



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

PEKKA LATVANNE  
PUUVÄLIPOHJIEN AKUSTISET OMINAISUUDET JA LASKENTA-  
MALLIT

Diplomityö

Tarkastajat:  
professori Juha Vinha  
yliassistentti Mikko Kylliäinen  
Tarkastajat ja aihe hyväksytty  
Talouden ja rakentamisen tiedekun-  
taneuvoston kokouksessa 5. maa-  
liskuuta 2014



## TIIVISTELMÄ

**Pekka Latvanne:** Puuvälipohjien akustiset ominaisuudet ja laskentamallit  
Tampereen teknillinen yliopisto  
Diplomityö, 164 sivua, 206 liitesivua  
Toukokuu 2015  
Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma  
Pääaine: Rakennesuunnittelu  
Tarkastajat: professori Juha Vinha ja tekniikan lisensiaatti Mikko Kylliäinen

Avainsanat: puurakenteet, askelääneneristys, rakennusakustiikka

Yksi puurakentamisen merkittävimmistä haasteista on rakennusten ääneneristys. Tutkimusten mukaan puurakennusten ääneneristävyysongelmat koetaan haittatekijäksi myös suomalaisten rakennusalan toimijoiden keskuudessa. Puuvälipohjien askelääneneristävyys on yksi tärkeimmistä rakennuksen ääneneristyksen osa-alueista.

Tässä tutkimuksessa puuvälipohjien askelääneneristävyysongelmaa on lähestytty laaja-alaisesti. Työn tarkoituksena oli selvittää kirjallisuustutkimuksen avulla, millaisia laskentamalleja puuvälipohjien askelääneneristävyysongelmaan on tällä hetkellä saatavilla, millaisia subjektiivisia tutkimusmenetelmiä puuvälipohjien askelääneneristävyysongelmaan on käytetty, ja tärkeimpänä, miten eri puuvälipohjien rakenteelliset ominaisuudet vaikuttavat askelääneneristävyysongelmaan. Näiden lisäksi kehitettiin TTY:llä tekniikan lisensiaatti Mikko Kylliäisen ideoimaa semi-empiiristä puuvälipohjien askelääneneristävyysongelmaan laskentamallia.

Kirjallisuustutkimuksen perusteella nykyiset puuvälipohjien laskentamallit eivät vielä sovellu käytännön suunnittelutyökaluiksi. Tutkitut laskentamallit ovat teoreettisia ja lähtöarvoilla on huomattava vaikutus laskentatulosten tarkkuuteen. Subjektiiviset tutkimukset ovat osoittaneet, että pienten taajuuksien huomioonottaminen puuvälipohjien askelääneneristävyysongelmaan arvioinnissa on tärkeää.

Puuvälipohjien askelääneneristävyysongelmaan kannalta merkittävien rakenteellisten ominaisuuksien määrittämisessä käytettiin laajaa eri tutkimuksista koottua mittaustulostietokantaa: 148 puuvälipohjan 1/3-oktaaveittain mitatut askeläänitasot. Tärkeimmät ominaisuudet ovat lattiapalkkien yläpuolisen rakenteen ja alakaton yhteismassa. Mitä enemmän joustavia liitoksia välipohjarakenne sisältää, sen parempi on välipohjan askelääneneristävyys. Joustavista liitoksista tärkeimpiä ovat alakaton liitos palkistoon ja raskaan pintalaatan asennus raakavälipohjan päälle. Lattiapäällysteen parannusvaikutus riippuu raakavälipohjalaatan akustisista ominaisuuksista.

Kylliäisen ideoiman laskentamallin kehitystyön perusteella puurakenteisen välipohjan alakattorakenteen vaikutus askeläänitasoon voidaan ottaa huomioon sen ilmaääneneristävyysongelmaan perusteella. Ilma- ja askeläänitasot korreloivat parhaiten, kun alakatto oli asennettu joustavasti. Muiden laskentamalliin liittyvien parametrien huomioonottaminen vaatii lisätutkimusta.

## ABSTRACT

**Pekka Latvanne:** The acoustical properties and the calculation models of the wooden intermediate floor constructions

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 164 pages, 206 Appendix pages

May 2015

Master's Degree Program in Civil Engineering

Major: Structural Engineering

Examiners: Professor Juha Vinha and Licentiate of Science (Tech.) Mikko Kylliäinen

**Keywords:** wooden constructions, impact sound insulation, building acoustics,

One of the main challenges of wood framed buildings is sound insulation, especially impact sound insulation of the intermediate floors. This disadvantage is also admitted by Finnish construction industry. In several researches it has been shown that the impact noise derived from other dwellings is the most annoying source of noise in the residential buildings.

There were four main topics in this thesis. Firstly, the kinds of calculation models available for calculation of the impact sound insulation of the wooden floors were surveyed. It was found out that the present impact sound insulation calculation models are notably theoretical for practical designing.

Secondly, the correlation of subjective and objective evaluations of the impact sound insulation of the wooden floors was researched based on a literature research. As a result, the studies have indicated that lowering the frequency range, used in objective evaluation, towards 50 Hz improves the correlation of subjective and objective evaluations.

Thirdly and most profoundly, it was investigated, which structural properties have the most significant effect on the wooden intermediate floor's impact sound insulation. This part of the research was also conducted by way of a literature research. The database, collected from several studies, included 148 wooden floor constructions.

The key factors of improving the impact sound insulation of a wooden intermediate floor are the masses of both ceiling and floor surface structure. In addition, the more resilient junction and layers the floor contains the better is the impact sound insulation of the floor. The ceiling should be installed resiliently, and the uncovered heavy weight slab should not be installed without a floating layer on wooden floor. The improving effect of the floor covering materials depends on the acoustical properties of the layer on top of which the floor cover is installed.

Fourthly, the calculation model of the impact sound insulation of wooden floors devised by Licentiate of Science Mikko Kylliäinen, was tested and developed. When developing the calculation model of Kylliäinen it was indicated, that the impact sound improvement of the ceiling constructions equals to airborne sound improvement of the structure. This simplifies the calculation model. Other parts of the calculation model need additional research.



## ALKUSANAT

Tämä tutkimus on tehty Tampereen teknillisen yliopiston rakennustekniikan laitokselle osana laitoksen perustutkimusta. Tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää puurakennusten akustisen tutkimuksen nykytilaa ja luoda mahdollisuuksia puurakenteiden akustiikan tutkimukselle TTY:llä. ”Puuvälipohjien akustiset ominaisuudet” on aihealueena hyvin laaja ja tässä työssä on käsitelty useita eri osa-alueita. Työn pääpaino oli välipohjan askelääneneristävyyyteen vaikuttavien tekijöiden selvittämisessä ja Kylliäisen ideoiman laskentamallin tutkimisessa.

Tampereen teknillisen yliopiston tukisäätiö on tukenut tutkimustyötäni tutkimusapurahalla, josta olen erittäin kiitollinen. Kiitän tästä mahdollisuudesta myös professori Ralf Lindbergiä. Apuraha mahdollisti täyspäiväisen tutkimustyön tekemisen. Esitän suurimmat kiitokset myös ohjaajalleni Mikko Kylliäiselle hyvistä ohjeista ja palautteista sekä kannustuksesta ja kärsivällisyydestä.

Haluan kiittää myös kollegoita Henry Niemeä, Ville Kovalaista, Eero Tuomista, Janne Saarelaista ja ”Kahvikerhon” poikia vertaistuesta opinnäytetyöprojektissa sekä erityisesti Kovalaista laskentaohjelmien käytön opastuksesta. Esitän kiitokset myös koko rakennustekniikan laitoksen väelle innostavasta ilmapiiristä ja lounasseurasta.

Matilda, Jedi ja kotiväki ovat tukeneet minua koko tämän vuoden kestäneen projektin ajan. Työt venyivät useasti myöhään iltaan ja joskus yöhönkin, mutta silti sain osakseni kannustusta ja ansaitun juoksulenkin Jedin kanssa, siispä valtavat kiitokset kannustuksesta, joustavuudesta ja ymmärryksestä!

Tampereella, 13.5.2015

Pekka Latvanne

## SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO .....	1
1.1	Asuinrakennusten äänilähteet.....	1
1.2	Puurakentaminen ja puuvälipohjat .....	2
1.3	Puukerrostalot Suomessa.....	3
1.4	COST-hankkeet .....	5
1.5	Askelääneneristävyyden arviointi .....	5
1.6	Tutkimuksen tavoitteet.....	6
2.	SUBJEKTIIVISET TESTAUSMENETELMÄT .....	7
2.1	Historia.....	7
2.2	Tutkimusmenetelmät .....	11
2.2.1	Kuuntelukokeet .....	12
2.2.2	TU 0901-hankkeen mukainen kuuntelukoe .....	15
2.2.3	Kyselyt .....	16
2.2.4	TU 0901-hankkeen mukainen kyselylomake.....	18
2.3	Subjektiiivisten ja objektiivisten mittalukujen korrelaatio.....	19
2.4	Johtopäätökset .....	23
3.	ASKELÄÄNENERISTÄVYYDEN LASKENNALLINEN ARVIOINTI .....	25
3.1	Johdanto .....	25
3.2	Teoreettinen levyn ja palkin värähtely .....	26
3.2.1	Levyn värähtely diffuusissa äänikentässä .....	27
3.2.2	Levyn värähtely mekaanisesta herätteestä .....	34
3.2.3	Palkin värähtely.....	37
3.3	Puurakenteisen palkki-levy-yhdistelmän värähtely .....	38
3.3.1	Mekaaninen mobiliteetti .....	40
3.4	Energia-laskentamallit.....	42
3.4.1	Puuvälipohjien mallintaminen SEA-malleilla .....	44
3.5	Deterministiset laskentamallit .....	46
3.6	Parametriset askeläänitasomittaukset puurakenteisille välipohjille .....	48
3.6.1	Välipohjapalkit.....	50
3.6.2	Alakaton kiinnitystapa .....	58
3.6.3	Alakaton massa .....	63
3.6.4	Lattialevyt ja raskaat pintalaatat .....	68
3.6.5	Kelluvat lattiat.....	74
3.6.6	Lattiapäällysteet .....	78
3.6.7	Absorptiomateriaali välipohjan sisällä.....	83
3.6.8	Laboratoriomittaukset ja niiden epävarmuustekijät .....	87
3.6.9	Askeläänitasomittausten uusittavuus ja toistettavuus .....	89
3.6.10	ISO standardoidut askeläänepainetasojen laboratoriomittaukset.....	92
3.7	Johtopäätökset .....	94

3.7.1	Parametriset tutkimukset.....	95
4.	EHDOTUS ASKELÄÄNENERISTÄVYYDEN LASKENTAMALLIKSI.....	100
4.1	Ideoitu laskentamalli .....	100
4.2	Lattiapäällysteen parannusluku $\Delta Lp$ .....	101
4.2.1	Parannusluvun mittaaminen ISO 10140 perusteella .....	102
4.2.2	Parannusluku $\Delta Lp$ parametrusten tutkimusten avulla .....	102
4.3	Alakaton parannusluku $\Delta Lak$ .....	105
4.3.1	Parannusvaikutus 1/3-oktaavikaistoittain .....	108
4.4	Välipohjan ilmaääneneristävyden laskenta ”Raimo”-lla.....	110
4.4.1	Laskentaan liittyvät reunaehdot .....	114
4.4.2	Vertailu mittaustuloksiin.....	117
4.4.3	Johtopäätökset.....	126
4.5	Kelluvan lattian parannusluku.....	129
4.5.1	Cremer et al. teoria.....	129
4.5.2	EN 12354-2 laskentatapa .....	131
4.5.3	Kristenssen ja Rindelin laskentatapa .....	132
4.5.4	Laskentatapojen vertailu .....	133
4.5.5	Johtopäätökset.....	137
4.6	Ideoidun laskentamallin testaus .....	138
4.6.1	Alakatto .....	138
4.6.2	Lattiapäällyste ja alakatto.....	143
4.7	Johtopäätökset .....	145
5.	YHTEENVETO .....	148
5.1	Askelääneneristävyden subjektiivinen arviointi.....	148
5.2	Askelääneneristävyyteen vaikuttavat rakenteelliset tekijät.....	149
5.3	Askelääneneristävyden laskentamallit .....	150
5.4	Ideoitu askelääneneristävyden laskentamalli .....	150
	LÄHTEET.....	152
	LIITTEET .....	165

## MÄÄRITELMÄT

Askelääni	Kävelystä, huonekalujen siirtämisestä, imuroinnista tms. toiminnasta aiheutuva toisessa tilassa kuultava ääni.
Askeläänitasoluku	Mitatuista askeläänitasoista vertailukäyrämenettelyn avulla määritetty askelääneneristävyyden yksilukuarvo.
Askeläänikone	Kone, jonka vastaanottohuoneeseen tuottamien askeläänepainetasojen perusteella arvioidaan rakenteen askelääneneristävyyttä ( <i>engl. tapping machine</i> ). Kojeessa on viisi 0,5 kg painavaa vasaraa, joista kukin putoaa 40 mm korkeudesta lattialle aiheuttaen rakenteeseen kohdistuvan iskun kahdesti sekunnissa.
Askeläänitaso	Askeläänen tilaan aiheuttama äänenpainetaso.
Binauraalinen äänitys	Äänitys, joka tehdään kahdella mikrofonilla siten, että talenteissa otetaan huomioon HRTF.
Binauraalinen	Kaksikorvainen, kahdella korvalla kuultu.
Dynaaminen jäykkyys	Kuvaa eristeen jousivakiota puristukselle.
HRTF	( <i>engl. Head related transfer function</i> ) Kuvaa vapaassa kentässä tärykalvolle saapuvan äänen muokkautumista tulosuunnan funktiona. Ihmisen kuuloaistimukseen vaikuttavat ylävartalon ja pään aiheuttama äänen värittyminen.
Kenttämittaus	Rakennusakustiikan mittaus, joka tehdään rakennuksessa todellisissa olosuhteissa.
K-jako	Rakennuksissa käytettävien rankarakenteiden jakoväli.
Kuuntelukoe	Koe, jossa yksi tai useampi koehenkilö kuuntelee järjestelmällisesti esitetyt ääninäytteet. Ääninäytteet arvioidaan ennalta esitettyjen kriteerien mukaisesti.
Lokalisoida	Kuuloaistin kyky paikantaa korvaan tulevan äänen suunta. Normaalikuuloinen ihminen lokalisoi äänen 1-3° tarkkuudella ympärilleen.
Melu	Häiritsevää tai kuulolle haitallista ääntä.
Ominaistaaajuus	Taajuus, jolla rakenne herkimmin värähtelee.
Pienet taajuudet	Tässä tutkimuksessa taajuusalue 20–100 Hz.

Presedenssi-ilmiö	Äänilähteen suunnaksi kuullaan suunta, josta ääni tulee ensimmäisenä, jos ensimmäinen ääni on voimakkain, äänet saapuvat 35ms sisällä, peräkkäisten äänen spektrit ja verhoikäyrät ovat samanlaiset.
Sivutiesiirtymä	Varsinaista rakennetta sivuavien rakenteiden kautta tapahtuva äänen siirtyminen.
Sosio-akustinen tutkimus	Tutkimus, jossa vertaillaan haastatteluiden perusteella saatuja subjektiivisia arvioita ja objektiivisesti määritettyjä mitalukuja.
Spektripainotusermi	Käytetään rakennusakustiikan yksilukuarvojen yhteydessä, kun halutaan ottaa paremmin huomioon esimerkiksi pienten taajuuksien vaikutus askeläänitasolukuun.
Taustaaänitaso	Äänitaso, joka huoneessa vallitsee ilman siellä tapahtuvaa toimintaa.
Laboratoriomittaus	Rakennusakustiikan mittaus, joka tehdään rakennusakustiikan laboratoriossa.

## MERKINNÄT

$m'$	levyn pintamassa [kg/m <sup>2</sup> ]
$\omega$	kulmataajuus [rad/s]
$c_B$	taivutusaallon etenemisnopeus [m/s]
$c_0$	äänennopeus ilmassa [m/s]
$B'$	levyn taivutusjäykkyys yksikköleveyttä kohden, Nm
$E$	kimmomoduuli [N/m <sup>2</sup> ]
$\nu$	Poissonin vakio [-]
$f$	taajuus [Hz]
$f_{cr}$	koinsidenssitaajuus [Hz]
$R_0$	massalain mukainen ilmaääneneristävyys [dB]
$R$	ilmaääneneristävyys [dB]
$\eta_{int}$	sisäinen häviökerroin [-]
$f_h$	leikkausaallon rajataajuus [Hz]
$Z_{mec}$	mekaaninen impedanssi [kg/s]
$M$	mekaaninen mobiliteetti [s/kg]
$u_0$	levyn pinnan nopeus levypinnan normaalin suunnassa [m/s]
$W_{mec}$	värähtelevän levyn mekaaninen teho [W]
$F$	voima [N]
$\tilde{F}$	voiman tehollisarvo, ( <i>engl. Root Mean Value</i> ) [N]
$Z_{askeläänikone}$	askeläänikoneen mekaaninen impedanssi [kg/s]
$W_{ac}$	värähtelevän levyn akustinen teho [W]
$L_{n,w}$	askeläänitasoluku laboratoriossa mitattuna [dB]
$L'_{n,w}$	askeläänitasoluku kenttämittausten perusteella [dB]
$C_{I,50-2500}$	askeläänitasoluvun spektripainotusermi 50-2500Hz alueella [dB]
$C_I$	askeläänitasoluvun spektripainotusermi 100-2500Hz alueella [dB]
$R^2$	korrelaatiokerroin, selitysaste
$\Delta L_{ak}$	alakatonta askelääneneristävyyden parannus [dB]
$\Delta L_p$	lattiapäällysteen tuottama askelääneneristävyyden parannus [dB]
$\Delta L_{ke}$	kelluvan lattian tuottama askelääneneristävyyden parannus [dB]
$L_{n,w,raw}$	raakavälipohjan askeläänitasoluku [dB]
$i$	imaginääriyksikkö, $i^2 = -1$

# 1. JOHDANTO

## 1.1 Asuinrakennusten äänilähteet

Asuinhuoneistojen äänilähteet voidaan jakaa ulkoisiin ja sisäisiin sen perusteella, syntyykö ääni asunnon sisällä vai kantautuuko se asuntoon sen ulkopuolelta. Asunnon ulkopuolinen melu voidaan jakaa vielä rakennuksen muista osista ja rakennuksen ulkopuolelta kantautuvaan meluun. [97] Maailman terveysjärjestön, WHO:n, toteuttaman tutkimuksen mukaan liikennemelu ja muista asunnoista kantautuva melu koetaan häiritsevimpinä asunnon melunlähteinä [124]. Rakennuksen sisäisistä melunlähteistä naapurihuoneistoista kantautuva askelääni koetaan häiritsevimmäksi melulähteeksi [6, 48, 58, 59, 60, 61, 75].

WHO:n mukaan asuntojen melu on aliarvioitu terveyshaitta, jonka vähentämiseksi asuinrakennusten ääneneristysominaisuuksia on parannettava. WHO:n tutkimuksen kohteena oli asuinympäristön ja asunnon vaikutus asukkaiden terveyteen. Vuosina 2002–2003 toteutetussa tutkimuksessa haastateltiin 8539 ihmistä kahdeksasta eurooppalaisesta kaupungista. Melun ohella merkittäviä asukkaiden terveyteen vaikuttavia tekijöitä olivat asunnon lämpöolosuhteet, ilmanlaatu ja asuinympäristö. [124]

Välipohjan päällä kävely tuottaa askelääntä välipohjan alapuoliseen tilaan. Askelääntä syntyy kävelyn ohella esimerkiksi lasten leikkimisestä sekä tavaroiden ja huonekalujen siirtämistä [70]. Erityyppisistä askeläänilähteistä lasten juoksemisen ja yleisesti kävelyn on havaittu olevan häiritsevimpiä askeläänilähteitä [60, 76].

Se, kuullaanko ääni ja koetaanko se häiritsevänä, riippuu välipohjan ohessa myös muista ulkoisista tekijöistä, kuten asunnon taustäänitasosta, häiritsevän äänen kestosta ja taajuudesta, sekä itse kuulijasta [79, 58]. Esimerkiksi ulkoseinien ääneneristävyyden parantuessa taustäänitaso rakennuksen sisällä laskee, jolloin naapurihuoneistoista kantautuvat äänet koetaan entistä häiritsevämpänä, koska taustamelu ei peitä niitä. Tutkimusten mukaan itse tuotettua ääntä ei koeta niin häiritsevänä kuin muiden tuottamaa ääntä. Esimerkiksi imurointi tai musiikin kuuntelu tuottaa huomattavasti korkeampia äänitasoja kuin naapurista kantautuvat äänet, mutta naapurista kantautuvat äänet koetaan merkittävästi häiritsevimpinä. [97] Korealaistutkimuksen mukaan asunnon askelääneneristysongelmilla on suora vaikutus asukkaiden hyvinvointiin [62].

## 1.2 Puurakentaminen ja puuvälipohjat

Useiden tutkimusten perusteella puurakenteiden keveys on merkittävä etu verrattuna perinteisiin kerrostalojen rakenneratkaisuihin [9, 17, 18, 118]. Rakenteiden keveys on etu maapohjan kantokykyrajoitteen sekä tarvittavan nosto- ja kuljetuskaluston kannalta. Puurakennusten nopea pystytys edellyttää korkeaa esivalmistusastetta [2, 18]. Chung et al. mukaan työmaalla tehtävät valu- ja levytystyöt hidastavat merkittävästi rakennusprosessia [15]. Rakenteiden keveyden ja korkean esivalmistusasteen avulla voidaan saavuttaa kustannussäästöjä verrattuna perinteisiin raskaisiin rakenteisiin [2, 9, 17, 39, 107]. Pohjoismaisesta näkökulmasta myös rakennusmateriaalin helppo saatavuus ja laajat metsävarat kannustavat puun käyttöön rakennusteollisuudessa [39].

Viime vuosina puurakentamista on alettu edistää myös sen myönteisten ilmastovaikutusten ansiosta. Puurakentaminen mielletään ”vihreäksi rakentamiseksi”, koska puu sitoo kasvaessaan hiilidioksidia ja on uusiutuva luonnonvara [39, 101, 112, 118].

Puurakentamisen markkinaosuus maailmalla on kasvanut viime vuosina, mutta alan kehitystä ja markkinaosuuden kasvua jarruttaa esimerkiksi puurakennusten ääneneristykseen liittyvät haasteet [2,11, 17, 39, 118]. Kuten aiemmassa kappaleessa 1.1 esitettiin, muista asunnoista kantautuva askelääni koetaan kaikkein häiritsevimpänä asunnon melulähteenä ja siksi tässä tutkimuksessa keskitytäänkin puuvälipohjien askelääneneristävyyden tarkasteluun. Puuvälipohjia käytetään puurakennuksissa joko asunnon eri kerrosten tai kahden eri asunnon välisenä lattiarakenteena. Tässä tutkimuksessa keskitytään eri asuntojen välisiin puuvälipohjiin, sillä Suomessa välipohjien sallitut askeläänitasoluvut on määritetty askeläänelle, joka syntyy ”asuinhuoneistoa ympäröivissä tiloissa” [111].

Puuvälipohjien akustiset haasteet ovat moninaiset ja ne ovat olleet tiedossa jo usean vuosikymmenen ajan [40]. Tutkimusten mukaan merkittävin haaste puuvälipohjien askelääneneristävyydelle on pienten taajuuksien eristävyys [23, 50, 129]. Hagberg ja Thorssonin mukaan pienten taajuuksien äänet vaikuttavat merkittävästi puuvälipohjan askelääneneristävyyden subjektiiviseen arvioon [50]. Pienten taajuuksien ongelman haastavuutta lisää se, että tällä taajuusalueella äänitasomittauksiin liittyy epävarmuustekijöitä. Niiden merkittävyydestä on käyty keskustelua tiedeyhteisössä. [31, 73, 91] Kylliäinen on esittänyt, ettei pienten taajuuksien mittausepävarmuuksilla ole huomattavaa vaikutusta askeläänitasolukuun eri välipohjarakenteita vertailtaessa [73].

Kuten tämän tutkimuksen kappaleissa 3.4 ja 3.5 tuodaan esiin, puuvälipohjien laskentaan on kehitetty laskentamalleja, mutta kehitystyö on vielä monelta osin kesken. Tänä päivänä ei ole saatavissa rutiininomaiseen askeläänitason laskentaan soveltuvaa laskentamallia puuvälipohjille. Se, että välipohjien askeläänitasoluvut joudutaan määrittämään koerakenteiden ja kokonaisten koerakennusten avulla, hidastaa merkittävästi puuvälipohjien ja samalla koko puurakentamisen tuotekehitystä. [39] Guigou-Carter et al. mu-



kaan askelääneneristävyyden laskentamallin puuttuminen voi johtaa rakenteiden akustiseen ylimitoitamiseen tai pahimmassa tapauksessa koko rakennushankkeen hylkäämiseen. Rakenteiden ylimitoittaminen heikentää puurakenteiden kilpailukykyä, koska turhien materiaalikustannusten lisäksi syntyy myös ylimääräisiä työkustannuksia. [48]

Puurakentamisessa on käytössä monia erilaisia rakenneratkaisuja: useita eri palkkityyppejä ja massiivipuulaattoja. Vaikka palkkityyppi olisikin sama, rakenteissa käytettävien liitosten kirjo on laaja. [1, 16, 19, 108, 120, 122, 126] Tutkimusten mukaan rakenteiden yksityiskohdat ja niiden pienetkin muutokset voivat vaikuttaa askelääneneristävyyteen huomattavasti [39, 49, 108, 122, 130].

Askelääneneristävyyden arvioimista hankaloittaa myös se, että laboratoriossa määritetyt askeläänitasot eivät sovellu suoraan todellisissa rakennuksissa olevien puuvälipohjien askelääneneristävyyden arvioimiseen. Välipohjan kuormituksen on havaittu vaikuttavan askeläänitasoihin: sama välipohja puukerrostalon alaosassa ja yläkerroksissa tuottaa erilaisen askeläänitasoluvun. [2] Välipohjan alapuoliseen tilaan syntyvään äänitasoon todellisissa asuinrakennuksissa vaikuttaa merkittävästi myös sivutiesiirtymät [39, 40, 41, 86].

### 1.3 Puukerrostalot Suomessa

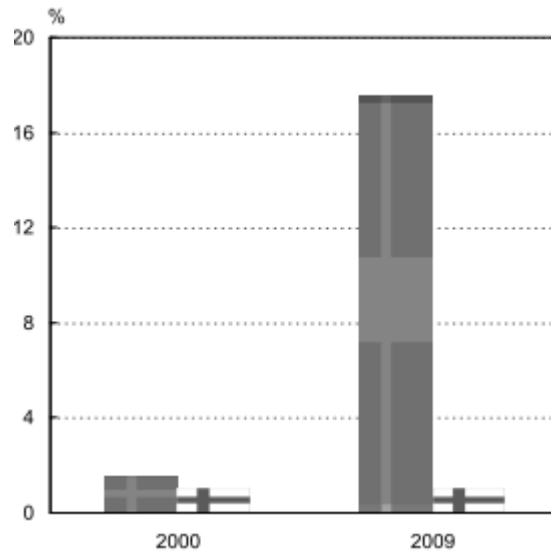
Nykyaikaista puukerrostalorakentamista on kehitetty Suomessa 1990-luvulta lähtien. Kerosen mukaan ensimmäiset nykyaikaiset puukerrostalot valmistuivat 1996 Ylöjärven asuntomessuille. Puukerrostalojen rakentamista Suomessa ovat rajoittaneet palomääräykset. [67]

Vuoteen 2011 asti oli sallittua rakentaa 3-4 kerroksisia puurunkoisia kerrostaloja. 2011 vuonna uudistetun Rakennusmääräyskokoelman osan E1 perusteella sallittiin puun käyttö runkomateriaalina P2-paloluokassa 3-8-kerroksissa rakennuksissa. [93]

Puurakentamista on viime vuosikymmenellä edistetty myös hallitusohjelman avulla. Vuonna 2005 hallitus teki periaatepäätöksen puurakentamisen edistämiseksi Suomessa. Hallituksen päätöksessä korostettiin puurakentamisen edistämistä erityisesti pientalorakentamisessa, jalostettujen puutuotteiden viennin kasvattamista sekä rakennusmääräysten muuttamista puurakentamisen mahdollistavaan suuntaan. Näiden lisäksi kehityskohdeksi valittiin myös puun käytön edistäminen kerrostalorakentamisessa. [94]

Kuten kuvan 1 kuvaajasta voidaan havaita, puukerrostalorakentamisen osuus Suomessa ei ole kasvanut 2000–2009 välisenä aikana juuri lainkaan. Suomen puukerrostalorakentamisen kehityksen karu kuva paljastuu, kun tuloksia verrataan vastaaviin ruotsalaisiin lukuihin. 2000-luvun aikana puukerrostalorakentaminen on kasvanut Ruotsissa noin 16 prosenttiyksikköä, Suomessa kasvu on ollut noin 1 prosenttiyksikön. Rialan esityksen

mukaan nykyinen puurakentamisen osuus kerrostalorakentamisesta on Suomessa noin 1 % ja Ruotsissa 10 %. [99]



**Kuva 1: Vuonna 2009 esitetty puurakentamisen osuus kerrostalorakentamisesta. Vuoden 2009 osuus perustuu arvioon [83].**

Riala on esittänyt Uudistuvat puutuote-arkivet ja puunhankintaratkaisut (PUU) -tutkimus ja kehittämissuunnitelman loppuseminaarissa kuvassa 2 esitetyn tutkimustuloksen puukerrostalorakentamiseen liittyvistä kokemuksista. Lauri Ilola toteutti haastattelututkimuksen vuonna 2012 osana Helsingin yliopistolle tehtyä Pro Gradu-tutkielmaansa. Haastatteluun osallistui 18 henkilöä: puukerrostalojen rakentajia, asiakkaita ja puutuoteollisuuden edustajia. [99]

## Kokemukset puurakentamisesta

Positiiviset	Negatiiviset
- Nopeus (6 vastaajaa)	- Sääsuojaus/ kosteuden hallinta (8 vastaajaa)
- Kuiva rakentaminen (6 vastaajaa)	- Julkisivut vaativat enemmän (5 vastaajaa)
- Kevyt rakennusmateriaali (4 vastaajaa), mahdollistaa isompien elementtien käytön ja rakentamisen heikommille rakennusmaille	- Vaativampi/ kalliimpi ylläpito (4 vastaajaa)
- Helpompi työstettävyys (3 vastaajaa)	- Äänieristys (3 vastaajaa)

**Kuva 2: Puurakentamiseen liittyviä kokemuksia Ilolan haastattelututkimuksen perusteella [99].**

Kuten kuvassa 2 esitetyistä kommentteista voidaan havaita, äänieristys ja julkisivujen huolto ovat ainoita rakenneteknisiä seikkoja, jotka nousivat esiin haastattelututkimuksessa. Esimerkiksi palotekniset haasteet eivät ole nousseet esiin haastattelussa. Puurakennusten ääneneristävyysoongelmat ovat tämän suppean haastattelututkimuksen perus-

teella myös kohtuullisesti rakennusyrittäjien, asiakkaiden ja teollisuuden edustajien tiedossa.

Riala on esittänyt, että puurakentamisen kilpailukyvyn kehittämisen kannalta on erittäin tärkeää, että puurakennusten teknisiä ratkaisuja kehitetään ja alan toimijoiden osaamista kohennetaan [99]. Vuonna 2012 julkaistun Pellervon taloustutkimuksen mukaan puukerrostalojen rakentamisen lisäämisellä voisi olla merkittäviä kansantaloutta parantavia seurauksia. Tärkeinä kansantalouteen vaikuttavina tekijöinä nähtiin puutuotteiden kotimaisuus, mahdolliset uudet työpaikat ja verotulojen kasvu. [37]

## 1.4 COST-hankkeet

Rakennusten akustisia ominaisuuksia on tutkittu useissa COST-hankkeissa [97, 116]. Yhteiseurooppalaisten COST- (*engl. European cooperation in science and technology*) hankkeiden tarkoituksena on edistää tieteellistä ja teknistä yhteistyötä eri eurooppalaisten tutkimusyhteisöjen välillä. Yhteistyötä on kehitetty jakamalla tietoa ja linjaamalla tutkimustavoitteita eri tutkimusyhteisöiden välillä. Vuosina 2009–2013 toteutetussa TU0901-hankkeessa pyrittiin harmonisoimaan rakennusakustiikan kriteerejä ja luokitusta eri maiden välillä. Rakennusakustiikan käytäntöjen harmonisoinnin tarkoituksena on helpottaa tutkimustulosten vertailua eri instituutioiden välillä. Osana TU0901-hanketta tutkittiin subjektiivisia hyvyyden testausmenetelmiä. Tutkimuksen pohjalta luotiin haastattelukaavake ja yhtenäinen ohjeistus kuuntelukokeiden tekemiseen. Kyseisiä tuloksia on esitelty tämän tutkimuksen kappaleissa 2.2.2 ja 2.2.4.

## 1.5 Askelääneneristävyyden arviointi

Välipohjan askelääneneristävyyttä voidaan arvioida objektiivisesti mittalaitteiden ja laskentamenetelmien avulla sekä subjektiivisesti koehenkilöiden kuuloaistimuksen perusteella. Yksilukuinen objektiivinen askeläänitasoluku voidaan määrittää standardin ISO 717-2 perusteella [36]. Rakennusakustiikan haasteena on määrittää se, kuinka hyvin objektiivisesti määritellyt mittaluvut vastaavat subjektiivista aistimusta [46, 76, 97].

Subjektiiviset tutkimusmenetelmät ovat olleet ja ovat yhä erityisen tärkeitä välipohjien askelääneneristävyyden arviointimenetelmien kehittämisessä. Vuosikymmenien ajan tutkijat ovat esittäneet, etteivät standardien ISO 140-7, ISO 10140-3 ja ISO 717-2 mukaiset mittaus- ja laskentamenettelyt korreloi täysin ihmisen aistimusta välipohjien ääneneristävyydestä. [6, 9, 40, 45, 46, 57, 72, 76, 80, 123]

Tässä yhteydessä voidaan todeta, että useissa tutkimuksissa 2000-luvulla [1, 45, 59, 60, 109] on tutkittu myös vaihtoehtoisten askeläänilähteiden käyttöä välipohjan askelääneneristävyyden hyvyyden määrittämisessä. Tässä tutkimuksessa ei kuitenkaan syvennytä eri askeläänilähteisiin vaan siihen, kuinka nykyistä ISO-standardoitua askelääneneristävyyden arviointimenetelmää tulisi kehittää puuvälipohjien näkökulmasta.

Alun perin ISO-standardoitu välipohjien ääneneristävyyden laskentamenettely kehitettiin 1950- ja 1960-luvulla yleisesti käytössä olevia välipohjatyyppejä silmällä pitäen [72]. Käytännössä tämä tarkoitti betonivälipohjia. Viime vuosikymmenien aikana kevyet puurakenteiset välipohjat ovat yleistyneet merkittävästi, mikä on johtanut lisätutkimuksiin askelääneneristävyytlaskennan kehittämiseksi. Näissä tutkimuksissa subjektiiviset hyvyyden testausmenetelmät ovat olleet jälleen tärkeässä asemassa, sillä kevyiden puuvälipohjien akustinen käyttäytyminen poikkeaa merkittävästi raskaista betonivälipohjista. [6, 9, 15, 39, 122]

## 1.6 Tutkimuksen tavoitteet

Tällä tutkimuksella on useita tavoitteita, jotka kaikki kytkeytyvät puuvälipohjien askelääneneristävyyteen. Ensimmäinen tavoite on selvittää kirjallisuustutkimuksen avulla, millaisia subjektiiviseen arviointiin perustuvia tutkimuksia puurakennusten askelääneneristävyydestä on tehty ja millaisia tuloksia näistä tutkimuksista on saatu. Tämä tutkimuksen osuus on esitetty luvussa kaksi.

Toinen tavoite tutkimukselle oli selvittää, miten puuvälipohjan eri ominaisuudet vaikuttavat sen askelääneneristävyyteen. Lähdeaineisto parametrille tutkimukselle on saatu useista eri lähteistä, joissa välipohjien askeläänitasot on esitetty 1/3-oktaavikaistoittain. Tämä tutkimuksen osuus on esitetty luvussa kolme.

Kolmantena tavoitteena on tutkia kirjallisuusselvityksen avulla, millaisia laskentamalleja puuvälipohjien askelääneneristävyyden laskemiseksi on luotu ja kuinka ne soveltuvat rakennusakustiikan suunnittelun työkaluiksi. Tämä tutkimuksen osuus on esitetty myös luvussa kolme.

Neljäntenä tavoitteena on tutkia tekniikan lisensiaatti Mikko Kylliäisen ideoimaa puuvälipohjien askelääneneristävyyden laskentamallia. Laskentamalli on vasta ideointitasolla ja tämän tutkimuksen tarkoituksena on selvittää, soveltuuko laskentaidea puuvälipohjien askelääneneristävyyden laskentaan ja kuinka eri laskennassa tarvittavat parametrit tulisi ottaa huomioon laskentamallissa. Ideoidun laskentamallin tarkastelu on esitetty tämän tutkimuksen luvussa neljä.

Tässä tutkimuksessa perehdytään ainoastaan välipohjan askelääneneristävyyteen. Kirjallisuustutkimuksessa käsitellyt mittaustulokset on saatu pääosin laboratoriomittauksista. Todellisissa rakennuksissa askelääni kulkeutuu myös välipohjia ympäröivistä rakenteista, sivutiesiirtyminä, ja välipohjan alapuoliseen tilaan ääniolosuhteet muodostuvat askeläänien ohella myös muista äänilähteistä.

## 2. SUBJEKTIIVISET TESTAUSMENETELMÄT

### 2.1 Historia

Subjektiiivisiä välipohjien hyvyyden testausmenetelmiä on käytetty välipohjien akustisten ominaisuuksien selvittämiseen 1900-luvun alkupuolelta lähtien. Erilaisilla askelherätteillä toteutettujen kokeiden tulosten vertailu oli haastavaa ja tämän ongelman ratkaisemiseksi alettiin kehittää askeläänikonetta. 1930-luvun aikana erilaisia askeläänikoneita kehitettiin esimerkiksi Saksassa, Yhdysvalloissa ja Britanniassa. [72] Saksalainen H. Reiher julkaisi vuonna 1932 kuvauksensa askeläänikojesta, jossa oli pyökkipuusta valmistetut iskuvasarat. 280 gramman painoiset vasarat putosivat kolmen senttimetrin korkeudelta ja niiden iskutahti oli Marinerin ja Hehmannin mukaan ”normaali kävelynopeus”. Tätä askeläänikonetta pidetään nykyisten askeläänikoneiden prototyypinä. Askeläänikojen kehittämiseksi H. Reiher tutki askeläänien tuottamaa melua subjektiivisilla tutkimusmenetelmillä, tutkimus kantoi nimeä ”Subjektiiivinen arvio askeläänien tuottamasta melusta”. [81]

Vuonna 1938 julkaistiin saksalainen standardi DIN 4110 askelääneneristyksestä, jossa Reiherin tutkimien subjektiivisten arviointimenetelmien sijaan standardoitiin objektiiviset arviointimenetelmät. Samaisessa standardissa askeläänilähteeksi standardoitiin nykyisen kaltainen askeläänikoje, jossa iskuäänen tuottivat 500 g painoiset metallivasarat, joiden pudotuskorkeus oli 4 cm. H. Reiher kritisoi uutta askeläänikojetta, koska se tuotti hänen mukaansa liian voimakkaan iskuäänen, joka ei vastannut kävelyn tuottamaa ääniherätettä. [81]

Toinen saksalainen tutkija W. Bausch puolusti Saksassa standardoitua askelääneneristävyyden laskenta- ja mittaustapaa. Vuonna 1939 julkaistussa artikkelissa Bausch viittasi Reiherin aiempaan tutkimukseen ja totesi, että subjektiiviseen arviointiin liittyy paljon epävarmuustekijöitä. Bausch myös toteaa, että uusi, voimakkaamman ja jatkuvan äänisignaalin tuottava askeläänikoje tarvittiin, jotta tutkittavan välipohjan alapuolisessa tilassa tehdyt äänitasomittaukset voitiin suorittaa luotettavasti silloisilla mittauslaitteilla. Askeläänikojen etuna on pidetty alusta alkaen kokeen tuottaman askeläänieräteen riittävää voimakkuutta, toistettavuutta ja eri mittauksista saatujen tulosten vertailtavuutta. [81] Askeläänikojetta kritisoi myös K. Gösele vuonna 1949. Hän totesi, että askeläänikojen tuottamat äänitasot ovat niin korkeita, että korvan herkkyys eri taajuuksille ei

vaikuta kuuloaistimukseen. [45] Siitä lähtien, kun saksalainen standardi julkaistiin 1938, tutkijakunta on käynyt keskustelua oikean kävelyn ja askeläänikojeen tuottaman herätteen eroista. [81]

Askeläänikoje standardoitiin kansainvälisellä ISO R140-standardilla vuonna 1960. Vertailukäyrä-menettely standardoitiin myöhemmin vuonna 1968 ISO R717-standardilla [72]. Mariner & Hehmann mukaan vuonna 1960 julkaistun ISO R140-standardin esipuheessa todettiin, että standardissa esitetyissä menetelmissä on puutteita. Esipuheessa esitettiin myös, että standardin tarkoituksena ei ole estää uusien mittaustekniikoiden kehittämistä vaan luoda menettelytapa, jolla eri mittaajien mittaustulokset ovat vertailukelpoisia. [81] Vastikään standardoitua askeläänien laskentamenetelmää kritisoitiin myös vuonna 1969 julkaistussa IR. J. Van den Eijk artikkelissa: ”Joitakin ongelmia askelääneneristysten mittauksissa ja arvioinnissa”. Artikkelin tiivistelmän mukaan Van de Eijk toteutti kyselytutkimuksen, jossa asukkaita haastateltiin välipohjien ääneneristykseen liittyvistä asioista [57]. Käytännössä vuonna 1960 ISO R140-standardoitu menetelmä vakiintui mittauskäytännöksi ja on käytössä nykypäivänäkin [27].

Yhdysvaltojen kansallinen standardointi seurasi kansainvälistä esimerkkiä ja vuonna 1963 Federal Housing Administration (FHA) hyväksyi ohjeen ”Impact noise control in multi-family dwellings, No. 750” välipohjien askelääneneristysten määrittämisen ohjeeksi. Tässä mittausohjeessa askeläänilähteenä käytettiin ISO-standardin mukaista askeläänikojetta. [80]

T. Mariner kritisoi yhdysvaltaista standardia välittömästi sen julkaisun jälkeen. Marinerin toteuttamien kuuntelukokeiden mukaan saman välipohjan ääneneristävyys arvioitiin erilaiseksi, riippuen siitä käytettiinkö askeläänieräteenä askeläänikojetta vai kävelijää, nainen korkokengillä. Kuuntelukokeisiin osallistui 30 koehenkilöä, joiden joukossa oli myös 10 merkittävää akustiikka-alan asiantuntijaa Euroopasta ja Pohjois-Amerikasta. Kuuntelukokeet toteutettiin laboratorio-olosuhteissa siten, että koehenkilöt, viiden henkilön ryhmissä, olivat välipohjan alapuolella kuuntelemassa eri tavoin tuotettuja askelääniä. Tutkimuksessa oli mukana neljä yhdysvalloissa yleisesti käytössä olevaa välipohjatyyppeä. Kahden välipohja-tyypin ääneneristävyys arvio muuttui, kun askeläänilähdettä vaihdettiin. Suppean otannan perusteella Mariner esitti myös, että askeläänikoje tuottaa enemmän melua alapuoliseen tilaan, kun välipohjan rakenne on joustava. [80]

Subjekttiivisia tutkimusmenetelmiä välipohjien askelääneneristysten hyvyden määrittämiseen on käytetty myös Kanadassa 1960-luvulta lähtien. Olynykin ja Northwoodin vuonna 1965 julkaistuissa tutkimuksissa hyödynnettiin kuuntelukokeita, joissa käytettiin ns. peittoäänitekniikkaan (*engl. masking technique*). Tutkimuksissa tehtiin kuuntelukokeita ja mittauksia 25 erilaisella välipohjalla. [90]

Vuonna 1965 julkaistujen tutkimustulosten perusteella tarvittiin lisämittauksia erilaisista välipohjarakenteista ja vuonna 1968 Olynyk ja Northwood julkaisivatkin lisätutkimuksensa tulokset, jossa kuuntelukokeisiin oli otettu mukaan myös puurakenteisia välipohjia. Uudessa tutkimuksessa oli mukana 22 puupalkki-välipohjaa ja seitsemän betonivälipohjaa. Tätä tutkimusta voidaan pitää ensimmäisenä laajempuna välipohjien askelääneneristystä koskevana tutkimuksena, jossa oli mukana myös puurakenteisia välipohjia. Uutta oli myös se, että puupalkki-välipohjien mittaukset tehtiin kenttäolosuhteissa. Tutkimuksensa perusteella Olynyk ja Northwood esittivät, että tasaisella vertailukäyrällä lasketut askeläänitasoluvut korreloivat paremmin subjektiivisten arvioiden kanssa kuin FHA vuonna 1963 esittämä vertailukäyrä. [89]

Peittoäänimenetelmään perustuvat kuuntelukokeet saivat jatkoa Yhdysvalloissa, kun Belmondo et al. julkaisivat vuonna 1973 tutkimustuloksia puurakenteisten välipohjien askelääneneristyksestä. Belmondo tutkimuksessa kehitettiin peittoäänitekniikkaa: koehenkilöt kuuntelivat peittoääntä kuulokkeilla kaiuttimien sijaan. Tutkimuksessa todettiin, että pienet taajuudet, alle 100 Hz, ovat erittäin tärkeitä askeläänen äänekkyuden ja tunnistettavuuden kannalta. Kuuntelukokeissa havaittiin, että välipohjien askelääneneristyksen arviot muuttuivat, kun kuuntelunäytteistä suodatettiin pois alle 89 Hz äänet. Belmodon tutkimuksessa oli mukana kuusi erilaista asuinrakennusten välipohjaa. [4]

1983 julkaistiin Bodlundin ja Eslonin tutkimus modernien ruotsalaisten asuntojen välisestä ääneneristävydestä. Tässä tutkimuksessa tutkittiin myös asuntojen välisten välipohjien askelääneneristävyttä. Tutkimuksen perusteella todettiin, että ISO 140- ja 717-standardien mukaisen askelääneneristävyuden mittalukujen ja subjektiivisten arvioiden välillä on hyvä korrelaatio. Samalla havaittiin kuitenkin myös se, että voimassa olevassa standardissa olisi kehitysmahdollisuuksia. [6]

Näiden havaintojen vahvistamiseksi K. Bodlund toteutti mittavan tutkimuksen välipohjien ääneneristävydestä, jonka tuloksena hän esitti uutta referenssikäyrää välipohjien askelääneneristävyuden laskentaan silloisen ISO 717-standardin mukaisen vertailukäyrän tilalle. Bodlundin mukaan uudella vertailukäyrällä laskettujen askeläänitasolukujen korrelaatiokerroin  $R^2$  haastattelututkimuksen avulla saatuihin subjektiivisiin arvioihin oli 0,87, kun ISO 717-2 mukaan laskettujen askeläänitasolukujen korrelaatiokerroin  $R^2$  oli 0,75. [6]

Vuonna 1985 julkaistussa tutkimuksen kaikki mittauskohteet olivat kenttäkohteita, erityyppisiä betoni- ja puurakennuksia. Tutkimuksessa oli mukana 22 erilaista välipohjarakennetta ja haastattelututkimukseen asuntojen akustisista olosuhteista osallistui 398 henkilöä. [6]

1981 julkaistiin Langdon et al. tutkimus asuinhuoneistojen väliseinien ilmaääneneristävydestä ja naapurien aiheuttamasta melusta. Tähän tutkimukseen haastateltiin 917 asu-

kasta Britanniasta. Tutkimuksessa tutkittiin rivitalojen (*engl. attached house*) väliseini- en ääneneristävyyttä. Britanniassa oli toteutettu laajoja asuinrakennusten ääneneristykseen liittyviä mittauksia jo 70-luvulla ja näitä tuloksia hyödynnettiin tässä tutkimuksessa. Vaikka aineistoa oli saatavissa runsaasti, Langdon et al. päätyivät hyödyntämään vain kaksikerroksisten rivitalojen mittaustuloksia. Tässä Langdon et al. väliseini- en ääneneristävyyttä koskevassa tutkimuksessa kiinnitettiin erityistä huomioita objektiivisten ja subjektiivisten arvioiden vertailtavuuteen. Tutkimuksessa oli mukana tutkimusajan- kohtaan nähden uusia taloja. Yksikään kohde ei ollut yli 10 vuotta vanha, kun haastat- teltutkimukset tehtiin vuonna 1978. Haastattelu kysymykset käsittelivät asunnon koettua ääneneristävyyttä mutta myös muita asuinympäristön ja asunnon viihtyisyyteen liittyviä asioita. Merkittävä tulos Langdonin ryhmän tutkimuksissa oli se, että 24,1 % haastatel- tavista ilmoitti merkittävimmäksi asunnon puutteeksi huonon ääneneristyksen. Toisaalta lähes yhtä moni, 21,2 %, ilmoitti merkittävimmäksi viaksi asunnon vetoisuuden. [75]

Vuonna 1983 julkaistiin Langdon et al. tutkimuksen toinen osa, joka käsitteli naapurien aiheuttamaa melua ja välipohjien askelääneneristävyyttä kerrostaloissa. Pienemmässä osana tutkimusta selvitettiin myös väliseini- en ilmaääneneristävyyttä kerrostaloissa. Tut- kimuksessa hyödynnettiin Langdonin mukaan Utley ja Alphey'n mittaustuloksia isobri- tannialaisista asuinrakennuksista vuodelta 1974. Kerrostalot rajattiin ulos aiemmasta tutkimuksesta, koska Langdonin mukaan niiden meluolosuhteet eroavat merkittävästi kaksikerroksista rivitaloista. Rivitaloissa melulähteet ovat pääasiassa toisista asunnoista kantautuva ilmaääni. Kerrostaloissa merkittäviä melunlähteitä ovat askeläät ympäröi- vistä asunnoista ja muista rakennuksen tiloista, kun porraskäytävästä. [74]

Langdon et al. tutkimuksen mukaan ilmaääneneristävyyden mittalukujen ja subjektiivis- ten arvioiden välillä oli hyvä yhteys. Kuitenkin päinvastaisesti askelääneneristyksen mittalukujen ja subjektiivisten arvioiden välillä oli heikko yhteys. [74] Heikkoihin tu- loksiin vaikutti myös se, että mittausten jälkeen huoneita oli muutettu ja kalustettu, esi- merkiksi joihinkin asuntoihin oli asennettu kokolattiamatto mittausten jälkeen. [6] Sa- manlaisia tuloksia askelääneneristävyyden ja subjektiivisten arvioiden yhteydestä oli Langdonin mukaan saatu myös useissa muissa eurooppalaisissa tutkimuksissa 1960- ja 1970-luvun aikana. Langdon et al. tutkimuksen johtopäätöksissä esitettiin, että askelää- neneristävyyden mittausta ja laskentamenettelyä on kehitettävä vastaamaan paremmin subjektiivista aistimusta. [74]

Bodlundin näkökulma objektiivisten ja subjektiivisten arvioiden vastaavuuden paranta- miseksi oli se, että yksilukuisen mittaluvun laskemisessa käytettävää vertailukäyrää tulisi muuttaa [6]. Saman päätelmän olivat tehneet Van den Eijk aiemmin vuonna 1969 ja Olynyk ja Northwood vuonna 1968 [57, 89]. Askeläänitasomittauksiin on ehdotettu myös vaihtoehtoisia askeläänilähteitä [102], joka vastaisi paremmin kävelyn tuottamaa askeläänihäätettä.



Askeläänilähteen muuttaminen aiheuttaa ongelmia, sillä eri äänilähteillä toteutettujen mittausten tulosten vertailu on erittäin haastavaa. Bodlund on todennut, että jos askeläänilähdettä muutetaan, joudutaan todennäköisesti muuttamaan myös laskentamenettelyä. Muuttamalla vain vertailukäyrää vanhat mittaustulokset säilyvät vertailukelpoisena. Bolundin esittämän vaihtoehdoisen referenssikäyrän avulla lasketut mittaluvut korreloivat paremmin askelääneneristykseen subjektiivisten arvioiden kanssa kuin vuonna 1985 voimassa olleen ISO 717-2 standardin referenssikäyrällä lasketut askelääneneristävyyden mittaluvut. [6]

Vuonna 1994 Ruotsissa sallittiin yli kaksikerroksisten puurakennusten rakentaminen [39]. Tämä muutos on omalta osaltaan vaikuttanut puurakenteiden akustiikan tutkimukseen Ruotsissa, sillä kuten lähdeluettelosta saattaa havaita, ruotsalaiset ovat tehneet merkittävää ja laajaa tutkimusta puurakennusten ääneneristykseen parissa.

Kuvan 3 taulukossa on Rindellin vuonna 1998 kokoama kattava esitys objektiivisten ja subjektiivisten arvioiden suhteesta. Forssen et al. mukaan Rindel käytti lähteenään kuvan 3 esityksessä Langdon et al. 1981 [75] ja Bodlundin tutkimuksia [6]. [39]

Subject of study	$G = 80 \%$	$P = 20 \%$ $G = 50 \%$	$P = 50 \%$ $G = 20 \%$	$P = 80 \%$
Airborne sound insulation				
Langdon [15] $P$	(62 dB)	55 dB	48 dB	(42 dB)
Weeber [16] $G$		56 dB	47 dB	
		57 dB	49 dB	(41 dB)
Impact sound pressure level				
Bodlund [12,13] $P$	50 dB	57 dB	64 dB	70 dB
		$G$	57 dB	64 dB

**Kuva 3: Forssen et al. mukaan Rindellin kirjallisuustutkimuksen tulos ilma- ja askelääniluvuista ja koetuista häiritsevyyksistä. Taulukossa  $P =$  huono (poor) ja  $G =$  hyvä (good) [39]. Eristävyydet ovat ISO 717 mukaisia  $R'_w$  ja  $L'_{n,w}$  arvoja.**

Kuvan 3 taulukon ylimmällä rivillä on esitetty  $G$  ja/tai  $P$  prosenttiluvut. Ne ilmoittavat, kuinka monta prosenttia ihmisistä keskimäärin kokee ilma- tai askelääneneristävyyden hyväksi ( $G$ ) tai huonoksi ( $P$ ), kun eristävyys on taulukon alemmalla rivillä ilmoitetun mukainen. Esimerkiksi taulukon toisessa sarakkeessa  $G = 80 \%$  tarkoittaa, että lattian askelääneneristävyyden ollessa 50 dB 80 % ihmisistä kokee askelääneneristävyyden hyväksi. Viimeisen sarakkeen  $P = 80 \%$  tarkoittaa, että askeläänitasoluvun  $L'_{n,w}$  ollessa 70 dB keskimäärin 80 % ihmisistä kokee askelääneneristävyyden huonoksi.

## 2.2 Tutkimusmenetelmät

Välipohjien akustisten ominaisuuksien tutkimuksessa subjektiivisia tutkimusmenetelmiä on käytetty pääasiallisesti vertailevaan tutkimukseen. Vertailun tarkoituksena on ollut selvittää, kuinka hyvin jo käytössä olevat objektiiviset mittaluvut vastaavat subjektiivista kokemusta välipohjien askelääneneristävyyden hyvydestä. Subjektiivisten kokeiden

avulla on pyritty kehittämään uusia mittalukuja ja mittausten menetelmiä, jotka vastaavat paremmin subjektiivista kuuloaistimusta välipohjan askelääneneristävyydestä. [6, 46, 49, 59, 60, 109] Kuuntelukokeita ja haastattelututkimuksia käytetään yleisesti, kun halutaan tutkia välipohjien akustisten ominaisuuksien subjektiivista hyvyyttä. Näiden tutkimustyyppien toteuttamiseen on useita eri tapoja ja tässä työssä esitellään puuvälipohjien tutkimukseen käyttökelpoisiksi havaittuja tutkimusmenetelmiä.

## 2.2.1 Kuuntelukokeet

Akustisen määritelmän mukaan kuuleminen ja kuunteleminen erotetaan toisistaan. Kuuleminen on yksi ihmisen viidestä aistista, kun taas kuunteleminen on opittu prosessi, johon liittyy sekä kuuleminen sekä kuullun tulkitseminen. Kuulokokeet mittaavat koehenkilön absoluuttista kuulokykyä. Kuuntelukokeiden avulla pyritään selvittämään, millaisia tuntemuksia ääninäyte herättää koehenkilössä. [97]

Kuuntelukokeissa tulee pyrkiä siihen, että arvioitavat kuuntelunäytteet kuvaavat tutkittavaa äänitilannetta mahdollisimman todenmukaisesti. Toisaalta eri faktoreiden analysointi on sitä vaikeampaa mitä monimutkaisempi ääninäyte on kyseessä. [79] Välipohjien tutkimuksessa on käytetty laboratorioissa tai kenttäkohteissa nauhoitettuja ääninäytteitä, joissa askelääninäytteenä on joko oikea kävelijä tai jollakin esineellä tai koneella tuotettu askelheräte. Välipohjan rakenneosia ja askelherätettä vaihtelemalla on pyritty selvittämään esimerkiksi objektiivisesti määritettyjen mittalukujen ja subjektiivisten askelääneneristävyyden hyvyyden arvioiden yhteneväisyyttä. [46, 60, 63, 76, 89]

Kuuntelukokeiden ääninäyte tulee äänittää binauraalisesti, jos todellisessa tilanteessa äänilähde on lähellä kuulijan päätä tai äänilähteen synnyttämä äänikenttä ei ole diffuusi kuulijan kohdalla. Jos kuulija on kaukana äänilähteestä, voidaan käyttää yhdellä mikrofonilla tallennettua äänitettä. Binauraalisessa mittaustekniikassa ääni tallennetaan kahdella mikrofonilla molemmista korvakäytävistä tai niiden suulta. Kuuloaisti erottaa äänentulosuunnan ja normaalikuuloinen lokalisoii äänen 1-3° tarkkuudella ympärilleen. Binauraalisella mittaustekniikalla ääni voidaan tallentaa siten, että se sisältää kuuloaistin tarvitsemat ominaisuudet äänen tulosuunnasta ja äänilähteen etäisyydestä. [79]

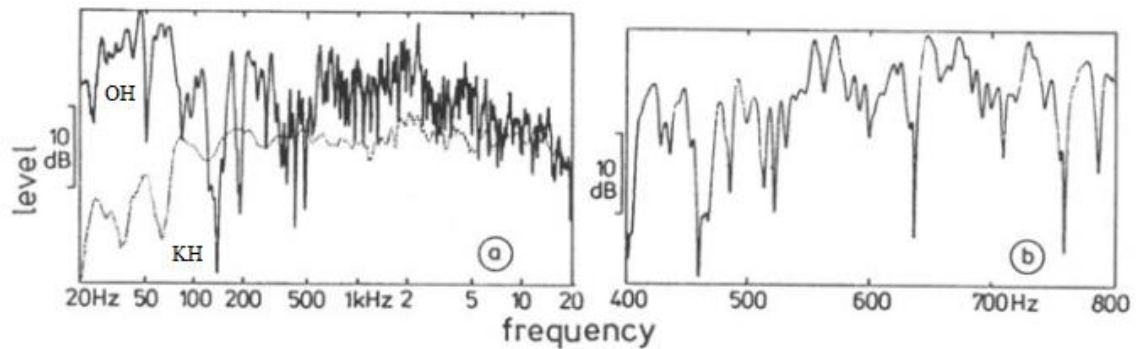
Alle 1000 Hz taajuuksilla äänen paikallistaminen perustuu korviin saapuvien ääniaaltojen väliseen aikaeroon ja yli 4000 Hz taajuuksilla korvaan saapuvien äänien tasoeroon. 1000-4000 Hz taajuuksilla suunta-aistimus perustuu molempiin edellä mainittuihin ominaisuuksiin. Kuuloaistimukseen vaikuttavat myös esimerkiksi presedenssi-ilmiö ja äänen taajuussisältö. Kuuloaisti on herkimmillään pitkän hiljaisen jakson jälkeen, esimerkiksi aamuisin ja vastaavasti heikoimmillaan pitkän meluallistuksen jälkeen. Kuuntelukoetta suunniteltaessa tämä tulee ottaa huomioon. Jos koehenkilöt altistetaan tarkoituksella tietynlaiselle äänikentälle ennen kuuntelukoetta, altistusmenetelmää kutsutaan biasoinniksi. [79]

Yksittäisen ihmisen kuuloaistimusta on mahdollista kuvata HRTF:llä eli päänmukaisella siirtofunktiolla (*engl. Head Related Transfer Function*). HRTF kuvaa ihmisen tärykalvolle saapuvan äänen muokkaantumista äänen tulosuunnan funktiona. Pään, ylävartalon ja ulkokorvan ominaisuudet vaikuttavat tärykalvolle saapuvaan ääneen. Koska HRTF on yksilöllinen ominaisuus ja soveltuu sellaisenaan vain sille henkilölle, jolta kyseinen HRTF on mitattu, binauraalisissa mittauksissa käytetään yleensä keinopäätä. Keinopäät on suunniteltu siten, että niiden tallentamat ääninäytteet toimivat keskimääräisen hyvin kaikilla ihmisillä.

Kun äänitys tehdään koehenkilön avulla, äänitystapaa kutsutaan tosipää-tekniikaksi. Tällöin äänitys tehdään korvakäytävän suulle asetettavien mikrofoniin avulla ja äänitykseen tulee automaattisesti koehenkilön HRTF. HRTF:n vaikutus voidaan korjata korjaussuotimella, kun koehenkilön HRTF on selvillä. Tosipäätekniikka käytetään esimerkiksi silloin, kun halutaan selvittää ihmisen ohjausta vaativan laitteen ääniolosuhteita todellisessa käyttötilanteessa. Kun mittaukset tehdään kaiuntaisessa tilassa, kuten välipohjien tutkimukseen tarkoitettussa äänilaboratoriossa, binauraalisiin mittauksiin sisältyy myös tilan akustiikka. Tällöin mitattua vastetta kutsutaan binauraaliseksi huonevas- teeksi, BRIR (*engl. Binaural room impulse response*). [79]

Äänen tallennustavan ohella äänentoisto vaikuttaa kuuntelukokeen onnistumiseen. Kuuntelukokeen äänite voidaan toistaa koehenkilöille joko kuulokkeilla tai kaiuttimilla. Kuulokeilla toistettaessa korvaan tulevaa ääntä voidaan kontrolloida tarkemmin kuin kaiutin toistossa, sillä kuuntelutilan akustiikka voi vaikuttaa kaiuttimilla toistettuihin ääninäytteisiin [76, 38]. Kuulokekuuntelu voidaan järjestää periaatteessa missä tahansa tilassa, kun taas kaiutinkuuntelu asettaa tilalle tarkat vaatimukset, käytännössä kuuntelut järjestetään kaiuttomassa huoneessa.

Kuvassa 4 on esitetty kaiutin vasteiden kuvaajat. Vasemmanpuoleisessa kuvassa ylempi käyrä ”OH” esittää taajuusvasteen olohuoneessa ja alempi käyrä ”KH” esittää kaiuttimien mitatun vasteen kaiuttomassa huoneessa. Mittaustuloksista nähdään selkeästi, että olohuoneen akustiikka vaikuttaa kaiuttimien vasteeseen, erityisesti pienillä taajuuksilla [38]. Kaiutin toistossa on myös huomioitava, että kaiuttimien ääni kuullaan molemmissa korvissa. Kun binauraalisesti nauhoitettua ääninäytettä toistetaan kaiuttimilla, äänisignaalille on tehtävä käänteissuodatus, jotta kuulokuva vastaisi todellista tilannetta [79]. Kanadalaisissa kuuntelukokeissa on käytetty tekniikka, jossa kaiuttimet asennettiin kuunteluhuoneen kattoon. Kaiuttimien taajuusvastetta säädettiin siten, että suunnitellusta kuuntelupisteestä mitattu taajuusvaste olisi mahdollisimman tasainen. Kaiuttimien transienttivaste säädettiin vertaamalla huoneessa soitettua ääninäytettä alkuperäiseen näytteeseen. [8]



**Kuva 4:** Vasemmassa kuvassa kaiuttimen taajuusvasteet tavallisessa olohuoneessa (OH) ja kaiuttomassa huoneessa (KH). Oikean puoleisessa kuvassa tarkennus kaiuttimen vasteesta olohuoneessa [38].

Puurakenteisia välipohjia koskevissa kuuntelukokeissa on käytetty sekä keinopää-äänityksiä [59, 60, 63, 76] että yhdellä mikrofonilla tehtyjä äänityksiä [8, 76]. Acuwood hankkeen osana toteutetuissa kuuntelukokeissa vertailtiin sekä binauraalisesti että yhdellä mikrofonilla äänitettyjä näytteitä. Kuuntelukokeen tuloksista havaittiin, että koehenkilöiden arviot liikkuvan askeläänilähteen häiritsevyydestä riippuivat ääninäytteen tallennustavasta. Samasta tilanteesta äänitetty binauraalinen näyte koettiin häiritsevämpanä kuin yhdellä mikrofonilla tallennettu ääninäyte. [76]

Hongiston mukaan kuuntelukokeen ääninäyte on toteutettava mahdollisimman realistisesti: äänilähteenä tulisi käyttää todellisuutta vastaavia äänilähteitä ja äänilähteiden äänitasoja. Epärealististen äänilähteiden käyttö vääristää subjektiivisia arvioita rakenteiden ääneneristävyydestä. [54] Puuvälipohjien kuuntelukokeiden äänilähteinä on käytetty esimerkiksi standardin ISO 10140-5 mukaisia askeläänilähteitä, kävelijää eri jalkineilla ja huonekalujen siirtämistä [46, 108, 113].

Koehenkilöiden valinnassa tulee ottaa huomioon testattavan tuotteen loppukäyttäjät siten, että koehenkilöt edustavat kohderyhmää mahdollisimman hyvin. Rakennusakustiikassa loppukäyttäjät ovat rakennusten asukkaat, joten kuuntelukokeisiin on valittu yleensä normaalikuuloisia aikuisia henkilöitä [60, 62, 63, 88]. Kuuntelukokeet vaativat kuuntelijalta tarkkaa keskittymistä ja siksi yhtäjaksoinen kuuntelukoe ei saisi kestää yli puolta tuntia [79]. Käytännön toteutus puoltaa myös kuulokekuuntelua, sillä kuulokekuuntelu voidaan järjestää samanaikaisesti useille koehenkilöille. Koehenkilöt vaikuttavat kuunteluhuoneen akustiikkaan, mikä tulee ottaa huomioon kaiutinkuunteluita järjestettäessä. [8, 76]

Seuraavassa on esitetty lyhyesti yleisesti akustisissa kuuntelutesteissä käytetyt koetyypit [38]:

- Säättäminen: koehenkilö säätää ääninäytettä halutulle tasolle, esimerkiksi tasolle, jonka hän juuri ja juuri kuulee
- Magnitudin arviointi/säättäminen:
  - o Koehenkilö sijoittaa ääninäytteet numeeriselle asteikolle niiden ”äänekyyden” (*engl. loudness*) mukaan.
  - o Vertailu referenssiääninäytteeseen. Näytteet esitetään pareittain (ref. ja varsinainen näyte). Referenssinäytteelle voidaan antaa jokin arvo ja kuuntelijat ilmoittavat näytteen arvon suhteessa vertailuarvoon.
  - o Magnitudin säättäminen. Koehenkilölle ilmoitetaan varsinaisen ääninäytteen ja referenssinäytteen tavoiteltu suhdeluku ja koehenkilö säätää näytteen voimakkuutta.
- Pakotetut testit: ääninäytteen/näytteiden perusteella esitetään kysymys, johon on ennalta määrätty vastausvaihtoehdot, Yleensä vastausvaihtoehtoina ovat ”kyllä” tai ”ei”

## 2.2.2 TU 0901-hankkeen mukainen kuuntelukoe

Vuonna 2014 julkaistussa Cost Action TU 0901 ”Building acoustics throughout Europe, Volume 1, Chapter 7”:ssä on esitetty toimintatapaohje, kuinka rakennus- ja huoneakustiikkaan liittyviä kuuntelukokeita tulisi tehdä. Toimintatapaohje on koostettu laajan tutkijaryhmän yhteistyönä ja lähdeaineistona on käytetty useita tieteellisiä julkaisuja. Tutkimushankkeen pohjalta on ehdotettu seuraavaa menettelyä kuuntelukokeen suorittamiseksi [97]:

1. Alkuperäisen äänisignaalin nauhoittaminen tai signaalin mallintaminen
2. Äänen etenemisen mallintaminen tai mittaaminen
3. Vastaanottajan tai koehenkilön HRTF:n määrittely
4. Ääninäytteen toistaminen koehenkilölle ja vastausten kerääminen

Alkuperäinen äänisignaali voidaan joko äänittää ”todellisesta” äänilähteestä tai tuottaa tietokoneella. Äänilähde voi olla esimerkiksi ihmisen puhe, kävely tai askeläänikoneen koputus lattian pintaan. Kappaleessa 2.2.1 esitetystä poiketen Cost Action TU 0901-hankkeen selvityksessä oli mukana myös auralisaatioihin perustuvat kuuntelukokeet. Selvityksen mukaan auralisaatioita käytetään pääasiassa huoneakustiikan kuuntelukokeissa. Selvityksen mukaan alkuperäinen äänisignaali tulisi äänittää kaiuttomassa huoneessa. [97]

Rakennusakustiikan kuuntelukokeissa äänen etenemisen mallintaminen tarkoittaa rakenteen ilma- tai askelääneneristävyyden selvittämistä. Kuten tämän tutkimuksen luvussa 3 esitetään, tänä päivänä ei ole saatavissa luotettavia laskentamalleja puuvälipohjien askelääneneristävyyden arvioimiseksi. Puuvälipohjien tapauksessa äänisignaalin eteneminen selvitetäänkin askeläänitasomittausten avulla. Askeläänitasomittaukset on tehtävä binauraalisesti, jotta ääninäytteitä toistettaessa voidaan ottaa huomioon HRTF. [97]

Ääninäyte voidaan toistaa koehenkilölle joko monikanavaisella kaiutinsysteemillä tai kuulokkeilla. Molemmissa toistotavoissa on otettava huomioon itse toistomenetelmän vaikutus toistettavaan signaaliin: esimerkiksi kaiuttimien sijainti koehenkilöön nähden ja toistolaitteiden taajuusvasteet. [97]

TU 0901 Vol. 1 -selvityksen kappaleen 7 mukaan myös tila, jossa kuuntelukoe tehdään, vaikuttaa koetuloksiin. Koetilan taustäänitason tulisi olla vähintään 10dB alhaisempi kuin tutkimuksessa toistettavat äänitasot. Tämä raja koskee sekä kaiutin- että kuulokekuunteluita. Myös visuaalisten ärsykkeiden on havaittu vaikuttavan kuuntelukokeiden tuloksiin. Esimerkiksi kokeiden aikana näytetyt kuvat vaikuttavat kuuntelukokeiden tuloksiin. [97] Kuuntelukokeiden tulosten luotettavuuden kannalta on tärkeää, että kokeen akustiset ja visuaaliset olosuhteet ovat samat kaikille koehenkilöille. Useissa Cost TU 0901-loppuraportissa esitellyissä kuuntelukokeissa kaiutinkuuntelut oli toteutettu niin, että koehenkilöt eivät nähneet kaiuttimia vaan ääninäyte tuli verhoilla tai muulla tavoin toteutetun seinän takaa. [46, 53, 100, 113]

TU0901 vol. 1-selvityksen kappaleessa 7 ei esitetä valmiita psykoakustisia mittaustapoja, sillä sopiva koetyyppi riippuu mittauksesta. Sekä paritestit, jossa kahta ääninäytettä verrataan keskenään, että koetyypit, jossa koehenkilöt arvioivat ääninäytettä ilman vertailuääninäytettä soveltuvat rakennusakustiikan tutkimuksiin. Vertailuissa voidaan käyttää joko etukäteen määritettyä sanallista tai numeerista asteikkoa. Tutkimuslaboratoriossa tapahtuva lyhytkestoinen, 2-7 sekunnin mittaisista näytteistä koostuva kuuntelukoe vastaa huonosti todellista kuuntelutilannetta tavallisessa asuinhuoneistossa. Tämän vuoksi on parempi pyytää koehenkilöitä järjestämään ääninäytteet vertailemalla niiden keskinäistä häiritsevyyttä kuin arvioimaan yksittäisen ääninäytteen häiritsevyyttä esimerkiksi numeerisella asteikolla. [97]

### 2.2.3 Kyselyt

Rakennusten akustisia ominaisuuksia koskevissa haastattelututkimuksissa on yleisesti pyritty selvittämään asukkaiden mielipidettä asuntonsa akustisista ominaisuuksista [6, 54, 59, 60, 61, 74, 75, 76, 98]. Haastattelujen lisäksi on usein tehty myös askel- ja ilmääneneristävyuden mittauksia, jotta haastattelun tuloksia on voitu vertailla objektiivisiin mittalukuihin [6, 54, 62, 74, 75, 76].

Haastattelututkimuksessa pyritään siihen, että otanta on tilastollisesti edustava. Tilastotieteen kannalta tutkimuksen luotettavuus kasvaa, kun otantaa suurennetaan, koska tällöin yksittäisen arvon merkitys kokonaisuuden kannalta pienenee [92]. Toisaalta, jos haastattelun kysymykset tai vastausvaihtoehdot on aseteltu huonosti, vastaukset eivät anna oikeaa kuvaa tutkittavan ilmiön merkittävyydestä eikä laajasta otannasta ole tällöin hyötyä [79].

Rakennusten akustiikan kyselytutkimuksissa on käytetty suhteellisen laajaa otantaa [6, 61, 62, 75, 76, 98]. Vuonna 1981 julkaistussa Langdon et al. asuinhuoneistojen akustisia ominaisuuksia koskevaan tutkimukseen haastateltiin 917 henkilöä. Haastateltaviksi valittiin ihmisiä, jotka asuivat Iso-Britanniassa vuoden 1970 jälkeen valmistuneissa rivitaloissa. [75] Rakennusakustiikan haastattelututkimuksissa haastateltavia henkilöitä on valittu sekä asuinrakennuksen tyyppin mukaan [6, 75, 76] että satunnaisesti edustamaan yleistä mielipidettä [62, 98]. Osana Jeon et al. tutkimusta toteutettiin haastattelututkimus, johon osallistui 1200 20-50-vuotiasta henkilöä. Haastattelulla selvitettiin ihmisten mielipiteitä asuinympäristöstään ja sen viihtyisyyteen vaikuttavista tekijöistä [62]. Kuten edellisessä kappaleessa on käynyt ilmi, haastattelututkimuksia on tehty jo 1960-luvulta lähtien. Haastattelukäytännöt eivät kuitenkaan ole täysin vakiintuneet, joten tutkimustulosten vertailussa on haasteita [105].

Haastattelututkimukset voidaan jakaa tiedonkeruutavan mukaan joko haastatteluihin, jossa haastattelijä haastattelee koehenkilöitä tai kyselyihin, jossa koehenkilöt vastaavat kysymyksiin itsenäisesti, esimerkiksi sähköisen lomakkeen avulla. Kun haastattelijä ja haastateltava ovat kasvotusten, vastausprosentti on yleensä korkea; korkeampi kuin puhelinhaastatteluissa tai lomakekyselyssä. Toisaalta henkilökohtaiset haastattelut ovat yleensä kalliimpia ja hitaampia toteuttaa kuin muut haastattelumuodot. Haastattelijointa käytettäessä on otettava huomioon haastatteliijoilta vaadittava ammattitaito sekä haastattelemisesta että tutkittavasta aiheesta. Henkilökohtainen haastattelu on osoittautunut hyväksi haastattelutavaksi, kun haastattelu on pitkä tai monimutkainen. [47]

Tietokoneavusteiseen haastatteluun ei sisälly haastattelijan inhimillistä vaikutusta eikä mahdollisia virheitä, kuten kysymysten unohtamista tai väärää esitysjärjestystä. Toisaalta, kun testi on täysin tietokoneohjattu, ohjelmointivirheet tai huonosti asetellut kysymykset paljastuvat pahimmassa tapauksessa vasta testin tulosten tarkastelussa. Esimerkiksi kyselylomakkeen graafinen ilme tai vastausvaihtoehtojen asettelu voivat vaikuttaa haastateltavien vastauksiin. Toisin kuin tietokone, ammattitaitoinen haastattelijä voi tehdä tulkintoja myös haastateltavan eleistä tai vastaustavasta. Toisaalta inhimillinen tulkinta voi johtaa myös väärään johtopäätökseen. [47]

Haastattelukysymyksiä suunniteltaessa on otettava huomioon haastateltavien kyky ymmärtää kysymykset ja peilata kysytyjä asioita omiin kokemuksiinsa. Koehenkilöt saattavat myös tulkita erilaisia vastausvaihtoehtoja hyvin eri tavalla. Tutkimuksissa on havaittu, että vastausten hajonta on pienempi, kun käytetään numeerista vastausasteikkoa, verrattuna sanallisesti kuvailtuun kategoriseen asteikkoon. [97, 104]

2000-luvulla tehdyissä tutkimuksissa on käytetty sekä henkilökohtaisia haastatteluja [49, 61] että lomakkeita [54, 62, 76].

## 2.2.4 TU 0901-hankkeen mukainen kyselylomake

Yhteiseurooppalaisen COST TU 0901-tutkimushankkeen tavoitteena oli kehittää rakennusakustiikan tutkimus- ja mittauskäytäntöjen yhteneväisyyttä. Yhtenä tavoitteena oli kehittää subjektiivisten ja objektiivisten arvioiden vertailtavuutta eri rakennusakustiikan tutkimusten välillä. Kysely ja siihen liittyvä vastauslomake on julkaistu Cost TU0901-tutkimusraportin 1 luvussa 6: ”Developing a Uniform Questionnaire for Socio-Acoustic Surveys in Residential Buildings”. Kyselyä on kehitetty laajan eurooppalaisen tutkijaryhmän yhteistyönä ja lähdeaineistona on käytetty useita tieteellisiä julkaisuja sekä tutkijaryhmän käytännön kokemuksia kyselytutkimuksista [97].

TU 0901-hankkeessa kehitetty kysely soveltuu sosio-akustisiin tutkimuksiin. Sosio-akustisten tutkimusten tarkoituksena on selvittää, kuinka objektiiviset mittaluvut vastaavat subjektiivisia arvioita akustisista ominaisuuksista, tässä tapauksessa asuntojen akustisista ominaisuuksista. Nämä tutkimukset vaativat sekä asuntojen asukkaiden haastattelun että akustisten mittalukujen selvittämisen. TU 0901-hankkeessa kehitetty kyselylomake mahdollistaa asunnon ääneneristävyyteen liittyvien mitattujen yksilukuarvojen vertailemisen subjektiivisiin arvioihin. [97]

Akustiset mittaluvut voidaan määrittää joko rakennusakustisilla kenttämittauksilla tai olemassa olevan tutkimustiedon perusteella. Tämä tarkoittaa, että mittalukuarvot määritetään rakennuspiirustusten, esimerkkirakenteiden, laboratoriokokeiden tai laskentaohjelmien avulla. Kenttämittaukset tulee tehdä vähintään 5 % kaikista kyselyyn osallistuvista asunnoista. [97]

TU0901-hankkeessa kehitetyn kyselyn käyttöön liittyy rajoitteita, jotka on syytä ottaa huomioon tutkimusta suunniteltaessa. Kyselyn avulla ei ole tarkoitus tehdä päätelmiä yksittäisten vastaajien meluherkkyydestä, tai yksittäisestä melulähteestä, vaan tutkimus kuvaa laajan ihmisjoukon keskimääräistä kokemusta asuntojen akustisista ominaisuuksista. Kysely on suunniteltu kerros- ja rivitaloissa tapahtuvaan tutkimukseen. Tutkimuskysymykset ovat laadittu tarkasti ja kysymysten muuttaminen tai lisääminen vaikeuttaa eri tutkimuksissa saatujen tulosten vertailemista. Joissakin tapauksessa osa kysymyksistä voi olla epäolennaisia, esimerkiksi askelääneneristävyys yksikerroksissa rivitaloissa, mutta tällöinkään kysymyksiä ei saa poistaa lomakkeesta. Epäolennaiset kysymykset merkitään siten, että vastaajalle on selvää, ettei niihin tarvitse vastata. [97]

TU 0901-selvityksen mukaan vastauslomakkeen tulee olla mahdollisimman lyhyt ja selkeä, jotta vastausaste pysyy korkeana. Tämän vuoksi varsinainen vastauslomake on yhden A4 arkin pituinen, jolloin vastausaste on kyseisen Cost-selvityksen mukaan usein yli 70 %. Kyselyn sanavalinnat ja termit on laadittu tarkasti niin, että niiden kääntäminen eri kielille olisi mahdollisimman selkeää. TU 0901-selvityksen mukaan sanavalinnoilla voi olla merkittävä vaikutus vastauksiin. Itse kyselylomakkeessa on käytetty nu-



meerista asteikkoa 0-10. Numeerinen asteikko ja sen arvot selitetty tarkasti vastauslomakkeen alussa. [97]

TU 0901-selvityksen mukaisen vastauslomakkeen rakenne on seuraava:

1. Johdanto ja henkilötiedot: Vastaajan ikä, sukupuoli, asunnossa asutut vuodet asukkaiden lukumäärä asunnossa yms.
2. Ohjeistus: Ohjeet, kuinka kysymyksiin vastataan ja numeerisen asteikon selitys
3. Esimerkki vastaus
4. Yleinen/harjoittelukysymys: ”Kuinka paljon vastaaja on häiriintynyt naapureista tai talotekniikan johtuvasta melusta viimeisen 12 kuukauden aikana?”
5. Kysymykset eri melulähteiden tuottamasta melusta
6. Kysymys vastaajan odotuksista meluolosuhteiden suhteen: ”Kuinka tärkeänä vastaaja piti ääneneristävyyttä ennen kyseiseen asuntoon muuttamista?”
7. Kysymys vastaajan meluherkkyydestä
8. Vastaus omin sanoin: Koehenkilö vastaa omin sanoin kysymykseen ”Mitkä ominaisuudet tekevät häiritsevimmistä melulähteistä erityisen häiritseviä? Mitä äänilähteen ominaisuuksia pidät melun häiritsevyyden kannalta tärkeinä?”
9. Kyselyn toteuttajan merkinnät: tätä osuutta ei lisätä haastateltaville jaettavaan kyselylomakkeeseen

TU 0901-selvityksen perusteella on esitetty seuraava toteutustapa sosio-akustisen tutkimuksen kyselyosuudelle:

1. Tiedotus asukkaille: Milloin ja kuinka kysely toteutetaan
2. Vastauslomakkeiden toimittaminen asukkaille
3. Asukkaiden muistutus
4. Lomakkeiden keräys asukkailta

TU 0901-hankkeen mukaiseen haastattelulomakkeeseen pohjautuvia kyselyitä on toteutettu useissa laajoissa sosio-akustisissa tutkimuksissa, kuten Suomessa ÄKK-hankkeessa sekä Akulite-, Acuwood- ja Acoubois-hankkeessa. ÄKK-hankkeessa tutkittiin asukkaiden tyytyväisyyttä asunnon akustisiin ominaisuuksiin betonikerrostalossa. Akulite- ja Acuwood-hankkeen tutkimuskohteina olivat puu-, teräs- ja betonirunkoiset välipohjat. Ranskalaisessa Acoubois-hankkeessa tutkittiin puukerrostalojen ääneneristävyttä. [49, 54, 76, 97]

## 2.3 Subjektiiivisten ja objektiivisten mittalukujen korrelaatio

Kuten kappaleessa 2.1 esitettiin, subjektiivisten ja objektiivisten ääneneristävyysarvoien eroista on käyty tiedemaailmassa keskustelua jo vuosikymmeniä. Tässä tutkimuksessa keskitytään puuvälipohjien askelääneneristävyiden arvioihin. Kuten johdantokappaleessa 1.1 esitettiin, pienien taajuuksien eristäminen on yksi puuvälipohjien askelää-

neneristävyyden haasteista ja monissa viimeaikaisissa sosio-akustisissa tutkimuksissa on tarkasteltu erityisesti pienitaajuisten melun vaikutusta subjektiivisiin arvioihin ääneneristävyydestä [46, 54, 76]. Kuten kappaleessa 2.1 esitettiin, pienten taajuuksien merkitys subjektiivisiin arvioihin nostettiin esiin jo Belmondo et al. tutkimuksessa vuonna 1973 [4].

Suomen nykyisten rakennusmääräysten mukaan alle 100 Hz taajuuksia ei tarvitse ottaa huomioon askeläänitasoluvun laskennassa [36, 111]. Askeläänitasoluvut  $L_{n,w}$  ja  $L'_{n,w}$  määritetään standardin ISO 717-2:1996 mukaan vertailukäyrämenettelyllä. Menettelyssä otetaan huomioon askeläänitasot 1/3-oktaavikaistan keskitaajuuksittain 100-3150 Hz taajuusalueella. Standardin ISO 717-2 liitteessä A on määritetty spektripainotustermin  $C_I$  laskenta, mutta spektripainotustermin käyttö on vapaaehtoista. Spektripainotustermi lisätään yksilukuarvoon, jolloin spektripainotettu yksiluku arvo ilmaistaan  $L_{n,w} + C_I$  tai  $L'_{n,w} + C_I$ . ISO 717-2 liitteen A mukaan vapaaehtoinen spektripainotustermi  $C_I$  on esitetty, koska  $L_{n,w}$  mittaluku yksinään ei huomio riittävästi puuvälipohjien tai betonivälipohjan päälle asennettujen pintarakenteiden vaikutusta askeläänitasolukuun. [36] Myös Suomen rakennusmääräyskokoelmassa C1 todetaan, että  $L'_{n,w}$  mittaluku ei ota huomioon pieniä taajuuksia ja pienitaajuinen ääni saattaa kuulua ”häiritseväenä kuminana” [111].

Se, kuinka pienet taajuudet tulisi ottaa huomioon mittalukujen laskennassa, jakaa tutkijakunnan mielipiteet, kuten jo kappaleessa 1.1 osoitettiin. Hongisto et al. tutkimuksen mukaan rakennetyypillä ei ole vaikutusta kyselytutkimuksen avulla kerättyihin subjektiivisiin arvioihin ilmaääneneristävyydestä. Kun väliseinä, kevyt- tai raskasrakenteinen, täyttää Suomen rakennusmääräysten mukaisen ilmaääneneristävyyssluvuvaatimuksen,  $R'_w \leq 53$  dB, pienitaajuisella melulla ei havaittu olevan vaikutusta subjektiivisiin arvioihin ääneneristävyydestä. Hongisto kuitenkin korostaa, että edellä esitettyihin johtopäätöksiin on päädytty betonikerrostaloissa ja puurakennusten osalta tarvitaan lisää tutkimusta. [54]

Ljunggren et al. ovat esittäneet sosio-akustisen tutkimuksen perusteella, että pienet taajuudet vaikuttavat merkittävästi subjektiivisten ja objektiivisten arvioiden korrelaatioon. Ljunggren et al. tutkimuksessa tutkittiin välipohjien askel- ja ilmaääneneristävyyttä. Tutkimustulosten mukaan puuvälipohjilla  $L'_{n,w} + C_{I,50-2500}$  korrelaatiokerroin  $R^2$  subjektiivisen arvion kanssa oli 0,32 ja tutkimuksessa kehitetyn mittaluvun  $L'_{n,w} + C_{I,20-2500}$  korrelaatiokerroin  $R^2$  oli 0,85. Tutkimuksessa oli mukana 10 puukerrostaloa. [77] Rindelin mukaan Tanskan teknillisen yliopiston tutkimustulosten perusteella  $L'_{n,w} + C_{I,50-2500}$  arvo korreloi paremmin subjektiivisten aistimusten kanssa kuin pelkkä  $L'_{n,w}$  [100]. Hongisto on omassa tutkimuksessaan kritisoinut Ljunggren et al. tutkimusta tilastollisista epätarkkuuksista [54].

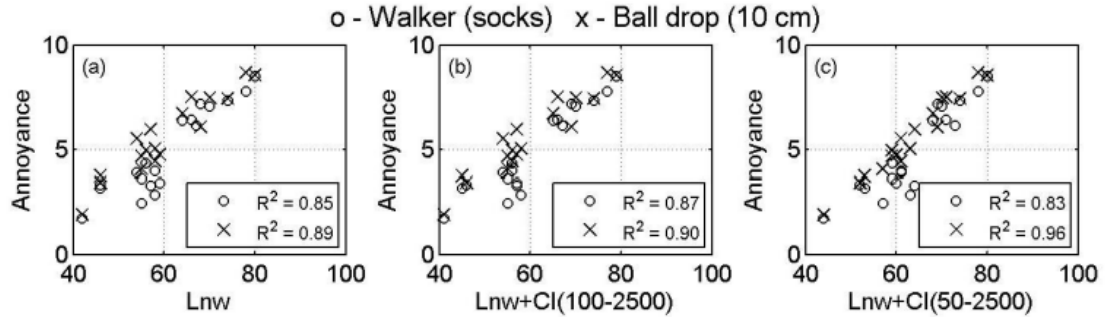
Osana Akulite-tutkimushanketta tutkittiin kuuntelukokeiden avulla pienten taajuuksien vaikutusta subjektiiviseen arvioon askeläänen voimakkuudesta. Tutkimuksessa koehenkilöille soitettiin kaiuttimilla ääninäytteitä askeläänistä: todellisia ääninäytteitä sekä näytteitä, joista oli poistettu alle 100 Hz tai alle 50 Hz taajuudet. Ääninäytteissä puuttuneet pienet taajuudet vaikuttivat merkittävästi aistittuun askeläänen voimakkuuteen. Muutos oli erityisen merkittävä, kun ääninäytteistä poistettiin alle 100 Hz taajuudet. Myös alle 50 Hz taajuuksien poistamisella havaittiin olevan vaikutus askeläänitaso aistimukseen. Pienten taajuuksien äänitason mittausongelma vältettiin, kun välipohjan äänitaso määritettiin mittaamalla alakattolevyn värähtely kiihtyvyyssantureiden avulla. Kuuntelukokeissa tarvittavat äänitasot määritettiin mitattujen värähtelytasojen perusteella. [113]

Vuonna 2014 julkaistussa Guigou-Carter et al. sosio-akustisessa tutkimuksessa tutkittiin puurakennusten akustisia ominaisuuksia. Sosio-akustinen tutkimus oli osa laajempaa Acoubois-tutkimushanketta. Tutkimuksessa käytetty kyselylomake pohjautui osin COST TU 0901-selvityksessä esitettyyn kyselylomakkeeseen. Tutkimuksessa oli mukana 10 taloyhtiötä, puurakenteisia kerros- ja rivitaloja. Tutkimuksen perusteella ei havaittu merkittävää eroa  $L'_{n,w}$  ja  $L'_{n,w} + C_{I,50-2500}$  arvojen ja subjektiivisten arvioiden korrelaatiokertoimien välillä. Spekitripainotusterman huomioonottaminen kuitenkin paransi mittalukujen ja subjektiivisten arvioiden korrelaatiota. [49]

Kanadalaisessa Gover et al. tutkimuksessa määritettiin kuuntelukokeiden avulla eri askeläänilähteiden välistä korrelaatiota. Tutkimuksen askeläänitasomittaukset tehtiin laboratoriossa yhdellä mikrofoniolla ja ääninäytteet toistettiin koehenkilöille koehuoneen kattoon asennetuista kaiuttimista. Itse kuuntelukoe toteutettiin paritestinä, jossa koehenkilöiden piti arvioida ääninäytteiden keskinäistä häiritsevyyttä. Paritestien tulosten perusteella välipohjat asetettiin paremmuusjärjestykseen, jota verrattiin välipohjien objektiivisesti määritettyihin mittalukuarvoihin, esimerkiksi ISO 717-2:1996  $L_{n,w}$ ,  $L_{n,w} + C_{I,100-2500}$  ja  $L_{n,w} + C_{I,50-2500}$  arvoihin. Tutkimuksessa oli mukana 19 erilaista puuvälipohjaa ja 12 koekuuntelijaa. Tutkimustuloksia on esitetty kuvan 5 kuvaajissa ja taulukossa 1. [46]

**Taulukko 1: Korrelaatiokertoimet  $R^2$  ISO 717-2 mukaisille askeläänitasoluville ja subjektiivisille arvioille kävelyn aiheuttaman askeläänitason häiritsevyydestä [46].**

Yksilukuarvo/ askeläänilähde	$L_{n,w}$	$L_{n,w} + C_{I,50-2500}$	$L'_{n,w} + C_{I,100-2500}$
Kävely	0,85	0,83	0,87



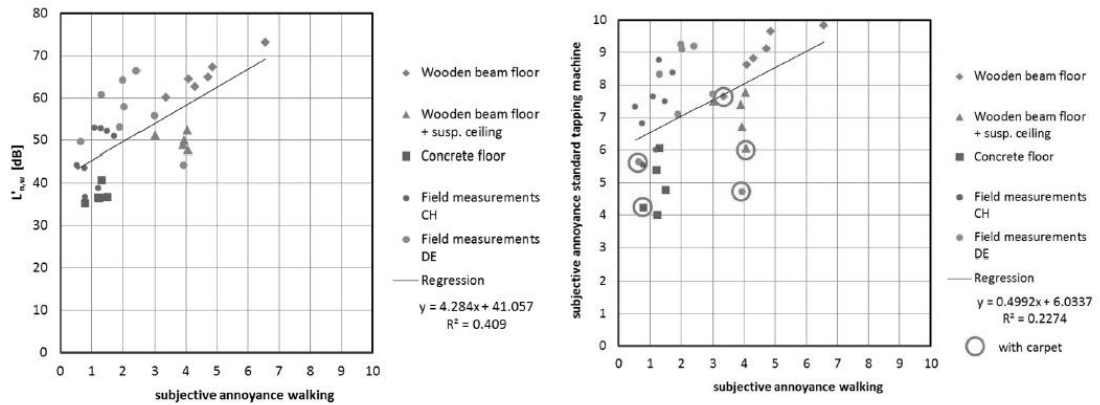
**Kuva 5:** Kuvaajissa on esitetty ISO 717-2 mukaan määritettyjen mittalukujen suhde kävelyn ja pallopudotuksen aiheuttaman askeläänen koettuun häiritsevyyteen. Ohessa myös korrelaatiokertoimet  $R^2$ . [46]

Osana Acuwood-hanketta tutkittiin subjektiivisten ja objektiivisten askelääneneristävyyden yhteneväisyyttä kuuntelukokeiden avulla. Askeläänitasomittauksia tehtiin sekä laboratoriossa että kenttäkohteissa, yhteensä 32 eri välipohjarakenteella, joista 16 oli kenttäkohteita. Kenttäkohteiden mittauksiin sisältyi myös sivutiesiirtymät. Askeläänilähteinä käytettiin ISO 10140-5 mukaista askeläänikonetta ja modifioitua askeläänikonetta sekä japanilaisen standardin JIS A 1419-2 mukaista kumipalloa. Näitä standardoituja askeläänilähteitä verrattiin välipohjalla kävelyn ja tuolin siirtämisen tuottamiin askeläänitasoihin. Askeläänitettiin keinopää-tekniikalla ja äänitteet toistettiin koehenkilöille kuulokkeilla. Tutkimustulosten mukaan puuvälipohjilla kävelyn tuottama askeläänitaso korreloi huonosti standardoidun askeläänikoneen tuottamaan askeläänitasoon. Korrelaatio määritettiin kuuntelutestien perusteella saatujen subjektiivisten arvioiden perusteella. [109]

**Taulukko 2:** Korrelaatiokertoimet  $R^2$  eri mittaluvuille. Askeläänitasolukujen laskennassa äänilähteenä oli ISO 10140-5 mukainen askeläänikone [109].

Yksiluarvo/ askeläänilähde	$L'_{n,w}$	$L'_{n,w} + C_{I,50-2500}$	$L'_{n,w} + C_{I,20-2500}$
Kävely	0,41	0,61	0,56

Kuvassa 6 on esitetty kaksi kuvaajaa Späh et al. tutkimuksesta [109]. Vasemmanpuoleisessa kuvaajassa on esitetty välipohjien askeläänitasoluvun suhde kävelyn tuottamaan askeläänitasoon häiritsevyyteen. Häiritsevyys on arvioitu subjektiivisesti. Kuvan 6 oikeanpuoleisessa kuvaajassa on esitetty välipohjien subjektiivisten arvioiden välinen suhde. Pystyakselilla on subjektiivinen arvio välipohjan hyvyydestä, kun askeläänilähteenä oli ISO 10140-5 mukainen askeläänikone. Vaaka-akselilla äänilähteenä oli ”kävelijä”.



**Kuva 6:** Vasemman puoleisessa: kävelystä johtuvan askeläänen häiritsevyyden korrelaatio  $L'_{n,w}$  askeläänitasolukuun. Oikean puoleisessa kuvassa: subjektiivisten häiritsevyyksien korrelaatio, kun kuuntelukokeissa äänilähteinä olivat kävely ja ISO 10140-5 mukainen askeläänikone [109].

Kuten Späh et al. tutkimustuloksista voidaan havaita, subjektiiviset arviot askeläänikoneen tuottamasta askeläänitasosta korreloivat heikosti kävelyn tuottamaan askeläänitason häiritsevyyteen. Se, että subjektiiviset arviot standardoidun askeläänikoneen tuottamasta askeläänitasosta eivät vastaa subjektiivisia arvioita kävelyn tuottamasta äänitasosta, on tiedetty jo 1960-luvulta lähtien [80, 89].

## 2.4 Johtopäätökset

Kuten kappaleiden 2.1–2.3 kirjallisuusselvityksestä käy ilmi, subjektiivisten kokeiden avulla on saatu tärkeää tietoa välipohjien akustisesta toiminnasta. COST TU 0901-hankkeen mukaiset kuuntelukoeohjeet ja haastattelulomakkeet tarjoavat hyvän ja mittaustulosten vertailun mahdollistavan pohjan subjektiivisten kokeiden suorittamiseen. Kuten edellä kappaleessa 2.2.4 ilmi, Acuwod-, Akulite- ja Acoubois-hankkeiden perusteella TU 0901-hankkeen mukainen kyselylomake on todettu toimivaksi myös puurakennusten akustisia ominaisuuksia tarkasteltaessa.

Kuuntelukokeisiin perustuvien tutkimusten tulosten vertailua hankaloittaa tutkimuksissa käytetyt erilaiset koejärjestelyt. Esimerkiksi Gover et al. ja Späh et al. tutkimustuloksissa on korrelaatiokertoimien osalta merkittäviä eroja. Gover et al. tutkimuksessa ääninäytteet tallennettiin yhdellä mikrofonilla, kun taas Späh et al. tutkimuksessa tallennukseen käytettiin binauraalista tallennustapaa. Myös kävelyherätteen toteuttamisessa ja välipohjarakennetyypeissä oli useita eroja. Merkittävin ero lienee se, että Späh et al. tutkimuksessa oli mukana sekä laboratorio- että kenttämittaustuloksia.

Korrelaatiokertoimien eroista huolimatta molemmat tutkimukset [46, 109] osoittavat, että puuvälipohjilla pienten taajuuksien huomioonottaminen parantaa subjektiivisten ja objektiivisten arvioiden vastaavuutta. Kuten myöhemmin kappaleessa 3.6.8 osoitetaan, mittaustarkkuus on epävarmuustekijä, erityisesti, kun äänitasomittauksia tehdään alle

100 Hz taajuusalueella. Kummassakaan edellä mainitussa tutkimuksessa [46, 109] ei mainittu, kuinka pienten taajuuksien mittausepävarmuudet otettiin huomioon.

Myös kyselytutkimusten perusteella pienten taajuuksien huomioonottaminen mittalukujen laskennassa parantaa subjektiivisten ja objektiivisten arvioiden vastaavuutta. Kuten kappaleessa 2.3 todettiin, Ljunggren et al. mukaan pienten taajuuksien merkitys subjektiivisten ja objektiivisten korrelaatiolle olisi erittäin suuri. Toisaalta Guigou-Carter et al. tutkimuksessa pienten taajuuksien vaikutusta ei havaittu yhtä suureksi. Guigou-Carterin tutkimuksissa käsiteltiin myös rivitaloja, kun taas Ljunggren et al. tutkimuksessa pelkästään puukerrostaloja. Kysymyssarjoissa ja haastattelumenetelmissä oli myös eroja.

### 3. ASKELÄÄNENERISTÄVYYDEN LASKENNALLINEN ARVIOINTI

#### 3.1 Johdanto

Monikerroksisissa puurakennuksissa välipohjan askelääneneristävyys on yksi asunnon ääneneristykseen pullonkauloista, kuten kappaleessa 1.1. tuotiin esille. Puurakennusten ääniolosuhteita kokonaisuutena käsiteltiin tarkemmin johdantokappaleessa. Rakenteiden keveys tuo haastetta askelääneneristävyyden toteutukseen, sillä kuten myöhemmin kappaleissa 3.6.3 ja 3.6.4 osoitetaan, massalla on merkittävä parantava vaikutus välipohjarakenteiden askelääneneristävyyteen. Toinen merkittävä värähtelytekninen ero puuvälipohjien ja yleisesti käytössä olevien betonivälipohjien välillä on rakennekerrosten ja liitosten määrä. Puuvälipohjat koostuvat useista eri materiaalikerroksista, jotka on liitetty toisiinsa erityyppisin liitoksien. Betonivälipohjia voidaan pitää homogeenisina ja puuvälipohjiin verrattuna niissä on vähän liitoksia. [9, 17, 55, 122]

Välipohjien askelääneneristävyyden arvioimiseksi on kehitetty useita erilaisia laskentamalleja, jotka voidaan jakaa karkeasti kahteen pääryhmään niiden taustalla olevan teorian ja laskentafilosofian mukaan: deterministisiin malleihin ja eriasteisiin empiirisiin malleihin, joista merkittävimpänä energia-mallit [11, 15]. Deterministisissä malleissa pyritään kuvaamaan fyysiset tapahtumat mahdollisimman tarkasti fysiikan lakien mukaan ja ratkaisemaan ongelmat analyttisesti. Energia-mallit perustuvat puolestaan laskentamallin eri komponenttien välillä siirtyvään keskimääräiseen ääni- ja värähtelyenergiaan. Numeerisen laskennan FEM- ja BEM-mallit, (*engl. Finite Element Method ja Boundary Element Method*), lukeutuvat deterministisiin malleihin. [11, 39]

Energiamalleissa käytetään paljon kokemusperäistä tietoa, mikä on nykyisellään johtanut siihen, että käytössä olevat mallit soveltuvat parhaiten raskaille ja homogeenisille välipohjarakenteille [6, 39]. Nykyinen ISO 12354-2-standardin mukainen välipohjan askelääneneristävyyden ja sivutiesiirtymien laskentamenetelmä perustuu yksinkertaiseen, ensimmäisen asteen, SEA-tyyppiseen energiamalliin, (*engl. Statistical Energy Analysis*), ja soveltuu vain homogeenisille välipohjille [6, 18 29, 43, 44].

Laskennallisten menetelmien kehittämiseen tarvitaan tuloksia sekä laboratorioolosuhteista että todellisessa rakennuksissa tehdyistä mittauksista. Puuvälipohjia on tutkittu parametrisissa tutkimuksissa, joissa on selvitetty ilmaääneneristävyys- ja askeläänitasomittausten avulla eri välipohjan rakenteellisten ominaisuuksien vaikutusta askelääneneristävyyteen. Näiden, niin sanottujen parametristen tutkimusten, tuloksia on

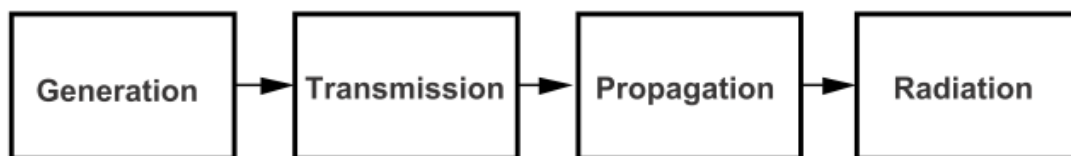
käytetty apuna välipohjien suunnittelussa sekä laskentamallien kehittämisessä [15, 121, 122, 131].

Parametrisia tutkimuksia on käytetty avuksi myös varsinaisten laskentamallien testaamiseen sekä kuuntelukokeissa, joissa on vertailtu objektiivisten ja subjektiivisten arvioiden yhtenevyyttä. [6, 46, 108]

Parametrisia tutkimukset ovat tarpeen kevytrakenteisten välipohjien askelääneneristyksen tutkimuksessa, sillä käytössä ei vielä ole yleisesti hyväksyttyä laskentamallia. Laskentamallin luotettavuutta voidaan arvioida vertailemalla laskentamallin tuloksia samanlaisen rakenteen mittaustuloksiin.

### 3.2 Teoreettinen levyn ja palkin värähtely

Puurakennuksissa välipohjat koostuvat usein erityyppisistä levy-palkki/ranka yhdistelmistä tai massiivipuelementeistä. Välipohjan akustisen toiminnan ymmärtämiseksi on ensin selvitettävä yksittäisten rakennusosien toiminta. Kun rakennusosat yhdistetään toisiinsa, esimerkiksi ruuviliitoksella, muodostuu mekaaninen systeemi, joka poikkeaa yksittäisen palkin tai levyn värähtelykäyttäytymisestä [22, 55, 87, 115]. Cremer et al. ovat esittäneet kuvan 7 mukaisen jaottelun runkoäänien etenemisestä mekaanisessa systeemissä.



*Kuva 7: Runkoäänien etenemisen vaihteet Cremer et al. mukaan [22].*

*Generation:* herätteen syntymekanismi, esimerkiksi askeläänikone, ihmisen askel tai kaiuttimen tuottama diffuusi äänikenttä.

*Transmission:* herätteen siirtyminen lähteestä systeemiin. Siirtyvän energian määrään vaikuttaa sekä herätelähteen että systeemin mekaaniset ominaisuudet.

*Propagation:* Mekaaninen värähtelyn eteneminen systeemissä. Systeemi voi olla yksinkertainen levy tai monesta rakenneosasta koostuva kokonaisuus. Systeemissä etenevä mekaaninen värähtely vaimenee erilaisten häviöiden ansiosta. Häviötyyppejä ovat esimerkiksi sisäinen häviö ja liitoshäviö systeemin eri osien välillä.

*Radiation:* Systemin mekaaninen värähtely siirtyy ympäröivään väliaineeseen, ilmaan, jolloin se aistitaan äänenä.



Mekaanisen värähtelyn teoreettinen mallintaminen on monimutkaista jo hyvin yksinkertaisille systeemeille ja laskennan helpottamiseksi värähtelevistä systeemeistä pyritäänkin usein luomaan mahdollisimman yksinkertainen rakennemalli. [55]

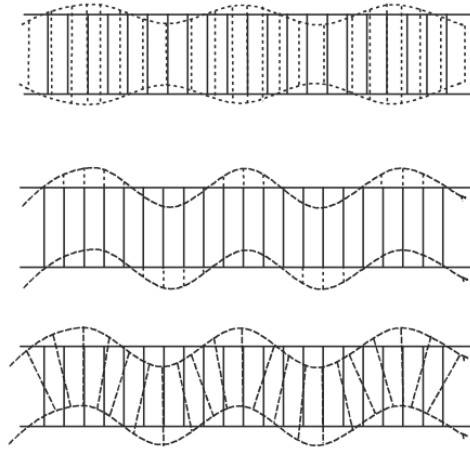
Puurakenteilla laskentamallin luomisen haasteet alkavat jo herätevoiman vaikutuksesta välipohjarakenteeseen. Raskaille ja homogeenisille rakenteille johdetut teoriat askeläänilähteen vaikutuksesta välipohjaan eivät sovellu kevyille ja ortotrooppisille puurakenteille. Toiseksi, puurakenteita voidaan pitää monimutkaisena värähtelysteeminä, jonka eristävyys perustuu pääasiassa liitoksissa tapahtuviin värähtelyhäviöihin. Näin ollen yksinkertaistetut rakenne- ja laskentamallit eivät sovellu puurakenteille. [6, 12, 17, 82].

Ortotrooppisilla materiaaleilla jäykkyysominaisuudet ovat riippuvaisia kuormitus suunnasta. Esimerkiksi puun lujuus on erilainen syiden suunnassa ja syitä kohtisuorassa suunnassa. Myös puusta valmistettujen rakennuslevyjen, kuten vanerin ja OSB levyjen, lujuusominaisuudet riippuvat tarkastelusuunnasta. Lujuusominaisuuksien vaihtelu vaikuttaa materiaalin värähtelykäyttäytymiseen [55, 82, 115, 122].

### 3.2.1 Levyn värähtely diffuusissa äänikentässä

Kiinteässä aineessa etenevä värähtely eroaa kaasussa etenevästä värähtelystä [22, 55, 115]. Kaasussa, kuten ilmassa, värähtely etenee ainoastaan pitkittäisenä aaltoliikkeenä, jolloin väliaineen partikkelit poikkeavat tasapainoasemasta vain aallon etenemissuunnan suuntaisesti. Kiinteässä aineessa värähtelyn etenemistyyppjä on useita. Kuvassa 8 on esitetty nämä kiinteän aineen aaltotyypit: kvasi-pitkittäinen, leikkaus- ja taivutusaalto. Näiden lisäksi levyssä voi edetä myös niin sanottu Rayleighin-aalto. Kvasi-pitkittäisessä aaltoliikkeessä partikkelit liikkuvat hiukan myös aaltoliikkeen etenemissuunnan normaalin suunnassa. Taivutusaalloissa aaltoliike tapahtuu aallon etenemissuunnan normaalin suuntaisesti, kuten leikkausaallossakin, mutta rakenteen partikkeleihin kohdistuu myös taivutusrasitusta toisin kuin leikkausaalloissa. Leikkausaaltojen ja pitkittäisaaltojen muodostumiseksi väliaineen kaikkien dimensioiden tulee olla huomattavasti suuremmat kuin etenevän aallon aallonpituus. [22, 55, 115]

Kappaleisiin syntyy taivutusaaltoja, jos yksi tai useampi kappaleen dimensio on pienempi kuin etenevän aallon aallonpituus. Tällaisia rakenteita ovat esimerkiksi ohuet levyt ja palkit [55]. Kun rakenteen partikkelit liikkuvat pinnan normaalin suuntaisesti, värähdysliike siirtyy tehokkaasti ympäröivään väliaineeseen. Tämä rakenneosan normaalin suuntainen värähtely saa aikaan pitkittäisiä paineaaltoja ilmassa, toisin sanoen ääniaaltoja. Tehokkaan äänentuottokyvyn takia taivutusaaltona etenevä värähtely on kiinteän kappaleen äänisäteilyn kannalta merkittävin värähtelymuoto. [22, 55]



**Kuva 8: Aaltotyypit kiinteässä aineessa. Ylhäältä alkaen: kvasi-pitkittäis-, leikkaus- ja taivutusaalto [115].**

Kiinteässä väliaineessa taivutusaallon etenemisnopeus muuttuu etenevän aaltoliikkeen taajuuden muuttuessa. Cremer et al. mukaan taajuuden ja taivutusaallon etenemisnopeuden suhde voidaan laskea kaavalla 1 [22].

$$\frac{\omega}{k} = c_b \quad (\text{kaava 1})$$

jossa  $\omega = 2 * \pi * f$  on kulmataajuus [rad/s],  $c_b$  on taivutusaallon etenemisnopeus väliaineessa ja  $k$  on aaltoluku. Cremer et al. mukaan levyn aaltoluvun ja kulmataajuuden suhde voidaan esittää taivutusaaltoyhtälön perusteella kaavan 2 mukaisesti [22].

$$\frac{B'}{m'} k_B^4 = \omega^2 \quad (\text{kaava 2})$$

Sijoittamalla kaavan 2 tiedot kaavan 1 saadaan kaavan 3 mukainen esitys taivutusaallon etenemisnopeudelle

$$c_B = \sqrt{\omega} * \sqrt[4]{\frac{B'}{m'}} \quad (\text{kaava 3})$$

jossa  $m'$  on levyn pintamassa [kg/m<sup>2</sup>]. Levyn taivutusjäykkyys  $B'$  [Nm] voidaan laskea kaavan 4 avulla.

$$B' = \frac{E * h^3}{12 * (1 - \nu^2)} \quad (\text{kaava 4})$$

kun  $E$  on levyn kimmomoduuli [N/m<sup>2</sup>],  $h$  levyn paksuus ja  $\nu$  on Poissonin vakio [-]. Ortotrooppisille materiaaleille voidaan laskea useita eri taivutusjäykkyyden arvoja, koska niiden jäykkyysominaisuudet ovat riippuvaisia tarkastelusuunnasta. Hopkinssin mukaan Cremer on esittänyt, että ortotrooppisten levyjen taivutusjäykkyys voidaan laskea kaavalla 5 [22]:

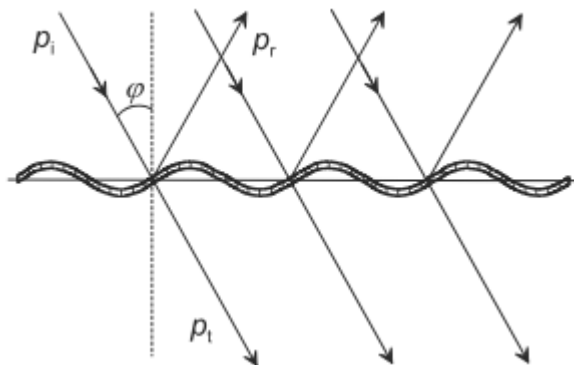
$$B_{eff} \approx \sqrt{B_x * B_y} \quad (\text{kaava 5})$$

jossa  $B_x$  ja  $B_y$  ovat levyn eri suunnille laskettuja taivutusjäykkyyksiä [54]. Isotrooppisilla materiaaleilla lujuusominaisuudet eivät ole riippuvaisia tarkastelusuunnasta, jolloin niiden taivutusjäykkyys voidaan laskea kaavalla 4. Tällaisia rakennustuotteita ovat esimerkiksi betoni ja kipsilevyt. Käytännössä kaavan 4 mukaista laskentatapaa käytetään myös ortotrooppisten levyjen tapauksessa [71]. Ortotrooppisuuden on havaittu vaikuttavan erityisesti mekaanisen värähtelyn etenemiseen levyissä [127]

Värähtelevän kappaleen kykyä tuottaa ääniaaltoja kutsutaan äänen säteilytehokkuudeksi,  $\sigma$ , joka voi saada arvoja 0-1, (*engl. radiation efficiency tai radiation factor*) [115]. Yksittäisen levyn äänensäteilytehokkuus riippuu merkittävästi taajuudesta. Levy säteilee ääntä tehokkaimmin silloin, kun aallon etenemisnopeus ilmassa ja levyssä on sama,  $c_0 = c_b$  [22, 55, 115]. Kuten edellä todettiin, äänennopeus ilmassa on taajuusriippumaton. Kun kaavaan 3 sijoitetaan äänennopeus ilmassa, voidaan kyseinen kaava johtaa kaavan 6 muotoon.

$$c_0 = \sqrt{2 * \pi * f_{cr} * \sqrt{\frac{B'}{m}}} \rightarrow f_{cr} = \frac{c_0^2}{2\pi} \sqrt{\frac{m}{B'}} \quad (\text{kaava 6})$$

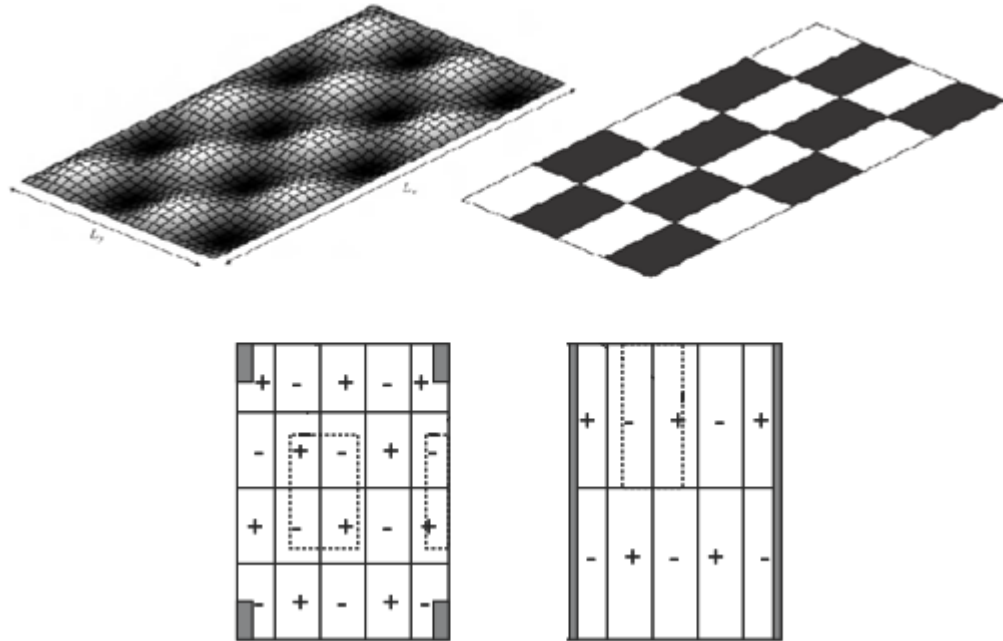
jossa  $c_0$  on äänennopeus ilmassa [m/s].  $f_{cr}$  on koinsidenssin rajataajuus [Hz]. Koinssidenssi-ilmiö on riippuvainen myös levyn kohtaavaan ääniaallon tulokulmasta. Käytännössä koinsidenssin rajataajuus on alin taajuus, jolla koinsidenssi-ilmiö tapahtuu. Tällöin tulevan ääniaallon ja levyn välinen kulma on  $90^\circ$ . Kuvassa 9 on esitetty tilanne, jossa ääniaalto kohtaa levypinnan. Kulma  $\varphi$  kuvaa ääniaallon ja levyn välistä kohtauskulmaa. Koinssidenssin rajataajuuden yläpuolella aina on löydettävissä sopiva ääniaallon tulokulma, jolla koinsidenssi-ilmiö tapahtuu [22, 115].



**Kuva 9: Ääniaalto kohtaa levypinnan [115].**

Koinsidenssitajuuden alapuolella levyyn muodostuu pakkovärähtelyn ansiosta värähtelykenttä, joka riippuu levyn ominaistaajuuksista [54]. Kuvan 10 ylemmissä kuvissa on

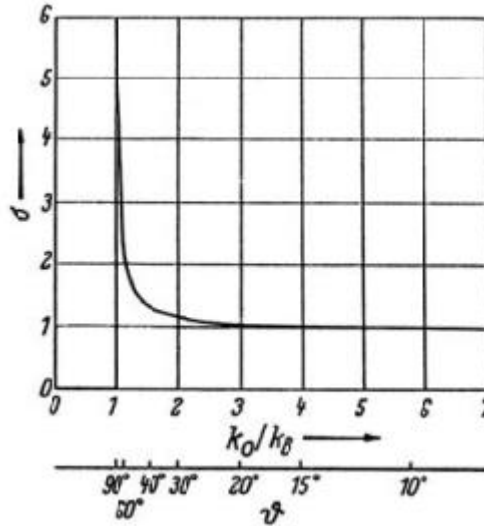
kuvattu eräs äärettömän levyn moodi. Levyn eri kohdat ovat eri vaiheessa, kuten kuvan 10 ylärivin ”shakkilauta” kuviossa on esitetty. Eri värit kuvaavat eri värähtelyn vaiheita.



**Kuva 10: Äärettömän ja äärellisen levyn värähtelymoodeja [115].**

Hopkinsin mukaan Maidanikin (JASA 1962) tutkimuksen perusteella levyn eri vaiheissa olevien kohtien voidaan olettaa toimivan kuin yksittäiset pisteäänilähteet, monopolit. Kuitenkin, kun monopolilähteiden välinen etäisyys verrattuna aallonpituuteen ympäröivässä väliaineessa on pieni, äänilähteitä ei käsitellä yksittäisinä pisteäänilähteinä vaan yhdistettyinä lähteinä [55]. Koska koinsidenssin rajataajuuden alapuolella levyssä etenevä taivutusaalto ja ilmassa etenevä ääniaalto ovat vaihe-erossa, edellä kuvattu yhdistetty äänilähde tuottaa heikon ja etäisyyden suhteen eksponentiaalisesti vaimenevan äänikentän. Levyn värähtely tuottaa hydrodynaamisen lähikentän, jonka vaikutus ulottuu 50–100 mm levyn pinnasta. [22] Yleisesti useasta pisteäänilähteestä koostuvan yhdistetyn äänilähteen ääniteho on heikompi kuin samankokoisen monopolilähteen ääniteho [5, 115].

Kuvassa 11 on esitetty äärettömän kokoisen levyn säteilytehon riippuvaisuus ilmassa etenevän ääniaallon ja levyssä etenevän taivutusaallon aaltolukujen suhteesta.



**Kuva 11: Äärettömän levyn äänensäteilykyky. Vaaka-akselin  $k_0/k_B$  kuvaa ilman ja levyn aaltolukujen suhdetta. Koinsidenssitaajuudella suhde on 1 ja tällöin pystyakselilla esitetty levyn äänensäteilytehokkuus on ääretön [22].**

Äärettömän suurille levyille oletetaan, etteivät ne säteile ääntä lainkaan koinsidenssitaajuuden alapuolella. Koinsidenssin rajataajuudella äärettömän levyn säteilykyky on ääretön, kuten kuvan 11 kuvaajassa on esitetty. Tosiasiassa suuretkin levyt ovat rajallisia, joten säteilykyky ei kasva äärettömäksi rajataajuudella. Koinsidenssin rajataajuudella levyn äänensäteilykyky on kuitenkin huomattavasti muita taajuuksia parempi. [22]

Käytännön levyrakenteet ovat aina äärellisen kokoisia. Vaikka äärellisen ja äärettömän levyn akustinen toiminta poikkeavat toisistaan, voidaan äärettömän levyn teorioita soveltaa myös äärelliselle levyille. Koinsidenssin rajataajuus äärelliselle levyille lasketaan samoin kuin äärettömälle levyille, kaavalla 6. Levyn akustinen käyttäytyminen koinsidenssin rajataajuuden alapuolella poikkeaa äärettömästä levystä, sillä levyn reunat ja kiinnitykset vaikuttavat sen äänensäteilykykyyn. [22, 115] Edellä esitetyn kuvan 10 alarivin kuvissa on esitetty eräs äärellisen levyn värähtelymoodi. Tummennetut alueet levyn nurkissa ja reunoilla kuvaavat alueita, jotka säteilevät ääntä koinsidenssin rajataajuuden alapuolella. Tummat alueet toimivat monopoli-äänilähteinä. Levyn keskellä tapahtuu vaihe-erosta johtuva äänenpaineen kumoutuminen, kuten äärettömällä levyllä, ja keskialueen äänensäteilykyky jää erittäin heikoksi [22, 70, 115]. Koinsidenssitaajuuden yläpuolella koko levy värähtelee tehokkaana tasoaltolähteenä [22].

Koinsidenssitaajuuden alapuolella levy värähtelee pääasiassa pakkovärähtelyn ansiosta, joka syntyy levyyn kohdistuvasta ääniherätteestä. Rajataajuuden yläpuolella resonanssi-ilmiön aiheuttama värähtely on hallitseva värähtelymuoto. [55] Resonanssin herättämä värähtely syntyy silloin, kun taivutusaallot heijastuvat levyn reunoista ja eri suuntiin kulkevat aallot summautuvat aaltoliikkeen superpositioperiaatteen mukaisesti. Sekä pakko- että resonanssivärähtely herättävät levyn ominaistaajuuksia.

Ominaistaajuudet ovat riippuvaisia levyn koosta, massasta, jäykkyysoinaisuuksista ja värähtelyn reunaehdoista, kuten levyn kiinnityksistä. Ominaistaajuudella levy värähteleä voimakkaasti ja sen ääneneristävyys on merkittävästi heikompi kuin muilla ympäröivillä taajuuksilla. [52, 55, 115] Homogeenisen ja vapaasti tuetun levyn ominaistaajuudet voidaan Vigranin [115] mukaan laskea kaavalla 7

$$f_{xz} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{B'}{m}} \left[ \left( \frac{x}{L_x} \right)^2 * \left( \frac{z}{L_z} \right)^2 \right] \quad (\text{kaava 7})$$

jossa  $x$  ja  $z$  ovat positiivisia kokonaislukuja ( $x, z: 0,1,2,3..$ ),  $L_x$  [m] on levyn leveys ja  $L_z$  [m] levyn korkeus tukipisteistä mitattuna.

Hongisto on esittänyt, että kun rakenne koostuu useista levyelementeistä, jotka on kiinnitetty jäykkiin rankoihin, esimerkiksi puurankoihin, resonanssitaajuus  $f_{11}$  riippuu rankojen jakovälistä. Kaavassa 7 voidaan käyttää tällöin  $L_z$  tilalla rankojen jakoväliä [m]. [52]

Ominaistaajuudet ovat merkittäviä pienillä taajuuksilla, koska niitä esiintyy suhteellisen harvassa taajuusalueella, jolloin niiden havaitseminen on mahdollista. Suurilla taajuuksilla ominaistaajuuksia on niin tiheästi, että yksittäisen ominaistaajuuden erottaminen on erittäin haastavaa [22, 115]. Yksittäisten ominaistaajuuksien laskemisen sijaan levyille voidaan määrittää mooditiheys  $n(f)$ , joka ilmoittaa, kuinka monta ominaistaajuutta osuu tarkasteltavalle taajuuskaistalle  $\Delta f$  [115]. Kaavassa 8 on esitetty mooditiheyden laskenta ohuelle, laajalle, homogeeniselle levyille:

$$n(f) = \frac{\Delta N}{\Delta f} = \frac{k_B^2 * S}{4 * \pi} \quad (\text{kaava 8})$$

jossa  $\Delta f \approx 0,23 * f_0$ .  $f_0$  on 1/3-oktaavikaistan keskitaajuus. Kaavassa 8  $S$  on levyn pinta-ala [m<sup>2</sup>],  $m$  on pintamassa [kg/m<sup>2</sup>] ja  $B'$  taivutusjäykkyys. Mooditiheyden avulla voidaan laskea moodien määrä  $N$ , joka riippuu tarkasteltavasta kulmataajuudesta  $\omega$  [rad/s].

$$N = \frac{n(f)}{\omega} \quad (\text{kaava 9})$$

$\omega$  on tarkastelutaajuutta  $f$  vastaava kulmataajuus,  $\omega = 2\pi f$ . Esimerkiksi, jos halutaan laskea 0-200 Hz kertyneet levyn ominaistaajuudet, käytetään kaavassa 9  $\omega = 1256,6 \frac{rad}{s}$ .

Koinsidenssin rajataajuuden alapuolella, pakkovärähtelyn ollessa määräävä värähtelymuoto, äärettömän ja äärellisen levyn ilmääneneristävyys voidaan laskea lähes samalla tavalla. Kun  $f \ll f_{cr}$ , levyn ääneneristävyys on riippuvainen vain sen massasta ja heräteäänien taajuudesta. Tätä taajuusaluetta kutsutaan ”massa-alueeksi” [70]. On osoitettu, että levyn taivutusjäykkyyden vaikutus ääneneristävyyteen on pieni, kun ääniherätteen

taajuus on merkittävästi koinsidenssin rajataajuuden alapuolella [115]. Aiemmin mainittiin, että ääniaallon tulokulmalla on merkitystä levyn äänensäteilytehokkuuteen. Kaavan 10 mukaisessa  $R_0$  laskennassa oletetaan, että ääniaallon tulokulma on  $<78^\circ$  ns. kenttätulokulman malli [52], sillä äärellisen levyn tapauksessa täysin levyn suuntaisesti tulevia aaltoja ei esiinny. Täten massa-lain mukainen levyn ääneneristävyys  $R_0$  voidaan laskea

$$R_0 = 20 * \log_{10}(m * f) - 47 \quad (\text{kaava 10})$$

, jossa  $m$  on levyn pintamassa [ $\text{kg}/\text{m}^2$ ] ja  $f$  on tarkasteltava taajuus.  $R_0$  laskennassa ei oteta huomioon koinsidenssin rajataajuudella tapahtuvaa eristävyiden heikentymistä, äärellisen levyn reunojen vaikutusta, eikä sitä, että koinsidenssin rajataajuuden yläpuolella levyn värähtely johtuu pääasiassa resonanssi-ilmioistä, jolloin häviökerroin vaikuttaa voimakkaasti levyssä edestakaisin etenevään aaltoliikkeeseen [115]. Nämä vaikutukset otetaan huomioon tekemällä korjauksia massalain mukaiseen laskentaan. Tässä diplomityössä käytettävässä ”Raimo”- laskentaohjelmassa on käytetty seuraavia korjauksia massalain mukaiseen laskentaan [69]:

$$R = R_0 + 20 * \log_{10} \left( 1 - \left( \frac{f}{f_{cr}} \right)^2 \right) \quad f < f_{cr} \quad (\text{kaava 11})$$

$$R = R_0 + 10 * \log_{10}(\eta) + 10 * \log_{10} \left( \frac{f}{f_{cr}} \right) + 3 \quad f_{cr} \leq f < f_h \quad (\text{kaava 12})$$

$$R = R_0 + 10 * \log_{10}(\eta) + 10 * \log_{10} \left( \frac{f}{f_{cr}} \right) - R_h + 3 \quad f \geq f_h \quad (\text{kaava 13})$$

$\eta$  on levyn häviökerroin, joka voidaan laskea kaavalla 14, kun levyn pintamassa  $< 800 \text{ kg}/\text{m}^2$ .  $\eta_{int}$  on sisäinen häviökerroin [-] [71].  $f_h$  on leikkausaallon rajataajuus, jonka laskenta on esitetty kaavassa 15

$$\eta = \eta_{int} + \frac{m}{485 * \sqrt{f}} \quad (\text{kaava 14})$$

$$f_h = \frac{1}{f_{cr}} \left( \frac{c_0}{6 * d} \right)^2 \quad (\text{kaava 15})$$

Leikkausaalloista johtuva korjaus  $R_h$  tehdään, koska edellä johdetussa laskennassa oletetaan, että levyssä etenevät aallot ovat vain taivutusaaltoja [52].

$$R_h = 10 * \log_{10} \left( \frac{f}{5 * f_h} + \sqrt{\left( \frac{f}{5 * f_h} \right)^2 + 1} \right) \quad (\text{kaava 16})$$

Kuten aiemmin mainittiin, taivutusaallot voivat edetä, jos levy on ohut suhteessa etenevään aallon aallonpituuteen. Kristenssen ja Rindel mukaan taivutusaallon etenemisehtona voidaan pitää  $\lambda_b > 6 * h$ , jossa  $h$  on levyn paksuus ja  $\lambda_b$  on taivutusaallon aallonpituus. Tämän ehdon perusteella on esitetty kaavan 15 mukainen leikkausaallon rajataa-

juus, jonka yläpuolella levyssä etenee taivutusaaltojen lisäksi myös leikkausaaltoja. [70] Leikkausaalto on esitetty kuvassa 8.

Rakennusakustiikan kirjallisuudessa on esitetty myös muita korjaustermejä massa-lain laskennalle. Laskennassa voidaan ottaa huomioon esimerkiksi levyn koko ja eri värähtelytyypeistä aiheutuvat äänensäteilykertoimet [70, 115].

### 3.2.2 Levyn värähtely mekaanisesta herätteestä

Välipohjalla kävely, hyppiminen tai tavaroiden putoaminen tuottavat mekaanisen herätteen välipohjan pintaan. Rakennusakustiikan tutkimuksissa käytetään yleensä standardeitua askeläänikonetta [28], jonka vasarakoneisto tuottaa mekaanisen herätteen välipohjan pintaan [26]. Värähtely etenemiseen rakenteessa vaikuttaa useita muuttujia, joiden yhteisvaikutus, varsinkin kevytrakenteisilla välipohjilla, on monimutkainen ilmiö.

Levyn värähtelyominaisuudet ovat riippuvaisia sen mekaanisesta impedanssista  $Z_{mec}$ . Levyjen värähtelyä tutkittaessa käytetään usein *mobilitteettia* (engl. *mobility*), joka on impedanssin käänteisluku ja esitetty kaavassa 17. Mobiliteetti on siirtofunktio, joka kuvaa kappaleeseen kohdistuvan harmonisen voiman ja sen ansiosta syntyvän kappaleen pinnan nopeuden suhdetta [22]. Toisin sanoen se kuvaa sitä, kuinka tehokkaasti kappale värähtelee herätevoiman  $F$  ansiosta [55]. Mobiliteetti voidaan määrittää joko samasta pisteestä kuin kappaleeseen vaikuttava voima  $F$  tai jostain toisesta kappaleen pisteestä. Tällöin käytetään termiä *engl. transfer mobility*. Jatkossa kuitenkin käytetään *mobilitteettina* vain herätepisteestä määritettyä mobiliteettia *engl. input mobility*.

$$\underline{M} = \frac{1}{Z_{mec}} = \frac{u_0}{F} \quad (\text{kaava 17})$$

jossa  $\underline{u}_0$  on kappaleen pinnan kompleksinen nopeus tarkastelupisteessä [m/s] ja  $F$  levyä kuormittava voima [N] [22]. Jos kappaletta kuormittava voima ei ole harmoninen, yhtälön 17 muuttujat tulee esittää taajuusriippuvaisina muuttujina [115].

Usein käytännön kohteissa mekaanisen impedanssin laskennallinen määrittäminen on rakenteen monimutkaisuudesta johtuen hankalaa. Tällöin mekaaninen impedanssi voidaan määrittää mittaamalla kaavan 17 mukaisesti kuormituspisteen nopeus tason normaalin suunnassa, kun tiedossa on systeemin syötetty voimaheräte. [22]

Kuten kappaleessa 4.3.1 esitettiin, levyt voidaan jakaa äärettömiin ja äärellisiin levyihin. Cremer et al. ovat osoittaneet [22], että äärettömän homogeenisen levyn tapauksessa

$$M_\infty = \frac{1}{8\sqrt{B*m}} \quad (\text{kaava 18})$$

jossa  $B$  on levyn taivutusjäykkyys, kaavan 12 mukaisesti ja  $m$  on levyn pintamassa [kg/m<sup>2</sup>]. Vaikka kaava 18 on johdettu äärettömälle levyille, Vigranin mukaan on osoitet-



tu, että se vastaa myös äärellisen levyn tapauksessa kaikkien tarkastelutaajuuksien ja kuormituspisteiden *mobilitietin* keskiarvoa [115]. Hopkinsin mukaan äärettömän levyn oletusta voidaan käyttää äärellisiin levyn laskentaan myös silloin, kun levyssä etenevä värähtely vaimenee voimakkaasti eli levyn sisäinen häviökerroin on suuri. Tällöin levyn reunoista heijastuva värähtely on merkittävästi heikompaa kuin herätepisteestä lähtevä värähtely. [55]

Cremer et al. ovat osoittaneet, että energian säilymislain perusteella voidaan esittää, että systeemiin siirtyvä teho  $W_{mec}$  [watti] on herätevoiman  $F$  [N] ja levyn pinnan nopeuden  $u$  [m/s] tulo [22].  $F$  ja  $u$  ovat ajan suhteen keskiarvotettuja arvoja [55]. Levyn mekaaninen teho on esitetty kaavassa 19

$$W_{mec} = F * u = \frac{1}{2} * Re\{\underline{F} * \underline{u}^*\} = \tilde{F}^2 * Re\{\underline{M}\} \quad (\text{kaava 19})$$

jossa  $\underline{\quad}$ -merkityt suureet ovat kompleksilukuja ja  $\tilde{F}$  on levyn pinnan nopeuden RMS-arvo *engl. root mean value* ja  $Re\{M\}$  *mobilitietin* reaaliosa.

Kaava 19 pätee tarkasti ottaen vain silloin, kun voimaherätelähteen mekaaninen impedanssi on hyvin pieni verrattuna kuormitettavan kappaleen mekaaniseen impedanssiin [55, 115]. Kun askeläänilähde on standardin ISO 10140- 5 mukainen askeläänikone, mekaaninen teho voidaan Vigranin mukaan esittää kaavan 20 mukaisesti [115]. Vigranin mukaan puurakenteisilla välipohjilla askeläänikoneen impedanssilla on vaikutus kokonaisvärähtelytehoon.

$$W_{mec} = \tilde{F}^2 * Re\left\{\frac{1}{Z_{levy} + Z_{askeläänikone}}\right\} \quad (\text{kaava 20})$$

$$Z_{askeläänikone} = i * m_h * \omega \quad (\text{kaava 21})$$

jossa  $m_h$  on askeläänikoneen vasaran massa [kg]. ISO 10140-5 standardin mukaisen askeläänikoneen vasaran massa on 0,5kg. Jos levy on raskas, kuten betonilaatta, voidaan kuitenkin olettaa, että  $Z_{levy} \gg Z_{askeläänikone}$ , joten  $Z_{askeläänikone}$  voidaan jättää huomioimatta [114]. Kaavan 21 mukaan askeläänikoneen mekaaninen impedanssi riippuu kulmataajuudesta  $\omega$  [rad/s] ja täten tarkastelutaajuudesta  $f$ .  $Z_{askeläänikone}$  on sitä suurempi, mitä suuremmalla taajuudella mekaanista impedanssia tarkastellaan. Tämän takia kevyillä laatoilla myös askeläänikoneen mekaaninen impedanssi vaikuttaa värähtelytehoon. Tämä on otettu huomioon esimerkiksi kappaleessa 4.5.1. esitetystä Cremer et al. kevytrakenteisen kelluvan lattian laskentamallissa. Toisaalta, jos  $Z_{askeläänikone}$  huomioidaan tarkasti eri taajuuksilla, myös levyn mekaanisen impedanssin taajuuksiin täytyy ottaa huomioon.

Todellisessa kuormitustilanteessa levyä kuormittava voimaheräte vaikuttaa useilla eri taajuuksilla, toisin sanoen herätteen voimaspektri on laaja. [22] Tällöin levyn mekaaninen teho voidaan laskea kaavan 22 mukaan

$$W_{mec} = \tilde{F}_{\Delta\omega}^2 * M_{\infty} = Sm\eta\omega\langle\tilde{u}^2\rangle_{\Delta\omega} \quad (\text{kaava 22})$$

jossa  $\tilde{F}_{\Delta\omega}$  on kuormitusvoiman [N] RMS-arvo tarkasteltavalla taajuuskaistalla  $\Delta\omega$ .  $S$  on levyn pinta-ala,  $\omega = 2\pi f$  kulmataajuus [rad/s],  $\eta$  sisäinen häviökerroin,  $m$  levyn pintamassa [kg/m<sup>2</sup>] ja  $\langle\tilde{u}^2\rangle_{\Delta\omega}$  levyn pinnan nopeuden amplitudin tehollisarvo, kun herätevoima huomioidaan vain taajuusalueella  $\Delta\omega$ . [115]

Teholla  $W_{mec}$  levyyn siirtyvä mekaaninen energia etenee levyssä värähtelynä ja vaimenee edetessään pääosin kolmesta eri syystä: sisäisten-, ääni- ja liitoshäviöiden takia. Levyn materiaaliominaisuuksista johtuen osa mekaanisesta energiasta muuttuu lämpöenergiaksi. Tätä häviötä kutsutaan sisäiseksi häviöksi. Liitoshäviöitä syntyy kappaleiden liitoksissa ja äänihäviö syntyy, kun levyn värähtely saa ympäröivän väliaineen värähtelemään. Äänihäviöt ovat yleensä noin 1-2 % energian kokonaishäviöstä, kun ympäröivä väliaine on ilmaa. [115] Värähtelevän äärellisen levyn akustinen teho voidaan laskea kaavalla 23

$$W_{ac} = \frac{\rho_0 \tilde{F}^2}{2 * \pi * c_0 * m^2} \left[ 1 + \frac{\pi * f_c}{4 * \eta * f} * \sigma \right] \quad (\text{kaava 23})$$

jossa  $f_c$  on levyn koinsidenssitaajuus,  $c_0$  äänennopeus ilmassa [m/s] ja  $\sigma$  on levyn säteilytehokkuus (engl. radiation efficiency), joka riippuu tarkasteltavasta taajuudesta  $f$  [Hz]. Kaavan 23 ensimmäinen termi on voimassa vain koinsidenssitaajuuden alapuolella. Vigranin mukaan pienillä taajuuksilla, huomattavasti levyn koinsidenssitaajuuden alapuolella, kaavan 23 toinen termi on riippuvainen termistä  $1/(\eta * \sqrt{f})$ . Tämä johtuu keskiarvoisen säteilytehokkuuden laskennasta eri taajuuksilla. Kaavan 23 ensimmäinen termi ei puolestaan ole taajuusriippuvainen. Näin ollen ensimmäinen termi määrää levyn akustisen tehon, kun tarkastelutaajuus on  $\ll f_c$ , eikä levyn sisäisen häviökertoimen kasvatus vaikuta sen äänensäteilyominaisuuksiin. Levyn pintamassan kasvatus puolestaan pienentää sen akustista tehoa koinsidenssitaajuuden alapuolella, kuten kaavasta 23 voidaan nähdä. Kaavan 23 ensimmäinen termi vaikuttaa vain koinsidenssitaajuuden  $f_c$  alapuolella, joten koinsidenssitaajuuden yläpuolella sisäinen häviökerroin vaikuttaa merkittävästi levyn akustiseen tehoon. [115]

Kaavojen 18 ja 22 avulla on selitettävissä, miksi kevyet rakennuslevyt värähtelevät ja tuottavat ääntä huomattavasti enemmän kuin raskaat rakennuslevyt. Mitä suuremmat levyn pintamassa ja taivutusjäykkyys ovat, sitä pienempi on levyn *mobiliteetti* ja täten levyn mekaaninen värähtelyteho. Toisaalta levyn akustiseen tehoon koinsidenssitaajuuden yläpuolella ei vaikuta levyn pintamassa vaan sisäinen häviökerroin. Ohuiden ja jäykkien laattojen koinsidenssitaajuudet ovat usein kuuloaistin kannalta ongelmallisella alueella, esimerkiksi 50 mm betonilaatan koinsidenssitaajuus on kaavoilla 4 ja 6 lasketuna noin 400 Hz, jolloin sisäisen häviökertoimen merkitys korostuu. Vigranin mukaan esimerkiksi betonille voidaan käyttää sisäistä häviökerointa  $0,1 * 10^{-3}$  ja kipsilevyille

puolestaan  $10 * 10^{-3} - 20 * 10^{-3}$ . Kipsilevyn sisäinen häviökerroin on 100–200-kertainen betoniin nähden.

Edellä esitetyssä levyn värähtelyteoriassa on tehty yksinkertaistuksia ja oletuksia, jotka eivät vastaa täysin välipohjissa olevien levyjen todellista tilannetta. Ideaalitalanteessa värähtelevän levyn oletetaan olevan vapaasti tuettu, suorakaiteen muotoinen ja homogeeninen [22]. Esimerkiksi Cremer on osoittanut, että äärellisen levyn ominaistajuuksien herääminen riippuu siitä, mihin kohtaa levyä mekaaninen pisteheräte vaikuttaa. Jos herätevoima vaikuttaa levyyn kohdassa, joka on samalla jonkin ominaistajuuden solmukohta, kyseinen ominaistajuus ei herää, eikä sitä havaita värähtelymittauksissa. Toinen ominaistajuuksiin liittyvä ilmiö on niiden päällekkäisyys. Levyn dimensioista riippuen on mahdollista, että eri moodien ominaistajuudet osuvat samalle taajuudelle tai hyvin lähelle toisiaan. Tällöin on mahdotonta erottaa eri moodeja toisistaan. [22] Myös levyn kiinnityksellä on vaikutusta sen värähtelykäyttäytymiseen [52, 53, 82, 103, 115, 130]. Levyn kiinnitystä on käsitelty tarkemmin kappaleessa 3.3.

### 3.2.3 Palkin värähtely

Palkissa värähtelyliike etenee taivutus-, kvasi-pitkittäisinä ja torsioaaltoina, joista taivutusaallot ovat äänisäteilyn kannalta merkittävimpiä. Runkoäänen siirtymisen kannalta myös muut värähtelytyypit ovat merkittäviä [55, 82, 122]: esimerkiksi seinän kautta tapahtuvan sivutiesiirtymän voimakkuus riippuu välipohjapalkkien suunnasta seinälinjaan nähden [51, 96]. Palkkien värähtely on rajattu pääosin tämän tutkimuksen ulkopuolelle, koska se vaikuttaa merkittävästi sivutiesiirtymiin, joita ei myöskään käsitellä tässä tutkimuksessa. Cremer et al. ovat julkaisseet kattavan teoksen ”Structure Borne Sound”, jossa käsitellään myös palkkien värähtelyä hyvin laajasti [22]. Tämän teoksen aikaisempia painoksia on käytetty lähteenä useissa rakennusakustiikan oppikirjoissa ja tutkimuksissa [12, 13, 55, 70, 115, 127].

Kuten kappaleessa 3. 2. 2 todettiin, mekaaninen impedanssi kuvaa herätevoiman ansios-ta rakenteessa havaittavaa värähtelyä. Cremer et al. ovat osoittaneet, että äärettömän pituisen palkin impedanssi voidaan laskea kaavan 24 mukaisesti [22]

$$Z^*_{palkki} = 2 * m' * c_b * (1 + i) \quad (\text{kaava 24})$$

jossa  $m'$  on palkin pituusmassa [kg/m] ja  $c_b$  on taivutusaallon nopeus palkissa [m/s]. Äärettömän pituisen palkin mekaaninen mobiliteetti voidaan esittää kaavan 25 mukaisesti.

$$M_{palkki} = \frac{(1+i)}{4*m'*c_b}, \quad Re\{M_{palkki}\} = \frac{1}{4*m'*c_b} \quad (\text{kaava 25})$$

jossa  $Re\{..\}$  ilmaisee *mobileetin* reaali-osan. Kaava 19 voidaan Cremerin mukaan johdattaa äärettömän pistevoimalla kuormitetun palkin tapauksessa kaavan 26 muotoon:

$$W_{mec} = \tilde{F}^2 * Re\{M_{palkki}\} = \frac{\tilde{F}^2}{4 * m' * c_B} \quad (\text{kaava 26})$$

### 3.3 Puurakenteisen palkki-levy-yhdistelmän värähtely

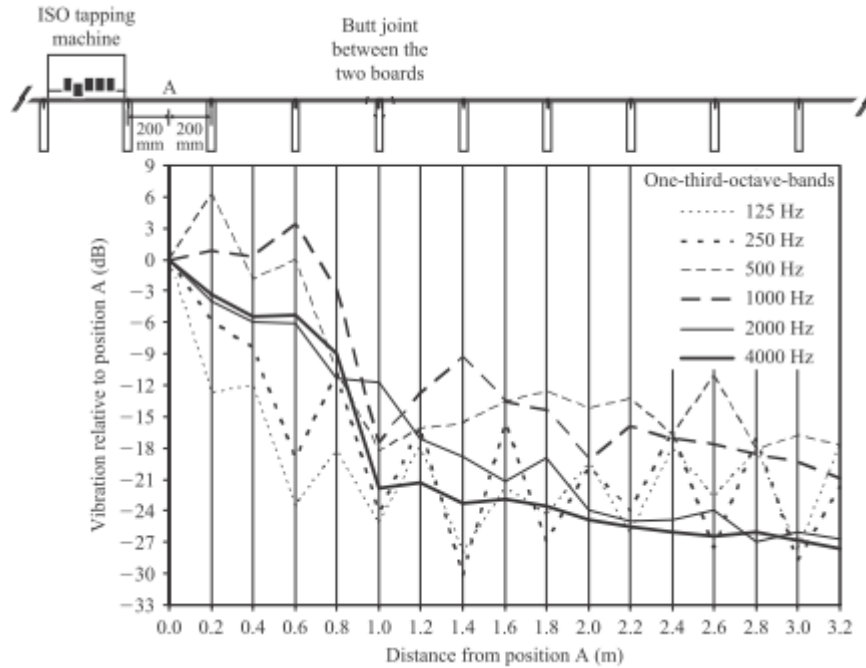
Puuvälipohjan akustisen toiminnan ymmärtämiseksi on tarkasteltava yksittäisten rakenneosien ohella myös palkeista ja levyistä koostuvan rakenteen värähtelyä. Pelkistetyn palkki-levy-rakenteen värähtelyä tutkimalla saadaan viitteitä siitä, miten mekaaninen värähtely etenee todellisissa välipohjarakenteissa.

Kun rakenteessa etenevä värähtely kohtaa epäjatkuvuuskohdan, osa värähtelystä heijastuu takaisin aallon tulo-suuntaan ja osa jatkaa eteenpäin epäjatkuvuuskohdasta. Epäjatkuvuuskohtia ovat esimerkiksi rakenteen dimension muutos tai väliaineiden rajapinta [22]. Väliaineiden rajapinnassa värähtely voi myös muuttua muotoaan. Esimerkiksi levyssä etenevä taivutusaalto voi aiheuttaa palkkiin quasi-pitkittäisen tai pitkittäisen aalto liikkeen [85, 87]. Cremer et al. ovat esittäneet teoreettisen lähestymistavan runkoäänen laskentaan rakenteille, joissa on epäjatkuvuuskohtia [22]. Hopkinsin mukaan nämä värähtelyteoriat soveltuvat huonosti puurakenteille, sillä puurakenteissa yhteen liitettävien rakenneosien materiaaliominaisuudet ovat hyvin erilaiset ja liitosten laskennallinen mallintaminen on haastavaa. [55]

Puuvälipohjat muodostavat usein säännöllisesti toistuvia rakenteita: palkkien k-jako on tasainen ja levykerrokset ovat tasapaksuiset koko välipohjan alalla [82, 87]. Tällaisia rakenteista kutsutaan periodisiksi rakenteiksi. Periodisuuden on havaittu vaikuttavan rakenteen akustiseen käyttäytymiseen ja sen värähtelyä vaimentavia ominaisuuksia käytetään hyväksi koneakustiikassa [22, 125]. Tutkimuksissa on kuitenkin havaittu, että puuvälipohjat eivät kuitenkaan toimi täysin siten, kuin periodisten rakenteiden teoria antaa olettaa [20, 85]. Käytännössä periodisille rakenteille ominaisia päästö- ja estotajuuksia ei ole havaittu puurakenteisia väliseiniä mitattaessa. Nightingale et al. mukaan periodiset rakenteet ovat erityisen herkkiä rakenteen epäsäännöllisyyksille, ja käytännön rakennustyöhön sisältyy usein pieniä epätarkkuuksia. [85]

Puurakenteisia levy-palkki yhdistelmiä on tutkittu erityisesti kanadalaisissa ja ruotsalaisissa tutkimuksissa. Tutkimusten tarkoituksena on ollut selvittää mittauksin puisten palkki-levy-yhdistelmien värähtelyä ja luoda näin edellytyksiä värähtelyn laskennalliselle mallintamiselle [3, 82, 84, 85, 87]. Nightingale ja Bosmanin tutkimuksen mukaan palkki-levy kentän värähtelyn voimakkuus riippuu merkittävästi tarkastelusuunnasta. Kun etäisyys herätepisteeseen kasvaa, värähtely vaimenee palkkien normaalin suuntaan huomattavasti nopeammin kuin palkkien suunnassa. Samanlaisia tuloksia on saatu myös Sjökvistin ja Brunskogin tutkimuksista. Näin ollen puuvälipohjien värähtelykenttä on ortotrooppinen [3, 14, 85].

Kuvan 12 kuvaajassa on esitetty värähtelyn vaimentuminen etäisyyden funktiona. Kyseiset mittaukset tehtiin puiselle levy-palkkirakenteelle, jossa palkkien k-jako oli 0,4 m. Kuvaajan esittämien tulosten perusteella värähtelytaso (*engl. vibration level*) vaimenee merkittävästi, kun etäisyys askeläänikoneeseen kasvaa.



**Kuva 12: Hopkinssin esitys Nightingale et al. [84] tutkimustuloksista. Kuvassa on esitetty värähtelyn suhteellinen vaimentuminen eri taajuuksilla, kun etäisyys herätepisteeseen kasvaa [55].**

KytKentä palkkeihin muuttaa levyn taivutusjäykkyyttä palkkien suunnassa, joten värähtelyominaisuuksien muutos tapahtuu sekä iso- että ortotrooppisilla rakennuslevyillä. Taivutusjäykkyyden muutos riippuu kytkenästä sekä palkin ja levyn jäykkyysominaisuuksista [3, 55]. Brunskogin mukaan Cremer on esittänyt, että laatta-palkki-rakennetta voidaan käsitellä ortotrooppisena, kun  $\lambda_b > d_{palkki}$ .  $\lambda_b$  on taivutusaallon aallonpituus ja  $d_{palkki}$  on palkkien välinen etäisyys [9]. Välipohjan pintalaatan ollessa raskas, esimerkiksi massiivipuulaatta, palkkien vaikutus välipohjan ortotrooppisuuteen ei ole yhtä voimakas kuin kevyellä pintalaatalla [3].

Värähtelyn vaimenemisen suuntariippuvuudella on merkitystä erityisesti sivutiesiirtymiin. Tutkimusten mukaan sivutiesiirtymät ovat huomattavasti voimakkaammat, kun palkit tukeutuvat seinälinjaan, verrattuna tilanteeseen, jossa palkit ovat seinälinjan suuntaiset [51, 86, 95, 96].

Palkin ja levyn välinen liitos vaikuttaa systeemissä etenevään värähtelyyn. Puurakenteiden ääneneneristävyyden perustuu pitkälti liitoksissa tapahtuviin värähtelyhäviöihin [17, 18]. Puurakenteissa kyseisen liitoksen mallintamiseen käytetään kahta päätyyppiä: piste- tai viivakytKentä [22, 55, 82]. KytKentätyypin valintaan vaikuttaa tarkasteltava aallonpituus

ja liittimien määrä [55, 85]. Esimerkiksi ruuvi- ja naulaliitosten on havaittu käyttäytymän pienillä taajuuksilla kuten viivakytkentä ja suuremmilla taajuuksilla kuten yksittäiset pistekytkenät [19, 85]. Craikin mukaan rajataajuus riippuu levyssä etenevän taivutusaallon pituudesta ja kiinnityspisteiden k-jaon suhteesta [19]. Liitosmallin valinnalla on tärkeä vaikutus SEA-laskentamallien lopputuloksiin. SEA-malleja käsitellään kappaleessa 3.4.

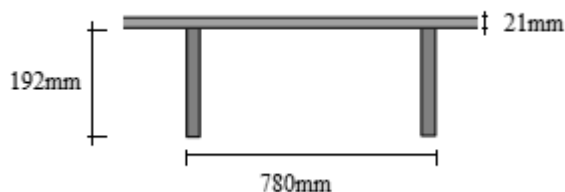
Nightingale et al. ovat esittäneet, että kuvan 12 mukaisen levy-palkkirakenteen värähtelykäyttäytyminen voitaisiin jakaa kolmeen taajuusalueeseen. Pientaajuuksien alueella, <100 Hz, värähtelyyn vaikuttavat pääasiassa etäisyys herätepisteestä ja välipohjan dimensiot sekä jäykkyys. Keskitajuuksien alueella, 125–500 Hz, värähtely on riippuvainen mittauspisteen suhteesta palkkiin. Kuvan 12 kuvaajasta voidaan havaita, että 125, 250 ja 500 Hz taajuuksilla palkkien välistä mitattu värähtelytaso on voimakkaampi kuin palkin päältä mitattu. Suurten taajuuksien alueella, >500 Hz, levyn ja palkin välinen kytkentä on yleensä pistekytkenä, mikä johtuu taivutusaallonpituuden ja liitinvälin suhteesta. Suurten taajuuksien alueella mittauspisteen sijainnin suhde lattiapalkkiin ei ole merkitsevä, kuten kuvan 12 kuvaajassa esitetystä 4000 Hz käyrästä voidaan havaita. [85]

Levyn ja palkin välisen liitoksen ohella levyjen väliset liitokset vaikuttavat palkki-levyrakenteen akustiseen toimintaan. Kun tarkastellaan etäisyysvaimennusta lattiapalkeille poikittaisessa suunnassa, vaimentuminen heikkenee levyjen välisessä liitoksessa. Vaimentuminen on havaittavissa kuvan 12 kuvaajasta: 1 metrin etäisyydellä askeläänilähteestä on levyjen välinen liitos (*engl. butt joint*) ilman ponttia. Ennen levyjen liitosta värähtelyn vaimeneminen kaikilla tarkastelutaajuuksilla on voimakkaampaa kuin sen jälkeen. Tämä ilmiö havaitaan koko taajuusalueella riippumatta edellä esitetystä kolmesta taajuusalueesta. Samantyyppistä vaimenemiskäyttäytymistä on havaittu myös ponttiliitoksella liitetyillä levyillä. Nightingale et al. tämä vaimenemisilmiö johtuu eri värähtelymuotojen vaimenemisesta levyjen välisessä liitoksessa. Levyjen välisessä liitoksessa taivutusaallot vaimenevat merkittävästi mutta pitkittäisaallot eivät. [85, 87]

### 3.3.1 Mekaaninen mobiliteetti

Edellisessä kappaleessa 3.2.2 esitettiin, että mekaaninen impedanssi ja sen käänteisluku kuvaa voimaherätteen synnyttämää värähtelyä rakenteessa. Mobiliteetin todettiin myös liittyvän läheisesti kappaleen äänensäteilytehokkuuteen. Mayr et al. ovat tutkineet puisen palkki-levy rakenteen mobiliteettia värähtelymittausten avulla. Tutkimusten mukaan äärettömän palkin ja levyn mobiliteetit ovat ala- ja yläraja, jonka väliin palkki-levy-yhdistelmän mekaaninen mobiliteetti sijoittuu. [82]

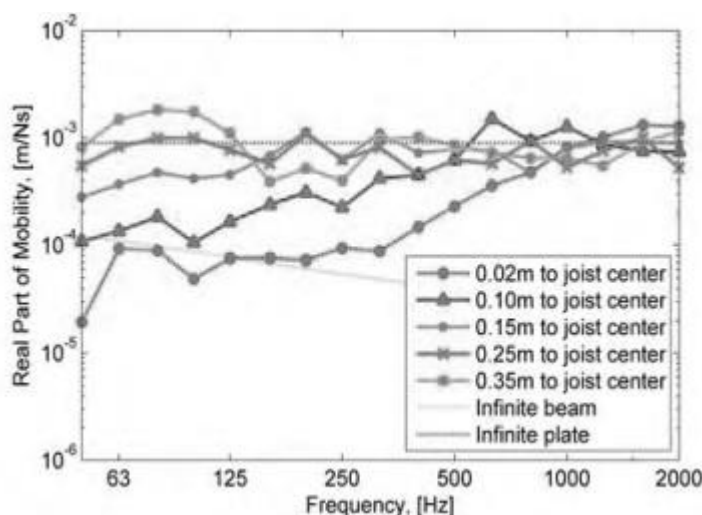
Kuvassa 13 on esitetty Mayr et al. tutkimuksessa käytetty puuvälipohjarakenne. 21 mm paksu laskulevy oli kiinnitetty 192 mm x 96 mm puupalkkeihin, joiden k-jako oli 780 mm ja pituus 4550 mm.



**Kuva 13: Mayr ja Nightingalen tutkimuksessa käytetty välipohjarakenne: 21 mm las-tulevy, jonka alla (192x96) puupalkit [81].**

Kuvan 14 kuvaajassa on esitetty mekaanisen mobiliteetin mittaustulokset kuvan 13 mukaiselta välipohjalta. Mittauksissa käytetyn välipohjan koko oli 4,55 m x 4,95 m, kokonaisala 22,5 m<sup>2</sup>. Levyn pintaan tuotettiin mekaaninen heräte tärinälaitteen avulla. Levyn pinnan nopeus mitattiin samasta pisteestä. Kuvaajassa on useita eri käyriä, sillä mittauksissa selvitettiin, kuinka pisteherätteen sijainti välipohjalla vaikuttaa rakenteeseen syntyvään herätepisteen mobiliteettiin (*engl. driving point mobility*). Suorat kuvaajassa esittävät äärettömän palkin, kaava 25, (*engl. infinite beam*) ja äärettömän levyn, kaava 18, (*engl. infinite plate*) mobiliteetteja.

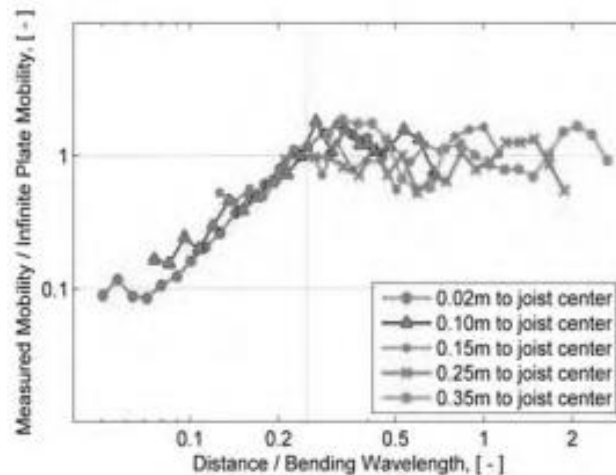
Kuvan 14 kuvaajan perusteella herätepisteen sijainnilla on merkitystä värähtelykäyttäytymiseen. Mayr esittää, että 1000 Hz yläpuolella herätepisteen sijainnilla ei ole vaikutusta mitattuun mobiliteettiin vaan mekaaninen mobiliteetti vastaa tällöin äärettömän levyn mobiliteettia. Toisaalta, mitä lähempänä herätepiste on palkkia, sitä enemmän levy-palkki-kentän mobiliteetti muistuttaa äärettömän palkin laskennallisia arvoja. [82]



**Kuva 14: Levy-palkki välipohjan mobiliteetti välipohjan eri pisteistä mitattuna. Kuvaaja on vuonna 2007 julkaistusta Mayr ja Nightingalen tutkimuksesta [82].**

Mayr et al. tutkimuksen perusteella voidaan todeta, että puurakenteisen levy-palkki välipohjan mobiliteetti on riippuvainen taajuudesta. Taajuusriippuvuus tulee selkeästi esiin

kuvan 15 kuvaajassa, jossa on esitetty mobiliteetin riippuvuus herätepisteen sijainnista ja tarkastelutaajuudesta. Kuvaaja on saatu Mayr et al. tutkimuksesta [82]. Kuvaajassa esitettyjen mittaustulosten perusteella levy-palkki-yhdistelmän mobiliteetti vastaa äärettömän levyn mobiliteettia, kun herätepisteen ja palkin etäisyyden suhde taivutusaallonpituuteen on vähintään 0,25. Käytännössä tämä tarkoittaa, että riittävän etäällä palkista levy-palkki yhdistelmän mobiliteettiin vaikuttaa ainoastaan levyn ominaisuudet [82]. Riittävän etäällä viittaa tässä herätepisteen ja taivutusaallonpituuden suhteeseen.



**Kuva 15:** Levy-palkki välipohjan mobiliteetin riippuvuus taivutusaallonpituudesta ja etäisyydestä palkkiin. Kuvaaja Mayr ja Nightingalen tutkimuksesta [82].

### 3.4 Energia-laskentamallit

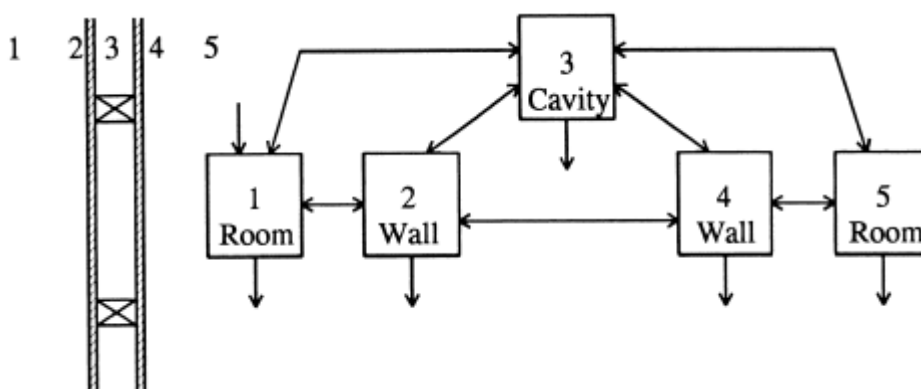
Energia-laskentamalleilla tarkoitetaan tässä keskimääräiseen energian siirtymiseen perustuvia askel- ja ilmääneneristävyyden laskentamalleja. Yksi tärkeimmistä energiamallien sovelluksista on tilastollinen energia-analyysi (*engl. statistical energy analysis*), jota jatkossa kutsutaan SEA:ksi [78]. Kuten kappaleen 3 johdannossa todettiin, nykyinen ISO 12354-2-standardin mukainen välipohjien laskentamalli perustuu ensimmäisen asteen SEA-malliin. Näiden, niin sanottujen power-flow-mallien, merkittävä kehittäjä on ollut hollantilainen E. Gerretsen [10, 29, 39, 44].

SEA-laskentamenetelmä kehitettiin alun perin Yhdysvaltojen avaruusohjelman tarpeisiin 1960-luvulla, kun haluttiin mallintaa avaruusrakettien laukaisussa syntyvän ääntä ja rakenteiden värähtelyä. Heti 60-luvun alusta lähtien SEA-malleja kehitettiin myös rakennusakustiikan tarpeisiin. Vigranin mukaan, 1962 julkaistiin G. Maidanikin artikkeli, joka käsitteli rangoilla tuetun levyn värähtelyä ja vuonna 1970 Pricen ja Crockerin artikkeli kaksinkertaisten levyrakenteiden SEA-laskennasta [20, 115]. Sitten SEA-malleja on käytetty sekä ilma- että askelääneneristysten laskentaan [20, 68, 115]. SEA-mallien avulla on pyritty mallintamaan myös sivutiesiirtymiä, jotka ovat tärkeässä asemassa puurakennusten akustisten olosuhteiden kannalta [7, 85, 87].



SEA-mallinnuksessa tutkittavasta rakenteesta luodaan laskentamalli, joka koostuu useista alisysteemeistä (*engl. subsystem*) ja niiden välisistä liitoksista. Mallin luominen perustuu kokemusperäiseen tietoon siitä, kuinka erilaiset rakenteet kannattaa mallintaa [20, 115] Samaa SEA-mallia voidaan käyttää sekä ilma- että askelääneneristävyyden laskentaan, sillä laskennassa käytettävä suure on alisysteemin energia. Energiatasot muunnetaan tilanteesta riippuen joko alisysteemin keskimääräiseksi äänenpainetasoksi tai kiinteän kappaleen tapauksessa värähtelytasoksi. [55]

Kuvassa 16 on esitetty yksinkertainen väliseinärakenne ja siitä luotu SEA-malli [20]. Alisysteemit on esitetty laatikoin ja numeroitu 1-5. Systemien väliset liitokset on esitetty kaksisuuntaisilla nuolilla. Rakenteessa siirtyvä energia vaimenee alisysteemien sisäisten häviöiden (*engl. loss factor*) ja alisysteemien välillä tapahtuvien liitoshäviöiden (*engl. coupling loss*) ansiosta. Kuvan 16 mallissa laatikoista ulos tulevat nuolet kuvaava sisäisten häviöiden aiheuttamaa energiahäviötä. Erityyppisten alisysteemien välisille liitoshäviöille on esitetty kirjallisuudessa laskentakaavoja. [20, 115] Alisysteemin sisäinen häviökerroin on usein mahdollista määrittää mittausten avulla [55].



**Kuva 16: Kaksinkertainen rangoilla kytketty seinärakenne ja siitä luotu SEA-malli. Alisysteemit on numeroitu 1-5 [20].**

Alisysteemien ja niiden välisten liitosten määrittely riippuu tarkastelutaajuudesta ja rakenteen yksityiskohdista. Esimerkiksi kaksinkertaisen levyrakenteen akustinen toiminta muuttuu massa-jousi-massa resonanssin rajataajuudella siten, että myös SEA-laskennan rakennemallia joudutaan muuttamaan [20, 55]. Tämä perustuu siihen, että SEA-malleja luodessa oletetaan värähtelyn tapahtuvan resonoivasti. Kuten kappaleessa 3.2.1 osoitettiin, kappaleen resonanssivärähtely on riippuvainen koinsidenssintaajuudesta. Koinssidenssintaajuuden alapuolinen alue, jossa värähtely on pakkovärähtelyä, voidaan ottaa huomioon massalain avulla [55, 115]. Mallinnettävien värähtelymuotojen määrä vaikuttaa myös alisysteemien määrään. Hopkinssin mukaan eri värähtelymuodot tarvitsevat oman alisysteeminsä ja liitosehtonsa [55].

SEA-mallien oletus keskiarvoisesta energian siirtymisestä perustuu siihen, että monet ääni-ilmiöt eivät koskaan toistu täysin samanlaisina [115]. Näin ollen ilmiöitä voidaan tarkastella tilastollisen analyysin avulla. Kuten kappaleessa 3.2.1 tuotiin esille, mooditaajuuksilla on merkittävä vaikutus rakenteen akustiseen toimintaan. Toinen tilastollista tarkastelua puoltava seikka on se, että todellisten rakenteiden moodien laskentaan liittyy aina epävarmuustekijöitä, esimerkiksi todellisen rakenteen dimensiot ja rakentamisen tarkkuus. Mooditiheyden ollessa suuri eri moodeja on haastava, jopa mahdoton, erottaa toisistaan [55]. SEA-malleissa moodien määrittämisen haasteet on ratkaistu asettamalla kaikki moodit samanarvoisiksi; kaikilla moodeilla sama energia. Jokaiselle mallin alisysteemille määritetään tilastollinen mooditiheys. Mooditiheyden, moodienergian ja tarkasteltavan taajuuskaistan avulla voidaan laskea koko alisysteemin energia. Näin ollen yksittäisten moodeilla ei ole vaikutusta laskentatulokseen. [55, 78, 115]

SEA-mallia luodessa oletetaan myös, että systeemiin kohdistuva heräte, äänikenttä tai värähtely, on diffuusi ja alisysteemien välinen kytkentä on ”heikko”. Värähtelyn kannalta se tarkoittaa, että heräte kohdistuu kappaleen koko pintaan samalla voimakkuudella ja sen vaihe on satunnainen. Heikko kytkentä puolestaan antaa olettaa, etteivät yhteen kytketyt alisysteemit vaikuta toistensa värähtelykäyttäytymiseen, esimerkiksi ominaistajuuksilla. [55]

Yleisesti ottaen SEA-laskentamallien etuihin voidaan lukea se, että sen avulla saadaan tietoa äänen eri kulkureiteistä ja niiden merkityksellisyydestä kokonaisuuden kannalta. Siksi ne soveltuvat hyvin tilanteisiin, joissa halutaan arvioida akustisesta näkökulmasta jonkin yksittäisen alisysteemin vaikutusta kokonaisuuteen. [55,115] SEA-mallinnus ei välttämättä tarvitse yksityiskohtaista tietoa rakenteista, joten akustisten ominaisuuksien mallintaminen on mahdollista aloittaa jo suunnitteluketjun alkuvaiheessa, kun rakenteen yksityiskohdat eivät ole tiedossa. SEA-laskenta itsessään on suhteellisen nopeaa ja laskennassa tarvittavia parametreja on vähän verrattuna monimutkaisiin deterministisiin malleihin. [9, 55, 115,117]

### 3.4.1 Puuvälipohjien mallintaminen SEA-malleilla

SEA-mallinnusta on kehitetty viime vuosikymmenillä myös puurakenteiden suuntaan [17, 18, 19, 85, 87], mutta puuvälipohjien mallinnukseen liittyy vielä useita haasteita. Suurimpia haasteita ovat välipohjarakenteiden periodisuus, liitokset, kenttämuuttujat ja mallintaminen pienten taajuuksien alueella [9, 20, 39, 55, 68, 117]. Merkittävimpiä tutkimuksia SEA-mallien soveltamisesta puurakenteiden ääneneristävyyden laskennassa ovat Chung et al. mukaan Craik ja Smith [19, 20] ja Emms [23] tutkimukset [15].

Kenttämuuttujat kuvaavat värähtelyenergian etenemistä rakenteessa. SEA-malleissa käytettävä oletus homogeenisista ja diffuuseista kenttämuuttujista ei sovellu puurakenteille, kun mekaaninen heräte on pistemäinen, esimerkiksi askeläänikone [9, 55]. Käytännössä homogeenisuus oletus tarkoittaa, ettei kappaleessa 3.3 esitettyä värähtelyener-

gian etäisyysvaimenemista oteta huomioon alisysteemin sisällä vaan kappaleen värähteleä yhtä tehokkaasti joka pisteessä. Kenttämuuttujien diffuusius olettaa, että värähtely etenee kaikkiin suuntiin yhtä suurella intensiteetillä ja todennäköisyydellä [9]. Tällöin jää ottamatta huomioon se, että palkki-levy-rakenteessa värähtelyn vaimeneminen on suuntariippuvaista, koska rakenne on ortotrooppinen [55, 85, 106].

Periodisten ominaisuuksien huomiointi mallinnuksessa on yksi merkittävimmistä SEA-mallien haasteista, ja se liittyy läheisesti myös koneakustiikkaan, joka on merkittävä akustiikan tutkimusala. Koneteollisuudessa käytetään paljon ohuita levyrakenteita, jotka on vahvistettu säännöllisesti toistuvalla rakenteella, esimerkiksi laiva- ja lentokoneollisuudessa. Kuten kappaleessa 3.3 esitettiin, rankakytKentä muuttaa levyn akustisen toiminnan ortotrooppiseksi. SEA-malleissa ortotrooppisuus on pyritty ottamaan huomioon esimerkiksi käyttämällä mallissa tehokasta taivutusjäykkyyttä  $B_{eff}$  tai kulmariippuvaista taivutusjäykkyyttä. [125]

SEA-mallit soveltuvat mallintamiseen yli 100 Hz taajuuksilla. Tämän taajuusrajan alapuolella oletukset rakenteiden ja äänikentän keskiarvoisesta toiminnasta eivät päde riittävän hyvin [55]. Pienten taajuuksien alue on puurakenteiden askelääneneristävyuden kannalta kriittinen. Tällä taajuusalueella rakenteen yksittäiset ominaistajuuudet ovat merkittäviä askelääneneristykseen heikentäjiä. Kuten edellisessä kappaleessa todettiin, SEA-mallit perustuvat kuitenkin keskiarvoiseen energiaan tietyllä taajuuskaistalla, joten yksittäisen ominaistajuuden vaikutuksesta ei saada tietoa. [9]

SEA-malleissa liitostyyppin valinta vaikuttaa siihen, kuinka tehokkaasti energia siirtyy alisysteemien välillä. Puurakenteissa liitoksia on usein paljon, joten liitostyyppin valinnalla on merkittävä vaikutus laskentatulokseen. Kuten edellä kappaleessa 3.2 todettiin, liitoksen malli riippuu tarkastelutaajuudesta ja liitoksissa värähtelymuoto voi muuttua. Craik et al. puurakenteisten väliseinien SEA-mallinnusta koskevassa tutkimuksessa havaittiin, että malliin tarvittavien alisysteemien määrä riippuu myös liitostyyppistä. Kun liitos tulkittiin viivakytKentänä, liitoksen eripuolilla olevat levyn osat tulkittiin eri alisysteeminä. Jos taas liitos tulkittiin pistekytKentänä, koko levy oli yksi yhtenäinen alisysteemi. [19] SEA-malleja on kehitetty huomioimaan useita eri värähtelytyyppejä. Liitoksissa tapahtuvan värähtelymuodon muuttumisen takia puuvälipohjien mallintamiseen tarvitaan SEA-malli, joka huomio useita eri värähtelytyyppejä [87].

Kuten aiemmin kappaleen 3 johdannossa tuotiin esiin, nykyinen ISO 12354-2-standardin välipohjien askelääneneristävyuden laskentamalli soveltuu vain homogeenisille välipohjarakenteille. Gerretsenin mukaan yksi tämän standardoidun laskentamallin haasteista on se, että laskennassa käytettävä värähtelyhäviökerroin  $K_{ij}$  ei huomio riittävästi rakenteen sisällä tapahtuvaa värähtelyn vaimenemista. Puurakenteiden kannalta häviökertoimen määrittämisessä tulisi ottaa huomioon sekä rakenteen sisäiset häviöt että liitoshäviöt. [44]

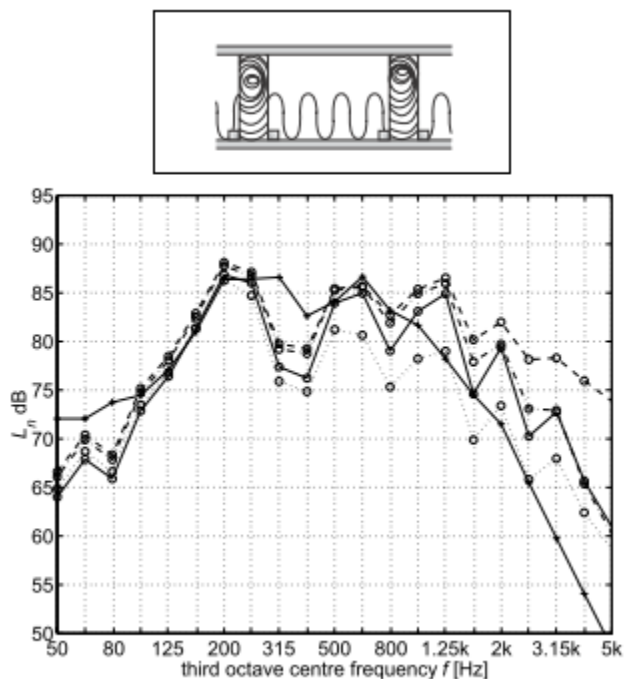
### 3.5 Deterministiset laskentamallit

Deterministiset laskentamallit kuvaavat fysikaalisia ilmiöitä eksplisiittisesti, fysiikan lakien mukaisesti, ilman tilastolliseen analyysiin perustuvia olettamuksia. Laskentamallit perustuvat joko analyttiseen tai numeeriseen laskentaan. Determinististen mallien etuna voidaan pitää sitä, että niiden avulla voidaan saada yksityiskohtaista tietoa rakenteen toiminnasta. [11, 39, 115]

Numeerista analyysia on käytetty apuna aaltoteoriaan perustuvien mallien kehittämisessä, sillä aaltoteorian mukaisten liikeyhtälöiden ratkaiseminen analyttisesti on usein mahdotonta. Tosin, jos analyttinen ratkaisu on saavutettavissa, se on yleensä tarkempi kuin numeerinen [11, 117]. FEM- ja BEM-laskennassa tarvittavien laskentaelementtien määrä on riippuvainen tarkastelutaajuudesta siten, että tarkastelutaajuuden kasvaessa myös tarvittavien elementtien määrä kasvaa. Laskenta muuttuu taajuuden kasvaessa hyvin raskaaksi. Käytännössä näitä malleja voidaan käyttää pienten taajuuksien tarkasteluun ja välipohjan värähtelykäyttäytymisen tarkasteluun [11, 39, 84, 117]. FEM-laskentaa on käytetty myös SEA-mallien parametrien laskemiseen, sillä edellä esitettyjen reunaehto- ja sisällä, FEM-laskennalla on mahdollista saada erittäin tarkkoja tuloksia [55].

Deterministisiä aaltoteoriaan perustuvia malleja on kehitetty erityisesti Brunskogin ja Hammerin tutkimuksissa [10, 11, 12, 13]. Chung et al. mukaan Hammerin vuonna 1996 julkaistu tutkimus käsitteli yksinkertaisen levy-palkki rakenteen akustista käyttäytymistä. Tutkimus perustui B. R Macen 1980-luvun alussa esittämiin teorioihin periodisesti jäykistettyjen levyjen akustisesta käyttäytymisestä. Brunskogin tutkimusta voidaan pitää jatkona näille tutkimuksille [12, 15]. Myös Chung et al. ovat kehittäneet aalto- ja palkkiteorioihin perustuvaa laskentamallia, joka nykyisellään soveltuu yksinkertaisten puuvälipohjien laskentaan [15].

Brunskogin ja Hammerin kehittämässä analyttisessä askelääneneristävyyden laskentamallissa on pyritty huomioimaan kaikki puuvälipohjan erityispiirteet: askeläänikoneen vaikutus välipohjaan ja värähtelyn eteneminen puurakenteissa ja liitoksissa. Brunskogin mukaan monet aiemmat askelääneneristävyyden laskentamallit, kuten Gerretsenin malli [41], ei ota huomioon puuvälipohjan mekaanista impedanssia, joka vaikuttaa askeläänilähteen ja lattiapinnan väliseen toimintaan [12]. Brunskog on tutkinut myös välipohjarakenteen periodisuuden vaikutusta askelääneneristävyyteen [9]. Kuvan 17 kuvaajassa on esitetty Brunskogin [12] laskentamallin tulokset ja vertailuarvoina mittaustulokset välipohjarakenteelta, joka on esitetty kuvan yläreunassa.



**Kuva 17: Mittaustulosten (+) ja Brunskogin laskentamallin (o) tulosten vertailu. Kuvaaja on saatu Brunskogin tutkimuksesta [12].**

Brunskogin kehittämää mallia on testattu yksinkertaisilla välipohjarakenteilla vertailemalla laskentamallin tuloksia mittaustuloksiin. Laskentatulokset on määritetty 15 eri herätepisteen keskiarvona. Kuvaajassa on esitetty useita käyriä, sillä tutkimuksessa selvitettiin, kuinka askeläänikoneen ja puurakenteisen lattian vuorovaikutus tulisi mallintaa. Tulosten perusteella Brunskogin malli tuottaa suhteellisen tarkkoja tuloksia 100–800 Hz taajuuksilla. Brunskogin mukaan laskentavirhettä aiheutuu siitä, ettei kyseinen malli ota huomioon levyn ja palkin välistä momenttikytkentää riittävän tarkasti. Myös askeläänilähteen ja välipohjan vuorovaikutuksen huomioonottaminen vaikuttaa laskentatuloksiin [12]. Laskentamallinsa perusteella Brunskog on esittänyt, että kuvan 12 tyyppisillä välipohjilla palkin korkeus ja alakattolevyn massa ovat merkittävimmät välipohjan askelääneneristävyyteen vaikuttava tekijät, kun vaikutusta tarkastellaan koko taajuusalueella [9].

Deterministisiä malleja on arvosteltu siitä, että ne soveltuvat usein vain yksittäistapausten ratkaisemiseen. Tarkkojen laskentatulosten saamiseksi tarvitaan myös mahdollisimman totuudenmukaiset lähtöarvot. Todellisiin rakenteisiin liittyy aina merkittäviä epätarkkuuksia, esimerkiksi mittojen ja värähtelyn reunaehtojen suhteen, jolloin tarvittavien lähtöarvojen määrittäminen voi olla erittäin hankalaa. Käytännön suunnittelutyössä ei ole aina mahdollista tietää lähtöarvoja tarkasti esimerkiksi heikon dokumentoinnin tai huonon työnlaadun takia. Mallinnettavien rakenteiden yksityiskohdat vaihtelevat myös laajasti. Nämä seikat heikentävät nykyisten determinististen mallien soveltamista suunnittelutyöhön. [12, 15, 42, 55] Brunskogin mukaan laskentaan liittyviä virheitä voidaan käsitellä jälkikäteen tilastollisen analyysin avulla. Hän myös esittää, että

suunnitteluun soveltuvan laskentamallin kehittämiseksi on ensin luotava yksityiskohtainen laskentamalli, jota voidaan tarvittaessa yksinkertaistaa. [9]

### **3.6 Parametriset askeläänitasomittaukset puurakenteisille välipohjille**

Parametrilla tarkoitetaan muuttujaa. Parametrisessa tutkimuksessa johonkin kokonaisuuteen vaikuttavat tekijät on jaettu parametreiksi ja tutkimuksessa selvitetään, millainen vaikutus yksittäisen tai usean parametrin muutoksella on kokonaisuuteen. Puurakenteisten välipohjien tapauksessa parametrisilla tutkimuksilla on tutkittu sitä, kuinka tietyn välipohjan rakenteellisen ominaisuuden muuttaminen vaikuttaa koko välipohjan askelääneneristävyyteen. Parametreina on käytetty esimerkiksi pintalattian ominaisuuksia, kannatinpalkkeja, alakattorakennetta sekä välitilan absorptiomateriaalia. Tässä tutkimuksessa käytetään vain laboratorio-olosuhteissa mitattuja askelääneneristävyyden arvoja. Käytännössä laboratoriomittaukset ovat ainoa luotettava mittaustapa, sillä tutkimuksen aikana rakenteita joudutaan muuttamaan useita kertoja ja vain laboratoriossa on mahdollista mitata pelkän välipohjan askelääneneristävyyttä. Laboratoriomittauksiinkin liittyy epävarmuustekijöitä, joita käsitellään kappaleessa 3.6.8.

Normaaleissa asuinrakennuksissa eli niin sanotuissa kenttäkohteissa välipohjaa ympäröivien seinärakenteiden kautta tapahtuu äänen sivutiesiirtymä, joka vaikuttaa merkittävästi välipohjan alapuoliseen tilaan syntyvään askeläänitasoon. Sivutiesiirtymien merkitystä käsiteltiin kappaleessa 3.3. Tässä tutkimuksessa ei käsitellä sivutiesiirtymiä laajemmin, sillä välipohjan akustisten ominaisuuksien ohella sivutiesiirtymien voimakkuuteen vaikuttavat myös sivuseinien ja liitosten akustiset ominaisuudet. Kenttämittauskohteissa on myös taustamelua, joka syntyy sekä rakennuksen sisällä että ulkopuolella olevista melulähteistä, kuten tämän tutkimuksen johdantokappaleessa 1.1 tuotiin esille. Laboratoriossa taustamelutaso pyritään pitämään mahdollisimman alhaisena. Kun laboratoriomittauksista saatuja tuloksia sovelletaan käytännössä, on kuitenkin otettava huomioon myös yllä esitetyt kenttäolosuhteet.

Taulukossa 3 on esitetty tutkimuksia, joissa on tutkittu puurakenteisten välipohjien askelääneneristävyyttä parametristen tutkimusmenetelmien avulla. Merkittävää tutkimusta tällä alalla on tehty Ranskassa, Kanadassa ja Ruotsissa. Tähän diplomityöhön on valittu välipohjien parametrisia tutkimuksia, jotka on julkaistu 1990-luvulla tai myöhemmin.

**Taulukko 3: Puurakenteisten välipohjien askelääneneristävyyden parametrisia tutkimuksia 1990-luvulta lähtien. CAN= Kanada, SWE= Ruotsi, AUS= Australia, GER= Saksa, FRA=Ranska**

Tutkimuksen toteuttaja	Julkaisuvuosi/ -maa	Julkaisun sisältö lyhyesti
Johansson [64]	1995/SWE	VP-rakenteen jäykkyyden vaikutus pienten taajuuksien askelääneneristävyyteen
Warnock [122]	2000/CAN	Laboratoriomittaukset 190 VP-rakenteelle
Warnock [120]	2005/CAN	Jatkotutkimus 2002 julkaistuun tutkimukseen, 67 VP-rakennetta.
Chung et al [16]	2006/AUS	25 välipohjarakennetta
Zeitler et al. [126]	2008/CAN	Pienitaajuksisen askeläänien hallinta puurakenteissa, 5 välipohjamallia, sivutiesiirtymä huomioitu.
Zeitler et al. [130]	2010/CAN	Askeläänien eri kulkureitit puuvälipohjassa, 25 VP-rakennetta.
Balanant et al. [1]	2012/FRA	Acoubois-hanke, jossa tutkittiin puurakennusten rakennusosien ilma- ja askelääneneristävyyttä.
Späh et al [108]	2013/SWE,GER	AcuWood hanke, VP askelääneneristävyyden mittauksia laboratoriossa ja kenttäkohteissa
Hu et al [56]	2013/CAN	Mittaukset ”koetalolla”, jolloin huomioitiin tuloksissa myös sivutiesiirtymät.

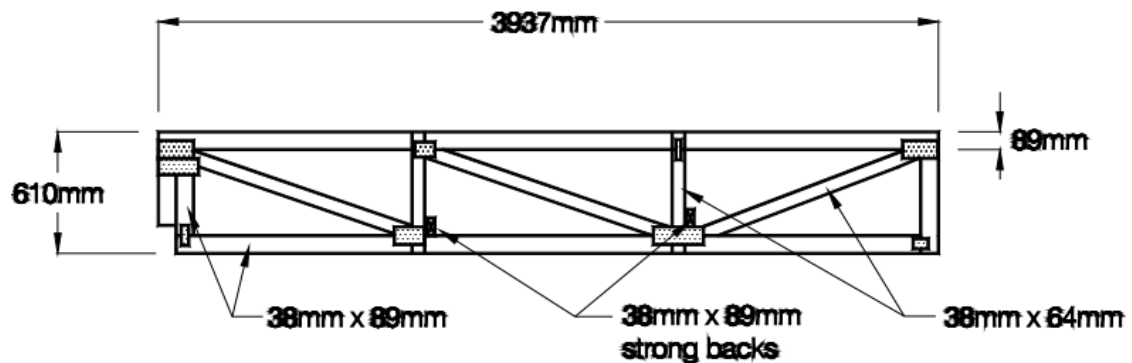
Taulukossa 3 esitettyjen tutkimusten pohjalta seuraavissa kappaleissa on selvitetty eri parametrien vaikutusta puuvälipohjan askelääneneristävyyteen.

Osasta taulukossa 3 esitetyistä tutkimuksista on ollut saatavissa 1/3-oktaavikaistoittain mitatut askeläänitasot ja ilmaääneneristävyydet. Näitä tuloksia on hyödynnetty laajasti tässä tutkimuksessa. Saatavissa olleet mittaustulokset on esitetty kattavasti liitteessä 3. Tässä tutkimuksessa käytettiin askeläänitasomittaustukoksia yhteensä 148 välipohjarakenteelta. Merkittävimmät lähteet tässä tutkimuksessa olivat Warnock et al. [120, 122], Balanant et al. [1] ja Späh et al. [108] tutkimukset. Jatkossa Warnock et al. tutkimuksesta saatuja mittaustuloksia on merkitty tunnuksella ”Can”, Balanant et al. tutkimuksen tuloksia tunnuksella ”Abo”, ja Späh et al. tuloksia tunnuksella ”Acu”.

Seuraavissa kappaleissa on esitetty eri parametrien vaikutus askeläänitasoon muutoksen tuoman askeläänitason parannuksen [dB] perusteella. Tulokset on esitetty 1/3-oktaavikaistoittain. Liitteessä 1 on esitetty kappaleissa 3.6.1–3.6.10 vertailtujen välipohjien askeläänitasot 1/3-oktaavikaistoittain.

### 3.6.1 Välipohjapalkit

Välipohjapalkit ovat puurakenteisen välipohjan kantava rakenne. Palkkien koko ja k-jako, eli palkkien välinen etäisyys, määräytyvät ensisijaisesti lattian kantokykyvaatimuksen perusteella, mutta Suomessa käytettävän Eurokoodi 1995-1-1 puurakenteiden suunnitteluohjeen mukaisessa mitoituksessa palkkien kokoon vaikuttaa myös käyttörajan värähtelyyn liittyvät rajoitukset. Värähtelymitoituksen tarkoituksena on varmistaa, etteivät rakenteen kuormat aiheuta rakenteen ja asukkaiden kannalta haitallista tai häiritsevää värähtelyä. [24] Käytännön toteutuksessa palkkien k-jakoon vaikuttaa myös muiden rakennustuotteiden, kuten rakennuslevyjen ja eristemateriaalien, standardimitat [71]. Akustisessa mielessä palkit jäykistävät välipohjarakennetta. Palkkikentän jäykistystä voidaan lisätä esimerkiksi kasvattamalla palkkien kokoa tai lisäämällä palkkien väliin poikittaistukia. Palkkien kasvattaminen lisää myös välipohjarakenteen kokonaismassaa [64, 122, 129, 130]. Suomessa lattiapalkkeina käytetään pääasiassa kokopuisia sahatavara-, liima- ja kertopuupalkkeja. Kanadalaisissa välipohjan askelääneneristävyytutkimuksissa on ollut mukana myös puisia I-palkkeja sekä ristikko- ja kotelopalkkeja. [120, 122, 126, 130] Kuvassa 18 on esitetty eräs Warnockin ja Birtan [121] tutkimuksessa käytetty puinen ristikkopalkki.

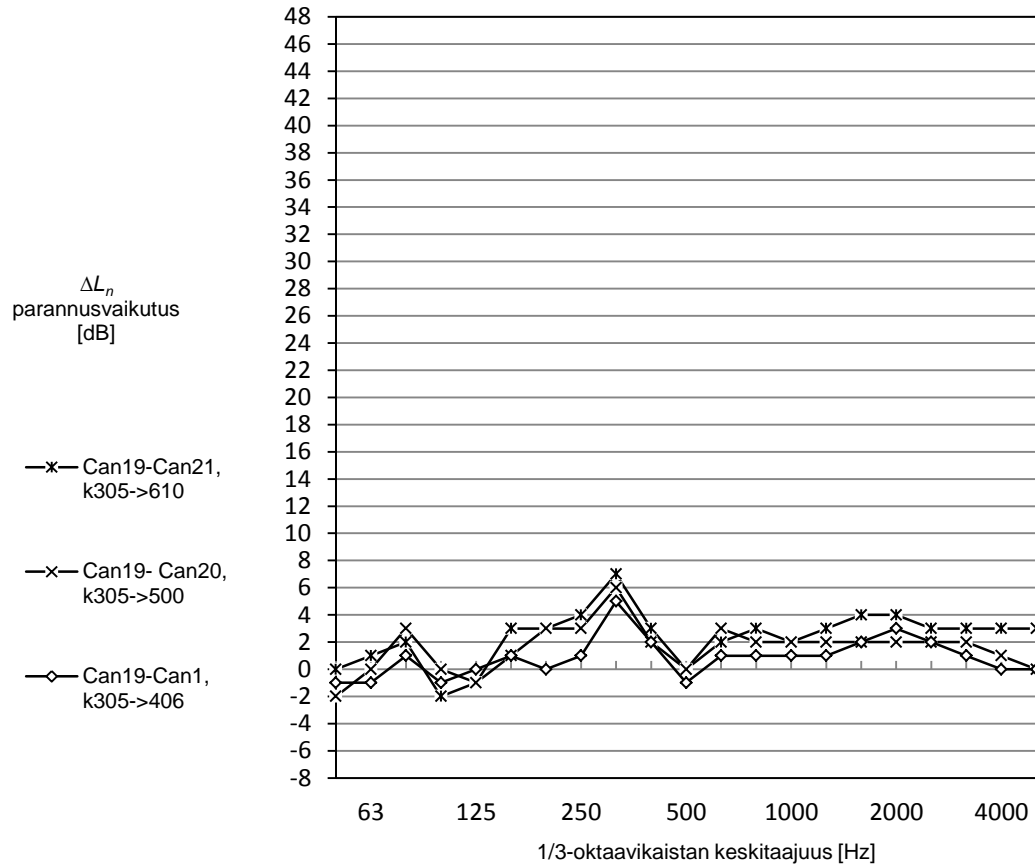


*Kuva 18: Eräs Warnockin ja Birtan välipohjatutkimuksessa käytetty naulalevyristikkopalkki [122].*

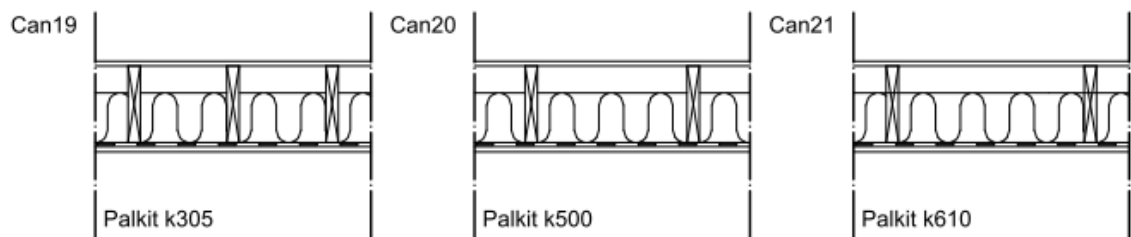
Palkkien suuntaisesti tehdyn jäykistyksen on havaittu parantavan askelääneneristävyyttä, kun jäykistys muuttuu merkittävästi. Zeitlerin tutkimuksessa havaittiin, että kaksinkertaistamalla palkkien määrän välipohjassa askelääneneristävyys paranee keskimäärin 2dB koko taajuusalueella alkaen noin 63 Hz taajuudelta. Kyseisessä tutkimuksessa palkkimäärä kaksinkertaistettiin kiinnittämällä kaksi palkkia toisiinsa. Näin ollen palkkien k-jako pysyi samana koko tutkimuksen ajan. [130] Chung et al. ovat esittäneet, että välipohjan taivutusjäykkyyden muutoksen on oltava vähintään 4-kertainen, jotta jäykis-



tyksen kasvatus parantaa askelääneneristävyyttä merkittävästi [15]. Kuvan 19 kuvaajassa on esitetty k-jaon vaikutus askelääneneristävyyteen, kun vertailukohtana oli palkkijako k305 [122].



**Kuva 19: Sahatavara palkkien ( $h=235$  mm) k-jaon vaikutus askelääneneristävyyteen [122].**

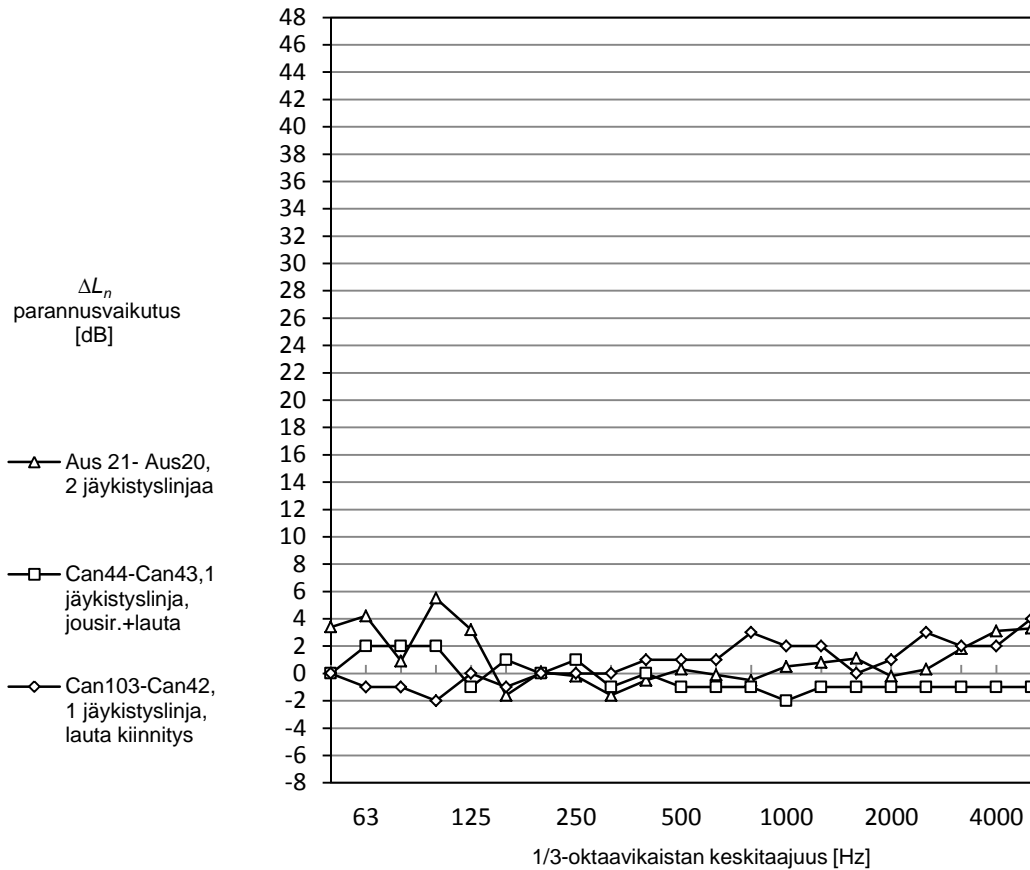


**Kuva 20: K-jakovertailussa käytettyjen välipohjien leikkauskuvat, mittakaava 1:20.**

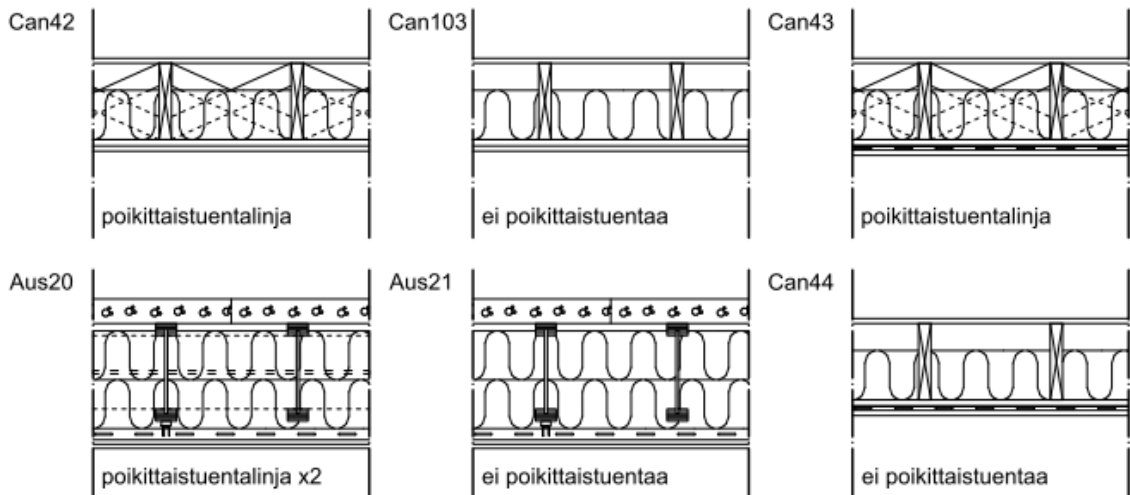
Kuvaajan tulosten perusteella k-jaon kasvatuksella oli pieni parantava vaikutus keskimäärin 125 Hz yläpuolella. Tämän alapuolella k-jaon harvennuksen vaikutus oli suureksi osaksi negatiivinen. Johansson et al. tutkimuksessa havaittiin, että k-jaon vaikutus askelääneneristävyyteen riippuu palkkikentän koosta. Suurella välipohjalla (35 m<sup>2</sup>) tiheämpi palkkien jako tuotti paremman askelääneneristävyyden kuin pienellä (11 m<sup>2</sup>). Välipohjan koon vaikutus havaittiin kenttäkohteissa tehdyistä mittauksista [64].

Välipohjan askelääneneristävyyttä voidaan parantaa myös jäykistämällä palkkikenttää palkkien suuntaan nähden poikittaisessa suunnassa. Zeitlerin tutkimuksen mukaan poikittaisella jäykistyksellä voidaan parantaa välipohjan askelääneneristävyyttä mutta sen vaikutus ei ole yhtä tehokas kuin palkkien suuntaisella jäykistyksellä saavutettu vaimennus [130]. Poikittaistukien parannusvaikutus havaittiin, kun vertailtiin välipohjia, joista toisessa ei ollut lainkaan poikittaistukia ja toisessa poikittaistukilinjoja oli useita, noin 600 mm välein koko välipohjan pituudelta. Mittaustulosten mukaan poikittaistuettu välipohja tuotti heikompia askeläänitasoarvoja alle 63 Hz taajuuksilla kuin välipohja ilman poikittaistuentaa [130]. Toisaalta australialaistutkimuksen mittaustulosten perusteella poikittaistuennan vahvistaminen parantaa askelääneneristävyyttä juuri pienillä taajuuksilla [15].

Kuvan 21 kuvaajassa on esitetty poikittaisen jäykistämisen vaikutus askelääneneristävyyteen eri tutkimuksista saatujen mittaustulosten avulla [15, 122]. Kuvaajassa on vertailtu välipohjarakenteiden askelääneneristävyyksiä poikittaistukilinjojen kanssa ja ilman niitä. Kuten kuvaajassa esitetyistä tuloksista voidaan havaita, yhden tai kahden poikittaistukilinjan lisääminen 3,9 metrin pituiseen palkistoon ei juuri paranna askelääneneristävyyttä. Australialaistutkimuksen mittaustulosten perusteella raskaalla pintalattalla, Aus 21 vs. Aus 20, poikittaistuet parantavat askelääneneristävyyttä alle 125 Hz taajuuksilla 3-5 dB. Chung et al päätyivät samaan tulokseen myös teoreettisessa tarkastelussa [16].



**Kuva 21: Palkkikentän poikittaistuentalinjojen vaikutus askeläänitasoihin [16, 122].**

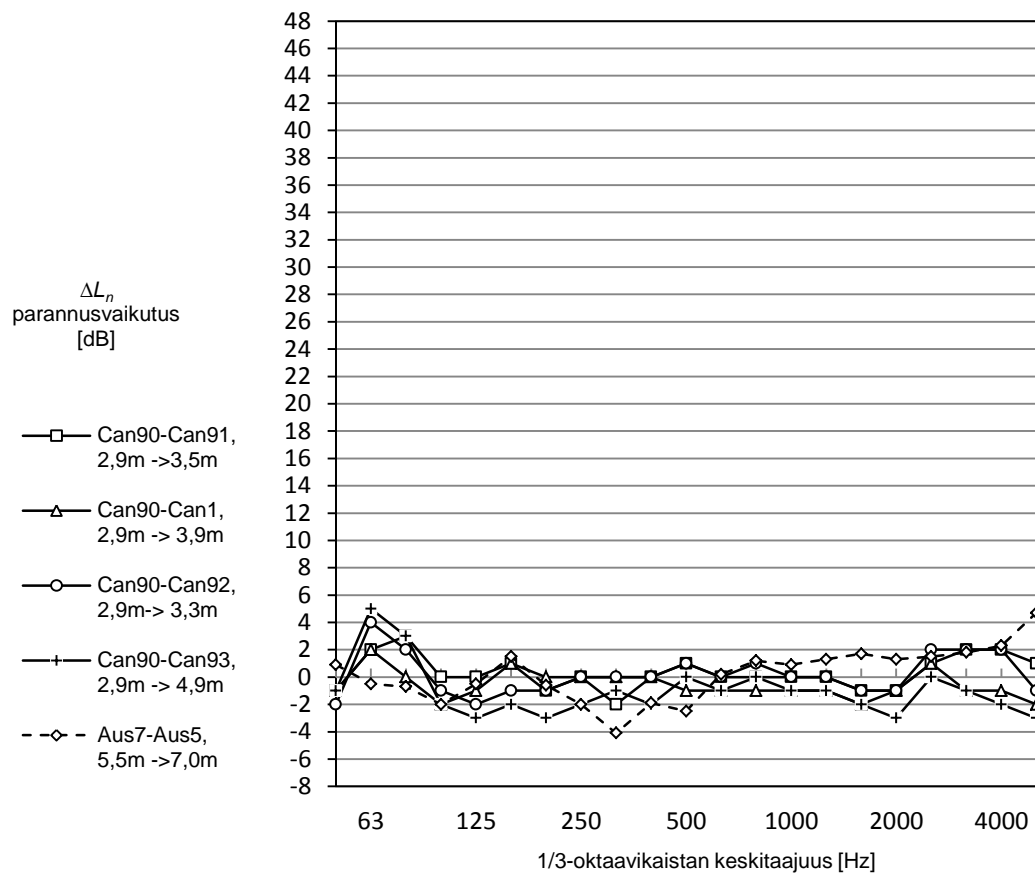


**Kuva 22: Poikittaistuenta vertailussa käytettyjen välipohjien leikkauskuvat, mittakaava 1:20.**

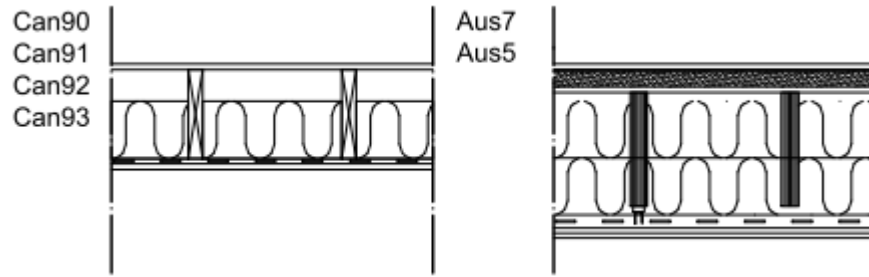
Kuvan 21 kuvaajassa esitettyyn välipohjamalliin Aus20 oli asennettu kaksi poikittaistukilinjaa 1,5 metrin välein palkiston pituussuunnassa. Poikittaistuet koostuivat sekä palkkien väliin asennetuista puukappaleista että kiristettävistä terästangoista. Palkkikentän kokonaispituus oli 5,5 m. Can 43 tapauksessa välipohjassa oli yksi poikittaistukilinja

3,92 m pitkän palkkikentän puolivälissä. Poikittaistuenta oli tehty asentamalla kaksi poikkileikkaukseltaan 16 mm x 64 mm puutolppaa ristikkäin, kuten kuvassa 22 on esitetty.

Palkkikentän ominaisuudet muuttuvat, kun palkkien pituutta muutetaan. Kuvan 23 kuvaajassa on esitetty eripituuisilla palkeilla toteutettujen välipohjien askelääneneristävyyksien vertailu. Vertailukohtana käytettiin tutkimuksen lyhimmillä, 2,921 m, palkeilla toteutettua välipohjaa. Pisimpien palkkien pituus oli 4,851 m [122]. Kuvaajasta voidaan nähdä, että kyseisellä välipohjamallilla palkkien pituudella ei ole merkittävää vaikutusta askelääneneristävyyteen.

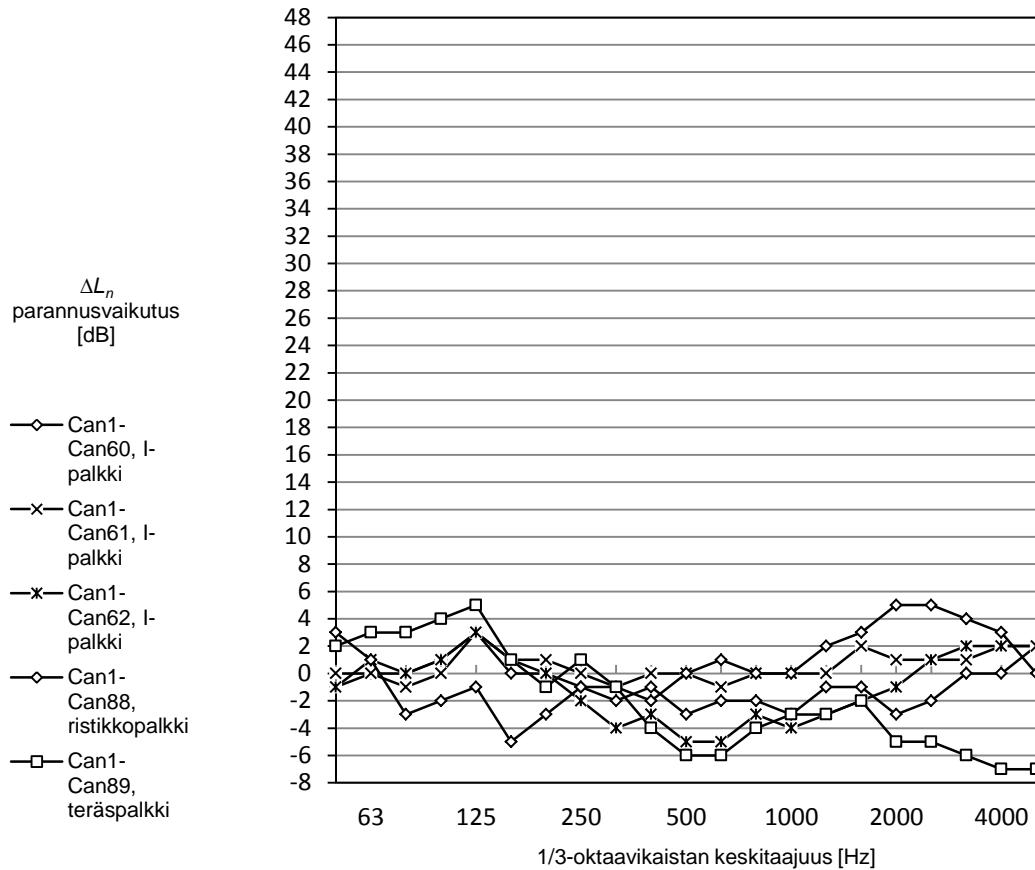


**Kuva 23: Palkkien pituuden vaikutus askeläänitasoihin [122].**

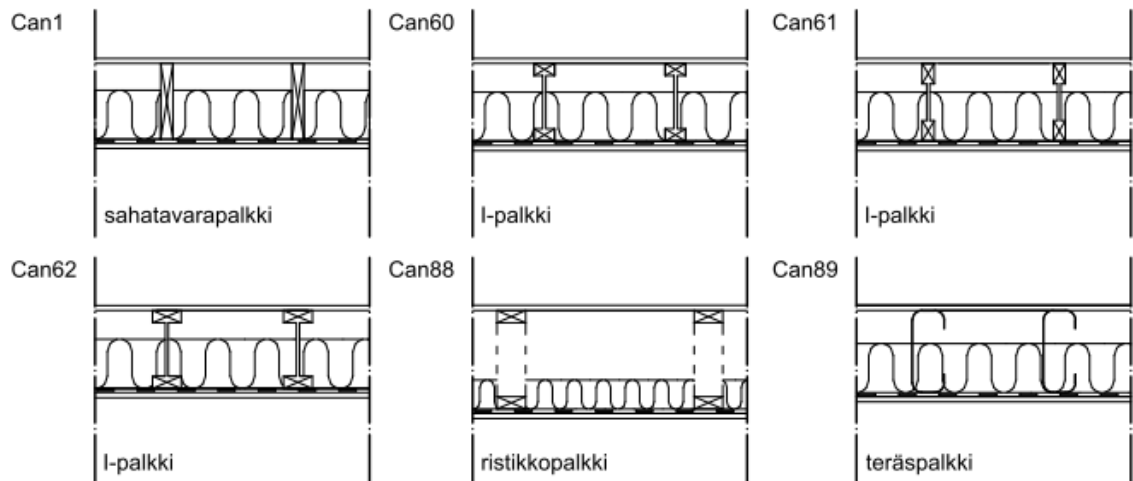


**Kuva 24: Palkkien pituusvertailussa käytettyjen välipohjarakenteiden leikkauskuvat, mittakaava 1:20.**

Palkkityypillä on todettu olevan pieni vaikutus puurakenteisen välipohjan askelääneneristävyyteen [64, 122]. Kuvan 25 kuvaajassa on esitetty askeläänepainetaso mittaustulosten vertailua erityyppisten I- sekä ristikkopalkkien ja sahatavarapalkilla toteutetuista välipohjista. Välipohjien Can60 ja 62 erona on I-palkin laippojen koko. Kaikkia vertailun välipohjia verrattiin 235 mm korkeilla, k406, sahatavarapalkeilla toteutettuun välipohjaan. Kuvaajan tuloksista voidaan havaita, että huomattavasti puupalkkia jäykemmällä teräspalkeilla toteutettu välipohja tuottaa parempia askelääneneristävyyden arvoja alle 125 Hz taajuuksilla. Yli 500 Hz taajuuksilla teräspalkkilattia tuottaa puolestaan jopa 6 dB heikompia arvoja kuin sahatavarapalkkilattia. Kuvassa 25 esitetyt mittaustulokset on saatu Warnock ja Birtan tutkimuksesta. Samoille mittaustuloksille sovelletun usean muuttujan regressioanalyysin perusteella Warnock on esittänyt, että puupalkkityypillä ei ole merkittävää vaikutusta askelääneneristävyyteen [120]. Johanssonin tutkimuksen mukaan liimapuu- ja vaneripalkkivälipohjat tuottavat hiukan parempia askelääneneristävyyden arvoja yli 125 Hz taajuuksilla kuin sahatavarapalkilla toteutettu välipohja [64].



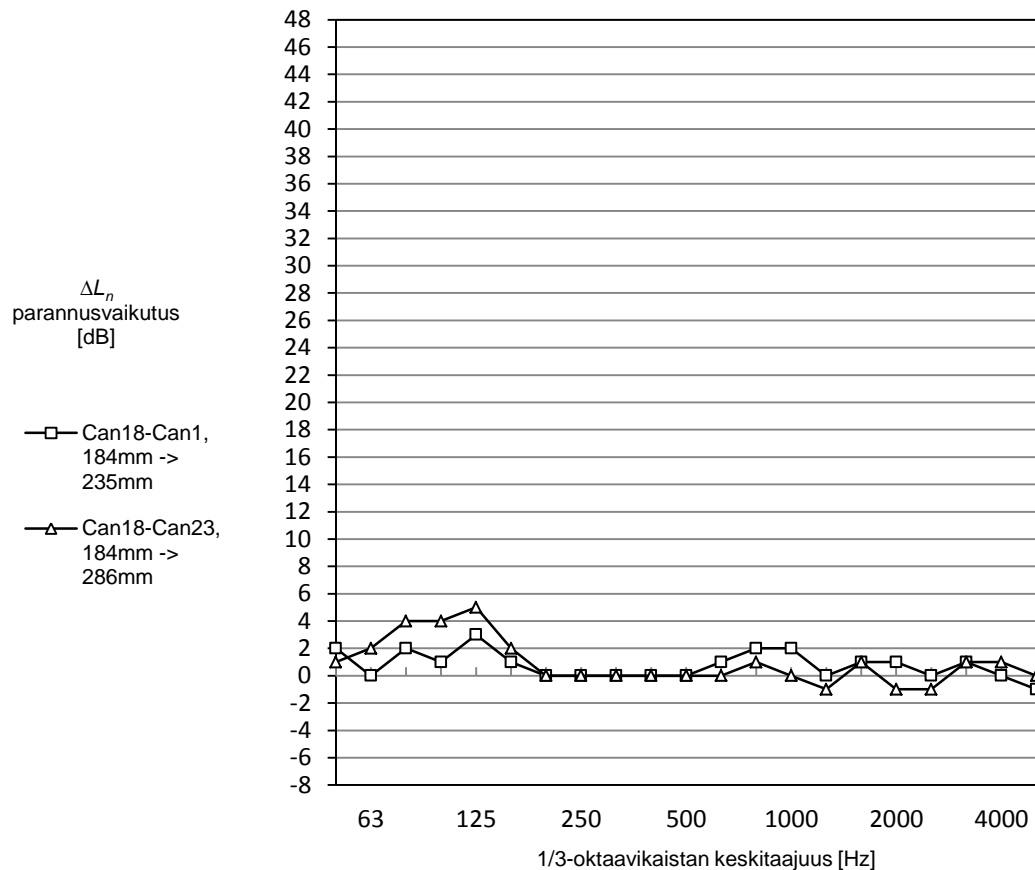
**Kuva 25: Eri palkkityyppien vertailu sahatavara palkkiin: puiset I-palkit, puu-teräs-ristikkopalkki ja C-profiili teräspalkki [120, 122].**



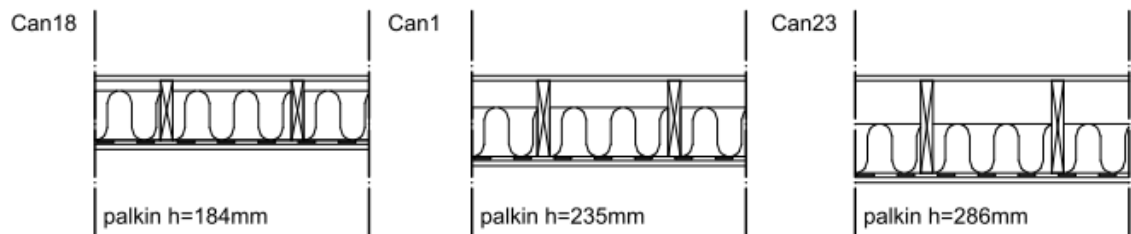
**Kuva 26: Palkkityyppivertailussa käytettyjen välipohjien leikkauskuvat, mittakaava 1:20.**

Välipohjan askelääneneristävyyttä voidaan parantaa myös kasvattamalla palkkien korkeutta, jolloin lattialevyn ja alakaton välinen ilmatila kasvaa. Erikorkuisilla palkeilla toteutettujen välipohjien askelääneneristävyyksien vertailu on esitetty kuvan 27 kuvajassa. Näiden mittaustulosten mukaan palkkien korottaminen paransi askelääneneristä-

vyyttä alle 160 Hz taajuuksilla. Mitä suurempi korkeuden lisäys on, sitä suurempi on askelääneneristävyyden parannus. Yli 160 Hz taajuuksissa palkkikoolla ei havaittu olevan vaikutusta [122]. Välipohjan sisällä ääni etenee joko runkoäänenä palkkeja pitkin tai ilmääänenä ilmatilassa [15, 55, 122]. Chung et al. ovat esittäneet, että palkkien kautta kulkeva runkoääni olisi merkittävin äänenkulkureitti, kun niiden korkeus on yli 200 mm; alle 200 mm palkeilla välitilassa etenevä ilmaääni olisi puolestaan merkitsevin kulkureitti [15].



**Kuva 27: Sahatavarapalkin korkeuden vaikutus askeläänitasoihin [122].**



**Kuva 28: Korkeusvertailussa käytettyjen välipohjien leikkauskuvat, mittakaava 1:20.**

Palkin korkeuden kasvattaminen kasvattaa sen taivutusjäykkyyttä ja samalla koko välipohjarakenteen taivutusjäykkyyttä. Palkkien kasvatus lisää myös välipohjarakenteen massaa. Kuvan 27 tapauksessa painavimman (Can23) ja kevyimmän (Can18) välipohja-

rungon ero oli noin 5 kg/m<sup>2</sup>. Toisaalta 286mm korkean palkin taivutusjäykkyys on 3,7-kertainen 184 mm korkeaan palkkiin verrattuna [122].

Vaikka sivutiesiirtymiä ei tässä tutkimuksessa tarkemmin käsitellä, on syytä mainita, että välipohjapalkistolla on vaikutus sivutiesiirtymiin, jotka vaikuttavat merkittävästi ääniolosuhteisiin asuinrakennuksissa. Tutkimusten mukaan askeläänilähteen etäisyys seinälinjasta vaikuttaa sivutiesiirtymien voimakkuuteen [3, 96]. Mitä lähempänä sivutienä toimivaa seinää äänilähde on, sitä voimakkaampi on sivutiesiirtymä. Etäisyyden ohella sivutiesiirtymän voimakkuuteen vaikuttaa palkkien suuntaus, kuten kappaleessa 3.3 tuotiin esille.

### 3.6.2 Alakaton kiinnitystapa

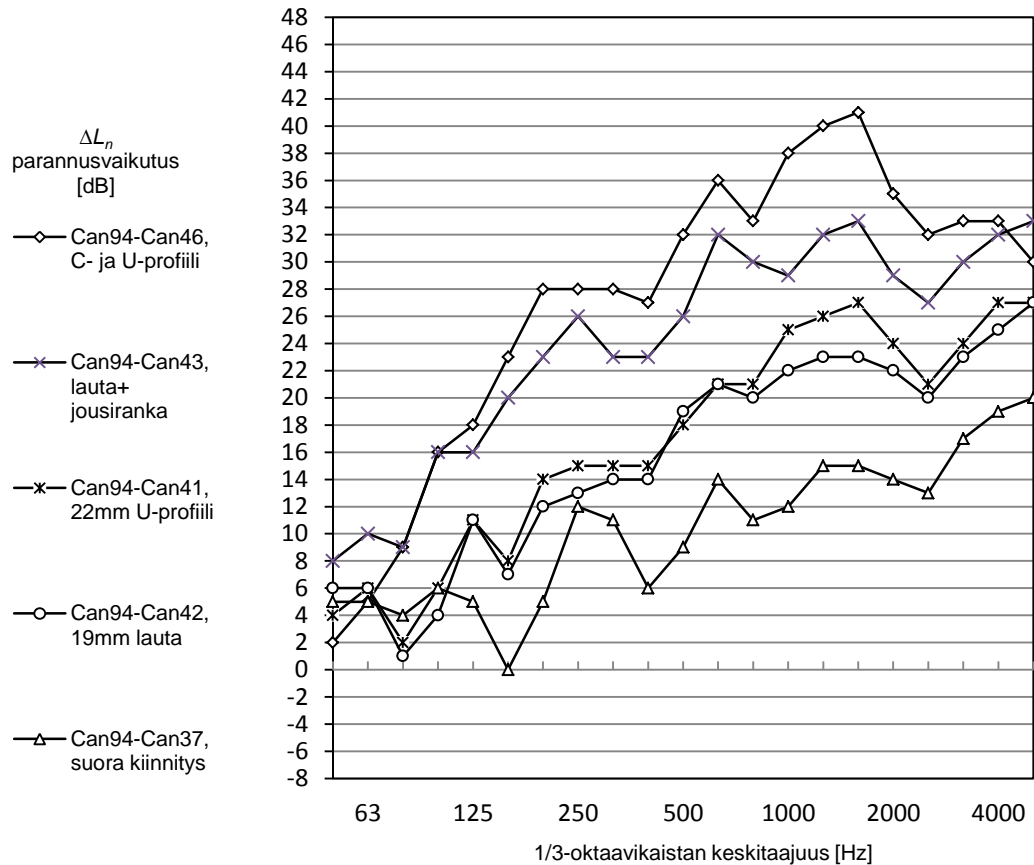
Kuten kappaleessa 3.6.1 tuotiin esille, lattiapalkit ovat merkittävä äänenkulkureitti välipohjassa. Tätä kulkureittiä voidaan heikentää merkittävästi kiinnittämällä alakatto lattiapalkkeihin joustavasti, esimerkiksi akustisilla jousirangoilla tai vaimentavilla kiinnikkeillä [15,120].

Alakaton askelääntä parantava vaikutus perustuu kaksinkertaisen rakenteen muodostaman massa-jousi-massa systeemin värähtelyyn ja siihen, että alakatto lisää välipohjan kokonaismassaa [122]. Massa-jousi-massa systeemissä palkkien ylä- ja alapuolinen levy tai levyt toimivat massoina ja palkkien muodostamassa ilmapölyssä oleva ilma jousena. Bradley et al. mukaan, kun alakattolevy on kiinnitetty joustavasti jäykkiin rankoihin, ilmapöly muodostama ilmajousi ja jousiranka toimivat yhdessä ja niiden dynaamiset jäykkyydet lasketaan yhteen [8, 130]. Kuten myöhemmin kappaleessa 4.4 esitetään, systeemin ominaistajuus  $f_{mam}$  vaikuttaa massa-jousi-massa systeemin akustiseen toimintaan. Vaikka kyseiset laskentakaavat on johdettu ilmapölylle, seuraavissa kappaleissa esitetyt askelääneneristävyyden mittaustulokset osoittavat, että samat ilmiöt on havaittavissa myös askelherätteen kanssa.

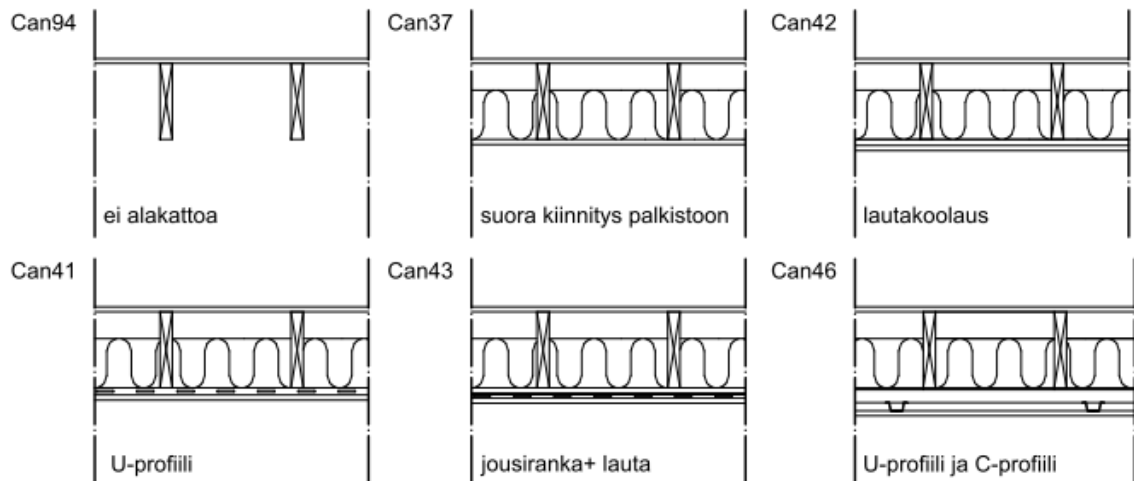
Lattiapalkit johtavat tehokkaasti värähtelyä lattian yläpinnasta alapintaan. Tämä äänenkulkureitti voidaan katkaista tehokkaasti kiinnittämällä alakatto joustavasti, esimerkiksi akustisilla jousirangoilla. [8, 122, 130]

Kuvan 29 kuvaajassa on vertailtu eri alakaton kiinnitystapojen vaikutusta askelääneneristävyyteen. Kaikkia kiinnitystapoja on verrattu ilman alakattoa toteutettuun välipohjaan. Akustisen jousirangan parannusvaikutus on esitetty erikseen kuvassa 31. Kuvassa 29 esitettyjen mittaustulosten perusteella kaikilla alakattoratkaisuilla on positiivinen vaikutus askelääneneristävyyteen koko taajuusalueella. Alakattolevyn suora kiinnitys palkkeihin tuottaa pienimmän ja kahdella metalliprofiililla ja vaijerilla (Can 46) kiinnitetty alakatto suurimman parannuksen askelääneneristävyyteen. Eri alakaton kiinnitystavat on esitetty kuvan 30 leikkauskuvissa.





**Kuva 29: Eri alakaton kiinnitystapojen vaikutus verrattuna ilman alakattoa toteutettuun välipohjaan [122].**

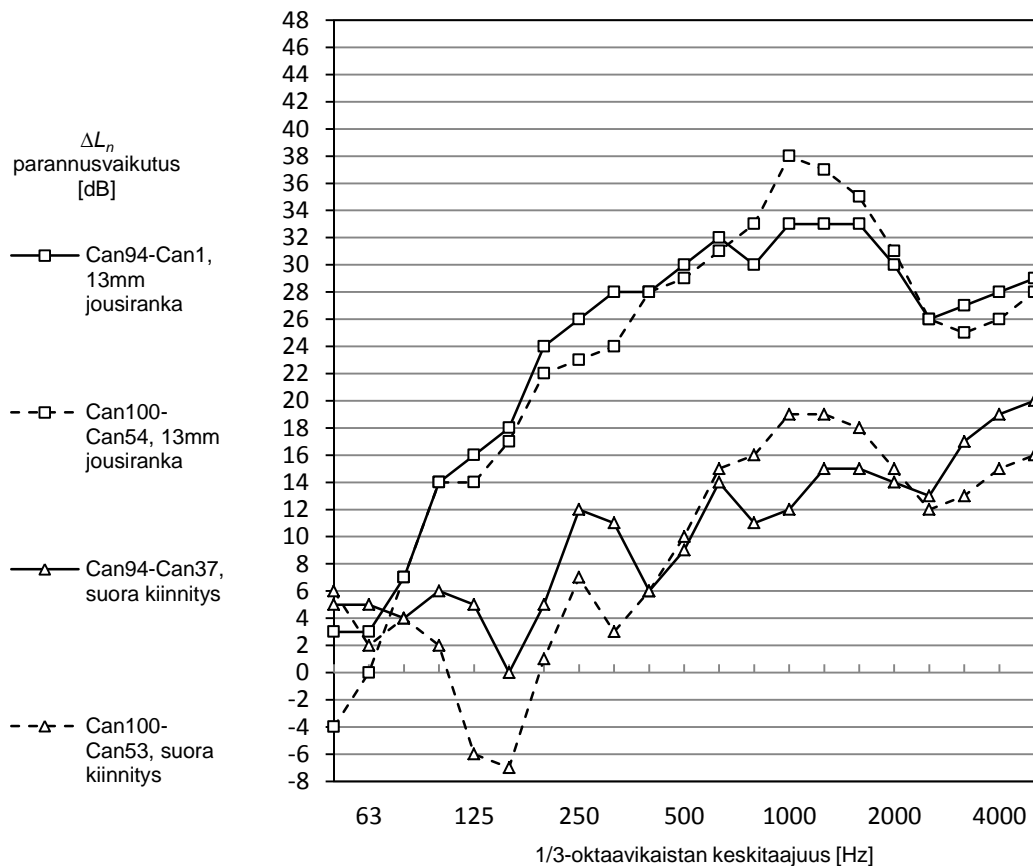


**Kuva 30: Alakaton kiinnitystavan vertailussa käytettyjen välipohjien leikkauskuvat, mittakaava 1:20.**

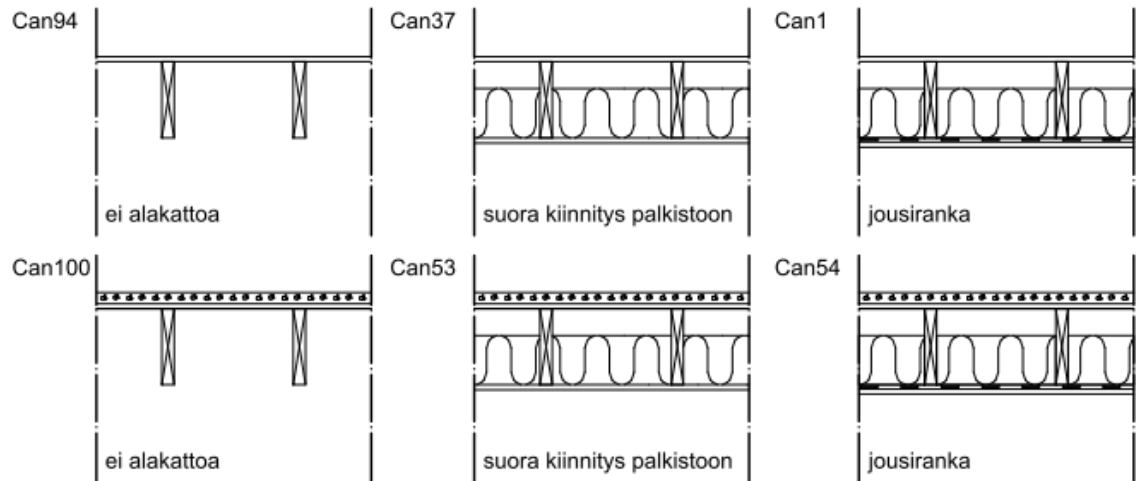
Kuvan 31 kuvaajassa on esitetty alakaton parannusvaikutus sekä jousirangan avulla että suoraan palkkeihin kiinnitettynä. Kuten kuvaajasta voidaan nähdä, 80 Hz yläpuolella jousirangalla kiinnitetty alakatto tuottaa huomattavasti parempia tuloksia kuin suoraan kiinnitetty alakatto. Jousirangalla toteutettu välipohja tuottaa heikomman askelää-

neneristävyuden alle 80 Hz taajuuksilla, koska jousirangan ja ilmapölyn yhdistetty dynaaminen jäykkyys on suurempi kuin pelkän ilmapölyn dynaaminen jäykkyys. Suurempi dynaaminen jäykkyys tarkoittaa tässä tapauksessa korkeampaa ominaistajuuutta  $f_{mam}$ .

Kaksinkertaisen rakenteen huomattava eristävyttä parantava vaikutus alkaa  $f_{mam}$  taajuuden yläpuolella, kuten kappaleessa 4.4 osoitetaan. Näin ollen suoraan kiinnitetyn rakenteen parannus vaikutus alkaa pienemmällä taajuudella kuin jousirangoilla kytketyn rakenteen. Palkkien kautta kulkeva runkoääni on kuitenkin niin merkittävä äänenkulureitti, että heti jousirankarakenteen  $f_{mam}$  taajuuden yläpuolella se eristää paremmin kuin suoraan kiinnitetty alakatto. Jousirangan parannusvaikutus perustuu siihen, että se estää tehokkaasti värähtelyn etenemisen välipohjapalkeista alakattolevyyn [8, 122, 130]. Jousirankakiinnityksen värähtelyvaimennuskyvyn määrittää sen dynaaminen jäykkyys [71]. Valitettavasti tutkimuksissa [108, 120, 122] käytettyjen jousirankojen dynaamisia jäykkyyksiä ei saatu selville tätä tutkimusta varten.



**Kuva 31: Jousirangan parannusvaikutus kevyellä pintalaatalla (OSB 15 mm) ja raskaalla pintalaatalla (betoni 35 mm) [122].**

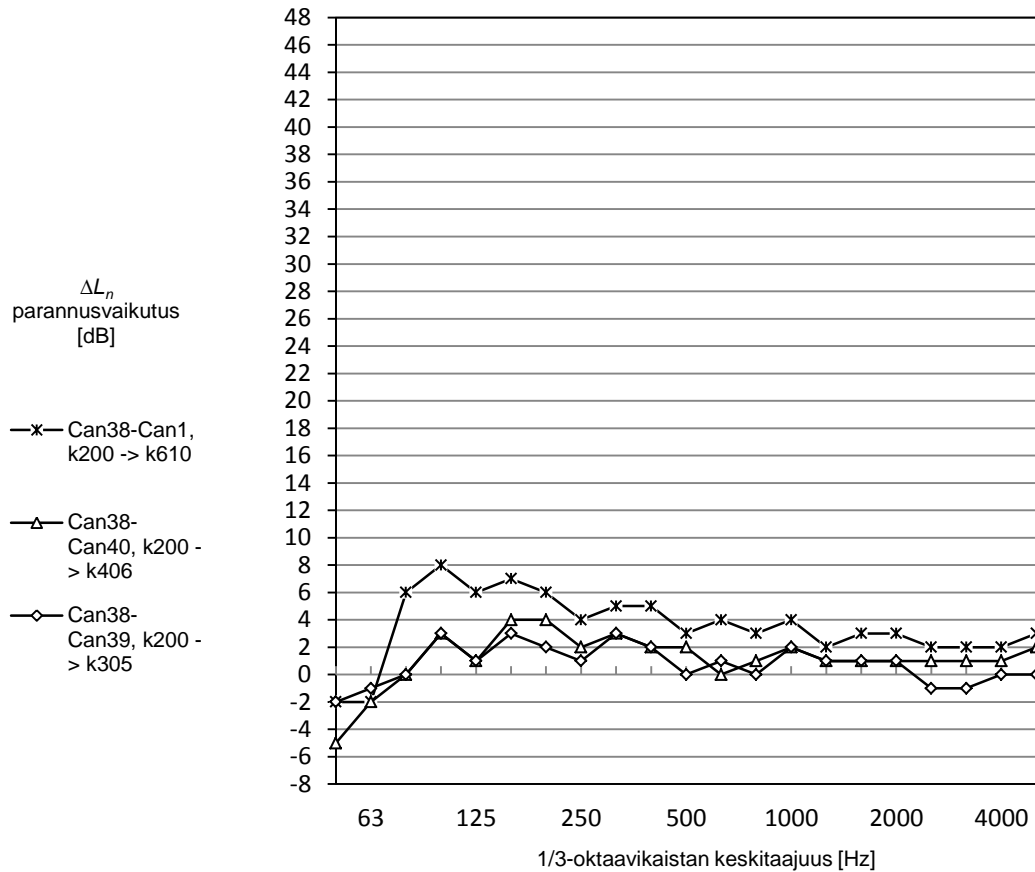


**Kuva 32: Jousirangan akustisen vaikutuksen vertailussa käytettyjen välipohjien leikkauskuvat, mittakaava 1:20.**

Kuvan 31 kuvaajan tulosten perusteella alakaton jousirankakiinnityksen parannusvaikutus ei ole riippuvainen pintalattiasta. Parannusvaikutus on lähes sama betonisella pintalattialla ja OSB-levyllä. Can100-Can54 rakenteiden vertailusta voidaan havaita, että pintalattian ollessa raskas alakaton suora kiinnittäminen jopa heikentää välipohjan askelääneneristävyyttä tässä tapauksessa 125 Hz taajuuden ympäristössä. Ilmiö liittyy rakenteen ominaistajuuksiin, todennäköisesti kaviteetti moodeihin, sillä heikennys havaitaan, kun verrataan alakattolaisia rakenteita ilman alakattoa toteutettuun rakenteeseen.

Kuvan 31 kuvaajan käyrästä Can100-54 voidaan havaita, että jousirankakiinnitys heikentää välipohjan askelääneneristävyyttä 63 Hz alapuolella. Tämä johtuu edellä esitetyistä kaksinkertaisen rakenteen resonanssitaajuudesta  $f_{mam}$ , jonka laskenta on esitetty kaavassa 37. Resonanssitaajuuden ympäristössä rakenteen ääneneristävyys heikkenee [8]. Zeitler et al. mukaan, kun massa-jousi-massa-systeemissä on useita rinnakkaisia jousia, löysin jousi määrittää alimman resonanssitaajuuden  $f_{mam}$ . [130]. Can54 välipohjan tapauksessa ilmatilan muodostama ilmajousi ja alakattoranka ovat rinnakkaisia jousia, josta alakattoranka on löysempi. Bradley et al. ja Zeitler et al. mukaan perinteisten alakattorangat vastaavat jäykkyydeltään 100–160 mm paksuista ilmapäliä [8, 130].

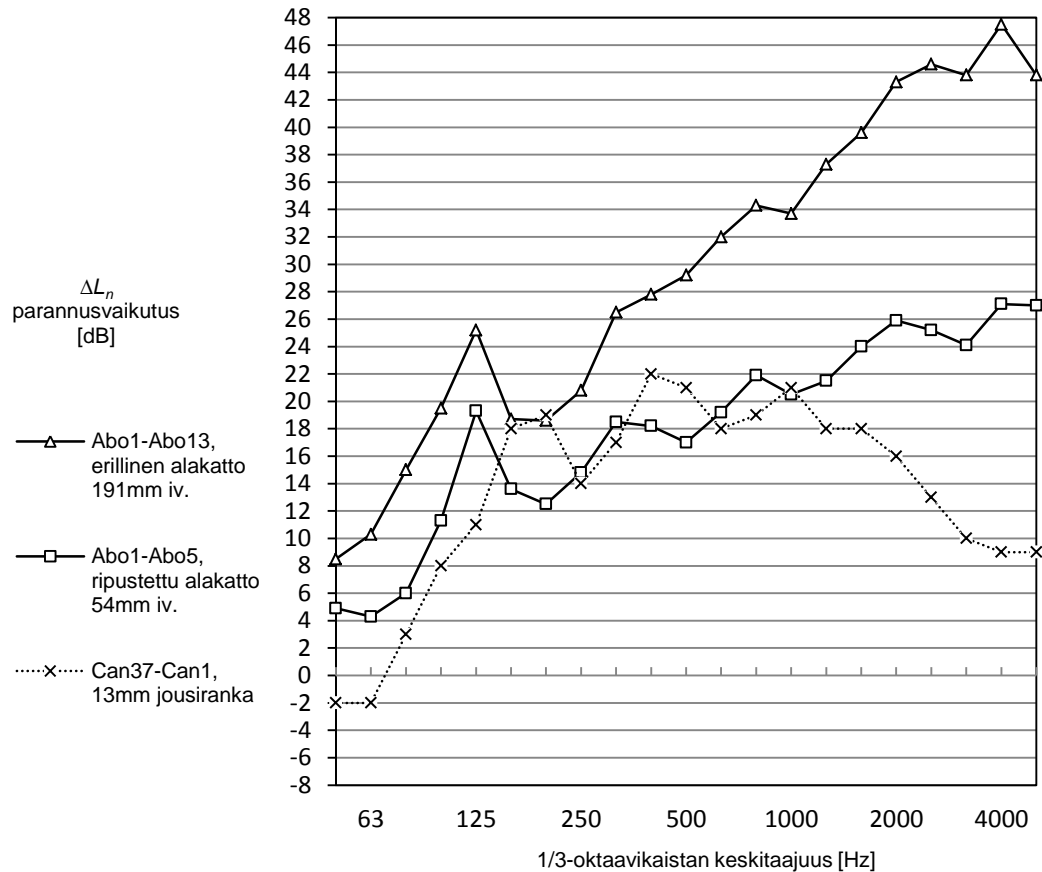
Jousirankakiinnityksen dynaamiseen jäykkyyteen vaikuttaa rangon ominaisuuksien ohella myös rankojen kiinnitystiheys eli k-jako. Jousirankakiinnityksen dynaaminen jäykkyys pienenee eli jousi löystyy, kun rankojen k-jako kasvaa [51]. Kuvan 33 kuvaajassa on esitetty jousirankojen k-jaon kasvattamisen vaikutus askelääneneristävyyteen. Kuvaajasta voidaan havaita, että alle 200mm muutoksilla ei ole juuri vaikutusta alakaton toimintaan. 310 mm k-jaon muutos tuottaa jo noin 6 dB parannuksen 63–500 Hz taajuusalueella. Kuvan 33 kuvaajassa esitetyn vertailun perusteella yli 1000 Hz taajuuksilla jousirankojen k-jaolla ei ole merkittävää vaikutusta askelääneneristävyyteen. Jousirankojen kiinnitystiheyteen vaikuttaa myös palomääräykset, sillä alakatto on palotilanteissa kantavia palkkeja suojaava rakenne [122].



**Kuva 33: Jousirangan k-jaon vaikutus askeläänitasoihin [122].**

Alakattorakenne voidaan toteuttaa myös ilman rakenteellista kytkentää välipohjan yläpuoliseen rakenteeseen. Silloin runkoäänen kulkeutuminen välipohjan kautta on estetty täydellisesti [125]. Kuvan 35 leikkauskuvissa on esitetty välipohjarakenne, jossa alakatto on asennettu erillisen palkiston varaan. Kuvan 34 kuvaajasta voidaan nähdä, että täysin erilleen asennettu alakatto tuotti ranskalaisessa Acoubois-hankkeen mittauksissa yli 8 dB parannuksen askelääneneristävyyteen koko taajuus alueella verrattuna suoraan palkkeihin kiinnitettyyn alakattoon. Parhaimmillaan parannus on yli 40 dB [1].

Zeitler et al. tutkimuksissa on havaittu, että jousirangalla on merkittävä askelääneneristävyyttä parantava myös kaksinkertaisissa rakenteissa vaikka kaksoispalkkirakenne itsessään on jo tehokas eristyskeino [126]. Chung et al. korostaa, että myös sivutiesiirtymien eristäminen on erittäin tärkeää kaksinkertaista alakattoa käytettäessä. Jos sivutiesiirtymiä ei oteta huomioon erillisellä alakatolla toteutettu rakenne tuottaa saman askelääneneristävyyden kuin jousirangalla suoraan palkkeihin kytketty alakatto [15].



**Kuva 34: Alakattotyypin parannusvaikutus. Parannusvaikutus on laskettu vertaamalla eri alakattotyyppien tuottamaa askelääneneristävyyttä suoraan palkkeihin kiinnitetyn alakaton eristävyyteen [1, 122].**



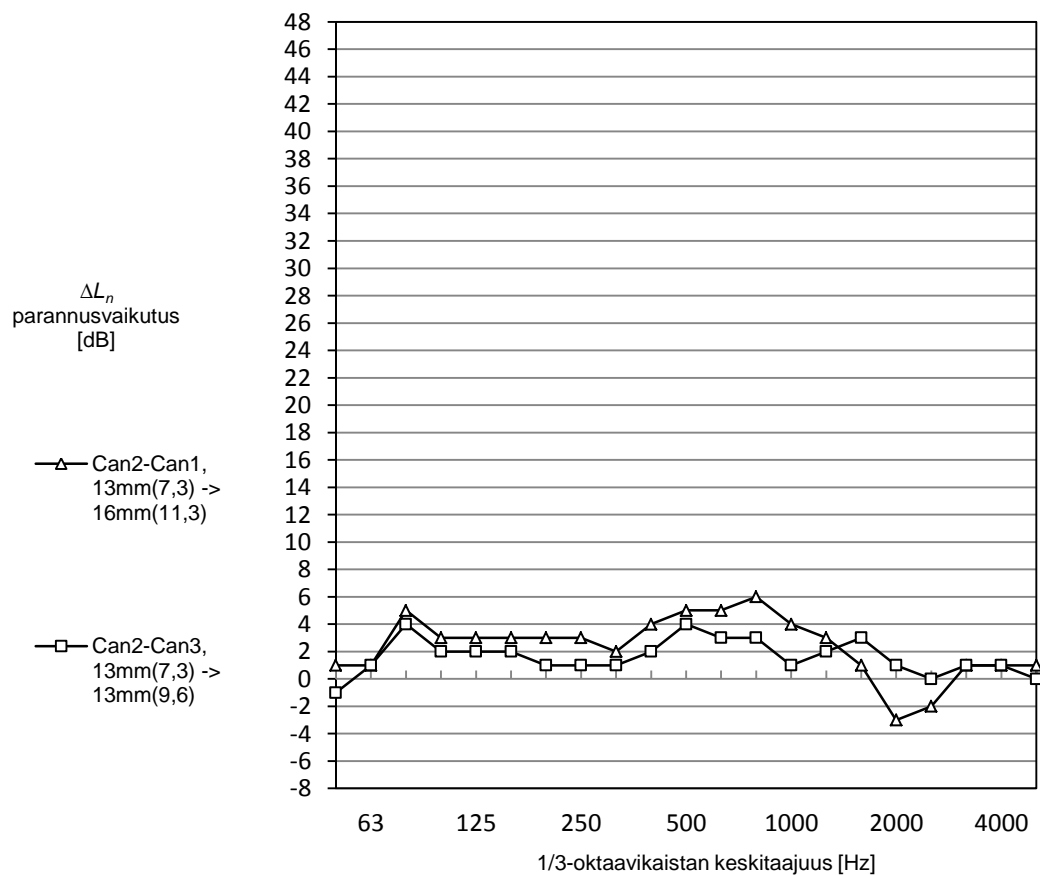
**Kuva 35: Leikkauskuvat välipohjarakenteista, joissa alakattotyyppi on parametrina, mittakaava 1:20.**

### 3.6.3 Alakaton massa

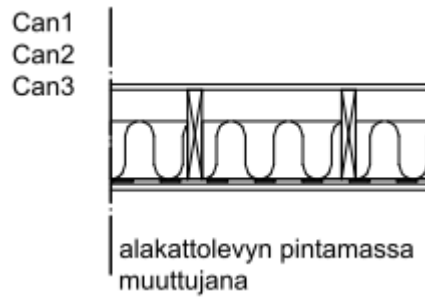
Alakaton ja lattian päällysrakenteen massa ovat tärkeimpiä puurakenteisten välipohjien askelääneneristävyyteen vaikuttavia tekijöitä [9, 120, 121, 126, 130]. Lattiarakenteen ja alakaton massaa voidaan kasvattaa eri tavoilla. Tyypillisintä on lisätä raakavälipohjarakenteeseen useita lattia- tai alakattolevyjä [16, 121, 130]. Tässä kappaleessa keskitytään alakattorakenteen akustisiin ominaisuuksiin ja lattiarakenteen vaikutusta askelääneneristävyyteen käsitellään kappaleessa 3.6.4.

Alakattorakenteen akustiseen toimintaan vaikuttavat alakattolevyjen määrä ja massa [1, 15, 16, 122, 130], sillä alakaton massa vaikuttaa kappaleen alussa esitellyn massa-jousimassa systeemin toimintaan. Alakaton massan kasvattaminen alentaa ominaistaajuutta  $f_{mam}$ . Näin ollen, mitä raskaampi alakatto on, sitä pienemmällä taajuudella alakaton askelääneneristävyyttä parantava vaikutus alkaa [8, 130]. Alakattorakenteissa voidaan käyttää yhtä tai useampia levykerroksia, jotka kiinnitetään toisiinsa ruuvaamalla. Tällöin kahden levyn ääneneristykseen hyöty on suurin [71, 122, 130].

Kuvan 36 kuvaajassa on esitetty alakattolevyn massan vaikutus välipohjan askelääneneristävyyteen [122]. Kuten kuvan 37 leikkauskuvista nähdään, mittauksissa käytetyt välipohjarakenne olivat alakattolevyn massaa lukuun ottamatta täysin identtiset. Kuvan 36 kuvaajan tulosten perusteella pienellä alakattolevyn massan muutoksella ei ollut juuri vaikutusta askelääneneristävyyteen. 13 mm paksuisen alakattolevyn vaihtaminen 16 mm levyyn heikentää askelääneneristävyyttä noin 2000 Hz taajuudella. Kappaleen 4.6 tulosten perusteella heikentyminen johtuu alakattolevyn koinsidensitaajuudesta: levyn paksuus ja pintamassa vaikuttavat eristävyyttä heikentävään koinsidensitaajuuteen.

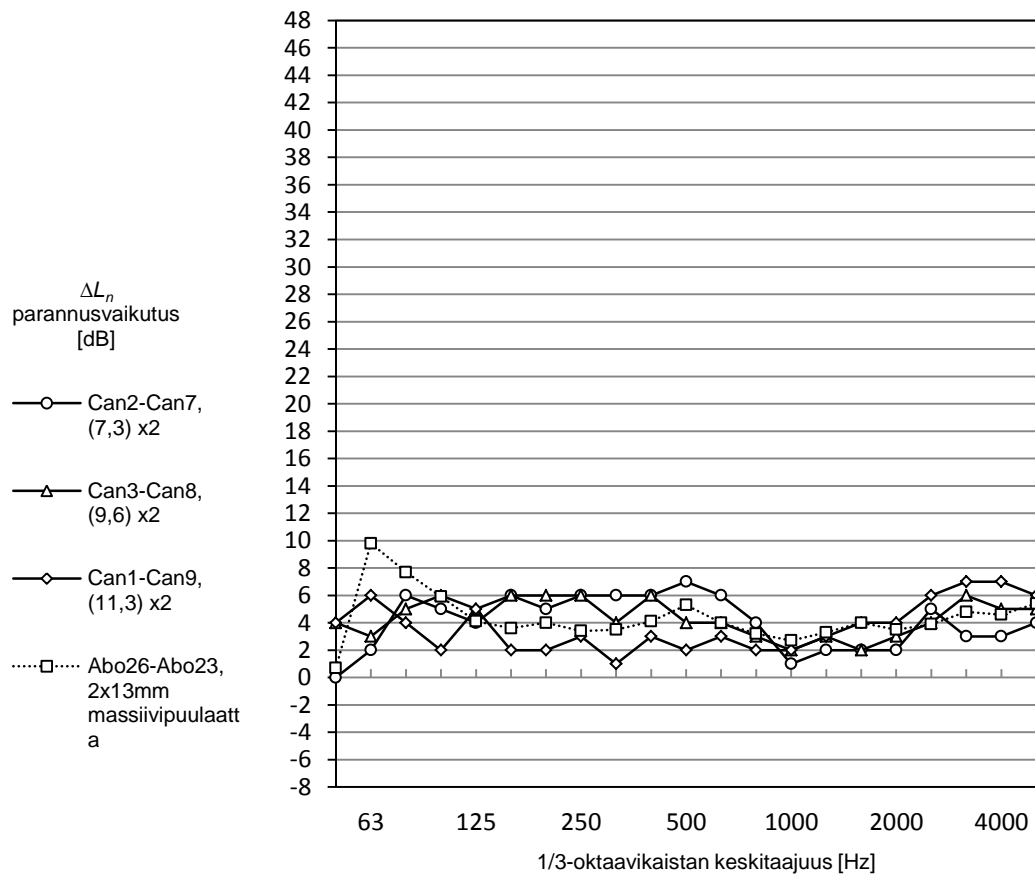


**Kuva 36: Alakaton levyjen massan vaikutus askelääneneristävyyteen. Sulkujen sisällä on esitetty alakattolevyjen pintamassat [ $\text{kg/m}^2$ ] [122].**



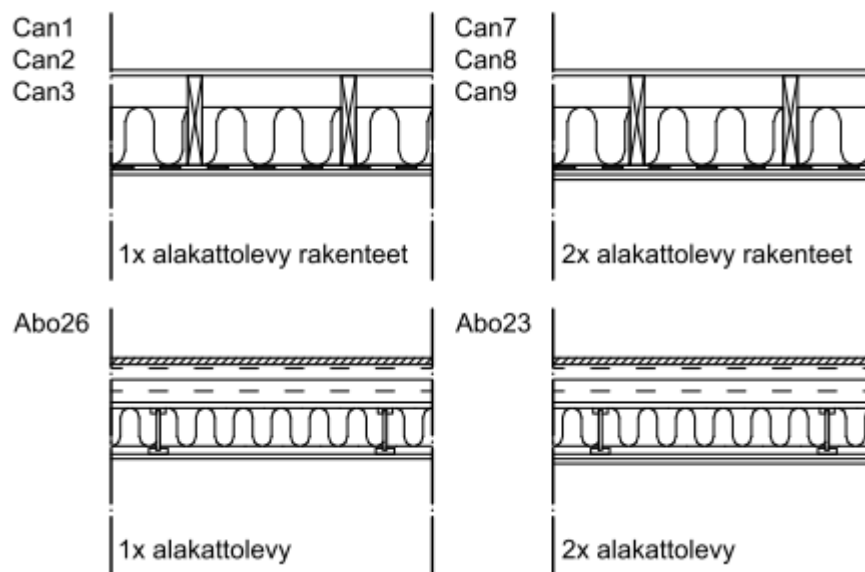
**Kuva 37: Alakattolevyjen pintamassojen vertailussa käytettyjen välipohjien leikkauskuva, mittakaava 1:20.**

Yksittäisen levyn massan kasvattamisen ohella alakaton massaa voidaan kasvattaa lisäämällä alakattoon useita rakennuslevyjä. Kahden samanlaisen levyn löyhä liittäminen, esimerkiksi ruuvaamalla, on usein parempi keino alakaton massan lisäämiseen kuin raskaamman levyn käyttö, koska tällöin alakatto systeemin koinsidenssitajuus ei muutu, mutta massa kasvaa [70]. Kuvan 38 kuvaajassa on esitetty alakattolevyn kaksinkertaistamisen vaikutus askelääneneristävyyteen [1, 122]. Kuvassa 39 on esitetty leikkauskuvat kuvan 38 vertailussa käytetyistä välipohjarakenteista.



**Kuva 38: Alakattolevyjen kaksinkertaistamisen vaikutus askeläänitasoihin. Suluissa on esitetty yksinkertaisen levyn pintamassa  $\text{kg/m}^2$  [122].**

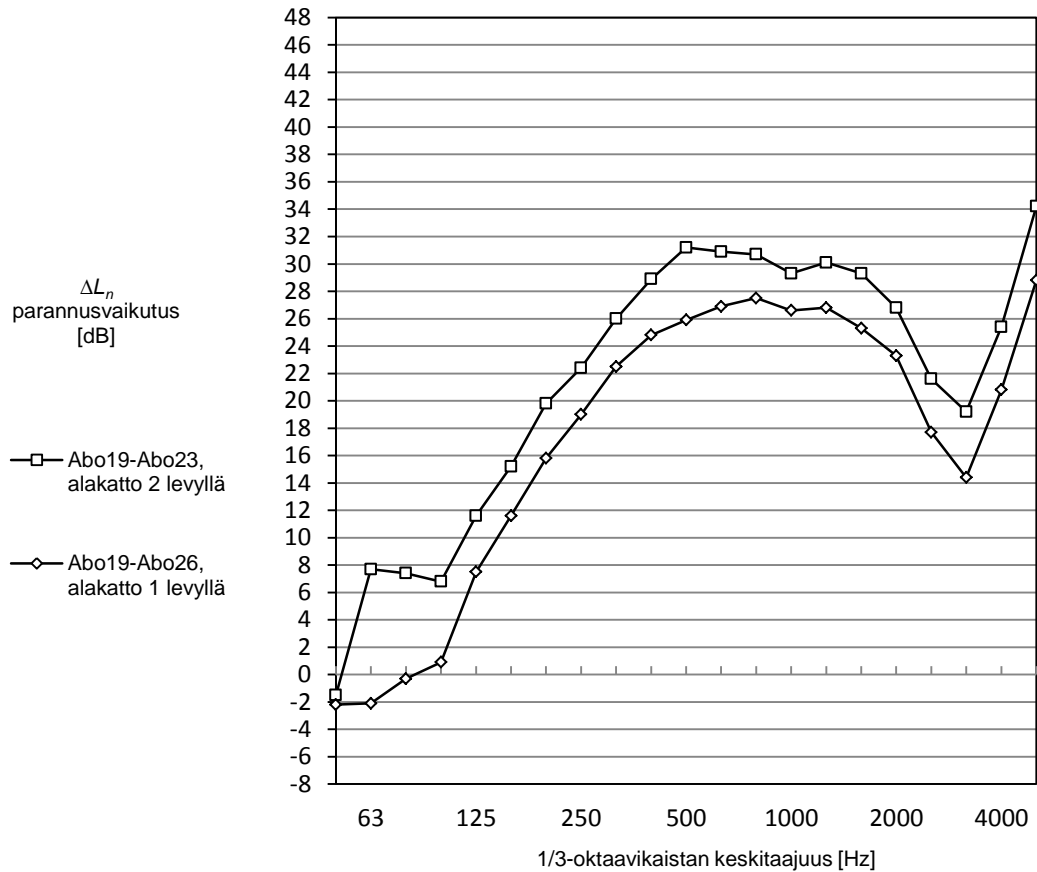
Kuvan 38 kuvaajasta voidaan havaita, että kaikissa tutkituissa tapauksissa alakattolevyn kaksinkertaistaminen paransi askelääneneristävyyttä koko tutkittavalla taajuusalueella. Warnockin mukaan löyhästi liitetyt alakattolevyt ja niiden väliin jäävä ohut ilmatila muodostavat massa-jousi-massa systeemin, jonka ominaistaajuus heikentää alakattorakenteen ääneneristävyyttä [122]. Tämä heikennys on nähtävissä kuvan 38 kuvaajan Can-etuliitteellä merkityistä käyristä 1000 Hz taajuusalueella. Kuvaajasta voidaan myös havaita, että raskaampien alakattolevyjen Can1 ja Can3 kaksinkertaistaminen parantaa askelääneneristävyyttä jo 63 Hz taajuudella mutta kevyemmän Can2 levyn kaksinkertaistamisen parannusvaikutus alkaa vasta noin 100 Hz taajuudelta.



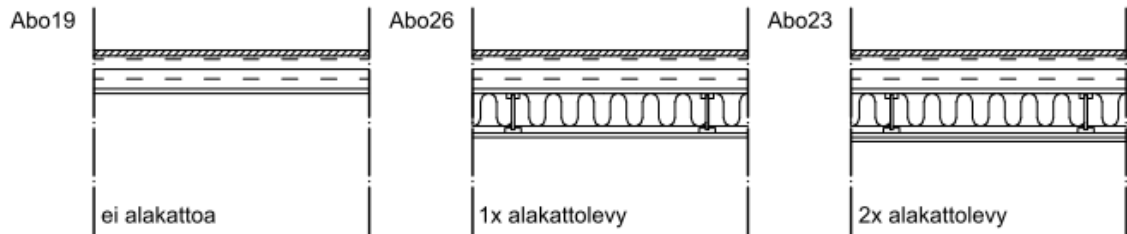
**Kuva 39: Alakattolevyjen kaksinkertaistamisen vaikutuksen selvittämiseen käytettyjen välipohjarakenteiden leikkauskuvat, mittakaava 1:20.**

Kuvan 40 kuvaajassa on esitetty alakaton parannusvaikutus, kun varsinainen välipohja on massiivipuuta. Kuvassa 41 on esitetty vertailussa käytettyjen välipohjien leikkauskuvat.





**Kuva 40: Alakaton vaikutus massiivipuurakenteella. Alakatollisia rakenteita on verrattu ilman alakattoa toteutettuun välipohjaan [1].**



**Kuva 41: Kuvan 40 vertailussa käytettyjen välipohjarakenteiden leikkauskuvat, mittakaava 1:20. Mittauksissa käytetty massiivipuulevy oli 115 mm paksu.**

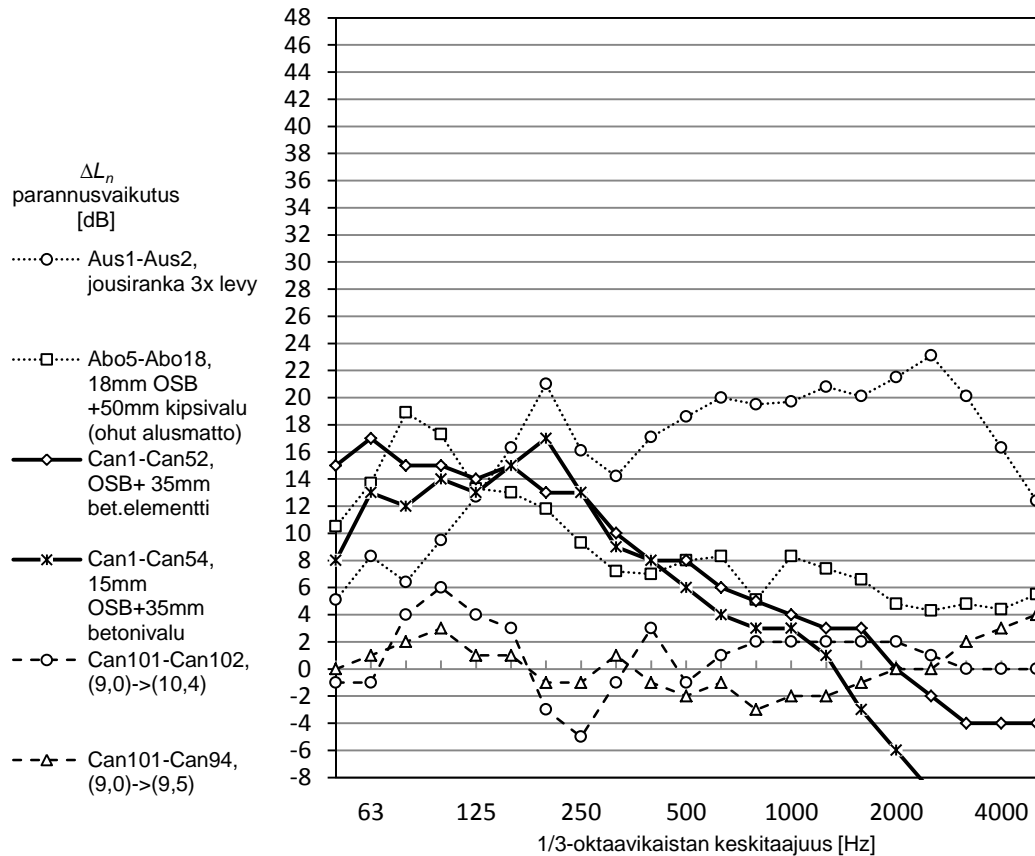
Kuten tuloksista voidaan nähdä alakatto parantaa massiivipuuvälipohjan askelääneneristävyyttä merkittävästi. Kun mittauksissa käytettiin alakatossa kahta 13 mm kipsilevyä (Abo23), alakatto paransi askelääneneristävyyttä yli 125 Hz taajuuksilla vähintään 10 dB. Parhaimmillaan parannusvaikutus on kuvaajan mukaan 400–2000 Hz taajuuksilla, noin 30 dB.

### 3.6.4 Lattialevyt ja raskaat pintalaatat

Välipohjapalkkien yläpuolisen rakenteen massa vaikuttaa merkittävästi välipohjan askelääneneristävyyteen. Tyypillisesti palkkien yläpuolelle asennetaan lattialevy tai useampia levyjä. Levykerroksen päälle voidaan valaa tasoite- tai betonilaatta. Myös massiivipuulevyjen päällä voidaan käyttää erillistä lattialevyä [1, 15, 56, 122, 129, 130].

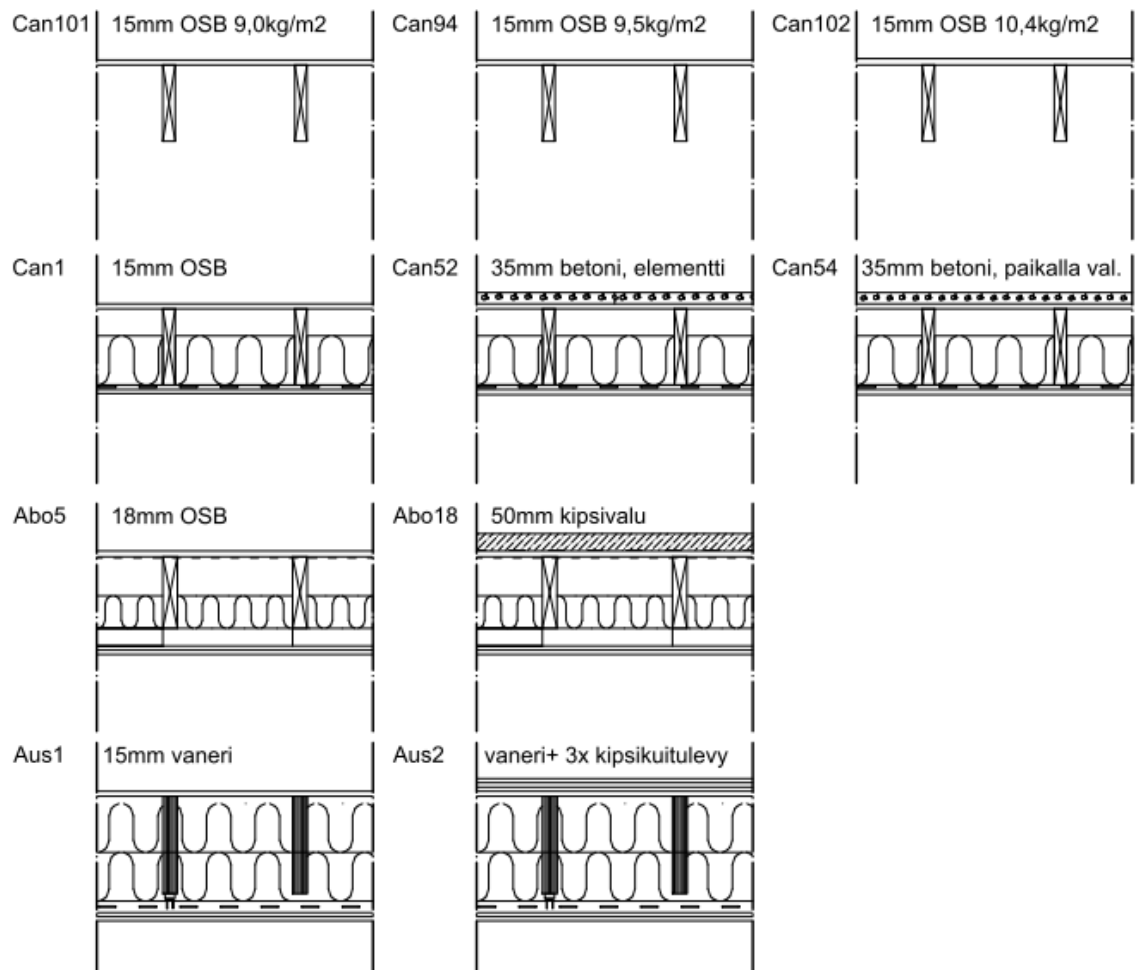
Kuvan 42 kuvaajassa on esitetty pintalattian massan kasvattamisen vaikutus askelääneneristävyyteen. Mittaustulokset on saatu Warnock et al. ja Balanant et al. tutkimuksista [1, 122]. Välipohjien leikkauskuvat on esitetty kuvassa 43. Tarkasteltaessa Can1-Can52 ja Can1-Can54 käyriä voidaan havaita, että lattian massan lisääminen paransi erityisesti pienten taajuuksien askelääneneristävyyttä. Useiden tutkimusten perusteella onkin esitetty, että massan lisääminen lattiarakenteeseen on tehokkain keino parantaa askelääneneristävyyttä alle 100 Hz taajuusalueella [122, 126, 129, 130]. Warnock et al. mukaan välipohjan lattia- ja alakattorakenteen yhteismassan kaksinkertaistaminen parantaa askelääneneristävyyttä 7 dB [122]. Chung et al. ovat puolestaan esittäneet, että massan lisääminen pintalaattaan on kannattavaa aina 100 kg/m<sup>2</sup> pintamassan asti. Tämän jälkeen massan parannusvaikutuksen kasvu hidastuu [15]. Toisaalta tiukat koorealaiset ääneneristysnormit täyttääkseen Zeitler et al. ovat ehdottaneet puuvälipohjan lattialaataksi 100 mm betonilaattaa, jonka pintamassa on noin 170 kg/m<sup>2</sup>[129].

Kuten kuvan 42 kuvaajasta voidaan havaita, yli 1250 Hz taajuuksilla ilman joustavaa aluskerrosta asennetut 35 mm betonilaatat (Can 52 ja 54) tuottivat heikompia askelääneneristävyyden arvoja kuin ilman betonilaattaa toteutettu rakenne. Kelluvia lattiarakenteita käsitellään tarkemmin kappaleessa 3.6.5, mutta tässä yhteydessä voidaan todeta, että kelluttava kerros betonilaatan ja raakavälipohjan välissä parantaa tämän tyyppisen välipohjarakenteen askelääneneristävyyttä merkittävästi [122].



**Kuva 42: Välipohjapalkkien yläpuolisen rakenteen massan kasvattamisen vaikutus askeläänitasoihin. 35 mm betonilaatan tuottama parannus on esitetty ehjällä ja OSB-levyn massan vaikutus katkoviivalla. Betonilaatat asennettiin ilman joustavaa/kelluttavaa kerrosta 15 mm OSB-levyn päälle [122].**

Kuvan 42 kuvaajassa on esitetty myös OSB-levyn pintamassan vaikutus askelääneneristävyyteen. OSB-levyjen tulokset on esitetty katkoviivalla. Kuvaajan tulosten mukaan pienellä OSB-levyn massamuutoksella ei ole merkittävää vaikutusta askelääneneristävyyteen. OSB-levyjä tutkittaessa pintamassa muutokset olivat  $0,5 \text{ kg/m}^2$  ja  $1,4 \text{ kg/m}^2$ . [122]



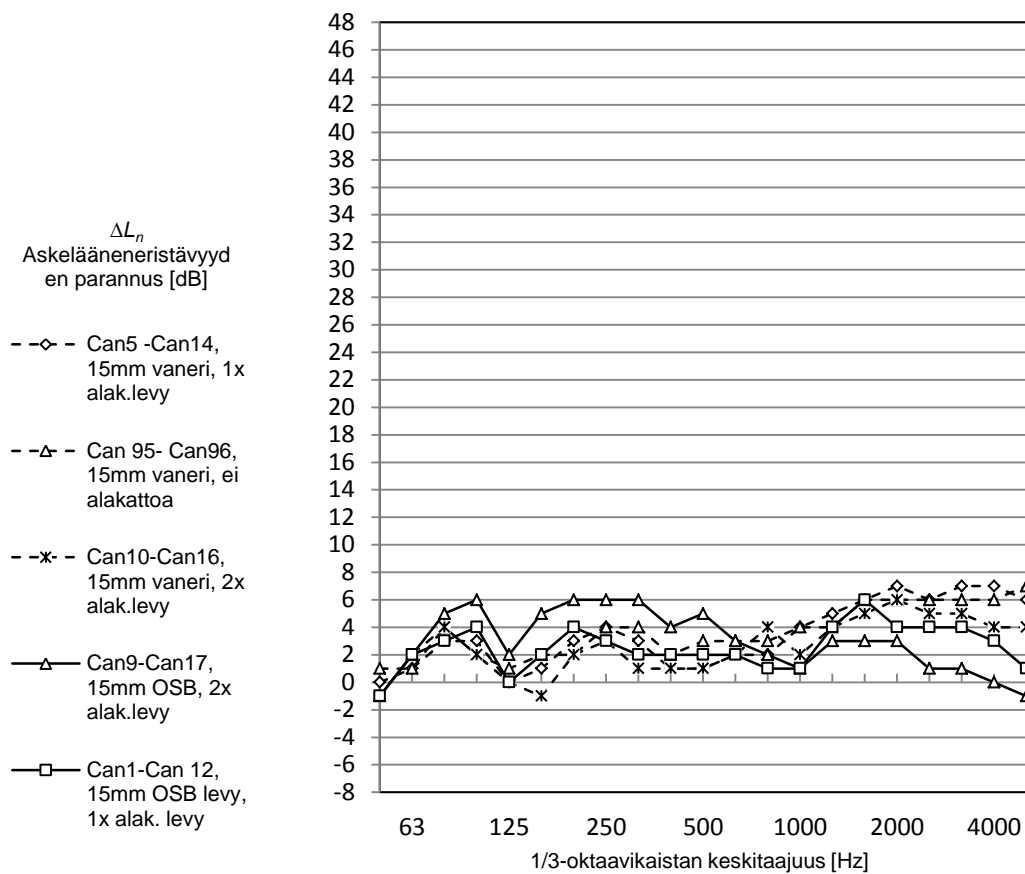
**Kuva 43: Välipohjapalkkien yläpuolisen rakenteen massan vaikutuksen vertailussa käytettyjen välipohjien leikkauskuvat, mittakaava 1:20.**

Yksittäisen levyn massan kasvattamisen sijaan voidaan myös lisätä lattiaan useita levykerroksia. Kuten Craik on todennut, liitoksissa tapahtuvat häviöt ovat puurakenteiden askelääneneristävyyden kannalta merkittäviä [17]. Monikerroksisen levyrakenteen tehokkuus on nähtävissä kuvan 42 kuvaajasta: kolmen 13 mm kipsikuitulevyn lisääminen (Aus1-Aus2) paransi askelääneneristävyyttä koko taajuusalueella. Mittaustulosten mukaan erityisesti suurilla taajuuksilla useasta ohuesta levykerroksesta koostuva rakenne eristää askelääntä paremmin kuin yhtenäinen kova betonilaatta. Betonilaatan ja kipsikuitulevyn värähtelykäyttäytymisessä on huomattavia eroja, joita käsitellään tarkemmin kelluvien lattioiden yhteydessä kappaleessa 3.6.5.

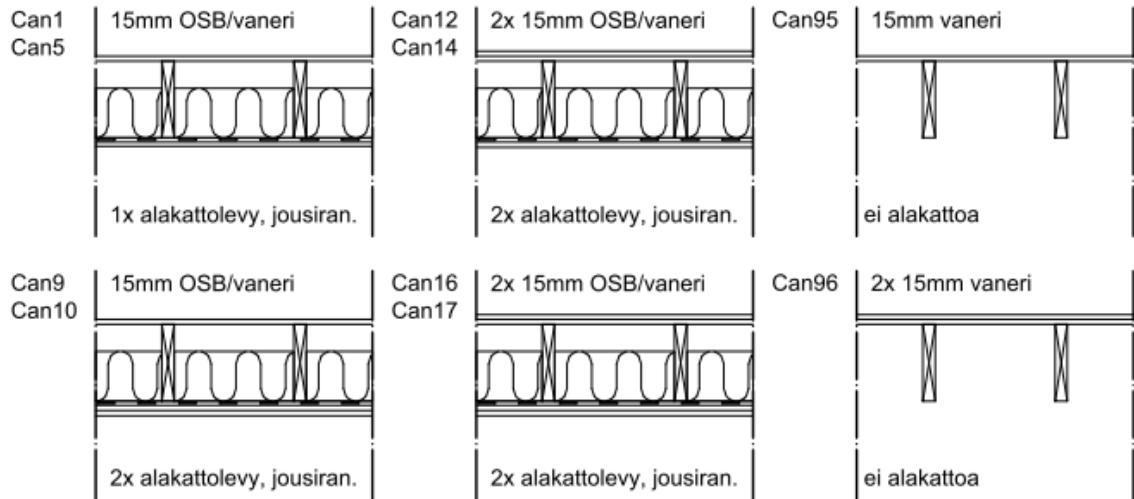
Kipsikuitulevyjen suuri parannusvaikutus on ymmärrettävissä myös kappaleessa 3.2.2 esitetyn levyn värähtelyteorian perusteella. Kuten kyseisen kappaleen kaavassa 23 osoitetaan, levyn akustinen teho koinsidenssitaajuuden alapuolella on riippuvainen levyn massasta ja koinsidenssitaajuuden yläpuolella erityisesti levyn häviökertoimesta. Chung et al. tutkimuksessa kipsikuitulevyjen sisäinen häviökerroin oli 0,015 [16]. Esimerkiksi lattiavanerien häviökertoimena voidaan käyttää huomattavasti pienempää kerrointa: 0,003 [69]. Kipsikuitulevyjen pintamassa ja häviökerroin on suurempi kuin perinteisillä

puupohjaisilla lattialevyillä, minkä vuoksi ne parantavat välipohjan askelääneneristävyyttä merkittävästi.

Kuvan 44 kuvaajassa on esitetty lattialevyjen kaksinkertaistamisen vaikutus askelääneneristävyyteen. Warnock et al. tutkimuksissa haluttiin selvittää erityisesti ortotrooppisten lattialevyjen vaikutusta askelääneneristävyyteen. Siksi kuvan 44 kuvaajassa on mukana useita vanerilattialevyillä toteutettuja välipohjia. Lattialevyjen kaksinkertaistamisen yhteydessä tutkittiin myös alakaton vaikutusta lattian tuomaan parannukseen [122].



**Kuva 44: Lattialevyn kaksinkertaistamisen vaikutus eri lattialevytyypeillä (OSB ja vaneri) sekä erilaisilla alakattoratkaisuilla [122].**



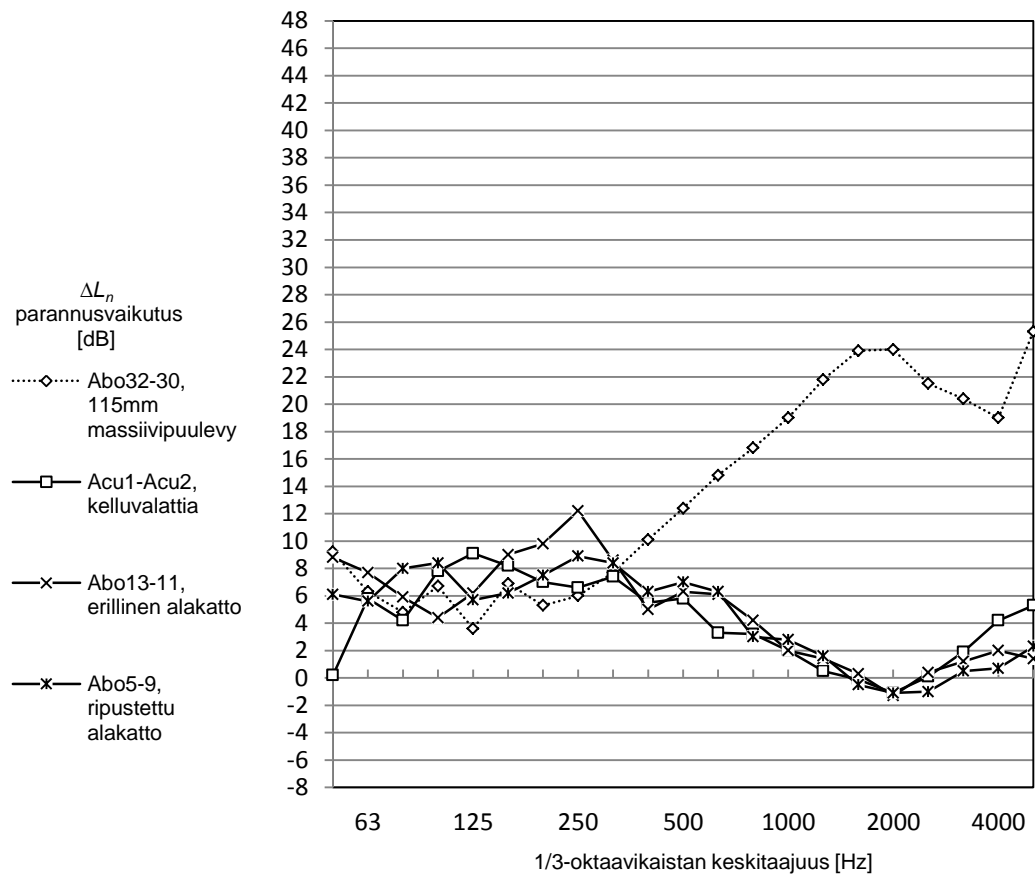
**Kuva 45: Lattialevyjen kaksinkertaistamisen vaikutusten vertailussa käytettyjen välipohjien leikkauskuva, mittakaava 1:20.**

Kuvassa 44 esitetyistä tuloksista voidaan havaita, että lattialevytyypin vaikutus askelääneneristävyyteen oli pieni, näissä mitatuissa tapauksissa 2-4 dB. Toisen lattialevyn lisääminen parantaa askelääneneristävyyttä, sillä se parantaa lattian jäykkyyttä ja lisää välipohjarakenteen kokonaismassaa [15, 122]. Kuten vertaamalla kuvan 42 ja 44 tuloksia voidaan havaita, kipsikuitulevyjen kolminkertaistaminen parantaa askelääneneristävyyttä huomattavasti enemmän kuin OSB-levyjen kaksinkertaistaminen. Toisaalta Sjöströmm on esittänyt tutkimustensa perusteella, että lattialastulevyjen kaksinkertaistaminen heikentää värähtelyn etenemistä lattiarakenteessa erityisesti alle 50Hz taajuusalueella. Värähtelyn eteneminen välipohjarakenteissa vaikuttaa erityisesti sivutiesiirtymien voimakkuuteen [107].

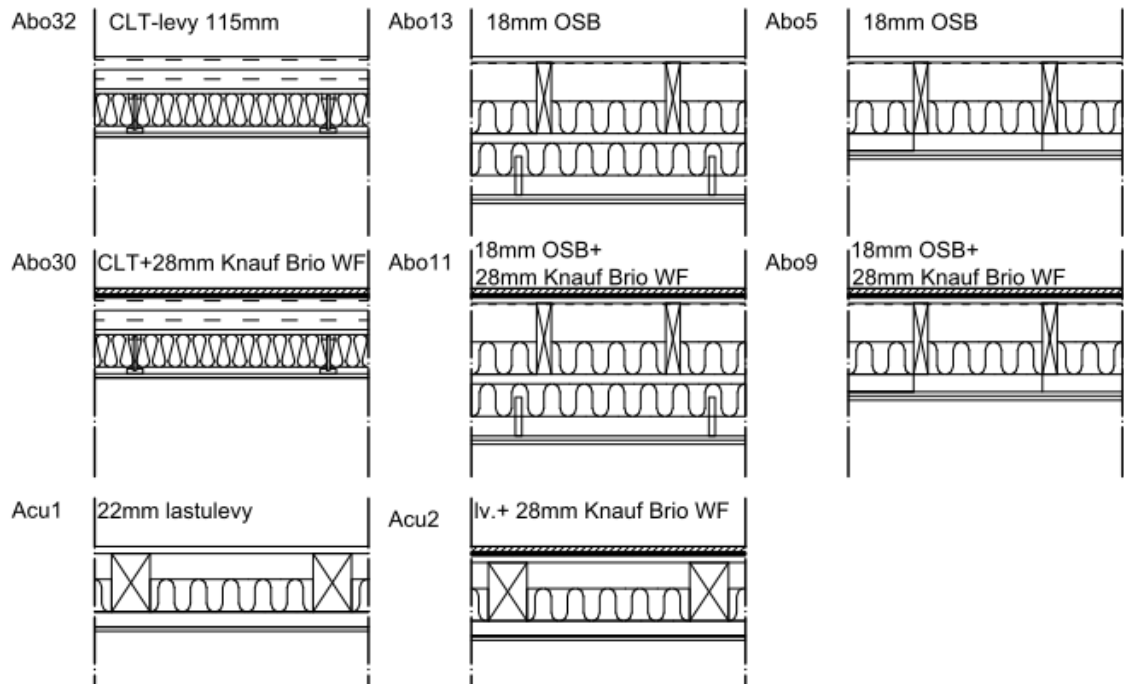
Warnockin mukaan ortotrooppisilla levyillä koinsidenssi-ilmiön aiheuttama askelääneneristävyyden heikentyminen havaitaan laajemmalla alueella koinsidenssitaaajuuden ympäristössä kuin isotrooppisilla levyillä. Tämä johtuu suuntariippuvaisista jäykkyysominaisuuksista. Lattialevyjen akustisen toiminnan ennustaminen on muutenkin haastavaa, sillä niiden akustiseen toimintaan saattaa vaikuttaa myös palkkien jako, korkeus ja levyn kiinnitys palkkeihin [122]. Kuten kappaleessa 3.3 tuotiin esiin, lattialevyjen värähtelykäyttäytyminen on voimakkaasti riippuvainen palkkikytkennästä.

Kuvan 46 kuvaajassa on esitetty Knauf Brio 18 WF kipsikuitulevyn tuottama parannus eri välipohjatyypeillä. Tuloksista voidaan havaita, että sama levy tuotti erilaisia parannustuloksia riippuen raakavälipohjan ominaisuuksista. Tulosten perusteella alakattoratkaisulla ei ole merkittävää vaikutusta lattialevyn tuottamaan parannukseen, sillä ripustetulla (Abo5-9) ja erillisellä (Abo13-11) alakatolla kipsikuitulevyn parannustulos oli lähes sama. Liitteessä 3 esitetyistä askeläänitasojen mittaustuloksista voidaan havaita, että massiivipuulevyrakenteiden ongelma on erityisesti suurten taajuuksien heikko askelääneneristävyys. Massiivipuulevyn päälle asennettava kipsikuitulevy paransi erityisesti yli 500 Hz taajuuksien eristävyyttä, kuten kuvan 46 kuvaajasta voidaan havaita. Kappalees-

sa 3.6.6. käsitellään laajemmin raakavälipohjan ominaisuuksien vaikutusta pintalattian parannusvaikutukseen.



**Kuva 46: Lattialelyn (Knauf Brio 18 WF) vaikutus askelääneneristävyyteen eri välipohjatyypeillä [1].**



**Kuva 47: Knauf Brio 18WF levyn parannusvaikutuksen määrittämiseksi käytettyjen välipohjien leikkauskuvat, mittakaava 1:20. Kipsikuitulevyn paksuus on 18 mm ja puukuitulevyn 10 mm.**

Levytyyppien ohella on tutkittu myös levyn kiinnitystavan vaikutusta välipohjan askelääneneristävyyteen [122, 130]. Tutkimuksissa on vertailtu ruuvien kiinnitystiheyden ja eri kiinnitystapojen, kuten naulaus ja liimaus, vaikutusta askelääneneristävyyteen. Warnock et al. mukaan kiinnitystavalla tai ruuvien kireydellä ei ole merkitystä askelääneneristävyyteen. Zeitlerin tutkimuksissa havaittiin, että, jos lattialevyt ovat irtonaisia, voimakas askelheräte saa levyt irtoamaan lattian pinnasta ja askelääneneristävyys heikkenee. Tutkimuksessa voimakkaana askelherätteenä käytettiin rengaskonetta (*engl. tire machine*). Kevyellä askelherätteellä tehdyissä kokeissa irtonaisten levyjen ei havaittu irtoavan lattiapinnasta [130].

### 3.6.5 Kelluvat lattiat

Kuten kappaleessa 3.6.3 todettiin, välipohjarakenteen massan kasvattaminen on tehokas tapa parantaa askelääneneristävyyttä mutta tietyissä olosuhteissa, erityisesti suurilla taajuuksilla, massan lisäämisellä voi olla myös negatiivinen vaikutus askelääneneristävyyteen. Näitä ongelmia voidaan ehkäistä käyttämällä kelluvaa lattiarakennetta [56, 119, 129]. Kun lattia toteutetaan kelluvana rakenteena, pintalattian ja raakavälipohjan väliin asennetaan joustava kerros, esimerkiksi mineraalivillaa tai elastisoitua polystyreenia, joka vaimentaa askelherätteestä syntyvää värähtelyn siirtymistä pintalaatasta muuhun välipohjarakenteeseen. Kelluvalla rakenteella voidaan näin vaikuttaa myös sivutiesiirtymien voimakkuuteen [71]. Joustava kerros voidaan toteuttaa joko kantavana tai ei-kantavana. Jos joustava kerros ei ole kantava, pintalaattaa kannatetaan esimerkiksi

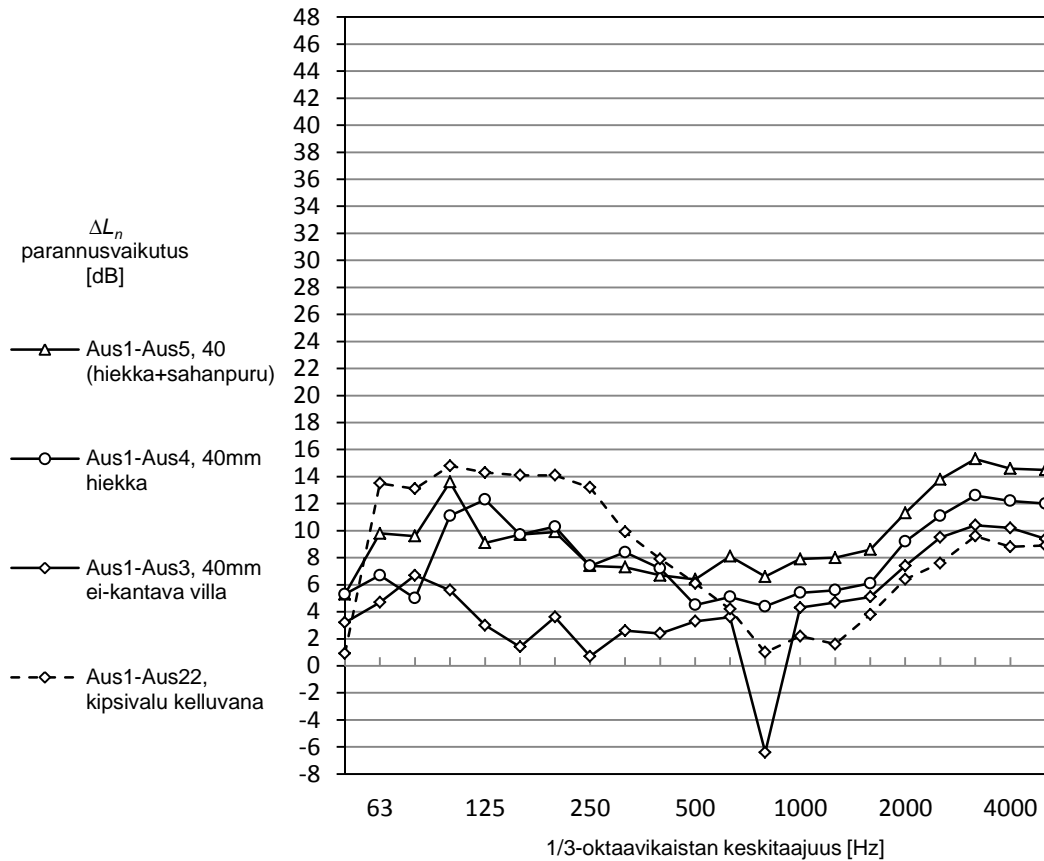


puukoolauksella eikä pintalaatan ja raakavälipohjan välissä olevaan eristeeseen kohdistu kuormitusta [16, 115].

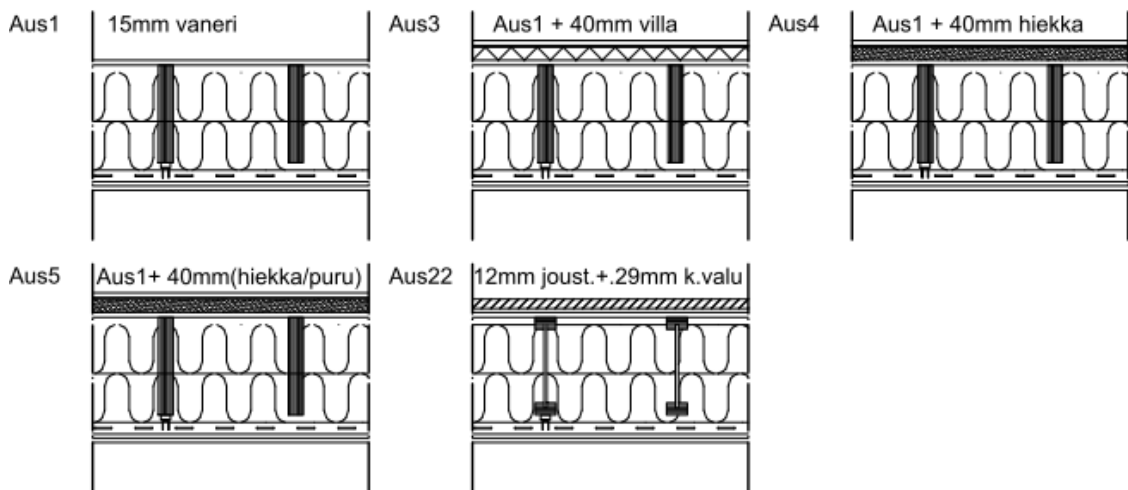
Kantavan elastisen kerroksen asentaminen pintalaatan ja raakavälipohjan väliin parantaa välipohjan askelääneneristävyyttä merkittävästi. Parametrisissa tutkimuksissa on kuitenkin havaittu, ettei joustavan kerroksen paksuus ole merkittävä tekijä, kun raakavälipohja on puurakenteinen. Raskailla rakenteilla elastisen kerroksen paksuus vaikuttaa esimerkiksi kelluvan lattian ominaistajuuteen. Puurakenteilla tätä ilmiötä ei ole havaittu. Zeitlerin mukaan joustavan kerroksen paksuus ei vaikuta askelääneneristävyyteen, koska puurakenteinen raakavälipohja on itsessään niin joustava, ettei elastinen materiaalikerros kelluvassa lattiarakenteessa merkittävästi puristu lattiaa kuormitettaessa. Ilman kokoonpuristumaa elastisen materiaalin jousivaikutus ei aktivoidu. [129]

Jos kelluvan lattian joustava kerros ei ole kantava, välitilassa voidaan käyttää voimakkaasti kokoonpuristuvia eristemateriaaleja ja esimerkiksi hiekkaa, jolla on sisäisestä kitkasta ja massasta johtuen hyvä äänenvaimennuskyky. Tutkimuksen mukaan hiekkakerroksen omasta painosta johtuva kokoonpuristuma heikentää sen askelääneneristävyyttä. Chung et al. tutkimuksessa hiekan sekaan lisättiin sahanpurua, mikä paransi kerroksen askelääneneristävyyttä. Hiekka-puru seoksen impedanssi on lähellä puun impedanssia. Kun eri materiaalien impedanssit ovat lähes samat, värähtely siirtyy niiden välillä tehokkaasti. Koska puru-hiekka seoksen sisäinen häviökerroin on suuri, rakenteessa etenevä värähtely vaimenee tehokkaasti edetessään hiekka kerroksen läpi, mikä parantaa välipohjan askelääneneristävyyttä [15]. Hiekkatäytteisiä välipohjia on esitetty kuvassa 49.

Kuvan 48 kuvaajassa on esitetty erilaisten kelluvien lattioiden parannusvaikutus puurunkoisen välipohjan päällä [16]. Kuten tuloksista voidaan nähdä, kaikki tutkimuksissa mukana olleet kelluvat lattiat paransivat välipohjan askelääneneristävyyttä jo 50Hz taajuudelta alkaen. Kuvassa 49 on esitetty leikkauskuvat vertailussa käytetyistä välipohjista. Lukuun ottamatta Aus22 rakennetta, kaikissa muissa välipohjissa kelluva rakenne oli toteutettu ei-kantavana. Pintalattian levyä kannattelivat koolausrimat. Pintalevyn ja raakavälipohjan väliin jäänyt ilmatila täytettiin eri materiaaleilla. Kuten tuloksista voidaan havaita, kelluttavan lattian kokonaismassa vaikuttaa askelääneneristävyyteen erityisesti alle 500 Hz taajuusalueella. Aus 3 rakenne, jossa joustava kerros (ei-kantava) oli kevyttä villaa, tuotti heikoimman askelääneneristävyyssparannuksen 500 Hz taajuuksilla. Toisaalta yli 1000 Hz taajuuksilla raskas ja resonoivasti värähtelevä kipsivalulaatta (Aus22) tuottaa vertailun pienimmän parannuksen. [16]



**Kuva 48: Kelluvan lattian parannusvaikutus [16].**



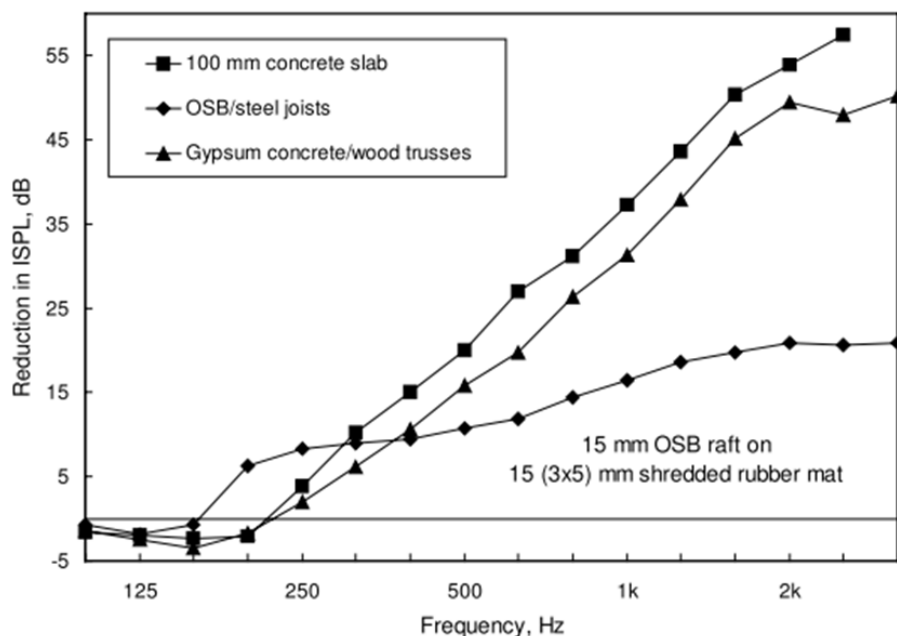
**Kuva 49: Kelluvan lattian parannusvaikutuksen tutkimuksessa käytettyjen välipohjen leikkauskuva, mittakaava 1:20. Rakenteissa Aus3-4 pintalevy oli 15 mm vaneri ja levy oli kiinnitetty raakavälipohjaan 45 mm korkeilla puurimoilla (k450) [16].**

Kelluvan lattian pintalaatan toiminta voidaan luokitella joko resonoivaksi tai paikalliseksi. Materiaalit, jotka ovat jäykkiä ja joiden sisäinen vaimennuskerroin on pieni, muodostavat resonoivan pintalaatan, kuten myöhemmin kappaleessa 4.5.2 esitetään. Askelherätteestä syntyvä taivutusaalto ei merkittävästi vaimene edetessään lattiamateri-

aalissa ja heijastuu takaisin tulosuuntaan levyn reunoista. Tällöin koko levy värähtelee tehokkaasti. Betonia voidaan pitää jäykkänä ja resonoivana lattiamateriaalia, ja siksi betonilaatta aiheuttaa ääneneristysongelmia asennettaessa suoraan raakavälipohjan päälle [115, 121].

Vaikka lattiarakenteen massan kasvatus kelluvalla rakenteella vaikuttaa parantavasti askelääneneristävyyteen, kelluvan materiaalikerroksen kovuus heikentää massan parannusvaikutusta [56, 115]. Hu et al. tutkimuksissa vertailtiin eri pintalaattojen vaikutusta puurakenteisen välipohjan askelääneneristävyyteen. Mittaustulosten perusteella paikallavalettu 38 mm kevytbetonilaatta ( $m^3=70 \text{ kg/m}^3$ ) tuotti noin 5 dB heikommän askeläänitasoluvun kuin 38 mm sementti-kuitu-levy ( $m^3=45 \text{ kg/m}^3$ ). Mittauksissa molemmat laatat oli päällystetty laminaatilla ja 3 mm kumimatolla. Laattojen alle oli myös asennettu 10 mm kumimatto ennen raakavälipohjaa [56].

Kelluvan lattian parannusvaikutus askelääneneristävyyteen riippuu myös kantavan välipohjan rakenteesta. Samanlaiset kelluvat rakenteet tuottavat hyvin erilaisia askelääneneristävyyden tuloksia riippuen kantavan välipohjan tyypistä [119]. Kuvan 50 kuvajassa on esitetty kelluvan rakenteen parannusvaikutus erilaisten raakavälipohjien päällä. Kyseisessä mittauksessa kelluva rakenne oli kumimattosuikaleiden päälle asetettu 15 mm OSB-levy ja raakavälipohjia oli kolme erilaista: 100 mm betonilaatta, teräspalkit ja OSB-levy sekä puu-ristikkopalkit ja kipsi-betonilevy.



**Kuva 50: Kelluvan lattian askelääneneristävyyden parannusvaikutus eri taajuuksilla. Kuva on Warnock et al. tutkimuksesta [119].**

Kuten kuvan 50 tuloksista voidaan havaita, kun raakavälipohjan lattialaatta oli raskasrakenteinen ja jäykkä (betoni tai kipsi-betoni), kelluva lattia paransi askelääneneristävyyttä nousujohteisesti yli 250 Hz taajuuksilla. Kun raakavälipohjan lattialaatta oli kevytra-

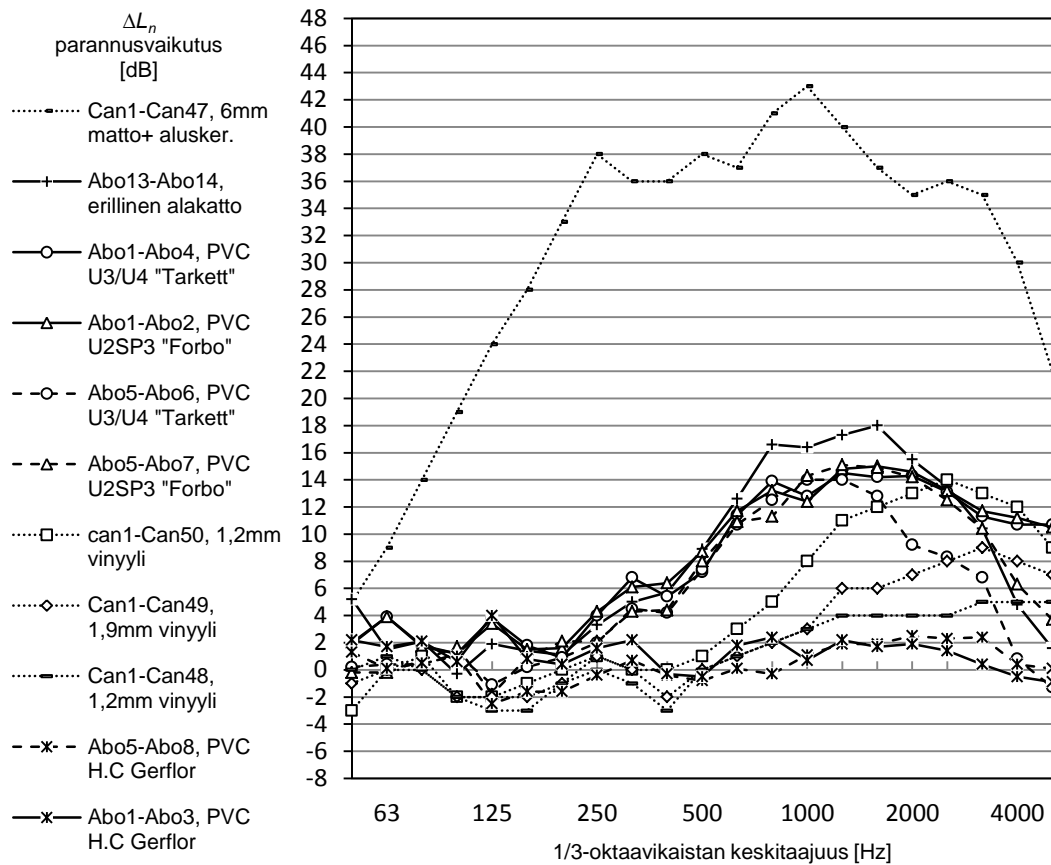
kenteinen OSB-levy, kelluvan lattian parannusvaikutus alkoi jo 180 Hz taajuudelta mutta parannusvaikutuksen ei havaittu suurenevan taajuuden kasvaessa yhtä voimakkaasti kuin raskailta laatoilla. On myös huomionarvoista, että kelluvan lattian parannusvaikutus ei näyttäisi riippuvan välipohjan palkkirakenteesta vaan ainoastaan lattialevytyypistä. Warnockin mukaan erilaiset parannusvaikutukset johtuvat siitä, että OSB-levy on joustavampi kuin betonilaatta. Tämä johtaa siihen, että OSB-levyssä askeläänikoneen vasaran tuottama impulssi kestää pidempään, sillä on pienempi amplitudi ja se tuottaa vähemmän suurten taajuuksien värähtelyä kuin betonilaatassa. Siksi askelääneneristävyyden parantuminen on suurilla taajuuksilla jää pienemmäksi kuin kovilla pintalaatoilla. [119]

Betonilaatan ja puulevyn värähtelyn ero on nähtävissä myös kappaleen 3.6.4. kuvassa 42, kun suurilla taajuuksilla betonilaatan lisääminen heikentää askelääneneristävyyttä. Liittessä 1 esitettyjen askeläänepainetasokuvaajien perusteella myös massiivipuulautoilla suuritaajuinen värähtely herää merkittävämmiin kuin palkkilatioilla. Tämä osaltaan selittää sen, miksi kappaleessa kuvan 3.6.4 kuvaajassa kipsikuitulevy parantaa massiivipuurakenteen askelääneneristävyyttä erityisesti suurilla taajuuksilla [1].

### 3.6.6 Lattiapäällysteet

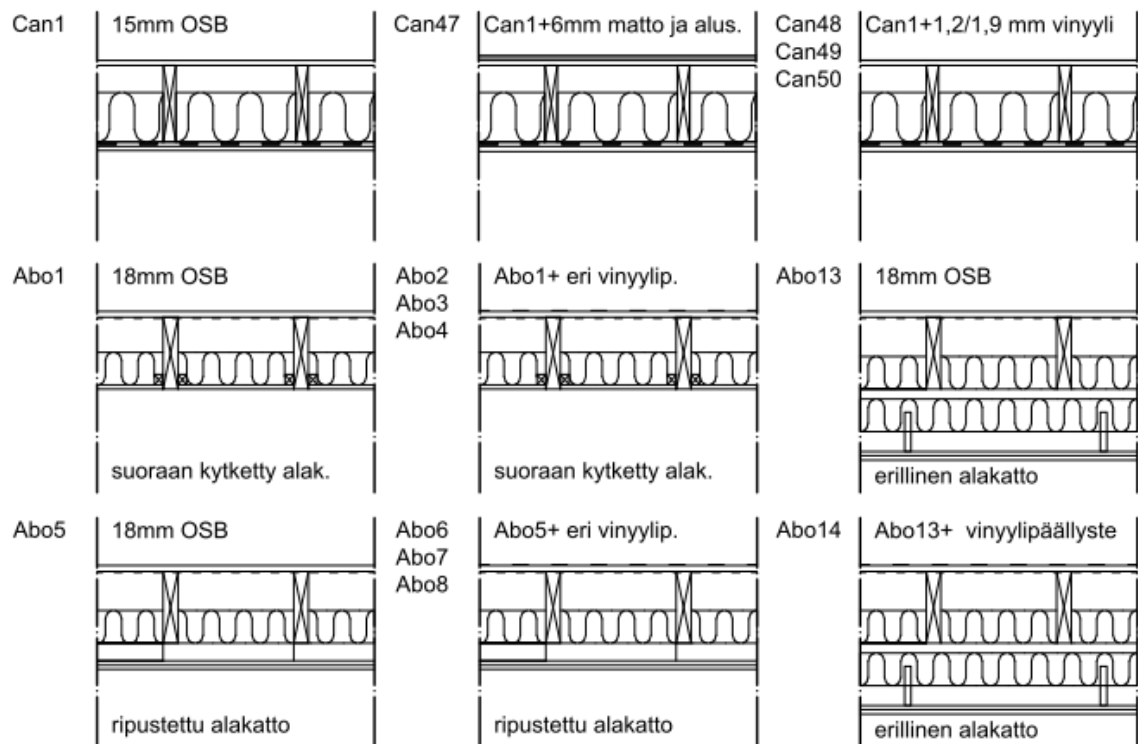
Lattiapäällyste valitaan usein esteettisin perustein mutta sen avulla voidaan vaikuttaa myös välipohjan askelääneneristävyyteen. Lattiapäällysteen askelääneneristystä parantava vaikutus perustuu siihen, että se vaimentaa välipohjaan kohdistuvaa askelherätettä. Näin ollen vaimennusvaikutus ei kohdistu vain yhteen vaan kaikkiin välipohjan äänenkulkureitteihin [55]. Lattiapäällysteen parannusvaikutuksen arvioimista vaikeuttaa se, että sama lattiapäällyste tuottaa erilaisen parannusvaikutuksen riippuen välipohjarakenteesta [119, 122, 128]. Lattiapäällysteen askelääneneristysvaikutuksia tutkittaessa on havaittu, että myös askelheräte vaikuttaa lattiapäällysteen parannusvaikutukseen. Herätteen ollessa askeläänikone, lattiapäällysteen parannusvaikutus on huomattavasti suurempi kuin rengaskone (*engl. Bang machine*) tai kumipallo herätteellä mitatut parannusvaikutukset [55]. Rengaskone ja kumipallo tuottavat korkeampia askeläänitasoja pienillä taajuuksilla kuin ISO 10140-5-standardin mukainen askeläänikone [108, 130].

Lattiapäällyste muuttaa askelherätteestä välipohjaan kohdistuvan voiman spektriä, käytännössä vaimentaa lattiaan kohdistuvaa iskua. Toisin sanoen lattiapäällysteen lisääminen muuttaa välipohjan mekaanista impedanssia. Askeläänilähteen ja lattian impedanssien yhteensopivuus vaikuttaa siihen, kuinka tehokkaasti askeläänilähteen tuottama heräte siirtyy välipohjaan [128]. Yleisessä käytössä olevien lattiapäällysteiden parannusvaikutus puuvälipohjilla alkaa noin 250 Hz taajuudelta [39, 108, 122], mikä on havaittavissa myös kuvien 51 ja 53 kuvaajista. Kuten kappaleessa 3.6.4 todettiin, pienten taajuuksien askelääneneristävyys on riippuvainen pääasiassa välipohjan alakaton ja pintalattian yhteismassasta.



**Kuva 51: Lattiapäällysteen parannusvaikutus Warnock et al. ja Acoubois tutkimuksissa [1, 122].**

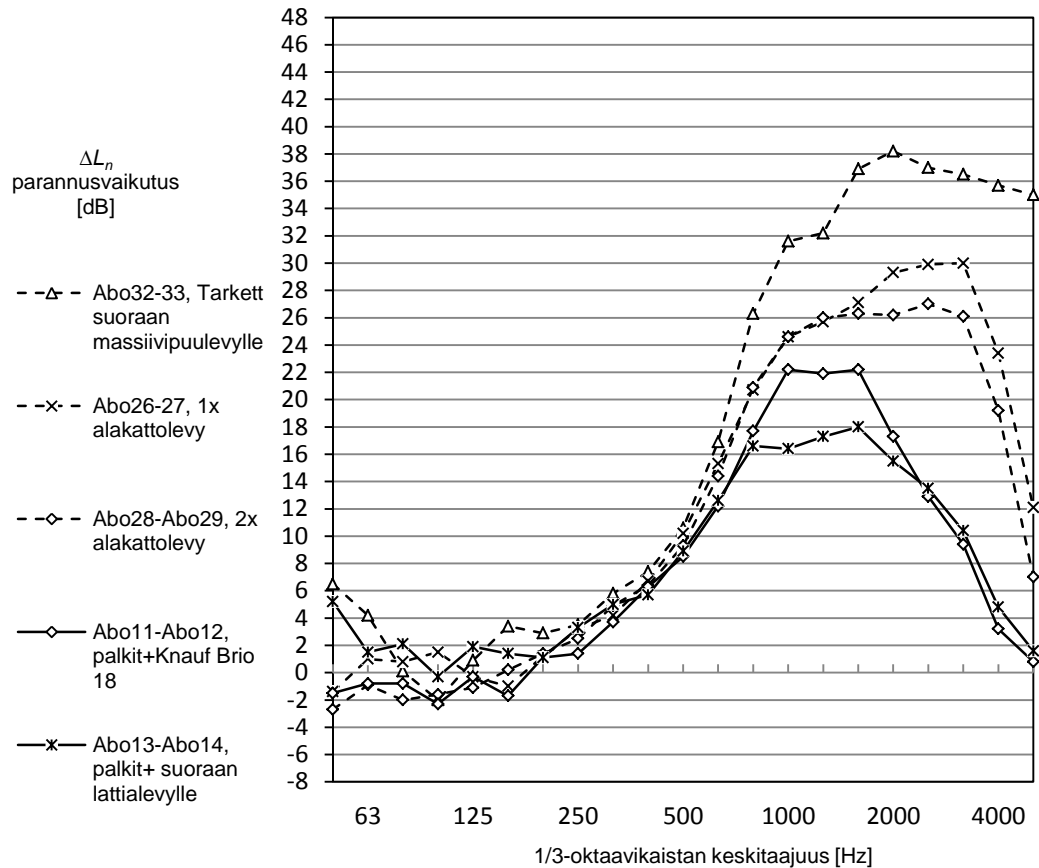
Kuvan 51 kuvaajassa on esitetty Acoubois-hankkeesta ja Warnock et al. tutkimuksesta saatujen mittaustulosten perusteella lattiapäällysteen tuottama askelääneneristävyyden parannusvaikutus [1, 122]. Kuvassa 42 on esitetty kyseisessä vertailussa käytettyjen välipohjien leikkauskuvat. Can48-50 välipohjissa ei käytetty joustavaa kerrosta vinyylipäällysteen alla. Kuvan 51 vertailussa paras askelääneneristävyyden parannusvaikutus syntyy, kun lattialevyn päälle lisätään joustava aluskerros ja matto, Can1-Can47. Tämä päällystys parantaa askelääneneristävyyttä heti 63 Hz taajuudelta alkaen, toisin kuin muut, tässä tapauksessa vinyylipäällysteet. Acoubois-hankkeesta saatujen tulosten perusteella alakattorakenne ei vaikuta lattiapäällysteen parannusvaikutukseen.



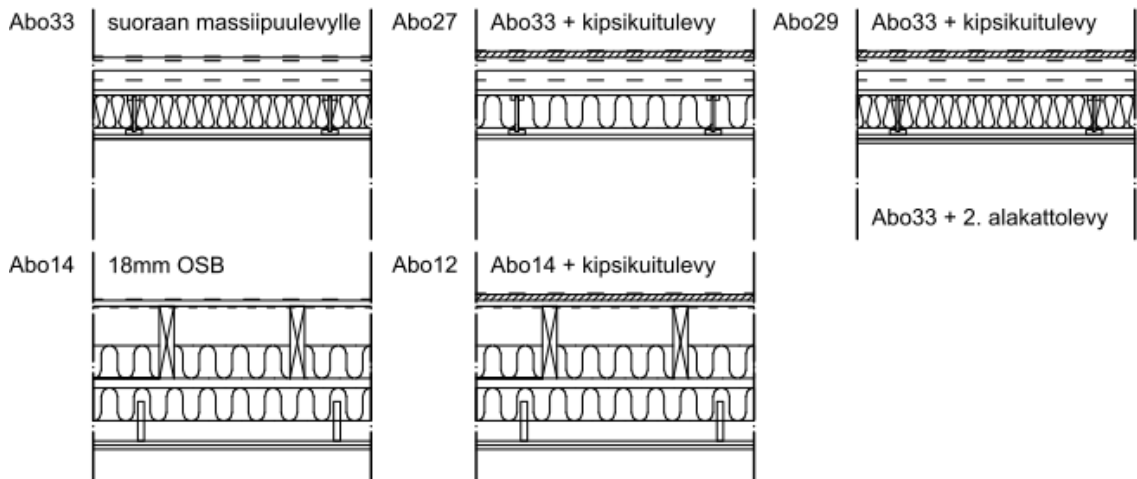
**Kuva 52: Lattiapäällysteen parannusvaikutusten selvittämiseen käytettyjen välipohjien leikkauskuvat, mittakaava 1:20.**

Tutkimuksissa on havaittu, että lattiapäällysteen vaimennuskyky riippuu myös raakavälipohjan akustisista ominaisuuksista. Tämän takia raskaalla betonilaatalla mitattua lattiapäällysteen parannusarvoa ei voida käyttää arvioitaessa kevyen puuvälipohjan askelääneneristävyyttä [119]. Myös puurakenteisissa välipohjissa on eroja, jotka vaikuttavat myös lattiapäällysteen tuottamaan parannusvaikutukseen [55, 119]. Standardissa ISO 10140-5 esitetään kaksi vaihtoehtoista referenssipuuvälipohjaa lattiapäällysteen parannusvaikutuksen laskentaan [28]. Standardin ISO 717-2 mukaan lattiapäällysteen parannusluku lasketaan normalisoitujen raakalattian ja päällystetyn lattian askeläänitasolukujen erotuksena [36]. Acuwod Report 1 mittaustulosten perusteella standardin [28] mukaisella betonivälipohjalla kokolattiamatto tuotti 23 dB parannuksen askeläänitasoluun, kun taas standardoidulla puuvälipohjalla parannus oli vain 8 dB [108].

Askeläänitasolukuerolla määritetty parannusvaikutus jää ohuilla ja kovilla lattiapäällysteillä hyvin pieneksi, koska askeläänitasoluku määräytyy vertailukäyrämenettelyllä. Betonirakenteisiin nähden kevyillä puuvälipohjilla vertailukäyrän asema määräytyy pienten taajuuksien askeläänitasojen perusteella, kuten liitteessä 3 esitetyistä askeläänitasokuvaajista on havaittavissa. Tällöin suurilla taajuuksilla tapahtuva askelääneneristävyyden parantuminen ei vaikuta kokonaiseristävyyteen.



**Kuva 53: Vinyylipäällyste "Tarkett" vaikutus askeläänitasoihin eri välipohjarakenteiden pinnassa [1].**



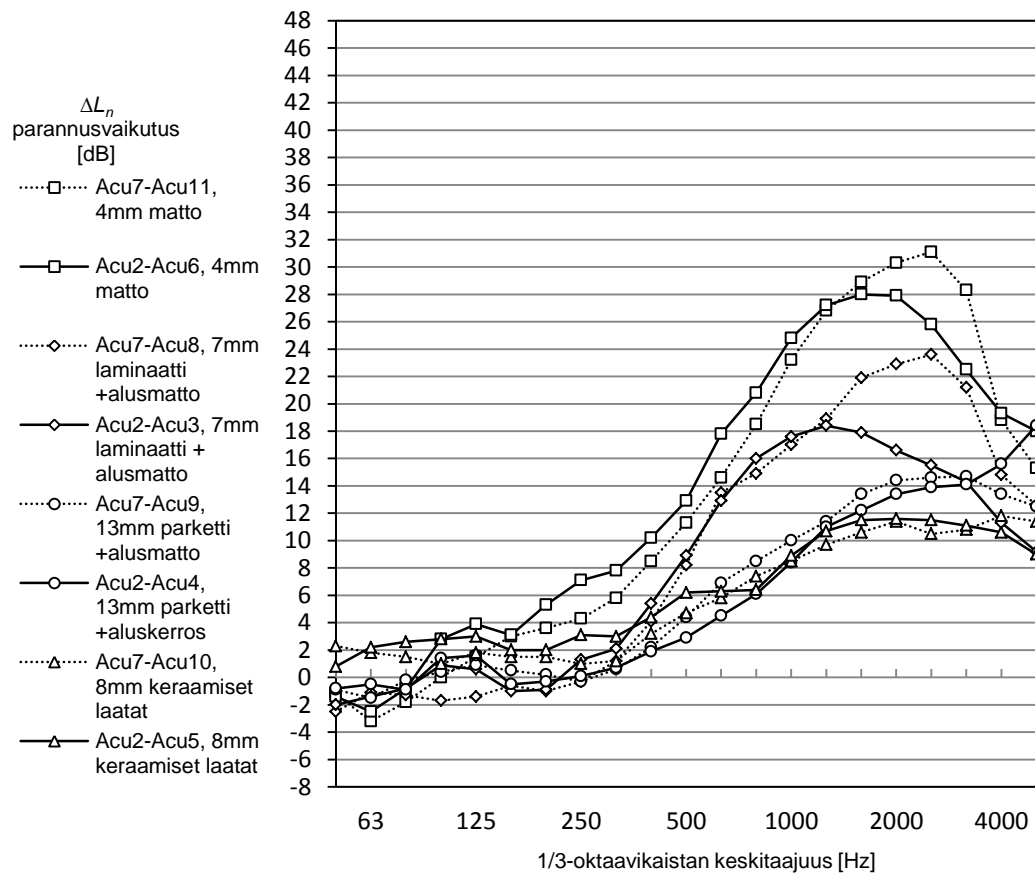
**Kuva 54: "Tarkett" vinyylipäällysteen parannusvaikutuksen tutkimuksessa käytettyjen välipohjien leikkauskuvat, mittakaava 1:20. Tässä tapauksessa on esitetty vain päällystetyt rakenteet. Kuvateksteissä on lisätietoja kyseisistä rakenteista.**

Kuvan 53 kuvaajassa on esitetty Tarkett-vinyylipäällysteen askelääneneristävyyden parannusvaikutus eri välipohjien päällä. Mittaustulokset on saatu ranskalaisesta Acoubois-tutkimushankkeesta [1]. Kuvassa 54 on esitetty kuvaajan vertailussa käytetyt

välipohjarakenteet. Tilansäästösyistä kuvassa 54 on esitetty vertailupareista vain päällystetyt rakenteet. Vinyylipäällystettä lukuun ottamatta kuvan 54 vertailuparien välipohjarakenteet olivat identtiset.

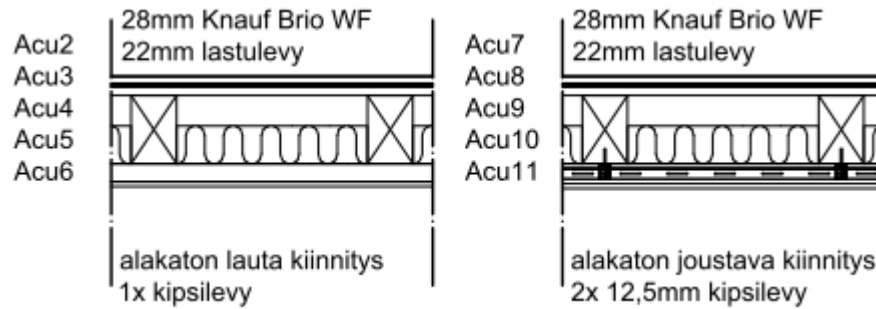
Kuvan 53 kuvaajan tuloksista voidaan havaita, että yli 500 Hz taajuuksilla lattiapäällysteen parannusvaikutus on riippuvainen raakavälipohjarakenteesta. Vinyylilattiapäällyste tuotti pienimmän parannusvaikutuksen, kun se asennettiin suoraan OSB-levyn päälle, kuten kuvan 54 Abo14 rakenteessa. Yli 800 Hz taajuuksilla massiivipuuvälipohjalla lattiapäällyste paransi askelääneneristävyyttä enemmän kuin palkkivälipohjilla, kuten kuvan 53 kuvaajasta voidaan havaita. [1]

Kuvan 55 kuvaajassa on esitetty lattiapäällysteiden askelääneneristävyuden parannusvaikutuksia, jotka on mitattu osana Acuwood-hanketta [108]. Kuvassa 56 on esitetty kyseisessä vertailussa käytettyjen välipohjien leikkauskuvat.



**Kuva 55: Lattiapäällysteen parannusvaikutus Acuwood-hankkeen mittausten perusteella [108].**





**Kuva 56: Raakavälipohjat, joiden päälle lattiapäällysteet kiinnitettiin Acuwood-hankkeessa. Leikkauskuvien mittakaava 1:20.**

Kuvan 55 kuvaajan tulokset osoittavat myös, että alakattorakenne vaikuttaa lattiapäällysteen tuottamaan askelääneneristyksen parannukseen.

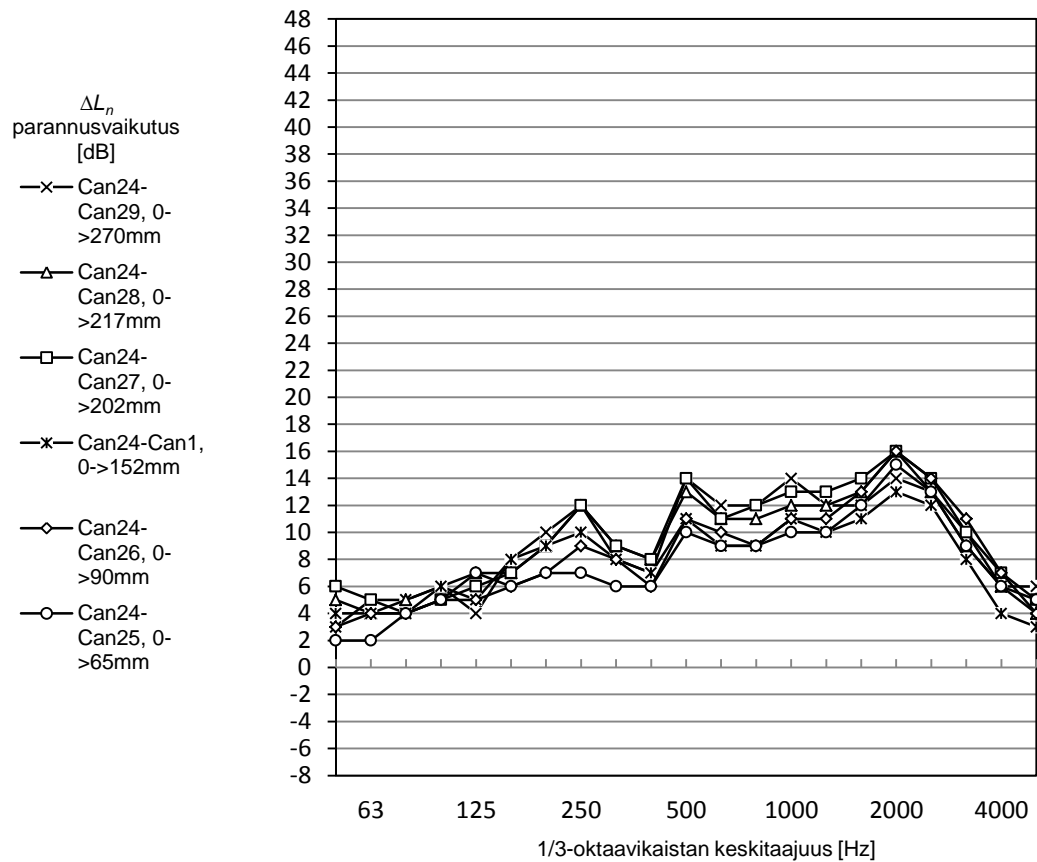
### 3.6.7 Absorptiomateriaali välipohjan sisällä

Puurakenteisen välipohjan sisällä voidaan käyttää huokoista absorptiomateriaalia parantamaan askelääneneristävyyttä. Hongiston mukaan välitilassa olevalla absorptiomateriaalilla on kaksi tarkoitusta: se vaimentaa suoraan etenevää ilmaääntä ja välitilaan syntyviä seisovia aaltoja eli lattialevyn suuntaisesti eteneviä ääniaaltoja [55]. Tutkimuksissa on havaittu, että eristemateriaalin parannusvaikutus riippuu merkittävästi välipohjan muista rakenneratkaisuista, kuten alakattorakenteesta ja sen kiinnityksestä [120, 122].

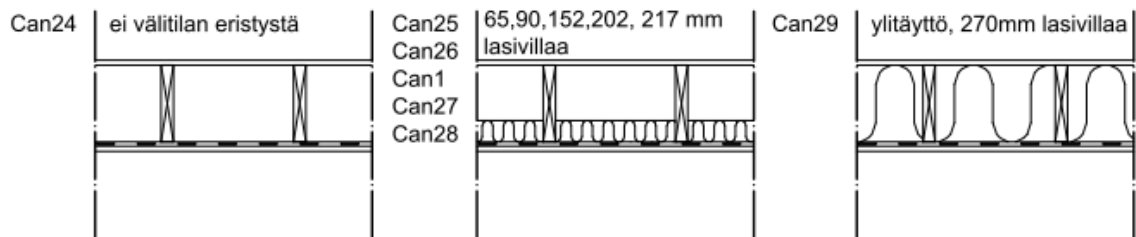
Kuvan 57 kuvaajassa on esitetty välitilassa olevan absorptiomateriaalin paksuuden vaikutus askelääneneristävyyteen. Mittaustulokset on saatu Warnock et al. tutkimuksesta [122]. Kuvassa 58 on esitetty tässä vertailussa käytettyjen välipohjien leikkauskuvat. Kaikissa kuvan 58 välipohjissa alakatto oli kiinnitetty jousirangoilla. Kuten kuvan 57 kuvaajasta voidaan havaita, 65 mm lasivillakerros välipohjan sisällä paransi välipohjan askelääneneristävyyttä vähintään 4 dB yli 125 Hz taajuusalueella. Suurin parannusvaikutus saavutettiin 500–2000 Hz alueella, jolloin 65 mm lasivillakerroksen lisääminen paransi askelääneneristävyyttä keskimäärin 10 dB. Kuvan 57 kuvaajasta voidaan nähdä, että lasivillakerroksen paksuuden kasvattaminen ei juuri parantanut askelääneneristävyyttä. Lasivillakerroksen paksuuden kasvatus 65 mm 270 mm paransi välipohjan askelääneneristävyyttä eniten 125–1250 Hz alueella, jolloin parannus oli keskimäärin 3 dB. Mittaustulosten perusteella voidaan myös todeta, ettei välipohjan ilmatilan ylitäyttö, Can29 tapauksessa, heikennä askelääneneristävyyttä.

Kuvan 57 kuvaajasta on havaittavissa, että kaikilla villapaksuuksilla absorptiomateriaali parantaa välipohjan askelääneneristävyyttä eniten 2000 Hz taajuudella. Vertailun välipohjissa käytetyn alakattolevyn koinsidenssitaajuus on 2070 Hz. Vigran ja Hongisto ovat esittäneet, että välitilassa oleva absorptiomateriaali parantaa eristävyyttä erityisesti alakattolevyn koinsidenssitaajuuden läheisyydessä, koska kappaleessa 3.2.1 esitetyn määritelmän mukaisesti koinsidenssitaajuudella levyyn tulevan ääniaallon ja levyn väli-

nen kulma on 90°. Näin ollen koinsidenssitaajuudella ääniaalto kulkee lähes levypinnan suuntaisesti ja kulkee näin ollen pitkän matkan absorptiomateriaalin sisällä. [52, 115]



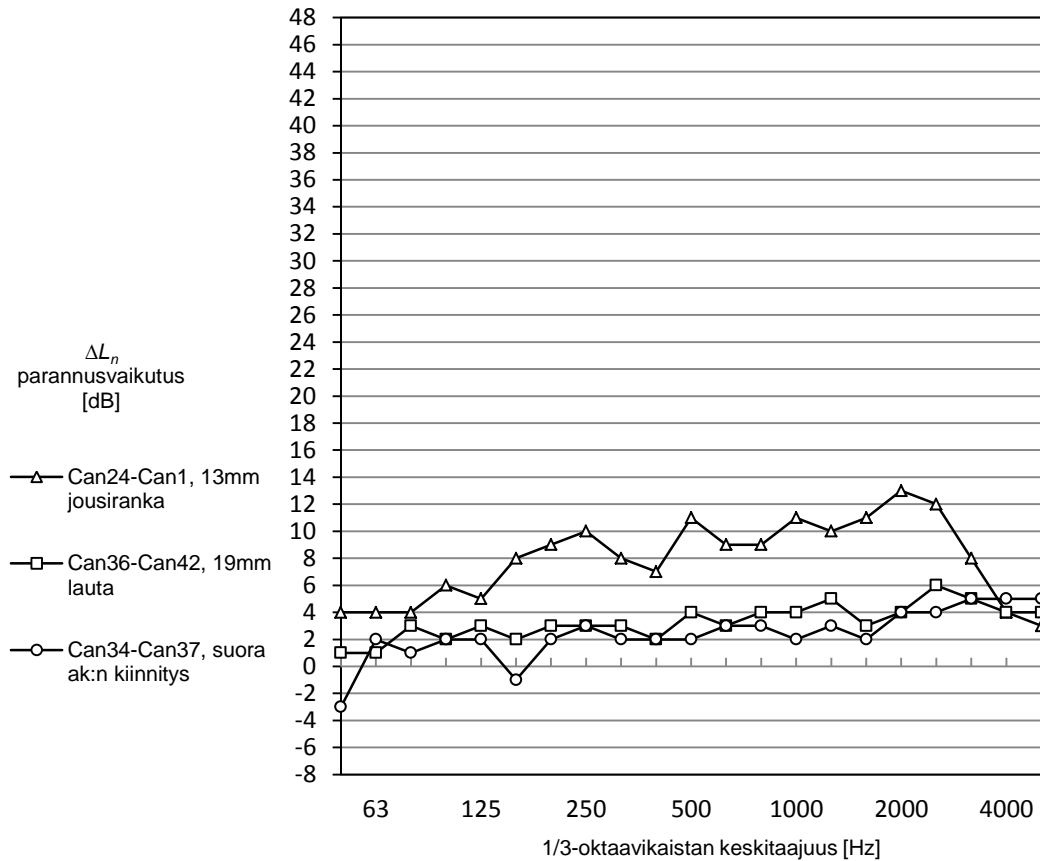
**Kuva 57: Välitilan lasivillan paksuuden vaikutus askeläänitasoihin [122].**



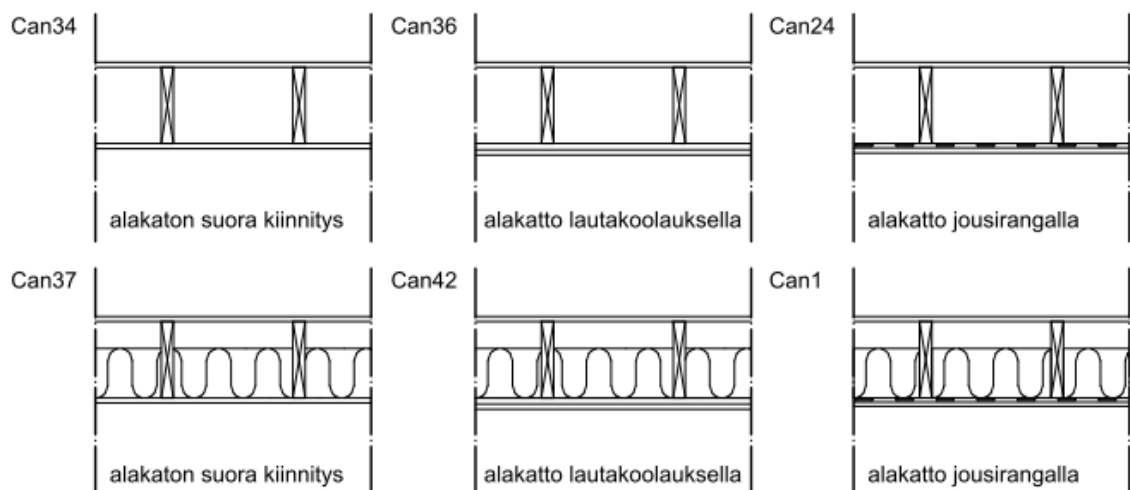
**Kuva 58: Välitilan absorptiomateriaalin paksuuden vaikutuksen selvittämiseen käytettyjen välipohjien leikkauskuvat, mittakaava 1:20.**

Kuvan 59 kuvaajassa on esitetty alakattokiinnityksen vaikutus absorptiomateriaalin askelääneneristävyyteen. Mittaustulokset on saatu Warnock et al. tutkimuksista [122]. Kuvassa 60 on esitetty kuvan 59 vertailussa käytettyjen välipohjien leikkauskuvat. Kuvan 59 kuvaajasta voidaan havaita, että alakaton kiinnitystavalla on vaikutusta myös absorptiomateriaalin askelääneneristävyyden parannusvaikutukseen. Kun alakatto oli kiinnitetty suoraan tai lautakoolauksella lattiapalkkeihin, absorptiomateriaalin lisääminen välipohjan sisään paransi askelääneneristävyyttä 2-4 dB 100 Hz yläpuolella. Tämä voidaan havaita Can36-Can42 ja Can34-Can37 käyristä. Jos taas alakatto oli kiinnitetty

jousirangoilla, absorptiomateriaalin lisääminen paransi askelääneneristävyyttä vähintään 6 dB yli 125 Hz taajisuusalueella, kuten Can24-Can1 esittää.

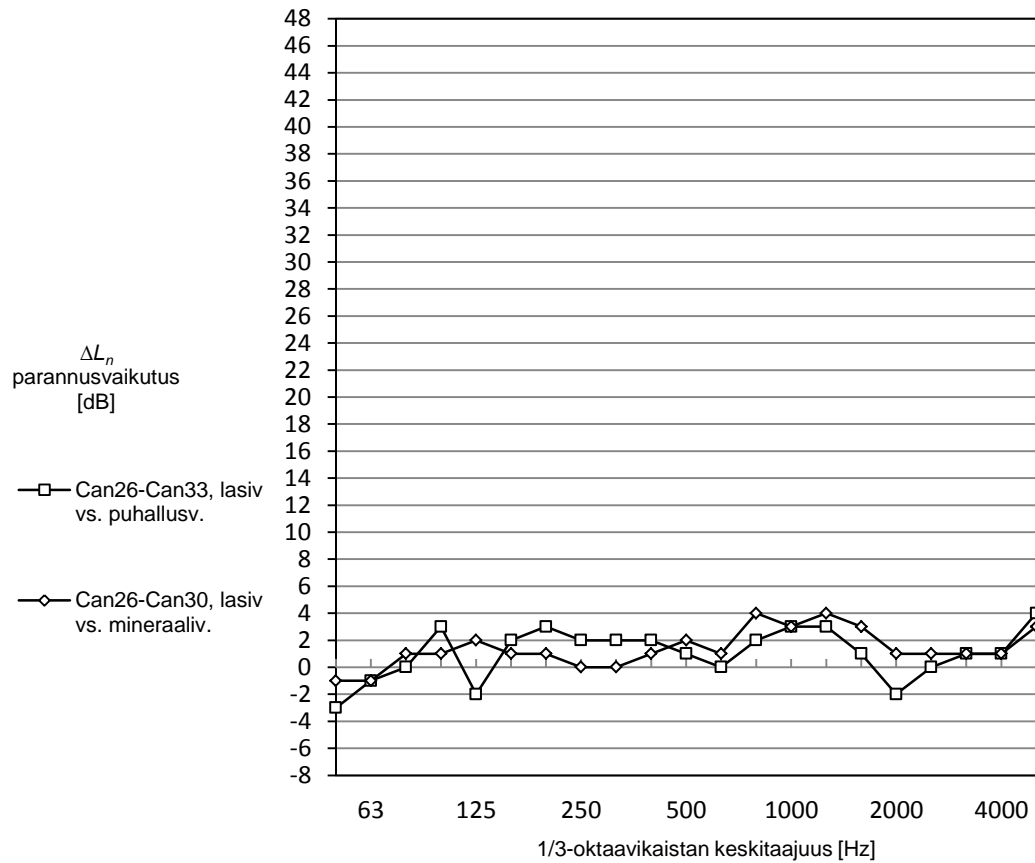


**Kuva 59:** Alakattokiinnityksen vaikutus välitilassa olevan absorptiomateriaalin parannusvaikutukseen [122].

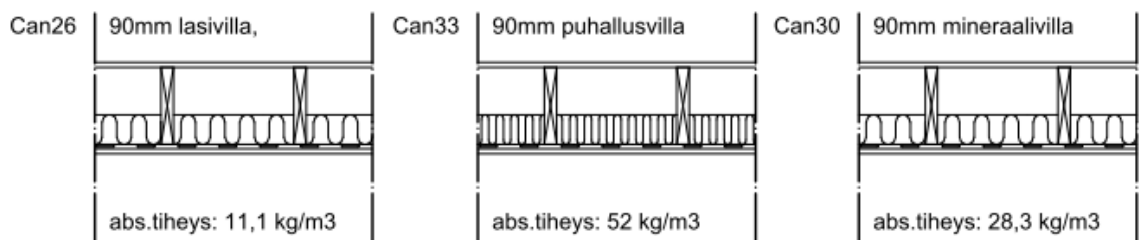


**Kuva 60:** Kuvan 59 vertailussa käytettyjen välipohjien leikkauskuva, mittakaava 1:20. Can 37,42 ja 1 tapauksissa välipohjan sisälle on lisätty 152 mm lasivillaa.

Kuvan 61 kuvaajassa on esitetty absorptiomateriaalityypin vaikutus askelääneneristävyyteen. Mittaustulokset on saatu Warnock et al. tutkimuksista [122]. Kuvassa 62 on esitetty tässä vertailussa käytettyjen välipohjien leikkauskuvat.



**Kuva 61: Absorptiomateriaalityypin vaikutus askelääneneristävyyteen [122].**



**Kuva 62: Villatyyppien vaikutuksen vertailuun käytettyjen välipohjien leikkauskuvat, mittakaava 1:20. Kuvien alareunoissa on esitetty kyseisten absorptiomateriaalien tiheydet [kg/m<sup>3</sup>].**

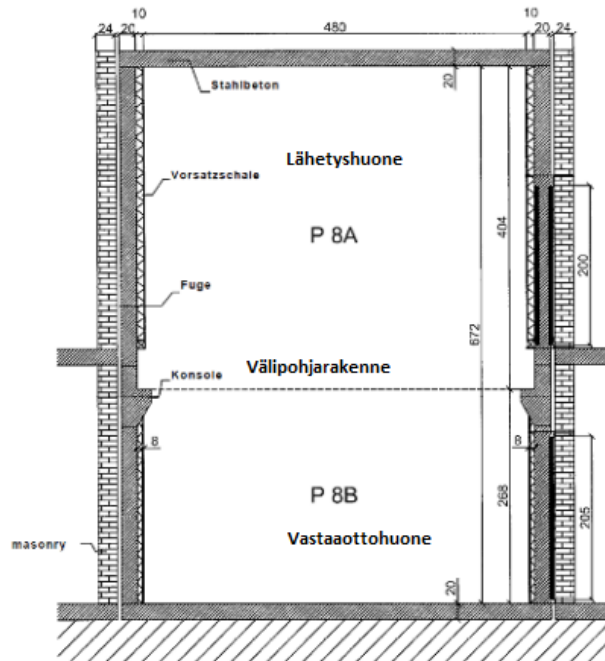
Kuvan 61 kuvaajassa puhallusvilla- ja mineraalivillavälipohjien mittaustuloksia on verrattu lasivillavälipohjan tuloksiin. Kuvaaja perusteella lasivillan vaihtaminen mineraalivillaan tai puhallusvillaan ei vaikuta askelääneneristävyyteen. Absorptiomateriaaleista

tiedetään tässä tapauksessa vain niiden tiheys [122], eikä esimerkiksi virtausvastusta. Toisaalta Warnock on esittänyt, että virtausvastus korreloisi hyvin absorptiomateriaalin tiheyden kanssa [120, 122]. Absorptiomateriaalin virtausvastus vaikuttaa siihen, kuinka tehokkaasti absorptiomateriaalissa etenevä ääniaalto muuttuu kitkan ansiosta lämmöksi. Virtausvastus vaikuttaa absorptiomateriaalin akustisiin ominaisuuksiin erityisesti suurilla taajuuksilla [52].

### **3.6.8 Laboratoriomittaukset ja niiden epävarmuustekijät**

Laboratoriomittauksiin liittyy epävarmuustekijöitä, mikä on otettava huomioon mittaus-tuloksia tarkasteltaessa ja eri tutkimuksissa saatujen tulosten vertailussa. Kuten aiemmin kappaleen 3.6 alussa todettiin, laboratorio-olosuhteissa tiettyjen epätarkkuuksien havaitseminen ja hallinta on kuitenkin helpompaa kuin kenttäolosuhteissa. Standardi ISO 12999-1 käsittelee akustisiin mittauksiin liittyvää epävarmuutta. Sen esipuheessa todetaan, että mittausepävarmuuksien hallinta on ensiarvoisen tärkeää eri mittauksissa ja eri mittauslaboratorioissa saatujen tulosten vertailukelpoisuuden varmistamiseksi. Standardin mukaan mittausepävarmuus liittyy mittausten uusittavuuteen ja toistettavuuteen. [30]

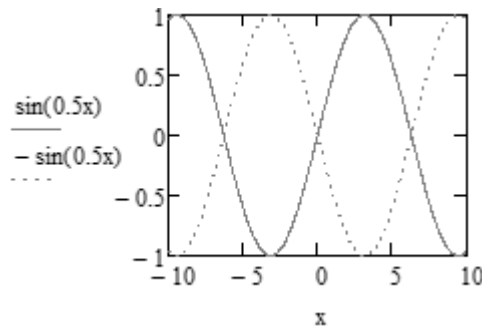
Warnock ja Birta määrittelevät laboratoriossa tehtäville puuvälipohjien askeläänitasomittauksille kolme epävarmuustekijää: laboratoriotila ja -laitteisto, mittausten toistettavuus ja välipohjarakenteen uusittavuus [121]. Ensimmäinen epävarmuustekijä liittyy yleisesti sekä askel- että ilmaääneneristävyyden mittauksiin. Askeläänitasomittauksia tehtäessä vastaanottohuoneeseen pyritään muodostamaan mahdollisimman diffuusi äänikenttä [27, 73]. Diffuusilla äänikentällä tarkoitetaan äänikenttää, jossa äänenpaine on paikan suhteen vakio ja riippumaton etäisyydestä äänilähteeseen [5]. Vastaanottohuoneella tarkoitetaan tässä välipohjan alapuolista tilaa, josta askeläänepainetaso mitataan.



**Kuva 63: Acuwood-hankkeessa välipohjien askelääneneristävyyden mittauksiin käytetty akustinen laboratorio [108].**

Standardin ISO 10140-5 mukaan vastaanottohuoneen tilavuuden tulisi olla vähintään 50 m<sup>3</sup> [28]. On huomattava, että tämän kokoisissa tai pienemmissä huoneissa äänikentän ei voida olettaa olevan diffuusi alle 400 Hz taajuuksilla, koska huoneen ominaistajuudet muuttavat äänikenttää [31]. Keskimäärin eurooppalaiset akustisten laboratorioiden vastaanottohuoneet ovat 50–70 m<sup>3</sup> kokoisia, jolloin mittaustulosten tarkkuus kärsii joka tapauksessa alle 100 Hz taajuuksilla [91]. Kuten kappaleessa 2.4 todettiin, alle 100 Hz taajuusalue on merkittävä taajuusalue puurakenteisten välipohjien askelääneneristävyyden kannalta. Ideaalitulanteessa vastaanottohuoneen mittojen tulisi olla vähintään mitattavan äänen aallonpituuden suuruiset. Kuitenkin vähimmäisvaatimus on, että edes yksi huoneen mitoista; korkeus, leveys tai pituus, olisi mitattavaa taajuutta vastaan aallonpituuden suuruinen [30]. Vähimmäisvaatimuksetkin on haastavaa täyttää pienillä taajuuksilla, sillä esimerkiksi 50 Hz taajuudella aallonpituus on 6,9 m, kun äänennopeus ilmassa on 345 m/s.

Ominaisajuudet ovat riippuvaisia huoneen geometriasta. Kun ääniherätteen aallonpituus on sopiva huoneen mittoihin nähden, huoneeseen muodostuu seisova aalto. Taajuutta, jolla seisova aalto syntyy, kutsutaan huoneen ominaistajuudeksi. Käytännössä seisovan aallon syntymiseksi huoneen jonkin mitan on oltava herätteen aallonpituuden puolikkaan monikerta [5]. Kuvassa 64 on esitetty seisovan aallon periaate sinifunktion kuvaajien avulla. Kahden sini-käyrän voidaan ajatella muodostavan yhdessä seisovan aallon kuvaajan. Käyrien nollakohdissa on seisovan aallon solmukohta ja äänenpaineen nollakohta. Sini-käyrien maksimikohdissa on seisovan aallon äänenpaineen maksimikohta eli kupu.



**Kuva 64:** *Seisova aalto hahmoteltuna sinifunktion kuvaajien avulla. Funktioiden nollakohdissa on seisovan aallon solmukohdat ja maksimikohdissa seisovan aallon kuvut.*

Huoneen ominaistajuudet on mahdollista laskea yksinkertaistetussa tapauksessa aalto-teorian avulla. Yksinkertaistetussa laskennassa oletetaan, että huone on suorakaidesärmiön muotoinen ja kaikki seinät ovat täydellisesti ääntä heijastavia pintoja. Akustiikan mittausten kannalta yksittäistä ominaistajuutta merkittävämpi tekijä on mooditiheys eli tietylle taajuusvälillä olevien ominaistajuuksien lukumäärä. Pienillä taajuuksilla ominaistajuuksien tiheys on pienempi kuin suurilla. Esimerkiksi, kun huoneen mitat ovat sopivat, 100 Hz taajuudella 23 Hz kaistaleveydelle osuu 8 huoneen ominaistajuutta. Samassa tilanteessa 1000 Hz taajuudella 23 Hz kaistaleveydelle osuu 500 ominaistajuutta. 23 Hz kaistaleveys seuraa siitä, että tulokset esitetään 1/3-oktaavikaistoittain [115]. Käytännössä suurilla taajuuksilla moodit sijaitsevat niin lähellä toisiaan, että 1/3-oktaavikaistoittain keskiarvotetuilla äänenpainetasomittauksilla ei voida erottaa eri ominaistajuuksia, eivätkä ne tällöin aiheuta epätarkkuutta mittauksiin. [5, 115] Pienillä taajuuksilla ominaistajuuksien kupu- ja solmukohdat ovat harvassa, esimerkiksi 100 Hz taajuudella noin 1,7 m välein. Pienillä ominaistajuuksilla käy niin, että tietyssä huoneen kohdassa ominaistajuinen ääni vahvistuu voimakkaasti ja seisovan aallon solmujen kohdalla taas heikkenee kuulumattomiin. Täten huoneen äänikenttä ei ole vakio kaikilla taajuuksilla.

Pienten taajuuksien mittausergelmaa on pyritty ratkaisemaan mittaamalla välipohjan värähtelyä vastaanottohuoneen äänitason asemesta. Tällöin vastaanottohuoneen akustiset ominaisuudet eivät vaikuta mittaustuloksiin. Chung et al. tutkimuksessa välipohjan ylä- ja alapinnan normaalin suuntaista liikettä mitattiin laser-anturilla. Mekaanisena herätteenä käytettiin tärastintä, joka säädettiin värähtelemään halutulle taajuudelle. Tärastimen ja askeläänikoneen tuottamat herätteet poikkeavat toisistaan [15].

### 3.6.9 Askeläänitasomittausten uusittavuus ja toistettavuus

Laboratorion ominaisuuksien ja mittauskäytäntöjen vaikutusta tuloksiin voidaan tutkia usean laboratorion välisellä toistokokeella [30]. Tällöin tutkitaan mittausten uusittavuutta (*engl. reproducibility*), joka määritellään useamman eri laboratorion mittaustulosten avulla: Täysin samanlainen mittausjärjestely toistetaan useassa eri laboratoriossa siten,

että mittaukset tehdään standardoitujen mittaustapaohjeiden mukaisesti. Esimerkiksi askelääneneristävyyden laboratoriomittaukset on ohjeistettu standardissa ISO 10140-3: 2010. Optimitilanteessa sama testikappale mitattaisiin useassa eri laboratoriossa ja viimeiseksi vielä uudestaan ensimmäisessä laboratoriossa, jolloin koekierroksen aikana tapahtuneet mahdolliset muutokset mitattavassa koekappaleessa saadaan selville. Rakennusakustiikan tutkimuksissa tämä ei useinkaan ole mahdollista, koska tutkittavien rakenteiden siirtäminen on hankalaa, johtuen niiden suuresta koosta ja laboratorioden välisistä eroista. Koerakenne pyritään kuvailemaan mahdollisimman tarkasti, jotta se voidaan rakentaa mahdollisimman yhteneväisenä jokaiseen laboratorioon. Tätä useassa laboratoriossa tapahtuvaa epävarmuusluvun määrittystapaa kutsutaan standardissa ISO-12999-1 tavaksi A. Määrittystavassa B eri tutkimusryhmien mittajat tekevät mittaukset samassa laboratoriossa. Kun mitattava rakenne on kaikille ryhmille sama, se ei aiheuta vaihtelua tuloksiin. Vain mittauskäytännön ja -laitteiston väliset erot aiheuttavat eroja tuloksiin. Standardissa määritellään myös määrittystapa C: yksi mittausryhmä mittaa samaa rakennetta useasti muuttamatta mittauskäytäntöä tai -laitteistoa. Tällöin tutkitaan mittauksen toistettavuutta (*engl. repeatability*). [30]

Mittausten toistettavuuteen liittyviä epävarmuustekijöitä ovat esimerkiksi eri puolilta vastaanottohuonetta mitattujen askeläänepainetasojen keskiarvotus, taustamelun epästationäärisyys ja vastaanottohuoneen absorptiomateriaalin huomioiminen laskennassa. Laboratoriotilojen välisessä vertailussa eli mittausten uusittavuudessa mittaustulosten erot voivat aiheutua esimerkiksi sivutiesiirtymästä lähetys- ja vastaanottohuoneen välillä, mittalaitteiston kalibroinnista ja huonegeometrian ja testiaukon koon vaikutuksesta mittaustuloksiin. [30]

Kaikissa tapauksissa ei ole mahdollista järjestää usean laboratorion välistä tutkimusta. Tällöin yksittäinen laboratorio voi arvioida mittausten toistettavuutta ja uusittavuutta standardissa ISO 12999-1 annettujen keskihajontojen keskiarvojen avulla. Nämä keskiarvoiset keskihajonnat on esitetty kuvan 65 taulukossa.



Frequency Hz	Situation B dB	Situation C dB
50	3,2	1,5
63	2,8	1,4
80	2,4	1,3
100	2,0	1,2
125	1,6	1,1
160	1,4	1,0
200	1,3	0,9
250	1,2	0,8
315	1,2	0,8
400	1,2	0,8
500	1,2	0,8
630	1,2	0,8
800	1,2	0,8
1 000	1,2	0,8
1 250	1,3	0,8
1 600	1,4	0,8
2 000	1,5	0,8
2 500	1,7	1,0
3 150	1,9	1,2
4 000	2,1	1,4
5 000	2,3	1,6

***Kuva 65: ISO 12999-1 standardissa esitetyt sallitut keskihajonnat [dB] askeläänitasomittauksissa. Keskihajonnat perustuvat useiden laboratorioiden välisten mittauksien perusteella laskettuun keskiarvoon [30].***

Taulukon tuloksista voidaan havaita, että alle 100 Hz ja yli 2500 Hz taajuuksilla sallitaan keskitaajuuksia suuremmat keskihajonnat. Standardissa on annettu ohjearvot myös yksilukuisen mittaluvun  $L_{n,w}$ ,  $L'_{n,w}$ ,  $L'_{n,Tw}$  toistettavuudelle ja spektripainotetuille mittaluvuille [30].

Vertailukäyrämenettelyllä määritetyn yksilukuisen mittaluvun epävarmuuden arviointi on haastavaa. Standardin ISO-717-2 mukaisessa vertailukäyrämenettelyssä jokainen 1/3-oktaavikaistoittain mitattu äänenpainetaso vaikuttaa vertailukäyrän sijaintiin ja täten yksilukuisen mittaluvun arvoon, välipohjien tapauksessa askeläänitasolukuun. Jokaiselle taajuuskaistalta mitattuun askeläänepainetasoon liittyy epävarmuutta, joka on tyypillisesti suurempaa pienillä taajuuksilla kuin suurilla taajuuksilla. Yksilukuisen mittaluvun epävarmuuden määrittämisessä täytyisi siten ottaa huomioon jokaisen taajuuskaistan epävarmuus. Käytännössä se on hyvin hankalaa, sillä taajuuskaistojen epävarmuus vaihtelee koko taajuusalueella ja riippuu aina vastaanottohuoneesta, jossa mittaukset suoritetaan. Tutkimuksissa on havaittu, että vaikka kahden erilaisen välipohjan 1/3-oktaavikaistan askeläänepaineen mittaustulosten keskihajonnat olivat samanlaiset, lopullisen yksilukuisen askeläänepainetasoluvun epävarmuudet erosivat toisistaan. Tämä johtuu Kylliäisen mukaan siitä, että vertailukäyrämenettely painottaa tiettyjä taajuuksia enemmän kuin toisia. Hankaluus kasvaa entisestään, kun vertaillaan eri laboratorioissa määritettyjä yksilukuisten mittalukujen epävarmuuksia. Nykyisen standardin ISO-12999-1 epävarmuusmenettelyn sijaan epävarmuuksia on tutkittu myös Monte Car-

lon-metodilla, joka on havaittu tehokkaaksi menetelmäksi mittausepävarmuustarkastelussa [73].

Yksittäisen välipohjaan liittyviä epävarmuuksia voidaan pitää puurakenteille ominaisina. Kuten aiemmin kappaleessa 3.1 on todettu, puurakenteiset välipohjan ovat rakenteellisesti monimutkaisia, verrattuna esimerkiksi betonivälipohjiin, ja pienillä rakennemuutoksilla on vaikutusta askelääneneristävyyteen. Warnock ja Birtan tutkimuksessa välipohjarakenteesta aiheutuvat epävarmuudet on jaettu vielä kahteen eri osaan: yksittäisen rakenteen toistettavuus ja rakenteen uusittavuus. Toistettavuudella tarkoitetaan rakenteen akustisten ominaisuuksien pysyvyyttä koesarjojen välillä ja uusittavuudella akustisten ominaisuuksien pysyvyyttä, kun rakenne rakennetaan uudestaan jokaista mittausta varten. [121] Toistettavuutta voidaan tutkia toistamalla mittaussarja useasti tietyn ajanjakson sisällä. Laboratorio-olosuhteet ja mittaustapa pyritään pitämään mahdollisimman samanlaisena mittausten välillä, jotta vain itse välipohjassa tapahtuvat muutokset saadaan havaittua. Esimerkiksi kun käytetään raskasta askelherätettä, on mahdollista, että välipohjan pintarakenne vaurioituu iskusta. [60, 121]. Välipohjan uusittavuuden tutkimisen kannalta on tärkeää, että välipohjarakenteen yksityiskohdat dokumentoidaan tarkasti.

Välipohjan uusittavuuden tutkimiseksi Warnock ja Birta:n tutkimuksissa referenssi välipohja rakennettiin kahdeksan kertaa yhden vuoden aikana. Välipohja rakennettiin aina uusista materiaaleista. Pohjoisamerikkalaisen ASTM E989 standardin mukaan määritetyt IIC (*engl. Impact Insulation Class*) lukuarvo oli neljässä tapauksessa 45 ja neljässä tapauksessa 46 [121]. Rakennustyötapojen vaikutuksista rakenteiden akustisiin ominaisuuksiin on julkaistu tutkimuksia [21, 114]. Trevathan et al. tutkimuksessa seinän ääneneneristävyyttä tutkittiin kenttäolosuhteissa sekä äänenpainetasomittauksilla että äänen intensiteettimittauksilla. Intensiteettimittausten avulla voidaan määrittää äänen etenemissuunta, mistä on hyötyä, kun halutaan ottaa huomioon vain rakenteen kautta huoneeseen siirtyvä ääni [79]. Myös rakennustyötapojen todellisesta vaikutuksesta rakenteen akustisiin ominaisuuksiin on käyty keskustelua tutkijoiden keskuudessa. Kylliäinen on esittänyt, ettei rakennustyöntavoilla ole merkittävää vaikutusta askeläänitasolukuihin [73].

### **3.6.10 ISO standardoidut askeläänepainetasojen laboratorio-mittaukset**

Standardeissa ISO 10140-3 ja -4 on esitetty ohjeet askeläänitason mittaukseen laboratorio-olosuhteissa [26, 27]. Standardissa ISO 10140-5 on esitetty vaatimuksia ja ohjeita askelääneneristävyyden mittaukseen soveltuvalla akustisella laboratoriolle ja mittalaitteistolle [28].

Standardin ISO 10140-5 liitteen E mukainen askeläänikone [28] on sijoitettava vähintään neljään eri pisteeseen välipohjan päällä. Välipohjan alapuolella askeläänitason mit-

tauspisteiden määrän on oltava sama kuin askeläänikoneen kuormituspisteiden lukumäärän. Jos askeläänilähde sijoitetaan kuuteen eri pisteeseen, niin riittää, että vastaanotto huoneessa askeläänepainetaso mitataan kuudesta eri pisteestä [27]. Askeläänepainetasot mitataan 1/3-oktaavitaajuuskaistoilla vähintään 100–5000 Hz taajuusalueelta. Standardi antaa mahdollisuuden laajentaa mitattavaa taajuusaluetta pienille taajuuksille, aina 50 Hz asti. Pienten taajuuksien mittaamisesta laboratoriossa on annettu ohjeet standardin ISO-10140-4 liitteessä A [27].

Vastaanottohuoneen eripuolilta mitatuista äänenpainetasoista lasketaan energia keskiarvotettu askeläänepainetaso. Standardin ISO-10140-4 mukaan energia-keskiarvotettu askeläänitaso lasketaan jokaisella 1/3-oktaavitaajuudella [27]:

$$L = 10 \lg \frac{p_1^2 + p_2^2 + \dots + p_n^2}{n \cdot p_0^2} \quad (\text{kaava 27})$$

$$L = 10 \lg \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n 10^{L_j/10} \quad (\text{kaava 28})$$

$$p_0 = 20 * 10^{-6} Pa \quad (\text{kaava 29})$$

jossa  $p_n$  on huoneen pisteestä  $n$  mitattu äänenpaineen tehollisarvo [Pa].  $p_0$  on vertailuäänepaine 20  $\mu$ Pa.  $L_j$  on puolestaan pisteessä  $n$  mitattu askeläänepainetaso [dB].  $n$  on myös mittauspisteiden lukumäärä. Tavallisesti käytetään kaavan 28 mukaista määrittäytapaa [27].

Askeläänitasomittauksissa on huomioitava myös vastaanottohuoneessa vallitseva taustäänitaso, jos se on alle 15 dB vaimeampi kuin askeläänikoneen tuottama askeläänitaso. Taustäänäen on oltava vähintään 6 dB vaimeampi kuin askeläänitason, jotta mittaukset voidaan suorittaa. Kun taustäänäni 6–15 dB vaimeampi, kuin askeläänitaso tehdään vastaanottohuoneesta mitatulle askeläänitasolle taustäänäikorjaus, joka on esitetty kaavassa 30

$$L_i = 10 \lg \left( 10^{\frac{L_{sb}}{10}} - 10^{\frac{L_b}{10}} \right) \quad (\text{kaava 30})$$

$L_b$  on mitattu taustäänitaso [dB] ja  $L_{sb}$  on mitattu askel- ja taustäänitaso yhdessä.

Energiakeskiarvotuksen ja taustäänäikorjauksen jälkeen askeläänitasoa määritettäessä huomioidaan vielä vastaanottohuoneessa oleva absorptiomateriaali. Askeläänitaso ilmoitetaan täten normalisoituna askeläänitasona [26]:

$$L_n = L_i + \lg \frac{A}{A_0} dB \quad (\text{kaava 31})$$

Kaavassa 31  $A$  on huoneen absorptioala kyseisellä taajuudella ja  $A_0$  on vertailuabsorptioala 10m<sup>2</sup>. Absorptioala  $A$  määritetään huoneesta mitatun jälkikaiunta-ajan  $T$  perusteella. Jälkikaiunta-aika määritetään joko keskeytetyn melun tai integroidun impulssi-

vasteen avulla. Jälkikaiunta-ajan laskentamenetelmät on esitetty standardeissa ISO-3382-2 ja ISO-18233 [32, 34]. Molemmissa menetelmissä mittaukset on suoritettava vähintään kuudesta eri mikrofonin paikasta vastaanottohuoneessa. Kun jälkikaiunta-aika 1/3-oktaavikaistoittain on saatu selville, voidaan kutakin 1/3-oktaavin keskitaajuutta vastaava absorptioala  $A$ :

$$A = \frac{0,16*V}{T} * \left[\frac{s}{m}\right] \quad (\text{kaava 32})$$

jossa  $V$  on huoneen tilavuus [ $m^3$ ] ja  $T$  on jälkikaiunta-aika [s] [27].

### 3.7 Johtopäätökset

Kuten selkeästi on tuotu esiin, puuväli­pohjien askelääneneristävyyden laskentaan ei ole vielä yleisesti hyväksyttyä laskentamallia. Merkittävää tutkimusta on tehty sekä determinististen että empiiristen mallien saralla. Kummallakin lähestymistavalla on omat heikkoutensa ja vahvuutensa, joita esiteltiin tarkemmin laskentamalleja koskevissa kapaleissa.

Empiirisiin malleihin lukeutuvat SEA-mallit soveltuvat laskentafilosofialtaan paremmin suunnittelumalleiksi, sillä niissä ei tarvita yksityiskohtaista tietoa rakenteesta ja laskentatulokset saadaan nopeasti. Toisaalta edellä esitetyt merkittävät puutteet puurakenteiden huomioonottamisessa osoittavat, että ilman merkittäviä parannuksia ja kehitystyötä SEA-malleja ei voida käyttää puuväli­pohjien askelääneneristävyyden arvioimiseen. Kuten aiemmin tuotiin esiin, SEA-malleja kehitetään myös koneakustiikan tarpeisiin. SEA-mallien kehittämisenä on näin useita taloudellisia intressejä ja osa koneakustiikkaan liittyvistä tutkimustuloksista voi olla hyödynnettävissä myös rakennusakustiikan puolella, kuten esimerkiksi Yin ja Hopkinssin [125] rakenteiden periodisuuden mallintamista koskeva tutkimus.

Deterministiset mallit mahdollistavat yksityiskohtaisen laskennan. Väli­pohjarakenteen akustisista ominaisuuksista on mahdollista saada tietoa laajasti koko tarkasteltavalla taajuusalueella sekä tarkasti halutulla taajuudella. Determinististen mallien haaste on vielä laskennan herkkyys lähtöarvojen epätarkkuuksille ja laskentamallien haastavuus tavallisten suunnittelijoiden käyttöön. Nykyiset deterministiset mallit soveltuvat vain yksinkertaisten väli­pohjarakenteiden laskentaan, vaikka puurakenteissa käytettävien rakenneratkaisuiden kirjo on hyvin laaja. Puuväli­pohjien tutkimuksen haastavuutta kuvaa osin se, että deterministisiä malleja on kehitetty vain muutamissa tutkimuksissa. Verrattuna SEA-mallien laaja-alaiseen kehittämiseen yksittäisen deterministisen mallin kehittäminen palvelee pääasiassa vain puurakenteiden kehittämistä, joka toisaalta on eduksi puurakenteiden ominaislaatuisuuden vuoksi. Pelkän puurakenteiden askelääneneristävyyden laskentamallin kehittämiseen liittyy myös taloudellisia intressejä, sillä kuten aiemmin esitettiin, nykyiset testausmenetelmät koerakennuksineen ja mittauksi-

neen on hyvin kallis. Nykyisten tai uusien determinististen laskentamallien käyttö joka-päiväisenä suunnittelutyökaluna vaatii vielä paljon kehitystyötä.

Tulevaisuuden laskentamallin kannalta yksi vaihtoehto voisi olla niin sanottu yhdistelmämalli, jossa yhdistetään useampien laskentamallien hyviä ominaisuuksia tai esimerkiksi empiirisiä tuloksia ja analyttistä laskentaa. Kuten aiemmin tuotiin esiin, esimerkiksi FEM-laskentaa on käytetty apuna sekä analyttisten että empiiristen mallien laskennassa, vaikka FEM-laskenta itsessään soveltuu askelääneneristävyyden laskentaan vain hyvin rajallisella taajuusalueella.

### 3.7.1 Parametriset tutkimukset

Koska kelvollista laskentamallia puuvälipohjien askelääneneristävyyden laskentaan ei ole vielä saatavissa, parametrilla tutkimuksilla saadaan tärkeää tietoa välipohjien akustisesta toiminnasta: erityisesti yksittäisten rakennusosien vaikutuksesta välipohjan askelääneneristävyyteen. Parametristen testien tuloksia voidaan käyttää myös laskentamallien kehittämiseen.

Puurakenteisten välipohjien askelääneneristävyyden arvioinnissa tulee aina huomioida koko välipohjarakenne ja yrittää hahmottaa merkittävimmät äänenkulkureitit. Yksittäisten parametrien muutosten tai yksittäisen mittaustuloksen perusteella ei voida tehdä pitkälle vietyjä päätelmiä koko välipohjan toiminnasta, sillä parametrien muuttaminen ei ole yksiselitteistä. Välipohjan askelääneneristävyyden muodostumisessa on samoja piirteitä kuin monesta äänilähteestä yhdistetystä äänitasosta. Äänitehojen yhteenlaskusäännön mukaan kahden yhtä tehokkaan epäkoherentin äänilähteen yhdistäminen tuottaa vain 3 dB korkeamman äänitason kuin yksittäinen äänilähde [71]. Välipohjan eri äänenkulkureittien voidaan ajatella muodostavan yksittäisiä äänilähteitä, jotka yhdessä saavat alakatto levyn värähtelemään. Analogia äänilähteiden ja välipohjan välillä pätee siten, että useasta äänilähteestä on tärkeintä vaimentaa kaikkein voimakkaimmat, jotta askeläänitaso laskisi. Vääriä äänenkulkureittejä vaimentamalla syntyy vain turhia materiaali- ja työkustannuksia mutta ei toivottua askelääneneristävyyden parantumista. Toisaalta merkittävien äänilähteiden vaimennuksen jälkeen, aiemmin merkityksettömät äänenkulkureitin nousevat merkittäviksi, kuten parametrien tarkastelun yhteydessä osoitettiin.

Palkkivälipohjilla palkkien kautta kulkeva runkoääni on merkittävin äänenkulkureitti. Tämän osoittaa esimerkiksi se, että välipohjien askelääneneristävyys paranee merkittävästi, kun alakatto kytketään joustavasti palkkien alapintaan. Toisaalta, kun äänenkulku palkkien kautta estetään toiset äänenkulkureitit nousevat merkittäviksi. Palkkireitin vaimentamisen ansiosta välitilassa etenevä ilmaääni vaikuttaa askeläänitasoon. Tämä ilmiö voidaan havaita, kun verrataan jousirangallisia välipohjia välitilan absorptiomateriaalin kanssa ja ilman absorptiomateriaalia. Absorptiomateriaalia sisältävän välipohjan askeläänitasot ovat matalammat kuin ilman absorptiomateriaalia toteutetun välipohjan.

Vertailemalla absorptiomateriaalin parannusvaikutusta eri alakattoratkaisuiden kanssa, osoitettiin, että parannusvaikutus riippuu alakaton kytkennästä palkkeihin.

Lattiapäällysteen askelääneneristävyyden parannukseen vaikuttaa merkittävästi raakavälipohja, jonka päälle se asennetaan. Raskaan pintalaatan, kuten puupalkkien päälle asennetun kipsilaatan, päälle asennettu lattiapäällyste toimii lähes samoin kuin massiivisen betonivälipohjan päälle asennettu päällyste. Lattiapäällysteen parannusvaikutus on sitä merkittävämpi mitä massiivisempi pintalaatta on. Tämä ilmiö on havaittavissa myös massiivipuulevyvälipohjien mittaustuloksista.

Mittaustuloksiin liittyy aina epävarmuutta, joka täytyy ottaa huomioon mittaustuloksia tulkittaessa. Mittausepävarmuus on taajuusriippuvaista ja kasvaa mitattavan taajuuden pientyessä. Puuvälipohjien askelääneneristävyyden mittauksissa korostuu pientaajuuksien mittausepävarmuus, sillä pienet taajuudet vaikuttavat merkittävästi koettuun askelääneneristävyyteen ja samalla niiden mittaamiseen liittyy suurin epävarmuus. Alle 100 Hz taajuudella mittausepävarmuuden takia alle 4 dB muutoksia askelääneneristävyydessä ei ole syytä pitää merkittävänä. Yleisesti mittaustuloksia tulkittaessa 100–5000 Hz taajuuksilla alle 2 dB muutokset voidaan tulkita mittausepävarmuuksina.

Seuraavassa on esitetty kappaleiden 3.6.1–3.6.10 perusteella tärkeimmät havainnot eri parametrien vaikutuksesta välipohjan askelääneneristävyyteen

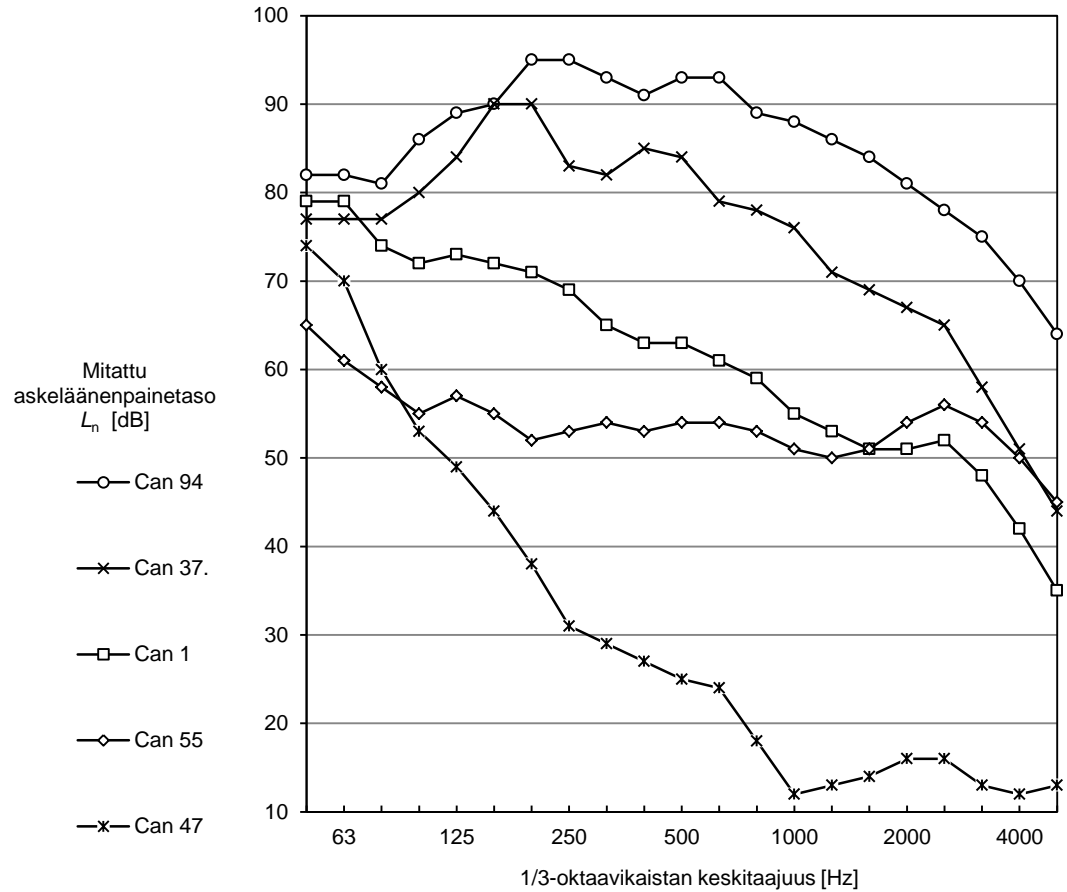
#### **Askelääneneristävyyttä parantavat rakennemuutokset:**

- pienillä taajuuksilla merkittävin parannus saavutetaan pintalattian ja alakaton yhteismassaa kasvattamalla.
- raskas ja paljas pintalattia, esimerkiksi kipsi- tai betonilaatta, vaatii kelluvan lattiarakenteen.
- useat lattialevykerrokset parempi vaihtoehto kuin yksi paksu lattialevy. Sama pätee alakattolevyihin
- lattiakipsilevyt parantavat erityisesti massiivipuuvälipohjien askelääneneristävyyttä
- joustavasti kiinnitetyllä alakatolla on suurin parannusvaikutus 63 Hz alkaen
- jousirankojen k-jaon harventaminen parantaa askelääneneristävyyttä
- absorptiomateriaali välipohjan sisällä parantaa askelääneneristävyyttä merkittävästi, kun alakatto on joustavasti asennettu.
- pehmeä tai aluskerroksen kanssa asennettu lattiapäällyste, esimerkiksi kokolatiamatto, parantaa välipohjan askelääneneristävyyttä merkittävästi. Lattiapäällysteen parannusvaikutus riippuu merkittävästi raakavälipohjalevystä, jonka päälle päällyste asennetaan. Mitä kovemman ja massiivisemmän laatan päälle lattiapäällyste asennetaan, sen suurempi on sen parannusvaikutus.

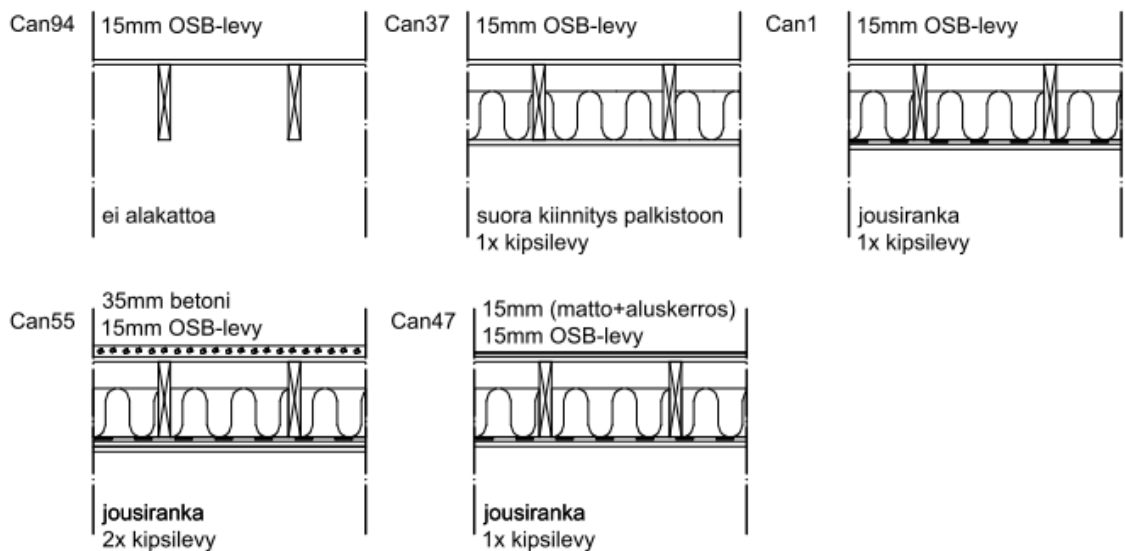
#### **Askelääneneristävyyden kannalta merkityksettömät tai haitalliset muutokset:**

- pintalattian massan lisääminen paksuilla kipsi- tai betonilaatoilla, ilman joustavaa kerrosta tai lattiapäällystettä, voi jopa heikentää askelääneneristävyyttä.
- kovan tai ohuen lattiapäällysteen asentaminen suoraan puisen lattialevyn päälle ilman joustavaa aluskerrosta ei paranna puuvälipohjan askelääneneristävyyttä
- Ilman alakaton joustavaa kiinnitystä absorptiomateriaalin parannusvaikutus on pieni
- $0,3 * \text{välitilan korkeus}$  jälkeen absorptiomateriaalin paksuuden kasvattamisella saavutetaan 1–2 dB parannus askeläänitasolukuun  $L_{n,w}$
- palkkien pituus/ välipohjan koko vaikuttaa sivutiesiirtymiin mutta ei pelkän välipohjan askelääneneristävyyteen
- välipohjan taivutusjäykkyyden merkittävä kasvattaminen parantaa pienten taajuuksien askelääneneristävyyttä. Taivutusjäykkyyden muutoksen pitää kuitenkin olla merkittävä, jopa nelinkertainen. Sahatavarapalkkien korkeuden 1,6-kertaistaminen tuotti noin 4 dB parannusvaikutuksen 80–125 Hz taajuusalueella.
- lattialevyjen ja palkkien liitoksella ei ole vaikutusta askelääneneristävyyteen, kunhan levyt ovat kiinni palkeissa. Irtonaiset lattialevyt heikentävät askelääneneristävyyttä.

Kuvan 66 kuvaajassa on esitetty välipohjarakenteita, joiden avulla voidaan nähdä merkittävimpien välipohjan ominaisuuksien vaikutus askelääneneristävyyteen



**Kuva 66: Askeläänitasot esimerkkirakenteilla. Mittaustulokset ovat Warnock et al. tutkimuksista [122].**



**Kuva 67: Esimerkkirakenteina käytettyjen välipohjien leikkauskuvat, mittakaava 1:20.**

Osa teoriakappaleessa 3.2 esitetyistä ilmiöistä voidaan havaita myös askelääneneristävyyden mittaustulosten avulla. Kuvan 66 kuvaajasta voidaan havaita, että noin 2000 Hz



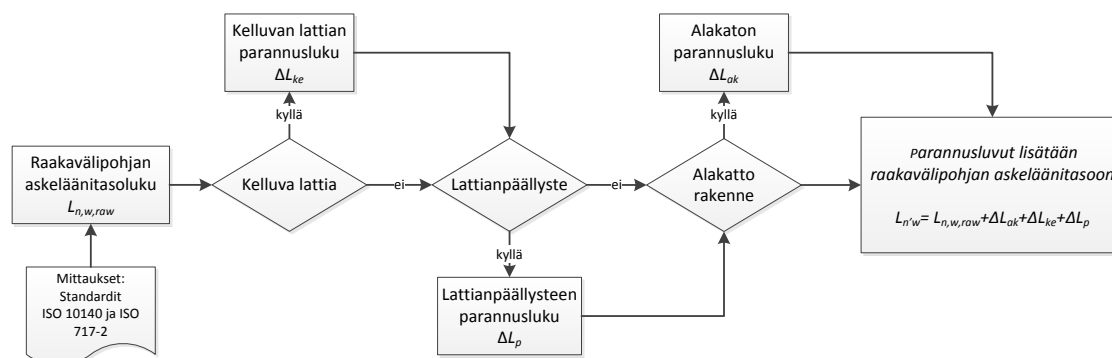
taajuudella kaikkien muiden paitsi Can94-rakenteen askelääneneristävyyden parantuminen pysähtyy ja jopa heikkenee paikallisesti. Tämä ilmiö johtuu alakattolevyn koinsidenssitaajuudesta, joka tässä tapauksessa kaavalla 12 määritettynä osuu noin 2000 Hz taajuudelle. Askelääneneristävyyden parantuminen hidastuu myös 500 Hz taajuusalueella. Tämä voidaan havaita kaikilla kuvassa 66 esitetyillä välipohjarakenteilla. Tämä ilmiö johtuu lattialevyn ja palkiston muodostaman systeemin koinsidenssitaajuudesta. Koinssidenssi-ilmiötä on tutkittu tarkemmin vielä ideoidun laskentamallin yhteydessä tämän tutkimuksen luvussa 4. Kuvan 66 kuvaajan tuloksista voidaan havaita, että askelääneneristävyydet heikkenevät paikallisesti myös muualla kuin edellä esitettyjen 500 Hz ja 2000 Hz taajuusalueilla. Nämä askelääneneristävyyden muutokset saattavat johtua lattiarakenteen, kaviteetin tai alakattorakenteen resonanssitaajuuksista. Nämä ilmiöt, erityisesti puurakenteissa, vaativat lisätutkimusta.

## 4. EHDOTUS ASKELÄÄNENERISTÄVYYDEN LASKENTAMALLIKSI

### 4.1 Ideoitu laskentamalli

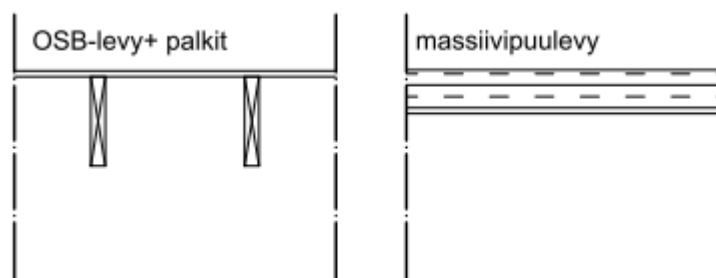
Tällä hetkellä ei ole saatavissa luotettavaa ja käytännön laskentatyöhön sopivaa laskentamallia kevytrakenteisten välipohjien askelääneneristysten arvioimiseksi, kuten luvun 3 johtopäätöksissä esitettiin. Välipohjien askelääneneristysongelmaa voidaan lähestyä myös niin sanotulla semi-empiirisellä laskentamallilla, jossa hyödynnetään samanaikaisesti sekä mittaustuloksia että analyttisesti johdettuja laskentakaavoja. Tässä diplomityössä perehdytään lähemmin tekniikan lisensiaatti Mikko Kylliäisen ideoimaan laskentamalliin, joka lukeutuu semi-empiirisiin laskentamalleihin. Laskentamalli on vasta ideatasolla ja tämän tutkimuksen tavoitteena on selvittää, missä määrin nykyinen laskentaidea soveltuu puurakenteisten välipohjien askelääneneristävyyden laskentaan ja kuinka laskentamallia voitaisiin kehittää. Luvun 3 johtopäätöksissä esitettiin myös merkittävimmät puurakenteisen välipohjan askelääneneristävyyteen vaikuttavat tekijät. Merkittävimmistä parametreista Kylliäisen ideoimalla laskentamallilla pyritään huomiomaan erityisesti seuraavat puuvälipohjan ominaisuudet: välipohjan massa, alakattorakenne, kelluva lattia ja lattiapäällyste.

Kylliäisen ideoima askelääneneristävyyden laskentamalli on esitetty kuvan 68 kaaviossa. Laskentamalli perustuu mittauksen avulla selvitettyyn raakavälipohjan askeläänitasolukuun  $L_{n,w,raw}$ , johon lisätään erilaisia parannuslukuja [dB] riippuen välipohjarakenteesta.



**Kuva 68: Kylliäisen ideoiman laskentamallin laskentaperiaate.**

Raakavälipohjalla tarkoitetaan tässä välipohjaa, johon ei ole asennettu alakattoa, kelluvaa lattiaa tai lattiapäällystettä. Kuvassa 69 on esitetty kaksi esimerkkirakennetta raakavälipohjista. Vastaavia rakenteita on käytetty myöhemmin laskentamallin testaamiseen.



**Kuva 69: Raakavälipohjien esimerkkirakenteita.**

Alakaton, kelluvan lattian tai lattiapäällysteen parannusluvut voitaisiin määrittää joko mittauksilla tai analyttisillä laskentamenetelmillä.

Kylliäisen ideoiman laskentamallin tarkoitus on mahdollistaa puuvälipohjien askelääneneristävyyden oikean suuruusluokan arviointi, ei pikkutarkka laskenta. Yksityiskohmainen laskenta edellyttää usein hyvin tarkkoja lähtötietoja, joiden saaminen todellisissa suunnitteluhankkeissa voi olla mahdotonta. Seuraavissa kappaleissa on käsitelty tarkemmin kuvassa 68 esitetyt parannusluvut ja niiden määrittäminen.

## 4.2 Lattiapäällysteen parannusluku $\Delta L_p$

Lattiapäällysteen askelääneneristävyyden parannusvaikutukselle ei ole vielä standardoitua laskennallista määrittystapaa vaan parannusluvun määrittäminen perustuu askeläänitasomittauksiin [55, 66, 128]. Parannusvaikutuksen laskennallista määrittämistä on tutkittu esimerkiksi Brunskog et al. ja Zeitler et al. tutkimuksissa [13, 128].

Lattiapäällyste muuttaa lattian mekaanista impedanssia ja vaikuttaa näin välipohjaan siirtyvän herätevoiman suuruuteen. Askelääneneristävyyden parantumiseen vaikuttaa myös raakavälipohjarakenteen mekaaninen impedanssi, ja siksi sama lattiapäällyste voi tuottaa erilaisen parannuksen riippuen raakavälipohjarakenteesta [128]. Brunskog et al. tutkimuksessa lattiapäällysteen ja vasaran vuorovaikutukselle on pyritty kehittämään laskentamalli, jossa päällysteen vaimennusominaisuuksia kuvataan erityyppisillä mekaanisilla vaimentimilla, kuten nesteiskuvaimentimella ja jousella. Vaimentimien ominaisuudet lasketaan lattiapäällysteen mekaanisten ja akustisten ominaisuuksien avulla. Lattiapäällysteen parannusvaikutus voidaan täten laskea vertaamalla paljaan lattian ja päällystetyn lattian voimayhtälöitä [12, 13, 115]. Brunskogin ja Hammerin tutkimuksessa askeläänikoneen vasaran ja lattiapinnan välisen vuorovaikutuksen tutkiminen oli osa laajempaa tutkimusta, jossa kehitettiin askelääneneristävyyden laskentamallia puurakenteiselle välipohjalle [9].

### 4.2.1 Parannusluvun mittaaminen ISO 10140 perusteella

Nykyiset lattiapäällysteen parannusvaikutusta kuvaavat laskentamallit ovat hyvin teoreettisia ja siksi lattiapäällysteen akustiset ominaisuudet määritetään yleisesti standardoitujen mittausten avulla. Lattiapäällysteen parannusluvun määrittäminen perustuu askeläänepainetaso mittaustuloksiin vertailuväli­pohjalla sekä ilman lattiapäällystettä että päällysteen kanssa. Standardin ISO-10140-1 liitteessä H on annettu ohjeet mittausten tekemiseen vertailuväli­pohjalla. Liitteessä H on määritelty erikseen parannusluvun määrittäminen raskaille ja kevyille väli­pohjille. [25]

Puurakenteiden tapauksessa vertailuväli­pohjana tulee käytettäväksi standardin 10140-5 liitteessä C määriteltyä puurakenteista väli­pohjaa. Lattiapäällyste kiinnitetään vertailulattian yläpintaan valmistajan ohjeiden mukaisesti. Jos lattiapäällyste on joustava ja se ei kata koko väli­pohjan pinta-alaa, sitä ei tarvitse asentaa koko väli­pohjan alalle vaan riittää, että materiaalikappale on askeläänikojeen alalla. Koekappaleen on oltava vähintään 650 x 350 mm kokoinen. Joustavia pintamateriaaleja ovat standardin mukaan esimerkiksi muovi-, kumi-, korkki- ja kangasmatot. Kuitenkin, jos joustava pintamateriaali asennetaan todellisessa kohteessa koko väli­pohjan alueelle, asennetaan se myös koetilanteessa koko väli­pohjan alalle. Jos pintamateriaali on jäykkä, kuten valetut pintalaatat, pintamateriaali on asennettava myös koko tutkittavan väli­pohjan alalle ja askelherätteen aikana lattialla on oltava kuormitus, 20–25 kg/m<sup>2</sup>. Kuormitus simuloi normaalissa asuinhuoneistossa olevaa kalustusta. [28] Askeläänikoneen sijoittelusta ja mittausten tarvittavasta lukumäärästä on kerrottu tarkemmin standardin ISO 10140-1 liitteessä H [25].

### 4.2.2 Parannusluku $\Delta L_p$ parametrinen tutkimusten avulla

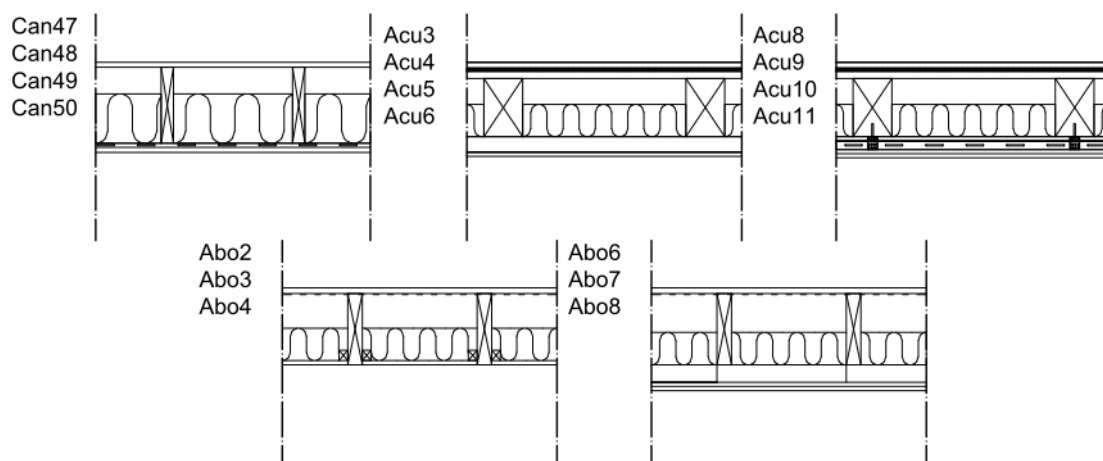
Kylläisen laskentaidean testausta varten lattiapäällysteiden parannusluvut määritettiin saatavissa olleiden mittaustulosten avulla [1, 108, 122]. Näiden tutkimusten väli­pohjat eivät ole standardin ISO 10140-5 liitteen C mukaisia referenssiväli­pohjia, mutta mittaustulosten avulla saadaan suhteellisen tarkka käsitys lattiapäällysteen vaikutuksesta väli­pohjan askeläänitasolukuun.

Taulukoissa 4 ja 5 on esitetty lattiapäällysteen parannuslukuja, jotka on laskettu eri tutkimuksista saatujen askeläänitaso mittaustulosten perusteella [1, 108, 128]. Kuten aiemmin kappaleessa 3.6.5. todettiin, lattiapäällysteen parannusvaikutus riippuu raakaväli­pohjarakenteesta. Taulukon 4 parannusluvut on määritetty palkkiväli­pohjille ja taulukon 5 luvut massiivipuuväli­pohjille. Liitteessä 3 on esitetty yksityiskohtaiset tiedot kaikista taulukoissa 4 ja 5 käsitellyistä väli­pohjista.

**Taulukko 4: Lattiapäällysteiden parannusvaikutus askeläänitasolukuun. Mittauksissa on käytetty erilaisia raakavälipohjarakenteita [1, 108, 122].**

Lattiapäällyste	parannus $\Delta L_p$ [dB] ( $L_{n,w}$ )	parannus $\Delta L_p$ [dB] ( $L_{n,w} + C_{l,50-2500}$ )	lähde
1,2 mm vinyyli, ei aluskerrosta	0		Can48
6 mm matto + 9mm aluskerros	28		Can47
1,9 mm vinyyli, ei aluskerrosta	0		Can49
1,2 mm vinyyli, ei aluskerrosta	1		Can 50
7 mm laminaatti+ aluskerrokset ( WPT SRL 160 +XPSfoam ribbed)	2,8	0,6	Acu3
13 mm parketti + aluskerros WPT SRL 140s	2,3	0,7	Acu4
8 mm laatat, 30x30cm + aluskerros WPT E210 liima	4,6	2,9	Acu5
4 mm matto, ei aluskerrosta	7,1	2,6	Acu6
7 mm laminaatti + aluskerrokset (WPT SRL 160 +XPS foam ribbed)	1,1	-1,5	Acu8
13 mm parketti + aluskerros WPT SRL 140s	2,4	-0,8	Acu9
8 mm laatat, 30x30cm+ aluskerros WPT E210 liima	3,4	1,7	Acu10
4 mm matto, ei aluskerrosta	4,6	-1,7	Acu11
vinyyli "Forbo"	6	4	Abo2
vinyyli "Gerflor"	2	2	Abo3
vinyyli "Tarkett"	6	4	Abo4
vinyyli "Forbo"	1	1	Abo6
vinyyli "Gerflor"	1	1	Abo7
vinyyli "Tarkett"	-1	0	Abo8

Kuvassa 70 on esitetty taulukon 4 parannuslukujen mittauksissa käytettyjen välipohjien leikkauskuvat. Kaikki kuvassa esitetyt rakenteet ovat palkkirakenteisia mutta alakatoissa ja lattialevyissä on eroja. Acu 3-6 rakenne on ISO 10140-5 liitteen C C1 referenssivälipohjan mukainen, lukuun ottamatta välipohjan pinnassa olevaa 18 mm kipsikuitulevyä.

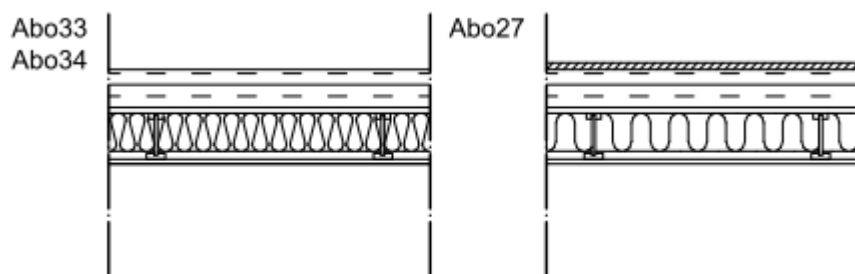


**Kuva 70: Välipohjarakenteet, joiden päälle lattiapäällysteet oli mittauksissa [1, 108, 122] asennettu.**

Taulukossa 5 on esitetty eri lattiapäällysteiden parannusluvut, kun raakavälipohja on massiivipuurakenteinen. Raakavälipohjat, joiden päälle lattiapäällysteet oli asennettu, on esitetty kuvassa 71. Abo 27 rakenteessa osana raakavälipohjaa oli 18mm kipsikuitulevy. Abo 33 j 34 rakenteissa lattiapäällyste asennettiin suoraan massiivipuulevyn pintaan.

**Taulukko 5: Lattiapäällysteiden parannusvaikutus askeläänitasolukuun. Taulukoiden parannusluvut on määritetty massiivipuuvälipohjilla [1].**

Lattiapäällyste	parannus $\Delta L_{n,w}$ [dB]	parannus $\Delta L_{n,w} + C_{50-2500}$ [dB]	lähde
vinyyli "Tarkett"	10	2	Abo 33
14 mm parketti + aluskerros	12	4	Abo 34
vinyyli "Tarkett"	2	1	Abo 27



**Kuva 71: Massiivipuuvälipohjat, joiden päälle lattiapäällysteet oli mittauksissa asennettu. Mittakaava 1:20.**

Edellä esitettyjä taulukoituja parannuslukuja on käytetty kappaleessa 4.6 esitettyssä Kylläisen laskentaidean testauksessa.

Kuten jo kappaleessa 3.6.6. tuotiin esiin, lattiapäällyste vaikuttaa askeläänitasoihin yleensä yli 250 Hz taajuuksilla. Samassa kappaleessa esitettiin myös, että nykyinen ISO 717-2 standardin mukainen vertailukäyrä menettely ja puurakenteiden akustiset ominaisuudet johtavat siihen, että pienillä taajuuksilla on merkittävin vaikutus askeläänitasoluvun määrittämisessä. Näin ollen, vaikka useat lattiapäällysteet alentavatkin askeläänitasoja merkittävästi suurilla taajuuksilla, tämä vaikutus ei näy lopullisessa askeläänitasoluvussa.

### 4.3 Alakaton parannusluku $\Delta L_{ak}$

Kylliäisen ideoimassa laskentamallissa alakaton askelääneneristävyyden parannusvaikutus huomioidaan sen ilmasteneristävyyden kautta. Perusajatuksena on, että alakattorakenteen tuoma parannus [dB] välipohjan askelääneneristävyyteen on yhtä suuri kuin alakattorakenteen parannusvaikutus [dB] ilmasteneristävyyteen. Tällöin voitaisiin hyödyntää jo käytössä olevia rakenteiden ilmasteneristävyyden laskentateorioita. Hopkins on esittänyt, että puurakenteisia välipohjia voidaan pitää ilmasteneristävyyden näkökulmasta monikerroksisina rankarakenteina [55].

Alakaton parannusvaikutuksen laskenta ilmasteneristävyyden avulla voidaan perustella myös luvun 3 havainnoilla. Kappaleessa 3.6.7 esitettiin, että välipohjan sisällä olevan absorptiomateriaalin askelääneneristävyyden parannusvaikutus on suurin, kun alakatto on kiinnitetty joustavasti palkiston alapintaan. Kappaleen 3.6.2 esityksen perusteella jousirangat vaimentavat tehokkaasti palkeista alakattolevyyn etenevää runkoääntä, jolloin alakattolevyt vaimentavat pääasiassa ilmasteitse etenevää ääntä.

Ideoidussa laskentamallissa alakaton parannusvaikutus askelääneneristävyyteen huomioidaisiin seuraavasti:

$$\Delta L_{ak} = R_w - R_{w,raakavälipohja} \quad (\text{kaava 33})$$

, jossa  $R_w$  on tutkittavan välipohjan ilmasteneristävyys [dB] ja  $R_{w,raakavälipohja}$  raakavälipohjan ilmasteneristävyys [dB]. Näin saadaan laskettua alakaton tuoma parannus ilmasteneristävyyteen.

Tämän idean testaamiseksi vertailtiin mittaustuloksia erilaisista alakattorakenteista. Vertailussa oli mukana sekä palkkirakenteisia että massiivipuuvälipohjia. Taulukoissa 6, 5, 7 ja 8 on esitetty eri välipohjarakenteista mitatut ilma- ja askelääneneristävyyksiluvut  $L_{n,w}$  ja  $R_w$  [108, 122] sekä niiden erot. Warnockin ja Birtan 1990-luvun loppupuolella tehdyissä mittauksissa on sovellettu pohjoisamerikkalaisia ASTM E90 ja ASTM E989 standardeja [122]. Näiden standardien mukaiset askel- ja ilmasteneristävyyksimittaukset vastaavat tuolloin voimassa olleita standardin ISO-140-3 ja -6 mukaisia mittauksia. Taulukoissa 6, 5, 7 ja 8 esitetyt mittaluvut on määritetty standardien ISO 717-1 ja ISO 717-2 mukaisesti [35, 36].

Taulukon 6 vertailussa on vertailtu ilman alakattoa olevia palkkivälipohjia alakatollisiin välipohjiin. Taulukossa 7 on vertailtu samaa tilannetta massiivipuuvälipohjilla.

**Taulukko 6: Mitattujen ilma- ja askeläänitasolukujen vertailu: alakatolliset ja ilman alakattoa olevat rakenteet [122].**

Vertailtavat rakenteet	$R_{w1}$ [dB]	$R_{w2}$ [dB]	$L_{n,w1}$ [dB]	$L_{n,w2}$ [dB]	$\Delta R_w$ [dB]	$\Delta L_{n,w}$ [dB]	$\Delta R_w - \Delta L_{n,w}$ [dB]
Can 37-Can 94	35	24	80	90	11	10	1
Can 1- Can 94	50	24	65	90	26	25	1
Can 41- Can94	42	24	74	90	18	16	2
Can 42- Can94	41	24	74	90	17	16	1
Can 43- Can 94	51	24	65	90	27	25	2
Can 46- Can 94	53	24	61	90	29	29	0
Can 2- Can 94	48	24	67	90	24	23	1
Can 3- Can 94	50	24	65	90	26	25	1
Can 4- Can 94	51	24	64	90	27	26	1
Can 7- Can 94	53	24	62	90	29	28	1
Can 8- Can 94	55	24	60	90	31	30	1
Can 9- Can 94	54	24	61	90	30	29	1
					Keskiarvo [dB]		1,1
					Keskihajonta		0,5

**Taulukko 7: Mitattujen ilma- ja askeläänitasolukujen vertailu: alakatolliset ja ilman alakattoa olevat massiivipuukurakenteet [1].**

Vertailtavat rakenteet	$R_{w1}$ [dB]	$R_{w2}$ [dB]	$L_{n,w1}$ [dB]	$L_{n,w2}$ [dB]	$\Delta R_w$ [dB]	$\Delta L_{n,w}$ [dB]	$\Delta R_w - \Delta L_{n,w}$ [dB]
Abo23-Abo19	57	43	68	73	14	5	9
Abo26-Abo19	53	43	56	73	10	17	-7
Abo28-Abo19	58	43	51	73	15	22	-7
Abo30-Abo19	53	43	55	73	10	18	-8

Taulukkojen 8 ja 9 vertailuissa lähtökohtina ovat alakatolliset välipohjat. Taulukossa 8 on vertailtu sekä palkki- että massiivipuuvälipohjia.



**Taulukko 8: Mitattujen ilma- ja askeläänitasolukujen vertailu: vertailtavissa rakenteissa erilaiset alakattorakenteet [1, 108, 122].**

Vertailtavat rakenteet	$R_{w1}$ [dB]	$R_{w2}$ [dB]	$L_{n,w1}$ [dB]	$L_{n,w2}$ [dB]	$\Delta R_w$ [dB]	$\Delta L_{n,w}$ [dB]	$\Delta R_w - \Delta L_{n,w}$ [dB]
Can1- Can37	50	35	65	80	15	15	0
Can 41- Can37	42	35	74	80	7	6	1
Can 42- Can37	41	35	74	80	6	6	0
Can 43- Can 37	51	35	65	80	16	15	1
Can 46- Can 37	53	35	61	80	18	19	-1
Can 1- Can 42	50	41	65	74	9	9	0
Can 43- Can42	51	41	65	74	10	9	1
Can 46- Can42	53	41	61	74	12	13	-1
Acu 7- Acu 2	64	54	52	67	10	15	-5
Can 2- Can 1	48	50	67	65	-2	-2	0
Can 3- Can 1	50	50	65	65	0	0	0
Can 4- Can 1	51	50	64	65	1	1	0
Can 7- Can 1	53	50	62	65	3	3	0
Can 8- Can 1	55	50	60	65	5	5	0
Can 9- Can 1	54	50	61	65	4	4	0
Abo5-Abo1	56	39	60	78	17	18	-1
Abo11-Abo9	63	56	45	54	7	9	-2
					Keskiarvo		-0,41
					Keskihajonta		1,4

Uudemmissa tutkimuksissa [1, 108] oli saatavilla myös spektripainotusermi  $C_{I,50-2500}$  kanssa lasketut askeläänitasot. Taulukossa 9 on esitetty spektripainotusermin kanssa lasketut ilma- ja askeläänitasojen erot.

**Taulukko 9: Mitattujen ilma- ja askeläänitasolukujen vertailu ( $C_{I,50-2500}$  spektripainotus huomioitu): alakatolliset ja ilman alakattoa olevat massiivipuurakenteet [1].**

Vertailtavat rakenteet	$R_{w1}$ [dB]	$R_{w2}$ [dB]	$L_{n,w1} + C_{I,50-2500}$ [dB]	$L_{n,w2} + C_{I,50-2500}$ [dB]	$\Delta R_w$ [dB]	$\Delta L_{n,w}$ [dB]	$\Delta R_w - \Delta L_{n,w}$ [dB]
Abo23-Abo19	57	43	55	72	14	17	-3
Abo26-Abo19	53	43	61	72	10	11	-1
Abo28-Abo19	58	43	55	72	15	17	-2
Abo30-Abo19	53	43	58	72	10	14	-4

Taulukoissa 6 ja 8 esitettyjen tulosten perusteella palkkirakenteisilla välipohjilla alakatton vaikutus ilmaääneneristävyyteen ja askelääneneristävyyteen oli lähes yhtä suuri. Taulukoissa 5 ja 9 esitettyjen tulosten perusteella massiivipuu välipohjilla ilma- ja askelääneneristävyydet eivät korreloi yhtä tarkasti kuin palkkivälipohjilla. Toisaalta, kun

spektripainotusermi  $C_{50-2500}$  otetaan huomioon laskennassa alakaton tuoma muutos ilmääneneristävyyteen vastaa paremmin myös askeläänitasomuutosta. Alakaton parannusluvun laskentamenetelmän vahvistamiseksi tarvitaan vielä lisää mittaustuloksia varsinkin massiivipuuvälipohjista.

### 4.3.1 Parannusvaikutus 1/3-oktaavikaistoittain

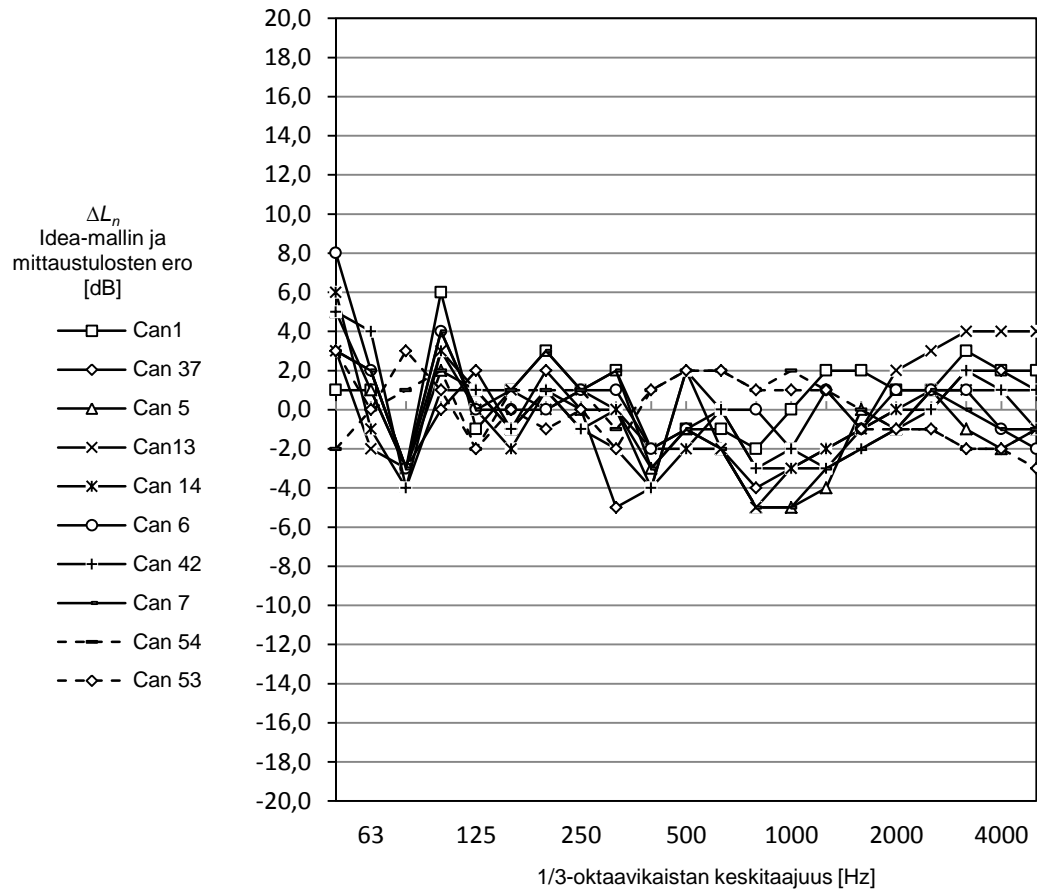
Warnock et al. ja Balanant et al. [1, 122] tutkimuksista on saatavissa sekä askel- että ilmääneneristävyyden mittaustulokset useille kymmenille puuvälipohjille. Nämä tulokset mahdollistivat Kylliäisen laskentaidean tarkemman testaamisen alakattojen osalta. Seuraavassa on esitetty lyhyesti alakaton parannusluvun laskenta 1/3-oktaavikaistoilla:

$$\Delta L_{i,ak} = R_i - R_{i,raw} \quad (\text{kaava 34})$$

, jossa  $i$  kuvaa tarkasteltavaa 1/3-oktaavikaistan keskitaajuutta 50-5000Hz taajuusalueella. Alakaton parannusvaikutus huomioidaan välipohjan askeläänitasoissa seuraavasti:

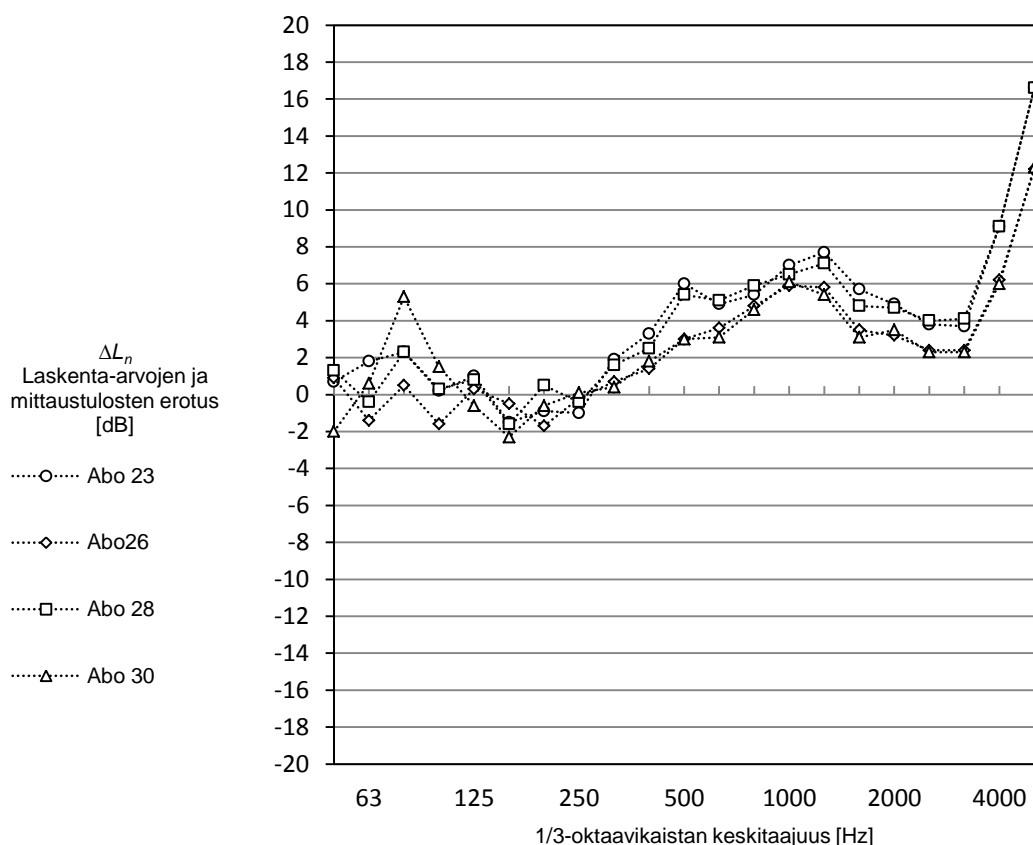
$$L_i = L_{i,raw} - \Delta L_{i,ak} \quad (\text{kaava 35})$$

, jossa  $L_{i,raw}$  on raakavälipohjan askeläänitaso tutkittavalla 1/3-oktaavikaistan keskitaajuudella. Kuvan 72 kuvaajassa on esitetty kaavojen 34 ja 35 perusteella määritettyjen askeläänitasojen ja mittaustulosten välinen erotus [dB] palkkivälipohjilla. Kaavojen 34 ja 35 lähtöarvoina käytettiin mittaustuloksia [122].



***Kuva 72: Kylläisen laskentaidealla lasketun askeläänitason ja mitatun askeläänitason erotus [dB] palkkivälipohjilla [122]. Kylläisen mallissa on käytetty lähtöarvoina mittaustuloksi Warnock et al. tutkimuksesta.***

Kuvan 73 kuvaajassa on esitetty kaavoilla 34 ja 35 lasketun 1/3-oktaavin askeläänitason erotus mittaustuloksista, kun raakavälipohja oli massiivipuuta.



**Kuva 73: Kylläisen laskentaidealla lasketun askeläänitason ja mitatun askeläänitason erotus [dB] massiivipuuvälipohjilla [1].Kylläisen mallissa on käytetty lähtöarvoina mittaustuloksia Balanant et al. tutkimuksesta.**

Kuvien 72 ja 73 kuvaajista voidaan havaita, että palkkivälipohjilla alakattoteoria näyttäisi toimivan paremmin koko taajuusalueella kuin massiivipuuvälipohjilla. Kuvan 72 kuvaajasta nähdään, että mittaustuloksiin perustuvan laskentamallituloksen ja mitatun askelääneneristävyyden erotus oli suurin alle 125 Hz taajuuksilla ja 1000 Hz taajuusalueella.

#### 4.4 Välipohjan ilmaääneneristävyyden laskenta ”Raimo”-lla

Vaikka puurakenteiden askelääneneristävyyden laskentamallit ovat vielä kehitystyön alla, puurakenteiden ilmaääneneristävyys kyetään laskemaan verrattain hyvällä tarkkuudella [52, 55, 70, 71, 103, 115]. Kappaleessa 4.3 todettiin, että alakaton parannusvaikutus voidaan laskea ilmaääneneristävyyden mittaustuloksista. Tuotekehityksen ja päivittäisen laskentatyön kannalta laboratoriomittauksiin perustuva laskenta on hidasta ja kallista, kuten tämän tutkimuksen johdantokappaleessa tuotiin esille. Tämän vuoksi alakaton parannusluku on tehokkaampaa laskea käytössä olevien ilmaääneneristävyyden laskentamallien avulla.

Monikerroksisen levy-ranka-rakenteen ilmaääneneristävyyden laskentaan on kehitetty TTY:llä Excel-pohjainen laskentaohjelma ”Raimo”. Se perustuu ilmaääneneristävyyden laskentamalliin, joka on koottu Sharpin, Hongiston ja Kylliäisen julkaisuissa esittämistä laskentateorioista [52, 71, 103]. Seuraavissa kappaleissa on esitelty laskentaohjelmassa käytettävät laskentakaavat ja niiden taustalla oleva teoria kaksinkertaisen rakenteen ilmaääneneristävyydestä.

Kaksinkertaisen seinärakenteen ilmaääneneristävyys voidaan jakaa kolmeen osaan rakenteen akustisen toiminnan perusteella. Alueet määritetään massa-ilmajousi-massa systeemin rajataajuuksien  $f_{mam}$  ja ylärajataajuuden  $f_d$  perusteella. Vaikka laskentaohjelmassa  $f_d$ :tä ei tarvita kytketyn rakenteen laskemiseksi, esitellään se kuitenkin kaavassa 36.

$$f_d = \frac{c_0}{2\pi \cdot d} \quad (\text{kaava 36})$$

Käytännössä  $f_{mam}$  taajuuden alapuolella ja  $f_d$  taajuuden yläpuolella kaksinkertaisen kytkemättömän rakenteen ilmaääneneristävyys perustuu eri seinän osien eristävyysiin. Kun tarkasteltava taajuus  $f$  on  $f_{mam} < f < f_d$ , kaksinkertaisen rakenteen eristävyys perustuu massa-ilmajousi-massa systeemin yhteisvaikutukseen. Tällöin kaksoisrakenteen eristävyysvaikutus on parhaimmillaan.

Kaksinkertaisen kytketyn rakenteen massa-ilmajousi-massa resonanssin rajataajuus voidaan laskea kaavalla 37, jossa  $m_1$  on yläpuolisen levyn pintamassa [ $\text{kg/m}^2$ ] ja  $m_2$  on alapuolisen levyn pintamassa [ $\text{kg/m}^2$ ].  $d$  on ilmaraon paksuus [m].

$$f_{mam} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho_0 \cdot c_0^2}{d} \cdot \left( \frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right)} \approx 80 \cdot \sqrt{\frac{1}{d} \cdot \frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2}} \quad (\text{kaava 37})$$

Kaavassa 37  $\rho_0$  on ilman tiheys [ $\text{kg/m}^3$ ] ja  $c_0$  on äänennopeus ilmassa [m/s]. Kun oletetaan ilman lämpötilan olevan  $+20^\circ\text{C}$ , voidaan käyttää kaavan 37 mukaista likiarvoa  $f_{mam}$  laskentaan [70, 115]. Rajataajuuden  $f_{mam}$  alapuolella rakenteen eristävyys perustuu yksittäisten levyjen eristävyYTEEN, sillä rakenteen kaksi puolta on kytketty toisiinsa välitilassa olevan ilman akustisen jäykkyyden ansiosta. Seinän sisällä oleva absorptiomateriaali ei vaikuta eristävyYTEEN  $f_{mam}$  alapuolella [70, 115]. On myös osoitettu, että  $f_{mam}$  alapuolella ilman rankaa ja rangallisen rakenteen ilmaääneneristävyys voidaan laskea samalla tavalla [70, 103]. Vuonna 1978 Sharp esitti, että  $f_{mam}$  alapuolella kaksinkertaisen rakenteen eristävyys voitaisiin laskea yksinkertaisesti kaavassa 10 esitetyn massalain avulla. Tällöin ei kuitenkaan oteta huomioon yksittäisten levyjen akustista toimintaa  $f_{mam}$  taajuuden alapuolella: esimerkiksi ominaistajuuksia, jotka heikentävät rakenteen eristävyYTEEN merkittävästi [52]. Siksi ”Raimo”-ssa käytetään Hongiston esittämää energiaperiaatetta, joka huomioi rakenteen molempien puolien akustisen toiminnan. Energiaperiaate on esitetty kaavassa 38.

$$R = 20 * \log_{10} \left( 10^{\frac{R_1}{20}} + 10^{\frac{R_2}{20}} \right) \quad f < f_{mam} \quad (\text{kaava 38})$$

$R_1$  ja  $R_2$  ovat kaksinkertaisen rakenteen eri puolien ilmasteneristävyydet, jotka lasketaan 1/3-oktaavi taajuuksittain kappaleessa 3.2.1 esitetyllä tavalla. Jos rakenteen pinnoissa on useampia levyjä, jotka on liitetty löyhästi toisiinsa, esimerkiksi ruuvaamalla, useamman levyn yhdistetty ilmasteneristävyys lasketaan ”Raimo”-ssa kaavalla 39, jossa eri levyjen eristävyydet summataan Hongiston esittämän energiaperiaatteen mukaisesti:

$$R_{kok} = 20 * \log_{10} \left( \sum_{n=1}^i 10^{\frac{R_i}{20}} \right) \quad (\text{kaava 39})$$

Rajataajuudella  $f_{mam}$  tai sen yläpuolella ilmasteneristävyys arvioidaan Raimolaskentaohjelmassa Sharpin ja Hongiston tutkimuksiin perustuvan minimiehdon perusteella [52, 103]. Minimiehdon mukaan mitoitettavaksi ilmasteneristävyyden arvoksi valitaan pienimmän arvon tuottava kaava. Minimiehto tarkistetaan erikseen jokaisella 1/3-oktaavin tarkastelutaajuudella [52].

$$R = \min \begin{cases} 20 * \log_{10} \left( 10^{\frac{R_1}{20}} + 10^{\frac{R_2}{20}} \right) + \Delta R_M + \Delta R_{fb} \\ R_1 + R_2 + 20 * \log_{10}(f * d) - 29 + \Delta R_{cav} \\ R_1 + R_2 + 6 + \Delta R_{cav} \end{cases} \quad f \geq f_{mam} \quad (\text{kaava 40})$$

Rankojen vaikutus seinän ääneneristävyyteen otetaan huomioon  $\Delta R_{fb}$  korjaustermin avulla. Kaava 41 on minimiehto, jossa korjaustermin arvoksi valitaan pienempi kyseisen kaavan lausekkeista [52].

$$\Delta R_{fb} = \min \begin{cases} -5 * \log_{10} \left( \frac{1 + 4 * \xi^2 \left( \frac{f}{f_r} \right)^2}{\left[ 1 - \left( \frac{f}{f_r} \right)^2 \right]^2 + 4 * \xi^2 \left( \frac{f}{f_r} \right)^2} \right) \\ R_{fb,max} \end{cases} \quad (\text{kaavat 41})$$

$\xi$  on vaimennussuhde [-].  $f_r$  on rakenteen massa-jousi-massaresonanssitaajuus, joka lasketaan kaavalla 43. Rankaseinän dynaaminen jäykkyys yksikköalaa kohden on  $K''$  [MN/m<sup>3</sup>]. Yleensä valmistajat ilmoittavat rangan dynaamisen jäykkyyden  $K'$  [MN/m<sup>2</sup>] rangan yksikköpituutta kohden, joten yksikköalan laskemiseksi huomioidaan rankojen k-jako kaavassa 42 esitetyllä tavalla.

$$K'' = \frac{K'}{b} \quad (\text{kaava 42})$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi} * \sqrt{K'' * \frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2}} \quad (\text{kaava 43})$$

$m_1$  ja  $m_2$  ovat rakennuslevyjen pintamassat, kuten kaavassa 37.

Jos kaksinkertaisen rakenteen ilmvälissä ei ole absorptiomateriaalia, ilmväliin muodostuu kaiuntainen äänikenttä ja ilmväliin syntyy voimakkaita resonansseja [52]. Absorptiomateriaalin parannusvaikutus perustuu välitilan kaiunnan estämiseen [52, 115]. Lähes levyypinnan suuntaisesti kulkevien ääniaaltojen vaimentaminen on erityisen tärkeää koinsidenssi-ilmiön kannalta, kuten aiemmin todettiin. Ilmvälin vaimennuksen parannusvaikutus huomioidaan kaavan 44  $\Delta R_{cav}$  termillä

$$\Delta R_{cav} = 10 * \log_{10} \alpha_{eff} \quad (\text{kaava 44})$$

Tehokas absorptiokerroin  $\alpha_{eff}$  lasketaan kaavan 45 mukaisesti, jossa  $\alpha$  on ilmvälissä olevan materiaalin absorptiokerroin [-] ja  $FR$  on ilmvälin täyttöaste [-].

$$\alpha_{eff} = \alpha * FR \quad (\text{kaava 45})$$

Ilmvälin täyttöaste lasketaan kaavan 46 mukaisesti, jossa  $d_{ab}$  on absorptiomateriaalin paksuus [m] ja  $d$  on koko ilmvälin paksuus [m].

$$FR = \frac{d_{ab}}{d} \quad (\text{kaava 46})$$

$\Delta R_{cav}$  huomioidaan vain kaviteetin alimman resonanssitaajuuden  $f_{cav}$  yläpuolella.  $f_{cav}$  lasketaan kaavalla 47.

$$f_{cav} = \frac{c_0}{2 * MAX(L_x, L_y)} \quad (\text{kaava 47})$$

Kaavassa 47 esiintyvä maksimilauseke tarkoittaa, että kahdesta suluissa olevasta vaihtoehdosta valitaan suurempi.  $L_y$  on kaviteetin korkeus [m] ja  $L_x$  on kaviteetin leveys [m].  $f_{cav}$  laskenta perustuu oletukseen, että seinän ilmväli on suljettu tila ja sinne muodostuu seisova-aaltoliike samalla tavalla kuin molemmista päistä suljettuun putkeen.

Levyjen kytkennällä eli kiinnitystavalla on vaikutusta rankarakenteisten rakenteiden ilmväleneristävyyteen. Kytkentä voi olla joko viivamainen tai pistemäinen. Yleensä levyjen liitokset rankoihin ovat viivamaisia [103]. Raimo-laskentaohjelmassa kytkennän vaikutus otetaan huomioon Sharp [103] ja Hongiston [52] esittämällä tavalla,

$$\Delta R_{M,viiva} = 10 * \log_{10}(b * f_{cr}) + 20 * \log_{10}\left(\frac{\max(m_1, m_2)}{m_1 + m_2}\right) - 18 \quad (\text{kaava 48})$$

$$\Delta R_{M,piste} = 20 * \log_{10}\left(\sqrt{\frac{1}{n}} * f_{cr}\right) + 20 * \log_{10}\left(\frac{\max(m_1, m_2)}{m_1 + m_2}\right) - 45 \quad (\text{kaava 49})$$

jossa  $b$  on viivakytkentöjen välinen etäisyys [m], tässä tapauksessa rankojen k-jako ja  $n$  on pistekytkentöjen määrä [kpl/m<sup>2</sup>]. Kaavoissa 48 ja 49 käytettävä  $f_{cr}$  on kevyemmän levyn koinsidenssin rajataajuus.

Jos laskettavassa rakenteessa on useita peräkkäisiä liitoksia, Raimo-laskentaohjelma muodostaa liitoksista liitosryhmän. Välipohjien ilmaääneneristävyyksiä laskettaessa liitosryhmä muodostuu, kun välipohjan kannatinpalkkeihin kiinnitetään alakaton ripustukseen käytettävät jousirangat. Liitosryhmän laskennassa eri osat huomioidaan seuraavilla laskentasäännöillä [52]:

- ilmväliden paksuudet yhdistetään  $d = d_1 + d_2$
- ilmväliden absorptiokertoimelle lasketaan keskiarvo  $\alpha = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}$
- dynaamisista jäykkyyksistä valitaan pienempi  $K'' = \min(K''_1, K''_2)$
- ilmväliden täyttöasteet kerrotaan keskenään  $FR = FR_1 * FR_2$
- rungon jakoväleistä valitaan kapeampi (ilmavälillä 0)  $b = \min(b_1, b_2)$

Raimo-laskentaohjelmalla voidaan yllä olevien sääntöjen puitteissa laskea kahden liitoksen liitosryhmiä. Tämä ei aiheuta rajoitteita tässä tutkimuksessa tehtyihin laskelmiin.

#### 4.4.1 Laskentaan liittyvät reunaehdot

”Raimo”:n jatkokäyttöä varten ja Kylliäisen laskentaidean testaamiseksi laskentatuloksia vertailtiin tutkimuksista [122] saatuihin ilmaääneneristävyyden mittaustuloksiin. Vertailuun käytettiin laboratorio-olosuhteissa mitattuja ilmaääneneristävyyksiä. Mittaus- ja laskentatulosten vertailussa tulee ottaa huomioon laskentamalliin liittyvät rajoitteet. Hongisto on esittänyt tutkimusraportissaan muutamia laskentatapaan liittyviä rajoitteita, jotka sisältyvät myös Raimo-laskentaohjelman laskentaan [52]:

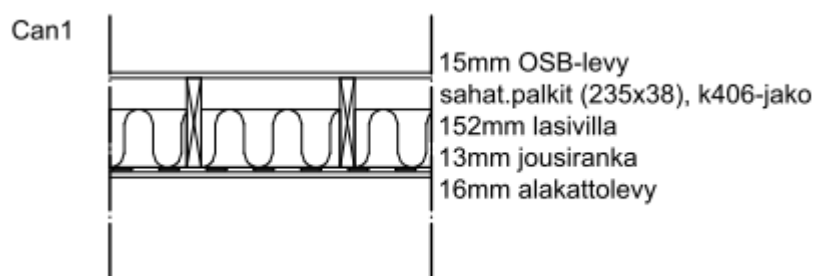
- ilmväliden absorptiosuhteen määrittäminen: absorptiosuhde ei ole sama kuin ilmvälissä olevan absorptiomateriaalin kaiuntahuoneessa tai impedanssiputkella mitattu absorptiosuhde, koska äänikenttä on lähes tasomainen koko tarkasteltavalla alueella.
- koinsidenssitaajuus ja sen yläpuolinen alue ei toimi yksinkertaisilla ohuilla levyillä hyvin. Merkittävä ongelma erityisesti jäykillä levyillä
- joustavien rankojen dynaamisen jäykkyyden määrittäminen
- jäykkien rankojen ja toisiaan lähellä olevien jäykkien tukirankojen aiheuttamat ominaistajuudet: mittausten perusteella resonanssit ovat erittäin voimakkaita matalilla taajuuksilla: jopa 20 dB

Raimo-laskennassa tarvittavat materiaaliparametrit, kuten eri materiaalien pintamassat ja jäykkyysominaisuudet, saatiin joko lähdeaineistona olleista tutkimusraporteista tai arvioitiin tutkimusraporteista saatujen tietojen perusteella. Esimerkiksi kanadalaisesta Warnockin et al. tutkimushankkeesta [122] ei ollut saatavissa tietoa levyjen ja rankojen jäykkyysominaisuuksista. Kipsilevyjen jäykkyysominaisuudet arvioitiin valitsemalla mahdollisimman samankaltainen eurooppalainen tuote, josta oli saatavilla myös puuttuvat materiaalitiedot. OSB-levyjen puuttuvat materiaalitiedot saatiin kanadalaisen SBA



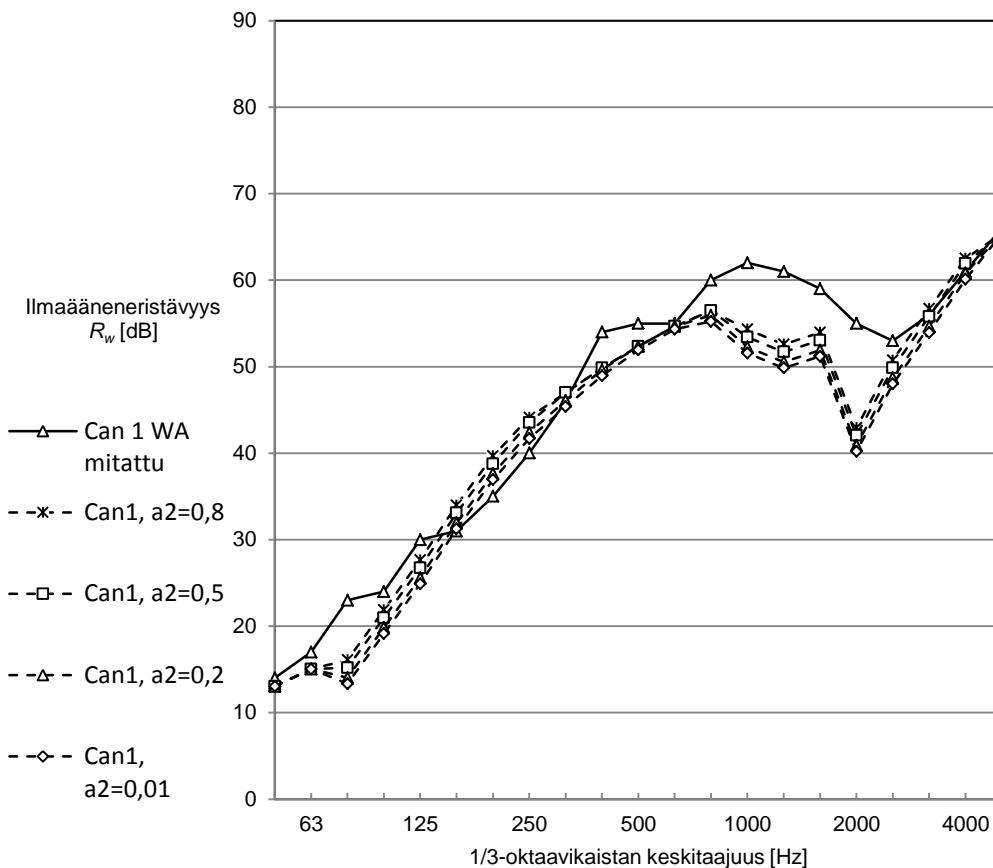
”Structural Board Association” julkaisusta: ”OSB Design Manual” [110]. Koska materiaalien ominaisuuksista ei ollut kaikissa tapauksissa tarkkoja tietoja, laskentaa tehtiin osin kokeilu-periaatteella. Laskentaohjelmaan syötettäviä materiaaliparametreja vaihdeltiin realistisissa rajoissa siten, että 1/3-oktaavikaistoittain laskettu ilmaääneneristävyys saatiin vastaamaan mittaustuloksia mahdollisimman hyvin.

Alustavassa tutkimuksessa selvitettiin, millaisia parametreja Raimo-laskentaohjelmassa tulisi käyttää, kun rakenteessa on useampia rankoja ja ilmvälejä. Kuten Hongisto on esittänyt, ilmvälin absorptiosuhde ei ole sama kuin ilmvälissä olevan absorptiomateriaalin absorptiosuhde. Tämä tulee esiin, kun lasketaan esimerkiksi Can 1-rakennetta, joka on esitetty kuvassa 74. Vaikka jousirangan muodostama ilmväli on tyhjä, se rajautuu alapuolelta kipsilevyyn ja yläpuolelta voimakkaasti ääntä absorboivaan lasivillaan, jolloin ilmvälin kaiuntaolosuhteet eivät vastaa absorptiosuhteen arvoa 0.



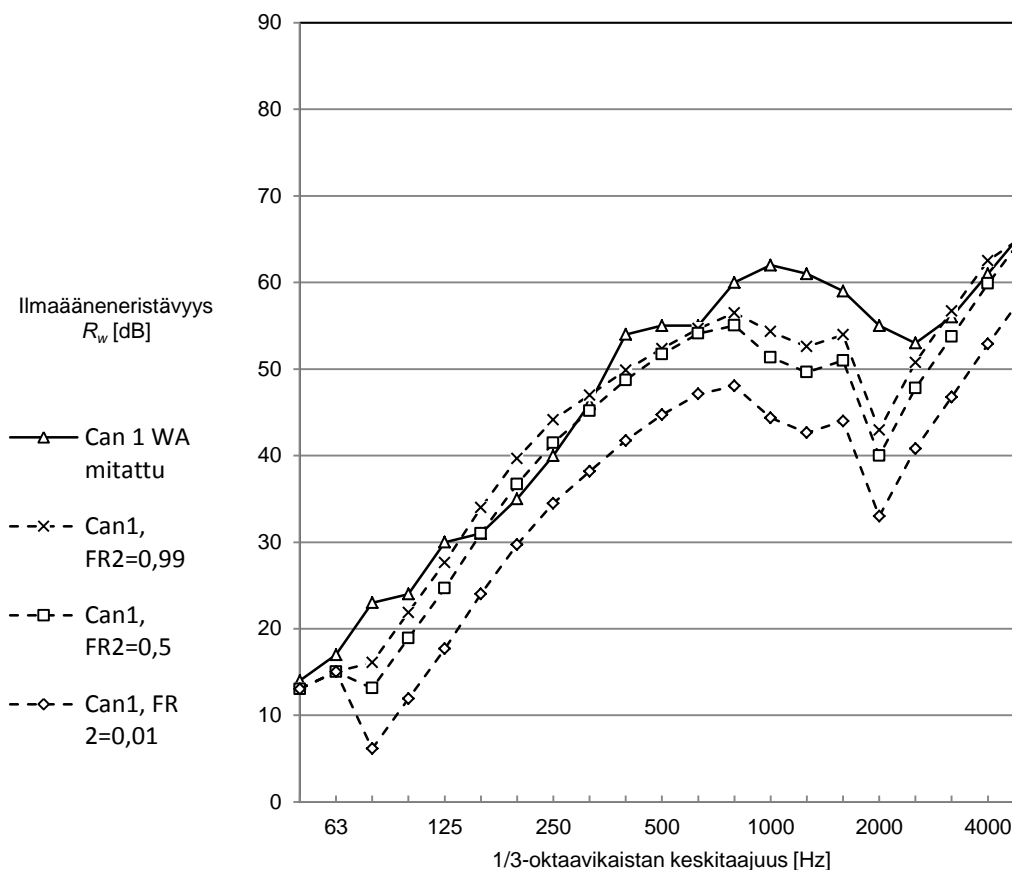
**Kuva 74: Välipohjarakenne Can 1 [122].**

Kuvassa 74 esitetyn välipohjarakenteen Can 1 pienemmän ilmvälin absorptiosuhteen vaikutus välipohjan ilmaääneneristävyyteen on esitetty kuvan 75 kuvaajassa. Kuten kuvaajasta voidaan nähdä, ”tyhjän” ilmvälin absorptiosuhteen kasvatus 0,01-0,8 parantaa laskenta- ja mittaustulosten vastaavuutta.



**Kuva 75: Tyhjän ilmvälin absorptiosuhteen vaikutus "Raimolla" laskettuun ilmaääneneristävyyteen Can1 rakenteella. "a2" kuvaa jousirangan muodostaman ilmvälin absorptiosuhdetta. Absorptiomateriaalilla täytetyn ilmvälin absorptiosuhde on tässä 0,8.**

Toinen kahden ilmvälin huomiointiin liittyvä seikka on ilmvälien täyttöasteet  $FR$ . Raimo-laskentaohjelmassa kahden ilmvälin vaikutus huomioidaan kertomalla niiden täyttöasteet toisillaan. Tällöin kummankin ilmvälin täyttöasteella on yhtä suuri painoarvo välipohjan kokonaistäyttöasteeseen. Can 1 välipohjan laskennassa jousirangan muodostaman ilmvälin täyttöasteen vaikutus välipohjan ilmaääneneristävyyteen on esitetty kuvan 76 kuvaajassa.



**Kuva 76: "Tyhjän" ilmapölyn täyttöasteen FR vaikutus välipohjan ilmaääneneristävyyden rakenteella Can1.**

Alustavan tutkimuksen perusteella voidaan todeta, että jos tyhjä ilmapöly todellisuudessa rajoittuu absorboiviin materiaaleihin ja ilmapölyn korkeus suhteessa rakenteen kokonaispaksuuteen on pieni, ilmapölyn absorptiosuhteen arvona voidaan käyttää ilmapölyä rajaavan absorptiomateriaalin absorptiosuhdetta. Tyhjän ilmapölyn täyttöasteena käytetään tulevaisuudessa laskentatapauksissa 0,99.

#### 4.4.2 Vertailu mittaustuloksiin

Lähtökohtaisesti "Raimo" on kehitetty monikerroksisten rankarakenteiden laskentaan. Tutkimustarkoituksessa laskettiin myös yksinkertaisten rangoilla tuettujen levyjen ilmaääneneristävyyksiä. Kuten kappaleessa 3.3 tuotiin esille, levyjen kiinnitys rankoihin muuttaa merkittävästi levyn akustista käyttäytymistä. "Raimo"-laskentaohjelma ei nykyisellään ota huomioon sitä, että rankakiinnitys muuttaa levyn värähtelyominaisuuksia ja lisää rakenteen kokonaismassaa. Laskentaohjelma ei myöskään ota huomioon rakenteen ominaistuuksia, jotka vaikuttavat erityisesti pienten taajuuksien akustiseen toimintaan [52].

Warnock et al. tutkimuksessa lattiapalkit (38 mm x 235 mm) oli kiinnitetty k406-jaolla 15 mm OSB-levyyn. Olettaen [24], että puupalkkien tiheys on noin  $500 \text{ kg/m}^3$ , palkisto lisää välipohjarakenteen massaa  $11,2 \text{ kg/m}^2$ . Alustavassa tutkimuksessa havaittiin, että välipohjan pintamassan lisäys  $11,2 \text{ kg}$ :lla vääristää laskentatuloksia merkittävästi. Tämän vuoksi koelaskenta tehtiin pienemmällä  $4,4 \text{ kg/m}^2$  kokonaispintamassan muutoksella.

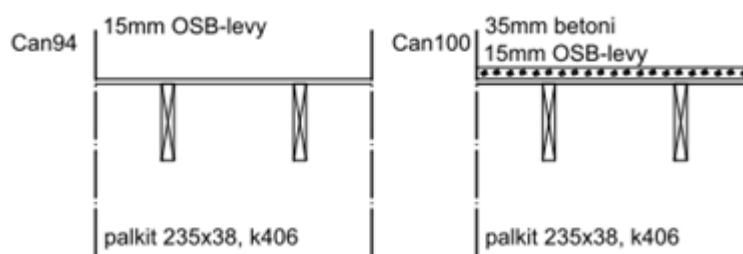
Hongiston mukaan Helenius on esittänyt väliseinien ilmaääneneristävyyden tutkimuksen yhteydessä, että jäykästi reunoiltaan tuetun levyn taivutusjäykkyys olisi noin 4-kertainen vapaasti tuettuun levyyn nähden. Levyn jäykä tuenta vastaa tilannetta, jossa levy on kytketty rankoihin [52]. Kiinnityksen ja lisämäärän vaikutusten selvittämiseksi välipohjarakenteiden laskennassa kokeiltiin kolmea eri laskentatapaa:

*Laskentatapa 1:* Levyjen pintamassat ja kimmokertoimet valittiin mahdollisimman tarkasti mittaustilannetta vastaaviksi. Lähtöarvot on saatu kyseisistä tutkimuksista [1, 122], ”Raimon” tietokannasta [69] ja alan kirjallisuudesta [110].

*Laskentatapa 2:* levyjen kokonaispintamassaa kasvatettiin noin  $4,4 \text{ kg/m}^2$  ja lattialevyn taivutusjäykkyys 4-kertainen laskentatapaan 1 nähden.

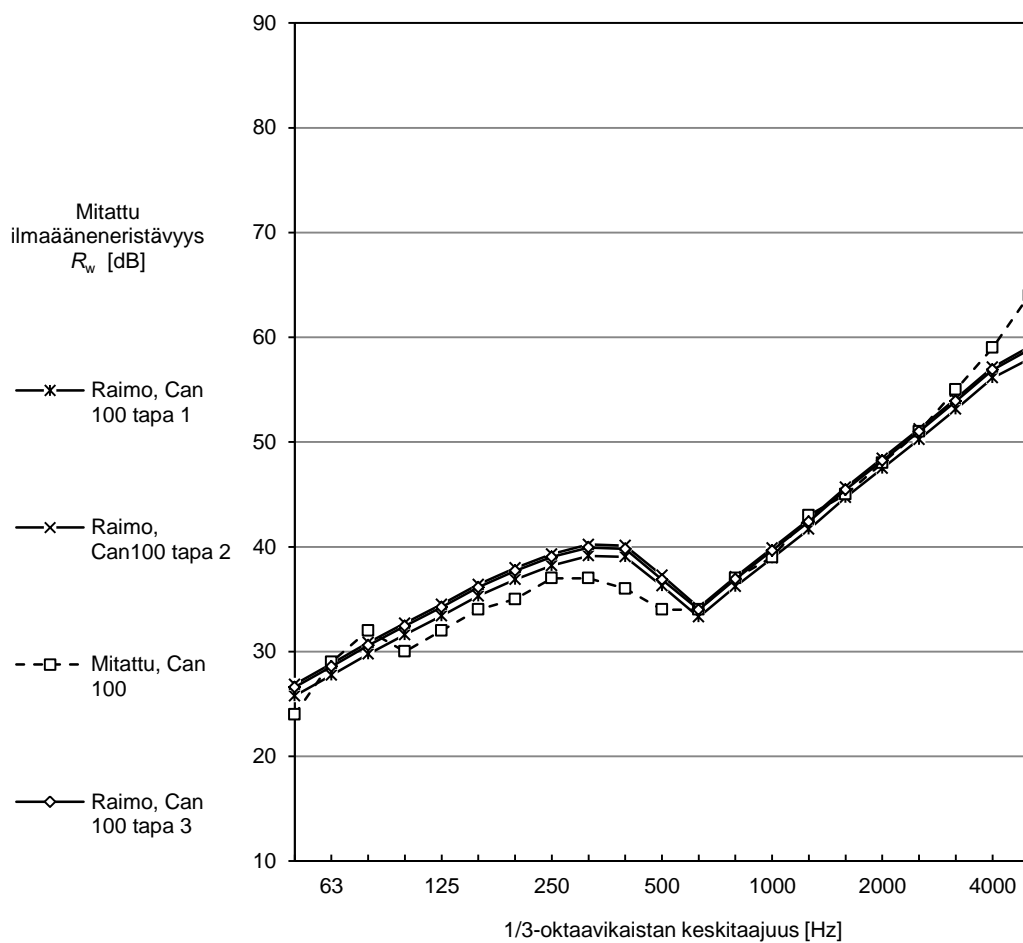
*Laskentatapa 3:* vain lattialevyn taivutusjäykkyyttä on muutettu. Lattialevyn taivutusjäykkyys on 4-kertaiseksi laskentatapaan 1 nähden.

Laskentatapoja testattiin sekä yksinkertaisille että monikerroksisille välipohjarakenteille. Yksinkertaisten rakenteiden leikkauskuvat on esitetty kuvassa 67. Kuvan 68 kuvajassa on esitetty eri laskentatapojen tuottamat ilmaääneneristävyydet 1/3-oktaavikaistoittain. Vertailuarvoina on käytetty Warnock et al. mittaustuloksia [122]. Tutkimusraportin perusteella [122] saatiin tieto rakennusosien dimensiot ja tiheydet. Laskentaa varten materiaalien kimmokertoimet, Poissonin luvut ja sisäiset häviökertoimet arvioitiin Raimon tietokannoissa olleiden vastaavien materiaalien perusteella.



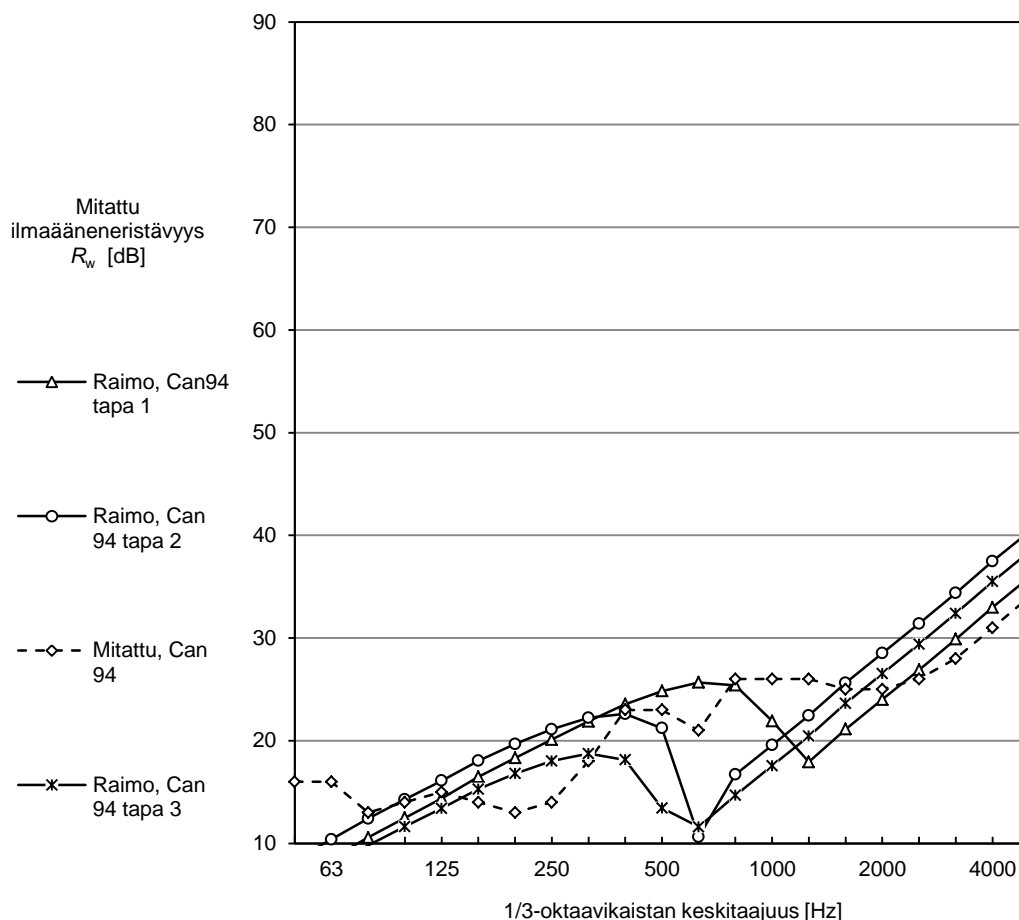
**Kuva 77: Raakavälipohjarakenteet Can 94 ja Can100, mittakaava 1:20 [122].**

Kuvassa 78 on esitetty Can 100 rakenteelle eri laskentatavoilla ”Raimolla” lasketut ilmaääneneristävyyden tulokset sekä vertailuarvoina kyseisten välipohjien mittaustulokset [122] tutkimuksesta.



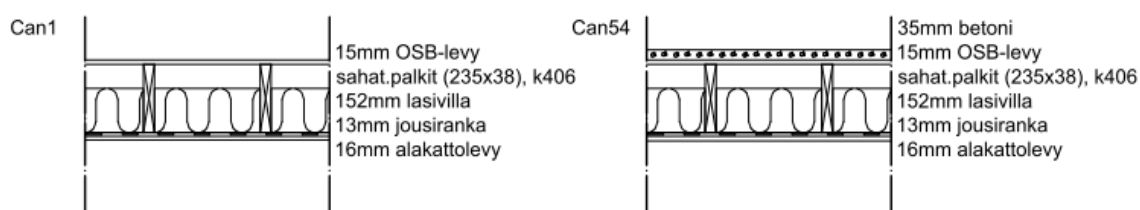
**Kuva 78: Eri laskentatapojen tuottamat ilmääneneristävyydet 1/3-oktaavikaistoittain Can 100 rakenteella. Vertailuarvoina mittaustulokset Warnock et al. tutkimuksesta [122].**

Kuvan 79 kuvaajassa on esitetty eri laskentatapojen tuottamat ilmääneneristävyydet 1/3-oktaavikaistoittain, kun tutkittava rakenne on Can 94 välipohja.



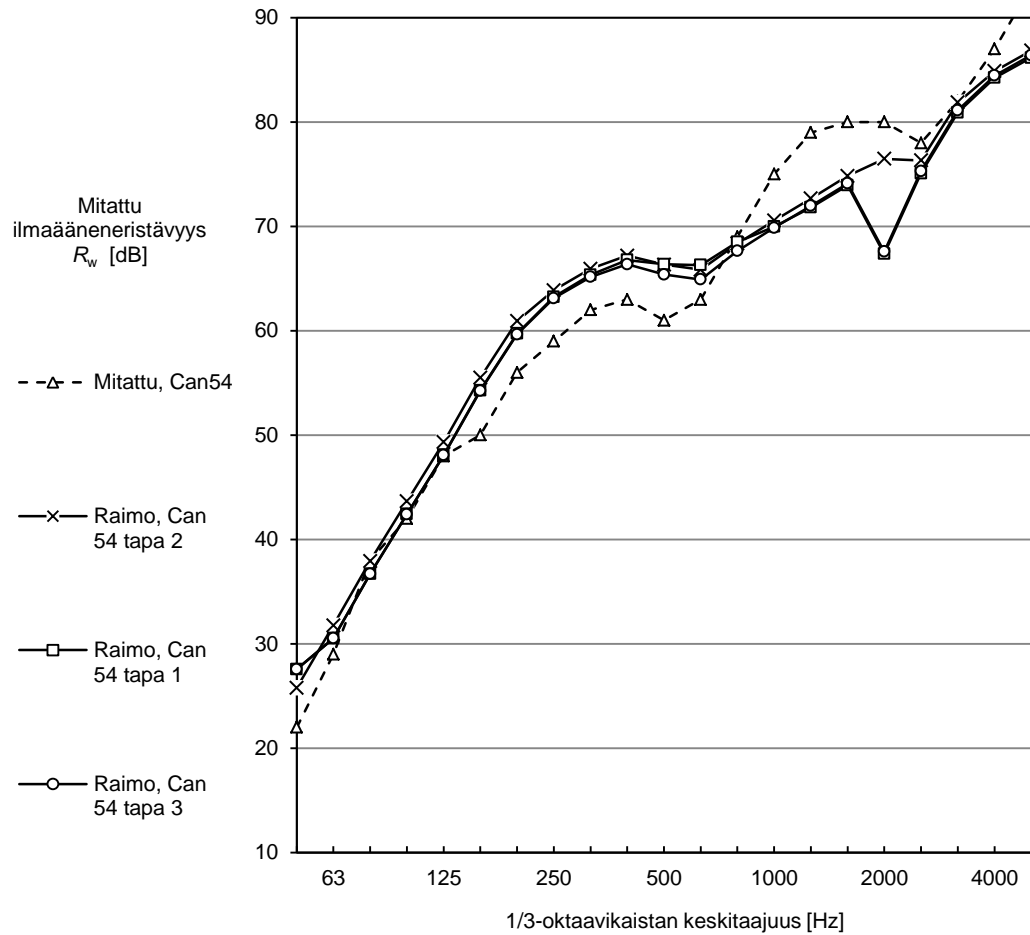
**Kuva 79: Eri laskentatapojen tuottamat ilmääneneristävyden 1/3-oktaavikaistoittain rakenteelle Can 94. Vertailuarvoina ovat Warnock et al. mittaustulokset [122].**

Monikerroksisten välipohjien ilmääneneristävyden laskennallista mallintamista tutkittiin kahdella eri välipohjarakenteella. Rakenteiden leikkauskuvat on esitetty kuvassa 80. Rakenteiden laskentaan sovellettiin edellä esitettyjä laskentatapoja 1, 2 ja 3.



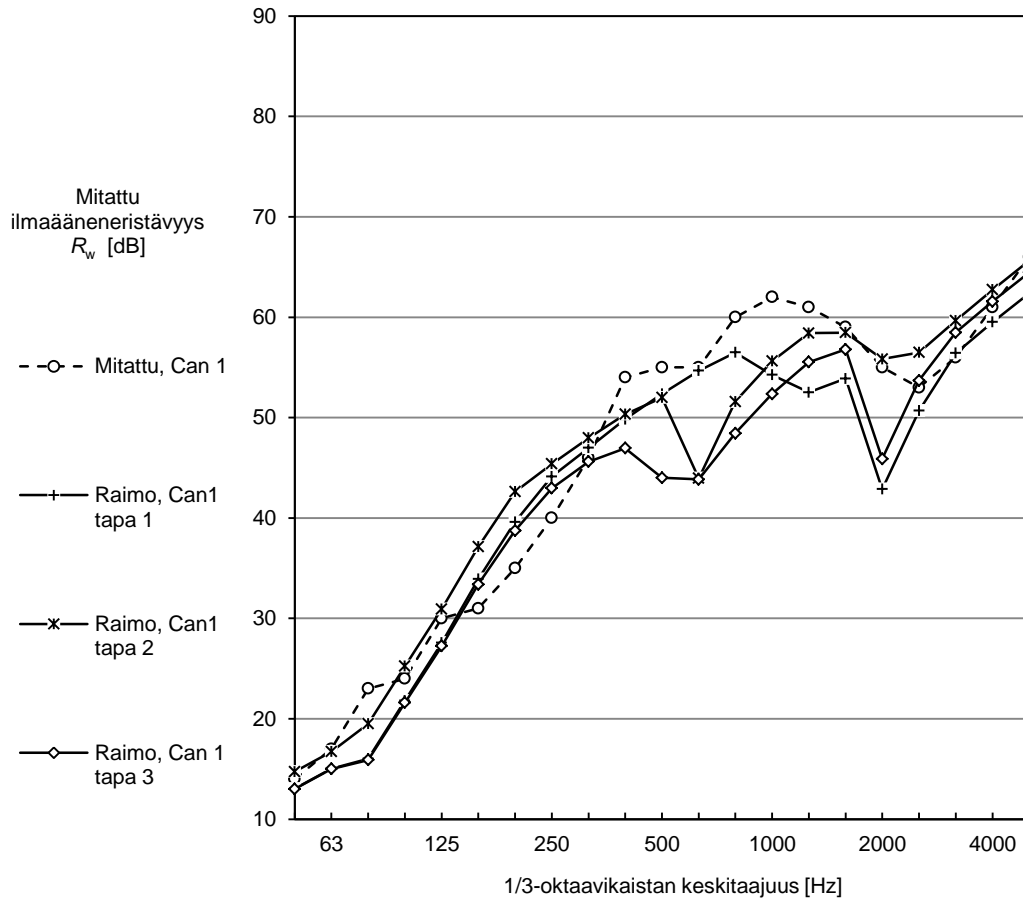
**Kuva 80: Välipohjarakenteiden Can1 ja Can54 leikkauskuvat, mittakaava 1:20.**

Kuvan 81 kuvaajassa on esitetty Can 54 rakenteen laskennalliset ilmääneneristävydet eri laskentatavoilla. Vertailuarvoina on esitetty Warnock et al. tutkimuksesta saadut välipohjan ilmääneneristävyden mittaustulokset [122].



**Kuva 81: Eri laskentatapojen tuottamat ilmääneneristävyydet 1/3-oktaavikaistoittain rakenteella Can 54. Vertailuarvoina ovat Warnock et al. mittaustulokset [122].**

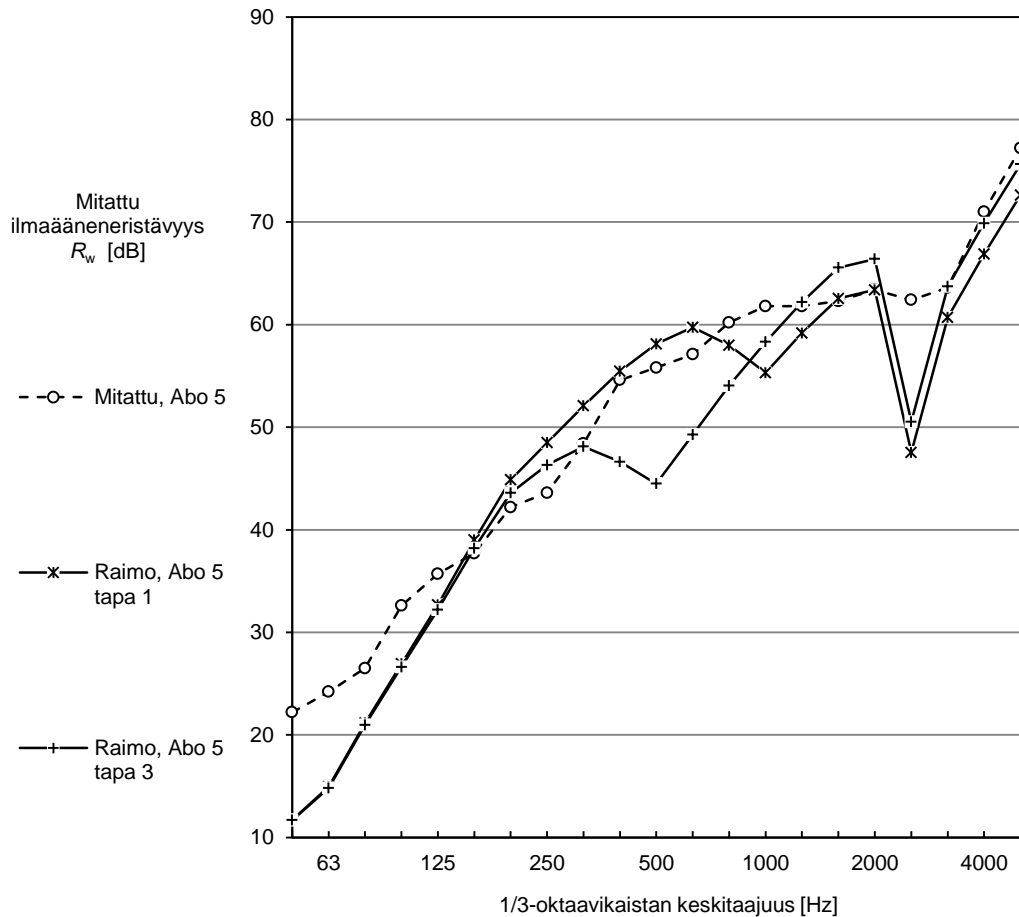
Kuvan 82 kuvaajassa on esitetty eri laskentatapojen tuottamat ilmääneneristävyydet 1/3-oktaavikaistoittain. Vertailuarvoina on esitetty myös Warnock et al. ilmääneneristävyyden mittaustulokset kyseisestä välipohjamallista [122].



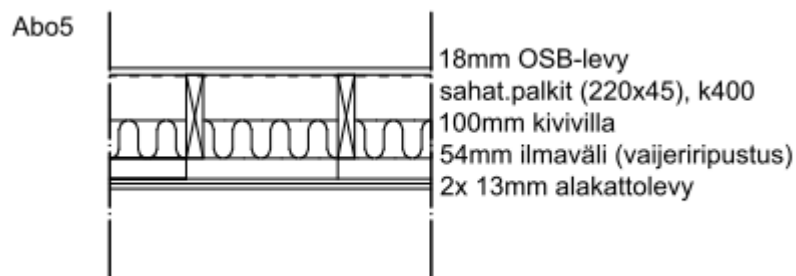
**Kuva 82: Eri laskentatapojen tuottamat ilmäääneneristävyydet 1/3-oktaavikaistoittain Can 1 rakenteella. Vertailuarvoina ovat Warnock et al. mittaustulokset Can 1 rakenteesta [122].**

Kuvan 83 kuvaajassa on esitetty laskenta- ja mittaustulokset Abo 5 välipohjalle. Kuvassa 84 on esitetty kyseisen rakenteen leikkauskuva. Vaijerikytkentä mallinnettiin ”Raimossa” kytkemättömänä ilmavälinä, sillä tarkempaa tietoa kytkennän ominaisuuksista ei ollut saatavissa.



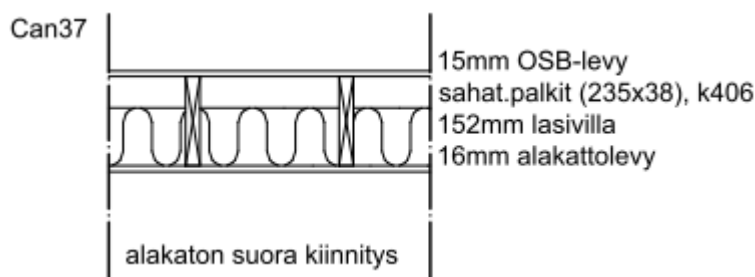


**Kuva 83: Eri laskentatapojen tuottamat ilmääneneristävyydet 1/3-oktaavikaistoittain Abo 5 rakenteelle. Vertailuarvoina ovat Balanant et al. tutkimuksen mittaustulokset [1].**

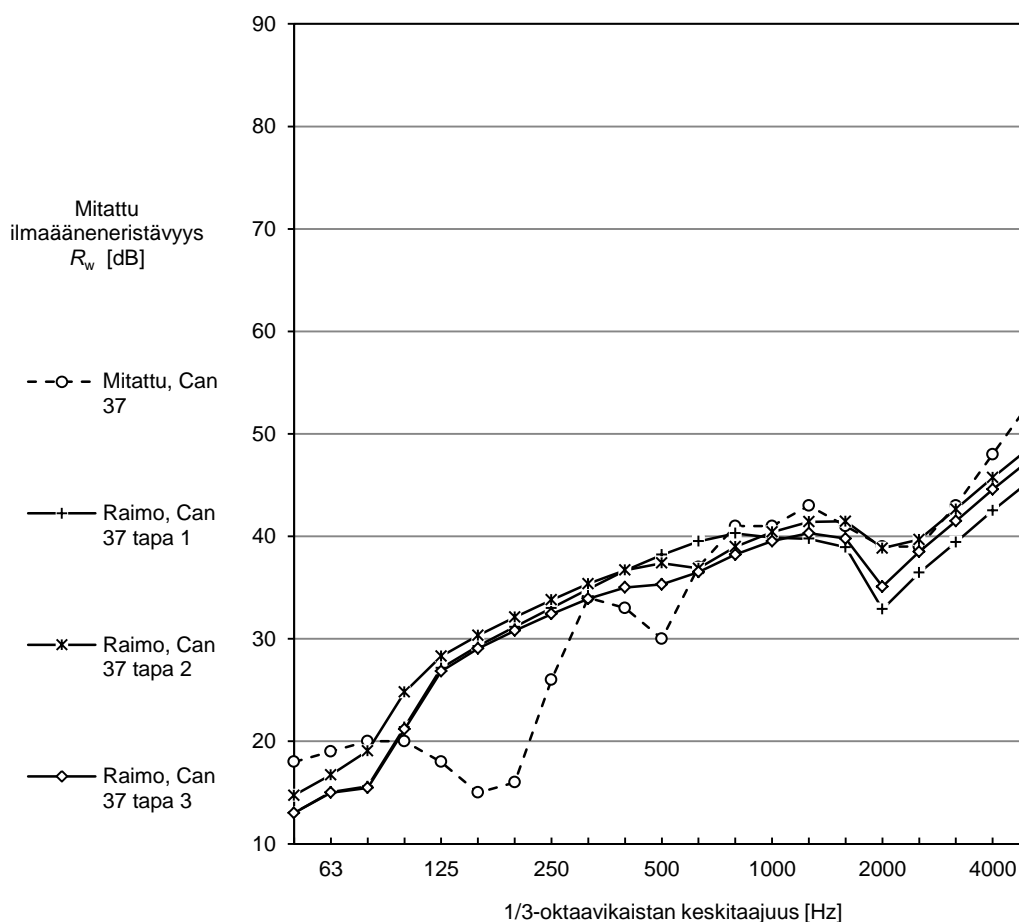


**Kuva 84: Abo 5 välipohjan leikkauskuva, mittakaava 1:20.**

Kuvassa 85 on esitetty Can 37 välipohjarakenteen leikkauskuva. Tämän välipohjarakenteen laskennalliset ilmääneneristävyydet on esitetty kuvan 86 kuvaajassa. Ilmääneneristävyyden laskennassa on käytetty edellä esitettyjä laskentatapoja 1, 2 ja 3.

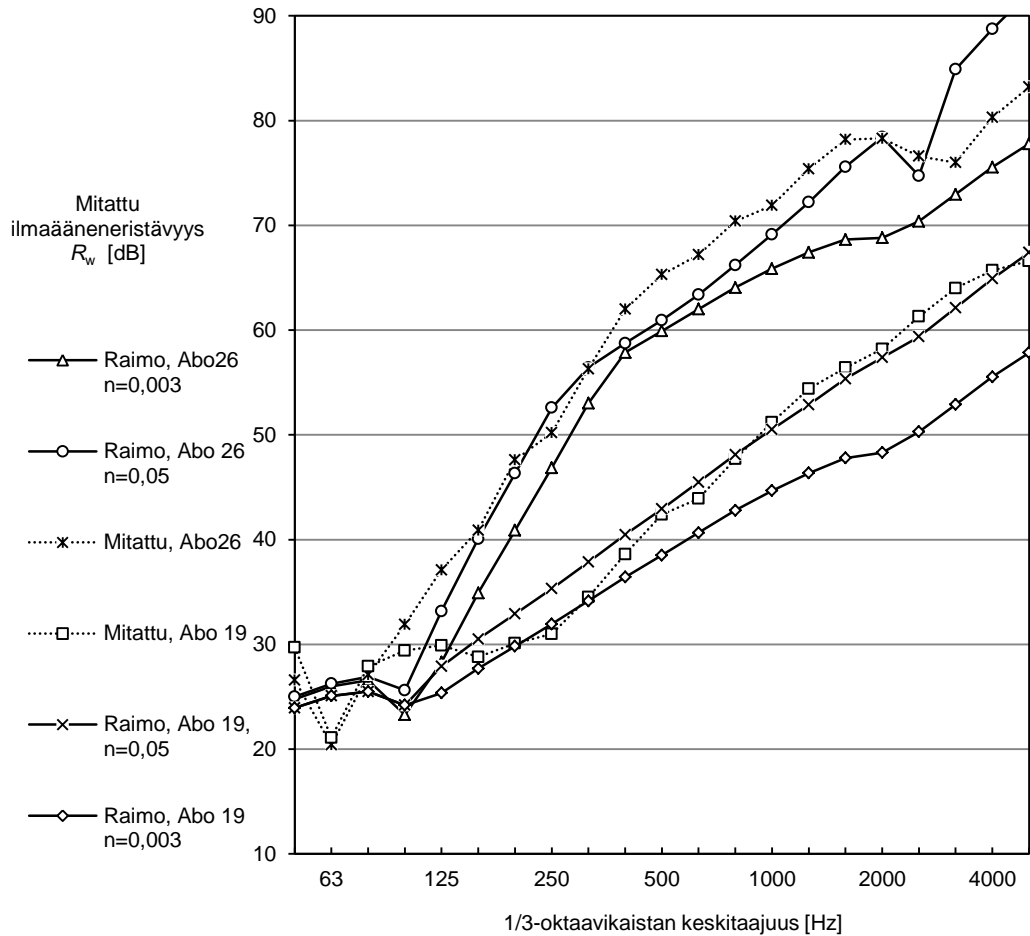


**Kuva 85: Can 37 rakenteen leikkauskuva, mittakaava 1:20.**

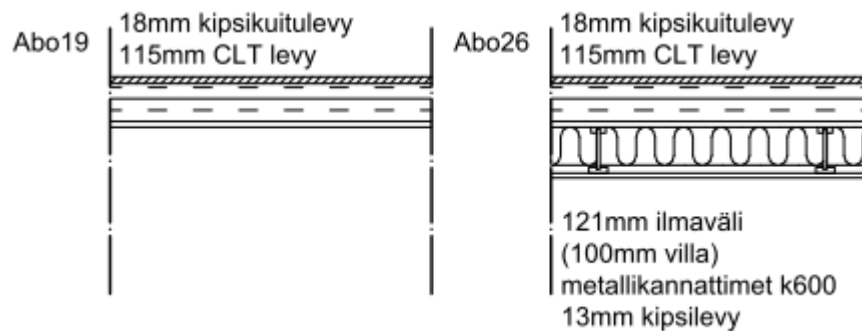


**Kuva 86: Eri laskentatapojen tuottamat ilmajääneristävyydet Can 37 rakenteella. Vertailuarvoina ovat Warnock et al. ilmajääneristävyyden mittaustulokset [122].**

Kuvan 87 kuvaajassa on esitetty massiivipuuvälipohjien mitatut ja laskennalliset ilmajääneristävyydet 1/3-oktaavikaistoittain. Kuvassa 88 on esitetty kuvaajassa käsiteltyjen välipohjien leikkauskuvat. Acoubois-hankkeesta [1] oli saatavissa niukasti tietoa materiaaliparametreista. Raporteissa oli mainittu ainoastaan rakennusosien dimensiot. Muut laskentamallin tarvitsemat tiedot arvioitiin ”Raimon” tietokannassa olleiden vastaavien rakennustuotteiden perusteella. Esimerkiksi alakaton kiinnitys approksimoitiin mallintamalla kiinnitys muuraussiteiden avulla, joita arvioitiin olevan  $1,5 \text{ kpl/m}^2$ .

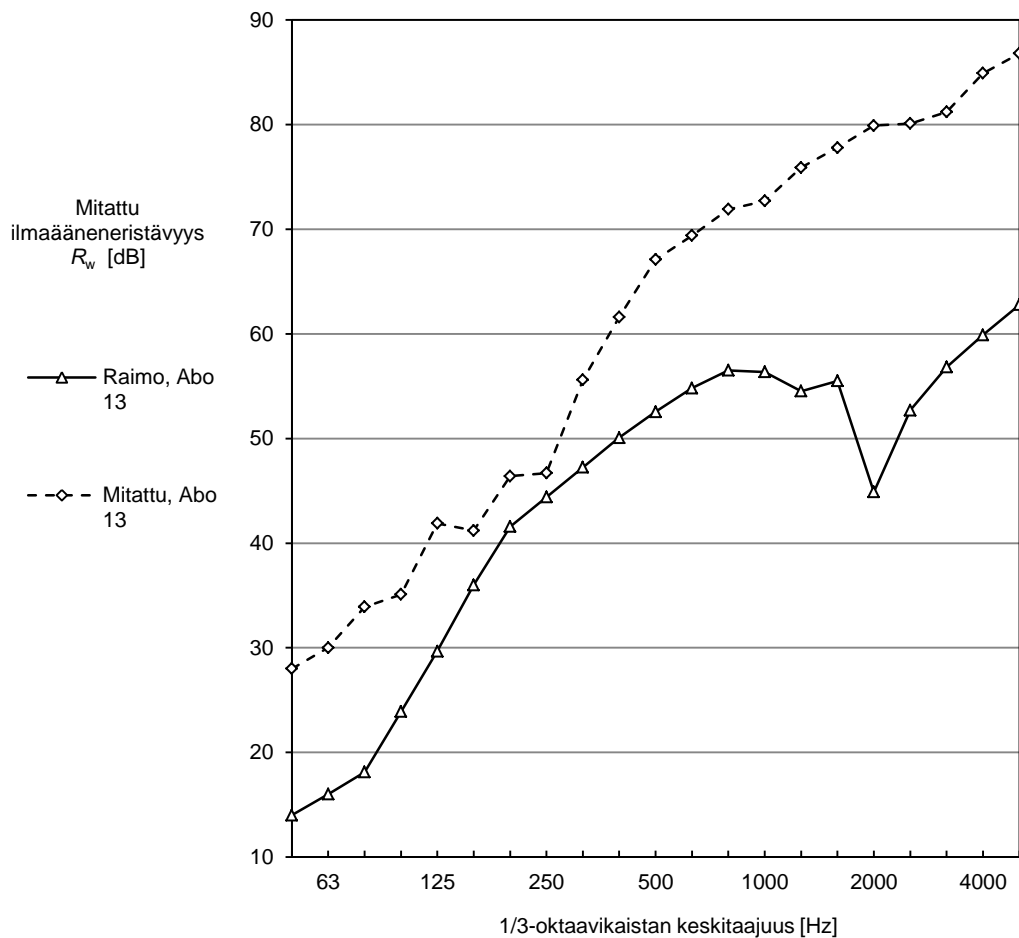


**Kuva 87: Yksi- ja monikerroksisten massiivipuuvälipohjien ilmääneneristävyydet: mitatut sekä "Raimolla" lasketut. Rakennetietojen yhteydessä on ilmoitettu  $n$ , eli massiivipuulevyn sisäinen häviökerroin. [1]**

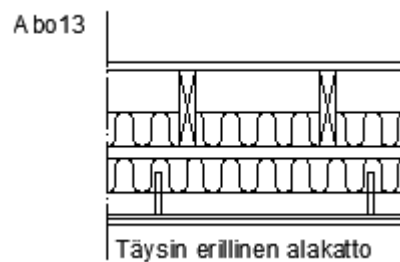


**Kuva 88: Abo 19 ja 26 välipohjarakenteet, mittakaava 1:20**

Kuvan 89 kuvaajassa on esitetty 1/3-oktaavikaistoittain määritetyt laskennalliset ja mitatut ilmääneneristävyydet Balanant et al. tutkimuksessa käytetylle Abo 13 välipohjal-  
le.



**Kuva 89:** Abo 13 välipohjan mitatut ja ”Raimolla” lasketut ilmaääneneristävyydet [1].



**Kuva 90:** Abo 13 rakenteen leikkauskuva, mittakaava 1:20.

Abo 13 rakenne mallinnettiin laskentaohjelmaan ilman alakaton palkkeja, laskentatavalla 1. Varsinaisten välipohjapalkkien alapuolella mallinnettiin 191 mm korkuinen ilmatila, jossa oli absorptiomateriaalia.

#### 4.4.3 Johtopäätökset

Kuten kappaleessa 3.5 todettiin, determinististen laskentamallien haaste on lähtöarvojen epätarkkuus. Lähtöarvoilla on merkittävä vaikutus myös Raimo-laskentamallin tulok-

siin. Esimerkiksi koinsidenssi-ilmiöstä johtuva laskennallinen ilmaääneneristävyyden heikentyminen on riippuvainen koinsidenssitaajuuden ja tarkastelutaajuuden suhteesta.

Kappaleessa 3.2.1 esitetyn kaavan 10 mukaan koinsidenssitaajuus on riippuvainen levyn pintamassasta ja taivutusjäykkyydestä. Yksittäisen levyn ilmaääneneristävyys lasketaan ”Raimossa” kaavoilla 10, 11, 12 ja 13, jotka on esitetty kappaleessa 3.2.1. Se, että Raimo-laskentamallissa ilmaääneneristävyyden määrittäminen tapahtuu diskreetisti, 1/3-oktaavikaistan keskitaajuuksilla, aiheuttaa virhettä tuloksiin. Jos levyn laskennallinen koinsidenssitaajuus osuu 1/3-oktaavikaistan keskitaajuudelle tai sen läheisyyteen, koinsidenssi-ilmiön heikennysvaikutus on suurempi kuin koinsidenssitaajuuden ollessa suhteellisen kaukana 1/3-oktaavin keskitaajuudesta. Tämä on havaittavissa kuvien 71 ja 72 kuvaajissa esitetyistä tuloksista. Laskentatapojen 1 ja 3 mukaisessa laskennassa alakattolevyn koinsidenssitaajuus on 2068 Hz, joka on lähellä 2000 Hz 1/3-keskioktaavitaajuutta. Laskentatavassa 2 alakattolevyn koinsidenssitaajuus on puolestaan 2187 Hz, jolloin laskennallinen koinsidenssiheikennys on pienempi kuin laskentatuloksissa häviökertoimet olivat vakioita, laskentatavasta riippumattomia. 1 ja 3 laskentatavoilla. Laskentamalli yliarvio koinsidenssi-ilmiön vaikutuksen myös Abo 5 välipohjalla, kuten kuvan 73 kuvaajasta voidaan havaita. Laskentamallin tuloksiin levyn koinsidenssitaajuudella ja sen yläpuolella vaikuttaa myös levyjen häviökertoimet.

Sopivan laskentatavan selvittämiseksi selvitettiin, kuinka levyjen pintamassan keinotekoinen lisääminen vaikuttaa laskentatulosten tarkkuuteen. Kuvien 78 ja 79 kuvaajissa esitettyjen tulosten perusteella pintamassan vaikutus riippuu massamuutoksen suhteesta välipohjarakenteen kokonaisuutensa. Can 100 rakenteen tapauksessa, kuva 78, kokonaispintamassan kasvattaminen 4,4 kg/m<sup>2</sup> ei vaikuta laskentatuloksiin. Tällä rakenteella 35 mm betonilaatta, laskennallinen pintamassa 87,5 kg/m<sup>2</sup>, dominoi rakenteen akustista toimintaa. Kevyemmillä rakenteilla pintamassojen muutos vaikutti selkeästi ilmaääneneristävyyden laskentatulokseen. Kuvien 79 ja 82 kuvaajista voidaan havaita, että laskentatavan 2 ja 3 tulokset poikkeavat toisistaan. Pienillä taajuuksilla raskaampi välipohjarakenne eli laskentatapa 2 tuottaa suurempia ilmaääneneristävyyden arvoja. Kuvaajista voidaan myös havaita, että laskentatavat 2 ja 3 yliarvioivat välipohjan ilmaääneneristävyyden 83–250 Hz ja yli 2000 Hz taajuuksilla. Näin ollen Can 1 ja Can 94 rakenteilla pintamassan keinotekoinen lisääminen heikensi laskenta- ja mittaustulosten yhteneväisyyttä.

Laskentatavassa 3 testattiin, miten pelkkä lattialevyn taivutusjäykkyyden muutos vaikuttaa välipohjan laskennalliseen ilmaääneneristävyyteen. Laskentatulosten perusteella ilmaääneneristävyys riippuu lattian kokonaisjäykkyydestä. Kuvien 78 ja 81 kuvaajien perusteella lattialevyn taivutusjäykkyyden muuttaminen ei juuri vaikuta ilmaääneneristävyyteen, sillä jälleen kerran raskas ja jäykkä betonilaatta hallitsee rakenteen akustista toimintaa. Välipohjalla, jossa lattialevyn jäykkyyden vaikutus rakenteen kokonaisjäykkyyteen on suurempi, lattialaatan taivutusjäykkyyden 4-kertaistamisella on merkittävä vaikutus ilmaääneneristävyyteen. Tämä voidaan havaita kuvien 79 ja 82 kuvaajista. Ku-

vassa 79 esitettyjen laskentatulosten perusteella lattialevyn taivutusjäykkyys 4-kertaistuksen ansiosta levyn laskennallinen koinsidenssitaajuus laskee 1150 Hz:stä noin 550 Hz, riippuen lattialevyn pintamassasta.

Kuvien 79 ja 82 kuvaajista voidaan havaita myös, että taivutusjäykkyyden kasvattamisen ansiosta laskennallinen koinsidenssiheikennys ja mittausten mukainen heikennys tapahtuvat samalla taajuusalueella. Tosin taivutusjäykkyyden muuttaminen aliarvio Can 1 ja 94 välipohjien ilmasteneristävyyden 300–2000 Hz taajuudella, kuten kuvien 79 ja 82 kuvaajista voidaan havaita. Myös Abo 5 rakenteella laskennallinen taivutusjäykkyyden 4-kertaistaminen aliarvioi rakenteen ilmasteneristävyyden, Abo 5 tapauksessa 250–800 Hz alueella, kuten kuvan 84 kuvaajasta voidaan havaita.

Johtopäätöksissä on otettava huomioon, että koerakenteet edustavat vain yksittäistapauksia. Esimerkiksi palkkien k-jaon tai eri lattialevytyyppien vaikutus jäykkyysominaisuuksiin vaatisi lisätutkimusta. Tämän tutkimuksen perusteella välipohjan pintalaatan ollessa raskas, esimerkiksi betonia, palkkien ja levyn kytkennällä ei vaikuta olevan suurta merkitystä ilmasteneristävyyteen. Kevytrakenteisilla välipohjilla, kuten Can 1 välipohja, palkkikytkentä vaikuttaa ilmasteneristävyyteen, mutta nykyisellä ”Raimo”-laskentamallilla palkkien vaikutusta ei pystytä huomioimaan tarkasti.

Kuvan 86 kuvaajasta voidaan havaita, että Can 37 rakenteella laskenta- ja mittaustulokset poikkeavat selkeästi toisistaan 100–500 Hz alueella. Can 37 rakenteessa alakatto oli kiinnitetty suoraan välipohjapalkkien alapintaan. ”Raimo”-laskentaohjelmassa ei oteta huomioon välipohjan ilmatilan ominaistajuuksia tai levyjen ominaistajuuksia. 160 Hz taajuudella ja sen ympäristössä Can 37 ja 94 mittaustulokset ovat lähes samat, kuten kuvien 86 ja 82 kuvaajista voidaan nähdä. Tämä viittaa siihen, että tällä taajuusalueella lattialevyt ja palkit määräävät Can 37 rakenteen akustisen toiminnan. Toisaalta Can 1 rakenteen mittaustuloksista ei havaita samanlaista ilmasteneristävyyden heikkenemistä 160 Hz taajuudella, joten alakaton kytkentätapa vaikuttaa merkittävästi rakenteen ilmasteneristävyyteen.

Massiivipuorakenteiden laskentaa hankaloitti tarkkojen lähtötietojen puuttuminen. Kuvan 86 kuvaajassa on esitetty sekä Abo 19 että 26 rakenteiden mittausta- ja laskentatuloksia. Tulosten perusteella CLT-levyn häviökerroin vaikuttaa merkittävästi laskentatulosten tarkkuuteen. Häviökertoimen merkitys on suuri, sillä massiivipuulevyn koinsidenssitaajuus on yleensä pieni ja häviökertoimen vaikutus alkaa koinsidenssitaajuudelta, kuten kappaleessa 3.2.1 esitetään. Kuvassa 86 esitettyjen Abo19 ja 26 rakenteiden mittausta- ja laskentatulosten perusteella laskentamallin tulokset sopivat hyvin yhteen mittaustulosten kanssa. Guigou-Carter et al. tutkimuksessa käytetyn massiivipuulevyn häviökerroin oli todennäköisesti suurempi kuin ”Raimo”-tietokannasta saadun CLT-levyn häviökerroin  $n=0,003$ , sillä korkeamman häviökertoimen,  $n=0,05$ , laskentatulokset vastaavat mittaustuloksia paremmin kuin ”todellisella” häviökertoimella laskettu malli. Yli 2000 Hz taajuuksilla Abo 26 rakenteella laskentamallin ja mittausten ero johtuu toden-

näköisesti lähtöarvojen epätarkkuudesta. Mittausraportista ei ollut saatavissa tarkkoja tietoja alakattolevystä tai alakaton kiinnitystavasta.

Edellä esitettyjen laskelmien ja johtopäätösten perusteella ”Raimo”-laskentamalli soveltuu nykyisellään parhaiten puuvälipohjien, joissa on massiivinen pintalaatta, ilmaääneneristävyyksien laskentaan. Selvityksen perusteella laskentamalli toimii myös kevyillä Can 1 ja Abo 5- tyyppisillä välipohjilla, kun alakatto on kiinnitetty joustavasti, esimerkiksi jousirangoilla tai vaijerilla. Heikoiten nykyinen laskentamalli toimii yksinkertaisilla kevyillä välipohjarakenteilla, kuten Can 94, ja välipohjarakenteilla, joissa alakatto on kytketty suoraan lattiapalkkeihin. Lattialevyn taivutusjäykkyyden 4-kertaistaminen tuotti oikean suuntaisia tuloksia, mutta välipohjapalkkien huomioonottaminen laskentamallissa vaatii vielä lisätutkimusta.

Kylliäisen välipohjien laskentamallissa käytetään tämän tutkimuksen kappaleessa 4.4.2. esitettyä laskentatapaa 1 ja laskenta perustuu kappaleessa 4.4. esitettyyn Raimo-laskentamalliin. Massiivipuuvälipohjien laskennassa käytetään massiivipuulevylle laskelmissa esitettyä suurempaa häviökerrointa  $n = 0,05$ , sillä materiaaliparametreista ei ollut tarkkaa tietoa.

## 4.5 Kelluvan lattian parannusluku

Kuten kappaleissa 3.6.3 ja 3.6.4 tuotiin esiin, välipohjan massa on merkittävä tekijä askelääneneristävyyden kannalta ja massalisäys vaatii usein myös kelluvan rakenteen käyttöä. Parannusluvun laskenta ei ole kuitenkaan yksiselitteistä, sillä raakavälipohjan akustiset ominaisuudet vaikuttavat kelluvan lattian askelääneneristävyyden parannukseen. Erityisesti raakavälipohjan lattialaatan massa ja värähtelyominaisuudet vaikuttavat kelluvanlattian parannusvaikutukseen, kuten kappaleessa 3.6.4 tuotiin esiin. Seuraavassa on esitetty eri laskentatapoja kelluvan lattian askelääneneristävyyden huomioimiseksi.

### 4.5.1 Cremer et al. teoria

Cremer et al. [22] ovat esittäneet, että kelluvan lattian askelääneneristävyyden parannusluku voidaan laskea,

$$\Delta L_n = 40 * \lg\left(\frac{f}{f_0}\right) + 20 * \lg\left|1 + \frac{i*2\pi*f*m_h}{z_1}\right| \quad (\text{kaava 50})$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{s}{m'_1} + \frac{s}{m'_2}} \quad (\text{kaava 51})$$

jossa  $m'_1$  ja  $m'_2$  ovat laattojen pintamassat [ $\text{kg}/\text{m}^2$ ],  $s$  [ $\text{MN}/\text{m}^3$ ] on kelluttavan kerroksen dynaaminen jäykkyys. Laskennassa oletetaan, että kuormittava voima on pistevoima. Askelääneneristävyyden parantuminen riippuu tarkastelutaajuuden  $f$  ja kaksinkertaisen rakenteen ominaistaajuuden  $f_0$  suhteesta. Kaava on voimassa, kun tarkastellaan paran-

nusvaikutusta  $f_0$  ominaistaajuuden yläpuolella.  $Z_l$  on kelluvan pintalaatan mekaaninen impedanssi, joka lasketaan harmonisen herätevoiman tapauksessa seuraavasti [115]:

$$Z_{mec} = \frac{F}{v} \quad (\text{kaava 52})$$

$F$  on pistevoima, joka kuormittaa systeemiä ja  $v$  on kuormituspisteestä mitattu systeemin nopeus kuormituspinnan normaalin suunnassa. Kun systeemin, tässä tapauksessa kelluvan lattiarakenteen pintalaatan, mekaaninen impedanssi on suuri, kaavan logaritmi-termi voidaan jättää huomiotta [114]. Tällöin kaava voidaan esittää muodossa:

$$\Delta L_n = 40 * \lg\left(\frac{f}{f_0}\right) \quad (\text{kaava 53})$$

Kaavan 53 mukaan kelluvan lattian askeläänienparannusvaikutus on 12dB/oktaavi, kun taajuus on kaksinkertaisen rakenteen ominaistaajuuden yläpuolella. Jos kelluvan lattian pintalaatta on raskas, esimerkiksi betonista, parannusvaikutuksen arviointiin voidaan käyttää kaavaa 53 [55, 115].

Kun kelluvan lattian pintalaatta on kevytrakenteinen ja sen mekaaninen impedanssi on pieni, Cremer et al. kehittämä laskentakaava 50 voidaan johtaa muotoon

$$\Delta L_n = 40 * \log_{10}\left(\frac{f}{f_0}\right) + 10 * \log_{10}\left[1 + \left(\frac{f}{f_z}\right)\right] \quad (\text{kaava 54})$$

$$f_z = \frac{4 * \sqrt{m'_1 * B_1}}{\pi * m_h} \quad (\text{kaava 55})$$

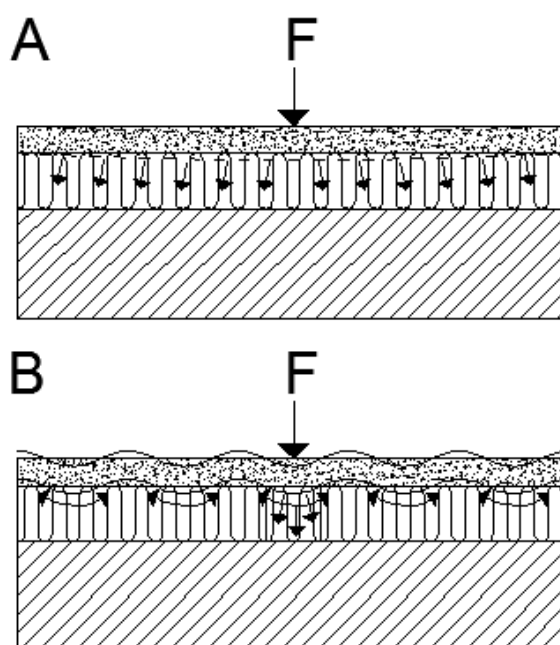
, jossa rajataajuus  $f_z$  [Hz] on riippuvainen pintalaatan pintamassasta  $m'_1$  [kg/m<sup>2</sup>] ja taivutusjäykkyyydestä  $B_1$  [Nm] sekä lattiaa kuormittavan askeläänikoneen yksittäisen vasaran massasta  $m_h$  [kg].  $f_z$  termin sisältävä osa kaavassa 54 huomioidaan vasta rajataajuuden  $f_z$  yläpuolella.  $f_0$  lasketaan kaavan 51 mukaisesti. Puusta ja ohuita kipsistä valmistettuja lattialevyjä voidaan pitää kevytrakenteisina pintalaattoina [115]. Kaavat 50, 53 ja 54 antavat mittaustuloksiin korreloivia tuloksia, kun tarkasteltava taajuusalue on  $f_0 \leq f \leq 4 * f_0$  [55]. Kyseisten kaavojen mukaisessa laskennassa oletetaan, että raakavälipohja on massiivinen ja huomattavasti jäykempi kuin kelluvan lattiarakenteen pintalaatta.

Zeitler et al. ovat tutkineet yllä esitetyn teorian soveltumista puuvälipohjille. Tutkimuksen mukaan kevyen raakavälipohjan päälle joustavan kerroksen varaan asennettu valettu kipsilaatta käyttäytyy kuin vapaasti tuettu levy, kun sitä kuormitetaan pistevoimalla. Tutkimuksessa myös todettiin, että vaikka kipsilaattaa kuormitetaan pistevoimalla, joustavan kerroksen alla oleva raakavälipohjalevy värähtelee ikään kuin sitä kuormitettaisiin koko levyn alueella. [127]



#### 4.5.2 EN 12354-2 laskentatapa

Standardin ISO 12354-2 mukainen kelluvan lattian parannusluvun määrittäminen pohjautuu edellisessä kappaleessa esitettyyn Cremer et al. teoriaan [29, 115]. Kuitenkin Cremer et al. kaava arvioi kelluvan lattian parannusvaikutuksen liian suureksi todelliseen tilanteeseen nähden. Kaavaa johdettaessa on tehty oletuksia, jotka eivät sovellu kaikille kelluville lattioille. Ensinnäkin Cremer et al. olettaa kelluvan rakenteen koostuvan äärettömän suurista levyistä, jolloin levyjen värähtely on lokaalia, kuten kuvassa 1, kohta B. Äärettömän suuret levyt värähtelevät vain taivutusaaltojen lähikentässä, lokaalisti ja värähtelyliike ei koskaan saavuta levyjen reunoja. Äärellisellä levyllä levyjen reunat synnyttävät taivutusaaltojen heijastuksia levyyn, jolloin levy värähtelee sekä lähikentässä että kaiuntaisessa kentässä toisin sanoen resonoi, kuten kuvassa 91, kohta A. Todellisessa tilanteessa raskas pintalaatta, jonka sisäinen vaimennuskerroin on pieni, vastaa äärellisen levyn tapausta [115].



**Kuva 91: A: resonoivasti reagoiva pintalaatta, B: lokaalisti reagoiva pintalaatta, mukailtu lähteestä [70].**

Toiseksi Cremer et al johtamassa kaavassa 50 oletetaan, että elastinen kerros levyjen välissä toimii kaikilla taajuuksilla kuin useasta jousesta koostuva systeemi, vaikka todellisuudessa suurilla taajuuksilla kelluvan lattian joustava kerroksen käyttäytyminen muuttuu [55].

Edellä mainitut virhelähteet on huomioitu standardin mukaisessa empiirisesti korjatussa laskentakaavassa, kaava 56. Se soveltuu kelluvan lattian parannusvaikutuksen laskentaan, kun pintalaatta on valettu betonista tai kipsistä. [29]

$$\Delta L = 30 * \log_{10}\left(\frac{f}{f_0}\right) \quad (\text{kaava 56})$$

, jossa  $f$  on tarkasteltava taajuus ja  $f_0$  on kaksinkertaisen rakenteen ominaistaajuus

$$f_0 = 160 * \sqrt{\frac{s'}{m'}} \quad (\text{kaava 57})$$

$s'$  on standardin ISO 29052-1 mukaan määritelty joustavan kerroksen dynaaminen jäykkyys [ $\text{MN}/\text{m}^3$ ] ja  $m'$  on pintalaatan pintamassa [ $\text{kg}/\text{m}^2$ ].

Jos pintalaatan sisäinen vaimennuskerroin on suuri, kuten kevyillä pintalaatoilla, sen käyttäytyminen on lähellä äärettömän laatan tapausta, koska levyssä etenevä värähtely vaimenee merkittävästi [55]. Tällöin standardin ISO 12354-2 mukaan kelluvan lattian vaimennuskerrointa voidaan arvioida kaavalla 58, joka on sama, kuin kappaleessa 4.5.1 esitetty Cremer et al. johtama kaava 53. Laatta käyttäytyy tällöin, kuten kuvan 19 kuvassa B esitetty lokaalisti reagoiva pintalaatta [70],

$$\Delta L = 40 * \log_{10}\left(\frac{f}{f_0}\right) \quad (\text{kaava 58})$$

jossa  $f_0$  lasketaan standardin ISO 12354-2 liite C mukaan kaavalla 57.

### 4.5.3 Kristenssen ja Rindelin laskentapa

Kristenssen- Rindel:n mukaan kelluvan lattian askelääneneristys parannusluku voidaan johtaa pintalaatan ja joustavan kerroksen mekaanisten impedanssien suhteesta [70]. Jos pintalaatan mekaaninen impedanssi on  $Z_l$  ja joustavan kerroksen mekaaninen impedanssi on  $Z_d$ , kelluvan lattiarakenteen askelääneneristävyyden parannusvaikutus voidaan esittää

$$\Delta L = 20 * \log_{10} \left| \frac{Z_l}{Z_d} \right| \quad (\text{kaava 59})$$

Vigranin mukaan myös Cremer et al. esittämä kelluvan lattian parannusluku on johdettavissa pintalaatan ja joustavan kerroksen mekaanisten impedanssien suhteena [115]. Resonoivasti käyttäytyvän pintalaatan impedanssi lasketaan

$$Z_1 = i * \omega * m'_1 \quad (\text{kaava 60})$$

, jossa  $i$  on imaginaariluku,  $\omega$  kulmataajuus [ $\text{rad}/\text{s}$ ] ja  $m'_1$  pintalaatan pintamassa [ $\text{kg}/\text{m}^2$ ] [70]. Joustavan kerroksen impedanssi voidaan esittää

$$Z_d = \frac{\rho_m c_m}{\sin\left(\frac{\omega}{c_m} * d\right)} \quad (\text{kaava 61})$$

, jossa  $c_m$  on äänennopeus joustavassa materiaalissa [m/s],  $\rho_m$  joustavan materiaalin tiheys [ $\text{kg/m}^3$ ] ja  $d$  joustavan materiaalikerroksen paksuus [m]. Kuten aiemmin Cremerin et al. johtamassa laskentatavassa, myös Kristenssenin ja Rindelin lähestymistavassa kelluvan lattian parannusvaikutus alkaa alarajataajuudelta  $f_0$ , joka tässä tapauksessa määritellään kaavalla 63. Alarajataajuuden lisäksi määritellään rajataajuus  $f_d$  kaavalla 62, jonka yläpuolella kelluvan lattian joustavaan kerrokseen muodostuu seisovia aaltoja. Seisovien aaltojen takia joustavan kerroksen ei voida olettaa toimivan jousimaisesti, ja siksi parannusluvun laskenta muuttuu taajuudella  $f_d$ . [70]

$$f_d = \frac{c_m}{2 * \pi * d} \quad (\text{kaava 62})$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho_m c_m^2}{m_1 * d}} \quad (\text{kaava 63})$$

Periaatteessa kaava 63 on sama massa-jousi-massa systeemin ominaistajuuden laskentakaava kuin kappaleessa 4.1.1. esitetty kaava 51. Rajataajuuden  $f_0$  laskennassa on oletettu, että varsinaisen välipohjan massa on huomattavasti suurempi kuin kelluvan lattian pintalaatan. Tällöin  $m_2$  sisältä termi voidaan jättää pois, koska sillä on vähäinen vaikutus lopputulokseen. Myös joustavan kerroksen dynaamisen jäykkyyden laskentaa on yksinkertaistettu. Kristenssen ja Rindel esittävät kelluvan lattian parannusluvun laskentakaavat 64 ja 65 eri taajuusalueille. [70]

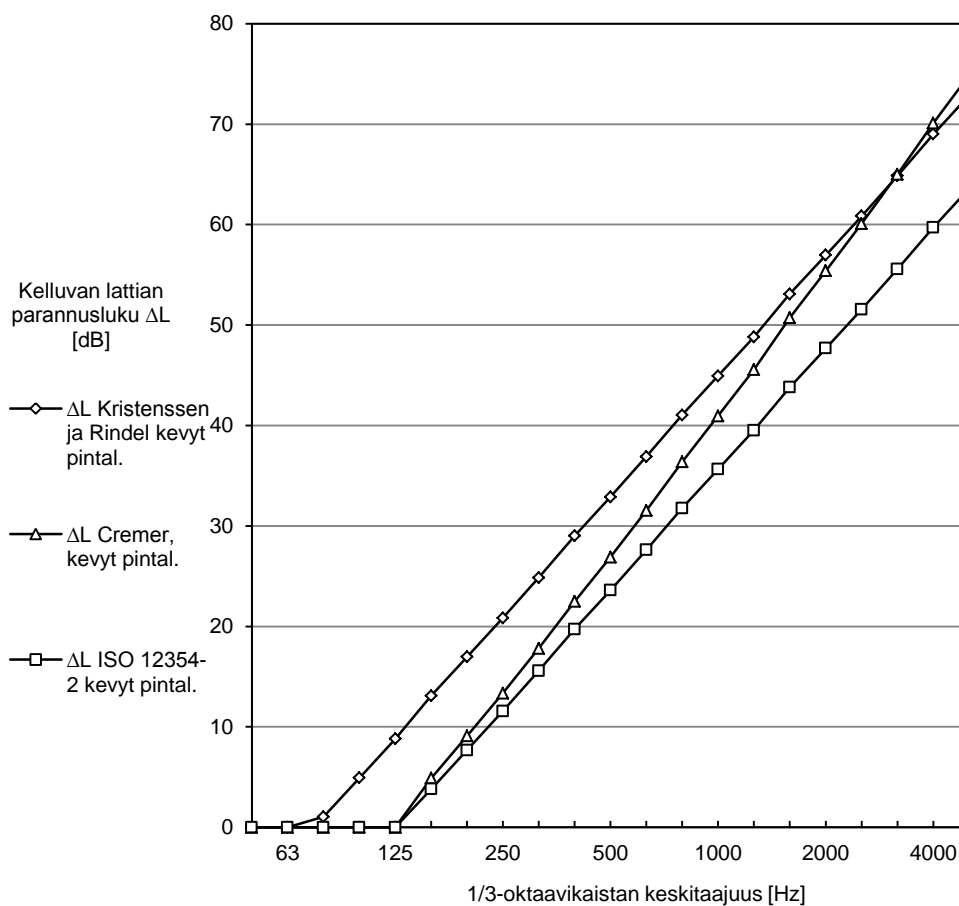
$$\Delta L = 20 * \log_{10} \frac{\omega^2 * m_1 * d}{\rho_m c_m^2} = 40 * \log_{10} \frac{f}{f_0} \quad , \text{ kun } f_0 < f \leq f_d \quad (\text{kaava 64})$$

$$\Delta L = 20 * \log_{10} \frac{\omega * m_1}{\rho_m c_m} = 40 * \log_{10} \frac{f_d}{f_0} + 20 * \log_{10} \frac{f}{f_d} \quad , \text{ kun } f_d < f \quad (\text{kaava 65})$$

Kaavojen 63 ja 65 mukaisessa laskennassa oletetaan, että pintalaatta käyttäytyy resonoivasti. Kuten kappaleessa 4.1.2 esitettiin, lokaalisti käyttäytyvän pintalaatan parannusvaikutus voidaan laskea kaavalla 58. Parannusvaikutus alkaa rajataajuuden  $f_0$  yläpuolelta. [70]

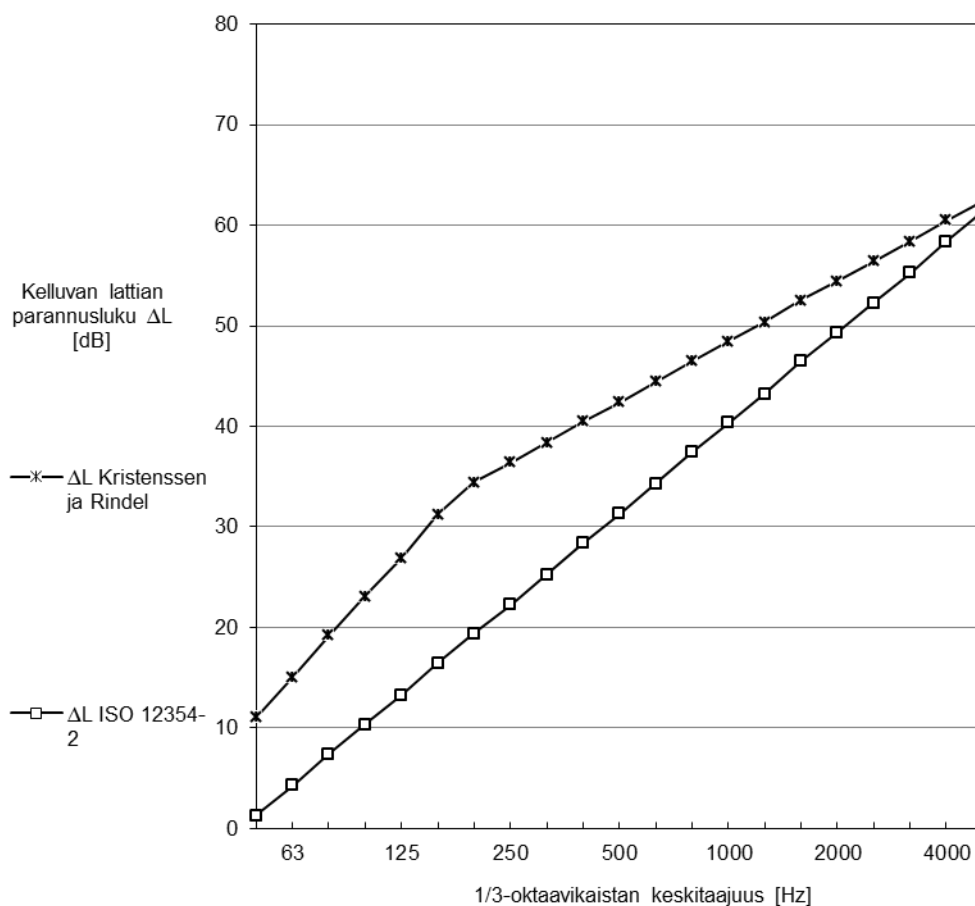
#### 4.5.4 Laskentatapojen vertailu

Seuraavassa on esitetty eri laskentatapojen keskinäinen vertailu. Tämän jälkeen laskennallisia arvoja on verrattu mittaustuloksiin [16]. Kuvan 92 kuvaajassa on esitetty Cremerin, Kristenssen-Rindel ja standardin ISO 12354-2 mukaan laskettu kelluvan lattian askelääneneristysparannusluvut, kun pintalaatta on kevytrakenteinen [29, 70, 115]. Kuvan 92 tapauksessa kelluvan laatan pintamassana on käytetty kipsilevyvalmistaja Gyprocin ”Lapikas” lattiakipsilevyn  $15,5 \text{ kg/m}^2$  [69] ja joustavan kerroksen dynaamisena jäykkyys on  $10 \text{ MN/m}^3$ , joka vastaa Isover Flo askelääneneristevyn dynaamista jäykkyyttä.



**Kuva 92: Kevyellä pintalaatalla toteutetun kelluvan lattian askelääneneristävyyden parannusluvut eri laskentakaavoilla [22, 29, 115].**

Kuvan 93 kuvaajassa on esitetty eri laskentakaavoilla määritetty kelluvan lattian askelääneneristävyyden parannusluku, kun pintalaatta on raskas. Laskennassa käytettiin 50 mm betonilaattaa.

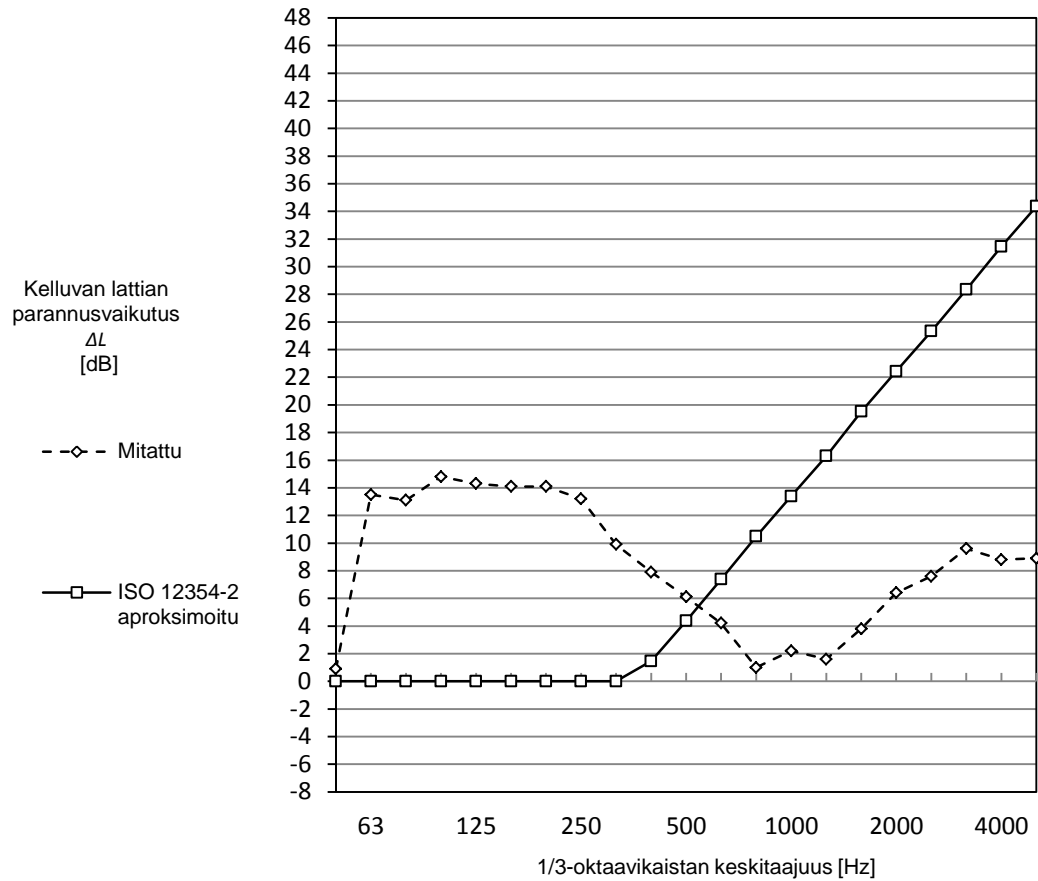


**Kuva 93: Raskaalla pintalaatalla toteutetun kelluvan lattian askelääneneristävyyden parannusluvut eri laskentakaavoilla [29, 70].**

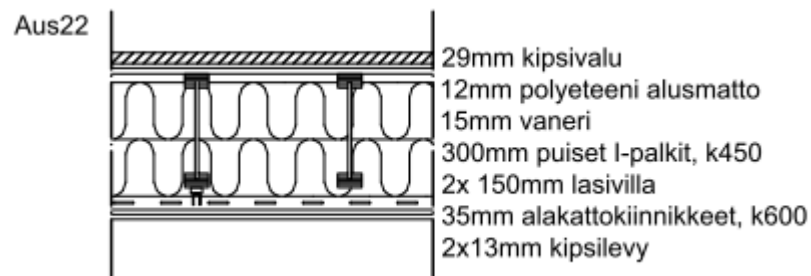
Kuvan 93 kuvaajassa esitetyissä laskentatuloksissa lähtöarvoina on oletettu, että 50 mm paksun betonilaatan pintamassa on  $125 \text{ kg/m}^2$  ja laatan alla olevan joustavan kerroksen dynaaminen jäykkyys on sama kuin kuvan 92 kuvaajan tapauksessa,  $10 \text{ MN/m}^3$ .

Kristenssen ja Rindelin laskentakaavaan lähtöarvoiksi tarvittiin vielä äänennopeus lasivillassa, joka on noin  $35 \text{ m/s}$  [70], ja ISOVER FLO askelääneneristyslevyn tiheys  $85 \text{ kg/m}^3$  sekä eristekerroksen paksuus:  $0,03 \text{ m}$  [69].

Kuvan 94 kuvaajassa on esitetty Chung et al. tutkimuksesta saatujen askeläänitasomittausten perusteella laskettu kelluvan lattian parannusvaikutus. Raakavälipohja oli kevyt-rakenteinen. Kyseisen välipohjarakenteen leikkauskuva on esitetty kuvassa 95.

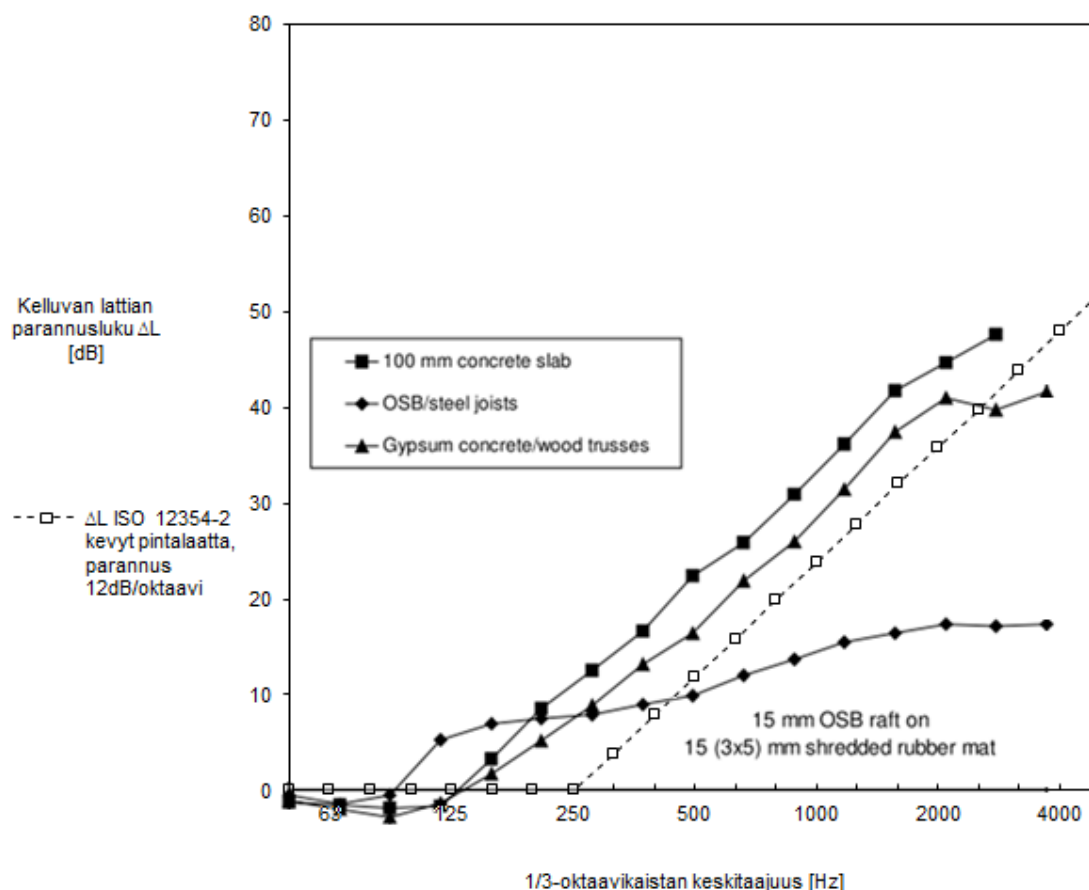


**Kuva 94:** Kelluvan lattian parannusvaikutus välipohjalla Aus 22 sekä standardin ISO 12354-2 mukaan laskettu raskaan kelluvan laatan askeläänitason parannus [16, 29].



**Kuva 95:** Välipohjan Aus 22 leikkauskuva, 1:20.

Kuvassa 96 on verrattu Warnock et al. tutkimustuloksia standardin ISO 12354-2 mukaiseen kelluvan lattian parannuslukuun.



**Kuva 96: Warnockin mittaustulosten vertailu ISO EN-12354-2 mukaiseen kelluvien lattioiden parannuslukuun. ISO 12354-2 mukainen parannusluvun laskenta ei vastaa Warnockin mittauksissa käytettyjen materiaalien arvoja [29, 119].**

Kuvan 96 kuvaajassa standardin ISO 12354-2 mukaisessa laskennassa ei ole käytetty samoja lähtöarvoja kuin Warnock et al. laskennassa. Kuvaajan tarkoituksena on osoittaa, että tietyissä tapauksissa palkkirakenteisen välipohjan askelääneneristävyyden noudattaminen ISO-12354-2 mukaista oletusta 12 dB/oktaavi askelääneneristävyyden parantumisesta.

#### 4.5.5 Johtopäätökset

Kuten edellisen kappaleen 4.4.4 kuvaajista voidaan havaita, eri kevyen ja raskaan pintalaatan parannusluvun laskentatapojen välillä ei ole merkittäviä eroja. Kuvien 94 ja 96 perusteella on kuitenkin selvää, etteivät nykyiset laskentamallit sovellu arvioimaan kelluvan lattian parannusvaikutusta, jos raakavälipohjan lattialaatta on kevytrakenteinen, esimerkiksi OSB- tai vanerilevy. Kuten kappaleessa 3.6.5 todettiin, parannusvaikutus on riippuvainen raakavälipohjan lattialevystä. Tämän tutkimuksen puitteissa ei ollut mahdollisuutta selvittää, soveltuisivatko edellä esitetyt laskentakaavat parannusvaikutuksen arviointiin, jos raakavälipohjan pintalaatta olisi raskasrakenteinen tai koostuisi useasta ohuemmasta rakennuslevystä.

Edellä esitettyjen laskelmien perusteella ja sopivien koemittausten puuttuessa kelluvan lattian laskentaa ei sisällytetä vielä Kylliäisen laskentaideaan. Tämän osa-alueen huomioonottaminen vaatii lisätutkimusta.

## 4.6 Ideoidun laskentamallin testaus

Laskentamallia testattiin useilla eri välipohjarakenteilla. Koerakenteet pyrittiin valitsemaan siten, että ne edustavat mahdollisimman laajasti erilaisia välipohjarakenteita. Kappaleiden 4.4 ja 4.5 johtopäätöksissä on esitetty, millä perusteella alakaton ja lattia-päällysteen parannusluvut on valittu. Liitteessä 2 on esitetty Kylliäisen ideoiman laskentamallin tulokset 1/3-oktaavikaistoitain sekä vastaavien rakenteiden mitatut askeläänitasot. Näitä tuloksia on käsitelty tarkemmin johtopäätösten yhteydessä kappaleessa 4.7.

### 4.6.1 Alakatto

Alakaton parannusluku laskettiin edellä kappaleessa 4.4 esitellyllä ”Raimo”-laskentaohjelmalla. Tässä kappaleessa esitetään yksilukuiset laskentamallin tulokset rakenteilta, jotka koostuvat raakavälipohjasta ja alakattorakenteesta. Laskennallisia tuloksia on verrattu mitattuihin askeläänitasolukuihin. Taulukossa 10 on esitetty alakaton parannusluku eri välipohjarakenteilla. Yksityiskohtaiset tiedot välipohjarakenteista on esitetty liitteessä 3. Taulukossa on myös esitetty laskentamallin tuloksen erotus mittaus-tuloksesta. Taulukon 10 mittaustuloksina esitetään standardin ISO 717-2 mukainen askeläänitasoluku  $L_{n,w}$ .

**Taulukko 10: Kylliäisen laskentamallin alakaton parannusluvut. Taulukossa on esitetty myös kyseisten rakenteiden mitatut askeläänitasoluvut  $L_{n,w}$  [1, 122].**

VP	VP <sub>raw</sub>	$\Delta L_{ak,Raimo}$	$L_{n,w,raw}$	$L_{n,w,mal}$	$L_{n,w,mit}$	$L_{n,w,mal} - L_{n,w,mit}$
Can 54	Can100	26,3	94	68	67	1
Can 53	Can100	12,6	94	81	79	2
Can1	Can 94	25,8	90	64	65	-1
Can 5	Can 95	26,8	92	65	67	-2
Can 6	Can 99	28,6	96	67	67	0
Can 7	Can 94	29,6	90	60	62	-2
Can 9	Can 94	29,8	90	60	61	-1
Can 13	Can 98	25,6	88	62	63	-1
Can 14	Can 96	26,9	88	61	63	-2
Can 37	Can 94	15,1	90	75	80	-5
Can 42	Can 94	15,2	90	75	74	1
Abo 1	Can 94	15,8	90	74	78	-4
Abo 5	Can 94	31,1	90	59	60	-1
Abo 13	Can 94	20	90	70	54	16
Abo 26	Abo 19	12,4	73	61	56	5
Abo 23	Abo 19	16,3	73	57	51	6



Taulukossa 11 on esitetty Kylliäisen ideoiman laskentamallin alakaton parannusluku ja sen vastaavuus mittaustuloksiin, kun vertailussa käytettiin mitattua standardin ISO 717-2 mukaista  $L_{n,w} + C_{,50-2500}$  arvoa.

**Taulukko 11: Kylliäisen laskentamallin alakaton parannusluvut. Taulukossa on esitetty myös kyseisten rakenteiden mitatut askeläänitasoluvut  $L_{n,w} + C_{I,50-2500}$  [1].**

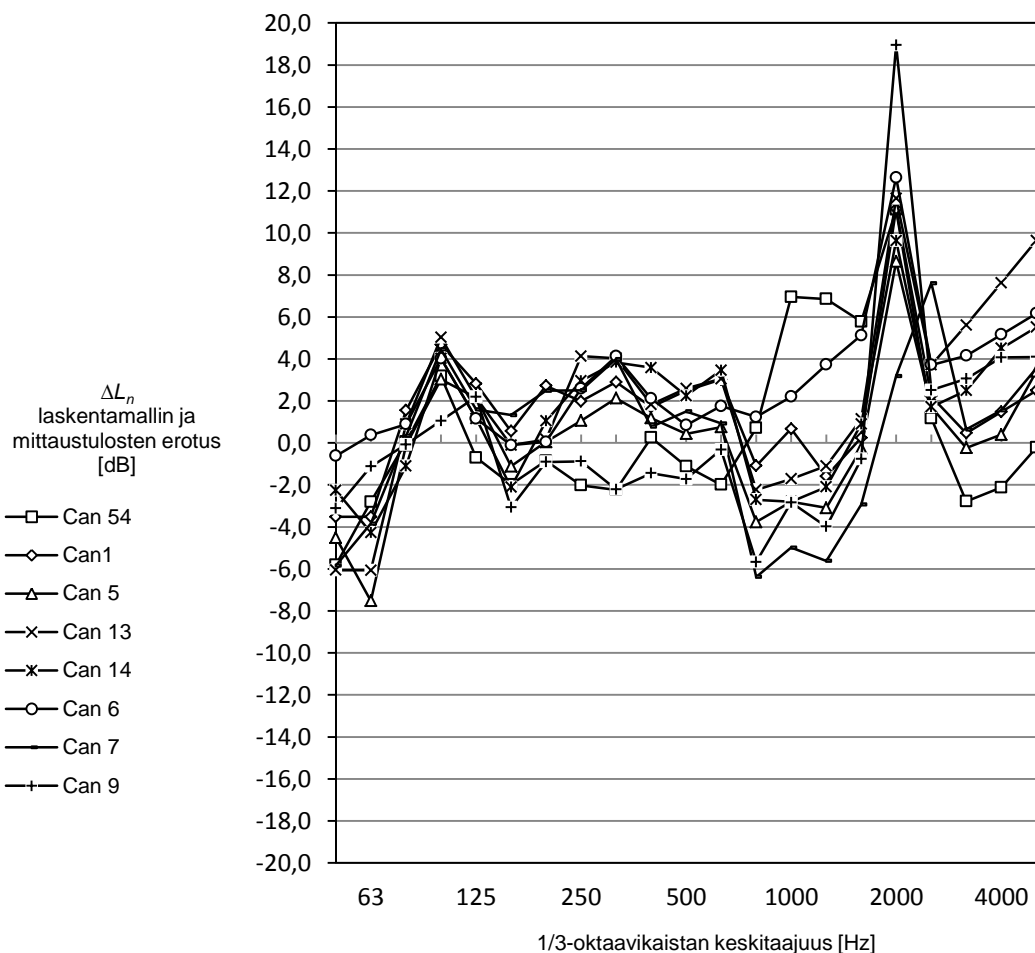
<i>VP</i>	<i>VP<sub>raw</sub></i>	$\Delta L_{ak,Raimo}$	$L_{n,w,raw}$	$L_{n,w,mal}$	$L_{n,w,mit}$	$L_{n,w,mal} - L_{n,w,mit} + C_{I,50-2500}$
Abo 1	Can 94	15,8	90	74	77	-3
Abo 5	Can 94	31,1	90	59	64	-5
Abo 13	Can 94	20	90	70	57	13
Abo 26	Abo 19	12,4	73	61	61	0
Abo 23	Abo 19	16,3	73	57	55	2

Taulukossa 12 on esitetty Kylliäisen ideoiman laskentamallin alakatonparannusluku ja sen vertailumittaustuloksiin, kun alakaton parannusluku laskettiin  $R_w + C_{50-3150}$  ilmäneristävyuden avulla.

**Taulukko 12: Kylliäisen ideoiman laskentamallin alakaton parannusluvut. Alakaton ilmäneristävyuden laskennassa on huomioitu  $R_w + C_{50-3150}$  ilmäneristävyysluku. Mittaustulokset on saatu [1, 122] tutkimuksista.**

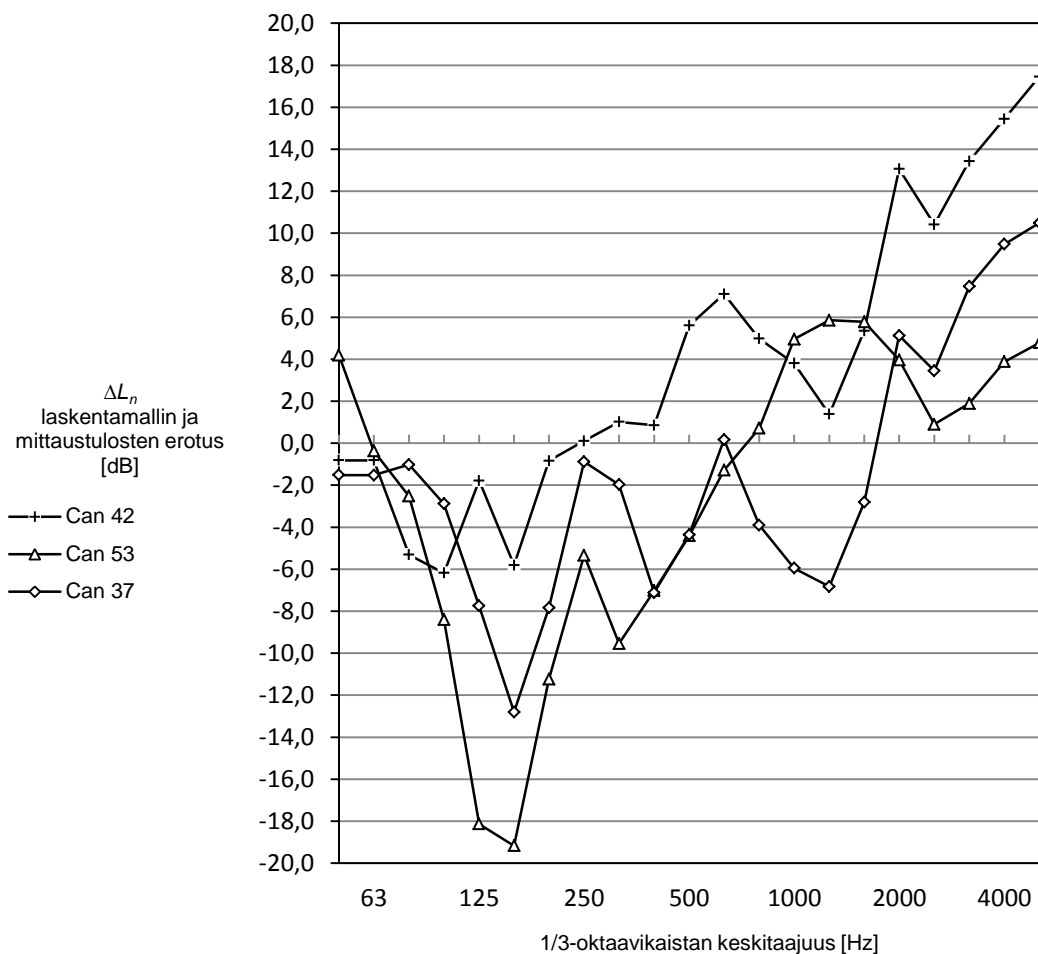
<i>VP</i>	<i>VP<sub>raw</sub></i>	$\Delta L_{ak,Raimo}$	$L_{n,w,raw}$	$L_{n,w,mal}$	$L_{n,w,mit}$	$L_{n,w,mal} - L_{n,w,mit}$
Can 54	Can100	19,8	94	74	67	7
Can 53	Can100	12	94	82	79	3
Can1	Can 94	21,4	90	69	65	4
Can 5	Can 95	29	92	63	67	-4
Can 6	Can 99	28,8	96	67	67	0
Can 7	Can 94	23,9	90	66	62	4
Can 9	Can 94	23,8	90	66	61	5
Can 13	Can 98	21,1	88	67	63	4
Can 14	Can 96	37,2	88	51	63	-12
Can 37	Can 94	14,8	90	75	80	-5
Can 42	Can 94	14,9	90	75	74	1
Abo 1	Can 94	15,6	90	74	78	-4
Abo 5	Can 94	24,3	90	66	60	6
Abo 13	Can 94	15	90	75	54	21
Abo 26	Abo 19	7	73	66	56	10
Abo 23	Abo 19	11,2	73	62	51	11

Kuvan 97 kuvaajassa on esitetty ideoidun laskentamallin ja Warnock et al. tutkimuksesta saatujen välipohjien mittaustulosten erotus [dB] 1/3-oktaavikaistoittain. Vertailussa käytettyjen välipohjien yksityiskohtaiset tiedot on esitetty liitteessä 3. Alakatto oli kiinnitetty jousirangalla kaikissa kuvan 97 vertailussa käytetyissä välipohjissa.



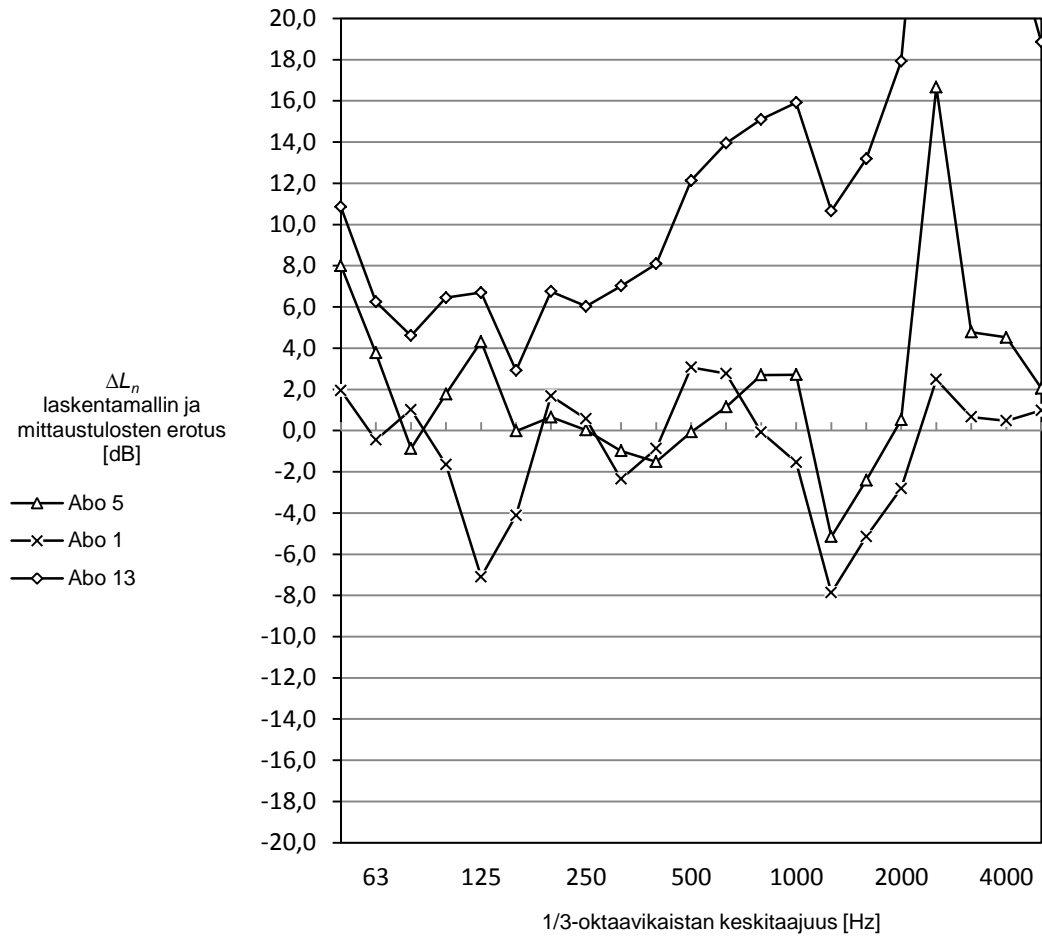
**Kuva 97: Ideoidun laskentamallin ja mittaustulosten erotus. Laskentamallissa on otettu huomioon vain "Raimo"-laskentaohjelmalla laskettu alakaton parannusluku. Tässä kuvaajassa käsitellyillä rakenteilla välipohja oli palkkirakenteinen ja alakatto oli kiinnitetty jousirangoilla. Mittaustulokset on saatu Warnock et al. tutkimuksesta [122].**

Kuvan 98 kuvaajassa on esitetty ideoidun laskentamallin ja Warnock et al. tutkimuksesta saatujen välipohjien mittaustulosten erotus [dB] 1/3-oktaavikaistoittain. Vertailussa käytettyjen välipohjien alakattoa ei ollut kiinnitetty joustavasti vaan joko lautakiinnityksellä tai alakattolevy oli asennettu suoraan välipohjapalkkien alapintaan.



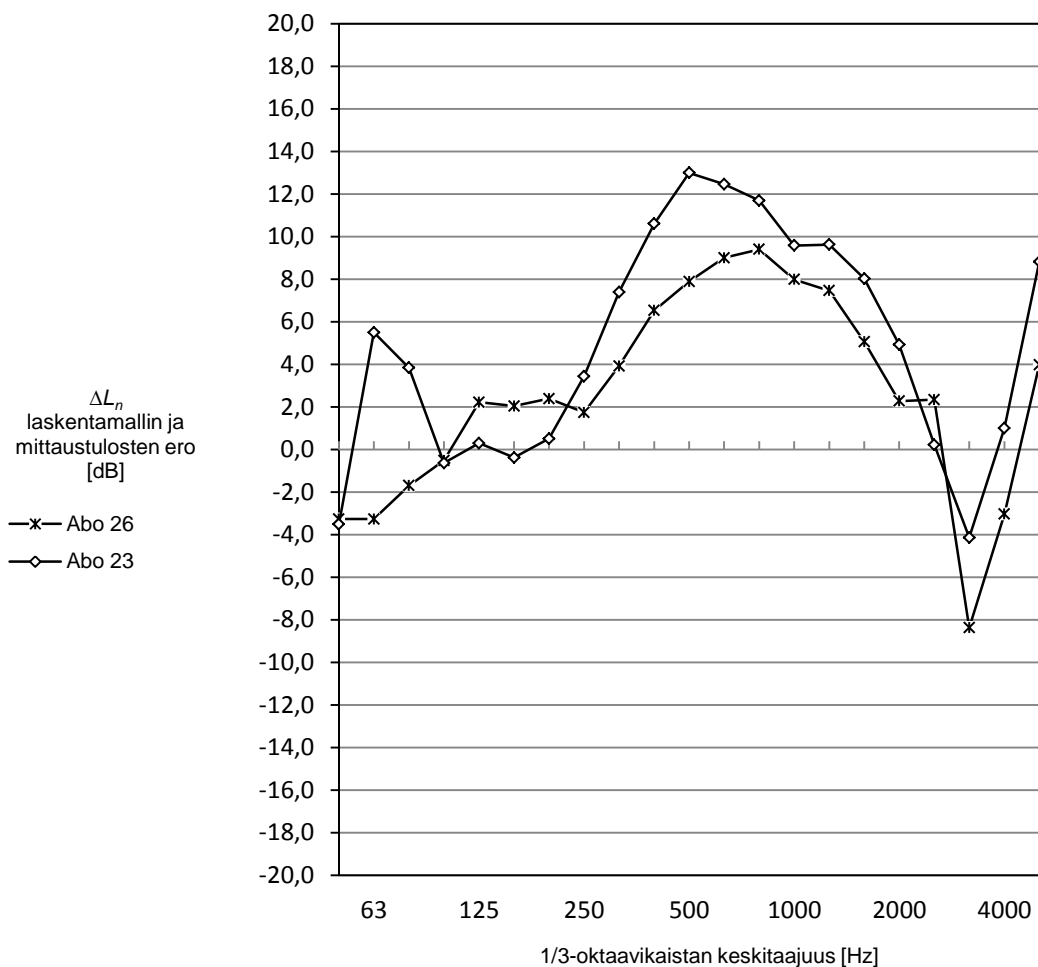
**Kuva 98: Ideoidun laskentamallin ja mittaustulosten erotus. Laskentamallissa on otettu huomioon vain "Raimo"-laskentaohjelmalla laskettu alakaton parannusluku. Tässä kuvaajassa käsitellyillä rakenteilla välipohja oli palkkirakenteinen ja alakatto oli kiinnitetty suoraan tai lautakiinnityksellä palkkeihin. Mittaustulokset on saatu Warnock et al. tutkimuksesta [122].**

Kuvan 99 kuvaajassa on esitetty ideoidun laskentamallin ja Balanant et al. tutkimuksesta saatujen mittaustulosten erotus [dB] [1]. Yksityiskohtaiset tiedot välipohjarakenteista on esitetty liitteessä 3. Abo 13 rakenteessa alakatto oli täysin erillinen, omalla palkistol-la toteutettu rakenne. Abo 1 ja 5 rakenteissa alakatto oli kytketty raakavälipohjaan.



***Kuva 99: Ideoidun laskentamallin ja mittaustulosten erotus. Laskentamallissa on otettu huomioon vain "Raimo"-laskentaohjelmalla laskettu alakaton parannusluku. Mittaustulokset on saatu Balanant et al. tutkimuksesta. Tutkitut rakenteet olivat palkkirakenteisia välipohjia. [1]***

Kuvan 100 kuvaajassa esitetty ideoidun laskentamallin ja Balanant et al. tutkimuksesta saatujen mittaustulosten erotus [dB] [1]. Tässä kuvaajassa käsiteltyjen välipohjien kantava rakenne oli massiivipuulevy.



**Kuva 100: Ideoidun laskentamallin ja mittaustulosten erotus. Laskentamallissa on otettu huomioon vain "Raimo"-laskentaohjelmalla laskettu alakaton parannusluku. Kuvaajassa käsitellyt välipohjat olivat massiivipuulevyrakenteisia. Mittaustulokset on saatu Balanant et al. tutkimuksesta [1].**

#### 4.6.2 Lattiapäällyste ja alakatto

Kappaleessa 4.2 esitettiin parametristen tutkimusten [1, 108, 122] perusteella lasketut lattiapäällysteiden parannusluvut. Taulukossa 13 on esitetty Kylliäisen ideoiman laskentamallin tulokset, kun laskennassa on otettu huomioon alakaton ja lattiapäällysteen parannusluku. Alakaton parannusluvut laskettiin kappaleessa 4.6.1. Laskentamallin tulokset ovat taulukon sarakkeessa  $L_{n,w,mal}$ .

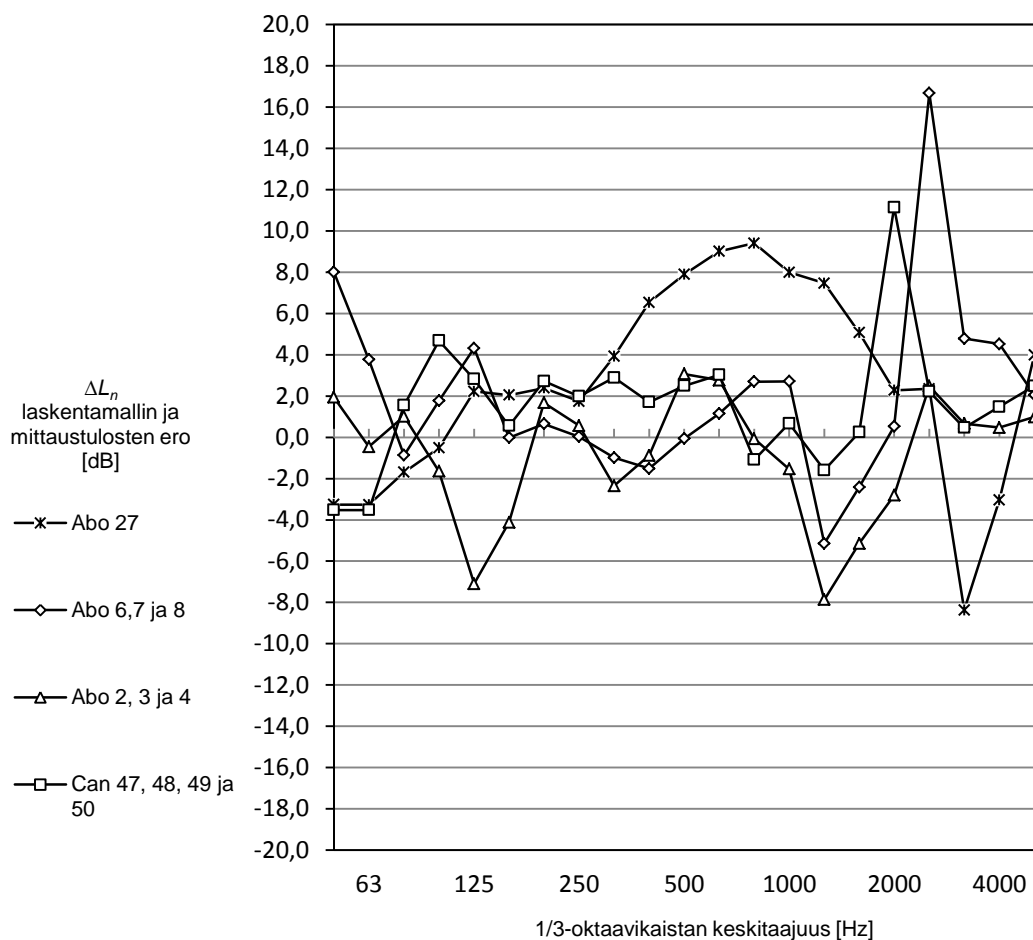
**Taulukko 13: Kylläisen laskentaidean tulokset koerakenteilla, kun laskennassa on otettu huomioon alakaton ja lattiapäällysteen parannusvaikutus. Mittaustulokset ovat Warnock et al. ja Balanant et al. tutkimuksista [1, 122].**

$VP$	$VP_{raw}$	$\Delta L_{ak,Raimo}$	$\Delta L_p$	$L_{n,w,raw}$	$L_{n,w,mal}$	$L_{n,w,mit}$	$L_{n,w,mal} - L_{n,w,mit}$
Can 48	Can94	25,8	0	90	64	65	-1
Can 47	Can94	25,8	28	90	36	37	-1
Can49	Can94	25,8	0	90	64	65	-1
Can50	Can94	25,8	1	90	63	64	-1
Abo 2	Can 94	15,8	6	90	68	72	-4
Abo 3	Can 94	15,8	2	90	72	76	-4
Abo4	Can 94	15,8	6	90	68	72	-4
Abo6	Can 94	31,1	1	90	58	59	-1
Abo7	Can94	31,1	1	90	58	59	-1
Abo8	Can94	31,1	-1	90	60	61	-1

**Taulukko 14: Kylläisen laskentaidean tulokset koerakenteilla, kun laskennassa on otettu huomioon alakaton ja lattiapäällysteen parannusvaikutus. Mittaus- ja laskentatulosten vertailussa ja lattiapäällysteen parannusluvun laskennassa on käytetty mitattuja  $L_{n,w} + C_{1,50-2500}$  [1].**

$VP$	$VP_{raw}$	$\Delta L_{ak,Raimo}$	$\Delta L_p$	$L_{n,w,raw}$	$L_{n,w,mal}$	$L_{n,w,mit}$	$L_{n,w,mal} - L_{n,w,mit}$
Abo 2	Can 94	15,8	4	90	70	73	-3
Abo 3	Can 94	15,8	2	90	72	75	-3
Abo4	Can 94	15,8	4	90	70	73	-3
Abo6	Can 94	31,1	1	90	58	63	-5
Abo7	Can94	31,1	1	90	58	63	-5
Abo8	Can94	31,1	0	90	59	64	-5
Abo27	Abo19	12,4	1	73	60	60	0

Kuvan 101 kuvaajassa on esitetty 1/3-oktaavikaistaisen laskentamallin ja mittaustulosten erotus. Alakaton parannusluku laskettiin suoraan parametrisissa tutkimuksissa käytettyjen välipohjien mitatuista 1/3-oktaavikaistojen askeläänitasoista ja yksilukuarvoista. Koska laskentamallin testaus on tehty täsmälleen samoilla välipohjarakenteilla kuin lattiapäällysteen parannusluvun laskenta, lattianpäällysteen parannusluku ei aiheuta lainkaan virhettä laskentamalliin. Näin ollen laskentamallin ja mittaustulosten ero johtuu vain alakaton parannusluvun tuottamasta erosta. Esimerkiksi mittauksissa Acu 47, 48, 49 ja 50 käytettiin yhtä välipohjamallia, Can1, jonka päälle eri lattiapäällysteet asennettiin. Näin tehtiin myös Abo 2,3,4 ja Abo 6,7,8 mittauksissa. Tämän vuoksi näiden välipohjarakenteiden laskenta- ja mittaustulosten erotukset on esitetty samassa käytössä.



**Kuva 101: Laskenta- ja mittaustulosten erotus. Lattiapäällysteen parannusvaikutus laskettiin suoraan välipohjien 1/3-oktaavikaistojen askelääneneristävyyden mittaustuloksista.**

## 4.7 Johtopäätökset

Laskentamalli on vasta ideointi tasolla ja tämän tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää, millaisilla laskentamenetelmillä puuvälipohjan eri ominaisuudet voitaisiin huomioida laskentamallissa. Tämän tutkimuksen perusteella nykyinen alakaton parannusluvun määrittystapa tuottaa erittäin hyviä tuloksia mittaustuloksiin vertailtuna. Alakaton vaikutuksen huomioon ottaminen sen ilmasteneristävyyden kautta on merkittävä havainto, sillä puurakenteiden monimutkaisuus on yksi laskentamallien merkittävimmistä haasteista. Se, että alakattorakenne ja välipohjan sisällä oleva absorptiomateriaali voidaan huomioida ilmasteneristävyyden kautta, yksinkertaistaa jäljelle jäävä laskentamallia.

Ideoidun laskentamallin tulokset vastasivat mitattuja arvoja parhaiten ”Can” [122] tutkimuksen välipohjilla. Kuten jo aiemmin kappaleen 4.4 johtopäätöksissä todettiin, Warronck et al. tutkimuksista [122] oli saatavissa hyvin tarkat välipohjien materiaalitiedot ja mittaustulokset, toisin kuin Balanant et al. tutkimuksesta [1].

”Can”-välipohjien laskenta- ja mittaustulosten vertailussa havaittiin, että laskentamallin ja mittaustulosten ero on suurin alakattolevyn koincidenssitaajuuden alueella, noin 2000 Hz taajuusalueella. Erot johtuvat siitä, etteivät ”Raimo”-laskentaohjelmalla lasketut ilmaääneneristävyydet vastaa todellisia ilmaääneneristävyyksiä. Edellä esitettyjen laskenta- ja mittaustulosten perusteella voidaan esittää, että alakaton parannusvaikutus välipohjan askelääneneristävyyteen voidaan huomioida tarkasti sen ilmaääneneristävyyden perusteella.

Alakaton parannusluvun yhteydessä selvitettiin eri yksilukuarvojen vaikutusta laskentamallin ja mittaustulosten yhteensopivuuteen. Kaikilla välipohjamalleilla laskentamalli tuotti parhaat tulokset, kun alakaton parannusluku laskettiin  $R_w$  ilmaääneneristävyyden avulla.  $R_w + C_{50-3150}$  mittaluvulla laskettu alakaton parannusluku puolestaan heikensi laskentamallin ja mittaustulosten vastaavuutta kaikissa tapauksissa. Massiivipuuvälipohjilla raakavälipohjan askeläänitason huomiointi  $L_{n,w} + C_{,50-2500}$  mittaluvun avulla paransi laskennallisten tulosten tarkkuutta. Tämän tutkimuksen otanta massiivivälipohjien osalta oli hyvin suppea, vain kaksi välipohjarakennetta. On kuitenkin huomionarvoista, että alakaton parannusluku näyttäisi toimivan, näiden yksittäistapausten perusteella, myös massiivipuuvälipohjilla.

Laskentamallin ja mittaustulosten ero oli suurin Abo 13 rakenteella. Tässä rakenteessa alakatto oli toteutettu ilman rakenteellista kytkentää välipohjaa kannatteleviin palkkeihin. Kuten kappaleessa 4.4 kävi ilmi, kyseisen rakenteen ilmaääneneristävyyden Raimo-laskentatuloksissa oli merkittäviä eroja mittaustuloksiin nähden, jotka vaikuttavat myös askelääneneristävyyden laskentamallin tuloksiin.

Lattiapäällysteen parannusluku ei aiheuttanut lainkaan virhettä laskentamallin tuloksiin, koska laskentamallin vertailu ja parannusluvun laskenta tehtiin samojen mittaustulosten perusteella. Parempi tapa lattiapäällysteen parannusluvun laskentaan olisi määrittää parannusluku tai 1/3-oktaavikaistoittainen parannus standardoidun referenssivälipohjan avulla. Tällöin referenssivälipohjan arvoilla laskettua laskentamallitulosta voitaisiin verrata todellisiin mittaustuloksiin. Tähän tutkimukseen ei ollut saatavilla sopivilla referenssivälipohjilla mitattuja lattiapäällysteiden parannuslukuja. Kuten parametrusten tutkimusten yhteydessä tuotiin ilmi, lattiapäällysteen toiminta on riippuvainen raakavälipohjan toiminnasta.

Tämä ideoitu puuvälipohjien askelääneneristävyyden laskentamalli vaati vielä huomattavasti lisätutkimusta. Tämän tutkimuksen perusteella merkittävimmät lisätutkimusta vaativat osa-alueet ovat raakavälipohjan askelääneneristävyyden ja kelluvan lattian parannusluvun määrittäminen. Myös välipohjan ilmaääneneristävyyden laskentamallit kaipaavat vielä lisätutkimusta. Ilmaääneneristävyyden tutkimuksen yhteydessä, kappaleessa 4.4, saatiin viitteitä siitä, että levy-palkki-yhdistelmän akustista toimintaa voitaisiin approksimoida korottamalla levyn taivutusjäykkyyttä. Palkki-levy-yhdistelmän taivutusjäykkyuden laskentaan voitaisiin mahdollisesti soveltaa myös lujusopin laskenta-



kaavoja. Tämän ideoidun laskentamallin kehityksen lähtökohtana on ollut mallin soveltuminen päivittäiseen suunnittelutyöhön. Näin ollen laskentamallin kehittämisen kannalta on tärkeämpää, että malli antaa oikean suuruusluokan askeläänitasotuloksia suhteellisen nopeasti ja kohtuullisella vaivalla.

## 5. YHTEENVETO

Kuten tämän tutkimuksen johdantokappaleessa todettiin, puurakentamiseen liittyvät ääneneristävyysongelmat on tiedostettu maailmanlaajuisesti, myös Suomessa. Välipohjien askelääneneristävyys on yksi merkittävimmistä puurakenteiden ääneneristävyysaasteista.

Tämän tutkimuksen tarkoituksen oli selvittää laajan kirjallisuustutkimuksen avulla, miten eri puuvälipohjan rakenteelliset ominaisuudet vaikuttavat sen askelääneneristävyyteen, millaisia subjektiivisia tutkimusmenetelmiä puuvälipohjien askelääneneristävyyden tutkimuksessa on käytetty, ja sitä, millaisia laskentamalleja puuvälipohjien askelääneneristävyyden laskentaan on saatavissa. Tämän lisäksi tutkimuksessa kehitettiin tekniikan liseniaatti Mikko Kylliäisen ideoimaa puuvälipohjien askelääneneristävyyden laskentamallia.

Kuten useasti tässä työssä on tuotu ilmi, tämä tutkimus rajoittuu vain välipohjien askelääneneristävyyden tarkasteluun. Todellisissa rakennuksissa huoneeseen muodostuvaan askeläänitasoon vaikuttaa myös muut rakennuksen ominaisuudet, kuten sivutiesiirtymät.

### 5.1 Askelääneneristävyyden subjektiivinen arviointi

Puuvälipohjien akustisia ominaisuuksia on tutkittu useissa subjektiivisissa kokeita sisältäneissä tutkimuksissa 2000-luvulla. Merkittävimpiä tutkimustapoja ovat kuuntelukokeet ja sosio-akustiset tutkimukset. Yhteiseurooppalaisessa COST TU0901-hankkeessa on esitetyn asuinrakennusten akustisia olosuhteita koskevan kyselytutkimuksen ja kuuntelukoejärjestelyn on osoitettu soveltuvan hyvin puurakennuksille. Näin ollen tulevaisuudessa tutkimuksissa tulisi käyttää näitä hyväksi todettuja käytäntöjä, mikä mahdollistaa tutkimustulosten laajemman hyödyntämisen ja vertailemisen. Tutkimustulosten vertailun kannalta on tärkeää, että kaikki lähtötiedot ja käytetyt tutkimusmenetelmät dokumentoidaan erittäin tarkasti.

2000-luvulla toteutettujen sosio-akustisten- ja kuuntelututkimusten perusteella pienten taajuuksien huomioon ottaminen mittauksissa parantaa subjektiivisten ja objektiivisten arvioiden yhteneväisyyttä puuvälipohjilla. Tämän perusteella on aiheellista esittää, että puuvälipohjien arvioinnissa tulisi käyttää vähintäänkin standardissa ISO 717-2 esitettyä  $L_{n,w} + C_{L,50-2500}$  mittalukua [36]. Pienten taajuuksien äänitasojen mittaamiseen liittyy epävarmuustekijöitä, jotka täytyy ottaa huomioon mittausaluetta laajennettaessa.

## 5.2 Askelääneneristävyyteen vaikuttavat rakenteelliset tekijät

Kirjallisuustutkimuksen perusteella puuvälipohjien askelääneneristävyyteen vaikuttavien tekijöiden arvioinnissa on tärkeintä ottaa huomioon koko välipohjarakenne. Välipohja sisältää useita eri äänenkulkureittejä ja askelääneneristävyyden parantamisen kannalta on tehokkainta vaimentaa merkittävimmät reitit mahdollisimman lähellä herätepistettä. Merkittäviä äänenkulkureittejä palkkivälipohjalla ovat runkoääni palkkien kautta ja välitilassa etenevä ilmaääni. Kuten tutkimuksessa osoitettiin, eri äänenkulkureittien merkittävyys on riippuvainen kokonaisuudesta: yhden äänenkulkureitin vaimentaminen nostaa toisen äänenkulkureitin kokonaisuuden kannalta merkittäväksi. Esimerkiksi palkkivälipohjan sisällä olevan absorptiovillan parannusvaikutus on riippuvainen alakattorakenteen kytkennästä kantavaan palkistoon.

Palkkivälipohjalla merkittävimmät askelääneneristävyyteen vaikuttavat rakenneominaisuudet ovat palkkien ylä- ja alapuolisten rakenteiden massat, sillä massojen kasvattaminen parantaa askelääneneristävyyttä koko taajuusalueella, mutta erityisesti alle 100 Hz taajuuksilla. Massan lisäämisen ohella rakenneosien väliset liitokset ovat merkittävässä asemassa puuvälipohjan askelääneneristävyyden kannalta. Raskas pintalaatta puuvälipohjan päällä on syytä toteuttaa kelluvana rakenteena, sillä suoraan raakavälipohjan päälle pintalaatan värähtely johtuu tehokkaasti raakavälipohjaan. Tutkimuksen perusteella toinen merkittävä liitos on alakaton liitos palkistoon. Alakatto parantaa välipohjan askelääneneristävyyttä parhaiten silloin, kun se on asennettu joustavasti palkkeihin. Ilman joustavasti asennettua alakattoa puuvälipohja saavuttaa harvoin rakennusmääräysten mukaisia askeläänitasolukuvaatimuksia.

Yksittäisten paksujen levyjen sijaan puuvälipohjissa on tehokkaampaa käyttää useita ohuempia levykerroksia. Usealla levyllä voidaan saavuttaa sama massalisäys kuin yhdellä paksulla, mutta samalla levykerrosten välissä tapahtuu värähtelyhäviöitä, jotka parantavat askelääneneristävyyttä. Lattiapäällysteiden avulla voidaan parantaa välipohjan askelääneneristävyyttä erityisesti yli 250 Hz taajuuksilla. Niiden teho perustuu askeläänilähteen tuottaman iskun vaimentamiseen. Näin ollen lattiapäällyste vaikuttaa tehokkaasti kaikkiin äänenkulkureitteihin. Tutkimustulosten mukaan lattiapäällysteen parannusvaikutus riippuu erityisesti laatasta, jonka päälle se asennetaan. Raskaan ja kovan laatan päällä lattiapäällysteet tuottavat paremman askelääneneristävyyden parannuksen kuin kevyen ja joustavan laatan päällä.

Massiivipuuvälipohjilla tärkeimmät askelääneneristävyyteen vaikuttavat tekijät ovat lattian pinta- ja alakattorakenne. Massiivipuulevy on suhteellisen kevyt ja johtaa värähtelyä tehokkaasti, joten pelkän massiivipuulevyn askelääneneristävyys on heikko.

### 5.3 Askelääneneristävyyden laskentamallit

Tämän tutkimuksen perusteella puuvälipohjien askelääneneristävyyden laskentaa ei vielä ole saatavissa käytännön suunnittelutyöhön soveltuvaa laskentamallia. Laskentamallit voidaan jakaa kahteen pääryhmään: deterministiset ja empiiriset mallit. Empiirisistä laskentamalleista merkittävimpiä ovat SEA-mallit. Rakennusakustiikan SEA-mallit on alun perin kehitetty raskaille ja homogeenisille rakenteille, mikä hankaloittaa niiden soveltamista kevyille ja epähomogeenisille puurakenteille. SEA-mallien vahvuutena voidaan pitää laaja-alaista tuotekehitystä, sillä rakennusakustiikan lisäksi SEA-laskentaa käytetään myös koneakustiikassa. Koneakustiikan tarpeisiin kehitettyjä laskentaratkaisuja voidaan mahdollisesti hyödyntää myös puuvälipohjien laskentamalleissa.

Tutkimuksessa tarkastellut deterministiset laskentamallit on kehitetty varta vasten puurakenteita varten, minkä vuoksi mallit ovat monimutkaisia ja teoreettisia. Analyyttisten mallien heikkoutena voidaan pitää niiden herkkyyttä lähtöarvojen epätarkkuuksille. Laskentamalleilla pitäisi pystyä mallintamaan myös useita erilaisia rakenteita ja liitoksia, sillä lähes jokaisella välipohjavalmistajalla on omat rakenneratkaisunsa.

### 5.4 Ideoitu askelääneneristävyyden laskentamalli

Kylliäisen ideoimaa laskentamallia kehitettiin kirjallisuustutkimuksesta saatujen tietojen perusteella. Laskentamallin parametreiksi valittiin alakattorakenne, kelluva lattia ja lattianpäällyste, koska kirjallisuustutkimuksen perusteella nämä olivat merkittävimpiä välipohjan askelääneneristävyyteen vaikuttavia tekijöitä. Itse raakavälipohjan askelääneneristävyys päätettiin määrittää mittausten avulla, sillä kuten laskentamallien kirjallisuustutkimuksessa osoitettiin, sopivaa mallia askelääneneristävyyden laskentaan ei ollut tällä aikataululla saatavissa.

Tämän tutkimuksen perusteella palkki- tai massiivipuorakenteiseen välipohjaan asennettun alakaton tuottama parannus askelääneneristävyyteen vastaa välipohjan ilmaääneneristävyyden muutosta. Tämä osoitettiin sekä eri tutkimuksista saatuja mittaustuloksia vertailemalla että laskennallisella tarkastelulla. Ilmaääneneristävyyksien laskentaan käytettiin TTY:llä kehitettyä ”Raimo”-laskentaohjelmaa. ”Raimo”-laskentaohjelma on kehitystyön alla, joten laskentatarkkuus tulee paranemaan. Laskennalliseen ilmaääneneristävyyteen vaikuttaa myös lähtöarvojen tarkkuus.

Lattiapäällysteen parannusvaikutus kevyen lattialevyn päällä joudutaan määrittämään mittausten perusteella. Standardissa ISO 10140-5 on esitetty referenssivälipohjat ja mitauskäytännöt lattiapäällysteiden parannusluvun määrittämiseksi [28]. Kelluvien lattioiden parannusvaikutusta ei määritetty tässä tutkimuksessa, koska sopivaa mittausdataa tai laskentamallia ei ollut saatavissa.

Tähän tutkimukseen ei ollut saatavissa mittaustuloksia rakenteilta, joissa puuvälipohjan päälle on asennettu sekä raskas pintalaatta että lattiapäällyste. Tutkimustulokset viittaavat siihen, että raskaan pintalaatan päällä lattiapäällysteen askelääneneristävyyden parannusvaikutus lähenee standardissa ISO 12354-2 esitettyä 12 dB/oktaavi parannusta. Lisätutkimuksilla ja -mittauksilla voitaisiin selvittää, kuinka lattiapäällyste toimii raskaan pintalaatan kanssa.

Tässä tutkimuksessa empiiristen ja determinististen laskentamallien tarkastelu jäi pintapuoliseksi. Kylläisen ideoiman laskentamallin jatkokehittämisen kannalta olisi hyödyllistä syventyä tarkemmin esimerkiksi Brunskogin esittämään malliin tai SEA-laskentaan. Näiden avulla saattaisi olla mahdollista laskea erilaisten raakavälipohjien askeläänitasoja. Raakavälipohjat ovat mahdollisimman yksinkertaisia välipohjarakenteita, mikä osaltaan keventää laskentamallin vaatimuksia. Vaikka raakavälipohjan laskentaosuus olisikin monimutkainen, se on vain osa ideoitua laskentamallia. Saman raakavälipohjan ympärille on mahdollista mallintaa useita erilaisia alakatto- ja pintalattiaratkaisuja. Näin ollen tavoite, ideoidun laskentamallin yksinkertaisuudesta, ei kärsisi merkittävästi.

## LÄHTEET

1. Balanant, N., Guigou, C., Villenave, M. 2012. Respect des exigences acoustiques dans les bâtiments à ossature bois, à vocation logements. Etape 2, Rapport final, Acoubois France, French Institute of Technology for Forest based and Furniture sector (FCBA), 604 p.
2. Bard, D., Davidsson, P., Wernberg, P. A. 2010. Sound and vibrations investigations in a multi-family wooden frame building. International Congress of Acoustics, ICA 2010, Sydney, Australia
3. Bard, D., Sjökvist, L-G. 2008. Acoustical measurements at Limnologen, Växjö, Sweden. Sweden, Lund University, Department of Construction Sciences, Engineering Acoustics, Report TVBA-3128
4. Belmondo, V. E., Heebink, T.B., Brittain, F.H. 1973. Ranking the impact sound transmission of wood-framed floor-ceiling assemblies. Journal of the Acoustical Society of America. Vol. 54(6), pp. 1433-1441
5. Bodén, H., Tamer, E. Sound and Vibration. Sweden, Royal Institute of Technology (KTH), The Marcus Wallenberg Laboratory, 584 p.
6. Bodlund, K. 1985. Alternative reference curves for evaluation of the impact sound insulation between dwellings. Journal of Sound and Vibration, vol. 102(3), pp. 381-402
7. Bosmans, I., Nightingale, T. R. T. 1999. Vibration transmission at floor/joist connections in wood frame buildings. Canadian Acoustics/ Acoustique Canadienne, vol 27(3), pp. 60-61
8. Bradley, J.S., Birta, J. A. 2001. A Simple model of the sound insulation of gypsum board on resilient supports. Noise Control Engineering Journal, vol. 49(5), pp. 216-223
9. Brunskog, J. 2002. Acoustic excitation and transmission of lightweight structures. Doctoral Thesis. Sweden, LTH, Lund University, Engineering Acoustics, Report TVBA-1009. 57 p. + included papers.

10. Brunskog, J. 2004. Near-periodicity in acoustically excited stiffened plates and its influence on vibration, radiation and sound insulation. *Acta Acustica united with Acustica*, vol. 90(2), pp.301-312
11. Brunskog, J., Hammer, P. 2000. Prediction Models of Impact Sound insulation on Timber Floor structures; A literature Survey. *Building Acoustics*, vol 9 (2), pp. 89-112
12. Brunskog, J., Hammer, P. 2003. Prediction Model for the Impact Sound Level of Lightweight Floors. *Acta Acustica united with Acustica*, vol. 89(2) pp. 309-322
13. Brunskog, J., Hammer, P. 2003. The Interaction between the ISO Tapping machine and Lightweight Floors. *Acta Acustica united with Acustica*, vol. 89(2) pp. 309-322
14. Brunskog, J., Sjökvist, L-G., 2013. An experimental and statistical study of the behavior of the vibration field in two coupled lightweight wooden joist floors. *Applied Acoustics*, vol. 74(4), pp. 517-520
15. Chung, H., Dodd, G., Emms, G., McGunnigle, K., Schmid, G. 2006. Maximizing impact sound resistance of timber framed floor/ceiling systems, Volume 1. Australia, Forest and wood products research and development corporation, Project No. PN04.2005.
16. Chung, H., Dodd, G., Emms, G., McGunnigle, K., Schmid, G. 2006. Maximizing impact sound resistance of timber framed floor/ceiling systems, Volume 3. Australia, Forest and wood products research and development corporation, Project No. PN04.2005.
17. Craik, R. J. M. 1998. Structure-borne sound transmission in lightweight buildings. *Proceedings of ICA 1998, Seattle, USA*. pp. 1387-1388
18. Craik, R.J.M., Galbrun, L. 2005. Vibration transmission through a frame typical of timber-framed buildings. *Journal of Sound and Vibration*, vol. 281(3-5), pp. 763-782
19. Craik, R.J.M., Smith, R.S. 2000. Sound transmission through double leaf lightweight partitions part II: structure-borne sound. *Applied Acoustics*, vol. 61(2), pp. 247-269

20. Craik, R.J.M., Smith, R.S. 2000. Sound transmission through double leaf lightweight partitions part I: airborne sound. *Applied Acoustics*, vol. 61(2), pp. 223-245
21. Craik, R. M. J., Evans, D. I. 1989. The effect of workmanship on sound transmission through buildings: Part 2 – Structure-borne sound. *Applied Acoustics*, vol. 27 (2), pp. 137-145
22. Cremer, L., Heckl, M., Petersson, B. A. T. 2005. *Structure-Borne Sound, Structural Vibrations and Sound Radiation at Audio Frequencies*, 3<sup>rd</sup> edition. Berlin, Springer-Verlag, 592 s.
23. Emms, G. 2004. The effect of mounting conditions on low-frequency impact sound insulation. *Proceedings of International Congress of Acoustics 2004*, Kyoto, Japan, 4 p.
24. EN 1995-1-1+A1+ AC:2008. Eurocode 5 – Design of timber structures – Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings. Brussels, European Committee for Standardization, 223 p.
25. EN ISO 10140-1:2010. Acoustics – Laboratory measurement of sound insulation of building element – Part 1: Application rules for specific products. Brussels, European Committee for Standardization, 32 p.
26. EN ISO 10140-3:2010. Acoustics – Laboratory measurement of sound insulation of building elements – Part 3: Measurement of impact sound insulation. Brussels, European Committee for Standardization, 12 p.
27. EN ISO 10140-4:2010. Acoustics - Laboratory measurement of sound insulation of building elements – Part 4: Measurement procedures and requirements. Brussels, European Committee for Standardization, 12 p.
28. EN ISO 10140-5:2010. Acoustics – Laboratory measurement of sound insulation of building elements – Part 5: Requirements for test facilities and equipment. Brussels, European Committee for Standardization, 35 p.
29. EN ISO 12354-2:2000. Acoustics – Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements – Part 2: Impact sound insulation between rooms. Brussels, European Committee for Standardization, 33 p.



30. EN ISO 12999-1:2014: Acoustics – Determination and application of measurement uncertainties in building acoustics – Part 1: Sound insulation. Brussels, European Committee for Standardization, 20 p.
31. EN ISO 140-7:1998. Acoustics – Measurement of sound insulation in buildings and of building elements – Part 7: Field measurements of impact sound insulation of floors. Brussels, European Committee for Standardization, 20 p.
32. EN ISO 18233:2006. Acoustics – Application of new measurement methods in building and room acoustics. Brussels, European Committee for Standardization, 26 p.
33. EN ISO 29052-1:1993. Acoustics – Determination of dynamic stiffness – Part 1: Materials used under floating floors in dwellings. Brussels, European Committee for Standardization, 9 p.
34. EN ISO 3382-2:2000. Acoustics – Measurement of room acoustic parameters – Part 2: Reverberation time in ordinary rooms. Brussels, European Committee for Standardization, 17 p.
35. EN ISO 717-1:1996. Acoustics – Rating of sound insulation in buildings and of building elements – Part 1: Airborne sound insulation. Brussels, European Committee for Standardization, 39 p.
36. EN ISO 717-2:1996. Acoustics – Rating of sound insulation in buildings and of building elements – Part 2: Impact sound insulation. Brussels, European Committee for Standardization, 16 p.
37. Esala, L., Hietala, J., Huovari, J. 2012. Puurakentamisen yhteiskunnalliset vaikutukset. Helsinki , Pellervon taloustutkimus PTT, raportti 239, 67 s.
38. Fastl, H., Zwicker, E. 2007. Psychoacoustics, Facts and Models. 3<sup>rd</sup> Edition. Berlin, Springer-Verlag, 462 p.
39. Forssén, J., Kropp, W., Brunskog, J., Ljunggren, S., Bard, D., Sandberg, G., Ljunggren, F., Ågren, A., Hallström, O., Dybro, H., Larsson, K., Tillberg, K., Jarnerö, K., Sjökvist, L. G., Östman, B., Hagberg, K., Bolmsvik, Å. Olsson, A., Ekstrand, C. G., Johansson, M. 2008. Acoustics in wooden buildings, State of the art 2008. Sweden, Technical Research Institute of Sweden, Report 2008:16, 133 p.

40. Gerretsen, E. 1976. A new system for rating impact sound insulation. *Applied Acoustics*, vol. 9(4), pp. 247-263
41. Gerretsen, E. 1986. Calculation of airborne and impact sound insulation between dwellings. *Applied Acoustics*, vol. 19(4), pp. 245-264
42. Gerretsen, E. 1994. European developments in prediction models for building acoustics. *Acta Acustica* 2 (1994)
43. Gerretsen, E. 1998. *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 103 (5), pp. 1385-1386
44. Gerretsen, E. 2008. Prediction models for building performance- European need and worldwide use. *Proceedings of Euronoise Conference*, June 29<sup>th</sup> –July 4<sup>th</sup>, Paris, France
45. Gösele, K. 1949. Zur Messmethodik der Trittschalldämmung. *Gesundheitsingenieur* 70(1949), pp. 66-70
46. Gover, B. N., Bradley, J. S., Zeitler, B., Schoenwald, S. 2011. Objective and subjective assessment of lightweight wood-framed floor assemblies in response to footstep and low-frequency impact sounds. Canada, National Research Council Canada, Institute for Research in Construction, Report NRCC-54534, 7 p.
47. Gubrium, J. F., Holstein, J. A. 2001. *Handbook of Interview Research*. Thousand Oaks, CA, SAGE knowledge.
48. Guigou, C., Lacaze, M., Villenave, M. 2010. Respect des exigences acoustiques dans les bâtiments d'habitation à ossature bois. Etape 1, Rapport Final, Acoubois. France, French Institute of Technology for Forest based and Furniture sector (FCBA), 266 p.
49. Guigou-Carter, C., Balanant, N., Villenave, M. 2014. Acoustic comfort evaluation in lightweight wood-based buildings. *Proceedings of Forum Acusticum*, Sep. 7<sup>th</sup> -12<sup>th</sup> 2014, Krakow, Czech
50. Hagberg, K., Thorsson, P. 2010. Uncertainties in standard impact sound measurement and evaluation procedure applied to light weight structures. *Proceedings of ICA 2010 Conference*, Aug. 23<sup>rd</sup> -27<sup>th</sup> 2010, Sydney, Australia

51. Halliwell, R. E., Quirt, J. D., Nightingale, T. R. T. 2002. Flanking transmission in wood framed multifamily dwellings. *Canadian Acoustics/Acoustique Canadienne*, vol 30(3), pp. 32-33
52. Hongisto, V. 2003. Monikerroksisen seinärakenteen ilmaääneneristävyyden ennustemalli. Turku, Työterveyslaitos, Työympäristötutkimuksen raporttisarja 2
53. Hongisto, V. 2013. Subjective and objective rating of airborne sound insulation –living sounds. Seminar presentation. CEN/TC 126 & TU0901 Building Acoustics Seminar, Dec. 4<sup>th</sup> 2013, Charlottenlund, Denmark
54. Hongisto, V., Mäkilä, M., Suokas, M. 2015. Satisfaction with sound insulation in residential dwellings – The effect of wall construction. *Building and Environment*, vol. 85, pp. 309-320
55. Hopkins, C. 2007. *Sound Insulation*. 1<sup>st</sup> Edition, Elsevier Ltd. 622 p.
56. Hu, L., Omeranovic, A., Dufour, R. 2013. Effects of flooring, topping and underlayment on impact sound insulation of wood-joisted floor-ceiling assemblies. *Proceedings of ICA*, June 2<sup>nd</sup>- 7<sup>th</sup> 2013 , Montréal, Canada
57. IR. J., van den Eijk. 1969. Some problems in the measurement and rating of impact sound insulation. *Applied Acoustics* vol. 2(4), pp. 269-277
58. Izewska, A. 2005. Requirements for impact sound insulation between dwellings from the point of view of acoustical comfort of inhabitants. *Proceedings of Forum Acousticum*, Aug. 29<sup>th</sup> – Sep 2<sup>nd</sup> , 2005, Budapest, Hungary
59. Jeon, J. Y., Jeong, J. H., Ando, Y. 2002. Objective and Subjective Evaluation of Floor Impact Noise. *Journal of Temporal Design in Architecture and the Environment*, vol. 2 (1), pp. 20-28
60. Jeon, J. Y., Ruy, J. K., Jeong, J. H., Tachibana, H. 2006. Review of the Impact Ball in Evaluation Floor Impact Sound. *Acta acustica united with Acustica*, vol. 92, pp. 777-786
61. Jeon, J. Y., Ruy, J. K., Lee, P. J. 2010. A quantification model of overall dissatisfaction with indoor noise environment in residential buildings. *Applied Acoustics*, vol.72(10), pp. 914-921

62. Jeon, J.Y. 2001. Subjective evaluation of floor impact noise based on the model of ACF/IACF. *Journal of Sound and Vibration*, vol. 241(1), pp.147-155
63. Johansson, A-C., Hammer, P., Nilsson, E. 2004. Prediction of Subjective Response from Objective Measurements Applied to Walking Sound. *Acta Acustica united with Acustica*, vol. 90(1), pp. 161-170
64. Johansson, C. 1995. Low-Frequency Impact Sound Insulation of a Light Weight Wooden Joist Floor. *Applied Acoustics*, vol. 44(2), pp. 133-147
65. Karjalainen, M. 2009. *Kommunikaatioakustiikka, 2. painos*. Espoo, Teknillinen korkeakoulu, Elektroniikan, tietoliikenteen ja automaation tiedekunta, Signaalinkäsittelyn ja akustiikan laitos, raportti 7, 255 s.
66. Kartous, M. S., Jonasson, H. G. 2001. Impact sound improvement on lightweight floors a simplified method. *Proceedings of the 17<sup>th</sup> International Congress on Acoustics, Sep 2<sup>nd</sup> -7<sup>th</sup> 2001, Rome*
67. Keronen, A. 1998. *Puukerrostalot: Rakenteet*. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos, talonrakennustekniikan julkaisu 85
68. Kim, M. J., Kim, H. S., Sohn, J. Y. 2001. Prediction and evaluation of impact sound transmission in apartment building structures by statistical energy analysis (SEA). *Applied Acoustics*, vol 62(9), pp. 601-616
69. Kovalainen, V. 2013. *Raimon käyttöohje*. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos. 30 s.
70. Kristenssen, J., Rindel, J. H. 1989. *Bygningsakustik, teori og praksis*. Denmark, Statens Byggeforskningsinstituts anvisning 166.
71. Kylliäinen, M. 2006. *Talonrakentamisen akustiikka*. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennetekniikan laitos. 205 s.
72. Kylliäinen, M. 2008. Askeläänieristyksen mittausmenetelmän ongelmien tausta. *Rakenteiden Mekaniikka*. Vol 41(1), pp. 58-65
73. Kylliäinen, M. 2014. The Measurement Uncertainty of Single-Number Quantities for Rating the Impact Sound Insulation of Concrete Floors. *Acta Acustica united with Acustica*, vol. 100 (4). pp. 640-647

74. Langdon, F.J., Buller, I.B., Scholes, W.E. 1983. Noise from neighbors and the sound insulation of party floors and walls in flats. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 88(2), pp. 243-270
75. Langdon, F.J., Buller, I.B., Scholes, W.E. 1981. Noise from neighbours and the sound insulation of party walls in houses. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 79(2), pp. 205-228
76. Liebl, A., Späh, M., Leitner, P. 2013. Evaluation of acoustic quality in wooden buildings: Listening tests and questionnaire field study, *AcuWood report No. 3*. Sweden, SP Technical Research Institute of Sweden, SP report 2014:16
77. Ljunggren, F., Simmons, C., Hagberg, K. 2014. Correlation between sound insulation and occupants' perception – Proposal of alternative single number rating of impact sound. *Applied Acoustics*, vol. 85, pp. 57-68
78. Mace, B. 2003. Statistical energy analysis, energy distribution models and system modes. *Journal of sound and vibration*, vol. 264 (2), pp. 391-409
79. Maijala, P. Akustiikan mittaukset, esivedos 22.09.2014. Tampere, omakustanne
80. Mariner, T. 1963. Letter to Editor- Comments on Impact-Noise Measurement. *Journal of the Acoustical Society of America*. vol. 35(9) pp. 1453
81. Mariner, T., Hehmann, H.W.W. 1967. Impact noise rating of different floors. *Journal of the Acoustical Society of America*. Vol 41(1), pp. 206-214
82. Mayr, A.R., Nightingale, T.R.T. 2007. On the mobility of joist floors and periodic rib-stiffened plates. Canada, National Research Council Canada, Institute for Research in Construction, Report NRCC-49694
83. Merivuo, K., Koskinen, A. 2009. Puutuotemarkkinoiden kehitysnäkymät, Selvitys työ- ja elinkerinoministeriölle. Helsinki, Pöyry Forest Industry Consulting Oy
84. Negreira, J. 2013. Vibrations in lightweight buildings - perception and prediction. Licentiate dissertation. Sweden, Lund University, Faculty of Engineering, Department of construction science, Division of engineering acoustics.

85. Nightingale, T. R. T., Bosmans, I. 1999. Vibration response of lightweight wood frame building elements. Canada, National Research Council Canada, Report NRCC-43673
86. Nightingale, T., Zeitler, B., Schoenwald, S., King, F. 2009. A hierarchy of flanking transmission paths in lightweight wood frame construction. Proceedings of Inter-Noise 2009, Aug. 23<sup>rd</sup> -26<sup>th</sup> 2008, Ottawa, Canada
87. Nightingale, T.R.T., Bosmans, I. 2007. Two modelling approaches for periodic rib-stiffened plates typical of floor assemblies. Canada, National Research Council Canada, Institute for Research in Construction, Report NRCC-49469
88. Nilsson, E., Hammer, P. 2001. Subjective evaluation of Impact Sound Transmission through Floor Structures. Proceedings of ICA 2001, Rome, Italy
89. Olynyk, D., Northwood, T. D. 1968. Assessment of Footstep Noise through Wood-Joist and Concrete floors. Journal of the Acoustical Society of America. Vol. 43(3), pp. 730-733
90. Olynyk, D., Northwood, T. D. 1965. Subjective judgments of footstep noise transmission through floors. Journal of the Acoustical Society of America. Vol. 38(6), pp. 1053-1039
91. Pedersen, D.B., Roland, J., Raabe, G., Maysenhölder, W. 2000. Measurement of the Low-Frequency Sound Insulation of Building Components. Acta Acustica united with Acustica, vol 86(3), pp. 495-505
92. Perttula, A., Vattulainen, K., Suurhaasko, T. 2012. Todennäköisyyslaskenta. Opintomoniste, versio 9/2012. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, Matematiikan laitos
93. Puuinfo. 2011. Tiedote RakMk E1 palomääräysten muuttumisesta. WWW-lähde, tarkistettu (29.4.2015). [www.puuinfo.fi/rakentamismääräykset/puukerrostalo-palomääräykset-2011](http://www.puuinfo.fi/rakentamismääräykset/puukerrostalo-palomääräykset-2011)
94. Puurakentamisen edistämisen seurantaryhmä. 2007. Helsinki, Ympäristöministeriön raportti 17/2007, 49 s.

95. Quirt, J. D., Nightingale, T. R. T., King, F. 2006. Developing a guide for flanking transmission in wood framed construction. *Canadian Acoustics/Acoustique canadienne*, vol. 34(3), pp. 88-89
96. Quirt, J. D., Nightingale, T.R.T, Halliwell, R.E. 2005. Vertical flanking sound transmission via the wall-floor junction in wood framed construction. *Canadian Acoustics*, vol. 33(3), pp. 68-69
97. Rasmussen, B., Machimbarrena, M. 2014. COST- Action TU0901- Building acoustics throughout Europe. Volume 1: Towards a common framework in building acoustics throughout Europe. DiScript Preimpression, S.L
98. Raw, G. J., Oseland, N. A. 1991. Subjective Response to Noise Through Party Floors in Conversion Flats. *Applied Acoustics*, vol. 32(3), pp. 215-231
99. Riala, M. 2014. Puurakentamisen kilpailukyvyyn haasteet. Seminaariesitys. Metsäntutkimuslaitos, Metla, Uudistuvat puutuotearvoketjut ja puunhankintaratkaisut (PUU) -tutkimus ja kehittämissuunnitelman loppuseminaari, 18.3.2014, Espoo
100. Rindel, J. H. 2013. Evaluation of airborne and impact sound from neighbours investigated by listening tests at DTU. Seminar presentation. CEN/TC 126 & TU0901 Building Acoustics Seminar, Dec. 4<sup>th</sup> 2013, Charlottenlund, Denmark
101. Ruuska, A., Häkkinen, T. 2012. Potential impact of wood building on GHG emissions – tutkimusraportti työ- ja elinkeinoministeriölle. Valtion teknillinen tutkimuskeskus VTT
102. Schultz, T. J. 1976 Alternative test method for evaluating impact noise, *The Journal of the Acoustical Society of America* 60(1976), s. 645–655
103. Sharp, B. H. 1978. Prediction methods for the sound transmission of building elements. *Noise Control Engineering Journal*. Vol. 11, s. 53–63.
104. Simmons, C. 2010. Revision of sound classification schemes in Sweden. *Proceedings of Inter-Noise*, 13- 16 June, 2010, Lisbon, Portugal
105. Simmons, C., Hagberg, K. 2011. A Questionnaire for Correlation of Subjective Evaluation of Dwellings with their Objective Building Acoustic Pa-

- rameters. Proceedings of the Forum Acusticum, June 27. – July 1. 2011, Aalborg, Denmark
106. Sjökvist, L.G., Hammer, P. 2001. Flanking transmission in lightweight buildings. International Commission of Acoustics, Congress 2001, Rome
  107. Sjöström, A., Baard, D., Persson, K., Sandberg, G. 2010. Experimental structural Acoustic investigation of lightweight floor structure. Proceedings of Congress on Sound and Vibration, Sep. 15<sup>th</sup>-18<sup>th</sup> 2010, Ljubljana, Slovenia
  108. Späh, M., Liebl, A., Leistner, P. 2013. Measurements in the Laboratory and in Single Family Houses, AcuWood report No. 1. Sweden, SP Technical Research Institute of Sweden, Report 2014:14
  109. Späh, M., Liebl, A., Leistner, P. 2013. Results of the project: correlation analysis of subjective and objective parameters (Translation of „Abschlussbericht AcuWood“), AcuWood Report No. 4. Sweden, SP Technical Research Institute of Sweden, Report 2014: 17
  110. Structural Board Association, 2004, OSB Design Manual: Construction Sheating and Design Rated Oriented Strand Board. Canada, Structural Board Association
  111. Suomen rakentamismääräys kokoelma, osa C1: Ääneneristys ja meluntorjunta rakennuksessa – Määräykset ja ohjeet. 1998. Helsinki, Ympäristöministeriö
  112. Teibinger, M., Matzinger, I. 2013. Construction with Cross Laminated Timber in Multi-Storey Buildings Focus on Building Physics. Austria, Holzfoschnung Austria
  113. Thorsson, P. 2013. Laboratory listening tests on footfall sounds, Akulite Report No. 7. Sweden, SP Technical Research Institute of Sweden, Report 2013: 35
  114. Trevathan, J. W., Pearse, J. R. 2008. The effect of workmanship on the transmission of airborne sound through light framed walls. Applied Acoustics, vol. 69 (2), pp. 127-131
  115. Vigran, T. E. 2008. Building Acoustics. Taylor & Francis, 362 p.



116. Villot, Michel. 2012. Overview of the COST FP0702-project. WWW-lähde, luettu 14.4.2015, saatavissa: <http://extranet.cstb.fr/sites/cost/Shared%20Documents/APC%202012%20FP0702%20Brochure.pdf>
117. Wachulec, M., Kirkegaard, P. H., Nielsen, S. R. K. 2000. Methods for Estimation of Structure Borne Noise in Structures - Review. Denmark, Aalborg University, Structural dynamics and Mechanics Series, Paper No. 20, 19 p.
118. Walk, M., Keller, B. 2001. High Sound insulation wooden floor system with granular filling. Proceedings of International Congress of Acoustics 2001, Rome, Italy, 2 p.
119. Warnock, A. C. C. 2000. Impact Sound Measurements on Floors Covered with Small Patches of Resilient Materials or Floating Assemblies. Canada, Institute for Research in Construction, Report IRC-IR-802
120. Warnock, A. C. C. 2005. Summary Report for Consortium on Fire Resistance and Sound Insulation of Floors: Sound Transmission and Impact Insulation Data. Canada, National Research Council Canada, Institute for Research in Construction, Report RR-169. 118 p.
121. Warnock, A. C. C., Birta, J. A. 1998. Summary Report for Consortium on Fire Resistance and Sound Insulation of Floors: Sound Transmission Class and Impact Insulation Class Results. Canada, National Research Council Canada, Institute for Research in Construction, IRC Internal Report IR-766, 121 p.
122. Warnock, A. C. C., Birta, J. A. 2000. Detailed report for consortium on fire resistance and sound insulation of floors: Sound transmission and impact sound insulation data in 1/3 octave bands. Canada, National Research Council Canada, Institute for Research in Construction, Internal Report IR-811., 319 p.
123. Watters, B. G. 1965. Impact-Noise Characteristics of Female Hard-Heeled Foot Traffic. The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 37 (4), pp.619-630
124. World Health Organization (WHO). 2007. Large analysis and review of European housing and health status (LARES)- preliminary overview. Denmark, Copenhagen, WHO Regional Office for Europe, 48 p.

125. Yin, J., Hopkins, C. 2015. Treating periodic ribbed plates with symmetric ribs as individual subsystems in Statistical Energy Analysis: Models for bending wave transmission across L-junctions in the low- and mid-frequency ranges. *Journal of Sound and Vibration*, vol. 344(26), pp. 221-241
126. Zeitler, B., Nightingale, T.R.T., King, F. 2008. Methods to control low frequency impact noise in wood frame construction. Canada, National Research Council Canada, Institute for Research in Construction, Report NRCC-50445. 5 p.
127. Zeitler, B., Nightingale, T.R.T., Schoenwald, S. 2009. Cremer's parallel plates applied to lightweight construction. Canada, National Research Council Canada, Institute for Research in Construction, Report NRCC-51322
128. Zeitler, B., Nightingale, T.R.T., Schoenwald, S. 2009. Effect of floor treatments on direct impact sound pressure level. Canada, National Research Council Canada, Institute for Research in Construction, Report NRCC-53563
129. Zeitler, B., Sabourin, I., Schoenwald, S., Wenzke, E. 2012. On reducing low frequency impact sound transmission in wood framed construction. *Proceedings of Inter Noise*, 19-22th Aug. 2012, New York City, USA, pp. 6653-6662.
130. Zeitler, B., Schoenwald, S., Nightingale, T.R.T. 2010. Parametric study of sound transmission through lightweight floors. Canada, National Research Council Canada, Institute for Research in Construction, Report NRCC-53564
131. Zeitler, B., Schoenwald, S., Nightingale, T.R.T., King, F. 2009. Simplified method to estimate effectiveness of floor treatments (toppings and coverings). Canada, National Research Council Canada, Institute for Research in Construction, Report NRCC-51352

## LIITTEET

Liitteissä 1-3 on esitetty tutkimusaineistoon ja laskentatuloksiin liittyviä lisätietoja.

- Liite 1: 1/3-oktaavikaistoittain mitattuja askeläänitasoja parametrisista tutkimuksista. Tulosten esittämisessä on käytetty kappaleita 3.6.1 - 3.6.10 mukaileva esitysmuoto
- Liite 2: Välipohjien askeläänitasot 1/3-oktaavikaistoittain ideoidun laskentamallin ja mittausten perusteella
- Liite 3: Tutkimuksessa käytetyt välipohjarakenteet: 1/3-oktaavikaistoittain mitatut askeläänitasot ja välipohjien materiaalitiedot

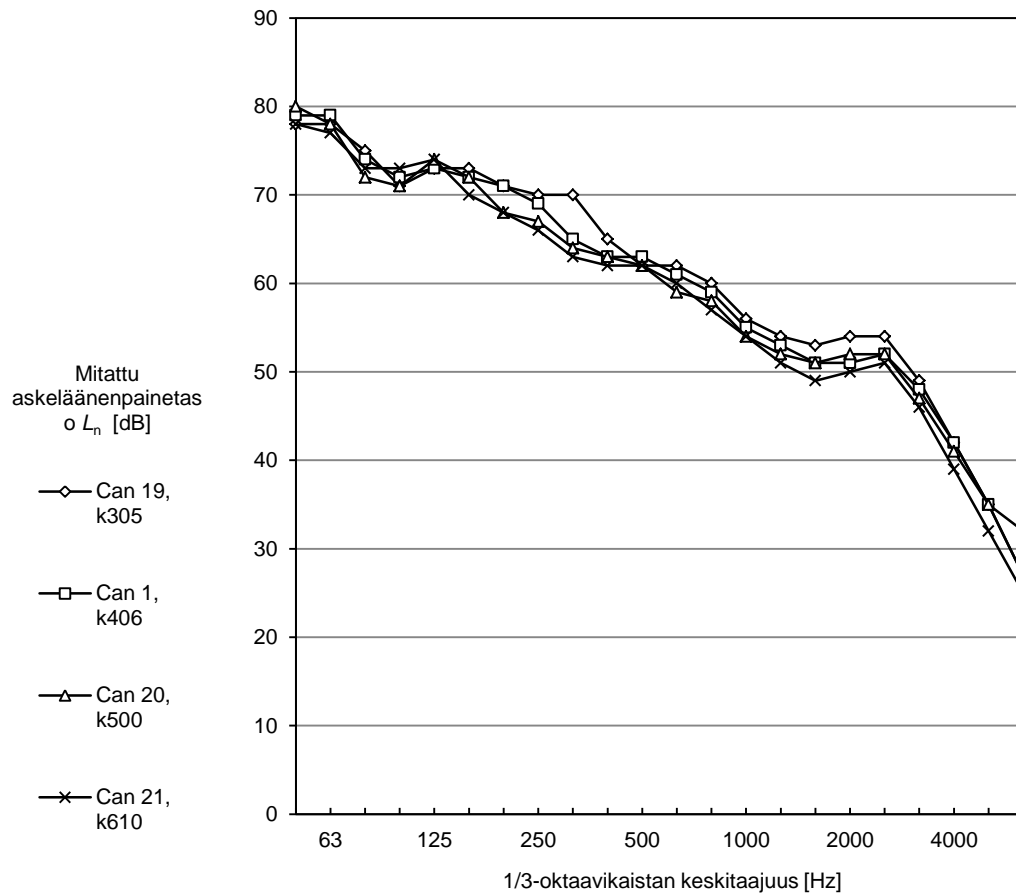
## LIITE 1

Liitteessä 1 on esitetty kuvaajia eri parametrien vaikutuksesta välipohjan askelääni-  
tasoihin. Kuvaajissa esitetään eri välipohjarakenteiden 1/3-oktaavikaistoittain mitattuja  
askeläänenpainetasoja. Mitatut tulokset on saatu useista eri tutkimuksista [1, 108, 120,  
122].

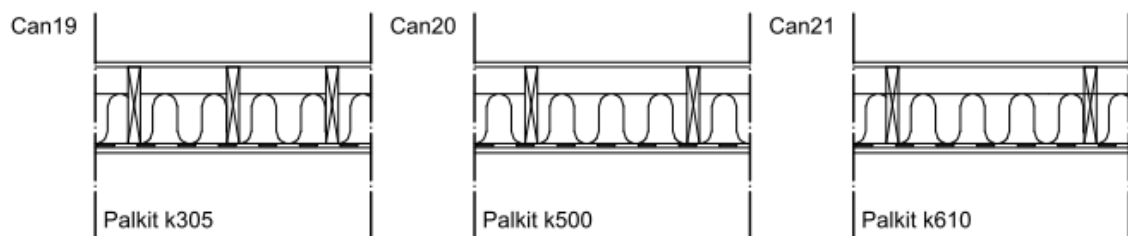
## SISÄLLYSLUETTELO

1. VÄLIPOHJAPALKIT JA PALKKIKENTÄN JÄYKISTYS.....	1
2. ALAKATON KIINNITYSTAPA.....	6
3. ALAKATON MASSA.....	10
4. LATTIALEVYT JA RASKAAT PINTALAAATAT .....	12
5. KELLUVAT LATTIAT .....	17
6. LATTIAPÄÄLLYSTEET .....	19
7. ABSORPTIOMATERIAALI VÄLIPOHJAN SISÄLLÄ .....	25

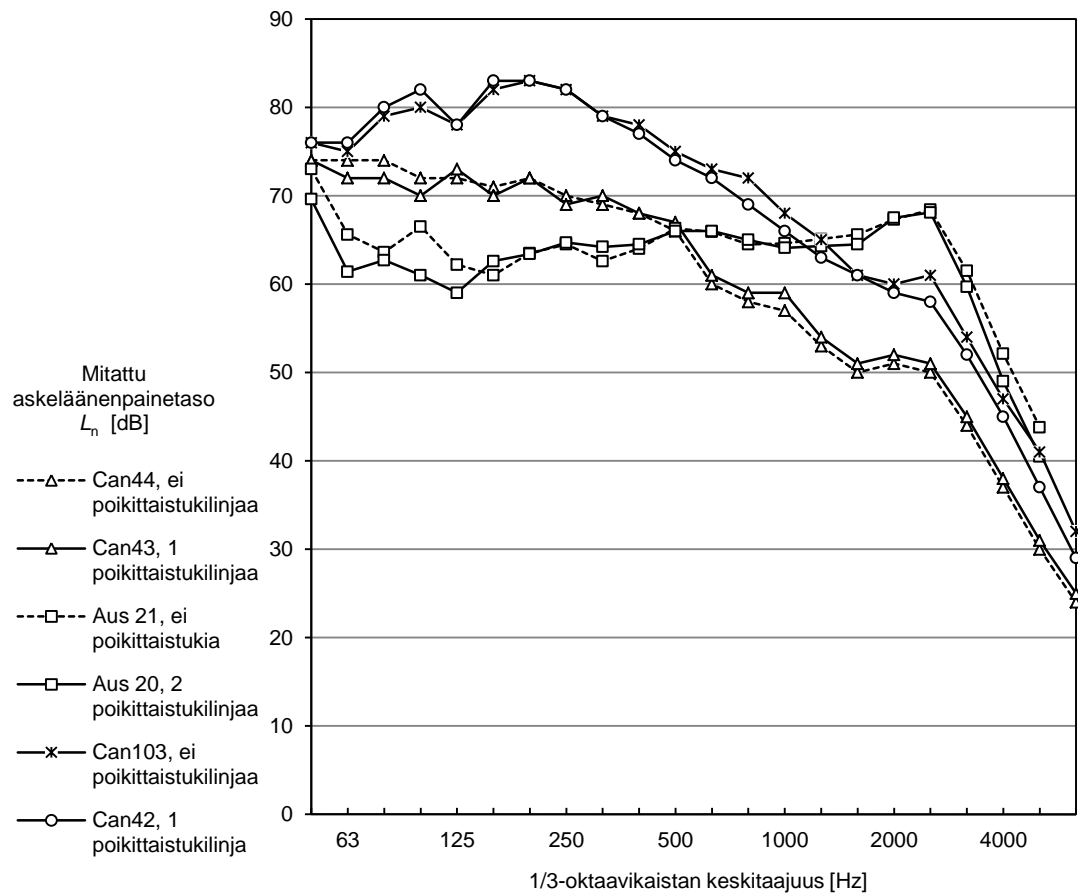
# 1. VÄLIPOHJAPALKIT JA PALKKIKENTÄN JÄYKISTYS



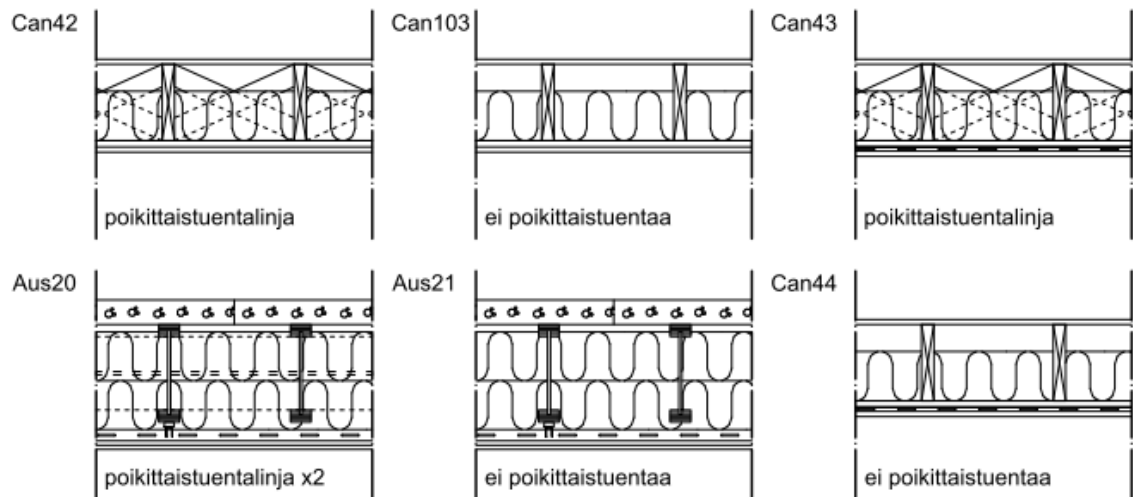
**Kuva 1: Palkkien k-jaon vaikutus askeläänitasoihin [122].**



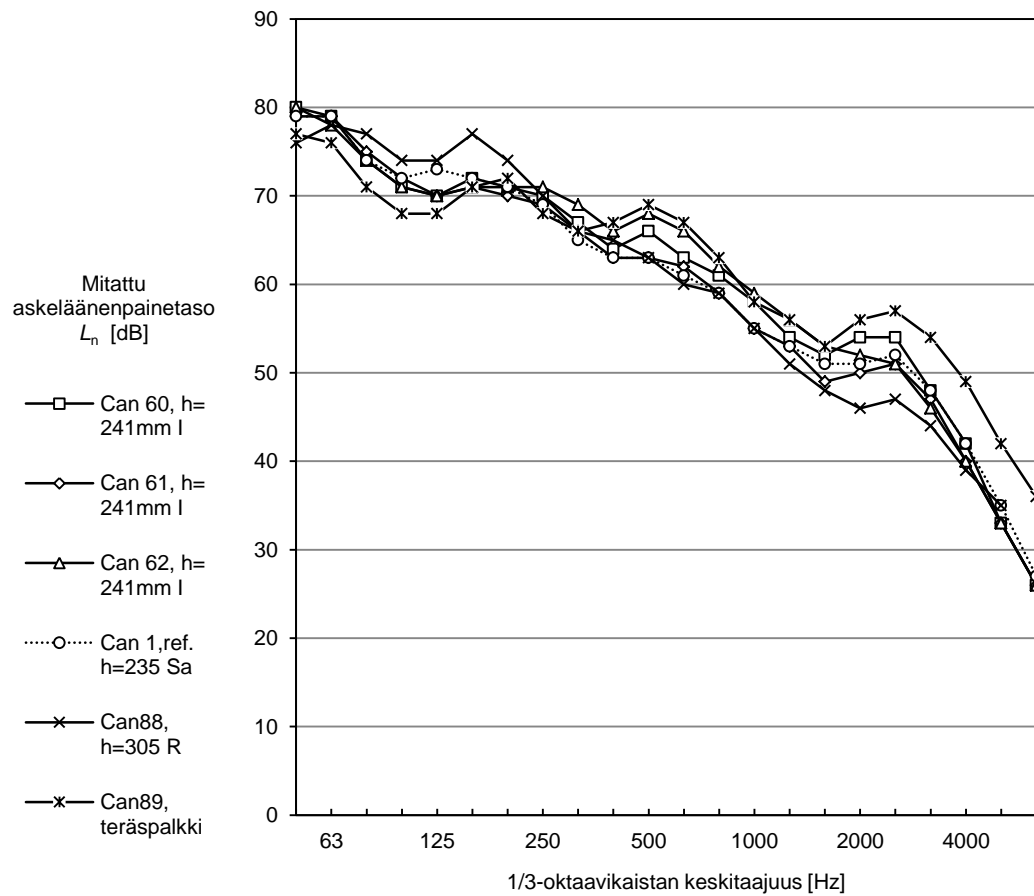
**Kuva 2: Palkkien k-jaon vaikutuksen selvittämiseen käytetyt välipohjarakenteet, mitataava 1:20. VP Can1 on esitetty kuvassa 6.**



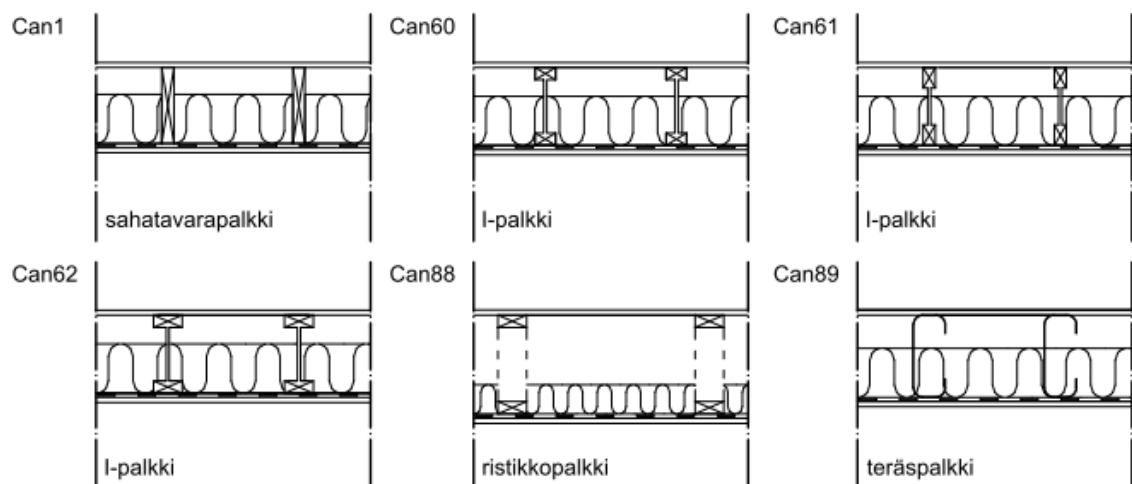
**Kuva 3: Palkkien poikittaistuennan vaikutus askelääneneristävyyteen [16, 122].**



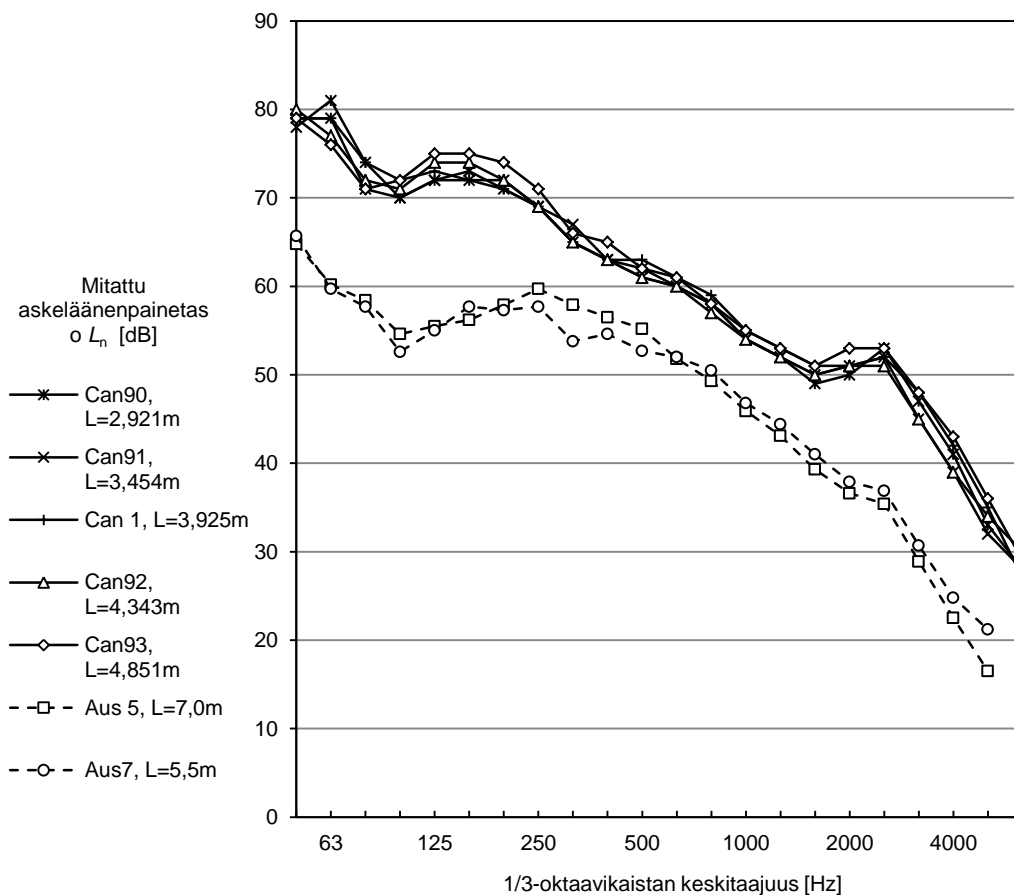
**Kuva 4: Palkkien poikittaistuennan vaikutuksen selvittämiseen käytetyt välipohjarakenteet, mittakaava 1:20.**



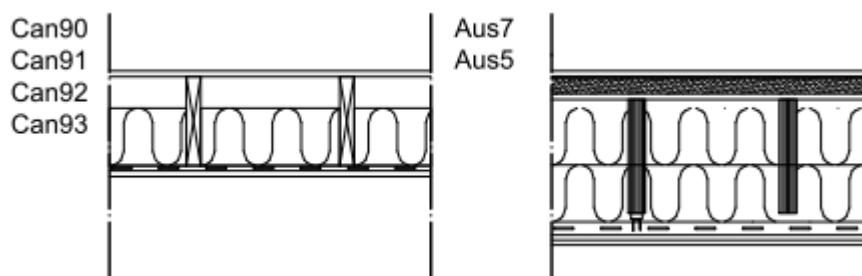
**Kuva 5: Eri palkkityypit verrattuna sahatavara palkkiin; puiset I-palkit, puu-teräs-ristikkopalkki ja C-profiili teräspalkki [120, 122].**



**Kuva 6: Palkkityypin vaikutuksen selvittämiseen käytetyt välipohjarakenteet, mitta-kaava 1:20.**

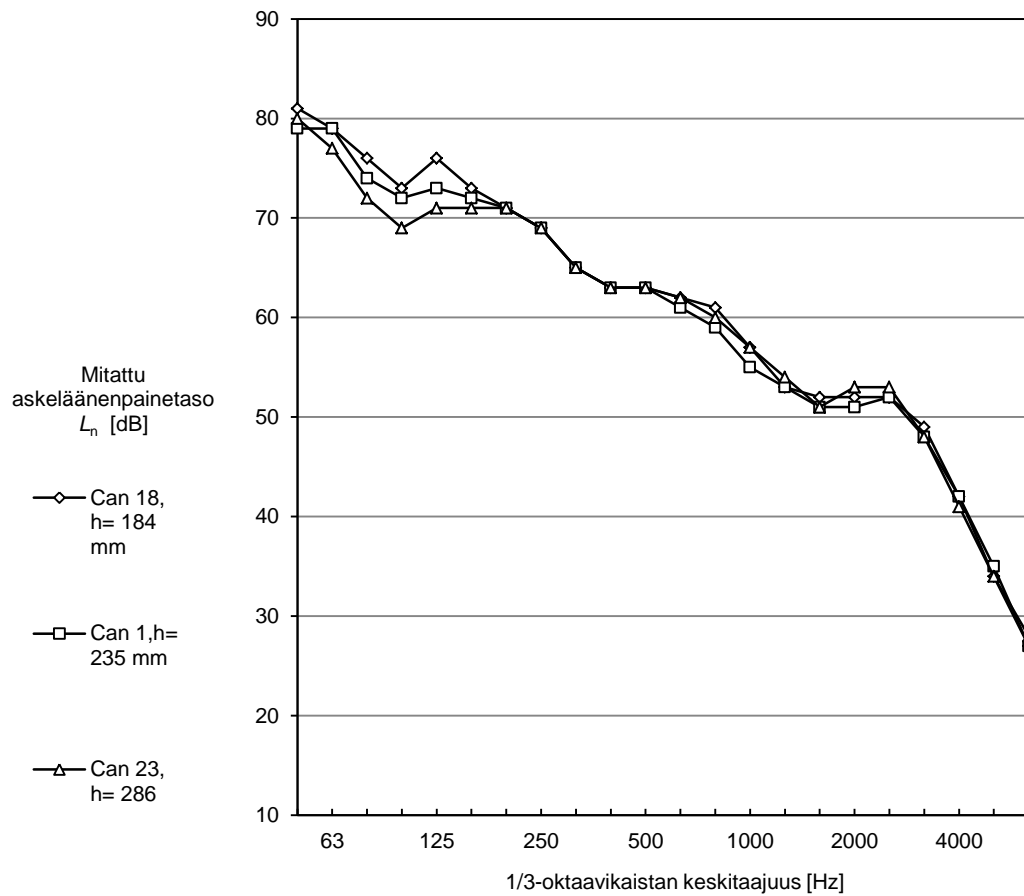


**Kuva 7: Askeläänitasot, kun tutkimusparametrina oli palkin pituus. Katkoviivalla on esitetty mittaustulokset Chung et al. tutkimuksesta [16, 122].**

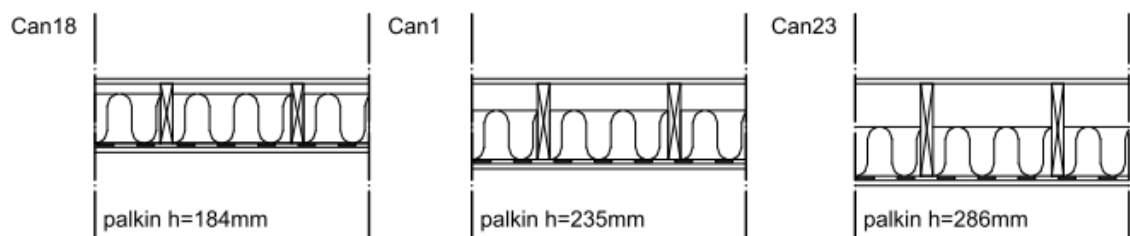


**Kuva 8: Palkkien pituuden vaikutuksen selvittämiseen käytetyt välipohjarakenteet.**



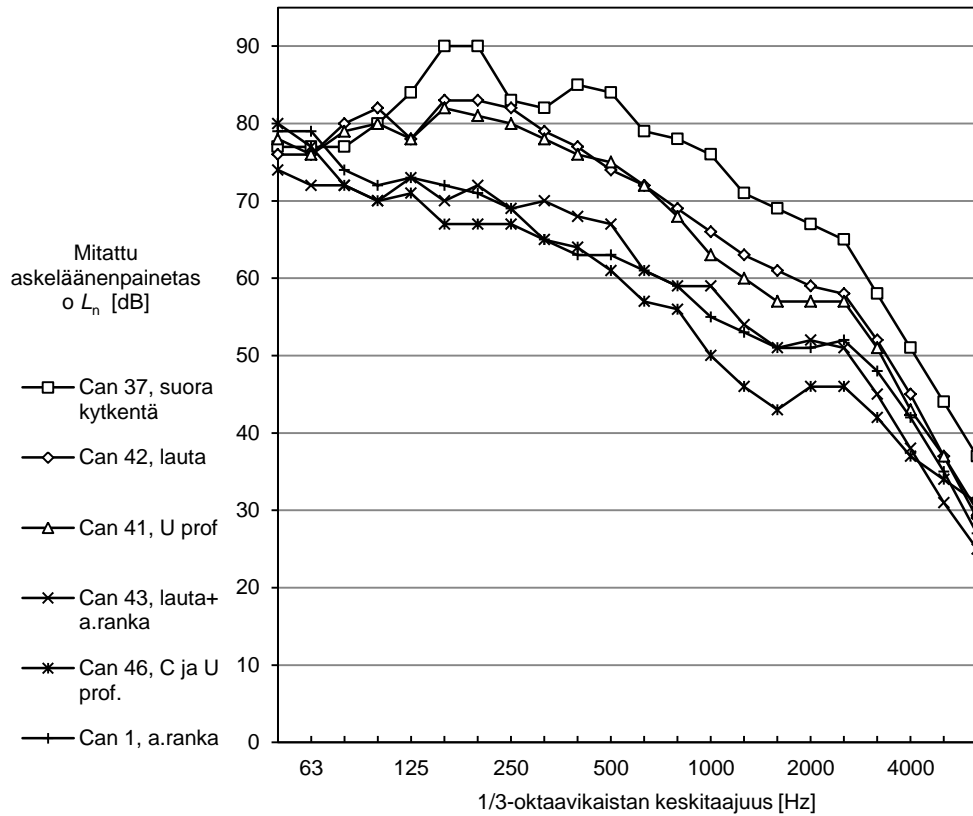


**Kuva 9: Askeläänitasot, kun tutkittavana parametrina oli sahatavarapalkkien korkeus [mm]. Mittaustulokset Warnock et al. tutkimuksesta [122].**

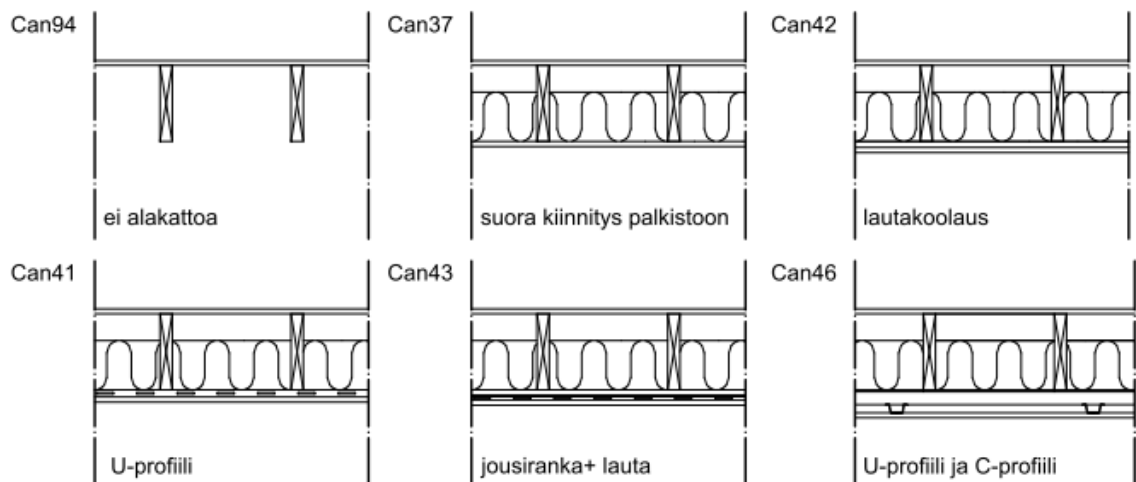


**Kuva 10: Palkkien korkeuden vaikutuksen selvittämiseen käytetyt välipohjarakenteet, mittakaava 1:20.**

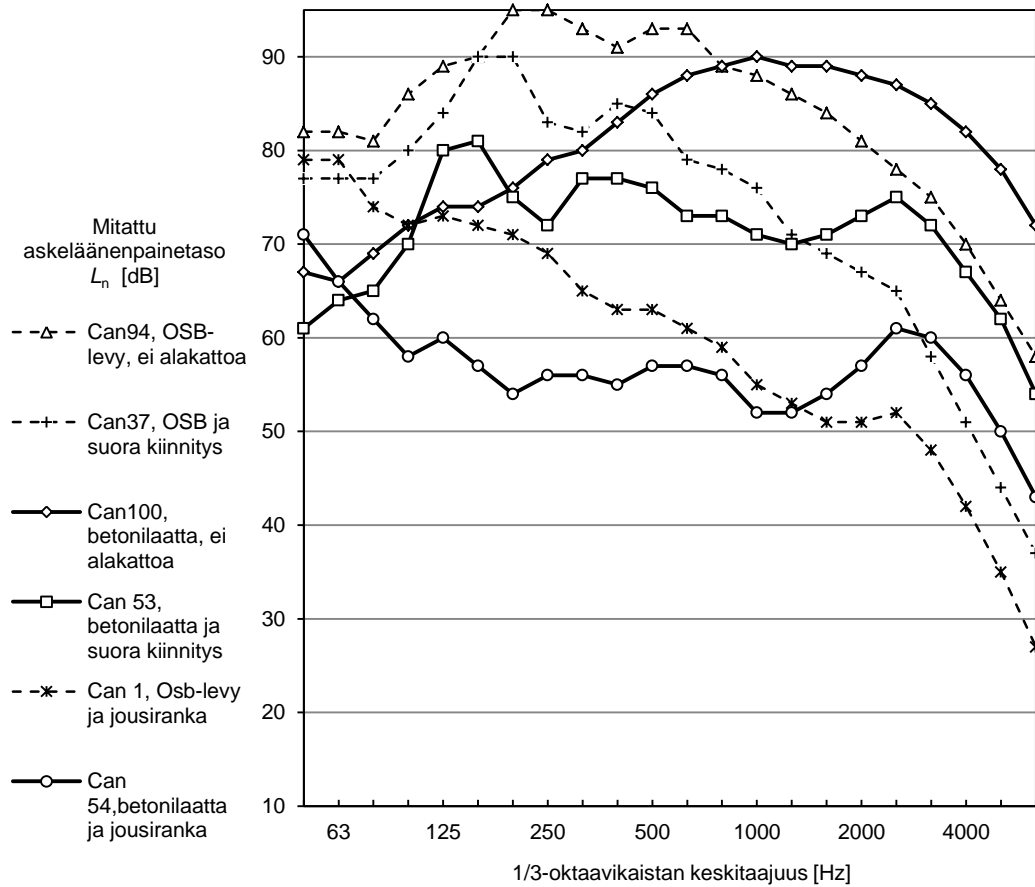
## 2. ALAKATON KIINNITYSTAPA



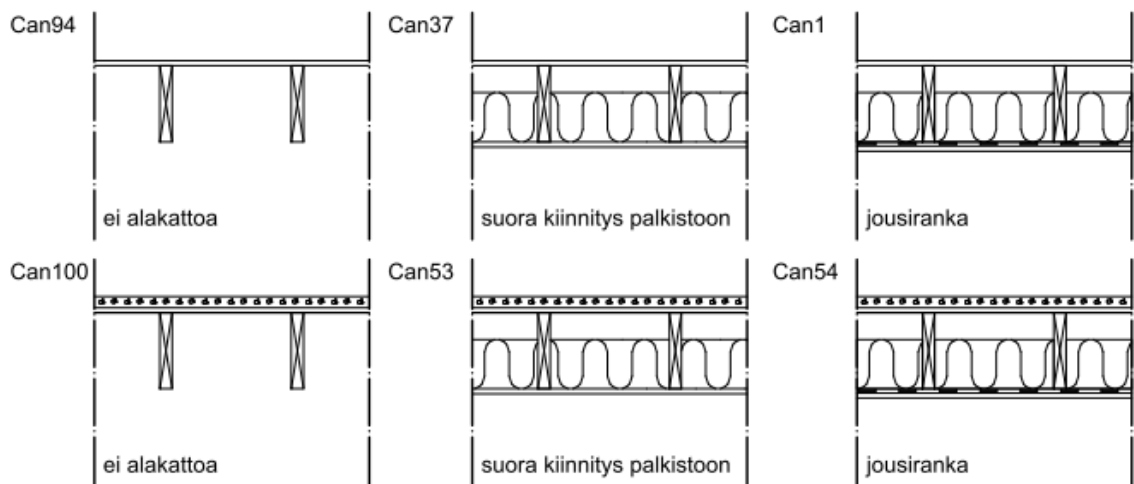
**Kuva 11: Alakaton kiinnitystavan vaikutus askeläänitasoihin [122].**



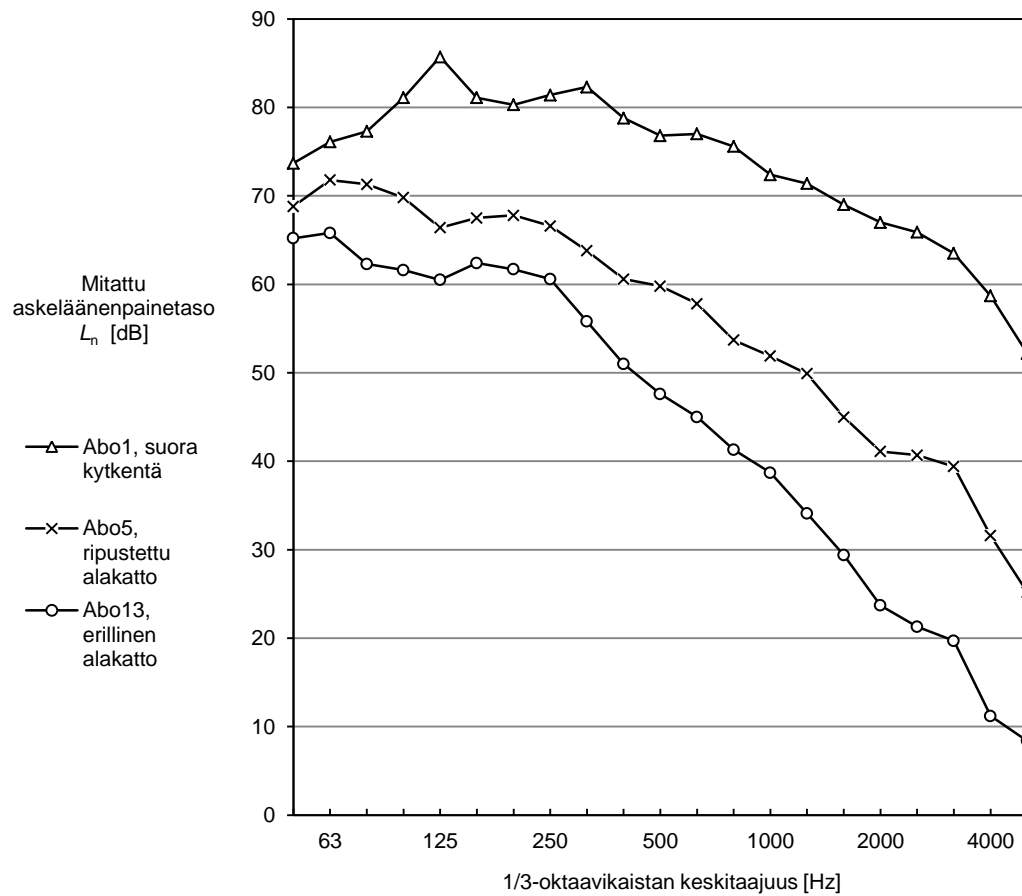
**Kuva 12: Alakaton kytKentätävän vaikutuksen selvittämiseen käytetyt välipohjaraken- teet, mittakaava 1:20.**



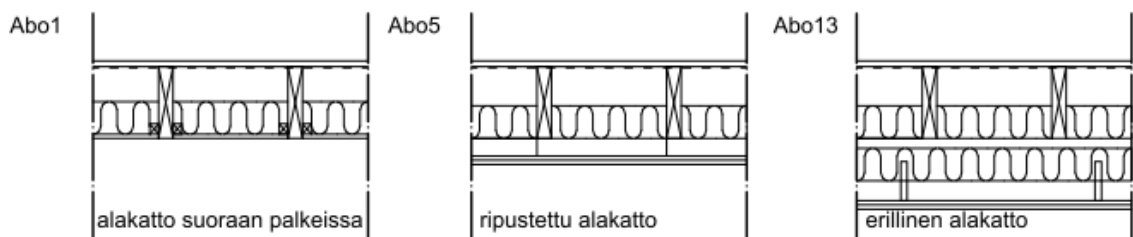
**Kuva 13: Alakattokiinnityksen vaikutus OSB-levy ja betonisilla (35 mm) pintalaatoilla. Alakattolevy oli kiinnitetty joko suoraan palkkeihin tai akustisella jousirangalla [122].**



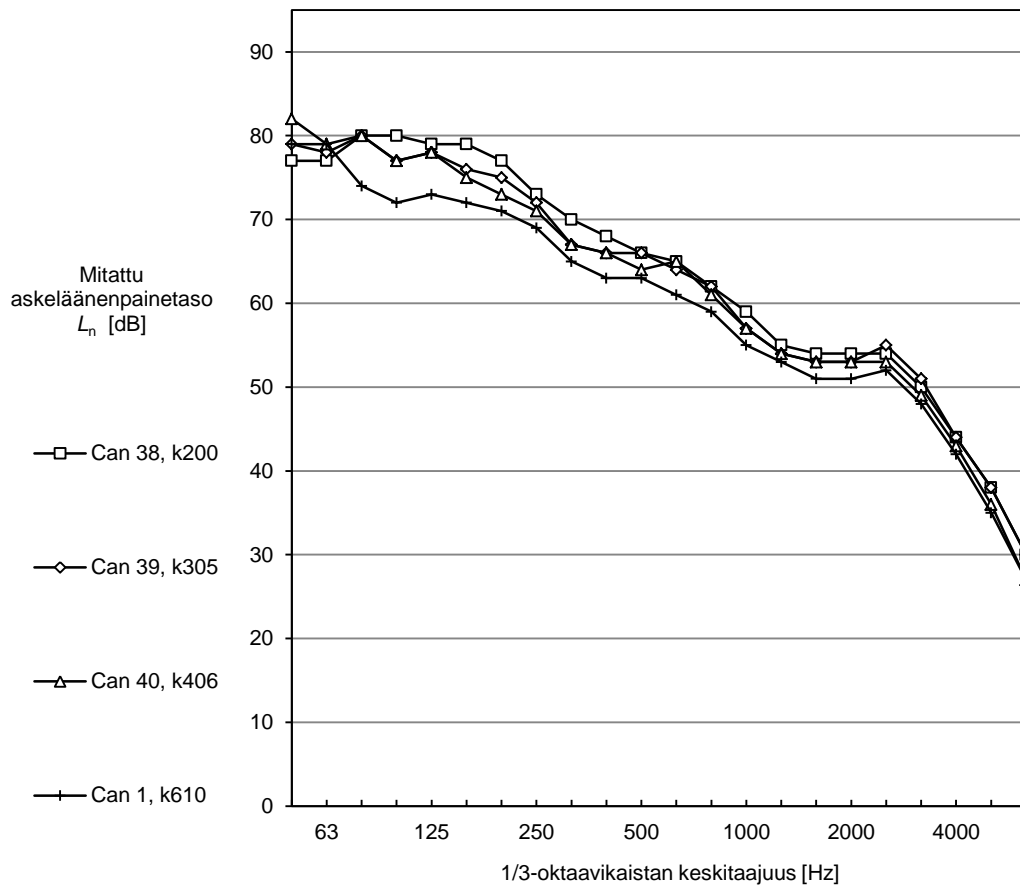
**Kuva 14: Alakaton jousiranka-kiinnityksen vaikutuksen selvittämiseen käytetyt välipohjarakenteet, mittakaava 1:20.**



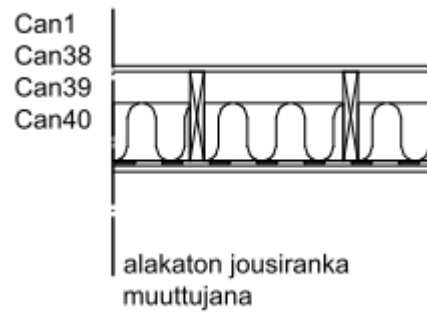
**Kuva 15: Alakattotyyppin vaikutus askeläänitasoihin [1].**



**Kuva 16: Alakattotyyppin vaikutuksen selvittämiseen käytetyt välipohjarakenteet, mit-takaava 1:20.**

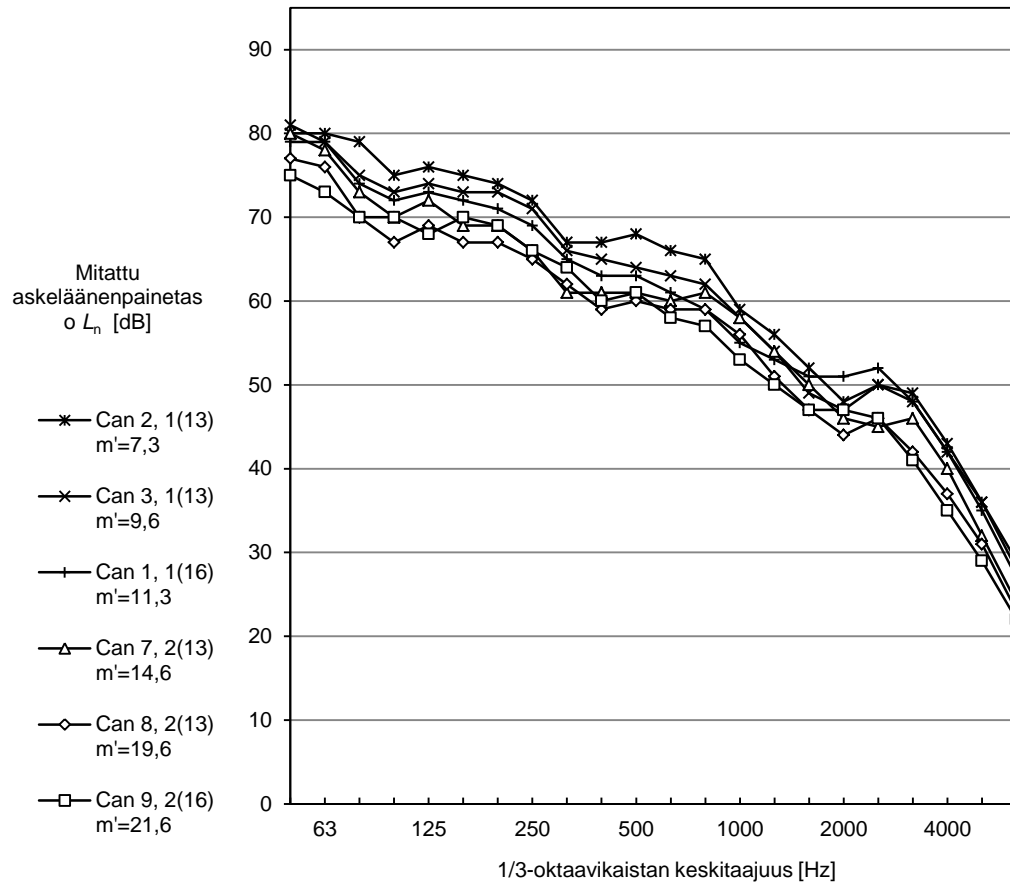


**Kuva 17: Jousirangan k-jaon vaikutus askeläänitasoihin [122].**

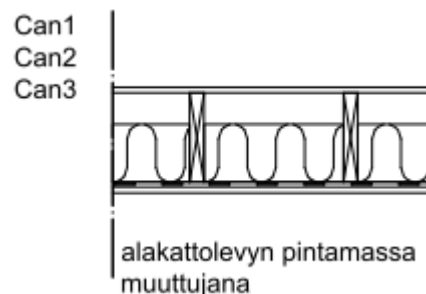


**Kuva 18: Jousirangan k-jaon vaikutuksen selvittämiseen käytetyt välipohjarakenteet, mittakaava 1:20.**

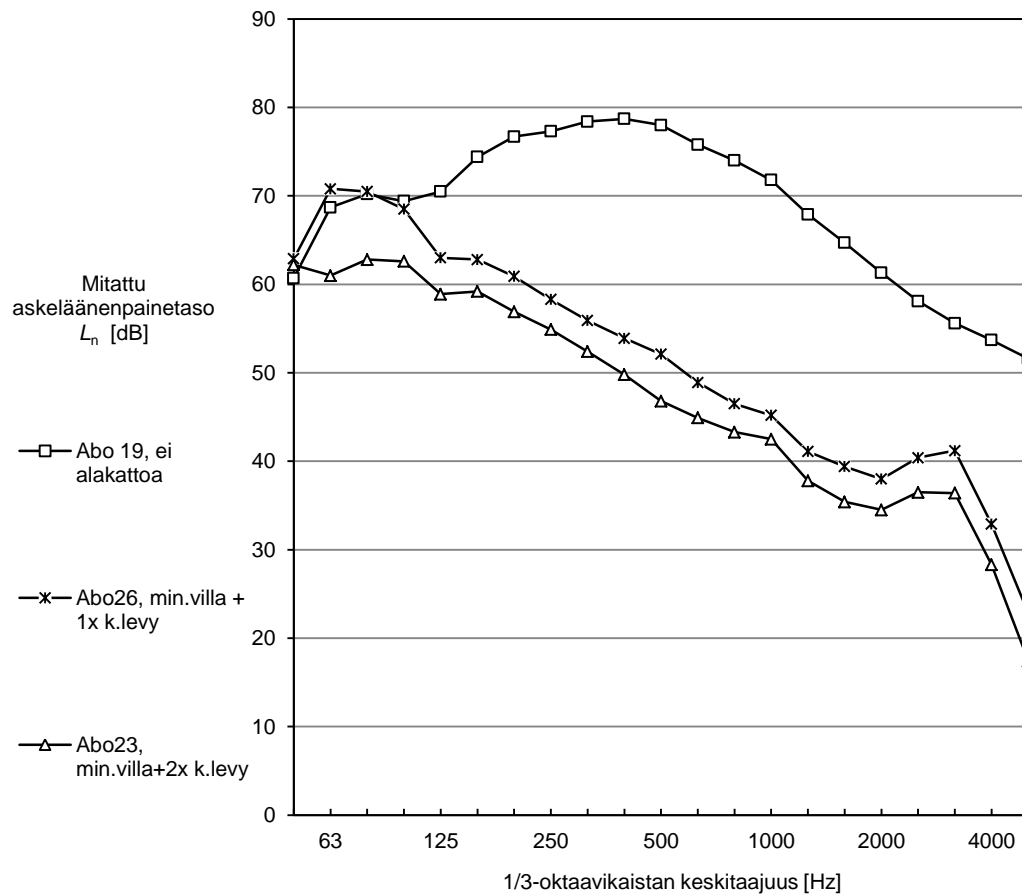
### 3. ALAKATON MASSA



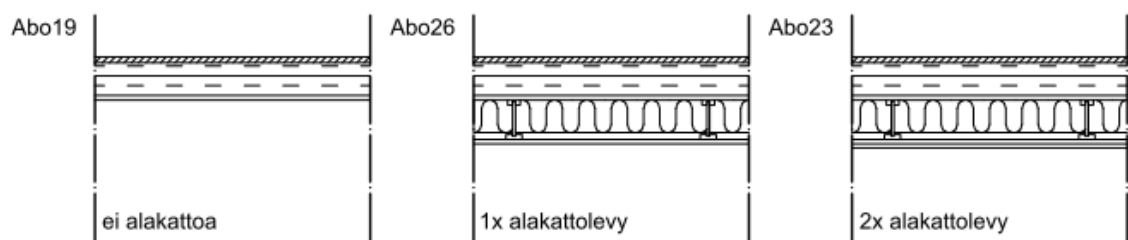
**Kuva 19:** Alakattolevyjen massan ja kaksinkertaistamisen vaikutus askeläänitasoihin. Suluissa on yksittäisen levyn paksuus [mm] ja  $m'$  on pintamassa [ $\text{kg}/\text{m}^2$ ] [122].



**Kuva 20:** Alakaton pintamassan vaikutuksen selvittämiseen käytetyt välipohjarakenteet, mittakaava 1:20.

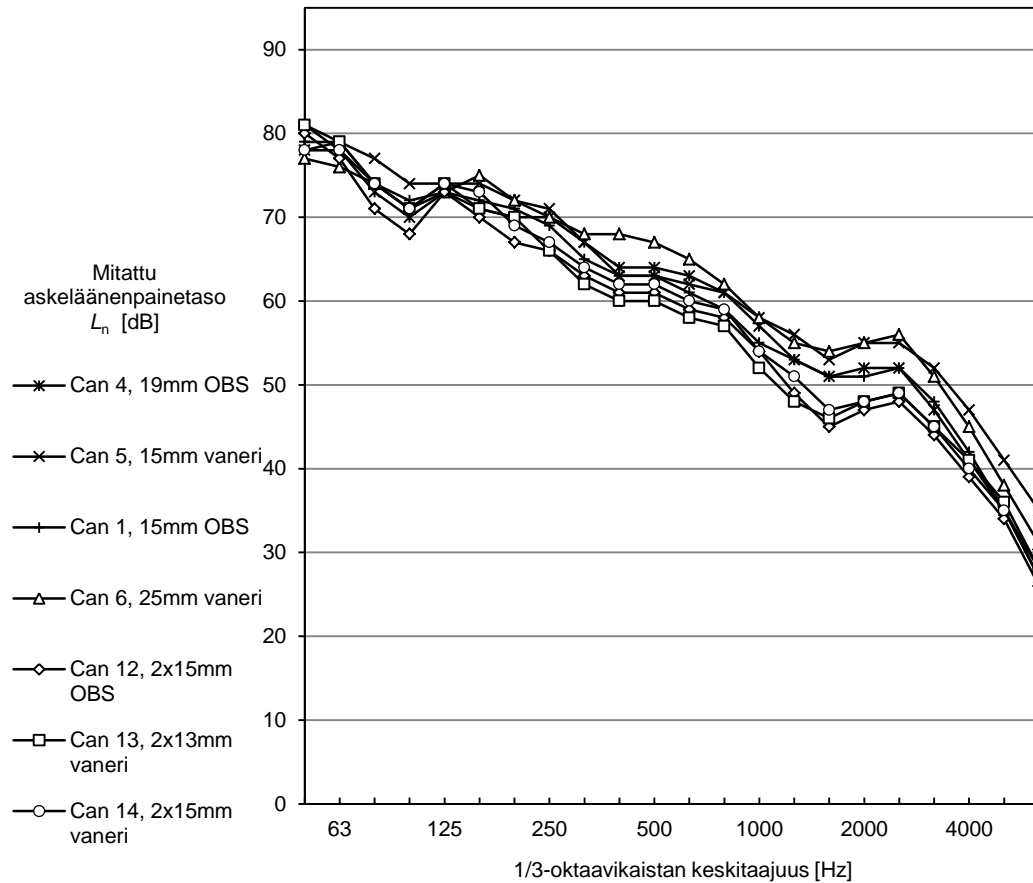


**Kuva 21: Eri alakattoratkaisuiden vaikutus askeläänitasoihin massiivipuurakenteilla. Kuvaajassa esitetyissä tapauksissa raakarakenne on 115 mm massiivipuulaatta [1].**



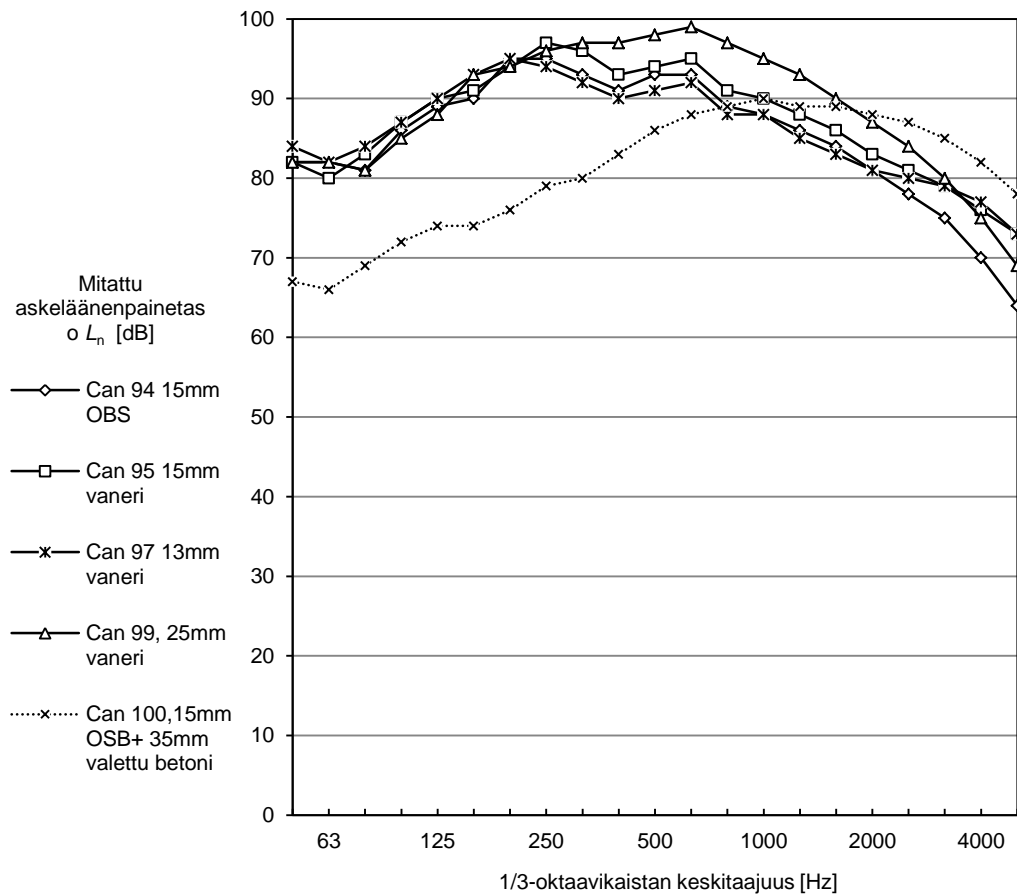
**Kuva 22: Eri alakattoratkaisuiden vaikutuksen selvittämiseen käytetyt välipohjarakenteet, mittakaava 1:20.**

## 4. LATTIALEVYT JA RASKAAT PINTALAATAT

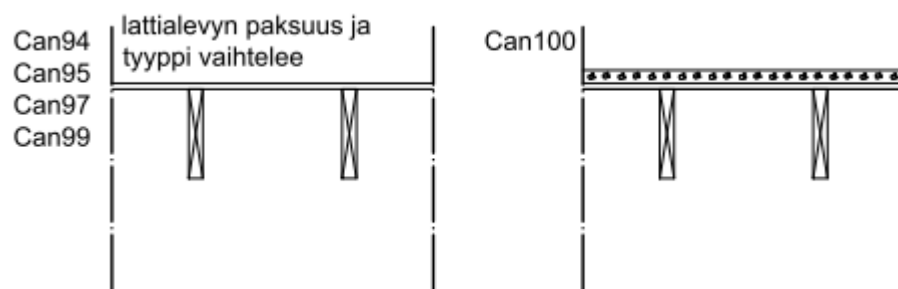


**Kuva 23:** Askeläänitasot rakenteilta, joissa parametrina on lattialevyjen paksuus ja levyjen kaksinkertaistaminen [122]. Kaikissa välipohjissa lattialevyt on kiinnitetty käytännössä Can 1 (kuvassa 6) rakenteen palkiston ja alakattorakenteen päälle.

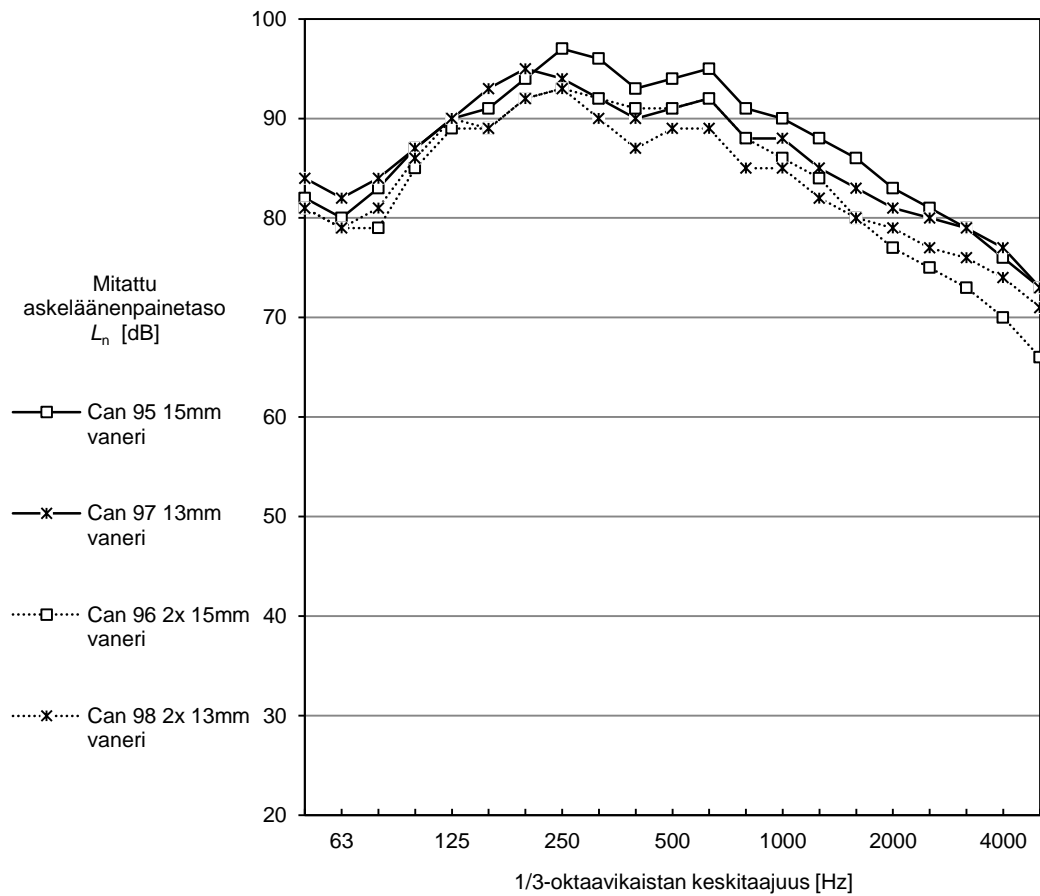




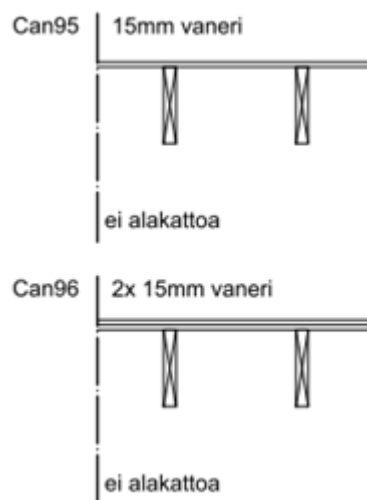
**Kuva 24: Lattialevyjen vaikutus askeläänitasoihin ilman alakattorakennetta. Ota huomioon muuttunut asteikko 100 dB asti [122].**



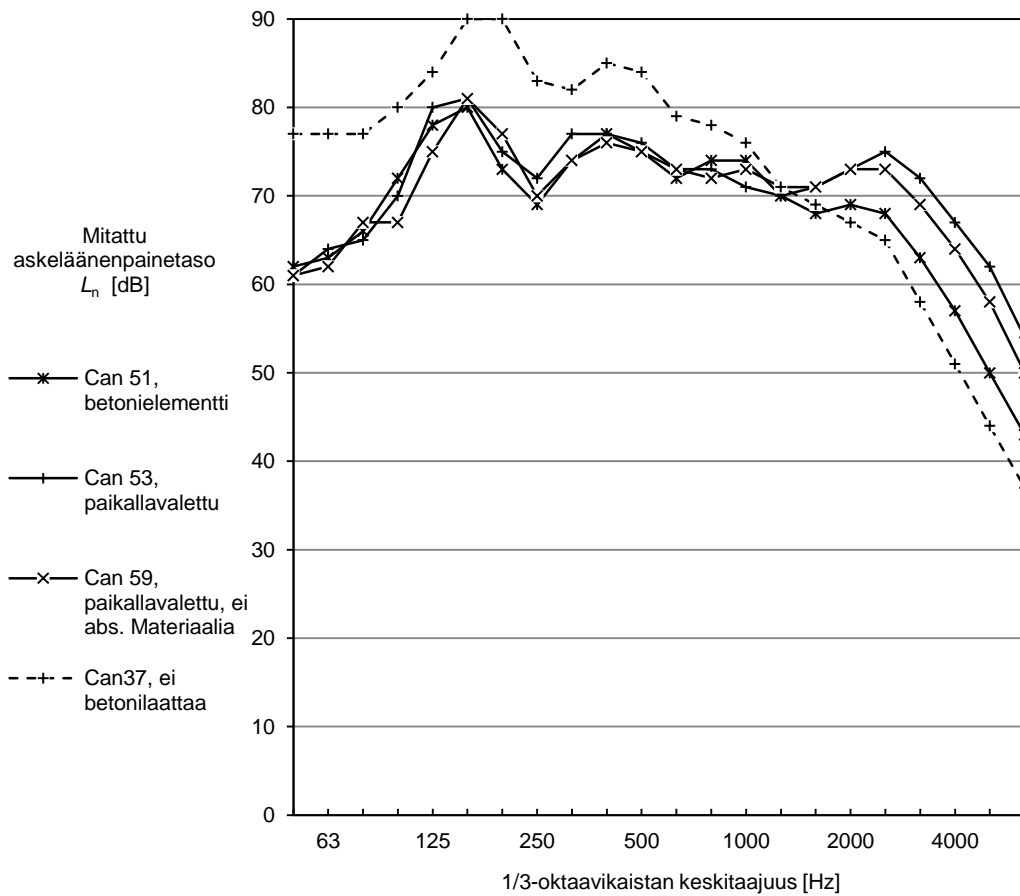
**Kuva 25: Lattialevyjen vaikutuksen selvittämiseen käytetyt välipohjarakenteet, mitta-kaava 1:20.**



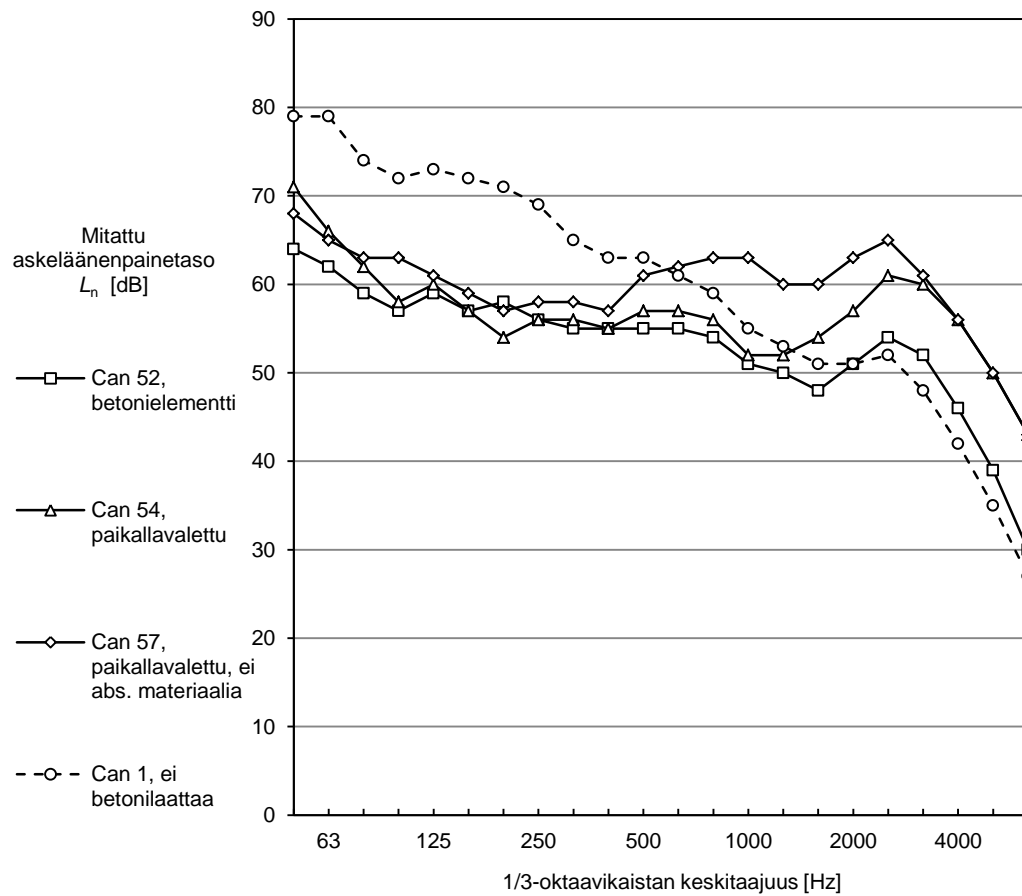
**Kuva 26: Askeläänitasoja rakenteilta, joissa parametrina lattialevyn kaksinkertaistaminen. Levyt on yhdistetty toisiinsa löyhästi, k150 ruuveilla. Rakenteissa ei ole alakattoja. Ota huomioon muuttunut asteikko 100 dB asti [122].**



**Kuva 27: Lattialevyn kaksinkertaistamisen vaikutuksen selvittämiseen käytettyjä välipohjarakenteita, mittakaava 1:20. Muut kuvan 23 kuvaajassa esitetyt välipohjarakenteet ovat rakennetyypiltään samanlaisia. Erona on lattialevyn pintamassa [kg/m<sup>2</sup>].**

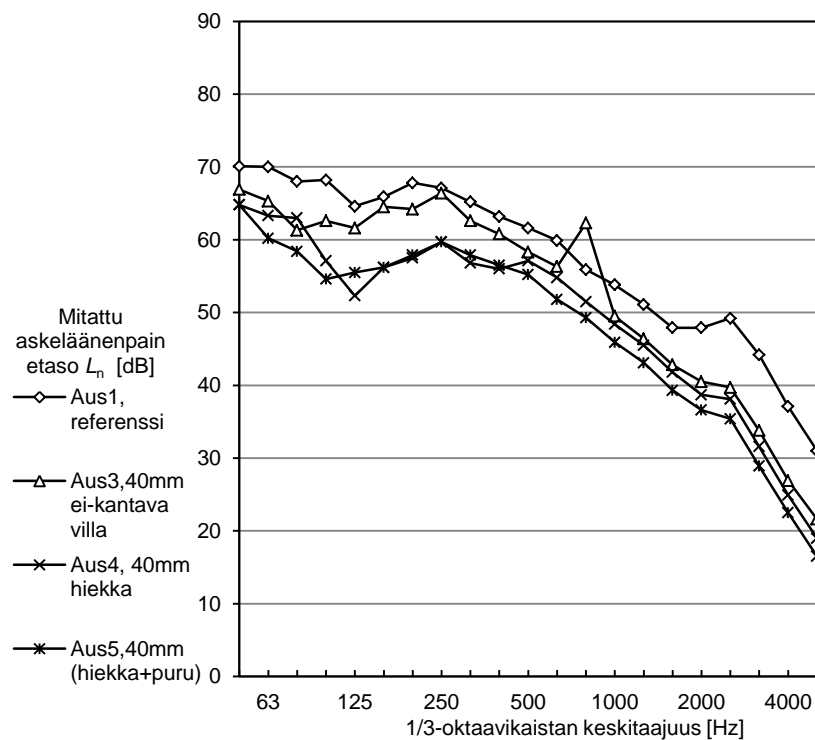


**Kuva 28: Askeläänitasoja rakenteilta, joissa pintalaattana on 35 mm betonilaatta joko suoraan OSB-levyn päällä tai elementtinä. Katkoviivalla on esitetty rakenne, Can37, joka on toteutettu ilman raskasta pintalaattaa. Kaikissa rakenteissa alakattolevy on kiinnitetty suoraan välipohjapalkkien alapintaan [122].**

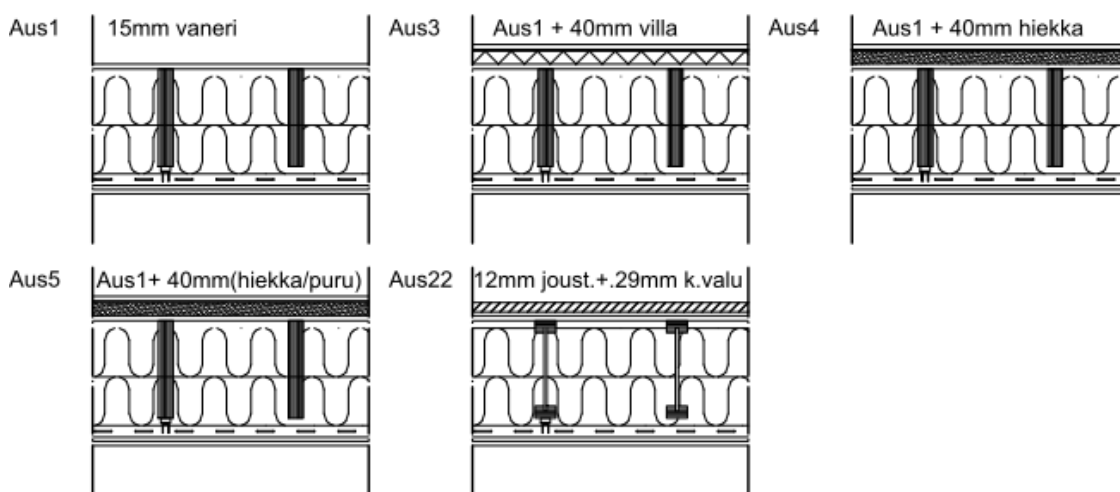


**Kuva 29: Askeläänitasoja rakenteilta, joissa pintalaattana on 35 mm betonilaatta joko suoraan OSB-levyn päällä tai elementtinä. Katkoviivalla on esitetty rakenne, Can37, joka on toteutettu ilman raskasta pintalaattaa. Kaikissa rakenteissa alakattolevy on kiinnitetty 13 mm jousirangalla välipohjapalkkien alapintaan [122].**

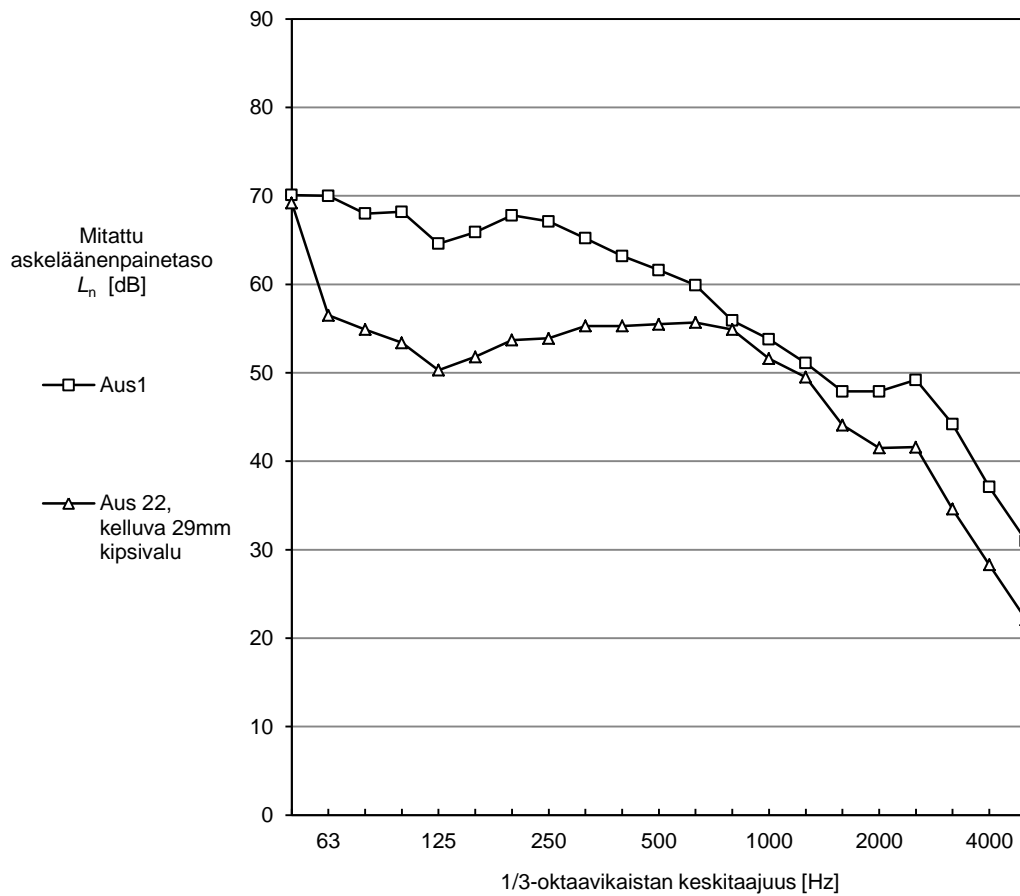
## 5. KELLUVAT LATTIAT



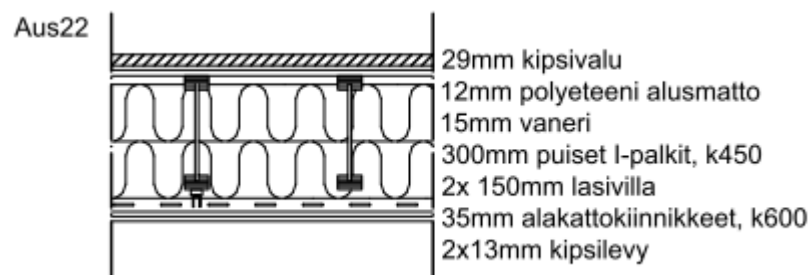
**Kuva 30:** Askeläänitasoja rakenteilta, joissa parametrina oli kelluva pintalattia. Rakenteissa Aus3-5 kelluva lattia on toteutettu puukoolauksen avulla. Itse kelluttavan kerroksen absorptiomateriaali ei kannata eikä puristu kasaan. [16]



**Kuva 31:** Kelluvan rakenteen vaikutuksen selvittämiseen käytetyt välipohjarakenteet, mittakaava 1:20.

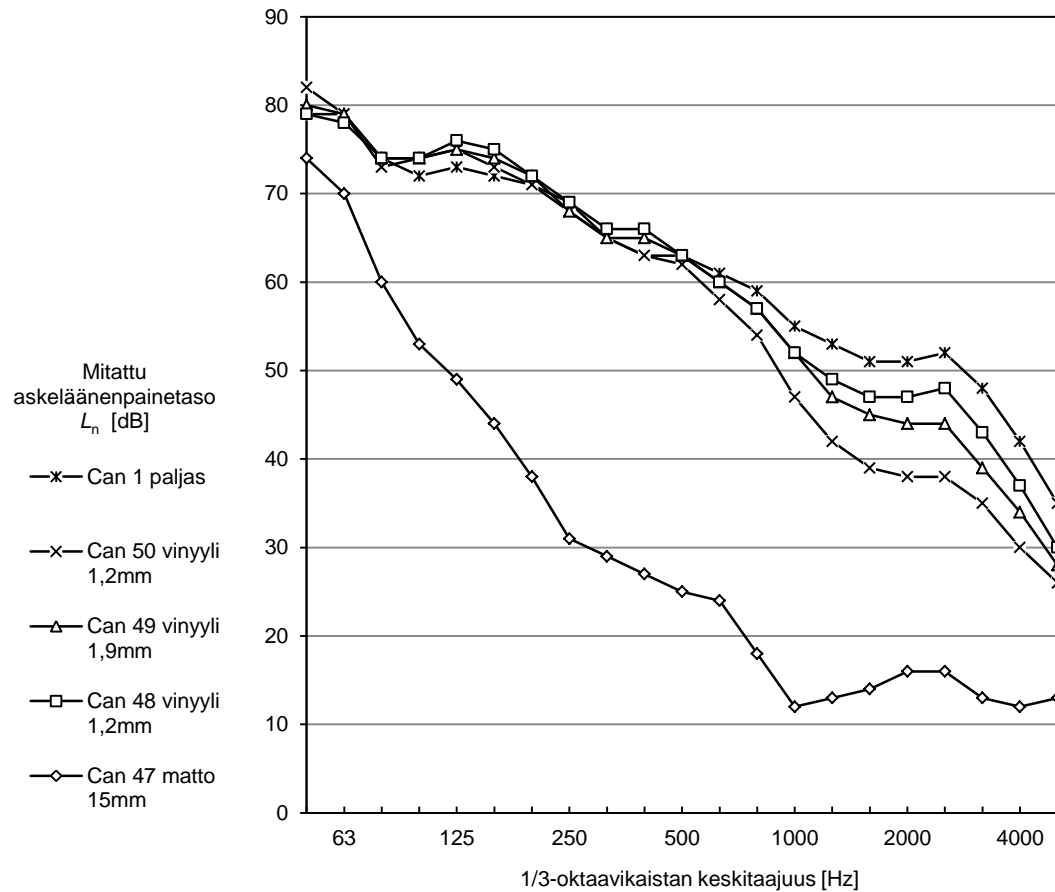


**Kuva 32: Askeläänitasot rakenteilta, jotka on toteutettu ilman kelluvaa laattaa ja kelluvan kipsilaatan kanssa. [16]**

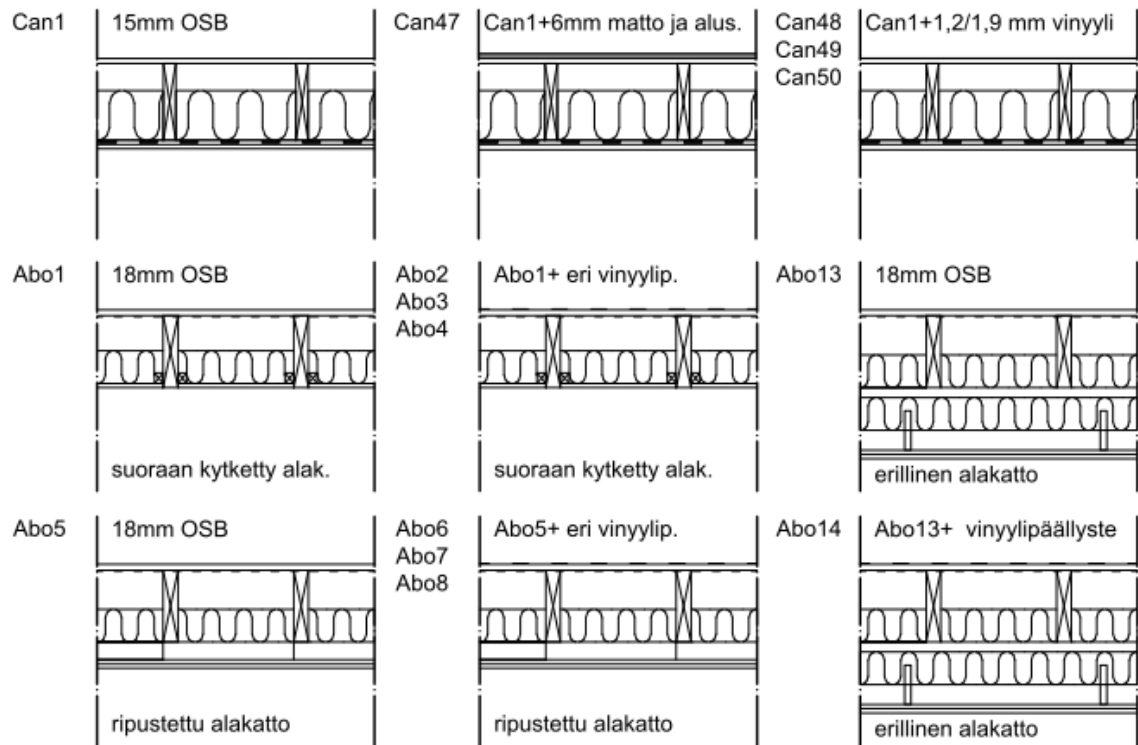


**Kuva 33: Kelluvan lattian vaikutuksen selvittämiseksi käytetty välipohjarakenne, mitataaava 1:20. Vertailurakenne Aus 1 on sama välipohja, ilman kipsivalukerrosta. Palkit ovat myös LVL-palkit, mutta edellä esitettyjen tulosten mukaan palkkityypillä ei ole juuri vaikutusta askeläänitasoihin.**

## 6. LATTIAPÄÄLLYSTEET

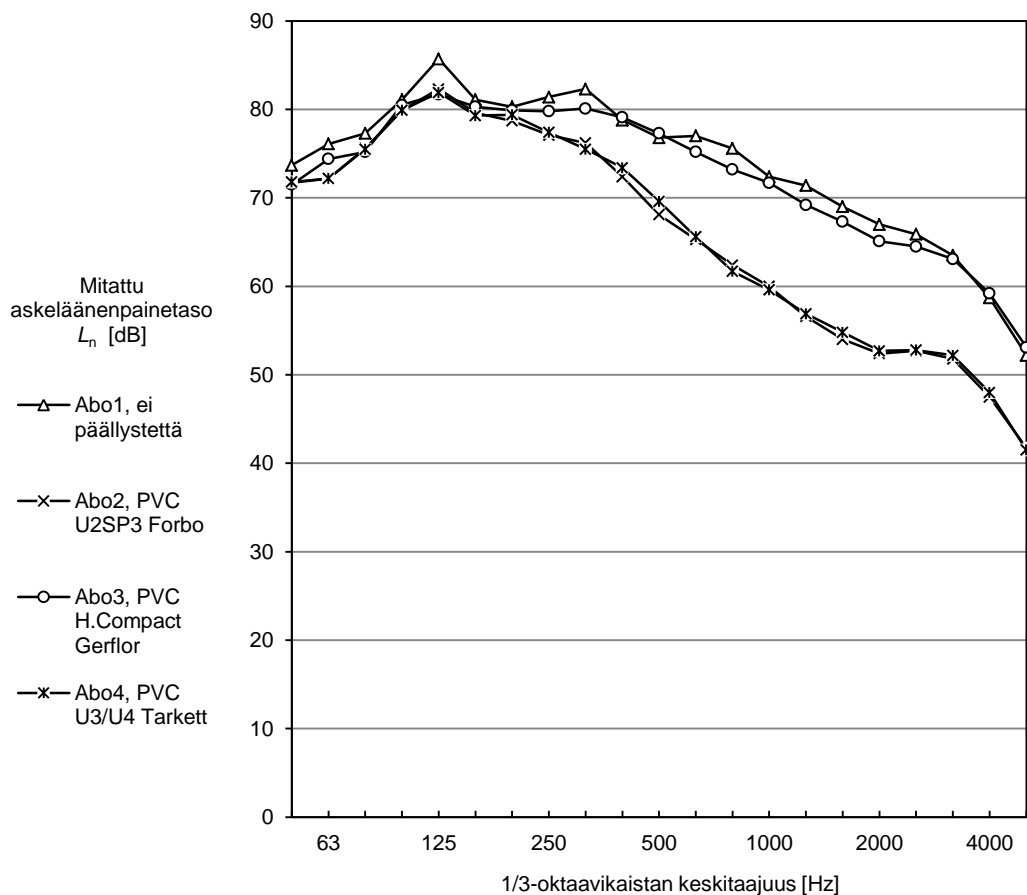


**Kuva 34:** Askeläänitasoja rakenteilla, joissa parametrina on raakavälipohjan päälle asennettu lattiapäällyste. Raakavälipohja oli palkkirakenteinen [122].

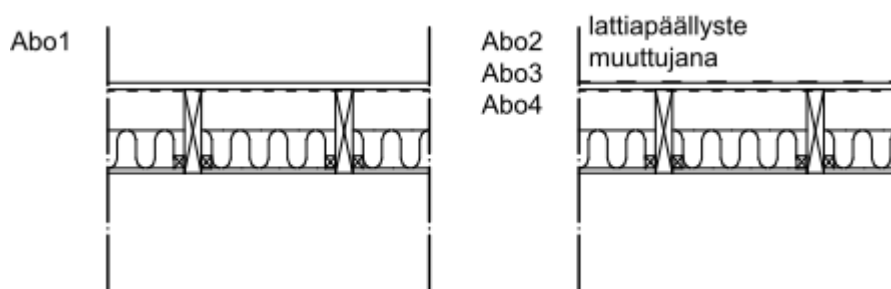


**Kuva 35: Lattiapäällysteiden vaikutuksen selvittämiseen käytetyt välipohjarakenteet, mittakaava 1:20.**

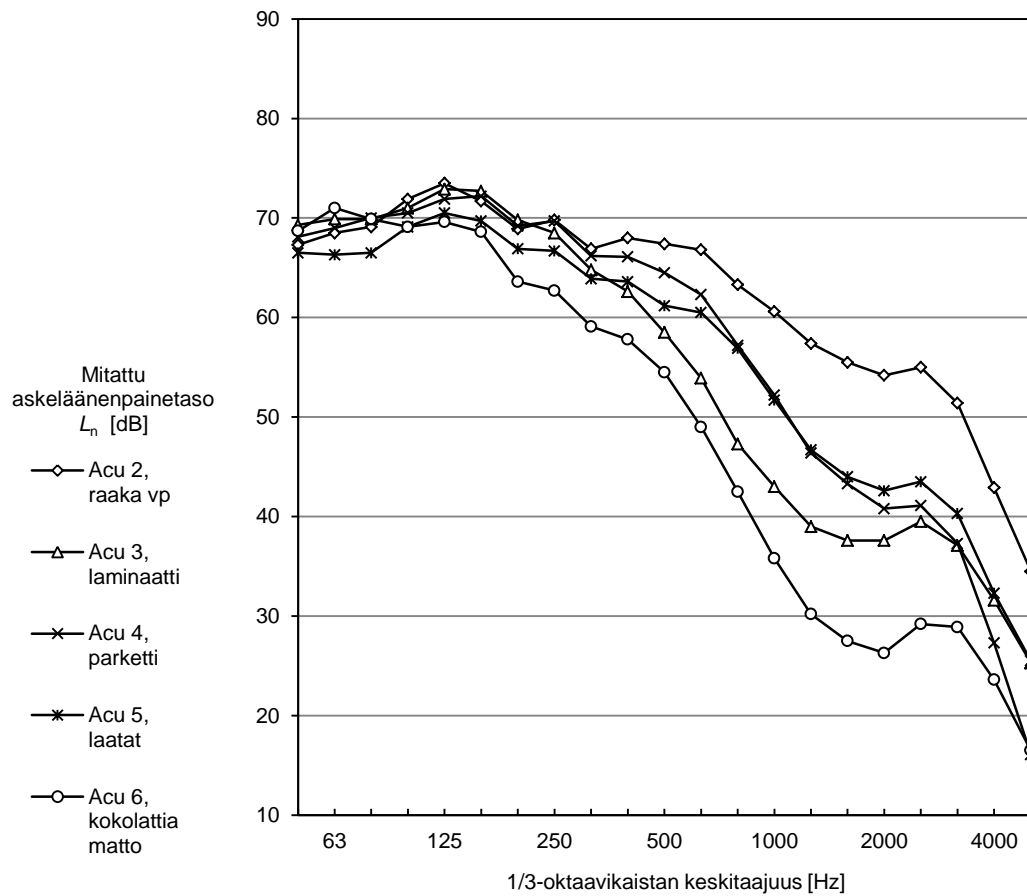




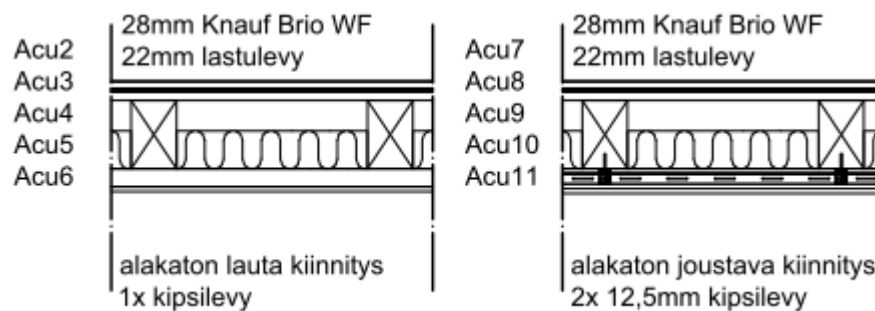
**Kuva 36: Askeläänitasoja rakenteilla, joissa parametrina on raakavälipohjan päälle asennettu lattiapäällyste. Raakavälipohja oli palkkirakenteinen [1].**



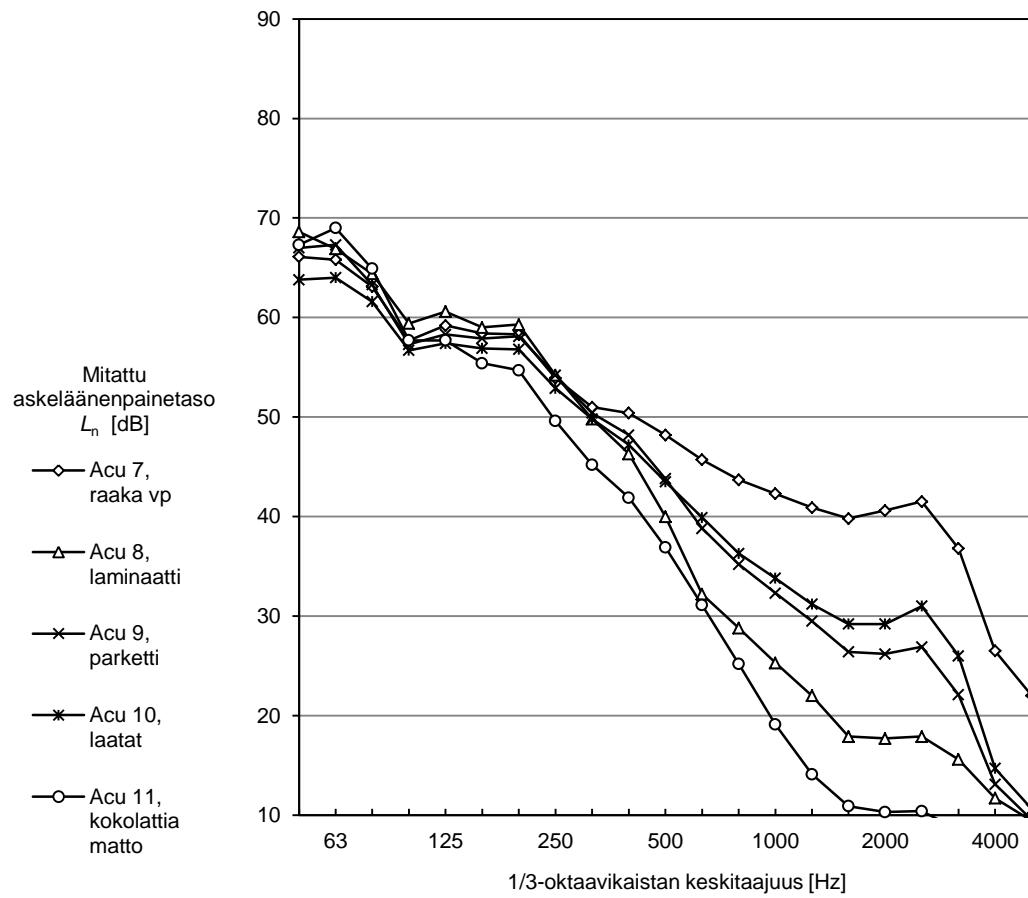
**Kuva 37: Lattiapäällysteen vaikutuksen selvittämiseen käytetyt välipohjarakenteet, mittakaava 1:20.**



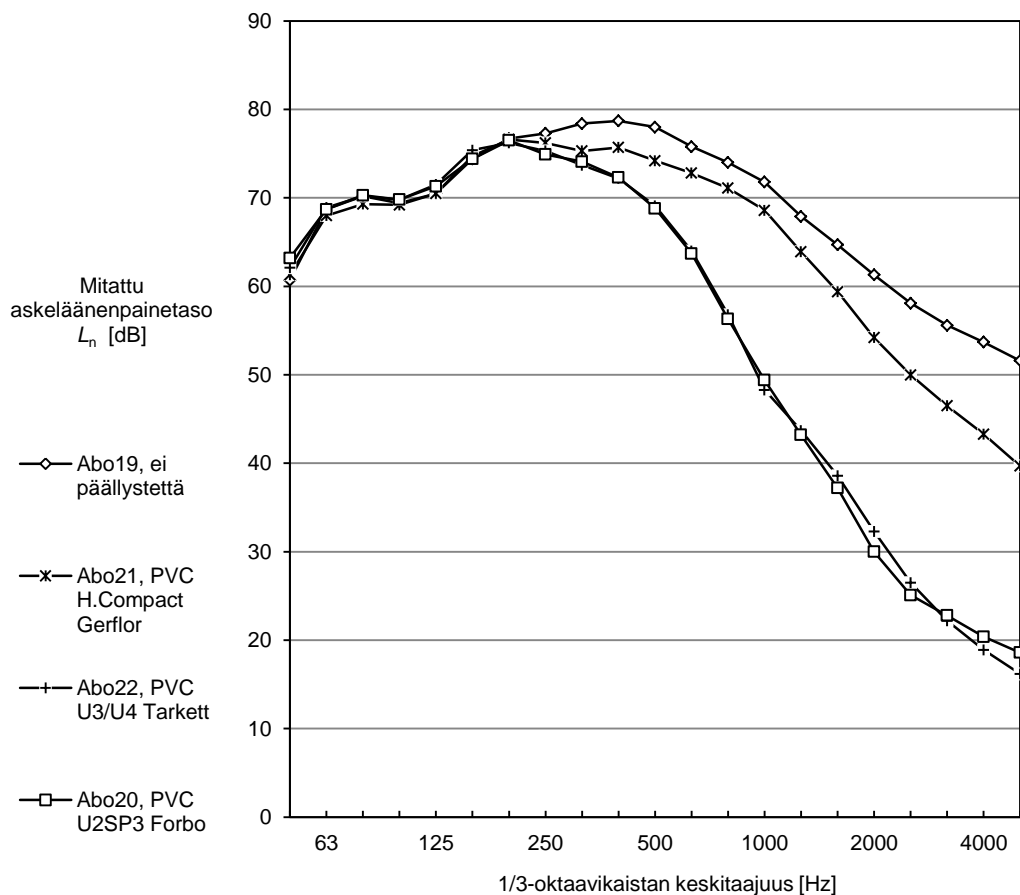
**Kuva 38: Askeläänitasoja rakenteilla, joissa parametrina on raakavälipohjan päälle asennettu lattiapäällyste. Raakavälipohja oli palkkirakenteinen ja alakatto oli kytketty lautakoolauksella palkiston alapintaan. [108]**



**Kuva 39: Acu-välipohjissa käytettyjen lattiapäällysteiden parannusvaikutuksen selvittämiseen käytetyt välipohjarakenteet, mittakaava 1:20.**



**Kuva 40: Askeläänitasoja rakenteilla, joissa parametrina on raakavälipohjan päälle asennettu lattiapäällyste. Raakavälipohja oli palkkirakenteinen ja alakatto oli kytketty joustavalla rangalla palkiston alapintaan. [108]**

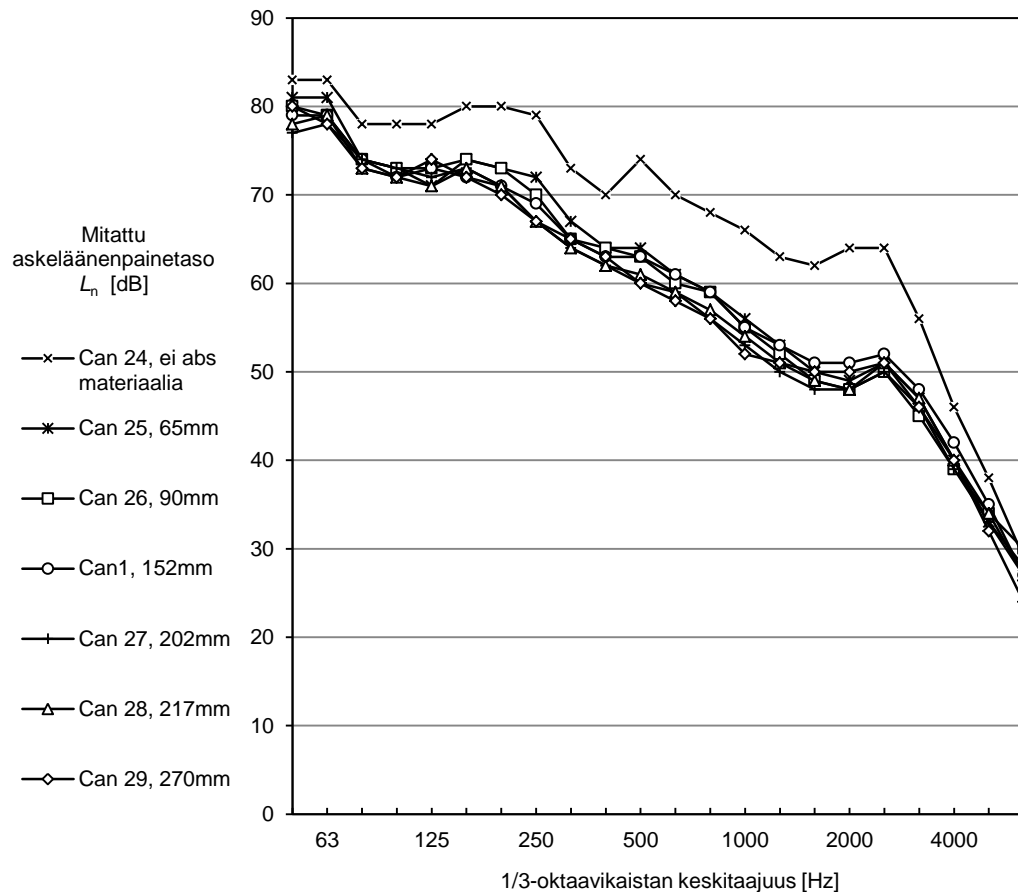


**Kuva 41: Askeläänitasoja rakenteilla, joissa parametrina on massiivipuuvälipohjan päälle asennettu ohut vinyylipäällyste. Massiivipuulevyn ja lattiapäällysteen välissä oli kipsikuitulevy Knauf Brio 18 WF. [1]**

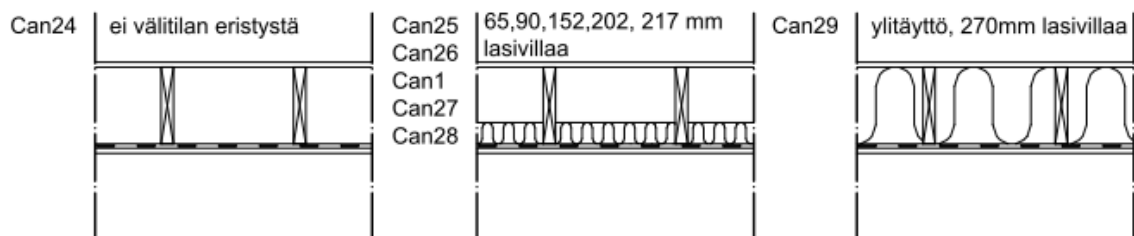


**Kuva 42: Lattiapäällysteen vaikutuksen selvittämiseen käytetyt välipohjarakenteet, mittakaava 1:20**

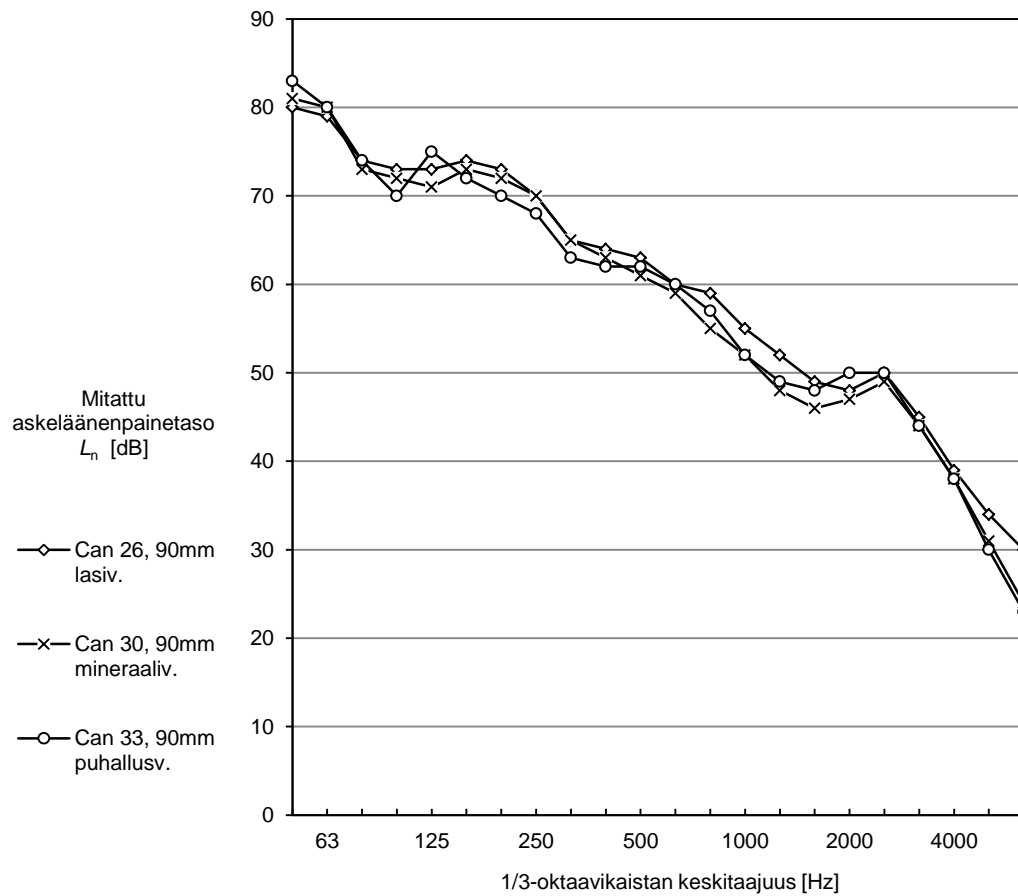
## 7. ABSORPTIOMATERIAALI VÄLIPOHJAN SISÄLLÄ



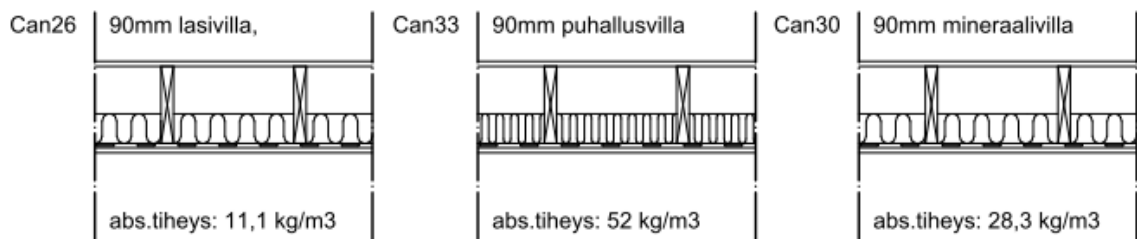
**Kuva 43: Askeläänitasoja rakenteilla, joissa parametrina on raakavälipohjan sisällä olevan absorptiomateriaalikerroksen paksuus, tässä tapauksessa käytettiin lasivillaa. Raakavälipohja oli palkkirakenteinen. [122]**



**Kuva 44: Absorptiomateriaalin vaikutuksen selvittämiseen käytetyt välipohjarakenteet, mittakaava 1:20.**



**Kuva 45: Askeläänitasoja rakenteilla, joissa parametrina on raakavälipohjan sisällä oleva absorptiomateriaali, koemateriaaleina käytettiin lasi-, mineraali- ja puhallusvillaa. Raakavälipohja oli palkkirakenteinen. [122]**



**Kuva 46: Absorptiomateriaalityypin vaikutuksen selvittämiseen käytetyt välipohjarakenteet, mittakaava 1:20.**

## **LIITE 2**

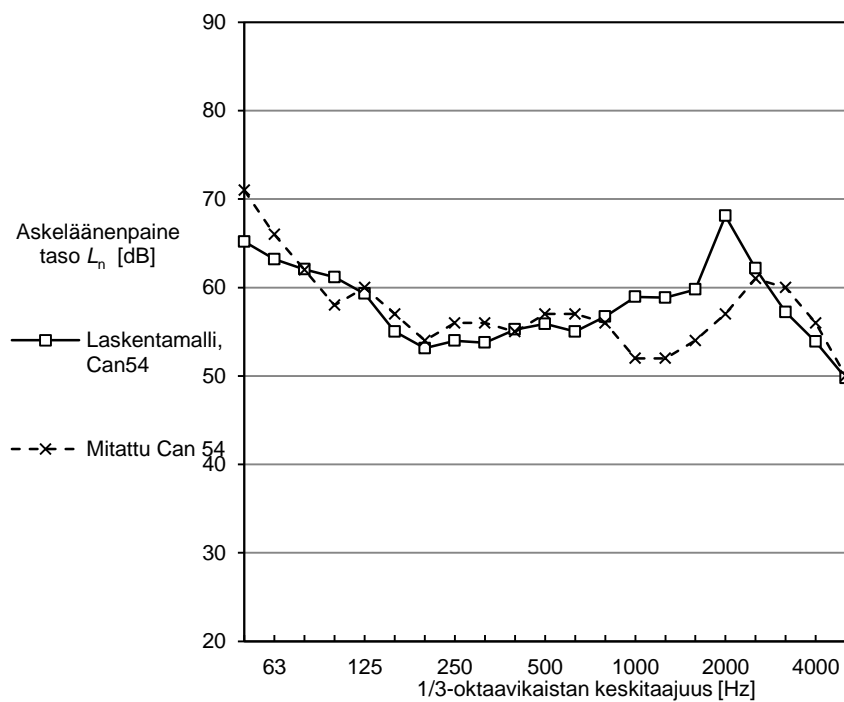
Liitteessä 2 on esitetty Kylläisen laskentaidealla laskettujen välipohjien askelääneneristävyydet 1/3-oktaavikaistoittain. Vertailuarvoina on esitetty myös kyseisten välipohjien mitatut askeläänitasot. [1, 122]

## **SISÄLLYSLUETTELO**

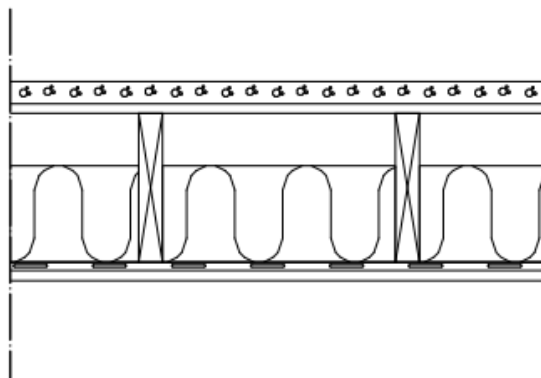
1. ALAKATON PARANNUSVAIKUTUS ..... 1
2. ALAKATON JA LATTIAPÄÄLLYSTEEN PARANNUSVAIKUTUS ..... 15

# 1. ALAKATON PARANNUSVAIKUTUS

Seuraavassa on esitetty Kylliäisen ideoiman laskentamallin askeläänitasotulokset ja tutkimuksista saadut mitatut askeläänitasot 1/3-oktaavikaistoittain [1, 122]. Laskentamallissa on otettu huomioon vain alakaton vaikutus askelääneneristävyyteen.

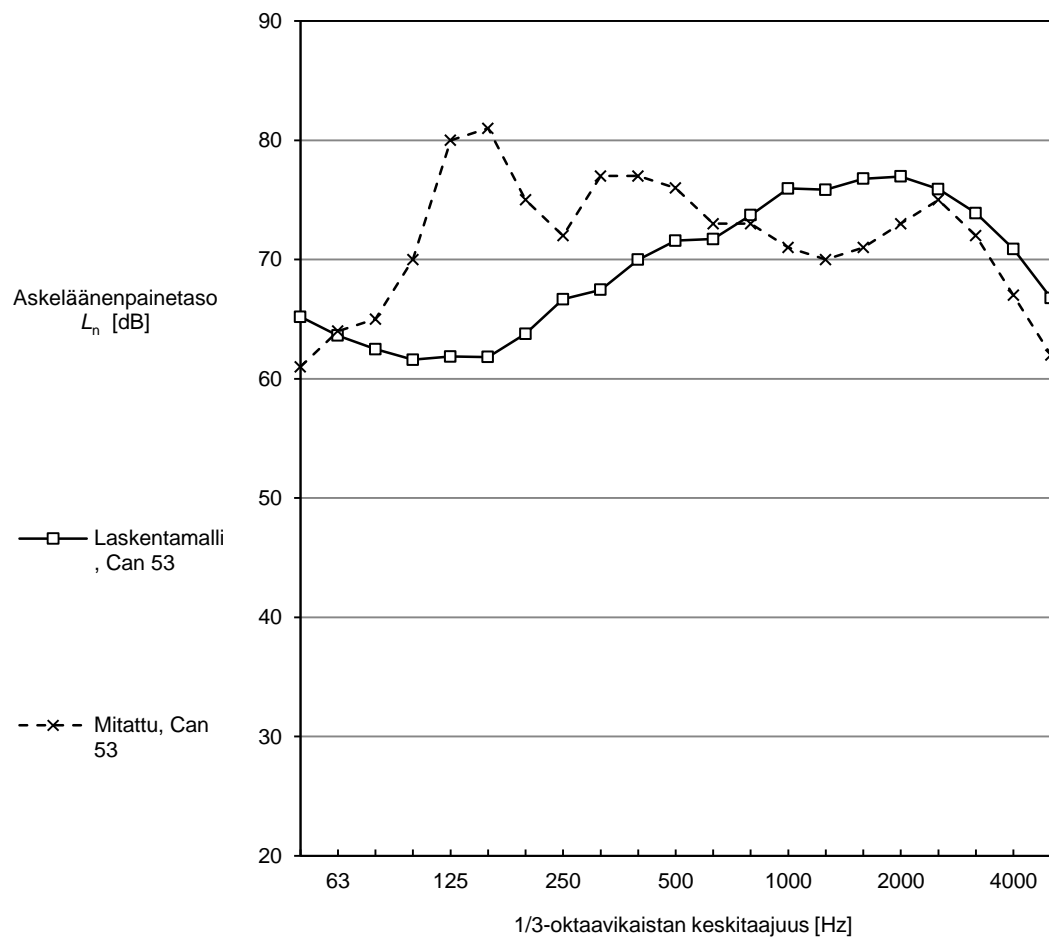


**Kuva 1: Can54 välipohjan askeläänitasot Kylliäisen ideoimalla laskentamallilla ja laboratoriomittausten perusteella [122].**

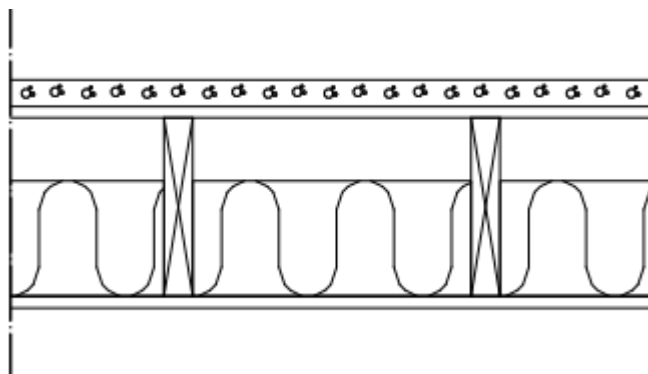


**Kuva 2: Can 54 välipohja. 35 mm betonilaatta on paikalla valettu.**

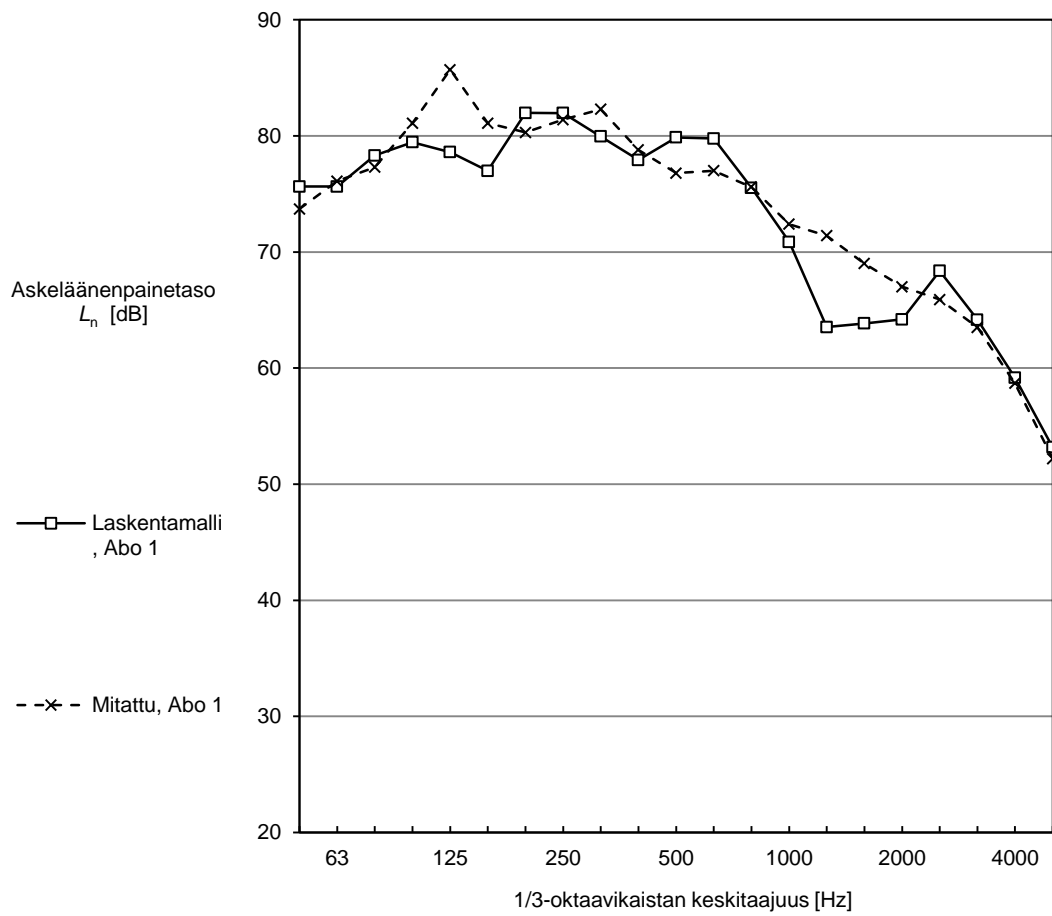




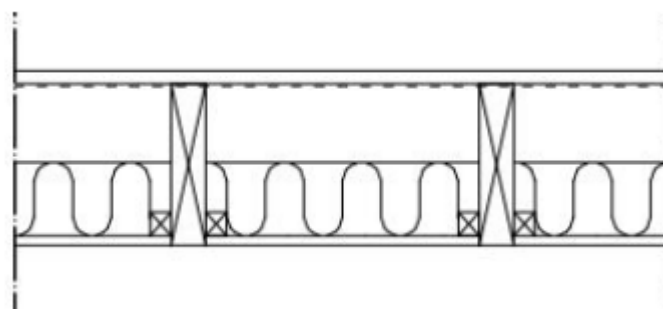
**Kuva 3: Can53 välipohjan askeläänitasot Kylliäisen ideomalla laskentamallilla ja laboriomiittauksen perusteella [122].**



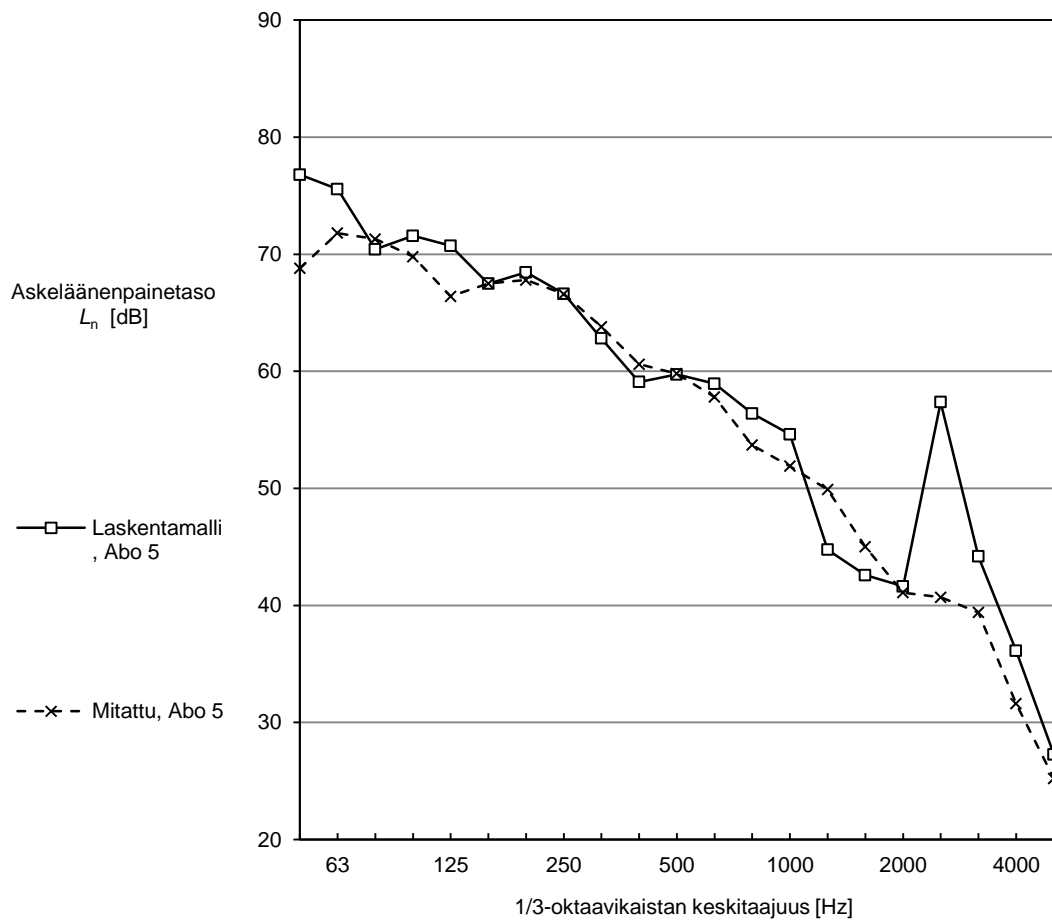
**Kuva 4: Can 53 välipohja. Alakattolevy kiinnitetty suoraan palkkien alapintaan. 35 mm betonilaatta on paikalla valettu.**



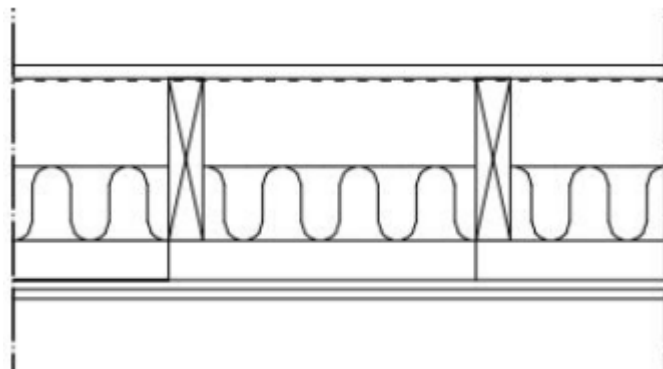
**Kuva 5: Abo 1 välipohjan askeläänitasot Kylliäisen ideomalla laskentamallilla ja laboratoriomittausten perusteella [1].**



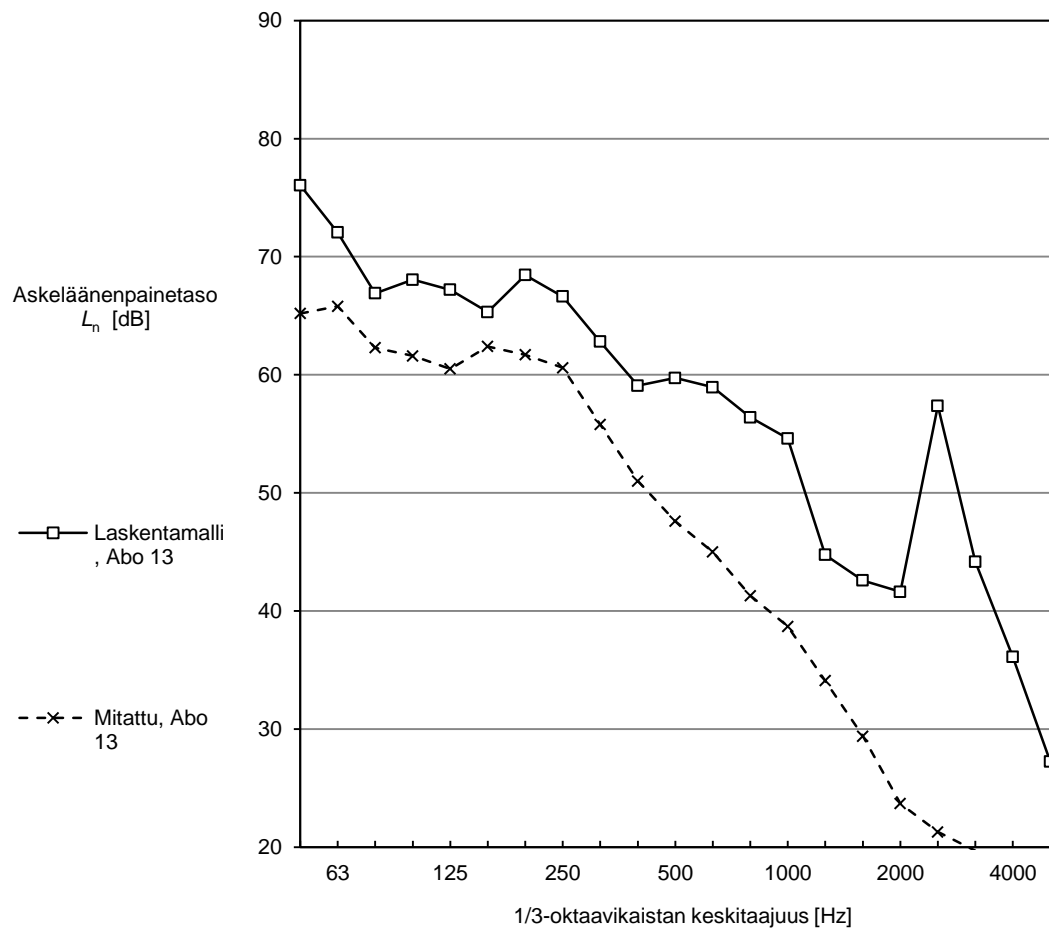
**Kuva 6: Abo 1 välipohja.**



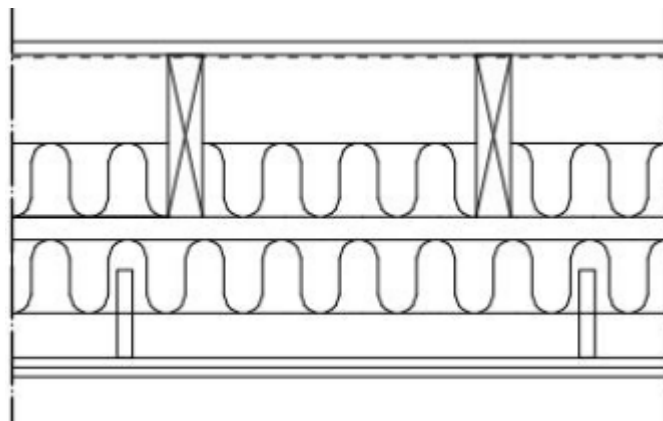
**Kuva 7: Abo 5 välipohjan askeläänitasot Kylliäisen ideomalla laskentamallilla ja laboratoriomittausten perusteella [1].**



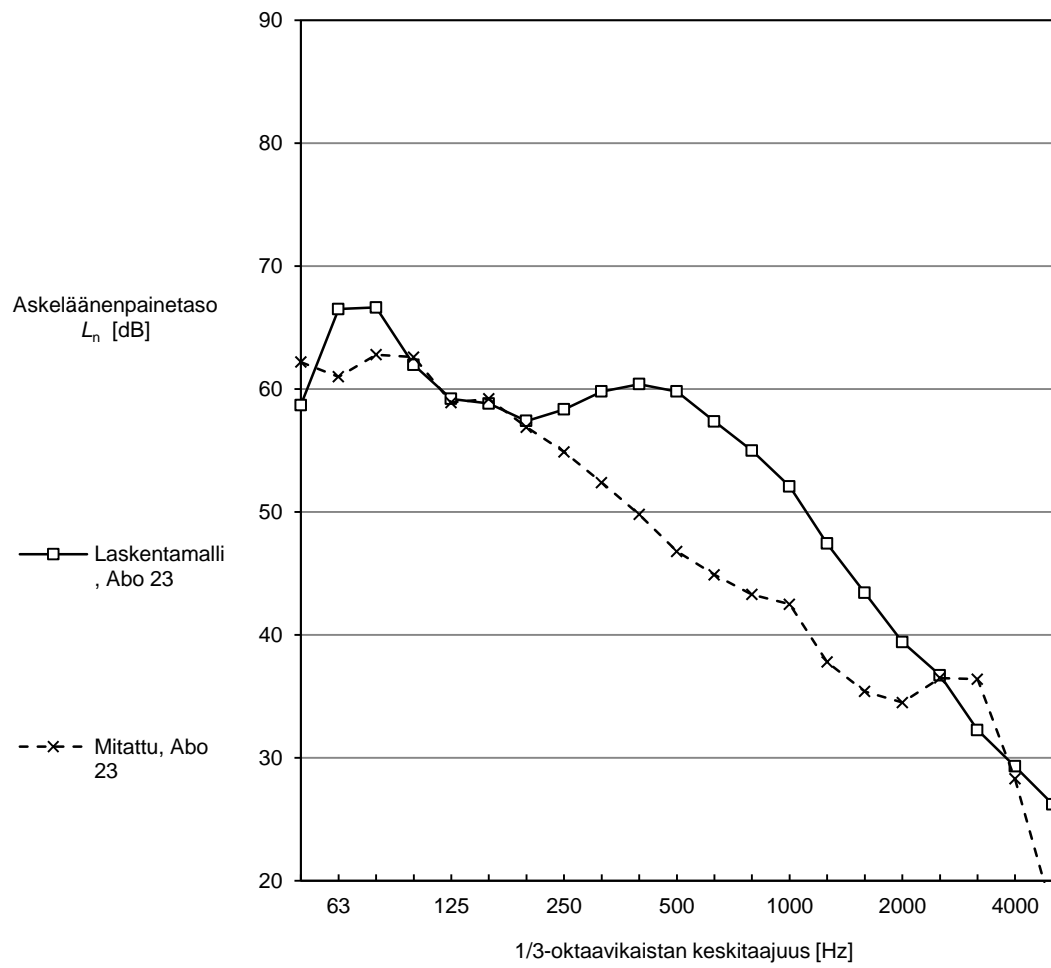
**Kuva 8: Abo 5 välipohja.**



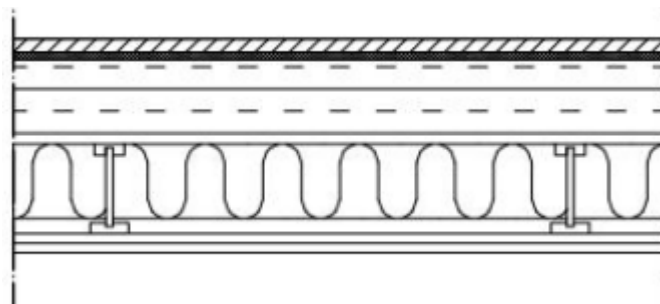
**Kuva 9: Abo13 välipohjan askeläänitasot Kylliäisen ideomalla laskentamallilla ja laboratoriomittausten perusteella [1].**



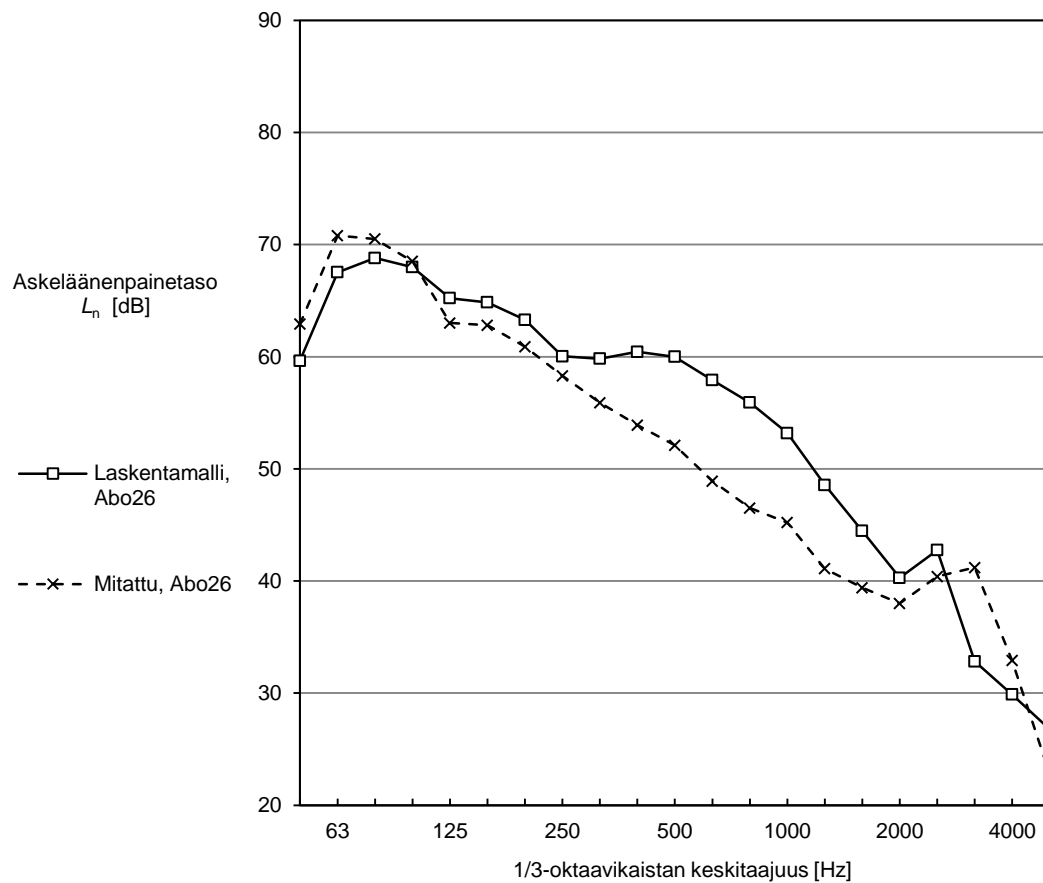
**Kuva 10: Abo 13 välipohja.**



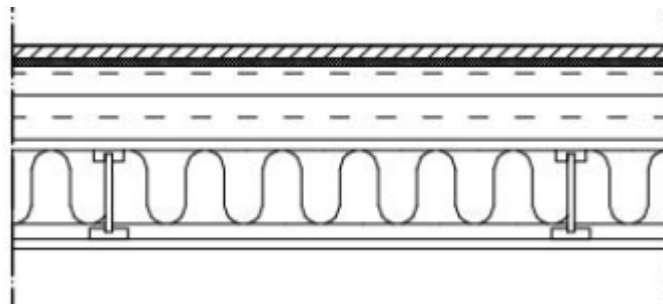
**Kuva 11: Abo23 välipohjan askeläänitasot Kylliäisen ideoimalla laskentamallilla ja laboratoriomittausten perusteella [1].**



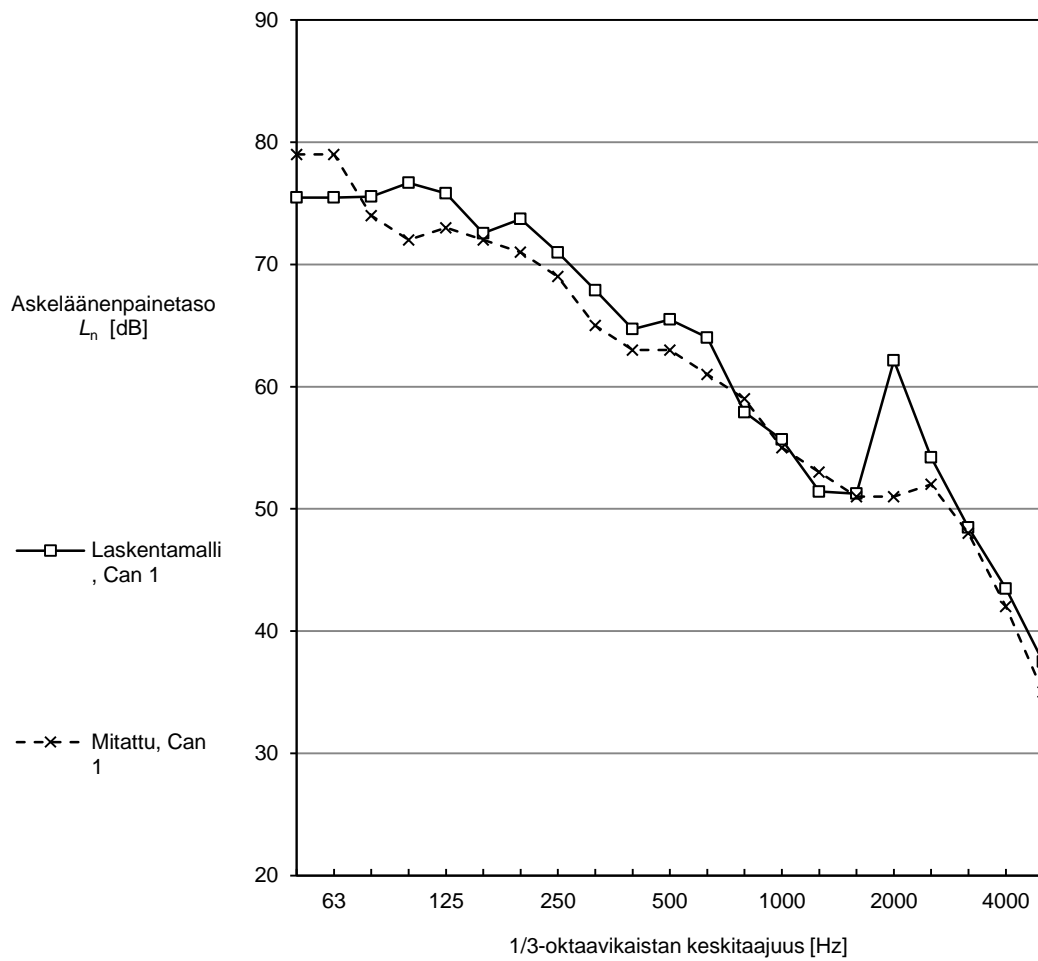
**Kuva 12: Abo 23 välipohja.**



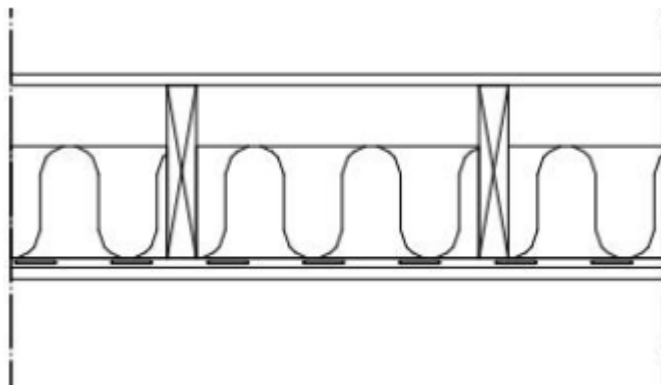
**Kuva 13:** Abo26 välipohjan askeläänitasot Kylliäisen ideomalla laskentamallilla ja laboratoriomittausten perusteella [1].



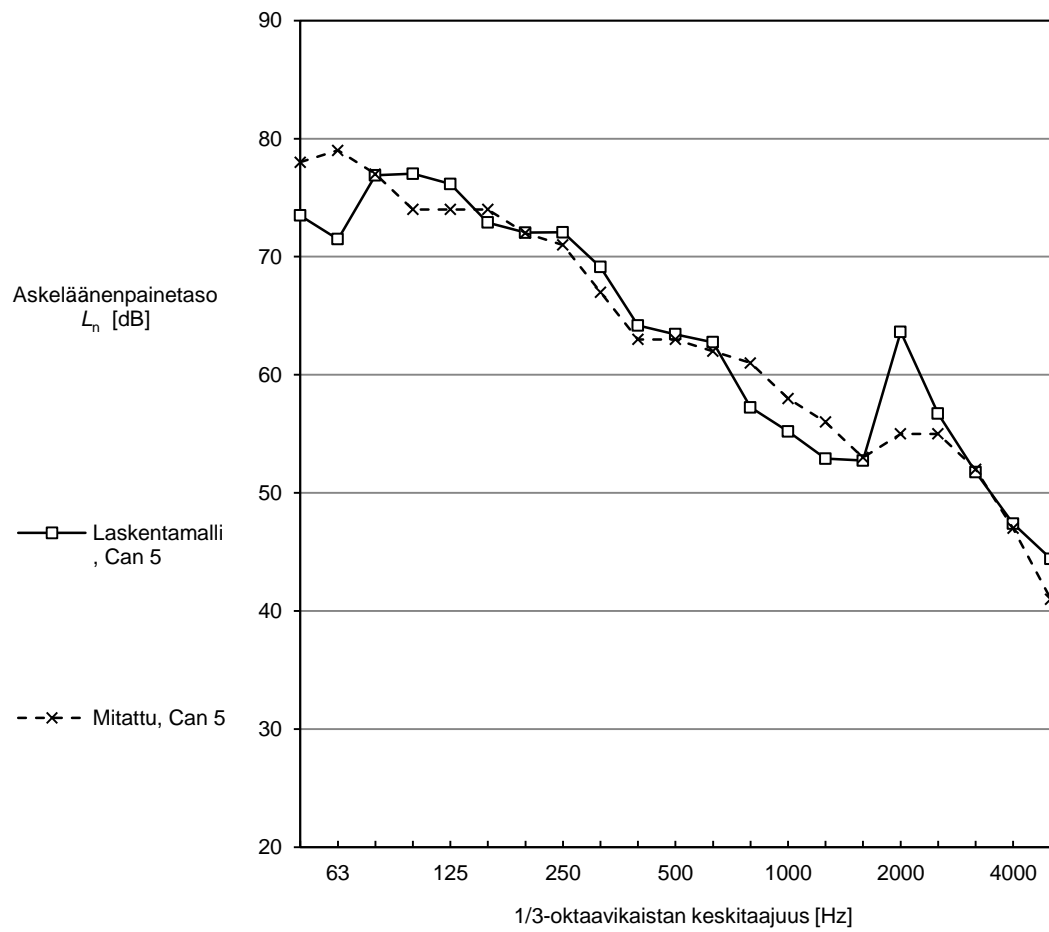
**Kuva 14:** Abo 26 välipohja.



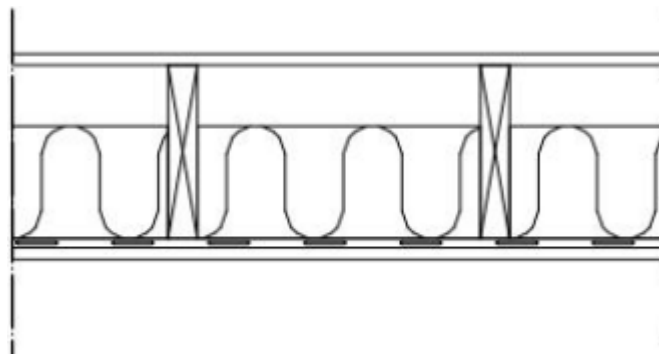
**Kuva 15: Can1 välipohjan askeläänitasot Kylliäisen ideomalla laskentamallilla ja laboratoriomittausten perusteella [122].**



**Kuva 16: Can 1 välipohja.**

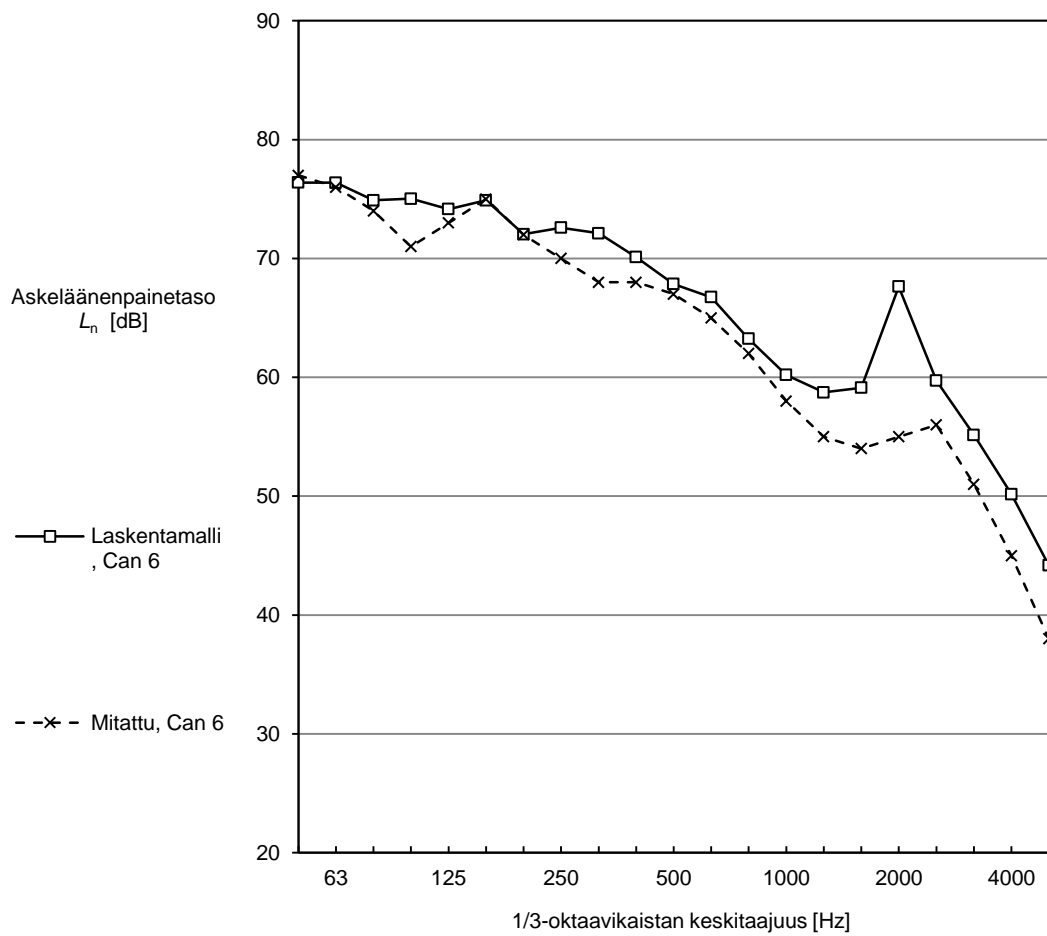


**Kuva 17: Can5 välipohjan askeläänitasot Kylliäisen ideomalla laskentamallilla ja laboratoriomittausten perusteella [122].**

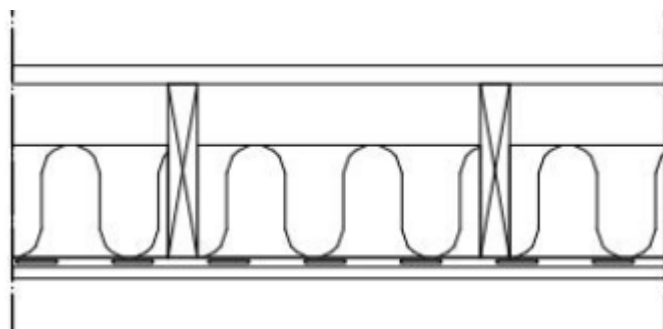


**Kuva 18: Can 5 välipohja.**

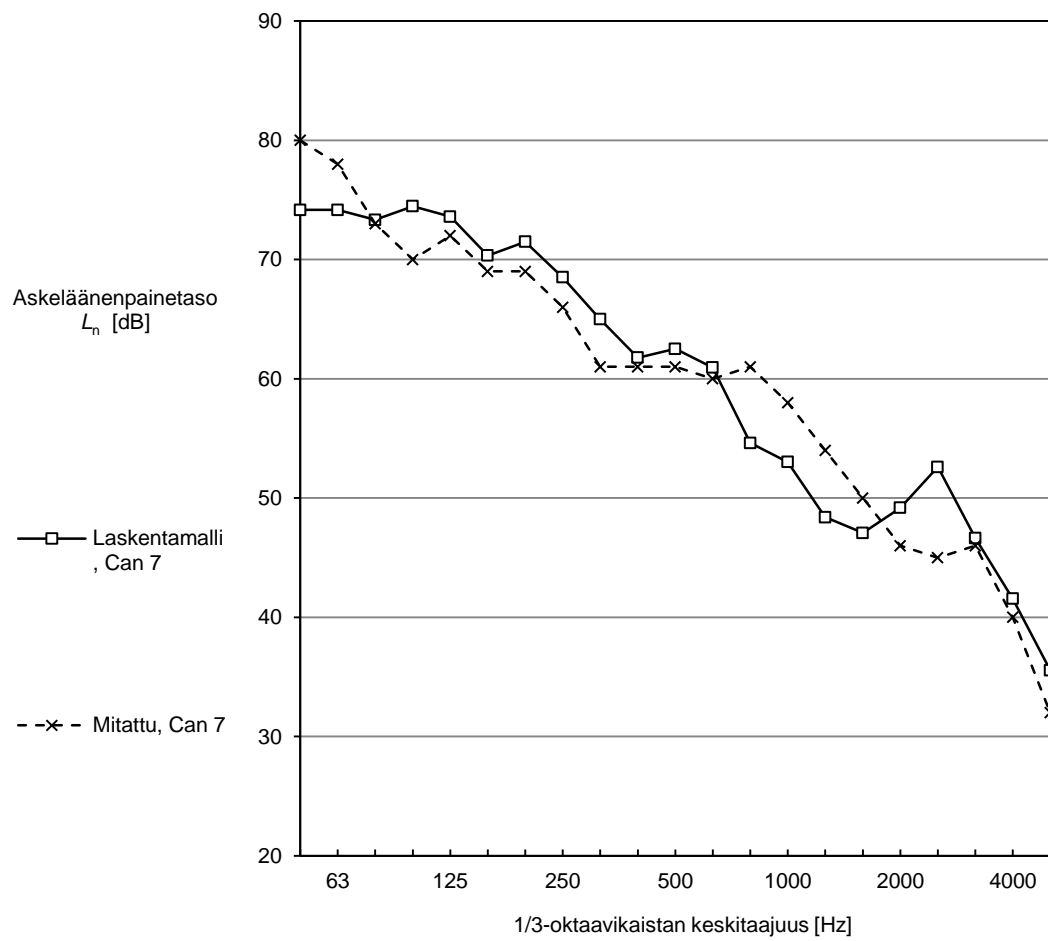




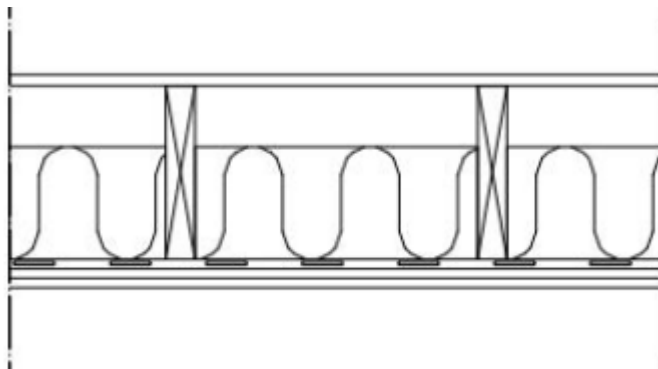
**Kuva 19: Can6 välipohjan askeläänitasot Kylliäisen ideomalla laskentamallilla ja laboriomiittausten perusteella [122].**



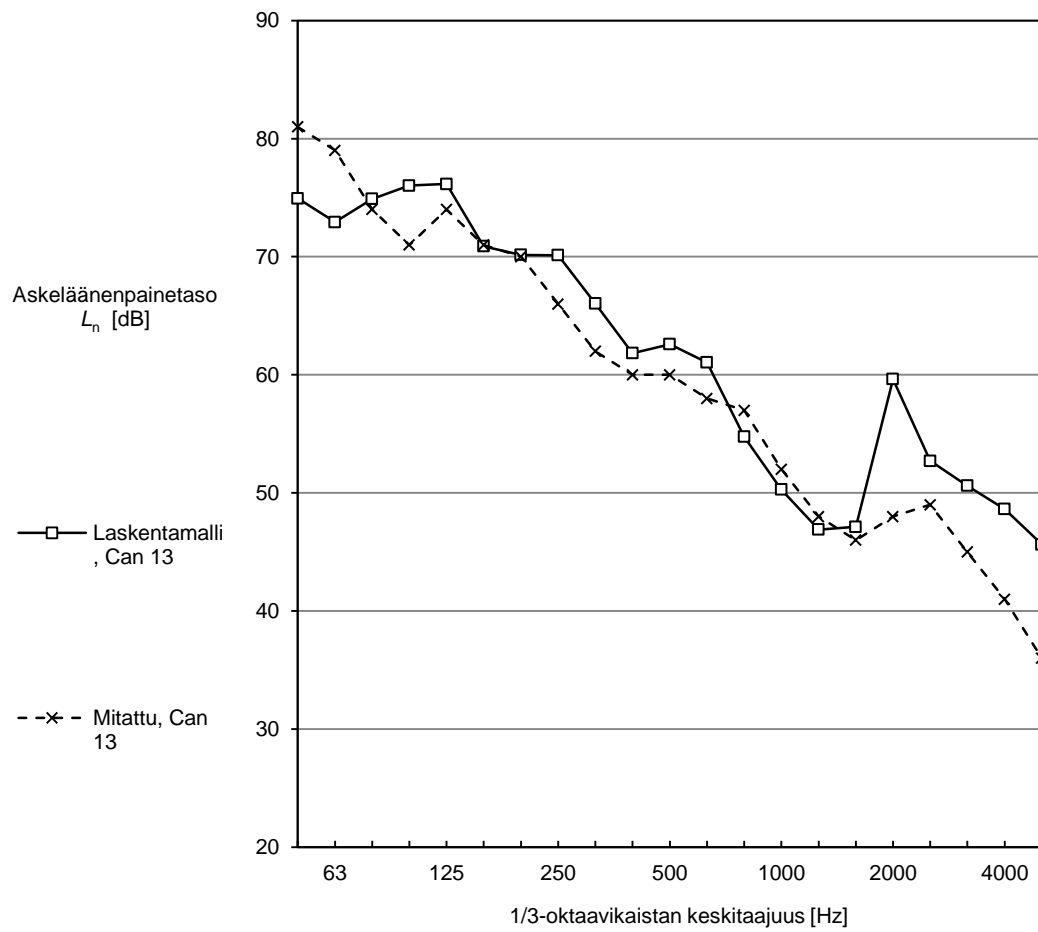
**Kuva 20: Can 6 välipohja.**



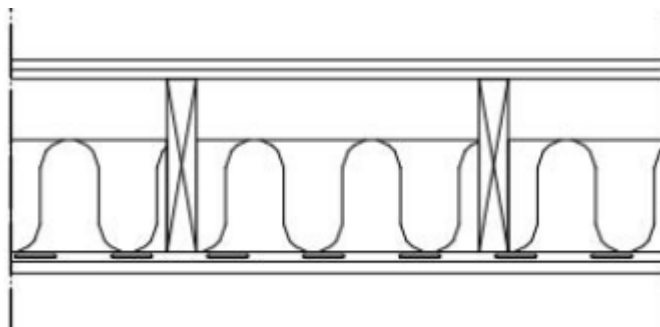
**Kuva 21: Can7 välipohjan askeläänitasot Kylliäisen ideomalla laskentamallilla ja laboratoriomittausten perusteella [122].**



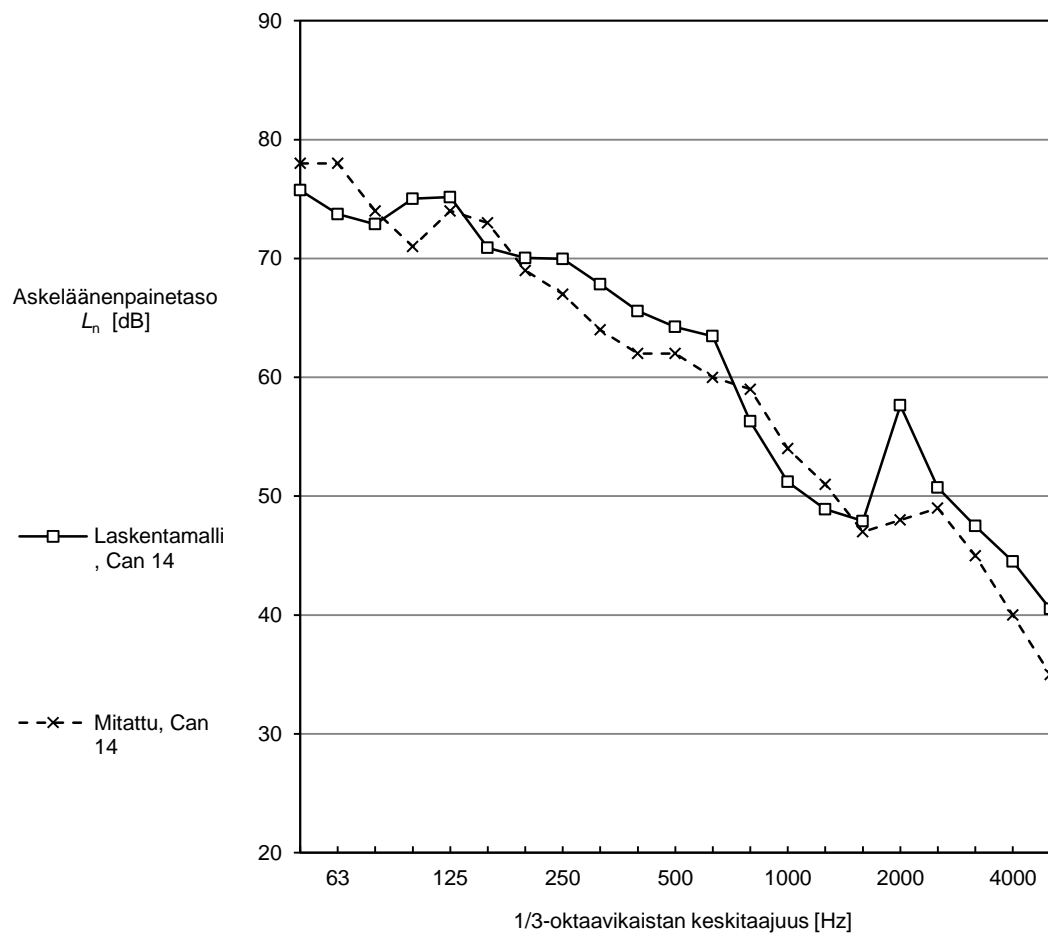
**Kuva 22: Can 7 välipohja.**



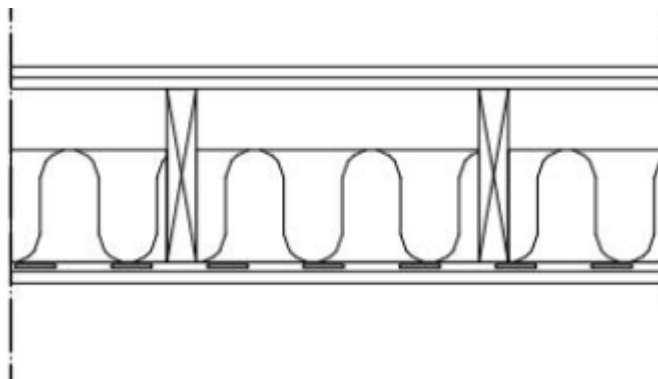
**Kuva 23: Can13 välipohjan askeläänitasot Kylläisen ideomalla laskentamallilla ja laboratoriomittausten perusteella [122].**



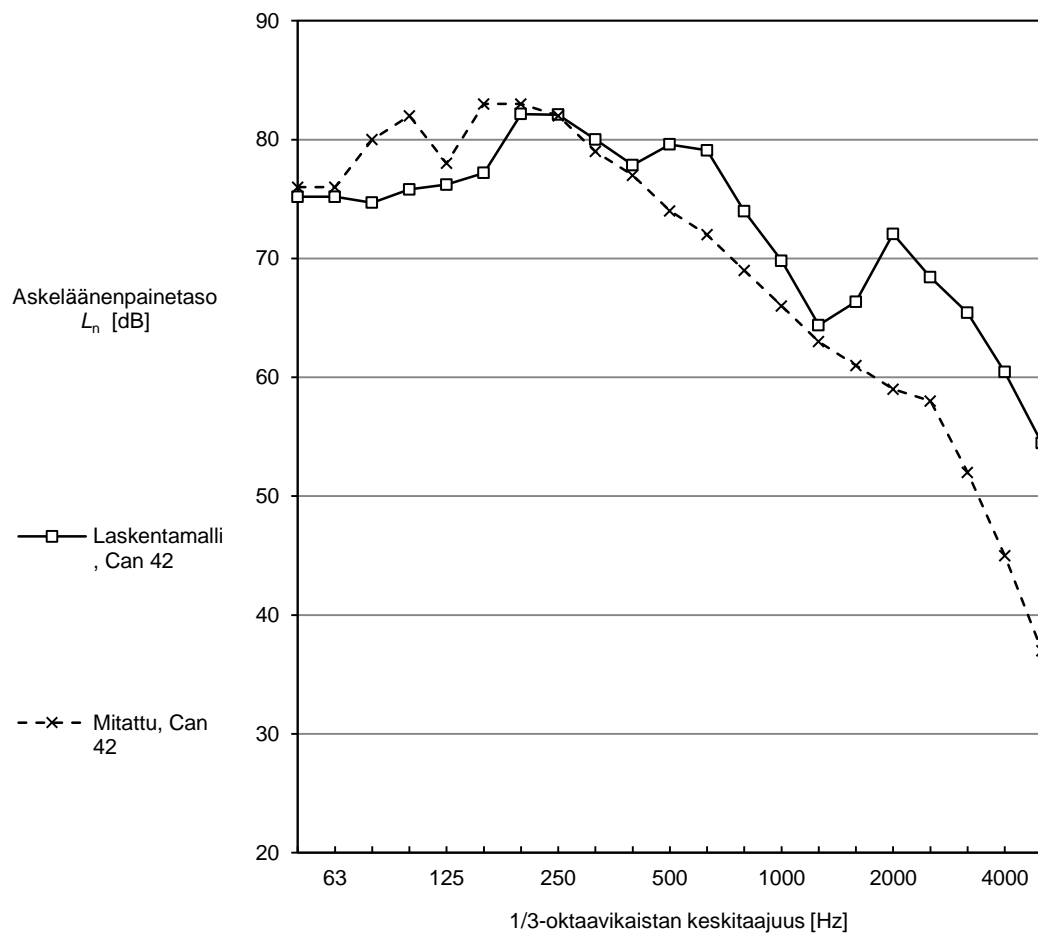
**Kuva 24. Can 13 välipohja.**



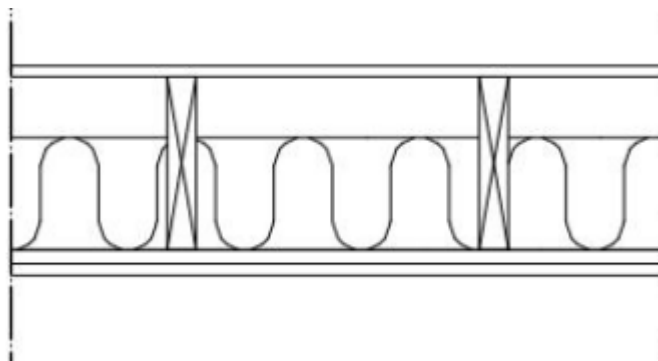
**Kuva 25: Can14 välipohjan askeläänitasot Kylliäisen ideoimalla laskentamallilla ja laboratoriomittausten perusteella [122].**



**Kuva 26: Can 14 välipohja.**



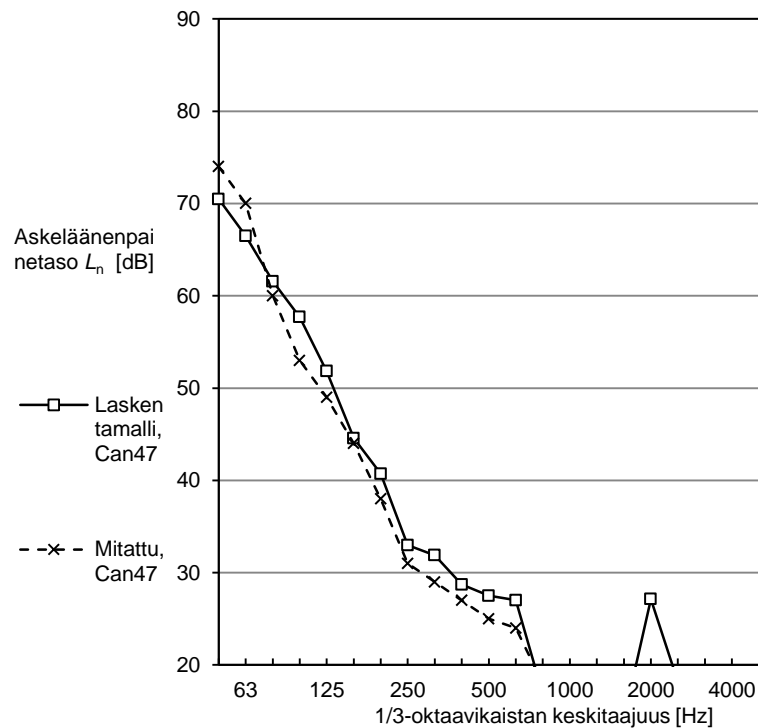
**Kuva 27: Can42 välipohjan askeläänitasot Kylliäisen ideoimalla laskentamallilla ja laboratoriomittausten perusteella [122].**



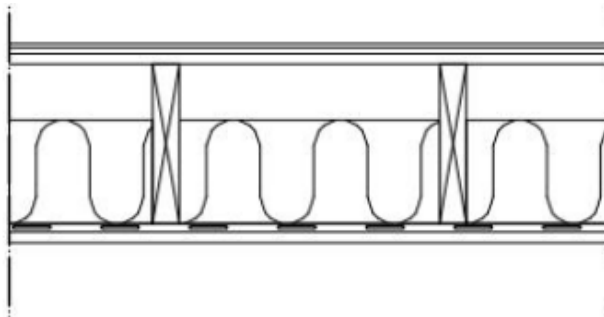
**Kuva 28: Can 42 välipohja.**

## 2. ALAKATON JA LATTIAPÄÄLLYSTEEN PA-RANNUSVAIKUTUS

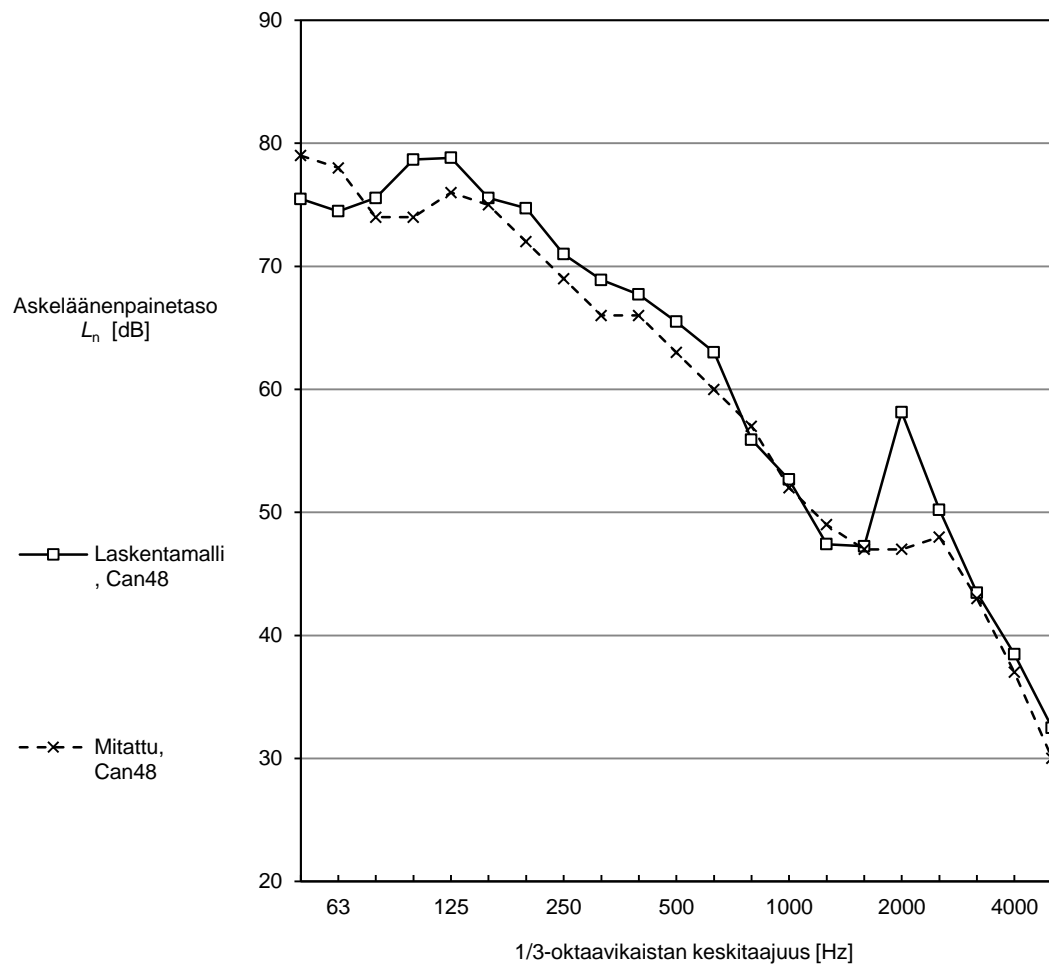
Seuraavassa on esitetty 1/3-oktaavikaistoittain Kylliäisen ideoiman laskentamallin tulokset ja tutkimuksista saadut kyseisten rakenteiden mitatut askeläänitasot [1, 122]. Laskentamallissa on otettu huomioon sekä alakaton että lattiapäällysteen vaikutus askelääneneristävyyteen.



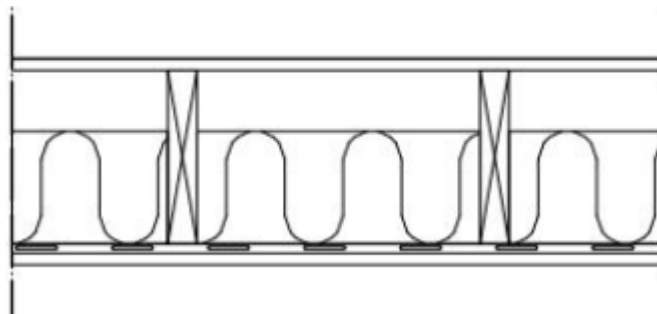
**Kuva 29:** Can47 välipohjan askeläänitasot Kylliäisen ideoimalla laskentamallilla ja laboratoriomittausten perusteella [122].



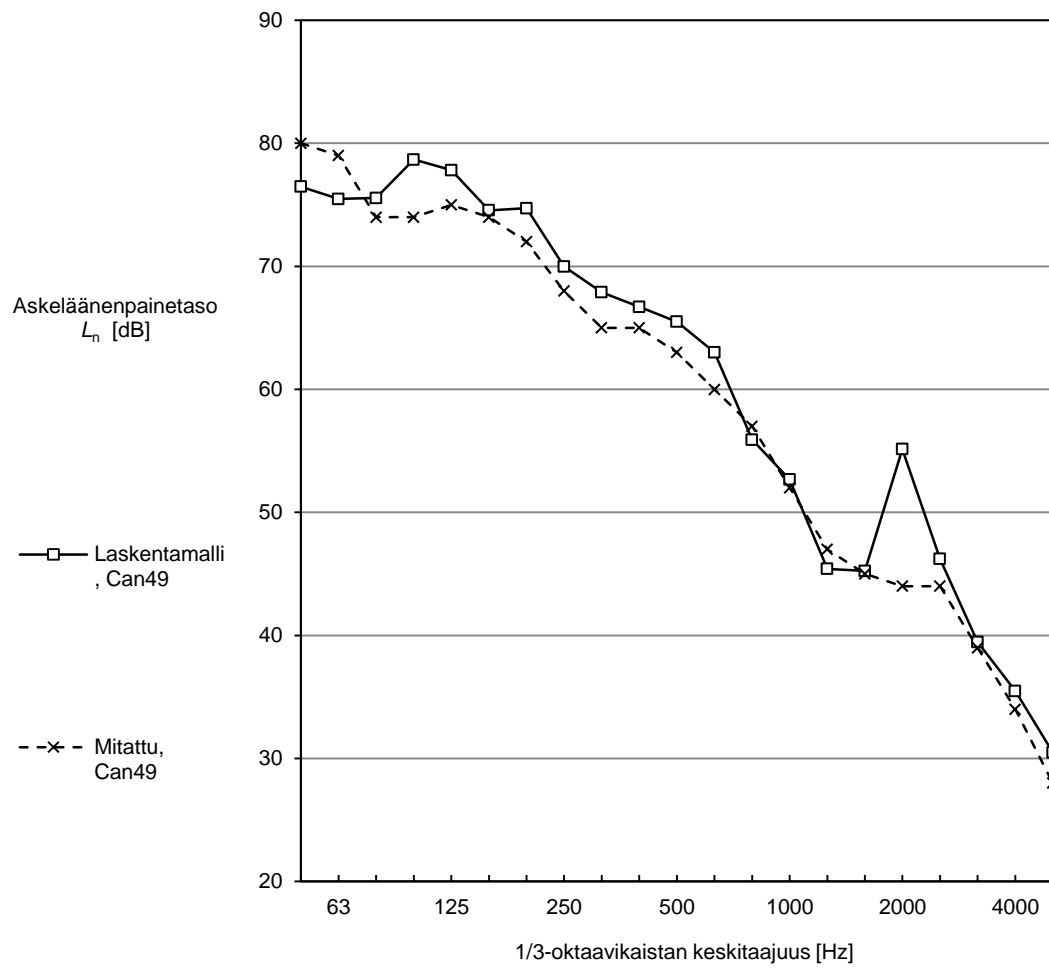
**Kuva 30.** Can 47 välipohja.



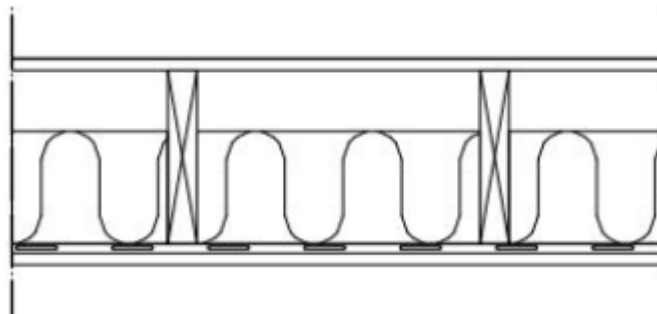
**Kuva 31: Can48 välipohjan askeläänitasot Kylliäisen ideoimalla laskentamallilla ja laboratoriomittausten perusteella [122].**



**Kuva 32: Can 48 välipohja.**

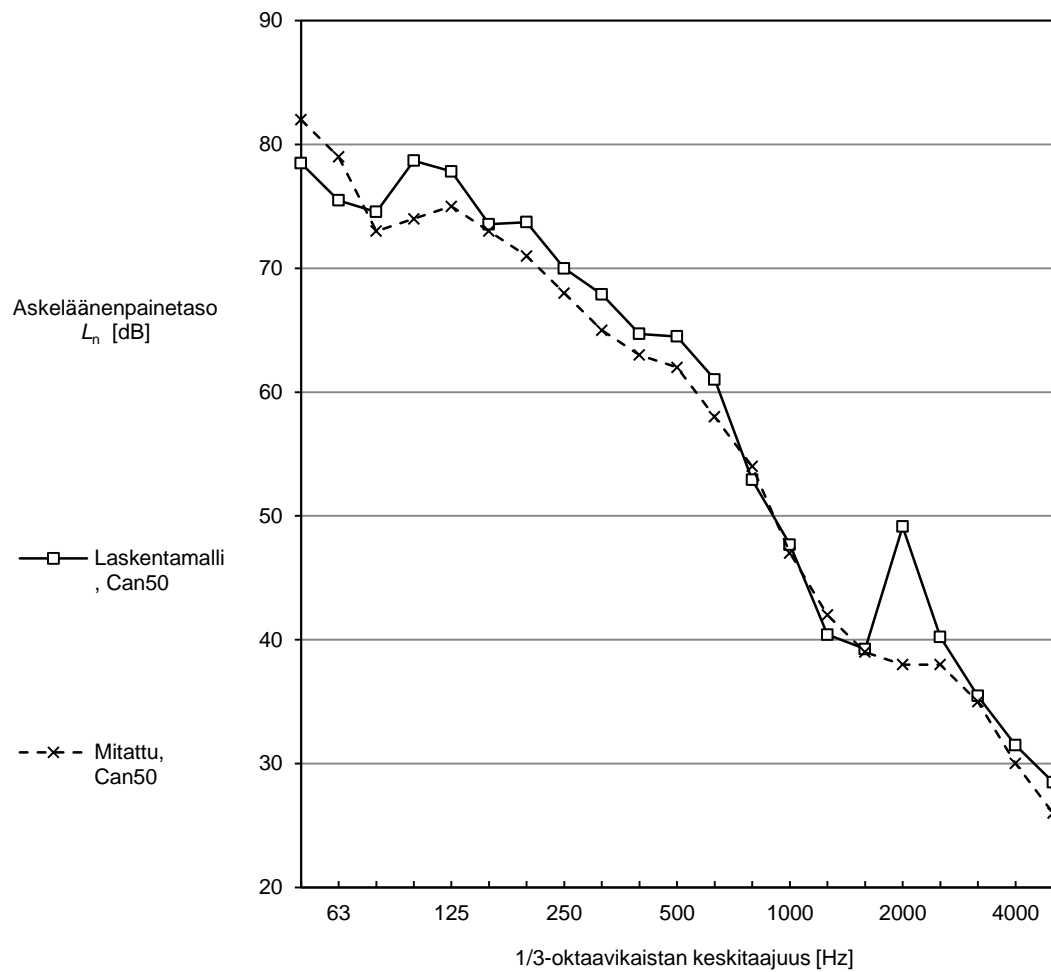


**Kuva 33: Can49 välipohjan askeläänitasot Kylliäisen ideoimalla laskentamallilla ja laboratoriomittausten perusteella [122].**

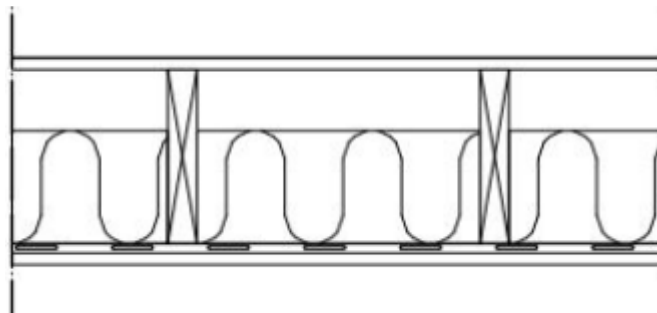


**Kuva 34: Can 49 välipohja.**

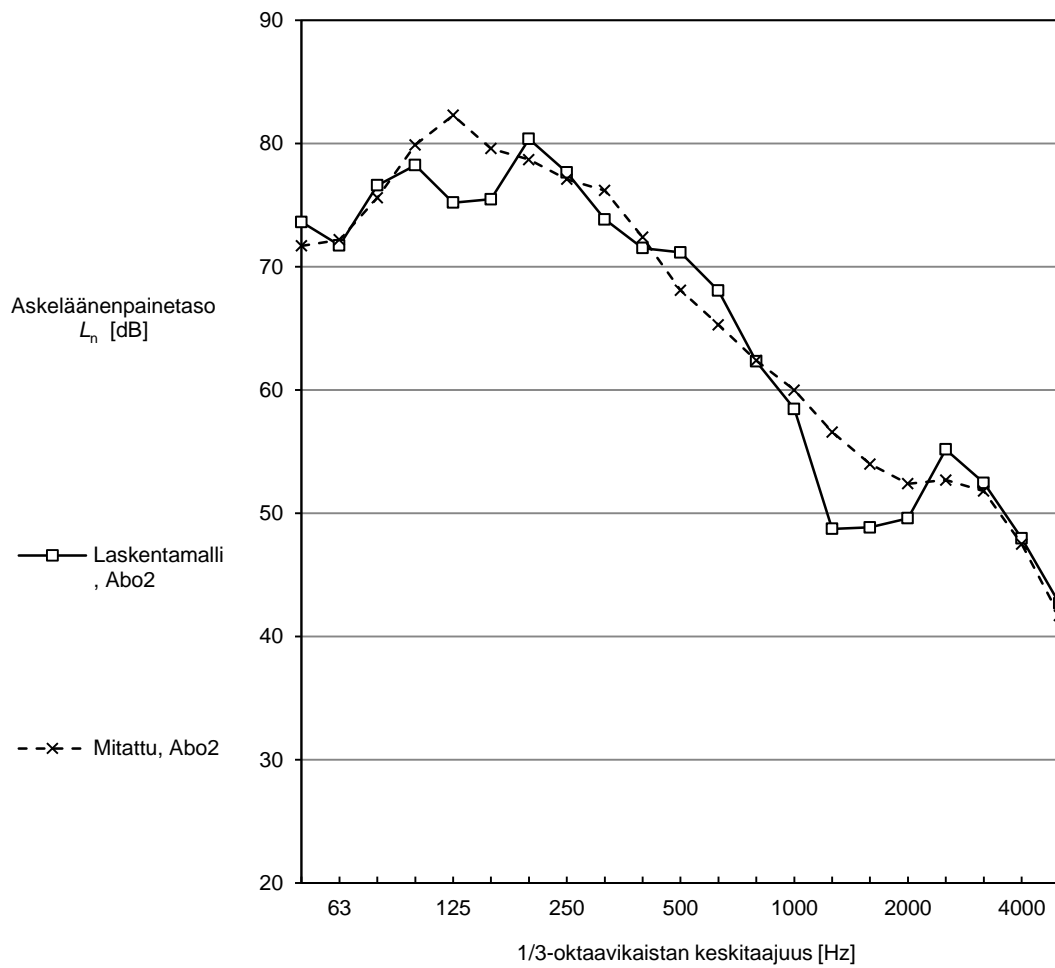




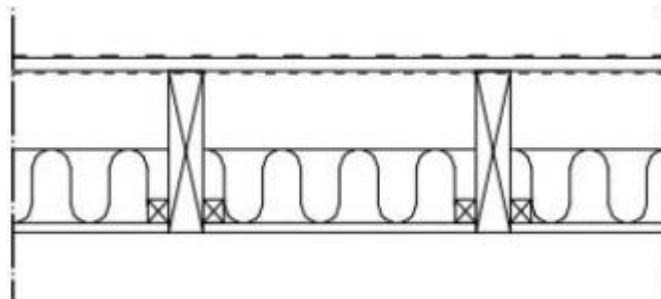
**Kuva 35: Can50 välipohjan askeläänitasot Kylliäisen ideoimalla laskentamallilla ja laboratoriomittausten perusteella [122].**



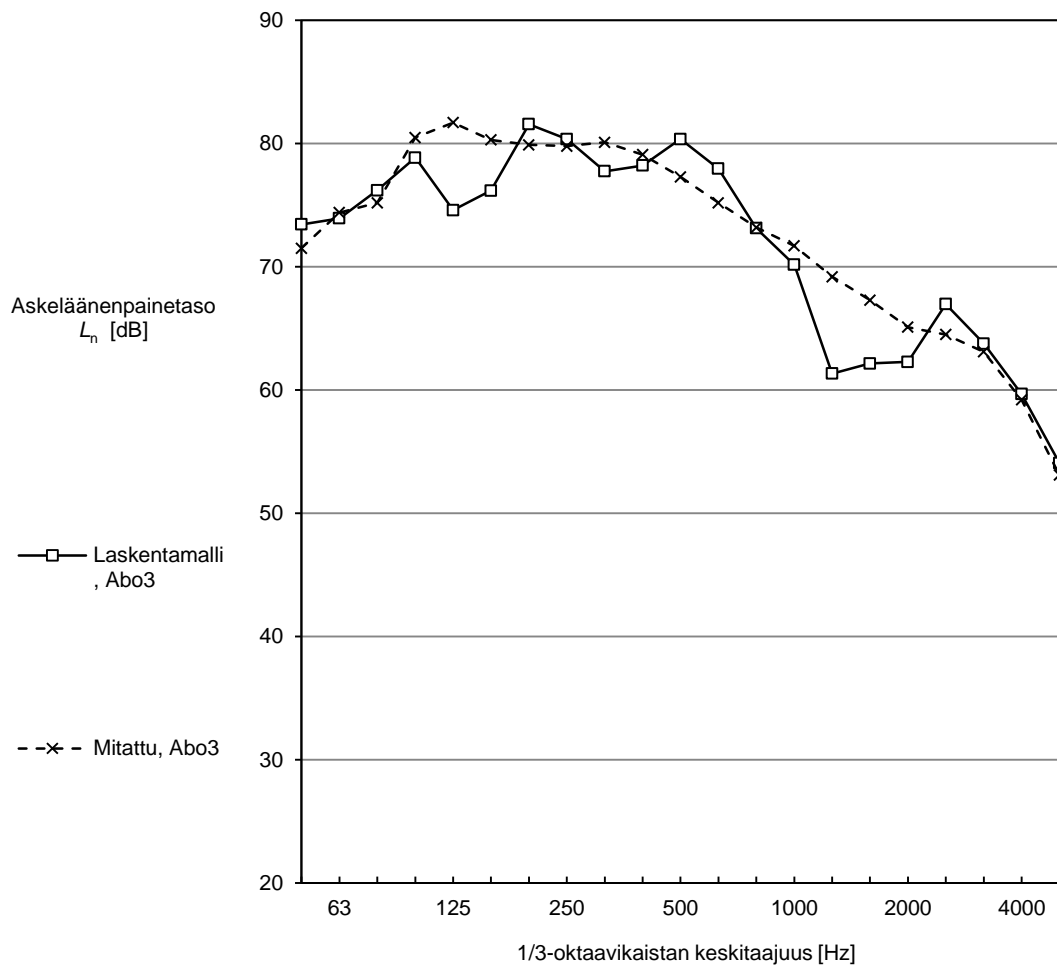
**Kuva 36: Can 50 välipohja.**



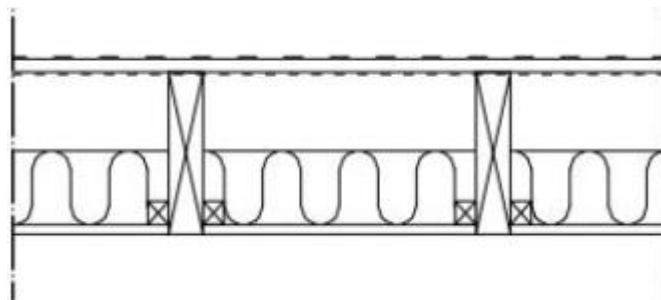
**Kuva 37: Abo2 välipohjan askeläänitasot Kylliäisen ideomalla laskentamallilla ja laboratoriomittausten perusteella [1].**



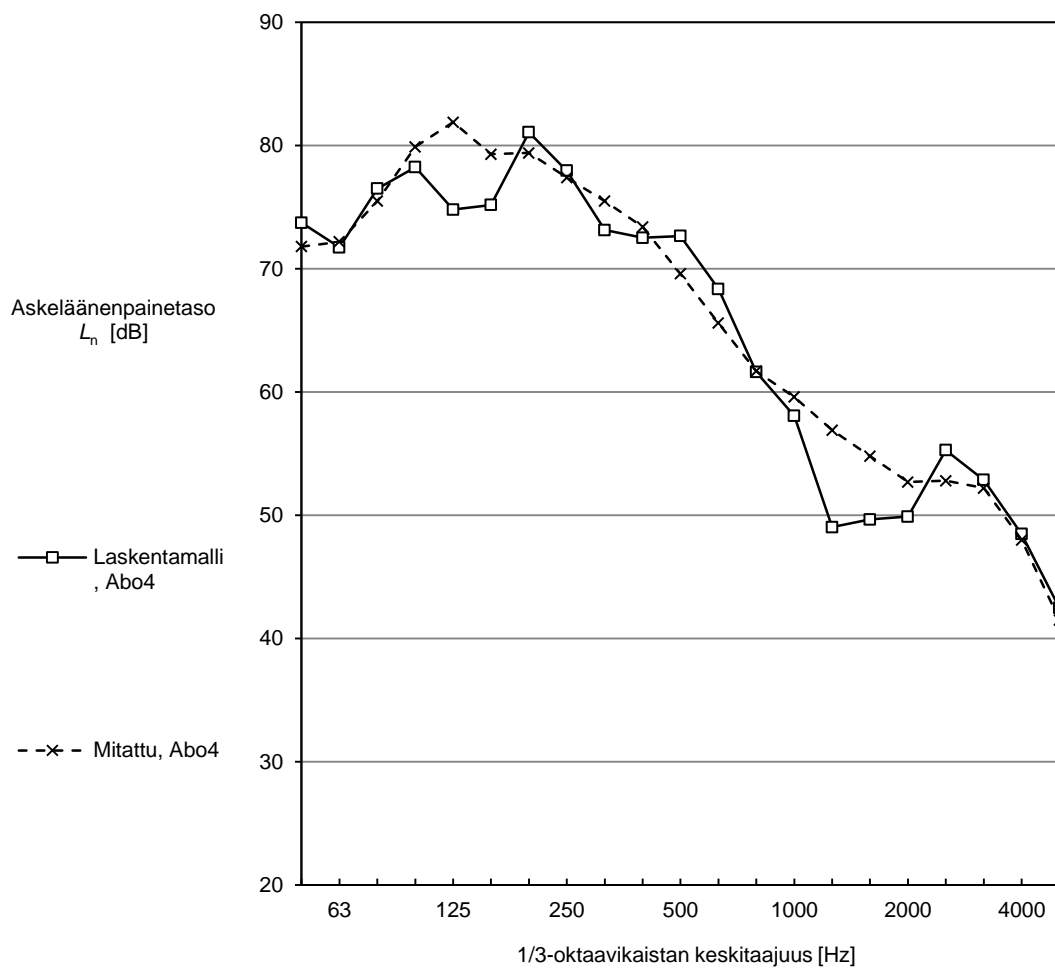
**Kuva 38. Abo 2 välipohja.**



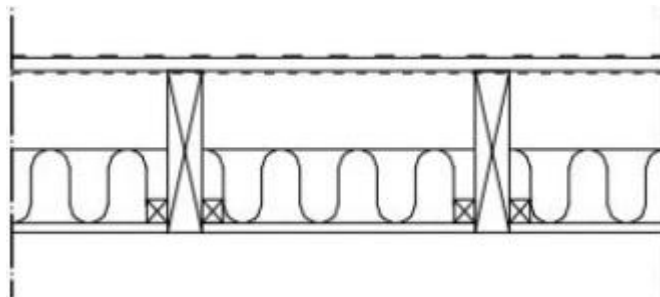
**Kuva 39: Abo3 välipohjan askeläänitasot Kylliäisen ideomalla laskentamallilla ja laboratoriomittausten perusteella [1].**



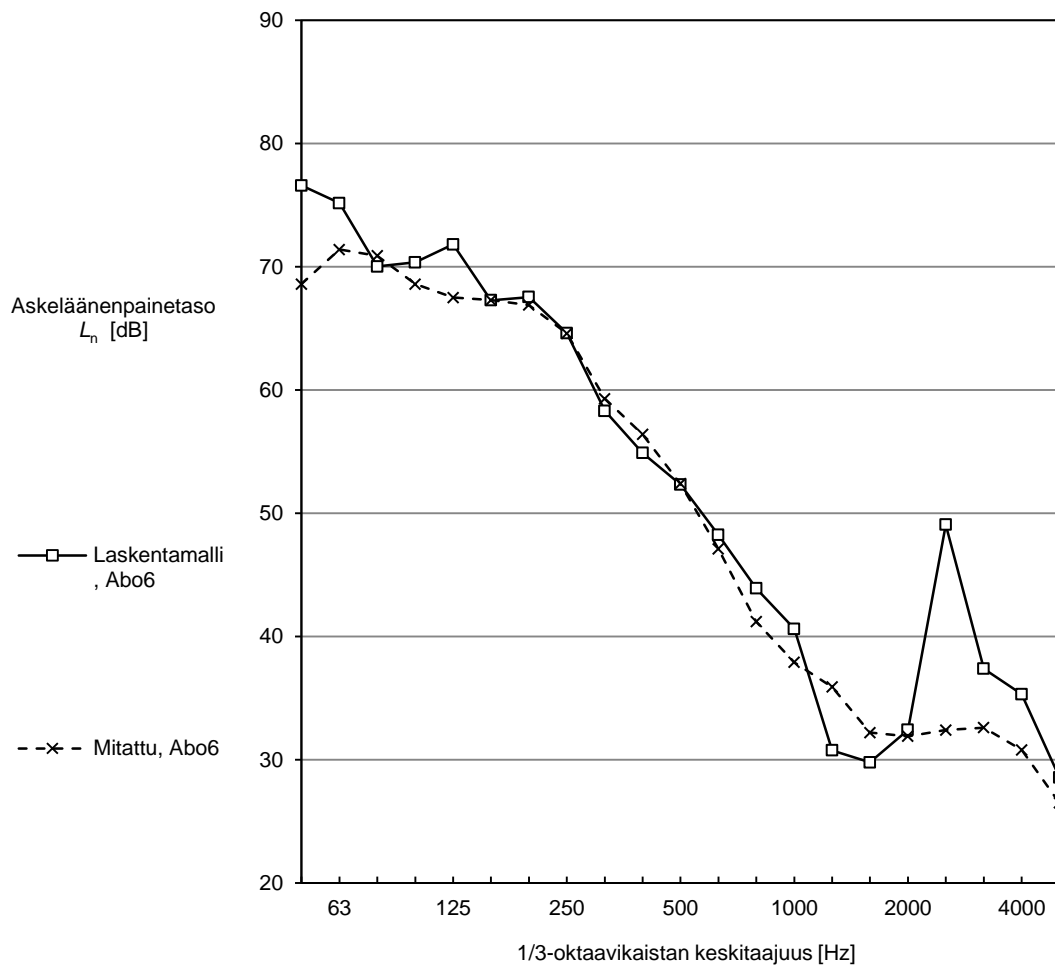
**Kuva 40: Abo 3 välipohja.**



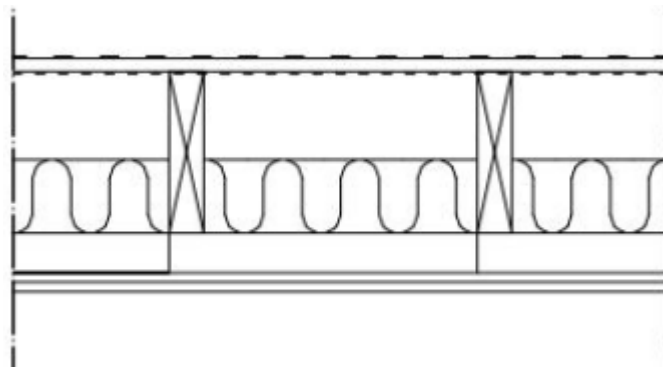
**Kuva 41: Abo4 välipohjan askeläänitasot Kylliäisen ideomalla laskentamallilla ja laboratoriomittausten perusteella [1].**



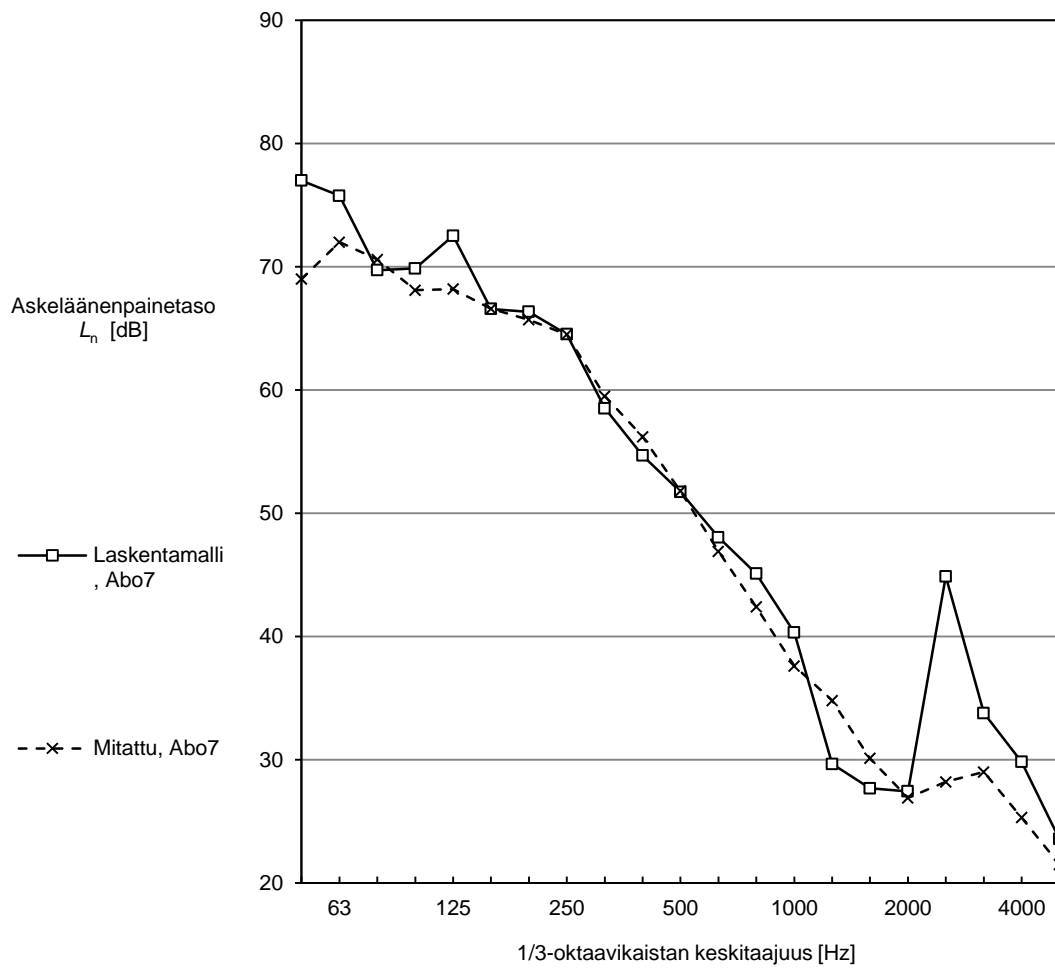
**Kuva 42: Abo 4 välipohja.**



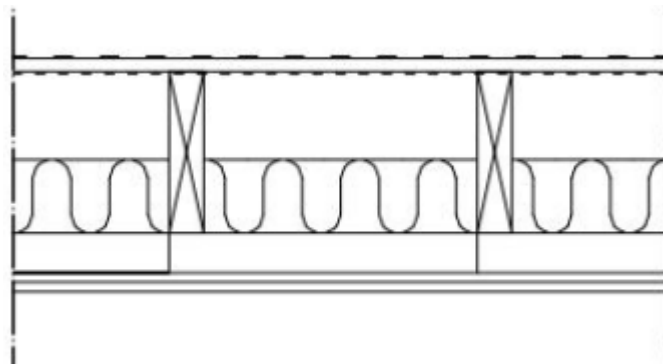
**Kuva 43: Abo6 välipohjan askeläänitasot Kylliäisen ideomalla laskentamallilla ja laboratoriomittausten perusteella [1].**



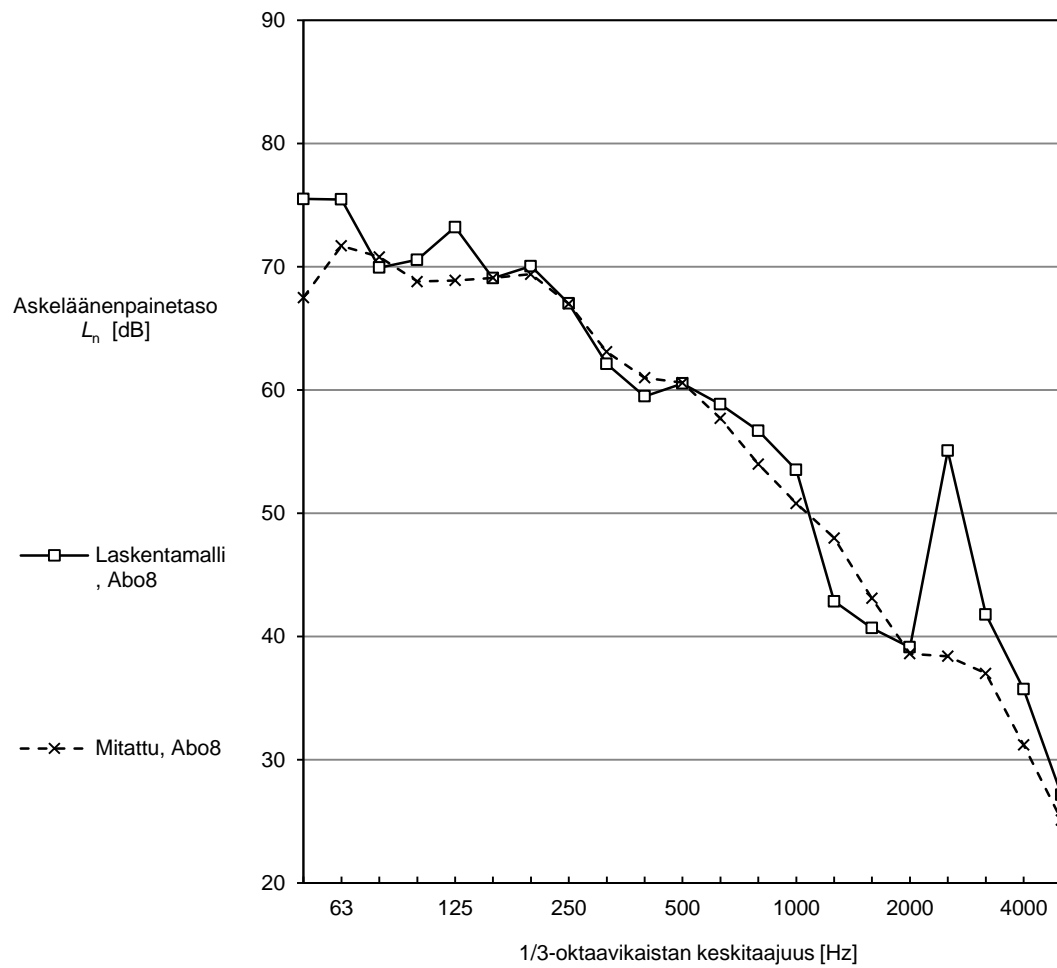
**Kuva 44: Abo 6 välipohja.**



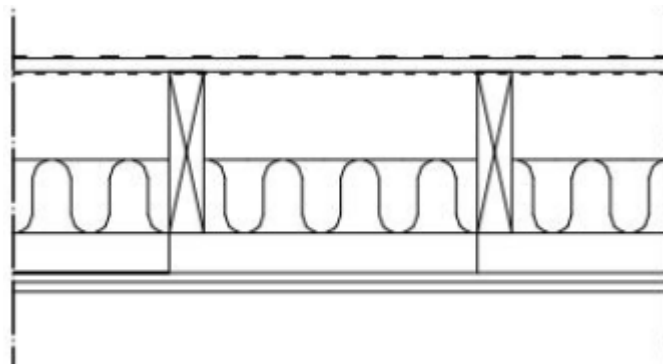
**Kuva 45: Abo7 välipohjan askeläänitasot Kylliäisen ideomalla laskentamallilla ja laboratoriomittausten perusteella [1].**



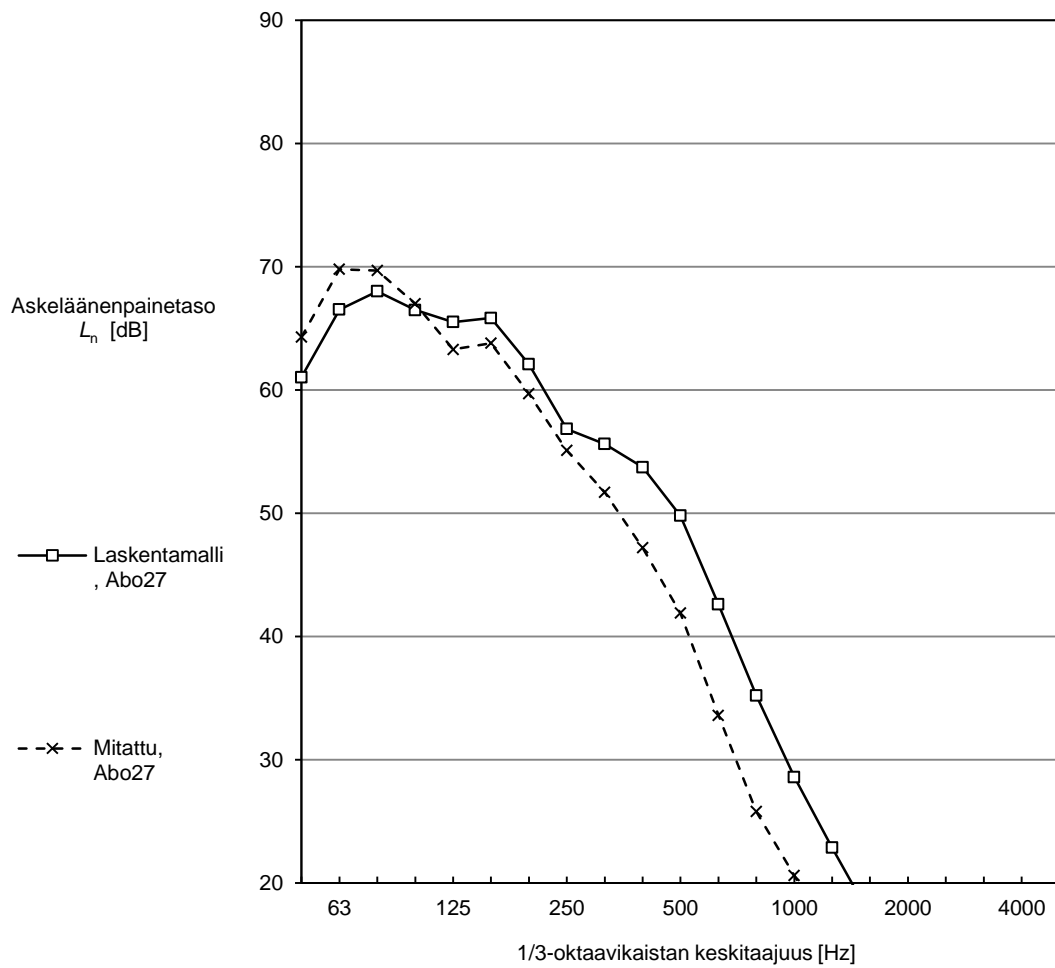
**Kuva 46: Abo 7 välipohja.**



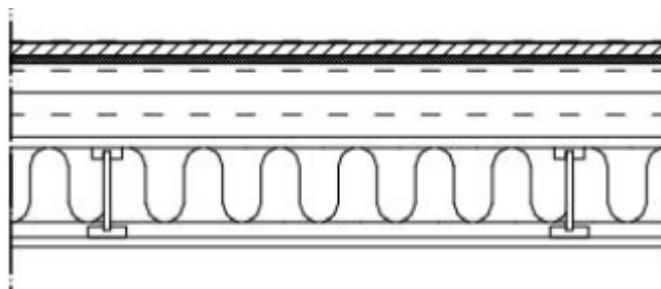
**Kuva 47: Abo8 välipohjan askeläänitasot Kylliäisen ideomalla laskentamallilla ja laboriomiittausten perusteella [1].**



**Kuva 48: Abo 8 välipohja.**



**Kuva 49:** Abo27 välipohjan askeläänitasot Kylliäisen ideoimalla laskentamallilla ja laboratoriomittausten perusteella [1].



**Kuva 50:** Abo 27 välipohja.



## LIITE 3

Liitteessä 3 on esitetty tämän tutkimuksen lähdemateriaalina käytetyt välipohjarakenteet ja niiden askeläänitasot 1/3-oktaavikaistoittain. Välipohjista on esitetty materiaalitiedot niin tarkasti, kuin ne olivat saatavissa lähdeaineistosta. Välipohjien mittaustulokset on saatu viidestä merkittävästä puuvälipohjia koskevasta tutkimuksesta [1, 16, 108, 120, 122].

1. CAN 1 -103-VÄLIPOHJAT
2. ACU 1-11-VÄLIPOHJAT
3. ABO 1-34-VÄLIPOHJAT
4. AUS 1-22-VÄLIPOHJAT

# 1. LIITE 3: CAN-VÄLIPOHJAT

Can-väli pohjat koostuvat Warnock et al. [120, 122] tutkimuksista saaduista mittaustuloksista ja väli pohjien materiaalitiedoista. Tarkistusvaiheessa materiaalitiedoista huomattiin uupuvan/virheellisiä joitakin tietoja:

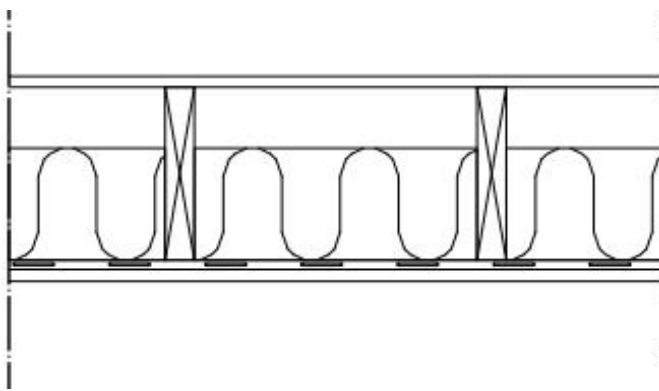
1. Väli pohjarakenteissa käytetyn lastulevyn lyhenne on OSB (*engl. oriented strandboard*)
2. Rakenteissa Can 60-71 I-palkkien jakoväli on k406

Liitteessä on esitetty seuraavat väli pohjarakenteet:

Can 1-52

Can 60-103

Yhteensä 96 väli pohjarakennetta



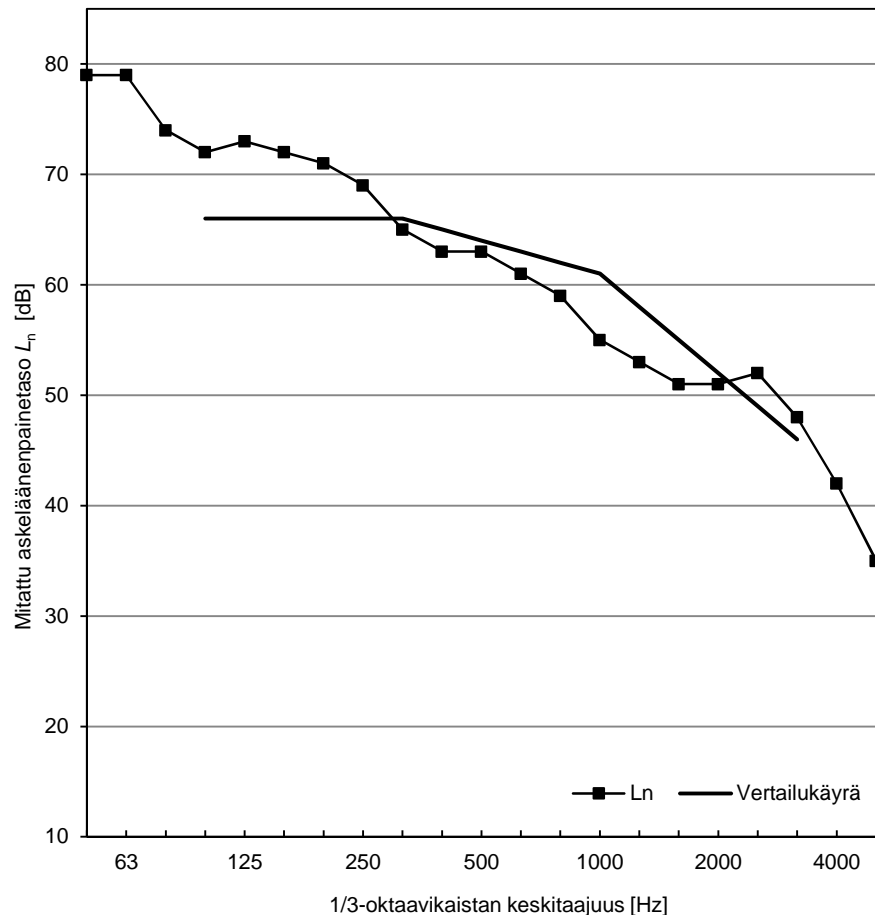
Rakennekerrokset:

	$m'$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$d'$ [mm]
OBS levy, k300/150 ruuvit	8,8	15
sahat.palkki (38x235)mm, k406		235
* pituus L=3925		
* 1 poikittaistuentalinja palkkikent.		
lasivilla (152mm)		
akustinen jousiranka, k610		13,0
*poikittain palkkeihin nähden		
kipsilevy	11,3	15,9

Kokonaiskorkeus [mm]

279

$f$ [Hz]	$L_n$ [dB]
50	79
63	79
80	74
100	72
125	73
160	72
200	71
250	69
315	65
400	63
500	63
630	61
800	59
1000	55
1250	53
1600	51
2000	51
2500	52
3150	48
4000	42
5000	35



$S [m^2] = 15$

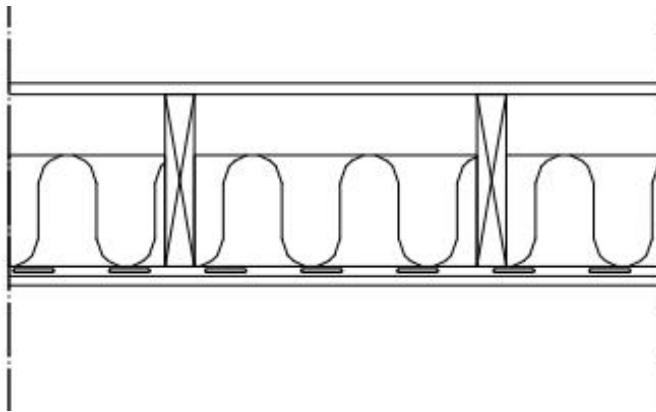
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

$L_{n,w} (C_1) = 64 (0) \text{ dB}$

$C_{1,50-2500} = 5 \text{ dB}$

$L_{n,w} + C_{1,50-2500} = 69 \text{ dB}$



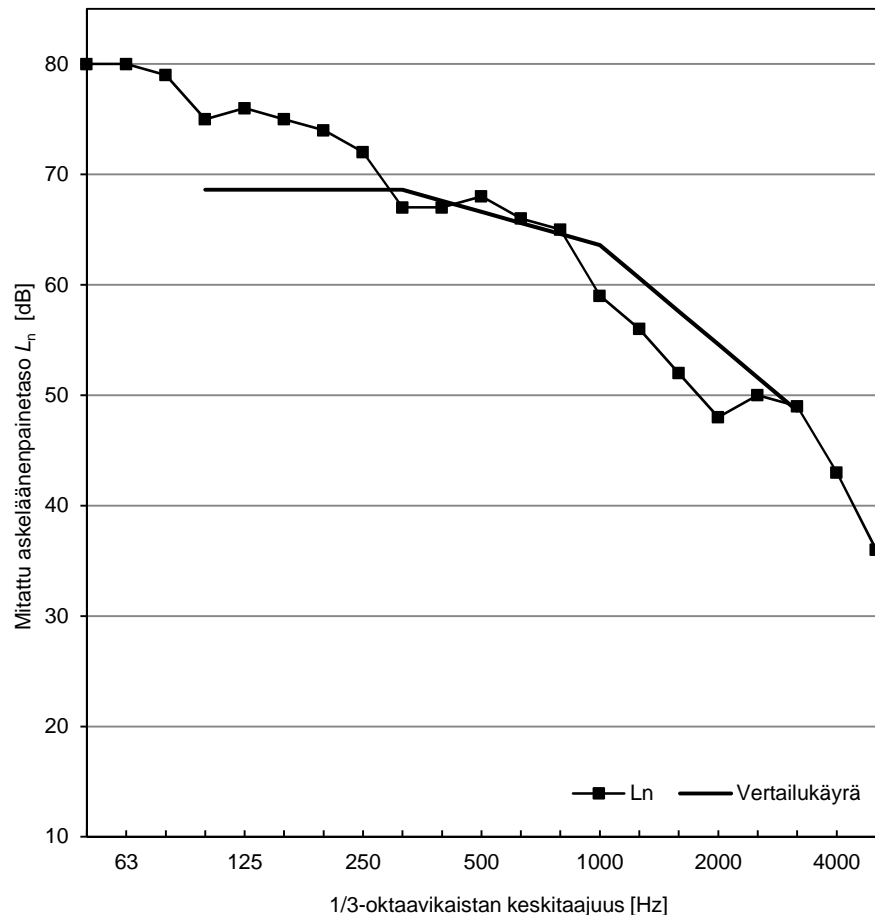
Rakennekerrokset:

	$m'$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$d'$ [mm]
OBS levy, k300/150 ruuvit	8,8	15
sahat.palkki (38x235)mm, k406		235
* pituus L=3925		
* 1 poikittaistuentalinja palkkikent.		
lasivilla (152mm)		
akustinen jousiranka, k610		13,0
*poikittain palkkeihin nähden		
kipsilevy	7,3	13,0

Kokonaiskorkeus [mm]

276

$f$ [Hz]	$L_n$ [dB]
50	80
63	80
80	79
100	75
125	76
160	75
200	74
250	72
315	67
400	67
500	68
630	66
800	65
1000	59
1250	56
1600	52
2000	48
2500	50
3150	49
4000	43
5000	36



$S [m^2] = 15$

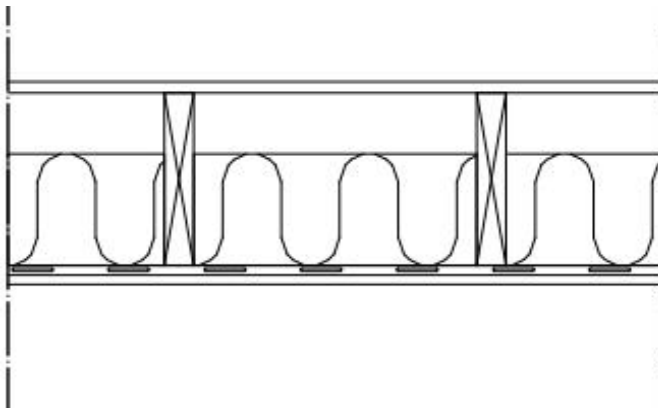
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

$L_{n,w} (C_1) = 67 (1) \text{ dB}$

$C_{1,50-2500} = 5 \text{ dB}$

$L_{n,w} + C_{1,50-2500} = 72 \text{ dB}$



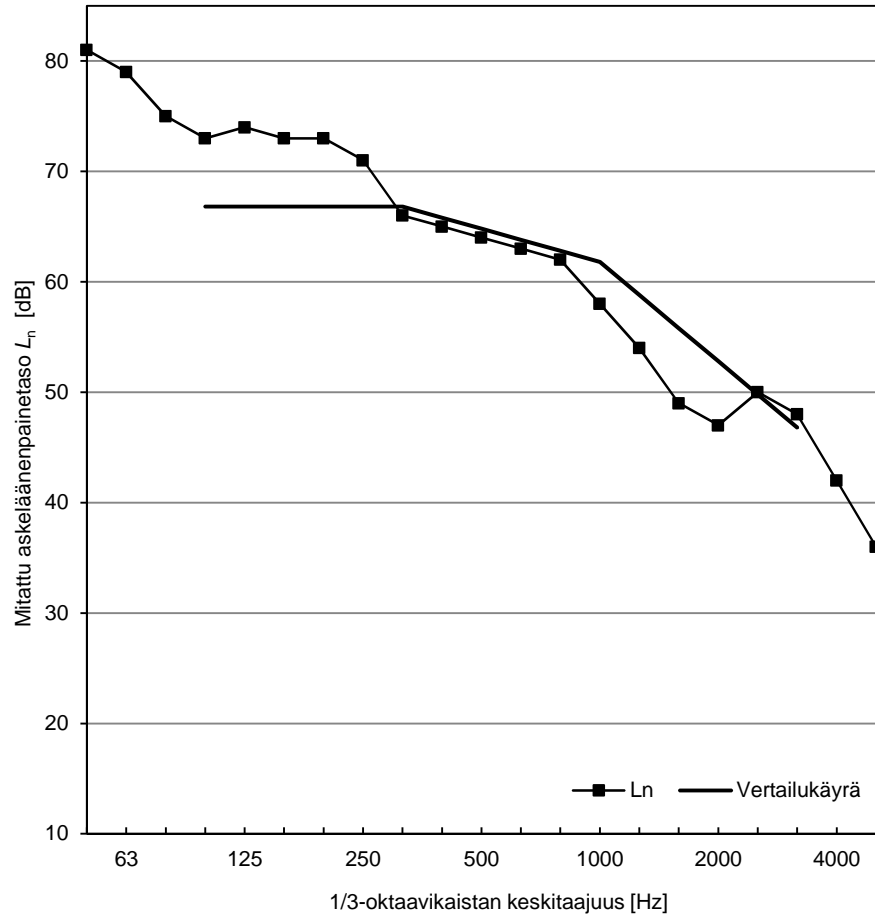
**Rakennekerrokset:**

	$m'$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$d'$ [mm]
OBS levy, k300/150 ruuvit	8,8	15
sahat.palkki (38x235)mm, k406		235
* pituus L=3925		
* 1 poikittaistuentalinja palkkikent.		
lasivilla (152mm)		
akustinen jousiranka, k610		13,0
*poikittain palkkeihin nähden		
kipsilevy	9,6	13,0

**Kokonaiskorkeus [mm]**

276

$f$ [Hz]	$L_n$ [dB]
50	81
63	79
80	75
100	73
125	74
160	73
200	73
250	71
315	66
400	65
500	64
630	63
800	62
1000	58
1250	54
1600	49
2000	47
2500	50
3150	48
4000	42
5000	36



$S [m^2] = 15$

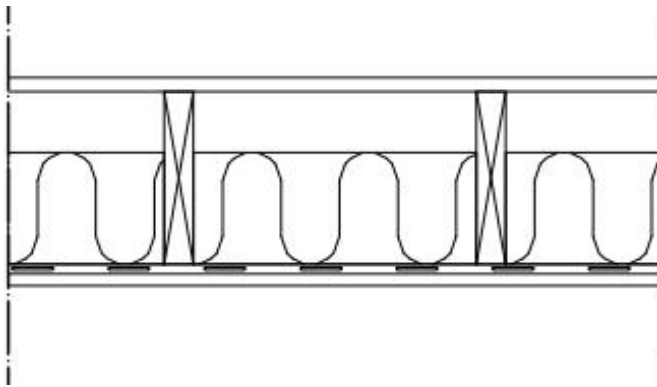
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

$L_{n,w} (C_1) = 65 (1) \text{ dB}$

$C_{1,50-2500} = 6 \text{ dB}$

$L_{n,w} + C_{1,50-2500} = 70 \text{ dB}$



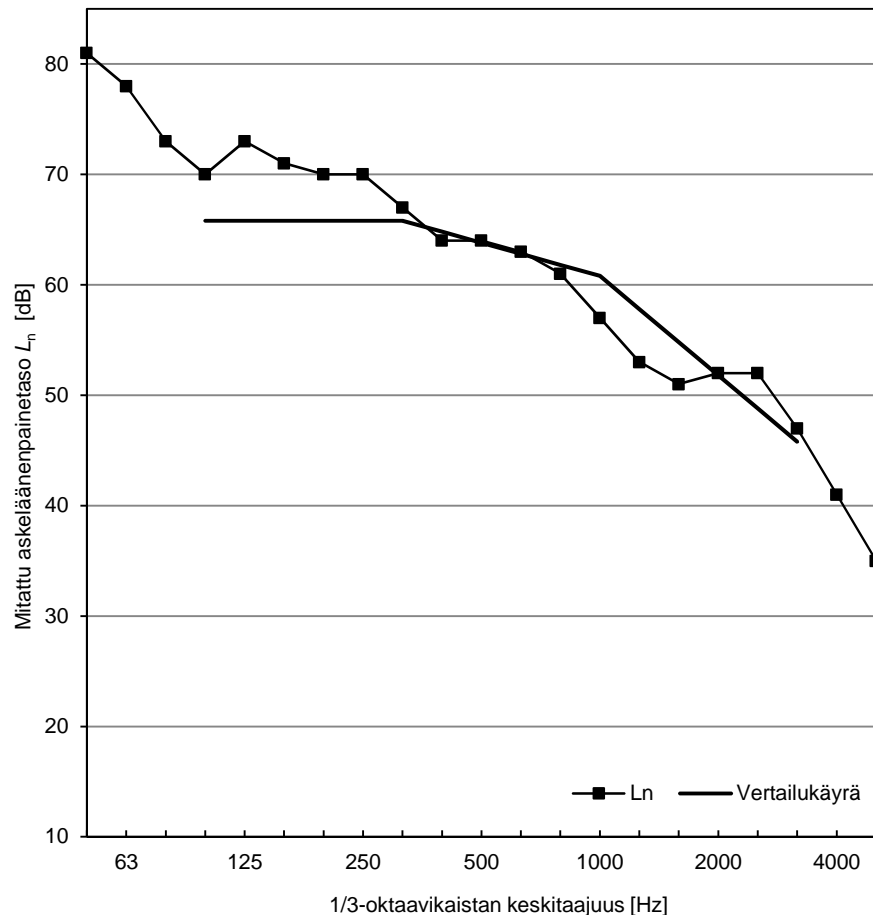
Rakennekerrokset:

	m'	d'
	[kg/m <sup>2</sup> ]	[mm]
OBS levy, k300/150 ruuvit	10,3	19
sahat.palkki (38x235)mm, k406		235
* pituus L=3925		
* 1 poikittaistuentalinja palkkikent.		
lasivilla (152mm)		
akustinen jousiranka, k610		13,0
*poikittain palkkeihin nähden		
kipsilevy	11,6	16,0

Kokonaiskorkeus [mm]

283

f [Hz]	L <sub>n</sub> [dB]
50	81
63	78
80	73
100	70
125	73
160	71
200	70
250	70
315	67
400	64
500	64
630	63
800	61
1000	57
1250	53
1600	51
2000	52
2500	52
3150	47
4000	41
5000	35



S [m<sup>2</sup>] = 15

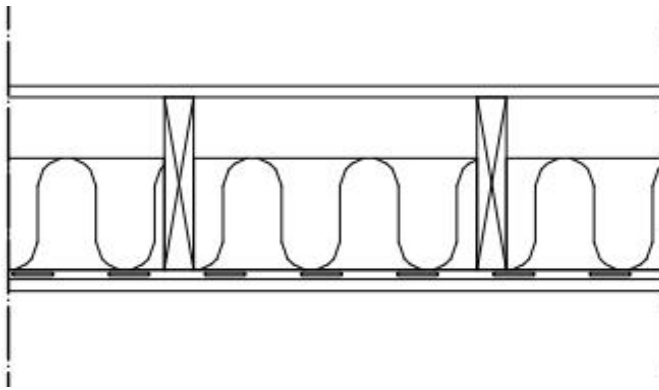
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

L<sub>n,w</sub> (C<sub>1</sub>) = 64 (0) dB

C<sub>1,50-2500</sub> = 6 dB

L<sub>n,w</sub> + C<sub>1,50-2500</sub> = 70 dB



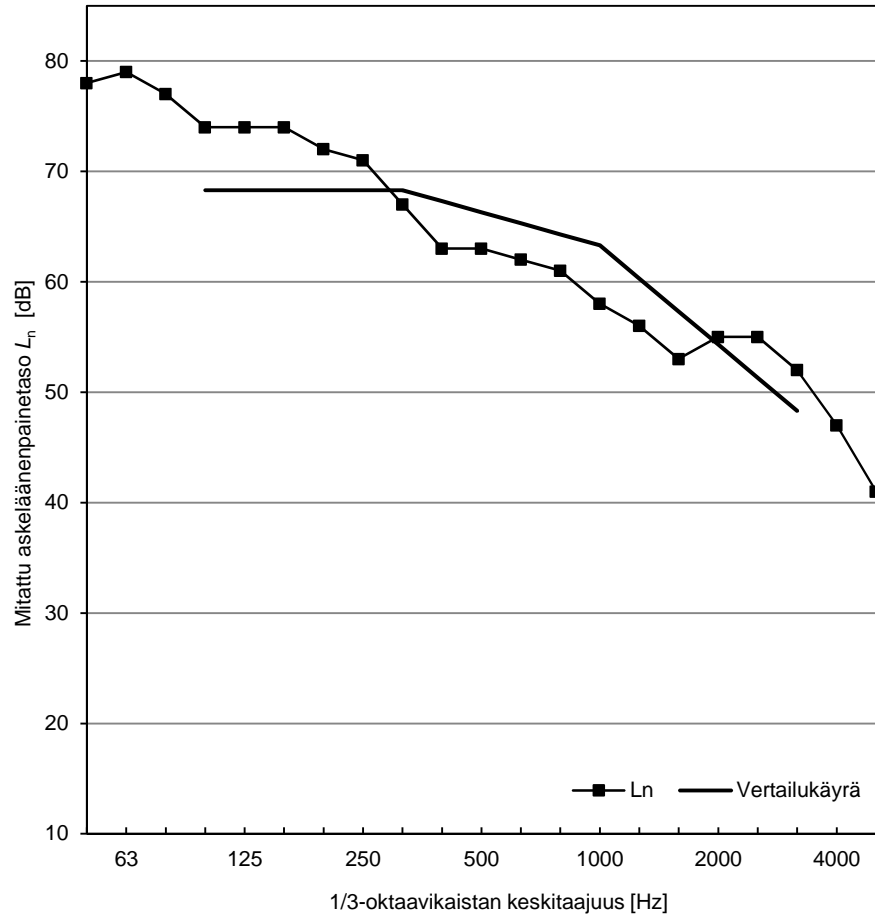
**Rakennekerrokset:**

	$m'$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$d'$ [mm]
vaneri, k300/150 ruuvit	7,1	15
sahat.palkki (38x235)mm, k406		235
* pituus L=3925		
* 1 poikittaistuentalinja palkkikent.		
lasivilla (152mm)		
akustinen jousiranka, k610		13,0
*poikittain palkkeihin nähden		
kipsilevy	11,6	16,0

**Kokonaiskorkeus [mm]**

279

$f$ [Hz]	$L_n$ [dB]
50	78
63	79
80	77
100	74
125	74
160	74
200	72
250	71
315	67
400	63
500	63
630	62
800	61
1000	58
1250	56
1600	53
2000	55
2500	55
3150	52
4000	47
5000	41



$S [m^2] = 15$

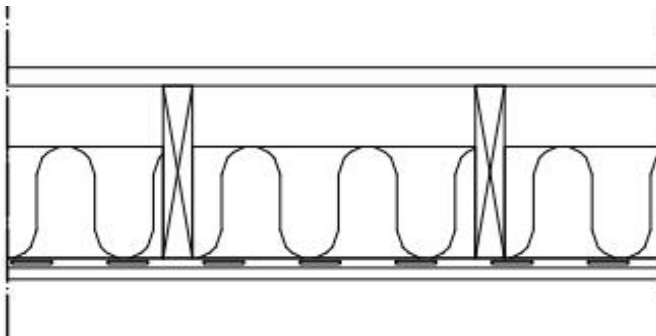
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askelaäänitasoluku

$L_{n,w} (C_1) = 66 (-1) \text{ dB}$

$C_{1,50-2500} = 4 \text{ dB}$

$L_{n,w} + C_{1,50-2500} = 70 \text{ dB}$



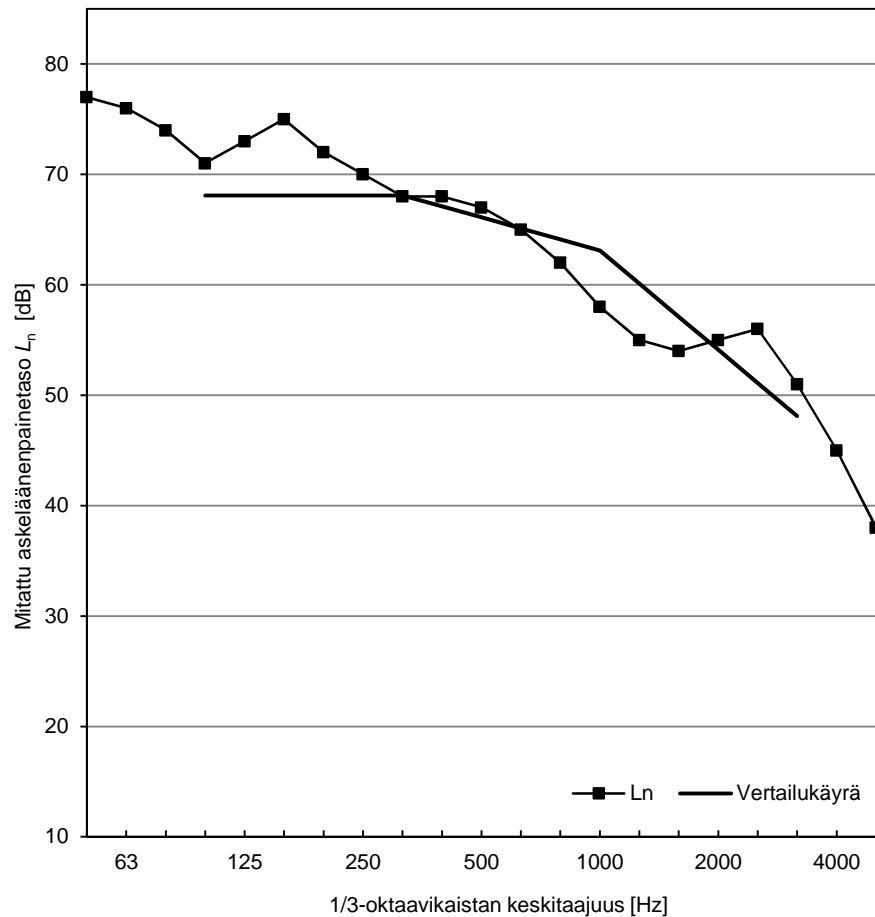
**Rakennekerrokset:**

	$m'$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$d'$ [mm]
vaneri, k300/150 ruuvit	12,1	25
sahat.palkki (38x235)mm, k406		235
* pituus L=3925		
* 1 poikittaistuentalinja palkkikent.		
lasivilla (152mm)		
akustinen jousiranka, k610		13
*poikittain palkkeihin nähden		
kipsilevy	11,6	16

**Kokonaiskorkeus [mm]**

289

$f$ [Hz]	$L_n$ [dB]
50	77
63	76
80	74
100	71
125	73
160	75
200	72
250	70
315	68
400	68
500	67
630	65
800	62
1000	58
1250	55
1600	54
2000	55
2500	56
3150	51
4000	45
5000	38



$S [m^2] = 15$

Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

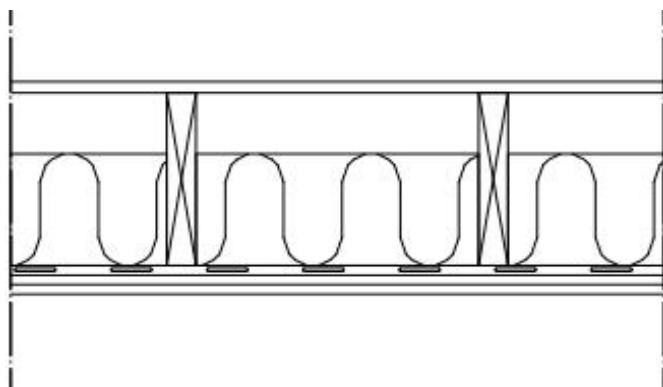
Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

$L_{n,w}(C_1) = 66 (-1) \text{ dB}$

$C_{1,50-2500} = 3 \text{ dB}$

$L_{n,w} + C_{1,50-2500} = 69 \text{ dB}$





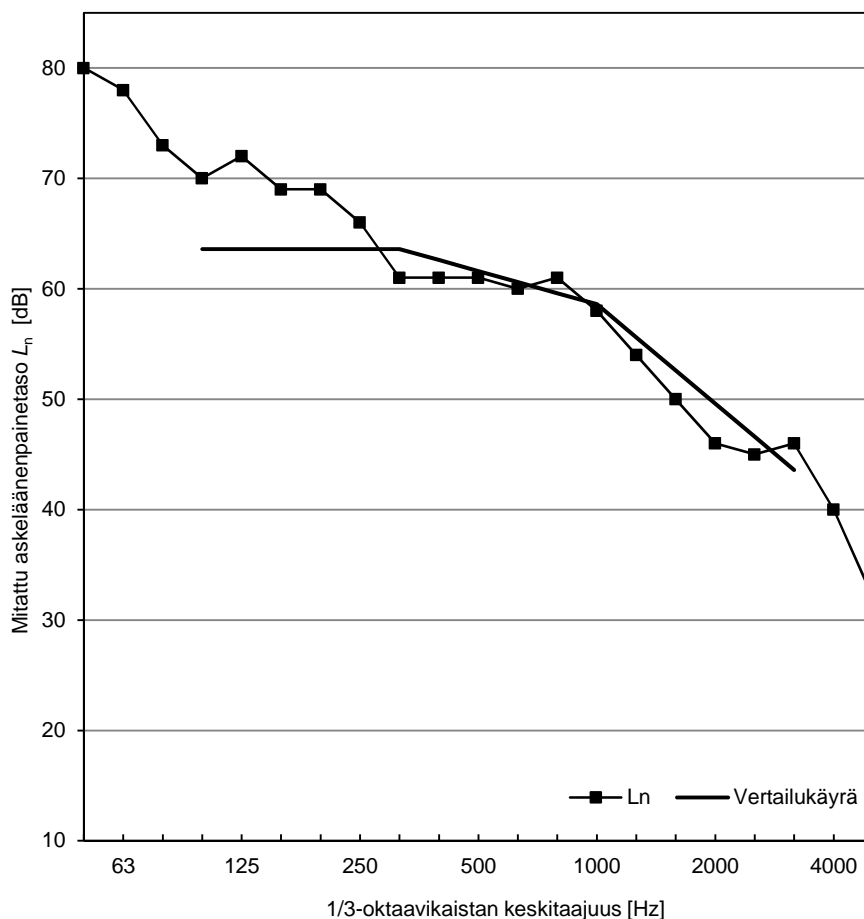
**Rakennekerrokset:**

	$m'$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$d'$ [mm]
OBS levy, k300/150 ruuvit	8,8	15
sahat.palkki (38x235)mm, k406		235
* pituus L=3925		
* 1 poikittaistuentalinja palkkikent.		
lasivilla (152mm)		
akustinen jousiranka, k610		13
*poikittain palkkeihin nähden		
2x kipsilevy	14,6	26
*molemmissa k300 ruuvit		

**Kokonaiskorkeus [mm]**

289

$f$ [Hz]	$L_n$ [dB]
50	80
63	78
80	73
100	70
125	72
160	69
200	69
250	66
315	61
400	61
500	61
630	60
800	61
1000	58
1250	54
1600	50
2000	46
2500	45
3150	46
4000	40
5000	32



$S [m^2] = 15$

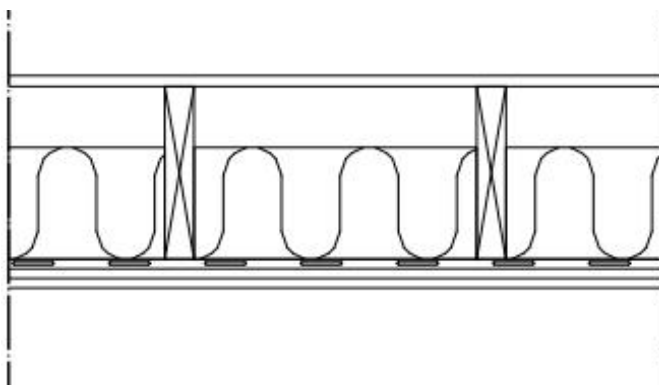
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

$L_{n,w}(C_1) = 62 (1) \text{ dB}$

$C_{1,50-2500} = 7 \text{ dB}$

$L_{n,w} + C_{1,50-2500} = 69 \text{ dB}$



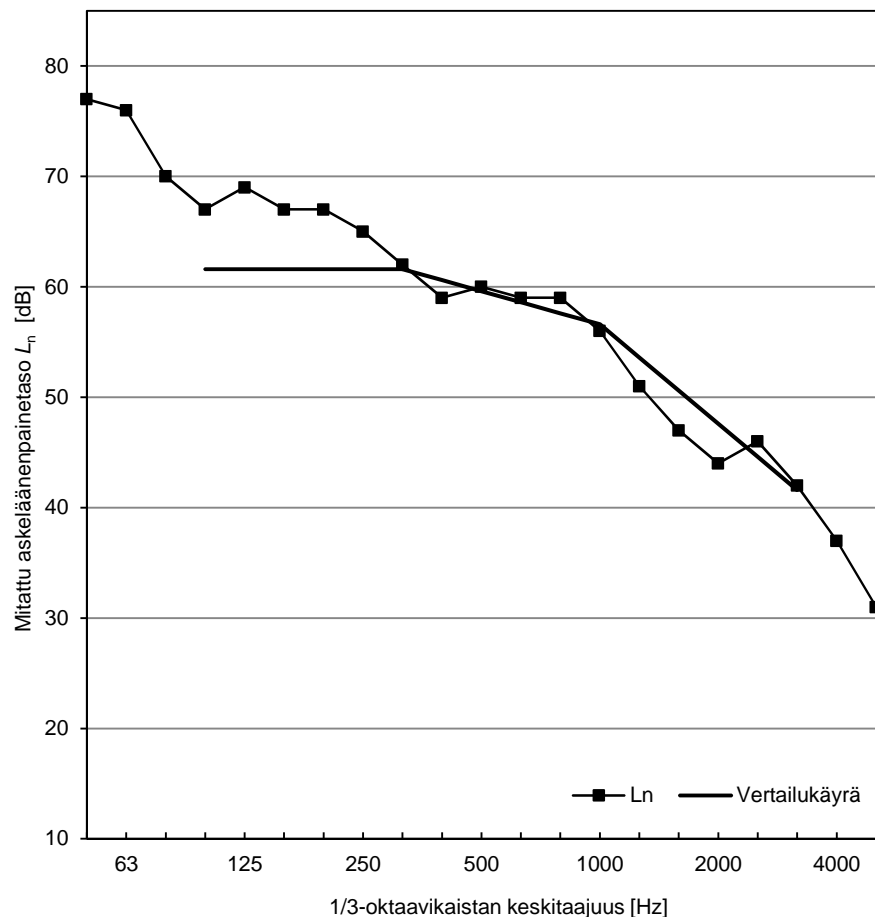
**Rakennekerrokset:**

	$m'$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$d'$ [mm]
OBS levy, k300/150 ruuvit	8,8	15
sahat.palkki (38x235)mm, k406		235
* pituus L=3925		
* 1 poikittaistuentalinja palkkikent.		
lasivilla (152mm)		
akustinen jousiranka, k610		13
*poikittain palkkeihin nähden		
2x kipsilevy	19,3	26
*molemmissa k300 ruuvit		

**Kokonaiskorkeus [mm]**

289

$f$ [Hz]	$L_n$ [dB]
50	77
63	76
80	70
100	67
125	69
160	67
200	67
250	65
315	62
400	59
500	60
630	59
800	59
1000	56
1250	51
1600	47
2000	44
2500	46
3150	42
4000	37
5000	31



$S [m^2] = 15$

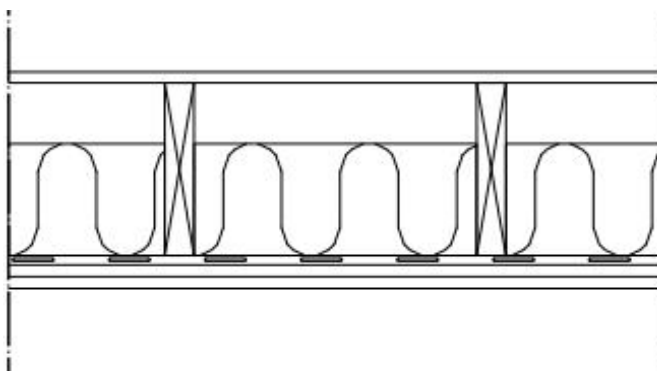
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

$L_{n,w}(C_1) = 60 (0) \text{ dB}$

$C_{1,50-2500} = 7 \text{ dB}$

$L_{n,w} + C_{1,50-2500} = 66 \text{ dB}$



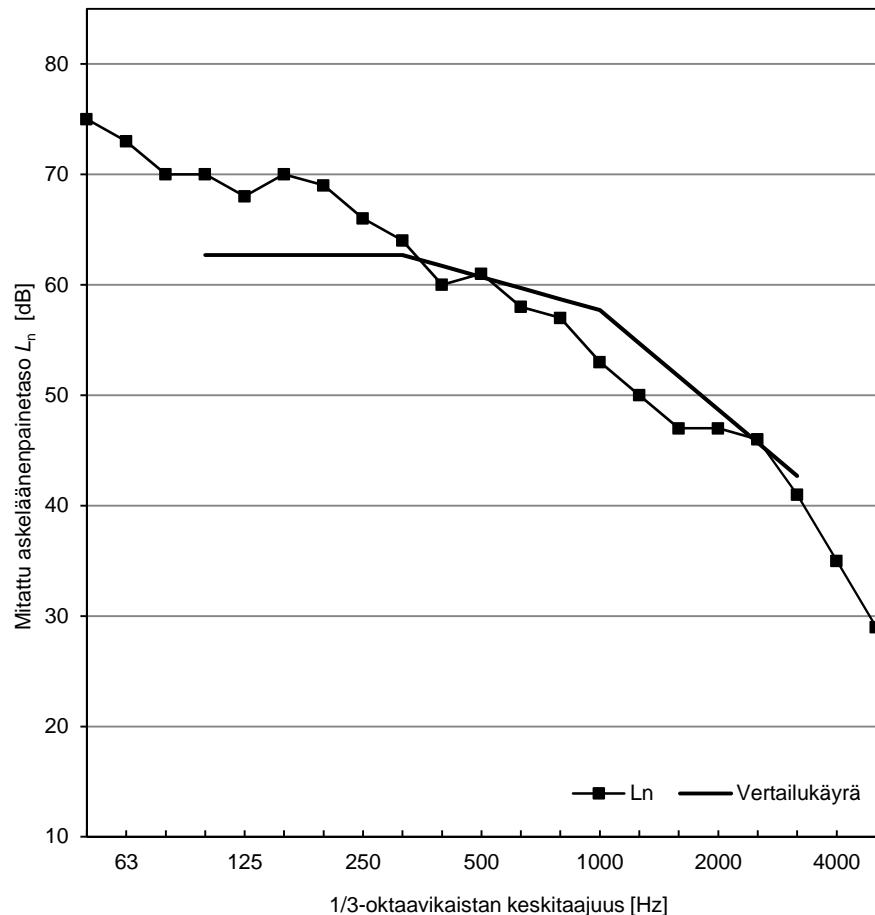
**Rakennekerrokset:**

	$m'$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$d'$ [mm]
OBS levy, k300/150 ruuvit	8,8	15
sahat.palkki (38x235)mm, k406		235
* pituus L=3925		
* 1 poikittaistuentalinja palkkikent. lasivilla (152mm)		
akustinen jousiranka, k610		13
*poikittain palkkeihin nähden		
2x kipsilevy (16mm)	21,3	32
*molemmissa k305 ruuvit		

**Kokonaiskorkeus [mm]**

295

$f$ [Hz]	$L_n$ [dB]
50	75
63	73
80	70
100	70
125	68
160	70
200	69
250	66
315	64
400	60
500	61
630	58
800	57
1000	53
1250	50
1600	47
2000	47
2500	46
3150	41
4000	35
5000	29



$S [m^2] = 15$

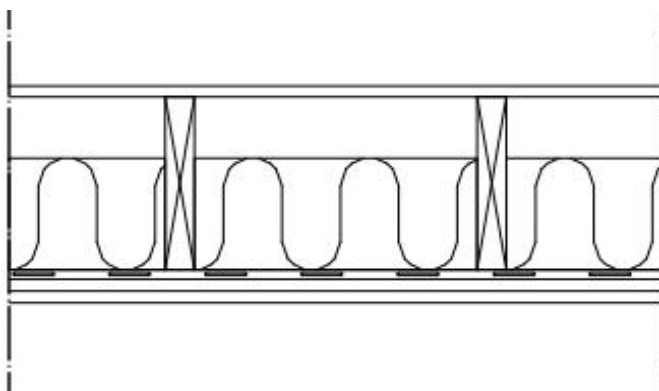
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

$L_{n,w} (C_1) = 61 (1) \text{ dB}$

$C_{1,50-2500} = 5 \text{ dB}$

$L_{n,w} + C_{1,50-2500} = 65 \text{ dB}$



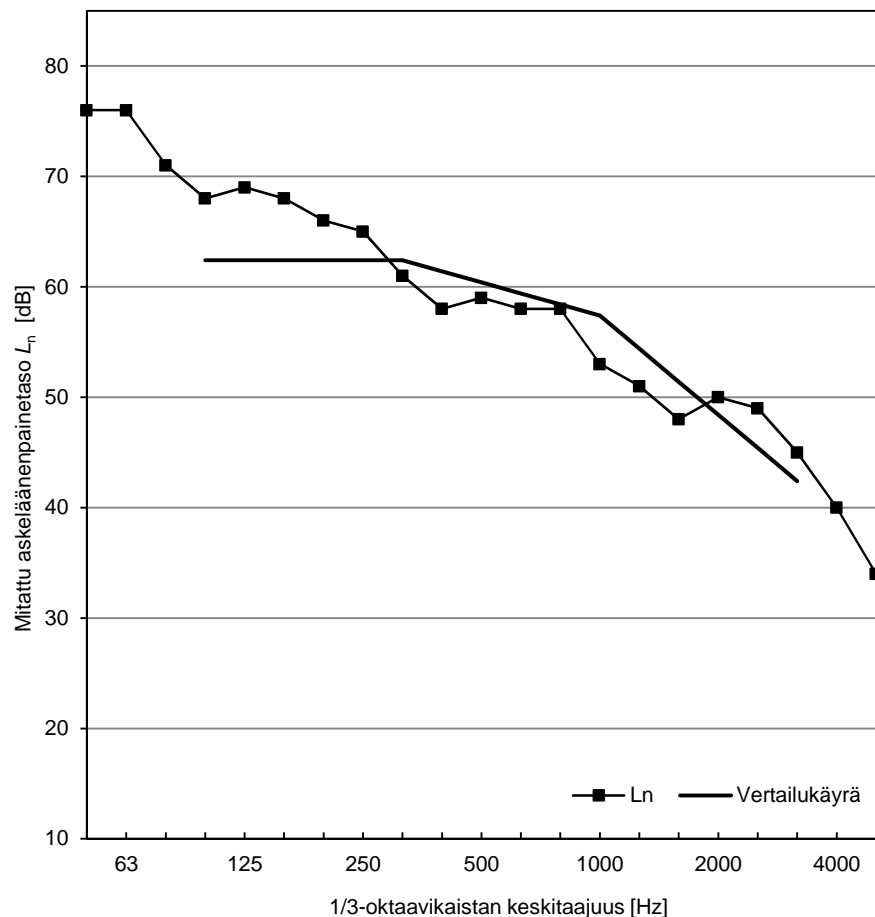
Rakennekerrokset:

	m'	d'
	[kg/m <sup>2</sup> ]	[mm]
vaneri, k300/150 ruuvit	7,1	15
sahat.palkki (38x235)mm, k406		235
* pituus L=3925		
* 1 poikittaistuentalinja palkkikent.		
lasivilla (152mm)		
akustinen jousiranka, k610		13
*poikittain palkkeihin nähden		
2x kipsilevy (16mm)	23,3	32
*molemmissa k305 ruuvit		

Kokonaiskorkeus [mm]

295

f [Hz]	L <sub>n</sub> [dB]
50	76
63	76
80	71
100	68
125	69
160	68
200	66
250	65
315	61
400	58
500	59
630	58
800	58
1000	53
1250	51
1600	48
2000	50
2500	49
3150	45
4000	40
5000	34



S [m<sup>2</sup>] = 15

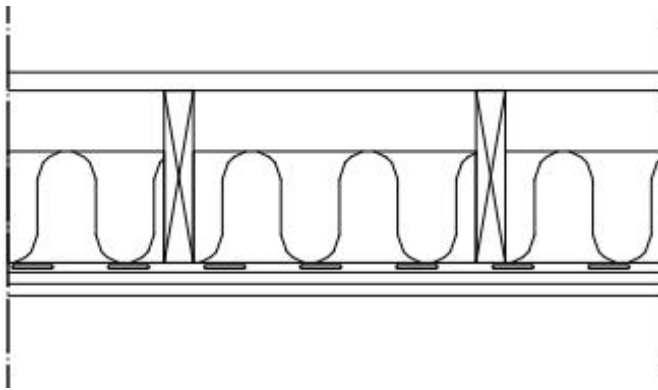
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

L<sub>n,w</sub> (C<sub>1</sub>) = 60 (0) dB

C<sub>1,50-2500</sub> = 6 dB

L<sub>n,w</sub> + C<sub>1,50-2500</sub> = 66 dB



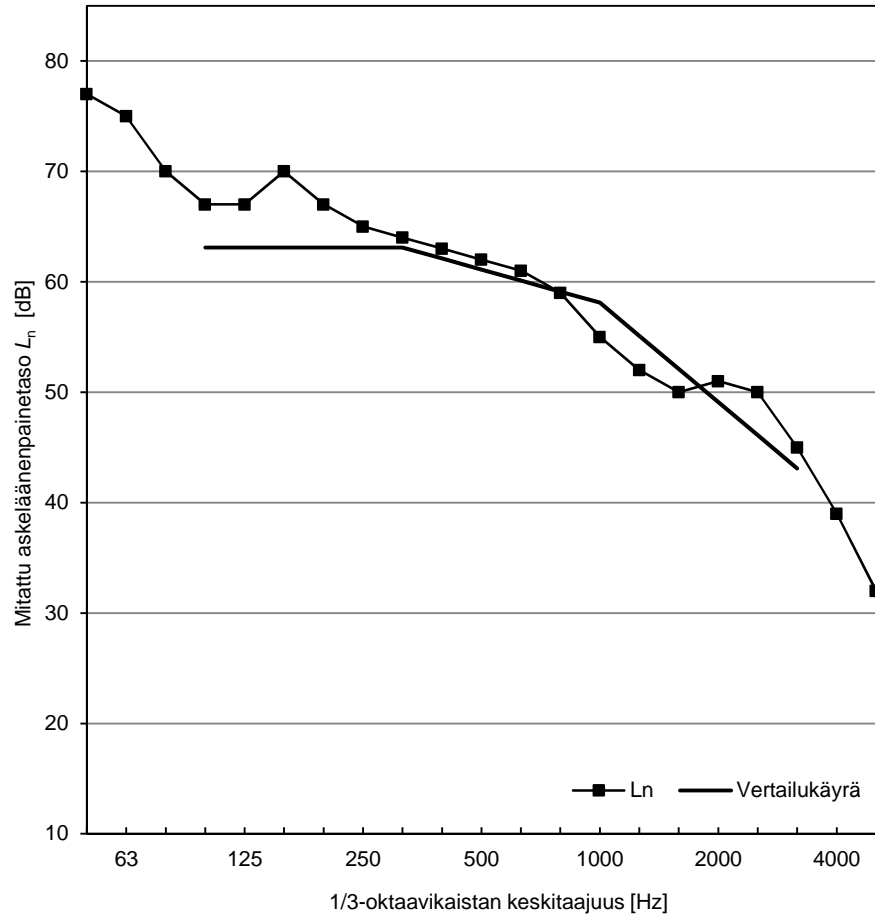
**Rakennekerrokset:**

	$m'$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$d'$ [mm]
OBS levy, k300/150 ruuvit	12,1	25
sahat.palkki (38x235)mm, k406		235
* pituus L=3925		
* 1 poikittaistuentalinja palkkikent.		
lasivilla (152mm)		
akustinen jousiranka, k610		13
*poikittain palkkeihin nähden		
2x kipsilevy (16mm)	22,7	32
*molemmissa k305 ruuvit		

**Kokonaiskorkeus [mm]**

**305**

$f$ [Hz]	$L_n$ [dB]
50	77
63	75
80	70
100	67
125	67
160	70
200	67
250	65
315	64
400	63
500	62
630	61
800	59
1000	55
1250	52
1600	50
2000	51
2500	50
3150	45
4000	39
5000	32



$S [m^2] = 15$

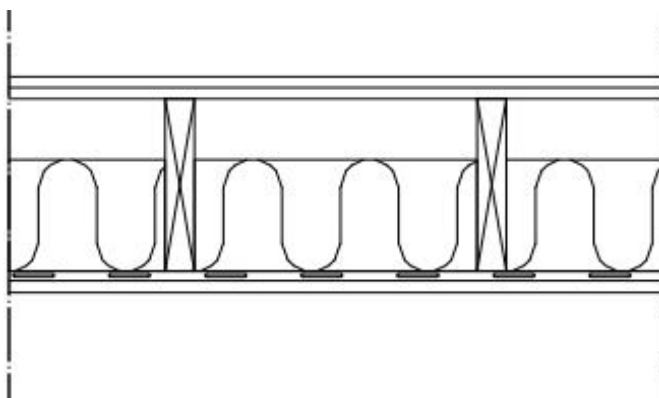
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

$L_{n,w} (C_1) = 61 (0) \text{ dB}$

$C_{1,50-2500} = 5 \text{ dB}$

$L_{n,w} + C_{1,50-2500} = 66 \text{ dB}$



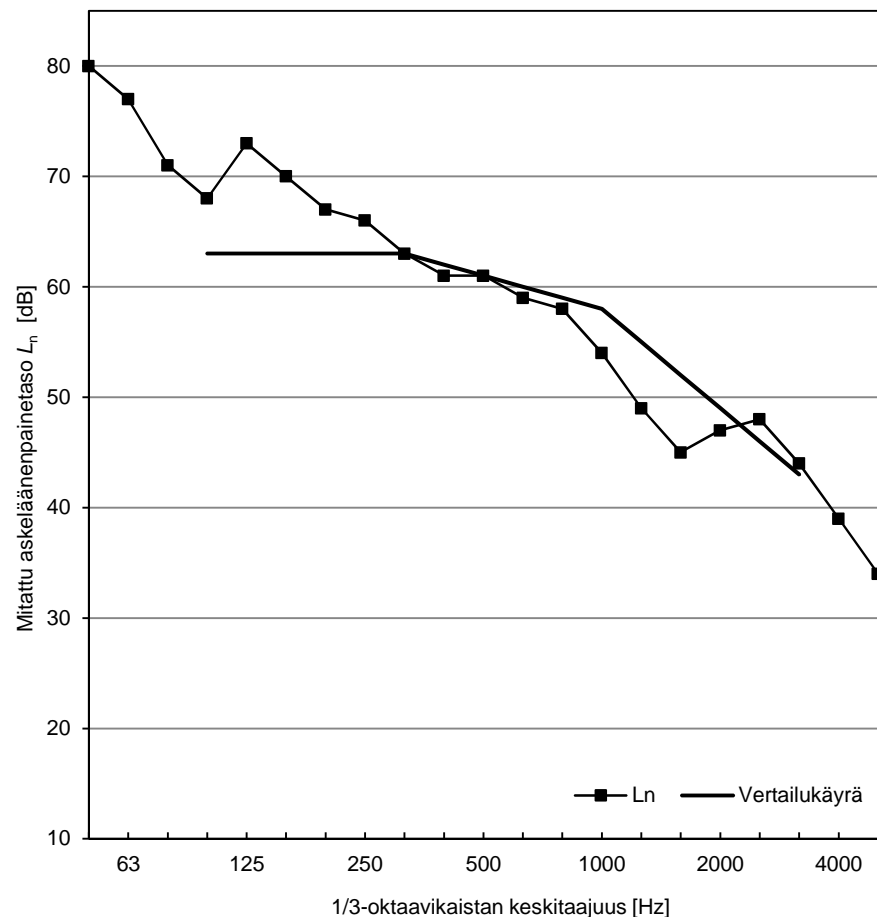
**Rakennekerrokset:**

	$m'$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$d'$ [mm]
2 x OBS levy (15mm), * k610/305 ruuvit	24,2	30
sahat.palkki (38x235)mm, k406 * pituus L=3925		235
* 1 poikittaistuentalinja palkkikent. lasivilla (152mm)		
akustinen jousiranka, k610 *poikittain palkkeihin nähden		13
kipsilevy, k305 ruuvit	11,6	16

**Kokonaiskorkeus [mm]**

294

$f$ [Hz]	$L_n$ [dB]
50	80
63	77
80	71
100	68
125	73
160	70
200	67
250	66
315	63
400	61
500	61
630	59
800	58
1000	54
1250	49
1600	45
2000	47
2500	48
3150	44
4000	39
5000	34



$S [m^2] = 15$

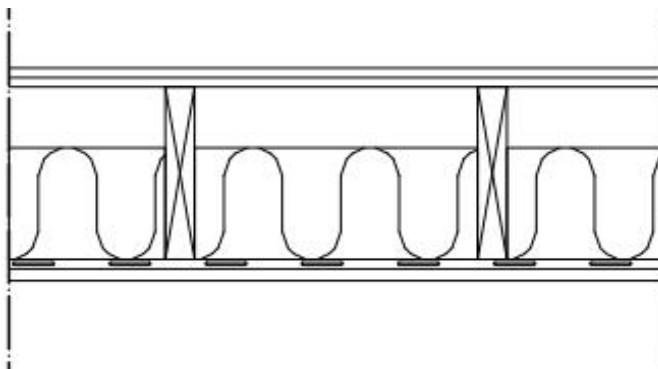
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

$L_{n,w} (C_1) = 61 (1) \text{ dB}$

$C_{1,50-2500} = 7 \text{ dB}$

$L_{n,w} + C_{1,50-2500} = 68 \text{ dB}$



Rakennekerrokset:

2 x vaneri (13mm),  
\*ala k610/305 ja ylä 305/150 ruuvit  
sahat.palkki (38x235)mm, k406  
\* pituus L=3925  
\* 1 poikittaistuentalinja palkkikent.  
lasivilla (152mm)  
akustinen jousiranka, k610  
\*poikittain palkkeihin nähden  
kipsilevy, k305 ruuvit

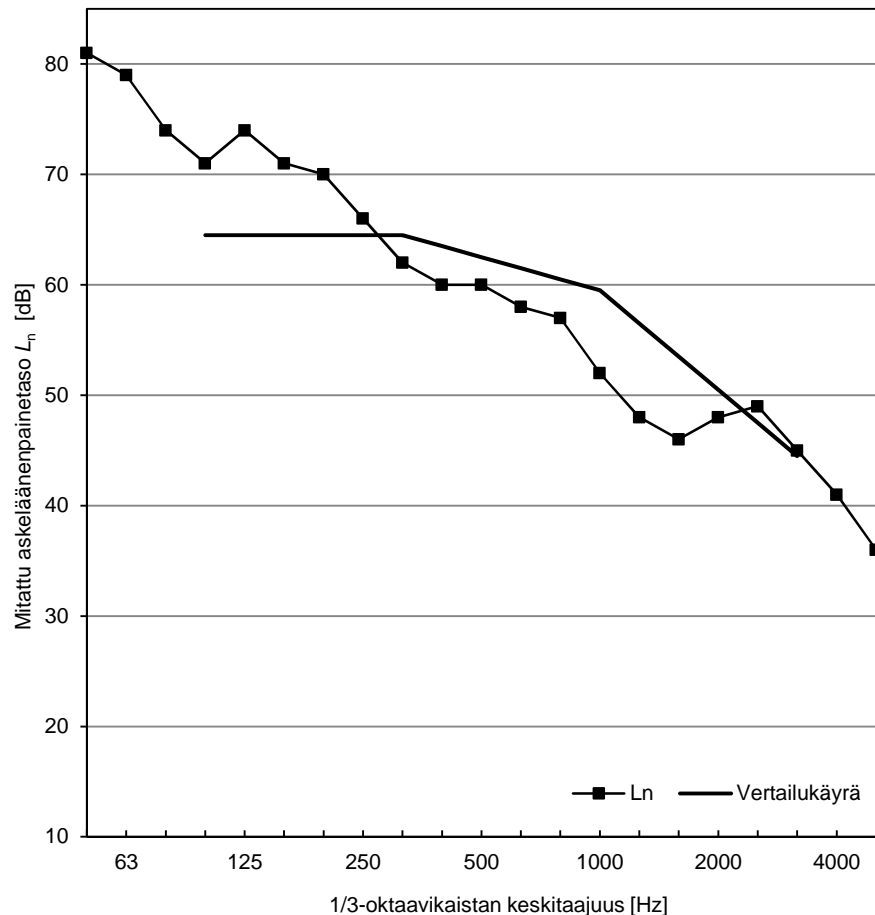
m' d'  
[kg/m<sup>2</sup>] [mm]

11,4	26
	235
	13
11,6	16

Kokonaiskorkeus [mm]

290

f [Hz]	L <sub>n</sub> [dB]
50	81
63	79
80	74
100	71
125	74
160	71
200	70
250	66
315	62
400	60
500	60
630	58
800	57
1000	52
1250	48
1600	46
2000	48
2500	49
3150	45
4000	41
5000	36



S [m<sup>2</sup>] = 15

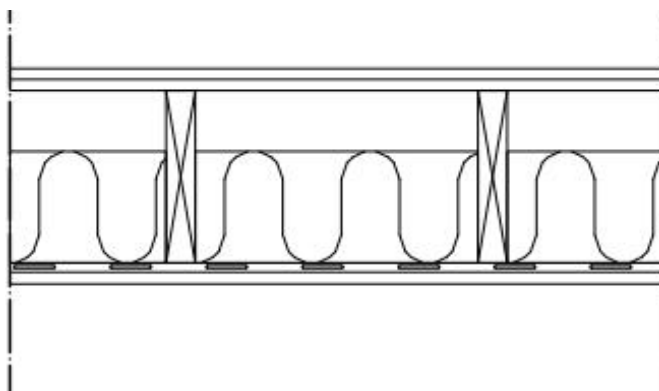
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

L<sub>n,w</sub> (C<sub>1</sub>) = 63 (1) dB

C<sub>1,50-2500</sub> = 7 dB

L<sub>n,w</sub> + C<sub>1,50-2500</sub> = 70 dB



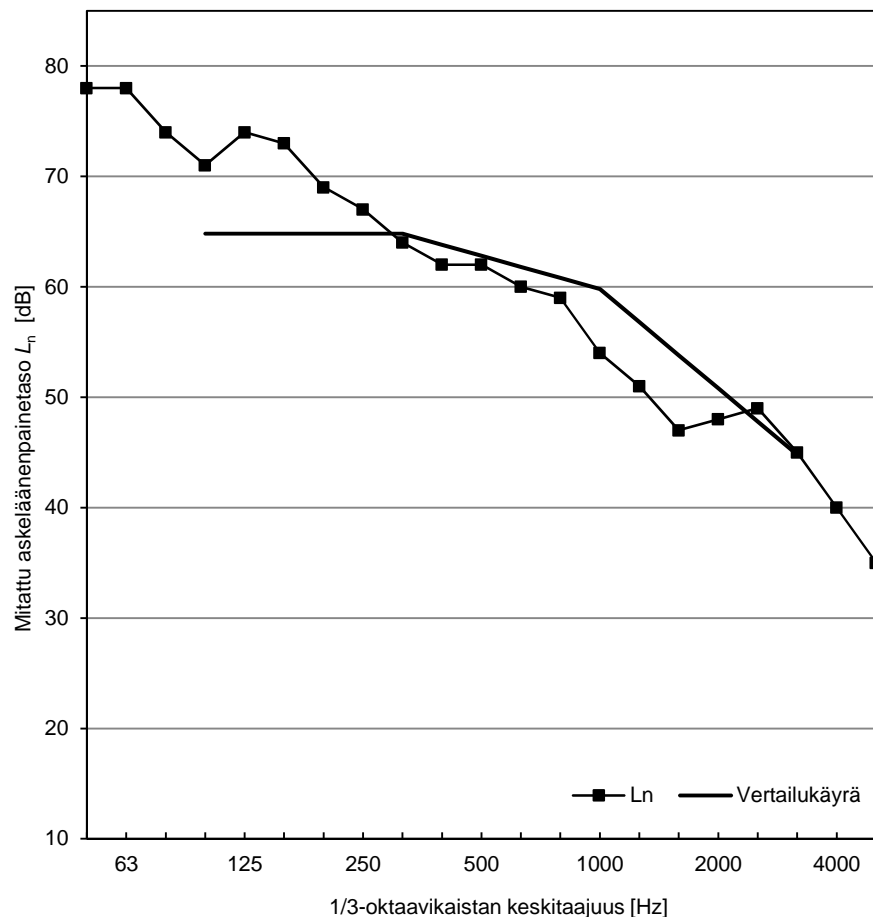
Rakennekerrokset:

	m'	d'
	[kg/m <sup>2</sup> ]	[mm]
2 x vaneri (15mm), *ala k610/305 ja ylä 305/150 ruuvit	14,2	30
sahat.palkki (38x235)mm, k406 * pituus L=3925 * 1 poikittaistuentalinja palkkikent. lasivilla (152mm)		235
akustinen jousiranka, k610 *poikittain palkkeihin nähden		13
kipsilevy, k305 ruuvit	11,6	16

Kokonaiskorkeus [mm]

294

f [Hz]	L <sub>n</sub> [dB]
50	78
63	78
80	74
100	71
125	74
160	73
200	69
250	67
315	64
400	62
500	62
630	60
800	59
1000	54
1250	51
1600	47
2000	48
2500	49
3150	45
4000	40
5000	35



S [m<sup>2</sup>] = 15

Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

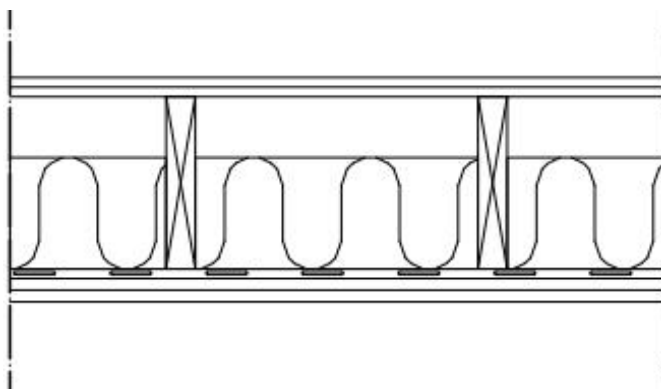
Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

L<sub>n,w</sub> (C<sub>1</sub>) = 63 (1) dB

C<sub>1,50-2500</sub> = 6 dB

L<sub>n,w</sub> + C<sub>1,50-2500</sub> = 69 dB





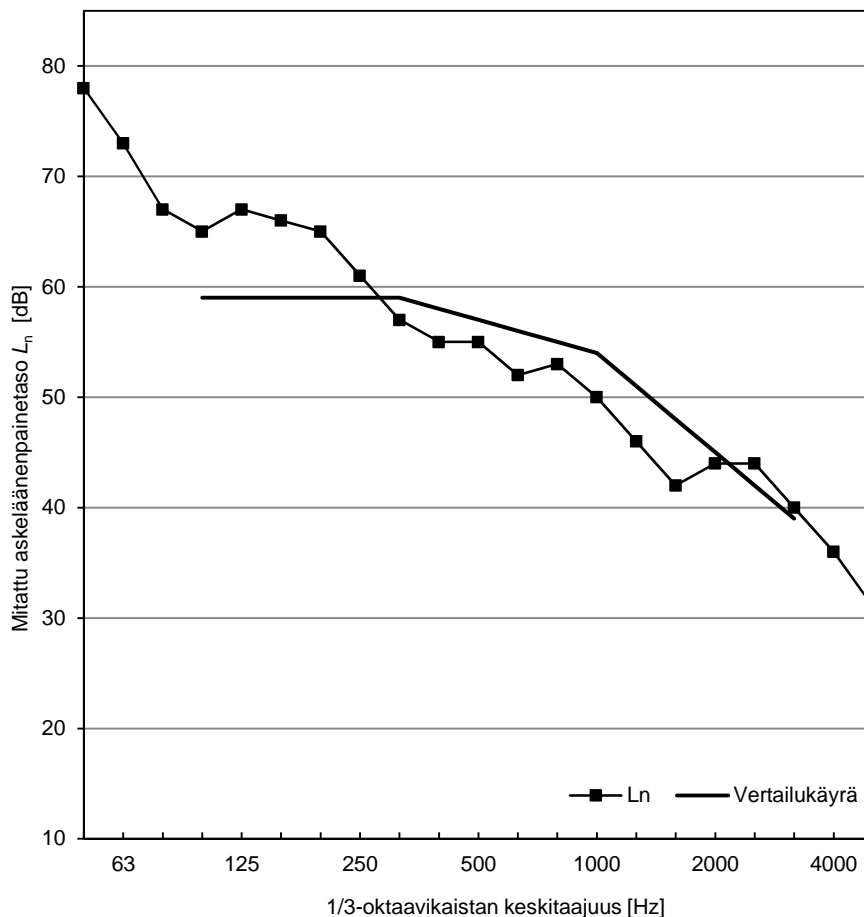
**Rakennekerrokset:**

	$m'$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$d'$ [mm]
2 x vaneri (13mm), *ala k610/305 ja ylä 305/150 ruuvit	11,4	26
sahat.palkki (38x235)mm, k406 * pituus L=3925		235
* 1 poikittaistuentalinja palkkikent. lasivilla (152mm)		
akustinen jousiranka, k610 *poikittain palkkeihin nähden		13
2 x kipsilevy (16mm) * ala k610, ylä k305 ruuvit	12,7*	32

**Kokonaiskorkeus [mm]**

306

$f$ [Hz]	$L_n$ [dB]
50	78
63	73
80	67
100	65
125	67
160	66
200	65
250	61
315	57
400	55
500	55
630	52
800	53
1000	50
1250	46
1600	42
2000	44
2500	44
3150	40
4000	36
5000	31



$S [m^2] = 15$

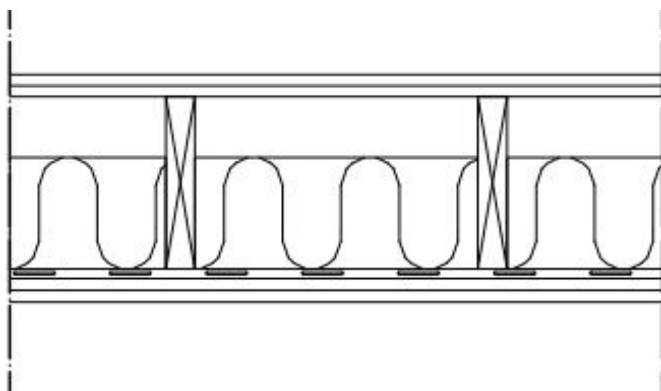
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

$L_{n,w} (C_1) = 57 (1) \text{ dB}$

$C_{1,50-2500} = 8 \text{ dB}$

$L_{n,w} + C_{1,50-2500} = 65 \text{ dB}$



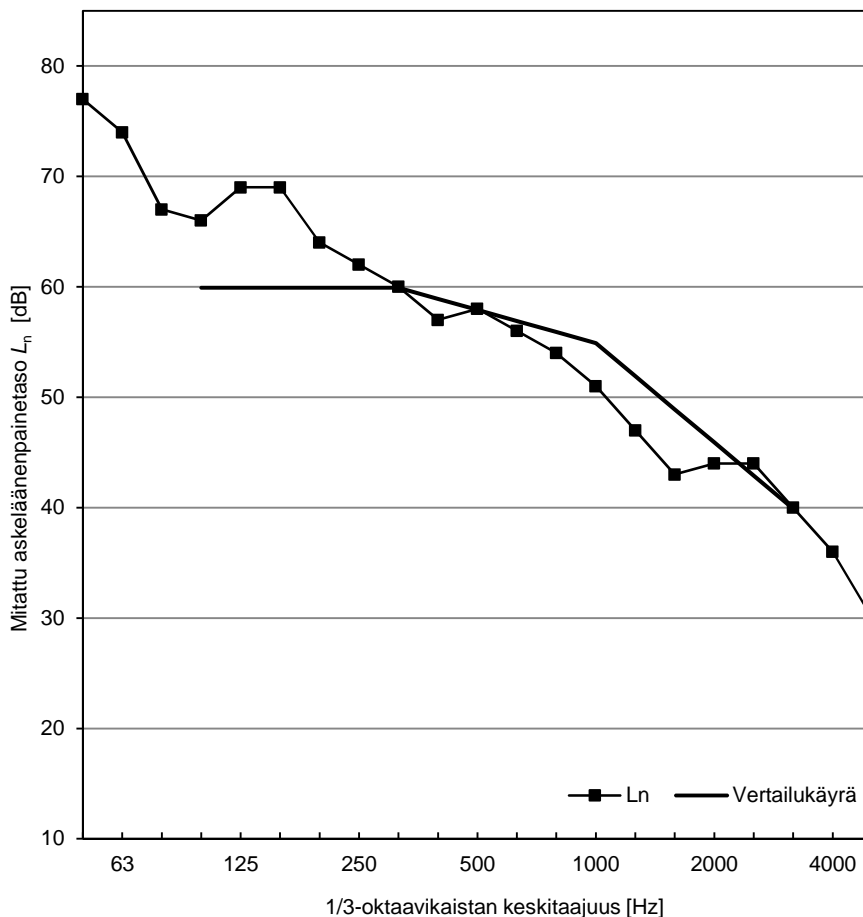
**Rakennekerrokset:**

	$m'$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$d'$ [mm]
2 x vaneri (15mm), *ala k610/305 ja ylä 305/150 ruuvit	11,4	26
sahat.palkki (38x235)mm, k406 * pituus L=3925		235
* 1 poikittaistuentalinja palkkikent. lasivilla (152mm)		
akustinen jousiranka, k610 *poikittain palkkeihin nähden		13
2 x kipsilevy (16mm) * ala k610, ylä k305 ruuvit	23,3	32

**Kokonaiskorkeus [mm]**

306

$f$ [Hz]	$L_n$ [dB]
50	77
63	74
80	67
100	66
125	69
160	69
200	64
250	62
315	60
400	57
500	58
630	56
800	54
1000	51
1250	47
1600	43
2000	44
2500	44
3150	40
4000	36
5000	30



$S [m^2] = 15$

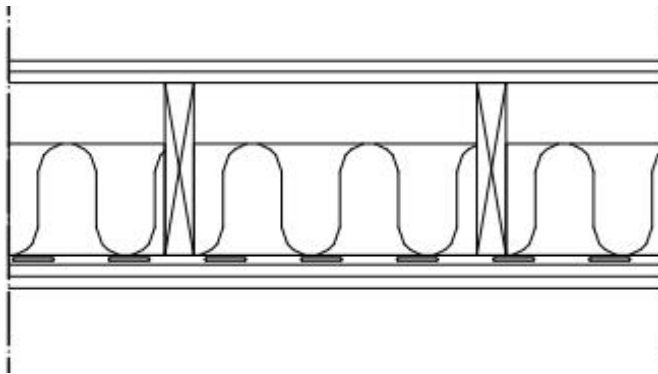
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

$L_{n,w}(C_1) = 58 (1) \text{ dB}$

$C_{1,50-2500} = 7 \text{ dB}$

$L_{n,w} + C_{1,50-2500} = 65 \text{ dB}$



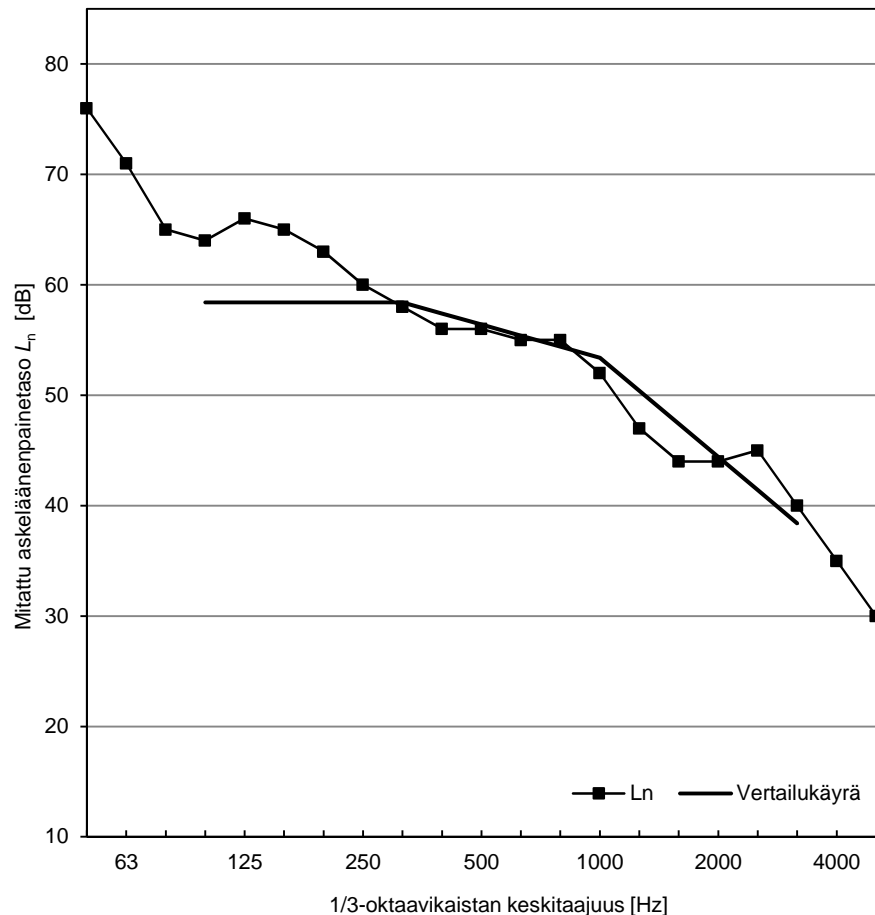
**Rakennekerrokset:**

	$m'$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$d'$ [mm]
2 x OBS levy (15mm), *ala k610/305 ja ylä 305/150 ruuvit	17,6	30
sahat.palkki (38x235)mm, k406 * pituus L=3925 * 1 poikittaistuentalinja palkkikent. lasivilla (152mm)		235
akustinen jousiranka, k610 *poikittain palkkeihin nähden		13
2 x kipsilevy (16mm) * ala k610, ylä k305 ruuvit	23,3	32

**Kokonaiskorkeus [mm]**

310

$f$ [Hz]	$L_n$ [dB]
50	76
63	71
80	65
100	64
125	66
160	65
200	63
250	60
315	58
400	56
500	56
630	55
800	55
1000	52
1250	47
1600	44
2000	44
2500	45
3150	40
4000	35
5000	30



$S [m^2] = 15$

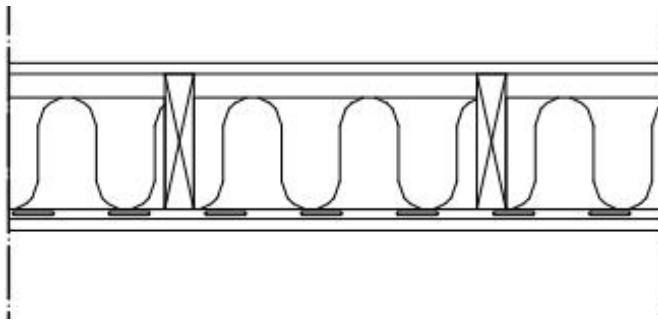
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

$L_{n,w} (C_1) = 56 (0) \text{ dB}$

$C_{1,50-2500} = 7 \text{ dB}$

$L_{n,w} + C_{1,50-2500} = 63 \text{ dB}$



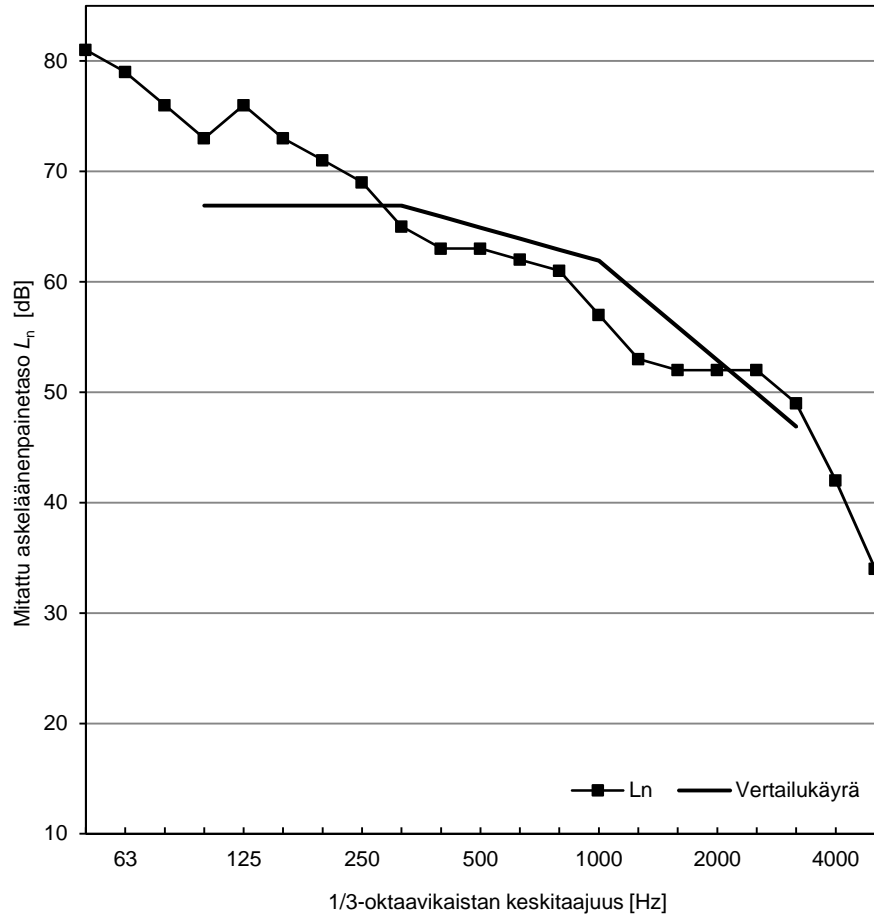
**Rakennekerrokset:**

	$m'$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$d'$ [mm]
OBS levy, k305/150	8,8	15
sahat.palkki (38x184)mm, k406		184
* pituus L=3925		
* 1 poikittaistuentalinja palkkikent.		
lasivilla (152mm)		
akustinen jousiranka, k610		13
*poikittain palkkeihin nähden		
kipsilevy, k305 ruuvit	11,4	16

**Kokonaiskorkeus [mm]**

228

$f$ [Hz]	$L_n$ [dB]
50	81
63	79
80	76
100	73
125	76
160	73
200	71
250	69
315	65
400	63
500	63
630	62
800	61
1000	57
1250	53
1600	52
2000	52
2500	52
3150	49
4000	42
5000	34



$S [m^2] = 15$

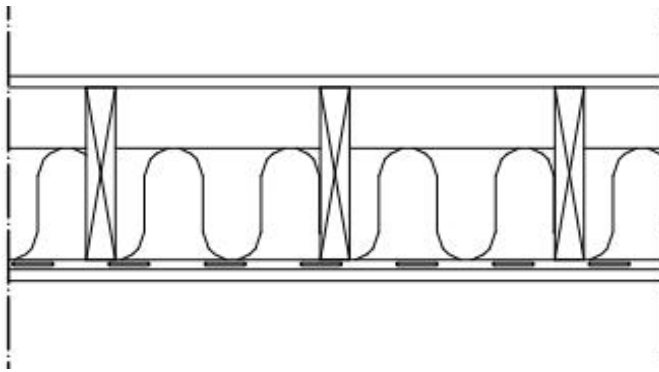
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

$L_{n,w} (C_1) = 65 (1) \text{ dB}$

$C_{1,50-2500} = 6 \text{ dB}$

$L_{n,w} + C_{1,50-2500} = 71 \text{ dB}$



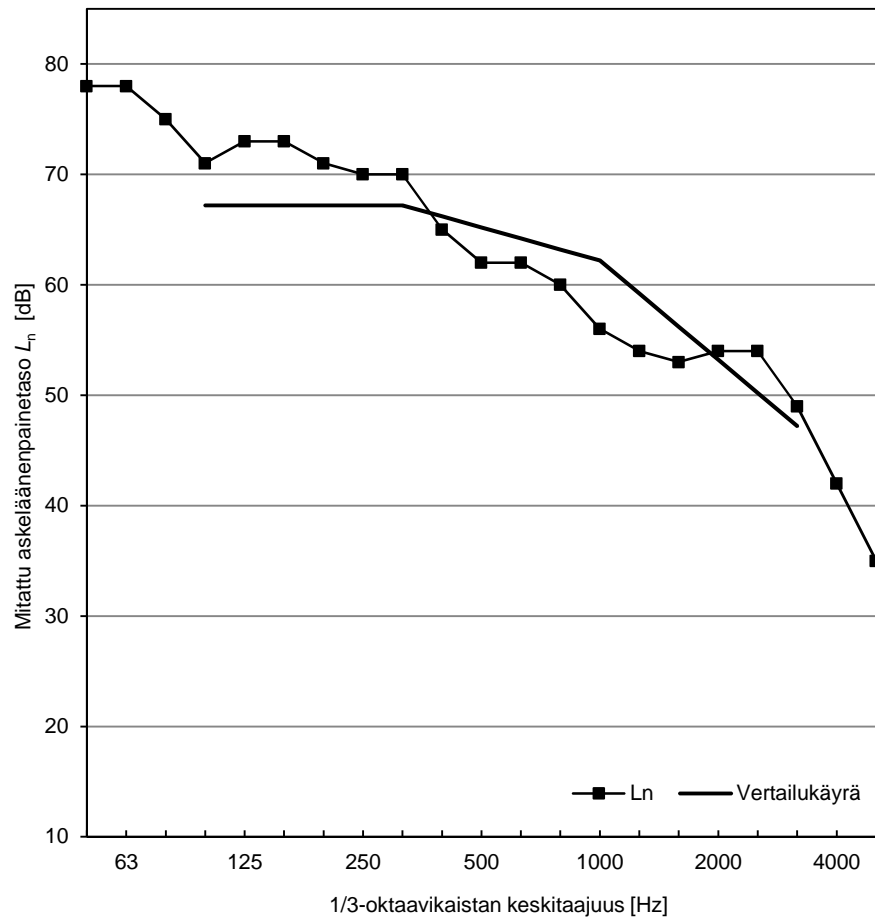
**Rakennekerrokset:**

	$m'$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$d'$ [mm]
OBS levy, k305/150	8,8	15
sahat.palkki (38x235)mm, k305		235
* pituus L=3925		
* 1 poikittaistuentaalinja palkkikent.		
lasivilla (152mm)		
akustinen jousiranka, k610		13
*poikittain palkkeihin nähden		
kipsilevy, k305 ruuvit	11,2	16

**Kokonaiskorkeus [mm]**

279

$f$ [Hz]	$L_n$ [dB]
50	78
63	78
80	75
100	71
125	73
160	73
200	71
250	70
315	70
400	65
500	62
630	62
800	60
1000	56
1250	54
1600	53
2000	54
2500	54
3150	49
4000	42
5000	35



$S [m^2] = 15$

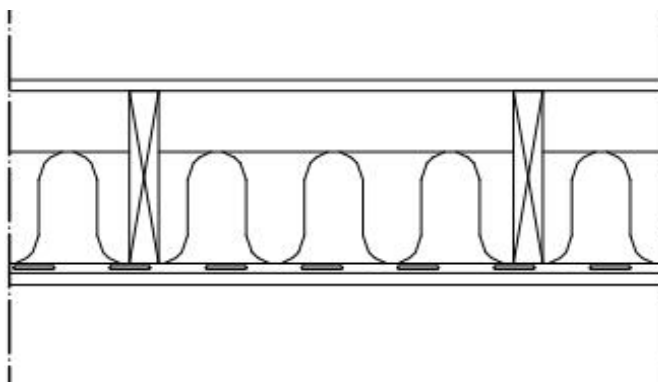
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

$L_{n,w} (C_1) = 65 (0) \text{ dB}$

$C_{1,50-2500} = 4 \text{ dB}$

$L_{n,w} + C_{1,50-2500} = 69 \text{ dB}$



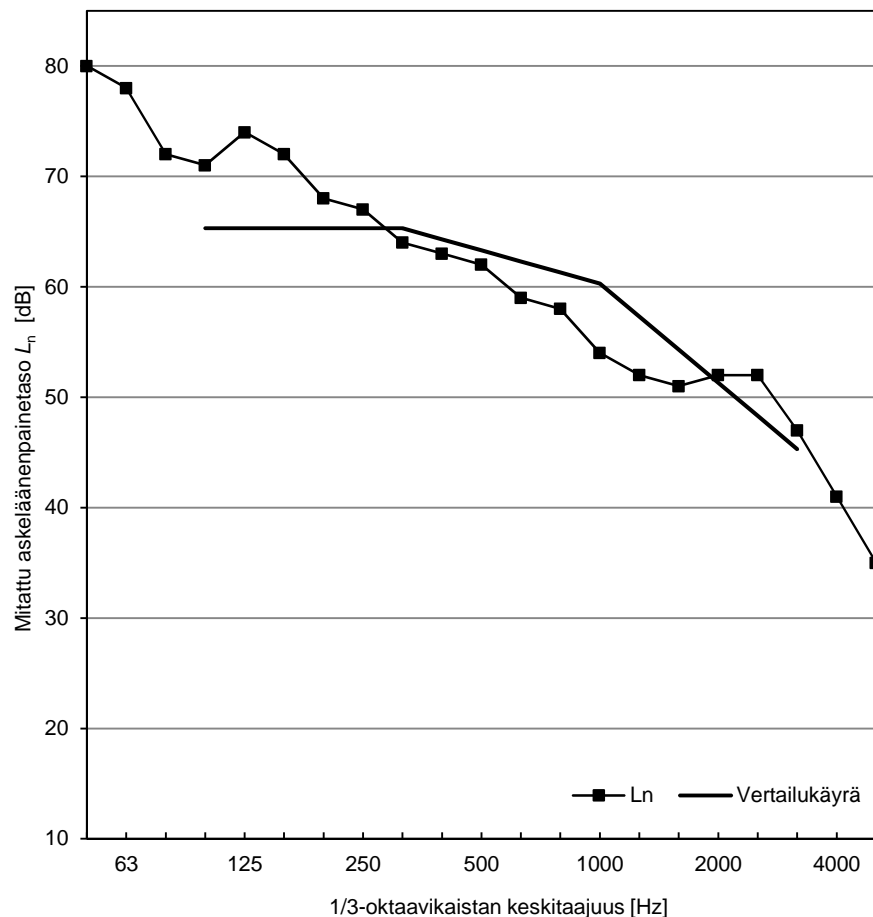
**Rakennekerrokset:**

	$m'$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$d'$ [mm]
OBS levy, k305/150	8,8	15
sahat.palkki (38x235)mm, k500		235
* pituus L=3925		
* 1 poikittaistuentalinja palkkikent.		
lasivilla (152mm)		
akustinen jousiranka, k610		13
*poikittain palkkeihin nähden		
kipsilevy, k305 ruuvit	11,2	16

**Kokonaiskorkeus [mm]**

279

$f$ [Hz]	$L_n$ [dB]
50	80
63	78
80	72
100	71
125	74
160	72
200	68
250	67
315	64
400	63
500	62
630	59
800	58
1000	54
1250	52
1600	51
2000	52
2500	52
3150	47
4000	41
5000	35



$S [m^2] = 15$

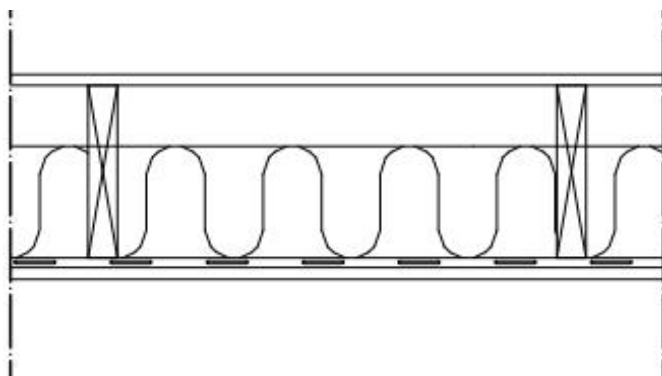
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

$L_{n,w} (C_1) = 63 (0) \text{ dB}$

$C_{1,50-2500} = 6 \text{ dB}$

$L_{n,w} + C_{1,50-2500} = 69 \text{ dB}$



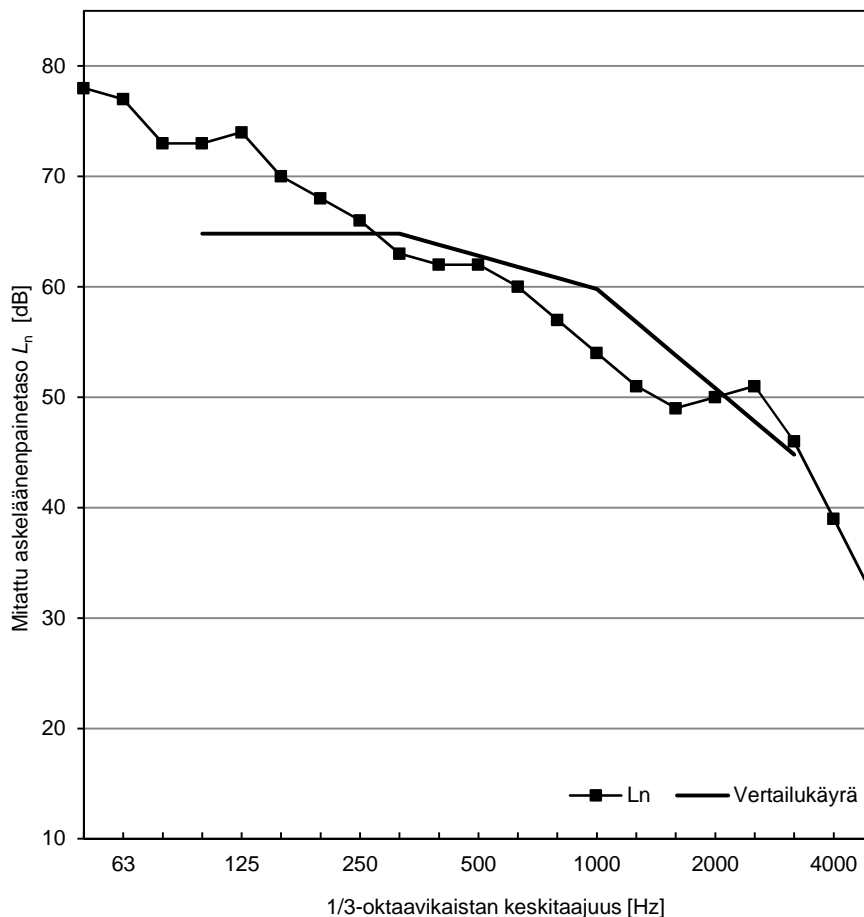
Rakennekerrokset:

	$m'$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$d'$ [mm]
OBS levy, k305/150	8,8	15
sahat.palkki (38x235)mm, k610		235
* pituus L=3925		
* 1 poikittaistuentalinja palkkikent.		
lasivilla (152mm)		
akustinen jousiranka, k610		13
*poikittain palkkeihin nähden		
kipsilevy, k305 ruuvit	11,2	16

Kokonaiskorkeus [mm]

279

$f$ [Hz]	$L_n$ [dB]
50	78
63	77
80	73
100	73
125	74
160	70
200	68
250	66
315	63
400	62
500	62
630	60
800	57
1000	54
1250	51
1600	49
2000	50
2500	51
3150	46
4000	39
5000	32



$S [m^2] = 15$

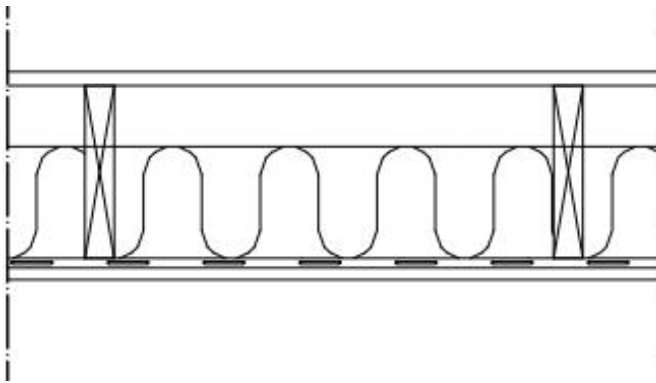
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Väliohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

$L_{n,w} (C_1) = 63 (1) \text{ dB}$

$C_{1,50-2500} = 5 \text{ dB}$

$L_{n,w} + C_{1,50-2500} = 68 \text{ dB}$



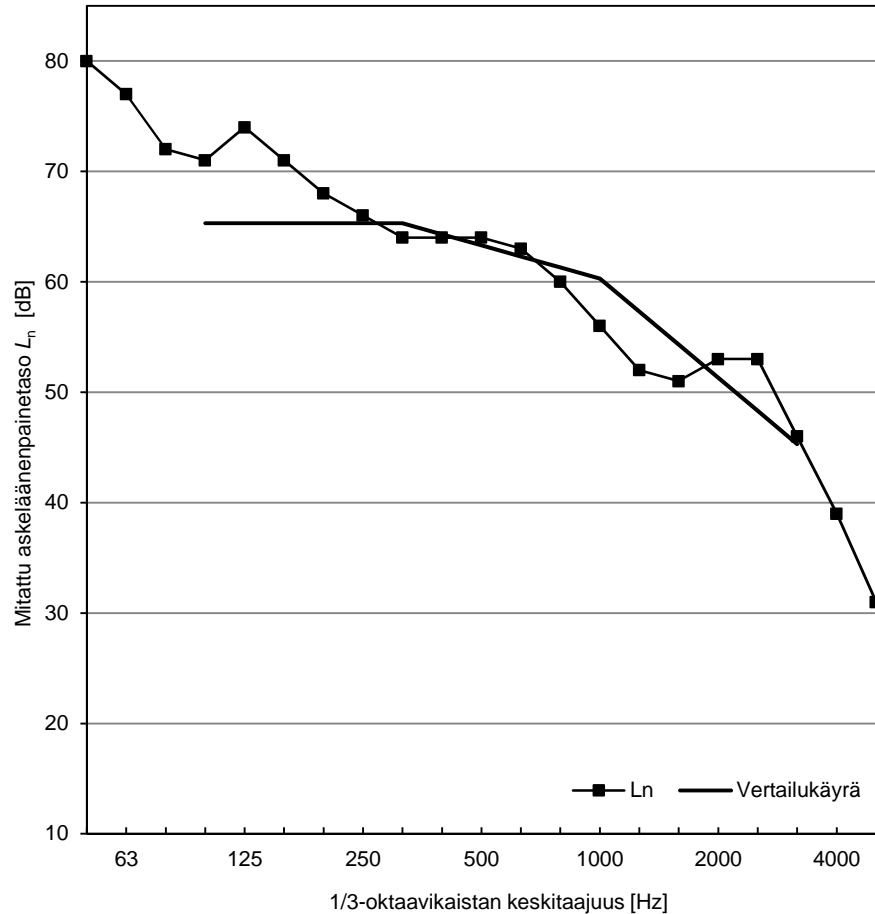
**Rakennekerrokset:**

	$m'$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$d'$ [mm]
OBS levy, k305/150	10,3	19
sahat.palkki (38x235)mm, k610		235
* pituus L=3925		
* 1 poikittaistuentalinja palkkikent.		
lasivilla (152mm)		
akustinen jousiranka, k610		13
*poikittain palkkeihin nähden		
kipsilevy, k305 ruuvit	11,2	16

**Kokonaiskorkeus [mm]**

283

$f$ [Hz]	$L_n$ [dB]
50	80
63	77
80	72
100	71
125	74
160	71
200	68
250	66
315	64
400	64
500	64
630	63
800	60
1000	56
1250	52
1600	51
2000	53
2500	53
3150	46
4000	39
5000	31



$S [m^2] = 15$

Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

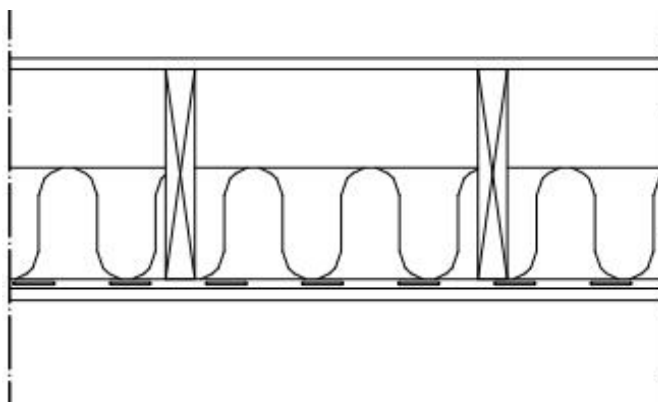
Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

$L_{n,w} (C_1) = 63 (0) \text{ dB}$

$C_{1,50-2500} = 5 \text{ dB}$

$L_{n,w} + C_{1,50-2500} = 69 \text{ dB}$





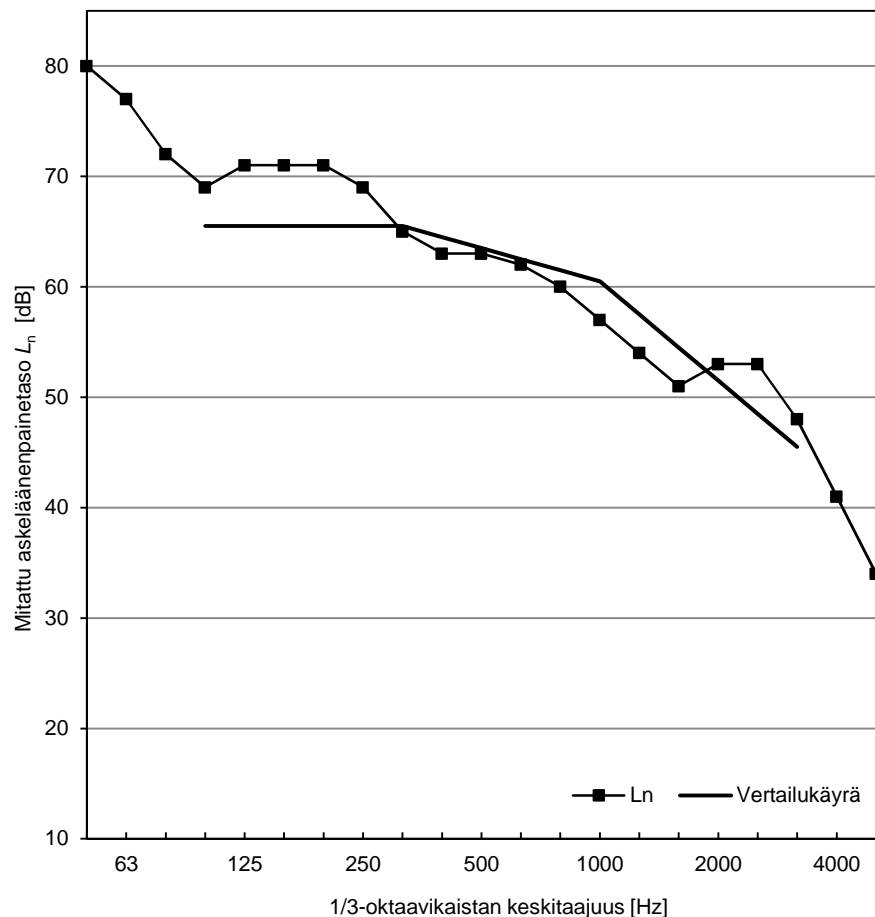
**Rakennekerrokset:**

	$m'$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$d'$ [mm]
OBS levy, k305/150	8,8	15
sahat.palkki (38x286)mm, k406		286
* pituus L=3925		
* 1 poikittaistuentalinja palkkikent. lasivilla (152mm)		
akustinen jousiranka, k610		13
*poikittain palkkeihin nähden		
kipsilevy, k305 ruuvit	11,3	16

**Kokonaiskorkeus [mm]**

330

$f$ [Hz]	$L_n$ [dB]
50	80
63	77
80	72
100	69
125	71
160	71
200	71
250	69
315	65
400	63
500	63
630	62
800	60
1000	57
1250	54
1600	51
2000	53
2500	53
3150	48
4000	41
5000	34



$S [m^2] = 15$

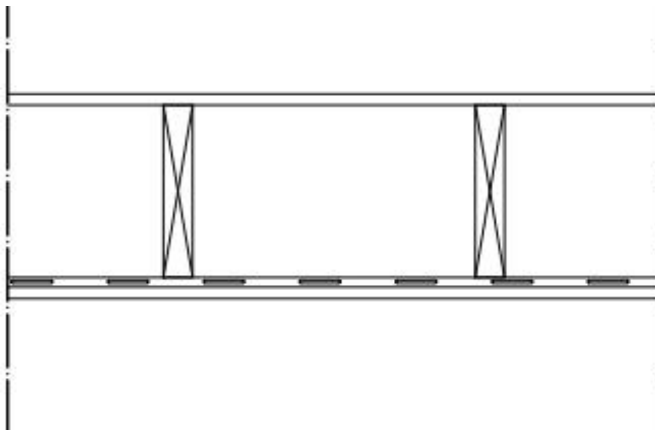
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

$L_{n,w} (C_1) = 64 (0) \text{ dB}$

$C_{1,50-2500} = 5 \text{ dB}$

$L_{n,w} + C_{1,50-2500} = 69 \text{ dB}$



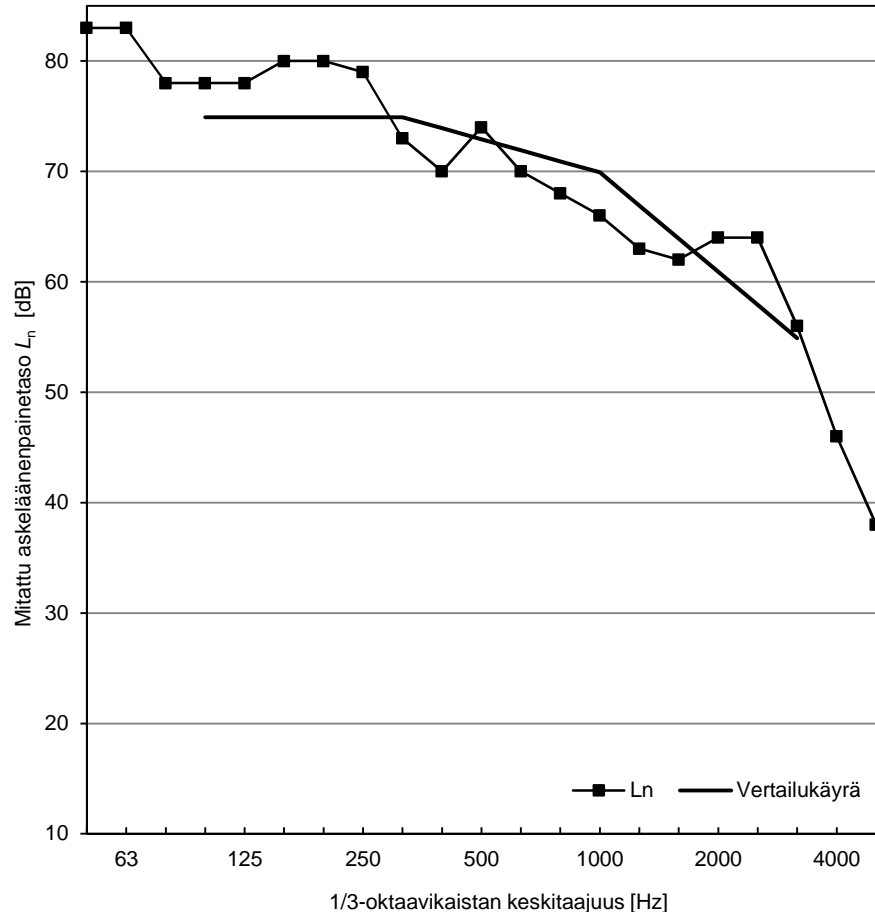
Rakennekerrokset:

	m'	d'
	[kg/m <sup>2</sup> ]	[mm]
OBS levy, k305/150	8,8	15
sahat.palkki (38x235)mm, k406		235
* pituus L=3925		
* 1 poikittaistuenta linja palkkikent.		
akustinen jousiranka, k610		13
*poikittain palkkeihin nähden		
kipsilevy, k305 ruuvit	11,2	16

Kokonaiskorkeus [mm]

279

f [Hz]	L <sub>n</sub> [dB]
50	83
63	83
80	78
100	78
125	78
160	80
200	80
250	79
315	73
400	70
500	74
630	70
800	68
1000	66
1250	63
1600	62
2000	64
2500	64
3150	56
4000	46
5000	38



S [m<sup>2</sup>] = 15

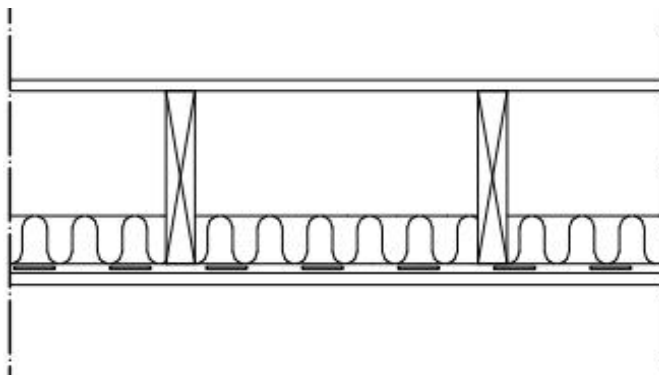
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

L<sub>n,w</sub> (C<sub>1</sub>) = 73 (-1) dB

C<sub>1,50-2500</sub> = 2 dB

L<sub>n,w</sub> + C<sub>1,50-2500</sub> = 75 dB



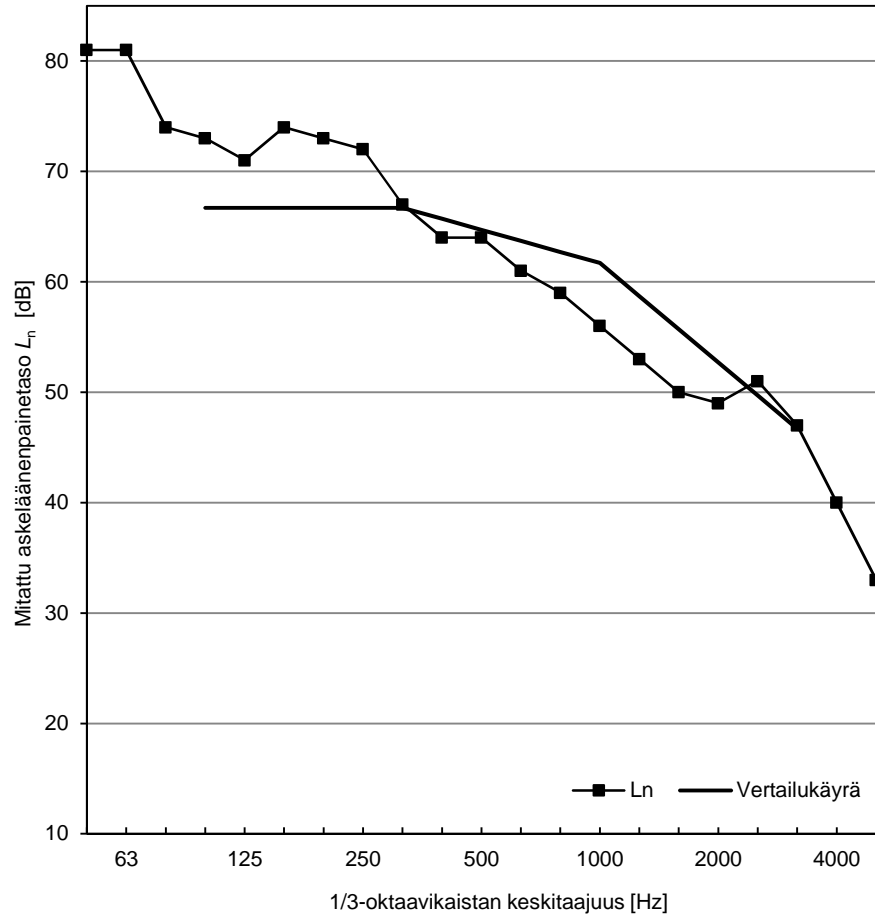
**Rakennekerrokset:**

	$m'$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$d'$ [mm]
OBS levy, k305/150	8,8	15
sahat.palkki (38x235)mm, k406		235
* pituus L=3925		
* 1 poikittaistuentalinja palkkikent.		
lasivilla (65mm)		
akustinen jousiranka, k610		13
*poikittain palkkeihin nähden		
kipsilevy, k305 ruuvit	11,0	16

**Kokonaiskorkeus [mm]**

279

$f$ [Hz]	$L_n$ [dB]
50	81
63	81
80	74
100	73
125	71
160	74
200	73
250	72
315	67
400	64
500	64
630	61
800	59
1000	56
1250	53
1600	50
2000	49
2500	51
3150	47
4000	40
5000	33



$S [m^2] = 15$

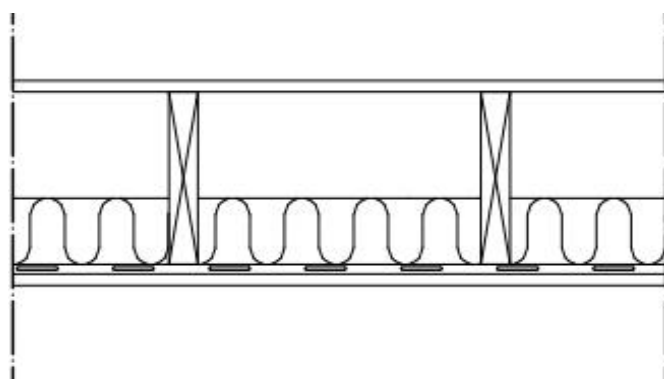
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

$L_{n,w} (C_1) = 65 (1) \text{ dB}$

$C_{1,50-2500} = 6 \text{ dB}$

$L_{n,w} + C_{1,50-2500} = 71 \text{ dB}$



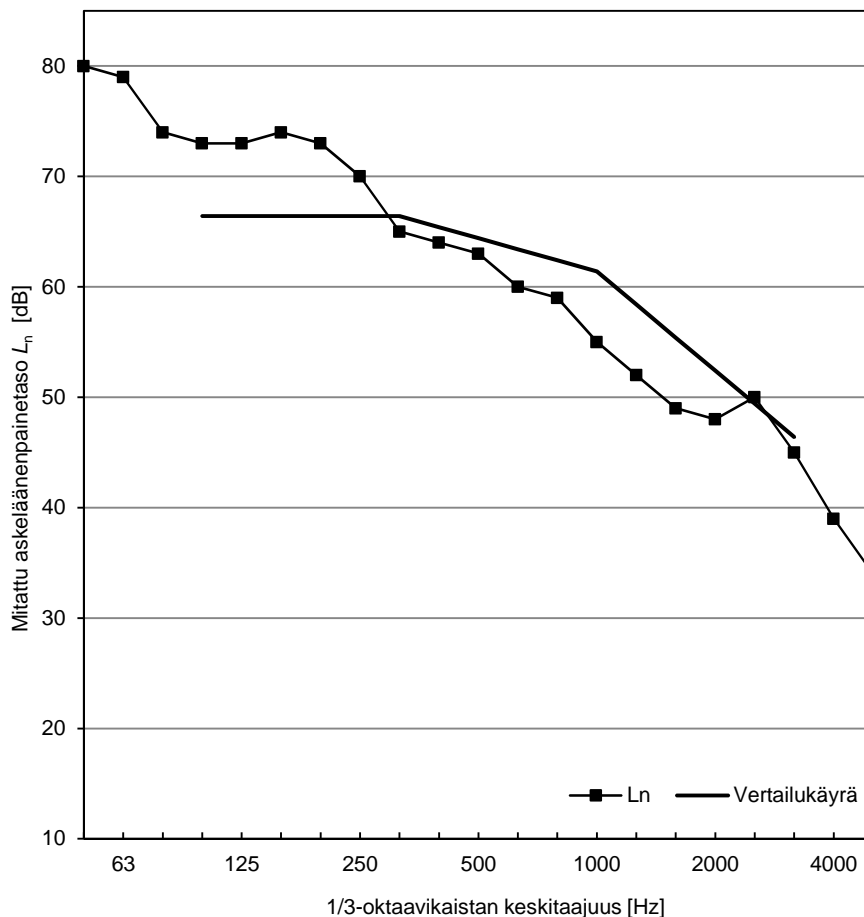
Rakennekerrokset:

	m'	d'
	[kg/m <sup>2</sup> ]	[mm]
OBS levy, k305/150	8,8	15
sahat.palkki (38x235)mm, k406		235
* pituus L=3925		
* 1 poikittaistuentaalinja palkkikent.		
lasivilla (90mm)		
akustinen jousiranka, k610		13
*poikittain palkkeihin nähden		
kipsilevy, k305 ruuvit	11,0	16

Kokonaiskorkeus [mm]

279

f [Hz]	L <sub>n</sub> [dB]
50	80
63	79
80	74
100	73
125	73
160	74
200	73
250	70
315	65
400	64
500	63
630	60
800	59
1000	55
1250	52
1600	49
2000	48
2500	50
3150	45
4000	39
5000	34



S [m<sup>2</sup>] = 15

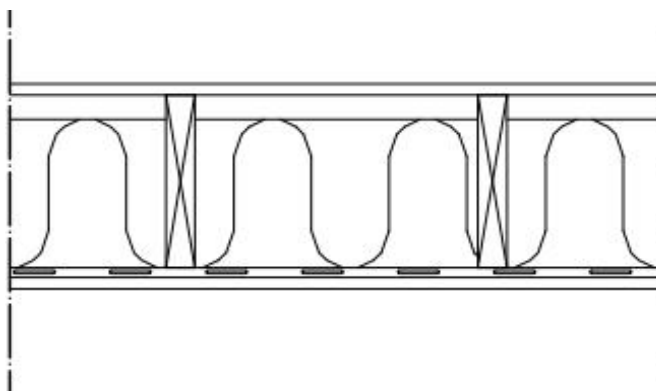
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

L<sub>n,w</sub> (C<sub>1</sub>) = 64 (1) dB

C<sub>1,50-2500</sub> = 6 dB

L<sub>n,w</sub> + C<sub>1,50-2500</sub> = 70 dB



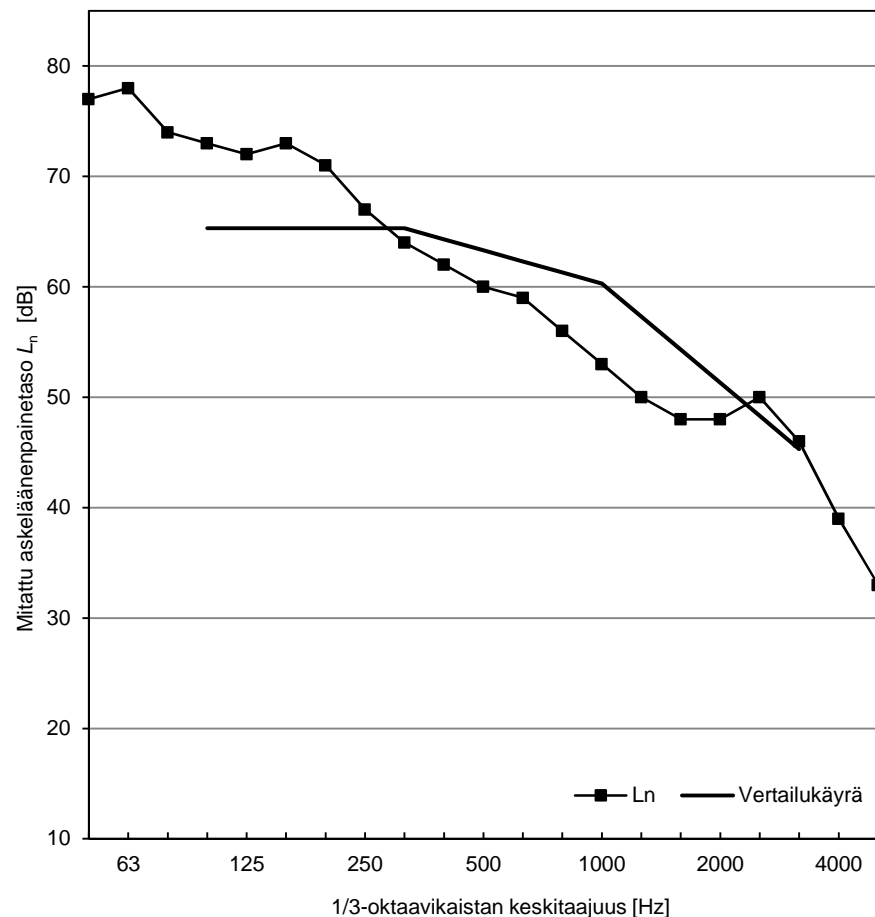
Rakennekerrokset:

	m'	d'
	[kg/m <sup>2</sup> ]	[mm]
OBS levy, k305/150	8,8	15
sahat.palkki (38x235)mm, k406		235
* pituus L=3925		
* 1 poikittaistuentalinja palkkikent.		
lasivilla (202mm)		
akustinen jousiranka, k610		13
*poikittain palkkeihin nähden		
kipsilevy, k305 ruuvit	11,0	16

Kokonaiskorkeus [mm]

279

f [Hz]	L <sub>n</sub> [dB]
50	77
63	78
80	74
100	73
125	72
160	73
200	71
250	67
315	64
400	62
500	60
630	59
800	56
1000	53
1250	50
1600	48
2000	48
2500	50
3150	46
4000	39
5000	33



S [m<sup>2</sup>] = 15

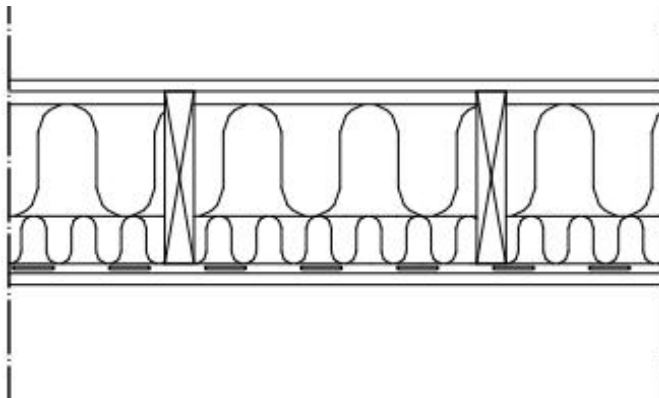
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

L<sub>n,w</sub> (C<sub>1</sub>) = 63 (1) dB

C<sub>1,50-2500</sub> = 5 dB

L<sub>n,w</sub> + C<sub>1,50-2500</sub> = 68 dB



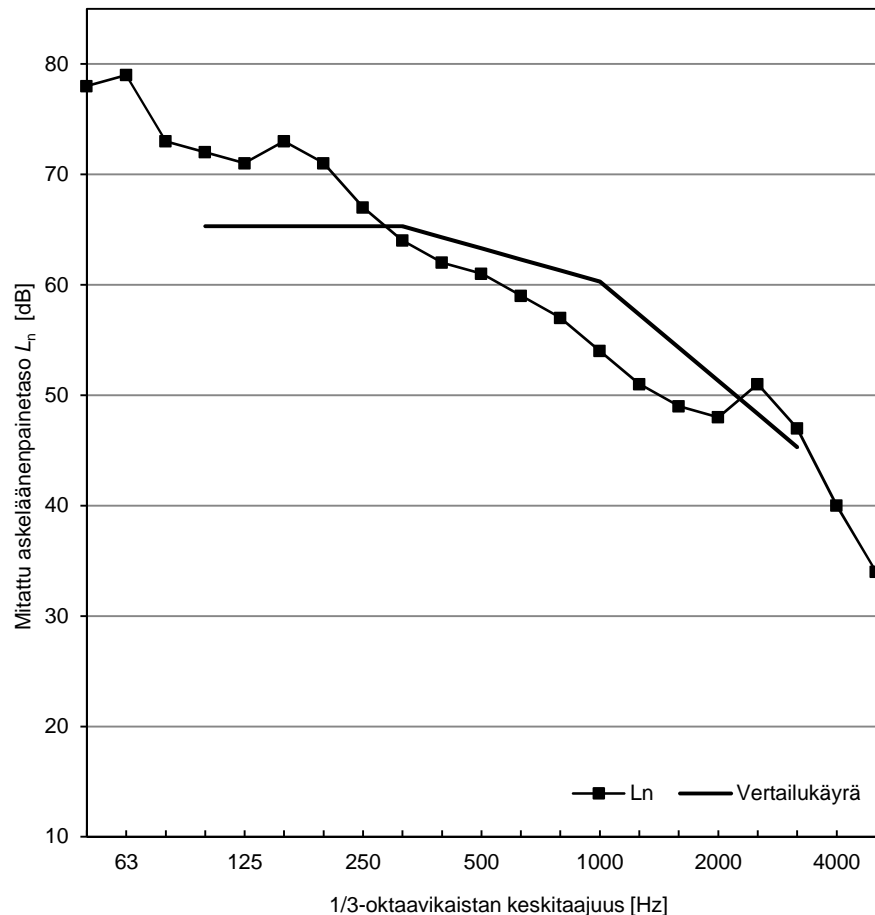
**Rakennekerrokset:**

	$m'$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$d'$ [mm]
OBS levy, k305/150	8,8	15
sahat.palkki (38x235)mm, k406		235
* pituus L=3925		
* 1 poikittaistuentalinja palkkikent.		
lasivilla (65+152mm)		
akustinen jousiranka, k610		13
*poikittain palkkeihin nähden		
kipsilevy, k305 ruuvit	11,0	16

**Kokonaiskorkeus [mm]**

279

$f$ [Hz]	$L_n$ [dB]
50	78
63	79
80	73
100	72
125	71
160	73
200	71
250	67
315	64
400	62
500	61
630	59
800	57
1000	54
1250	51
1600	49
2000	48
2500	51
3150	47
4000	40
5000	34



$S [m^2] = 15$

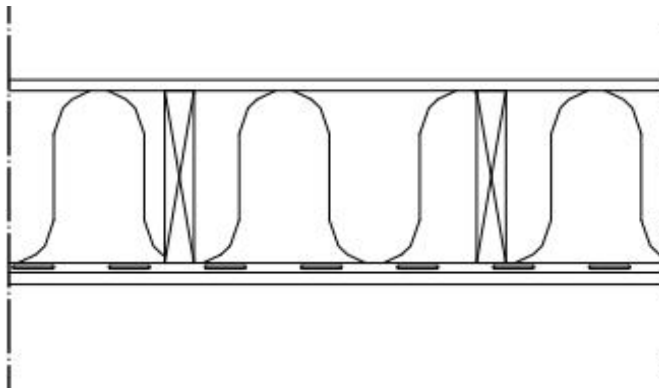
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

$L_{n,w} (C_1) = 63 (0) \text{ dB}$

$C_{1,50-2500} = 5 \text{ dB}$

$L_{n,w} + C_{1,50-2500} = 69 \text{ dB}$



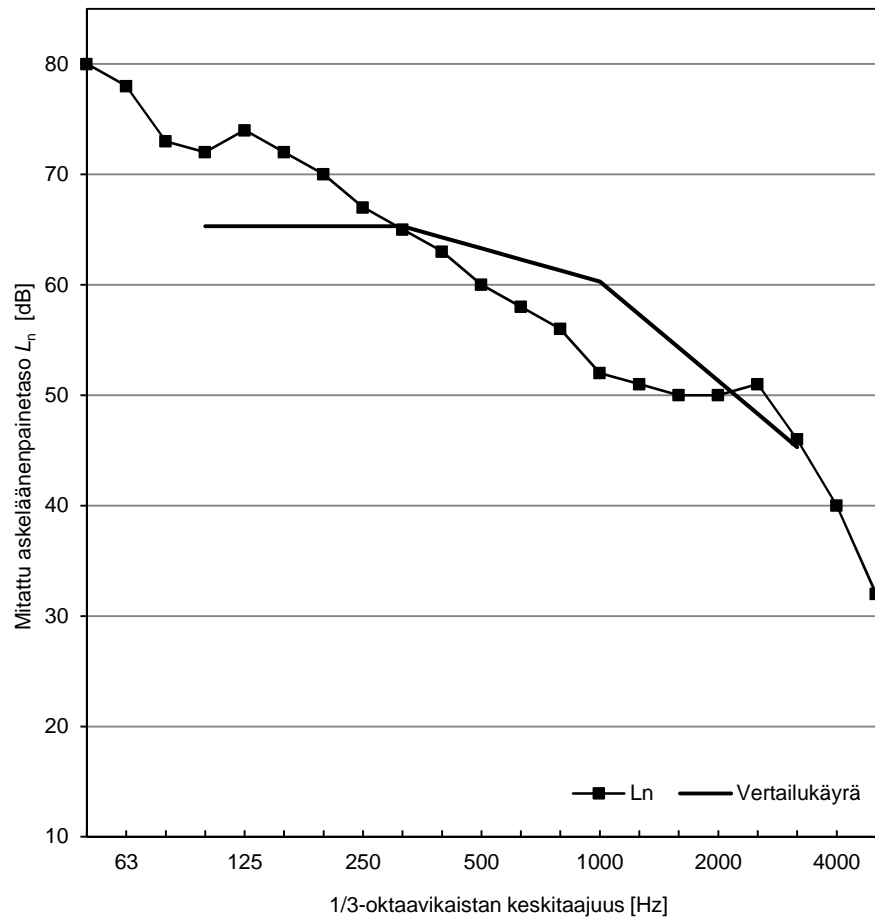
**Rakennekerrokset:**

	$m'$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$d'$ [mm]
OBS levy, k305/150	8,8	15
sahat.palkki (38x235)mm, k406		235
* pituus L=3925		
* 1 poikittaistuentalinja palkkikent. lasivilla (270mm)		
akustinen jousiranka, k610		13
*poikittain palkkeihin nähden		
kipsilevy, k305 ruuvit	11,0	16

**Kokonaiskorkeus [mm]**

279

$f$ [Hz]	$L_n$ [dB]
50	80
63	78
80	73
100	72
125	74
160	72
200	70
250	67
315	65
400	63
500	60
630	58
800	56
1000	52
1250	51
1600	50
2000	50
2500	51
3150	46
4000	40
5000	32



$S [m^2] = 15$

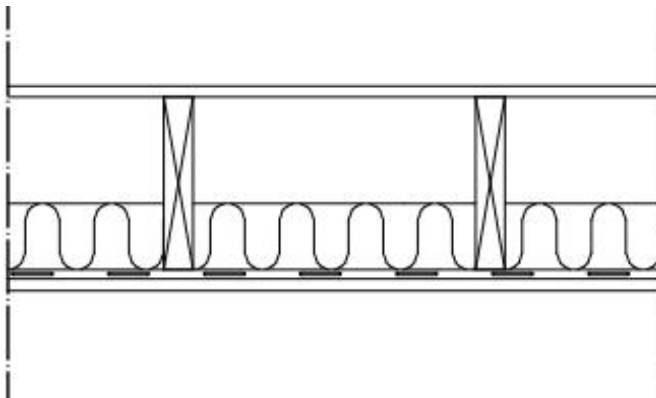
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

$L_{n,w} (C_1) = 63 (1) \text{ dB}$

$C_{1,50-2500} = 6 \text{ dB}$

$L_{n,w} + C_{1,50-2500} = 69 \text{ dB}$



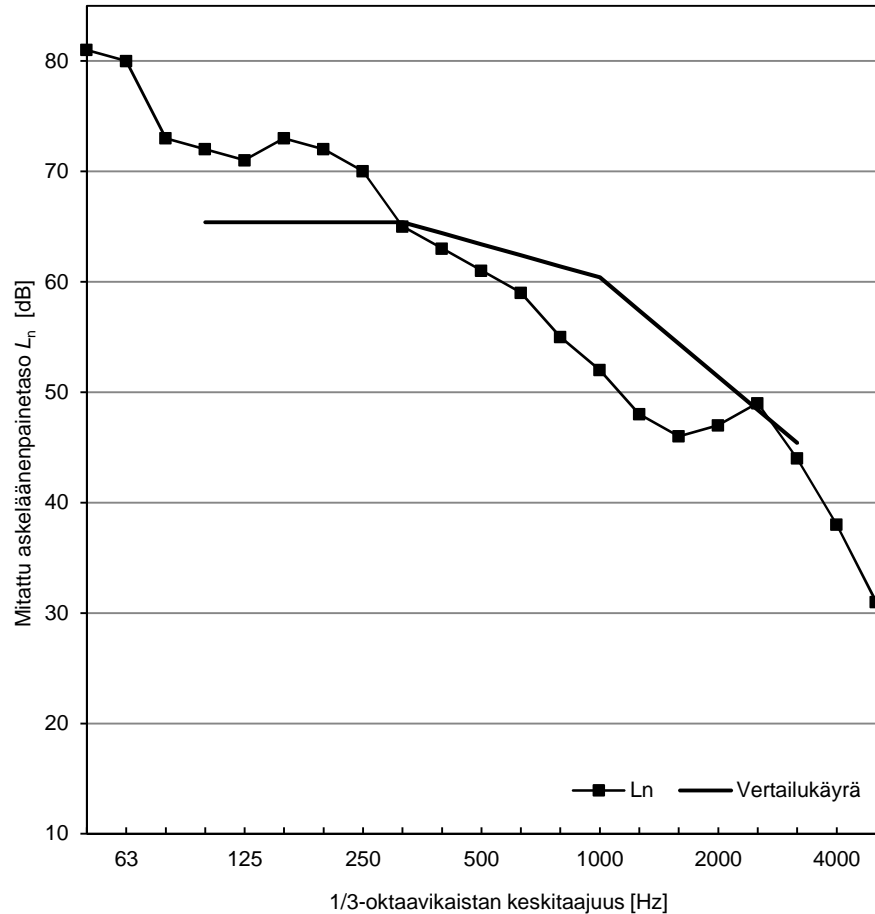
**Rakennekerrokset:**

	$m'$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$d'$ [mm]
OBS levy, k305/150	8,8	15
sahat.palkki (38x235)mm, k406		235
* pituus L=3925		
* 1 poikittaistuentaalinja palkkikent. mineraalivilla (90mm)		13
akustinen jousiranka, k610		13
*poikittain palkkeihin nähden kipsilevy, k305 ruuvit	11,0	16

**Kokonaiskorkeus [mm]**

279

$f$ [Hz]	$L_n$ [dB]
50	81
63	80
80	73
100	72
125	71
160	73
200	72
250	70
315	65
400	63
500	61
630	59
800	55
1000	52
1250	48
1600	46
2000	47
2500	49
3150	44
4000	38
5000	31



$S [m^2] = 15$

Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

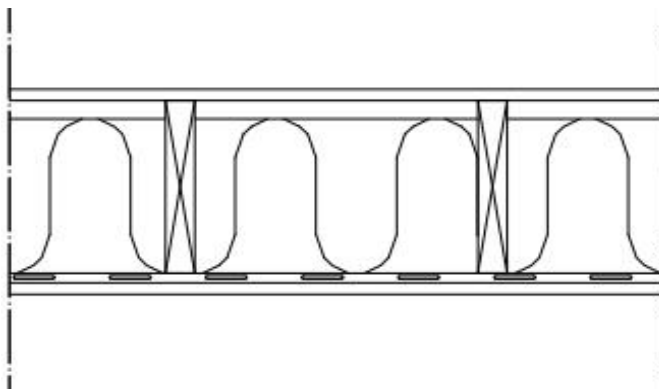
Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

$L_{n,w} (C_1) = 63 (1) \text{ dB}$

$C_{1,50-2500} = 7 \text{ dB}$

$L_{n,w} + C_{1,50-2500} = 70 \text{ dB}$





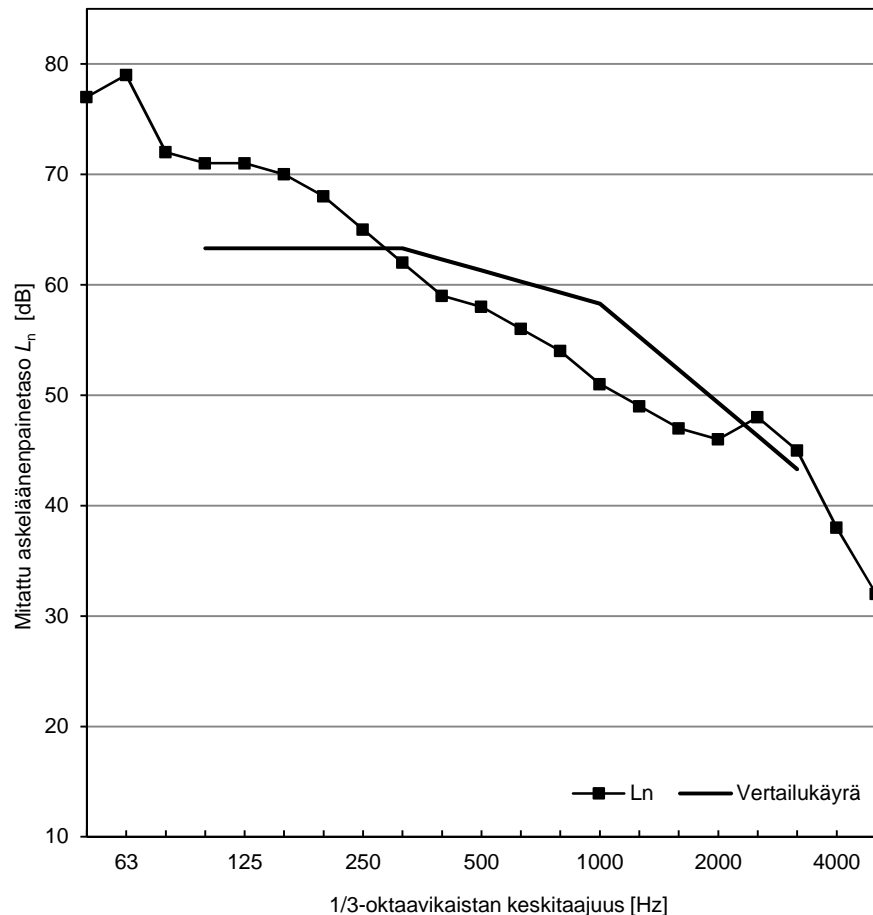
**Rakennekerrokset:**

	$m'$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$d'$ [mm]
OBS levy, k305/150	8,8	15
sahat.palkki (38x235)mm, k406		235
* pituus L=3925		
* 1 poikittaistuentalinja palkkikent. mineraalivilla (210mm)		13
akustinen jousiranka, k610		13
*poikittain palkkeihin nähden kipsilevy, k305 ruuvit	11,0	16

**Kokonaiskorkeus [mm]**

279

$f$ [Hz]	$L_n$ [dB]
50	77
63	79
80	72
100	71
125	71
160	70
200	68
250	65
315	62
400	59
500	58
630	56
800	54
1000	51
1250	49
1600	47
2000	46
2500	48
3150	45
4000	38
5000	32



$S [m^2] = 15$

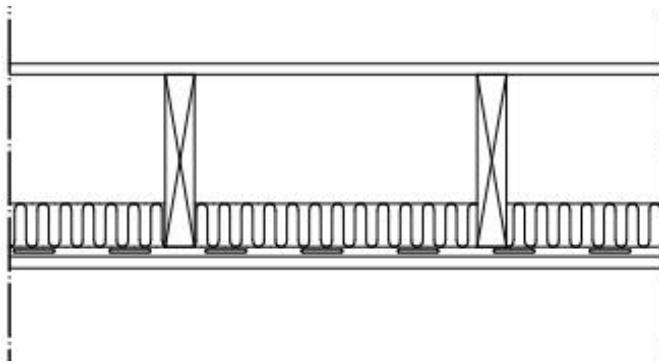
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

$L_{n,w} (C_1) = 61 (1) \text{ dB}$

$C_{1,50-2500} = 7 \text{ dB}$

$L_{n,w} + C_{1,50-2500} = 68 \text{ dB}$



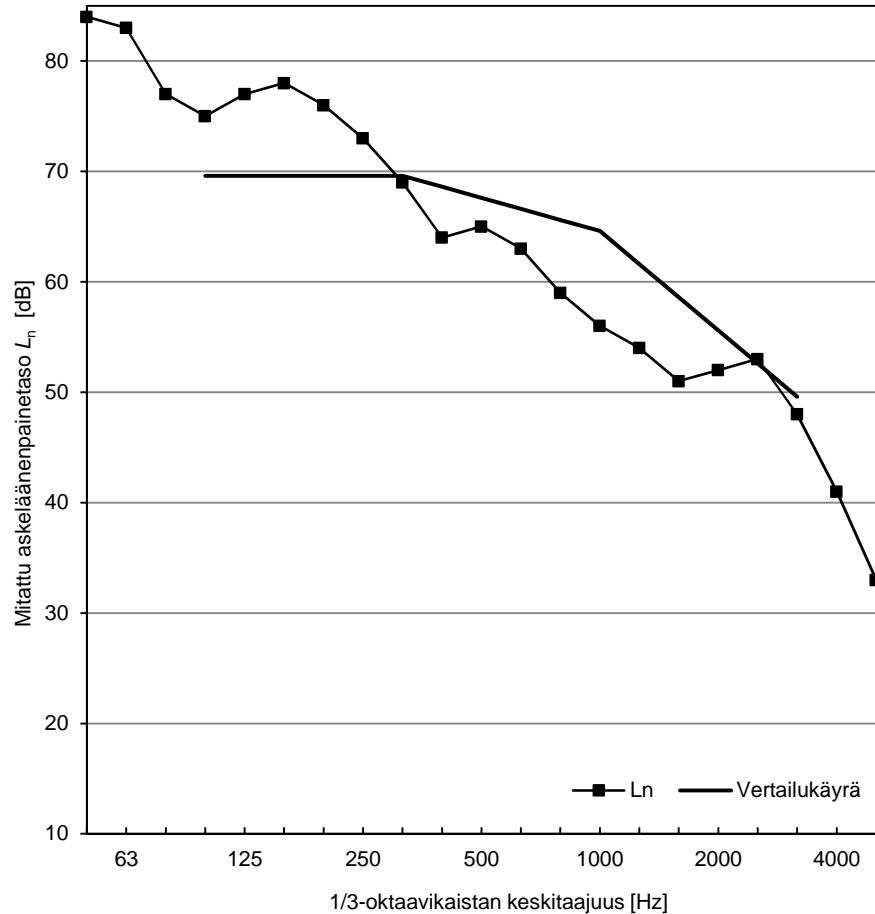
Rakennekerrokset:

	m'	d'
	[kg/m <sup>2</sup> ]	[mm]
OBS levy, k305/150	8,8	15
sahat.palkki (38x235)mm, k406		235
* pituus L=3925		
* 1 poikittaistuentaalinja palkkikent.		
puhalattu selluloosaeriste (59mm)		
akustinen jousiranka, k610		13
*poikittain palkkeihin nähden		
kipsilevy, k305 ruuvit	11,0	16

Kokonaiskorkeus [mm]

279

f [Hz]	L <sub>n</sub> [dB]
50	84
63	83
80	77
100	75
125	77
160	78
200	76
250	73
315	69
400	64
500	65
630	63
800	59
1000	56
1250	54
1600	51
2000	52
2500	53
3150	48
4000	41
5000	33



S [m<sup>2</sup>] = 15

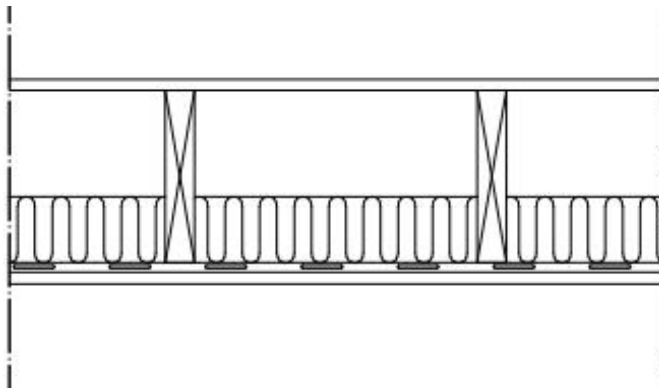
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

L<sub>n,w</sub> (C<sub>1</sub>) = 68 (1) dB

C<sub>1,50-2500</sub> = 6 dB

L<sub>n,w</sub> + C<sub>1,50-2500</sub> = 74 dB



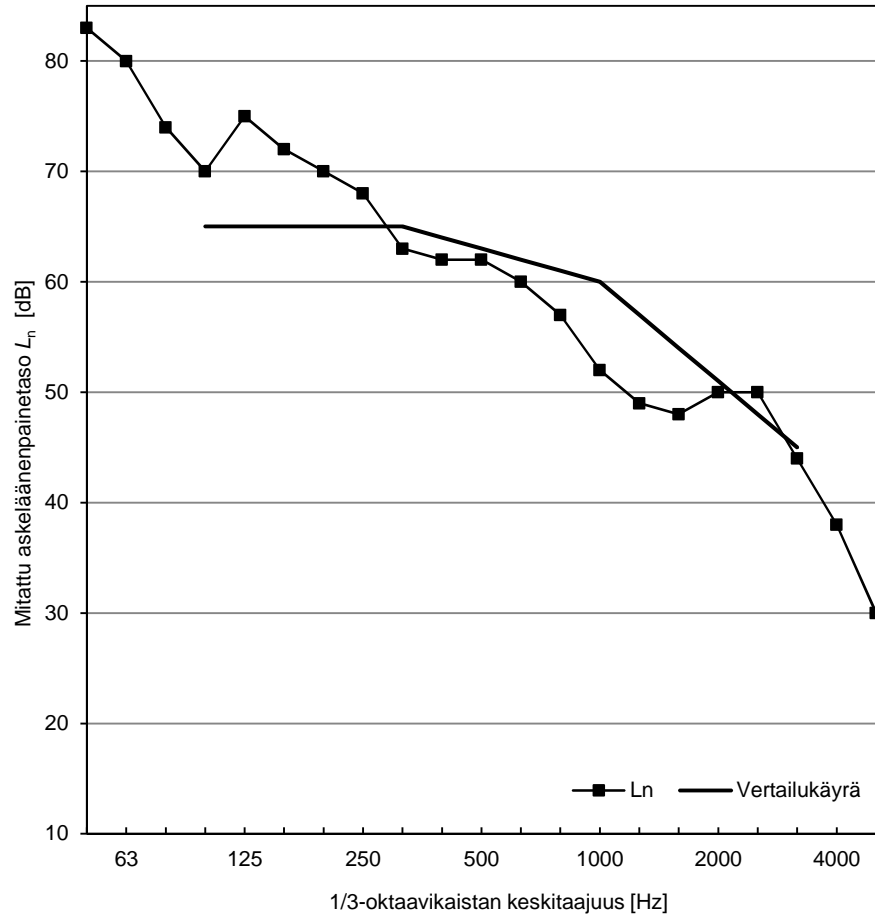
Rakennekerrokset:

	m'	d'
	[kg/m <sup>2</sup> ]	[mm]
OBS levy, k305/150	8,8	15
sahat.palkki (38x235)mm, k406		235
* pituus L=3925		
* 1 poikittaistuentaalinja palkkikent.		
puhallettu selluloosaeriste (90mm)		
akustinen jousiranka, k610		13
*poikittain palkkeihin nähden		
kipsilevy, k305 ruuvit	11,0	16

Kokonaiskorkeus [mm]

279

f [Hz]	L <sub>n</sub> [dB]
50	83
63	80
80	74
100	70
125	75
160	72
200	70
250	68
315	63
400	62
500	62
630	60
800	57
1000	52
1250	49
1600	48
2000	50
2500	50
3150	44
4000	38
5000	30



S [m<sup>2</sup>] = 15

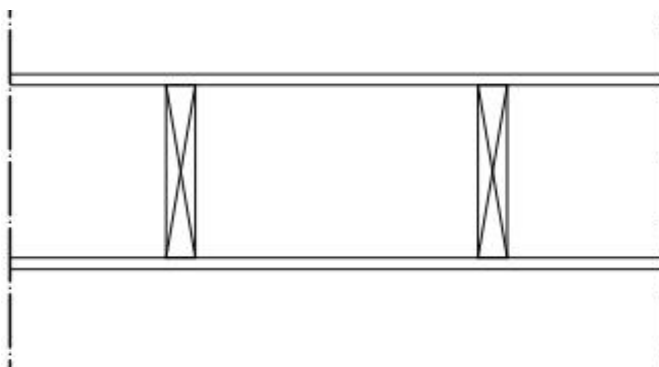
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

L<sub>n,w</sub> (C<sub>1</sub>) = 63 (1) dB

C<sub>1,50-2500</sub> = 8 dB

L<sub>n,w</sub> + C<sub>1,50-2500</sub> = 71 dB



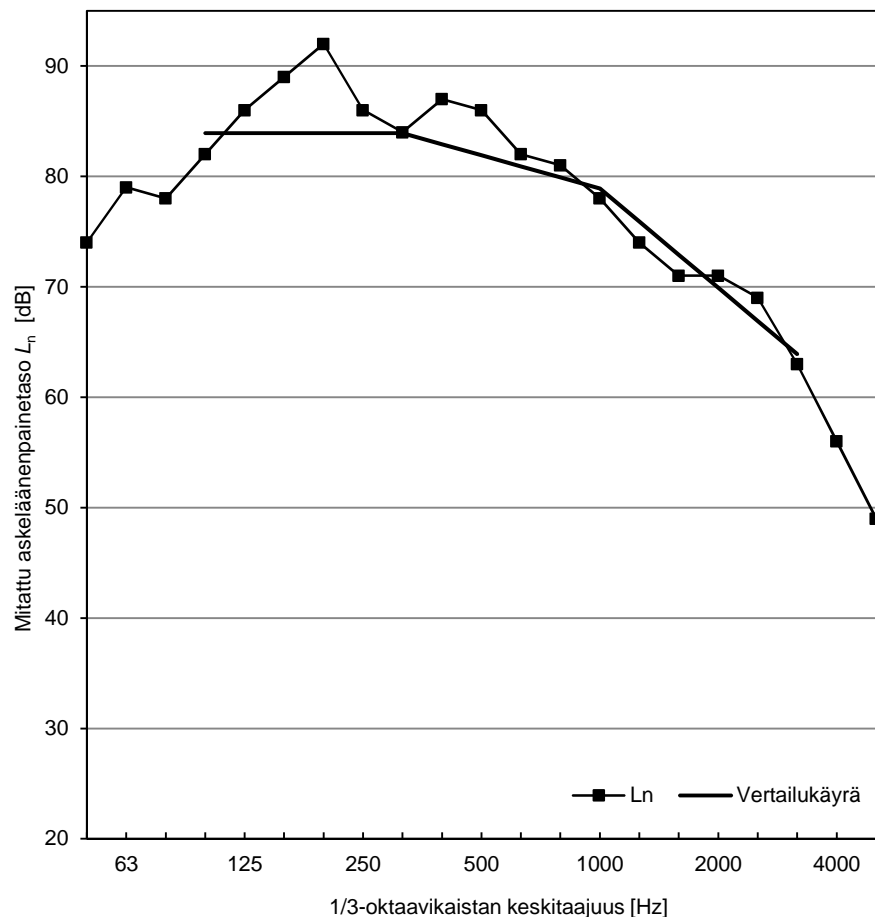
Rakennekerrokset:

	m'	d'
	[kg/m <sup>2</sup> ]	[mm]
OBS levy, k305/150	8,8	15
sahat.palkki (38x235)mm, k406		235
* pituus L=3925		
* 1 poikittaistuentaalinja palkkikent.		
kipsilevy, k305 ruuvit	11,0	16
*ruuvattu lattiapalkkeihin		

Kokonaiskorkeus [mm]

266

f [Hz]	L <sub>n</sub> [dB]
50	74
63	79
80	78
100	82
125	86
160	89
200	92
250	86
315	84
400	87
500	86
630	82
800	81
1000	78
1250	74
1600	71
2000	71
2500	69
3150	63
4000	56
5000	49



S [m<sup>2</sup>] = 15

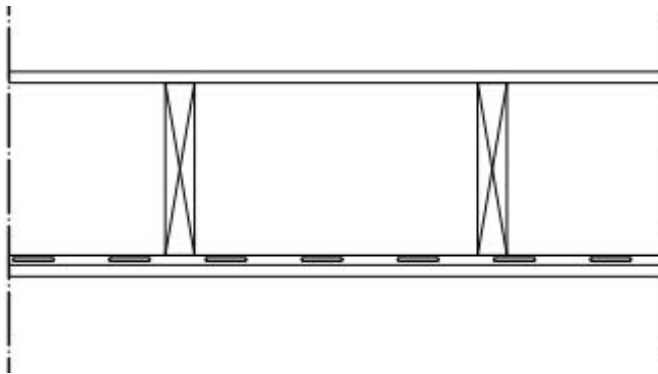
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

L<sub>n,w</sub> (C<sub>1</sub>) = 82 (0) dB

C<sub>1,50-2500</sub> = 0 dB

L<sub>n,w</sub> + C<sub>1,50-2500</sub> = 82 dB



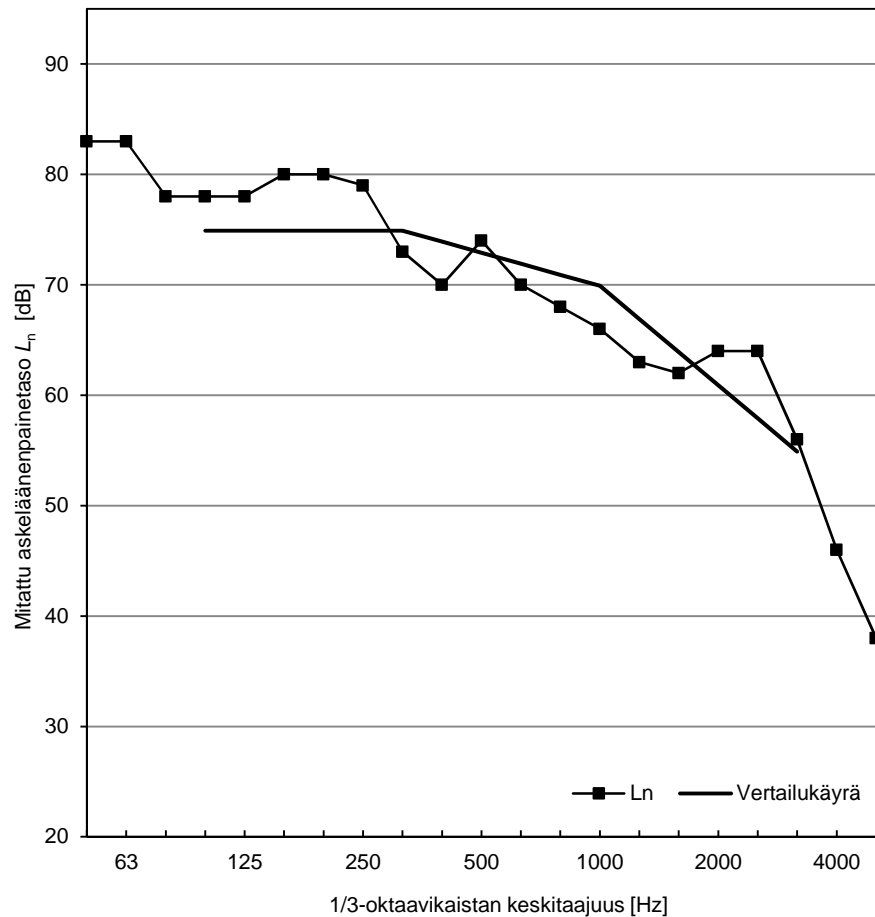
Rakennekerrokset:

	m'	d'
	[kg/m <sup>2</sup> ]	[mm]
OBS levy, k305/150	8,8	15
sahat.palkki (38x235)mm, k406		235
* pituus L=3925		
* 1 poikittaistuentalinja palkkikent.		
akustinen jousiranka, k610		13
*poikittain palkkeihin nähden		
kipsilevy, k305 ruuvit	11,0	16

Kokonaiskorkeus [mm]

279

f [Hz]	L <sub>n</sub> [dB]
50	83
63	83
80	78
100	78
125	78
160	80
200	80
250	79
315	73
400	70
500	74
630	70
800	68
1000	66
1250	63
1600	62
2000	64
2500	64
3150	56
4000	46
5000	38



S [m<sup>2</sup>] = 15

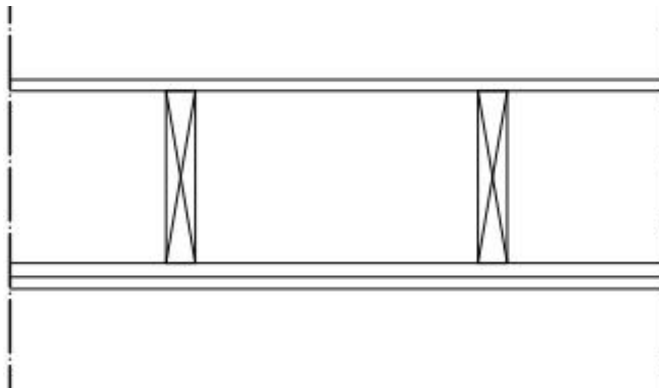
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

L<sub>n,w</sub> (C<sub>1</sub>) = 73 (-1) dB

C<sub>1,50-2500</sub> = 2 dB

L<sub>n,w</sub> + C<sub>1,50-2500</sub> = 75 dB



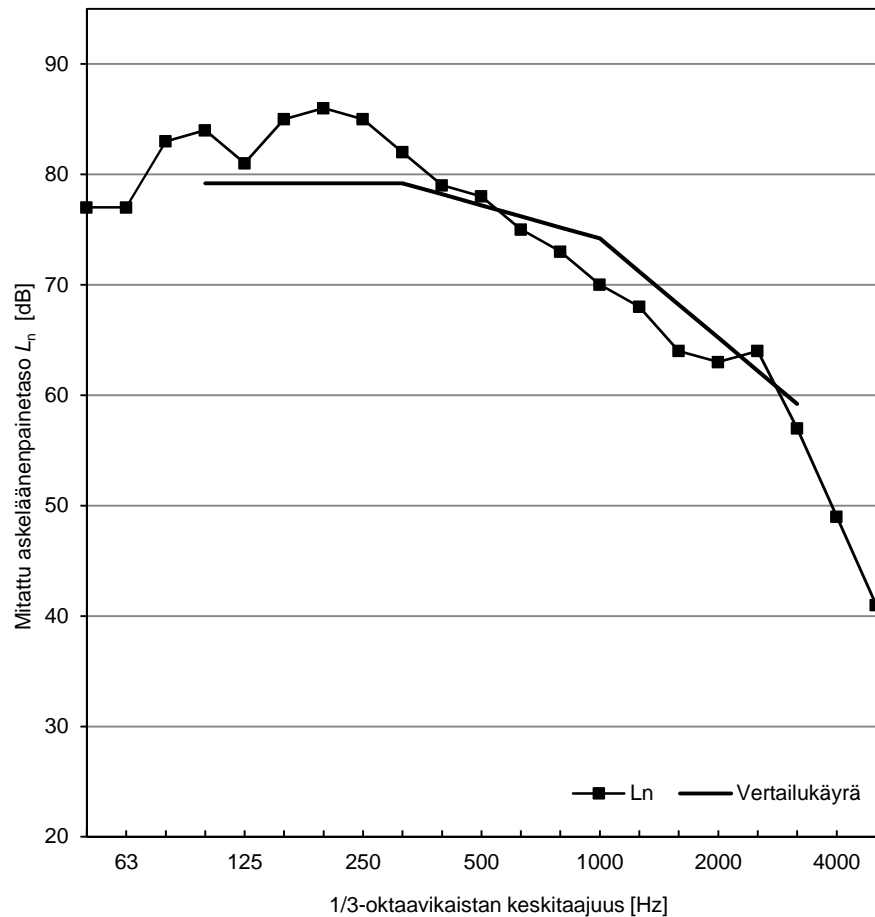
Rakennekerrokset:

	m'	d'
	[kg/m <sup>2</sup> ]	[mm]
OBS levy, k305/150	8,8	15
sahat.palkki (38x235)mm, k406		235
* pituus L=3925		
* ei poikittaistuentaa		
puukoolaus (19x64)mm, k610		19
*poikittain palkkeihin nähden		
kipsilevy, k305 ruuvit	11,0	16

Kokonaiskorkeus [mm]

285

f [Hz]	L <sub>n</sub> [dB]
50	77
63	77
80	83
100	84
125	81
160	85
200	86
250	85
315	82
400	79
500	78
630	75
800	73
1000	70
1250	68
1600	64
2000	63
2500	64
3150	57
4000	49
5000	41



S [m<sup>2</sup>] = 15

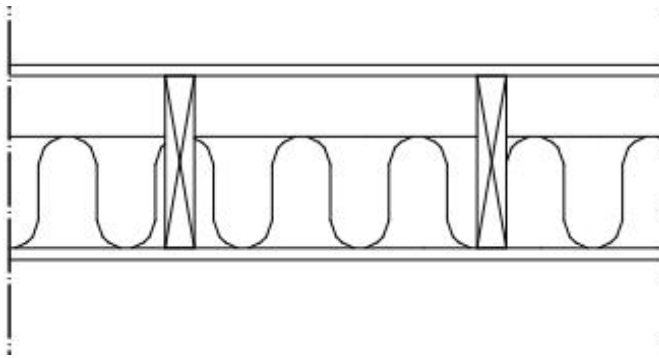
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

L<sub>n,w</sub> (C<sub>1</sub>) = 77 (0) dB

C<sub>1,50-2500</sub> = 1 dB

L<sub>n,w</sub> + C<sub>1,50-2500</sub> = 78 dB



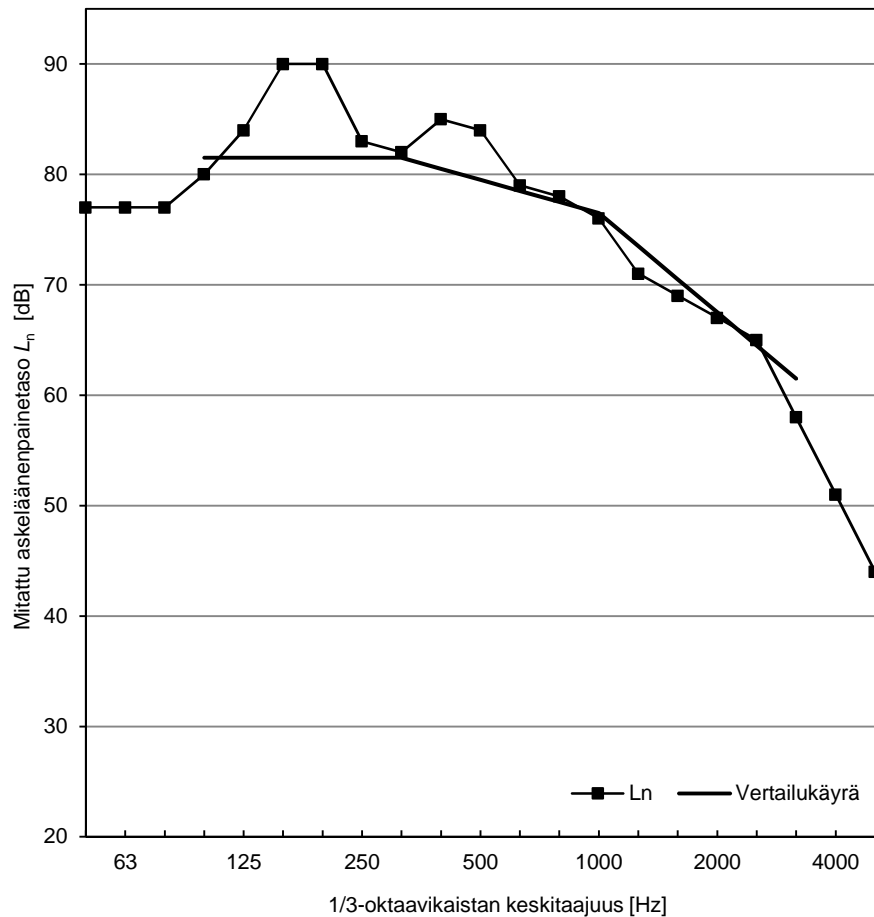
Rakennekerrokset:

	m'	d'
	[kg/m <sup>2</sup> ]	[mm]
OBS levy, k305/150	8,8	15
sahat.palkki (38x235)mm, k406		235
* pituus L=3925		
* 1 poikittaistuentalinja palkkikent. lasivilla (152mm)		
kipsilevy, k305 ruuvit	11,3	16
*kiinnitys suoraan palkkeihin		

Kokonaiskorkeus [mm]

266

f [Hz]	L <sub>n</sub> [dB]
50	77
63	77
80	77
100	80
125	84
160	90
200	90
250	83
315	82
400	85
500	84
630	79
800	78
1000	76
1250	71
1600	69
2000	67
2500	65
3150	58
4000	51
5000	44



S [m<sup>2</sup>] = 15

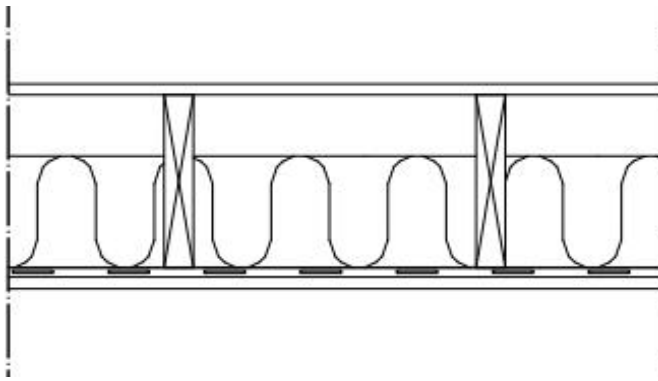
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

L<sub>n,w</sub> (C<sub>1</sub>) = 80 (1) dB

C<sub>1,50-2500</sub> = 1 dB

L<sub>n,w</sub> + C<sub>1,50-2500</sub> = 81 dB



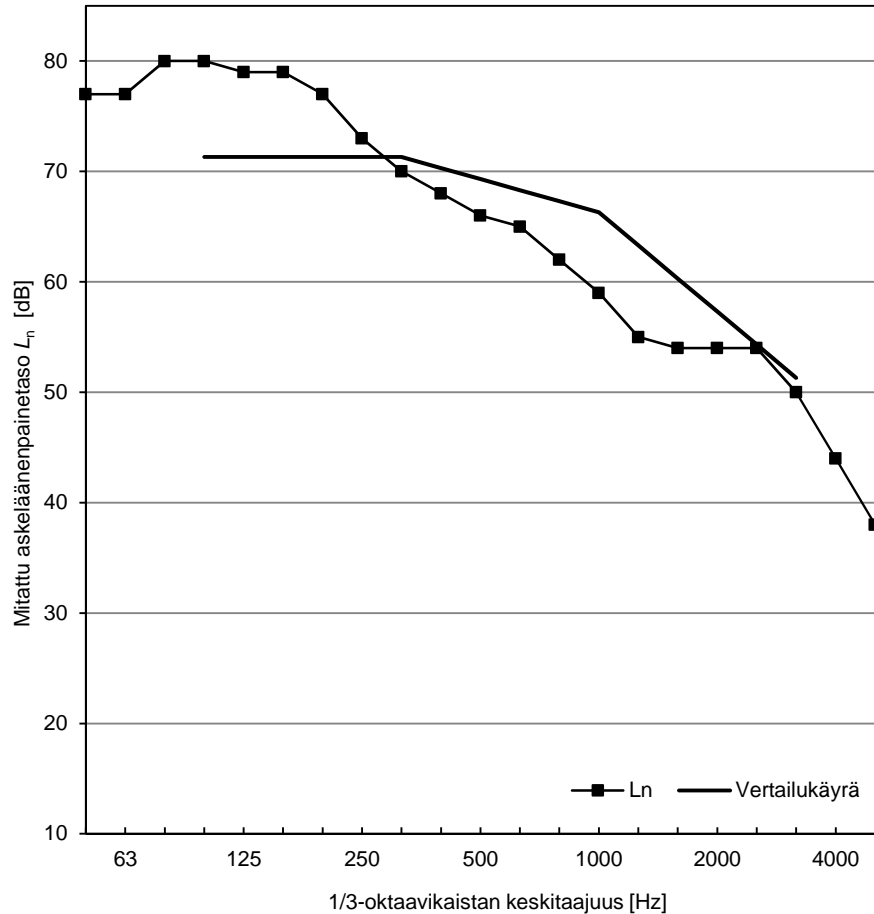
**Rakennekerrokset:**

	$m'$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$d'$ [mm]
OBS levy, k305/150	8,8	15
sahat.palkki (38x235)mm, k406		235
* pituus L=3925		
* 1 poikittaistuentalinja palkkikent. lasivilla (152mm)		
akustinen jousiranka, k200		13
*poikittain palkkeihin nähden kipsilevy, k305 ruuvit	11,3	16

**Kokonaiskorkeus [mm]**

279

$f$ [Hz]	$L_n$ [dB]
50	77
63	77
80	80
100	80
125	79
160	79
200	77
250	73
315	70
400	68
500	66
630	65
800	62
1000	59
1250	55
1600	54
2000	54
2500	54
3150	50
4000	44
5000	38



$S [m^2] = 15$

Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

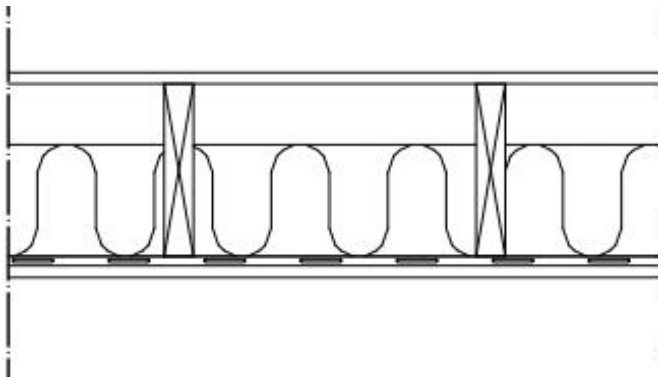
Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

$L_{n,w} (C_1) = 69 (1) \text{ dB}$

$C_{1,50-2500} = 3 \text{ dB}$

$L_{n,w} + C_{1,50-2500} = 72 \text{ dB}$





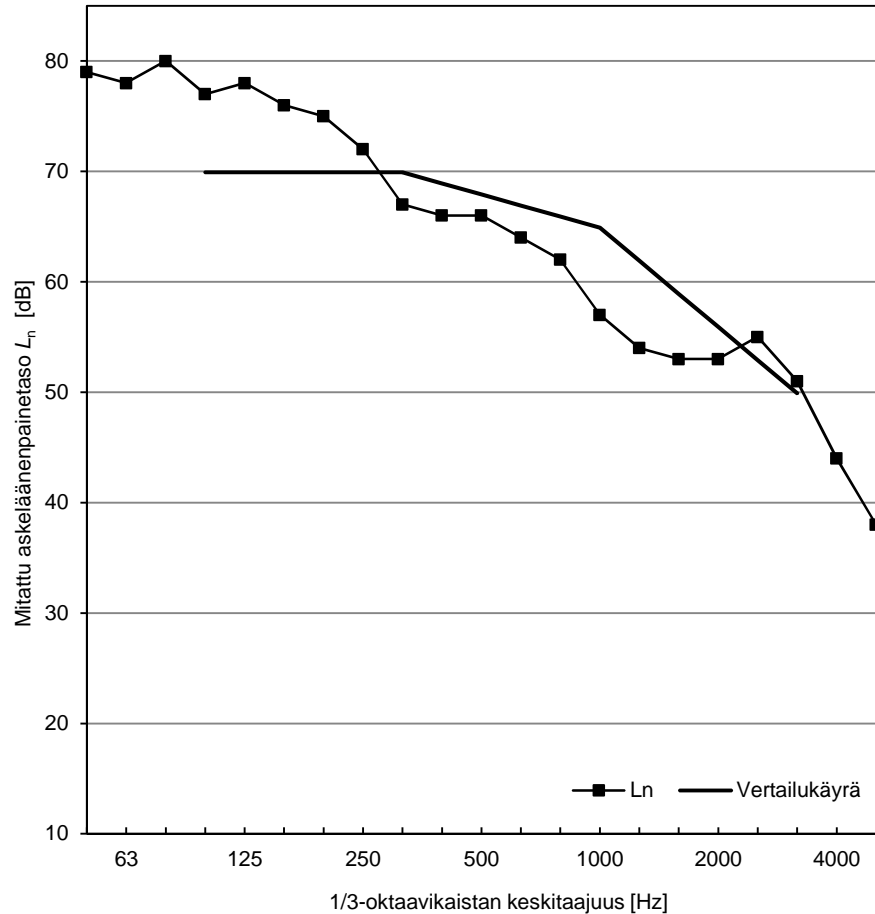
**Rakennekerrokset:**

	$m'$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$d'$ [mm]
OBS levy, k305/150	8,8	15
sahat.palkki (38x235)mm, k406		235
* pituus L=3925		
* 1 poikittaistuentalinja palkkikent. lasivilla (152mm)		
akustinen jousiranka, k305		13
*poikittain palkkeihin nähden kipsilevy, k305 ruuvit	11,3	16

**Kokonaiskorkeus [mm]**

279

$f$ [Hz]	$L_n$ [dB]
50	79
63	78
80	80
100	77
125	78
160	76
200	75
250	72
315	67
400	66
500	66
630	64
800	62
1000	57
1250	54
1600	53
2000	53
2500	55
3150	51
4000	44
5000	38



$S [m^2] = 15$

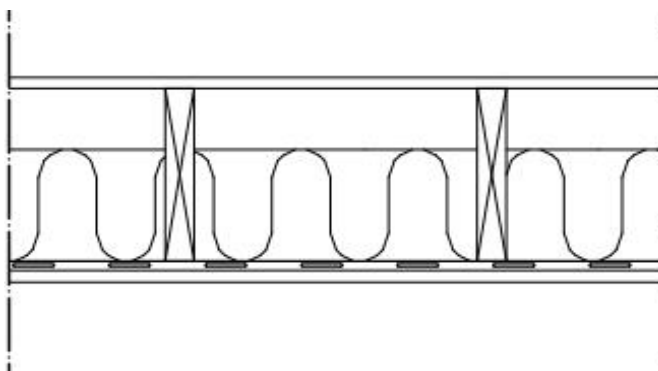
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

$L_{n,w}(C_1) = 68 (1) \text{ dB}$

$C_{1,50-2500} = 4 \text{ dB}$

$L_{n,w} + C_{1,50-2500} = 72 \text{ dB}$



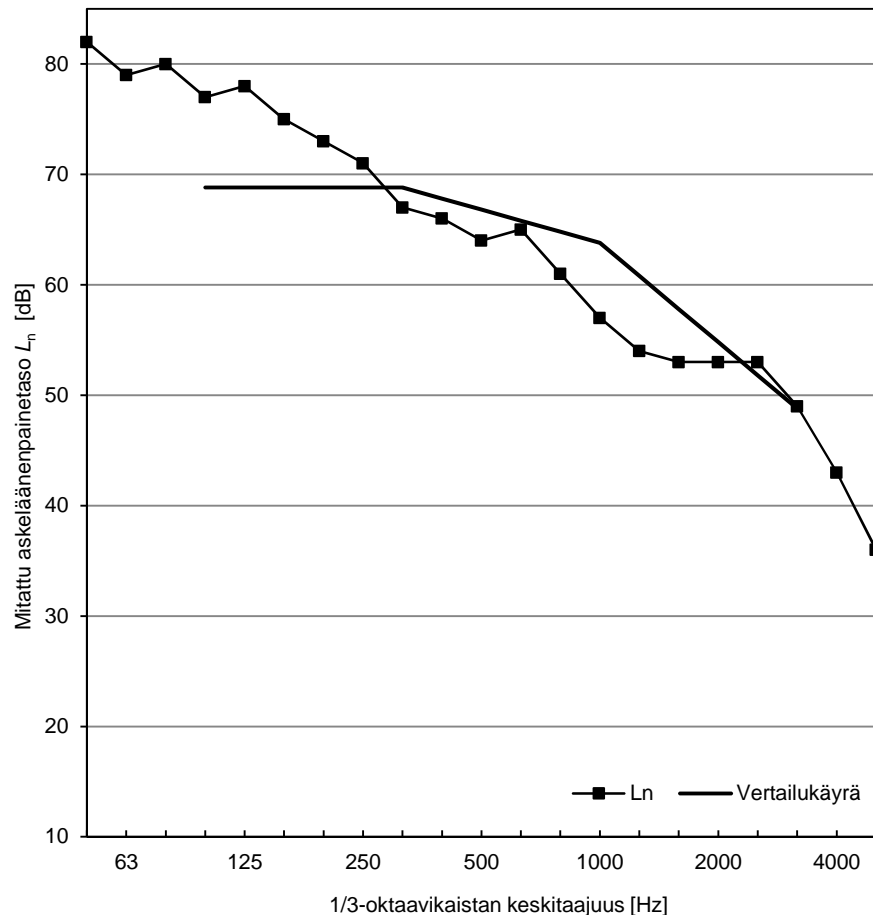
**Rakennekerrokset:**

	$m'$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$d'$ [mm]
OBS levy, k305/150	8,8	15
sahat.palkki (38x235)mm, k406		235
* pituus L=3925		
* 1 poikittaistuentalinja palkkikent. lasivilla (152mm)		
akustinen jousiranka, k406		13
*poikittain palkkeihin nähden kipsilevy, k305 ruuvit	11,3	16

**Kokonaiskorkeus [mm]**

279

$f$ [Hz]	$L_n$ [dB]
50	82
63	79
80	80
100	77
125	78
160	75
200	73
250	71
315	67
400	66
500	64
630	65
800	61
1000	57
1250	54
1600	53
2000	53
2500	53
3150	49
4000	43
5000	36



$S [m^2] = 15$

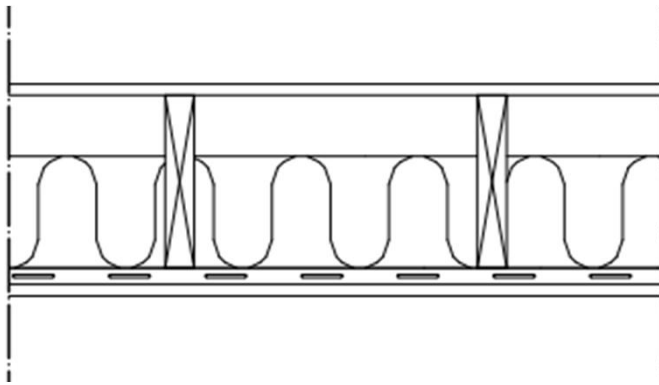
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

$L_{n,w}(C_1) = 67 (1) \text{ dB}$

$C_{1,50-2500} = 5 \text{ dB}$

$L_{n,w} + C_{1,50-2500} = 72 \text{ dB}$



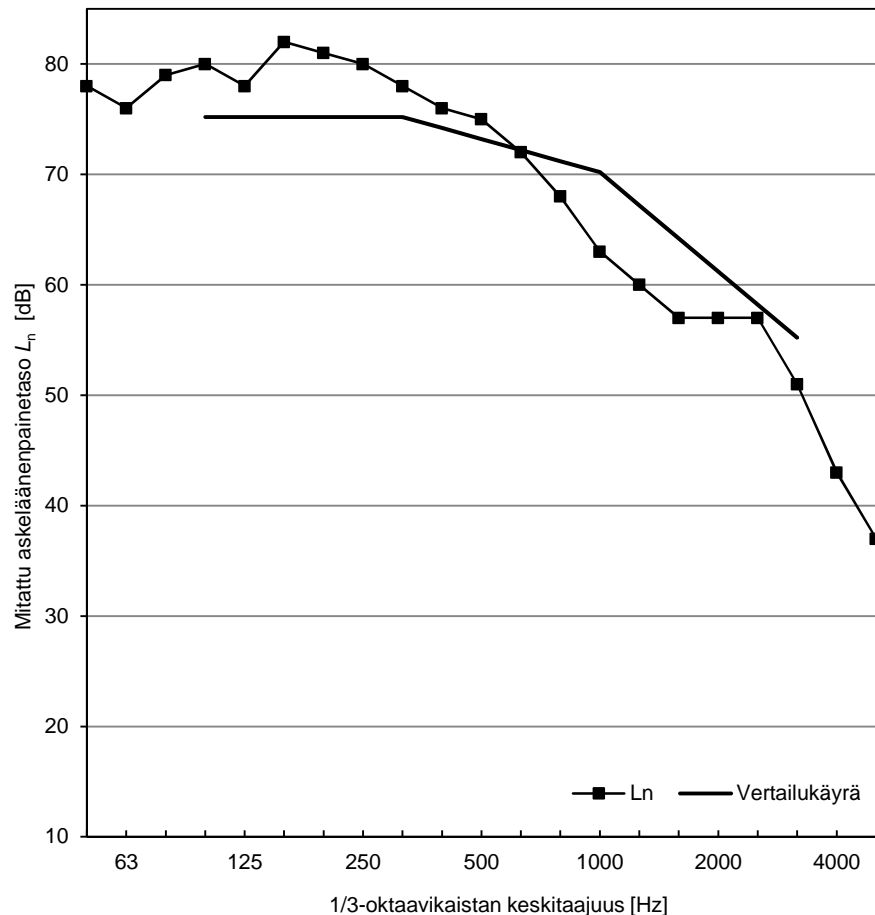
**Rakennekerrokset:**

	$m'$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$d'$ [mm]
OBS levy, k305/150	8,8	15
sahat.palkki (38x235)mm, k406		235
* pituus L=3925		
* 1 poikittaistuentalinja palkkikent.		
lasivilla (152mm)		
peltiranka U-profiili, k610		22
* poikittain palkkeihin nähden		
kipsilevy, k305 ruuvit	11,3	16

**Kokonaiskorkeus [mm]**

288

$f$ [Hz]	$L_n$ [dB]
50	78
63	76
80	79
100	80
125	78
160	82
200	81
250	80
315	78
400	76
500	75
630	72
800	68
1000	63
1250	60
1600	57
2000	57
2500	57
3150	51
4000	43
5000	37



$S [m^2] = 15$

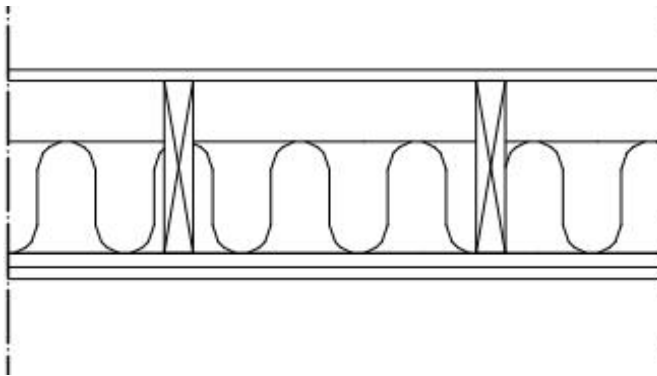
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

$L_{n,w} (C_1) = 73 (0) \text{ dB}$

$C_{1,50-2500} = 1 \text{ dB}$

$L_{n,w} + C_{1,50-2500} = 74 \text{ dB}$



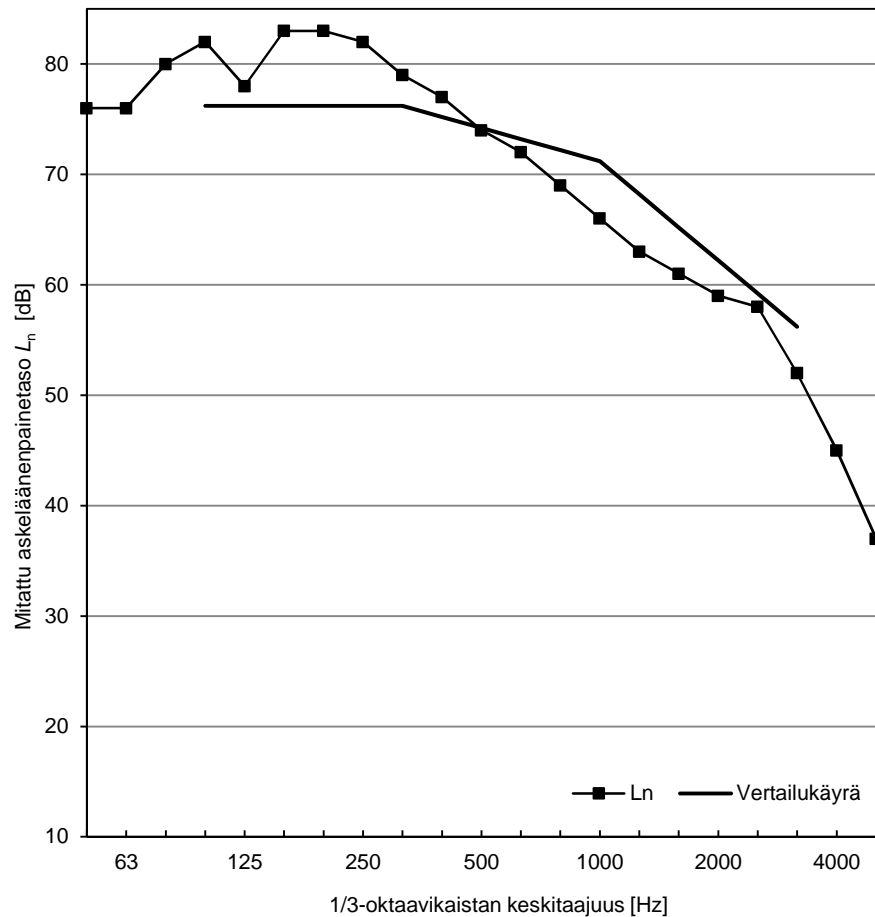
Rakennekerrokset:

	m'	d'
	[kg/m <sup>2</sup> ]	[mm]
OBS levy, k305/150	8,8	15
sahat.palkki (38x235)mm, k406		235
* pituus L=3925		
* 1 poikittaistuentalinja palkkikent.		
lasivilla (152mm)		
lauta (19x64)mm, k610		19
* poikittain palkkeihin nähden		
kipsilevy, k305 ruuvit	11,3	16

Kokonaiskorkeus [mm]

285

f [Hz]	L <sub>n</sub> [dB]
50	76
63	76
80	80
100	82
125	78
160	83
200	83
250	82
315	79
400	77
500	74
630	72
800	69
1000	66
1250	63
1600	61
2000	59
2500	58
3150	52
4000	45
5000	37



S [m<sup>2</sup>] = 15

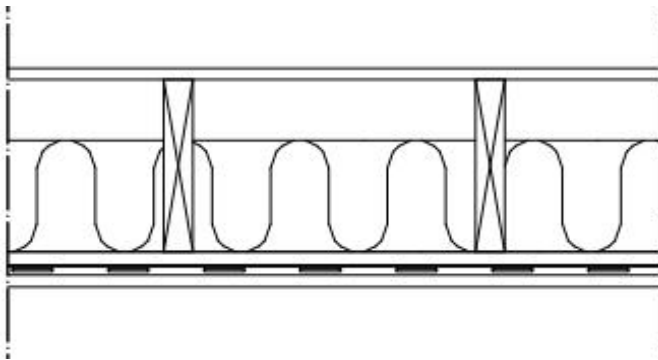
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

L<sub>n,w</sub> (C<sub>1</sub>) = 74 (1) dB

C<sub>1,50-2500</sub> = 1 dB

L<sub>n,w</sub> + C<sub>1,50-2500</sub> = 76 dB



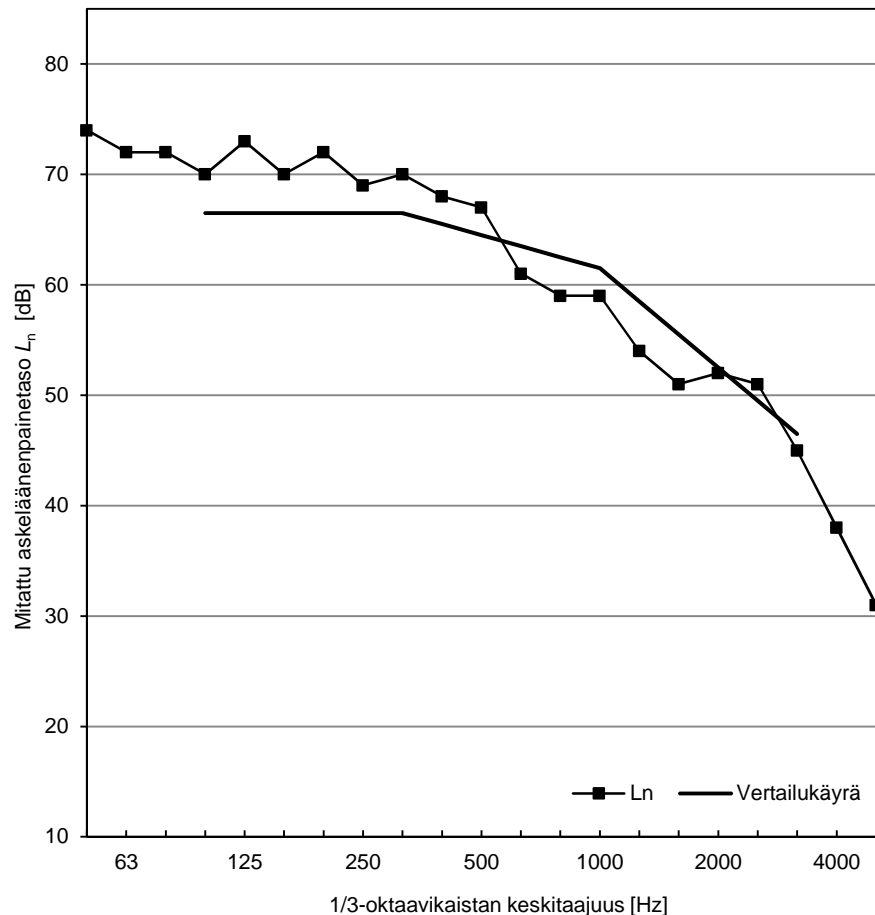
**Rakennekerrokset:**

	$m'$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$d'$ [mm]
OBS levy, k305/150	8,8	15
sahat.palkki (38x235)mm, k406		235
* pituus L=3925		
* 1 poikittaistuentalinja palkkikent. lasivilla (152mm)		
lauta (19x64)mm, k610		19
* poikittain palkkeihin nähden		
akustinen jousiranka, k610		13
*poikittain palkkeihin nähden		
kipsilevy, k305 ruuvit	11,3	16

**Kokonaiskorkeus [mm]**

298

$f$ [Hz]	$L_n$ [dB]
50	74
63	72
80	72
100	70
125	73
160	70
200	72
250	69
315	70
400	68
500	67
630	61
800	59
1000	59
1250	54
1600	51
2000	52
2500	51
3150	45
4000	38
5000	31



$S [m^2] = 15$

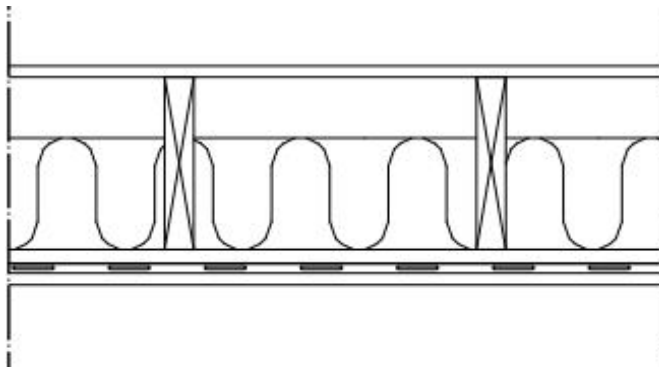
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

$L_{n,w} (C_1) = 65 (0) \text{ dB}$

$C_{1,50-2500} = 2 \text{ dB}$

$L_{n,w} + C_{1,50-2500} = 67 \text{ dB}$



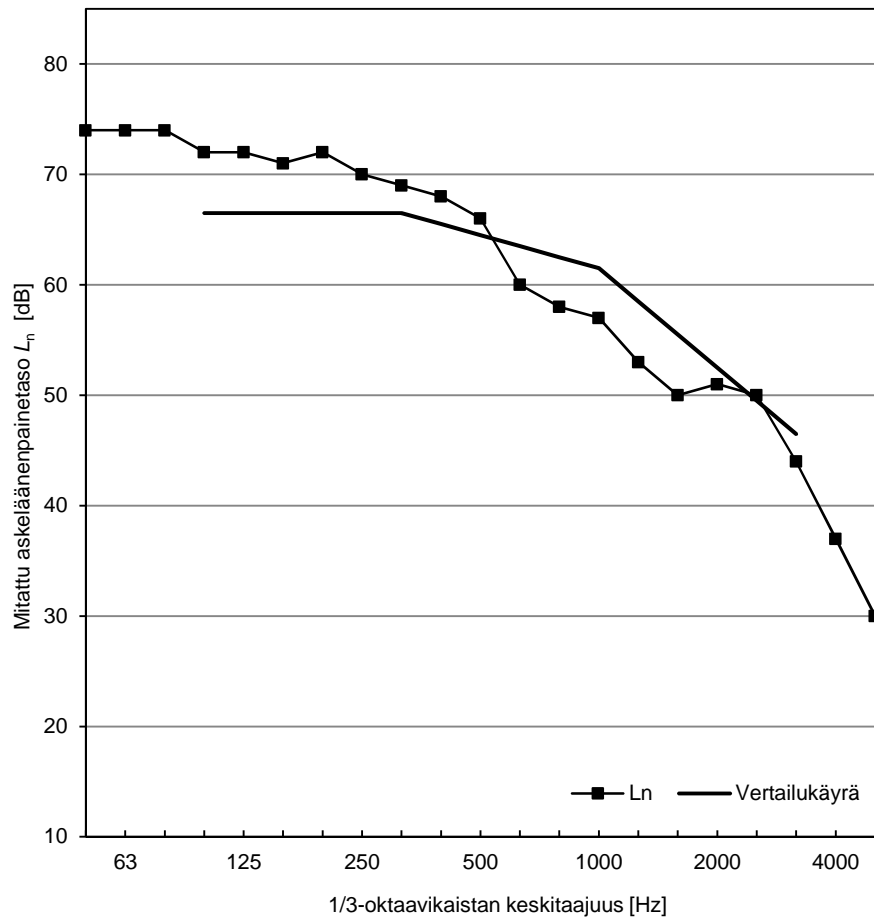
**Rakennekerrokset:**

	$m'$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$d'$ [mm]
OBS levy, k305/150	8,8	15
sahat.palkki (38x235)mm, k406		235
* pituus L=3925		
* ei poikittaistuentaa		
lasivilla (152mm)		
lauta (19x64)mm, k610		19
* poikittain palkkeihin nähden		
akustinen jousiranka, k610		13
*poikittain palkkeihin nähden		
kipsilevy, k305 ruuvit	11,3	16

**Kokonaiskorkeus [mm]**

298

$f$ [Hz]	$L_n$ [dB]
50	74
63	74
80	74
100	72
125	72
160	71
200	72
250	70
315	69
400	68
500	66
630	60
800	58
1000	57
1250	53
1600	50
2000	51
2500	50
3150	44
4000	37
5000	30



$S [m^2] = 15$

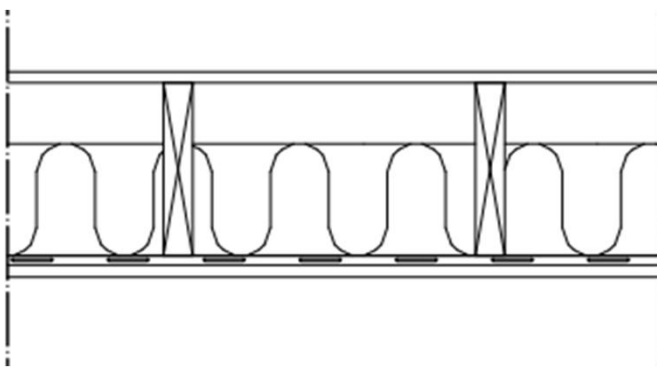
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

$L_{n,w} (C_1) = 65 (0) \text{ dB}$

$C_{1,50-2500} = 3 \text{ dB}$

$L_{n,w} + C_{1,50-2500} = 67 \text{ dB}$



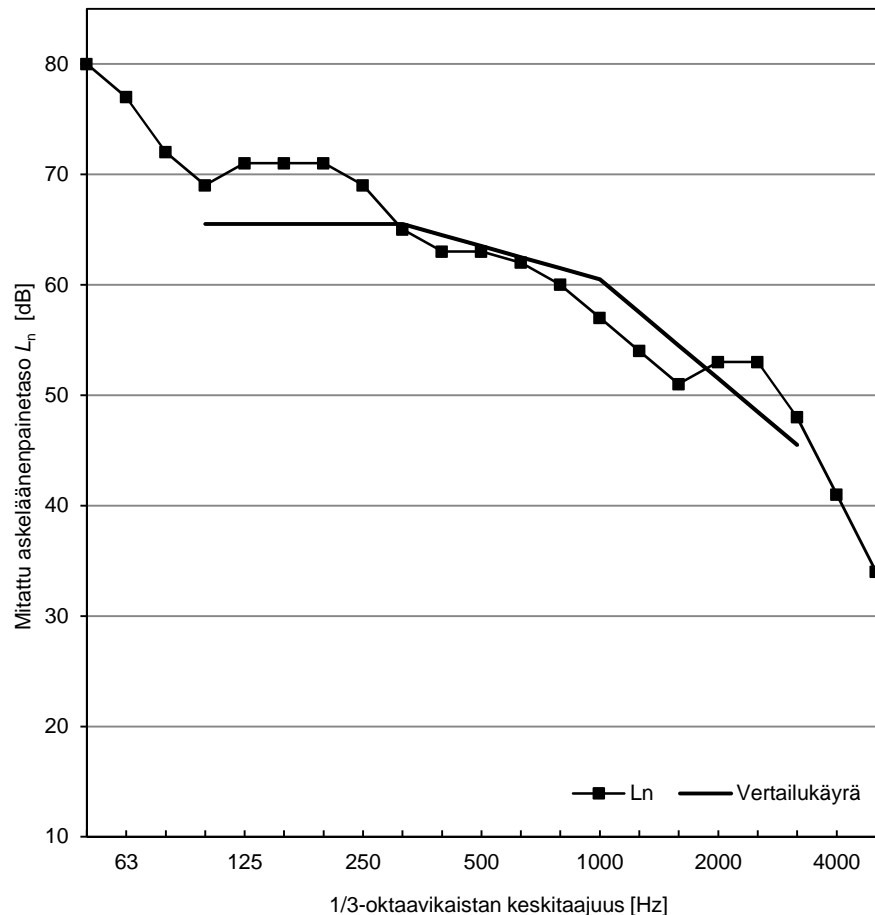
**Rakennekerrokset:**

	$m'$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$d'$ [mm]
OBS levy, k305/150	8,8	15
sahat.palkki (38x286)mm, k406		286
* pituus L=3925		
*1 poikittaistentalinja palkkikent. lasivilla (152mm)		
akustinen jousiranka, k610		13
*poikittain palkkeihin nähden		
kipsilevy, k305 ruuvit	11,3	16

**Kokonaiskorkeus [mm]**

**330**

$f$ [Hz]	$L_n$ [dB]
50	80
63	77
80	72
100	69
125	71
160	71
200	71
250	69
315	65
400	63
500	63
630	62
800	60
1000	57
1250	54
1600	51
2000	53
2500	53
3150	48
4000	41
5000	34



$S [m^2] = 15$

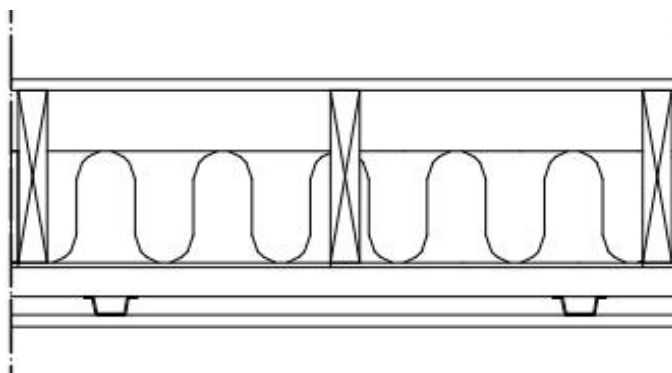
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

$L_{n,w} (C_1) = 64 (0) \text{ dB}$

$C_{1,50-2500} = 5 \text{ dB}$

$L_{n,w} + C_{1,50-2500} = 69 \text{ dB}$



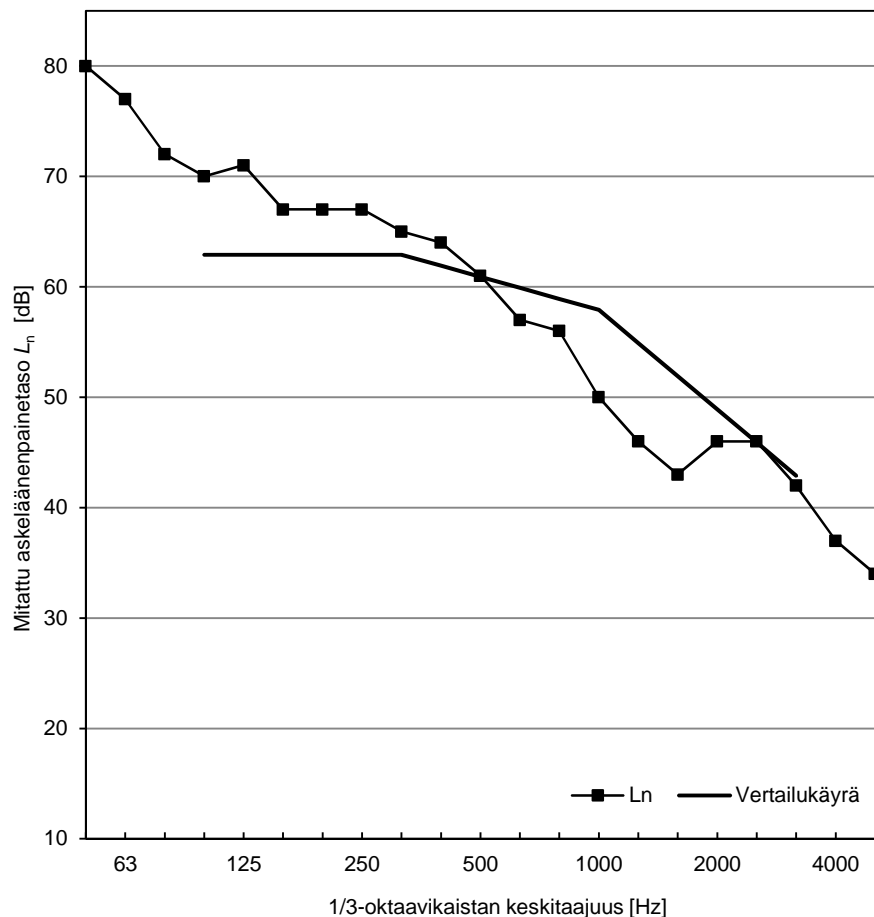
**Rakennekerrokset:**

	$m'$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$d'$ [mm]
OBS levy, k305/150	8,8	15
sahat.palkki (38x235)mm, k406		235
* pituus L=3925		
* 1 poikittaistuentalinja palkkikent.		
lasivilla (152mm)		
ilmaväli, ripustus vaijerilla		6
peltiranka C-prof, k610		40
* poikittain palkkeihin nähden		
peltiranka U-profiili, k610		25
*palkkien suuntaisesti		
kipsilevy, k305 ruuvit	11,3	16

**Kokonaiskorkeus [mm]**

**337**

$f$ [Hz]	$L_n$ [dB]
50	80
63	77
80	72
100	70
125	71
160	67
200	67
250	67
315	65
400	64
500	61
630	57
800	56
1000	50
1250	46
1600	43
2000	46
2500	46
3150	42
4000	37
5000	34



$S [m^2] = 15$

Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

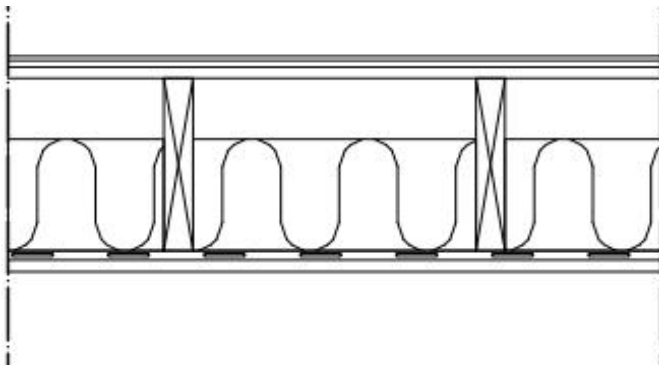
Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

$L_{n,w} (C_1) = 61 (1) \text{ dB}$

$C_{1,50-2500} = 7 \text{ dB}$

$L_{n,w} + C_{1,50-2500} = 68 \text{ dB}$





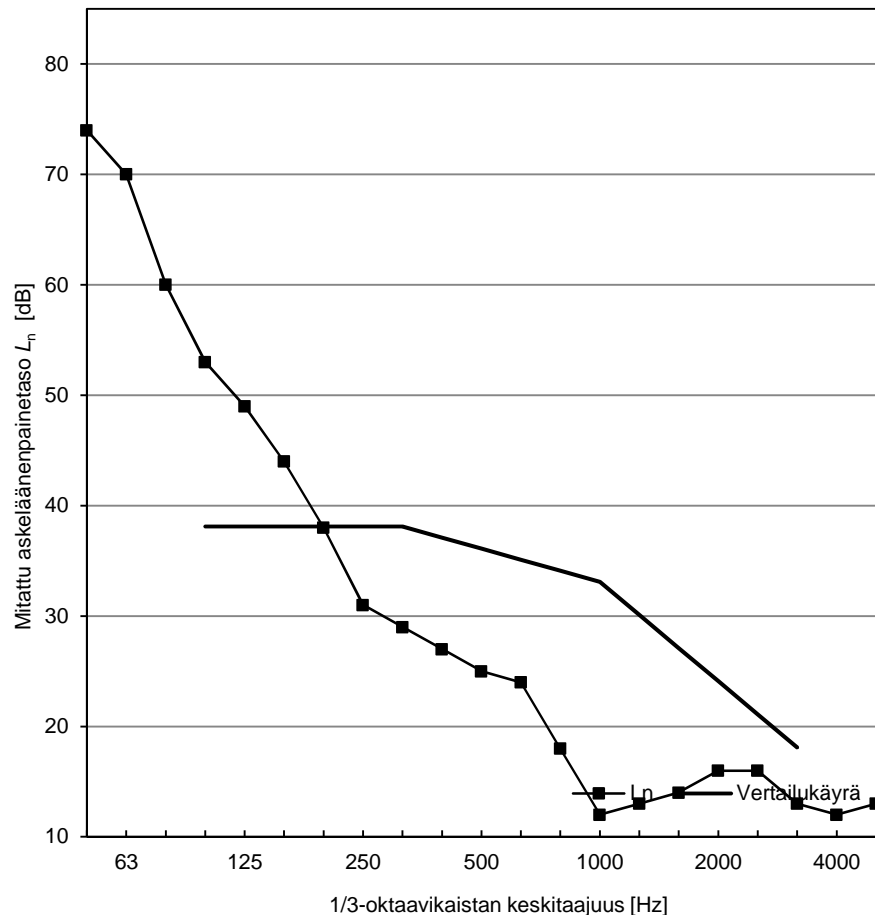
Rakennekerrokset:

	$m'$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$d'$ [mm]
matto		6
aluskerros		9
OBS levy, k305/150	8,8	15
sahat.palkki (38x235)mm, k406		235
* pituus L=3925		
* 1 poikittaistuentalinja palkkikent. lasivilla (152mm)		
akustinen jousiranka, k610		13
*poikittain palkkeihin nähden kipsilevy, k305 ruuvit	11,3	16

Kokonaiskorkeus [mm]

294

$f$ [Hz]	$L_n$ [dB]
50	74
63	70
80	60
100	53
125	49
160	44
200	38
250	31
315	29
400	27
500	25
630	24
800	18
1000	12
1250	13
1600	14
2000	16
2500	16
3150	13
4000	12
5000	13



$S [m^2] = 15$

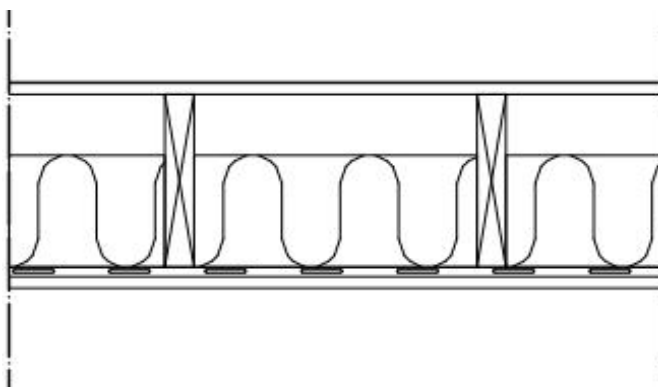
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

$L_{n,w} (C_1) = 36 (4) \text{ dB}$

$C_{1,50-2500} = 25 \text{ dB}$

$L_{n,w} + C_{1,50-2500} = 61 \text{ dB}$



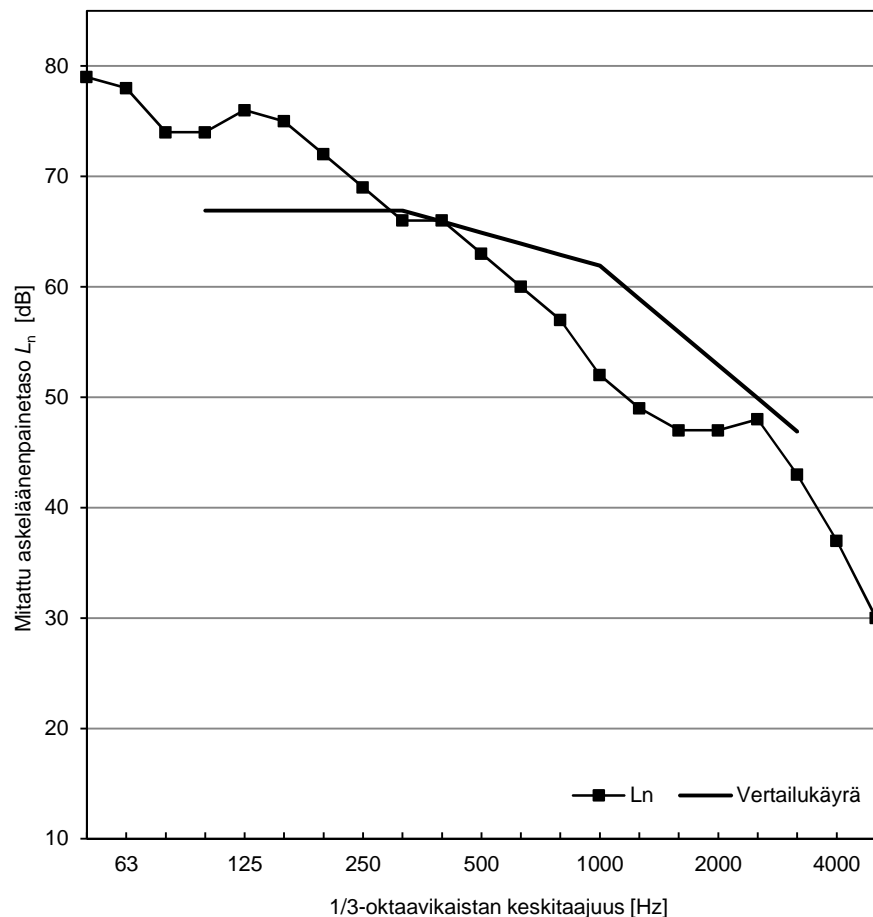
**Rakennekerrokset:**

	$m'$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$d'$ [mm]
vinyyli *halpa hintaluokka		1
OBS levy, k305/150	8,8	15
sahat.palkki (38x235)mm, k406 * pituus L=3925 * 1 poikittaistuentalinja palkkikent. lasivilla (152mm)		235
akustinen jousiranka, k610 *poikittain palkkeihin nähden		13
kipsilevy, k305 ruuvit	11,3	16

**Kokonaiskorkeus [mm]**

280

$f$ [Hz]	$L_n$ [dB]
50	79
63	78
80	74
100	74
125	76
160	75
200	72
250	69
315	66
400	66
500	63
630	60
800	57
1000	52
1250	49
1600	47
2000	47
2500	48
3150	43
4000	37
5000	30



$S [m^2] = 15$

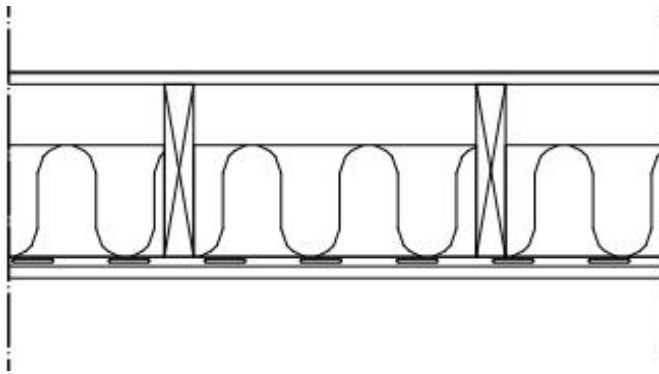
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

$L_{n,w} (C_1) = 65 (1) \text{ dB}$

$C_{1,50-2500} = 5 \text{ dB}$

$L_{n,w} + C_{1,50-2500} = 70 \text{ dB}$



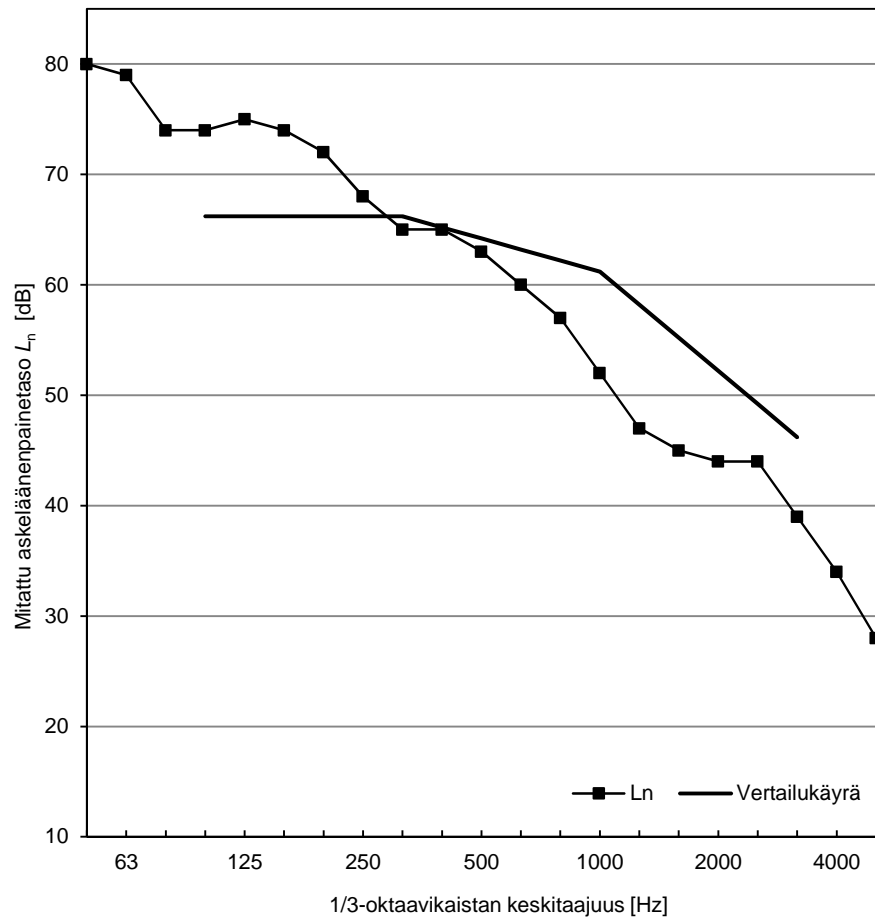
Rakennekerrokset:

	m'	d'
	[kg/m <sup>2</sup> ]	[mm]
vinyyli		2
*kallis hintaluokka		
OBS levy, k305/150	8,8	15
sahat.palkki (38x235)mm, k406		235
* pituus L=3925		
* 1 poikittaistuentalinja palkkikent. lasivilla (152mm)		
akustinen jousiranka, k610		13
*poikittain palkkeihin nähden kipsilevy, k305 ruuvit	11,3	16

Kokonaiskorkeus [mm]

281

f [Hz]	L <sub>n</sub> [dB]
50	80
63	79
80	74
100	74
125	75
160	74
200	72
250	68
315	65
400	65
500	63
630	60
800	57
1000	52
1250	47
1600	45
2000	44
2500	44
3150	39
4000	34
5000	28



S [m<sup>2</sup>] = 15

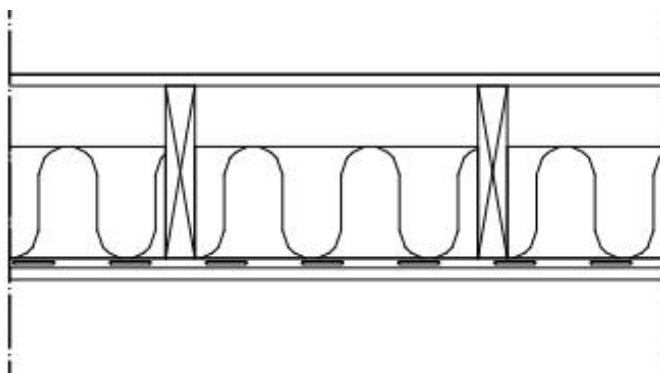
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

L<sub>n,w</sub> (C<sub>1</sub>) = 64 (1) dB

C<sub>1,50-2500</sub> = 6 dB

L<sub>n,w</sub> + C<sub>1,50-2500</sub> = 70 dB



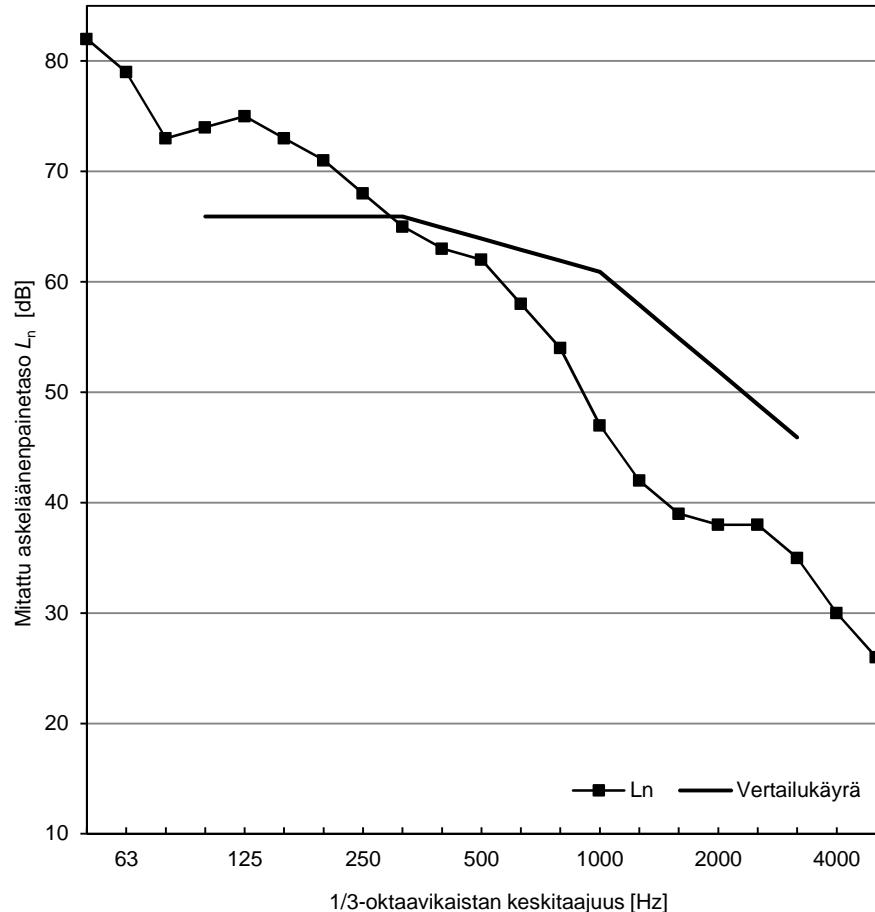
Rakennekerrokset:

	m'	d'
	[kg/m <sup>2</sup> ]	[mm]
vinyyli		1
* keskiverto hintaluokka		
OBS levy, k305/150	8,8	15
sahat.palkki (38x235)mm, k406		235
* pituus L=3925		
* 1 poikittaistuentalinja palkkikent. lasivilla (152mm)		
akustinen jousiranka, k610		13
*poikittain palkkeihin nähden		
kipsilevy, k305 ruuvit	11,3	16

Kokonaiskorkeus [mm]

280

f [Hz]	L <sub>n</sub> [dB]
50	82
63	79
80	73
100	74
125	75
160	73
200	71
250	68
315	65
400	63
500	62
630	58
800	54
1000	47
1250	42
1600	39
2000	38
2500	38
3150	35
4000	30
5000	26



S [m<sup>2</sup>] = 15

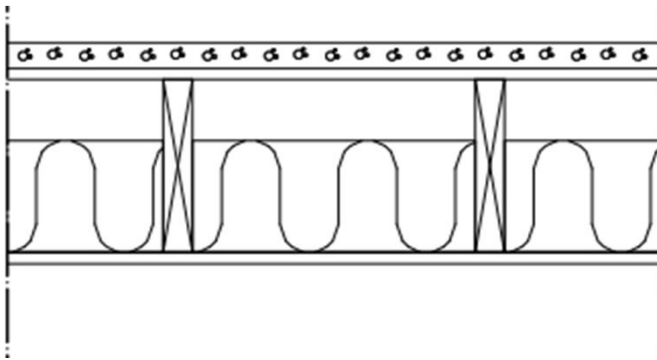
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

L<sub>n,w</sub> (C<sub>1</sub>) = 64 (1) dB

C<sub>1,50-2500</sub> = 7 dB

L<sub>n,w</sub> + C<sub>1,50-2500</sub> = 71 dB



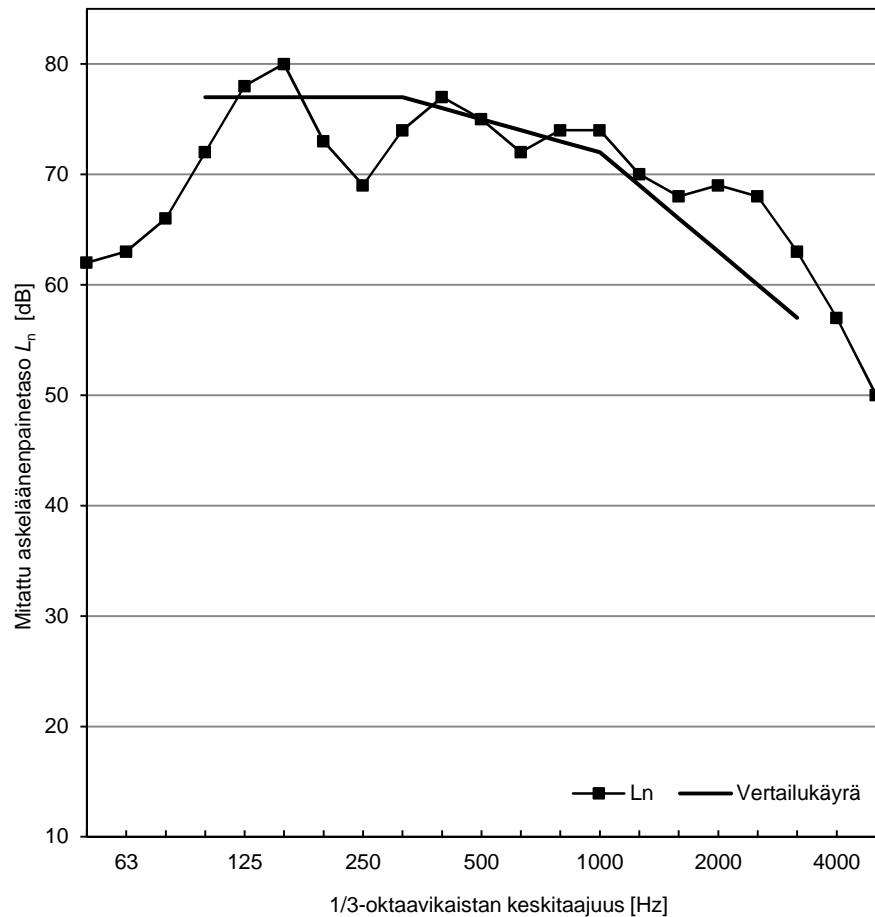
**Rakennekerrokset:**

	$m'$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$d'$ [mm]
betoni, laattaelementti		35
OBS levy, k305/150	8,8	15
sahat.palkki (38x235)mm, k406		235
* pituus L=3925		
* 1 poikittaistuentalinja palkkikent. lasivilla (152mm)		
kipsilevy, k305 ruuvit	11,3	16

**Kokonaiskorkeus [mm]**

**301**

$f$ [Hz]	$L_n$ [dB]
50	62
63	63
80	66
100	72
125	78
160	80
200	73
250	69
315	74
400	77
500	75
630	72
800	74
1000	74
1250	70
1600	68
2000	69
2500	68
3150	63
4000	57
5000	50



$S [m^2] = 15$

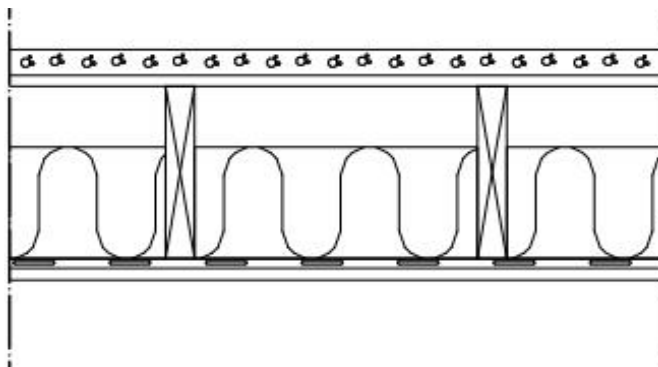
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

$L_{n,w} (C_1) = 75 (-4) \text{ dB}$

$C_{1,50-2500} = -4 \text{ dB}$

$L_{n,w} + C_{1,50-2500} = 71 \text{ dB}$



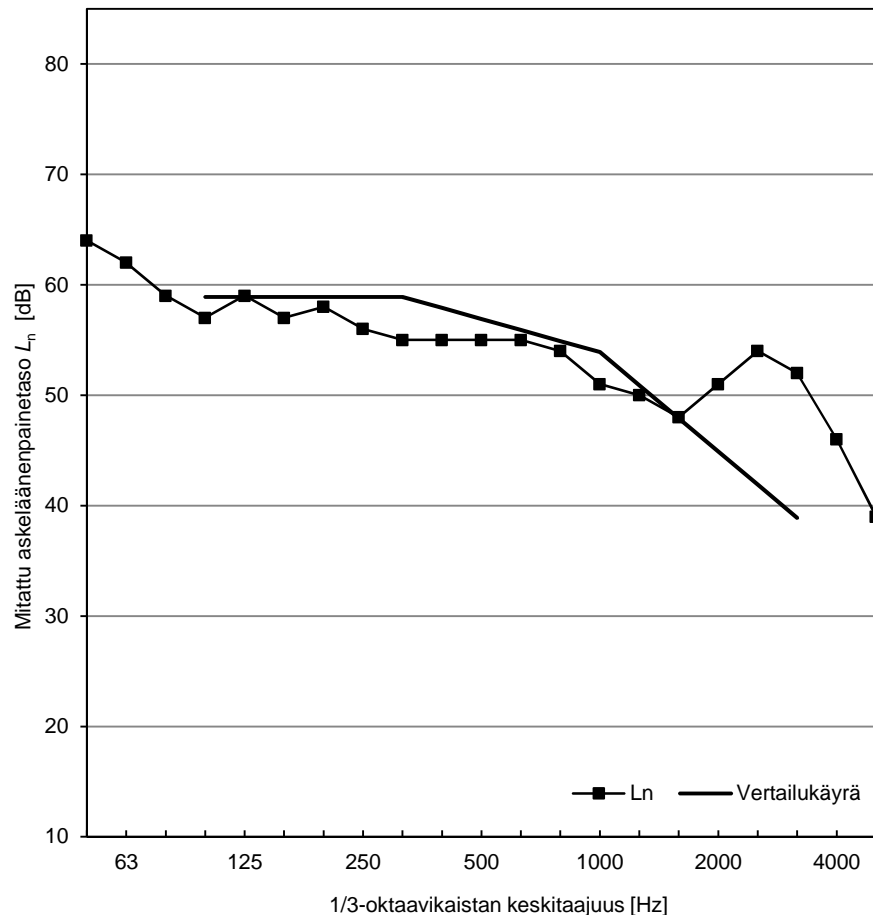
Rakennekerrokset:

	$m'$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$d'$ [mm]
betoni, laattaelementti		35
OBS levy, k305/150	8,8	15
sahat.palkki (38x235)mm, k406		235
* pituus L=3925		
* 1 poikittaistuentalinja palkkikent. lasivilla (152mm)		
akustinen jousiranka, k610		13
*poikittain palkkeihin nähden kipsilevy, k305 ruuvit	11,3	16

Kokonaiskorkeus [mm]

314

$f$ [Hz]	$L_n$ [dB]
50	64
63	62
80	59
100	57
125	59
160	57
200	58
250	56
315	55
400	55
500	55
630	55
800	54
1000	51
1250	50
1600	48
2000	51
2500	54
3150	52
4000	46
5000	39



$S [m^2] = 15$

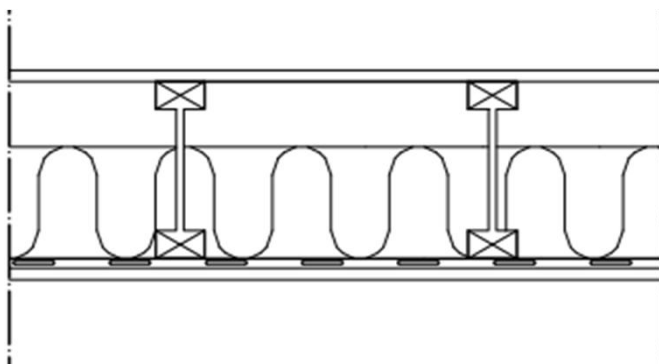
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

$L_{n,w} (C_1) = 57 (-5) \text{ dB}$

$C_{1,50-2500} = -2 \text{ dB}$

$L_{n,w} + C_{1,50-2500} = 55 \text{ dB}$



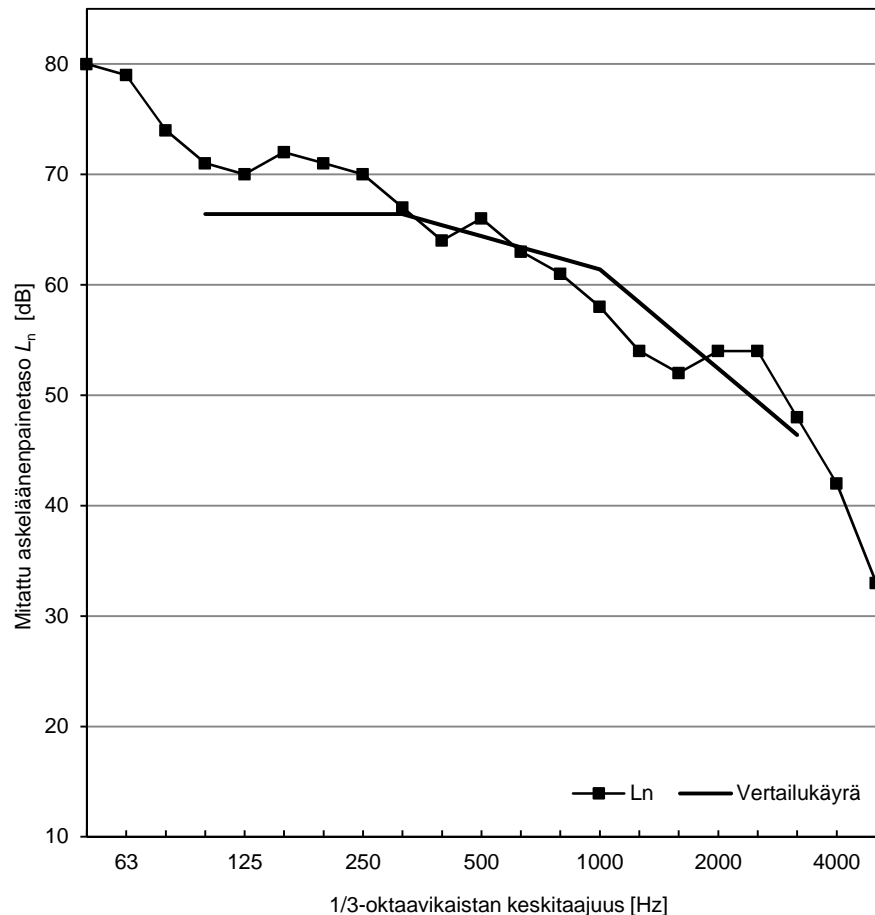
Rakennekerrokset:

	m'	d'
	[kg/m <sup>2</sup> ]	[mm]
OBS levy, k305/150	8,8	15
I-palkki, valmistaja A		241
* laipat (63,5x38)mm		
* uuma OBS 10mm		
*poikittaistuenta OBS 22mm lasivilla (152mm)		
akustinen jousiranka, k610		13
*poikittain palkkeihin nähden kipsilevy, k305 ruuvit	11,3	16

Kokonaiskorkeus [mm]

285

f [Hz]	L <sub>n</sub> [dB]
50	80
63	79
80	74
100	71
125	70
160	72
200	71
250	70
315	67
400	64
500	66
630	63
800	61
1000	58
1250	54
1600	52
2000	54
2500	54
3150	48
4000	42
5000	33



S [m<sup>2</sup>] = 15

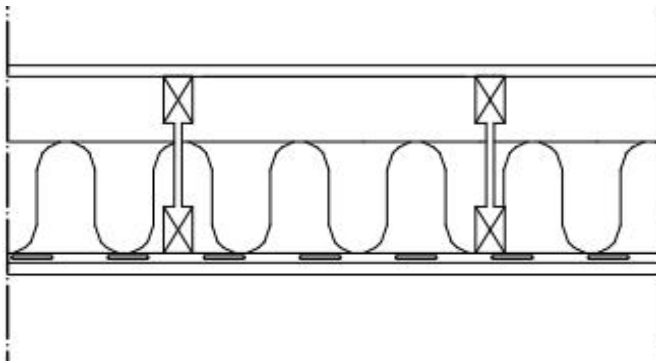
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

L<sub>n,w</sub> (C<sub>1</sub>) = 64 (-1) dB

C<sub>1,50-2500</sub> = 5 dB

L<sub>n,w</sub> + C<sub>1,50-2500</sub> = 70 dB



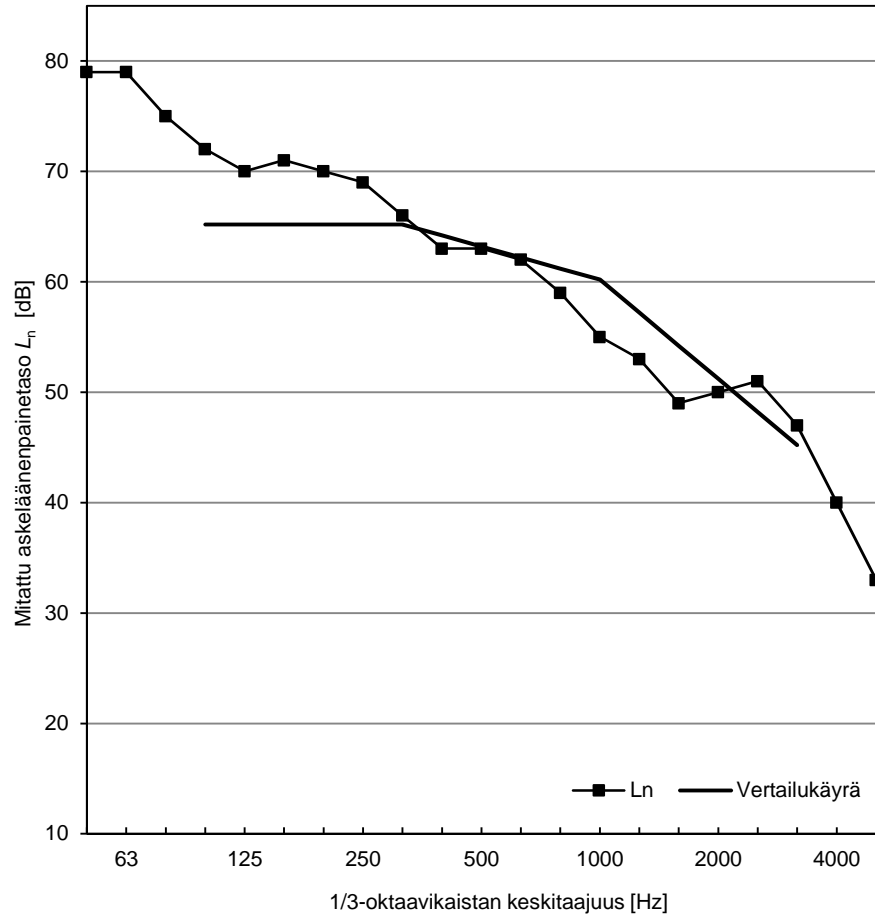
**Rakennekerrokset:**

	$m'$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$d'$ [mm]
OBS levy, k305/150	8,8	15
I-palkki, valmistaja A		241
* laipat (38x63,5)mm		
* uuma OBS 10mm		
*poikittaistuenta OBS 22mm lasivilla (152mm)		
akustinen jousiranka, k610		13
*poikittain palkkeihin nähden kipsilevy, k305 ruuvit	11,3	16

**Kokonaiskorkeus [mm]**

285

$f$ [Hz]	$L_n$ [dB]
50	79
63	79
80	75
100	72
125	70
160	71
200	70
250	69
315	66
400	63
500	63
630	62
800	59
1000	55
1250	53
1600	49
2000	50
2500	51
3150	47
4000	40
5000	33



$S [m^2] = 15$

Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

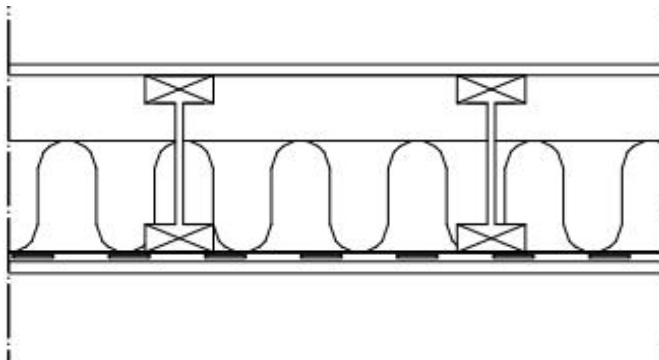
Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

$L_{n,w} (C_1) = 63 (0) \text{ dB}$

$C_{1,50-2500} = 6 \text{ dB}$

$L_{n,w} + C_{1,50-2500} = 69 \text{ dB}$





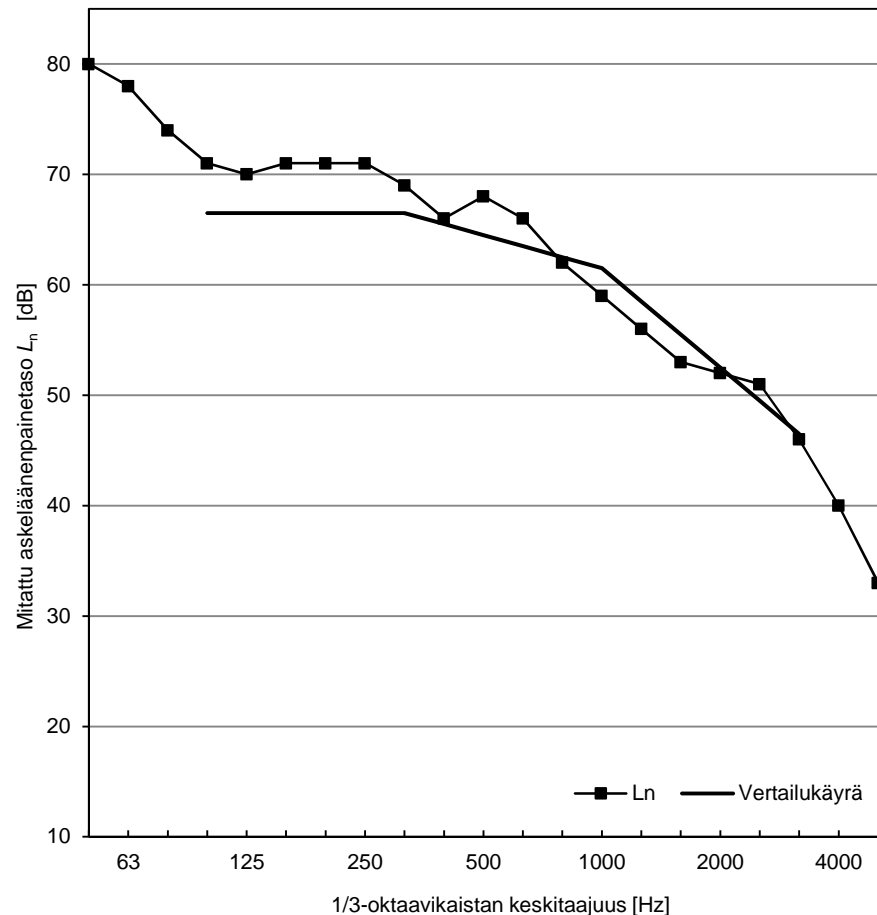
**Rakennekerrokset:**

	$m'$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$d'$ [mm]
OBS levy, k305/150	8,8	15
I-palkki, valmistaja A		241
* laipat (89x38)mm		
* uuma OBS 11mm		
*poikittaistuenta OBS 22mm lasivilla (152mm)		
akustinen jousiranka, k610		13
*poikittain palkkeihin nähden kipsilevy, k305 ruuvit	11,3	16

**Kokonaiskorkeus [mm]**

285

$f$ [Hz]	$L_n$ [dB]
50	80
63	78
80	74
100	71
125	70
160	71
200	71
250	71
315	69
400	66
500	68
630	66
800	62
1000	59
1250	56
1600	53
2000	52
2500	51
3150	46
4000	40
5000	33



$S [m^2] = 15$

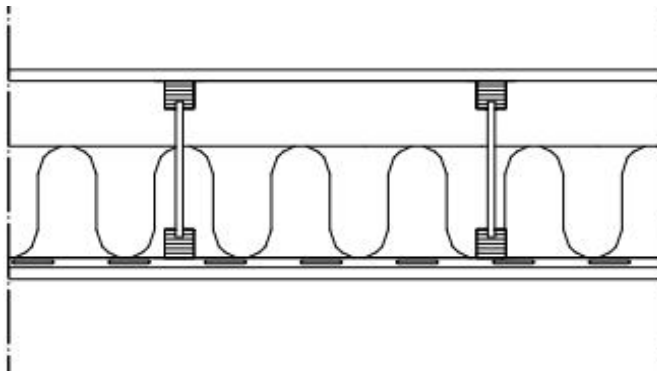
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

$L_{n,w} (C_1) = 65 (0) \text{ dB}$

$C_{1,50-2500} = 5 \text{ dB}$

$L_{n,w} + C_{1,50-2500} = 69 \text{ dB}$



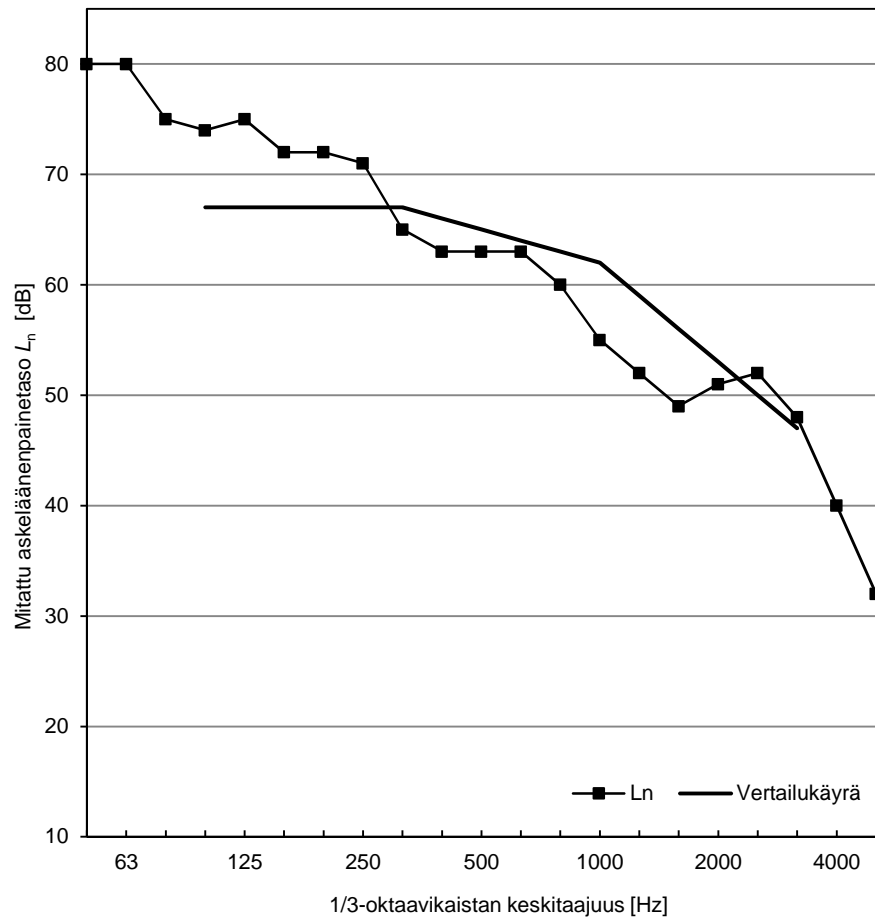
**Rakennekerrokset:**

	$m'$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$d'$ [mm]
OBS levy, k305/150	8,8	15
I-palkki, valmistaja B		241
* laipat (38x38)mm		
* uuma OBS 9,5mm		
*poikittaistuenta OBS 32mm lasivilla (152mm)		
akustinen jousiranka, k610		13
*poikittain palkkeihin nähden kipsilevy, k305 ruuvit	11,3	16

**Kokonaiskorkeus [mm]**

285

$f$ [Hz]	$L_n$ [dB]
50	80
63	80
80	75
100	74
125	75
160	72
200	72
250	71
315	65
400	63
500	63
630	63
800	60
1000	55
1250	52
1600	49
2000	51
2500	52
3150	48
4000	40
5000	32



$S [m^2] = 15$

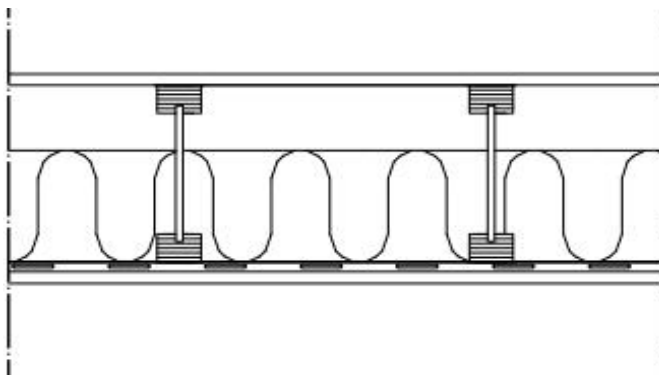
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

$L_{n,w} (C_1) = 65 (0) \text{ dB}$

$C_{1,50-2500} = 5 \text{ dB}$

$L_{n,w} + C_{1,50-2500} = 70 \text{ dB}$



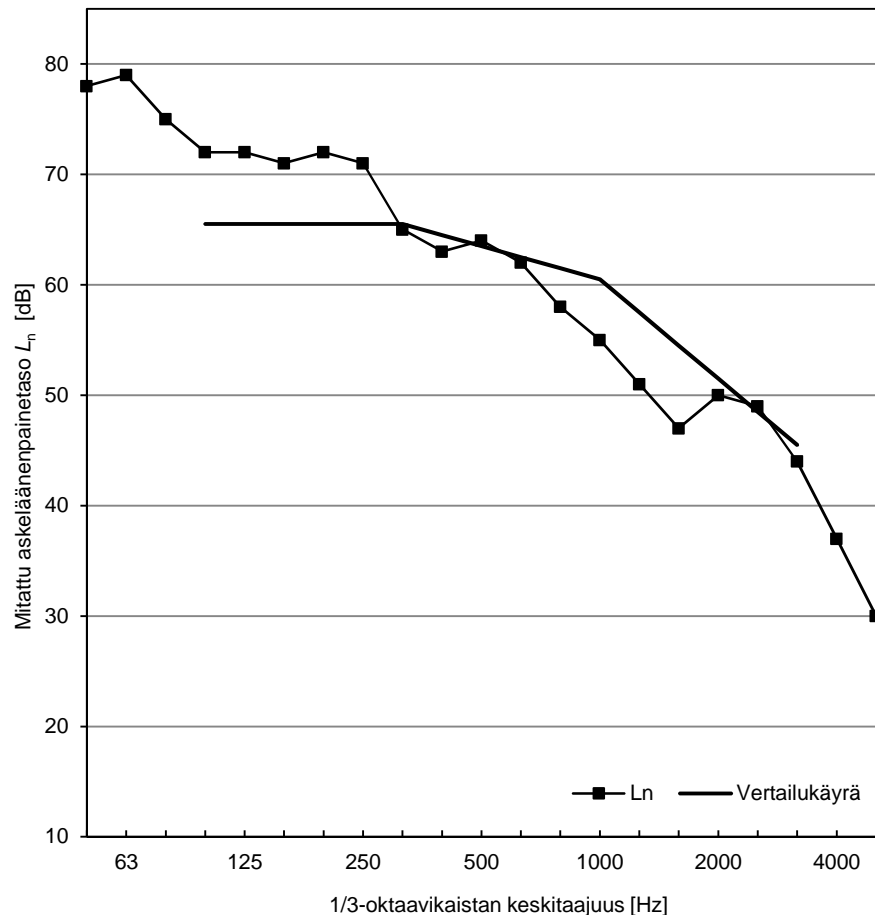
Rakennekerrokset:

	m'	d'
	[kg/m <sup>2</sup> ]	[mm]
OBS levy, k305/150	8,8	15
I-palkki, valmistaja B		241
* laipat (57x38)mm		
* uuma OBS 9,5mm		
*poikittaistuenta OBS 32mm lasivilla (152mm)		
akustinen jousiranka, k610		13
*poikittain palkkeihin nähden kipsilevy, k305 ruuvit	11,3	16

Kokonaiskorkeus [mm]

285

f [Hz]	L <sub>n</sub> [dB]
50	78
63	79
80	75
100	72
125	72
160	71
200	72
250	71
315	65
400	63
500	64
630	62
800	58
1000	55
1250	51
1600	47
2000	50
2500	49
3150	44
4000	37
5000	30



S [m<sup>2</sup>] = 15

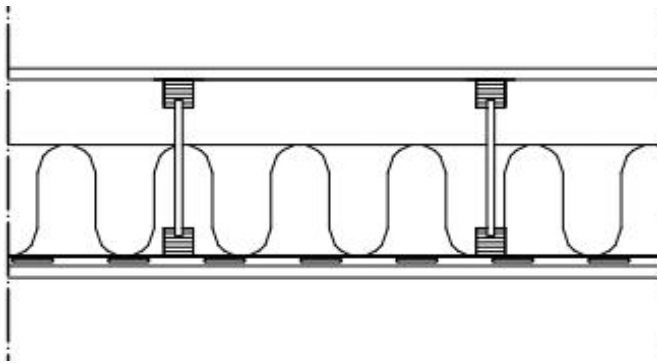
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

L<sub>n,w</sub> (C<sub>1</sub>) = 64 (1) dB

C<sub>1,50-2500</sub> = 6 dB

L<sub>n,w</sub> + C<sub>1,50-2500</sub> = 69 dB



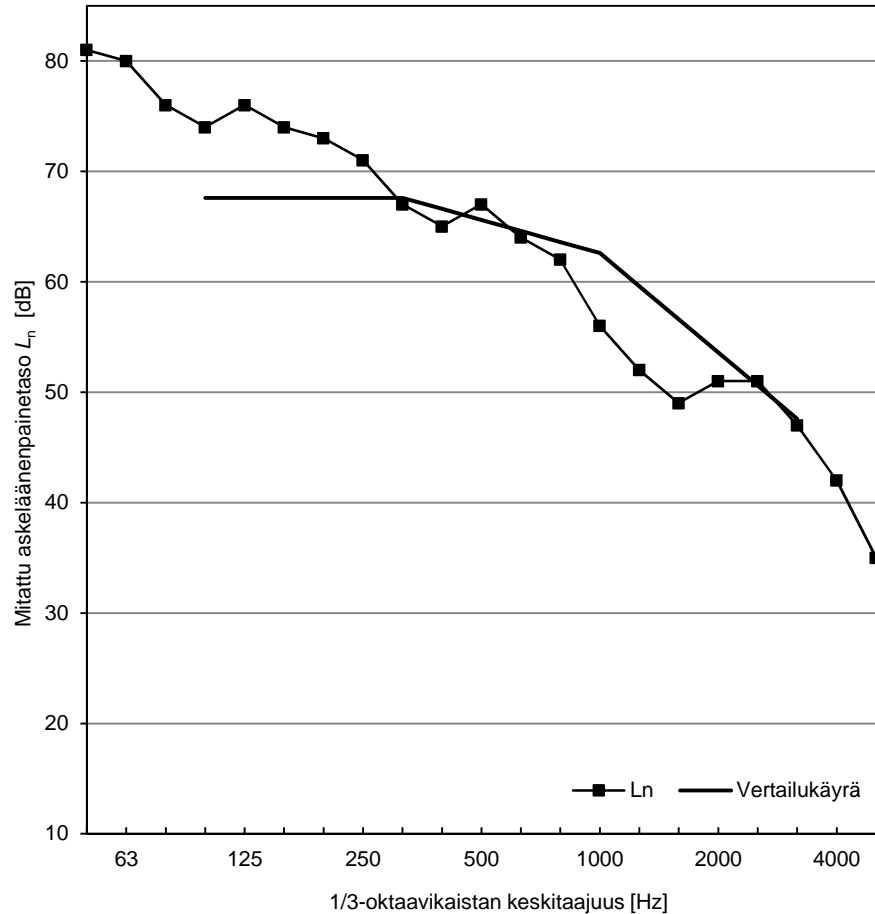
**Rakennekerrokset:**

	$m'$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$d'$ [mm]
OBS levy, k305/150	8,8	15
I-palkki, valmistaja C		241
* laipat (38x38)mm		
* uuma vaneri 9,5mm		
*poikittaistuenta OBS 25mm lasivilla (152mm)		
akustinen jousiranka, k610		13
*poikittain palkkeihin nähden kipsilevy, k305 ruuvit	11,3	16

**Kokonaiskorkeus [mm]**

285

$f$ [Hz]	$L_n$ [dB]
50	81
63	80
80	76
100	74
125	76
160	74
200	73
250	71
315	67
400	65
500	67
630	64
800	62
1000	56
1250	52
1600	49
2000	51
2500	51
3150	47
4000	42
5000	35



$S [m^2] = 15$

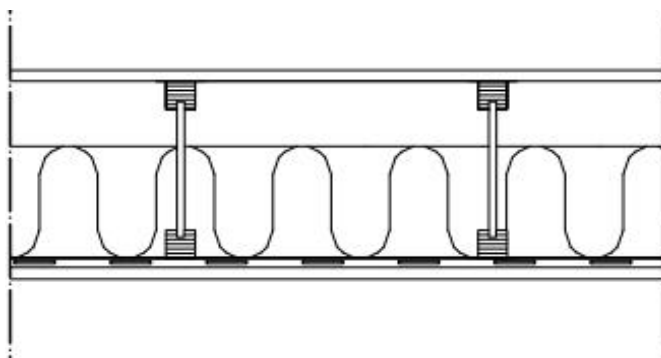
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

$L_{n,w} (C_1) = 66 (1) \text{ dB}$

$C_{1,50-2500} = 5 \text{ dB}$

$L_{n,w} + C_{1,50-2500} = 71 \text{ dB}$



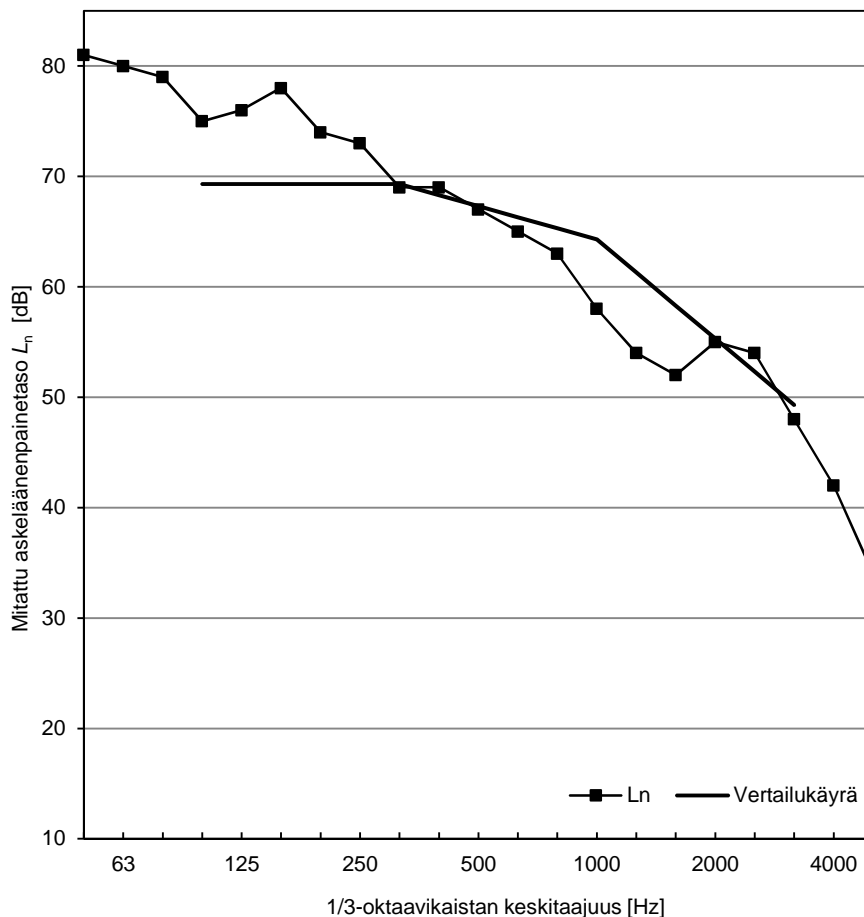
Rakennekerrokset:

	$m'$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$d'$ [mm]
OBS levy, k305/150	8,8	15
I-palkki, valmistaja D		241
* laipat (38x38)mm		
* uuma OBS 10 mm		
* poikittaistuenta OBS 25mm lasivilla (152mm)		
akustinen jousiranka, k610		13
* poikittain palkkeihin nähden kipsilevy, k305 ruuvit	11,3	16

Kokonaiskorkeus [mm]

285

$f$ [Hz]	$L_n$ [dB]
50	81
63	80
80	79
100	75
125	76
160	78
200	74
250	73
315	69
400	69
500	67
630	65
800	63
1000	58
1250	54
1600	52
2000	55
2500	54
3150	48
4000	42
5000	34



$S [m^2] = 15$

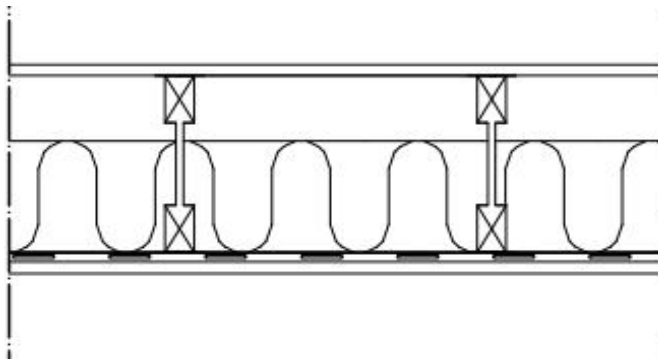
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

$L_{n,w} (C_1) = 67 (1) \text{ dB}$

$C_{1,50-2500} = 5 \text{ dB}$

$L_{n,w} + C_{1,50-2500} = 72 \text{ dB}$



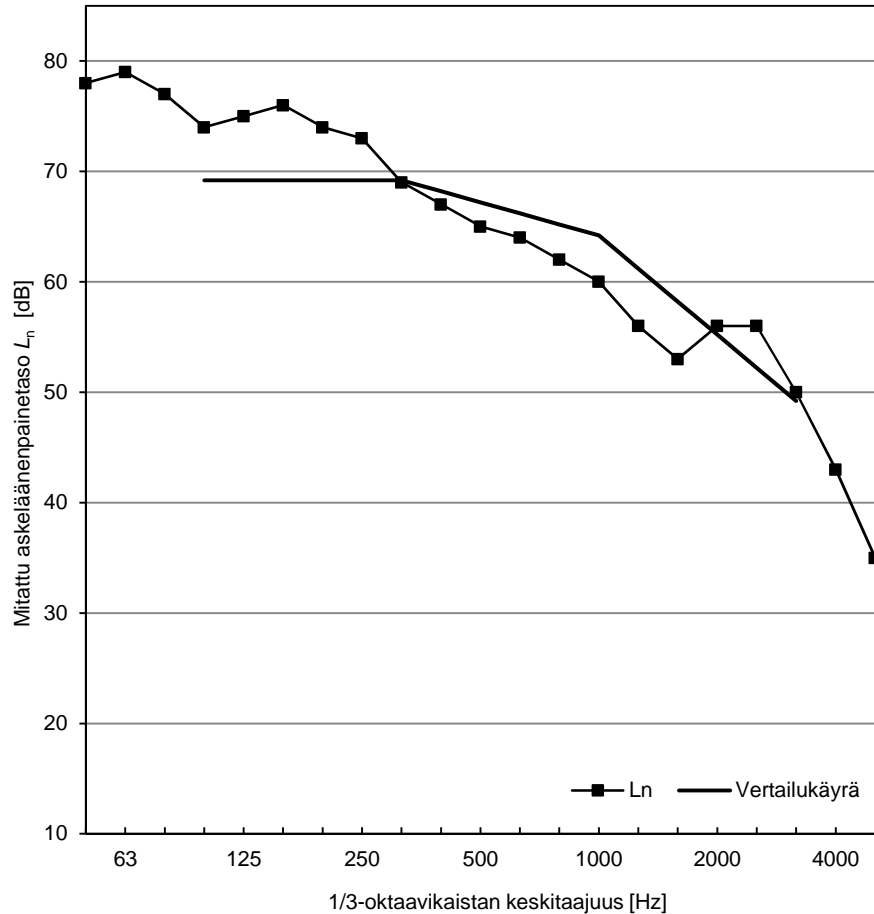
Rakennekerrokset:

	$m'$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$d'$ [mm]
OBS levy, k305/150	8,8	15
I-palkki, valmistaja E		241
* laipat (38x64)mm		
* uuma OBS 9,5 mm		
* poikittaistuenta OBS 28mm lasivilla (152mm)		
akustinen jousiranka, k610		13
* poikittain palkkeihin nähden kipsilevy, k305 ruuvit	11,3	16

Kokonaiskorkeus [mm]

285

$f$ [Hz]	$L_n$ [dB]
50	78
63	79
80	77
100	74
125	75
160	76
200	74
250	73
315	69
400	67
500	65
630	64
800	62
1000	60
1250	56
1600	53
2000	56
2500	56
3150	50
4000	43
5000	35



$S [m^2] = 15$

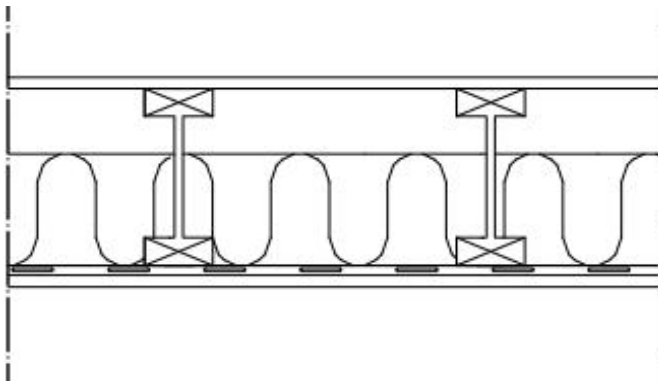
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

$L_{n,w} (C_1) = 67 (0) \text{ dB}$

$C_{1,50-2500} = 3 \text{ dB}$

$L_{n,w} + C_{1,50-2500} = 71 \text{ dB}$



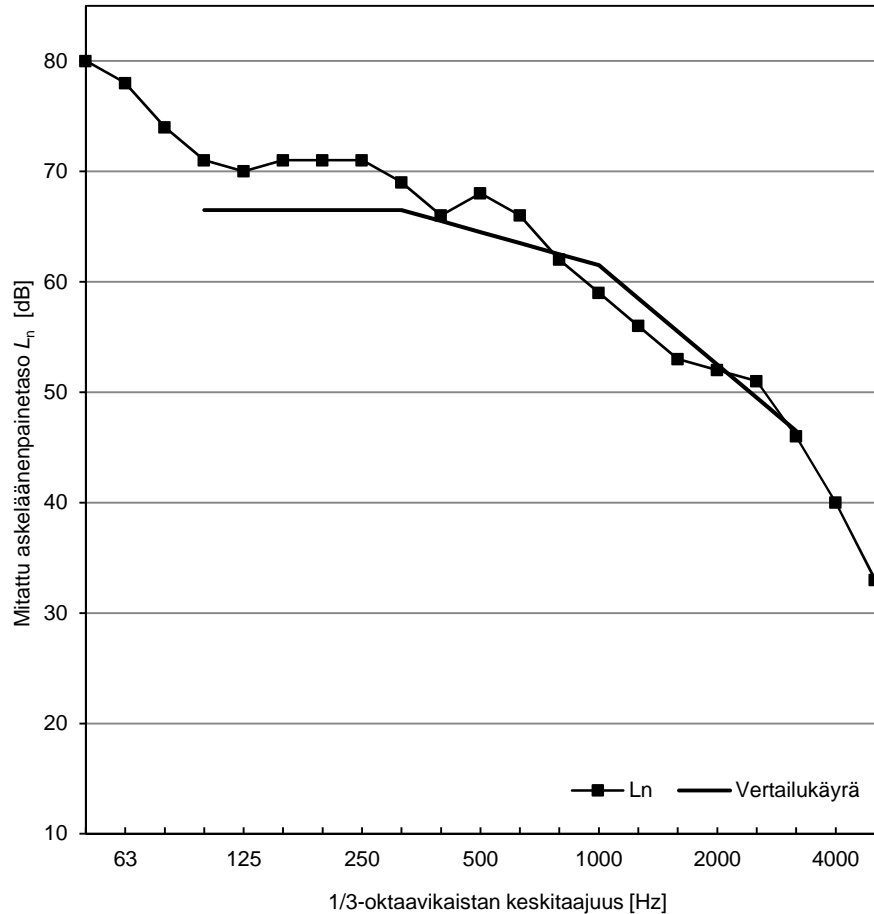
**Rakennekerrokset:**

	$m'$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$d'$ [mm]
OBS levy, k305/150 ruuvit	8,8	15
I-palkki, valmistaja A		241
* laipat (89x38)mm		
* uuma OBS 11 mm		
* poikittaistuenta OBS 22mm lasivilla (152mm)		
akustinen jousiranka, k610		13
* poikittain palkkeihin nähden kipsilevy, k305 ruuvit	11,3	16

**Kokonaiskorkeus [mm]**

285

$f$ [Hz]	$L_n$ [dB]
50	80
63	78
80	74
100	71
125	70
160	71
200	71
250	71
315	69
400	66
500	68
630	66
800	62
1000	59
1250	56
1600	53
2000	52
2500	51
3150	46
4000	40
5000	33



$S [m^2] = 15$

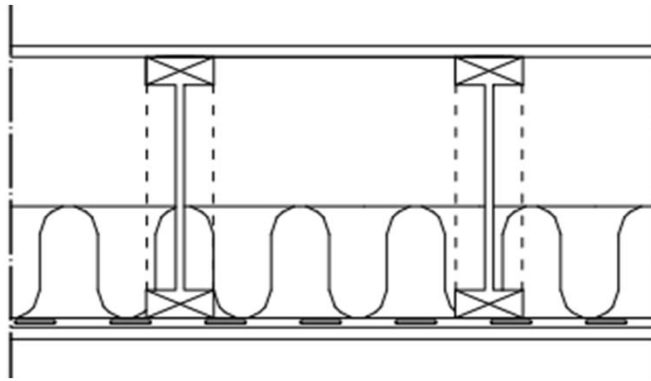
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

$L_{n,w} (C_1) = 65 (0) \text{ dB}$

$C_{1,50-2500} = 5 \text{ dB}$

$L_{n,w} + C_{1,50-2500} = 69 \text{ dB}$



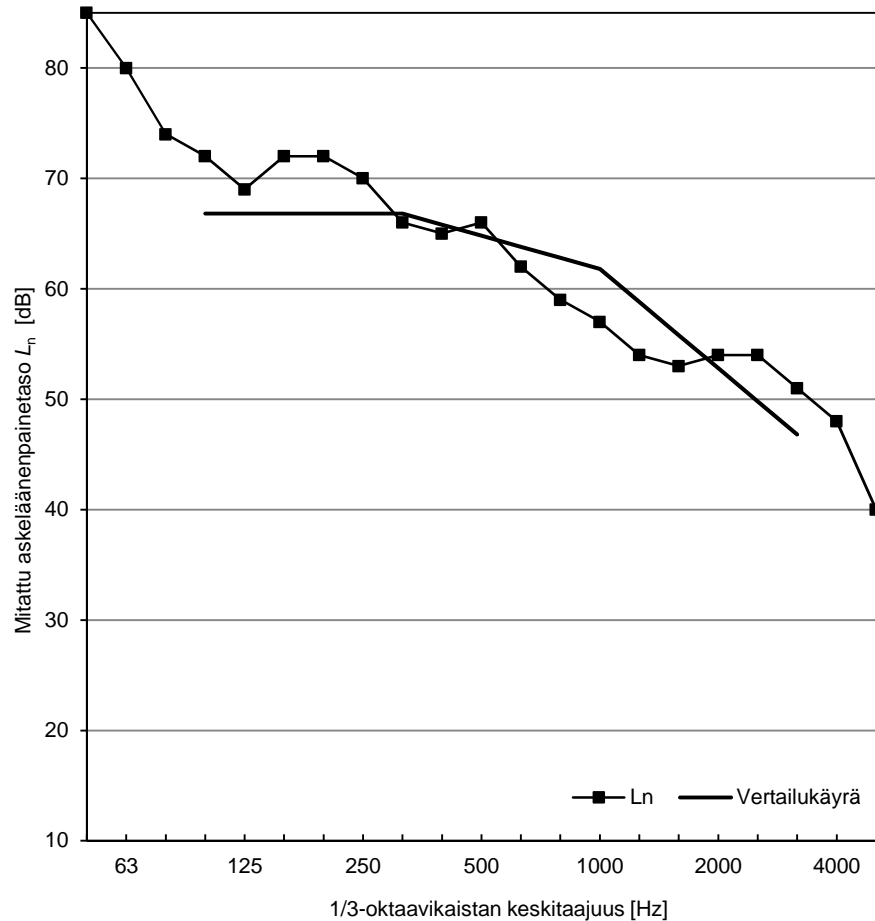
Rakennekerrokset:

	$m'$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$d'$ [mm]
OSB-levy	8,8	15
I-palkki, valmistaja A		355
* laipat (89x38)mm		
* uuma OSB 11 mm		
* poikittaistuenta OSB 19mm		
lasivilla (152mm)		
akustinen jousiranka, k610		13
* poikittain palkkeihin nähden		
kipsilevy, k305 ruuvit	11,3	16

Kokonaiskorkeus [mm]

399

$f$ [Hz]	$L_n$ [dB]
50	85
63	80
80	74
100	72
125	69
160	72
200	72
250	70
315	66
400	65
500	66
630	62
800	59
1000	57
1250	54
1600	53
2000	54
2500	54
3150	51
4000	48
5000	40



$S [m^2] = 15$

Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

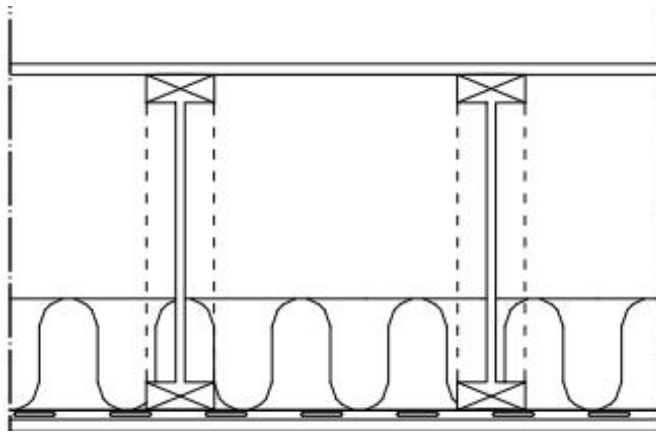
Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

$L_{n,w} (C_1) = 65 (-1) \text{ dB}$

$C_{1,50-2500} = 7 \text{ dB}$

$L_{n,w} + C_{1,50-2500} = 72 \text{ dB}$





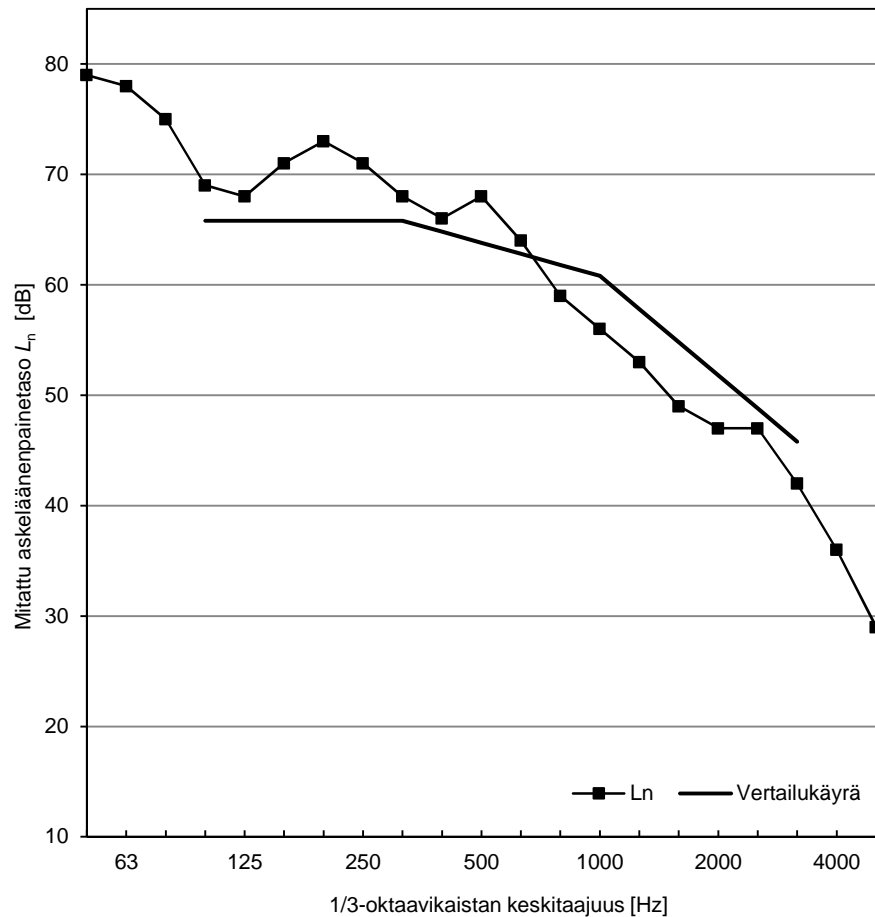
Rakennekerrokset:

	m'	d'
	[kg/m <sup>2</sup> ]	[mm]
latulevy		15
I-palkki, valmistaja A		457
* laipat (89x38)mm		
* uuma OSB 12 mm		
* poikittaistuenta OSB 19mm lasivilla (152mm)		
akustinen jousiranka, k610		13
* poikittain palkkeihin nähden kipsilevy, k305 ruuvit	11,3	16

Kokonaiskorkeus [mm]

501

f [Hz]	L <sub>n</sub> [dB]
50	79
63	78
80	75
100	69
125	68
160	71
200	73
250	71
315	68
400	66
500	68
630	64
800	59
1000	56
1250	53
1600	49
2000	47
2500	47
3150	42
4000	36
5000	29



S [m<sup>2</sup>] = 15

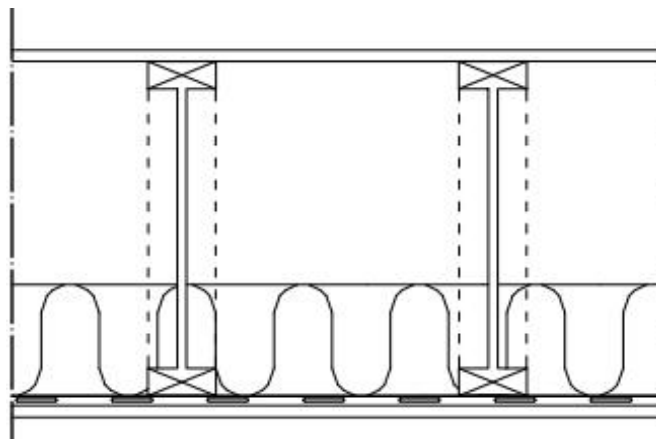
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

L<sub>n,w</sub> (C<sub>1</sub>) = 64 (0) dB

C<sub>1,50-2500</sub> = 5 dB

L<sub>n,w</sub> + C<sub>1,50-2500</sub> = 69 dB



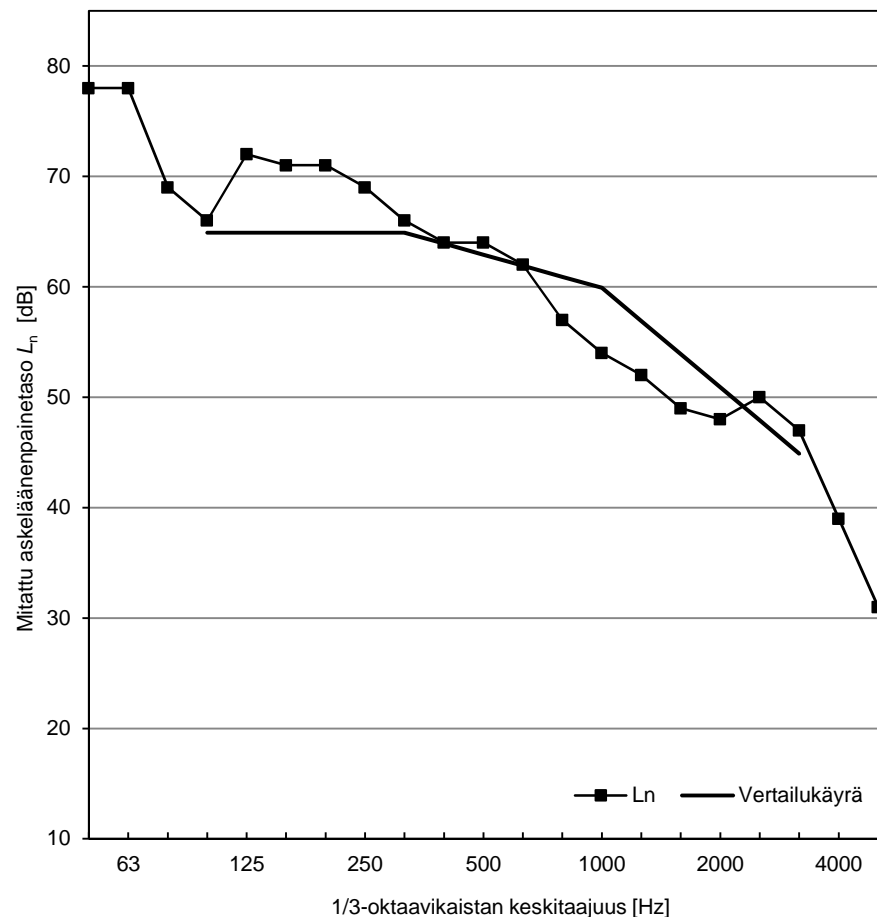
**Rakennekerrokset:**

	$m'$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$d'$ [mm]
OSB-levy, ruuvit k150/305	8,8	15
I-palkki, valmistaja A		457
* laipat (89x38)mm		
* uuma OSB 12 mm		
* poikittaistuenta OSB 19mm lasivilla (152mm)		
akustinen jousiranka, k610		13
* poikittain palkkeihin nähden kipsilevy, k305 ruuvit	11,3	16

**Kokonaiskorkeus [mm]**

501

$f$ [Hz]	$L_n$ [dB]
50	78
63	78
80	69
100	66
125	72
160	71
200	71
250	69
315	66
400	64
500	64
630	62
800	57
1000	54
1250	52
1600	49
2000	48
2500	50
3150	47
4000	39
5000	31



$S [m^2] = 15$

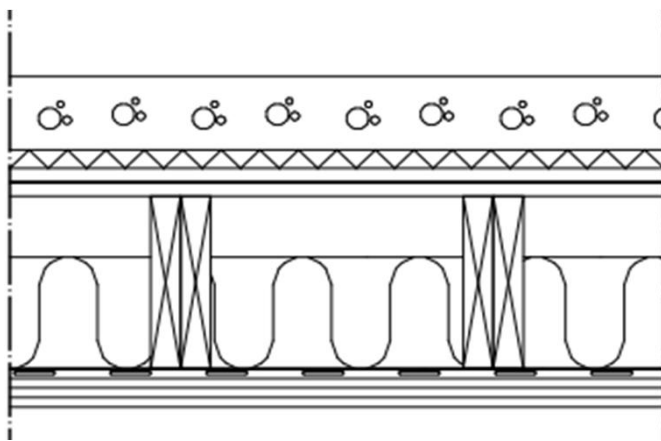
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

$L_{n,w} (C_1) = 63 (0) \text{ dB}$

$C_{1,50-2500} = 5 \text{ dB}$

$L_{n,w} + C_{1,50-2500} = 68 \text{ dB}$



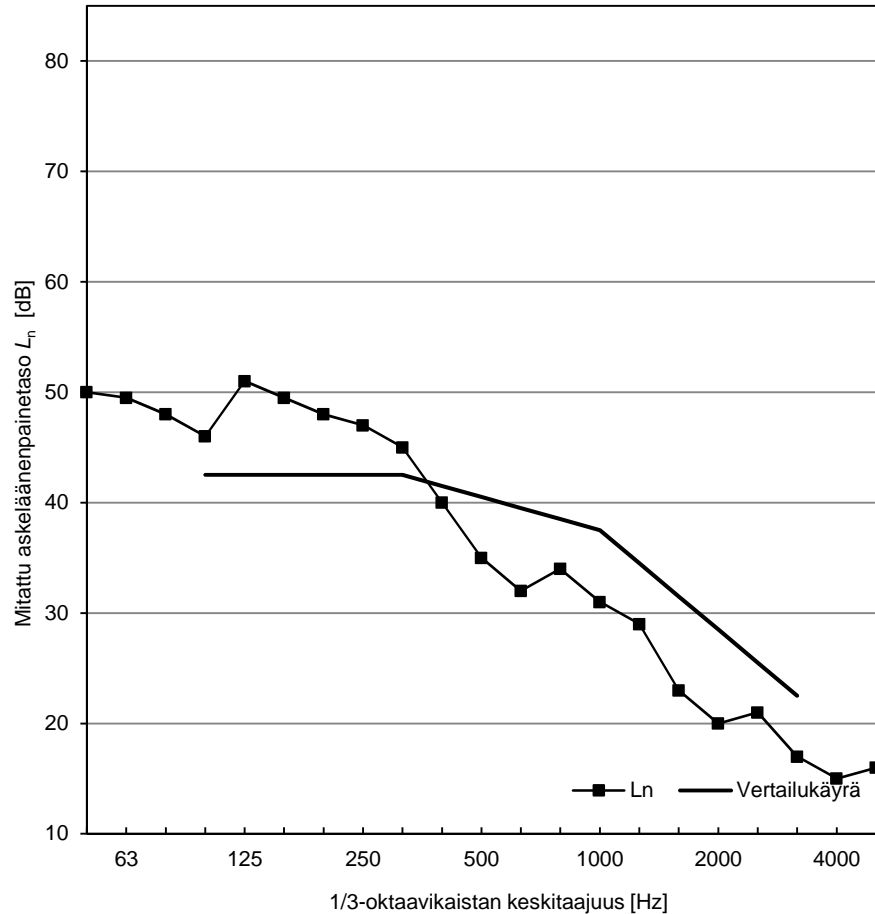
Rakennekerrokset:

	m'	d'
	[kg/m <sup>2</sup> ]	[mm]
betoni, laattaelementti		100
joustava kerros		25
* ei muita tietoja saatavissa		
2x OBS levy (19mm)		38
2x sahat. palkki (39x235)mm		235
* k406		
lasivilla (~152mm)		
metalliprofiili, k610		13
* korkeus arvioitu		
3x kipsilevy (13mm)		39

Kokonaiskorkeus [mm]

450

f [Hz]	L <sub>n</sub> [dB]
50	50
63	50
80	48
100	46
125	51
160	50
200	48
250	47
315	45
400	40
500	35
630	32
800	34
1000	31
1250	29
1600	23
2000	20
2500	21
3150	17
4000	15
5000	16



S [m<sup>2</sup>] = 15

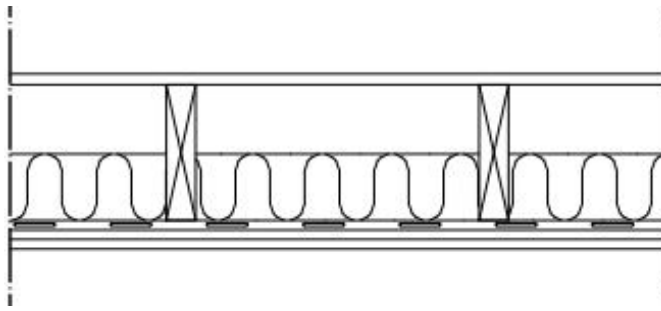
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Väliohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

L<sub>n,w</sub> (C<sub>1</sub>) = 41 (1) dB

C<sub>1,50-2500</sub> = 3 dB

L<sub>n,w</sub> + C<sub>1,50-2500</sub> = 43 dB



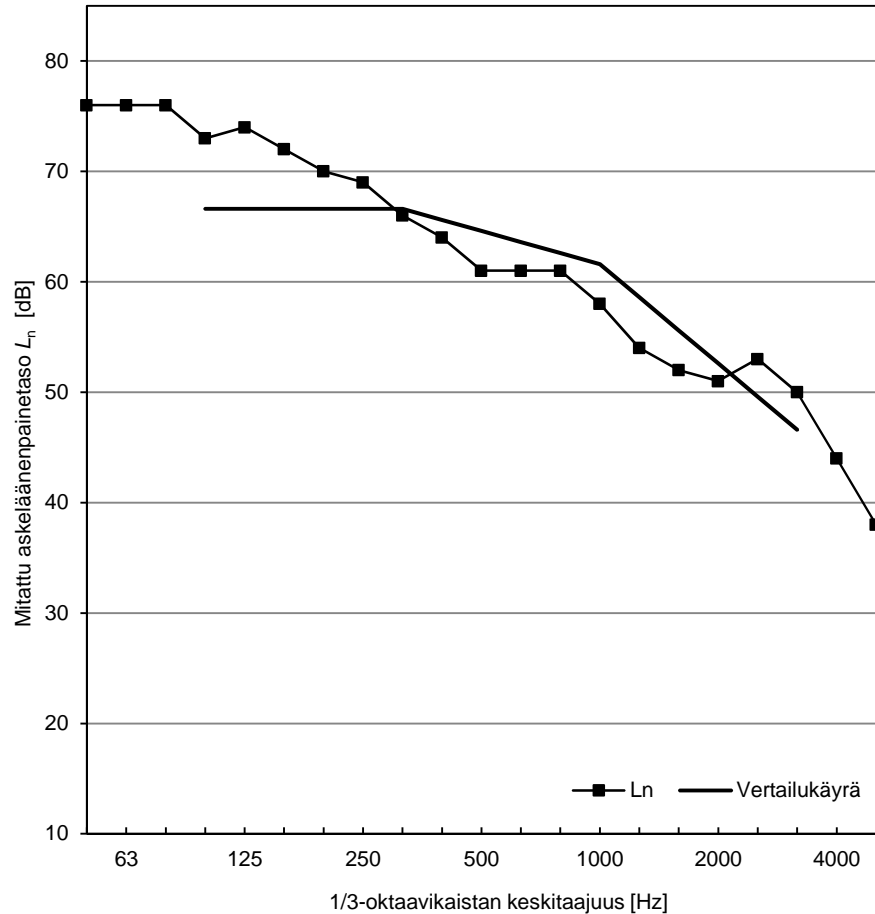
Rakennekerrokset:

	$m'$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$d'$ [mm]
vaneri	6,8	15
sahat.palkki (38x184), k406		184
lasivilla (90mm)		
akustinen jousiranka, k406		13
* poikittain palkkeihin nähden 2x 13mm kipsilevy		26
kipsilevyn $m'=9,3\text{kg/m}^2$		

Kokonaiskorkeus [mm]

238

$f$ [Hz]	$L_n$ [dB]
50	76
63	76
80	76
100	73
125	74
160	72
200	70
250	69
315	66
400	64
500	61
630	61
800	61
1000	58
1250	54
1600	52
2000	51
2500	53
3150	50
4000	44
5000	38



$S$  [m<sup>2</sup>] = 15

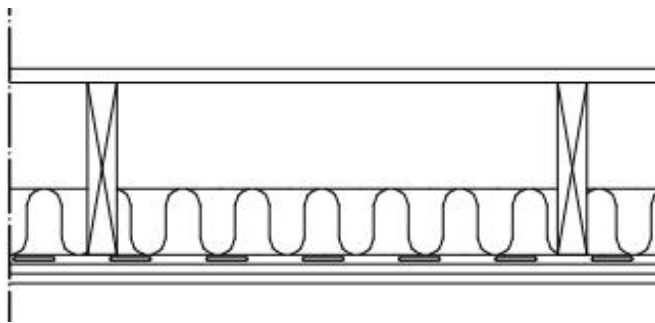
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

$L_{n,w}(C_1) = 65$  (0) dB

$C_{1,50-2500} = 4$  dB

$L_{n,w} + C_{1,50-2500} = 68$  dB



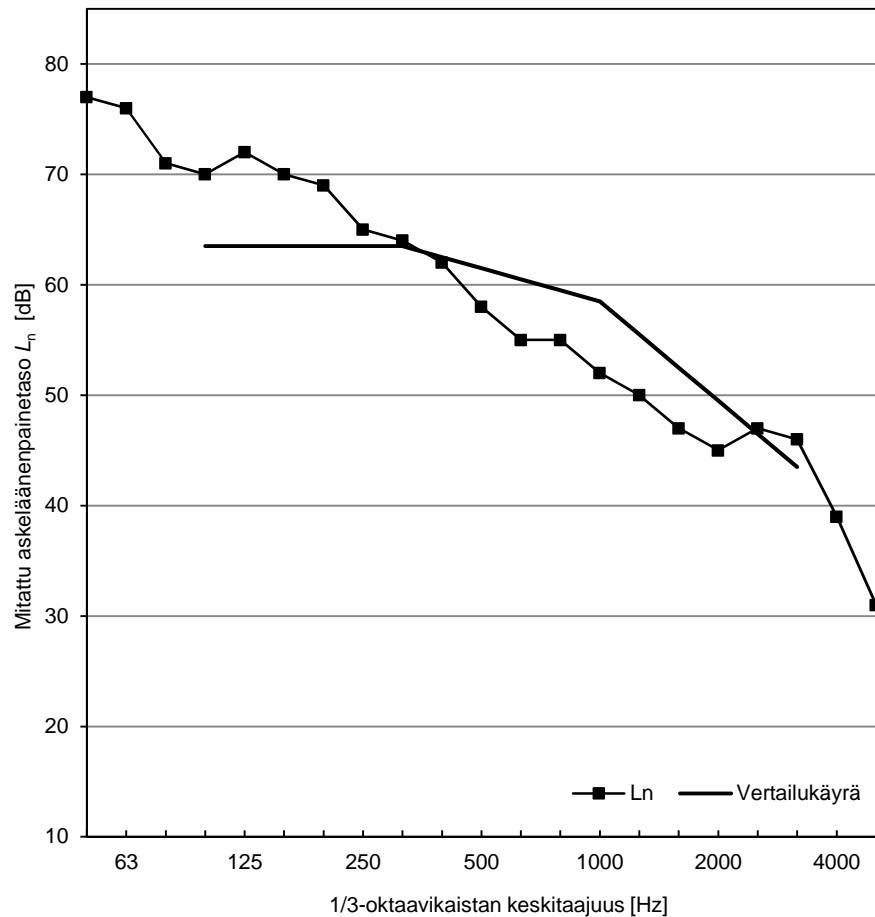
Rakennekerrokset:

	m'	d'
	[kg/m <sup>2</sup> ]	[mm]
vaneri	8,6	19
sahat.palkki (38x235), k610		235
mineraalivilla (90mm)		
akustinen jousiranka, k610		13
* poikittain palkkeihin nähden		
2x 13mm kipsilevy		26
kipsilevyn m'=9,9kg/m <sup>2</sup>		

Kokonaiskorkeus [mm]

293

f [Hz]	L <sub>n</sub> [dB]
50	77
63	76
80	71
100	70
125	72
160	70
200	69
250	65
315	64
400	62
500	58
630	55
800	55
1000	52
1250	50
1600	47
2000	45
2500	47
3150	46
4000	39
5000	31



S [m<sup>2</sup>] = 15

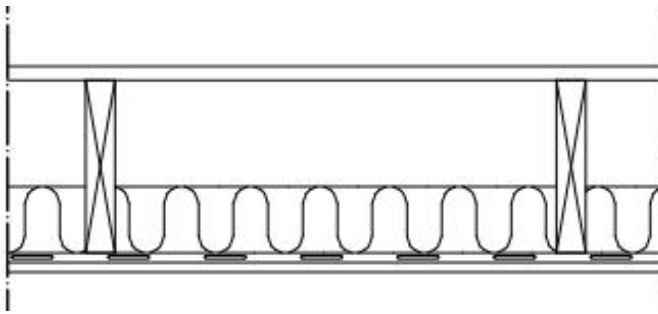
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

L<sub>n,w</sub> (C<sub>1</sub>) = 62 (1) dB

C<sub>1,50-2500</sub> = 5 dB

L<sub>n,w</sub> + C<sub>1,50-2500</sub> = 67 dB



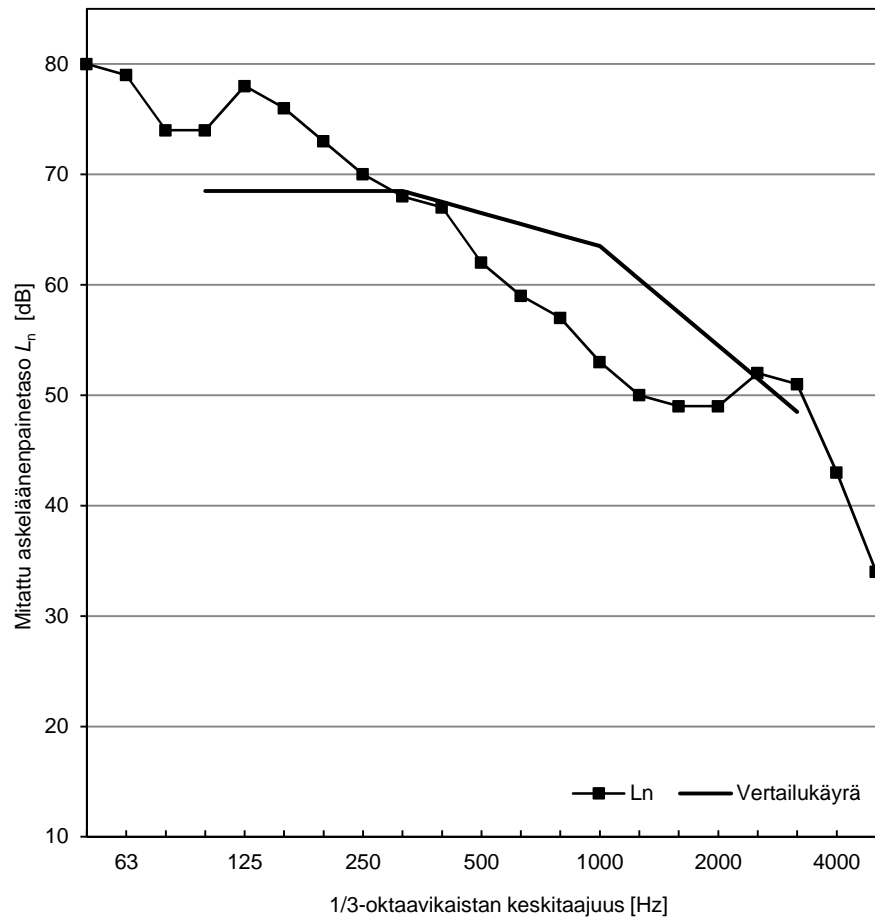
Rakennekerrokset:

	$m'$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$d'$ [mm]
vaneri	8,6	19
sahat.palkki (38x235), k610		235
mineraalivilla (90mm)		
akustinen jousiranka, k610		13
* poikittain palkkeihin nähden kipsilevy	9,8	13

Kokonaiskorkeus [mm]

280

$f$ [Hz]	$L_n$ [dB]
50	80
63	79
80	74
100	74
125	78
160	76
200	73
250	70
315	68
400	67
500	62
630	59
800	57
1000	53
1250	50
1600	49
2000	49
2500	52
3150	51
4000	43
5000	34



$S [m^2] = 15$

Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

$L_{n,w} (C_1) = 67 (1) \text{ dB}$

$C_{1,50-2500} = 4 \text{ dB}$

$L_{n,w} + C_{1,50-2500} = 71 \text{ dB}$



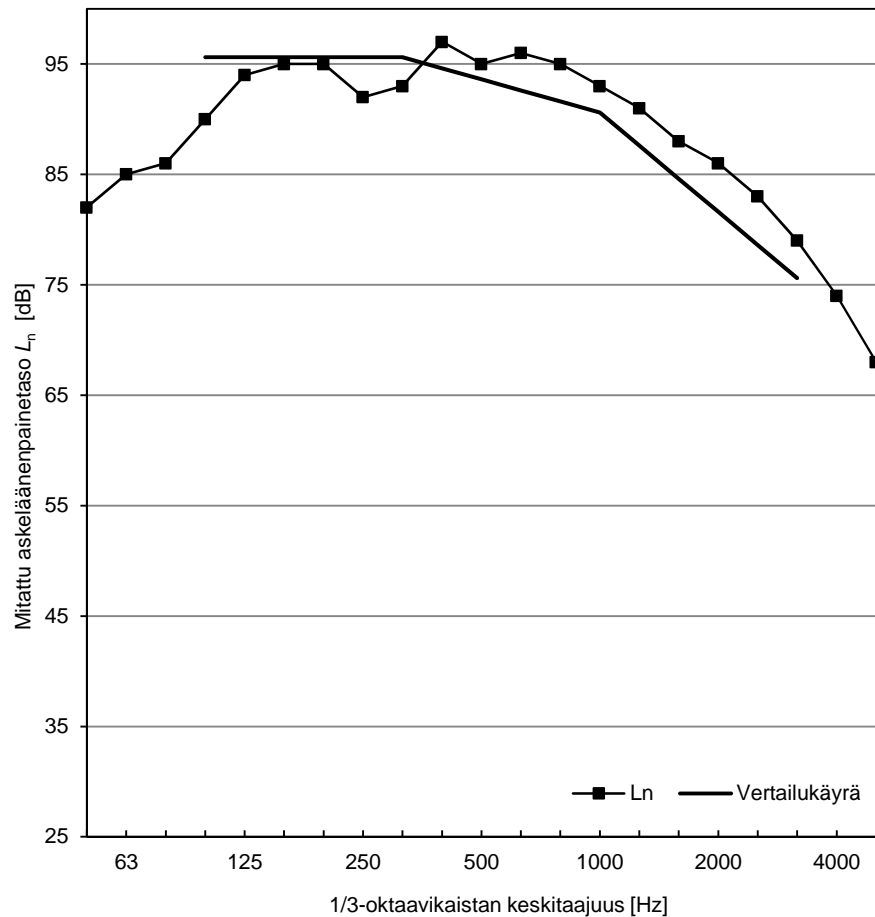
Rakennekerrokset:

	m'	d'
	[kg/m <sup>2</sup> ]	[mm]
vaneri	8,6	19
sahat.palkki (38x235), k610		235

Kokonaiskorkeus [mm]

254

f [Hz]	L <sub>n</sub> [dB]
50	82
63	85
80	86
100	90
125	94
160	95
200	95
250	92
315	93
400	97
500	95
630	96
800	95
1000	93
1250	91
1600	88
2000	86
2500	83
3150	79
4000	74
5000	68



S [m<sup>2</sup>] = 15

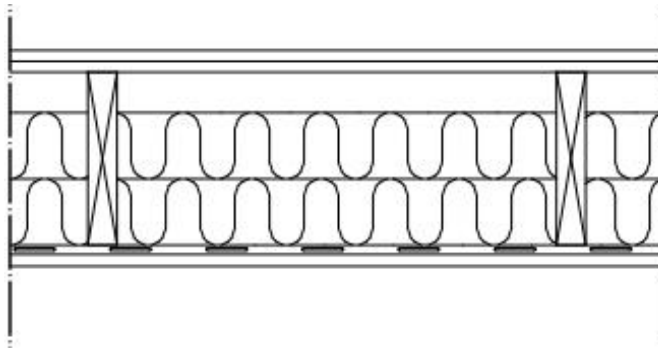
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

L<sub>n,w</sub> (C<sub>l</sub>) = 94 (-3) dB

C<sub>l,50-2500</sub> = -3 dB

L<sub>n,w</sub> + C<sub>l,50-2500</sub> = 90 dB



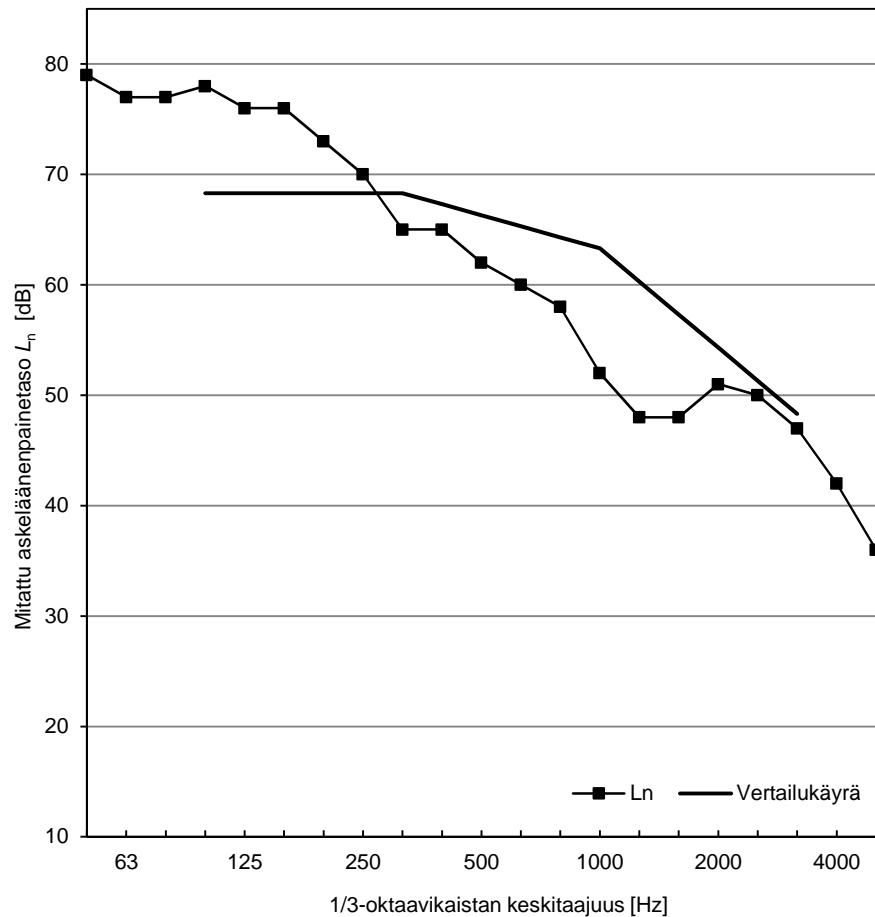
Rakennekerrokset:

	m'	d'
	[kg/m <sup>2</sup> ]	[mm]
2x 15mm vaneri	13,4	30
sahat.palkki (38x235), k610		235
2x90mm mineraalivilla		13
akustinen jousiranka k406		16
kipsilevy	11,2	

Kokonaiskorkeus [mm]

294

f [Hz]	L <sub>n</sub> [dB]
50	79
63	77
80	77
100	78
125	76
160	76
200	73
250	70
315	65
400	65
500	62
630	60
800	58
1000	52
1250	48
1600	48
2000	51
2500	50
3150	47
4000	42
5000	36



S [m<sup>2</sup>] = 15

Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

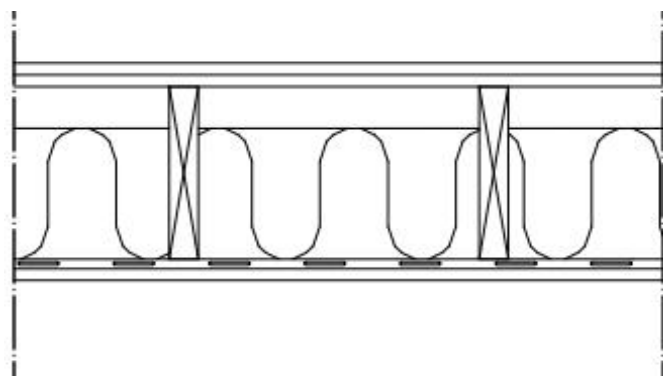
Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

L<sub>n,w</sub> (C<sub>1</sub>) = 66 (1) dB

C<sub>1,50-2500</sub> = 4 dB

L<sub>n,w</sub> + C<sub>1,50-2500</sub> = 71 dB





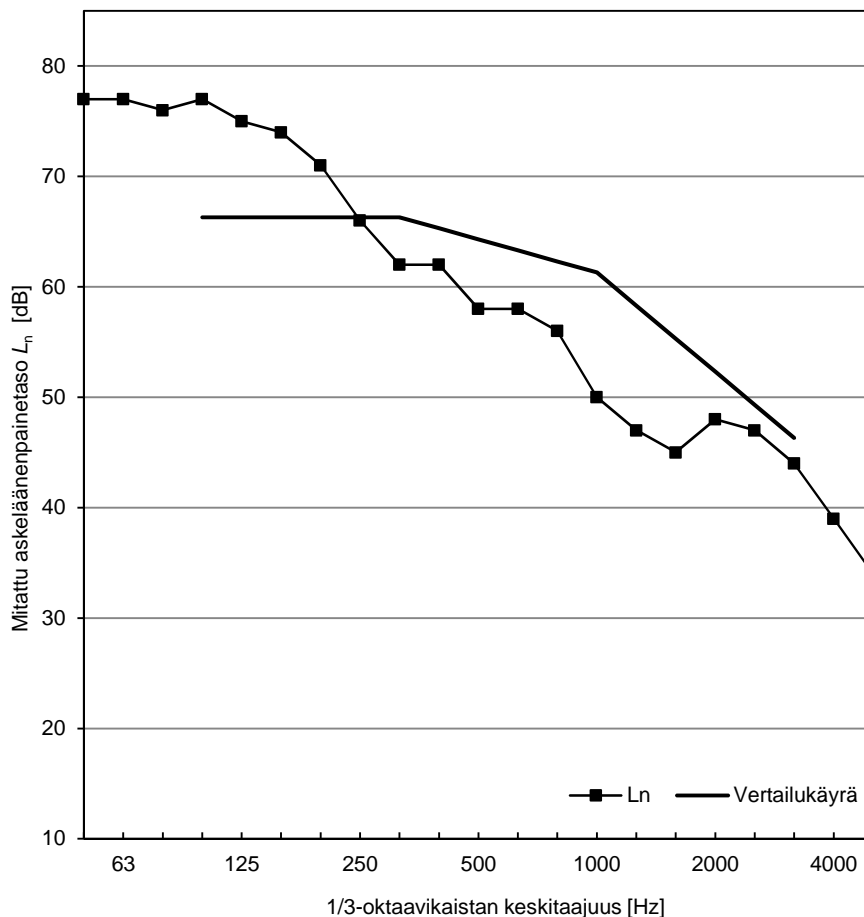
Rakennekerrokset:

	m'	d'
	[kg/m <sup>2</sup> ]	[mm]
2x 15mm vaneri	13,4	30
sahat.palkki (38x235), k406		235
178mm mineraalivilla		
akustinen jousiranka k406		13
kipsilevy	11,2	16

Kokonaiskorkeus [mm]

294

f [Hz]	L <sub>n</sub> [dB]
50	77
63	77
80	76
100	77
125	75
160	74
200	71
250	66
315	62
400	62
500	58
630	58
800	56
1000	50
1250	47
1600	45
2000	48
2500	47
3150	44
4000	39
5000	34



S [m<sup>2</sup>] = 15

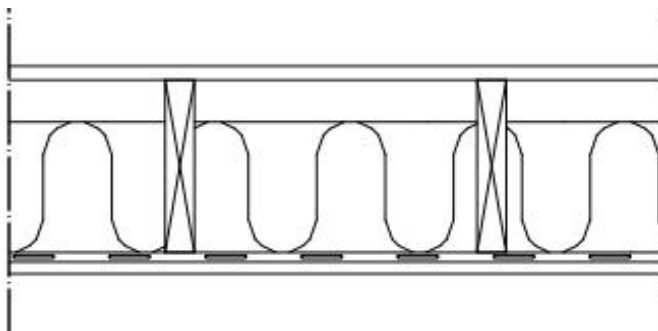
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

L<sub>n,w</sub> (C<sub>1</sub>) = 64 (2) dB

C<sub>1,50-2500</sub> = 5 dB

L<sub>n,w</sub> + C<sub>1,50-2500</sub> = 69 dB



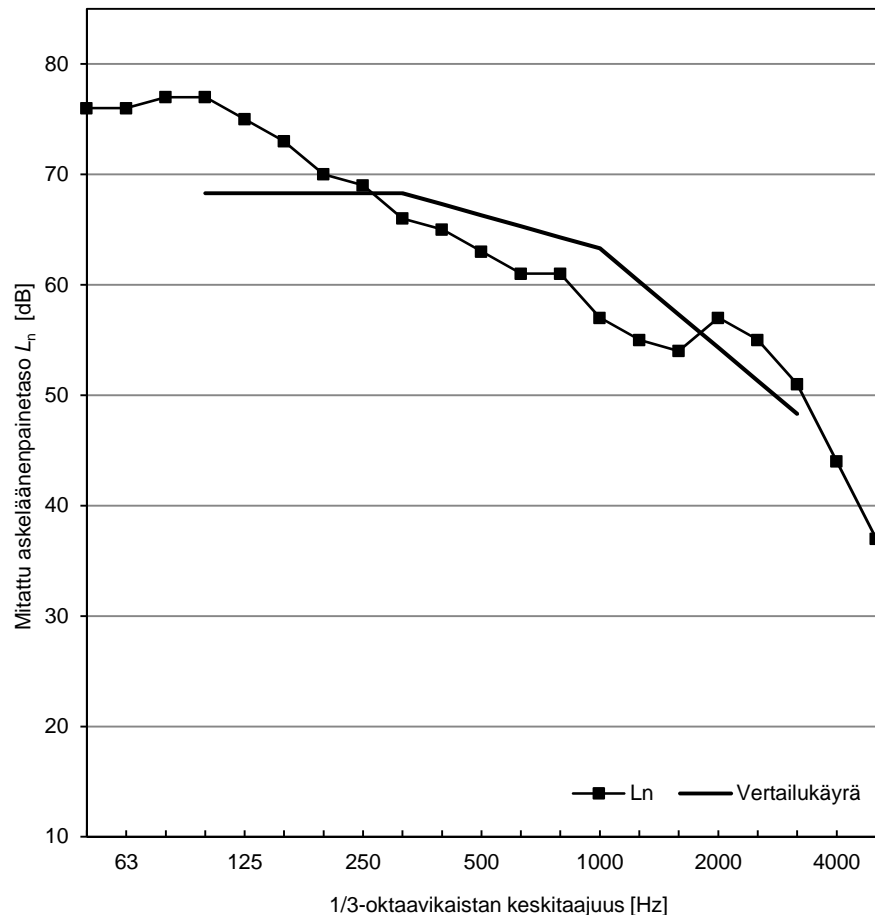
Rakennekerrokset:

	$m'$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$d'$ [mm]
OSB-levy	11,2	19
sahat.palkki (38x235), k406		235
178mm mineraalivilla		
akustinen jousiranka k406		13
kipsilevy	11,2	16

Kokonaiskorkeus [mm]

283

$f$ [Hz]	$L_n$ [dB]
50	76
63	76
80	77
100	77
125	75
160	73
200	70
250	69
315	66
400	65
500	63
630	61
800	61
1000	57
1250	55
1600	54
2000	57
2500	55
3150	51
4000	44
5000	37



$S [m^2] = 15$

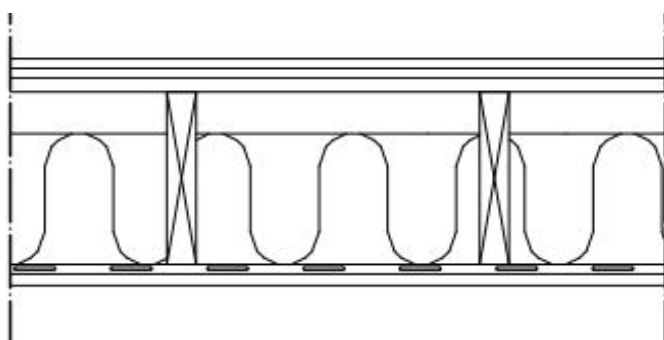
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

$L_{n,w} (C_1) = 66 (0) \text{ dB}$

$C_{1,50-2500} = 3 \text{ dB}$

$L_{n,w} + C_{1,50-2500} = 69 \text{ dB}$



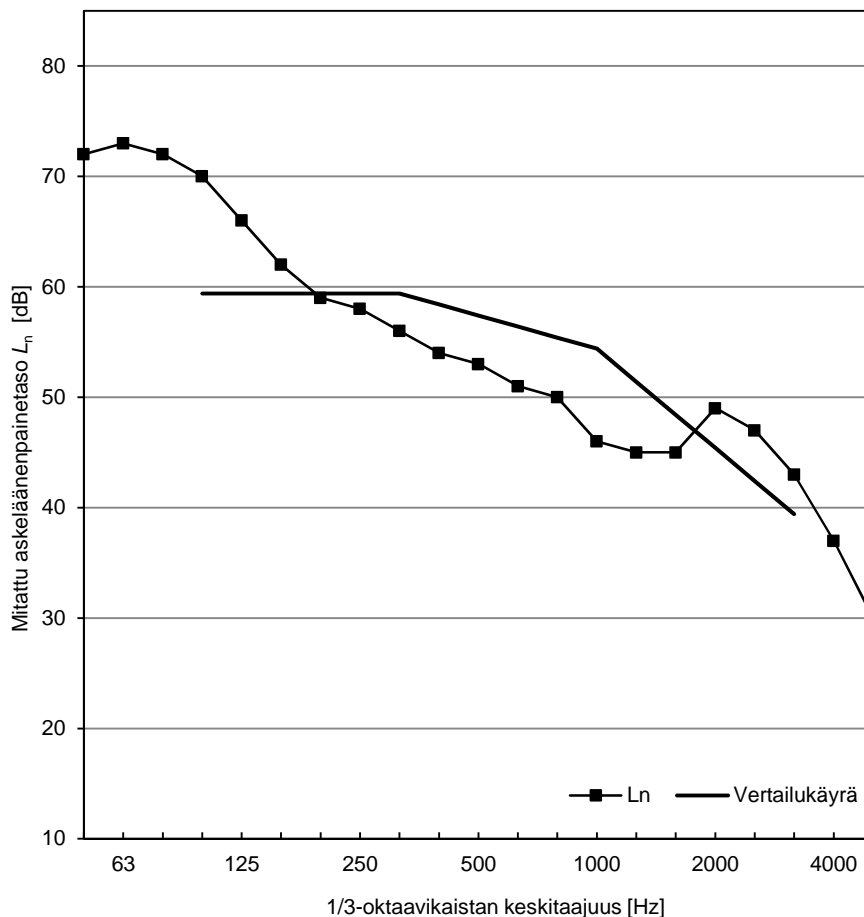
Rakennekerrokset:

	m'	d'
	[kg/m <sup>2</sup> ]	[mm]
2x13mm kipsikuitulevy		26
OSB-levy		19
- koko pintalattian m'	36,4	
sahat.palkit (38x235) k406		235
178mm mineraalivilla		
akustinen jousiranka k406		13
kipsilevy	11,2	16

Kokonaiskorkeus [mm]

309

f [Hz]	L <sub>n</sub> [dB]
50	72
63	73
80	72
100	70
125	66
160	62
200	59
250	58
315	56
400	54
500	53
630	51
800	50
1000	46
1250	45
1600	45
2000	49
2500	47
3150	43
4000	37
5000	30



S [m<sup>2</sup>] = 15

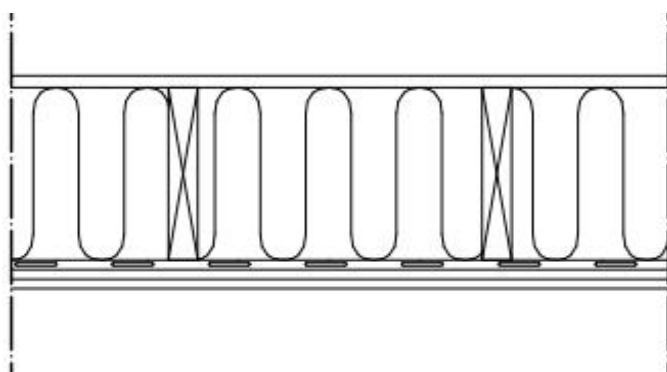
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

L<sub>n,w</sub> (C<sub>1</sub>) = 57 (0) dB

C<sub>1,50-2500</sub> = 6 dB

L<sub>n,w</sub> + C<sub>1,50-2500</sub> = 63 dB



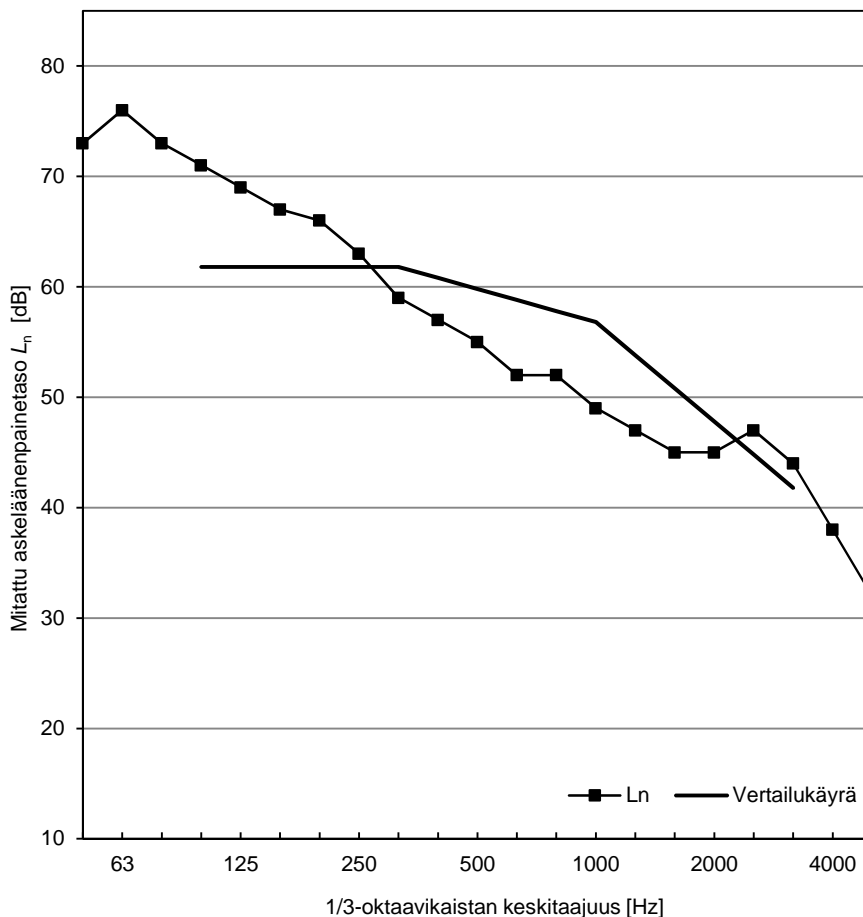
Rakennekerrokset:

	m'	d'
	[kg/m <sup>2</sup> ]	[mm]
vaneri	7	16
sahat.palkit (38x235) k406		235
235mm puhallettu selluloosaeriste		
akustinen jousiranka k406		13
2x13mm kipsilevy		26
ak. Levyjen yhteis m'	19,9	

Kokonaiskorkeus [mm]

290

f [Hz]	L <sub>n</sub> [dB]
50	73
63	76
80	73
100	71
125	69
160	67
200	66
250	63
315	59
400	57
500	55
630	52
800	52
1000	49
1250	47
1600	45
2000	45
2500	47
3150	44
4000	38
5000	32



S [m<sup>2</sup>] = 15

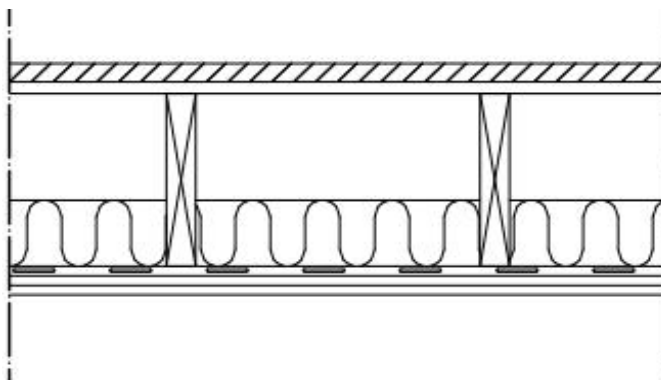
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

L<sub>n,w</sub> (C<sub>1</sub>) = 60 (0) dB

C<sub>1,50-2500</sub> = 6 dB

L<sub>n,w</sub> + C<sub>1,50-2500</sub> = 66 dB



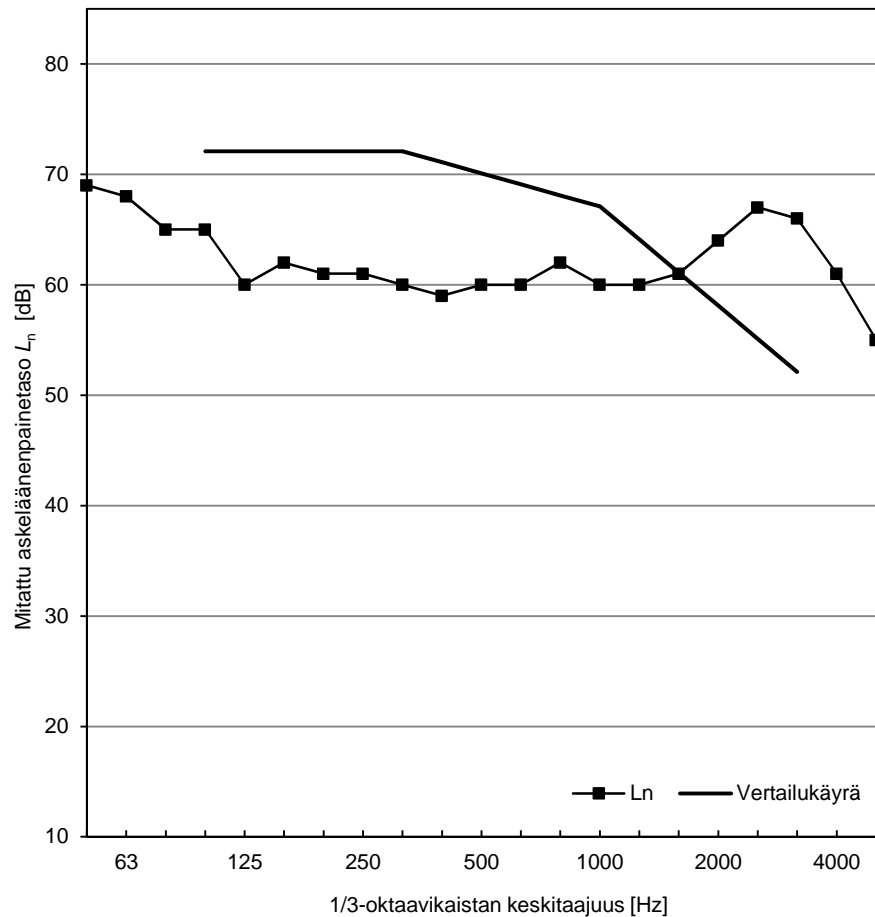
Rakennekerrokset:

	m'	d'
	[kg/m <sup>2</sup> ]	[mm]
kipsivalu		25
vaneri		16
- pintalattian yhteis m'	62,3	
sahat.palkit (38x235) k406		235
90mm lasivilla		
akustinen jousiranka k610		13
2x13mm kipsilevy		26
ak. Levyjen yhteis m'	19,9	

Kokonaiskorkeus [mm]

315

f [Hz]	L <sub>n</sub> [dB]
50	69
63	68
80	65
100	65
125	60
160	62
200	61
250	61
315	60
400	59
500	60
630	60
800	62
1000	60
1250	60
1600	61
2000	64
2500	67
3150	66
4000	61
5000	55



S [m<sup>2</sup>] = 15

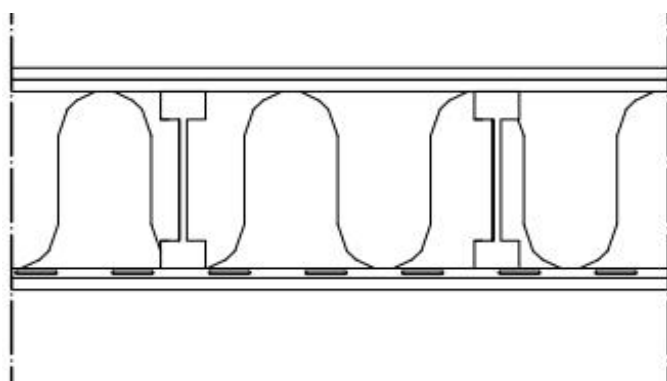
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

L<sub>n,w</sub> (C<sub>l</sub>) = 70 (-11) dB

C<sub>l,50-2500</sub> = -9 dB

L<sub>n,w</sub> + C<sub>l,50-2500</sub> = 61 dB



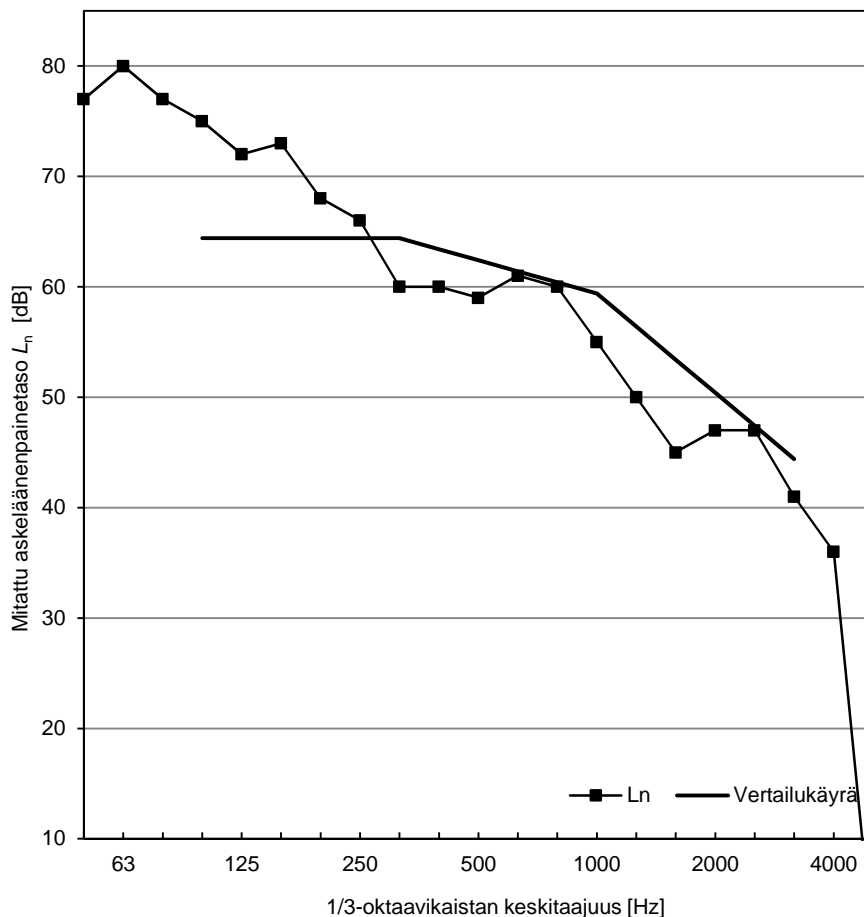
Rakennekerrokset:

	m'	d'
	[kg/m <sup>2</sup> ]	[mm]
2x16mm vaneri		32
-pintalattian yhteis m'	14,2	
I-palkki ,laipat 58x38, k406		241
267mm mineraalivilla		
akustinen jousiranka k305		13
kipsilevy	10,8	16

Kokonaiskorkeus [mm]

302

f [Hz]	L <sub>n</sub> [dB]
50	77
63	80
80	77
100	75
125	72
160	73
200	68
250	66
315	60
400	60
500	59
630	61
800	60
1000	55
1250	50
1600	45
2000	47
2500	47
3150	41
4000	36
5000	ei



S [m<sup>2</sup>] = 15

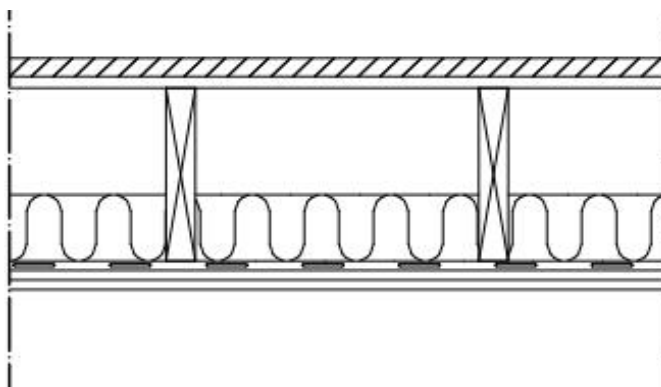
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

L<sub>n,w</sub> (C<sub>1</sub>) = 62 (2) dB

C<sub>1,50-2500</sub> = 7 dB

L<sub>n,w</sub> + C<sub>1,50-2500</sub> = 70 dB



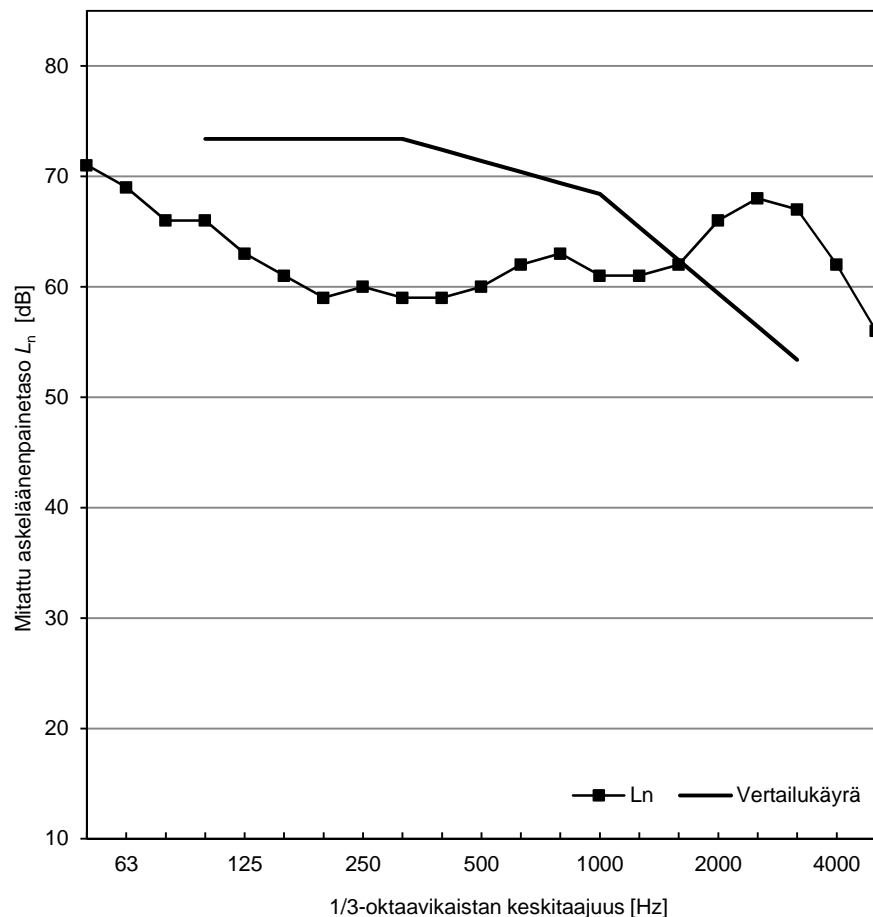
Rakennekerrokset:

	m'	d'
	[kg/m <sup>2</sup> ]	[mm]
kipsivalu		25
vaneri		16
- pintalattian yhteis m'	62,3	
sahat.palkit (38x235) k406		235
90mm lasivilla		
akustinen jousiranka k406		13
2x13mm kipsilevy		26
ak. Levyjen yhteis m'	19,9	

Kokonaiskorkeus [mm]

315

f [Hz]	L <sub>n</sub> [dB]
50	71
63	69
80	66
100	66
125	63
160	61
200	59
250	60
315	59
400	59
500	60
630	62
800	63
1000	61
1250	61
1600	62
2000	66
2500	68
3150	67
4000	62
5000	56



S [m<sup>2</sup>] = 15

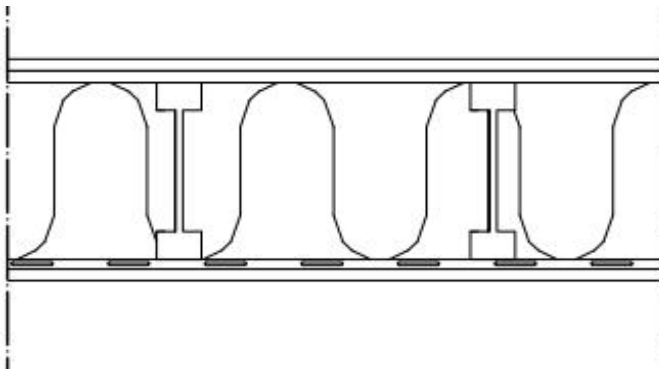
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Väliohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

L<sub>n,w</sub> (C<sub>1</sub>) = 71 (-12) dB

C<sub>1,50-2500</sub> = -9 dB

L<sub>n,w</sub> + C<sub>1,50-2500</sub> = 62 dB



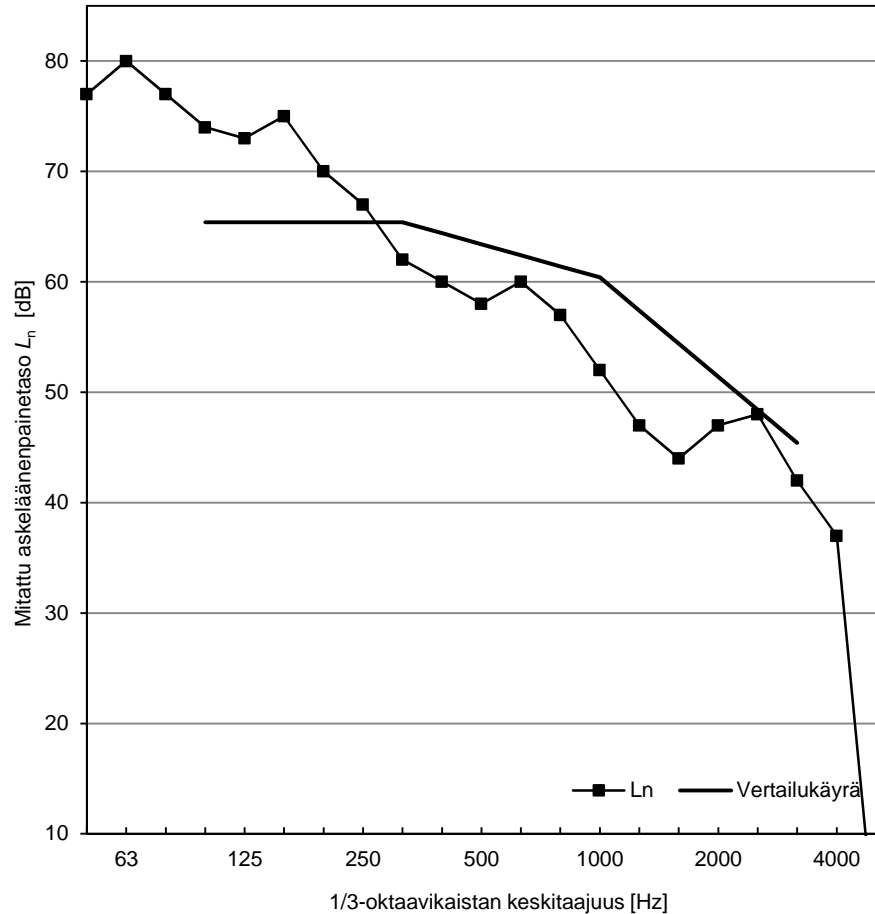
Rakennekerrokset:

	m'	d'
	[kg/m <sup>2</sup> ]	[mm]
2x16mm vaneri		32
-pintalattian yhteis m'	14,2	
I-palkki ,laipat 58x38, k406		241
241mm puhallettu selluloosaeriste		
akustinen jousiranka k305		13
kipsilevy	10,8	16

Kokonaiskorkeus [mm]

302

f [Hz]	L <sub>n</sub> [dB]
50	77
63	80
80	77
100	74
125	73
160	75
200	70
250	67
315	62
400	60
500	58
630	60
800	57
1000	52
1250	47
1600	44
2000	47
2500	48
3150	42
4000	37
5000	ei



S [m<sup>2</sup>] = 15

Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

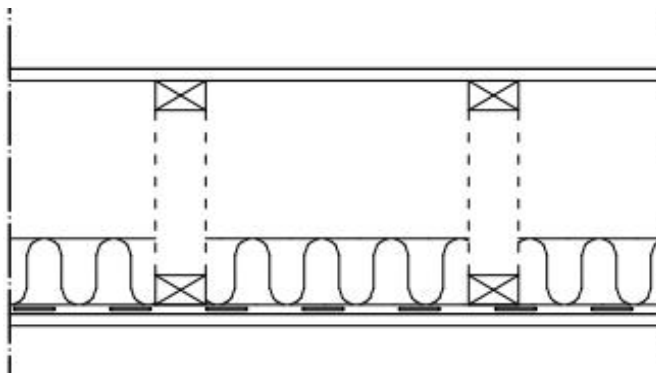
Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

L<sub>n,w</sub> (C<sub>1</sub>) = 63 (1) dB

C<sub>1,50-2500</sub> = 6 dB

L<sub>n,w</sub> + C<sub>1,50-2500</sub> = 70 dB





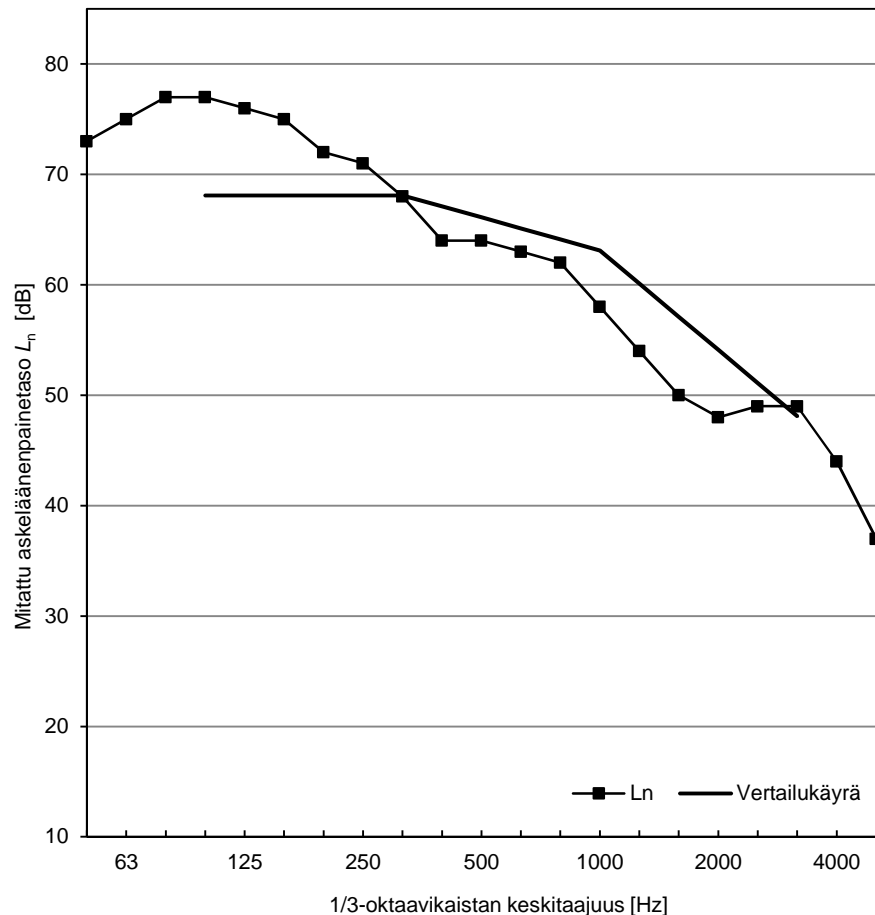
Rakennekerrokset:

	m'	d'
	[kg/m <sup>2</sup> ]	[mm]
vaneri	7,4	16
puu-metalli-ristikko, k406		305
* paarteet (65x40) puuta		
*sauvat (1mm teräs)		
lasivilla (90mm)		
akustinen jousiranka, k406		13
* poikittain palkkeihin nähden		
2x13mm kipsilevy		26
kipsilevyn m'=9,7kg/m <sup>2</sup>		

Kokonaiskorkeus [mm]

360

f [Hz]	L <sub>n</sub> [dB]
50	73
63	75
80	77
100	77
125	76
160	75
200	72
250	71
315	68
400	64
500	64
630	63
800	62
1000	58
1250	54
1600	50
2000	48
2500	49
3150	49
4000	44
5000	37



S [m<sup>2</sup>] = 15

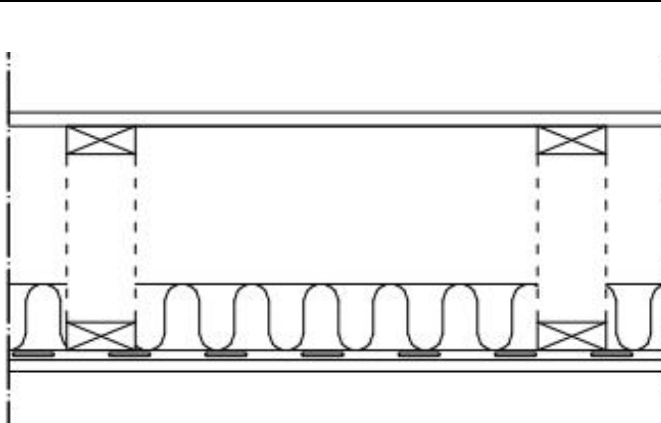
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

L<sub>n,w</sub> (C<sub>1</sub>) = 66 (1) dB

C<sub>1,50-2500</sub> = 3 dB

L<sub>n,w</sub> + C<sub>1,50-2500</sub> = 69 dB



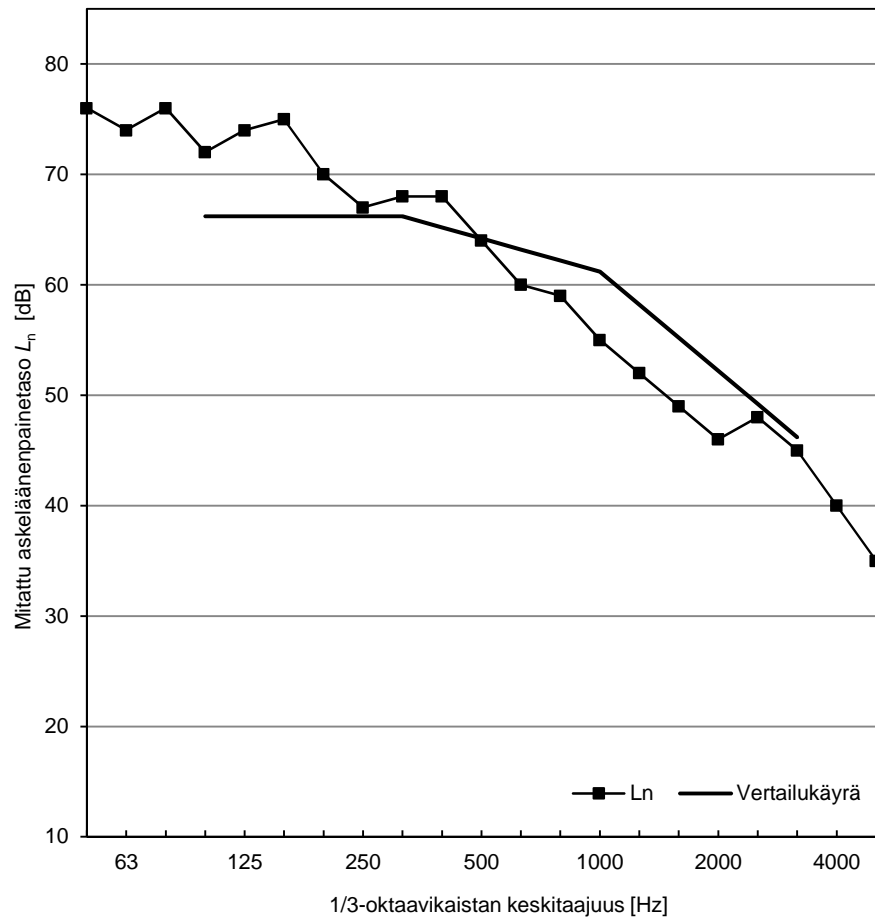
Rakennekerrokset:

	$m'$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$d'$ [mm]
vaneri	8,4	19
puinen ristikkopalkki		305
*kaikki puuosat (38x89), k610		
lasivilla (90mm)		
akustinen jousiranka, k406		13
* poikittain palkkeihin nähden		
2x13mm kipsilevy		26
kipsilevyn $m'=9,6\text{kg/m}^2$		

Kokonaiskorkeus [mm]

363

$f$ [Hz]	$L_n$ [dB]
50	76
63	74
80	76
100	72
125	74
160	75
200	70
250	67
315	68
400	68
500	64
630	60
800	59
1000	55
1250	52
1600	49
2000	46
2500	48
3150	45
4000	40
5000	35



$S [m^2] = 15$

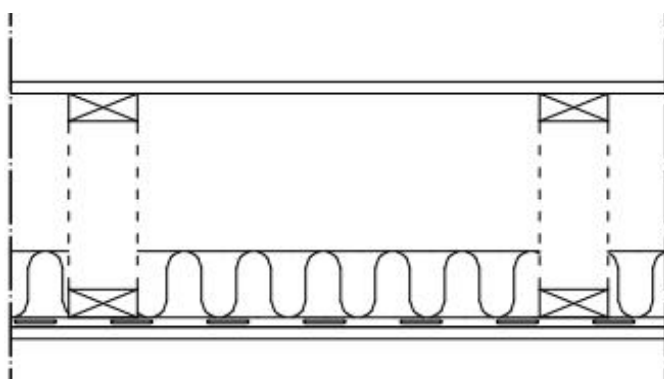
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

$L_{n,w} (C_1) = 64 (1) \text{ dB}$

$C_{1,50-2500} = 4 \text{ dB}$

$L_{n,w} + C_{1,50-2500} = 68 \text{ dB}$



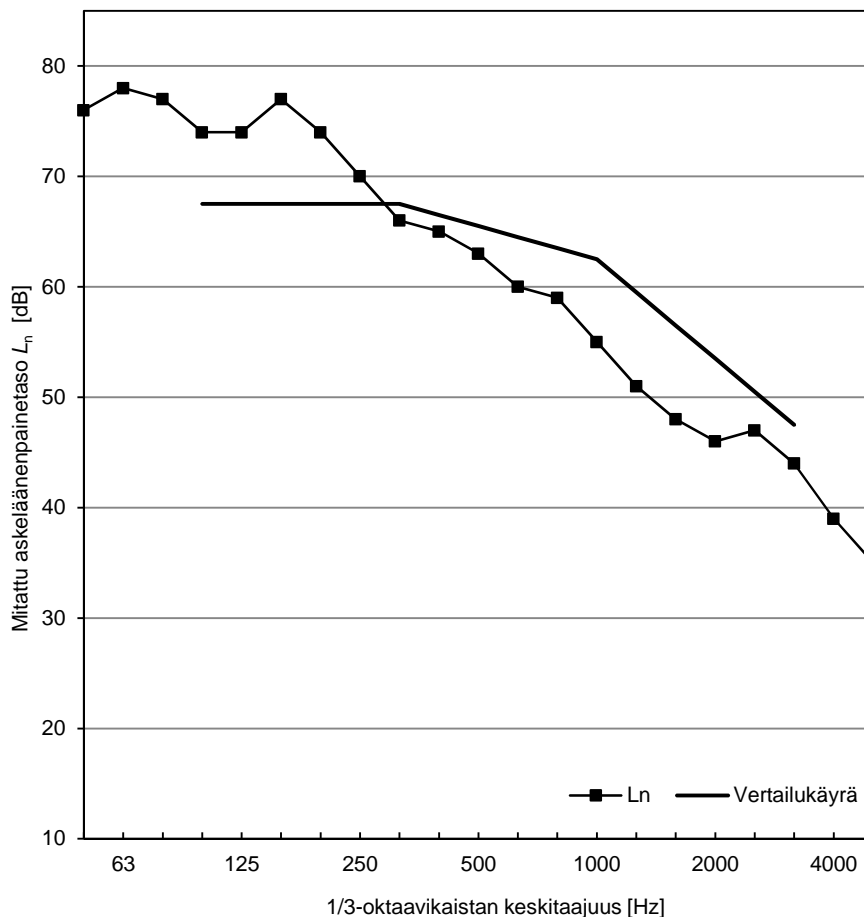
Rakennekerrokset:

	$m'$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$d'$ [mm]
vaneri	6,7	16
puu-metalli-ristikko, k406		305
* paarteet (65x40) puuta		
*sauvat (1mm teräs)		
lasivilla (90mm)		
akustinen jousiranka, k406		13
* poikittain palkkeihin nähden		
2x13mm kipsilevy		26
kipsilevyn $m'$ =9,6kg/m <sup>2</sup>		

Kokonaiskorkeus [mm]

360

$f$ [Hz]	$L_n$ [dB]
50	76
63	78
80	77
100	74
125	74
160	77
200	74
250	70
315	66
400	65
500	63
630	60
800	59
1000	55
1250	51
1600	48
2000	46
2500	47
3150	44
4000	39
5000	35



$S [m^2] = 15$

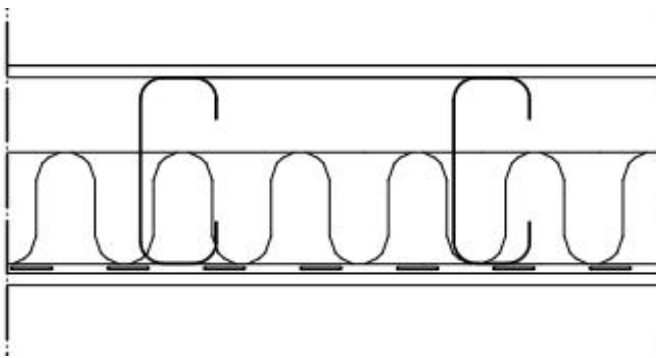
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

$L_{n,w} (C_1) = 66 (1) \text{ dB}$

$C_{1,50-2500} = 4 \text{ dB}$

$L_{n,w} + C_{1,50-2500} = 70 \text{ dB}$



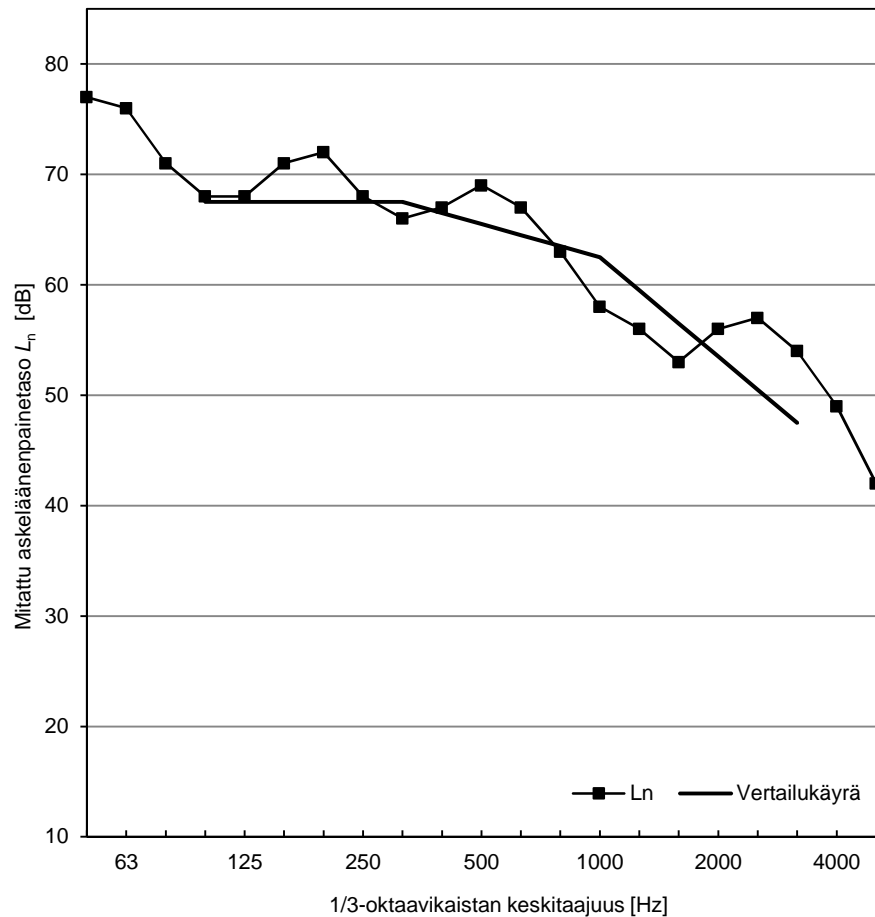
Rakennekerrokset:

	m'	d'
	[kg/m <sup>2</sup> ]	[mm]
OSB-levy	8,8	15
teräspalkki, C-prof, 4,4kg/m * k406		254
152mm lasivilla		
akustinen jousiranka, k610		13
kipsilevy	11,3	16

Kokonaiskorkeus [mm]

298

f [Hz]	L <sub>n</sub> [dB]
50	77
63	76
80	71
100	68
125	68
160	71
200	72
250	68
315	66
400	67
500	69
630	67
800	63
1000	58
1250	56
1600	53
2000	56
2500	57
3150	54
4000	49
5000	42



S [m<sup>2</sup>] = 15

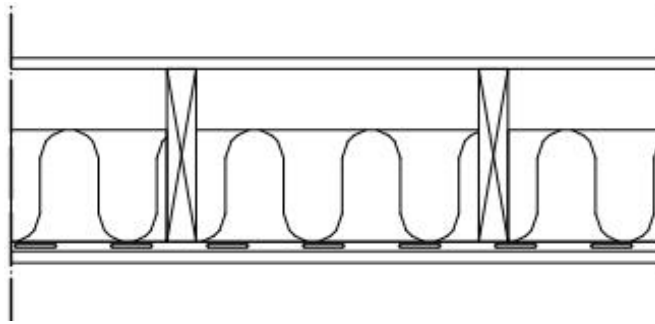
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

L<sub>n,w</sub> (C<sub>1</sub>) = 66 (-2) dB

C<sub>1,50-2500</sub> = 2 dB

L<sub>n,w</sub> + C<sub>1,50-2500</sub> = 67 dB



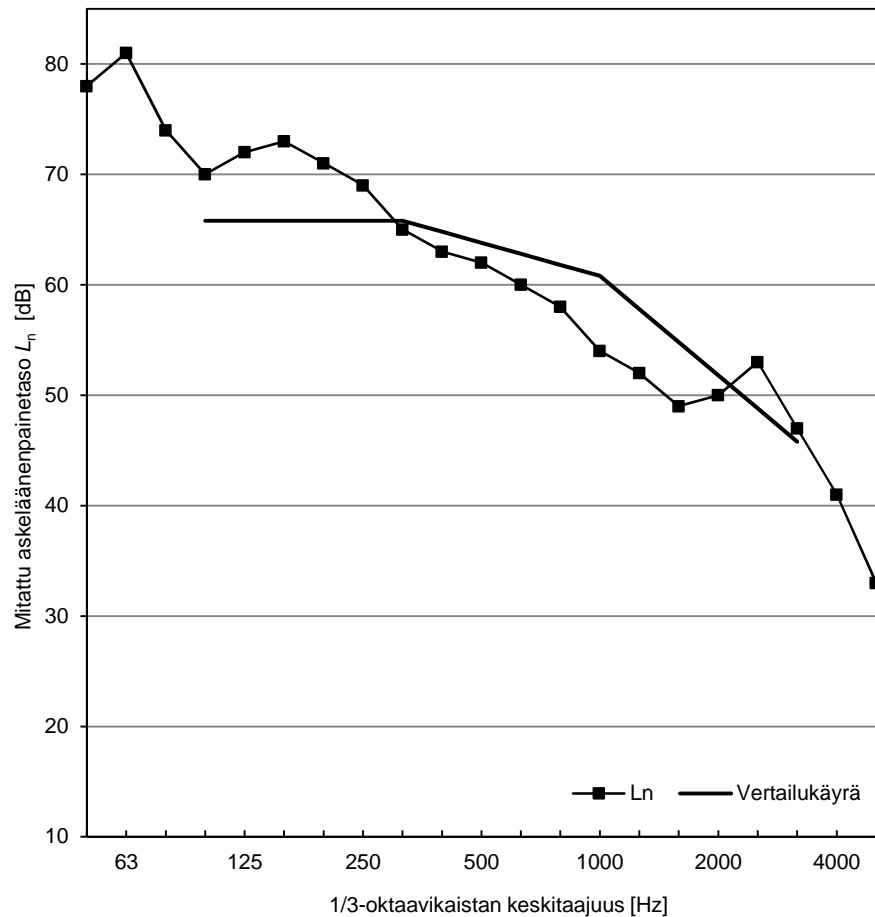
Rakennekerrokset:

	m'	d'
	[kg/m <sup>2</sup> ]	[mm]
OSB-levy	8,8	15
sahat.palkki (38x235) L=2,91m		235
*k406		
152mm lasivilla		
akustinen jousiranka, k610		13
kipsilevy	11,3	16

Kokonaiskorkeus [mm]

279

f [Hz]	L <sub>n</sub> [dB]
50	78
63	81
80	74
100	70
125	72
160	73
200	71
250	69
315	65
400	63
500	62
630	60
800	58
1000	54
1250	52
1600	49
2000	50
2500	53
3150	47
4000	41
5000	33



S [m<sup>2</sup>] = 15

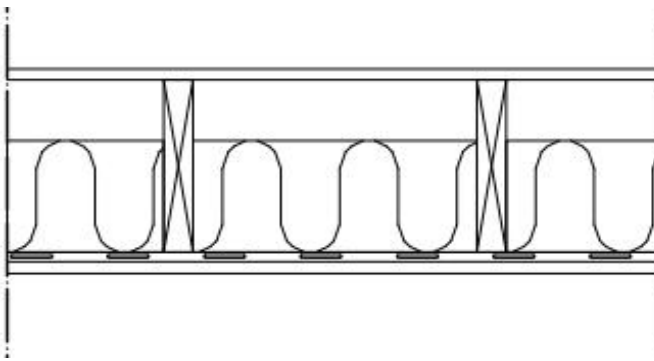
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

L<sub>n,w</sub> (C<sub>1</sub>) = 64 (0) dB

C<sub>1,50-2500</sub> = 6 dB

L<sub>n,w</sub> + C<sub>1,50-2500</sub> = 70 dB



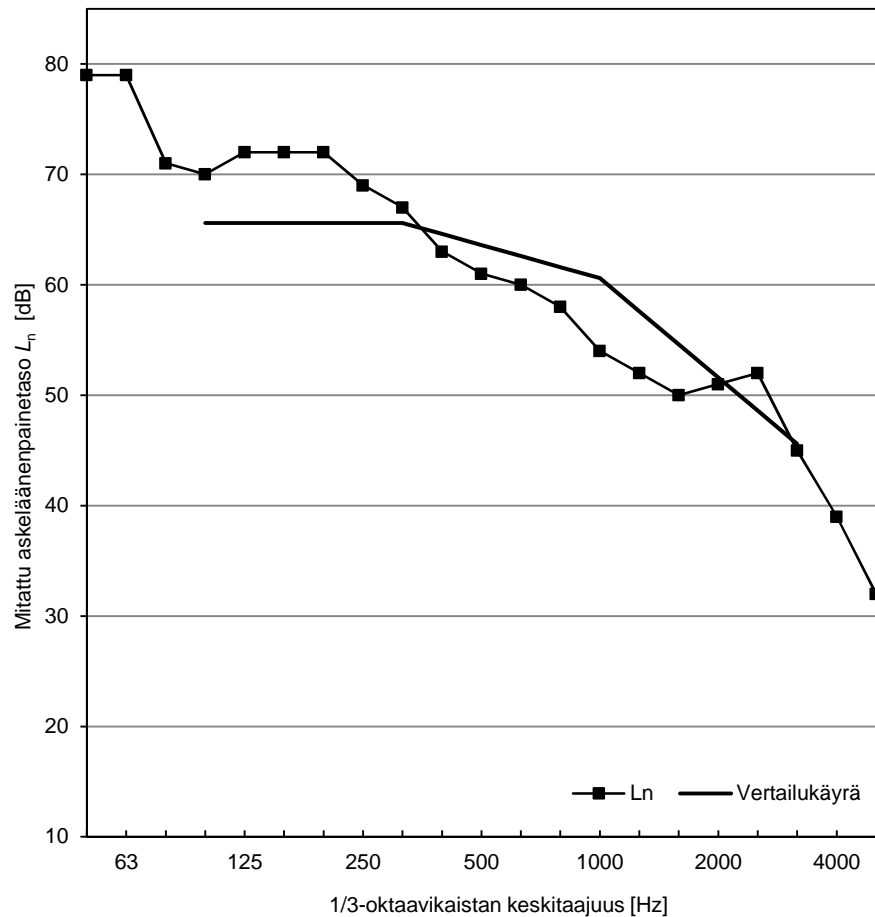
Rakennekerrokset:

	$m'$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$d'$ [mm]
OSB-levy	8,8	15
sahat.palkki (38x235) L=3,45m		235
*k406		
152mm lasivilla		
akustinen jousiranka, k610		13
kipsilevy	11,3	16

Kokonaiskorkeus [mm]

279

$f$ [Hz]	$L_n$ [dB]
50	79
63	79
80	71
100	70
125	72
160	72
200	72
250	69
315	67
400	63
500	61
630	60
800	58
1000	54
1250	52
1600	50
2000	51
2500	52
3150	45
4000	39
5000	32



$S [m^2] = 15$

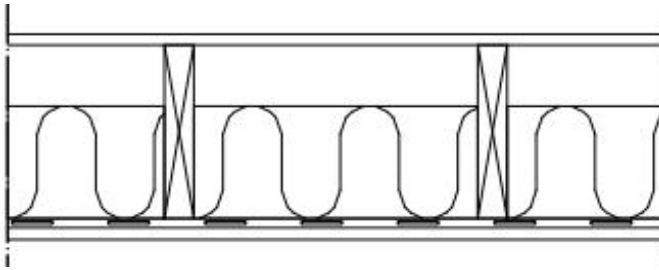
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

$L_{n,w} (C_1) = 64 (0) \text{ dB}$

$C_{1,50-2500} = 5 \text{ dB}$

$L_{n,w} + C_{1,50-2500} = 69 \text{ dB}$



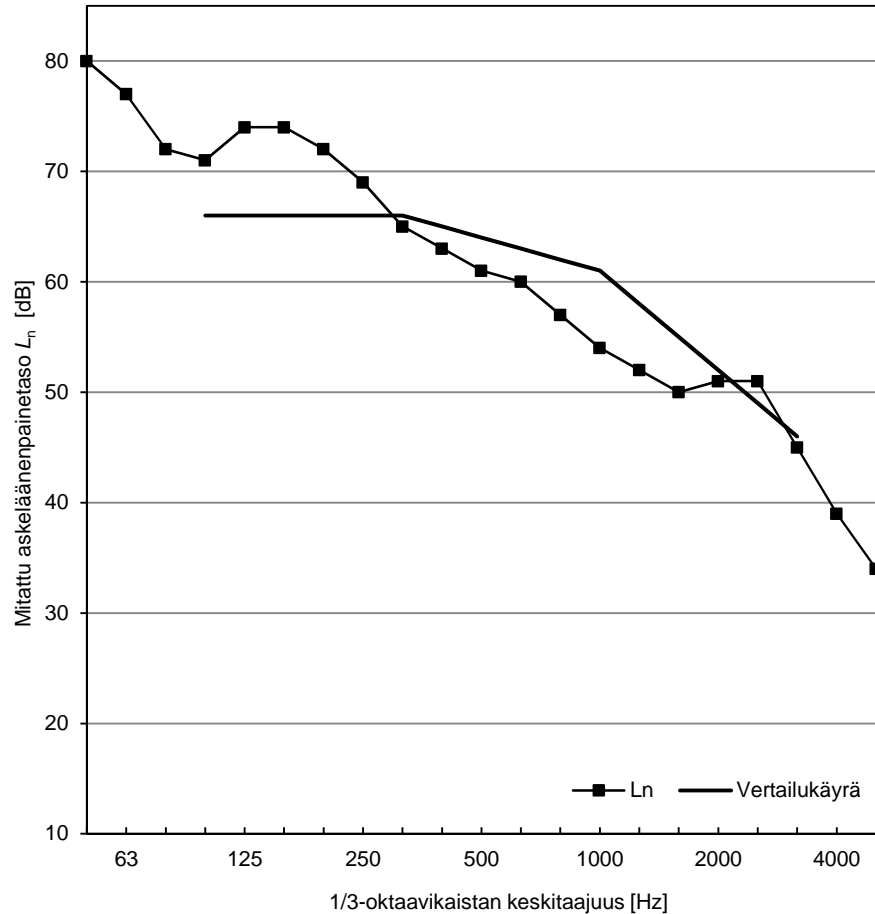
Rakennekerrokset:

	m'	d'
	[kg/m <sup>2</sup> ]	[mm]
OSB-levy	8,8	15
sahat.palkki (38x235) L=4,34m		235
*k406, kaksi poikittaistukilinjaa		
152mm lasivilla		
akustinen jousiranka, k610		13
kipsilevy	11,3	16

Kokonaiskorkeus [mm]

279

f [Hz]	L <sub>n</sub> [dB]
50	80
63	77
80	72
100	71
125	74
160	74
200	72
250	69
315	65
400	63
500	61
630	60
800	57
1000	54
1250	52
1600	50
2000	51
2500	51
3150	45
4000	39
5000	34



S [m<sup>2</sup>] = 15

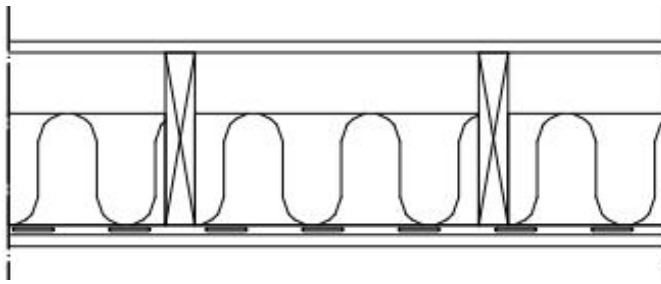
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

L<sub>n,w</sub> (C<sub>1</sub>) = 64 (1) dB

C<sub>1,50-2500</sub> = 5 dB

L<sub>n,w</sub> + C<sub>1,50-2500</sub> = 69 dB



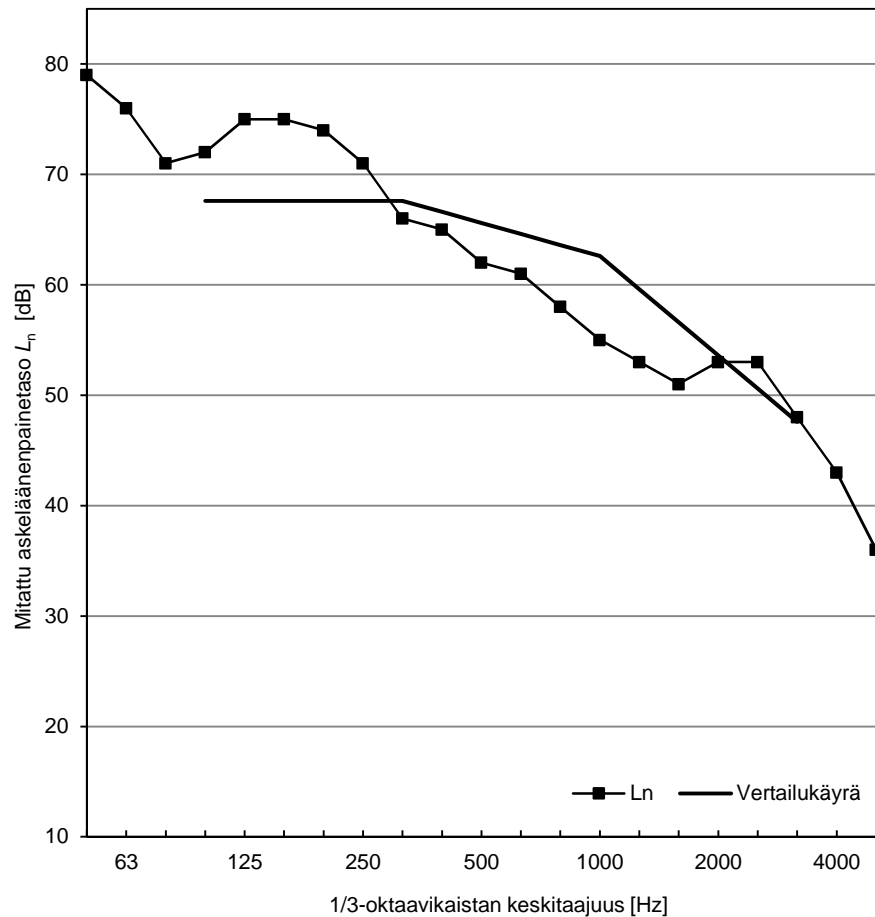
Rakennekerrokset:

	m'	d'
	[kg/m <sup>2</sup> ]	[mm]
OSB-levy	8,8	15
sahat.palkki (38x235) L=4,85m		235
*k406, kaksi poikitaistukilinjaa		
152mm lasivilla		
akustinen jousiranka, k610		13
kipsilevy	11,3	16

Kokonaiskorkeus [mm]

279

f [Hz]	L <sub>n</sub> [dB]
50	79
63	76
80	71
100	72
125	75
160	75
200	74
250	71
315	66
400	65
500	62
630	61
800	58
1000	55
1250	53
1600	51
2000	53
2500	53
3150	48
4000	43
5000	36



S [m<sup>2</sup>] = 15

Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

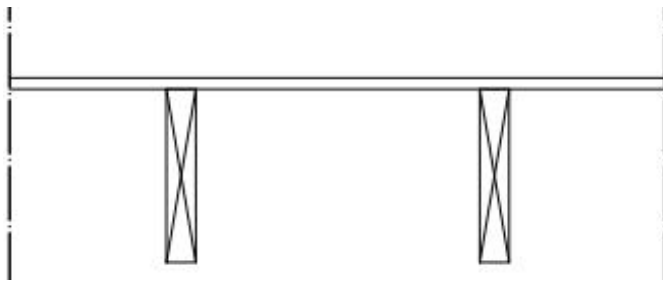
Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

L<sub>n,w</sub> (C<sub>1</sub>) = 66 (0) dB

C<sub>1,50-2500</sub> = 4 dB

L<sub>n,w</sub> + C<sub>1,50-2500</sub> = 69 dB





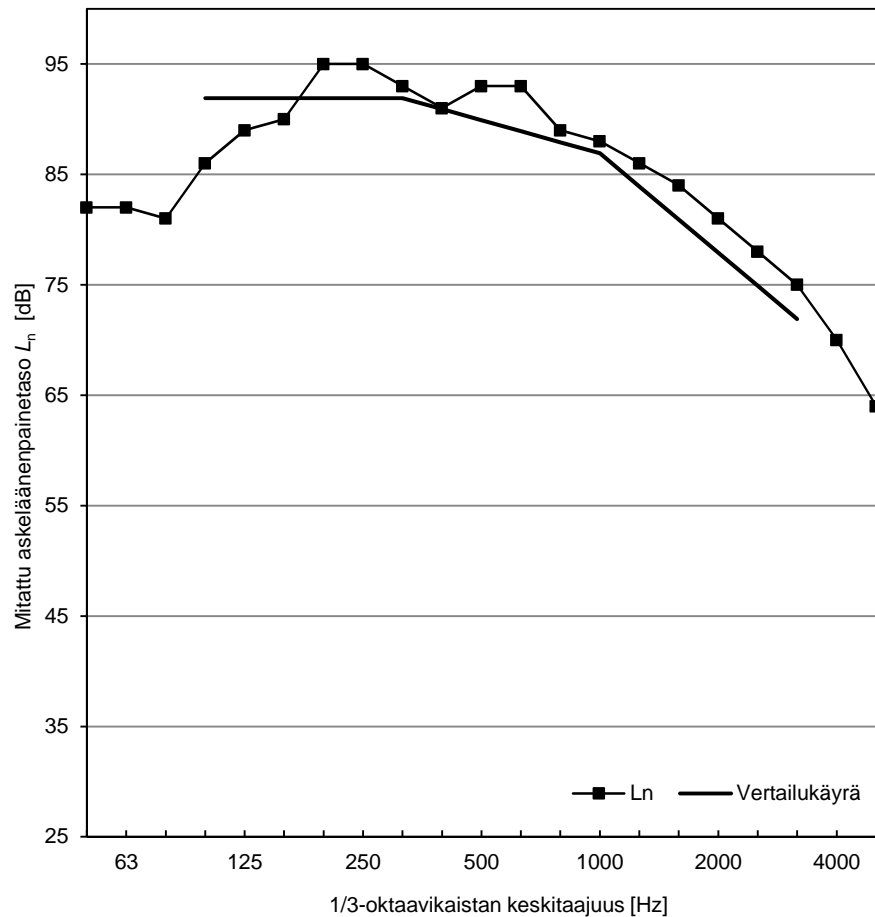
Rakennekerrokset:

	m'	d'
	[kg/m <sup>2</sup> ]	[mm]
OSB-levy	9,5	15
sahat.palkki (38x235) k406		235

Kokonaiskorkeus [mm]

250

f [Hz]	L <sub>n</sub> [dB]
50	82
63	82
80	81
100	86
125	89
160	90
200	95
250	95
315	93
400	91
500	93
630	93
800	89
1000	88
1250	86
1600	84
2000	81
2500	78
3150	75
4000	70
5000	64



S [m<sup>2</sup>] = 15

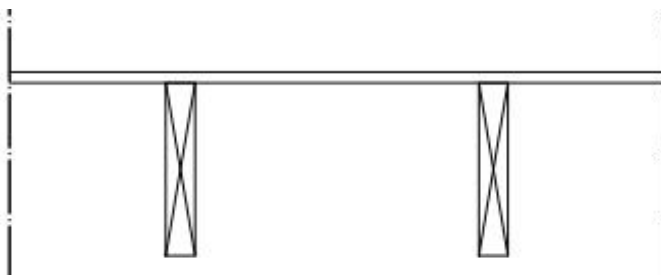
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

L<sub>n,w</sub> (C<sub>1</sub>) = 90 (-2) dB

C<sub>1,50-2500</sub> = -2 dB

L<sub>n,w</sub> + C<sub>1,50-2500</sub> = 88 dB



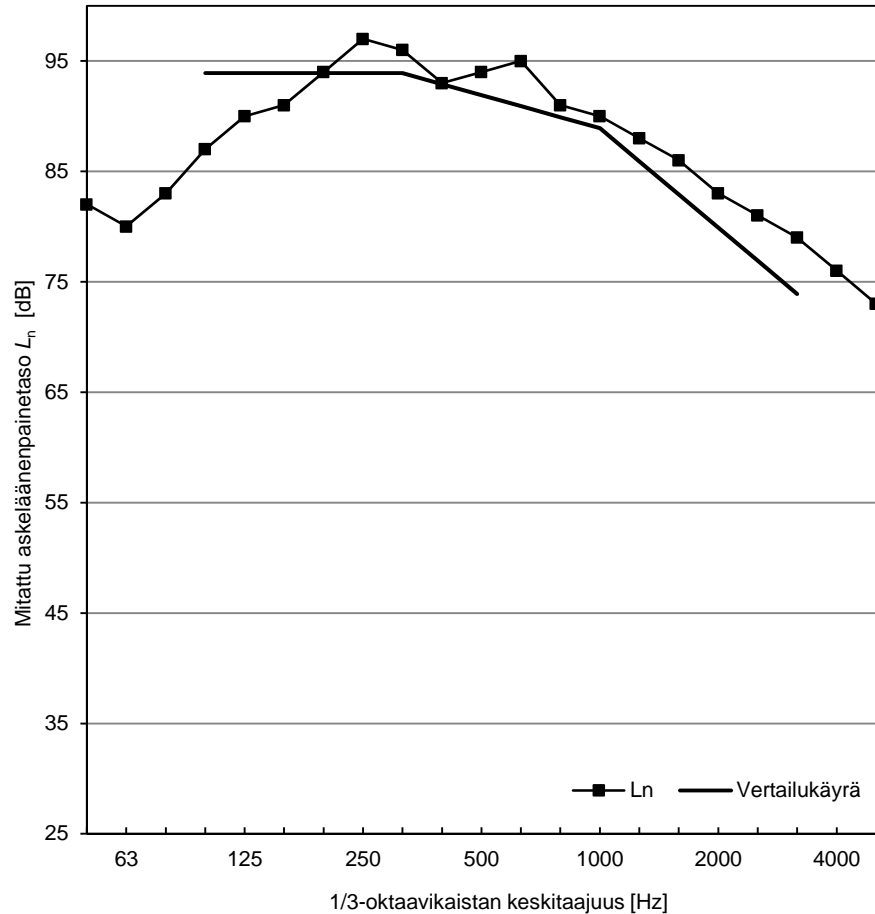
Rakennekerrokset:

	m'	d'
	[kg/m <sup>2</sup> ]	[mm]
vaneri	6,8	15
sahat.palkki (38x235), k406		235

Kokonaiskorkeus [mm]

250

f [Hz]	L <sub>n</sub> [dB]
50	82
63	80
80	83
100	87
125	90
160	91
200	94
250	97
315	96
400	93
500	94
630	95
800	91
1000	90
1250	88
1600	86
2000	83
2500	81
3150	79
4000	76
5000	73



S [m<sup>2</sup>] = 15

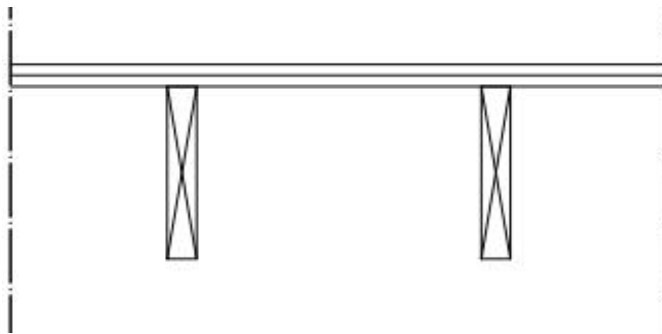
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

L<sub>n,w</sub> (C<sub>1</sub>) = 92 (-3) dB

C<sub>1,50-2500</sub> = -3 dB

L<sub>n,w</sub> + C<sub>1,50-2500</sub> = 89 dB



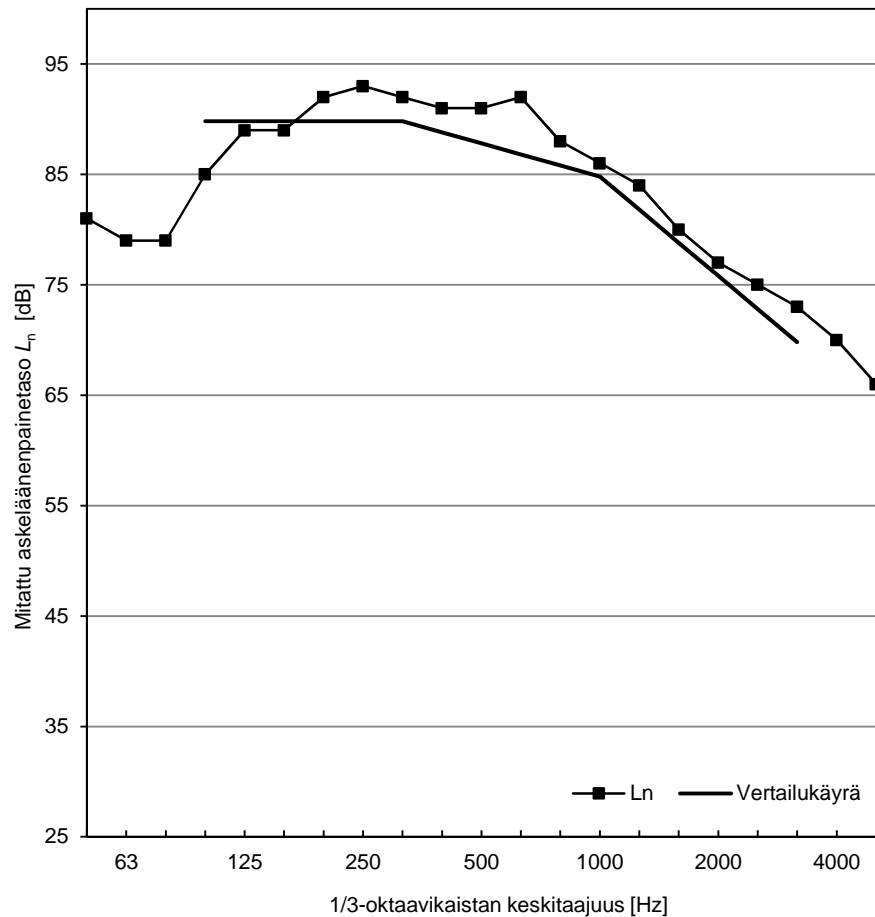
Rakennekerrokset:

	m'	d'
	[kg/m <sup>2</sup> ]	[mm]
2x15mm vaneri		30
levyjen kokonais m'	13,7	
sahat.palkit (38x235),k406		235

Kokonaiskorkeus [mm]

265

f [Hz]	L <sub>n</sub> [dB]
50	81
63	79
80	79
100	85
125	89
160	89
200	92
250	93
315	92
400	91
500	91
630	92
800	88
1000	86
1250	84
1600	80
2000	77
2500	75
3150	73
4000	70
5000	66



S [m<sup>2</sup>] = 15

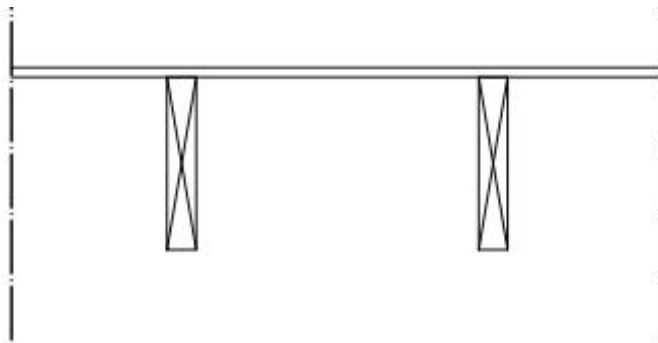
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

L<sub>n,w</sub> (C<sub>l</sub>) = 88 (-2) dB

C<sub>l,50-2500</sub> = -2 dB

L<sub>n,w</sub> + C<sub>l,50-2500</sub> = 86 dB



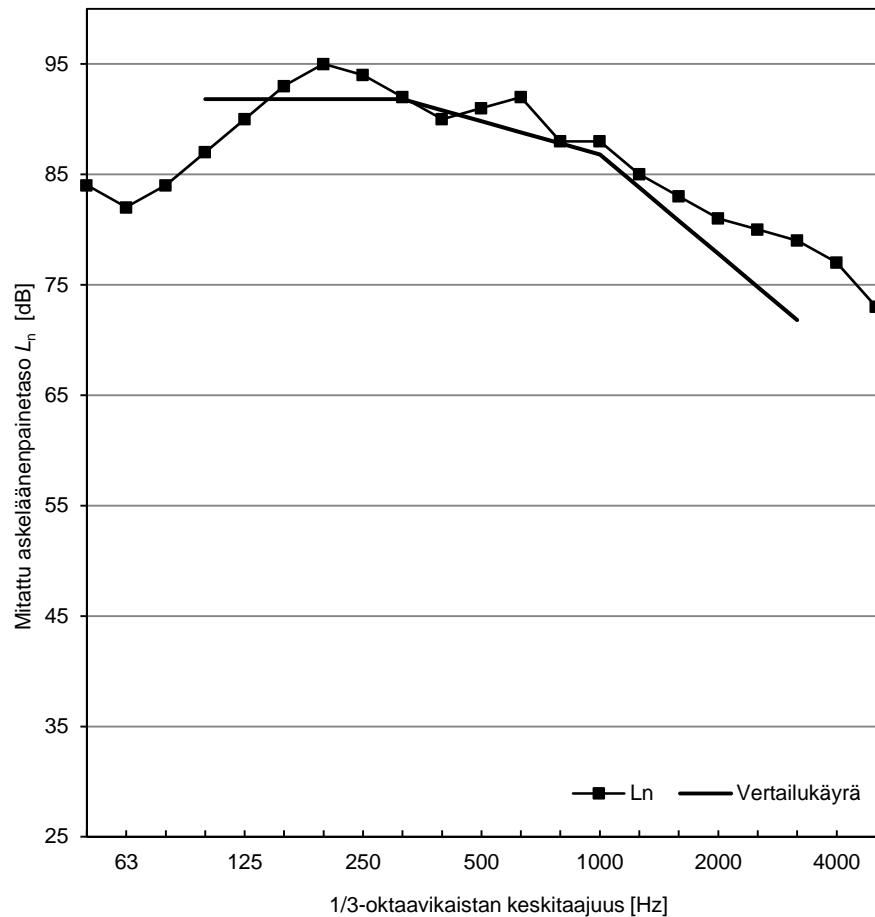
Rakennekerrokset:

	m'	d'
	[kg/m <sup>2</sup> ]	[mm]
vaneri	5,6	13
sahat.palkit (38x235), k406		235

Kokonaiskorkeus [mm]

248

f [Hz]	L <sub>n</sub> [dB]
50	84
63	82
80	84
100	87
125	90
160	93
200	95
250	94
315	92
400	90
500	91
630	92
800	88
1000	88
1250	85
1600	83
2000	81
2500	80
3150	79
4000	77
5000	73



S [m<sup>2</sup>] = 15

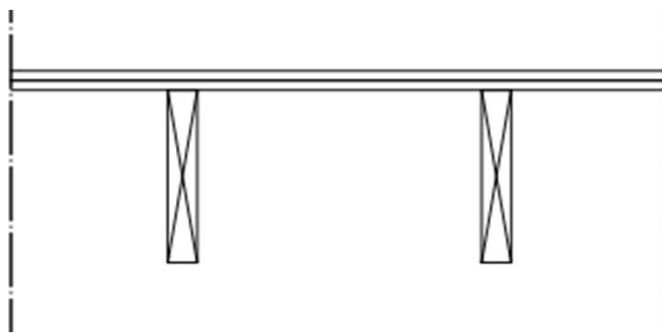
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

L<sub>n,w</sub> (C<sub>l</sub>) = 90 (-3) dB

C<sub>l,50-2500</sub> = -2 dB

L<sub>n,w</sub> + C<sub>l,50-2500</sub> = 87 dB



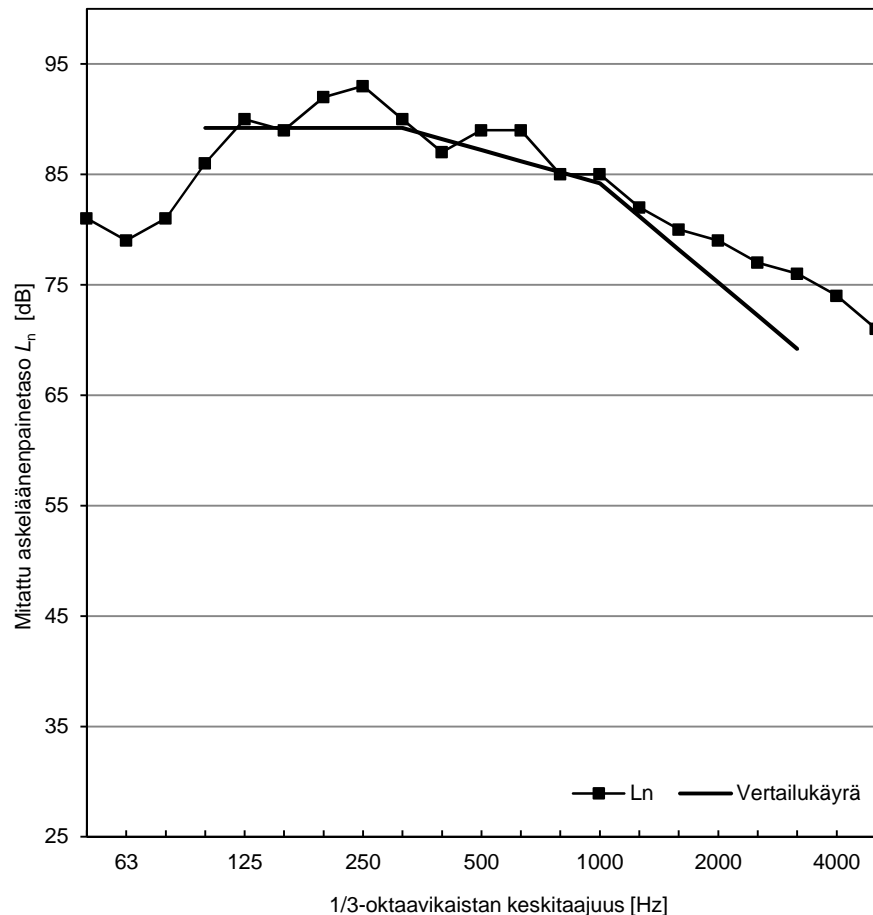
Rakennekerrokset:

	m'	d'
	[kg/m <sup>2</sup> ]	[mm]
2x13mm vaneri	5,6	13
lattialevyjen yhteis m'	11,6	
sahat.palkit(38x235), k406 L=4,85		235

Kokonaiskorkeus [mm]

248

f [Hz]	L <sub>n</sub> [dB]
50	81
63	79
80	81
100	86
125	90
160	89
200	92
250	93
315	90
400	87
500	89
630	89
800	85
1000	85
1250	82
1600	80
2000	79
2500	77
3150	76
4000	74
5000	71



S [m<sup>2</sup>] = 15

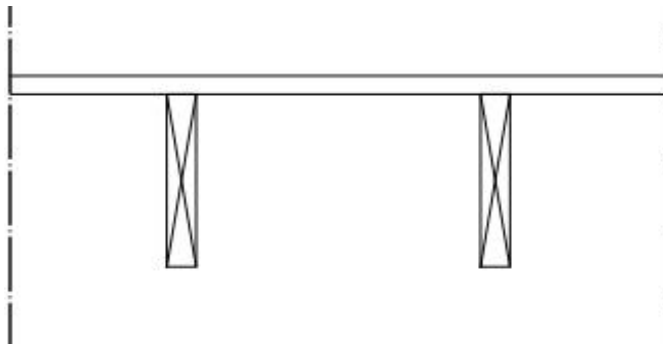
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

L<sub>n,w</sub> (C<sub>1</sub>) = 87 (-2) dB

C<sub>1,50-2500</sub> = -2 dB

L<sub>n,w</sub> + C<sub>1,50-2500</sub> = 85 dB



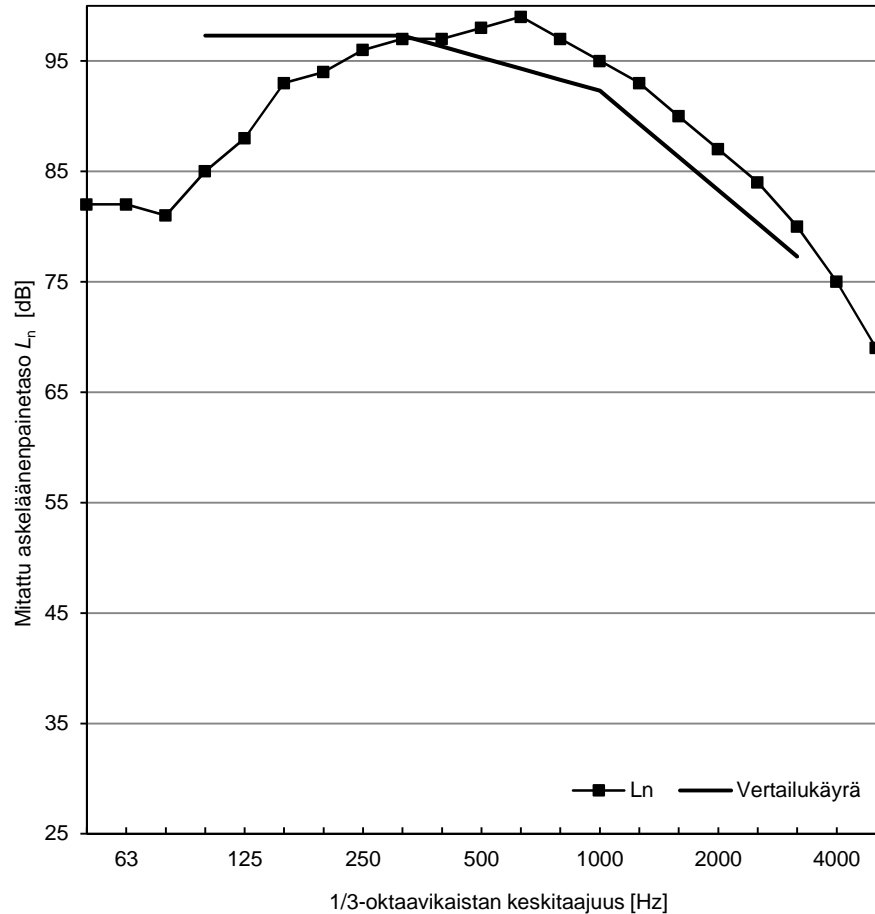
Rakennekerrokset:

	m'	d'
	[kg/m <sup>2</sup> ]	[mm]
vaneri	12	25
sahat.palkki (38x235) k406		235

Kokonaiskorkeus [mm]

260

f [Hz]	L <sub>n</sub> [dB]
50	82
63	82
80	81
100	85
125	88
160	93
200	94
250	96
315	97
400	97
500	98
630	99
800	97
1000	95
1250	93
1600	90
2000	87
2500	84
3150	80
4000	75
5000	69



S [m<sup>2</sup>] = 15

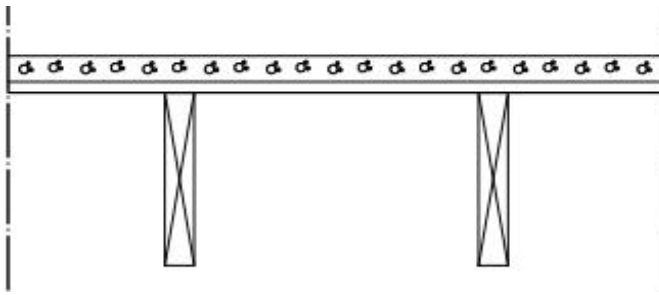
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

L<sub>n,w</sub> (C<sub>1</sub>) = 95 (-4) dB

C<sub>1,50-2500</sub> = -4 dB

L<sub>n,w</sub> + C<sub>1,50-2500</sub> = 92 dB



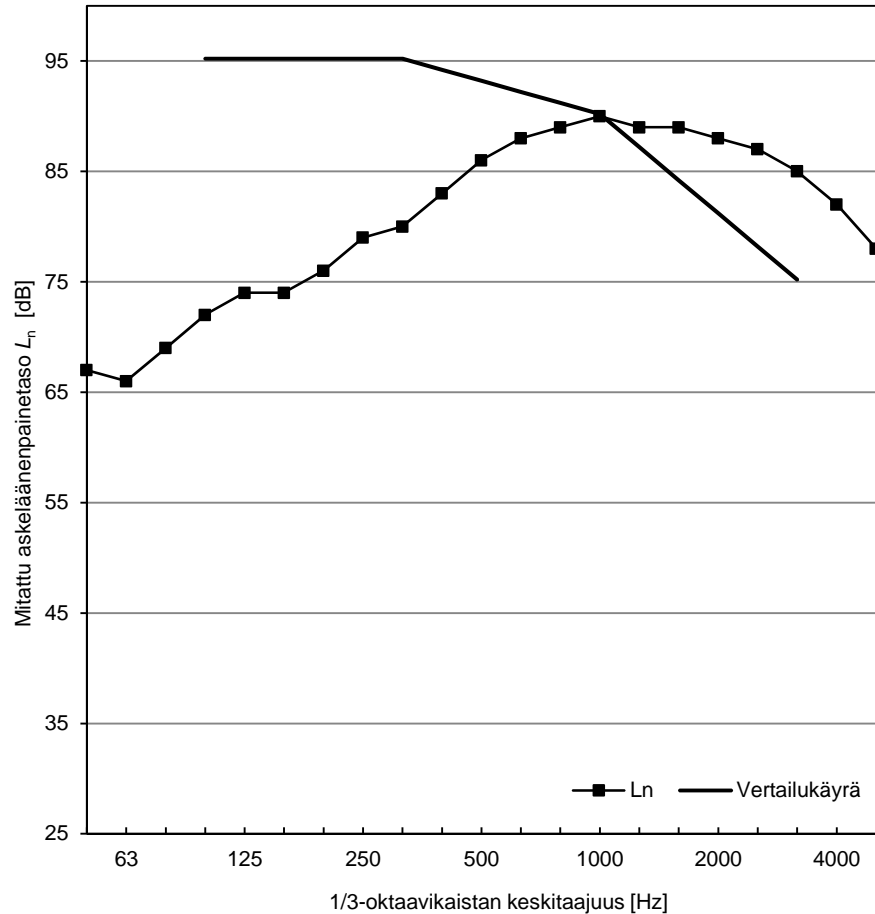
Rakennekerrokset:

	m'	d'
	[kg/m <sup>2</sup> ]	[mm]
betoni	83,2	35
OSB-levy	8,8	15
sahat.palkit (38x235), k406		235

Kokonaiskorkeus [mm]

285

f [Hz]	L <sub>n</sub> [dB]
50	67
63	66
80	69
100	72
125	74
160	74
200	76
250	79
315	80
400	83
500	86
630	88
800	89
1000	90
1250	89
1600	89
2000	88
2500	87
3150	85
4000	82
5000	78



S [m<sup>2</sup>] = 15

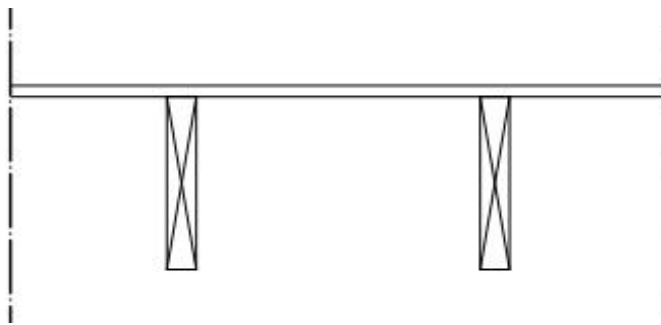
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

L<sub>n,w</sub> (C<sub>1</sub>) = 93 (-10) dB

C<sub>1,50-2500</sub> = -10 dB

L<sub>n,w</sub> + C<sub>1,50-2500</sub> = 83 dB



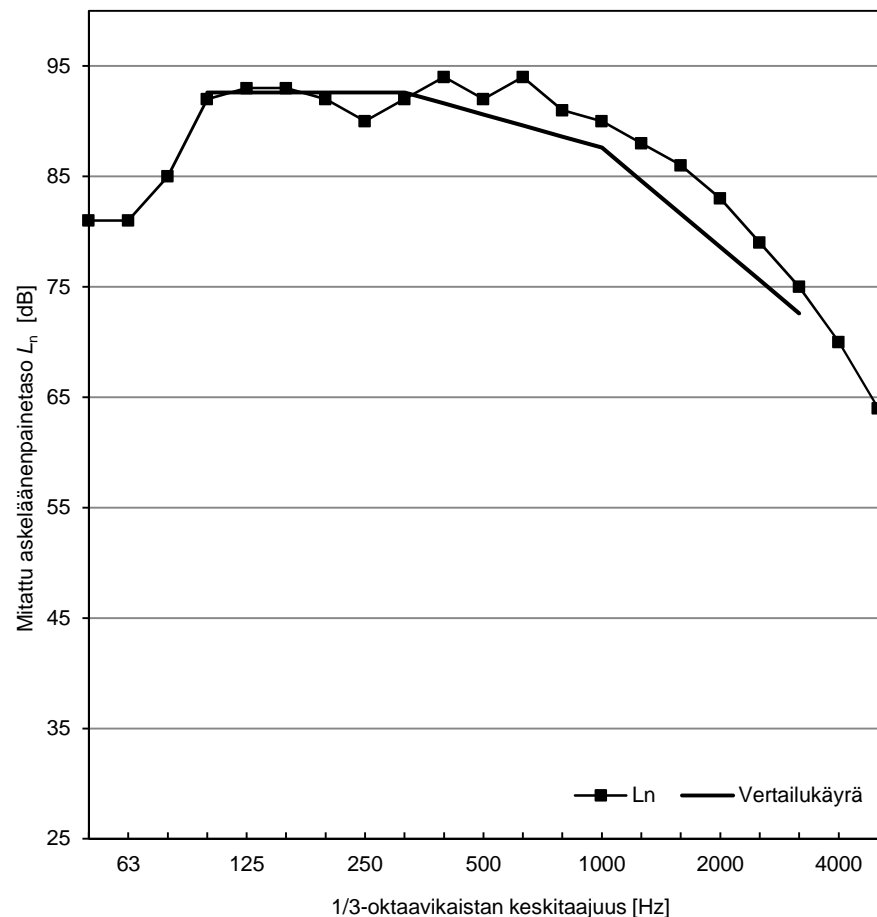
Rakennekerrokset:

	m'	d'
	[kg/m <sup>2</sup> ]	[mm]
OSB-levy	9	15
sahat.palkki (38x235) k406		235

Kokonaiskorkeus [mm]

250

f [Hz]	L <sub>n</sub> [dB]
50	81
63	81
80	85
100	92
125	93
160	93
200	92
250	90
315	92
400	94
500	92
630	94
800	91
1000	90
1250	88
1600	86
2000	83
2500	79
3150	75
4000	70
5000	64



S [m<sup>2</sup>] = 15

Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

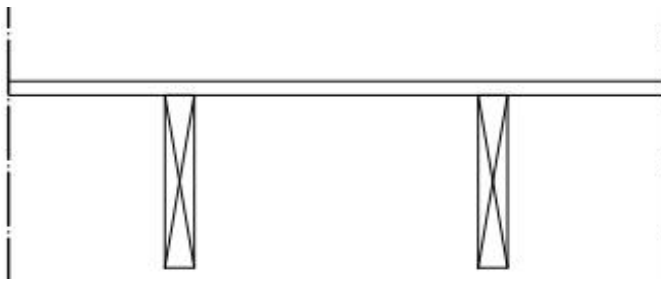
Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

L<sub>n,w</sub> (C<sub>l</sub>) = 91 (-3) dB

C<sub>l,50-2500</sub> = -2 dB

L<sub>n,w</sub> + C<sub>l,50-2500</sub> = 88 dB





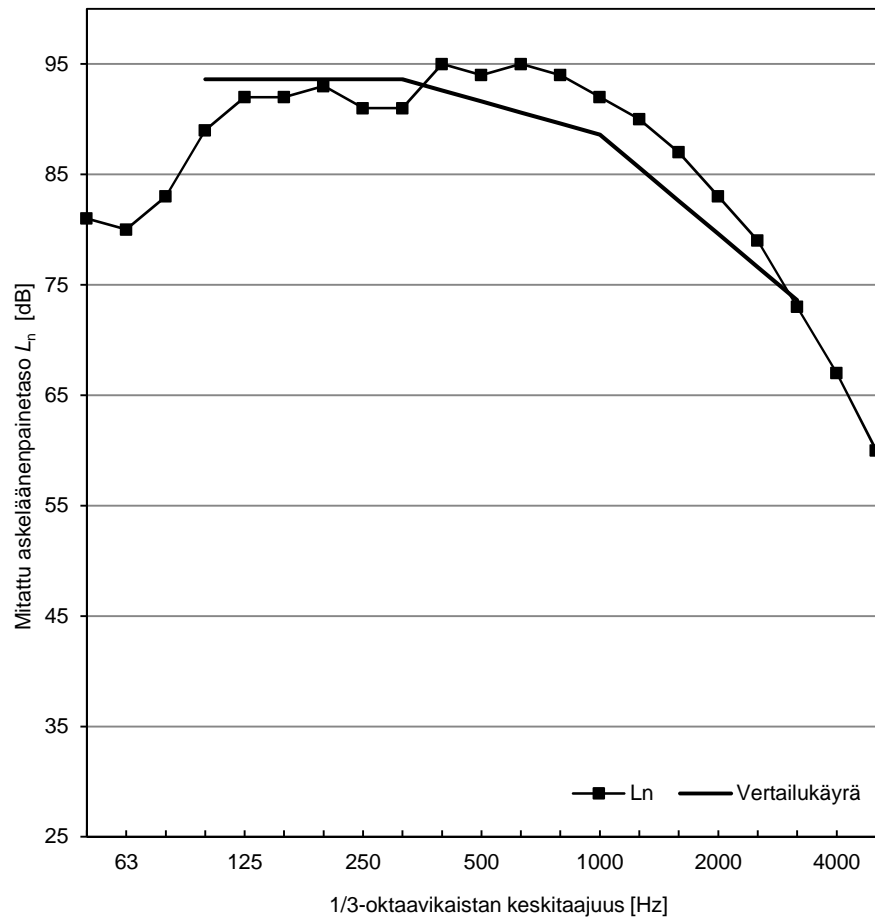
Rakennekerrokset:

	m'	d'
	[kg/m <sup>2</sup> ]	[mm]
OSB-levy	10,4	19
sahat.palkki (38x235) k406		235

Kokonaiskorkeus [mm]

254

f [Hz]	L <sub>n</sub> [dB]
50	81
63	80
80	83
100	89
125	92
160	92
200	93
250	91
315	91
400	95
500	94
630	95
800	94
1000	92
1250	90
1600	87
2000	83
2500	79
3150	73
4000	67
5000	60



S [m<sup>2</sup>] = 15

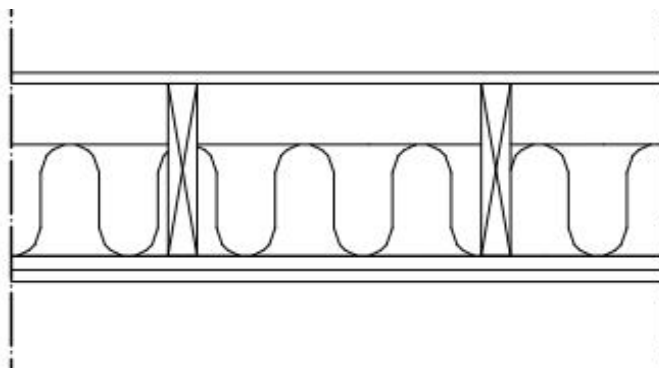
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

L<sub>n,w</sub> (C<sub>1</sub>) = 92 (-3) dB

C<sub>1,50-2500</sub> = -3 dB

L<sub>n,w</sub> + C<sub>1,50-2500</sub> = 89 dB



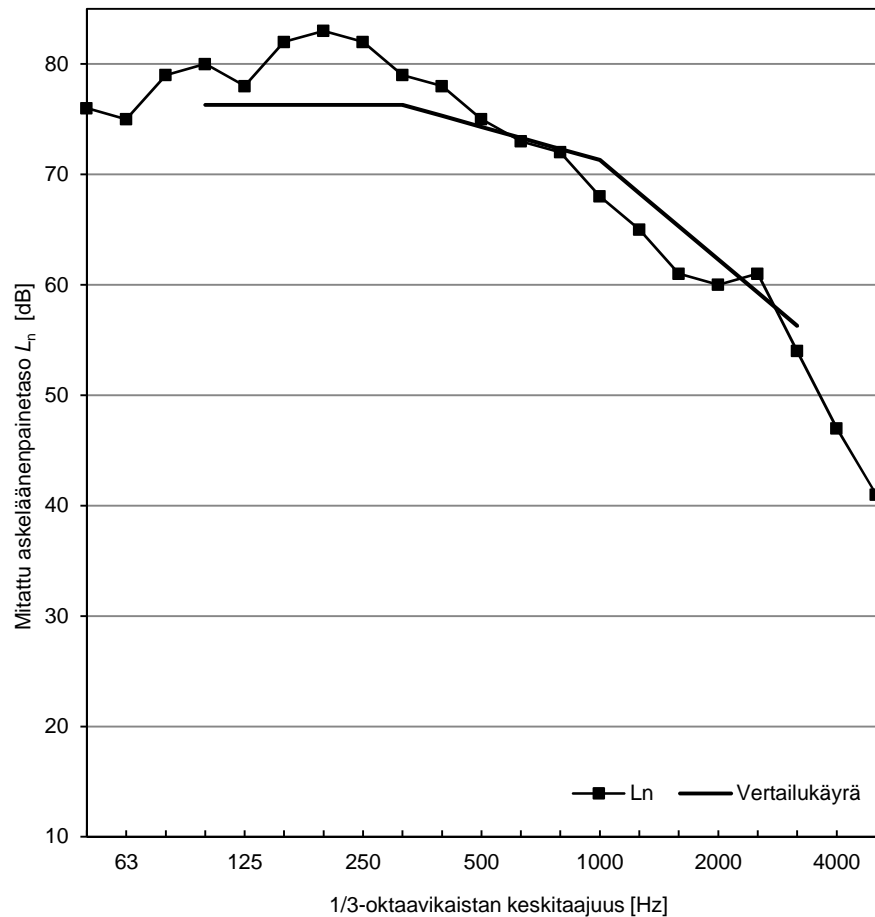
Rakennekerrokset:

	m'	d'
	[kg/m <sup>2</sup> ]	[mm]
OSB-levy	9,5	15
sahat.palkki (38x235) k406		235
- ei poikittaistuentaalinjaa		
152mm lasivilla		
lauta		19
kipsilevy	11,5	16

Kokonaiskorkeus [mm]

285

f [Hz]	L <sub>n</sub> [dB]
50	76
63	75
80	79
100	80
125	78
160	82
200	83
250	82
315	79
400	78
500	75
630	73
800	72
1000	68
1250	65
1600	61
2000	60
2500	61
3150	54
4000	47
5000	41



S [m<sup>2</sup>] = 15

Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

L<sub>n,w</sub> (C<sub>1</sub>) = 74 (0) dB

C<sub>1,50-2500</sub> = 1 dB

L<sub>n,w</sub> + C<sub>1,50-2500</sub> = 75 dB

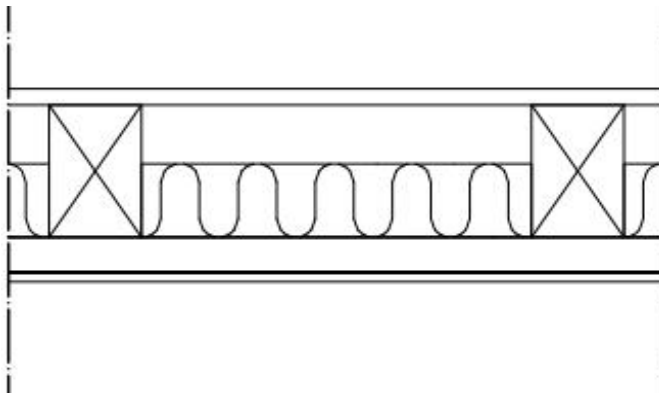
## **2. LIITE 3: ACU-VÄLIPOHJAT**

Acu-väliohjat koostuvat Späh et al. [108] tutkimuksista saaduista mittaustuloksista ja väliohjien materiaalitiedoista. Späh et al. tutkimuksen mittaukset tehtiin osana Acu-wood-tutkimushanketta.

Liitteessä on esitetty seuraavat väliohjarakenteet:

Acu 1-11

Yhteensä 11 väliohjarakennetta



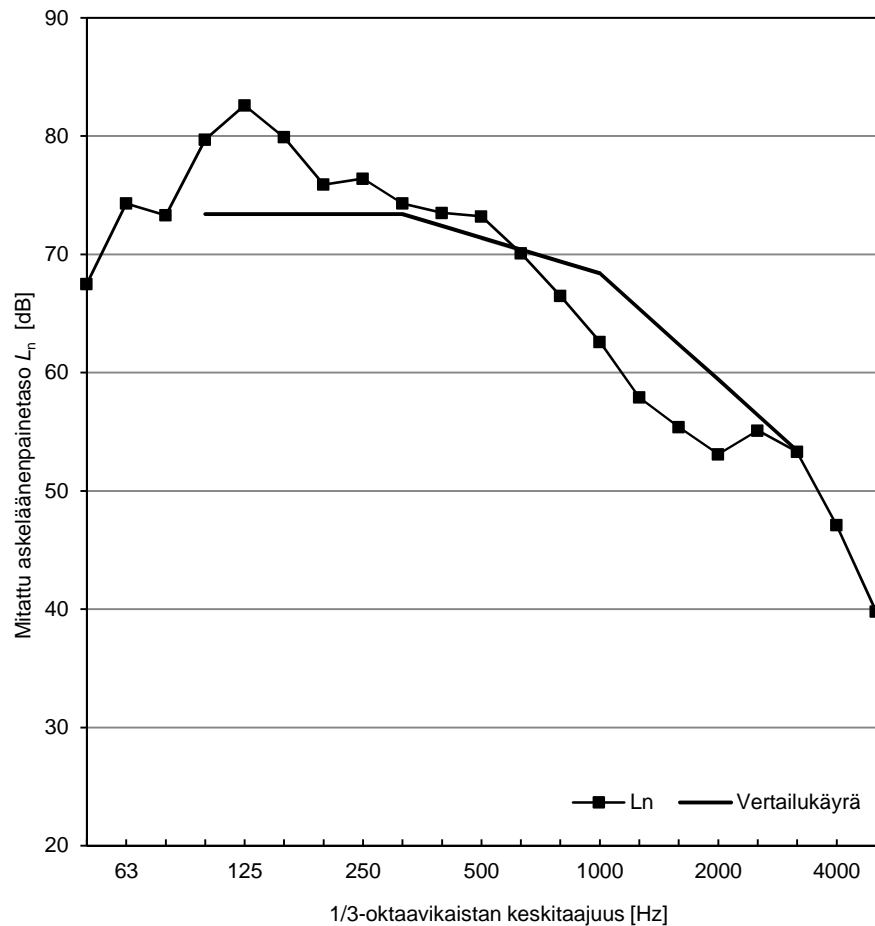
**Rakennekerrokset:**

	$m'$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$d'$ [mm]
lastulevy, k300 ruuvit	14,5	22,0
sahat.palkki,(120x180)mm		180,0
* palkit k625		
mineraalivilla, 5-10kPas/m <sup>2</sup>		100,0
puukoolaus,(24x48)mm, k625		48,0
*poikittain palkkeihin nähden kipsilevy, k300 ruuvit	10	12,5

**Kokonaiskorkeus [mm]**

362,5

$f$ [Hz]	$L_n$ [dB]
50	67,5
63	74,3
80	73,3
100	79,7
125	82,6
160	79,9
200	75,9
250	76,4
315	74,3
400	73,5
500	73,2
630	70,1
800	66,5
1000	62,6
1250	57,9
1600	55,4
2000	53,1
2500	55,1
3150	53,3
4000	47,1
5000	39,8



$S [m^2] = 18$

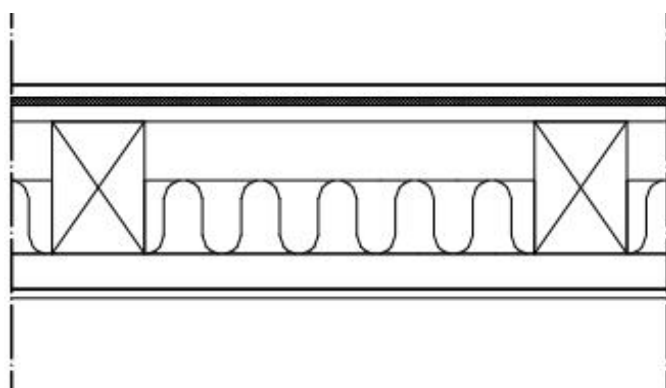
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

$L_{n,w} (C_1) = 71 (1) \text{ dB}$

$C_{1,50-2500} = 1 \text{ dB}$

$L_{n,w} + C_{1,50-2500} = 73 \text{ dB}$



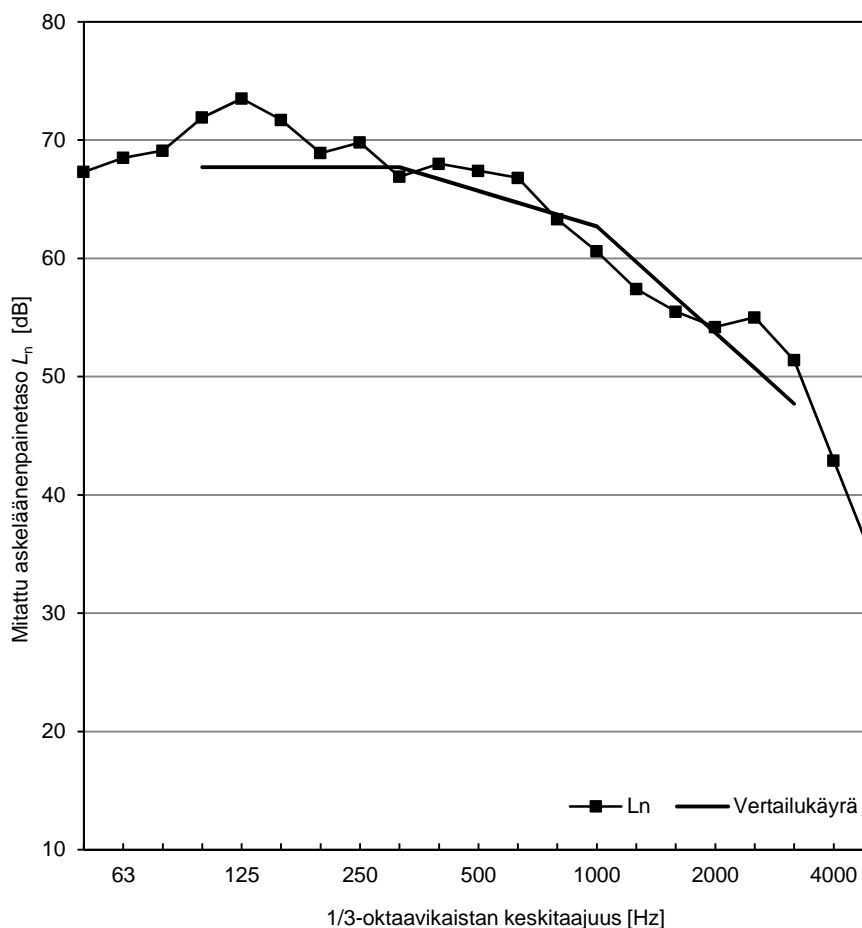
Rakennekerrokset:

	m'	d'
	[kg/m <sup>2</sup> ]	[mm]
kipsikuitulevy	23	18
puukuitulevy	2,5	10
lastulevy, k300 ruuvit	14,5	22,0
sahat.palkki,(120x180)mm		180,0
* palkit k625		
mineraalivilla, 5-10kPas/m <sup>2</sup>		100,0
puukoolaus,(24x48)mm, k625		48,0
*poikittain palkkeihin nähden		
kipsilevy, k300 ruuvit	10	12,5

Kokonaiskorkeus [mm]

390,5

f [Hz]	L <sub>n</sub> [dB]
50	67,3
63	68,5
80	69,1
100	71,9
125	73,5
160	71,7
200	68,9
250	69,8
315	66,9
400	68,0
500	67,4
630	66,8
800	63,3
1000	60,6
1250	57,4
1600	55,5
2000	54,2
2500	55,0
3150	51,4
4000	42,9
5000	34,5



S [m<sup>2</sup>] = 18

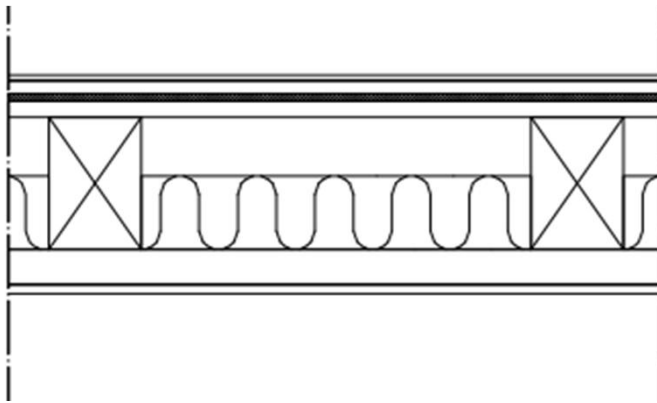
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

L<sub>n,w</sub> (C<sub>1</sub>) = 66 (-1) dB

C<sub>1,50-2500</sub> = 0 dB

L<sub>n,w</sub> + C<sub>1,50-2500</sub> = 66 dB



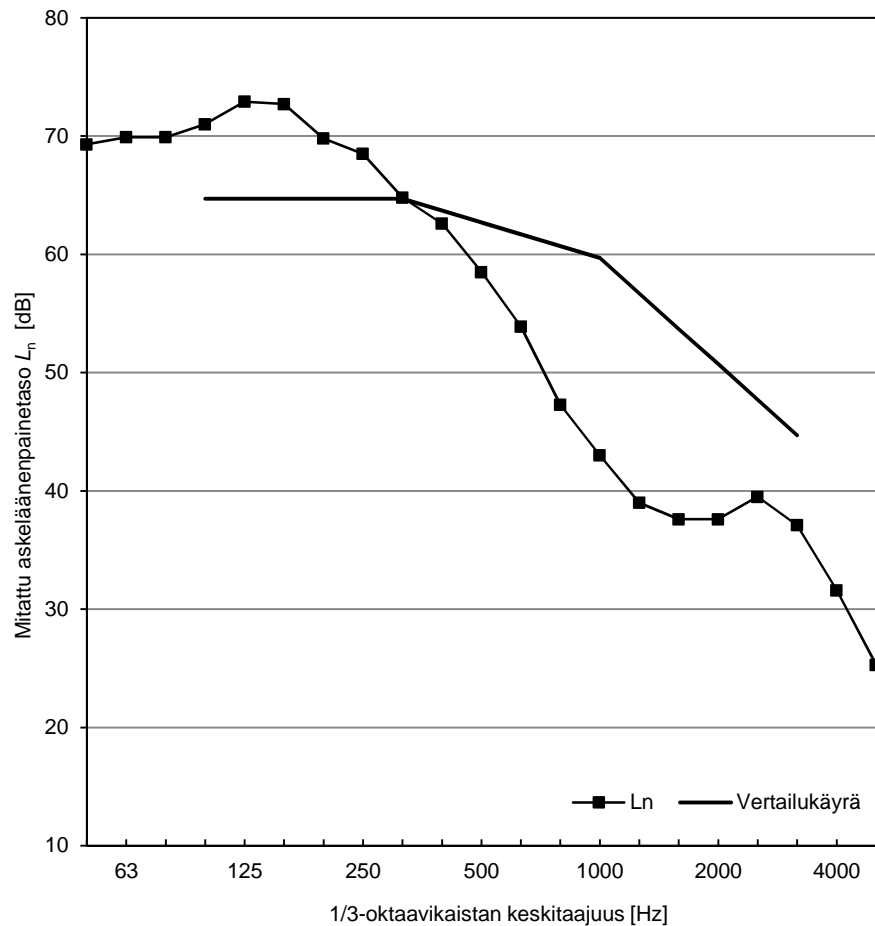
Rakennekerrokset:

	m'	d'
	[kg/m <sup>2</sup> ]	[mm]
laminaatti+aluskerros		7
kipsikuitulevy	23	18
puukuitulevy	2,5	10
lastulevy, k300 ruuvit	14,5	22,0
sahat.palkki,(120x180)mm		180,0
* palkit k625		
mineraalivilla, 5-10kPas/m <sup>2</sup>		100,0
puukoolaus,(24x48)mm, k625		48,0
*poikittain palkkeihin nähden		
kipsilevy, k300 ruuvit	10	12,5

Kokonaiskorkeus [mm]

397,5

f [Hz]	L <sub>n</sub> [dB]
50	69,3
63	69,9
80	69,9
100	71,0
125	72,9
160	72,7
200	69,8
250	68,5
315	64,8
400	62,6
500	58,5
630	53,9
800	47,3
1000	43,0
1250	39,0
1600	37,6
2000	37,6
2500	39,5
3150	37,1
4000	31,6
5000	25,3



S [m<sup>2</sup>] = 18

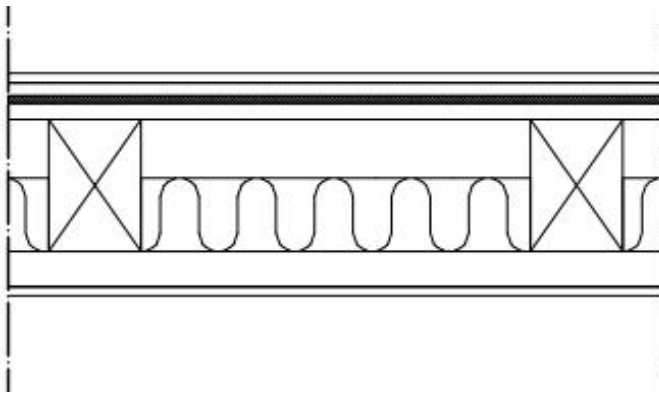
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

L<sub>n,w</sub> (C<sub>1</sub>) = 63 (1) dB

C<sub>1,50-2500</sub> = 2 dB

L<sub>n,w</sub> + C<sub>1,50-2500</sub> = 65 dB



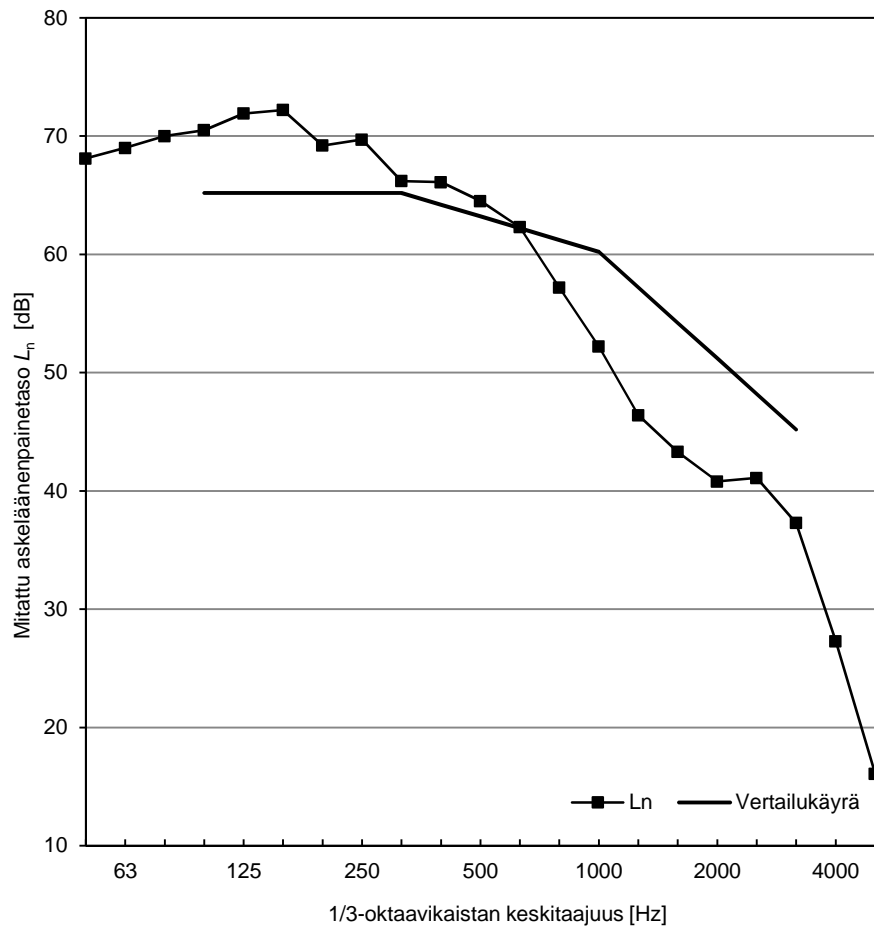
**Rakennekerrokset:**

	$m'$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$d'$ [mm]
parketti, liimattu +aluskerros		13
kipsikuitulevy	23	18
puukuitulevy	2,5	10
lastulevy, k300 ruuvit	14,5	22,0
sahat.palkki,(120x180)mm		180,0
* palkit k625		
mineraalivilla, 5-10kPas/m <sup>2</sup>		100,0
puukoolaus,(24x48)mm, k625		48,0
*poikittain palkkeihin nähden		
kipsilevy, k300 ruuvit	10	12,5

**Kokonaiskorkeus [mm]**

403,5

$f$ [Hz]	$L_n$ [dB]
50	68,1
63	69,0
80	70,0
100	70,5
125	71,9
160	72,2
200	69,2
250	69,7
315	66,2
400	66,1
500	64,5
630	62,3
800	57,2
1000	52,2
1250	46,4
1600	43,3
2000	40,8
2500	41,1
3150	37,3
4000	27,3
5000	16,1



$S [m^2] = 18$

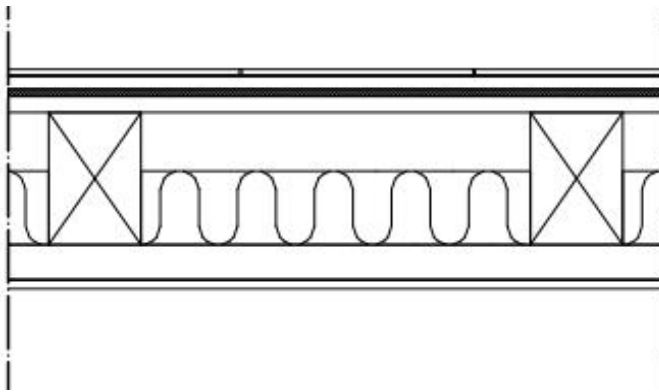
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askelaänitasoluku

$L_{n,w} (C_1) = 63 (1) \text{ dB}$

$C_{1,50-2500} = 2 \text{ dB}$

$L_{n,w} + C_{1,50-2500} = 65 \text{ dB}$



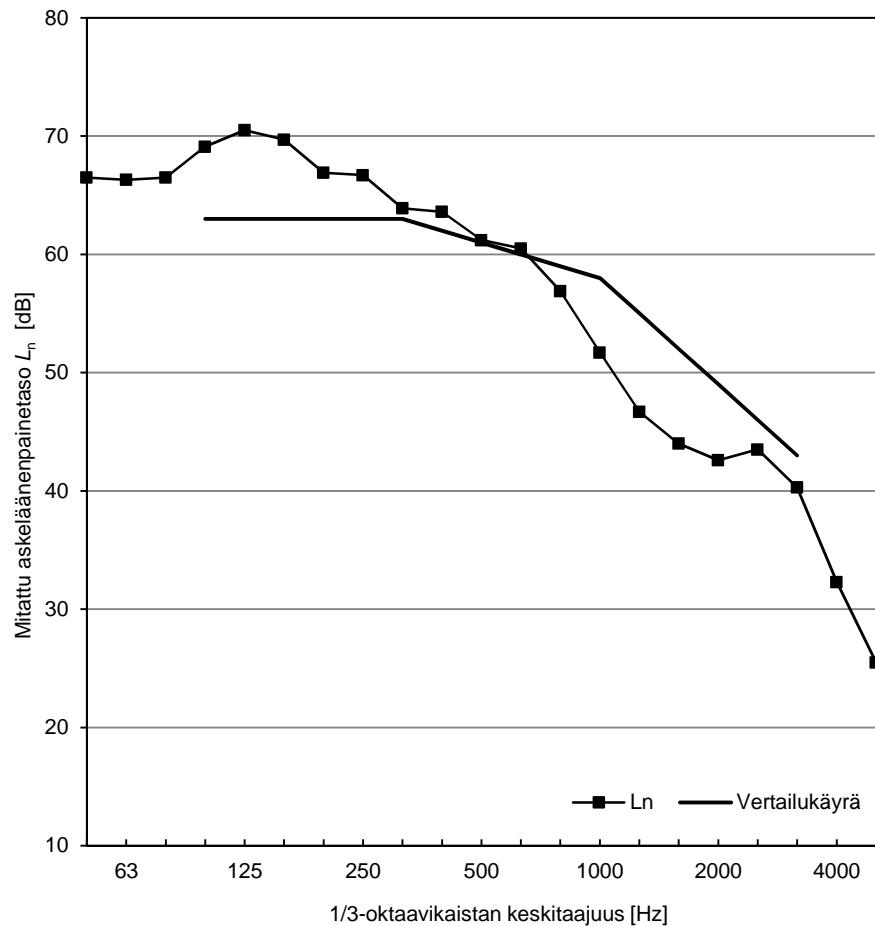
Rakennekerrokset:

	$m'$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$d'$ [mm]
laatat, liimattu		8
kipsikuitulevy	23	18
puukuitulevy	2,5	10
lastulevy, k300 ruuvit	14,5	22,0
sahat.palkki,(120x180)mm		180,0
* palkit k625		
mineraalivilla, 5-10kPas/m <sup>2</sup>		100,0
puukoolaus,(24x48)mm, k625		48,0
*poikittain palkkeihin nähden		
kipsilevy, k300 ruuvit	10	12,5

Kokonaiskorkeus [mm]

398,5

$f$ [Hz]	$L_n$ [dB]
50	66,5
63	66,3
80	66,5
100	69,1
125	70,5
160	69,7
200	66,9
250	66,7
315	63,9
400	63,6
500	61,2
630	60,5
800	56,9
1000	51,7
1250	46,7
1600	44,0
2000	42,6
2500	43,5
3150	40,3
4000	32,3
5000	25,5



$S [m^2] = 18$

Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

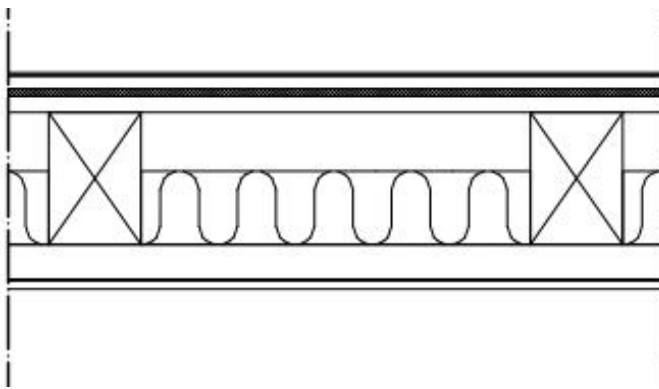
Välipohjarakenteelle laskettu askelaänitasoluku

$L_{n,w}(C_1) = 61 (1) \text{ dB}$

$C_{1,50-2500} = 2 \text{ dB}$

$L_{n,w} + C_{1,50-2500} = 63 \text{ dB}$





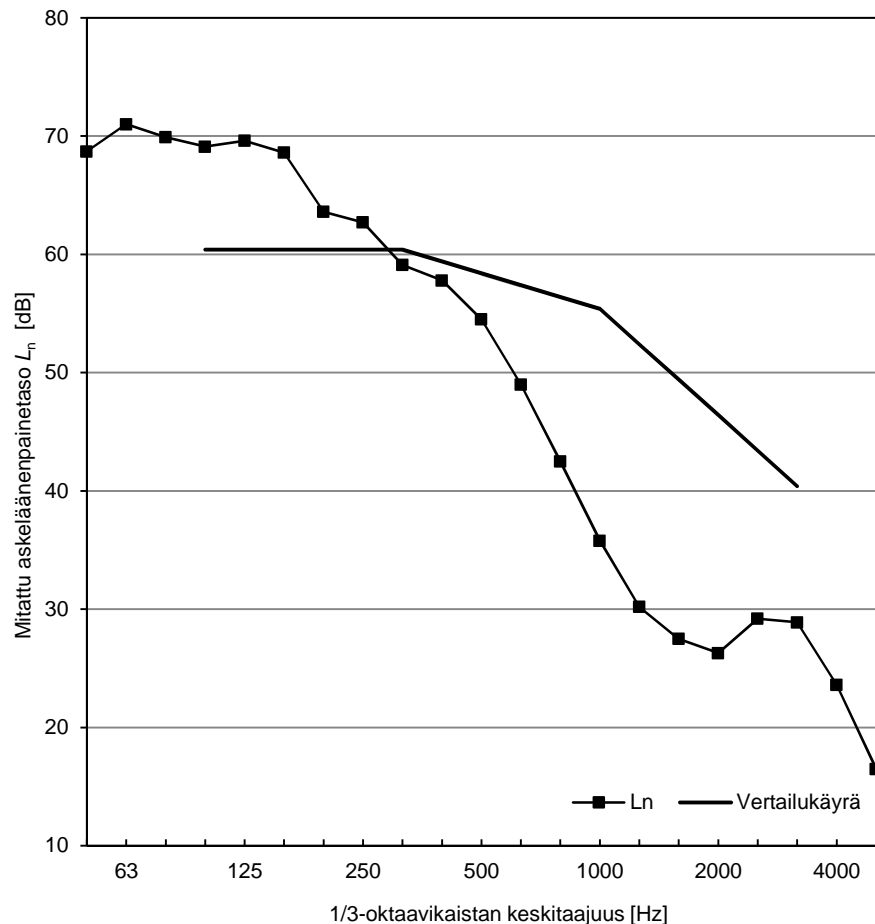
Rakennekerrokset:

	$m'$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$d'$ [mm]
matto		4
kipsikuitulevy	23	18
puukuitulevy	2,5	10
lastulevy, k300 ruuvit	14,5	22,0
sahat.palkki,(120x180)mm		180,0
* palkit k625		
mineraalivilla, 5-10kPas/m <sup>2</sup>		100,0
puukoolaus,(24x48)mm, k625		48,0
*poikittain palkkeihin nähden		
kipsilevy, k300 ruuvit	10	12,5

Kokonaiskorkeus [mm]

394,5

$f$ [Hz]	$L_n$ [dB]
50	68,7
63	71,0
80	69,9
100	69,1
125	69,6
160	68,6
200	63,6
250	62,7
315	59,1
400	57,8
500	54,5
630	49,0
800	42,5
1000	35,8
1250	30,2
1600	27,5
2000	26,3
2500	29,2
3150	28,9
4000	23,6
5000	16,5



$S [m^2] = 18$

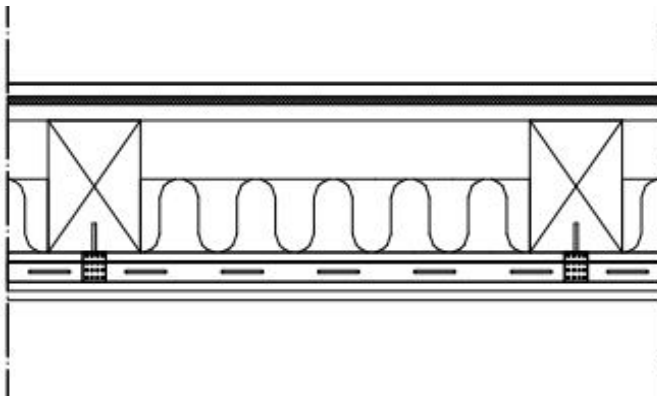
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

$L_{n,w} (C_1) = 58 (1) \text{ dB}$

$C_{1,50-2500} = 4 \text{ dB}$

$L_{n,w} + C_{1,50-2500} = 63 \text{ dB}$



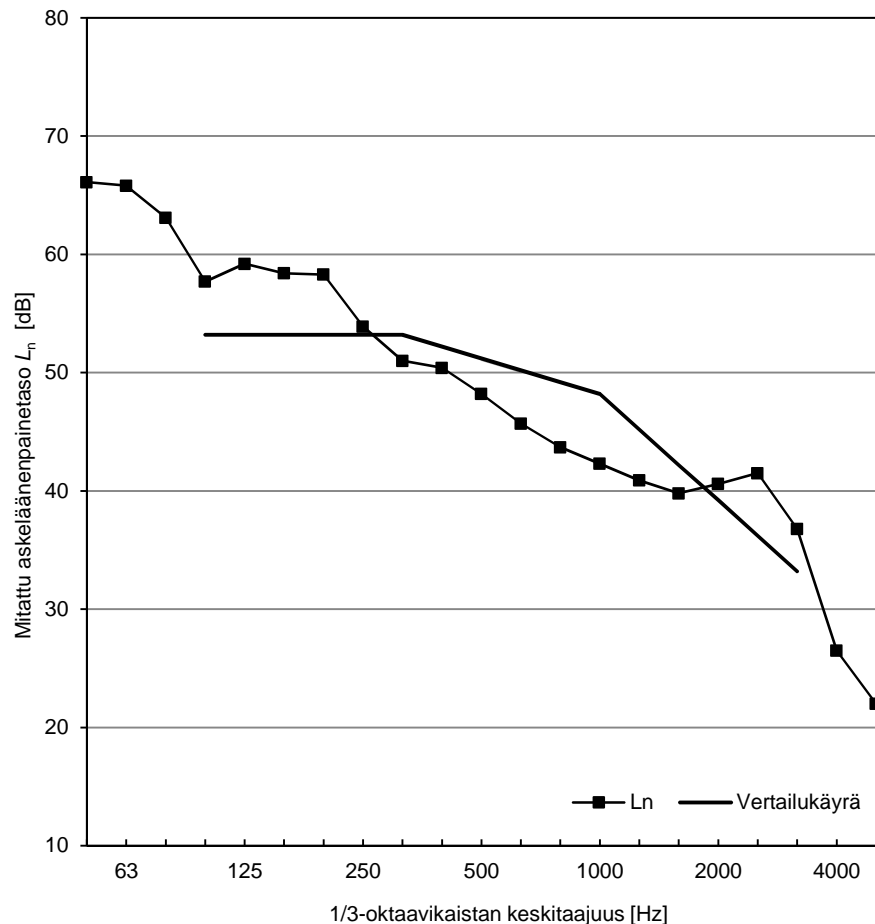
Rakennekerrokset:

	m'	d'
	[kg/m <sup>2</sup> ]	[mm]
kipsikuitulevy	23	18
puukuitulevy	2,5	10
lastulevy, k300 ruuvit	14,5	22,0
sahat.palkki,(120x180)mm		180,0
* palkit k625		
mineraalivilla, 5-10kPas/m <sup>2</sup>		100,0
metalliprofiili+ilmaväli		40,0
*poikittain palkkeihin nähden		
2xkipsilevy, k300 ruuvit	10	25,0
kipsilevy, k300 ruuvit	10	12,5

Kokonaiskorkeus [mm]

407,5

f [Hz]	L <sub>n</sub> [dB]
50	66,1
63	65,8
80	63,1
100	57,7
125	59,2
160	58,4
200	58,3
250	53,9
315	51,0
400	50,4
500	48,2
630	45,7
800	43,7
1000	42,3
1250	40,9
1600	39,8
2000	40,6
2500	41,5
3150	36,8
4000	26,5
5000	22,0



S [m<sup>2</sup>] = 18

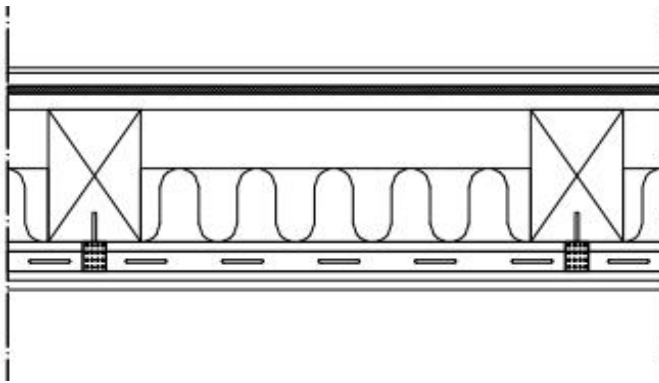
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

L<sub>n,w</sub> (C<sub>1</sub>) = 51 (-1) dB

C<sub>1,50-2500</sub> = 5 dB

L<sub>n,w</sub> + C<sub>1,50-2500</sub> = 56 dB



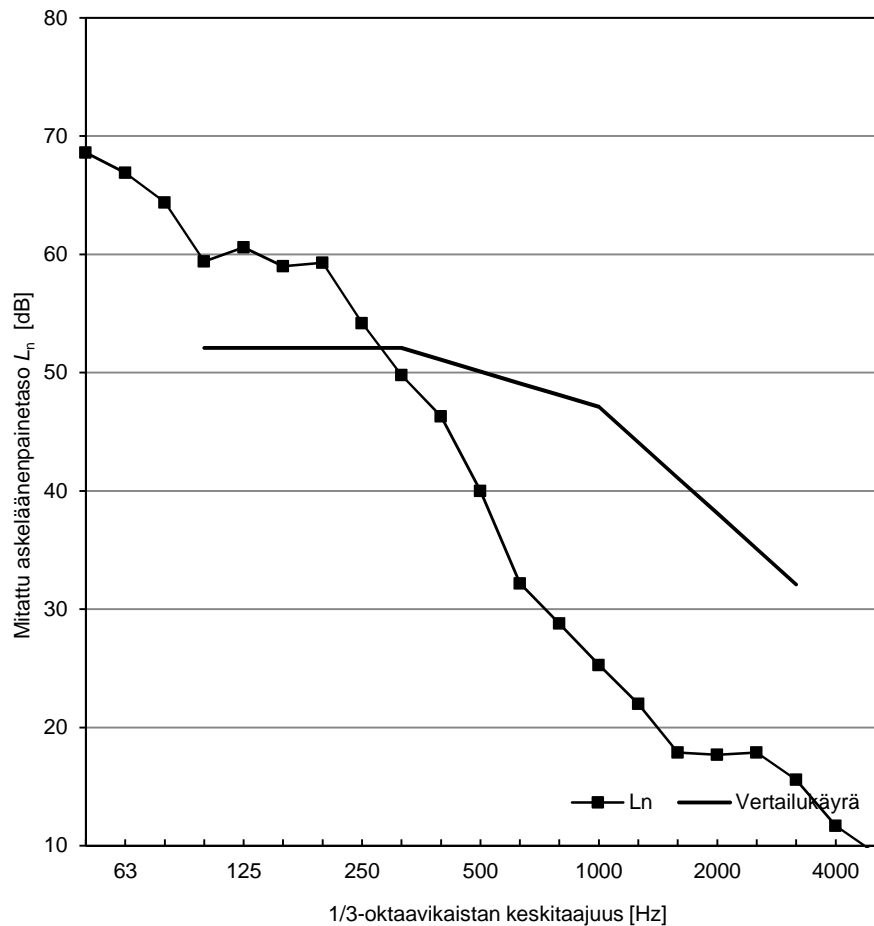
**Rakennekerrokset:**

	$m'$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$d'$ [mm]
laminaatti+aluskerros		7
kipsikuitulevy	23	18
puukuitulevy	2,5	10
lastulevy, k300 ruuvit	14,5	22,0
sahat.palkki,(120x180)mm		180,0
* palkit k625		
mineraalivilla, 5-10kPas/m <sup>2</sup>		100,0
metalliprofiili+ilmaväli		40,0
*poikittain palkkeihin nähden		
2xkipsilevy, k300 ruuvit	10	25,0

**Kokonaiskorkeus [mm]**

402,0

$f$ [Hz]	$L_n$ [dB]
50	68,6
63	66,9
80	64,4
100	59,4
125	60,6
160	59,0
200	59,3
250	54,2
315	49,8
400	46,3
500	40,0
630	32,2
800	28,8
1000	25,3
1250	22,0
1600	17,9
2000	17,7
2500	17,9
3150	15,6
4000	11,7
5000	9,4



$S [m^2] = 18$

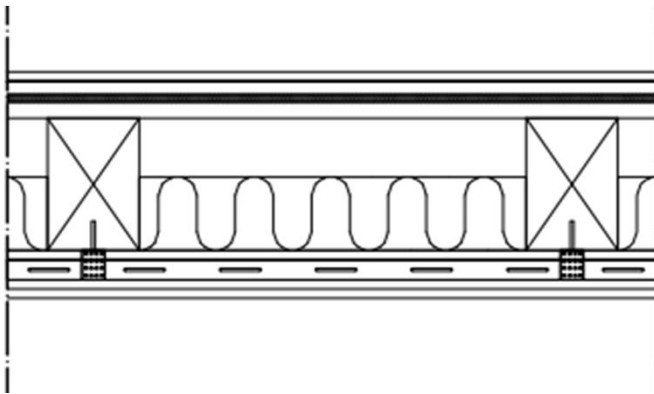
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

$L_{n,w} (C_1) = 50 (1) \text{ dB}$

$C_{1,50-2500} = 8 \text{ dB}$

$L_{n,w} + C_{1,50-2500} = 58 \text{ dB}$



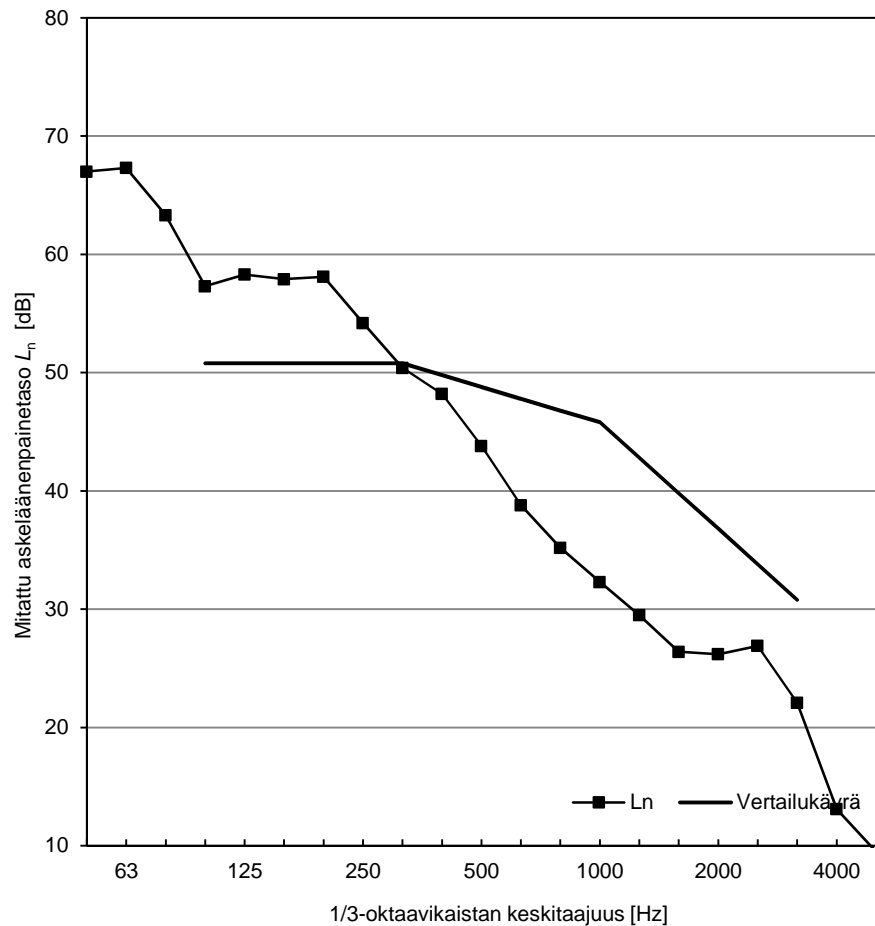
**Rakennekerrokset:**

	m'	d'
	[kg/m <sup>2</sup> ]	[mm]
parketti, liimattu +aluskerros		13
kipsikuitulevy	23	18
puukuitulevy	2,5	10
lastulevy, k300 ruuvit	14,5	22,0
sahat.palkki,(120x180)mm		180,0
* palkit k625		
mineraalivilla, 5-10kPas/m <sup>2</sup>		100,0
metalliprofiili+ilmaväli		40,0
*poikittain palkkeihin nähden		
2xkipsilevy, k300 ruuvit	10	25,0

**Kokonaiskorkeus [mm]**

408,0

f [Hz]	L <sub>n</sub> [dB]
50	67,0
63	67,3
80	63,3
100	57,3
125	58,3
160	57,9
200	58,1
250	54,2
315	50,4
400	48,2
500	43,8
630	38,8
800	35,2
1000	32,3
1250	29,5
1600	26,4
2000	26,2
2500	26,9
3150	22,1
4000	13,1
5000	9,5



S [m<sup>2</sup>] = 18

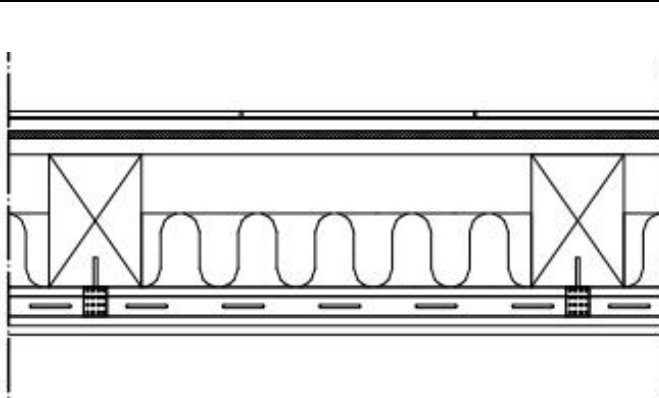
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askelaänitasoluku

L<sub>n,w</sub> (C<sub>1</sub>) = 49 (1) dB

C<sub>1,50-2500</sub> = 8 dB

L<sub>n,w</sub> + C<sub>1,50-2500</sub> = 57 dB



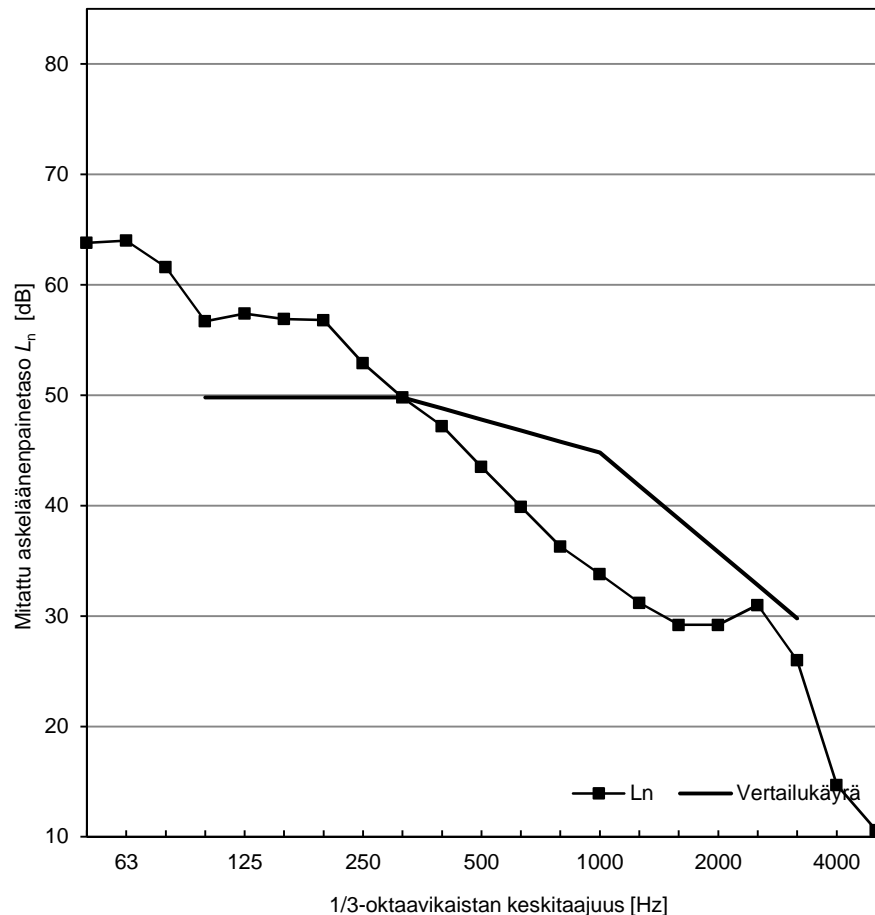
**Rakennekerrokset:**

	$m'$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$d'$ [mm]
laatat, liimattu		8
kipsikuitulevy	23	18
puukuitulevy	2,5	10
lastulevy, k300 ruuvit	14,5	22
sahat.palkki,(120x180)mm		180
*k625		
100mm mineraalivilla, 5-10kPas/m <sup>2</sup>		
metalliprofiili+ilmaväli		40
*poikittain palkkeihin nähden		
2xkipsilevy, k300 ruuvit		25
*kipsilevyn $m'=10\text{kg/m}^2$		

**Kokonaiskorkeus [mm]**

**303**

$f$ [Hz]	$L_n$ [dB]
50	64
63	64
80	62
100	57
125	57
160	57
200	57
250	53
315	50
400	47
500	44
630	40
800	36
1000	34
1250	31
1600	29
2000	29
2500	31
3150	26
4000	15
5000	11



$S [m^2] = 18$

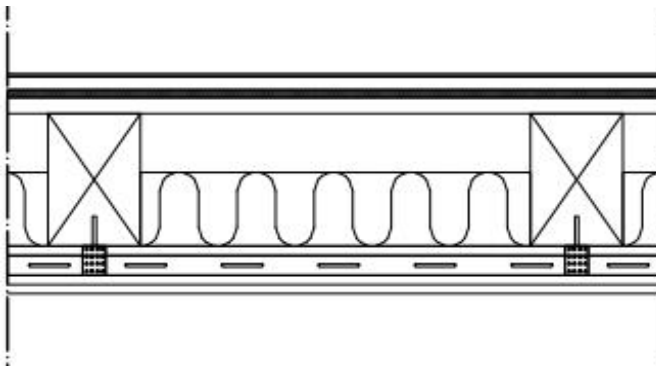
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

$L_{n,w} (C_1) = 48 (1) \text{ dB}$

$C_{1,50-2500} = 7 \text{ dB}$

$L_{n,w} + C_{1,50-2500} = 54 \text{ dB}$



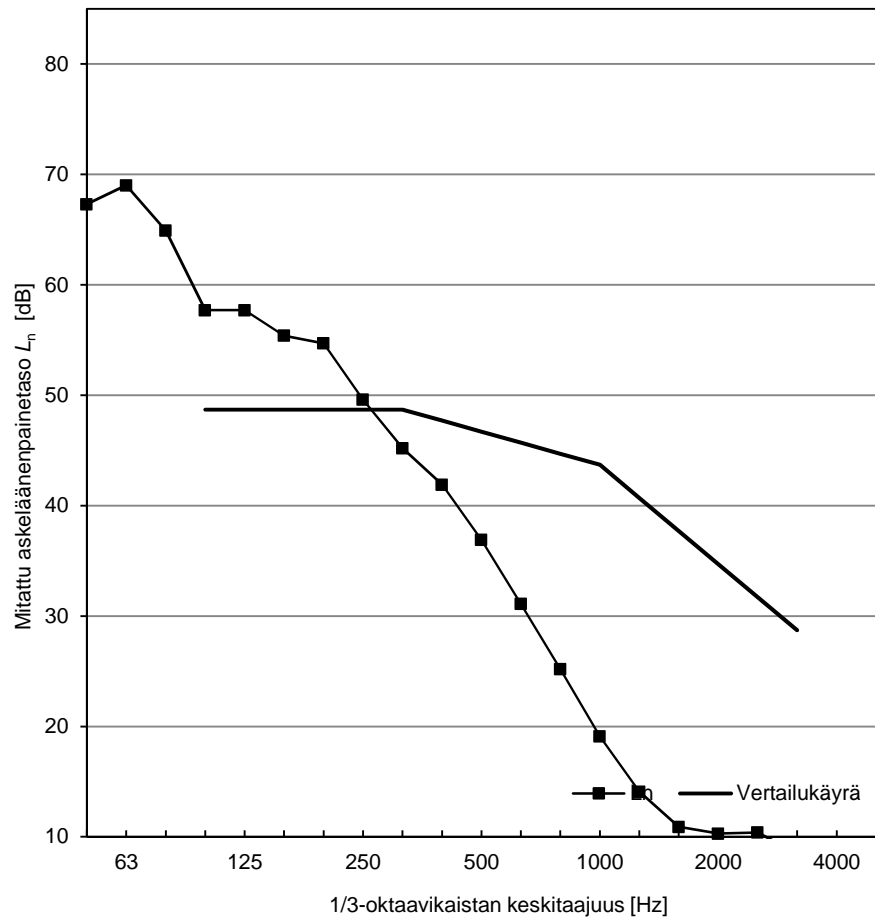
Rakennekerrokset:

	$m'$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$d'$ [mm]
matto		4
kipsikuitulevy	23	18
puukuitulevy	2,5	10
lastulevy, k300 ruuvit	14,5	22,0
sahat.palkki,(120x180)mm		180,0
*k625		
100mm mineraalivilla, 5-10kPas/m <sup>2</sup>		
metalliprofiili+ilmaväli		40,0
*poikittain palkkeihin nähden		
2xkipsilevy, k300 ruuvit		25,0
*kispilevyn $m'=10\text{kg/m}^2$		

Kokonaiskorkeus [mm]

299

$f$ [Hz]	$L_n$ [dB]
50	67
63	69
80	65
100	58
125	58
160	55
200	55
250	50
315	45
400	42
500	37
630	31
800	25
1000	19
1250	14
1600	11
2000	10
2500	10
3150	9
4000	8
5000	7



$S [m^2] = 18$

Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

$L_{n,w} (C_1) = 47 (1) \text{ dB}$

$C_{1,50-2500} = 11 \text{ dB}$

$L_{n,w} + C_{1,50-2500} = 58 \text{ dB}$

### **3. LIITE 3: ABO-VÄLIPOHJAT**

Abo-välipohjat koostuvat Balanant et al. [1] tutkimuksista saaduista mittaustuloksista ja välipohjien materiaalitiedoista. Tutkimuksesta oli saatavissa niukalti materiaalitietoja. Saatavissa olleet tiedot on esitetty liitteissä.

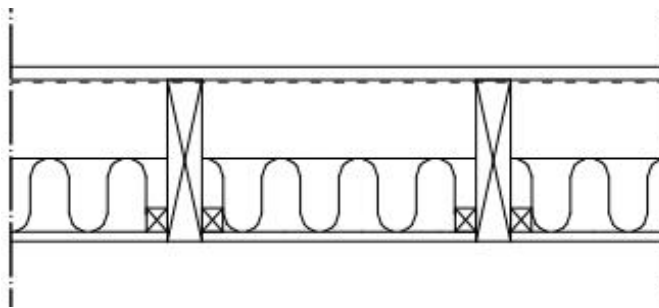
Liitteessä on esitetty seuraavat välipohjarakenteet:

Abo 1-16

Abo 18-23

Abo 26- 44

Yhteensä 31 välipohjarakennetta



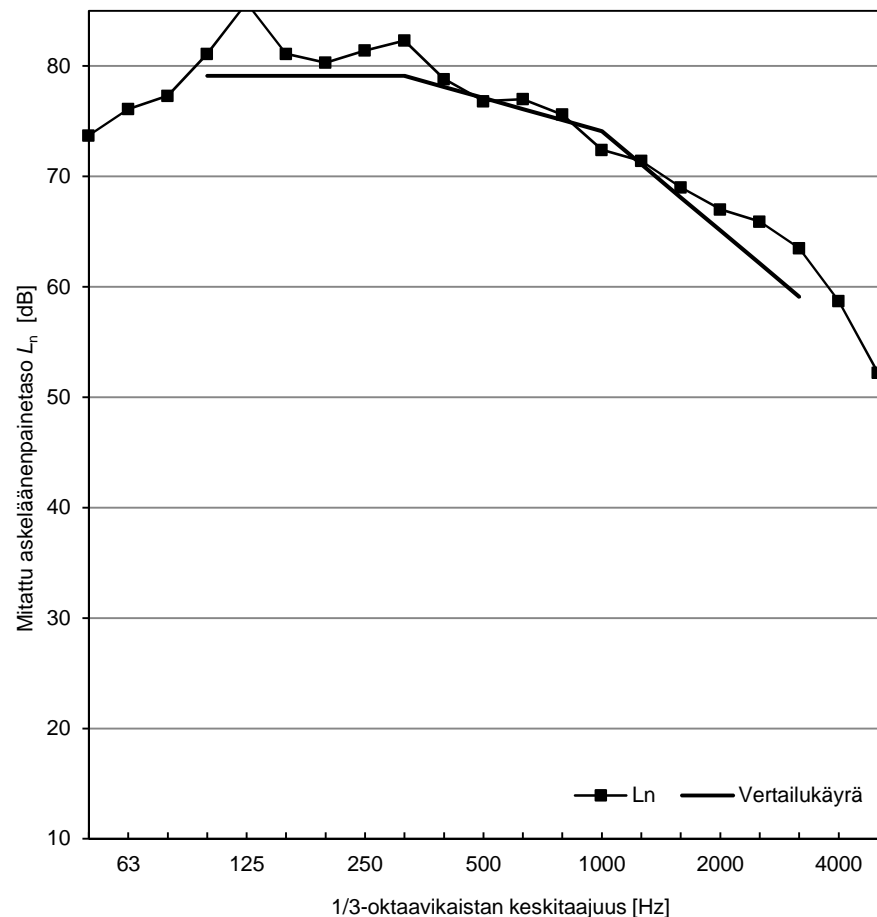
Rakennekerrokset:

	m'	d'
	[kg/m <sup>2</sup> ]	[mm]
OSB-levy		18
*levyn alla höyrysulkumuovi		
sahat.palkki (45x220), k400		220
kivivilla (100mm)		
kipsilevy (13mm),palkkien tasossa		
* levykiinnitys (27x32) puurimoilla		
*levyjen pintamassoista ei tietoja		

Kokonaiskorkeus [mm]

238

f [Hz]	L <sub>n</sub> [dB]
50	74
63	76
80	77
100	81
125	86
160	81
200	80
250	81
315	82
400	79
500	77
630	77
800	76
1000	72
1250	71
1600	69
2000	67
2500	66
3150	64
4000	59
5000	52



S [m<sup>2</sup>] = 17

Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

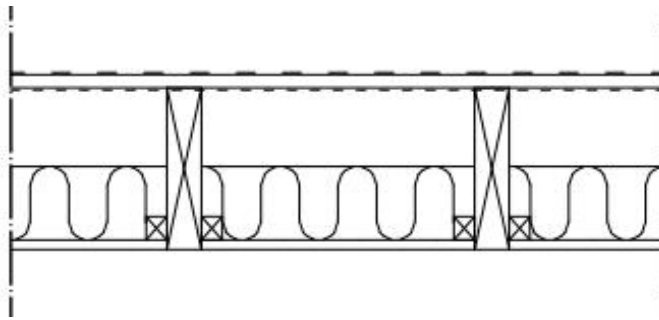
Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

L<sub>n,w</sub> (C<sub>1</sub>) = 77 (-1) dB

C<sub>1,50-2500</sub> = -1 dB

L<sub>n,w</sub> + C<sub>1,50-2500</sub> = 77 dB





**Rakennekerrokset:**

Vinyylipäällyste, "Forbo"  
OSB-levy  
\*levyn alla höyrysulkumuovi  
sahat.palkki (45x220), k400  
kivivilla (100mm)  
kipsilevy (13mm),palkkien tasossa  
\* levykiinnitys (27x32) puurimoilla  
\*levyjen pintamassoista ei tietoja

**m'** **d'**  
[kg/m<sup>2</sup>] [mm]

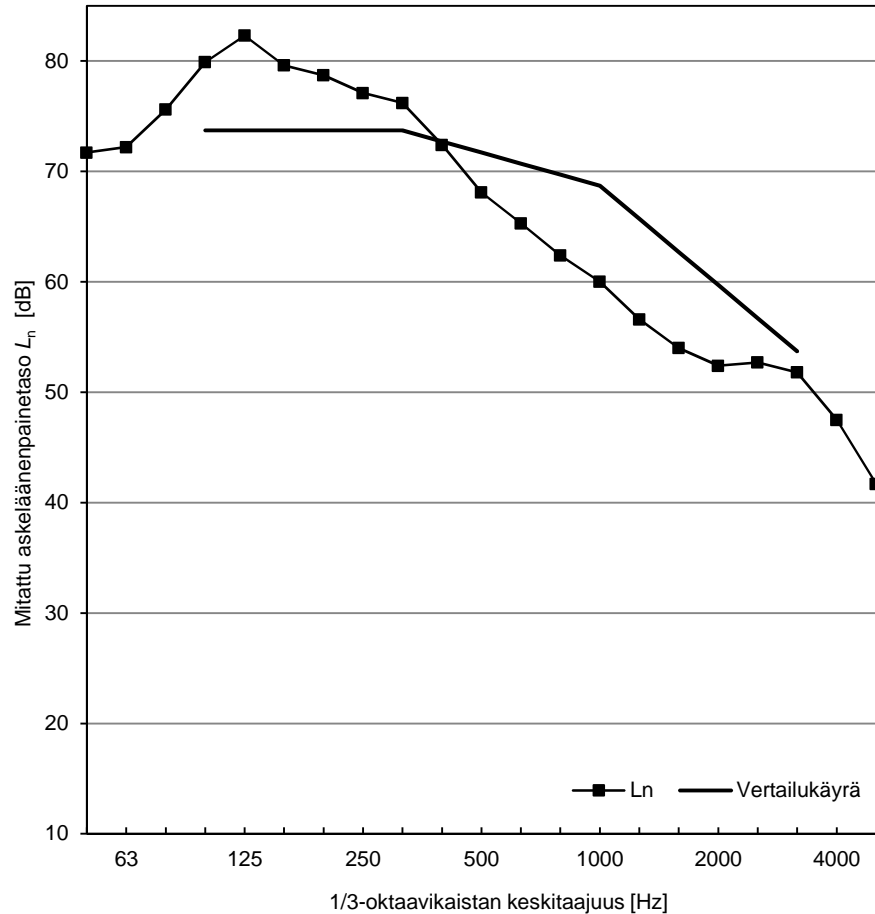
18

220

**Kokonaiskorkeus [mm]**

238

<i>f</i> [Hz]	<i>L<sub>n</sub></i> [dB]
50	72
63	72
80	76
100	80
125	82
160	80
200	79
250	77
315	76
400	72
500	68
630	65
800	62
1000	60
1250	57
1600	54
2000	52
2500	53
3150	52
4000	48
5000	42



$S [m^2] = 17$

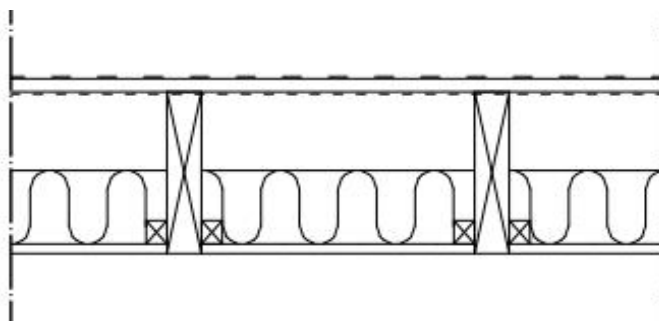
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

$L_{n,w} (C_1) = 72 (1) \text{ dB}$

$C_{1,50-2500} = 1 \text{ dB}$

$L_{n,w} + C_{1,50-2500} = 73 \text{ dB}$



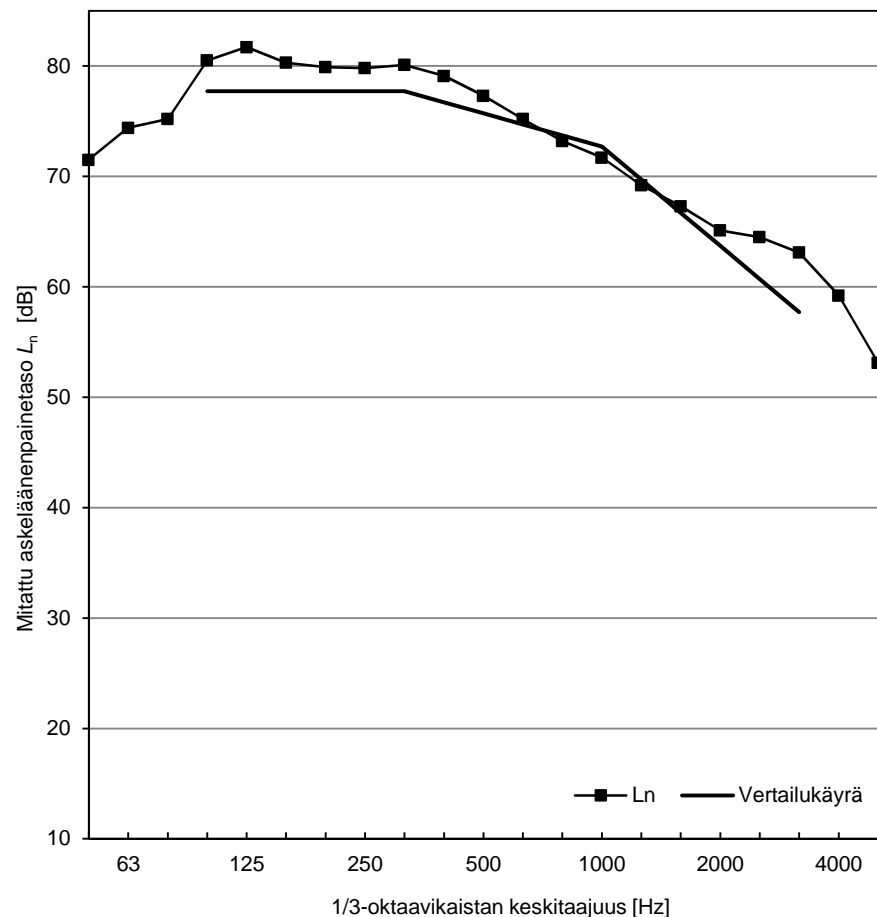
**Rakennekerrokset:**

	$m'$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$d'$ [mm]
Vinyylipäällyste, "Gerflor"		
OSB-levy		18
*levyn alla höyrysulkumuovi		
sahat.palkki (45x220), k400		220
kivivilla (100mm)		
kipsilevy (13mm),palkkien tasossa		
* levykiinnitys (27x32) puurimoilla		
*levyjen pintamassoista ei tietoja		

**Kokonaiskorkeus [mm]**

238

$f$ [Hz]	$L_n$ [dB]
50	72
63	74
80	75
100	81
125	82
160	80
200	80
250	80
315	80
400	79
500	77
630	75
800	73
1000	72
1250	69
1600	67
2000	65
2500	65
3150	63
4000	59
5000	53



$S [m^2] = 17$

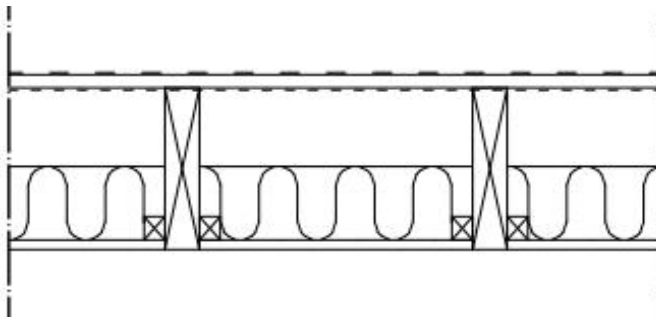
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Väliohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

$L_{n,w} (C_1) = 76 (-1) \text{ dB}$

$C_{1,50-2500} = -1 \text{ dB}$

$L_{n,w} + C_{1,50-2500} = 75 \text{ dB}$



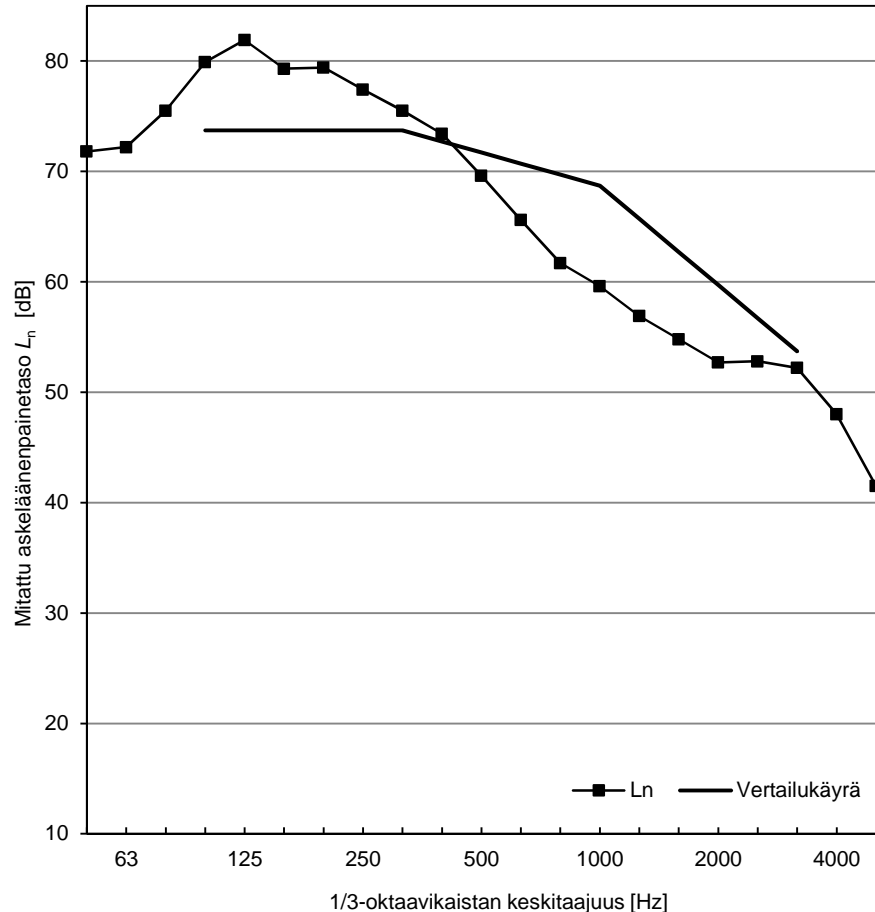
**Rakennekerrokset:**

	m'	d'
	[kg/m <sup>2</sup> ]	[mm]
Vinyylipäällyste, "Tarkett"		
OSB-levy		18
*levyn alla höyrysulkumuovi		
sahat.palkki (45x220), k400		220
kivivilla (100mm)		
kipsilevy (13mm),palkkien tasossa		
* levykiinnitys (27x32) puurimoilla		
*levyjen pintamassoista ei tietoja		

Kokonaiskorkeus [mm]

238

f [Hz]	L <sub>n</sub> [dB]
50	72
63	72
80	76
100	80
125	82
160	79
200	79
250	77
315	76
400	73
500	70
630	66
800	62
1000	60
1250	57
1600	55
2000	53
2500	53
3150	52
4000	48
5000	42



S [m<sup>2</sup>] = 17

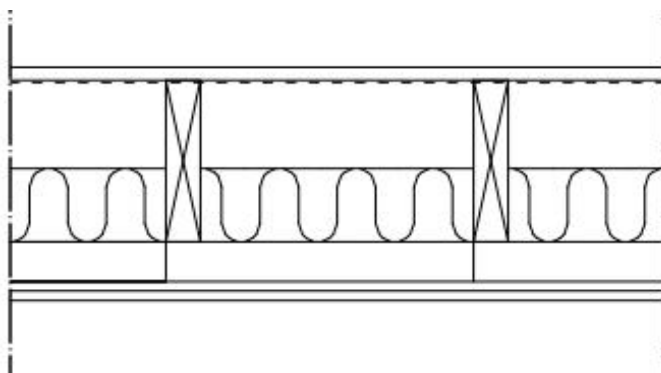
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

L<sub>n,w</sub> (C<sub>1</sub>) = 72 (1) dB

C<sub>1,50-2500</sub> = 1 dB

L<sub>n,w</sub> + C<sub>1,50-2500</sub> = 73 dB



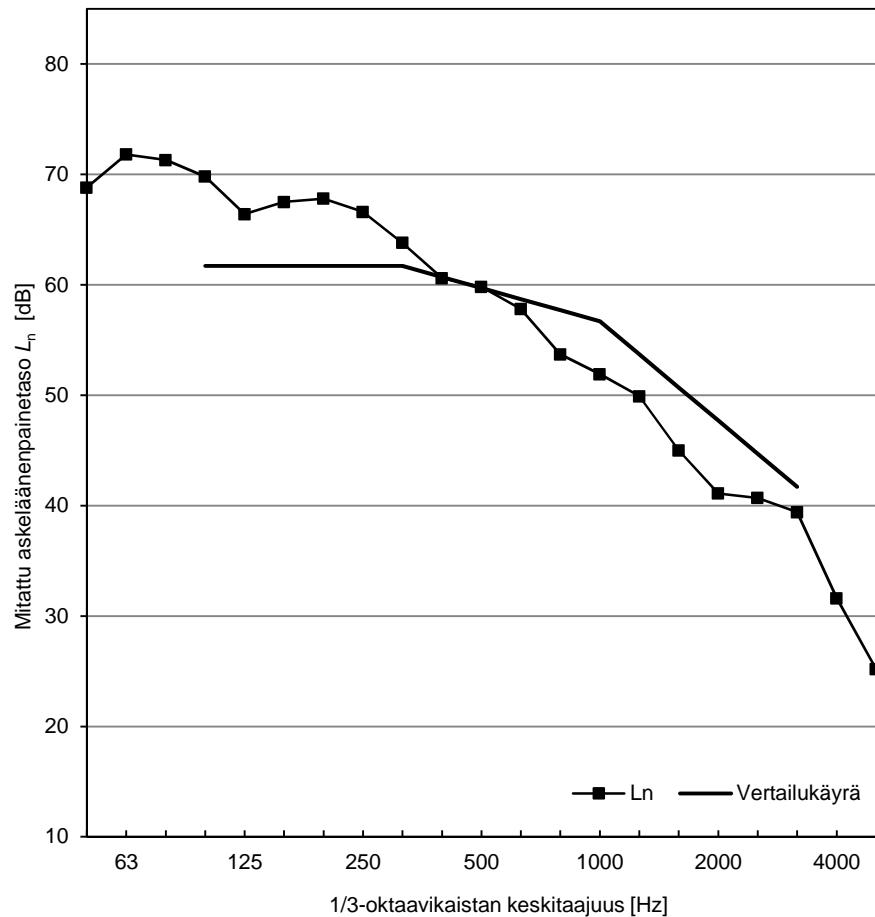
Rakennekerrokset:

	m'	d'
	[kg/m <sup>2</sup> ]	[mm]
OSB-levy		18
*levyn alla höyrystulkuvuovi		
sahat.palkki (45x220), k400		220
kivivilla (100mm)		
alakaton ripustus, vaijeri tms.		54
2x 13mm kipsilevy		26
* levyjen pintamassoista ei tietoja		
*alakattorangoista ei tietoa		

Kokonaiskorkeus [mm]

318

f [Hz]	L <sub>n</sub> [dB]
50	69
63	72
80	71
100	70
125	66
160	68
200	68
250	67
315	64
400	61
500	60
630	58
800	54
1000	52
1250	50
1600	45
2000	41
2500	41
3150	39
4000	32
5000	25



S [m<sup>2</sup>] = 17

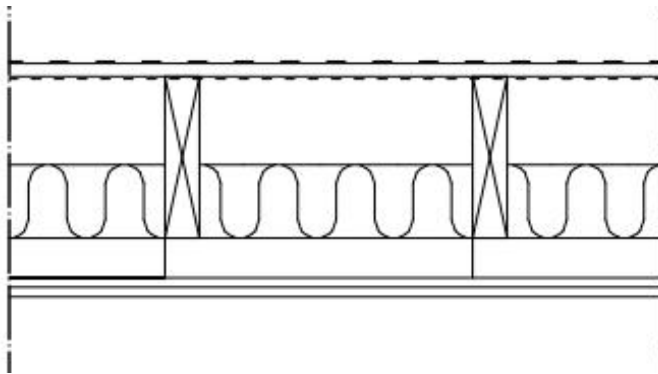
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

L<sub>n,w</sub> (C<sub>1</sub>) = 60 (1) dB

C<sub>1,50-2500</sub> = 4 dB

L<sub>n,w</sub> + C<sub>1,50-2500</sub> = 64 dB



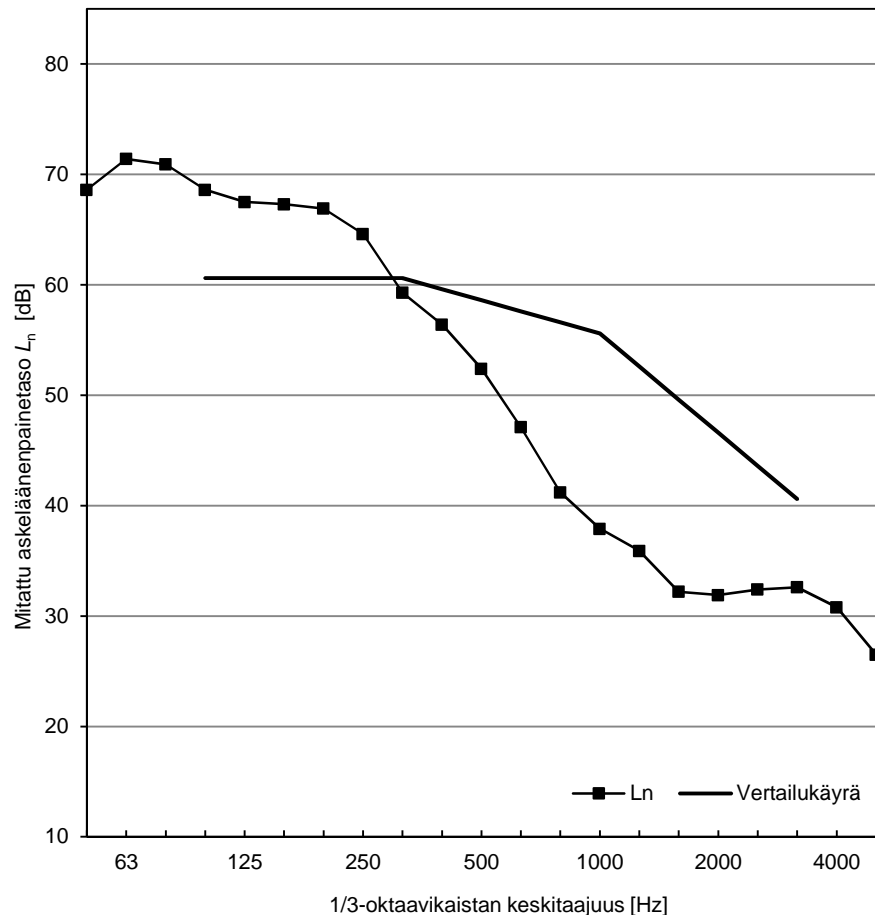
**Rakennekerrokset:**

	$m'$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$d'$ [mm]
Vinyylipäällyste, "Tarkett"		
OSB-levy		18
*levyn alla höyrysulkumuovi		
sahat.palkki (45x220), k400		220
kivivilla (100mm)		
alakatn ripustus, vaijeri tms.		54
2x 13mm kipsilevy		26
* levyjen pintamassoista ei tietoja		
*alakatnangoista ei tietoa		

**Kokonaiskorkeus [mm]**

318

$f$ [Hz]	$L_n$ [dB]
50	69
63	71
80	71
100	69
125	68
160	67
200	67
250	65
315	59
400	56
500	52
630	47
800	41
1000	38
1250	36
1600	32
2000	32
2500	32
3150	33
4000	31
5000	27



$S [m^2] = 17$

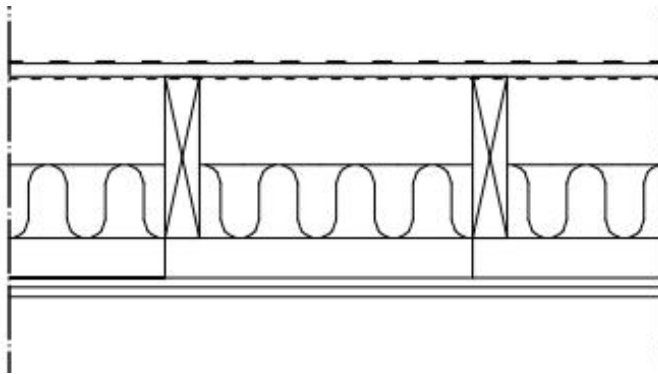
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

$L_{n,w} (C_1) = 59 (1) \text{ dB}$

$C_{1,50-2500} = 4 \text{ dB}$

$L_{n,w} + C_{1,50-2500} = 63 \text{ dB}$



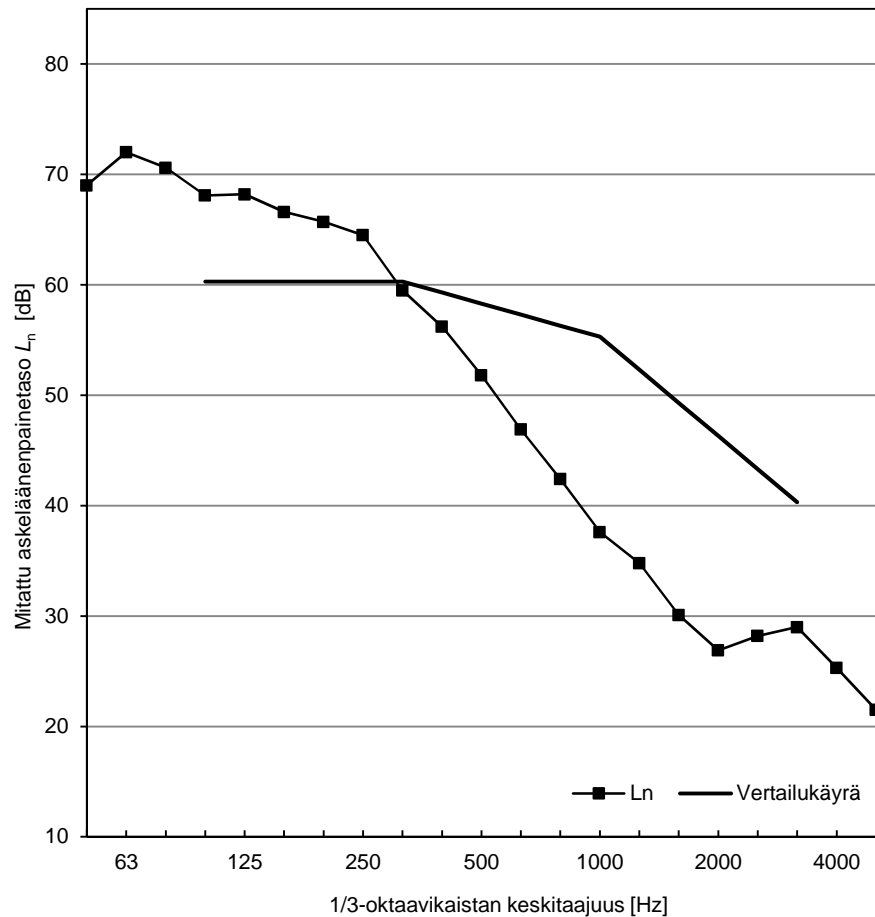
**Rakennekerrokset:**

	$m'$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$d'$ [mm]
Vinyylipäällyste, "Forbo"		
OSB-levy		18
*levyn alla höyrysulkumuovi		
sahat.palkki (45x220), k400		220
kivivilla (100mm)		
alakatn ripustus, vaijeri tms.		54
2x 13mm kipsilevy		26
* levyjen pintamassoista ei tietoja		
*alakatnorangeista ei tietoa		

**Kokonaiskorkeus [mm]**

318

$f$ [Hz]	$L_n$ [dB]
50	69
63	72
80	71
100	68
125	68
160	67
200	66
250	65
315	60
400	56
500	52
630	47
800	42
1000	38
1250	35
1600	30
2000	27
2500	28
3150	29
4000	25
5000	22



$S [m^2] = 17$

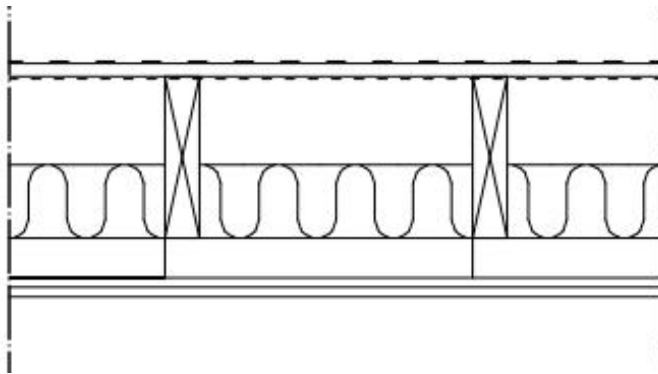
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

$L_{n,w} (C_1) = 58 (1) \text{ dB}$

$C_{1,50-2500} = 5 \text{ dB}$

$L_{n,w} + C_{1,50-2500} = 63 \text{ dB}$



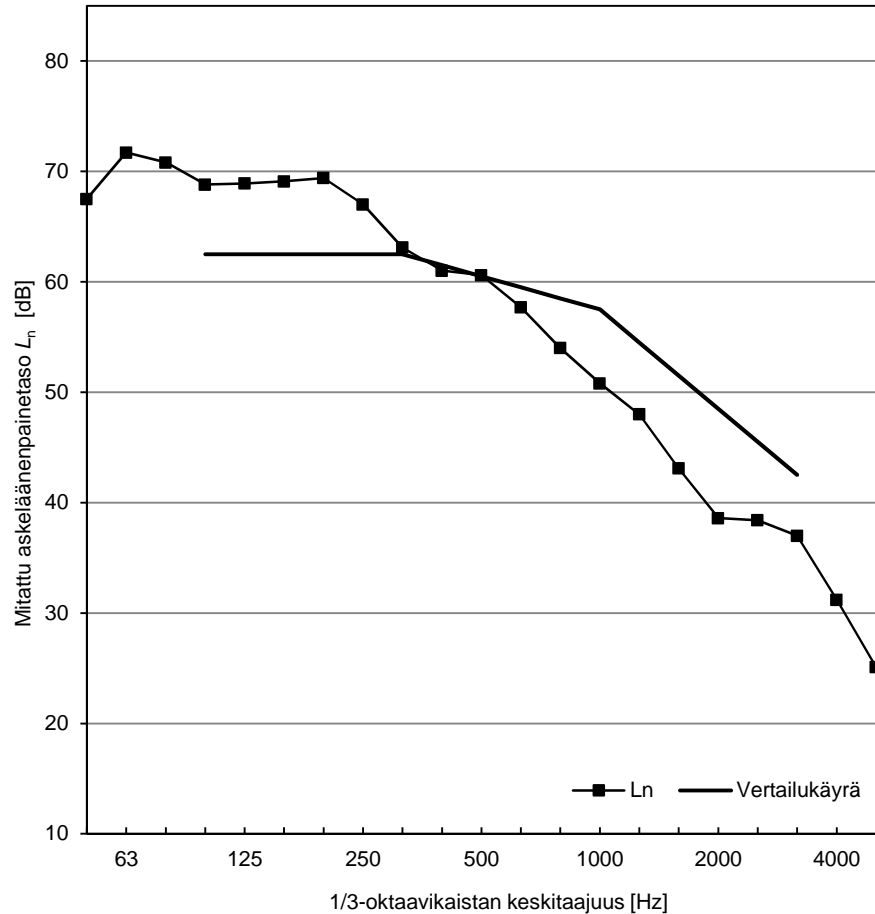
**Rakennekerrokset:**

	$m'$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$d'$ [mm]
Vinyylipäällyste, "Gerflor"		
OSB-levy		18
*levyn alla höyrysulkumuovi		
sahat.palkki (45x220), k400		220
kivivilla (100mm)		
alakatn ripustus, vaijeri tms.		54
2x 13mm kipsilevy		26
* levyjen pintamassoista ei tietoja		
*alakatnorangeista ei tietoja		

**Kokonaiskorkeus [mm]**

318

$f$ [Hz]	$L_n$ [dB]
50	68
63	72
80	71
100	69
125	69
160	69
200	69
250	67
315	63
400	61
500	61
630	58
800	54
1000	51
1250	48
1600	43
2000	39
2500	38
3150	37
4000	31
5000	25



$S [m^2] = 17$

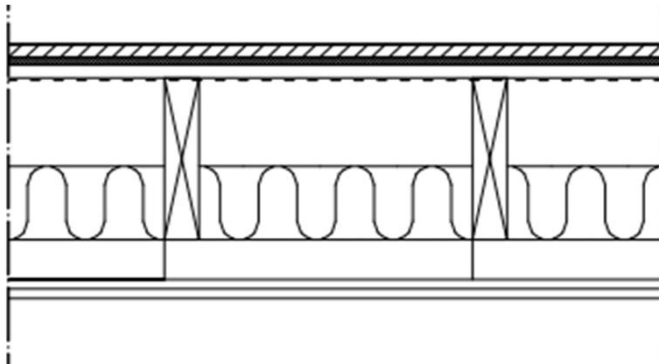
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askelaäänitasoluku

$L_{n,w} (C_1) = 61 (1) \text{ dB}$

$C_{1,50-2500} = 3 \text{ dB}$

$L_{n,w} + C_{1,50-2500} = 64 \text{ dB}$



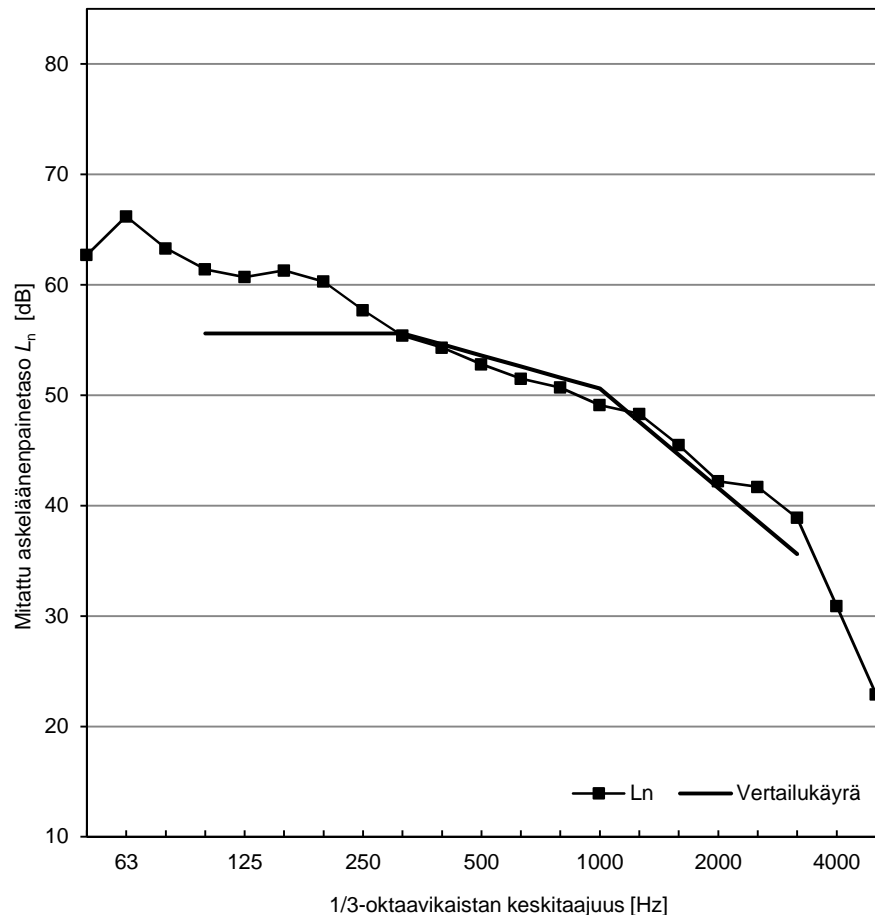
Rakennekerrokset:

	m'	d'
	[kg/m <sup>2</sup> ]	[mm]
kipsikuitulevy	23	18
puukuitulevy	2,5	10
OSB-levy		18
sahat.palkki (45x220), k400		220
kivivilla (100mm)		
alakatn ripustus, vaijeri tms.		54
2x 13mm kipsilevy		26
* levyjen m' puuttuu tietoja		
*alakatn rangoista ei tietoa		

Kokonaiskorkeus [mm]

346

f [Hz]	L <sub>n</sub> [dB]
50	63
63	66
80	63
100	61
125	61
160	61
200	60
250	58
315	55
400	54
500	53
630	52
800	51
1000	49
1250	48
1600	46
2000	42
2500	42
3150	39
4000	31
5000	23



S [m<sup>2</sup>] = 17

Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

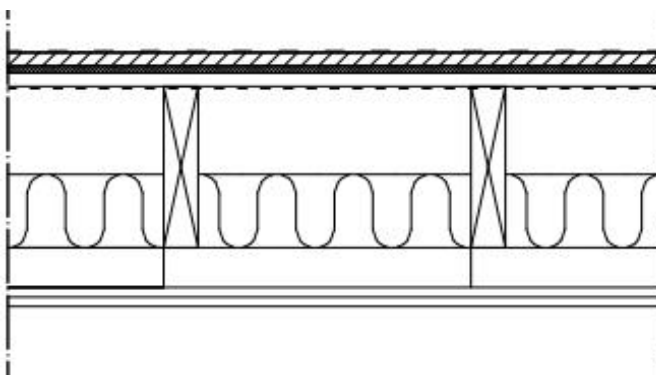
Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

L<sub>n,w</sub> (C<sub>1</sub>) = 54 (0) dB

C<sub>1,50-2500</sub> = 3 dB

L<sub>n,w</sub> + C<sub>1,50-2500</sub> = 57 dB





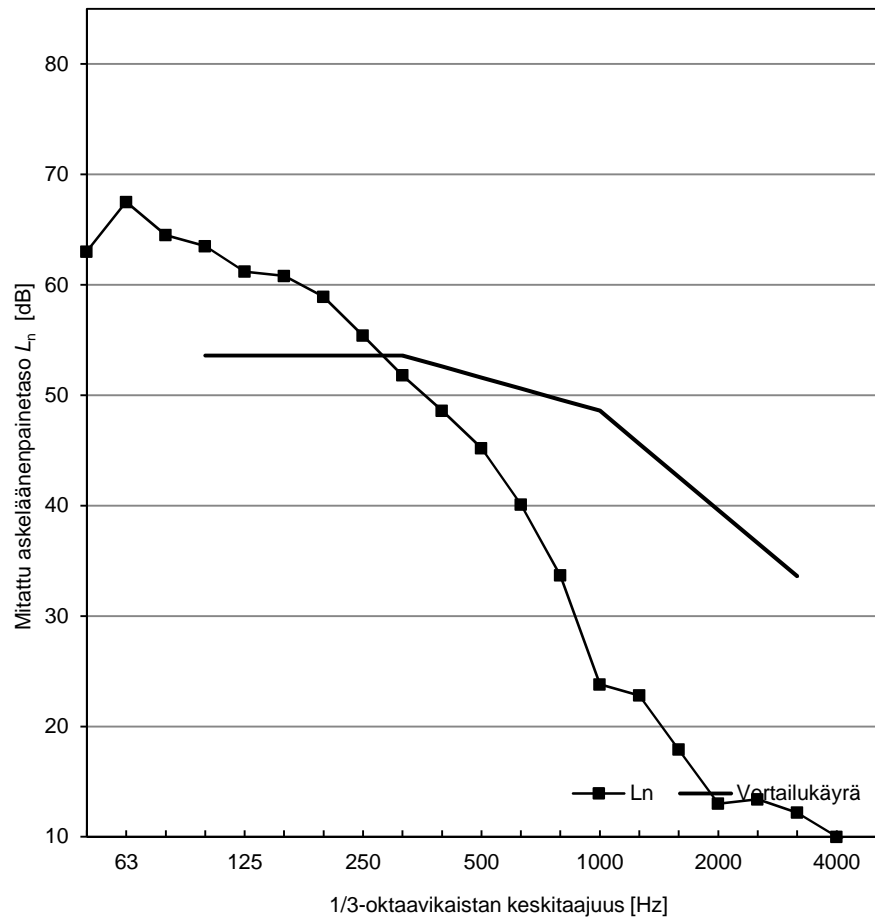
**Rakennekerrokset:**

	$m'$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$d'$ [mm]
Vinyylipäällyste, "Tarkett"		
kipsikuitulevy	23	18
puukuitulevy	2,5	10
OSB-levy		18
sahat.palkki (45x220), k400		220
kivivilla (100mm)		
alakaton ripustus, vaijeri tms.		54
2x 13mm kipsilevy		26
* levyjen $m'$ puuttuu tietoja		
*alakattorangoista ei tietoa		

**Kokonaiskorkeus [mm]**

346

$f$ [Hz]	$L_n$ [dB]
50	63
63	68
80	65
100	64
125	61
160	61
200	59
250	55
315	52
400	49
500	45
630	40
800	34
1000	24
1250	23
1600	18
2000	13
2500	13
3150	12
4000	10
5000	8



$S [m^2] = 17$

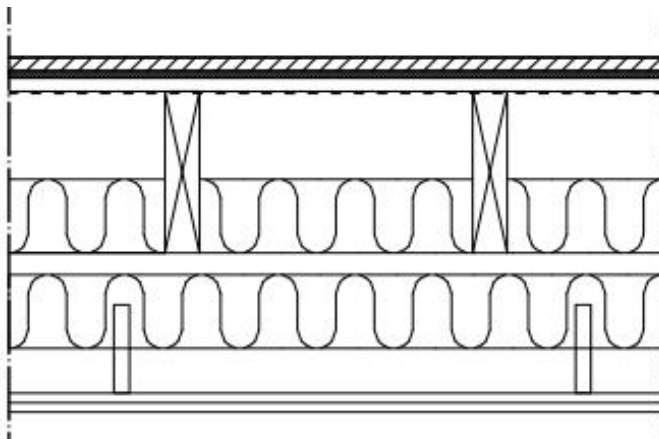
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askelaänitasoluku

$L_{n,w} (C_1) = 52 (1) \text{ dB}$

$C_{1,50-2500} = 6 \text{ dB}$

$L_{n,w} + C_{1,50-2500} = 57 \text{ dB}$



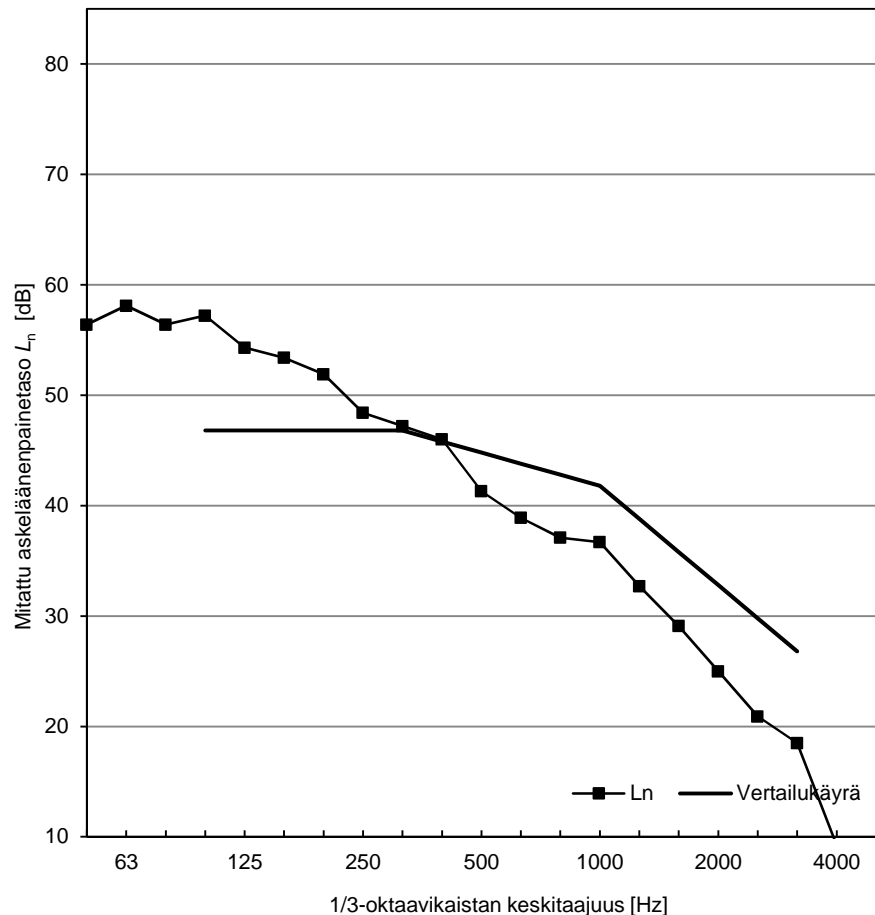
Rakennekerrokset:

	m'	d'
	[kg/m <sup>2</sup> ]	[mm]
kipsikuitulevy	23	18
puukuitulevy	2,5	10
OSB-levy		18
*levyn alla höyrysulkumuovi		
sahat.palkki (45x220), k400		220
kivivilla (100mm)		
Ilmaväli sisältäen:		191
*kivivilla (100mm)		
*erillinen ak.palkisto (100x45mm), poikittain pääpalk. nähden		
2x 13mm kipsilevy		26
* levyjen m' puuttuu tietoja		

Kokonaiskorkeus [mm]

483

f [Hz]	L <sub>n</sub> [dB]
50	56
63	58
80	56
100	57
125	54
160	53
200	52
250	48
315	47
400	46
500	41
630	39
800	37
1000	37
1250	33
1600	29
2000	25
2500	21
3150	19
4000	9
5000	7



S [m<sup>2</sup>] = 17

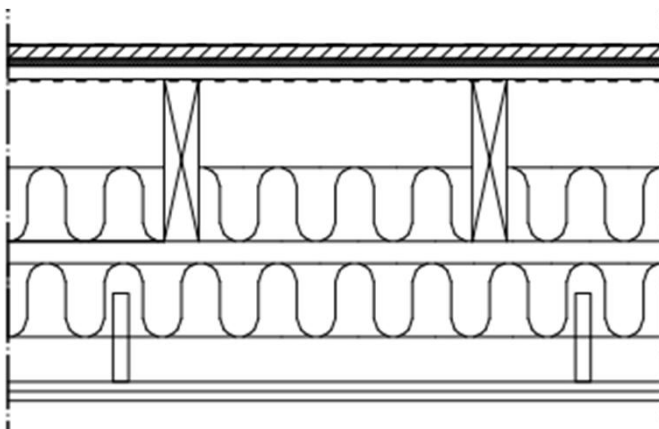
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

L<sub>n,w</sub> (C<sub>1</sub>) = 45 (2) dB

C<sub>1,50-2500</sub> = 5 dB

L<sub>n,w</sub> + C<sub>1,50-2500</sub> = 50 dB



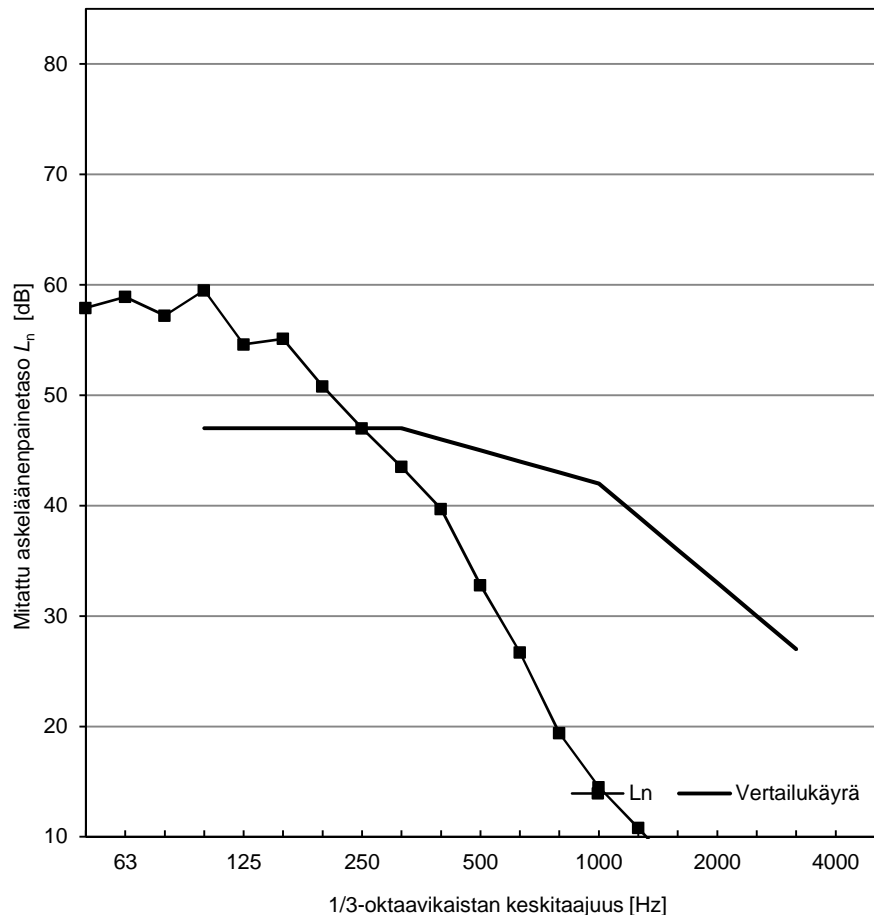
**Rakennekerrokset:**

	$m'$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$d'$ [mm]
Vinyylipäällyste, "Tarkett"		
kipsikuitulevy	23	18
puukuitulevy	2,5	10
OSB-levy		18
sahat.palkki (45x220), k400		220
kivivilla (100mm)		
Ilmaväli sisältäen: *kivivilla (100mm)		191
*erillinen ak.palkisto (100x45mm), poikittain pääpalk. nähden		
2x 13mm kipsilevy		26
* levyjen $m'$ puuttuu tietoja		

**Kokonaiskorkeus [mm]**

483

$f$ [Hz]	$L_n$ [dB]
50	58
63	59
80	57
100	60
125	55
160	55
200	51
250	47
315	44
400	40
500	33
630	27
800	19
1000	15
1250	11
1600	7
2000	8
2500	8
3150	9
4000	6
5000	6



$S [m^2] = 17$

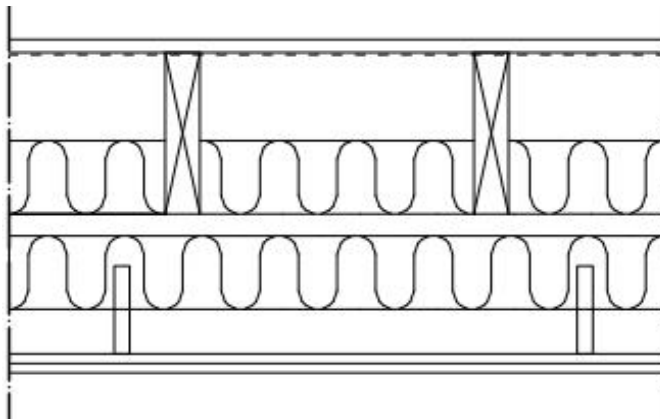
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

$L_{n,w} (C_1) = 45 (2) \text{ dB}$

$C_{1,50-2500} = 6 \text{ dB}$

$L_{n,w} + C_{1,50-2500} = 51 \text{ dB}$



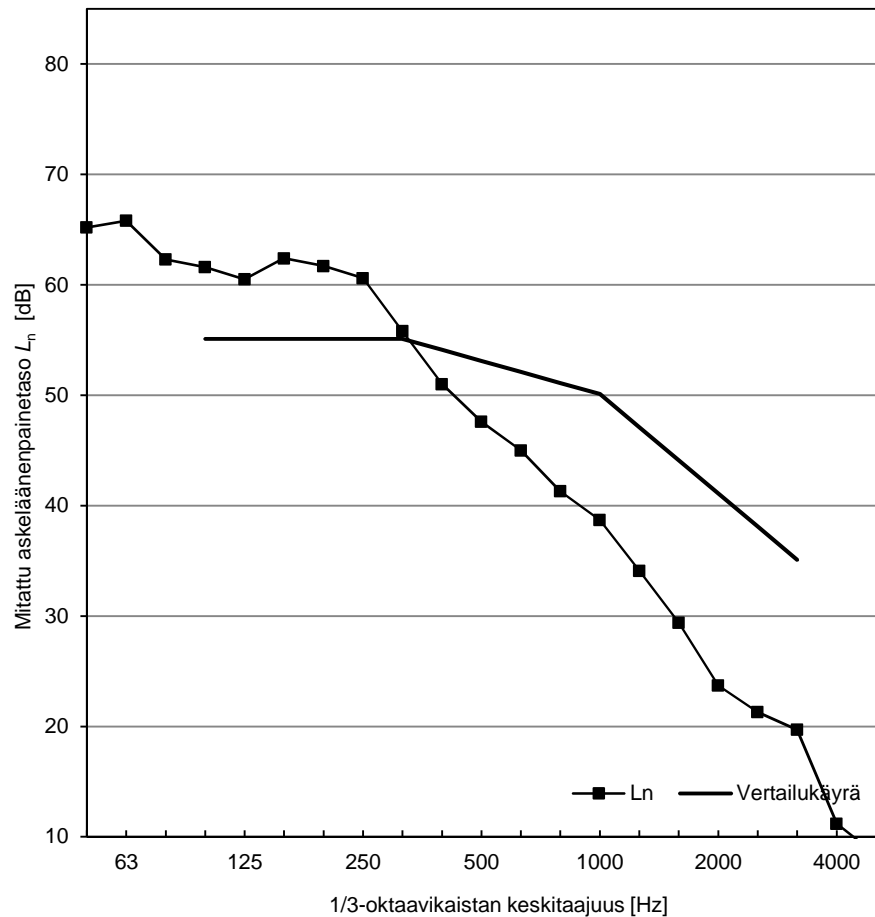
Rakennekerrokset:

	m'	d'
	[kg/m <sup>2</sup> ]	[mm]
OSB-levy		18
*levyn alla höyrysulkumuovi		
sahat.palkki (45x220), k400		220
kivivilla (100mm)		
Ilmaväli sisältäen:		191
*kivivilla (100mm)		
*erillinen ak.palkisto (100x45mm), poikittain pääpalk. nähden		
2x 13mm kipsilevy		26
* levyjen m' puuttuu tietoja		

Kokonaiskorkeus [mm]

455

f [Hz]	L <sub>n</sub> [dB]
50	65
63	66
80	62
100	62
125	61
160	62
200	62
250	61
315	56
400	51
500	48
630	45
800	41
1000	39
1250	34
1600	29
2000	24
2500	21
3150	20
4000	11
5000	8



S [m<sup>2</sup>] = 17

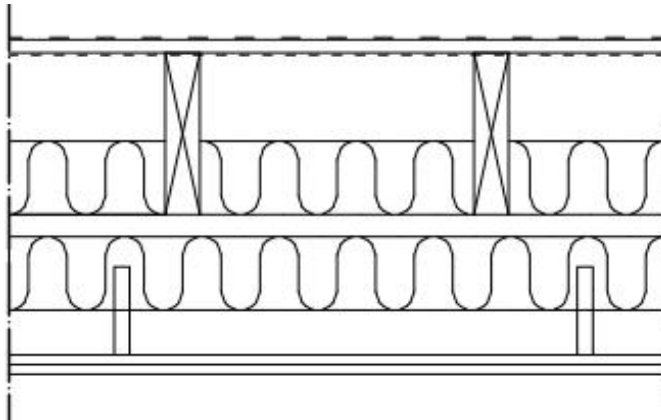
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

L<sub>n,w</sub> (C<sub>1</sub>) = 53 (1) dB

C<sub>1,50-2500</sub> = 4 dB

L<sub>n,w</sub> + C<sub>1,50-2500</sub> = 57 dB



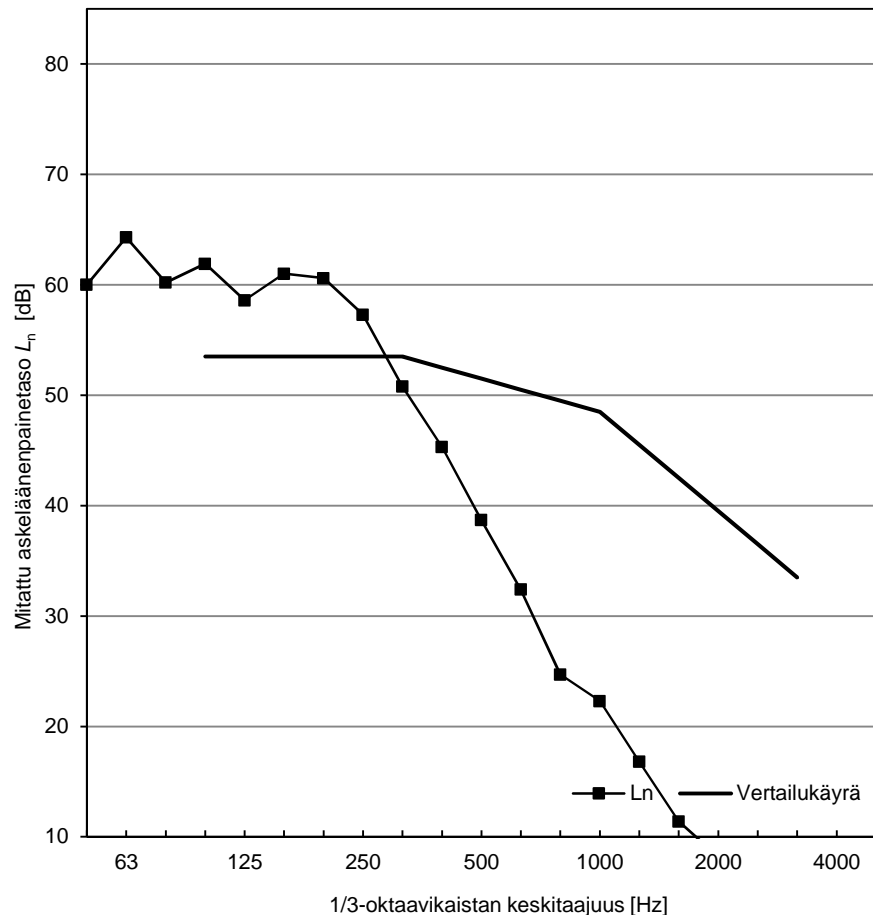
**Rakennekerrokset:**

	m'	d'
	[kg/m <sup>2</sup> ]	[mm]
Vinyylipäällyste, "Tarkett"		
OSB-levy		18
*levyn alla höyrysulkumuovi		
sahat.palkki (45x220), k400		220
kivivilla (100mm)		
Ilmaväli sisältäen:		191
*kivivilla (100mm)		
*erillinen ak.palkisto (100x45mm), poikittain pääpalk. nähden		
2x 13mm kipsilevy		26
* levyjen m' puuttuu tietoja		

**Kokonaiskorkeus [mm]**

455

f [Hz]	L <sub>n</sub> [dB]
50	60
63	64
80	60
100	62
125	59
160	61
200	61
250	57
315	51
400	45
500	39
630	32
800	25
1000	22
1250	17
1600	11
2000	8
2500	8
3150	9
4000	6
5000	7



S [m<sup>2</sup>] = 17

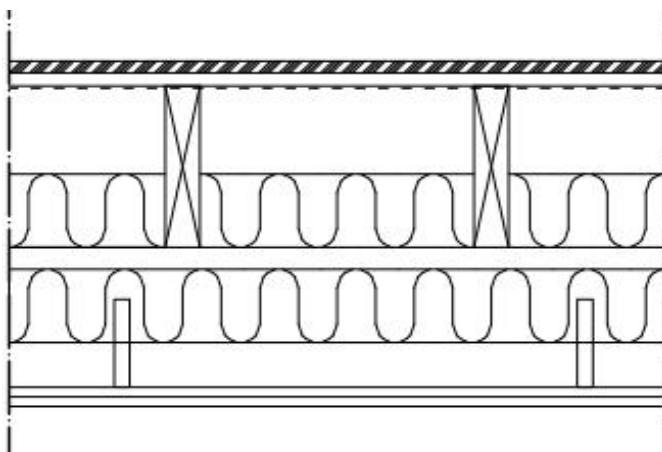
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

L<sub>n,w</sub> (C<sub>1</sub>) = 52 (1) dB

C<sub>1,50-2500</sub> = 4 dB

L<sub>n,w</sub> + C<sub>1,50-2500</sub> = 55 dB



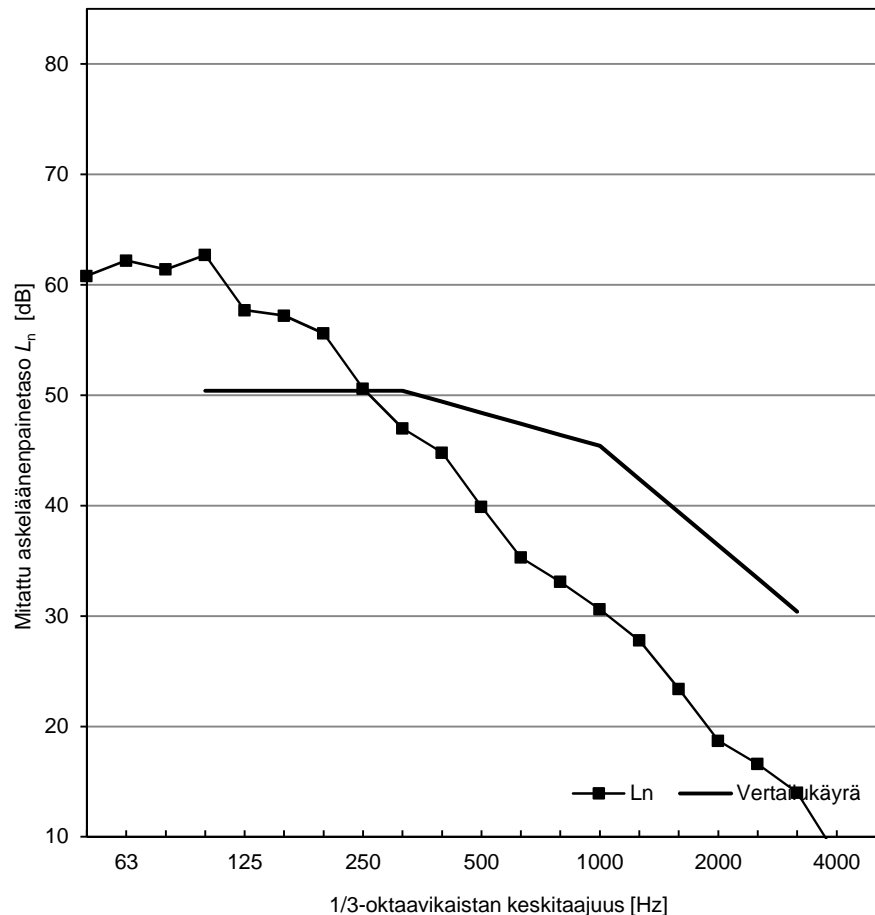
Rakennekerrokset:

	m'	d'
	[kg/m <sup>2</sup> ]	[mm]
Parketti		16
OSB-levy		18
*levyn alla höyrysulkumuovi		
sahat.palkki (45x220), k400		220
kivivilla (100mm)		
Ilmaväli sisältäen:		191
*kivivilla (100mm)		
*erillinen ak.palkisto (100x45mm), poikittain pääpalk. nähden		
2x 13mm kipsilevy		26
* levyjen m' puuttuu tietoja		

Kokonaiskorkeus [mm]

471

f [Hz]	L <sub>n</sub> [dB]
50	61
63	62
80	61
100	63
125	58
160	57
200	56
250	51
315	47
400	45
500	40
630	35
800	33
1000	31
1250	28
1600	23
2000	19
2500	17
3150	14
4000	8
5000	7



S [m<sup>2</sup>] = 17

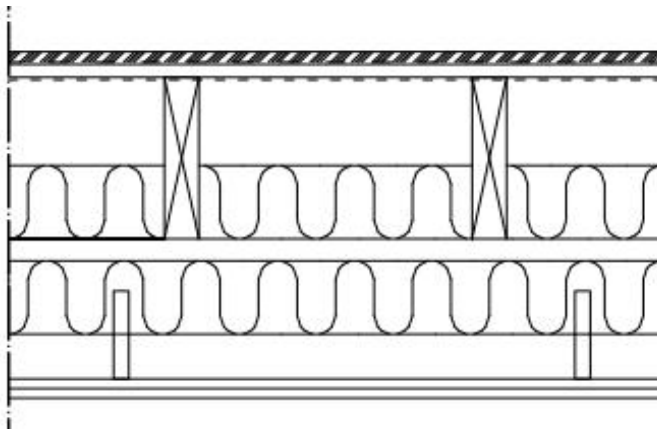
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askelaäänitasoluku

L<sub>n,w</sub> (C<sub>1</sub>) = 48 (2) dB

C<sub>1,50-2500</sub> = 6 dB

L<sub>n,w</sub> + C<sub>1,50-2500</sub> = 54 dB



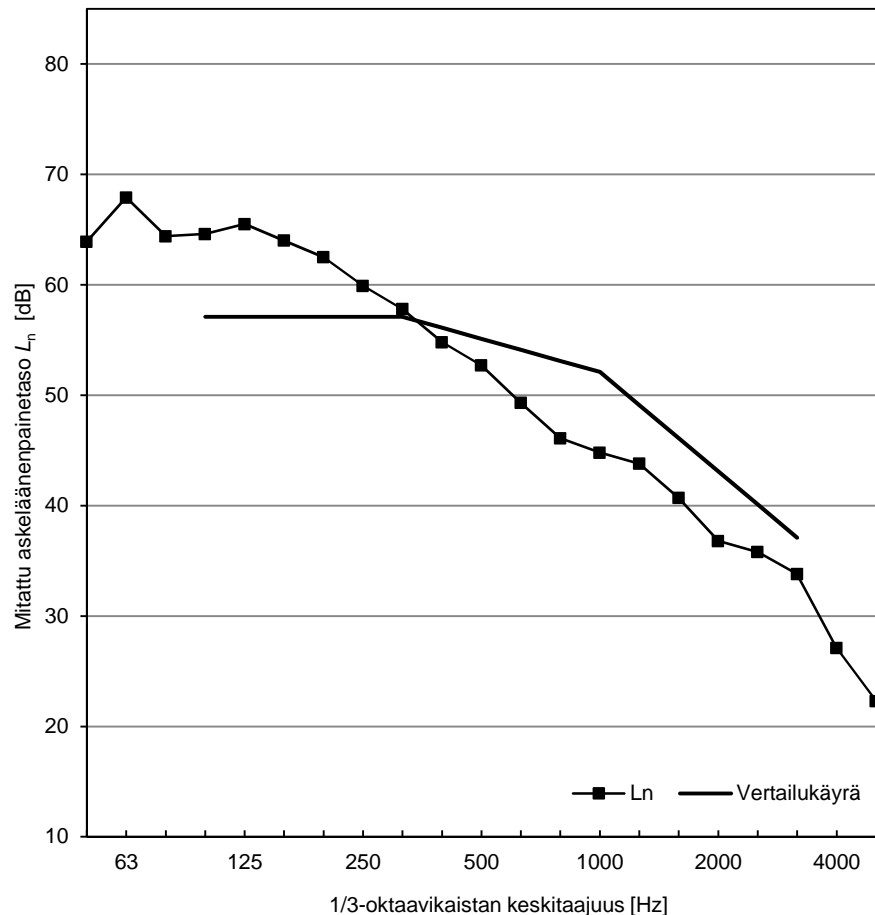
Rakennekerrokset:

	m'	d'
	[kg/m <sup>2</sup> ]	[mm]
Parketti		14
*parketin alla aluskerros, ei tietoja		
OSB-levy		18
*levyn alla höyrysulkumuovi		
sahat.palkki (45x220), k400		220
kivivilla (100mm)		
Ilmaväli sisältäen:		191
*kivivilla (100mm)		
*erillinen ak.palkisto (100x45mm), poikittain pääpalk. nähden		
2x 13mm kipsilevy		26
* levyjen m' puuttuu tietoja		

Kokonaiskorkeus [mm]

469

f [Hz]	L <sub>n</sub> [dB]
50	64
63	68
80	64
100	65
125	66
160	64
200	63
250	60
315	58
400	55
500	53
630	49
800	46
1000	45
1250	44
1600	41
2000	37
2500	36
3150	34
4000	27
5000	22



S [m<sup>2</sup>] = 17

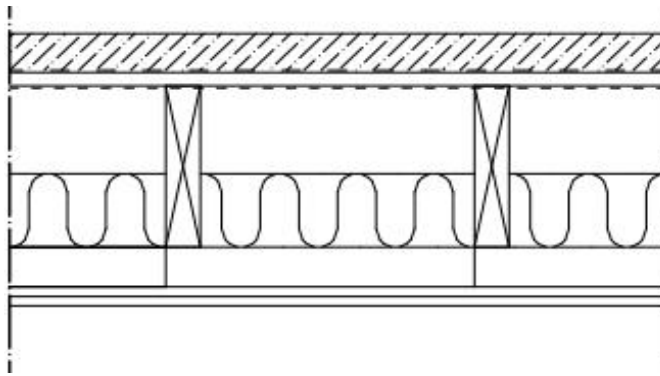
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

L<sub>n,w</sub> (C<sub>1</sub>) = 55 (1) dB

C<sub>1,50-2500</sub> = 4 dB

L<sub>n,w</sub> + C<sub>1,50-2500</sub> = 59 dB



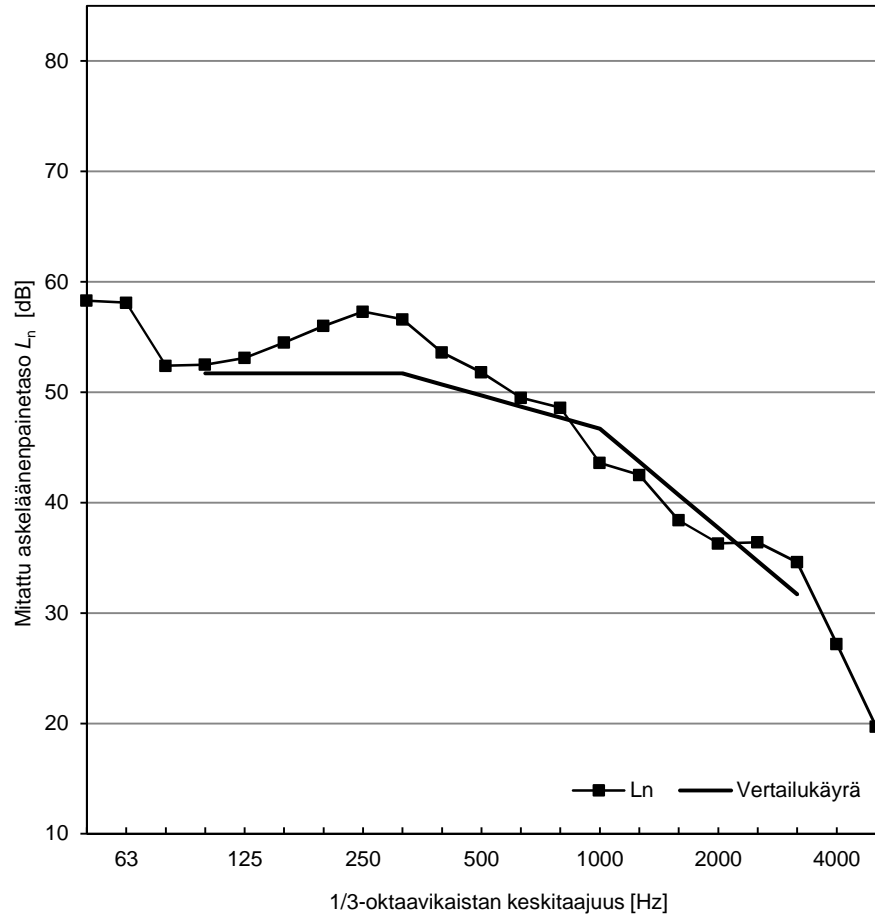
**Rakennekerrokset:**

	m'	d'
	[kg/m <sup>2</sup> ]	[mm]
valettu tasoite, tietoja puuttuu		50
* aluskerros, ei tietoja		
OSB-levy		18
*levyn alla höyrysulkumuovi		
sahat.palkki (45x220), k400		220
kivivilla (100mm)		
alakaton ripustus, vaijeri tms.		54
2x 13mm kipsilevy		26
* levyjen m' puuttuu tietoja		
*alakattorangoista ei tietoa		

**Kokonaiskorkeus [mm]**

368

f [Hz]	L <sub>n</sub> [dB]
50	58
63	58
80	52
100	53
125	53
160	55
200	56
250	57
315	57
400	54
500	52
630	50
800	49
1000	44
1250	43
1600	38
2000	36
2500	36
3150	35
4000	27
5000	20



S [m<sup>2</sup>] = 17

Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

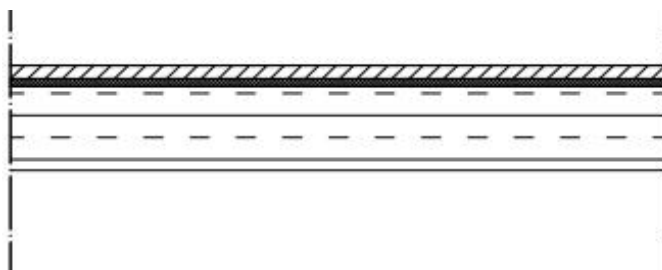
Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

L<sub>n,w</sub> (C<sub>1</sub>) = 50 (0) dB

C<sub>1,50-2500</sub> = 1 dB

L<sub>n,w</sub> + C<sub>1,50-2500</sub> = 51 dB





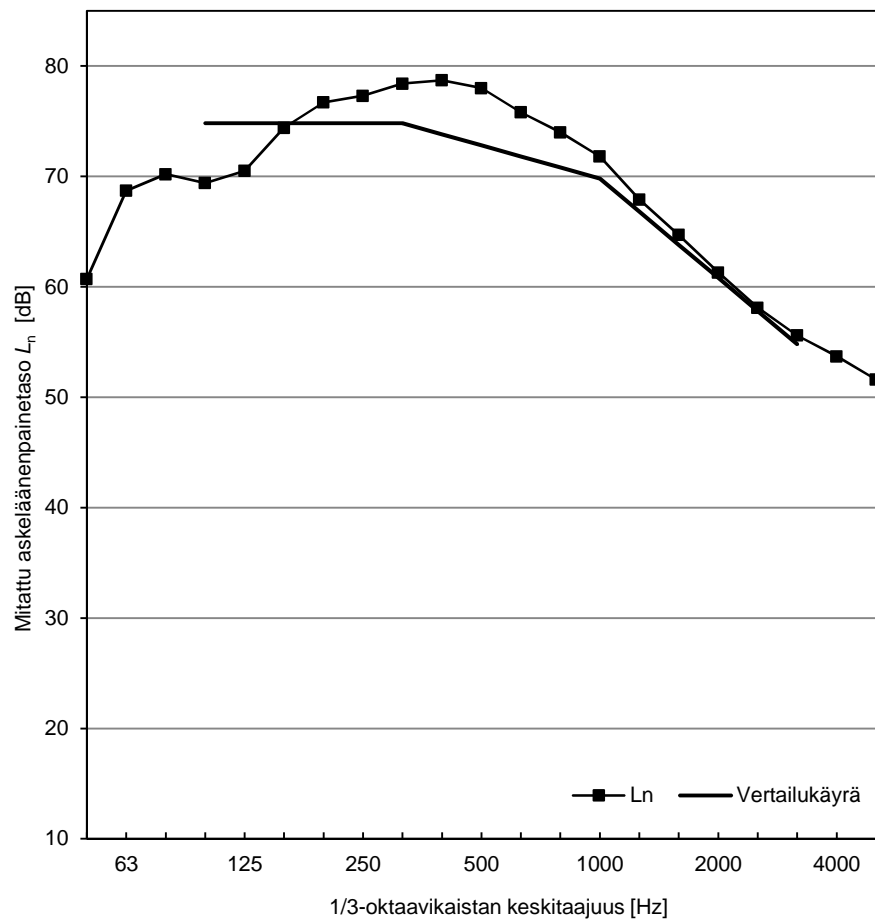
Rakennekerrokset:

	m'	d'
	[kg/m <sup>2</sup> ]	[mm]
kipsikuitulevy	23	18
puukuitulevy	2,5	10
massiivipuulevy		115
*arvioitu levyn tiheys 500kg/m3		

Kokonaiskorkeus [mm]

143

f [Hz]	L <sub>n</sub> [dB]
50	61
63	69
80	70
100	69
125	71
160	74
200	77
250	77
315	78
400	79
500	78
630	76
800	74
1000	72
1250	68
1600	65
2000	61
2500	58
3150	56
4000	54
5000	52



S [m<sup>2</sup>] = 17

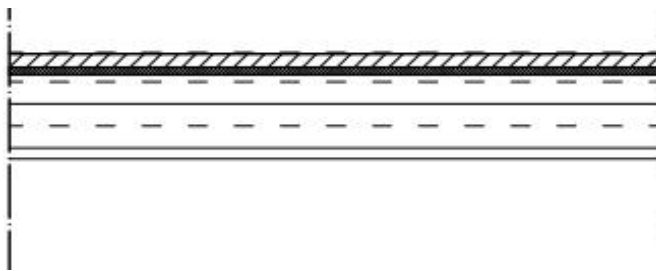
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

L<sub>n,w</sub> (C<sub>1</sub>) = 73 (-1) dB

C<sub>1,50-2500</sub> = -1 dB

L<sub>n,w</sub> + C<sub>1,50-2500</sub> = 72 dB



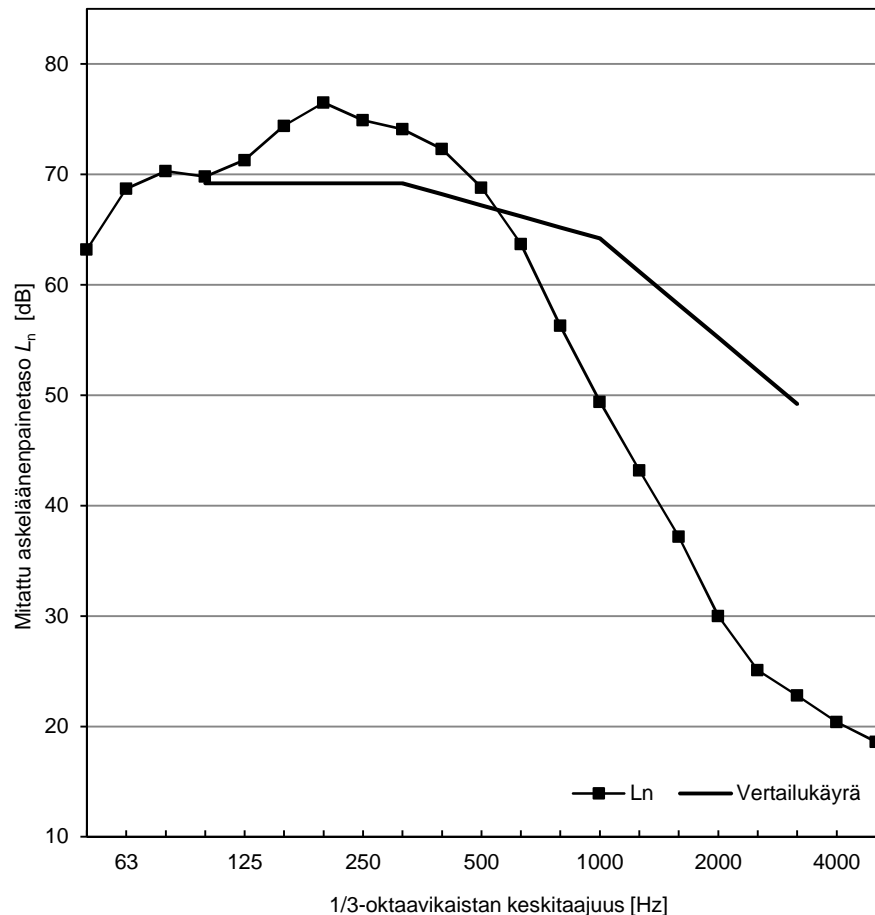
Rakennekerrokset:

	m'	d'
	[kg/m <sup>2</sup> ]	[mm]
Vinyylipäällyste, "Forbo"		
kipsikuitulevy	23	18
puukuitulevy	2,5	10
massiivipuulevy		115
*arvioitu levyn tiheys 500kg/m3		

Kokonaiskorkeus [mm]

143

f [Hz]	L <sub>n</sub> [dB]
50	63
63	69
80	70
100	70
125	71
160	74
200	77
250	75
315	74
400	72
500	69
630	64
800	56
1000	49
1250	43
1600	37
2000	30
2500	25
3150	23
4000	20
5000	19



S [m<sup>2</sup>] = 17

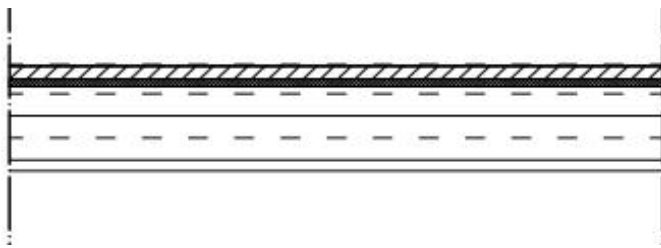
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

L<sub>n,w</sub> (C<sub>1</sub>) = 67 (0) dB

C<sub>1,50-2500</sub> = 1 dB

L<sub>n,w</sub> + C<sub>1,50-2500</sub> = 68 dB



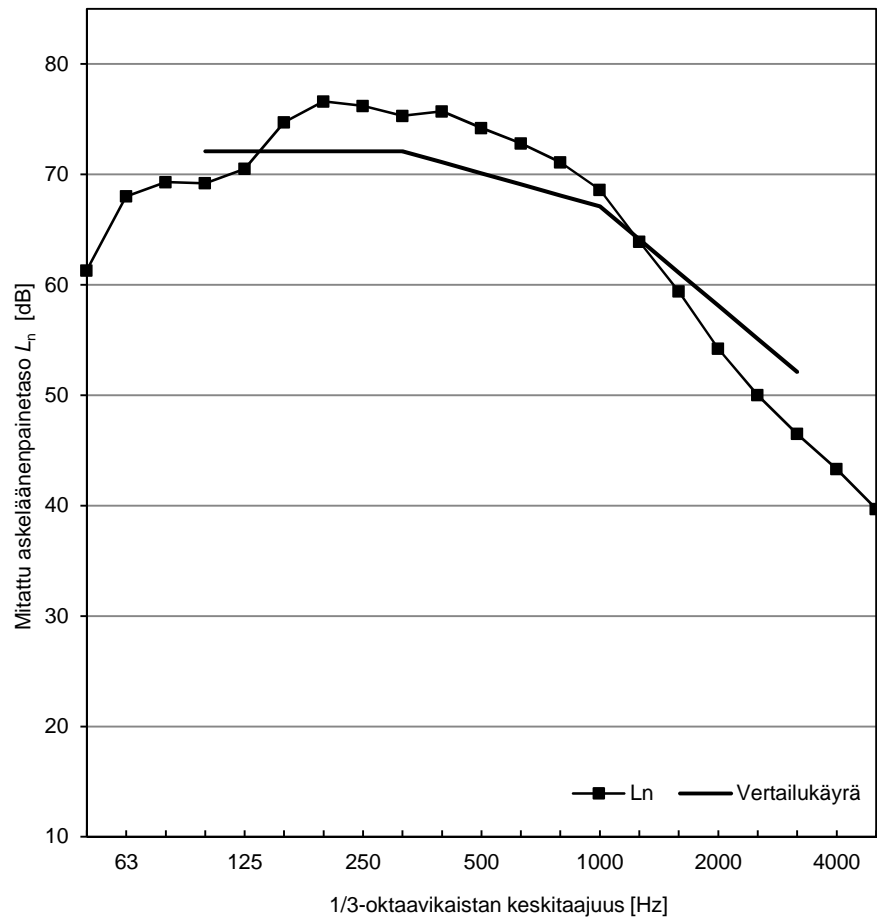
Rakennekerrokset:

	$m'$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$d'$ [mm]
Vinyylipäällyste, "Gerflor"		
kipsikuitulevy	23	18
puukuitulevy	2,5	10
massiivipuulevy		115
*arvioitu levyn tiheys 500kg/m <sup>3</sup>		

Kokonaiskorkeus [mm]

143

$f$ [Hz]	$L_n$ [dB]
50	61
63	68
80	69
100	69
125	71
160	75
200	77
250	76
315	75
400	76
500	74
630	73
800	71
1000	69
1250	64
1600	59
2000	54
2500	50
3150	47
4000	43
5000	40



$S [m^2] = 17$

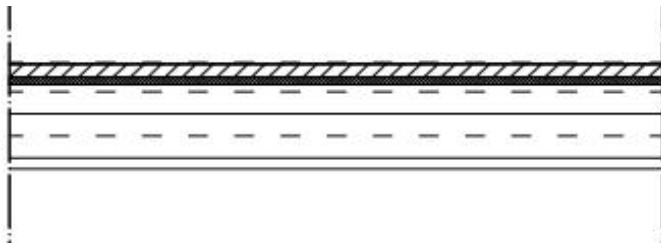
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

$L_{n,w} (C_1) = 70 (-1) \text{ dB}$

$C_{1,50-2500} = 0 \text{ dB}$

$L_{n,w} + C_{1,50-2500} = 70 \text{ dB}$



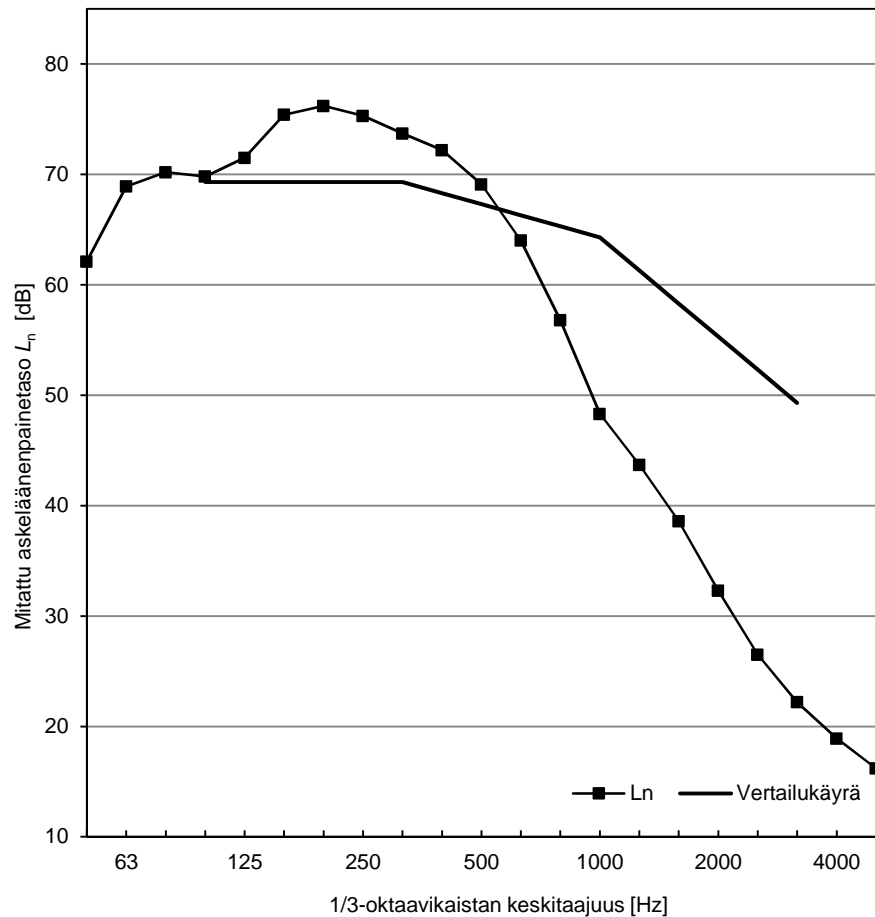
Rakennekerrokset:

	m'	d'
	[kg/m <sup>2</sup> ]	[mm]
Vinyylipäällyste, "Tarkett"		
kipsikuitulevy	23	18
puukuitulevy	2,5	10
massiivipuulevy		115
*arvioitu levyn tiheys 500kg/m <sup>3</sup>		

Kokonaiskorkeus [mm]

143

f [Hz]	L <sub>n</sub> [dB]
50	62
63	69
80	70
100	70
125	72
160	75
200	76
250	75
315	74
400	72
500	69
630	64
800	57
1000	48
1250	44
1600	39
2000	32
2500	27
3150	22
4000	19
5000	16



S [m<sup>2</sup>] = 17

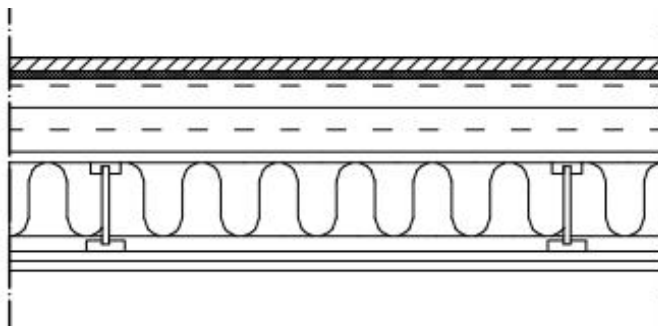
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

L<sub>n,w</sub> (C<sub>1</sub>) = 67 (0) dB

C<sub>1,50-2500</sub> = 1 dB

L<sub>n,w</sub> + C<sub>1,50-2500</sub> = 68 dB



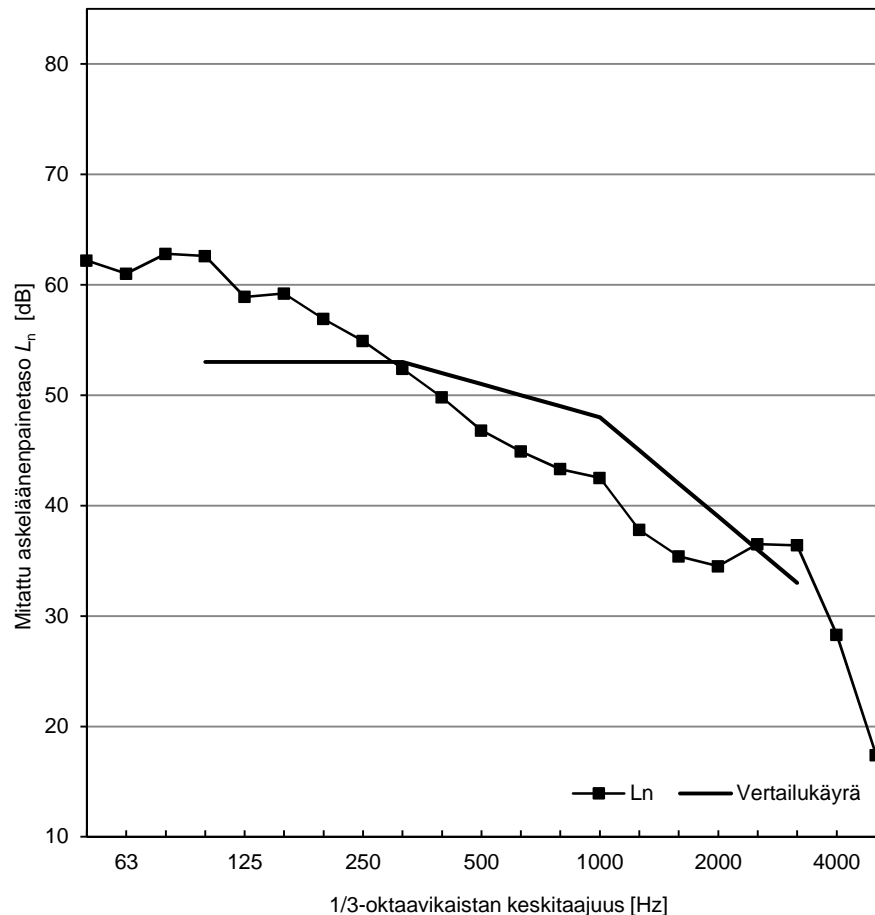
Rakennekerrokset:

	m'	d'
	[kg/m <sup>2</sup> ]	[mm]
kipsikuitulevy	23	18
puukuitulevy	2,5	10
massiivipuulevy		115
*arvioitu levyn tiheys 500kg/m <sup>3</sup>		
ripustettu alakatto, kiinnitys k600		121
sis. kivivilla (100mm)		
*kiinnityksestä puuttuu tietoja		
2x13mm kipsilevy		26
* levyjen m' puuttuu		

Kokonaiskorkeus [mm]

290

f [Hz]	L <sub>n</sub> [dB]
50	62
63	61
80	63
100	63
125	59
160	59
200	57
250	55
315	52
400	50
500	47
630	45
800	43
1000	43
1250	38
1600	35
2000	35
2500	37
3150	36
4000	28
5000	17



S [m<sup>2</sup>] = 17

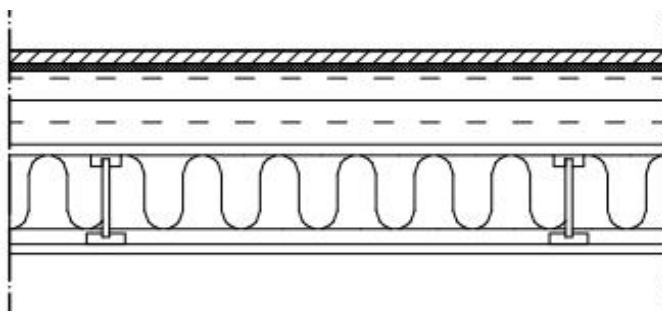
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

L<sub>n,w</sub> (C<sub>1</sub>) = 51 (1) dB

C<sub>1,50-2500</sub> = 4 dB

L<sub>n,w</sub> + C<sub>1,50-2500</sub> = 55 dB



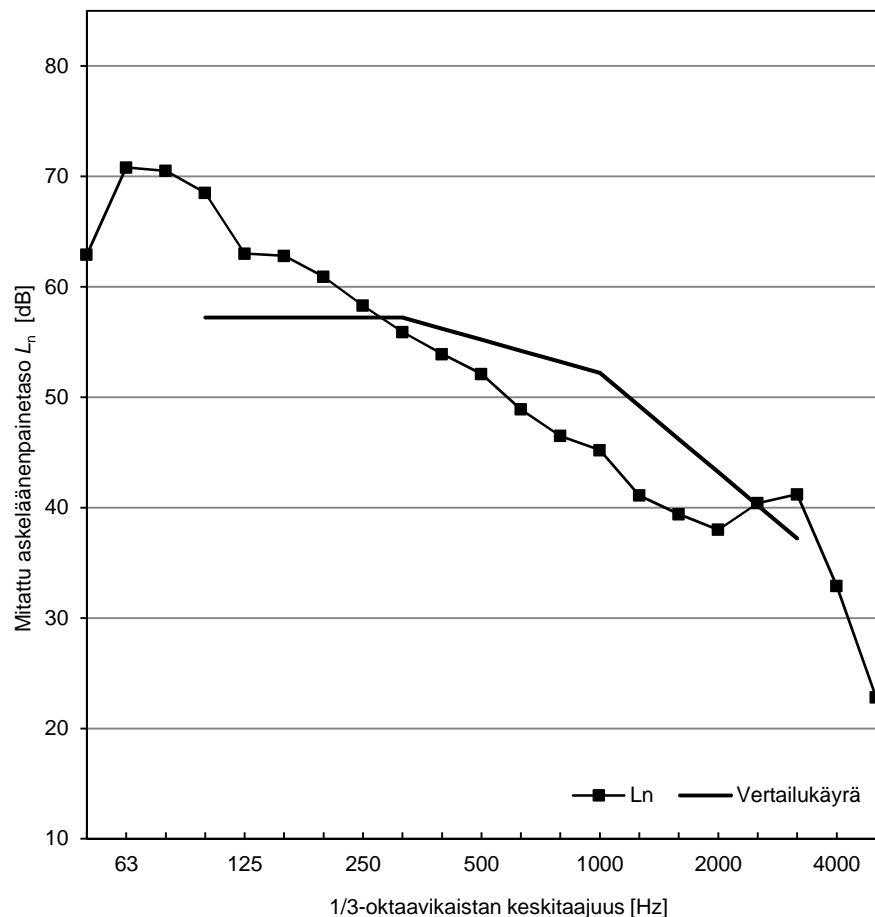
Rakennekerrokset:

	m'	d'
	[kg/m <sup>2</sup> ]	[mm]
kipsikuitulevy	23	18
puukuitulevy	2,5	10
massiivipuulevy		115
*arvioitu levyn tiheys 500kg/m <sup>3</sup>		
ripustettu alakatto, kiinnitys k600		121
sis. kivivilla (100mm)		
*kiinnityksestä puuttuu tietoja		
kipsilevy		13
* levyn m' puuttuu		

Kokonaiskorkeus [mm]

277

f [Hz]	L <sub>n</sub> [dB]
50	63
63	71
80	71
100	69
125	63
160	63
200	61
250	58
315	56
400	54
500	52
630	49
800	47
1000	45
1250	41
1600	39
2000	38
2500	40
3150	41
4000	33
5000	23



S [m<sup>2</sup>] = 17

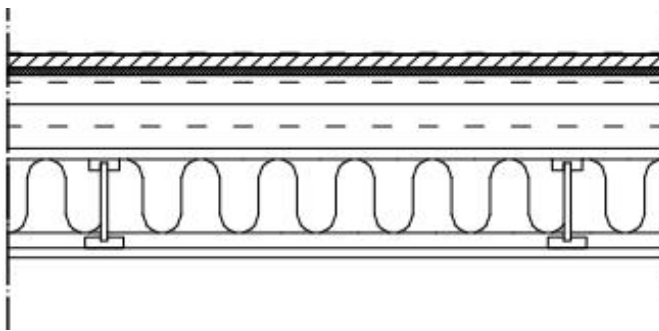
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

L<sub>n,w</sub> (C<sub>1</sub>) = 55 (1) dB

C<sub>1,50-2500</sub> = 6 dB

L<sub>n,w</sub> + C<sub>1,50-2500</sub> = 61 dB



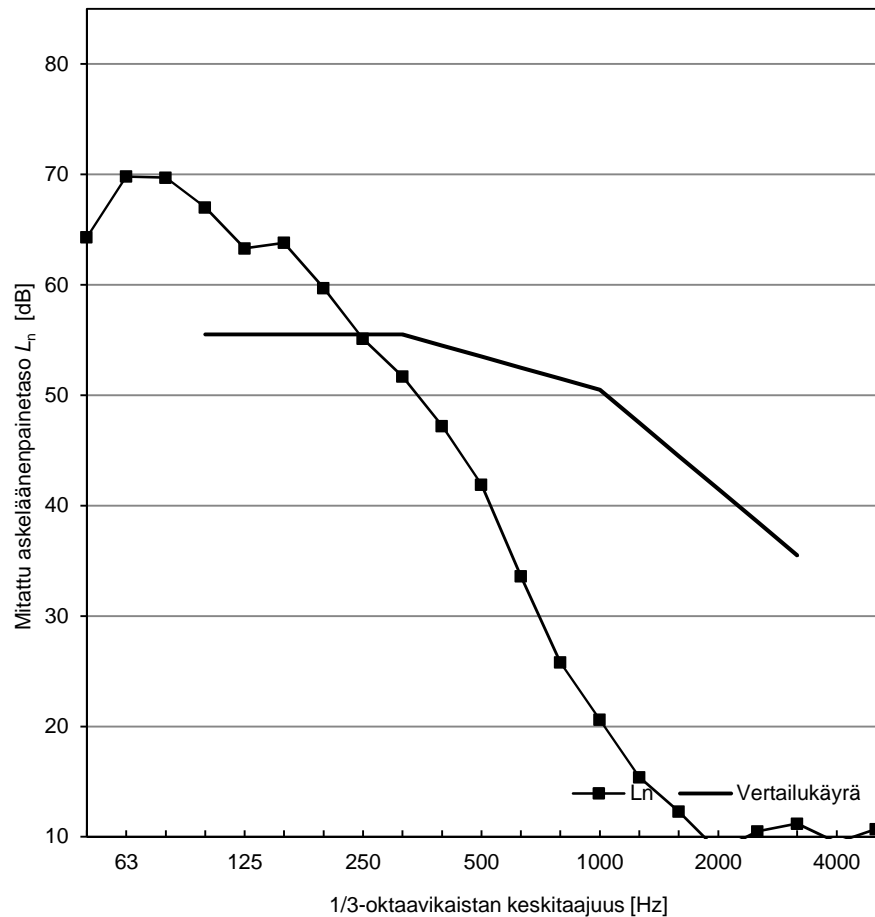
**Rakennekerrokset:**

	$m'$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$d'$ [mm]
lattiapäällyste, "Tarkett		
kipsikuitulevy	23	18
puukuitulevy	2,5	10
massiivipuulevy		115
*arvioitu levyn tiheys 500kg/m <sup>3</sup>		
ripustettu alakatto, kiinnitys k600		121
sis. kivivilla (100mm)		
*kiinnityksestä puuttuu tietoja		
kipsilevy		13
* levyn $m'$ puuttuu		

**Kokonaiskorkeus [mm]**

277

$f$ [Hz]	$L_n$ [dB]
50	64
63	70
80	70
100	67
125	63
160	64
200	60
250	55
315	52
400	47
500	42
630	34
800	26
1000	21
1250	15
1600	12
2000	9
2500	11
3150	11
4000	10
5000	11



$S [m^2] = 17$

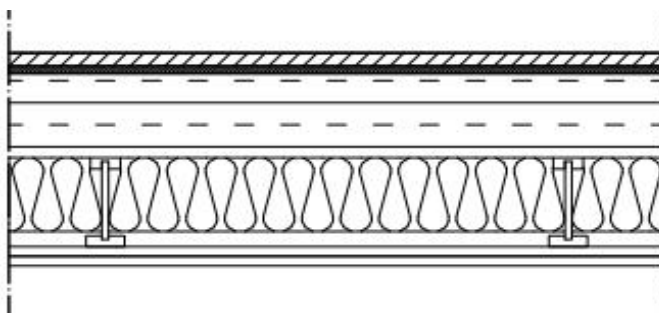
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

$L_{n,w} (C_1) = 54 (2) \text{ dB}$

$C_{1,50-2500} = 7 \text{ dB}$

$L_{n,w} + C_{1,50-2500} = 60 \text{ dB}$



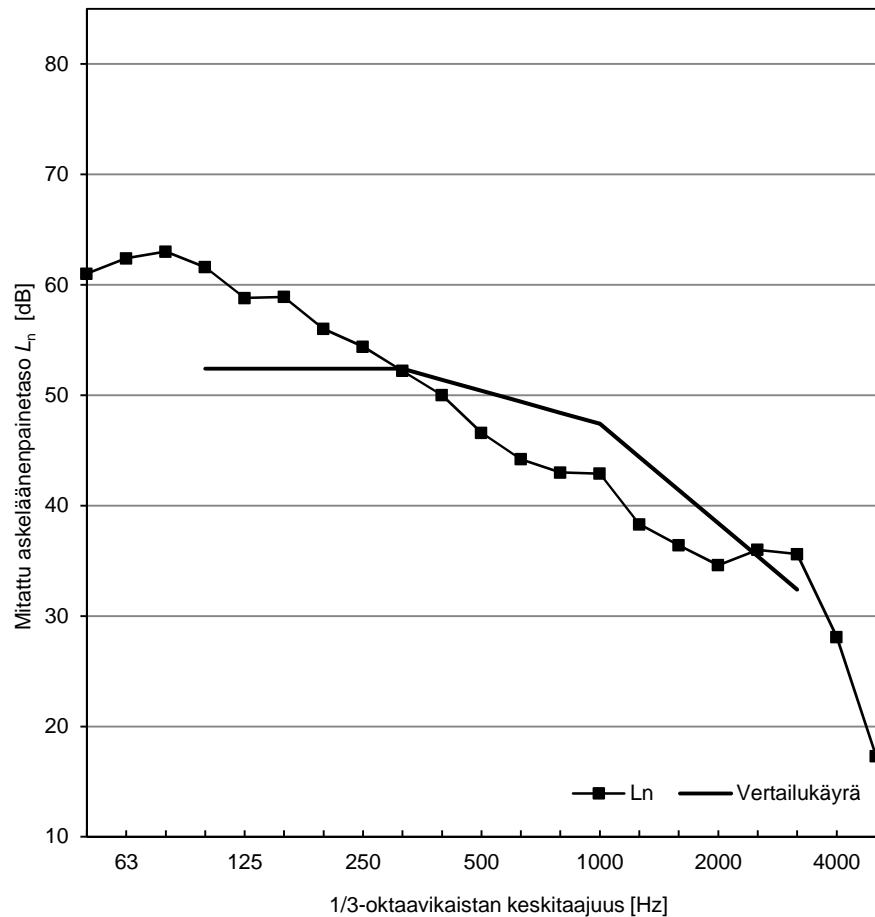
Rakennekerrokset:

	m'	d'
	[kg/m <sup>2</sup> ]	[mm]
kipsikuitulevy	23	18
puukuitulevy	2,5	10
massiivipuulevy		115
*arvioitu levyn tiheys 500kg/m <sup>3</sup>		
ripustettu alakatto, kiinnitys k600		121
sis. puukuitueriste (100mm)		
*kiinnityksestä puuttuu tietoja		
2x13mm kipsilevy		26
* levyjen m' puuttuvat		

Kokonaiskorkeus [mm]

290

f [Hz]	L <sub>n</sub> [dB]
50	61
63	62
80	63
100	62
125	59
160	59
200	56
250	54
315	52
400	50
500	47
630	44
800	43
1000	43
1250	38
1600	36
2000	35
2500	36
3150	36
4000	28
5000	17



S [m<sup>2</sup>] = 17

Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

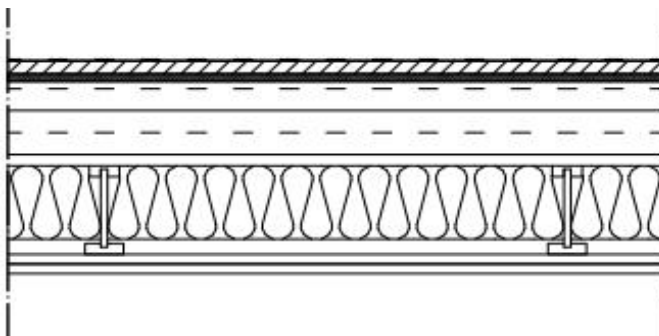
Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

L<sub>n,w</sub> (C<sub>1</sub>) = 50 (1) dB

C<sub>1,50-2500</sub> = 4 dB

L<sub>n,w</sub> + C<sub>1,50-2500</sub> = 55 dB





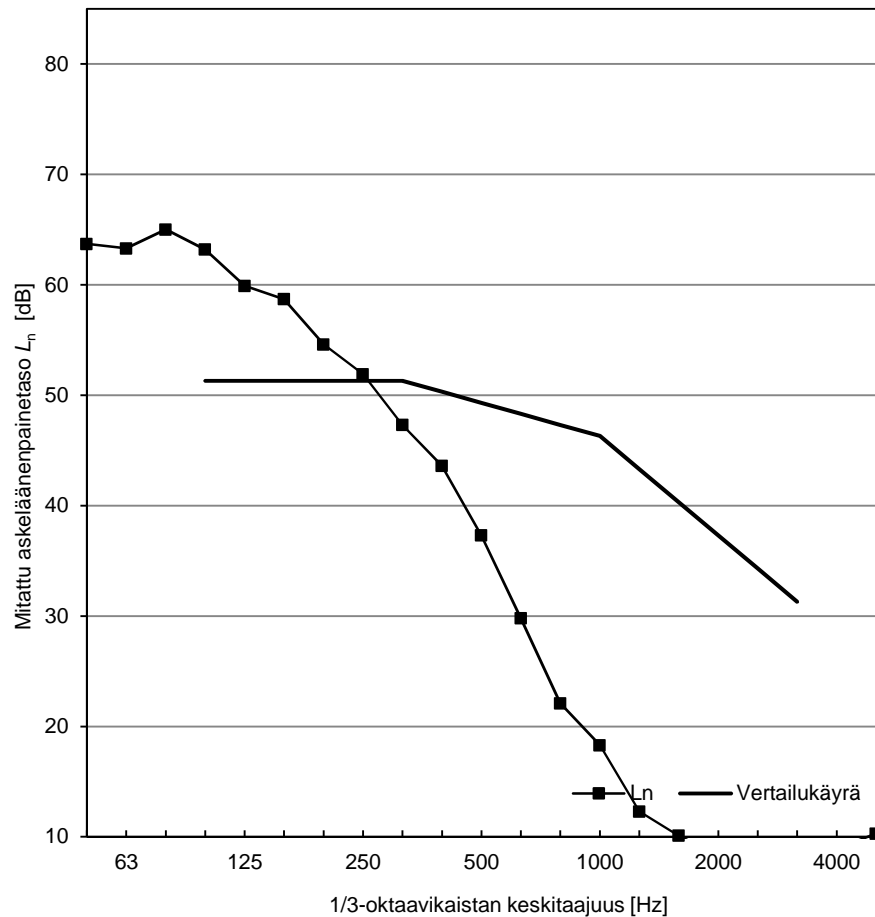
**Rakennekerrokset:**

	$m'$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$d'$ [mm]
vinyylipäällyste, "Tarkett"		
kipsikuitulevy	23	18
puukuitulevy	2,5	10
massiivipuulevy		115
*arvioitu levyn tiheys 500kg/m <sup>3</sup>		
ripustettu alakatto, kiinnitys k600		121
sis. puukuitueriste (100mm)		
*kiinnityksestä puuttuu tietoja		
2x13mm kipsilevy		26
* levyjen $m'$ puuttuu		

**Kokonaiskorkeus [mm]**

290

$f$ [Hz]	$L_n$ [dB]
50	64
63	63
80	65
100	63
125	60
160	59
200	55
250	52
315	47
400	44
500	37
630	30
800	22
1000	18
1250	12
1600	10
2000	8
2500	9
3150	10
4000	9
5000	10



$S [m^2] = 17$

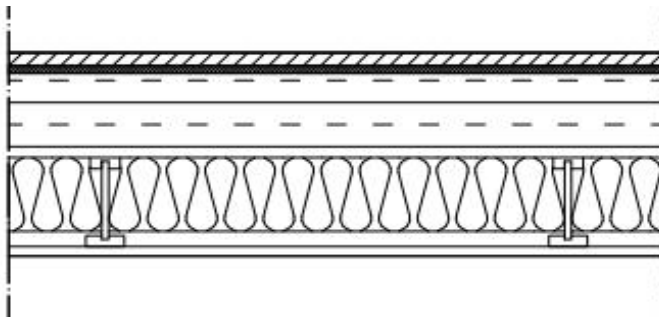
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

$L_{n,w} (C_1) = 49 (2) \text{ dB}$

$C_{1,50-2500} = 6 \text{ dB}$

$L_{n,w} + C_{1,50-2500} = 56 \text{ dB}$



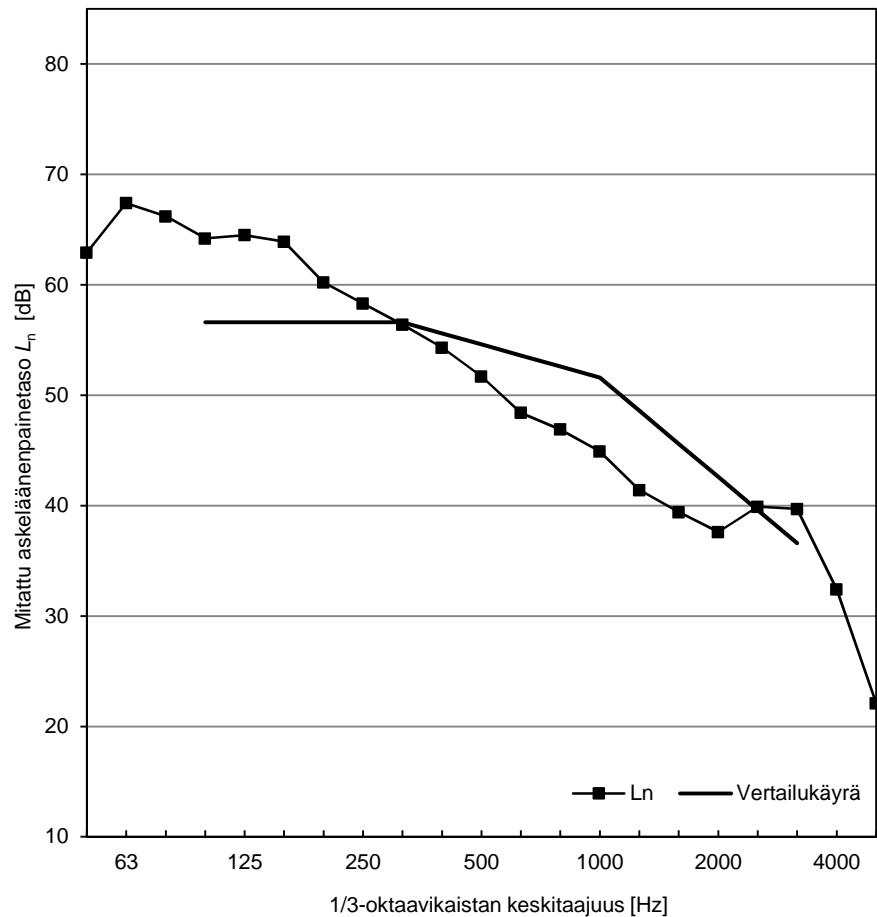
Rakennekerrokset:

	m'	d'
	[kg/m <sup>2</sup> ]	[mm]
kipsikuitulevy	23	18
puukuitulevy	2,5	10
massiivipuulevy		115
*arvioitu levyn tiheys 500kg/m <sup>3</sup>		
ripustettu alakatto, kiinnitys k600		121
sis. puukuitueriste (100mm)		
*kiinnityksestä puuttuu tietoja		
kipsilevy		13
*levyn m' puuttuu		

Kokonaiskorkeus [mm]

277

f [Hz]	L <sub>n</sub> [dB]
50	63
63	67
80	66
100	64
125	65
160	64
200	60
250	58
315	56
400	54
500	52
630	48
800	47
1000	45
1250	41
1600	39
2000	38
2500	40
3150	40
4000	32
5000	22



S [m<sup>2</sup>] = 17

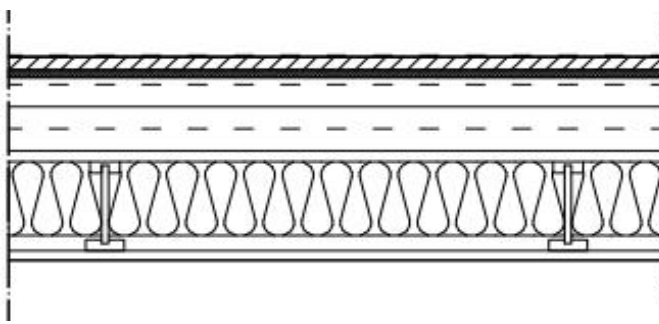
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

L<sub>n,w</sub> (C<sub>1</sub>) = 55 (1) dB

C<sub>1,50-2500</sub> = 4 dB

L<sub>n,w</sub> + C<sub>1,50-2500</sub> = 58 dB



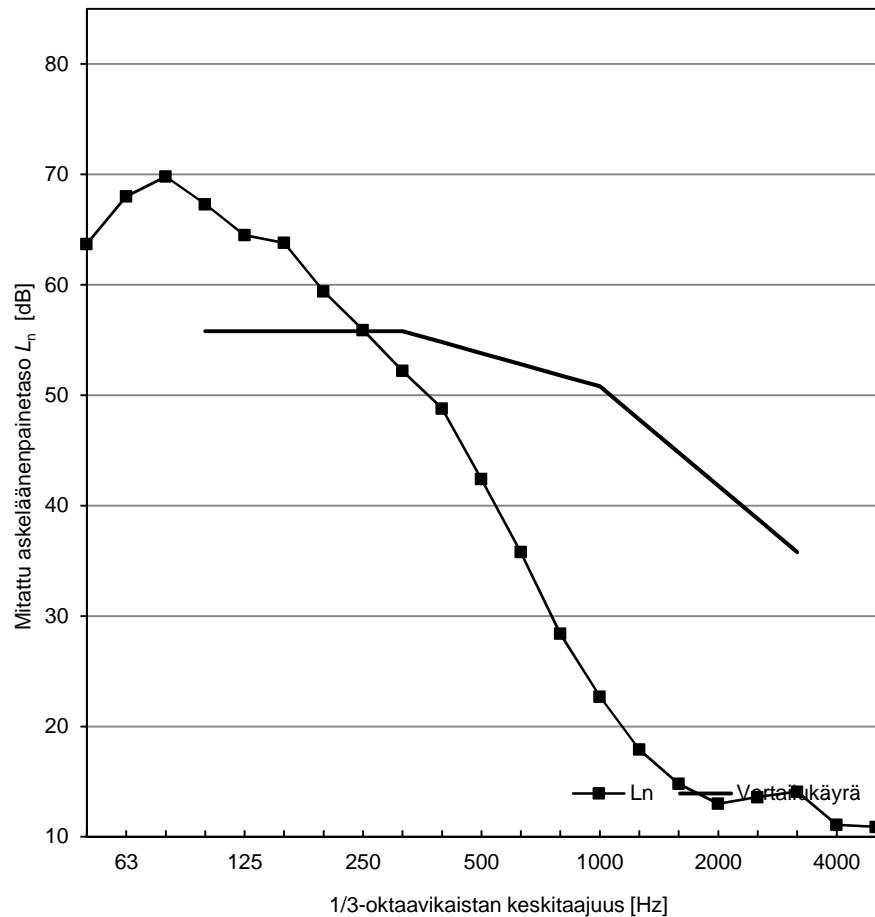
Rakennekerrokset:

	m'	d'
	[kg/m <sup>2</sup> ]	[mm]
vinyylipäällyste, "Tarkett"		
kipsikuitulevy	23	18
puukuitulevy	2,5	10
massiivipuulevy		115
*arvioitu levyn tiheys 500kg/m <sup>3</sup>		
ripustettu alakatto, kiinnitys k600		121
sis. puukuitueriste (100mm)		
*kiinnityksestä puuttuu tietoja		
kipsilevy		13
* levyn m' puuttuu		

Kokonaiskorkeus [mm]

277

f [Hz]	L <sub>n</sub> [dB]
50	64
63	68
80	70
100	67
125	65
160	64
200	59
250	56
315	52
400	49
500	42
630	36
800	28
1000	23
1250	18
1600	15
2000	13
2500	14
3150	14
4000	11
5000	11



S [m<sup>2</sup>] = 17

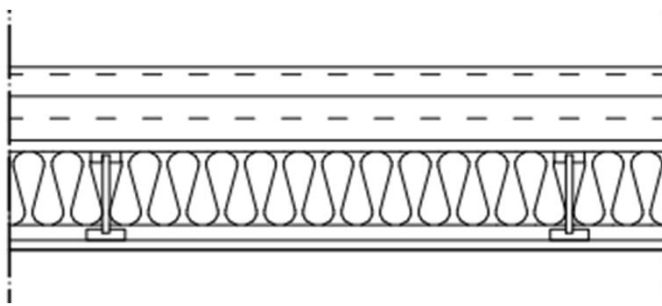
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

L<sub>n,w</sub> (C<sub>1</sub>) = 54 (2) dB

C<sub>1,50-2500</sub> = 6 dB

L<sub>n,w</sub> + C<sub>1,50-2500</sub> = 60 dB



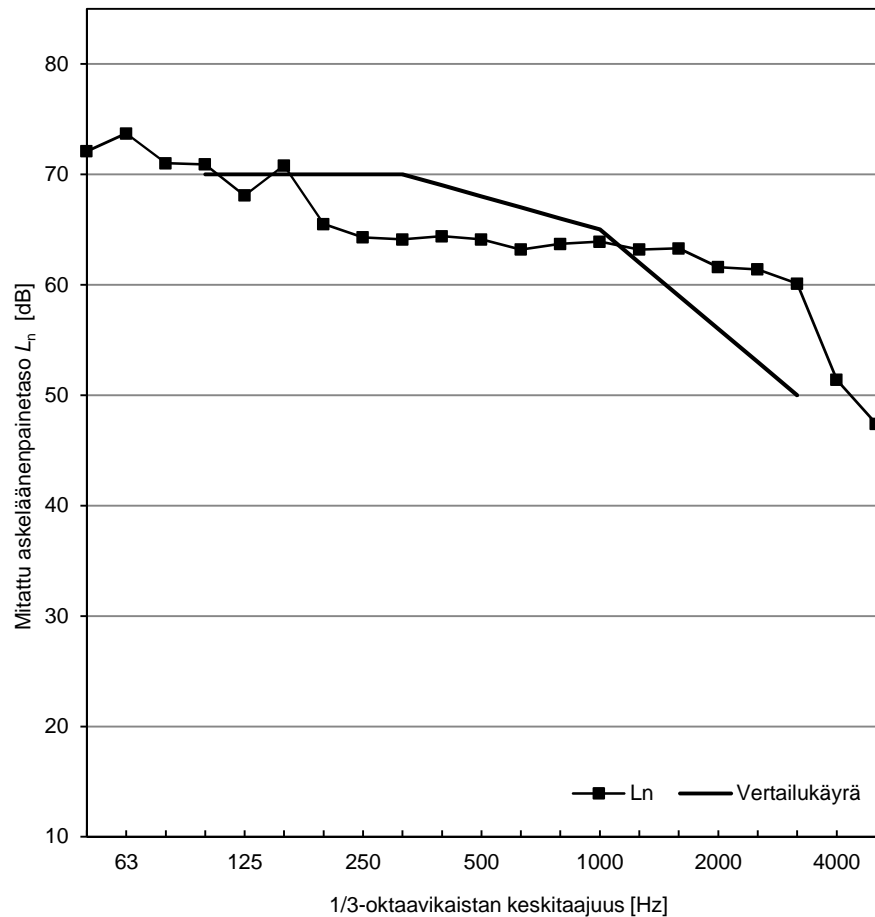
Rakennekerrokset:

	m'	d'
	[kg/m <sup>2</sup> ]	[mm]
massiivipuulevy *arvioitu levyn tiheys 500kg/m <sup>3</sup>		115
ripustettu alakatto, kiinnitys k600 sis. puukuitueriste (100mm) *kiinnityksestä puuttuu tietoja		121
kipsilevy * levyn m' puuttuu		13

Kokonaiskorkeus [mm]

249

f [Hz]	L <sub>n</sub> [dB]
50	72
63	74
80	71
100	71
125	68
160	71
200	66
250	64
315	64
400	64
500	64
630	63
800	64
1000	64
1250	63
1600	63
2000	62
2500	61
3150	60
4000	51
5000	47



S [m<sup>2</sup>] = 17

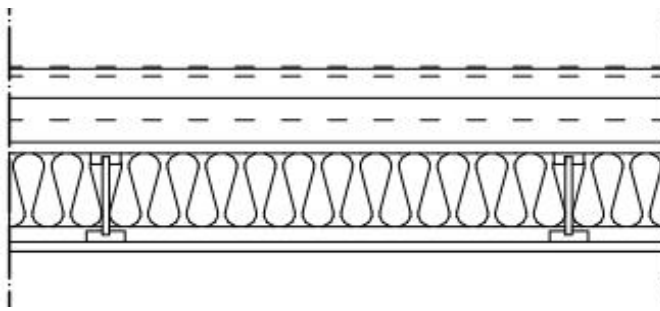
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

L<sub>n,w</sub> (C<sub>1</sub>) = 68 (-5) dB

C<sub>1,50-2500</sub> = -3 dB

L<sub>n,w</sub> + C<sub>1,50-2500</sub> = 65 dB



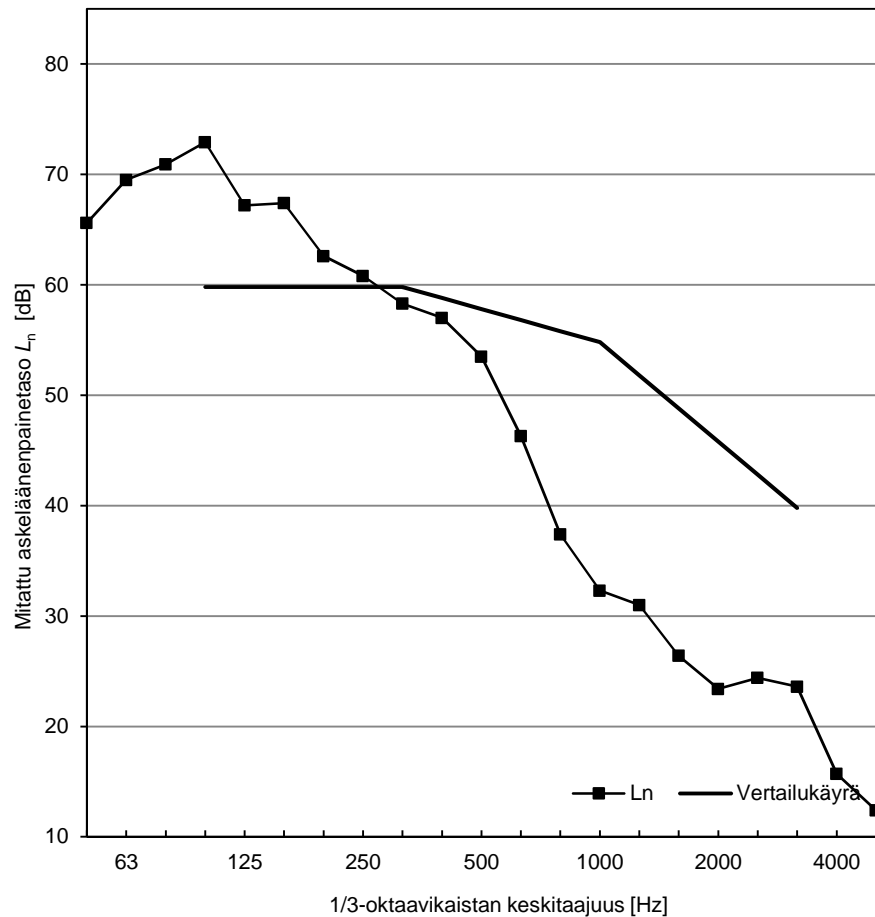
**Rakennekerrokset:**

	m'	d'
	[kg/m <sup>2</sup> ]	[mm]
vinyylipäällyste, "Tarkett"		
massiivipuulevy		115
*arvioitu levyn tiheys 500kg/m <sup>3</sup>		
ripustettu alakatto, kiinnitys k600		121
sis. puukuitueriste (100mm)		
*kiinnityksestä puuttuu tietoja		
kipsilevy		13
* levyn m' puuttuu		

**Kokonaiskorkeus [mm]**

249

f [Hz]	L <sub>n</sub> [dB]
50	66
63	70
80	71
100	73
125	67
160	67
200	63
250	61
315	58
400	57
500	54
630	46
800	37
1000	32
1250	31
1600	26
2000	23
2500	24
3150	24
4000	16
5000	12



S [m<sup>2</sup>] = 17

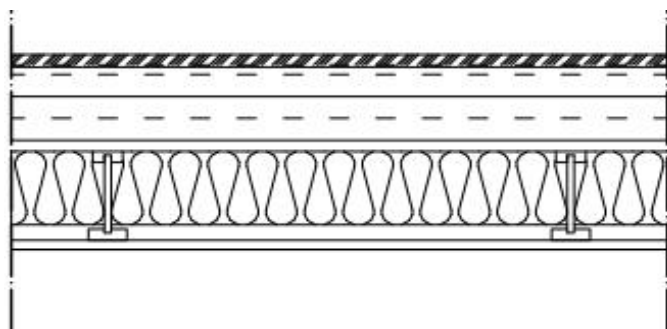
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

L<sub>n,w</sub> (C<sub>1</sub>) = 58 (3) dB

C<sub>1,50-2500</sub> = 5 dB

L<sub>n,w</sub> + C<sub>1,50-2500</sub> = 63 dB



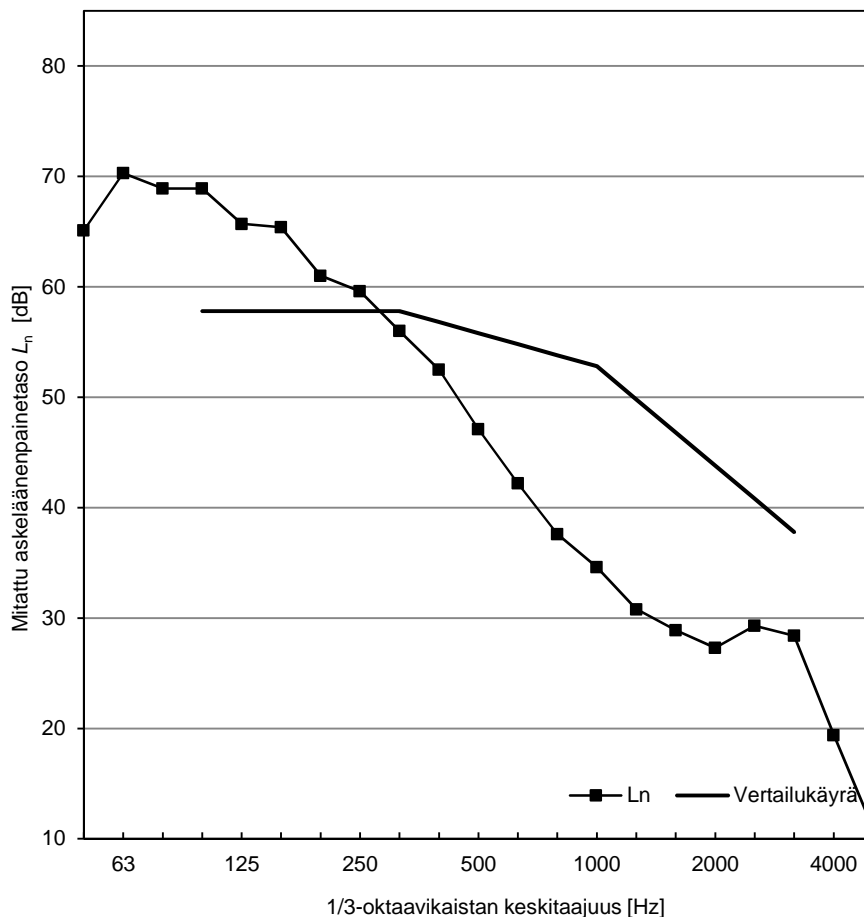
Rakennekerrokset:

	m'	d'
	[kg/m <sup>2</sup> ]	[mm]
parketti		14
*aluskerrot, tiedot puuttuvat		
massiivipuulevy		115
*arvioitu levyn tiheys 500kg/m <sup>3</sup>		
ripustettu alakatto, kiinnitys k600		121
sis. puukuitueriste (100mm)		
*kiinnityksestä puuttuu tietoja		
kipsilevy		13
* levyn m' puuttuu		

Kokonaiskorkeus [mm]

263

f [Hz]	L <sub>n</sub> [dB]
50	65
63	70
80	69
100	69
125	66
160	65
200	61
250	60
315	56
400	53
500	47
630	42
800	38
1000	35
1250	31
1600	29
2000	27
2500	29
3150	28
4000	19
5000	11



S [m<sup>2</sup>] = 17

Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

L<sub>n,w</sub> (C<sub>1</sub>) = 56 (2) dB

C<sub>1,50-2500</sub> = 5 dB

L<sub>n,w</sub> + C<sub>1,50-2500</sub> = 61 dB

## **4. LIITE 3: AUS-VÄLIPOHJAT**

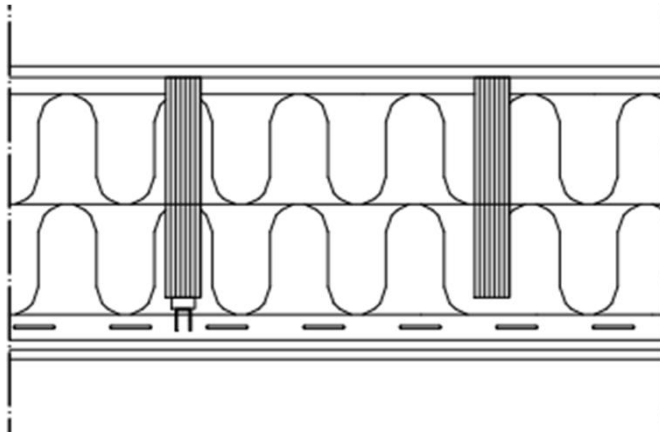
Aus-väliohjat koostuvat Chung et al. [16] tutkimuksista saaduista mittaustuloksista ja väliohjien materiaalitiedoista.

Liitteessä on esitetty seuraavat väliohjarakenteet:

Aus 1-7

Aus 20-22

Yhteensä 10 väliohjarakennetta



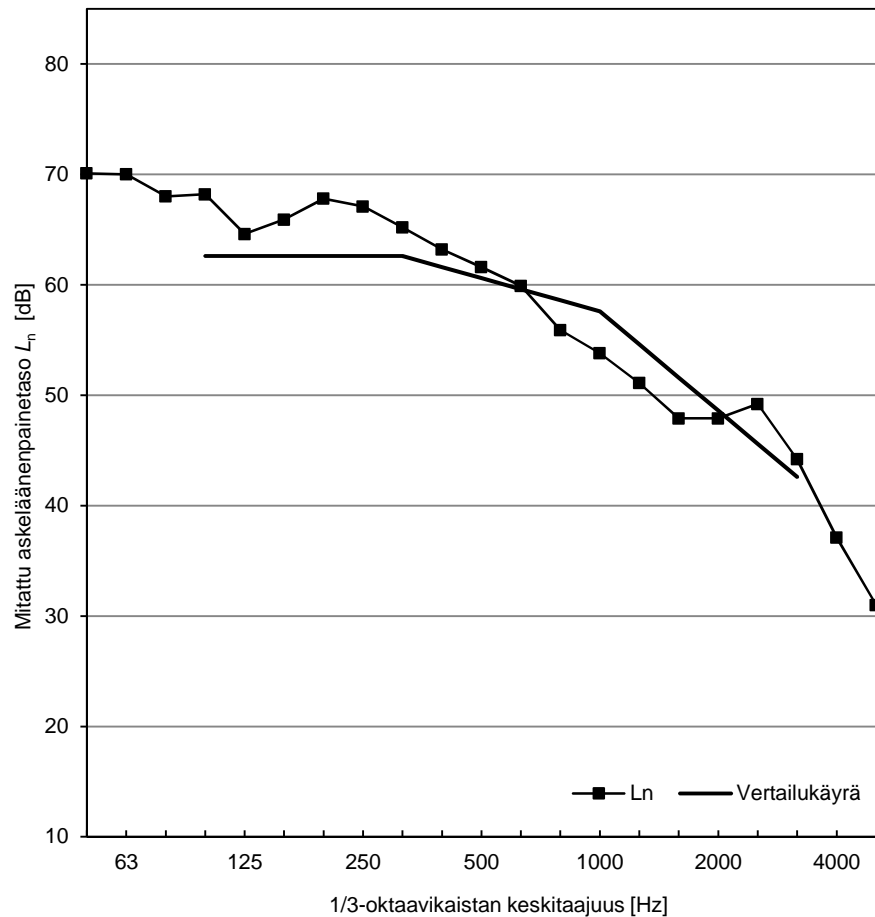
Rakennekerrokset:

	m'	d'
	[kg/m <sup>2</sup> ]	[mm]
vaneri	8,4	15
LVL-palkki (45x300) k400		300
*pituus L=7000mm		
2x150mm lasivilla		
* "Pink Batts silencer mid floor"		
RSIC-kiinnike, k800		23
alakattoranka, k600		35
* "GIB Rondo furring channel"		
2x13mm kipsilevy		26
* levyn m'=12kg/m <sup>2</sup>		

Kokonaiskorkeus [mm]

399

f [Hz]	L <sub>n</sub> [dB]
50	70
63	70
80	68
100	68
125	65
160	66
200	68
250	67
315	65
400	63
500	62
630	60
800	56
1000	54
1250	51
1600	48
2000	48
2500	49
3150	44
4000	37
5000	31



S [m<sup>2</sup>] = 18

Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

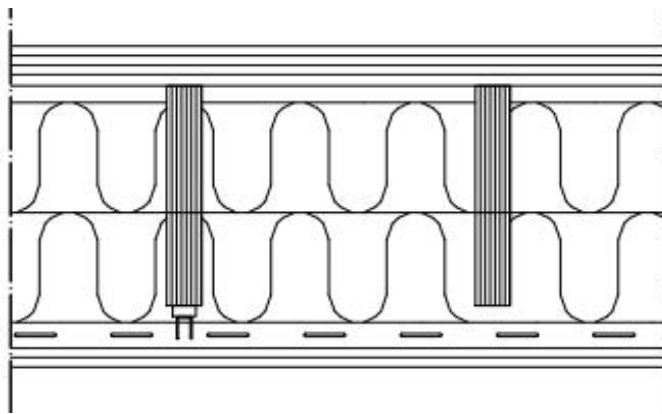
Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

L<sub>n,w</sub> (C<sub>1</sub>) = 61 (0) dB

C<sub>1,50-2500</sub> = 2 dB

L<sub>n,w</sub> + C<sub>1,50-2500</sub> = 63 dB





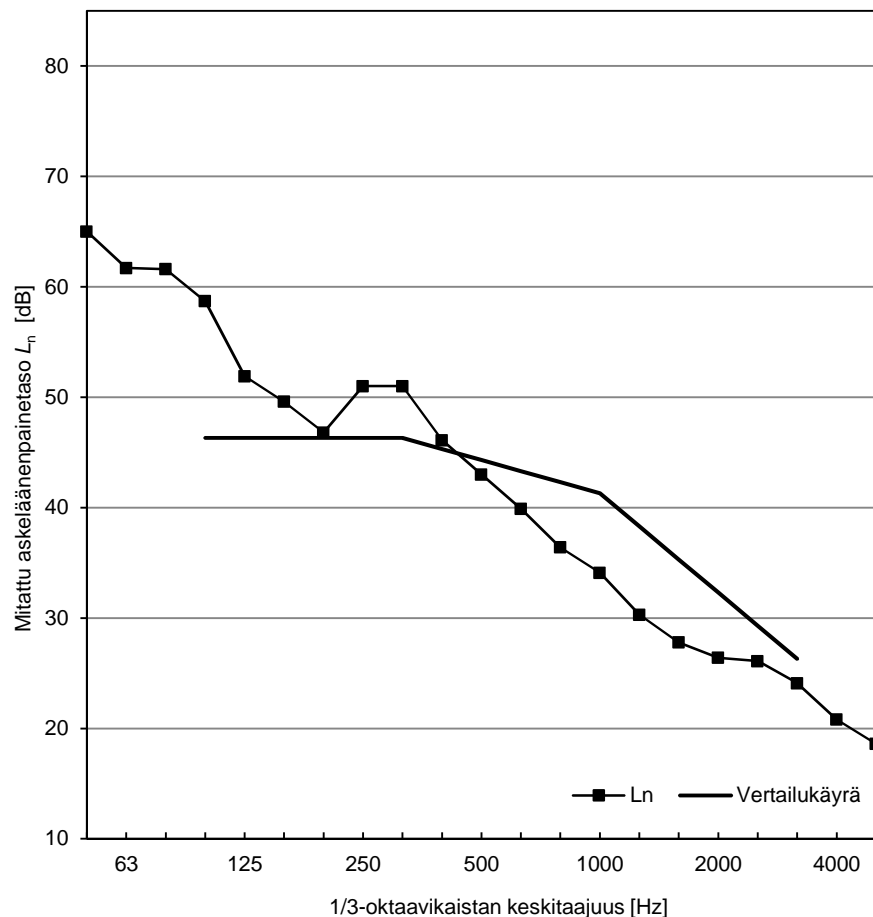
**Rakennekerrokset:**

	$m'$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$d'$ [mm]
3x13mm kipsikuitulevy * levyn $m'=14\text{kg/m}^2$		39
vaneri	8,4	15
LVL-palkki (45x300) k400 *pituus L=7000mm		300
2x150mm lasivilla * "Pink Batts silencer mid floor"		
RSIC-kiinnike, k800		23
alakattoranka, k600 * "GIB Rondo furring channel"		35
2x13mm kipsilevy * levyn $m'=12\text{kg/m}^2$		26

**Kokonaiskorkeus [mm]**

438

$f$ [Hz]	$L_n$ [dB]
50	65
63	62
80	62
100	59
125	52
160	50
200	47
250	51
315	51
400	46
500	43
630	40
800	36
1000	34
1250	30
1600	28
2000	26
2500	26
3150	24
4000	21
5000	19



$S [m^2] = 18$

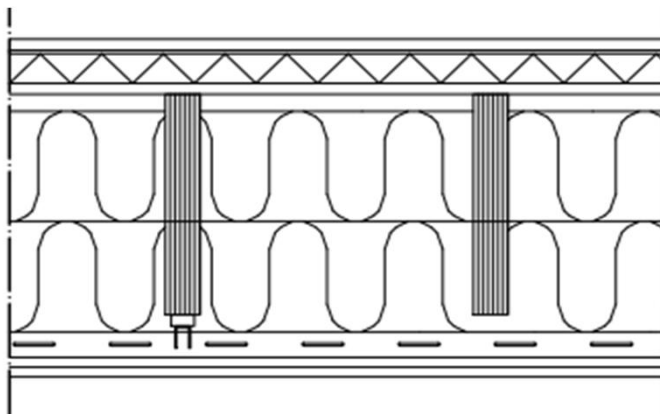
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

$L_{n,w} (C_1) = 44 (2) \text{ dB}$

$C_{1,50-2500} = 9 \text{ dB}$

$L_{n,w} + C_{1,50-2500} = 54 \text{ dB}$



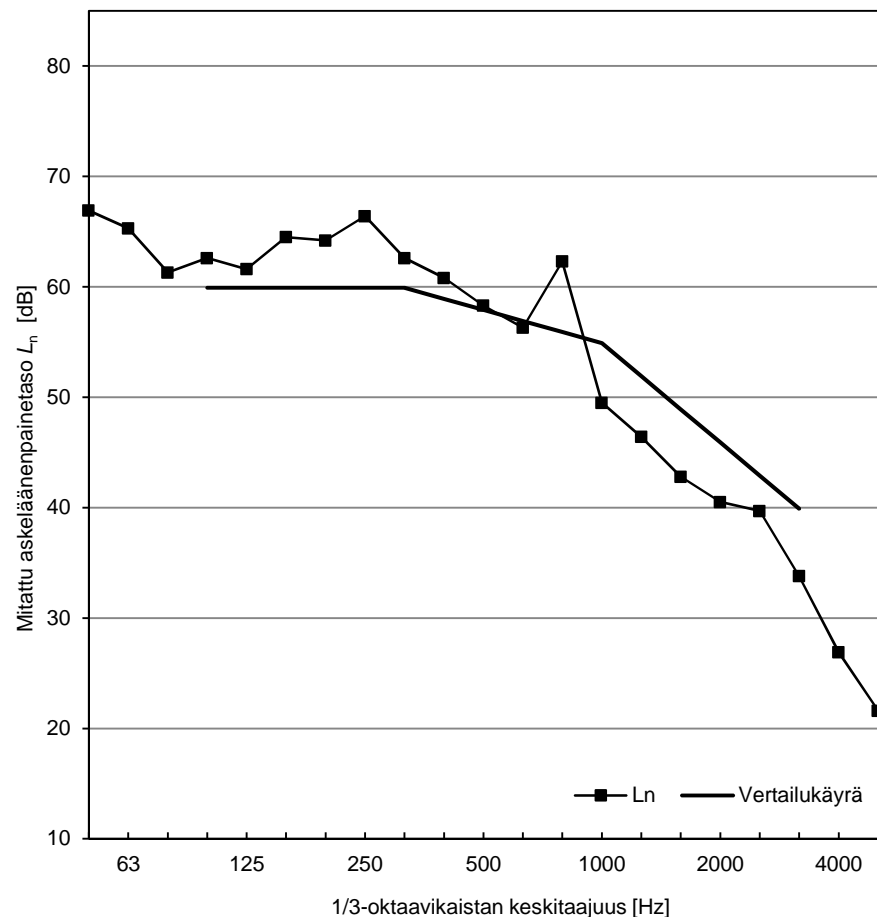
Rakennekerrokset:

	m'	d'
	[kg/m <sup>2</sup> ]	[mm]
vaneri	8,4	15
puukoolaus(70x45), k450		45
*ei-kantava abs.materiaali (40mm)		
vaneri	8,4	15
LVL-palkki (45x300) k400		300
*pituus L=7000mm		
2x150mm lasivilla		
RSIC-kiinnike, k800		23
alakattoranka, k600		35
* "GIB Rondo furring channel"		
2x13mm kipsilevy		26
* levyn m'=12kg/m <sup>2</sup>		

Kokonaiskorkeus [mm]

459

f [Hz]	L <sub>n</sub> [dB]
50	67
63	65
80	61
100	63
125	62
160	65
200	64
250	66
315	63
400	61
500	58
630	56
800	62
1000	50
1250	46
1600	43
2000	41
2500	40
3150	34
4000	27
5000	22



S [m<sup>2</sup>] = 18

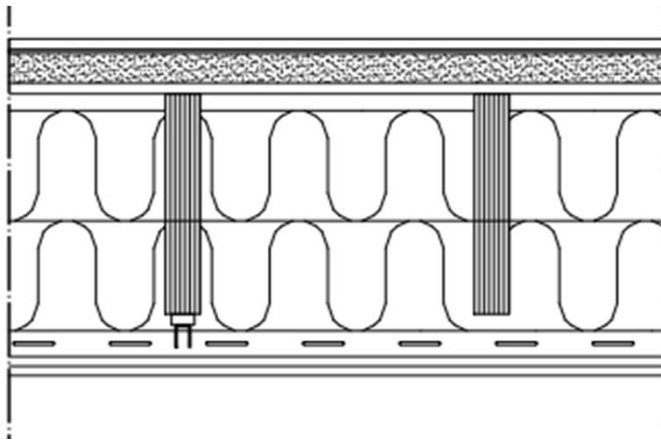
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

L<sub>n,w</sub> (C<sub>1</sub>) = 58 (0) dB

C<sub>1,50-2500</sub> = 2 dB

L<sub>n,w</sub> + C<sub>1,50-2500</sub> = 60 dB



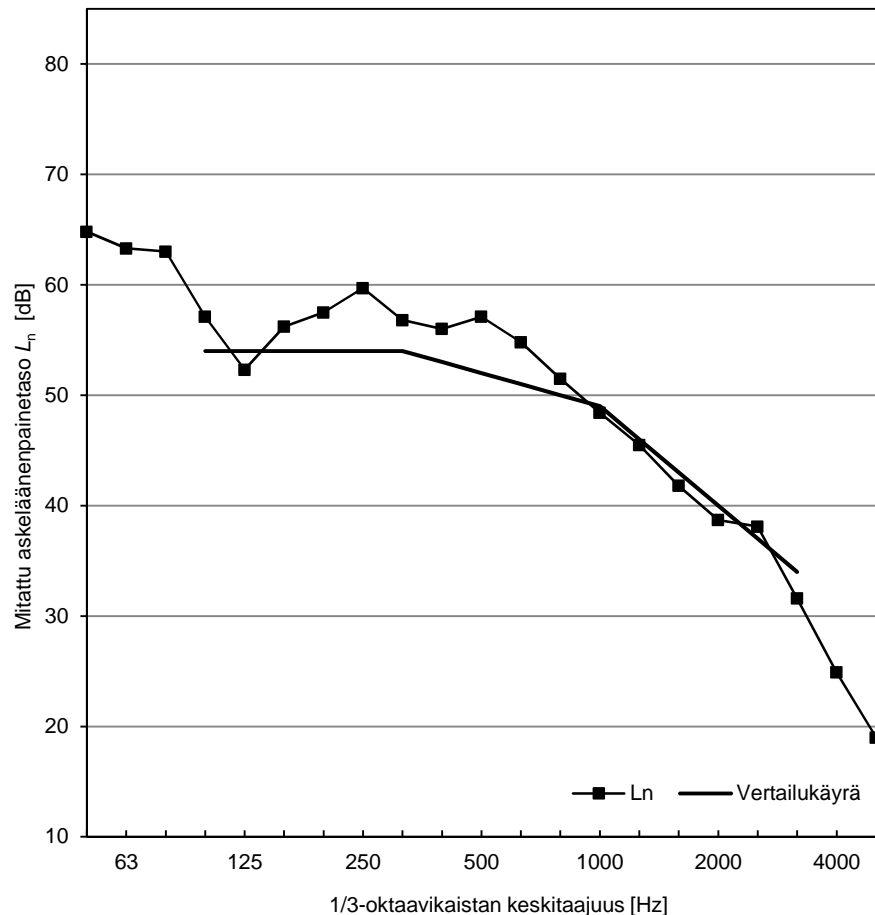
Rakennekerrokset:

	m'	d'
	[kg/m <sup>2</sup> ]	[mm]
vaneri	8,4	15
puukoolaus(70x45), k450		45
*ei-kantava hiekka (40mm)		
vaneri	8,4	15
LVL-palkki (45x300) k400		300
*pituus L=7000mm		
2x150mm lasivilla		
RSIC-kiinnike, k800		23
alakattoranka, k600		35
* "GIB Rondo furring channel"		
2x13mm kipsilevy		26
* levyn m'=12kg/m <sup>2</sup>		

Kokonaiskorkeus [mm]

459

f [Hz]	L <sub>n</sub> [dB]
50	65
63	63
80	63
100	57
125	52
160	56
200	58
250	60
315	57
400	56
500	57
630	55
800	52
1000	48
1250	46
1600	42
2000	39
2500	38
3150	32
4000	25
5000	19



S [m<sup>2</sup>] = 18

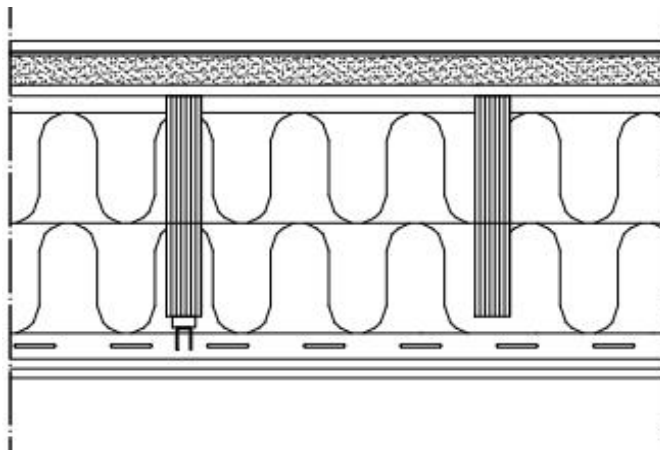
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

L<sub>n,w</sub> (C<sub>1</sub>) = 52 (0) dB

C<sub>1,50-2500</sub> = 4 dB

L<sub>n,w</sub> + C<sub>1,50-2500</sub> = 56 dB



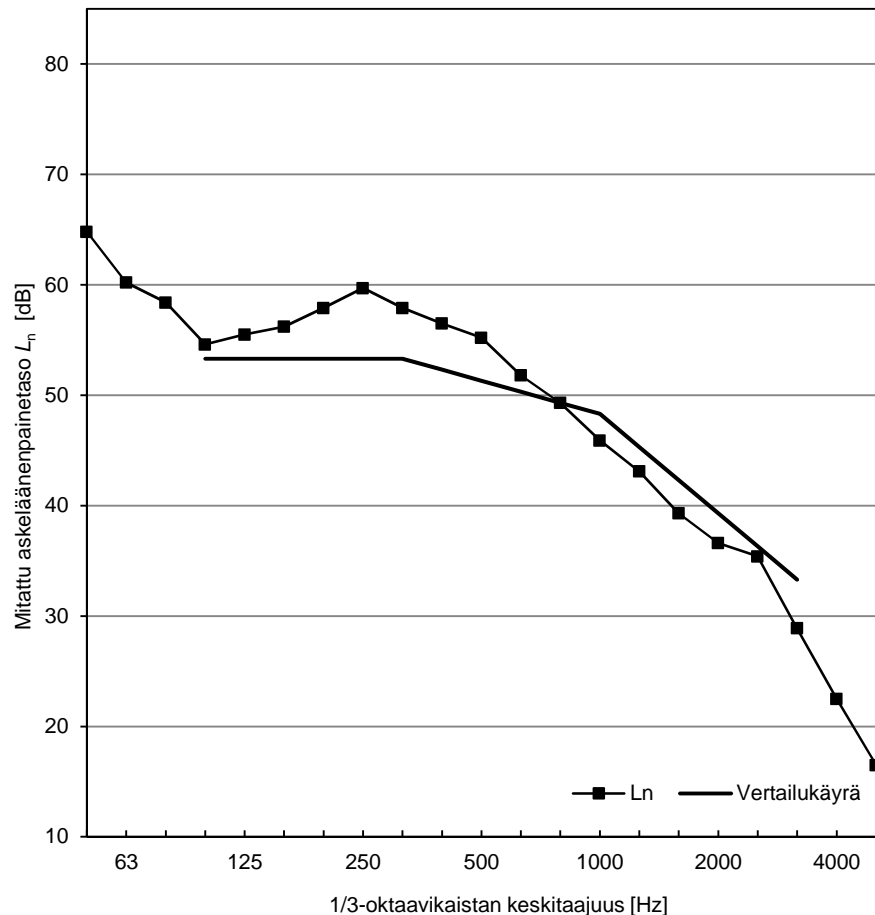
Rakennekerrokset:

	m'	d'
	[kg/m <sup>2</sup> ]	[mm]
vaneri	8,4	15
kantava puukoolaus(70x45), k450		45
* hiekka60-puru40-seos (40mm)		
vaneri	8,4	15
LVL-palkki (45x300) k400		300
*pituus L=7000mm		
2x150mm lasivilla		
RSIC-kiinnike, k800		23
alakattoranka, k600		35
* "GIB Rondo furring channel"		
2x13mm kipsilevy		26
* levyn m'=12kg/m <sup>2</sup>		

Kokonaiskorkeus [mm]

459

f [Hz]	L <sub>n</sub> [dB]
50	65
63	60
80	58
100	55
125	56
160	56
200	58
250	60
315	58
400	57
500	55
630	52
800	49
1000	46
1250	43
1600	39
2000	37
2500	35
3150	29
4000	23
5000	17



S [m<sup>2</sup>] = 18

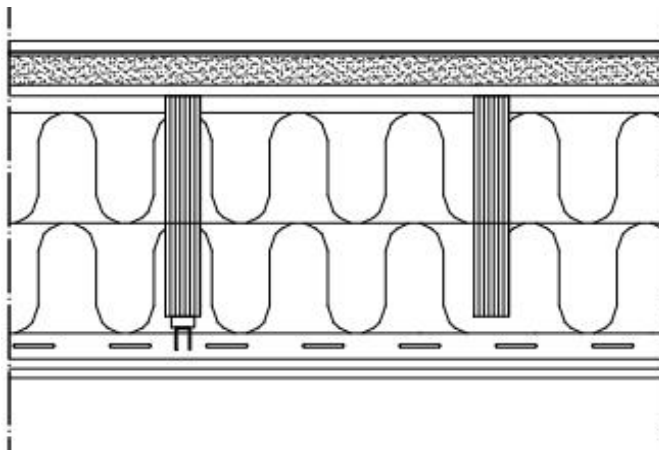
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

L<sub>n,w</sub> (C<sub>1</sub>) = 51 (0) dB

C<sub>1,50-2500</sub> = 3 dB

L<sub>n,w</sub> + C<sub>1,50-2500</sub> = 55 dB



**Rakennekerrokset:**

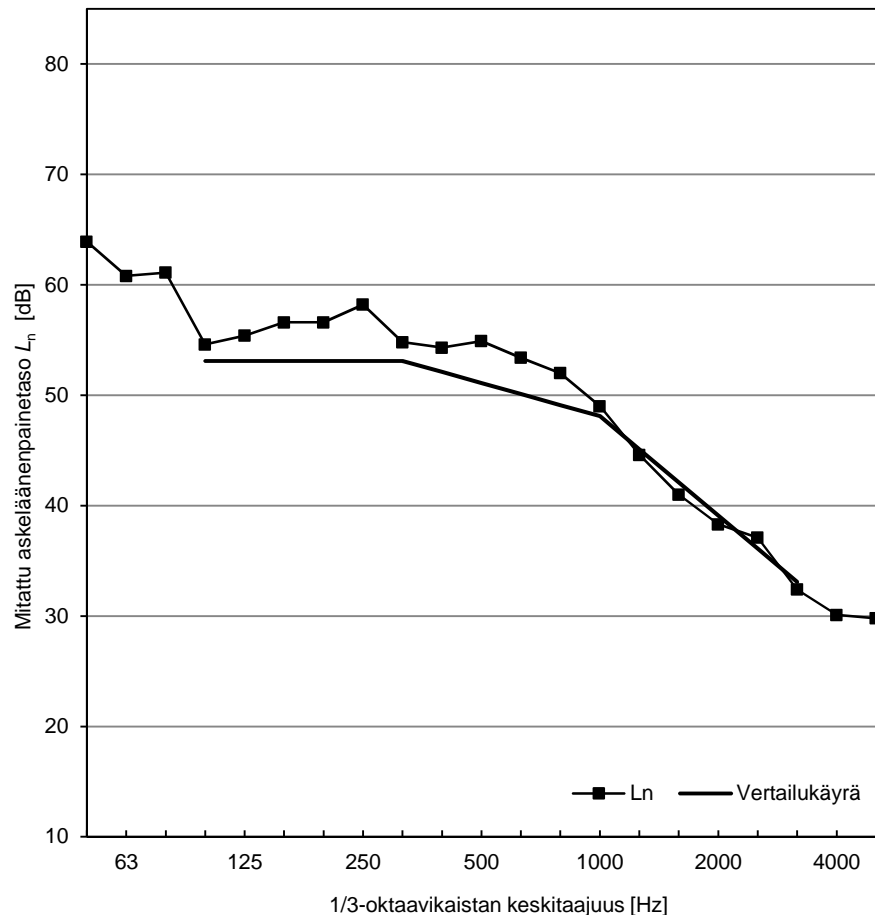
	m'	d'
	[kg/m <sup>2</sup> ]	[mm]
vaneri	8,4	15
kantava puukoolaus(70x45), k450		45
* hiekka60-puru40-seos (40mm)		
vaneri	8,4	15
LVL-palkki (45x300) k400		300
*pituus L=7000mm		
2x150mm lasivilla		
RSIC-kiinnike, k800		23
alakattoranka, k600		35
* "GIB Rondo furring channel"		
2x13mm kipsilevy		26
* levyn m'=12kg/m <sup>2</sup>		

**Kokonaiskorkeus [mm]**

459

\* Lattiapalkkien kääntyminen tuilla estetty seinäkuormituksen simuloimiseksi

f [Hz]	L <sub>n</sub> [dB]
50	64
63	61
80	61
100	55
125	55
160	57
200	57
250	58
315	55
400	54
500	55
630	53
800	52
1000	49
1250	45
1600	41
2000	38
2500	37
3150	32
4000	30
5000	30



S [m<sup>2</sup>] = 18

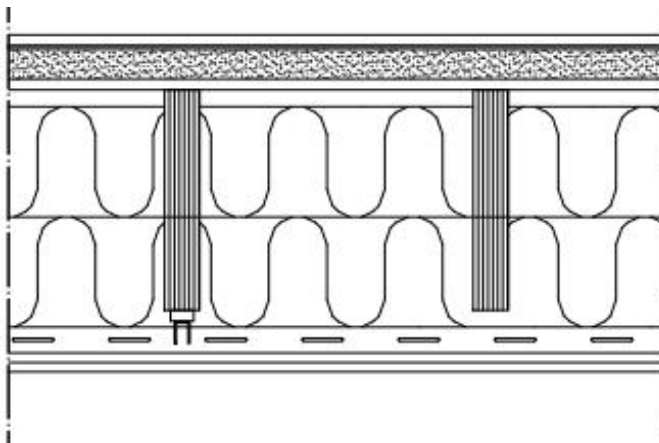
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

L<sub>n,w</sub> (C<sub>1</sub>) = 51 (-1) dB

C<sub>1,50-2500</sub> = 3 dB

L<sub>n,w</sub> + C<sub>1,50-2500</sub> = 54 dB



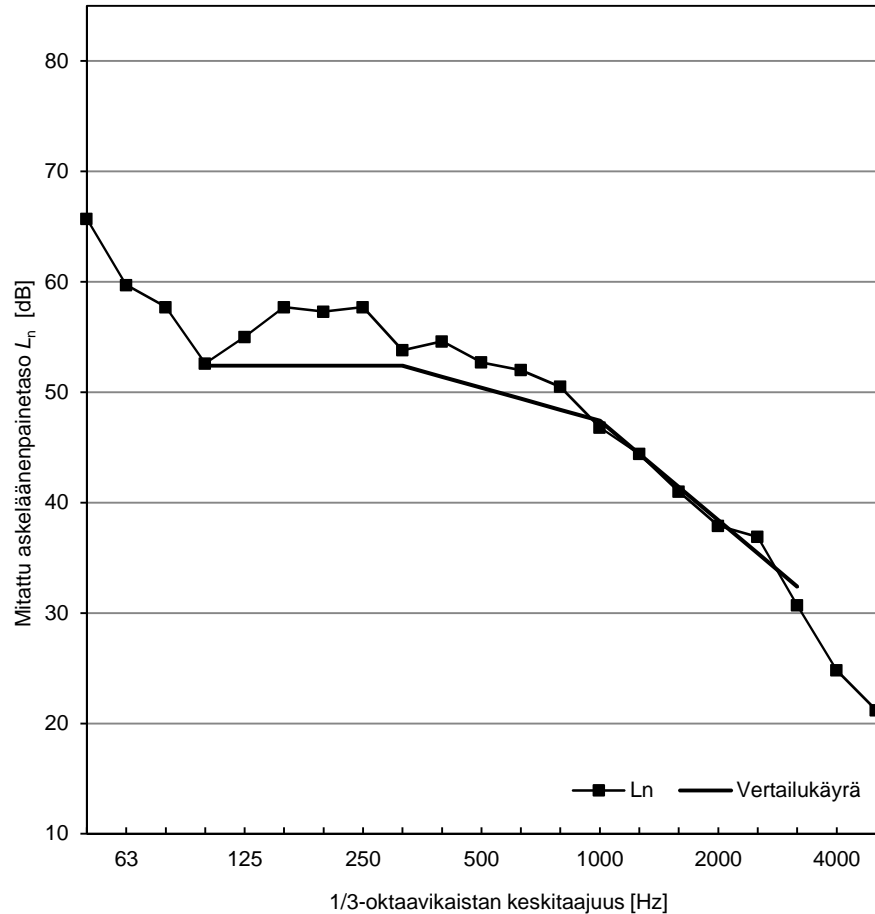
**Rakennekerrokset:**

	$m'$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$d'$ [mm]
vaneri	8,4	15
kantava puukoolaus(70x45), k450		45
* hiekka60-puru40-seos (40mm)		
vaneri	8,4	15
LVL-palkki (45x300) k400		300
*pituus L=5500mm		
2x150mm lasivilla		
RSIC-kiinnike, k800		23
alakattoranka, k600		35
* "GIB Rondo furring channel"		
2x13mm kipsilevy		26
* levyn $m'$ =12kg/m <sup>2</sup>		

**Kokonaiskorkeus [mm]**

459

$f$ [Hz]	$L_n$ [dB]
50	66
63	60
80	58
100	53
125	55
160	58
200	57
250	58
315	54
400	55
500	53
630	52
800	51
1000	47
1250	44
1600	41
2000	38
2500	37
3150	31
4000	25
5000	21



$S [m^2] = 18$

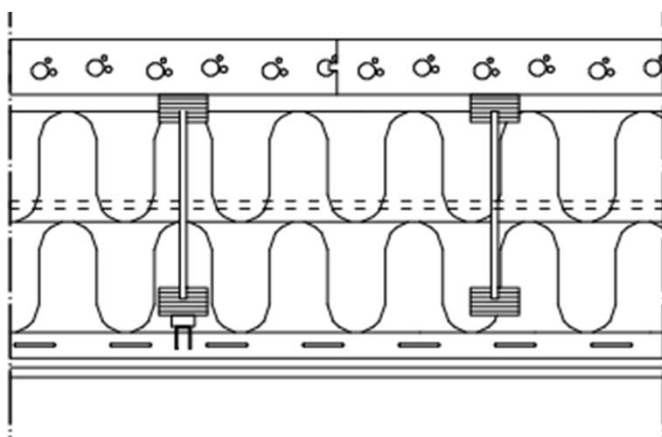
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

$L_{n,w}(C_1) = 50 (0) \text{ dB}$

$C_{1,50-2500} = 4 \text{ dB}$

$L_{n,w} + C_{1,50-2500} = 54 \text{ dB}$



**Rakennekerrokset:**

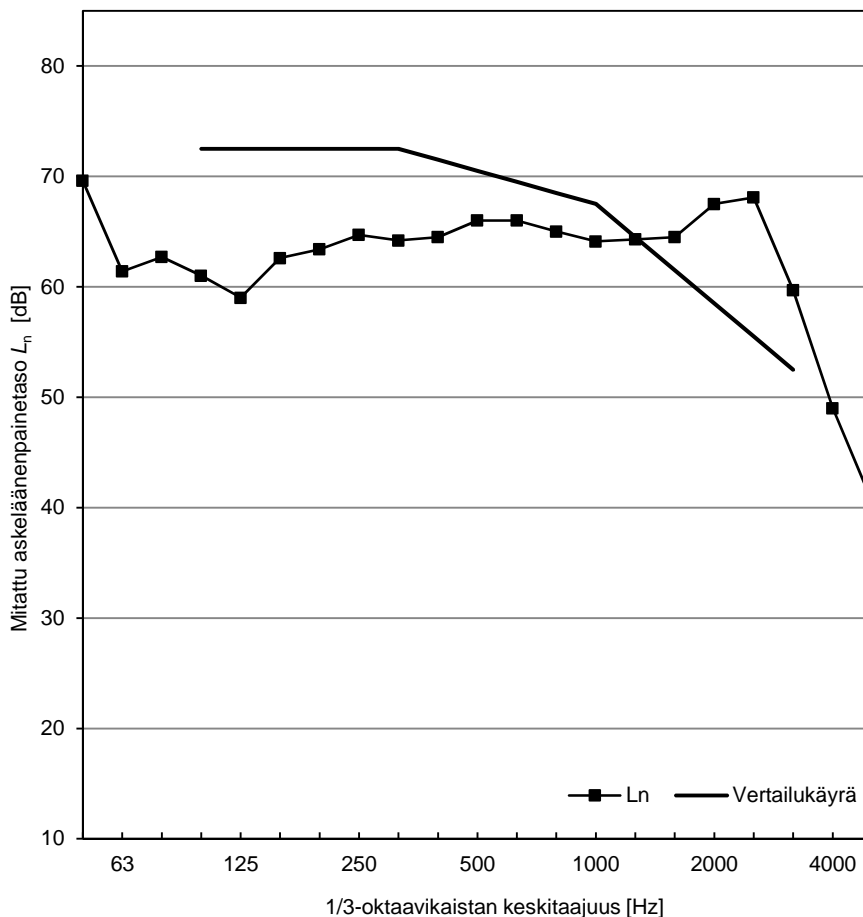
	m'	d'
	[kg/m <sup>2</sup> ]	[mm]
kevytbetonilaatta	52	75
*laatta ruuvattu ja liimattu palkkiin		
puinen I-palkki k450, L=5500mm		300
*laipat 63mm leveitä		
*2 poik.jäykistyslinjaa		
2x150mm lasivilla		
RSIC-kiinnike, k800		23
alakattoranka, k600		35
* "GIB Rondo furring channel"		
2x13mm kipsilevy		26
* levyn m'=12kg/m <sup>2</sup>		

**Kokonaiskorkeus [mm]**

459

\* poikittaisjäykistykseen käytetty terästankoja ja puupalkkeja

f [Hz]	L <sub>n</sub> [dB]
50	70
63	61
80	63
100	61
125	59
160	63
200	63
250	65
315	64
400	65
500	66
630	66
800	65
1000	64
1250	64
1600	65
2000	68
2500	68
3150	60
4000	49
5000	41



S [m<sup>2</sup>] = 18

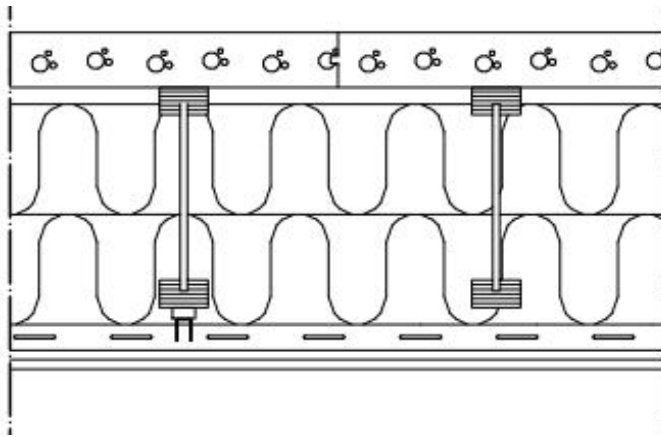
Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

L<sub>n,w</sub> (C<sub>1</sub>) = 71 (-9) dB

C<sub>1,50-2500</sub> = -8 dB

L<sub>n,w</sub> + C<sub>1,50-2500</sub> = 63 dB



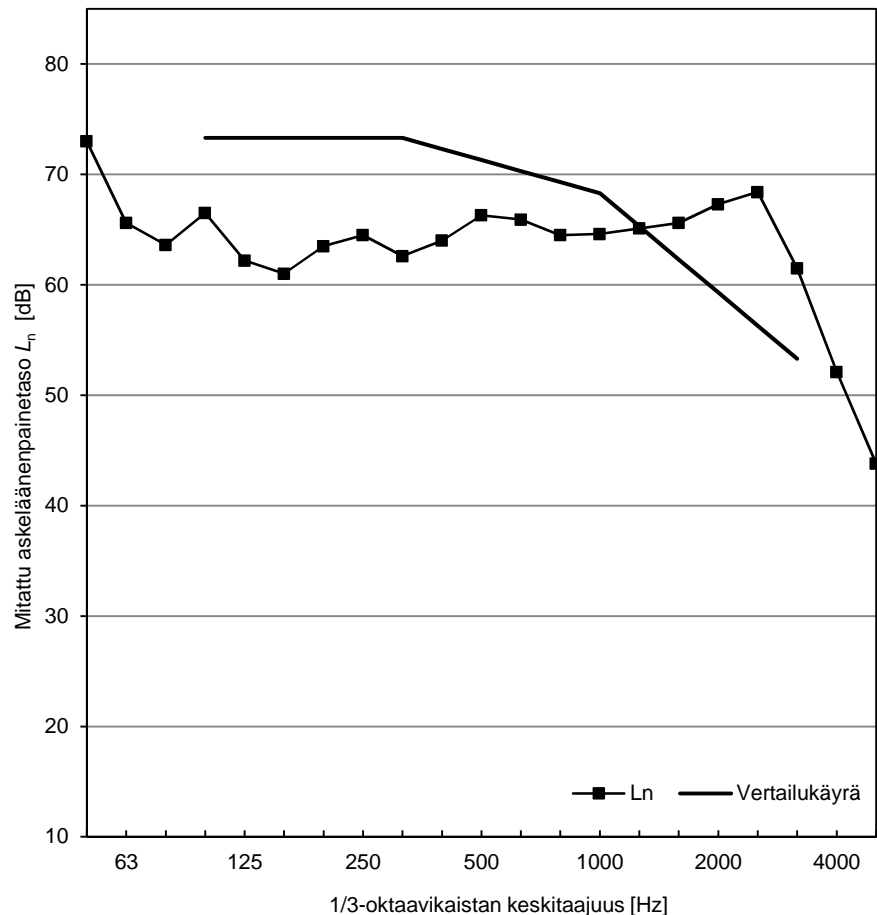
Rakennekerrokset:

	m'	d'
	[kg/m <sup>2</sup> ]	[mm]
kevytbetonilaatta	52	75
*laatta ruuvattu ja liimattu palkkiin		
puinen I-palkki k450, L=5500mm		300
*laipat 63mm leveitä		
* ei poikittaisjäykistystä		
2x150mm lasivilla		
RSIC-kiinnike, k800		23
alakattoranka, k600		35
* "GIB Rondo furring channel"		
2x13mm kipsilevy		26
* levyn m'=12kg/m <sup>2</sup>		

Kokonaiskorkeus [mm]

459

f [Hz]	L <sub>n</sub> [dB]
50	73
63	66
80	64
100	67
125	62
160	61
200	64
250	65
315	63
400	64
500	66
630	66
800	65
1000	65
1250	65
1600	66
2000	67
2500	68
3150	62
4000	52
5000	44



S [m<sup>2</sup>] = 18

Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

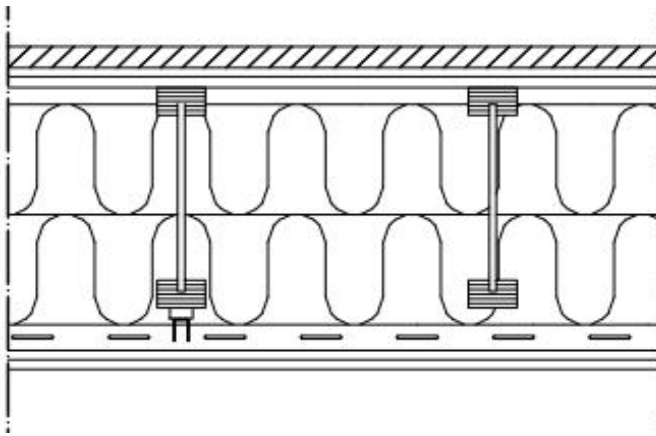
Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

L<sub>n,w</sub> (C<sub>1</sub>) = 71 (-9) dB

C<sub>1,50-2500</sub> = -8 dB

L<sub>n,w</sub> + C<sub>1,50-2500</sub> = 64 dB





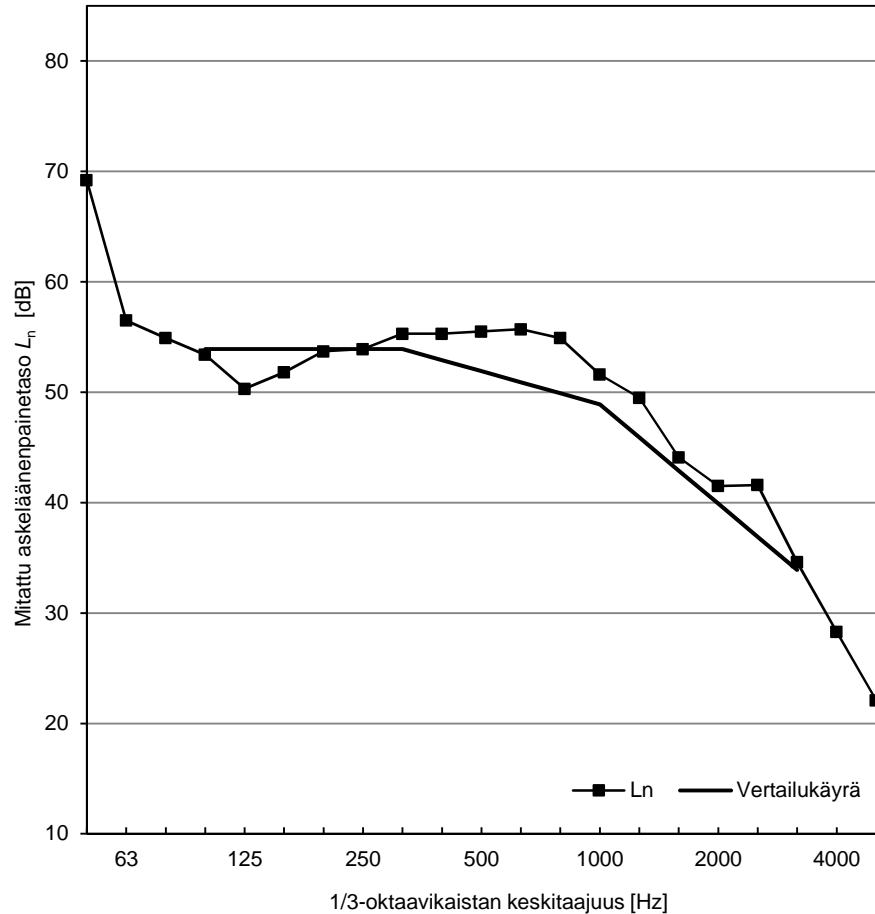
**Rakennekerrokset:**

	$m'$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$d'$ [mm]
kipsivalu	56	29
aluskerros (vaahtomuovi)		12
vaneri	8,4	15
puinen I-palkki k450, L=5500mm		300
*laipat 63mm leveitä		
2x150mm lasivilla		
RSIC-kiinnike, k800		23
alakattoranka, k600		35
* "GIB Rondo furring channel"		
2x13mm kipsilevy		26
* levyn $m'=12\text{kg/m}^2$		

**Kokonaiskorkeus [mm]**

440

$f$ [Hz]	$L_n$ [dB]
50	69
63	57
80	55
100	53
125	50
160	52
200	54
250	54
315	55
400	55
500	56
630	56
800	55
1000	52
1250	50
1600	44
2000	42
2500	42
3150	35
4000	28
5000	22



$S \text{ [m}^2\text{]} = 18$

Mittaluvut on laskettu standardin ISO 717-2:1996 mukaan.

Välipohjarakenteelle laskettu askeläänitasoluku

$L_{n,w} (C_1) = 52 (-2) \text{ dB}$

$C_{1,50-2500} = 4 \text{ dB}$

$L_{n,w} + C_{1,50-2500} = 56 \text{ dB}$