamiseksi levyjen väliin liimataan erillinen lisämateriaali, jonka avulla ääneneristysominaisuudet parantuvat. Levyjen ominaisuuksiin vaikutetaan myös erilaisilla viilu- ja lisämateriaalirakenteilla sekä levyn paksuudella.</p> <p>Levyistä testattiin ääneneristävyys standardin ISO 10140-2 mukaan ja määritettiin mittaustuloksien avulla ääneneristävyysarvo R_w standardin ISO 717-1 avulla. Levyistä mitattiin myös lujuusominaisuudet, sillä ääneneristysvanerin yleisimmät käyttökohteet ovat juna- ja linja-autoteollisuudessa, joissa vaaditaan tuotteilta hyvää lujuutta ja kestävyttä.</p> <p>Mittausten perusteella kahdella uudella versiolla ääneneristysarvoa saatiin hieman kasvatettua nykyiseen verrattuna ja yhdellä arvo laski. Lujuusominaisuudet olivat hyvin lähellä toisiaan jokaisella versiolla.</p> <p>Työn perusteella ääneneristysvanerin ominaisuuksia on mahdollista parantaa ja lisäksi työ antoi uusia ideoita ja tietotaitoa tuotteen kehittämiseen.</p>		
Asiasanat ääneneristysvaneri, ääneneristysarvo, lisämateriaali		

Abstract

Author(s) Viili, Asko	Type of publication Bachelor's thesis	Published Autumn 2019
	Number of pages 41	
Title of publication Developing the properties of sound insulation plywood Koskisen Oy		
Name of Degree Bachelor of Engineering		
Abstract <p>The purpose of the thesis was to widen the knowledge about sound insulation plywood for Koskisen Oy. The information was gathered on sound insulation properties both how the sound behaves in the material and what kind of properties are needed from the sound insulation panels. The best sound insulation panel is always some kind of sandwich construction with some core material which has an effect on the properties of the panel.</p> <p>Three new versions of sound insulation plywood panel were developed with precise background details. To improve the sound insulation properties of plywood, core material layers were glued in the construction of plywood with various constructions and thicknesses. The properties of panels were also influenced with different structures and thicknesses.</p> <p>The sound insulation properties were tested in all versions according to ISO 10140-2 and rate of the sound insulation value R_w of the panels according to ISO 717-1. The mechanical strength of panels was measured because the sound insulation plywood panels were usually used in trains and busses where good strength and durability properties are needed.</p> <p>The sound insulation tests revealed that with two new versions the R_w values improved and with one version they declined. All versions had almost the same strength properties.</p> <p>The study proved that the properties of sound insulation plywood can be improved and the study also provided a lot of knowledge and new ideas how to develop the product.</p>		
Keywords sound insulation plywood, sound insulation value, core material		

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	1
1.1	Työn taustat ja tavoite	1
1.2	Työn toteutus ja sisältö	1
2	TOIMEKSIANTAJA – KOSKISEN OY	2
3	ÄÄNI	3
3.1	Äänen taajuus	3
3.2	Ääniaallot ja äänen nopeus	3
3.3	Äänenpaine	4
3.4	Äänenteho	4
3.5	Aaltovastus	5
3.6	Äänen intensiteetti	5
3.7	Desibeli	6
3.8	Äänen absorptio ja jälkikaiunta-aika	6
3.9	Resonaattorit	8
3.10	Äänen kuuluvuus	9
3.11	Ilmaääneneristys ja ilmaääneneristysluku	10
3.12	Massalaki	11
4	MELU JA ÄÄNENERISTYS	13
4.1	Ympäristö	13
4.2	Puurakennukset	13
4.3	Junat	13
4.4	Linja-autot	15
5	ÄÄNENERISTYS- JA AKUSTIIKKALEVYT	17
5.1	Vaneri	17
5.1.1	Vanerin ääneneristysominaisuudet	17
5.1.2	Ääneneristysvaneri	18
5.2	Akustiikkalevyt	19
5.3	Korkki	20
6	KOKEELLINEN OSA	21
6.1	Testaussuunnitelma	21
6.2	Testattavat levyt	21
6.3	Testausmenetelmät	22
7	TESTAUKSIEN TEKEMINEN	26

7.1	Ääneneristystestaukset.....	26
7.2	Lujuustestaukset.....	28
8	TULOSTEN TARKASTELU	31
8.1	Ääneneristysominaisuudet.....	31
8.2	Lujuusominaisuudet.....	33
9	KEHITYSEHDOTUKSET	38
10	YHTEENVETO	39
	LÄHTEET	40

1 JOHDANTO

1.1 Työn taustat ja tavoite

Tämän opinnäytetyön toimeksiantajana toimii Koskisen Oy ja tarkoituksena on tutkia ääneneristysvanerin ominaisuuksia ja kehittää niitä. Työssä perehdytään myös ääneen yleisesti sekä esitellään yleisimpiä käyttökohteita ääneneristysvanerin käyttökohteita.

Työn tavoitteena on saada lisää tietoa ääneneristysvanerin ominaisuuksista ja selvittää ääneneristysvaneria käyttävien teollisuudenalojen, kuten juna- ja linja-autoteollisuuden tavoitearvoja ääneneristysvanerin ominaisuuksille. Tavoitteena on tutkia ja testata ääneneristysvanerin ääneneristysominaisuuksia sekä mahdollisuuksien mukaan kehittää uusia, paremmin ääneneristämiseen soveltuvia vanerituotteita. Vanereista tutkitaan myös lujuusominaisuuksia, kuten taivutus- ja vetolujuus, sekä tiheys.

Kokeellisessa osassa tutkimuksia tehdään nykyisellä sekä kolmella uudella versiolla, jotka on mietitty yhdessä toimeksiantajan kanssa. Kaikki levyille tehdyt testaukset on suoritettu standardien mukaisesti, jolloin tulokset ovat vertailukelpoisia myös muihin tutkimuksiin.

1.2 Työn toteutus ja sisältö

Teoreettista osuutta varten on etsitty tietoja äänestä ja ääneneristyksestä erilaisten standardien ja olemassa olevien tietojen perusteella. Työn teoreettinen osuus alkaa luvusta kolme, jossa käsitellään yleisesti ääntä ja sen käyttäytymistä sekä ääneneristävyttä. Luku neljä keskittyy esittelemään ääneneristysvanerin käyttökohteita ja niihin sisältyviä tavoitteita. Viidennessä luvussa esitellään yleisesti vanerin ja ääneneristysvanerin rakennetta ja ominaisuuksia sekä muutamia erilaisia akustiikkalevyjä.

Kokeellinen osa alkaa luvusta kuusi, joka sisältää testaussuunnitelman ja eri testausversioiden esittelyt, sekä kuvaukset testausmenetelmistä ja testauksista. Luvusta seitsemän löytyy testauksien tulokset ja niiden tarkastelu ja kahdeksannesta luvusta ajatuksia tuotteeseen ja tutkimuksiin liittyvistä kehitysideoista.

2 TOIMEKSIANTAJA – KOSKISEN OY

Koskisen Oy on 110-vuotias ”puulle omistautunut” perheyritys, josta on kasvanut kansainvälinen puunjalostuksen ja puutuotteiden erikoisosaaja. Yrityksen juuret ovat Kärkölässä, mutta nykyään Koskisella on tehdastoimintaa Suomen lisäksi Venäjällä ja Puolassa. Koskisen Oy on jaoteltu osastoihin saha-, levy- ja ohutvaneri sekä puunhankinta ja bioenergiaan. Työntekijöitä konsernissa on reilu 1 000, ja liikevaihto oli vuonna 2018 269 M €, joista saha- ja levyteollisuus hankki 79% ja ne ovatkin konsernin tärkeimmät tuotealueet. Koskisen on myös Suomen ainoa lastulevyn valmistaja ja levyskaala on markkinoiden laajin. (Koskisen 2019.)

Koskisen Oy:n keskeisiin arvoihin kuuluvat luottamus, rohkeus, luovuus ja tuloksellisuus, joten he pyrkivät aina ylittämään asiakkaan odotukset. Koskisen toiminta on perustettu ympäristöystävällisyydelle ja heidän tuotteissaan käytetyille puumateriaalille on myönnetty sertifikaatit PEFC ja FSC®. Yritys myös hyödyntää puumateriaalin kokonaisuudessaan, sillä syntyvää puujätettä käytetään muissa tuotteissa tai vähintään biopoltoaineena tehtaiden voimalaitoksissa. Koskisen on myös mukana ympäristöministeriön kestävän kehityksen hankkeessa sitoumus2050.fi, jonka tarkoitus on kasvattaa energiajätteen osuutta koko jätemäärästä. (Koskisen 2019.)

3 ÄÄNI

3.1 Äänen taajuus

Äänentaajuus vaikuttaa äänenkorkeuden kuuloaistimukseen. Ääni on fysikaalisesti ilmanpaineen vaihtelua, joka syntyy värähtelevästä kappaleesta. Värähtely saa ilmaan tiheytyksiä ja harventumia, joista syntyy ääniaallot. Äänen taajuus f [Hz] on värähtelyjen määrä n jaettuna aikajaksolla T [s], jonka aikana värähtelyt on havaittu. Äänen taajuus voidaan laskea kaavalla 1.

$$f = n/T \quad (1)$$

jossa	f	äänentaajuus	[Hz]
	n	värähtelyjen määrä	[-]
	T	aika	[s]

(Kylliäinen 2006.)

3.2 Ääniaallot ja äänen nopeus

Ääni on elastisia aaltoja, joissa värähtely etenee pitkittäis- tai poikittaisaaltoina. Pitkittäisaallot eli tihennysaallot voivat edetä kaasuissa, nesteissä ja kiinteissä aineissa, mutta poikittaisaallot eli taivutusaallot liikkuvat yleensä vain kiinteissä aineissa. Tyhjiössä ääni ei pysty etenemään, vaan ääni tarvitsee aina väliaineen edetäkseen. Yleensä väliaineena on ilma, mutta ääni voi liikkua myös kiinteissä aineissa. Äänen taajuuden kasvaessa äänen aallonpituus lyhenee. Kuultavien äänien aallonpituudet vaihtelevat 21 m:stä (16 Hz) 21 mm:iin (16 000 Hz). (Siikanen 2014, 136.)

Taajuudella ei ole merkitystä ilmaäänennopeuteen c [m/s], mutta lämpötilalla on vaikutusta. Normaalissa huonelämpötilassa ilmaäänennopeus on noin 340 - 345 m/s. Äänen nopeus ilmassa voidaan laskea kaavalla 2.

$$c = 331 + 0,6t \quad (2)$$

jossa	c	äänen nopeus	[m/s]
	t	lämpötila	[°C]

(Kylliäinen 2006.)

Äänen nopeudella, taajuudella ja aallon pituudella on myös yhteys kaavan 3 mukaan.

$$f = c/\lambda \quad (3)$$

jossa	f	äänentaajuus	[Hz]
	c	äänen nopeus	[m/s]
	λ	aallon pituus	[m]

(Kylliäinen 2006.)

3.3 Äänenpaine

Äänenpaine p [Pa] on hetkellisen paineen ja ympäröivän ilmanpaineen ero, joka ilmaisee äänen voimakkuuden pascalleissa. Äänenpaine on kuuloaistimuksen kannalta tärkein suure, sillä sen aiheuttama paineen vaihtelu saa korvan tärykalvon värähtelemään. (Siikanen 2014, 141.)

Äänenpainetaso LP [dB] on 20-kantainen logaritmi äänenpaineen ja vertailuäänepaineen suhteen (Siikanen 2014, 141). Äänenpainetason voi laskea kaavan 4 mukaan.

$$LP = 20 \log \frac{P}{P_0} \quad (4)$$

jossa	LP	äänepainetaso	[dB]
	P	tarkasteltava äänenpaine	[Pa]
	P_0	vertailuäänepaine (0,00002 Pa)	[Pa]

(Kylliäinen 2006.)

3.4 Äänenteho

Ääniteholla W tarkoitetaan ääniaallon siirtämää energiaa ympäristöön, jonka yksikkönä on watti [W] (Siikanen 2014, 141). Ääniteho arvojen yksinkertaistamiseksi käytetään äänitehotasoa L_w , jonka voi laskea kaavan 5 mukaan.

$$L_w = 10 \log \frac{W}{W_0} \quad (5)$$

jossa	L_w	äänitehotaso	[dB]
	W	ääniteho	[W]
	W_0	vertailuääniteho (1 pW)	[W]

(Kylliäinen 2006.)

3.5 Aaltovastus

Akustinen ominaisimpedanssi eli aaltovastus z on ominainen suure jokaiselle kimmoisalle väliaineelle. Äänen tuotossa on huono hyötysuhde, sillä värähtelevän pinnan ja ilman välinen aaltovastusero on suuri. Väliaineen aaltovastuksen saa laskettua kaavalla 6.

$$z = p/v = p \cdot c \quad (6)$$

jossa	z	aaltovastus	[-]
	p	väliaineen tiheys	[kg/m ³]
	c	ääniaallon etenemisnopeus	[m/s]
	p	äänenpaine	[Pa]
	v	hiukkasnopeus	[m/s]

(Siikanen 2014, 140 - 141.)

3.6 Äänen intensiteetti

Äänen intensiteettiä I [W/m²] eli neliömetrin alalle kohdistuvaa äänitehoa käytetään useasti äänenvoimakkuuden mittarina, eli äänienergian määrää, joka on kulkeutunut aikayksikössä pintayksikön kautta, kutsutaan äänen intensiteetiksi. Intensiteetin suuruus on riippuvainen äänen tulokulmasta ja kohtisuorassa pintaan osuvan äänen intensiteetin saa laskettua kaavalla 7.

$$I = p^2/z \quad (7)$$

jossa	I	äänen intensiteetti	[W/m ²]
	p	äänenpaine	[Pa]
	z	aaltovastus	[-]

(Siikanen 2014, 141.)

Äänen intensiteettiä esittäessä logaritmisella asteikolla puhutaan äänen intensiteettitasosta L_I , jonka yksikkö on desibeli [dB]. Intensiteettitason saa laskettua referenssitason ($0,937 \times 10^{-12}$ W/m²) ja 10-kantaisen logaritmin avulla kaavan mukaan

$$L_I = 10 \log(I/0,937 \times 10^{-12}) \quad (8)$$

jossa	L_I	äänen intensiteettitaso	[dB]
	I	äänen intensiteetti	[W/m ²]

(RIL 2007, 42.)

3.7 Desibeli

Desibeli [dB] on yksikkö, jolla äänen voimakkuus saadaan ilmoitettua suhteellisella logaritmisella asteikolla. Asteikon perustana on ollut intensiteettiasteikko ja siihen päästään, kun katsotaan äänen intensiteettitaso kasvavan 10 dB, kun intensiteetti kasvaa kymmenkertaiseksi. Näin ollen kahden äänen intensiteeteille I_1 ja I_2 saadaan intensiteettitasoero D_I desibeleissä kaavan 9 mukaan.

$$D_I = 10 \log(I_1/I_2) \quad (9)$$

jossa	D_I	intensiteettitasoero	[dB]
	I_1	intensiteetti 1	[W/m ²]
	I_2	intensiteetti 2	[W/m ²]

(Siikanen 2014, 141 - 142.)

Desibeliyksiköllä ilmoitetaan yleisesti äänenpaineen, -intensiteetin ja -tehon suuruus. Kun käytetään desibelejä, puhutaan aina äänen eri tasoista eli äänenpainetasosta L_p , äänen tehotasosta L_w ja äänen intensiteettitasosta L_I . (Siikanen 2014, 141 - 142.)

Kokonaisäänitaso määräytyy kovimpien äänilähteiden perusteella, sillä kovinta ääntä 10 dB heikommät äänet eivät vaikuta kokonaisäänitasoon juurikaan. Äänitasossa tapahtuva 10 dB:n lisäys merkitsee ääniaistimuksen kaksinkertaistumista. (Siikanen 2014, 141 - 142.)

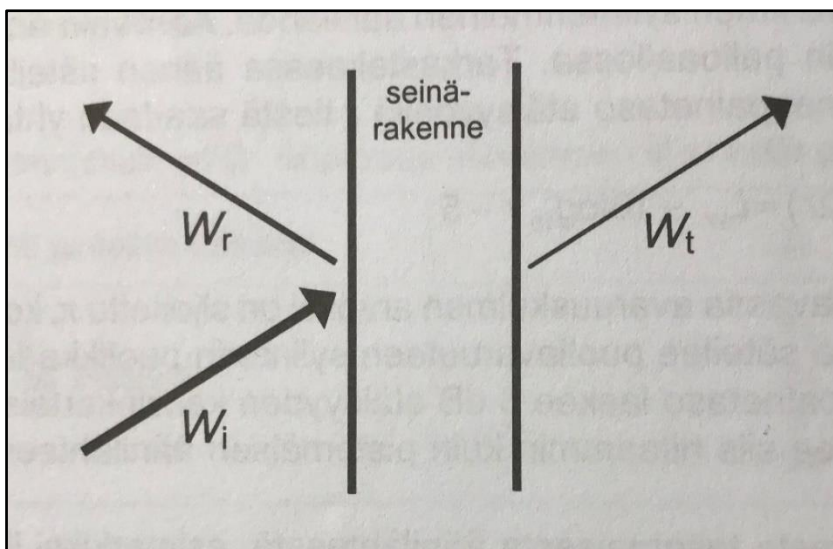
3.8 Äänen absorptio ja jälkikaiunta-aika

Äänen osuessa materiaaliin osa siitä läpäisee sen, osa heijastuu takaisin ja osa imeytyy eli absorboituu materiaaliin (kuvio 1). Pintaan imeytyneen äänen määrää kuvataan absorptiokertoimella a , joka on pintaan kohdistuneen ja siitä heijastumatta jääneen äänienergian suhde, joka esitetään arvoilla 0 - 1. Mitä suurempi absorptiokerroinluku on, sitä paremmin se imee ääntä. Absorptiokertoimen voi laskea kaavan 10 mukaan.

$$a = (W_i - W_r)/W_i \quad (10)$$

jossa	a	absorptiokerroin	[-]
	W_i	rakenteisiin osuva ääniteho	[W]
	W_r	rakenteista heijastuva ääniteho	[W]

(Siikanen 2014, 170.)



Kuvio 1. Rakenteeseen osuva ääniteho on W_i , rakenteesta heijastuva ääniteho on W_r ja rakenteen läpi menevä ääniteho on W_t (Suomen Rakennusinsinöörien Liitto, RIL 2007, 46)

Absorptiosuhteen avulla saadaan laskettua absorptioala, joka kuvaa sellaisen tilassa olevan absorptiomateriaalin määrää neliöinä, jonka absorptiosuhde on 1. Yhden tilassa olevan materiaalin absorptioalan saa laskettua materiaalin absorptiosuhteen a ja materiaalin pinta-alan S [m^2] tulona. Tilan kokonaisabsorptioala A [$m^2 \cdot Sab$] on kaikkien materiaalien absorptioalojen summa kaavan 11 mukaan, ja se merkitään $m^2 \cdot Sab$, jotta se ei sekoitu normaalien pinta-alojen kanssa.

$$A = a_1 S_1 + a_2 S_2 + \dots + a_n S_n = \sum_{i=1}^n a_i S_i \quad (11)$$

jossa	A	kokonaisabsorptioala	[$m^2 \cdot Sab$]
	a	absorptiosuhde	[-]
	S	yksittäinen absorptioala	[m^2]

(Kylliäinen 2006.)

Ilma kykenee myös absorboimaan ääntä jonkin verran, mutta sen vaikutus on merkittävää ainoastaan suurilla taajuuksilla isoissa tiloissa. Ilman absorptio kykyyn vaikuttaa myös lämpötila ja suhteellinen kosteus, joka yleisesti muuttuu sisätiloissa vuodenaikojen mukaan. (RIL 2007, 155.)

Jälkikaiunta-ajalla T [s] tarkoitetaan aikaa, joka kuluu äänen äkillisestä lopettamisesta siihen, että äänenpainetaso on laskenut miljoonaosaa eli 60 dB. Jälkikaiunta-ajalla mitataan tilan akustisia ominaisuuksia ja niitä voidaan parantaa lisäämällä absorptioalaa, jolloin ääniallot eivät heijastu pinnoista niin kauaa. Jälkikaiunta-ajan yksikkö on sekunti ja se saadaan laskettua kaavan 12 mukaan.

$$T = 0,163 \times V/A \quad (12)$$

jossa	T	jälkikaiunta-aika	[s]
	V	tilan tilavuus	[m ³]
	A	kokonaisabsorptioala	[m ² -Sab]

(Siikanen 2014, 171.)

3.9 Resonaattorit

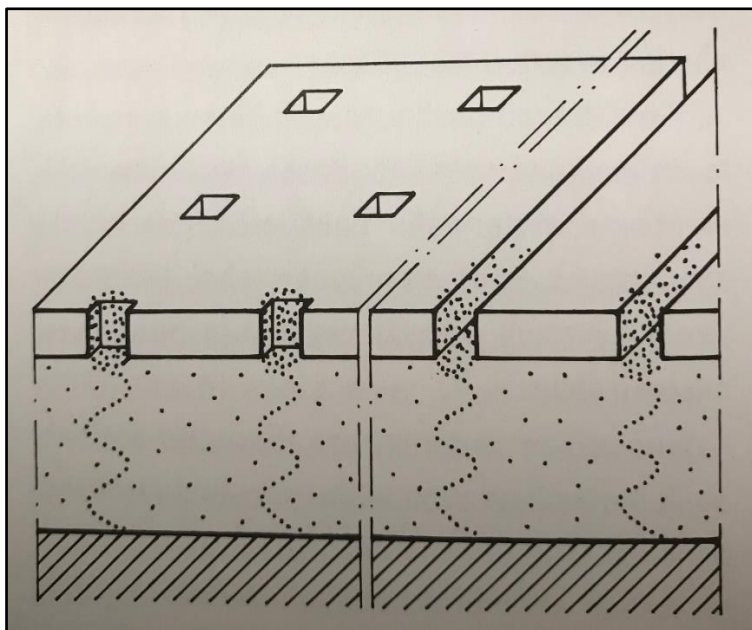
Levyresonaattori on yksinkertainen resonaattorirakenne. Se muodostuu kiinteästä levystä eristettävän rakenteen edessä niin, että levyn ja rakenteen väliin jää tiivis ilmatila. Rakenteen toimii jousi-massajärjestelmänä, ja sen teho perustuu ääniaaltojen värähtelemiseen levyn ja ilmatilan resonanssitaajuudella, eikä näin heijasta ääniaaltoja takaisin. Levyresonaattorin ominaistajuuteen vaikuttaa levyn massa ja ilmatilan väli ja ominaistajuuden f_0 saa laskettua kaavalla 13.

$$f_0 = 60\text{Hz}/m \times d \quad (13)$$

jossa	f_0	ominaistajuus	[Hz]
	m	levyn massa	[kg/m ²]
	d	ilmaväli	[mm]

(Siikanen 2014, 175 - 177.)

Toinen resonaattorirakenne on reikä- tai rakoresonaattori, jonka saa tehtyä rei'itetyillä levyillä tai jättämällä levyjen väliin pieni ilmarako (kuvio 2). Levyjen absorptiokyky perustuu myös jousi-massajärjestelmään, jossa massana toimii reiässä tai raossa oleva ilma ja jousena ilmavälissä oleva ilma. Reikien ja rakojen määrällä, koolla ja muodolla sekä levyn paksuudella ja ilmatilan välillä on merkitystä ominaistajuuteen ja absorptiosuhteeseen. Absorptiosuhdetta saadaan parannettua lisäämällä ilmatilaan huokoista materiaalia. (RIL 2007, 150.)



Kuvio 2. Reikä- ja rakoresonaattori (Siikanen 2014, 176)

3.10 Äänen kuuluvuus

Ihmisen kuuloaistimus syntyy, kun ilmanpaineen vaihtelut saavat korvan rumpukalvon värähtelemään. Tiheä värähtely on korkeaa ääntä ja harva värähtely matalaa ääntä. (Kylliäinen 2006.)

Ihmisen kuuloaisti toimii 16 - 20 000 Hz:n taajuudella, mutta herkimmillään se on 1 - 4 kHz:n taajuusalueella. Alle 20 Hz:n taajuudella olevia matalia ääniä kutsutaan infraääniksi ja korkeita yli 20 kHz:n ääniä ultraääniksi. Kuuloaistimuksen kannalta tärkein suure on äänenpaine, sillä se saa värähtelyn aikaan. Äänenpaineen tarvitsee olla vähintään 0 dB, jotta kuulokynnys ylittyy. Äänenpaineen tuottama kipukynnys sijaitsee noin 120 dB kohdalla, jolloin on vaarana saada kuulovaurioita. (Siikanen 2014, 142 - 143.)

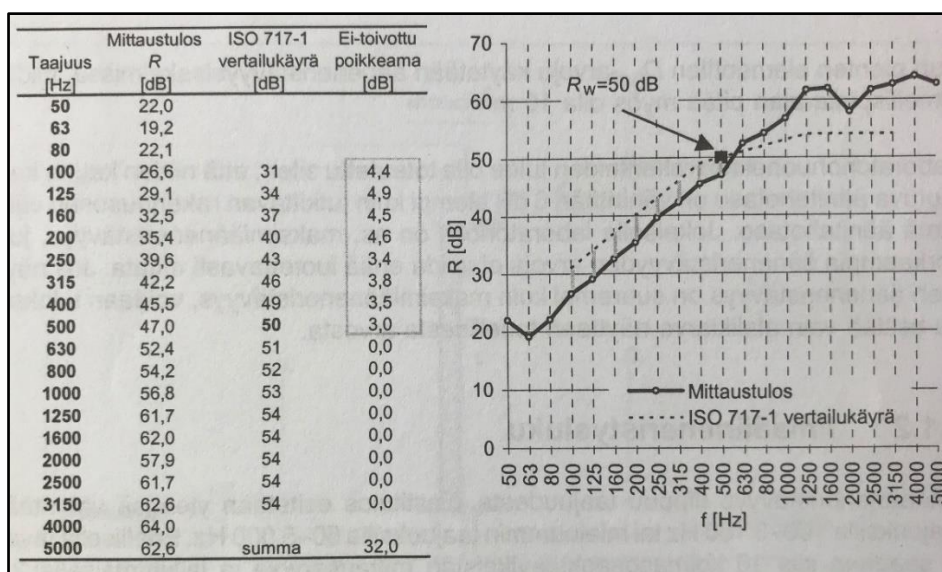
Äänen kuuluvuutta voidaan kuvata foneilla eli äänekkyytasoilla, tai soneilla eli elämyksellisellä äänekkyydellä. Ihmisen kuulokyky ei kulje täydellisesti logaritmisella asteikolla, ja sen vuoksi soniasteikko kuvaa kuulokykyä paremmin. (Siikanen 2014, 143 - 144.)

Ihmisen kuulotajunta on erilainen äänen voimakkuudesta eli intensiteetistä sekä äänenkorkeudesta riippuen. Siksi äänen mittaamista varten on standardisoitu neljä erilaista painotussuodatinta, A, B, C ja D. Käytännössä A-painotusta käytetään melkein aina, sillä se korreloi hyvin äänen häiritsevyyden kanssa. Mittarit ottavat painotuksien avulla hyvin ihmiskorvan ominaisuudet huomioon ja mittauksien tulokset annetaan yleensä desibeleissä. (Siikanen 2014, 144.)

3.11 Ilmaääneneristys ja ilmaääneneristysluku

Ilmaääneneristävyydellä tarkoitetaan materiaalin ominaisuutta eristää ilmassa kulkevia ääniaaltoja. Ilmaääneneristävyys on riippuvainen taajuuksista, ja yleisesti testaukset suoritetaan taajuusalueella 100 - 3 150 Hz, mutta satunnaisesti myös laajemmalla 50 - 5 000 Hz:n taajuusalueella. Standardin ISO 10140 mukaisilla ääneneristystestauksilla 100 - 3 150 Hz taajuusalueella saadaan 16 kolmasosaoktaavikaistan mittaustuloksia ja 50 - 5 000 Hz:n alueella 21, mutta sen muotoisina ilmanääneneristävyyssarvojen käyttö on hankalaa. Siksi on kehitetty yksinumeroinen esitystapa ilmaääneneristävyyssarvo R [dB], joka lasketaan mittaustuloksista standardin ISO 717-1 mukaan. Jos testaukset ovat tehty laboratorio-olosuhteissa ilmaääneneristävyyssarvo merkitään R_w ja kenttäolosuhteissa R'_w . Kenttäolosuhteissa mitatut arvot erotetaan pilkulla, sillä kenttäolosuhteissa kuten rakennuksissa, ääni ei siirry vain tutkittavan materiaalin kautta, vaan myös useita muita reittejä. (RIL 2007, 58 - 66.)

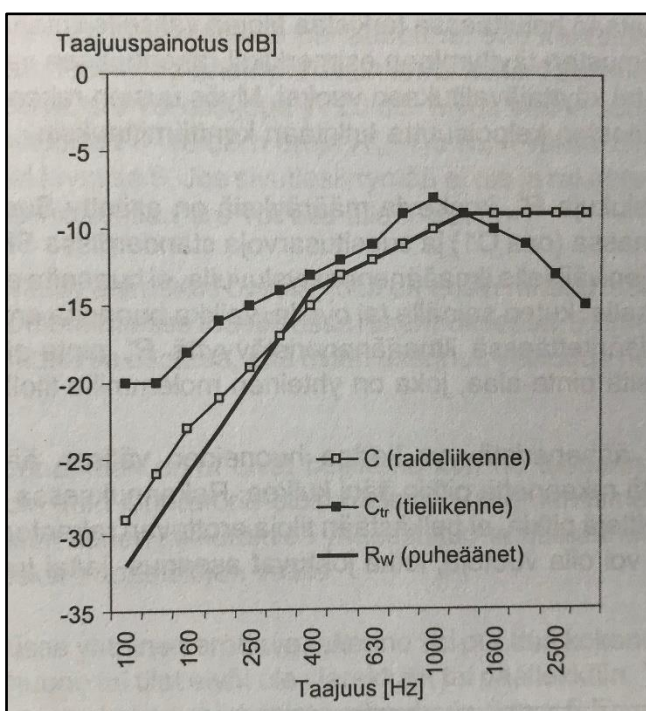
Ilmaääneneristävyyssarvo on testauksista saatavien arvojen painotettu keskiarvo. Kuvio 3 näkee standardissa ISO 717-1 määritetyn vertailukäyrän, jonka muoto perustuu puheäänessä oleviin taajuuksiin sekä korvan herkkyyteen. R_w arvon saa määritettyä vertailukäyrän avulla siten, että vertailukäyrää siirretään 1 dB:n portain kohtaan, jossa mitattujen ilmaääneneristävyyssarvojen ei-toivottujen poikkeamien summa verrattuna vertailukäyrään on enintään 32 dB. Ei-toivottu poikkeama tarkoittaa vertailukäyrää pienempiä ilmaääneneristävyyssarvojen erotusta. Kun vertailukäyrä on siirretty mahdollisimman korkeaan kohtaan, jossa ei-toivottujen poikkeamien ehto täyttyy, saa R_w arvon luettua kuvion 3 vertailukäyrästä 500 Hz:n kohdasta. (RIL 2007, 60.)



Kuvio 3. R_w :n vertailukäyrä ja esimerkki ilmaääneneristävyyssarvon määrittämisestä (RIL 2007, 60)

Ilmaääneneristysluku on määritetty kuvaamaan lukuarvona, kuinka hyvin kyseinen materiaali laskee puheääntä A-painotetussa äänitasossa. Mutta jos eristettävän äänen taajuusjakauma muuttuu huomattavasti normaalista puheen taajuusjakaumasta, antaa perinteinen R_w arvo vääristyneen kuvan ääneneristyskyvystä. Normaalin puhetaajuuteen verrattuna yleiset melulähteet, kuten liikennemelu ja rakennusten sisäiset melulähteet, kuten äänentoistolaitteet, sisältävät enemmän pientaajuisia melua. (RIL 2007, 62.)

Eri taajuuksien yleisten melulähteiden vuoksi, R_w arvoon voidaan tehdä korjauksia spektripainotustermeillä C ja C_{tr} . Spektripainotustermi C:n avulla saadaan määritettyä uusi lukuarvo asuntomelulle, sekä raide- ja lentoliikennemelulle ja C_{tr} :n avulla tieliikennemelulle A-painotetussa äänitasossa 100 - 3150 Hz taajuusvälillä. Spektripainotustermien laskentaa varten ohjeet löytyvät standardista ISO 717-1 ja kuviosta 4 näkee spektripainotustermien määrittämiseen käytettävät vertailukäyrät. (RIL 2007, 62.)



Kuvio 4. C ja C_{tr} spektripainotustermien, sekä R_w :n vertailukäyrät (RIL 2007, 63)

3.12 Massalaki

Rakenteet värähtelevät ääniaaltojen osuessa niihin. Mitä enemmän rakenne värähtelee, sitä enemmän ääniaallot jatkuvat rakenteen toisella puolella. Äänieristävyyden massalaki tarkoittaa raskaiden rakenteiden parempaa ääneneristävyyttä, sillä ne värähtelevät kevyitä rakenteita vähemmän.

Massalain mukaan on määritetty kaava 14, jonka perusteella yksinkertaisille rakenteille voidaan laskea suuntaa antava ilmasteneristävyyden taajuudella 500 Hz. Kaavan 14 mukaan laskettu ilmasteneristävyyden on luotettavampi, mitä raskaampi rakenne on kyseessä.

$$R = 20 \log (m \times f) - 49 \quad (14)$$

jossa	R	rakenteen ilmasteneristävyyden	[dB]
	m	rakenteen massa	[kg/m ²]
	f	äänentaajuus	[Hz]

(Lahtela 2004, 18.)

Raskaammilla rakenteilla joiden paino on yli 100 kg/m² ilmasteneristävyyden kasvaa kevyempiä rakenteita nopeammin. Massalain nyrkkisääntönä voidaan kuitenkin pitää, että massan kaksinkertaistuksessa ilmasteneristävyyden paranee 4 - 6 dB. (Lahtela 2004, 18.)

Myös standardissa EN 13986 on annettu kaava 15, puulevyjen ilmasteneristävyyden laskemiseksi taajuuksien 1 - 3 kHz:n välillä. Laskennan tulos on suuntaa antava ja pätee vain yli 5 kg/m² painoisille levyille.

$$R = 13 \times \log (m_A) + 14 \quad (15)$$

jossa	R	rakenteen ilmasteneristävyyden	[dB]
	m_A	rakenteen massa	[kg/m ²]

(SFS-EN 13986 + A1, 2015)

4 MELU JA ÄÄNENERISTYS

4.1 Ympäristö

Ympäristömelu on suurimmaksi osaksi liikenteen aiheuttamaa, ja Suomessa valtioneuvosto on antanut ohjearvot (993/1992) melutasoista, jotka ovat 55 dB (klo 07-22) ja 50 dB (klo 22-07) (THL 2019).

Myös Maailman terveysjärjestö WHO on suositellut, että liikennemelun vuorokauden ilta-painotetun keskiäänitason L_{den} tulisi alittaa 53 dB ja yöpainoitettun keskiäänitason L_n 45 dB, mutta EU:n ympäristömeludirektiivi (2002/49/EY) määrittää rajoiksi L_{den} 55 dB ja L_n 50 dB (THL 2019).

4.2 Puurakennukset

Puurakentamisessa ääneneristävyyteen vaikuttaa rakennusosien paino, kerroksellisuus, tiiviys ja kiinnitykset. Jos rakenne on yksinkertainen, ääneneristävyyteen vaikuttaa pääasiassa ainoastaan rakenteen tilavuuspaino, mutta kerrosrakenteissa vaikutusta on kerrosten etäisyyksillä ja materiaaleilla sekä kiinnityksillä. Monikerrosrakenteissa rakenteiden tiiveys korostuu, mutta ne ovat ainoita joilla saavutetaan riittävä ääneneristys puurakentamisessa. (Siikanen 2008, 153.)

Puurakennuksissa kuin muissakin rakennuksissa ääni siirtyy tiloista toiseen seinien, katon ja lattian läpi, mutta myös sivutiesiirtymien: ilmanvaihtokanavien, pattereiden ja muiden rakennusosien kautta. Jos rakennukselle tahdotaan hyvä ääneneristävyys, on sivutiesiirtymien merkitys suuri. (Siikanen 2008, 154.)

Rakennuksissa tulee myös huomioida äänenvaimennus, jota saadaan parannettua absorboivilla materiaaleilla. Absorboivat materiaalit lyhentävät kaiunta aikaa sekä imevät ääntä itseensä. Äänenvaimennuksen tavoitteena on vaimentaa yleisen äänentaajuuden alueita 125 - 4 000Hz. Absorboivat materiaalit ovat huokoisia, kuten lämmöneristeinä käytetyt villat ja eristeet, jotka toimivat hyvin ääntä vaimentavina rakenteina. (Siikanen 2008, 160-161.)

4.3 Junat

Euroopan yhteisöjen komission päätöksen 2006/66/EY mukaan on myös annettu raja-arvot raideliikenteen ympäristömelulle. Ympäristöön kuuluva melu jaetaan veturien, junayksikköjen ja matkustajavaunujen osalta seisonta-, liikkeellelähtö- ja ohiajomeluun ja tavara-

vaunujen osalta seisonta- ja ohiajomeluun. Apulaitteet, kuten ilmastointi, jäähdytysjärjestelmät ja kompressorit ovat vaikuttavia tekijöitä seisontamelun kannalta. Liikkeellelähtömelu on yhdistelmä apulaitteiden, vetolaitteiden, kuten dieselmoottorien ja jäähdytyspuhaltimien, sekä luistavien pyörien melusta. Ohiajomelun suurin tekijä on pyörän ja kiskon välinen kulkumelu, mutta alhaisilla nopeuksilla myös apulaitteet ja vetokoneistot vaikuttavat. Ympäristömelun mittaukset suoritetaan standardin ISO 3095:2001 mukaan. Taulukossa 1 on lueteltu ääriarvot päätöksen 2006/66/EY antamista raja-arvoista, sillä jokaiselle vaunu ja veturi tyypille on annettu omat raja-arvot. (Komission päätös 2006/66/EY, Liite 1, Luku 4,2.)

Taulukko 1. Raja-arvoja junien ympäristömelulle (Komission päätös 2006/66/EY, Liite 1, Luku 4,2)

Kulkuneuvo	seisontamelu, $L_{pAeq, T}$ [dB]	liikkeellelähtömelu, L_{pAFmax} [dB]	ohiajomelu, $L_{pAeq, Tp}$ [dB]
Tavaravaunu	65	-	82-87
Sähköveturit	75	82-85	85
Dieselveturit	75	86-89	85
EMU:t	68	82	81
DMU:t	73	83-85	82
Matkustajavaunut	65	-	80

Euroopan yhteisöjen komission päätöksen (2006/66/EY) mukaan, junien sisämelulle on annettu raja-arvot vain ohjaamoiden osalta taulukon 2 mukaan. Matkustusvaunuille raja-arvoja ei ole, vaan valmistajat saavat itse määrittellä omat tavoitteensa sisämelulle. Junien sisämelun mittaaminen suoritetaan standardin ISO 3381:2005 mukaisesti.

Taulukko 2. Juna ohjaamojen sisämelun raja-arvot (Komission päätös 2006/66/EY, Liite 1, Luku 4,2)

Ohjaamon sisämelu	raja-arvot, $L_{pAeq, T}$ [dB]
Seisontamelu (käytettäessä ulkoista varoitusäänimerkkiä sen suurimmalla äänenpaineella, joka ei kuitenkaan ylitä 125 dB(A):ta mitattuna 5 m:n päästä kulkuneuvon edestä 1,6 m:n korkeudella kiskon yläpinnasta)	95
Suurimmalla nopeudella, kun nopeus on alle 190 km/h (avoimessa maastossa ilman ulkoisia ja sisäisiä varoitusääniä)	78

Kansainvälisellä tasolla junayhtiöt ovat asettaneet itselleen vertailu arvot matkustajavaunujen sisämelulle 160 km/h nopeudella. (Muller & Möser 2013, 425.)

Taulukko 3. Juna yhtiöiden vertailuarvoja matkustajavaunujen sisämelulle (Muller & Möser 2013, 425)

1. luokassa	65 dB(A)
2. luokassa	68 dB(A)

4.4 Linja-autot

Vaneria ja erityisesti ääneneristysvaneria käytetään linja-autojen matkustamo- ja tavaratioloissa. Vanerilla haetaan hyvää äänen- ja lämmöneristävyyttä, sillä mitä paremmat ominaisuudet ovat, sitä parempi on matkustusmukavuus. Vanerin painolla on myös vaikutusta sen käytettävyyteen, sillä kevyemmät rakenteet nostavat kapasiteettia hyötykuorman osalta ja parantavat polttoainetaloutta. Juuri painon vuoksi vaneri on saanut kilpailijoita erilaisista komposiitti-, alumiini- ja korkkirakenteista. (Tapanainen, 2019.)

Linja-autoille eli autoluokille M2 ja M3 on EUROOPAN PARLAMENTIN JA NEUVOSTON ASETUS (EU) N:o 540/2014 mukaan säädetty ympäristön melutason raja-arvot, jotka myös tiukentuvat asteittain vuoteen 2026 mennessä taulukon 4 mukaan. (EUROOPAN PARLAMENTIN JA NEUVOSTON ASETUS (EU) N:o 540/2014, Liite 2, Luku 4,2.)

Taulukko 4. Linja-autojen raja-arvot ympäristömelulle (EUROOPAN PARLAMENTIN JA NEUVOSTON ASETUS (EU) N:o 540/2014, Liite 2, Luku 4,2)

luokka	luokan kuvaus	dB arvo (2016)	dB arvo (2022)	dB arvo (2026)
M2	massa < 2 500 kg	72	70	69
M2	2 500 kg < massa < 3 500 kg	74	72	71
M2	3 500 kg < massa < 5 000 kg, teho > 135 kW	75	73	72
M2	3 500 kg < massa < 5 000 kg, teho < 135 kW	75	74	72
M3	teho < 150 kW	76	74	73
M3	150 kW < teho < 250 kW	78	77	76
M3	teho > 250 kW	80	78	77

Junissa ja linja-autoissa ääneneristys luo mukavuutta matkustajille, mutta sisämelulle ei ole annettu raja-arvoja, vaan jokaisella valmistajalla on omat tavoitteensa. Kulkuneuvojen sisämelun tarkastelussa voidaan käyttää Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivin 2003/10/EY mukaisia terveyttä ja turvallisuutta koskevia vähimmäisvaatimuksia työntekijöiden suojelemiseksi. Direktiivi antaa meluallistukselle kolme arvoa standardin ISO 1999:1990 mukaan. (Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2003/10/EY, Artikla 3.)

Taulukko 5. Kulkuneuvojen sisämelun vähimmäisvaatimukset (Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2003/10/EY, Artikla 3)

äänenpaineen c-taajuuspainotettu huippuarvo	87 dB(A)
päivittäisen meluallistuksen taso	85 dB(A)
viikoittaisen meluallistuksen taso	80 dB(A)

5 ÄÄNENERISTYS- JA AKUSTIIKKALEVYT

5.1 Vaneri

Vaneri on kerroksellinen puutuote, joka valmistetaan syysuuntaan ristiin liimatuista viiluista (kuva 1). Suomessa vanerin valmistukseen käytetään koivua ja havua, joka on pääsääntöisesti kuusta. Vanerin valmistuksessa yleisimpänä liimana toimii fenoliformaldehydi. Levyt valmistetaan sorvatuista viiluista, ja levyissä niitä on pääsääntöisesti pariton määrä. Vanerin yleisimmät rakenteet ovat koivu-, havu- ja sekavaneri ja niitä valmistetaan eri rakenteilla niiden käyttökohteen mukaan. Levyjen luokittelu tapahtuu rakenteen mukaan ja laatu määräytyy pintaviilun laadun perusteella. (Varis 2017, 43-44.)



Kuva 1. Vanerin ristiinliimattu rakenne (Puuproffa 2015)

Vanerilla on puulevyistä parhaat lujuusominaisuudet ja sen puumaisen ulkonäön vuoksi sillä on hyvin laaja käyttöalue, jota voidaan lisätä entisestään erilaisilla pinnoitteilla (Puuproffa 2015).

5.1.1 Vanerin ääneneristysominaisuudet

Materiaalina puu johtaa ääntä pituussuunnassa poikkisuuntaa paremmin ja on tilavuuspainoltaan kevyttä. Siksi puun ääneneristävyys ominaisuudet ovat heikot, mutta äänenvaimennusominaisuudet puulla ovat kohtalaiset, joten sitä käytetään ääneneristys tarkoituksessa yleensä jonkinlaisena yhdistelmä rakenteena. (Siikanen 2008, 45.)

Puu heijastaa siihen kohdistuneesta äänitehosta noin 85%, joten se resonoi ääntä hyvin. Hyvän resonoimiskyvyn vuoksi puu toimii hyvin erilaisissa akustisissa resonaattorirakenteissa, joilla vaimennetaan ääntä. (Siikanen 2008, 45.)

Materiaalin tiheys vaikuttaa ilmaääneneristävyyteen ja suhteessa tilavuuspainoonsa suomalainen vaneri vaimentaa hyvin ääntä. Keskimääräiset ääneneristävyyden arvot suomalaiselle vanerille taajuusalueella 100 - 3 200 Hz on esitetty taulukossa 6. Ääneneristävyyttä voidaan parantaa erilaisilla eristemateriaaleilla tai rakenteilla. (Metsäteollisuus ry 2005, 25.)

Taulukko 6. Suomalainen vakiovanerin ääneneristävyys (Metsäteollisuus ry 2005, 25)

Nimellispaksuus [mm]	Ääneneristävyys [dB]
6,5	20,0
18	23,8
24	25,3

5.1.2 Ääneneristysvaneri

Ääneneristys tarkoituskeeseen valmistetuissa vanerilevyissä on kerrosrakente, sillä levyn väliin on lisätty ääntä eristävää materiaalia. Lisämateriaali on yleensä kumia, korkkia tai niiden yhdistelmää. Eri lisämateriaaleilla on erilainen vaikutus levyn ääneneristävyyden ja lujuusominaisuuksiin, joihin myös materiaalin, ja koko levyn paksuus vaikuttaa.



Kuva 2. Ääneneristysvaneri

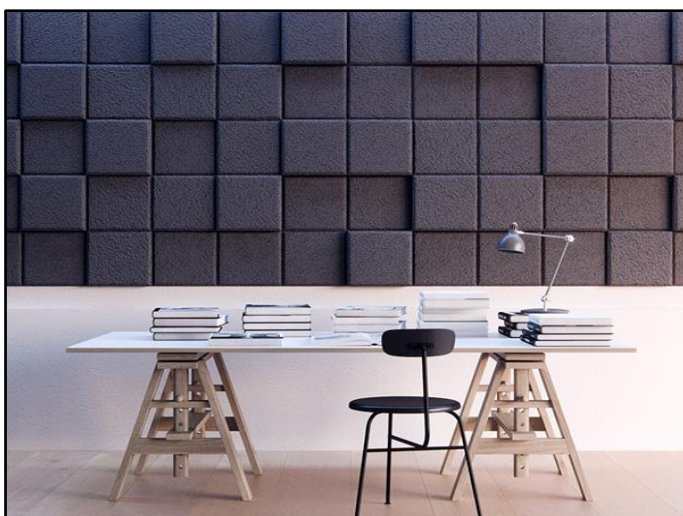
Koskisen valmistaa ääneneristysvaneria KoskiSound, joka on koivuvaneria, jonka väliin on lisätty kumikorkki lisämateriaali parantamaan ääneneristysominaisuuksia. Koska levyssä on käytetty kumikorkkia, se on kevyttä, mutta omaa silti paremman ääneneristävyyden ja hyvät lujuusominaisuudet. (Koskisen 2018.)

Taulukko 7. KoskiSoundin ääneneristävyys (Koskisen 2018)

Paksuus [mm]	Ääneneristävyys, R_w [dB]	Paino [kg/m ²]
12	29	8,2
15	32	11
18	33	13,1
21	34	14,5

5.2 Akustiikkalevyt

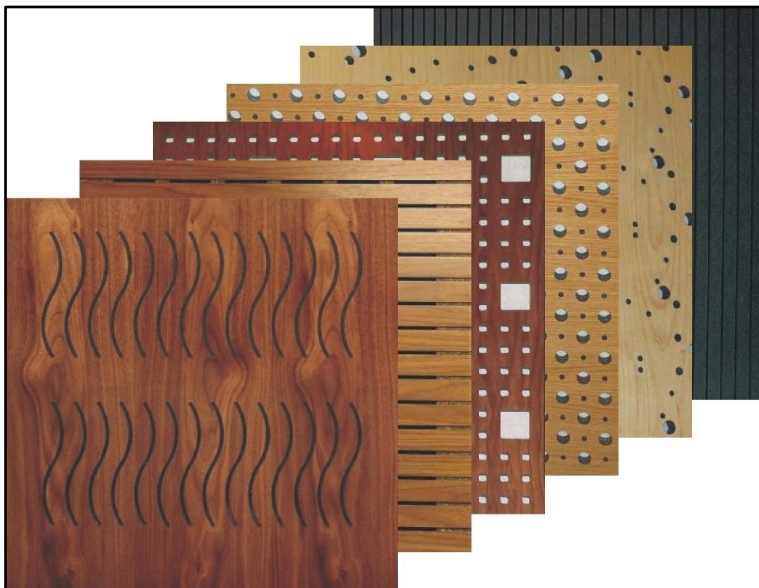
Akustiikan parantamiseen tarkoitettuja levyjä on hyvin monenlaisia ja niiden tarkoitus on vaimentaa äänitasoa, ja lyhentää jälkikaiunta-aikaa. Akustiikkalevyjä on kattoihin ja seiniin asennettavia sekä erilaisia sermejä ja elementtejä. Akustiikkalevyjä valmistetaan monista materiaaleista eri paksuuksilla ja rakenteilla, jotka vaikuttavat eri tavalla levyjen ominaisuuksiin. Useasti akustiikkalevyt ovat melko huokoisia, kuten villaa, jotta ne imevät hyvin ääntä. (Akustiikkapalvelut 2019a.)



Kuva 3. Puukuituvillasta valmistettuja BAUX akustiikka paneeleja (Akustiikkapalvelut 2019b)

Akustiikan parantamiseen käytettävät puulevyt ja vanerit ovat rei'itettyjä, sillä reiät toimivat resonaattoreina ja näin lisäävät tilan absorptiota. Rei'itetyt levyt toimivat ääntä imevinä ja sileät levyt ääntä heijastavina alueina. Tilan absorption kasvu tarkoittaa äänen pienempää kaiuntaa, eli onnistunut akustiikka vaikuttaa huomattavasti tilojen viihtyvyyteen. (ELAM 2019.)

Akustiikkalevyt asennetaan yleensä hieman irti asennus pinnasta, jotta väliin jää ilma, joka auttaa resonaattorien toimintaa. Akustiikkalevyjen taustalle voidaan myös laittaa hyvin ääntä imevää materiaalia, kuten huopaa tai villalevyä.



Kuva 4. Puisia ELAM akustiikkalevyjä (Puuinfo 2019)

5.3 Korkki

Korkki on materiaalina hyvin kevyttä, elastista ja vedenpitävää, sekä lisäksi se omaa hyvät äänen- ja lämmöneristys ominaisuudet. Korkki on myös paloturvallinen materiaali, sillä se palaa käytännössä ilman liekkiä.

Ympäristöystävällisenä ja uusiutuvana materiaalina korkki tarjoaa paljon erilaisia mahdollisuuksia. Korkista ja erilaisista yhdistelmistä voi valmistaa tuotteita hyvin monipuolisesti pullonkorkeista laadukkaisiin rakennusmateriaaleihin eri teollisuuksien aloille. Erilaiset korkki ja kumikorkki yhdistelmät ovat hyviä materiaaleja vanerin ääneneristysominaisuuksien parantamiseksi.

6 KOKEELLINEN OSA

6.1 Testaussuunnitelma

Suunnitelmana on valmistaa ääneneristysvaneria Koskisen koivuvaneritehtaalla ja testata niiden ääneneristys- ja lujuusominaisuuksia. Testattavat levyt tehtäisiin koossa 1 220 x 2 440 mm ja noin 18 mm paksuudella. Lisämateriaaleina käytettäisiin nykyisistä tuotannossa olevaa kumikorkkia, sekä kolmea uutta lisämateriaalia. Myös jokaisen lisämateriaalin liimauslujuus tutkitaan sekä määritetään tiheysprofiili jokaiselle testiversiolle.

Ääneneristysominaisuuksien testaaminen tehdään Eurofinsillä Espoossa, sillä ääneneristysmittauksien itsenäinen tekeminen standardien mukaisesti vaatisi liian suuren panostuksen. Testien tekeminen Eurofinsillä takaa luotettavat tulokset, sillä siellä on siihen soveltuvat tilat ja ammattimainen opastus testien suorittamiseen.

Lujuusominaisuuksien testaaminen tapahtuu Koskisen Oy:n laboratoriossa olevilla testauslaitteilla. Testaukset tehdään riittävällä otannalla standardien määrittämällä tavalla, ja tuloksia vertaillaan keskenään sekä normaalin koivuvanerin ilmoitettuihin arvoihin.

6.2 Testattavat levyt

Tähän opinnäytetyöhön valittiin testattavaksi nykyinen kumikorkki ja kolme erilaista lisämateriaalia tavallisen koivuvanerin rinnalle, joilla levyjen ääneneristysominaisuuksia saataisiin paremmaksi. Materiaaleista on olemassa erilaisia versioita, joissa kumin ja korkin suhde vaihtelee ja valitut lisämateriaalit ovat

- lisämateriaali A
- lisämateriaali B
- lisämateriaali C
- lisämateriaali D.

Kaikki lisämateriaalit ovat 4 mm paksuja ja niiden ominaisuudet näkyvät taulukossa 8. Lisämateriaalit parantavat vanerin ääneneristävyttä, lämmöneristävyttä ja paloturvallisuutta.

Taulukko 8. Lisämateriaalit ja niiden ominaisuuksia

Lisämateriaali	Tiheys [kg/m ³]	Lämmöneristys [W/m °K]	Häviökerroin [20 °C @ 1Hz]
A	580 - 680	11,2	0,12
B	620 - 740	7,5	0,13
C	1 150 - 1 250	6,7	0,20
D	200 - 250	21,7	0,09 (3mm)

Lisämateriaaleilla A, B ja C tehtiin testattavia levyjä kolmella erilaisella rakenteella:

- rakenne 1
- rakenne 2
- rakenne 3.

Lisämateriaalilla D tehtiin vain rakenteet 1 ja 2, sillä rakenteen 3 liimaus ei onnistunut tuotannollisista syistä.

Testattavien ääneneristysvanerien laskennalliset neliöpainot löytyvät taulukosta 9. Painot on laskettu lisämateriaalien ilmoitetuilla keskiarvo tiheyksillä, jotka löytyvät taulukosta 8 ja koivuvanerin osuuden tiheytenä on käytetty arvoa 700 kg/m³.

Taulukko 9. Testattavien levyjen neliöpainot

Rakenne/Lisämateriaali	Neliöpaino, [kg/m ²]			
	A	B	C	D
1	11,9	12,5	10,7	14,6
2	11,9	12,5	10,7	14,6
3	11,2	12,4	8,8	19,4

6.3 Testausmenetelmät

Ilmaääneneristystestaukset tehdään laboratoriossa standardin EN ISO 10140 mukaisesti ja ilmaääneneristysluku määritetään standardilla EN ISO 717-1. Laboratoriomittaukset suoritetaan asentamalla mitattava rakenne kahden huoneen välissä olevaan aukkoon (kuvio 5). Laboratorion lähetys- ja vastaanottohuoneen väliset sivutiesiirtymät on eristetty

mahdollisimman hyvin, jotta ääni siirtyisi ainoastaan tutkittavan rakenteen kautta. (RIL 2007, 58.)

Ilmaääneneristävyys R [dB] määritetään laboratoriossa menetelmällä, joka perustuu äänenpainetason mittaukseen kaavan 16 mukaan.

$$R = L_{p,1} - L_{p,2} + 10 \log_{10} S/A_2 \quad (16)$$

jossa	R	Ilmaääneneristävyys	[dB]
	$L_{p,1}$	lähetyshuoneen äänenpainetaso	[dB]
	$L_{p,2}$	vastaanottohuoneen äänenpainetaso	[dB]
	S	tutkittavan osan pinta-ala	[m ²]
	A_2	vastaanottohuoneen absorptioala	[m ² -Sab]

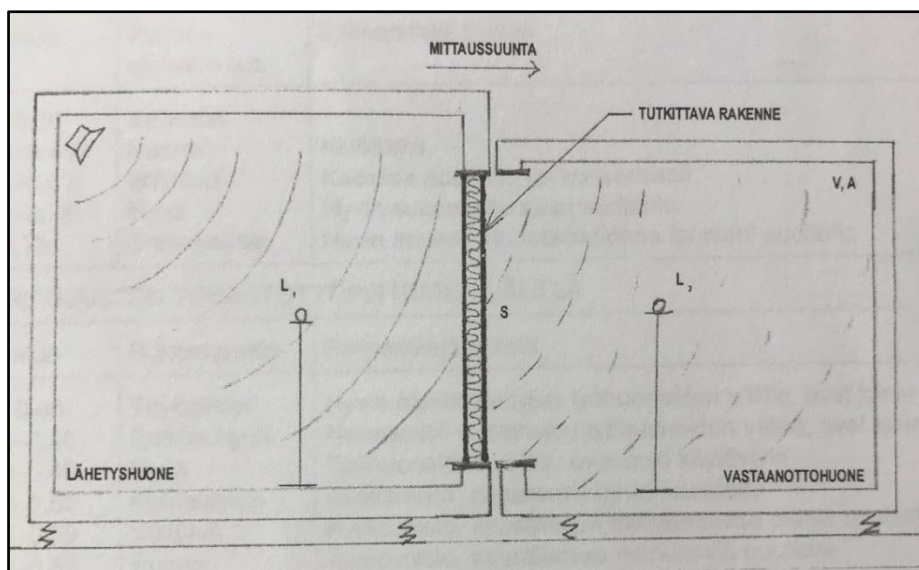
(RIL 2007, 59.)

Vastaanottohuoneen absorptioala A_2 [m² -Sab] saadaan laskettua kaavalla 17, kun tiedetään huoneen tilavuus V_2 ja jälkikaiunta-aika T_2 .

$$A_2 = 0,163 \times V_2/T_2 \quad (17)$$

jossa	V_2	huoneen tilavuus	[m ³]
	T_2	huoneen jälkikaiunta-aika	[s]

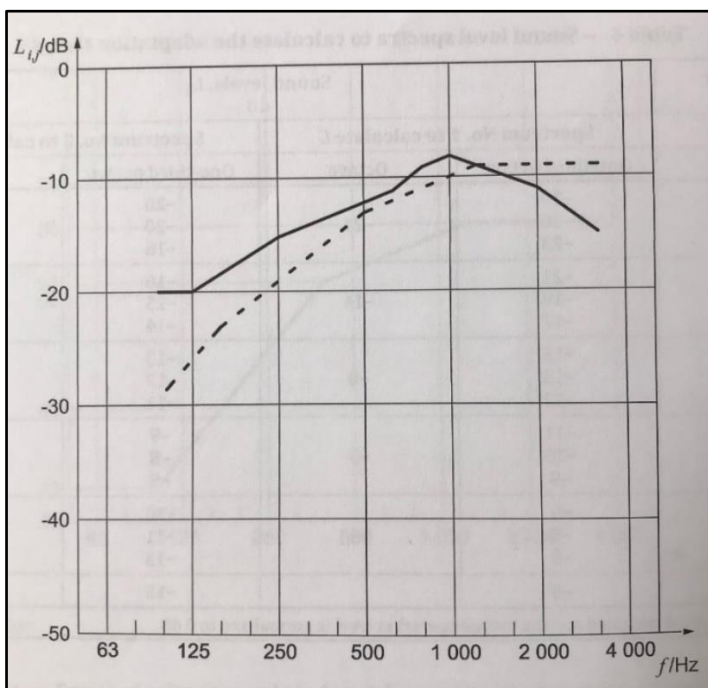
(RIL 2007, 59.)



Kuvio 5. Ilmaääneneristävyyden mittaus laboratoriossa (RIL 2007, 58)

Ääneneristävyyssarvot määritetään taajuuksien 50 - 3 150Hz välillä kolmasosaoktaavikaisesti, jolloin käytetään 16 mittaustulosta. (RIL 2007, 59.)

Mittausten suorittamisen jälkeen mittaustulosten, eli ilmaääneneristävyyden R arvojen perusteella määritetään ilmaääneneristävyyden luku R_w . R_w luku määritetään standardissa EN ISO 717-1 olevalla erityisellä vertailukäyrällä (kuvio 6), johon mitattua ilmaääneneristävyyden käyrää verrataan.



Kuvio 6. Vertailukäyrä R_w arvon määrittämiseksi (SFS-EN-ISO 717-1, 2013)

R_w luvun yksikkö on desibeli ja se kuvaa materiaalin tai rakenteen kykyä eristää ääntä A-painotetussa äänitasossa (RIL 2007, 60). Eri taajuuksien yleisten melulähteiden vuoksi, R_w arvoon voidaan tehdä korjauksia spektripainotustermeillä C ja C_{tr} , sillä kaikilla melulähteillä on omat yleiset taajuusjakaumansa. Spektripainotustermeillä C saadaan määriteltyä uusi lukuarvo asunto-, raide- ja lentoliikennemelulle ja C_{tr} :llä tieliikennemelulle. (RIL 2007, 62.) Lisää tietoa ilmaääneneristävyydestä on luvussa 3.11 Ilmaääneneristävyys ja ääneneristävyyden luku.

Lujuusominaisuudet testataan aineenkoestuskoneella standardien EN 310, EN 319 ja EN 320 mukaisesti. Kyseisissä standardeissa on kerrottu testausmenetelmät taivutuslujuuden, ruuvien vetolujuuden ja poikittaisvetolujuuden määrittämiseksi. EN 319 on tarkoitettu lastu- ja kuitulevyjen poikittaisvetolujuuden määrittämiseksi, mutta sitä sovellettiin ääneneristysvanerin testaamiseen, sillä lisämateriaalit ovat lujuuksiltaan puuta heikompaa.

Jokaisen lisämateriaalin ja koivuviulun välinen liimasauman lujuus selvitetään myös puukotestillä, joka tehdään Koskisen Oy:n määrittämällä tavalla.

Ääneneristävyys- ja lujuusominaisuuksien lisäksi kaikista valmiista levyistä otetaan tiheysprofiili, josta nähdään tarkasti levyn tiheys kerroksittain.

7 TESTAUKSIEN TEKEMINEN

Kaikki testaukset suoritettiin mahdollisimman tarkasti standardien vaatimalla tavalla ja testauksiin käytettiin laitteita, joiden toimintakunto oli tarkastettu. Laitteen olivat myös tarkasti kalibroituja, jotta saavutettiin tarkat ja luotettavat tulokset kaikista testauksista.

7.1 Ääneneristystestaukset

Ääneneristysominaisuudet testattiin Eurofinssillä, jossa oli siihen tarkoitukseen rakennettu tutkimustila. Tutkimustila sisälsi lähetys- ja vastaanottohuoneen, joiden sivutiesiirtymät oli minimoitu ja jotka oli täysin äänieristetty ulkopuoleltatulevista äänistä. Lähetyshuoneessa (kuva 5) oli kaiuttimet, jotka lähettivät vaaleanpunaiseksi kohinaksi kutsuttua ääntä, jonka taajuus vaihteli 50 - 5 000 Hz välillä. Vastaanottohuoneessa (kuva 6) oli mikrofoni, joka liikkui ympäri huonetta, jolloin saatiin tarkempi tulos ääneneristävydestä, kuin vain yhdestä kohdasta mitattuna.



Kuva 5. Lähetyshuone



Kuva 6. Vastaanotto huone

Testit suoritettiin ovikoon aukossa (kuva 7), johon levyt asennettiin listojen avulla kiinni. Kaikki sivut tiivistettiin villalla ja silikonilla (kuva 8), joilla varmistettiin, että vuotokohtia ei ole ja ääni siirtyy täysin levyjen läpi.



Kuva 7. Ovikoon aukko, johon levyt asennettiin



Kuva 8. Levy asennettuna ja tiivistettynä

Levyjen asennukset suoritettiin yhdessä Eurofinssin työntekijöiden kanssa, mutta mittauslaitteiden kalibroinnin ja virallisen testauksen suoritti Eurofinssin työntekijät. Mittauskohtia testin aikana oli 21 ja testaukset suoritettiin standardin EN ISO 10140 mukaisesti ja mittalaitteet antoivat suoraan standardin EN ISO 717-1 mukaan määritetyn ääneneristävyyden sekä mittauskäyrän.

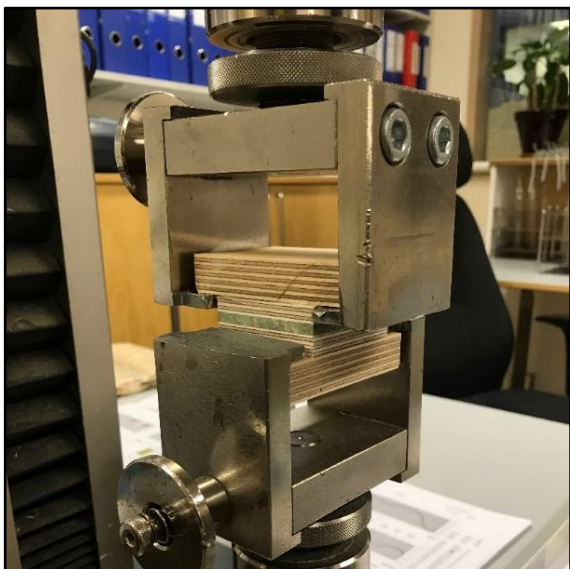
7.2 Lujuustestaukset

Lujuusominaisuuksien testaaminen suoritettiin Koskisen Oy:n lastulevytehtaan laboratoriossa olevalla ZWICK- aineenkoestuskoneella ja testauksissa on noudatettu standardin EN 310 määrittämiä mittaus tapoja. Taivutuslujuus mittaukset suoritettiin (kuva 9) pintavilunsiyden pituus- ja poikkisuunnassa.



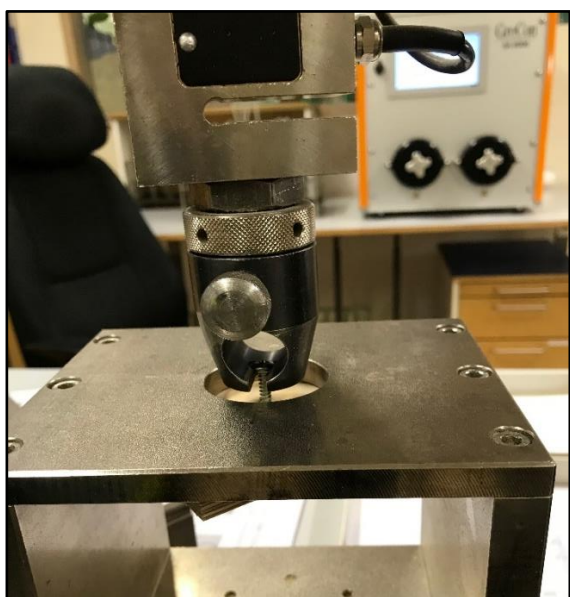
Kuva 9. Taivutuslujuustesti

Poikittaisvetolujuus testaukset (kuva 10) tehtiin kaikilla lisämateriaaleilla vain rakenteelle 1 ja testaukset suoritettiin standardin EN 319 mukaan. Normaalisti poikittaisvetolujuus testejä tehdään vain lastu- ja kuitulevyille, mutta tässä tapauksessa haluttiin selvittää liimasauman lujuus vanerin ja lisämateriaalin välillä myös koneellisesti. Liimasauman lujuus selvitettiin myös puukkotestillä, jossa levyt halkaistiin lisämateriaalin ja koivuviilun välistä puukolla.



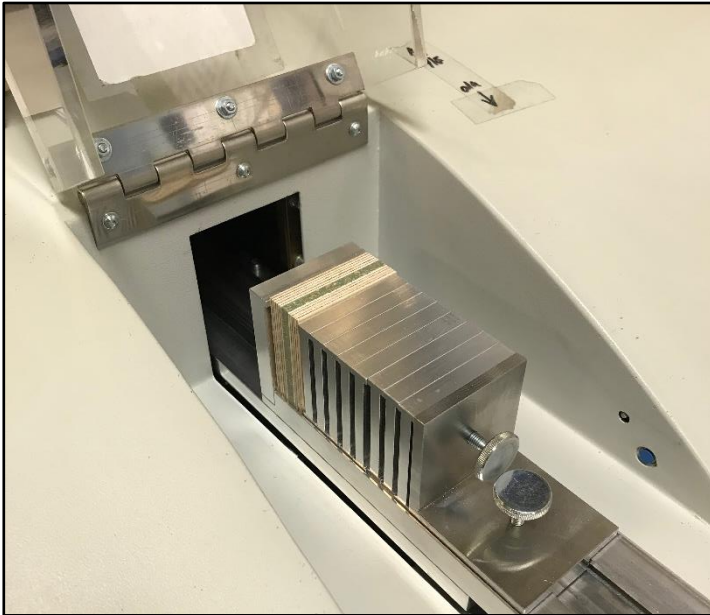
Kuva 10. Poikittaisvetolujuustesti

Ruuvinvetolujuudet testattiin standardin EN 320 määrittämällä tavalla levyjen pinnasta (kuva 11) ja sivusta. Testaukset tehtiin vain rakenteelle 1, sillä eri rakenteilla ei uskottu olevan suurta vaikutusta tuloksiin.



Kuva 21. Ruuvinvetolujuustesti

Tiheydet mitattiin laitteella (kuva 12), joka määrittää röntgenin avulla tiheyden koekappaleista. Kone antaa tarkan tiheysprofiilin, josta voi tarkastella eri kerrosten tiheyksiä.



Kuva 32. Tiheysprofiilitesti

8 TULOSTEN TARKASTELU

8.1 Ääneneristysominaisuudet

Standardin EN 13986 ja massalain määrittämien kaavojen mukaan lasketut ääneneristävytykset löytyvät alla olevista taulukoista 10 ja 11. Standardin määrittämän kaavan avulla lasketut arvot ovat hieman lähempänä todellisia, kuin massalain mukaan lasketut, mutta laskennalliset arvot jäävät silti kauas testatuista arvoista. Kaavoissa ei oteta huomioon mikä materiaali on kyseessä, joten arvot ovat testattuja arvoja heikompia, sillä kumi korkilla on tiheyteen nähden hyvä ääneneristävyys. Kaavat toimivat melko todenmukaisesti perus vanerilla.

Taulukko 10. Ääneneristävyysarvot EN 13986 mukaan

Rakenne/Lisämateriaali	Ääneneristävyysarvo, R_w [dB]			
	A	B	C	D
1	28,0	28,3	27,4	29,1
2	28,0	28,3	27,4	29,1
3	27,7	28,2	26,3	30,7

Taulukko 11. Ääneneristävyysarvot massalain mukaan

Rakenne/Lisämateriaali	Ääneneristävyysarvo, R_w [dB]			
	A	B	C	D
1	26,5	26,9	25,6	28,3
2	26,5	26,9	25,6	28,3
3	26,0	26,9	23,9	30,7

Ääneneristysvanereiden ääneneristävyys simuloitiin aluksi siihen tarkoitetulla ohjelmalla ja ohjelmalla saadut ääneneristävyysarvot (taulukko 12), antoivat odottaa parempia tuloksia virallisista mittauksista (taulukko 13), mitä lopulta saatiin. Simulointi antaa ääneneristävyysarvon vain R_w arvona ja siinä ei kerrota millä taajuudella simulointi ohjelma laskee tuloksen tai perustuuko laskenta kaavat joihinkin standardeihin.

Taulukko 12. Ääneneristävyys tulokset simuloinnissa

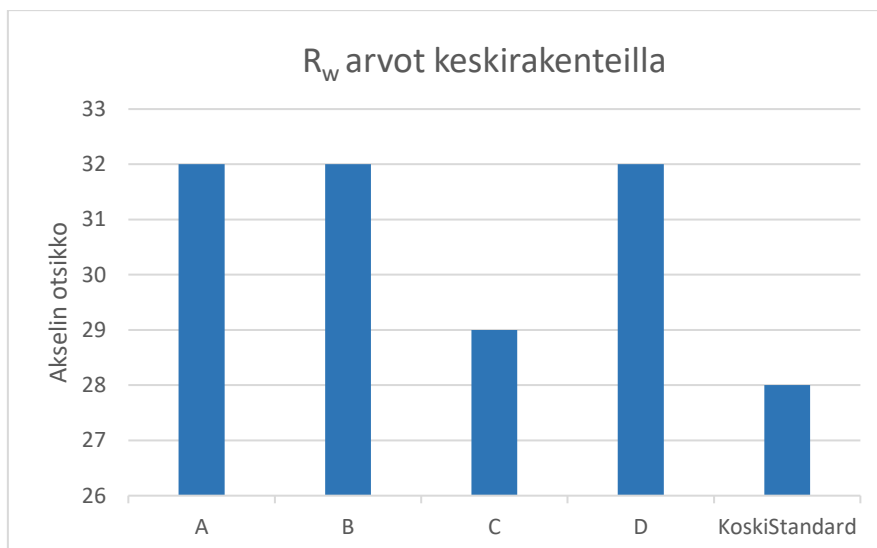
Rakenne/Lisämateriaali	Ääneneristävyysarvo, R_w [dB]			
	A	B	C	D
1	32	33	30	35
2	32	33	30	35
3	32	33	29	36

Taulukko 13. Ääneneristävyys tulokset testeissä

materiaali	rakenne	Ääneneristävyys [dB]		
		R_w	$R_w + C$	$R_w + C_{tr}$
A	1	32	31	29
A	2	31	30	29
A	3	33	33	30
B	1	32	31	29
C	1	29	28	27
D	1	32	32	30

Testauksiin otettiin vertailun vuoksi mukaan 18 mm perus koivuvaneri (KoskiStandard), jonka ääneneristävyys myös mitattiin. Perus vanerin ääneneristävyys oli vanerikäsikirjan antamia arvoja huomattavasti parempi. Vanerikäsikirjan arvot ovat annettu yleisesti suomalaiselle vanerille, joten tulokset ovat luultavasti havuvanerin arvoja ja havuvanerin pienemmän tiheyden vuoksi arvot olivat huonompia, kuin koivuvanerin mitattuarvo. Testien tulokset saatiin Eurofinssin raportoimana ja niissä näkyi määritettyjen arvojen lisäksi kaikki mitatut arvot, sekä graafi missä oli mitattu käyrä ja vertailu käyrä.

Keskirakenteisten eli normaalin ääneneristysvanerin rakenteen mukaiset testaus tulokset ja myös vertailuna olleen saman paksuisen perusvanerin arvot löytyvät pylväsdiagrammista (kuvio 7).



Kuvio 7. Testattu ääneneristävyys keskirakenteilla

8.2 Lujuusominaisuudet

Lujuusominaisuuksiltaan levyt olivat lisämateriaaleilla A, B ja C hyvin samaa luokkaa, mutta lisämateriaalilla D lujuudet olivat huomattavasti pienempiä.

Lisämateriaalilla D tehtyjen levyjen lujuusominaisuudet olivat hyvin heikkoja, koska niiden liimasauman lujuus oli hyvin huono. Koekappaleiden liimasaumat irtosivat myös taivutustesteissä, joten siksi taivutustuloksetkin ovat huomattavasti muihin materiaaleihin verrattuna heikompia. Lisämateriaalilla D onnistuttiin liimaamaan vain rakenteet 1 ja 2, sillä materiaalin kanssa jouduttiin käyttämään eri liimaa ja sen alkutartunta ei ollut riittävä rakenteen 3 liimaamiseen tuotannossa. Liimauksen lujuus oli kuitenkin riittävä ääneneristävyyden mittaamiseen.

Lujuusominaisuuksiltaan lisämateriaaleilla A, B ja C tehdyt levyt olivat hyvin saman vahvaisia ja riittäviä. Taivutuslujuudet (taulukko 14 ja 15) olivat kuitenkin kaikki Koskisen 18 mm koivuvaneriin asettamia raja-arvoja huonompia ja vertailun vuoksi taivutuslujuudet määritettiin myös 18 mm perus koivuvaneriin. Ääneneristys vanerin lujuuksia ei voi kuitenkaan suoraan verrata saman paksuiseen perus koivuvaneriin, sillä ääneneristys vanerissa oleva 4 mm lisämateriaali vaikuttaa tuloksiin huomattavasti. Siksi ääneneristys vanerin tuloksia verrataan lähinnä vain keskenään, sillä niille ei ole vielä määritetty tiettyjä raja-arvoja.

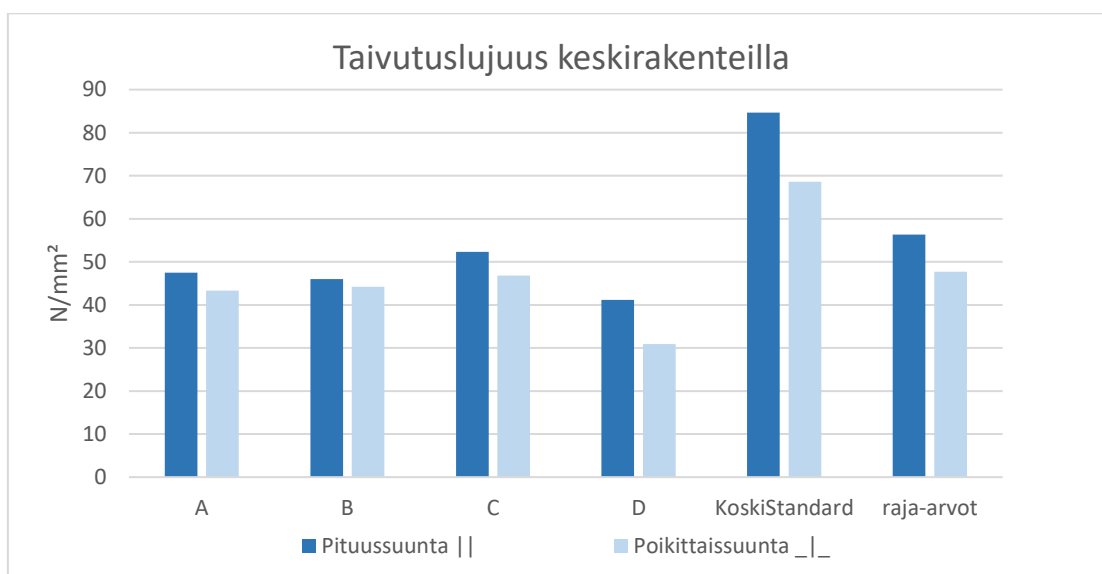
Taulukko 14. Taivutuslujuuksien keskiarvo tulokset syiden pituussuunnassa

		(pituussuunta)				
materiaali	rakenne	Taivutus lujuus [N / mm ²]	Kimmo moduuli [N / mm ²]	Taivutus murtomomentti [N mm/mm]	Max voima [N]	Taipuma [mm]
A	1	47,46	3 511	2 916	1 620	33,69
	2	45,06	3 886	2 816	1 566	26,80
	3	34,93	2 686	2 047	1 134	34,74
B	1	46,00	3 292	2 846	1 575	26,02
	2	53,43	4 176	3 137	1 744	30,25
	3	35,91	2 257	1 936	1 076	37,11
C	1	52,31	5 149	2 954	1 637	29,13
	2	65,08	6 387	3 546	1 961	28,90
	3	44,28	5 068	1 820	1 134	32,28
D	1	41,20	2 736	2 299	1 276	27,39
	2	27,27	2 495	1 411	782	25,03
	3	-	-	-	-	-

Taulukko 15. Taivutuslujuuksien keskiarvo tulokset syiden poikittaissuunnassa

		_ (poikittaissuunta)				
materiaali	rakenne	Taivutus lujuus [N / mm ²]	Kimmo moduuli [N / mm ²]	Taivutus murtomomentti [N mm/mm]	Max voima [N]	Taipuma [mm]
A	1	43,33	2 830	2 706	1 497	32,31
	2	44,06	3 409	2 766	1 530	29,23
	3	31,93	2 563	1 908	1 056	27,91
B	1	44,22	2 707	2 743	1 517	31,34
	2	45,80	3 178	2 714	1 505	27,30
	3	34,06	2 181	1 865	1 035	30,46
C	1	46,83	4 046	2 661	1 473	29,27
	2	68,07	6 137	3 708	2 054	31,93
	3	38,35	3 859	1 674	1 036	21,87
D	1	30,88	2 711	1 716	954	20,81
	2	29,04	2 763	1 496	829	27,80
	3	-	-	-	-	-

Keskirakenteisten levyjen taivutuslujuustuloksia voi vertailla pylväsdiagrammista (kuvio 8), johon on myös lisätty 18 mm perus koivuvaneri (KoskiStandard) ja Koskisen asettamat raja-arvot 18 mm koivuvanerille.



Kuvio 8. Taivutuslujuuksien keskiarvot keskirakenteilla

Ruuvien vetolujuudet (taulukko 16) olivat tasosta eli vanerin pinnasta vedettynä hyvin lähellä toisiaan, mutta sivusta vedettynä lisämateriaali C sai muita paremman tuloksen. Parempi tulos johtui siitä, että materiaali oli painunut liimauksen kuumapuristuksessa muita materiaaleja enemmän kasaan, jolloin kierteet olivat enemmän itse vanerissa kiinni.

Taulukko 16. Ruuvien vetolujuuksien keskiarvo tulokset

materiaali	rakenne	Ruuvien veto	
		Max voima tasosta, [N]	Max voima sivusta, [N]
A	1	2 536	261
B	1	2 872	349
C	1	2 796	910
D	1	2 874	262

Puukkotestin tulos määritetään puusta murtuma-% mukaan ja tässä tapauksessa myös lisämateriaalista murtuma-% mukaan. Puukkotestissä hyvän tuloksen (taulukko 17) sai lisämateriaalit A, B ja C, mutta lisämateriaalin D tulos ei ollut riittävä.

Taulukko 17. Puukkotestin tulos

	Puukkotesti
materiaali	Puusta-/lisämateriaalista murtuma-%
A	90
B	70
C	100
D	5

Poikittaisvetolujuuksille ei ollut määritetty arvoja, joihin tuloksia olisi voinut vertailla, mutta keskenään tuloksia pystyi vertailemaan. Taulukossa 18 olevat tulokset antoivat vain varmistuksen puukkotestin tuloksiin, joissa todettiin lisämateriaalin D huono liimautuminen. Muut materiaalit olivat liimautuneet hyvin ja ne antoivatkin puolta paremmat lujuudet testeissä.

Taulukko 18. Poikittaisvetolujuuksien keskiarvo tulokset

materiaali	rakenne	Poikittaisvetolujuus, [N/mm ²]	F max, [N]
A	1	0,782	1 956
B	1	0,693	1 733
C	1	0,795	1 987
D	1	0,389	972

Levyjen tiheyksissä (taulukko 19) ei materiaalista riippumatta suuria muutoksia ollut ja se selittääkin ääneneristävyyksissä olevat odotettua pienemmät erot, sillä ääneneristävyyden kannalta painolla on suuri merkitys.

Taulukko 19. Levyjen tiheydet

materiaali	rakenne	Tiheys, [kg/m ³]
A	1	666
	2	668
	3	722
B	1	688
	2	741
	3	760
C	1	617
	2	683
	3	650
D	1	790
	2	782
	3	-

9 KEHITYSEHDOTUKSET

Verrattuna nykyiseen KoskiSound ääneneristysvaneriin, saimme parannettua ääneneristävyyttä kahdella uudella versiolla, kun kumikorkki materiaali vaihdettiin nykyistä materiaalia hieman raskaampaan. Materiaaleissa kumin ja korkin suhde olivat hieman erilaiset nykyiseen verrattuna. Parannus oli kuitenkin odotettua vähäisempi, joten paremman ääneneristävyyden saavuttamiseksi on lisämateriaalin oltava huomattavasti raskaampaa kuin testatut materiaalit.

Ääneneristävyyden parantamiseksi voisi kokeilla erilaisia raskaampia materiaaleja, kuten kumin ja täyteaineiden seoksia, sillä niitä on saatavana paljon erilaisia ja eri painoisia versioita. Tuotetta kehittäessä on kuitenkin pidettävä mielessä, mikä on tuotannon kannalta mahdollista, sillä tuotteen valmistus on onnistuttava isossa tuotantomittakaavassa.

Myös erilaisten lisämateriaalien liimauksesta saattaa aiheutua haasteita, sillä vanerin tuotannossa käytetty fenoliformaldehydihartsia ei sovellu kaikille materiaaleille. Koskisella on kuitenkin vanerinpinnoituslinja, jossa käytetään sulateliimaa, mutta sekään ei sovellu kaikille materiaaleille. Erilaisten materiaalien vuoksi joudutaan käyttämään erilaisia liimoja ja siksi välillä alihankkijaa levyjen liimauksessa, sillä tuotantolinjoilla liimojen vaihto ei ole aina mahdollista.

10 YHTEENVETO

Työn alussa perehdyttiin tarkasti ääneen ja sen ominaisuuksiin, joista tärkeimmiksi tämän työn kannalta muodostui äänentaajuuden ja ääneneristämisen ymmärtäminen, sekä ääneneristysluvun määrittäminen. Ääneneristävyden parantamiseksi on tärkeää ymmärtää miten ääniaallot ovat erilaisia eri taajuuksilla ja siksi ääneneristävyys on eri taajuuksilla erilainen. Ääneneristysluku on painotettu keskiarvo, joka määritetään standardin ISO 717-4 mukaan ja se antaa materiaalille ja rakenteelle ääneneristävyysarvon desibeleissä. Ääneneristykseällä tarkoitetaan ääniaaltojen pääsyn estämistä, jonkin rakenteen läpi. Tämä saattaa usein sekoittaa äänenvaimennuksen kanssa, jolla tarkoitetaan yleensä tilassa olevan äänitason laskua. Ääneneristys vaikuttaa tilojen äänitasoihin ulkopuolisia ääniä vastaan, mutta tilasta kuuluvia ääniä yritetään yleensä vaimentaa hyvin ääntä imevillä akustiikka levyillä, jotka parantavat tilan absorptiota.

Ääneneristysvanerin suurimmat käyttökohteet ovat junissa ja linja-autoissa, joten keveys olisi tärkeä ominaisuus. Tämän vuoksi työssä yritettiin parantaa koivuvanerin ääneneristävyttä suunnilleen saman painoisilla kumikorkki materiaaleilla, kuin koivu itse materiaalina. Käyttökohteiden kannalta levyjen toivottaisiin olevan vieläkin kevyempi, mutta se ei tule onnistumaan, kun ääneneristävyttä parannetaan. Työssä piti ääneneristävyden parantamisen lisäksi pystyä pitämään levyjen lujuudet riittävällä tasolla, niiden käyttökohteiden vaatimuksien vuoksi. Tärkeimmäksi lujuuskriteeriksi muodostui lisämateriaalin liimauksen lujuus, joka vaikuttaa huomattavasti levyjen muihin lujuusarvoihin.

Ääneneristävyden parantamiseksi suunniteltiin nykyisen KoskiSound ääneneristysvanerin lisäksi kolme uutta versiota. Versioissa oli käytetty erilaisia kumikorkki materiaaleja, sekä rakenteita. Valmiiden levyjen ääneneristävydet testattiin Eurofinssillä, sillä itsenäinen testaaminen standardien mukaisesti olisi ollut liian haastava prosessi. Mittauksien perusteella pystyimme parantamaan ääneneristävyttä nykyiseen verrattuna, mutta parannus oli odotettua heikompi.

Työssä saatiin selville, että vanerin ääneneristävyden parantaminen vaatii huomattavasti raskaampia materiaaleja, kuin käytetyt kumikorkki yhdistelmät olivat. Mahdollisia materiaaleja joilla ääneneristävyttä saataisiin paremmaksi ovat erilaiset kumit, mutta niiden liimaus on kumikorkkia haastavampaa.

Tuotteen kehittämistä tulisi jatkaa, sillä ääneneristävyden parantaminen on mahdollista ja tämän työn antamien tietojen avulla kehitystyölle on olemassa hyvä perusta. Ääneneristysvanerin käytön luulisi myös lisääntyvän, sillä sen suurimmat käyttökohteet ovat julkisissa liikennevälineissä, jotka kehittyvät ja lisääntyvät jatkuvasti.

LÄHTEET

Painetut lähteet

Metsäteollisuus ry 2005. Vanerikäsikirja. Lahti: Kirjapaino Markprint Oy.

Varis, R. 2017. Puulevyteollisuus. Porvoo: Bookwell Oy.

Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry 2007. RIL 243-1-2007: Rakennusten akustinen suunnittelu: akustiikan perusteet. Helsinki: Hakapaino.

Siikanen, U. 2008. Puurakentaminen. Helsinki: Rakennustieto Oy.

Siikanen, U. 2014. Rakennusfysiikka: Perusteet ja sovelluksia. Helsinki: Rakennustieto Oy.

Elektroniset lähteet

Akustiikkapalvelut 2019a. Akustiikkatuotteet: Akustiikkalevyt [viitattu 12.8.2019].

Saatavissa: <https://www.akustiikkapalvelut.fi/akustiikkatuotteet/akustiikkalevyt>

Akustiikkapalvelut 2019b. Tuotemerkit: Baux: Pixel [viitattu 12.8.2019]. Saatavissa:

<https://www.akustiikkapalvelut.fi/tuotemerkit/baux/3d-pixel>

ELAM 2019. Tuotteet: Sisustuslevyt: Akustiikkarei'itykset [viitattu 29.8.2019]. Saatavissa:

<http://www.elam.fi/index.php/fi/tuotteet/sisustuslevyt/akustiikkareiitykset#edit-s-akustiikkareikamallit-341#388>

Muller, G. & Möser, M. 2013. Handbook of engineering acoustics [viitattu 25.7.2019]. Saa-

tavissa: [https://books.google.fi/books?id=1cX4Ag-](https://books.google.fi/books?id=1cX4Ag-fUaSkC&pg=PA425&lpg=PA425&dq=airborne+insulation+in+trains&source=bl&ots=XviR-kaw1nB&sig=ACfU3U1wJGIVv7R1qkY11Rcqnm-eB_wcPA&hl=fi&sa=X&ved=2ahU-KEwjeipakzdHiAhXGAXAIHT51DaoQ6AEwDHoECAkQAQ#v=onepage&q=airborne%20insulation%20in%20trains&f=false)

[fUaSkC&pg=PA425&lpg=PA425&dq=airborne+insulation+in+trains&source=bl&ots=XviR-](https://books.google.fi/books?id=1cX4Ag-fUaSkC&pg=PA425&lpg=PA425&dq=airborne+insulation+in+trains&source=bl&ots=XviR-kaw1nB&sig=ACfU3U1wJGIVv7R1qkY11Rcqnm-eB_wcPA&hl=fi&sa=X&ved=2ahU-KEwjeipakzdHiAhXGAXAIHT51DaoQ6AEwDHoECAkQAQ#v=onepage&q=airborne%20insulation%20in%20trains&f=false)

[kaw1nB&sig=ACfU3U1wJGIVv7R1qkY11Rcqnm-eB_wcPA&hl=fi&sa=X&ved=2ahU-](https://books.google.fi/books?id=1cX4Ag-fUaSkC&pg=PA425&lpg=PA425&dq=airborne+insulation+in+trains&source=bl&ots=XviR-kaw1nB&sig=ACfU3U1wJGIVv7R1qkY11Rcqnm-eB_wcPA&hl=fi&sa=X&ved=2ahU-KEwjeipakzdHiAhXGAXAIHT51DaoQ6AEwDHoECAkQAQ#v=onepage&q=airborne%20insulation%20in%20trains&f=false)

[KEwjeipakzdHiAhXGAXAIHT51DaoQ6AEwDHoECAkQAQ#v=onepage&q=air-](https://books.google.fi/books?id=1cX4Ag-fUaSkC&pg=PA425&lpg=PA425&dq=airborne+insulation+in+trains&source=bl&ots=XviR-kaw1nB&sig=ACfU3U1wJGIVv7R1qkY11Rcqnm-eB_wcPA&hl=fi&sa=X&ved=2ahU-KEwjeipakzdHiAhXGAXAIHT51DaoQ6AEwDHoECAkQAQ#v=onepage&q=airborne%20insulation%20in%20trains&f=false)

[borne%20insulation%20in%20trains&f=false](https://books.google.fi/books?id=1cX4Ag-fUaSkC&pg=PA425&lpg=PA425&dq=airborne+insulation+in+trains&source=bl&ots=XviR-kaw1nB&sig=ACfU3U1wJGIVv7R1qkY11Rcqnm-eB_wcPA&hl=fi&sa=X&ved=2ahU-KEwjeipakzdHiAhXGAXAIHT51DaoQ6AEwDHoECAkQAQ#v=onepage&q=airborne%20insulation%20in%20trains&f=false)

Koskisen 2018. [viitattu 21.6.2019]. Saatavissa: [https://www.koskisen.fi/file/koski-](https://www.koskisen.fi/file/koski-sound/?download)

[sound/?download](https://www.koskisen.fi/file/koski-sound/?download)

Koskisen 2019. [viitattu 3.6.2019]. Saatavissa: <https://www.koskisen.fi/>

Kylliäinen, M. 2006. Talonrakentamisen akustiikka [viitattu 6.7.2019]. Saatavissa:

[https://tutcris.tut.fi/portal/fi/publications/talonrakentamisen-akustiikka\(471f1108-ba98-4e6f-89af-7b91f3c1c527\).html](https://tutcris.tut.fi/portal/fi/publications/talonrakentamisen-akustiikka(471f1108-ba98-4e6f-89af-7b91f3c1c527).html)

Puuinfo 2019. Tuotteet: Elam sisustuslevyt [viitattu 27.8.2019]. Saatavissa:
<https://staging.puuinfo.fi/tuote/elam-sisustuslevyt>

Puuproffa 2015. Puujalosteet: Vanerit [viitattu 18.6.2019]. Saatavissa:
https://www.puuproffa.fi/PuuProffa_2012/fi/puujalosteet/vanerit

Lahtela, T. 2004. Ääneneristys puutalossa. Helsinki: Wood Focus Oy. [viitattu 11.6.2019].
Saatavissa: <https://www.puuinfo.fi/sites/default/files/content/rakentaminen/suunnitteluohjeet/aaneneristys-puutalossa/koko-ohje.pdf>

Terveysten ja hyvinvoinnin laitos 2019. Ympäristöterveys: Melu [viitattu 27.7.2019].
Saatavissa: <https://thl.fi/fi/web/ymparistoterveys/melu>

Suulliset lähteet

Tapanainen, J. 2019. Design and R&D Manager. Carrus Delta Oy. Haastattelu 26.6.2019.

Muut lähteet

Komission päätös 2006/66/EY. Euroopan laajuisen tavanomaisen rautatiejärjestelmän osajärjestelmää ”liikkuva kalusto - melu” koskevasta yhteentoimivuuden teknisestä eritelmästä.

EUROOPAN PARLAMENTIN JA NEUVOSTON ASETUS (EU) N:o 540/2014. Moottoriajoneuvojen ja varaosaäänenvaimennusjärjestelmien melutasosta, direktiivin 2007/46/EY muuttamisesta ja direktiivin 70/157/ETY kumoamisesta.

Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2003/10/EY. Terveyttä ja turvallisuutta koskevista vähimmäisvaatimuksista työntekijöiden suojelemiseksi altistumiselta fyysikaalisista tekijöistä (melu) aiheutuville riskeille (seitsemästoista direktiivin 89/391/ETY 16 artiklan 1 kohdassa tarkoitettu erityisdirektiivi).

SFS-EN 13986 + A1, 2015. Puulevyt rakennuskäytössä. Ominaisuudet, vaatimustenmukaisuuden arviointi ja merkintä. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.

SFS-EN ISO 717-1, 2013. Acoustics. Rating of sound insulation in buildings and of building elements. Part 1: Airborne sound insulation. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.