

Tuija Kinnunen-Hummastenniemi

# **Tilaelementtirakenteisen puukerrostalon välipohjan ääneneristävyyden tutkiminen**

Insinööri (AMK)

Rakennus-  
ja yhdyskuntatekniikka

Kevät 2021



**KAMK • University  
of Applied Sciences**

## Tiivistelmä

**Tekijä(t):** Kinnunen-Hummastenniemi Tuija

**Työn nimi:** Tilaelementtirakenteisen puukerrostalon välipohjan ääneneristävyyden tutkiminen

**Tutkintonimike:** Insinööri (AMK), rakennus- ja yhdyskuntatekniikka

**Asiasanat:** ääneneristys, akustiikka, välipohjat, puukerrostalot

Opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää ja vertailla erilaisten välipohjarakenteiden vaikutusta ääneneristykseen tilaelementtirakenteisessa puukerrostalossa.

Työssä suunniteltiin ja rakennettiin testimoduuleita, joihin suunniteltiin erilaisia välipohjarakenteita. Testimoduuleissa suoritettiin ilmaääneneristävyys- ja askelääneneristävyyksmittaukset standardin ISO 16283-1 ja 2 mukaisesti. Mittaustuloksia verrattiin ympäristöministeriön asetuksessa rakennuksen ääniympäristöstä annettuihin vaatimuksiin ja vertailurakenteeseen. Vertailurakenteena käytettiin välipohjarakennetta, joka oli mitattu valmiissa rakennuksessa ja mittausten tulokset täyttivät viranomaismääräykset. Vertailurakenteesta suoritettiin myös mittaukset testimoduulissa.

Testimoduuleissa mitatuista rakenteista kolme täytti ympäristöministeriön ääneneristävyydelle asettamat vaatimukset. Vertailurakenteen mittaustulokset testimoduulissa mitattuna olivat heikommat kuin valmiissa rakennuksessa mitatut tulokset.

Tämän tutkimuksen perusteella kolmea rakennetta voitaisiin käyttää asuinrakennuksen huoneistojen välisenä välipohjarakenteena. Vertailurakenteen tulosten vertailun perusteella voidaan kuitenkin olettaa, että testimoduulissa mitattujen rakenteiden ääneneristävyys valmiissa rakenteessa olisi todennäköisesti testimoduuleissa saatuja mittaustuloksia parempi.

## **Abstract**

**Author(s):** Kinnunen-Hummastenniemi Tuija

**Title of the Publication:** Investigating Soundproofing of Intermediate Floors in Module Structured Wooden Apartment Block

**Degree Title:** Bachelor of Engineering, Construction and Civil Engineering

**Keywords:** soundproofing, acoustics, intermediate floors, wooden apartment blocks

The aim of this thesis was to find out and compare the influence of different intermediate floor structures on sound proofing in module structured wooden apartment block.

The test modules were designed and built, and for these test modules different intermediate floor structures were designed and constructed. Air borne soundproofing and impact sound proofing measurements were made for intermediate floors in test modules. Measurements were made according to the standard ISO 16283-1 and 16283- 2 and the results obtained were compared to regulations and comparative structure. An intermediate floor structure which was used as a comparison structure, had already been measured in a finished building. This comparison structure was the first structure measured in test modules.

The measurement results of the comparison structure were worse, when measured from test modules than measured from finished building. It can be supposed that the measured sound insulation of intermediate floor structures is probably better when measured from a finished building than measured from test modules, according to this study. Three of the designed intermediate floor structures met the sound insulation requirements given in the regulations. These three, intermediate floor structures can be used as separating structure between apartments.

## Sisällys

1	Johdanto .....	1
2	Toimeksiantajan esittely .....	2
3	Ääneneristystä koskevat säädökset ja ohjeet .....	3
3.1	Maankäyttö- ja rakennuslaki .....	3
3.2	Ympäristöministeriön asetus rakennuksen ääniympäristöstä .....	3
4	Akustinen suunnittelu .....	5
4.1	Huoneakustiikka .....	6
4.2	Meluntorjunta .....	6
4.3	Tärinäeristys .....	7
4.4	Ääneneristys .....	7
5	Ilmaääneneristys .....	9
5.1	Yksinkertaisten rakenteiden ilmaääneneristävyys .....	10
5.1.1	Resonanssi-ilmiö .....	11
5.1.2	Koinsidenssi-ilmiö .....	11
5.2	Kaksinkertaisten rakenteiden ääneneristävyys .....	12
6	Sivutiesiirtymät .....	15
7	Askelääneneristys .....	17
7.1	Kelluvat pintalaatat .....	18
7.2	Alakatot .....	18
7.3	Absorptiomateriaali välipohjan ilmatilassa .....	18
8	Testimoduulien ääneneristävyys .....	19
8.1	Mittaukseen käytettävän rakennuksen suunnittelu .....	19
8.2	Tutkittavien välipohjarakenteiden suunnittelu .....	20
8.3	Mittauksen kulku ja mittausmenetelmät .....	21
8.3.1	Ilmaääneneristävyyden mittaus .....	23
8.3.2	Askelääneneristävyyden mittaus .....	25
8.4	Tulosten tarkastelu .....	25

9	Pohdinta.....	32
	Lähteet.....	34

## Määritelmiä

Seuraavassa on esitetty muutamia tähän työhön liittyviä tärkeitä määritelmiä.

### Askelääni

Runkoääni, joka kuuluu muihin tiloihin ja jonka aiheuttaa esim. esineiden siirtely tai kulkeminen lattialla tai portaissa (1).

Askeläänitasoluku  $L_{n,w}$  (dB) laboratoriomittaus tai  $L'_{n,w}$  (dB) mittaus rakennuksessa

Rakenteiden ja tilojen välistä askelääneneristävyyttä kuvaava luku, joka saadaan vertaamalla taajuuskaistoittain mitattua ja normalisoitua askeläänenpainetasoa standardoituun vertailukäyrään (1).

### Ilmaaääni

Äänilähteestä ilman välityksellä ympäristöön leviävä ääni (1).

Ilmaääneneristysluku  $R_w$  (dB) laboratoriomittaus tai  $R'W$  (dB) mittaus rakennuksessa

Rakenteiden ja tilojen välistä ilmaääneneristävyyttä kuvaava luku, joka saadaan vertaamalla taajuuskaistoittain mitattua ilmaääneneristävyyttä standardoituun vertailukäyrään (1).

### Jälkikaiunta-aika $T$ (s)

Aika, jona äänenpainetaso äänilähteen vaiettua alenee 60 dB (1).

### Ominaistaajuus

Ominaistaajuudet (resonanssitaajuudet) ovat rakenteille ominaisia taajuuksia, joilla rakenne tai sen osat pyrkivät värähtelemään poikkeutettaessa niitä tasapainotilastaan tai annettaessa rakenteelle hetkellinen alkuheräte (1).

### Resonanssi

Resonanssissa jaksollisen herätteen taajuus osuu rakenteen ominaistaajuusalueelle, jolloin rakenne alkaa värähdellä voimakkaasti ko. taajuudella. Rakenteen äänen eristävyys heikkenee merkittävästi resonanssissa. (1.)

Runkoääni

Kiinteässä kappaleessa, kuten rakenteessa, etenevä mekaaninen värähtely, joka aiheuttaa ilma-ääntä (1).

Sivutiesiirtymä

Äänen kulkeutumista muita reittejä kuin tarkasteltavan rakenteen läpi sanotaan sivutiesiirtymäksi (1).

Spektripainotustermi  $C_{I,50-2500}$

Spektripainotustermi  $C_{I,50-2500}$  laajentaa askelääneneristävyyden mitattavaa taajuusaluetta taajuuskaistoille 50, 63 ja 80 Hz sekä ottaa huomioon yksittäisillä taajuuskaistoilla koko taajuusalueella esiintyvät suuret poikkeamat vertailukäyrästä. Spektripainotustermi otetaan huomioon vain silloin, kun sen arvo on suurempi kuin nolla. (2.)

Standardisoitu äänitasoeroluku  $D_{nT,w}$  (dB)

Taajuusalueella 100–3150 Hz taajuuskaistoittain mitatuista tai mallinnetuista äänitasoeroista laskettu mittasuure (3).

Taajuus  $f$  (Hz)

Värähdysliikkeen taajuus ilmoittaa aikayksikössä tapahtuvien värähdysten lukumäärän. Taajuuden yksikkö on hertsi ( $\text{Hz}=1/\text{s}$ ). Ihmisen kuuloalue on äänentaajuuden välillä 16–16000 Hz (1).

Taajuuskaista

Tarkasteltava äänen taajuusjakauma voidaan jakaa pienempiin osiin eli taajuuskaistoihin. Tavallisesti käytetään oktaavikaistoja ja kolmannesoktaavikaistoja. Kun äänen korkeus kasvaa oktaavin, sen taajuus kaksinkertaistuu. Taloteknisten laitteiden äänitehotaso sekä rakennusmateriaalien absorptiosuhteet ja tilan jälkikaiunta-aika ilmoitetaan tavallisesti oktaavikaistoittain. Kolmannesoktaavikaistoittain ilmoitetaan ilmaääneneristävyys, standardisoitu äänitasoero ja standardisoitu askeläänitaso. (4.)

Värähtely

Värähtelyllä tarkoitetaan partikkelin jaksollista liikettä tasapainoasemansa ympärillä. Värähtelyn aiheuttama häiriö leviää rakenteessa aaltorintamana (1).

Äänenpainetaso  $L_p$  (dB)

Äänenpaineen  $p$  ja vertailuäänepaineen  $p_0$  ( $=20 \mu\text{Pa}$ ) suhteen kaksikymmenkertainen kymmenlogaritmi  $20 \lg [p/p_0]$  (1).

Ääni

Ääni on elastisessa väliaineessa, kuten kaasu, neste tai kiinteä aine, tapahtuvaa värähtelyä. Ääni etenee pitkittäisaaltona äänilähteestä ympäristöön, ja sille annetaan nimityksiä sen perusteella, missä väliaineessa ääniaalto etenee. Esim. ilmaääneksi kutsutaan ääntä, joka etenee ilmassa. (4.)



## 1 Johdanto

Puukerrostalojen rakentaminen Suomessa on lisääntynyt viime vuosina. Tätä on edistänyt ympäristöministeriön puurakentamisen ohjelma, jonka tavoitteena on monipuolistaa ja kasvattaa puunkäyttöä rakennusmateriaalina. Puurakentamisen ohjelman taustalla on Suomen ympäristö- ja ilmastostrategia, jonka tavoitteena on mm. rakentamisen hiilijalanjäljen pienentäminen. Puunkäyttöä kerrostalorakentamisessa rajoittaa rakentamisen kalleus verrattuna betonirakentamiseen ja puun paloherkkyys.

Puukerrostalon rakennusosista välipohjaan kohdistuu eniten erilaisia vaatimuksia. Sanotaankin, että puukerrostalon kilpailukyky betonirakenteisiin kerrostaloihin verrattuna riippuu suureksi osaksi välipohjarakenteesta. Tämän vuoksi välipohjaan liittyy runsaasti kehittämistarpeita, joista yksi on ääneneristys. (5.)

Tämä opinnäytetyö toteutettiin Woodcomp-yhtiöihin kuuluvan KW-Componentin toimeksiantona. Työn taustalla on toimeksiantajan halu löytää tilaelementtirakenteisen puukerrostalon välipohjalle kustannustehokas ratkaisu, joka täyttää ääneneristävyysvaatimukset.

Opinnäytetyön teoriataustan tavoitteena on selvittää, mitkä seikat vaikuttavat välipohjan ääneneristävyyteen ja voiko suunnitteluvaiheessa laskennallisesti arvioida rakenteen ääneneristävyyttä. Käytännön osuuden tarkoituksena on mittausten perusteella tutkia ja vertailla erilaisten tilaelementtirakenteisten välipohjarakenteiden ääneneristävyyttä.

Opinnäytetyössä rakennettiin testimoduuleita, joihin suunniteltiin ja toteutettiin erilaisia rakenneratkaisuja välipohjien osalta. Näiden moduulien välistä ääneneristävyyttä tutkittiin mittaamalla. Mittaukset toteutettiin standardin ISO 16283-1 ja 2 sekä ISO 717-1 ja 2 mukaisesti.

## 2 Toimeksiantajan esittely

Opinnäytetyön toimeksiantajana on Woodcomp-yhtiöihin kuuluva KW-Component Oy. Woodcomp-yhtiöt on puunjalostukseen ja teolliseen puurakentamiseen keskittynyt raahelainen perheyrittäjä. Woodcomp-yhtiöihin kuuluu emoyhtiö Woodcomp, KW-Component sekä Lapaluodon Puu Oy. Woodcompin tuotteita ovat puutuotteet ja -komponentit, puuelementit ja valmisosat, käyttövalmiit tilaelementtiratkaisut ja vähähiiliset puukerrostalot. Woodcompin visiona on olla Suomen johtava puukerrosrakentaja vuonna 2025. Woodcompin arvoja ovat luotettavuus, positiivisuus ja kehittyminen. (6.)

Woodcomp on aloittanut toimintansa 2001 Raahen Piehinggissä. Lapaluodon Puu on aloittanut toimintansa 2005, ja Woodcompin toiminta siirtyi Lapaluotoon 2006. Precut-tuotanto ja yhteistyö Kastelli-talot Oy:n kanssa aloitettiin 2009, ja KW-Component Oy:n taloelementtituotanto käynnistettiin 2012. Uusi pintakäsittelylinja avattiin 2015, ja KW-Componentin tilaelementtituotanto käynnistyi Raahen Kaupunginmetsän teollisuusalueella 2018. Tällä hetkellä Woodcomp-yhtiöt työllistävät Raahessa yli 165 henkilöä. Yhtiöiden liikevaihto v. 2020 oli 28,9 milj. euroa. (6.)

### 3 Ääneneristystä koskevat säädökset ja ohjeet

Akustinen suunnittelu kiinnostaa myös yhteiskuntaa ja lainsäätäjiä, koska rakennuksen akustisilla olosuhteilla on taloudellista merkitystä kansanterveyden, menetetyn työajan sekä tilojen korjaamisesta aiheutuvien kustannusten vuoksi. Euroopan unionin jäsenmaissa rakentamista koskevaa lainsäädäntöä ohjaa rakennustuotedirektiivi, joka määrittelee rakennuksia koskevat olennaiset vaatimukset. Niiden joukossa on meluntorjuntaa koskeva vaatimus. Tätä vaatimusta on Suomessa täsmennetty maankäyttö- ja rakennuslaissa. (5.)

Melun tiedetään aiheuttavan terveysvaikutuksia, joista vakavin on pysyvä ja välitön kuulovaurio. Sen lisäksi melun tiedetään vaikeuttavan nukahtamista, aiheuttavan ennenaikaisia heräämisiä ja vähentävän unen syvyyttä. Myös puutteellisista akustisista olosuhteista voi aiheutua terveysvaikutuksia, mikäli puhuja joutuu toistuvasti korottamaan ääntään. Tästä voi aiheutua ongelmia normaalin puheen tuottamisessa. (7.)

#### 3.1 Maankäyttö- ja rakennuslaki

Maankäyttö- ja rakennuslain (MRL 132/1999) 117 f § mukaan rakennushankkeeseen ryhtyvän on huolehdittava siitä, että rakennus ja sen oleskelu- ja piha-alueet suunnitellaan ja rakennetaan siten, että niiden melualtistus ja ääniolosuhteet eivät vaaranna terveyttä, lepoa tai työntekoa.

Rakenteiden ääneneristävyys ja taloteknisten laitteiden äänitaso ja asennus on oltava sellaisia, ettei rakennuksessa oleskelevien uni ja lepo häiriinny ja rakennusta voidaan ääniolosuhteiden puolesta käyttää sen käyttötarkoituksen mukaiseen toimintaan. (8.)

Tarkempia säännöksiä rakennusten ääniolosuhteista, ääneneristyksestä sekä melun- ja värinän- torjunnan ja annetaan ympäristöministeriön asetuksessa rakennuksen ääniympäristöstä.

#### 3.2 Ympäristöministeriön asetus rakennuksen ääniympäristöstä

Ympäristöministeriön asetus rakennuksen ääniympäristöstä (A 796/2017) antaa vaatimukset rakennuksen ääniympäristön suunnittelulle ja toteutukselle sekä uuden rakennuksen ääneneristyk-

selle. Sen 3 §:n mukaan rakennuspaikan melu- ja värinäolosuhteet on otettava huomioon rakennuksen suunnitteluvaiheessa. Taulukossa 1 on esitetty asetuksen 4 §:ssä annetut vaatimukset rakennuksen ääneneristävyydelle. (9.)

Huonetila	Pienin sallittu äänitasoeroluku $D_{nT,w}$ (dB)	Suurin sallittu askeläänitasoluku $L'_{nTw+C_{l,50-2500}}$ (dB)
Asuntojen, majoitus- tai potilashuoneiden välillä	55	53
Uloskäytävästä asuin-, majoitus- tai potilashuoneeseen	39	63

Taulukko 1. Ääneneristävyyden vaatimukset

Pienin sallittu äänitasoeroluku  $D_{nT,w}$  (dB) kuvaa tiloja erottavan rakenteen ilmaääneneristävyyden vähimmäismäärä. Jotta rakenne täyttää asetuksessa annetut vaatimukset, tulee äänitasoeroluvun olla suurempi. Suurin sallittu askeläänitasoluku  $L'_{nTw+C_{l,50-2500}}$ (dB) kuvaa suurinta äänitasoa, joka askeläänistä tilaan saa syntyä. Jotta rakenne täyttää asetuksessa esitetyt vaatimukset, tulee askeläänitasoluvun olla pienempi.

#### 4 Akustinen suunnittelu

Ääni on fysikaalisesti ilmanpaineen vaihtelua staattiseen ilmanpaineeseen nähden. Ilmaääni on ilmassa etenevää ääntä, joka syntyy värähtelevän kappaleen, kuten ihmisen äänihuulien, saadessa aikaan ilman tihentymiä ja harventumia ympäristössään. Tämä ilmahiukkasten liike saa seuraavat hiukkaset liikkeeseen, ja ääni etenee äänilähteestä ympäristöön pitkäaikaaltona. Ilmanpaineen vaihtelu saa korvan rumpukalvon värähtelemään ja syntyy kuuloaistimus. Mikäli tämä värähtely on tiheää, koetaan ääni korkeaksi ja mataliksi koettujen äänien värähtely tapahtuu harvaan. (5.) (7.)

Staattiseen ilmanpaineeseen verrattuna äänenä aistittavat ilmanpaineen vaihtelut ovat hyvin pieniä. Pienin ihmisen aistima ilmanpaineenmuutos on 20  $\mu\text{Pa}$ , kun ilmakehän ilmanpaine on noin 100 kPa. Äänenä aistittavan ilmanpaineen muutoksesta käytetään nimitystä äänenpaine  $p$  [Pa]. Kun ääniaistimus muuttuu kipuaistimukseksi, on äänenpaine tällöin noin 20 Pa. Äänenpaineiden lukuarvojen ollessa pieniä, mutta kuulokynnyksen ja kipukynnyksen ero miljoonakertainen, olisi äänenpaineita epäkäytännöllistä soveltaa suunnittelu- ja laskentatyössä. Tämän vuoksi on vertailuäänepaineeksi otettu kuulokynnyys  $p_0$ , johon äänenpainetta  $p$  verrataan. Äänen voimakkuutta voidaan tällöin kuvata äänenpainetasona  $L_p$  [dB]. Erilaisten äänilähteiden äänenpainetasoja on kuvattuna taulukossa 2. (7.)

Äänilähde	Äänenpainetaso
Kuulokynnyys	0
Pensaiden lehtien havina	5 – 25
Tietokone	25 – 50
Äänekäs puhuminen	50 – 70
Liikenne	70 – 85
Moottoripyörä	85 – 90
Disco	90 – 110
Kipukynnyys	110 – 130
Suihkumoottori	150

Taulukko 2. Äänenpainetasoja (1).

Akustiikassa äänen taajuusjakauma eli äänispektri jaetaan pienempiin osiin eli taajuuskaistoihin, koska äänilähteiden tuottaman äänenpainetasot ovat erilaisia yksittäisillä taajuuksilla. Tavallisimpia taajuuskaistoja ovat kolmannesoktaavikaistat ja oktaavikaistat. (5.)

Ääniolosuhteet ovat yksi tärkeimmistä rakennuksen ja tilan ominaisuuksista. Jotta ääniolosuhteet vastaavat rakennuksen tai tilan käyttötarkoitusta, tarvitaan akustista suunnittelua. Akustisella

suunnittelulla otetaan kantaa rakennuksesta riippumatta huoneakustiikkaan, rakennusakustiikkaan, meluntorjuntaan sekä tärinäeristykseen. (7.)

Rakennuksen käyttötarkoitus ja tilan käyttö ovat akustisen suunnittelun ensimmäinen lähtökohta. Se määrää tilan muodon, vaatimuksiltaan erilaisten tilojen keskinäisen sijainnin, huoneakustiikan vaatimukset, millainen ääneneristystarve on sekä teknisten laitteiden sallitun äänitason. Akustinen suunnittelu perustuu melun vaikutukseen ihmisissä. (7.)

#### 4.1 Huoneakustiikka

Huoneakustisen suunnittelun tavoitteena on hallita äänen kulkua, heijastumista ja vaimenemista tilan sisällä. Tilan käyttötarkoitus määrittelee, millaisia akustisia ominaisuuksia sille pyritään suunnittelemaan. Esimerkiksi auditoriossa pyritään siihen, että puhujan on helppo puhua ääntään raottamatta kuitenkin niin, että yleisö saa puheesta selvän. Tämä saadaan aikaan käyttämällä tilassa heijastavia pintoja äänen suuntaamiseen yleisölle ja vaimentavia pintoja vähentämään tilan kaiuntaa siten, että puheen tavut erottuvat hyvin toisistaan. Huoneakustinen suunnittelu koostuu tilan muodon valinnasta, heijastavien pintojen suunnittelusta, tarvittavasta absorptioalan määrittämisestä sekä sen sijoittamisesta tilaan. (7.)

#### 4.2 Meluntorjunta

Meluntorjunnalla pyritään vähentämään rakennuksen ulkopuolisen melun syntymistä tai estämään sen eteneminen ääntä eristävin rakentein ja erilaisin meluestein. Rakennuspaikan ääniympäristö ja tärinäolosuhteet voivat vaihdella suuresti. Meluntorjuntaa käytetään myös rakennuksen sisällä. Siellä tarkoituksena on vähentää rakennusten teknisten laitteiden ja koneiden aiheuttamaa melua estämällä sen leviämistä ja vaikuttamalla sen syntymiseen. Näihin pyritään vaikuttamaan käyttämällä eristäviä rakenteita, erilaisia äänenvaimentimia tai huoneakustiikkaa. (5) Kääntämällä voidaan rakennuksen julkisivun ääneneristyksen sekä piha- ja oleskelualueiden ja parvekkeiden äänitasoja tiukentaa (4.)

#### 4.3 Tärinäeristys

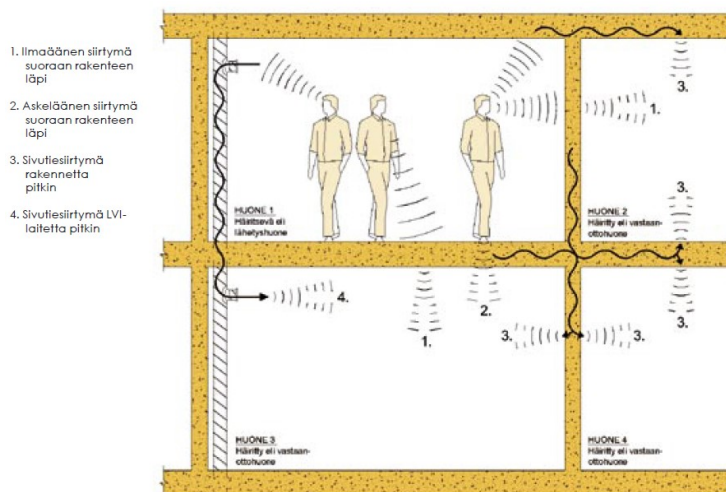
Tärinäeristyksellä vähennetään laitteiden aiheuttaman värähtelyn siirtymistä rakennuksen runkoon. Erilaiset rakenteisiin kiinnitetyt laitteet, jotka sisältävät liikkuvia tai pyöriviä osia, aiheuttavat runkoääntä. Runkoääntä aiheuttavat laitteet, kuten ilmanvaihtokoneet, kompressorit, lauhduttimet, pumput, sähkökäyttöiset ovet ja hissit. Näiden lisäksi runkoääntä aiheuttavat myös vesijohdot ja viemärit. (7.)

Laitteiden liikkeen aiheuttaman runkoäänen voimakkuus riippuu sen rakenteen massasta, mihin laite on kiinnitetty. Useimmiten rakenteiden massa ei ole riittävän suuri laitteiden aiheuttaman runkoäänen eristämiseen, vaan laitteille on suunniteltava tärinäeristys. (10.)

#### 4.4 Ääneneristys

Ääneneristyksellä estetään ja vähennetään äänen kulkeutumista tilojen välillä, jotta tilan käyttösä käyttötarkoitus huomioiden on mahdollista. Kun suunnitellaan rakenteiden ääneneristävyyttä, äänentaajuudella on tärkeä merkitys, koska ääneneristyskyky ja rakenteen käyttäytymisen muuttuvat taajuuden muuttuessa. Asuinrakennuksessa on monenlaisia äänilähteitä ja niiden tuottaman äänen taajuudet vaihtelevat suuresti. Esimerkiksi välipohjalla askelten tuottaman äänen taajuus on välillä 25–200 Hz, kun taas ihmisen puhe on alueella 50–10000 Hz. Ihmisen kuulo on herkimmillään taajuusalueella 100–3150 Hz. Jotta saavutettaisiin ihmisen kuulon kannalta mahdollisimman hyvä ääneneristävyys, rakenteiden ääneneristävyyttä tutkitaan kyseisellä taajuusalueella. Nykyisin etenkin kevyiden seinä- ja välipohjarakenteiden suunnittelussa pyritään huomioimaan myös alle 100 Hz matalat taajuudet, koska ne läpäisevät kyseisiä matalia äänentaajuuksia helpommin. (1.)

Ääni etenee rakennuksessa erilaisia reittejä pitkin; suoraan rakenteiden läpi joko ilma- tai aske- läänenä, sivutiesiirtymänä rakenteita pitkin tai LVI-laitteita pitkin. Äänen kulkeutumisreitit on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Äänen kulkeutumisreitit (1).

Rakennuksen ääneneristävyys muodostuu rakenteen ääneneristävydestä ja sivutiesiirtymien yhteisvaikutuksesta. Rakennusosien välisten saumojen ja liitosten, läpivientien ja taloteknisten järjestelmien tiiviys ja eristävyys vaikuttavat myös ääneneristävyyteen. (4.)



## 5 Ilmaääneneristys

Ilmaääneneristyksen tarkoituksena on vähentää erilaisten äänilähteiden synnyttämän ilmaäänien siirtymistä toiseen huoneeseen. Huonetilassa äänilähteestä leviävä ääniaalto kohtaa esteitä, kuten seinä- ja lattiarakenteita, ja paineen vaihtelu saa ne värähtelemään. Rakenteet saavat toisella puolellaan olevan ilman värähtelemään, ja tämä voidaan havaita ilmaääninä. Rakenteen kohtamaa värähtelyn määrää voidaan ilmaista äänitehona  $W_1$ [dB], ja rakenteesta toiselle puolen välittyntä äänienergiaa voidaan ilmaista äänitehona  $W_2$ [dB]. Tällöin ilmaääneneristävyys  $R$  [dB] voidaan määrittää kaavan 1 avulla. (5.)

$$R = 10 \lg \frac{W_1}{W_2} \quad (1)$$

Ilmaääneneristävyys on rakennusosan tai -osien muodostaman kokonaisuuden ominaisuus. Tilaan syntyvä äänenpainetaso sekä viereisestä tilasta siirtyvän äänitehon kuuluminen ovat riippuvaisia monesta muustakin tekijästä. Tilaan välittyvä ääniteho  $W_2$  on riippuvainen ilmaääneneristävyyden lisäksi myös viereisessä tilassa olevasta äänitehosta. Mitä suurempi absorptioala tilassa on, sitä enemmän toisesta tilasta välittynyt ääniteho  $W_2$  vaimenee. Absorptiota lisäämällä vaikutetaan tilaan syntyvään äänenpainetasoon, ei niinkään ilmaääneneristävyyteen. (10.)

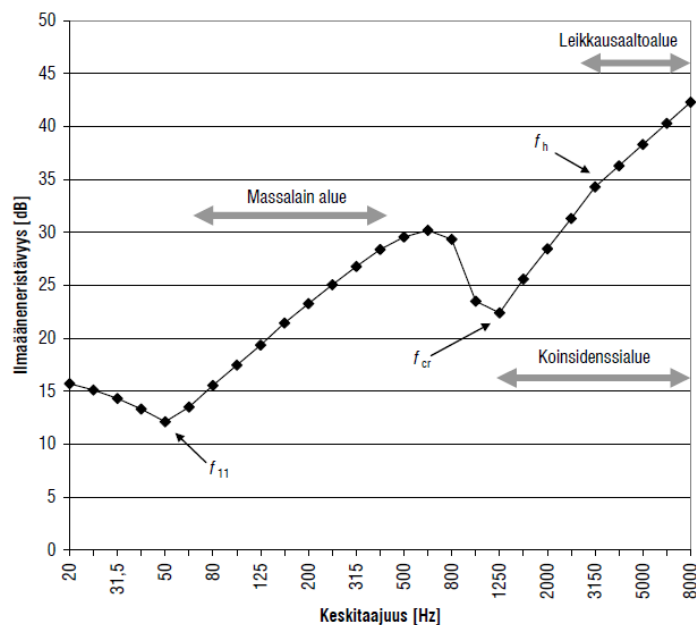
Rakenteen ilmaääneneristävyysluku kuvaa rakenteen ilmaääneneristyskykyä. Se määrittää rakenteen pintaan kohdistuvan ja rakenteen toiselle puolelle siirtyvän äänitehon suhteenä. Ääniteho on suure, joka kuvaa äänienergian absoluuttista määrää eikä sitä ole mahdollista määrittää suoraan mittauksilla, vaan se selvitetään välillisesti. Rakenteen ilmaääneneristävyys on sitä parempi, mitä suurempi ilmaääneneristysluku on. Rakennuksessa tilojen välille määritettyä ilmaääneneristävyyttä merkitään  $R'_w$ , kun taas laboratoriossa rakenteelle määritettyä ilmaääneneristävyyslukua merkitään  $R_w$  [dB]. (1.) (10.)

Ilmaääneneristävyyteen rakenteessa vaikuttavat monet seikat. Näitä ovat rakennusosan paino, rakenteen kerroksellisuus, tiiviys, reiät, liittyminen muihin rakennusosiin sekä rakenteen sisällä olevat kytkennät. Rakenteen ollessa yksinkertainen tai yksiaineinen perustuu ääneneristävyys massaan, kun taas monikerroksisissa rakenteissa ääneneristävyyteen vaikuttavat kerrosten jäykkyys, kytkennät, väliaineet sekä keskinäinen etäisyys. (11.)

## 5.1 Yksinkertaisten rakenteiden ilmaääneneristävyys

Yksinkertaisten rakenteiden ilmaääneneristävyyttä voidaan selvittää massalain avulla. Siinä laskennallisesti voidaan massan [ $\text{kg/m}^2$ ] ja taajuuden perusteella laskea rakenteen ilmaääneneristävyys taajuuksittain. Tämä on kuitenkin rakenteen ilmaääneneristävyyden määrittämiseen epätarkka keino, koska rakenteiden ilmaääneneristävyydessä voidaan erottaa rajataajuuksia, joilla rakenteen käyttäytyminen muuttuu. Rajataajuuksiin liittyvät ilmiöt esiintyvät kaikilla rakenteilla, mutta niiden sijainti on riippuvainen rakenteiden massasta, paksuudesta ja jäykkyydestä. (10.)

Rakenteilla on yleensä kolme rajataajuutta (kuva 2). Näillä rajataajuuksilla rakenteen käyttäytyminen muuttuu ja ääneneristävyys heikkenee. Matalin rajataajuus on yleensä rakenteen ominaistaajuus, jonka alueella rakenteessa tapahtuu resonanssi-ilmiö ja joka heikentää ääneneristävyyttä. Keskimmäisenä kuvassa näkyy koinsidenssin rajataajuus. Koinsidenssitaajuudella äänen nopeus ilmassa on yhtä suuri kuin taivutusaallon nopeus rakenteessa. Tämä on yleensä äänieristyksen kannalta kiinnostava rajataajuus, koska se usein sijaitsee ihmisen kuulon kannalta otollisella taajuusalueella. Korkein rajataajuus on leikkausaaltoalueen rajataajuus. (10.)



Kuva 2. Esimerkkirakenteen ilmaääneneristävyys kolmannesoktaavikaistoittain taajuuksilla 20–8000 Hz (10.)

### 5.1.1 Resonanssi-ilmiö

Rakenteessa syntyy resonanssi-ilmiö, kun siihen osuu ääniaaltoja, joiden taajuus on rakenteen ominaistaajuusalueella eli resonanssitaajuusalueella. Tällöin rakenteen ääneneristävyys heikkenee, koska se värähtelee ja säteilee ääntä voimakkaasti. Rakenteessa oleva värähtelysystemi saa koko ajan lisää energiaa siihen osuvista ääniaalloista, josta voimakas värähtely johtuu. (1.)

Rakenteelle voidaan määrittää resonanssitaajuusalue alimman resonanssitaajuuden  $f_{11}$  [Hz] avulla. Alimmalla resonanssitaajuudella rakenteen värähtely saavuttaa maksimiarvonsa. Mikäli värähtelyä aiheuttava heräte on rakenteen resonanssitaajuusalueella, havaitaan myös tällöin resonanssi-ilmiötä. Rakenteen resonanssitaajuusalueen tulisi sijaita taajuusalueen 100–6150 Hz alapuolella, joka on ihmisen kuulon kannalta tärkeä alue. Myös värähtelyä tuottavan laitteen ja rakenteen välillä voi syntyä resonanssi-ilmiö, mikäli laitteen herätetaajuus osuu rakenteen resonanssitaajuusalueelle. Tämän vuoksi laitteiden herätetaajuuden tulisikin olla riittävästi resonanssitaajuuden ylä- tai alapuolella. (1.)

### 5.1.2 Koinsidenssi-ilmiö

Rakenteeseen syntyy taivutusaalto, kun siihen kohdistuva ääniteho taivuttaa rakennetta. Tämän taivutusaallon nopeus riippuu taajuudesta. Kun levyn pintaan tietyssä kulmassa osuvan ääniaalltorintaman jälki ja levyssä oleva taivutusaalto etenevät samalla nopeudella, syntyy koinsidenssi-ilmiö, jossa ääniaallot läpäisevät levyn ja ääneneristävyys on lähinnä levyn ja rakenteen häviömekanismeista aiheutuvaa. (1.)

Koinsidenssin rajataajuudella, joka on koinsidenssi-ilmiön alin taajuus, taivutusaallon nopeus sekä äänen nopeus ilmassa  $c$  [m/s] ovat samat, ja  $f_c$  on riippuvainen levyn taivutusjäykkyydestä  $B$  ja pintamassasta  $m'$  [kg/m<sup>2</sup>]. Kaava 2 (10.)

$$f_c = \frac{c^2}{2\pi} \sqrt{\frac{m'}{B}} \quad (2)$$

Rakenteen taivutusjäykkyys  $B$  saadaan kimmomooduulin  $E$  [N/m<sup>2</sup>], Poisson'n vakion  $\nu$  ja rakenteen paksuuden  $h$  [m] avulla. Kaava 3 (10).

$$B = \frac{E}{1-\nu^2} \frac{h^3}{12} \quad (3)$$

Koinsidenssitaajuuden olisi hyvä sijaita 100–3150 Hz yläpuolella. Mitä suurempia ovat rakenteen kimmomoduuli sekä rakennekaksuus, ja mitä pienempi rakenteen pintamassa on, sen alhaisempi on koinsidenssin rajataajuus. Ohuella levyllä ääneneristävyys paranee pintamassan kasvaessa ja taivutusjäykkyyden pienentyessä. (1.) (10.)

Rakenteen kaksuuden ollessa suuri esiintyy taivutusaaltojen lisäksi leikkausaaltoja. Nämä leikkausaallot vaikuttavat ilmaääneneristävyyteen rajataajuuden  $f_h$  yläpuolella. (10.)

## 5.2 Kaksinkertaisten rakenteiden ääneneristävyys

Rakenteiden ollessa kevyitä voidaan rakenteiden ilmaääneneristävyyttä helposti kasvattaa rakenteiden pintamassaa lisäämällä. Raskaiden rakenteiden ääneneristävyyden parantaminen massaa lisäämällä ei kuitenkaan ole järkevää, koska massan lisäysten tulisi olla todella suuria ja se aiheuttaisi vaatimuksia rakenteiden kantavuuksille ja lisäisi kustannuksia. Rakenteen jakaminen kahdeksi osaksi, joiden välissä on ilmapäli tai absorptiomateriaalilla täytetty ilmapäli, parantaa eristävyyttä enemmän ja helpommin. (5.)

Akustisen toiminnan kannalta kaksinkertaisia rakenteita ovat mm. molemmiin puoli levytetyt kipsilevyseinät, kaksinkertaiset tiiliseinät ja betoniväliäpohjat, joihin liittyy asennuslattia tai levyrakenteinen alakatto sekä puurakenteiset väliäpohjat. Kelluva lattia muodostaa myös kaksinkertaisen rakenteen kantavan väliäpohjan kanssa. Sen akustinen toiminta on kuitenkin hiukan toisenlainen kuin massojen ja ilmapälin muodostavan rakenteen. Tämä johtuu rakenteen alla olevasta eristekerroksesta. (10.)

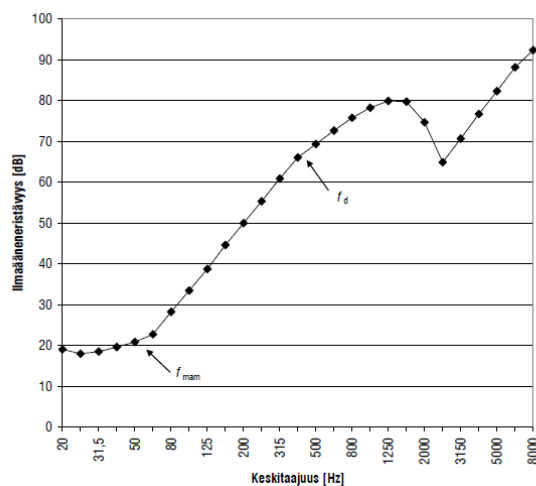
Kaksinkertaisen rakenteen ääneneristävyys perustuu erillään olevien levyäisten massojen sekä niiden välisen ilmatilan eli ”ilmajousen” yhteistoimintaan, jota kutsutaan massa-jousi-massajärjestelmäksi. Näin ollen levyäisten massojen lisääminen parantaa seinän ääneneristävyyttä. Ilmaääneneristävyyttä laskettaessa on ensin selvitettävä kummankin puoliskon ilmaääneneristävyys yksinkertaisena rakenteena. Ilmatilan kaksuus vaikuttaa sen joustavuuteen. Ilmatilan ollessa suurempi se on joustavampi ja välittää vähemmän värähtelyä toiselle puoliskolle, jolloin rakenteen ääneneristävyys paranee. Korkeilla taajuuksilla voi rakenteen ilmatilaan syntyä seisovia aaltoja, jotka heikentävät sen ääneneristävyyttä. Asentamalla ilmatilaan ääntä absorboivaa materiaalia, kuten mineraalivillaa, voidaan seisovien aaltojen vaikutusta vähentää. (1.) (5.)

Myös kaksinkertaisella rakenteella ilmaääneneristävyys muuttuu rajataajuuksilla, ja rakenteella on ominaistajuus, jonka yläpuolella ilmaääneneristävyys kasvaa voimakkaasti (kuva 3). Rakenteen ominaistajuus  $f_{mam}$  riippuu sen puolikkaiden pintamassoista  $m_1$  ja  $m_2$  [kg/m<sup>2</sup>] sekä ilmapälin suuruudesta  $d$  [m]. Kaava 4

$$f_{mam} = 60 \sqrt{\frac{1}{d} \frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2}} \quad (4)$$

Ilmaääneneristävyyden kasvu ei kuitenkaan jatku rajattomasti, vaan rakenteen toiminta muuttuu sen saavutettua rajataajuuden  $f_d$ . Tällöin ilmapäli ei enää toimi jousena, koska äänen aallonpituus on pieni siihen verrattuna. Rakenteen ilmapäli  $d$  rajataajuudella on noin kuudesosan aallonpituudesta. (10.)

$$f_d = \frac{c}{2\pi d} \quad (5)$$



Kuva 3. Kaksinkertaisen rakenteen rajataajuudet (10)

Kaksinkertaisia rakenteita suunniteltaessa tulisi rakenteiden puoliskoien massat ja etäisyys valita siten, että ominaistajuus  $f_{mam}$  olisi enintään 100 Hz, mieluiten alle 50 Hz, koska rakenne on silloin resonanssissa ja sen ilmaääneneristävyys on pienimmillään. Massa-jousi-massajärjestelmän ominaistajuudesta johtuen kaksinkertaisten rakenteiden ilmaääneneristävyys matalilla taajuuksilla on yksinkertaisia raskaita rakenteita heikompi. Kolminkertaisilla rakenteilla näitä massa-jousi-massaresonansseja on enemmän, joten niiden ääneneristävyys on kaksinkertaisiakin rakenteita heikompi. (10.)

Rakenteen rangoilla on myös vaikutusta sen ilmaääneneristävyyteen. Mikäli rakenteen molemmat puoliskot on kiinnitetty samaan rankaan, jää ilmaääneneristävyys heikommaksi kytkennän

vuoksi kuin kytkemättömillä rakenteilla. Rankojen jäykkyys vaikuttaa saavutettavaan ilmaääneneristävyyteen siten, että rankojen tullessa jäykemmiksi ilmaääneneristävyys heikkenee. (5.)

Koska liitoksiin liittyy monia akustisia seikkoja, on rakenteiden liittyminen viereisiin rakenteisiin suunniteltava ja toteutettava huolellisesti. Kokonaisääneneristävyyden kannalta rakenteen tiiviydellä on suuri merkitys, koska pienikin rako riittää pilaamaan tilojen välisen ilmaääneneristävyyden. (5.)

## 6 Sivutiesiirtymät

Sivutiesiirtymällä tarkoitetaan äänen kulkeutumista tilojen välillä muuta reittiä kuin tiloja erottavan rakenteen läpi. Ääni voi kulkeutua silloin LVIS-järjestelmien, kuten ilmanvaihtokanavien kautta tai rakenteellisesti, jonkin huonetta sivuavan rakenteen välityksellä. LVIS-järjestelmän kautta tapahtuvassa sivutiesiirtymässä äänen kulkumekanismi on erilainen kuin rakenteiden kautta tapahtuva rakenteellinen sivutiesiirtymä, eikä sitä käsitellä tässä opinnäytetyössä. (7.)

Sivutiesiirtymien vuoksi ääneneristävyys rakennuksessa on aina jossain määrin heikompi kuin yksittäisen rakennusosan laboratoriossa mitattu arvo. Tämän vuoksi määräyksissä annetut arvot koskevat ilma- ja askelääneneristävyyttä rakennuksessa. (10.)

Rakennuksessa syntyy aina rakenteellista sivutiesiirtymää, koska huoneessa oleva äänilähde saa huoneen kaikki pinnat värähtelemään. Tämä ilmaäänien aiheuttama värähtely etenee runkoääninä rakenteessa lukemattomia reittejä pitkin. Liitoksissa runkoäänien energia jakaantuu riippuen liitosten jäykkyydestä sekä liitokseen liittyvien rakenteiden massasta. Runkoäänien etenemistä voidaan estää massan ja jäykkyyden lisäksi tekemällä rakenteisiin saumoja. Näissä saumoissa rakenne katkaistaan mineraalivilla-, kumi- tai ilmakerroksella. (10.)

Massiivisia rakenteita tutkittaessa on sivutiesiirtymien laskeminen melko yksinkertaista ilmaääneneristysluvun  $R'_w$  määrittämisellä taajuusalueella 100–3150 Hz. Tämä johtuu siitä, että betonirakenteella, jonka paksuus on enemmän kuin 160 mm, koinsidenssin rajataajuus esiintyy 100 Hz alueella. Koinsidenssin rajataajuuden yläpuolella rakennevärähtely on resonoivaa, ja tällöin sen kulkeutumista on mahdollista mallintaa melko suoraviivaisesti. Värähtelyn ollessa resonoivaa ei liitoksien runkoääneneristävyys ole myöskään taajuudesta riippuvaista. (7.)

Sivutiesiirtymien arviointi kevyitä rakennusosia pitkin on huomattavasti vaikeampaa kuin massiivisia rakennusosia pitkin tapahtuvien. Tämä selittyy sillä, että kevyillä rakenteilla koinsidenssin rajataajuus esiintyy yli 2000 Hz alueella. Tällöin taajuusalueella 100–3150 Hz levyrakenteiden käyttäytymisen määrää lähinnä pakkovärähtely. Tällöin värähtely on paikallista eikä rakenne kuljeta äänienergiaa rakenteen suunnassa. Koska pakkovärähtely ei etene liitosten yli niin helposti kuin massiivisissa rakenteissa etenevä resonoiva värähtely, ovat liitosten värähtelyeristysarvot monesti suurempia kevyissä rakenteissa. Vaikka kevyessä rakenteessa oleva liitos olisi hyvin ääntä eristävä, on kevyen rakenteen ääneneristävyys etenkin pienillä taajuuksilla heikko ja tämän vuoksi pakkovärähtely kantautuu sivuavia rakenteita pitkin. (7.)

Puukerrostalojen liitosten suunnittelu Suomessa perustuu mittaamalla saatuun aineistoon sekä tärinäeristinkaistojen toimittajien ohjeisiin. Tärinäeristyskaistojen eristävyys perustuu niille tulevan kuormituksen aiheuttamaan painumaan, joten tärinäeristinmateriaalien toimittajat ilmoittavatkin tuotteistaan kaksi tärkeää kuormitusalueita: jännityksen  $[MN/m^2]$ , jolla eristimet toimivat optimaalisesti ja suurimman sallitun jännityksen  $[MN/m^2]$ , jonka eristimet kestävät ominaisuuksien muuttumatta hetkellisesti. Tärinäeristinkaistojen mitoittamiseen tarvitaankin jokaisen kantavan seinän viivakuormat jokaisesta kerroksesta ilman osavarmuuskertoimia. (5.)



## 7 Askelääneneristys

Askeläänat ovat kävelystä, esineiden putoilemisesta, huonekalujen siirtelystä ja muista vastaavista syntyviä runkoääniä. Rakenteeseen kohdistunut isku saa rakenteen ympärillä olevan ilman värähtelemään, jolloin toisella puolen rakennetta ääni havaitaan ilmaääninä. Askelääneneristystyksen tarkoituksena onkin vähentää rakenteisiin kohdistuvien iskujen aiheuttamaa ääntä. Askelääneneristysten vaatimukset ja mittaustulokset esitetään askeläänitasolukuna. Mitä pienempi askeläänitasoluku on, sitä parempi on tilojen välinen askelääneneristävyys. (7.) (5.)

Samat ilmiöt, jotka vaikuttavat ilmaääneneristävyyteen, vaikuttavat myös askelääneneristävyyteen, vaikka äänen syntymekanismi on erilainen. Syntymekanismiin vuoksi keinot, joilla toteutetaan askelääneneristystä, poikkeavat osittain ilmaääneneristyksessä käytettävistä keinoista. (10.)

Värähtelyn eteneminen välipohjarakenteessa riippuu sen rakennekerroksista sekä niiden välisistä kytkennöistä, ja se voi edetä rakenneosissa runkoääninä tai rakenteen ilmatilassa ilmaääninä. Välipohjarakenteiden suunnittelussa tuleekin tunnistaa värähtelyn merkittävimmät kulkureitit ja pyrkiä vaimentamaan ne niiden merkitsevyysjärjestyksessä. (5.)

Yksi merkittävimmistä askelääneneristykseen vaikuttavista tekijöistä on välipohjan massa. Erityisesti matalien taajuuksien, alle 100 Hz, ääneneristävyys paranee, kun kasvatetaan välipohjan pintalaatan ja alakaton massaa. Massaa voidaan kasvattaa erilaisten laatta- ja levykerrosten avulla. (5.)

Massan lisäksi rakennekerrosten kytkennöissä ja liitoksissa tapahtuvat värähtelyhäviöt vaikuttavat välipohjien askelääneneristävyyteen. Joustavat kerrokset, kuten askeläänieriste kelluvan lattian alla, sekä joustavat kytkennät, kuten alakaton liitos palkistoon, vaimentavat askeläänierähteestä aiheutuvaa värähtelyä alapohjarakenteessa. (5.)

Askelääneneristävyys kannalta puurakenteinen välipohja poikkeaa huomattavasti massiivisesta betonivälipohjasta. Puurakenteinen välipohja on yleensä kevyt kaksinkertainen rakenne ja toimii massa-jousi-massajärjestelmänä, jonka massoina toimii alakattolevytys ja välipohjapalkkien päällä oleva kansirakenne. Kevyissä välipohjissa korkeilla taajuuksilla askeläänepainetasot ovat luonnostaan alhaisia ja matalilla taajuuksilla korkeita, kun taas massiivisten välipohjien kohdalla tilanne on päinvastainen. Tämän vuoksi kevyissä välipohjissa kelluvalla lattialla tai joustavalla lattianpäällysteellä ei saavuteta yhtä korkeita parannusvaikutuksia kuin massiivisissa välipohjissa. (1.)

### 7.1 Kelluvat pintalaatat

Kelluvat pintalaatat parantavat askelääneneristystä. Ne voidaan toteuttaa betonirakenteisena tai levyrakenteisena. Kelluvissa lattioissa pehmeän eristekerroksen päälle tehdään lattiarakenne. Eristekerroksena voidaan käyttää mineraalivillaa, elastisoitua polystyreeniä tai äänieristimiä. Akustisen toiminnan kannalta tärkein ominaisuus kelluvalla lattialla on sen ominaistaajuus. Ominaistaajuus riippuu kelluvan rakenteen pintamassasta sekä eristekerroksen dynaamisesta jäykkyydestä. Ominaistaajuuden yläpuolella ääneneristävyys paranee huomattavasti, joten mitä alhaisempi on ominaistaajuus, sitä paremmin kelluva lattia toimii akustisesti. (7.)

### 7.2 Alakatot

Alakaton vaikutus askelääneneristykseen perustuu siihen, että se vähentää välipohjan kantaviin rakenteisiin kohdistuneen iskun aiheuttaman värähtelyn vaikutusta alapuolisessa huoneessa. Alakatolla ei ole minkäänlaista vaikutusta sivutiesiirtyminä eteneviin ääniin. Puurakenteisen välipohjan kantavien palkkien kautta kulkevan runkoäänen esitetään olevan merkittävin äänenkulku-reitti. Tällöin joustavasti jousirangoin kiinnitetty alakatto parantaa askelääneneristävyttä huomattavasti enemmän mitä alakaton suora kytkentä palkkeihin. (5.)

Alakattorakenteissa käytetään yleensä rakennuslevyjä, joiden pintamassa on yli  $8 \text{ kg/m}^2$ . Alakattolevyjen koinsidenssitaajuuden tulisi olla mahdollisimman korkea, jotta koinsidenssi-ilmiön heikennysvaikutus jäisi mahdollisimman vähäiseksi. Tämän vuoksi alakattolevytyksessä tulisi käyttää ohuita rakennuslevyjä, eikä niitä tulisi liimata toisiinsa. (1.) (7.)

### 7.3 Absorptiomateriaali välipohjan ilmatilassa

Puurakenteisissa välipohjissa palkkien välissä on ilmatila. Siinä askelherätteestä syntyvä ääni etenee ilmaäänenä. Tämä ilmatilassa kulkeva ilmaääni muodostuu kriittiseksi äänenkulkureitiksi siinä tapauksessa, että palkkeja pitkin kulkeva runkoääni on vaimennettu. Absorptiomateriaali ilmatilassa vaimentaa tehokkaasti ilmatilassa kulkevaa ääntä, erityisesti seisovia aaltoja. (5.)

## 8 Testimoduulien ääneneristävyys

Ääneneristävyysmittaukset suunniteltiin tehtäväksi helposti siirrettävissä ja riittävän kokoisissa testimoduuleissa rakenteita vaihtaen. Testimoduulien ääneneristävyysmittausten tarkoituksena oli selvittää erilaisten välipohjarakenteiden ääneneristävyyttä, ja toimeksiantajalta saatiin tietoja heidän tavoitteistaan ja rajoitteistaan välipohjarakenteiden suhteen.

Tavoitteena oli yksinkertainen, kustannustehokas ja ääneneristysvaatimukset täyttävä, teolliseen valmistukseen sopiva välipohjarakenne. Liitosten osalta toimeksiantajalla oli jo oman tuotekehityksen perusteella hyvä ratkaisu, joten tähän ei oteta kantaa tässä opinnäytetyössä.

### 8.1 Mittaukseen käytettävän rakennuksen suunnittelu

Ääneneristysten mittauksia varten suunniteltiin testimoduulit. Moduulien tilantarve määriteltiin siten, että standardin mukainen tilojen välinen ääneneristävyyden mittaus voitiin suorittaa. Mittaukset suoritettiin käyttäen standardin SFS-EN ISO 16823-1 ja 2 mukaista tilojen välisen mittauksen menetelmää. Standardin SFS-EN ISO 16283-1 ja 2 mukaan vastaanotto- ja lähetystilan tulee tilavuudeltaan olla vähintään 10 m<sup>3</sup>. Myös lattiapinta-alan tuli olla sellainen, että kaikki vaadittavat mittauspisteet voitiin sijoittaa vaadittavien etäisyyksien päähän toisistaan ja huoneen seinistä.

Moduulien seinärakenne oli kahdella kipsilevyillä levytetty eristetty rankaseinä, jonka ulkopinnassa ei ollut levytystä. Liitokset toteutettiin toimeksiantajan käytössä hyväksi havaituilla rakenteilla, ja näiden suunnittelu oli toimeksiantajan vastuulla.

Alustavasti mittauksia varten harkittiin joko kahta tai kolmea moduulia. Lopulta päädyttiin rakentamaan kolme ovellista moduulia (kuva 4), jolloin yhden moduulin rakenteita oli mahdollista muokata sillä aikaa, kun kaksi muuta olivat mittauksen kohteena.



Kuva 4. Testimoduuli

## 8.2 Tutkittavien välipohjarakenteiden suunnittelu

Tilaelementtirakenteisessa kerrostalossa välipohjarakenne koostuu alemman moduulin yläpohjasta ja ylemmän moduulin alapohjasta. Tässä työssä alapohjarakenteella tarkoitetaan moduulin lattiarakenteita ja yläpohjalla alakattorakenteita. Tämä asia tuli huomioida, kun suunniteltiin moduulien rakenteita ja mittausjärjestystä.

Välipohjarakenteiden suunnittelua varten toimeksiantaja toimitti edellisessä kohteessa olevan välipohjarakenteen tiedot sekä toiveita, minkä tyyppisiä rakenteita lähdetään tutkimaan mittauksilla. Suunnittelun lähtökohtana oli pitää alapohjan kantava palkisto samanlaisena kuin edellisessä kohteessa, ja tarkoitus oli keskittyä alapohjan askelääneneristyksen eri variaatioihin sekä yläpohjan variaatioihin käyttäen CLT-levyä runkona. Suunnittelussa tuli huomioida palomääräykset, ääneneristävyys, lattialämmityksen toimivuus ja lattialämmityspotkien reitit, sähköjen kulureitit sekä tuotannolliset seikat. CLT-levyä päätettiin hankkia kahta eri paksuutta, joiden mukaan yläpohjaratkaisuja tuli suunnitella. Suunnittelu tapahtui kokeiluperiaatteella käyttäen mallina RunkoPES:n valmiiden rakenneratkaisujen osia. Suunnittelussa pyrittiin muuttamaan rakennetta vain yksi osa kerrallaan, jotta tehtyjen muutosten vaikutus ääneneristävyyteen voitaisiin kohdistaa tiettyyn rakennemuutokseen.

Suunnitellut rakenne-ehdotukset lähetettiin toimeksiantajalle, ja sieltä saadun suullisen ja kirjallisen palautteen perusteella tehtiin tarvittavia muutoksia, kunnes saatiin aikaiseksi tyydyttävät ratkaisut. Suunniteltujen uusien välipohjaratkaisujen lisäksi valmistettiin vertailuvälipohja (VP1), joka on ollut käytössä, mitattu valmiissa rakennuksessa ja täyttänyt ääneneristävyydelle asetetut vaatimukset. Kohde on valmistunut v. 2021. Tässä tutkimuksessa käytetään tästä valmiista rakennuksesta lyhennettä (SR). VP1:n mittaustuloksia on tarkoitus verrata muihin mitattaviin rakenteisiin (VP2–VP6) sekä valmiissa rakennuksessa (SR) VP1:stä mitattuihin ääneneristävyysmittaustuloksiin.

Välipohjarakenteiden suunnittelussa päädyttiin lopulta viiteen vaihtoehtoon (VP2–VP6), joissa kaikissa muuttui pelkästään yläpohjan osuus. Alapohjan askelääneneristykselle esitetyistä rakenne-ehdotuksista ei löytynyt sopivia vaihtoehtoja, joita toimeksiantaja olisi halunnut mitata. Suunnitellut välipohjarakenteet ovat ainoastaan toimeksiantajan käyttöön, joten niitä ei esitellä tässä opinnäytetyössä.

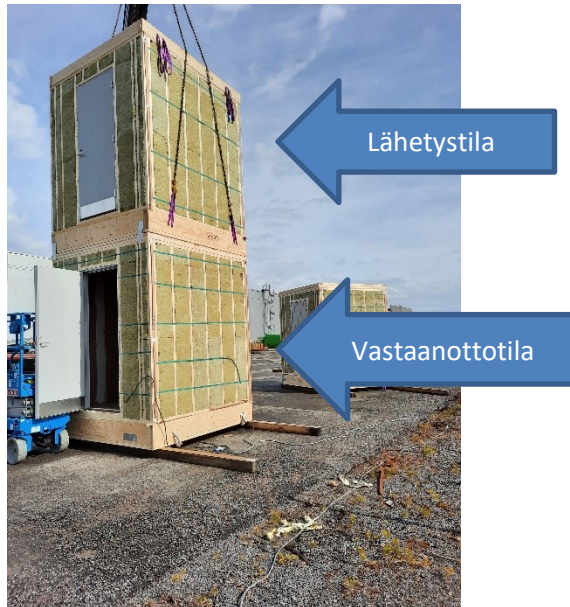
### 8.3 Mittauksen kulku ja mittausmenetelmät

Mittauksia varten laadittiin alustava mittaussuunnitelma, joka on esitetty taulukossa 3. Siinä on esitetty mitkä moduulit olivat mittauksessa, missä järjestyksessä ne tuli pystyttää ja minkä välipohjarakenteen ne muodostivat. Suunnitelmaan on kuvattu myös mittauksen aikana vapaaseen moduuliin mahdollisesti tehtävät muutokset. Muokattava moduuli kuljetettiin trukilla tehdashallin, ja muutokset tehtiin tilaelementtitehtaalla sisätiloissa, jolloin muutostöistä aiheutuvat äänet eivät häirinneet mittauksia. Koska mittauspäiviä oli kaksi, tehtiin suunnitelmasta poiketen mitausten 3 ja 4 aikana tehdyt muutokset toisen mittauspäivän aamuna, ennen mittauksia.

	Sijainti	Moduuli	Mitattava rakenne	
Mittaus 1	Yläpuoli	Moduuli 2	VP1	
	Alapuoli	Moduuli 1		
Mittaus 2	Yläpuoli	Moduuli 3	VP2	Mittauksen aikana muokataan moduuli 1
	Alapuoli	Moduuli 2		
Mittaus 3	Yläpuoli	Moduuli 1	VP3	Mittauksen aikana muokataan moduuli 2
	Alapuoli	Moduuli 3		
Mittaus 4	Yläpuoli	Moduuli 2	VP4	Mittauksen aikana muokataan moduuli 3
	Alapuoli	Moduuli 1		
Mittaus 5	Yläpuoli	Moduuli 1	VP5	
	Alapuoli	Moduuli 2		
Mittaus 6	Yläpuoli	Moduuli 1	VP6	
	Alapuoli	Moduuli 3		

Taulukko 3. Alustava mittaus suunnitelma

Mittaukset suoritettiin kahtena päivänä toimeksiantajan tehdasalueen ulkotiloissa. Rakennetuista moduuleista käytettiin kerrallaan aina kahta moduulia. Moduulit pystytettiin päällekkäin aluspuiden päälle ja kiinnitettiin toisiinsa naulauslevyillä (kuva 5). Ensimmäisen mittausasetelman pystyttäminen vei paljon aikaa. Nostokalusto vaihdettiin sen jälkeen sopivampaan ja pystytys onnistui tämän jälkeen sujuvasti. Ensimmäisen mittauspäivän aikana saatiin mitattua kolme rakennetta, ajassa 6,5 h, kun toisena päivänä kolmen rakenteen mittaukseen kului vain 3,5 h. Yläpuolinen moduuli toimi lähetystilana ja alempi moduuli vastaanottotilana.



Kuva 5. Mittauksia varten moduulit laitettiin päällekkäin.

Mitattavia välipohjarakenteita oli yhteensä kuusi kappaletta (VP1–VP6). Mittaukset suoritettiin Akukon Oy:n toimesta, joka on FINAS-akkreditointipalvelun akkreditoima testauslaboratorio T299 (12). Ääneneristävyyden mittaukset suoritettiin standardien SFS-EN ISO 16283-1 ja 16283-2 sekä standardien SFS-EN ISO 717-1 ja 717-2 mukaisesti.

#### 8.3.1 Ilmaääneneristävyyden mittaus

Ilmaääneneristävyyden mittauksella määritellään äänenpainetasojen erotus lähetys- ja vastaanottotilan välillä käyttäen useiden mittauspisteiden keskiarvoa tai logaritmista keskiarvoa (7).

Mittauskalusto kalibroitiin päivittäin ennen mittautusta sekä mittauksen jälkeen. Mittauksissa lähetystilaan sijoitettiin kaiutin (kuva 6). Standardin mukainen vähimmäisetäisyys huoneen seinistä tuli olla vähintään 0,5 m ja vähintään 1 m lattiasta, koska se on tässä tapauksessa mitattavia tiloja erottava rakenne. Mitta otetaan tilan pinnasta kaiuttimen keskipisteeseen. (3.)



Kuva 6. Kaiutin lähetystilassa.

Äänilähteen ollessa käynnissä ensimmäisessä sijainnissaan mitattiin äänenpainetasot vastaanottohuoneesta, ja sen jälkeen lähetyshuoneesta. Mittaus suoritettiin manuaalisesti mikrofonilla skannaamalla tiettyä liikerataa pitkin poispäin huoneen reunoilta. Mittaaja piti mikrofonia käsivarsi ojennettuna suorittaessaan liikerataa, jonka keskimääräinen kesto tuli olla 30 sekuntia mittaessa taajuusalueella 100–5000 Hz (kuva 7). Matalammilla taajuuksilla, 50–80 Hz, mittauksen keskimääräinen aika tuli olla 60 sekuntia. Standardin mukaan vähintään yksi mittaus jokaista äänilähteen sijaintia kohden tuli suorittaa. (3.)



Kuva 7. Mikrofonia pidetään käsivarsi ojennettuna.



Kun ensimmäisestä äänilähteen sijainnista tarvittavat mittaukset oli suoritettu, vaihdettiin äänilähteen sijainti seuraavaan. Myös toisen äänilähdesijainnin etäisyys lattiasta tuli olla 1 m ja seinistä 0,5 m. Tämän lisäksi etäisyys ensimmäiseen mittauspisteeseen tuli olla vähintään 1,4 m. (3.)

Äänenpainetasojen mittausten lisäksi tilasta mitattiin taustamelutaso. Taustamelutasoa mitattaessa äänilähde oli suljettu ja mittaaja suoritti samaa liikerataa vastaanottohuoneessa, kuin äänenpainetasoa mitattaessa. Näin mittaajan aiheuttama vaikutus taustameluun saatiin minimoitua. (3.)

Vastaanottotilassa suoritettiin myös jälkikaiunta-ajan mittaus. Jälkikaiunta-ajan mittauksessa äänilähde sijoitettiin vastaanottotilaan. Mittauksissa mitattiin kuudesta eri sijainnista aika, jona äänilähteen tilaan synnyttämä äänenpainetaso laskee 60 dB (7).

### 8.3.2 Askelääneneristävyyden mittaus

Askelääneneristävyyden mittauksella määritellään äänenpainetason keskiarvo huoneen keskialueella, kun äänilähteenä on askeläänikoje. Askelääneneristysmittauksissa tarvitaan myös taustamelutaso. Tämä mitattiin ilmaääneneristävyyden yhteydessä. Askeläänilähteenä käytettiin standardin mukaista askeläänikojetta, jossa on viisi 500 g painoista vasaraa. Jokainen vasara putoaa vapaasti pystysuoraan 40 mm korkeudelta lattiaan kahdesti sekunnissa, joten koje kohdistaa lattiaan 10 iskua sekunnissa. (7.) (13.)

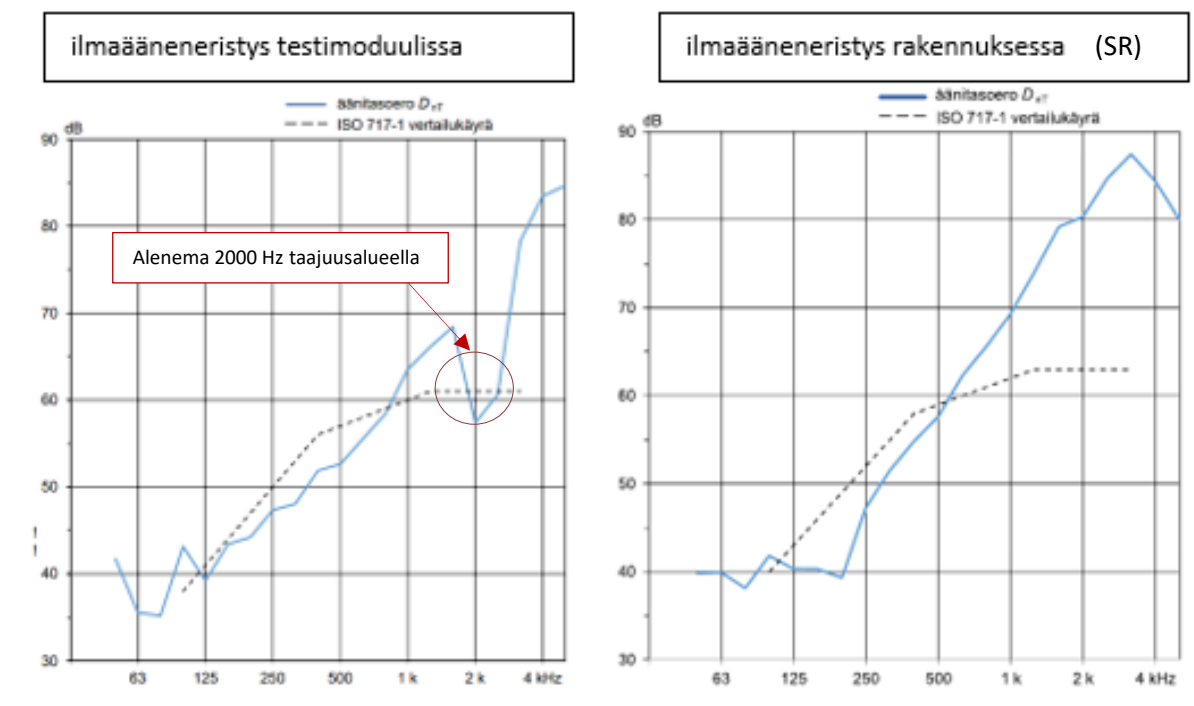
Askeläänikoje sijoitettiin vähintään 0,5 m huoneen seinistä siten, että vasaralinja asettuu vinosti 45° kulmaan lattiavasoihin nähden. Kojе sijoitettiin yhteensä neljään eri sijaintiin, jotka valittiin sattumanvaraisesti ja joiden keskinäinen etäisyys on vähintään 0,7 m. Askeläänikojeen tuottama äänenpainetaso mitattiin vastaanottohuoneen keskialueelta vähintään yhden kerran jokaista äänilähdesijaintia kohden. Mittaus suoritettiin käyttäen samaa manuaalista liikeratamenetelmää kuin ilmaääneneristysmittauksessa. (14.)

## 8.4 Tulosten tarkastelu

Rakenteen ääneneristävyyden mittaustulokset ja vaatimukset esitetään yhtenä lukuna. Yksilukui-nen arvo saadaan vertaamalla taajuuskaistoittain mitattuja äänitasoja standardissa ISO 717-1 ja 2 esitettyyn vertailukäyrään. Tämä tapahtuu siirtämällä vertailukäyrää 1 dB:n portain sellaiseen

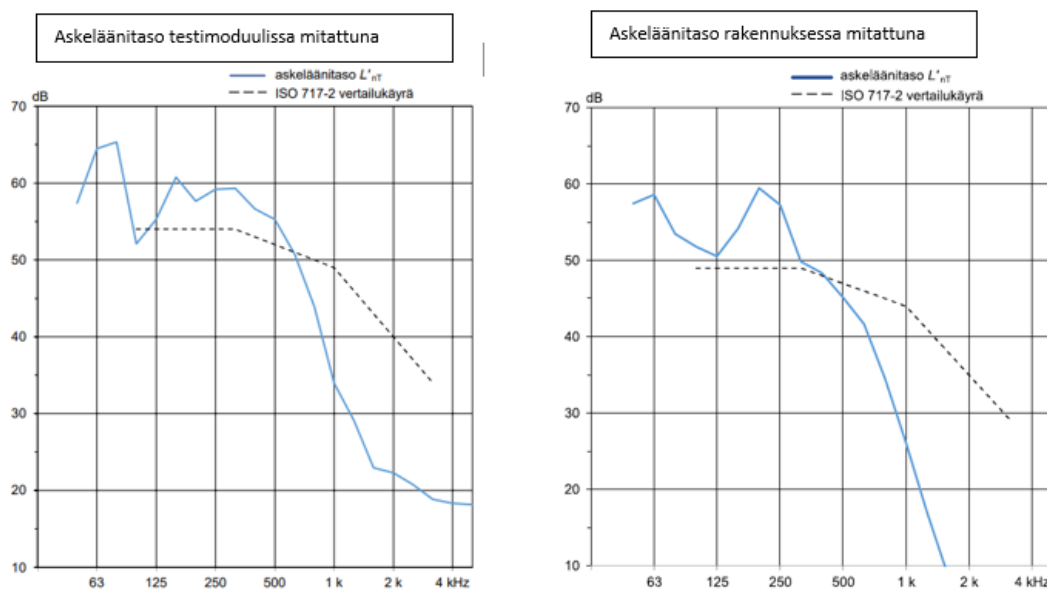
asemaan, että mitattujen äänitasojen ei-toivottujen poikkeamien summa ei ylitä 32,0 dB. Ei-toivottu poikkeama ilmaääneneristävyyden mittauksessa tarkoittaa pienempää arvoa kuin vertailukäyrän arvo. Askelääneneristyksessä ei-toivottu poikkeama taas on suurempi arvo kuin vertailukäyrän arvo. Kun vertailukäyrä ilmaääneneristyksen osalta on saatu sijoitettua korkeimpaan mahdolliseen asemaan, saadaan ilmaääneneristävyydelle äänitasoeroluku  $D_{nT,W}$  luettua vertailukäyrältä 500 Hz:n kohdalta. Askeläänitaso  $L'_{n,w}$  luetaan vertailukäyrän 500 Hz:n kohdalta, kun vertailukäyrä on sijoitettu alimpaan mahdolliseen asemaan. (14.) (2.)

Testimoduuleissa suoritettujen mittausten tulokset poikkeavat rakennuksessa (SR) samanlaiselle rakenteelle tehdyistä mittaustuloksista. VP1:lle määritetty äänitasoeroluku  $D_{nT,W}$  valmiissa rakennuksessa (SR) vaihteli 58–64 dB välillä, kun testimoduulissa VP1:lle tehdyistä mittauksista määritetty äänitasoeroluku  $D_{nT,W}$  oli 57 dB. Testimoduulista VP1 määritetty ilmaääneneristyksen äänitasoeroluku  $D_{nT,W}$  on 1–7 dB huonompi kuin rakennuksessa (SR) määritetyn VP1 rakenteen. Testimoduulien ilmaääneneristysmittaustulosten äänitasoerokäyrällä on havaittavissa selvä alenema 2000 Hz taajuusalueella (kuva 8). Alenema toistuu kaikkien testimoduuleissa mitattujen rakenteiden (VP1–VP6) äänitasoerokäyrällä. Tällaista alenemaa ei esiinny VP1:lle rakennuksessa (SR) tehtyjen mittausten äänitasoerokäyrässä.



Kuva 8. VP1:n äänitasoerokäyrät testimoduulissa vasemmalla ja valmiissa rakennuksessa (SR) oikealla.

Askeläänitason  $L'_{nT}$  mittaustuloksista ei ollut havaittavissa samanlaisia poikkeamia kuin ilmaääneneristyksen mittauksissa (kuva 9). Testimoduuleissa mitatut askeläänitasot samanlaiselle rakenteelle olivat kuitenkin huonommat kuin valmiissa rakennuksessa (SR) mitatut. Testimoduulissa mitatuista askeläänitasoista vertailurakenteelle (VP1) määritelty askeläänitasoluku  $L'_{nT,w}+C_{I,50-2500}$  oli 56 dB, kun valmiissa rakennuksessa (SR) mitatuista arvoista määritelty askeläänitasoluvut  $L'_{nT,w}+C_{I,50-2500}$  VP1:lle vaihtelivat 45–53 dB välillä. Joten testimoduulissa VP1:stä määritelty askeläänitaso  $L'_{nT,w}+C_{I,50-2500}$  oli 3–11 dB huonompi kuin valmiissa rakennuksessa (SR) VP1:stä mitatuista askeläänitasoista määritelty askeläänitasoluku  $L'_{nT,w}+C_{I,50-2500}$ .



Kuva 9. VP1 askeläänitasot mitattuna testimoduulissa ja valmiissa rakennuksessa.

Taulukossa 4 on esitetty kooste testimoduulien mittaustulosten perusteella määritetyistä äänita-soeroluista, askeläänitasoluista sekä (A 796/2017) mukaiset vaatimukset.

Lähetystila	Vastaanottotila		Mitattu $D_{nT,w}$ [dB]	Vaatus $D_{nT,w}$ [dB]	Mitattu $L'_{nT,w+C_{l,50-2500}}$ [dB]	Vaatus $L'_{nT,w+C_{l,50-2500}}$ [dB]
Moduuli 2	Moduuli 1	VP1	57	55	56	53
Moduuli 3	Moduuli 2	VP2	56	55	56	53
Moduuli 1.1	Moduuli 3	VP3	57	55	54	53
Moduuli 2.1	Moduuli 1.1	VP4	58	55	56	53
Moduuli 1.1	Moduuli 2.1	VP5	58	55	52	53
Moduuli 1.1	Moduuli 3.1	VP6	60	55	52	53

Taulukko 4. Akukon Oy:n testimoduulien mittaustuloksista määrittämät äänitasoeroluvut, aske-  
läänitasoluvut ja ympäristöministeriön asetuksen mukaiset vaatimukset

Jotta rakenne täyttää ääneneristävyydelle asetetut vaatimukset, tulee ilmaääneneristävyyttä kuvaavan äänitasoeroluvun  $D_{nT,w}$  olla suurempi kuin pienimmän sallitun äänitasoeroluvun. Mittauksista saatujen tulosten mukaan kaikkien testirakenteiden ilmaääneneristävyyden äänitasoeroluvut  $D_{nT,w}$  ovat suurempia kuin pienin sallittu äänitasoeroluku, joten mitatut välipohjarakenteet täyttävät ilmaääneneristykselle asetetut vaatimukset. Standardin ISO 12999-1 mukaan standardien ISO 16283-1 ja ISO 717-1 mukaan määritetyn ilmaääneneristystä kuvaavan äänitasoeroluvun  $D_{nT,w}$  mittausepävarmuus on  $\pm 0,9$  dB.

Jotta rakenne täyttää askelääneneristävyydelle asetetut vaatimukset, tulee askelääneneristävyyttä kuvaavan askeläänitasoluvun  $L'_{nT,w+C_{l,50-2500}}$  olla pienempi kuin suurin sallittu askeläänitasoluku. Standardin ISO 12999-1 mukaan standardien ISO 16283-2 ja ISO 717-2 mukaan määritetyn askeläänitason  $L'_{nT,w+C_{l,50-2500}}$  mittausepävarmuus on  $\pm 1,0$  dB. Kun huomioidaan mittausepävarmuus  $\pm 1,0$  dB mittauksista saatujen tulosten mukaan kolme välipohjarakenteista (VP3, VP5 ja VP6) täyttävät ääneneristykselle asetetut vaatimukset mitattaessa testimoduulissa. Kuitenkin VP1 rakenne on mitattu valmiissa rakennuksessa (SR) ja niiden mittausten mukaan se täyttää askelääneneristävyydelle asetetut vaatimukset. Kun testimoduuleista saatuja mittaustuloksia verrataan testimoduulissa mitatun VP1 mittaustuloksiin, kaikkien rakenteiden (VP2–VP6) askeläänitaso on samaa luokkaa tai parempi.

VP1 ja VP 4 rakenteiden eroavuus on sisäverhouslevyn materiaalissa. Sisäverhouslevyn vaihdolla Paracem-levystä kipsilevyyn ei ollut vaikutusta askeläänitasolukuun  $L'_{nT,w+C_{l,50-2500}}$ . Ilmaääneneristävyyden äänitasoeroluku  $D_{nT,w}$  parani 1 dB verran.

VP2 ja VP3 rakenteet ovat keskenään samanlaiset lukuun ottamatta CLT-levyn paksuutta. VP3 rakenteessa CLT-levy on 20 mm paksumpi kuin VP2:ssa. Tässä tutkimuksessa CLT-levyn paksuuden kasvattaminen 20 mm on vaikuttanut ilmaääneneristävyyteen parantamalla äänitasoerolukua  $D_{nT,W}$  1 dB verran. Sama rakennemuutos on vaikuttanut askelääneneristävyyteen parantamalla askeläänitasolukua  $L'_{nT,W}+C_{l,50-2500}$  2 dB verran.

Rakenteiden VP2 ja VP5 välinen vertailu osoittaa, että tässä tutkimuksessa mitattuna CLT-levyn alapuolelle asennetut kipsilevyt parantavan ilmaääneneristävyyden äänitasoerolukua  $D_{nT,W}$  2 dB: 56:sta 58 dB:in. Askeläänitasoluku paranee  $L'_{nT,W}+C_{l,50-2500}$  4 dB: 56:sta 52 dB:in. Tässä tutkimuksessa VP3 ja VP6 välillä tehtävä vertailu kertoo CLT-levyn yläpuolelle asennettujen kipsilevyjen vaikuttavan ääneneristykseen siten, että ilmaääneneristyksen osalta äänitasoeroluku  $D_{nT,W}$  paranee 3 dB: 57:stä 60 dB:in, ja askelääneneristävyyden osalta askeläänitasoluku  $L'_{nT,W}+C_{l,50-2500}$  paranee 2 dB: 54:stä 52 dB:in.

Taulukossa 5 on esitetty yhteenveto rakenteiden äänitasoeroluista  $D_{nT,W}$ , askeläänitasoluista  $L'_{nT,W}+C_{l,50-2500}$  sekä materiaalikustannuksista. Taulukossa vihreällä pohjalla näkyvät arvot täyttävät ääneneristävyydelle asetetut vaatimukset.

Rakenne	$D_{nT,W}$	$L'_{nT,W}+C_{l,50-2500}$	€/m <sup>2</sup>
VP1	57	56	176,3
VP2	56	56	183,3
VP3	57	54	193,1
VP4	58	56	155,1
VP5	58	52	200
VP6	60	52	203,2

Taulukko 5. Yhteenveto rakenteiden äänitasoeroluista  $D_{nT,W}$ , askeläänitasoluista  $L'_{nT,W}+C_{l,50-2500}$  ja materiaalikustannuksista.

Standardin ISO 12999-1:2014 mukaan standardin ISO 16283-1 ja 2 sekä ISO 717-1 ja 2 mukaisella kenttämenetelmällä määritetyn ilmaääneneristysluvun  $D_{nT,W}$  mittausepävarmuus on  $\pm 0,9$  dB ja askeläänitasoluvun  $L'_{nT,W} \pm 1,0$  dB. Tämän tutkimuksen perusteella voidaan todeta, että VP3, VP5 ja VP6 täyttävät ääneneristävyydelle asetetut vaatimukset ja niitä voitaisiin käyttää asuinrakennuksessa huoneistojen välisenä välipohjarakenteena. Rakenteiden hyvän ääneneristävyyden ratkaiseva tekijä on todennäköisesti niissä käytetty kipsilevy. Kipsilevyn koinsidenssin rajataajuus on

yleensä yli 2000 Hz, jolloin ääneneristävyyttä saavutetaan koko rakennusakustiikan kannalta tärkeällä taajuualueella (10). Materiaalikustannuksiltaan VP3 on näistä materiaalikustannuksiltaan edullisin ja VP5 on edullisempi kuin VP6.

Tämän tutkimuksen perusteella voidaan myös todeta, että VP1, VP2 ja VP4 eivät täyttäneet ääneneristävyydelle asetettuja vaatimuksia askeläänitason osalta, eikä niitä voida ilman jatkotutkimuksia käyttää asuinrakennuksessa huoneistojen välisenä välipohjarakenteena. VP1:n osalta tämän tutkimuksen tulos on ristiriidassa aikaisempaan tutkimukseen nähden. Valmiissa rakennuksessa (SR) mitattuna VP1 on täyttänyt ääneneristykselle asetetut vaatimukset. Syitä tähän ristiriitaan voi aiheuttaa mm. testimoduulien koko, moduulien rakenne, käytetty mittaussuunnitelma ja mahdolliset valmistusvirheet.

Vertailurakenteen VP1 mittaustulokset testimoduuleista osoittautuivat heikommiksi kuin valmiissa rakennuksessa (SR) VP1:lle tehtyjen mittausten tulokset. Tähän voisi syynä olla esimerkiksi tilan pieni koko ja pieneen tilaan tarkoitettujen lisämittausten puute, puutteet rakenteiden tiiveydessä esimerkiksi nurkkien osalta, käytetyn oven ääneneristävyys ja moduulien välisen värinäeristuksen erilaisuus verrattuna valmiiseen rakennukseen. Kuitenkin mitatuista rakenteista VP3, VP5 ja VP6 täyttivät ääneneristävyydelle asetetut vaatimukset jo testimoduulissa suoritetuissa mitauksissa. Tässä tutkimuksessa VP1:lle saatujen mittaustulosten perusteella määritetyt ilmaääneneristävyyden äänitasoeroluku  $D_{nT,w}$  oli 1–7 dB huonompi ja askeläänitasoluku  $L'_{nT,w}+C_{l,50-2500}$  oli 3–11 dB huonompi kuin valmiissa rakennuksessa (SR) saatujen mittaustulosten perusteella määritellyt äänitasoero- ja askeläänitasoluvut.

Rakenteiden mittaustuloksista VP4 tuloksen odotin olevan heikompia kuin rakenteen VP1. VP1 rakenne on kaksinkertainen, kun VP4 rakenne on kolminkertainen ja massa-jousi-massaresonansseja pitäisi olla enemmän. Teorian mukaan niiden tulisi heikentää ääneneristävyyttä, tätä ei kuitenkaan tässä mittaustuloksessa ole havaittavissa.

Tämän tutkimuksen perusteella voidaan olettaa CLT-levyn paksuuden kasvattamisen 20 mm:llä todennäköisesti parantavan ääneneristävyyttä hiukan. Ilmaääneneristävyyttä kuvaavan äänitasoeroluvun parannus oli tässä tutkimuksessa 1 dB ja askeläänitasoluku parani 2 dB verran. CLT-levyn paksuuden kasvattaminen 20 mm:llä lisäsi materiaalikustannuksia 10 €/m<sup>2</sup>. Koska tämän tutkimuksen perusteella, vertailurakenne VP1:lle määritetyt äänitasoeroluku  $D_{nT,w}$  ja askeläänitasoluku  $L'_{nT,w}+C_{l,50-2500}$  ovat paremmat valmiissa rakennuksessa (SR) on todennäköistä, että pelkkä CLT-levy moduulin yläpohjarakenteena täyttäisi ääneneristykselle asetetut viranomaismääräykset, kun mittaukset suoritettaisiin valmiissa rakennuksessa. CLT-levyä ei sellaisenaan kuitenkaan

voida käyttää puukerrostalossa moduulin yläpohjarakenteena, eli alakattona, koska puukerrostalon palomääräykset edellyttävät sisäpuolisille pinnoille suojaverhous.

## 9 Pohdinta

Vaikka puukerrostalojen rakentaminen Suomessa onkin lisääntynyt viime vuosina, ei niiden osuus kaikista rakennetuista kerrostaloista ole suuri. Syyksi tähän sanotaan olevan puurakentamisen kalleuden ja osaajien puutteen. Toteutetuista hankkeista suuri osa on ollut ns. pilottihankkeita, joiden kustannukset ovat olleet suurempia, koska ei ole ollut valmiita toimintamalleja tai ratkaisuja. Uskon että teollisen valmistuksen ja tuotekehityksen kautta on mahdollista alentaa puukerrostalojen rakentamisen kustannuksia ja sitä kautta puukerrostalojen rakentaminen voisi yleistyä. Tässä työssä pyrittiinkin välipohjan tuotekehitykseen, jotta rakentamisen kustannuksia saataisiin alennettua.

Päätavoitteena oli mittausten perusteella tutkia ja vertailla erilaisten tilaelementtirakenteiden välipohjarakenteiden ääneneristävyyttä. Mittaukset suoritettiin testimoduuleissa, joiden pieni koko todennäköisesti kuitenkin vaikutti mittaustuloksiin huonontamalla niitä. Kolme rakennetta täytti ääneneristävyydelle asetetut vaatimukset, kun mittaustuloksia verrattiin ympäristöministeriön asetuksessa annettuihin vaatimuksiin. Testimoduulissa saatuja mittaustuloksia verrattaessa valmiissa rakennuksessa (SR) mitattuihin arvoihin jäivät testimoduulin arvot huonommaksi. Käyttöön valmista välipohjarakenneratkaisua ei tästä tutkimuksesta saatu, mutta toimeksiantaja sai kuitenkin alustavaa tietoa siitä, millainen näiden rakenteiden ääneneristävyys on ja voi hyödyntää sitä jatkossa tekemällä esimerkiksi jatkotutkimuksia. Kustannusten tarkastelu rajattiin koskemaan ainoastaan materiaalien kustannuksia, joten kustannustehokkuuden tarkastelu jäi siltä osin va- jaaksi, ettei tuotannollisia seikkoja otettu huomioon.

Opinnäytetyön teoriataustan tavoitteena oli selvittää välipohjarakenteiden ääneneristävyyteen vaikuttavia seikkoja ja suunnitteluvaiheen ääneneristävyyden laskentaa. Teoriatausta on mielestäni laaja, ja siihen tutustuminen veikin suuren osan työhön varaamastani ajasta. Teoreettisen tarkastelun tuloksena tuli esille, että ääneneristävyyteen vaikuttavia seikkoja välipohjarakenteissa on rakennusosan massa, rakenteiden tiiviys, rakenteiden liittyminen muihin rakenteisiin sekä läpiviennit. Esimerkiksi massan kaksinkertaistamisen sanotaan parantavan ilmaääneneristävyyttä 4–6 dB. Rakenteissa olevilla raoilla taas on ääneneristystä heikentävä vaikutus. Läpivientien ei tulisi olla suorassa kosketuksessa rakenteisiin, ettei runkoääni pääse etenemään niitä pitkin heikentäen rakenteen ääneneristystä. Puurakenteet ovat kevyitä ja monikerroksisia, joten niissä vaikuttavat lisäksi myös kerrosten jäykkyys, väliaineet, kytkennät sekä kerrosten keskinäinen etäisyys. Esimerkiksi kerrosten välisen ilmatilan suurentaminen tekee siitä joustavamman, jolloin se välittää vähemmän värähtelyä toiselle rakennepuoliskolle ja parantaa näin ääneneristystä.



Tavoitteenani oli myös rakenteiden ääneneristävyyden laskennallinen arviointi. Puurakenteet ovat kevyitä ja kerroksellisia, mikä tekee niiden ääneneristävyyden laskennallisesta arvioinnista todella haastavaa eikä askeläänen määrittämiseen laskennallisesti monen lähteen mukaan ole olemassa luotettavaa menetelmää. Löysin kuitenkin artikkelin, jossa mainittiin tällaisen olevan kehitetty ja se on käytössä yhdellä johtavista insinööritoimistoista (15). Kuitenkin opinnäytetyön laajuus olisi kasvanut liian suureksi ja aikataulu venynyt liian pitkäksi, joten päätin luopua rakenteiden laskennallisesta arvioinnista. Laskennallinen rakenteiden ääneneristävyyden arvioiminen olisi kuitenkin kustannustehokkaampaa kuin niiden mittaaminen.

Koska välipohjarakenteiden suunnittelun laskennallinen määrittäminen ei tämän opinnäytetyön aikataulun puitteissa ollut mahdollista, päädyin kokeilupohjaiseen suunnitteluun. Tutkin valmiita rakenneratkaisuja mm. RunkoPES:stä ja niiden pohjalta kehittelemään ehdotuksia. Yläpohjan osalta löydettiin mitattavia vaihtoehtoja, mutta lattiarakenteen askelääneneristävyyteen en onnistunut löytämään sopivaa vaihtoehtoa, jota toimeksiantaja olisi halunnut mitata. Mittauspäivät onnistuivat alkuvaikeuksien jälkeen hyvin. Tässä yhteydessä moduulien pieni koko oli eduksi ja moduulit onnistuttiin pystyttämään ja vaihtamaan sujuvasti. Myös rakenteiden muutostyöt onnistuivat ilman odotusaikoja.

Oma tietämykseni rakenteiden ääneneristyksestä, niihin liittyvistä määräyksistä sekä niiden mittaamisesta, on kasvanut tämän opinnäytetyön aikana huomattavasti. Sain myös paljon uutta tietoa välipohjarakenteista ja rakennusmateriaaleista. Välipohjarakenteiden tuotekehittely ääneneristyksen näkökulmasta, ei mielestäni ole helppoa. Uskon kuitenkin, että se on kannattavaa ja sen avulla löydetään uusia kustannustehokkaampia ratkaisuja tilaelementtirakenteisen puukerrostalon välipohjarakenteeksi.

Tässä tutkimuksessa käytettiin mittausmenetelmänä standardin mukaista menetelmää, joka standardin ISO 16283-1 ja 2 mukaan soveltuu yli 25 m<sup>3</sup> kokoisille tiloille. Standardissa on esitetty lisämittausmenetelmä pienille alle 25 m<sup>3</sup> ja yli 10 m<sup>3</sup> kokoisille tiloille, jonka mukaan olin testimoduulit suunnitellut. Jatkotutkimuksena näiden lisämittausten vaikutus mittauksiloksiin olisikin mielenkiintoisia selvittää tulevaisuudessa tai vertailla suurempien saman rakenteisten testimoduulien mittauksilosten vastaavuutta keskenään. Lisätutkimuksena olisi myös mielenkiintoista tietää, minkä verran testimoduuleissa mitattujen rakenteiden ääneneristävyyden mittauksilokset muuttuvat mitattaessa valmiissa rakennuksessa.

## Lähteet

- (1) Lahtela T. Ääneneristys puutalossa.: Wood Focus Oy; 2004.
- (2) SFS-EN ISO 717-1:2020 Acoustics. Rating of sound insulation in buildings and of building elements. Part 1: Airborne sound insulation.
- (3) SFS-EN ISO 16283-1:2014: Acoustics. Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements. Part1: Airborne sound insulation.
- (4) Ääniympäristö, Ympäristöministeriön ohje rakennuksen ääniympäristöstä. Helsinki: Ympäristöministeriö; 2018.
- (5) Mikko Kylliäinen, Pekka Latvanne, Antti Kuusinen, Toni Kekki. Puukerrostalojen ääneneristys, Asiantuntijaselvitys. Karelia-ammattikorkeakoulu 2017.
- (6) Woodcomp yhtiöt. Saatavilla 22.5.2021: <https://www.woodcomp.fi>.
- (7) Kylliäinen M, Hongisto V. Rakennusten akustinen suunnittelu: akustiikan perusteet. Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien liitto; 2007.
- (8) L 132/1999.Maankäyttö- ja rakennuslaki.
- (9) A 796/2017. Ympäristöministeriön asetus rakennuksen ääniympäristöstä.
- (10) Kylliäinen Mikko. Talonrakentamisen akustiikka. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennetekniikan laitos 2006:3-205.
- (11) Siikanen U. Puurakentaminen. 2., uudistettu painos ed. Helsinki: Rakennustieto Oy; 2016.
- (12) Akukon Oy | Äänimittaukset ja värinämittaukset. Saatavilla 11.5.2021: <https://www.akukon.fi/fi/Mittaukset>.
- (13) SFS-EN ISO 16283-2:2020 Acoustics. Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements. Part 2: Impact sound insulation.
- (14) SFS-EN ISO 717-2:2020 Acoustics. Rating of sound insulation in buildings and of building elements. Part 2: Impact sound insulation.
- (15) Latvanne, P. Kylliäinen, M. (2019). Puurakentaja, välipohjan askelääneneristävyttä voi parantaa kustannustehokkaasti. Saatavilla 9.6.2021 <https://www.ains.fi/asiantuntija-artikkelit/puurakentaja-valipohjan-askelaaneneristavyytta-voi-parantaa>.