

KARELIA-AMMATTIKORKEAKOULU
Rakennustekniikan koulutusohjelma

Joni Jäppinen
Joonas Pesonen

PUUKERROSTALOJEN RAKENTEIDEN ÄÄNITEKNINEN
TOIMIVUUS – CASE JOENSUU LIGHTHOUSE

Opinnäytetyö
Toukokuu 2019



OPINNÄYTETYÖ
Toukokuu 2019
Rakennustekniikan koulutusohjelma

Tikkarinne 9
80200 JOENSUU
+358 13 260 600 (vaihde)

Tekijä(t)
Joni Jäppinen ja Joonas Pesonen

Nimeke
Puukerrostalojen rakenteiden äänitekniinen toimivuus – Case Joensuu Lighthouse

Toimeksiantaja
Karelia-amk

Tiivistelmä

Opinnäytetyön aiheena oli perehtyä rakennusakustiikan teoriaan ja määräyksiin sekä tutkia puukerrostalon rakenteiden vaikutusta ääneneristävyyteen. Lisäksi osana opinnäytetyötä suoritettiin case-tutkimus, jonka aikana suoritettiin akustiikkamittauksia todellisessa kohteessa. Kohteeksi valikoitui rakenteilla oleva puukerrostalo Joensuu Lighthouse, jossa mittauksia suoritettiin kahdessa eri rakennusvaiheessa. Mitattuja tuloksia verrattiin simulaatiomalleihin ja laskennallisiin malleihin.

Askelääneneristävyydet mitattiin huoneistoiden välisistä välipohjista, jossa kantavana rakenteena oli käytetty CLT-elementtejä ja ilmaääneneristävyydet huoneistoiden välisistä kantavista väliseinistä, joissa oli käytetty LVL-suurelementtejä. Askelääneneristävyydessä huomioitiin myös lattiapinnoitteen ja CLT:n alapuolisten rakenteiden vaikutusta. Mittauksissa noudatettiin SFS-EN ISO 16283-1 ja SFS-EN ISO 16283-2 standardeja ja ne suoritettiin siihen sopivilla mittauslaitteistoilla.

Normalisoidun askeläänitasoluvun $L'_{n,w}$ tuloksiksi saatiin toisella mittauskerralla 50 dB jokaisesta tutkitusta välipohjasta. Ilmaääneneristävyyksiluvun R'_w tuloksiksi saatiin toisella mittauskerralla 51, 54 ja 55 dB tutkituista seinärakenteista. Tuloksista selviää, että kaikki rakenteet eivät täyttäneet mittaushetkellä niille annettuja vaatimuksia.

Kieli
suomi

Sivuja 56
Liitteet 4
Liitesivumäärä 27

Asiasanat

CLT, LVL, askelääneneristävyys, ilmaääneneristävyys, jälkikaiunta-aika, taustamelu



THESIS
May 2019
Degree Programme in Civil Engineering

Tikkarinne 9
80200 Joensuu
FINLAND
+358 13 260 600

Author (s)
Joni Jäppinen and Joonas Pesonen

Title
The Acoustics of Structures in Wooden Apartment Building – Case Joensuu Lighthouse

Commissioned by
Karelia UAS

Abstract

The subject of this thesis was to get acquainted with the theory and regulations of building acoustics and to study the effect of structures in a wooden apartment building on sound insulation. In addition, a case study was carried out as part of the thesis, during which acoustic measurements were performed on the actual site. The measurements were carried out at two different construction stages under construction at Joensuu Lighthouse. The measured results were compared to simulation models and computational models.

Impact sound insulation was measured from the intermediate floors between the apartments where the load-bearing element was CLT (Cross Laminated Timber). Airborne sound insulation was measured from the load-bearing partition walls between apartments where the load-bearing element was LVL (Laminated Veneer Lumber). The effect of floor covering and structures underneath the CLT was also taken into account in the impact sound insulation. The measurements were in accordance with SFS-EN ISO 16283-1 and SFS-EN ISO 16283-2 standards. The measurements were carried out with suitable measuring equipment.

At the second stage of measurement 50 dB was measured for each intermediate floors as a result of weighted normalized impact sound pressure level $L'_{n,w}$. Results for the weighted apparent sound reduction index R'_w was 51, 54 and 55 dB from the partition walls. The results show that all structures did not fill the requirements given to them at the time of measurement.

Language

Finnish

Pages 56

Appendices 4

Pages of Appendices 27

Keywords

CLT, LVL, impact sound insulation, airborne sound insulation, reverberation time, background noise

Sisältö

1	Johdanto	5
2	Puukerrostalot	7
2.1	Puukerrostalon ääneneristävyys	8
2.2	Insinööripuutuotteet	9
2.2.1	CLT	9
2.2.2	LVL	10
2.3	Joensuu Lighthousen rakenteet	11
3	Määräykset	14
3.1	C1, Ääneneristys ja meluntorjunta rakennuksessa 1998	15
3.2	Ympäristöministeriön asetus rakennuksen ääniympäristöstä	15
4	Äänen teoriaa	17
4.1	Äänen taajuus	17
4.2	Äänenpainetaso	17
4.3	Massalaki	18
4.4	Resonanssi-ilmiö	19
4.5	Koinsidenssi-ilmiö	21
4.6	Absorptio, absorptioala ja huonevaimennus	22
4.7	Jälkikaiunta-aika	24
4.8	Sivutiesiirtymät	25
5	Askelääneneristävyys	26
5.1	Askeläänitasoluku	27
5.2	Spektripainotustermit	28
6	Ilmaääneneristävyys	29
6.1	Ilmaääneneristysluku	30
6.2	Standardisoitu äänitasoero ja standardisoitu äänitasoeroluku	31
6.3	Spektripainotustermit	32
7	Mittaukset	33
7.1	Mittauslaitteisto	35
7.2	Mittausten kulku	36
7.2.1	Ilmaääneneristävyyden mittaaminen	37
7.2.2	Askelääneneristävyyden mittaaminen	38
8	Tulokset	40
8.1	Askelääneneristävyydsmittausten tulokset	40
8.2	Askeläänitasoluvun $L'_{n,w}$ tulokset	42
8.3	Ilmaääneneristävyydsmittausten tulokset	45
8.4	Ilmaääneneristävyydsluvun R'_w tulokset	50
9	Pohdinta	53

Liitteet

Liite 1	Askelääneneristävyyden mittaustulokset
Liite 2	Ilmaääneneristävyyden mittaustulokset
Liite 3	Binderholzin & British Gypsumin tutkimus
Liite 4	$L'_n - L'_{nT}$ ja $R' - D_{nT}$ vertailu

1 Johdanto

Joensuun Penttilänrantaan Pielisjoen varrelle on nousemassa Suomen korkein puukerrostalo. Hankkeen on tarkoitus valmistua vuoden 2019 loppuun mennessä, kerrostalon ollessa 14-kerroksinen. Karelia-ammattikorkeakoulu suorittaa kohteessa tutkimustoimenpiteitä, joista saadaan kerättyä tietoa esimerkiksi rakenteiden lämpö- ja kosteusteknisestä toimivuudesta, rungon painaumista ja siirtymistä, ääniteknisestä toimivuudesta ja työmaatekniikasta (Karelia 2018). Opinnäytetyössämme perehdymme puukerrostalon äänitekniiseen toimivuuteen ja ääneneristävyyksmittauksiin eri rakennusvaiheissa.

Suoritamme kohteessa ilma- ja askelääneneristävyyksmittauksia kohteen rakennusvaiheessa. Tutkittavia rakenteita ovat huoneistojen väliset kantavat väliseinät ja niiden ilmaääneneristävyys, sekä huoneistojen välisten välipohjien askelääneneristävyys. Mittaukset suoritetaan useammasta huoneistosta, ja mittauskertoja suoritetaan ainakin kaksi ja ne suoritetaan samoista huoneistoista kuin aiemmat mittaukset. Askelääneneristävyyksiä mitatessa ensimmäiset mittaukset suoritetaan, kun huoneistojen lattiapinnoitetta sekä CLT:n alapuolisia rakenteita ei ole vielä asennettu, ja toiset mittaukset suoritetaan niiden valmistuttua. Tutkittavat huoneistot ovat yksiöitä ja kaksioita.

Opinnäytetyössä rakenteista saatuja ääneneristävyyksituloksia verrataan INSUL-ohjelmalla tehtävään malliin, jolloin saadaan tehtyä vertailtava rakenne ja suuntaa sille, millainen on simuloitu ääneneristävyys rakenteella. Mittausten välillä tehdään vertailua, miten rakenteet ovat vaikuttaneet ääneneristävyyteen.

Puukerrostalon rakennuttaa Opiskelija-asunnot Oy Joensuun Elli ja sen pääura-koitsijana toimii Rakennustoimisto Eero Reijonen Oy. Valmiissa rakennuksessa on 117 asuntoa ja se on pohjakerrosta lukuun ottamatta kokonaan puurakenteinen (Arcadia 2018). Kohteessa on käytetty Stora Enson LVL-viilupuuta seinärakenteissa, sekä Itävallassa valmistettua CLT:tä välipohjarakenteissa (Puuinfo 2018).



Kuva 1. Joensuun puukerrostalo Lighthouse.

Saimme opinnäytetyön aiheen syksyllä 2018. Opinnäytetyö on tehty toimeksiantona Karelia-ammattikorkeakoululle. Mittausten tulisi olla suoritettu alkuvuodesta 2019 sekä työn olisi tarkoitus olla valmiina keväällä 2019. Valmiin kohteen äänimittaukset suoritetaan myöhemmin toisten tekijöiden toimesta. Työhön vaadittavan laitteiston ja tarvikkeet tarjoaa Karelia-ammattikorkeakoulu.

2 Puukerrostalot

Puukerrostalo määritteenä on vähintään kaksikerroksinen talo, jonka kerrokset ovat yleensä eri huoneistoja ja kantavat rakenteet pääasiassa puuta. Puukerrostalon rungot voidaan toteuttaa erilaisin rakenneratkaisuin ja runkojärjestelmin. Vuonna 2011 voimaan tulleiden palomääräysten vuoksi 8-kerroksisia puukerrostaloja on mahdollista rakentaa taulukkomitoituksella. (Tolppanen, Karjalainen, Lahtela & Viljakainen 2013, 10-11.)

Yleisesti käytetty runkojärjestelmä on kantaviin seiniin perustuva järjestelmä. Seinät voidaan toteuttaa esimerkiksi massiivipuisilla suurelementeillä, jolloin kantavat linjat ovat yleensä ulkoseinät ja huoneistojen väliset seinät. (Puuinfo 2019a, 8.) Joensuun Lighthoussessa kantavat rakenteet ovat ulko- ja huoneistojen väliset seinät.

Puupinnat tasaavat kosteuden vaihtelua, mikä vaikuttaa sisäilmaan laatuun positiivisesti. Paloturvallisuuteen vaikutetaan automaattisella sammutusjärjestelmällä ja palamattomilla sisäpinnan suojaverhouksilla, jotka estävät palon leviämisen. Puukerrostaloissa saadaan hyvin eristettyä korkeat äänentaajuudet, mutta matalat, kuten askelista kuuluvat tumpsahavat äänet kulkeutuvat välipohjassa paremmin kuin betonirakenteisessa. (Puuinfo 2019a, 4.)

”Kaikki Joensuun puukerrostalossa tarvittava puutavara mahtuu arviolta alle 50 rekkaan. Jos talo olisi rakennettu betonista, materiaalin kuljettamiseen olisi vaadittu 270 täyttä rekkakuormaa.” (Puuinfo 2018.)

2.1 Puunkerrostalon ääneneristävyys

Puulla on hyvät akustiset ominaisuudet, koska se pehmentää ja heijastaa ääntä, mutta sillä ei ole keveytensä vuoksi hyvät ääneneristävyysominaisuudet (fwr 2019). Puurakennuksissa tarvittavaan äänieristävyteen päästään käyttämällä monikerrosrakenteita. Levypintaisten rakenteiden liittymät ovat yleensä joustavia ja niissä on katkoja, jotka vähentävät sivutiesiirtymän esiintymistä. Puu on kevyt materiaali, joten erityistä huomiota tulisikin kiinnittää mataliin taajuuksiin, nimenomaan välipohjan askeläänissä taajuuksiltaan 25-200 hertsiä. (Tolppanen, Karjalainen, Lahtela & Viljakainen 2013, 158-159.)

Väliseinärakenteet puunkerrostaloissa tehdään yleensä kaksoisrunkoisena, eli jousi-massa-yhdistelmänä. Tämä tarkoittaa sitä, että seinässä on kaksi erillistä runkoa, joiden välissä on ilmatilaa, eli ilmajousi. Ilmatila olisi hyvä täyttää jollain kevyellä absorboivalla materiaalilla, esimerkiksi pehmeällä mineraalivillalla. Se vähentää seisovien aaltojen vaikutusta, mikä taas parantaa ääneneristävyttä rakenteessa. Runkojen tulisi olla erillään toisistaan, jolloin ääneneristävyys olisi hyvä. Huomiota tulisi myös kiinnittää seinän ilmatiiveyteen parhaan mahdollisen ääneneristävyuden saavuttamiseksi, mutta myös estämään esimerkiksi hajujen kulkeutuminen asunnosta toiseen. (Tolppanen, Karjalainen, Lahtela & Viljakainen 2013, 161-163.) Äänen pystysuora siirtyminen runkorakenteissa estetään tärinävaimentimilla (Puuinfo 2019b).

Välipohjissa kelluvalla pintapintabetonivalulla voidaan lisätä rakenteen massaa, jotta päästään parempaan askeläänieristävyteen. Betonivalu tehdään joustavan kerroksen päälle ja valu jätetään seinistä irti 5-10 mm, jotta äänisiltoja ei syntyisi rakenteesta toiseen. Alakattolevyt kiinnitetään akustorangoihin, jolloin kiinnitetyistä levyistä saadaan joustavia. (Tolppanen, Karjalainen, Lahtela & Viljakainen 2013, 167.)

Puunkerrostalon äänimaailmaan voidaan vaikuttaa suunnitteluvaiheessa sijoittamalla tilat, joista aiheutuu ääntä, kuten keittiöt ja märkätilat päällekkäin sekä vastakkain huoneistojen välillä. Oleskelutilat sekä makuuhuone sijoitetaan kauemmas esimerkiksi tieliikenteestä aiheutuvasta melusta. Oleskelu ja makuutilojen

eteen voidaan asettaa tiloja, joita ei käytetä oleskeluun ja nukkumiseen. Tällaisia tiloja ovat keittiöt, käytävät ja vaatehuoneet. (Tolppanen, Karjalainen, Lahtela & Viljakainen 2013, 160.)

2.2 Insinööripuutuotteet

2.2.1 CLT

CLT (kuva 2) on massiivipuinen rakennusmateriaali, joka valmistetaan yleensä kolmesta, viidestä, seitsemästä tai kahdeksasta ristikkäin liimatuista lamellikerroksesta. CLT:tä käytetään seinien, välipohjien ja kattojen rakennusmateriaalina ja lujutensa vuoksi se soveltuu hyvin myös suuriin rakennuskohteisiin. CLT-levyjä voidaan muokata millin tarkasti, mikä mahdollistaa monipuolisen käyttötarkoituksen. (Puuinfo 2014, 4.)

Raaka-aineena käytetään yleensä kuusta tai mäntyä, mutta muitakin puulajeja voidaan käyttää halutessa. Stora Enso valmistaa Itävallassa CLT:tä 2,95 x 16 m:n kokoisina levyinä. Levyjen suuri koko minimoi puskuliitosten määrän. Stora Enso käyttää liimauksessa formaldehydittömiä liimoja, jotka ovat ympäristöystävällisiä. (CLT.info 2013.)



Kuva 2. CLT (Puuinfo 2014).

Stora Enso valmistaa C-levyjä (pystyrakenteet) ja L-levyjä (vaakarakenteet). C-levyissä syysuunta pintakerroksissa on yhdensuuntainen paneelin leveyden kanssa. Nimellispaksuus on 60-160 mm ja lamellikerroksia on 3 tai 5. L-levyissä syysuunta on pintakerroksissa suorassa kulmassa paneelin leveyden kanssa. Nimellispaksuus on 60-320 mm ja lamellikerroksia on 3, 5, 7 tai 8. (Puuinfo 2014, 10.) Joensuun Lighthouseessa on käytetty huoneistojen välipohjissa 180 mm L5s ja 220 mm L7s-2 levyjä (A-Insinöörit 2017a). Numero viittaa CLT-levyn lamellikerroksien määrään.

2.2.2 LVL

LVL (kuva 3) eli Laminated Veneer Lumber on monipuolinen insinööripuutuote, joka on painoonsa nähden lujimpia puurakennusmateriaaleja. LVL on helppotyösteinen, mittapitävä sekä vahva puutuote. Yleisimpiä käyttökohteita ovat palakit, pilarit, kattotuolit, puurungot sekä rakennuselementit. LVL sopii käytettäväksi niin uudisrakentamisessa kuin korjausrakentamisessa. (Puuinfo 2016.)

Viilupuu valmistetaan havupuusta, yleensä kuusiviilusta. Viilut sorvataan tukeista, jonka jälkeen ne liimataan lämmön ja paineen alla yhteen ahioksi. Viilut liimataan joko syysuuntaisesti pitkittäin tai ristiin sekä huomioidaan jokaisen viilun tiheys, kosteuspitoisuus ja kimmomoduuli halutun tuotteen laadun mukaan. (Puuinfo 2019c.) LVL:n suurin ahiokoko on 24 x 2,5 m, joka on yksi suurimmista markkinoilla olevista ahiikoista. (Puuinfo 2016.)

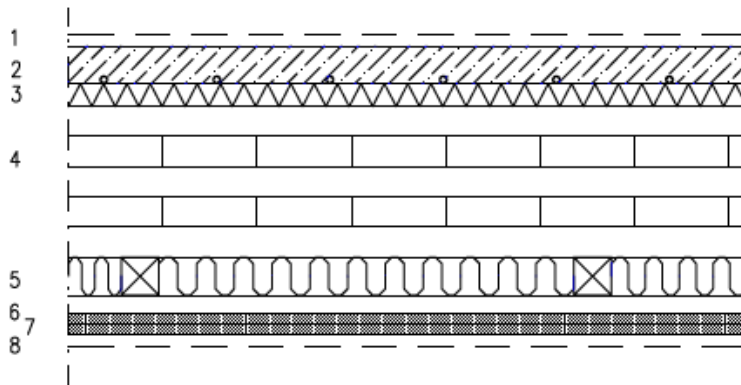


Kuva 3. LVL (Puuinfo 2019c).

Stora Enson LVL-tuotteita on saatavilla eri laatusina erilaisiin rakenteisiin. T-laatu on tarkoitettu seinätolppiin. Sen viilut ovat liimattu syysuuntaisesti pitkittäin, jolloin rakenteiden mittapysyvyys ja suoruus säilyvät. S-laatu on luja, koska kaikki sen viilut ovat syysuuntaisesti samoin päin, laatu sopiikin siksi puurunkoihin, palkkeihin, kattorakenteisiin ja valumuotteihin. X-laadun vieläkin parempi mittapysyvyys saadaan aikaiseksi, kun osa liimattavista viiluista liimataan ristiin. X-laatu on tarkoitettu kohteisiin, joissa vaaditaan pitkää jänneväliä tai mitoittavana tekijänä on leikkauslujuus. (Puuinfo 2019c.) Joensuun Lighthousen kantavissa väliseinissä käytetään LVL X-laatua suurelementeissä, jotka valmistetaan Varkauden Stora Enson tehtaalla (Puuinfo 2018).

2.3 Joensuu Lighthousen rakenteet

Joensuu Lighthousen huoneistojen välipohjat ovat kerrosrakenteisia. Lighthousen välipohjarakenne on kuvan 4 mukainen. Kantavana rakenteena on käytetty CLT-levyjä, jotka ovat isommissa huoneistoissa paksuudeltaan 220 mm ja pienemmissä huoneistoissa 180 mm (kohteen CLT-levyt selitetty kohdan 2.2.1 lopussa). Välipohjan massana käytetään maakosteabetonivalua, joka on askeleenieristeen päällä. CLT:n alapuolella on koolaus ja eriste, johon on kiinnitetty akustiset jousirangat. Alimpana on kaksi kipsilevyä, joista ulompi on palokipsilevy.



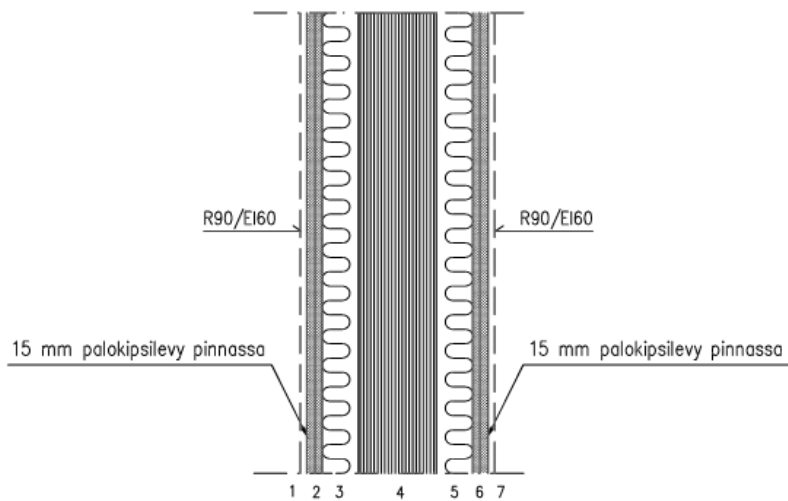
Kuva 4. Välipohjarakenne huoneistojen välissä, $L'_{n,w} \leq 53$ dB (A-Insinöörit 2017b).

Kantavat väliseinät ovat toteutettu LVL-X-suurelementteinä. LVL-X-suurelementtien paksuus muuttuu tiettyjen kerrosten välillä, jolloin rakennuksen kuormaa saadaan kevennettyä ylöspäin mentäessä. Ensimmäisen betonirakenteisen kerroksen jälkeen kantavat LVL-X-suurelementtiseinät alkavat kerroksesta 2, jolloin 2. - 4. kerroksessa LVL-X:n paksuus on 162 mm, kerroksissa 5–11 paksuus on 144 mm ja kerrokset 12–14 paksuus on 126 mm. (A-Insinöörit 2017c.)

Korkean puukerrostalon puurakenteet ovat liitetty toisiinsa kovilla liitoksilla, toisin kuin yleensä käytetään matalammissa puukerrostaloissa tärinäeristimiä. Huoneistoiden sisälle on tehty ns. akustinen sisäkuori. (Heilä 2018, 23.) Akustisessa sisäkuoressa on puurunkoranka, joka täytetään kivivillalla, seinissä on kiinni tu-plakipsilevyt, joista pinnassa oleva on palokipsilevy ja alla tavallinen 13 mm:n kipsilevy. LVL-X-suurelementin molemmin puolin on tehty samalainen rakenne kuivissa tiloissa huoneistoja erottelevassa seinässä (Kuva 5 ja 6).

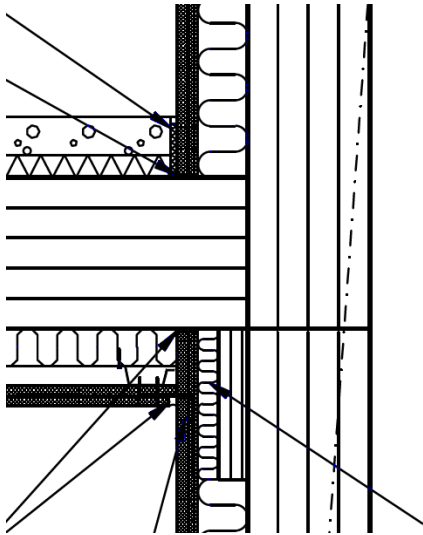


Kuva 5. Kuva otettu huoneistojen välisestä seinästä 5. kerroksesta seinän 2 kohdalla. Kuvan aukossa on jännetanko, siksi seinän alalaitaan on jätetty reikä rakennusvaiheessa.



Kuva 6. Kantava väliseinärakenne, $R'_w \geq 55$ dB (A-Insinöörit 2017b).

Välipohjan ja kantavan väliseinän liitos (kuva 7) on toteutettu niin, että välipohjan CLT-elementti on konsolin päällä. Elementti kiinnitetään L-muotoisilla kulmilla, sekä sitä ennen on tehty tiivistysteippaus saumoihin. (A-Insinöörit, 2018a.) Välipohjan ja seinän levytykset on eroteltu irroituskaitalla ja palokittauksella. Seinän kipsilevyjen ala- ja yläreunassa on elastinen palokitti.



Kuva 7. Kantavan väliseinän ja välipohjan liitos (A-Insinöörit 2018b).

3 Määräykset

Tässä opinnäytetyössä on noudatettu määräyksiä ja ohjeita, jotka koskevat ääneneristävyyden mittausten suorittamista ja tulosten laskemista. Suomen Rakentamismääräyskokoelman osassa C1 Ääneneristys ja meluntorjunta rakennuksessa 1998 on määritetty noudatettavat ääneneristävyyden vaatimukset.

Kohteen rakennuslupaa on haettu ennen uusien vaatimusten voimaantuloa. Kohteen piirustuksissa ja asiakirjoissa on merkitty vaatimuksiksi mittaluvut $R'w$ ja $L'n,w$. Tuloksia verrataan Rakentamismääräyskokoelman osan C1 1998 vaatimukseen. Lisäksi ympäristöministeriön uudistuksen myötä tutkimme uudistuksessa tulleiden mittalukujen vaikutusta tuloksiin.

3.1 C1, Ääneneristys ja meluntorjunta rakennuksessa 1998

Suomen rakentamismääräyskokoelman vanhassa osassa C1 on esitetty vaatimukset rakennuksen ääneneristykselle. Asuinrakennuksissa tulee noudattaa pienimpiä sallittuja ilmanääneneristysluvun R'_w arvoja ja suurimpia sallittuja askeläänitasoluvun $L'_{n,w}$ arvoja. (Ympäristöministeriö 1998, 5.)

Taulukko 1. Asuinrakennuksissa noudatettavat akustiset vaatimukset (Ympäristöministeriö 1998, 5).

Huonetila	Pienimmät sallitut ilmaääneneristävyyden R'_w (dB) arvot	Suurimmat sallitut askeläänitasoluvun $L'_{n,w}$ (dB) arvot
Asuinhuoneiston ja sitä ympäröivien tilojen välillä yleensä	55	
Asuinhuoneiston ja toista huoneistoa palvelevan uloskäytävän välillä, kun välissä on ovi	39	
Asuinhuoneistoa ympäröivistä tiloista keittiöön tai muuhun asuinhuoneeseen, yleensä		53
Uloskäytävästä asuinhuoneeseen		63

3.2 Ympäristöministeriön asetus rakennuksen ääniympäristöstä

Uudet ympäristöministeriön asetukset rakennuksen ääniympäristöstä tulivat voimaan 1.1.2018. Ennen tätä vireillä olevissa hankkeissa sovelletaan asetuksen voimassa olevia säännöksiä. Uusia määrittäviä tuli ilmaääneneristävyyden ja askelääneneristävyyden laskentaan. (Ympäristöministeriö 2017.)

Taulukko 2. Uudet ääneneristävyysvaatimukset (Ympäristöministeriö 2017).

Huonetila	Pienin sallittu äänitasoeroluku $D_{nT,w}$ (dB)	Suurin sallittu aske- läänitasoluku $L'_{nT,w}+C_{1,50-2500}$ (dB)
Asuntojen, majoitus- tai potilashuoneiden välillä	55	53
Uloskäytävästä asuin-, majoitus- tai potilas-huoneeseen	39	63

Uudistuksen myötä tilojen välinen ilmaääneneristys määritetään tilojen äänenpainetasojen erolla. Tilan äänenpainetasot riippuvat tilan koosta ja kalustuksesta, joten mittaustulokset on tehty vertailukelpoisiksi standardisoimalla ne vastaanotettavan tilan jälkikäiunta-aikaan. Standardoitua äänitasoeroa merkitään mittaluvulla D_{nT} sekä standardoitua äänitasoerolukua mittaluvulla $D_{nT,w}$. (Ympäristöministeriö 2018, 19.) $D_{nT,w}$ kuvaa paremmin asumismelun todellista siirtymistä huoneistojen välillä kuin vanha ilmanääneneristysluku R'_w (Kylliäinen 2019).

Aikaisemmin käytetty $L'_{n,w}$ korvautui askeläänitasoluvulla $L'_{nT,w}+C_{150-2500}$ mittaluvulla. Askeläänitasoluvun ja spektripainotustermin yhdistelmää merkitään $L'_{nT,w}+C_{150-2500}$. Spektripainotustermi laajentaa taajuusaluetta 100 Hz:stä 50 Hz:iin. (Ympäristöministeriö 2018, 19.) Spektripainotustermin $C_{150-2500}$ vähimmäisarvo on 0 dB, joten tätä pienempiä spektripainotustermin arvoja ei oteta huomioon askeläänitasolukua laskettaessa (Ympäristöministeriö 2018, 21).

4 Äänen teoriaa

4.1 Äänen taajuus

Normaalikuuloinen ihminen kuulee äänet taajuuksilta 16 Hz - 16000 Hz. Värähtelyn ollessa tiheää kuullaan äänet korkeina, harvat värähtelyt ovat matalia ääniä. (Lahtela 2004, 11.) Äänen taajuus f [Hz] voidaan laskea kaavalla 1, kun tiedetään värähtelyiden määrä n , sekä T (s) kun tiedetään missä ajassa värähtelyt tapahtuvat (Kylliäinen 2006, 27).

$$f = \frac{n}{T} \quad (1)$$

missä

f	äänen taajuus, Hz
n	värähtelyiden määrä
T	ajanjakso, jonka kuluessa värähtelyt on havaittu, s (Kylliäinen 2006, 27.)

Ääni etenee väliaineessa, eli esimerkiksi ilmassa, jota kutsutaan ilmaääneksi. Ilmaääntä tuottavat puhe, musiikki, laitteet ja koneet. Ilmaääni saa ympäröivät rakenteet (seinät, katto, lattia) värähtelemään, jolloin ääni kulkee rakenteen läpi. Rakenteen läpi kulkevaa ääntä kutsutaan runkoääneksi. Runkoääntä voi syntyä myös rakenteeseen kohdistuneista iskuista, kuten kävelystä, jota taas kutsutaan askelääniksi. Äänen nopeus on ilmassa noin 340 m/s. Äänen nopeuteen ilmassa vaikuttaa lämpötila, mutta se on taajuudesta riippumaton. (Kylliäinen 2006, 27-28.)

4.2 Äänenpainetaso

Äänenä aistittavan ilmanpaineen muutosta kutsutaan äänenpaineksi p [Pa]. Ihmisen kuulokynnys on 20 μ Pa ja äänenpaineen ollessa noin 20 Pa, ääniaistimus muuttuu kipuaistimukseksi. Äänenpainetaso L_p voidaan laskea kaavalla 2.

Pienin kuultavissa oleva äänenpainetaso on 0 dB ja kipukynnyksen äänenpainetaso on noin 120 dB. (Kylliäinen 2006, 28.)

$$L_p = 10 \lg \frac{p^2}{p_0^2} = 20 \lg \frac{p}{p_0} \quad (2)$$

missä

L_p	äänepainetaso, dB
p	äänepaine, Pa
p_0	vertailuäänepaine, ihmisen kuulokynnyks (Kylliäinen 2006, 28.)

Äänenvoimakkuutta kuvaillaan äänenpainetasona. Äänenvoimakkuus ilmoitetaan desibelinä, dB. Desibelejä laskettaessa käytetään logaritmeja, joten niitä ei pystytä laskemaan yhteen tavalliseen tapaan summaamalla. (Lahtela 2004, 12.)

4.3 Massalaki

Kun rakenteeseen kohdistuu ääniaaltoja, alkaa rakenne värähtelemään. Värähtelyn johdosta syntyy ääniaaltoja rakenteen toiselle puolelle. Kevyet rakenteet värähtelevät enemmän äänenpaineesta kuin raskaat rakenteet. Massalaki tarkoittaa sitä, että mitä raskaampi rakenne, sitä paremmin se eristää ääntä. Rakenteilla, joiden paino on alle 100 kg/m^2 , ääneneristävyys massaa lisäämällä paranee hitaammin kuin painavammilla (yli 100 kg/m^2) rakenteilla. Hyvin raskaiden rakenteiden massan lisääminen ei ole kannattavaa sen tuottaman ääneneristävyyden paranemisen kannalta, sen sijaan massan lisääminen kevyisiin rakenteisiin on taloudellisemmin järkevämpää. Massan kaksinkertaistaminen parantaa rakenteen ilmaääneneristävyyttä noin 4-6 dB. Massateorian mukainen ilmaääneneristävyys taajuuksittain voidaan määrittellä kaavalla 3, joka antaa arvion rakenteen ilmaääneneristävyydestä massalakiin pohjautuen, 500 Hz:n kohdalta saadaan suuntaa antava ilmaääneneristävyyksluvun arvo. (Lahtela 2004, 18.)

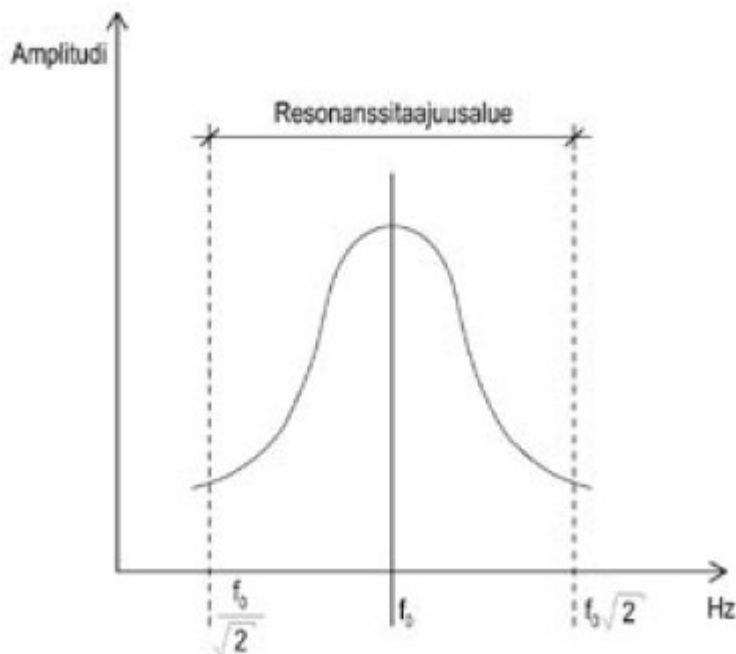
$$R = 20 \lg(mf) - 49 \quad (3)$$

missä

R	rakenteen ilmaääneneristävyys, dB
m	rakenteen massa, kg/m ²
f	äänentaajuus, Hz (Lahtela 2004, 18.)

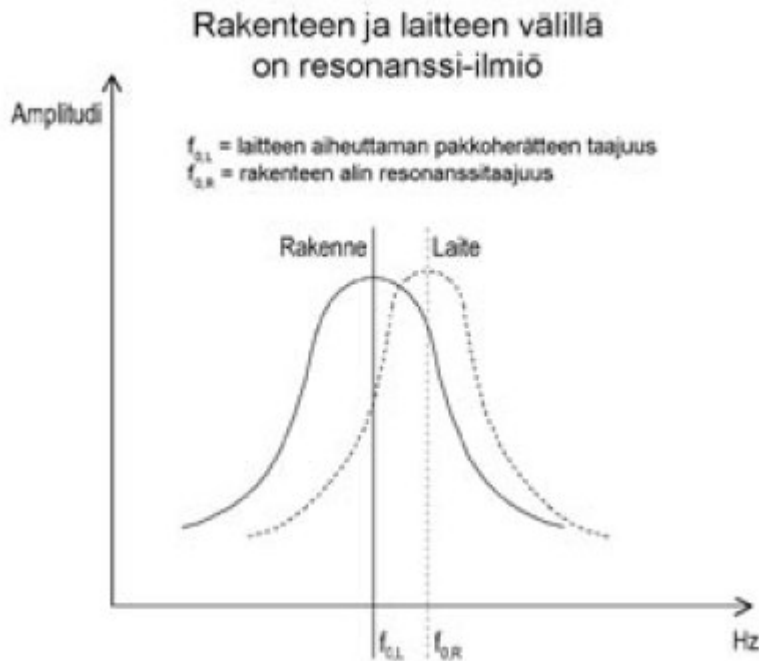
4.4 Resonanssi-ilmiö

Kun rakenteeseen osuu ääniaalto, jonka taajuus on rakenteen omalla resonanssitaajuusalueella (kuva 8), syntyy resonanssi-ilmiö. Ilmiössä ääni säteilee voimakkaasti, johtuen rakenteen voimakkaasta värähtelystä, joka taas johtuu siitä, että rakenteen värähtelysteemi saa koko ajan lisää energiaa ääniaalloista. Rakenteen resonanssin taajuusalueen tulisi olla ihmisen kuulon kannalta 100 - 3150 Hz:n alapuolella. (Lahtela 2004, 20.)



Kuva 8. Resonanssitaajuusalue (Lahtela 2004, 20).

Resonanssi voi syntyä myös jonkin laitteen värähtelystä kuten pyykinpesukoneen. Tällöin laite saa rakenteen värähtelemään, koska laitteen herätetaajuus on rakenteen resonanssitaajuusalueella (kuva 9). Jos laitteen herätetaajuus ja rakenteen resonanssitaajuusalue eivät kohtaa silloin ei synny resonanssi-ilmiötä. (Lahtela 2004, 20.)



Kuva 9. Laitteen ja rakenteen välinen resonanssi-ilmiö (Lahtela 2004, 20).

Tässä työssä seinän resonanssi on mietitty siten, että lasketaan massa-jousimassa kaksoisrakenteisena seinänä, sillä kolmikerrosrakenteen monimutkainen selvittäminen käytössämme olleilla kaavoilla. Kaksikerrosrakenteinen seinä tässä tapauksessa sisältää 2 kipsilevyä (massa 1), ilmapäli/runko (jousi) sekä LVL (massa 2). Tällöin voimme käyttää kaavaa 4 arvioimaan kipsilevyjen ja ilmaraon ominaistajuutta kiinteää värähtelemätöntä LVL-rakennetta vasten.

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

missä

m_1	pintamassa 1, kg/m^2
m_2	pintamassa 2, kg/m^2
d	ilmavälin suuruus, m (Kylliäinen 2006, 58.)

4.5 Koinsidenssi-ilmiö

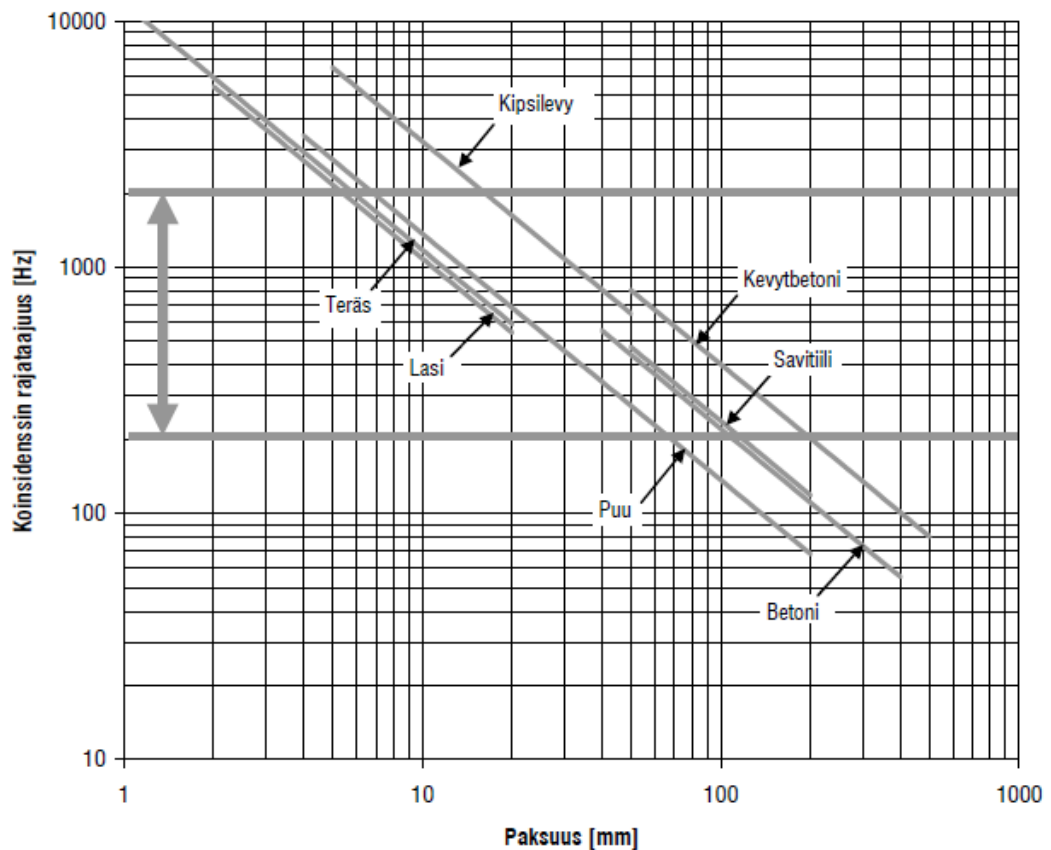
Rakennuslevyissä syntyy koinsidenssi-ilmiötä, joka tarkoittaa sitä, että levyn pintaan osuu tietyssä kulmassa oleva ääniaaltorintama, jolloin levyssä oleva äänen taivutusaalto ja ääniaaltorintaman jälki etenevät samaa nopeutta. (Lahtela 2004, 21.)

Yksinkertaisilla rakenteilla on oma koinsidenssitaajuus f_c . Koinsidenssitaajuuden yläpuolella olevilla taajuuksilla syntyy koinsidenssi-ilmiö, jolloin ääneneristävyys heikkenee. Rakenteen koinsidenssitaajuuden olisi hyvä olla tajuusalueen 100-3150 Hz yläpuolella. (Lahtela 2004, 21.) Raskailla ja jäykillä rakenteilla koinsidenssitaajuus on pieni, kevyillä ja joustavilla rakenteilla, kuten kipsilevyllä koinsidenssitaajuus on suuri (Kylläinen 2006, 50). Koinsidenssin rajataajuuden voi lukea kuvaa 10 käyttäen, kun tiedetään materiaali ja sen paksuus. Yksinkertaisen rakenteen esimerkiksi kipsilevyn koinsidenssitaajuus määritetään kaavalla 5.

$$f_c = \frac{c^2}{2\pi h} x \sqrt{\frac{12g(1-\mu^2)}{E}} \quad (5)$$

missä

f_c	koinsidenssitaajuus, Hz
c	äänen etenemisnopeus ilmassa (noin 340 m/s)
h	rakenteen paksuus, m
g	rakenteen tiheys, kg/m ³
μ	Poisson'in luku (0,3)
E	rakenteen kimmomoduuli, N/mm ² (Lahtela 2004, 22.)



Kuva 10. Eri rakennusmateriaalien koinsidenssien rajataajuuksia, rajataajuuksien yläpuolella esiintyy koinsidenssiä (Kylliäinen 2006, 51).

4.6 Absorptio, absorptioala ja huonevaimennus

Tilassa kulkevan äänen kohdatessa seinän, katon tai lattian, osa aalloista heijastuu pinnoista takaisin ja osa absorboituu pintaan. Heijastumaton, eli absorboitunut ääniteho muuttuu lämmöksi tai liike-energian muoto muuttuu, saaden rakenteet värähtelemään hiukkasten liikkeestä. (Kylliäinen 2006, 37.)

Absorptioalalla tarkoitetaan tilassa olevien absorptiomateriaalien pinta-alaa, joiden absorptiosuhde on 1. Absorptioala voidaan laskea, kun tiedetään absorptiosuhde α sekä pinnan pinta-ala S . Absorptiosuhde lasketaan kaavalla 6. (RIL ry 2007, 46-49.)

$$\alpha = \frac{W_i - W_r}{W_i} \quad (6)$$

missä

α	absorptiosuhde
W_i	rakenteeseen kohdistunut ääniteho
W_r	rakenteesta takaisin heijastunut ääniteho (RIL ry, 46.)

Materiaaleilla ei ole absorptiosuhteelle vakioarvoa, vaan se on aina riippuvainen taajuudesta. Mitattaessa käytetään 63-4000 Hz:n keskitaajuuksia oktaavikaistoit-
tain. Absorptiosuhteen ollessa lähellä arvoa 1, ääni ei heijastu pinnasta ollenkaan
eli se absorboituu lähes kokonaan. Koko tilan absorptioala lasketaan tulojen sum-
mana kaavalla 7. (Kylliäinen 2006, 37-39.)

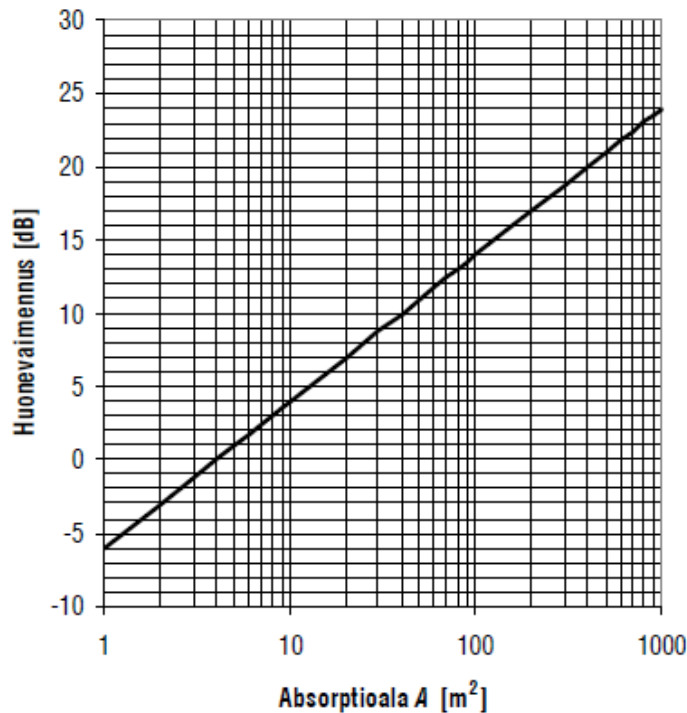
$$A = \alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \dots + \alpha_n S_n + \sum_{i=1}^n \alpha_i S_i \quad (7)$$

missä

A	absorptioala, m ² -Sab
α	absorptiosuhde
S	pinta-ala, m ² (Kylliäinen 2006, 39.)

Kenttämittauksissa saadaan määritettyä jälkikaiunta-aika ja huoneen tilavuus, jol-
loin kaavalla 8 voidaan laskea huoneen absorptioala.

Jos tilassa on vähän ääntävaimentavia materiaaleja, kuten kovia ja heijastavia
pintoja, tällöin ääniteho ei absorboidu ja tilan äänenpainetaso kasvaa ääniteho-
tasoa korkeammaksi. Huonevaimennuksella vaikutetaan äänitehon absorboitu-
miseen ja siten se vaikuttaa äänenpainetasoon. Tilojen, joiden absorptioala on yli
4 m² huonevaimennus on positiivinen. (Kylliäinen 2006, 42.) Kuvasta 11 voidaan
huomata, kuinka absorptioala A vaikuttaa huonevaimennukseen.



Kuva 11. Absorptioalan vaikutus huonevaimennukseen (Kylliäinen 2006, 42).

4.7 Jälkikaiunta-aika

Jälkikaiunta-aika kuvaa sitä, kuinka nopeasti äänenpainetaso laskee 60 dB:iin, kun äänilähde sammutetaan. Jälkikaiunta-aikaa merkitään kirjaimella T ja sen yksikkö on sekunti. Jos jälkikaiunta-aika on lyhyt niin puhe on selvää, mutta jos se on pitkä, niin puheen tavut jäävät soimaan päällekkäin ja puheen selvyys kärsii. (RIL ry 2007, 50.) Määrittäessä jälkikaiunta-aikaa täytyy selvittää huoneen absorptioala. Jälkikaiunta-aika voidaan laskea kaavalla 8.

$$T = 0,16 \frac{V}{A} \quad (8)$$

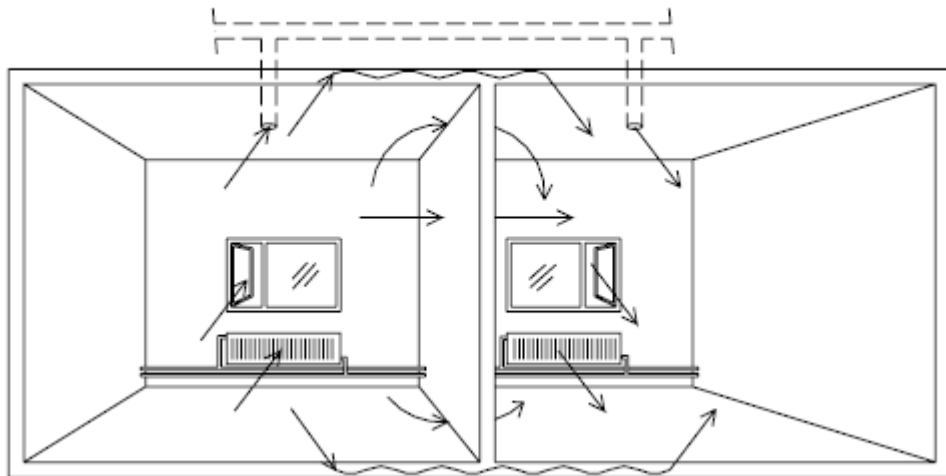
missä

T	jälkikaiunta-aika, s
V	tilavuus, m ³
A	absorptioala, m ² -Sab (RIL ry 2007, 50.)

4.8 Sivutiesiirtymät

Ääni siirtyy tilasta toiseen muitakin reittejä pitkin, kuin tiloja erottavan rakenteen kautta. Tätä kutsutaan sivutiesiirtymäksi. Kun tilassa oleva äänilähde saa ympärillään olevan ilman värähtelemään etenee se ympärillä oleviin rakenteisiin synnyttäen runkoääntä. Rakenteellinen sivutiesiirtymä syntyy runkoäänien edetessä tiloja erottavan rakenteen ympärillä olevien rakenteiden kautta toiseen tilaan. Myös LVI-S-järjestelmän putkia, kanavia ja johtoja pitkin ääni siirtyy tilojen välillä. Rakenteellista sivutiesiirtymää voidaan estää rakenteen massalla ja jäykkyydellä. Rakenteisiin voidaan tehdä myös saumoja, joiden tarkoitus on katkaista rakenne käyttäen esimerkiksi mineraalivillaa. (Kylliäinen 2006, 72-73.)

Merkittävimmät siirtymisreitit tilojen välillä ovat tiloja erottava rakenne, tiloja erottavan rakenteen kautta siirtyvä ääni sivuaviin rakenteisiin, sivuavista rakenteista siirtyvä ääni tiloja erottavaan rakenteeseen sekä sivuavat rakenteet. (Kylliäinen 2006, 73.) Kuvassa 12 on yleisiä sivutiesiirtymäreittejä.



Kuva 12. Sivutiesiirtymäreittejä (Kylliäinen 2006, 72).

Kohteen huoneistoissa on huoneistokohtainen ilmanvaihto, joten ilmanvaihdosta johtuvia sivutiesiirtymiä ei kohteessa esiinny.

5 Askelääneneristävyys

Askelääntä syntyy irtaimiston siirtelystä, kävelemisestä, esineiden tippumisesta sekä muista samankaltaisista äänistä, jotka tuottavat rakenteissa etenevää mekaanista värähtelyä eli runkoääntä. Iskun saadessaan rakenne saa ympärillään olevan ilman värähtelemään ja tällöin tuottaa rakenteen toiselle puolelle ilmaääntä. (RIL ry 2007, 115.) Askelääneneristykseen mittaustulos ilmoitetaan taajuuskaistoittain yhtenä lukuna, tässä työssä L'_{nT} ja L'_n , jotka saadaan laskettua standardin SFS-EN ISO 16283-2 mukaan kaavoilla 9 ja 10.

$$L'_{nT} = L_i - 10 \lg \frac{T}{T_0} \quad (9)$$

missä

L'_{nT}	standardoitu askeläänitaso, dB
L_i	vastaanottavan huoneen äänenpainetasoista laskettu energiakeskiarvo
T	vastaanottavan huoneen jälkikaiunta-aika, s
T_0	vertailujälkikaiunta-aika, s, asunnoilla $T_0=0,5s$ (SFS-EN ISO 16283-2 2018, 9.)

ja

$$L'_n = L_i + 10 \lg \frac{A}{A_0} \quad (10)$$

missä

L'_n	normalisoitu askeläänitaso
A	vastaanottavan huoneen absorptioala, m^2 -Sab
A_0	vertailuhuoneen absorptioala, m^2 , asunnoilla $A_0=10m^2$ (SFS-EN ISO 16283-2 2018, 9-10.)

Rakennuksessa mitattaessa äänenpainetasoja L' askeläänikojeella on määritettävä energiakeskiarvo, joka saadaan standardin SFS-EN ISO 16283-2 mukaan kaavalla 11.

$$L_i = 10 \lg \left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n 10^{\frac{L_j}{10}} \right) \quad (11)$$

missä

n	mikrofonin mittauspisteiden määrä
L_j	mitattu äänenpainetaso, dB (Kylliäinen 2006, 92.)

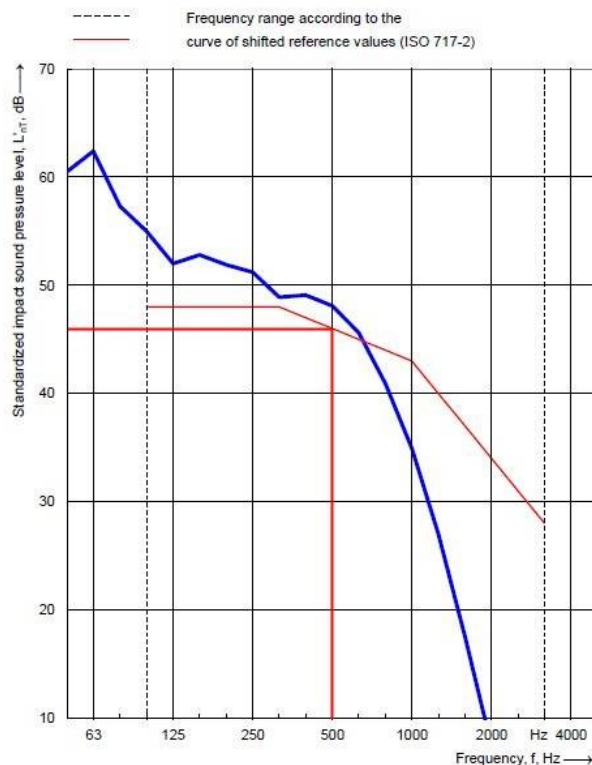
5.1 Askeläänitasoluku

Askeläänieristävyysmittauksissa on tiedettävä äänilähteen aiheuttama voima rakenteen pintaan. Jos äänilähteenä käytettäisiin esimerkiksi henkilön askelista tulevaa ääntä, pitäisi jokaisen askeleen voima laskea erikseen. Mittauksissa käytetään standardoituja askeläänikojeita, koska niiden tuottama voima on tarkkaan tunnettu. Askeläänieristyksellä pyritään vaimentamaan rakenteeseen kohdistuvista iskuista lähtevä ääni mahdollisimman alhaiseksi. (RIL ry 2007, 115.)

Askeläänieristävyysmittaaminen suoritetaan epäsuorasti, toisin kuin ilmaäänien, jota voidaan mitata lähetystilassa ja vastaanottotilassa. Mittaus suoritetaan askeläänikojeen ympärillä sijaitsevista tiloista, joissa äänenpaine mitataan taajuuskaistoittain. Yleensä mittaukset suoritetaan äänilähteen alapuolella sijaitsevasta tilasta, mutta jos asuinkerrostalon alimmassa kerroksessa sijaitsee jokin julkisen palvelutila, mittaukset suoritetaan yläpuolella olevista huoneistoista. Myös rivitaloissa vierekkäisten huoneistojen tulee täyttää askeläänieristykselle asetetut määräykset. (Kylliäinen 2006, 91.)

Askeläänieristävyttä voidaan mitata kahdella eri tapaa, joko laboratoriossa tai paikan päällä kohteessa. Laboratoriomittauksissa mitataan yksittäisen rakenteen vaikutusta äänieristävyyteen ja kohteessa mitattaessa pitää ottaa huomioon tiloja erottavat rakenteet ja sivutiesiirtymien kautta kulkeutuva äänen siirtyminen. Askeläänieristävyysmittaukset tulisi suorittaa kohteessa, jotta ne olisivat rakennusmääräyksien mukaiset. Rakennuksen äänieristävyttä suunniteltaessa käytetään rakenteille tehtyjä laboratoriomittauksia. (Kylliäinen 2006, 91.)

Askeläänitasoluku, tässä työssä $L'_{n,w}$ ja $L'_{nT,w}$, saadaan vertaamalla oktaavikais-toittain mitattuja askeläänitasoja standardin ISO 717-2 mukaiseen vertailukäyrään. Askeläänitasoluku saadaan siirtämällä vertailukäyrää 1 dB pykälän koh-taan, jossa epäsuotuisten poikkeamien, eli vertailukäyrän ylittävien askeläänitasojen summa on maksimissaan 32 dB. Vertailukäyrän ollessa alhai-simmassa kohdassaan edellä mainitulla tavalla, saadaan vertailukäyrältä stan-dardin ISO 717-2 mukaan 500 Hz:n kohdalta askeläänitasoluku (kuva 13). (Kyl-liäinen 2006, 93.)



Kuva 13. Kohteen askelääneneristävyytuloksien lukeminen vertailukäyrältä 500 Hz:n kohdalta.

5.2 Spektripainotustermit

Alle 100 Hz taajuuksilla kuuluvat äänet koetaan viereisissä tiloissa matalina, häi-ritsevinä ääнинä. Askeläänitasoluvun $L'_{n,w}$ ja $L'_{nT,w}$ mittausalue alkaa 100 Hz eli niissä ei huomioida näitä matalia ääniä. Standardissa ISO 717-2 on määritelty spektripainotustermit C_1 taajuuskaistoille 100-2500 Hz ja $C_{1,50-2500}$ taajuuskaistoilla

50-2500 Hz. (ISO 717-2 2013). Tästä johtuen spektripainotusermi $C_{1,50-2500}$ lisätynä askeläänitasolukuun on lähempänä ihmisten subjektiivista kokemusta askelääneneristävydestä kuin pelkkä askeläänitasoluku. (Kylliäinen 2006, 96.)

6 Ilmaääneneristävyys

Ilmaääneneristävyys R tai R' kuvaa äänitehon siirtymistä tilasta toiseen, sekä kyseisessä menetelmässä on oletettu, että ääni siirtyy vain tutkittavan rakenteen kautta, sillä mittalukua on käytetty alun perin lähinnä laboratoriomittauksissa, joissa olosuhteet ovat aina samankaltaiset, eikä siten vastaa kohteella suoritettavien mittausten olosuhteita. Mittaustuloksiin vaikuttavat myös tilojen tilavuudet ja äänenkulkureitit. Standardisoidussa äänitasoeroluvussa mittaluku kuvaa äänenpainetasojen eroja tilojen välillä sekä tasoerot standardisoidaan 0,5 s jälkikaiunta-aikaan. (Kylliäinen, Takala & Hongisto 2015, 1.)

Ilmaääneneristävyydellä tarkoitetaan rakenteen kykyä eristää ilmaäänien siirtymistä tilasta toiseen. Äänilähde saa ympärillä olevan ilman värähtelemään, joka johtaa siihen, että huonetta ympäröivät seinät, lattiat ja katto värähtelevät myös äänitehon vaikutuksesta. Tiloja erottava rakenne värähtelee ja siten vastaanottavan huoneen ilma alkaa värähtelemään. Ilmaääneneristävyys määritellään rakenteeseen kohdistuneen ja sen läpäisseen äänitehon suhteena kaavalla 12. Mitä suurempi saatu dB arvo on, sitä vähemmän rakenteen läpi kulkee äänienergiaa ja rakenne on parempi ääneneristävydeltään. (RIL ry 2007, 47.)

$$R = 10 \lg \frac{W_1}{W_2} \quad (12)$$

missä

R	ilmaääneneristävyys
W_1	rakenteen kohdannut ääniteho
W_2	toiselle puolelle siirtynyt ääniteho (RIL ry 2007, 47.)

Ilmaääneneristävyyttä voidaan mitata laboratoriossa tai valmiissa rakennuksessa. Laboratoriomittauksissa kahden vierekkäisen huoneen välissä on aukko, johon asennetaan tutkittava rakenneos. Mittausten tavoitteena on mitata vain sitä ääntä, joka siirtyy lähetyshuoneesta vastaanottohuoneeseen. Näissä mittauksissa sivutiesiirtymät on pyritty minimoimaan, joten se ei vastaa varsinaisen rakennuksen mittauksia. Laboratoriossa rakennusosan ilmanääneneristävyyden merkintä on R. Valmiin rakennuksen mittauksissa, eli kenttämittauksissa ilmaääneneristävyyttä merkitään R'. Kohteella suoritettavissa mittauksissa ääni kulkee myös lukuisten muiden reittien kautta sivutiesiirtyminä. (RIL ry 2007, 58-63.) Ilmaääneneristävyys taajuuskaistoittain saadaan selville kaavasta 13, kun tiedetään erottavan rakenteen pinta-ala S, vastaanottavan huoneen absorptioala A sekä tilojen äänenpainetasot L₁ ja L₂.

$$R = L_1 - L_2 + 10 \log_{10} \frac{S}{A} \quad (13)$$

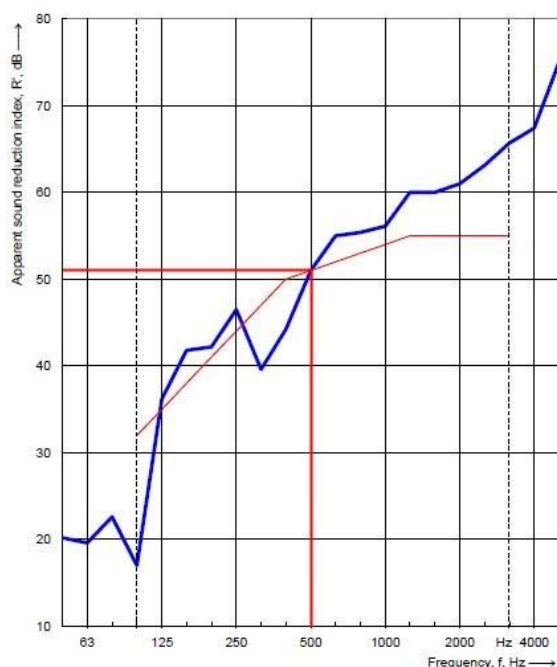
missä

R	ilmaääneneristävyys
L ₁	lähetyshuoneen äänenpainetaso
L ₂	vastaanottohuoneen äänenpainetaso
S	erottavan rakenteen pinta-ala, m ²
A	absorptioala (Kylliäinen 2006, 65.)

6.1 Ilmaääneneristysluku

Ilmaääneneristävyyttä on hankala tulkita 1/3 oktaavikaistan taajuuksien mukaan, sillä ne kertovat ilmaääneneristävyyden tietyllä taajuudella. Tarvitaan yksinumeroinen esitystapa esittämään tulos. Ilmanääneneristysluku R_w, tai kenttäolosuhteissa R'_w määritetään standardoidun ISO 717-1 vertailukäyrän mukaan. ISO 717-1 esitetään vertailukäyrä, jonka muoto perustuu puheäänien taajuusjakaumaan sekä kuuloaistin herkkyteen. Ilmaääneneristysluku on ilmaääneneristävyyssarvojen painotettu keskiarvo. (RIL ry 2007, 59-60).

Ilmanääneneristävyytluku voidaan tulkita vertailukäyrää käyttämällä siten, että käyrää siirretään 1 dB pykälin, jolloin $\frac{1}{3}$ oktaviikaistoittain mitattujen ilmaääneneristävyyksien epäsuotuisten poikkeamien (ilmaääneneristävyys pienempi kuin vertailukäyrän arvo) summa on enintään 32 dB. Tämän jälkeen ilmanääneneristävyytluku voidaan lukea vertailukäyrältä 500 Hz:n kohdalta (kuva 14). Mitä suurempi saatava ilmanääneneristävyytluvun dB arvo on, sitä parempi on ilmaääneneristävyys. (RIL ry 2007, 60.)



Kuva 14. Kohteen ilmaääneneristävyytuloksien lukeminen vertailukäyrältä 500 Hz:n kohdalta.

6.2 Standardisoitu äänitasoero ja standardisoitu äänitasoeroluku

Äänitasoero kuvaa tilojen välistä äänenpainetason eroa. Äänentasoeroa verrataan kohteelta mitattuun jälkikaiunta-aikaan sekä vertailujälkikaiunta-aikaan (0,5 s). (Ympäristöministeriö 2018, 19.) Standardisoidun äänitasoeron (D_{nT}) mittaus tulokset taajuuskaistoittain määritetään samanlaisella vertailukäyrämenetelmällä kuin luvussa 6.1, jotta saadaan standardisoitu äänitasoeroluku $D_{nT,w}$, joka kuvastaa ilmanääneneristävyyttä tällä menetelmällä (Helimäki & Huhtala 2009 27). Standardisoitu äänitasoero lasketaan kaavoilla 14 ja 15.

$$D = L_1 - L_2 \quad (14)$$

missä

L ₁	äänenpaine lähetyshuoneessa
L ₂	äänenpaine vastaanottohuoneessa (SFS-EN ISO-16283-1 2014, 3.)

ja

$$D_{nT} = D + 10 \lg \frac{T}{T_0} \quad (15)$$

missä

T	vastaanottohuoneen jälkikaiunta-aika
T ₀	vertailujälkikaiunta-aika (SFS-EN ISO-16283-1 2014, 3.)

6.3 Spektripainotustermit

Spektripainotustermeillä otetaan huomioon äänilähteen äänispektri silloin, kun kyseessä on jokin muu äänilähde kuin puhe, esimerkiksi raide-, tie- tai lentoliikennemelu. Spektripainotustermeillä arvioidaan esimerkiksi liikenteen vaikutusta ilmajääneristyslukuun, jolloin ilmajääneristyslukuun $R'w$ lisätään spektripainotustermi. Yleisesti ottaen spektripainotustermit lasketaan taajuusalueilla 100-3150 Hz, 50-3150 Hz tai 50-5000 Hz. Riippuen lasketusta taajuusalueesta spektripainotustermiin C merkitään alaindeksiin taajuusalue, esimerkiksi $C_{50-3150}$. (Kylliäinen 2006, 70.) Spektripainotustermit merkitään tuloksissa esimerkiksi näin: $R,w (C; Ctr) = 55 (-7; -15)$ dB. Spektripainotustermi C arvo on noin -2...-5 dB levyrakenteille ja Ctr arvot ovat noin -5...-15 dB (Kylliäinen 2006, 70).

7 Mittaukset

Kohteen ensimmäiset mittaukset suoritettiin 19.12.2018 laboratorioinsinöörin kanssa. Ensimmäisellä mittauskerralla opettelimme mittalaitteiden käyttöä, sekä tutustuimme kohteeseen. Jokaisesta asunnosta otettiin useampi mittaus, jolloin saatiin laskettua mittausten keskiarvo tuloksia varten. Ilmaääneneristävyysmittauksissa tutkittiin kolmea eri kantavaa väliseinää asuntojen välissä, sekä askeleeneneristävydessä kolmen eri asunnon välisiä välipohjia.

Kohteessa ei ollut ovia asennettuna ensimmäisellä mittauskerralla, joten ovet tukittiin väliaikaisella ovenkorvikkeella (kuva 15) mittausten ajaksi. Oviaukot täytyi tukkia, koska äänilähteen ääni kantautui suoraan käytävän kautta vastaanotetaan asuntoon, eikä täten mittaustulos olisi luotettava. Huoneistoissa oli myös läpivientejä, joita jouduttiin tukkimaan villalla ja teipillä ettei ääni kantautuisi niistä läpi. Väliaikaisella ovella tuskin saadaan yhtä hyvää vaikutusta äänen kantautumiseen kuin varsinaisella 30 dB-luokitetulla ovella.



Kuva 15. Ovenkorvike 1. mittauksissa.

Kerrostalossa oli tarkoitus suorittaa 19.3.2019 toiset askel- ja ilmaääneneristävyyssmittaukset samoista huoneistoista. Tämä mittauskerta ei onnistunut, koska naapuritontilla paalutettiin, ja se olisi vaikuttanut mittaustulosten luotettavuuteen. Tässä vaiheessa huoneistojen ovet olivat paikallaan ilman kynnyksiä, sekä pinnat lähes valmiina ja osa kiintokalusteista oli asennettu.

Toiset mittaukset suoritettiin huhtikuun alussa. Huoneistojen ovissa ei ollut vielä kynnyksiä, joten ovien alapuolet tukittiin solukumieristeen pätkillä (kuva 16) mittausten ajaksi. Mittausten ajaksi laitoimme huoneistojen WC-ovet kiinni, koska alaslaskuja ei ollut tehty vielä loppuun asti (kuva 17) ja tämä olisi voinut vaikuttaa mittaustuloksiin. Vähensimme WC:n tilavuuden huoneiston kokotilavuudesta ja otimme huomioon katon alaslaskut sekä huoneiston kiintokalusteet tilavuutta laskehtaessa.



Kuva 16. Ovien tiivistys solukumieristeellä toisella mittauskerralla.



Kuva 17. WC-tilojen kattojen alaslaskujen levytykset puuttuvat.

7.1 Mittauslaitteisto

Tutkimuksissa käytettiin Norsonic Nor140-äänitasomittaria, jolla saatiin mitattua kaikki kohteessa suoritettut mittaukset. Äänilähteinä mittauksissa käytettiin Norsonic Nor275-puolipallokaiutinta, joka tuottaa 120 dB:n äänitehotason vahvistimen kanssa. Äänilähde tuottaa kohinamaista ääntä, joka mitataan siten äänitasomittarilla. Puolipallokaiuttimen kanssa käytimme Norsonic Nor280-vahvistinta. Askelääneneristävyyttä mitattaessa käytössämme oli standardisoitu askelääni-koje, jossa on viisi 0,5 kg vasaraa, jotka iskevät kohdistettuun rakenteeseen 10 iskua sekunnissa.

7.2 Mittausten kulku

Mittaukset aloitettiin pystyttämällä mittauslaitteisto lähetyshuoneeseen ja tutkimalla tarvitseeko läpivientejä tai aukkoja tukkia. Äänitasomittari (kuva 18) kalibroitiin ensimmäisellä mittauskerralla lukemaan 114 ja toisella mittauskerralla lukemaan 113,8.



Kuva 18. Nor140 äänitasomittari.

Aloitimme mittaukset mittaamalla huoneiston taustamelun Lb. Taustamelu mitattiin pyörittelemällä äänitasomittaria 30 sekuntia paikoillaan ja mahdollisimman äänettömästi. Tämän jälkeen vaihdettiin huoneistossa paikkaa, josta mitattiin taustamelu. Taustamelun tuloksiin tulee merkintä sekä taustamelun korjaus taajuuden kohdalle, jos taustamelu on liian korkea.

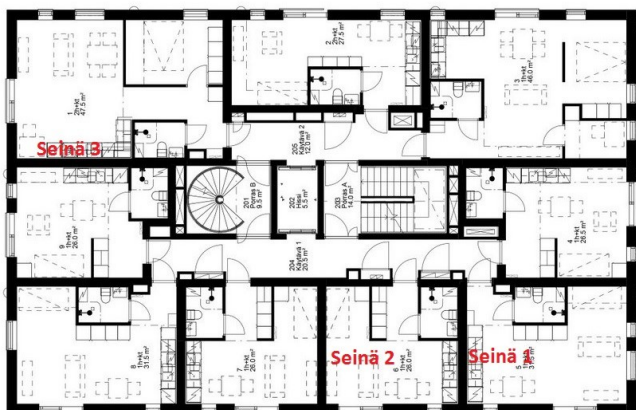
Seuraavaksi mitattiin jälkikaiunta-aika T, jossa äänilähde toisti melua 30 sekuntia, jonka jälkeen laite sammui ja sammumisen jälkeen laite mittasi 5 sekuntia jälkikaiunta-aikaa. Jälkikaiunta-ajan mittaus toistettiin kolmessa eri kohdassa huoneistoa ja mittauksia otettiin kaksi per kohta.

7.2.1 Ilmaääneneristävyyden mittaaminen

Ilmaääneneristävyydsmittauksissa ääntä toistavan puolipallokaiuttimen (kuva 19) ääntä mitattiin ensiksi lähettävässä huoneessa L1, jonka jälkeen kaiutin jätettiin samoille paikoille, mutta äänitasomittarilla mitattiin vastaanottavasta huoneesta äänitasot L2. Tämän jälkeen kaiutinta siirrettiin eri kohtaan ja toistettiin mittaukset L1 (2) ja L2 (2). Ilmaääneneristävyyttä on mitattu kuvan 20 rakenteista ja huoneistoista. Ilmaääneneristävyydsmittauksissa noudatettiin SFS-EN ISO 16283-1 standardia. SFS-EN ISO 16283-1 mukaan äänilähteen tulisi olla vähintään 1 metrin päästä tiloja erottavasta rakenteesta ja vähintään puoli metriä muista seinistä, mikrofonin täytyy olla vähintään puoli metriä huoneen seinistä sekä vähintään 1 m päässä äänilähteestä (SFS-EN ISO 16283-1 2014, 7).



Kuva 19. Mittauksissa käytetty puolipallokaiutin



Kuva 20. Kohteella tutkittavat kantavat väliseinät, alkuperäinen kuva Arcadia Oy arkkitehtitoimisto (Arcadia 2018).

Ilmaääneneristävyyden toisissa mittauksissa kohteen keittiökalustus, kattojen alaslaskut ja WC-tilojen tilavuudet otettiin huomioon tuloksia laskettaessa vähentämällä alkuperäisestä tilavuudesta. Ilmaääneneristävyyden R'_w tulokset saattoivat olla epäluotettavampia, kuin äänitasoeron $D_{nT,w}$ tulokset, sillä R'_w ottaa huomioon tilan absorptioalan, jolloin kalusteet voivat vaikuttaa mittaustuloksiin. Äänitasoeron tuloksiin huoneiden kalustus ja tilavuus eivät vaikuta, sillä äänitasoerossa otetaan jälkikaiunta-aika ja vertailujälkikaiunta-aika huomioon. Suurimassa huoneistossa (kaksio seinä 3 kohdalla) makuuhuoneessa ei ollut ovea, joten ääni kantautui sinnekin ja siksi makuuhuone otettiin huomioon tilavuudessa.

7.2.2 Askelääneneristävyyden mittaaminen

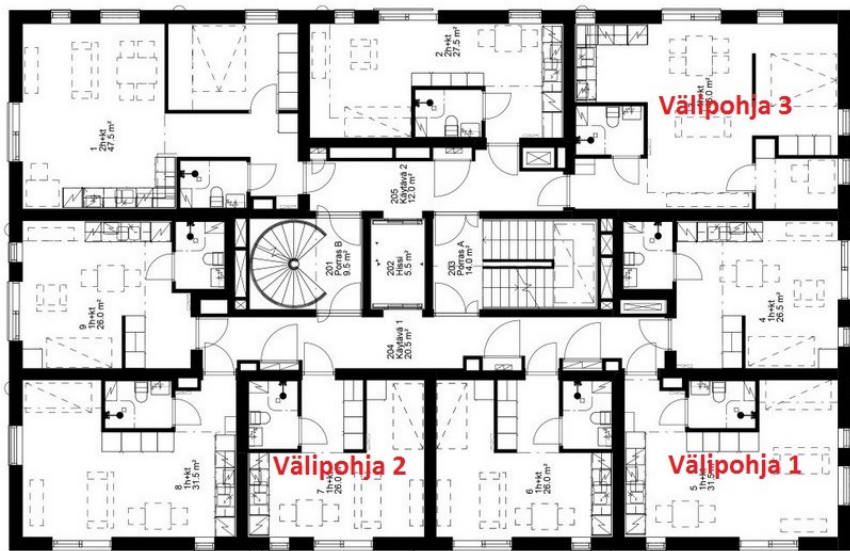
Askelääneneristävyydsmittauksissa askeläänikoje (kuva 21) oli mitattavan huoneen yläpuolella. Mittaushuoneessa mikrofonilla mitattiin 4-6 eri pisteestä, huoneiston pinta-alasta riippuen. Yläpuolisessa huoneessa askeläänikojetta siirrettiin yhtä monta kertaa, kuin mittaushuoneessa mikrofontia. Askelääneneristävyyttä mitattiin kuvan 22 huoneistojen välipohjista.

Askelääneneristävyydsmittauksissa noudatettiin SFS-EN ISO 16283-2 ja SFS-EN ISO 717-2 standardeja. Standardissa SFS-EN ISO 16283-2 sanotaan, että askeläänikojeen tulee olla vähintään 0,5 metrin päässä tilaa rajaavista pinnoista ja eri mittauspisteitä tulee olla vähintään 4. Mikrofonin pitää olla käden mitan päässä mittaajasta, 0,7 metrin päässä edellisistä mikrofonin paikoista, 0,5 metrin päästä tilaa rajaavista pinnoista ja mittausten tulee kestää joka pisteessä vähintään 15 sekuntia. (SFS-EN ISO 16283-2, 17.)

Askelääneneristävyyden toisissa mittauksissa normalisoidun askeläänitasoluvun $L'_{n,w}$ tuloksissa voi olla epäluotettavuutta, koska siinä huomioidaan absorptioala ja sen vaikutus on selitetty kappaleessa 7.2.1. Standardoidun askeläänitasoluvun $L'_{nT,w}$ tulokset saadaan jälkikaiunta-ajan ja vertailujälkikaiunta-ajan avulla, joten ne ovat luotettavampia kuin normalisoidun askeläänitasoluvun $L'_{n,w}$ tulokset.



Kuva 21. Mittauksissa käytetty askeläänikoje.



Kuva 22. Kohteella tutkittavat välipohjat, alkuperäinen kuva Arcadia Oy arkkitehtitoimisto (Arcadia 2018).

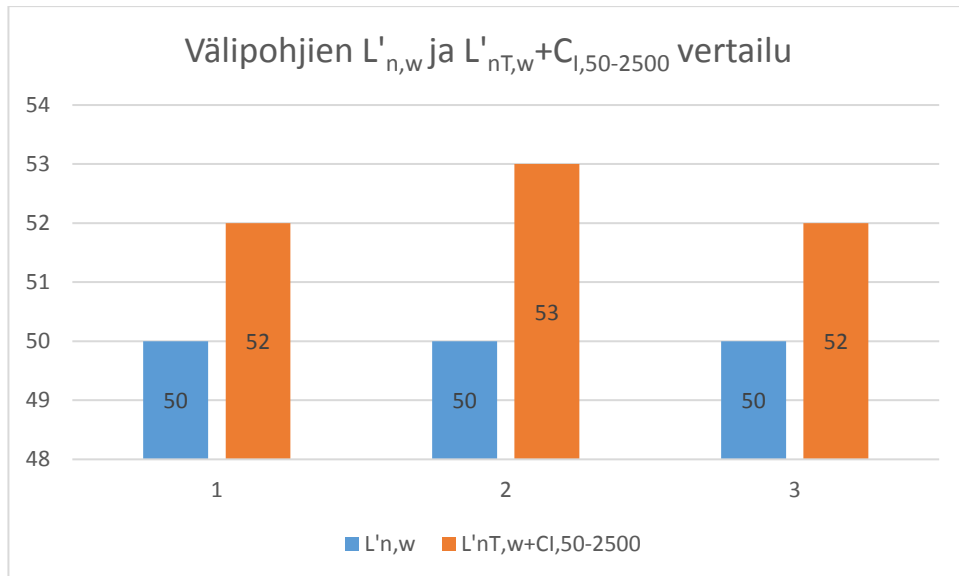
8 Tulokset

Mittausten jälkeen tulokset saatiin tietokoneelta NorXfer ja NorBuild-ohjelmien avulla. NorBuildiin määritettiin käytettävä standardi tulosten tulkitsemiseksi, sekä syötettiin huoneistojen tilavuudet ja erottavan rakenteen pinta-ala. Tuloksista saatiin Pdf-tulosteet ja Excel-tiedostot, joissa näkyi jokainen saatu mittaustulos. Pdf-tulosteissa selviää vertailukäyrämenetelmillä tehdyt mittaustulokset, taulukoidut taustamelut ja jälkikaiunta-ajan tulokset sekä lähetys ja vastaanottohuoneen dB-arvot. Excel-tuloksista tehtiin kuvaajat, joista selviää ääneneristävyyksien vertailut.

Tuloksien tulosteet ovat liitteinä 1 ja 2, joista näkyy painotetut askel- ja ilmaääneneristävyyssarvot sekä kuvaajat. Liitteinä ovat sekä vanhat, että uudet mittaluvut molemmilta mittauskerroilta. Tuloksien saamiseksi Norbuildiin syötettiin standardit ISO 16283-1 sekä ISO 16283-2, joissa vertailukäyrät tulivat standardeista ISO 717-1 ja ISO 717-2.

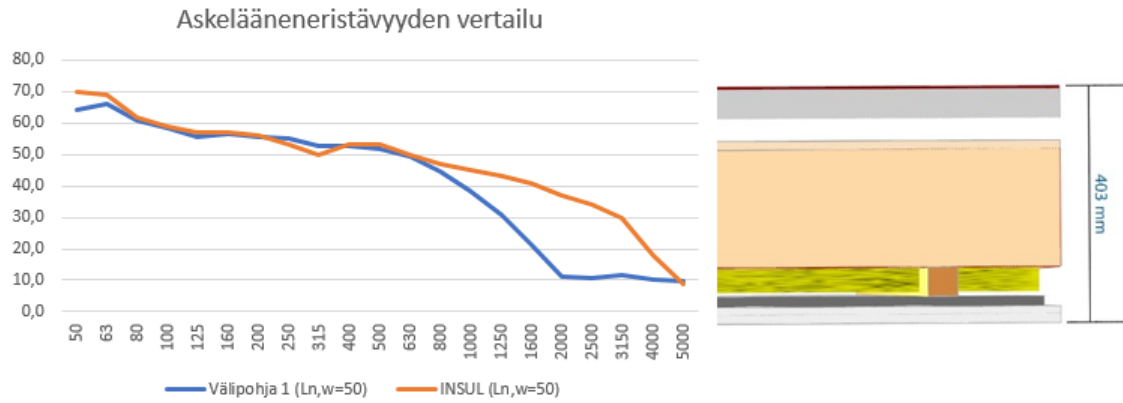
8.1 Askelääneneristävyyssmittausten tulokset

Askelääneneristävyyksien tulokset laskettiin normalisoidun askeläänitasoluvun $L'_{n,w}$ ja standartoidun askeläänitasoluvun $L'_{nT,w}$ perusteella. Mittaustuloksiin vaikuttavat käytävien ovien tiiveys, läpiviennit ja keskeneräiset rakenteet. Kuvioista 1 huomataan, että mittaluvun $L'_{nT,w}+C_{1,50-2500}$ tulokset ovat huonommat kuin $L'_{n,w}$. Askeläänitasoluvun $L'_{nT,w}+C_{1,50-2500}$ mittaluku ottaa huomioon spektripainotusterman $C_{1,50-2500}$, joka laajentaa taajuusaluetta matalammille taajuuksille. (Kylliäinen 2019).



Kuvio 1. Välipohjien $L'_{n,w}$ ja $L'_{nT,w}+C_{I,50-2500}$ tulosten vertailu 2. mittauskerralla, numeroinnit tarkoittavat välipohjien numeroiteja.

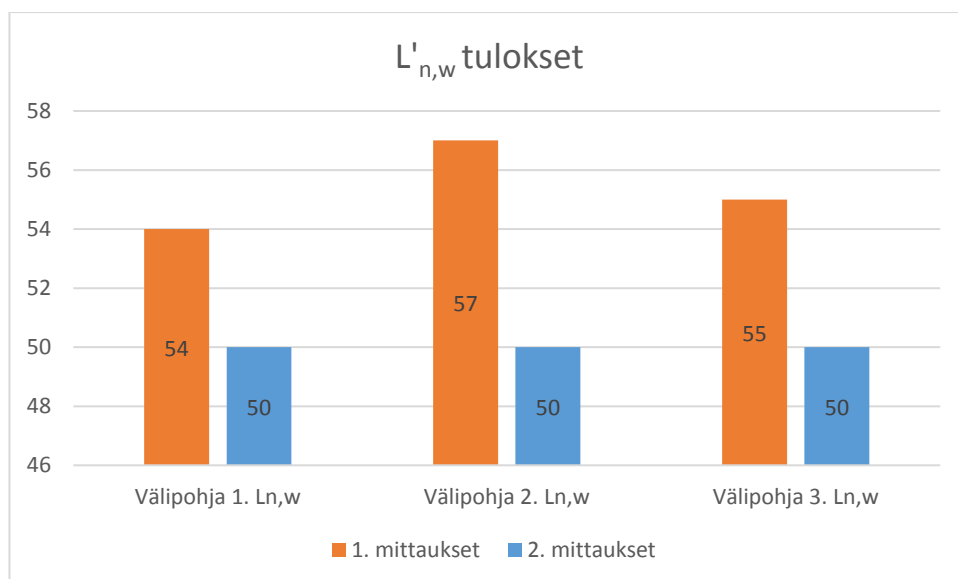
Saimme käyttöön INSUL-nimisen ohjelman, jolla voitiin simuloida rakenteen askelääneneristävyyttä. Ohjelmassa pystyttiin tekemään samantapainen välipohjarakenne kuin kohteessa, jolloin saatiin jonkinlainen vertailtava rakenne. Ohjelmassa syötettiin välipohjan materiaalit, paksuudet, äänilähde ja mahdolliset sivutiesiirtymät. Kaikkia materiaaleja ei ohjelmasta kuitenkaan löytynyt ja jouduimme korvaamaan betonin päälle tulevan askeleristeen ja vinyylilankun sekä betonin alle tulevan 30 mm:n askeläänieristeen samankaltaisiin materiaaleihin. Vaikka kohteessa oli vielä keskeneräisiä pintoja, mahdollisia läpivientejä ja muutenkin vielä keskeneräisiä rakenteita INSUL-ohjelmasta saadut tulokset ovat samankaltaiset kuin kohteesta mitatut, kuten kuvan 23 käyrästäkin voi päätellä. Koska lattiapinnoite ei ollut sama kuin kohteessa on tuloksissakin eriävyyksiä korkeilla taajuuksilla, joissa INSUL-ohjelman eri lattiapinnoitteiden välillä oli suuria eroavaisuuksia. CLT:n alapuolinen rakennekerros vaikutti INSUL-ohjelman mukaan kaikilla taajuusalueilla tasaisesti parantaen ääneneristävyyttä.



Kuva 23. Välipohja 1 ja INSUL-käyrän vertailu, $L'_{n,w}$

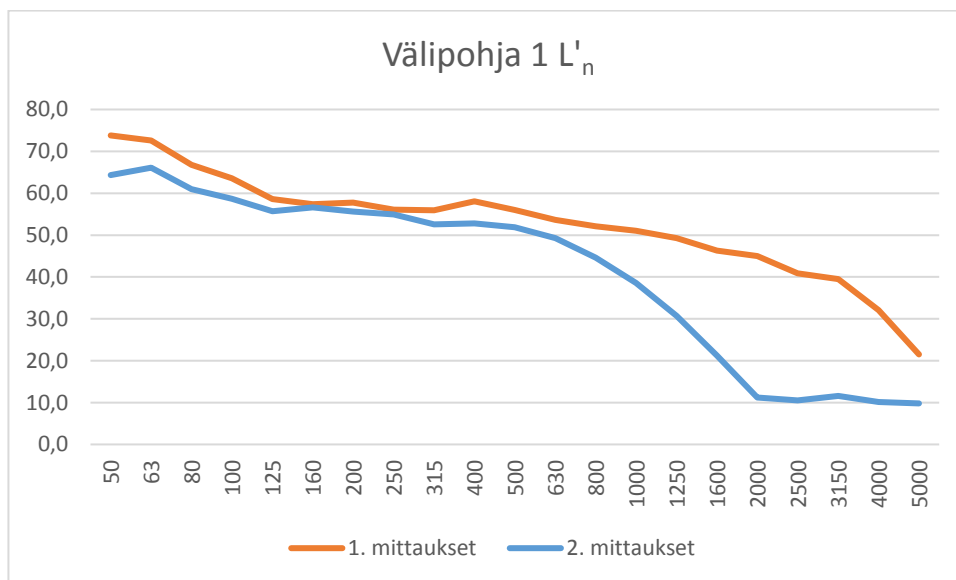
8.2 Askeläänitasoluvun $L'_{n,w}$ tulokset

Ensimmäisellä mittauskerralla välipohjista puuttui vielä betonikerroksen päälle tuleva vinyylilankku sekä CLT:n alapuoliset rakenteet (koolaus, jousiranka ja kipsilevyt). Välipohjan pinnoite ja CLT:n alapuolinen kerros vaikuttivat huomattavasti korkeampien taajuuksien eristävyyteen. Toisella mittauskerralla kaikista mitatuista huoneistoista saatiin askeläänitasoluvuiksi 50 dB, joka täyttää Suomen Rakentamismääräyskokoelman osassa C1 1998 mainitut vaatimukset, jossa askeläänitasoluvuksi on annettu $L'_{n,w} \leq 53$ dB asuinhuoneistoissa.



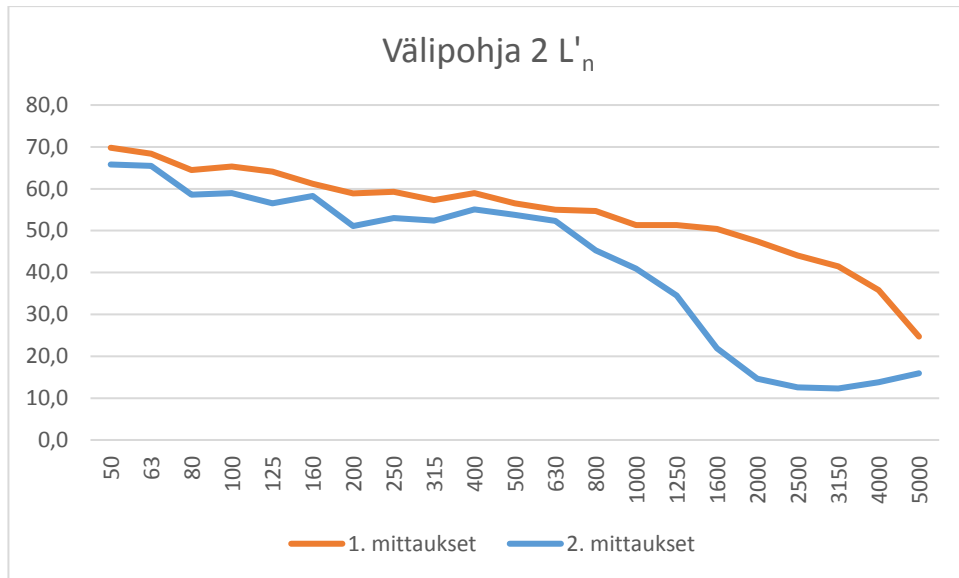
Kuvio 2. $L'_{n,w}$ 1. ja 2. mittausten ero.

Välipohjassa 1 ensimmäisen ja toisen normalisoidun askeläänitasoluvun $L'_{n,w}$ mittausten ero on 4 dB. Käyristä (kuvio 3) näkee, että lattiapinnoite ja CLT:n alapuoliset rakenteet ovat parantaneet ääneneristävyyttä. Matalilla taajuuksilla eristävyyden parannus johtunee CLT:n alapuolisesta kerroksesta ja korkeilla taajuuksilla lattiapinnoitteesta.

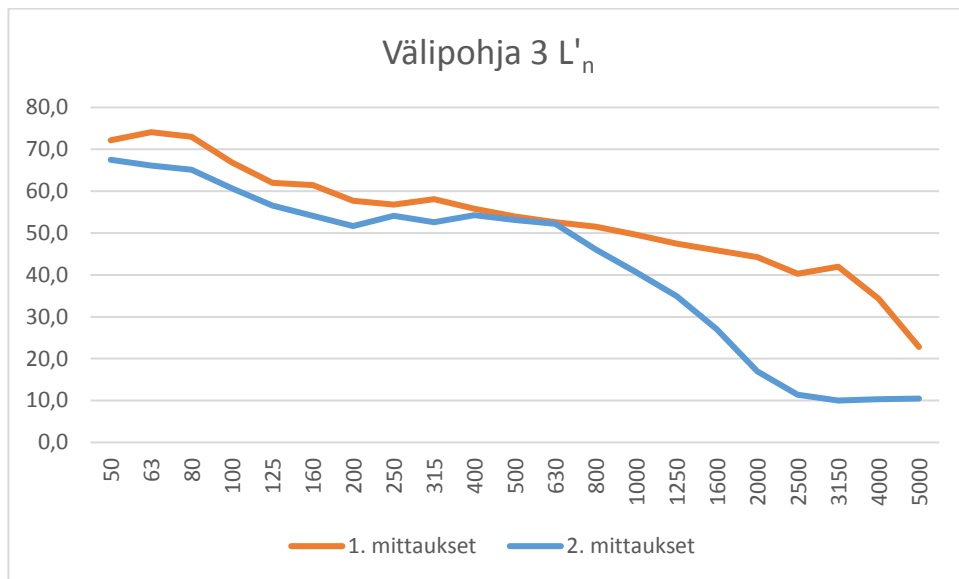


Kuvio 3. Välipohjan 1 L'_n vertailu 1. ja 2. mittauksissa.

Välipohjien 2 ja 3 toisella mittaukskerralla huomasimme lähetyshuoneiden seinärakenteissa aukot, jotka oli tehty molemmissa huoneistoissa jännetangon kohdalle (kuva 5). Aukot vaikuttavat negatiivisesti mittaustulosten luotettavuuteen, vaikkakin askeläänitasoluku oli sama kuin välipohjassa 1. Kuvioissa 4 ja 5 toisen kerran mittauksien tuloksissa näkyvät epätasaisuudet voivat johtua osittain seinissä olleesta reiästä.



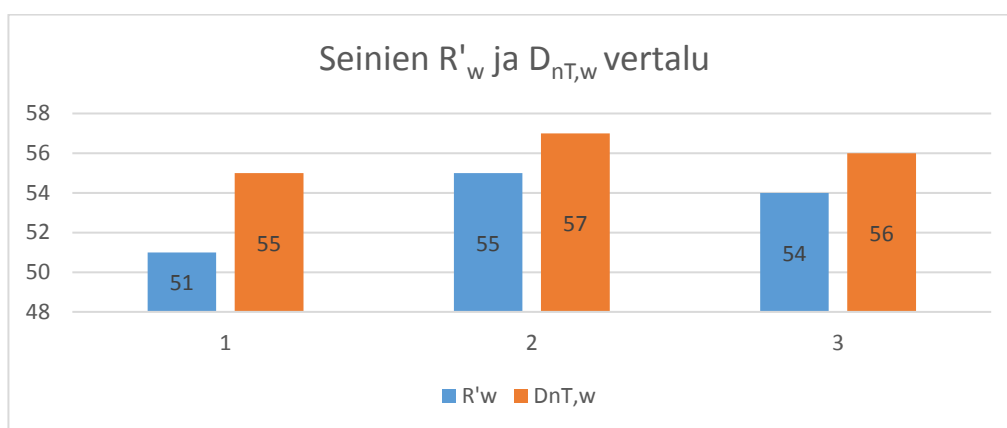
Kuvio 4. Välipohjan 2 L'_n vertailu 1. ja 2. mittauksissa.



Kuvio 5. Välipohjan 3 L'_n vertailu 1. ja 2. mittauksissa.

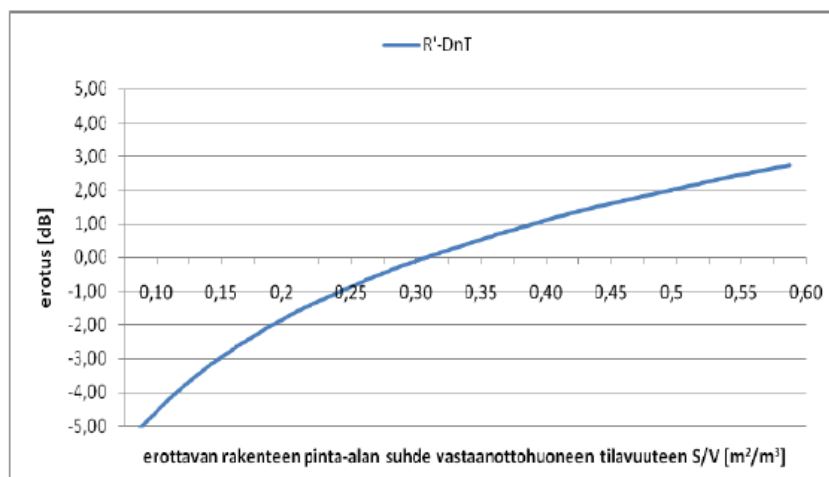
8.3 Ilmaääneneristävyysmittausten tulokset

Ilmaääneneristävyksien tulokset laskettiin ilmaääneneristysluvun R'_w ja standardisoidun äänitasoeroluvun $D_{nT,w}$ perusteella. Työssä on vertailtu molempien mittalukujen tuloksia keskenään, alla kuviossa 6 näkyvät mittalukujen erot. Työn tuloksista huomattiin, että käytettäessä standardisoitua äänitasoerolukua saadaan hieman paremmat ilmaääneneristävyys tulokset.



Kuvio 6. Kantavien väliseinien R'_w ja $D_{nT,w}$ tulosten vertailu toisella mittauskerrolla, numeroinnit tarkoittavat seinien numeroiteja.

Liitteen 4 kuvaajista huomataan, että ilmaääneneristävyys R' ja standardisoidun äänitasoeron D_{nT} käyrät ovat hyvin samantapaiset. Ilmaääneneristävyys ja standardisoidun äänitasoeron erotus voidaan laskea kuvan 24 kuvaajaa käyttäen, kun tiedetään erottavan rakenteen pinta-ala ja vastaanottohuoneen tilavuus (Helimäki & Huhtala 2009, 11-12). Kohteelta mitattujen ilmaääneneristävyksien ja standardisoitujen äänitasoerojen erot olivat taajuuksittain: seinä 1 (-3,4...-3,5 dB), seinä 2 (-1,6...-1,7 dB) ja seinä 3 (-1,7...-1,8 dB).



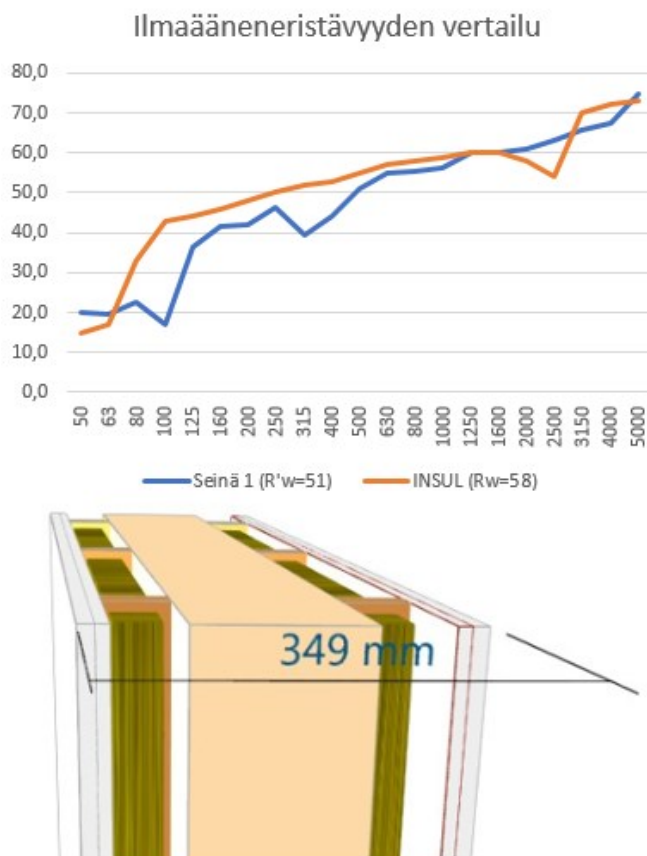
Kuva 24. R' ja D_{nT} erotus sekä huoneistoja erottavan seinän pinta-alan ja vastaanottohuoneiston tilavuuden suhde (Helimäki & Huhtala 2009, 12).

Koska kohteen kantavat väliseinät ovat kolminkertaisia seiniä, sillä siinä on 3 värähtelysteemiä, ei kolminkertaisista seinistä löytynyt internetistä tai kirjoista paljoa tietoa. Yleensä käytettyyn kaksoisrunkoseinään löytyi paljon kaavoja ja tietoja niiden ääneneristävyyden laskentaan. Kaksinkertaiseen seinään ei suositella laittamaan kolmatta levyä rakenteiden ilmatilan väliin, sillä siitä tulee silloin kolminkertainen seinä ja se on ääneneristävyydeltään huonompi kuin vastaava kaksikerroksinen seinä (Lahtela 2004, 24). Kohteen tapauksessa kolmas levy on tässä tapauksessa LVL, joten sitä ei voi suoranaisesti ajatella edellä mainitulla tavalla, sillä se on massiivinen ja ei värähtele kuten kipsilevy.

Etsimme internetistä vastaavaa rakennetta, jotta voitaisiin vertailla ilmaääneneristävyyden tuloksia aikaisempiin tutkimuksiin, mutta aivan samanlaista rakennetta emme löytäneet. Kohteen väliseinän puurunko on kiinnitetty suoraan LVL-elementtiin ilman ilmarakoa, jolloin rakenteen ääneneristävyys voi heikentyä. Vastaavanlaisessa rakenteessa (liite 3) on käytetty peltirankaprofiilia puurungon sijasta sekä rungon ja massiivipuun väliin on jätetty ilmarako. Myöskään vertailurakenteen materiaalien paksuudet eivät täsmää kohteen kantavien väliseinärakenteiden paksuuksia, mutta suuntaa antavaa vertailua voidaan tehdä. Vertailtu rakenne on CLT:tä, kun kohteessa on käytetty LVL:ää, mutta voisi kuvitella, että tulokset olisivat samantapaiset molemmilla massiivipuisilla rakenteilla. Vertailtavan rakenteen ilmaääneneristävyyksiluvuksi R_w on saatu 68 dB. Mittaluku R_w viittaa siihen, että kyseessä on ollut laboratoriomittaus, jolloin voidaan olettaa, että

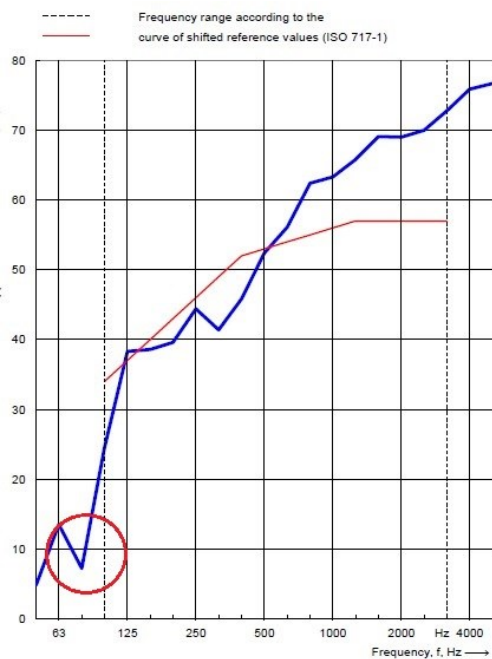
suurempia sivutiesiirtymiä ei rakenteeseen ole kohdistunut (Binderholz & British Gypsum 2010). Kohteen väliseinärakenne olisi voinut olla toteutettu niin, että puurankojen ja LVL-elementin välille olisi jätetty ilmaväli, jolloin kaikki rakenteet eivät olisi olleet toisissaan kiinni, jolloin ilmaääneneristävyys voisi olla parempi.

Vastaavanlainen rakenne saatiinkin tehtyä INSUL-ohjelmalla. INSUL-ohjelma mahdollisti kolminkertaisen seinän tekemisen, mutta kaikkia materiaaleja, kuten LVL:ää ei sieltä löytynyt, joten käytimme CLT-rakennetta. Ohjelman tuloksia voidaan verrata osittain, sillä kohde ei ollut mittaushetkillä vielä valmis. INSUL antoi R_w tulokseksi 58 dB, joka voi olla lähellä todellista valmiin kohteen ilmaääneneristävyyttä. INSUL-ohjelman mittaluku R_w viittaa laboratoriomittaukseen, mutta ohjelmassa syötetään sivutiesiirtymät, rakenteen mitat ja huoneiston tilavuus, niin voidaan olettaa, että saatu tulos voisi olla kenttämittausmainen. INSUL-ohjelman käyrän lasku 2500 Hz:ssä (kuva 25) johtuu luultavasti ohjelman omasta sivutiesiirtymän simuloinnista tai koincidenssistä.

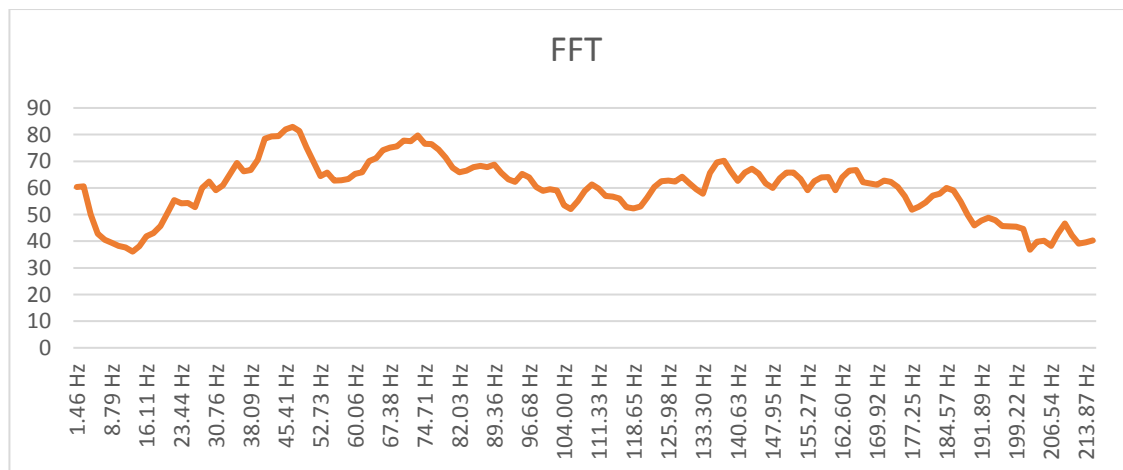


Kuva 25. Seinän 1 R' sekä R'_w ja INSUL-ohjelman seinän R sekä R_w tulosten vertailu.

Kohteen mittaustuloksista huomattiin, että noin 80 - 100 Hz:n kohdilla lähes jokaisessa ilmastoineristävyyden mittaustuloksen käyrässä on kuoppa (kuva 26). Käyrän lasku voi johtua esimerkiksi resonanssista. Kohteella suoritettujen toisten mittausten ohella tallensimme kaksi noin 5 sekuntia kestävää FFT-äänitettä. Äänitteistä koitimme selvittää seinärakenteen resonanssitaajuuden lyömällä seinään toiselta puolelta ja toiselta puolelta otettiin äänite. Äänitteen taajuuksista ja dB-arvoista tehtiin Excel-kuvaaja (kuvio 7), jossa suurimmat käyrän nousut olivat matalilla taajuuksilla 45 Hz:n ja 75 Hz:n kohdilla, mutta juuri 80 tai 100 Hz:n kohdalla suurinta nousua ei ollut.



Kuva 26. 80 Hz:n kohdilla kuvaajassa kuoppa.

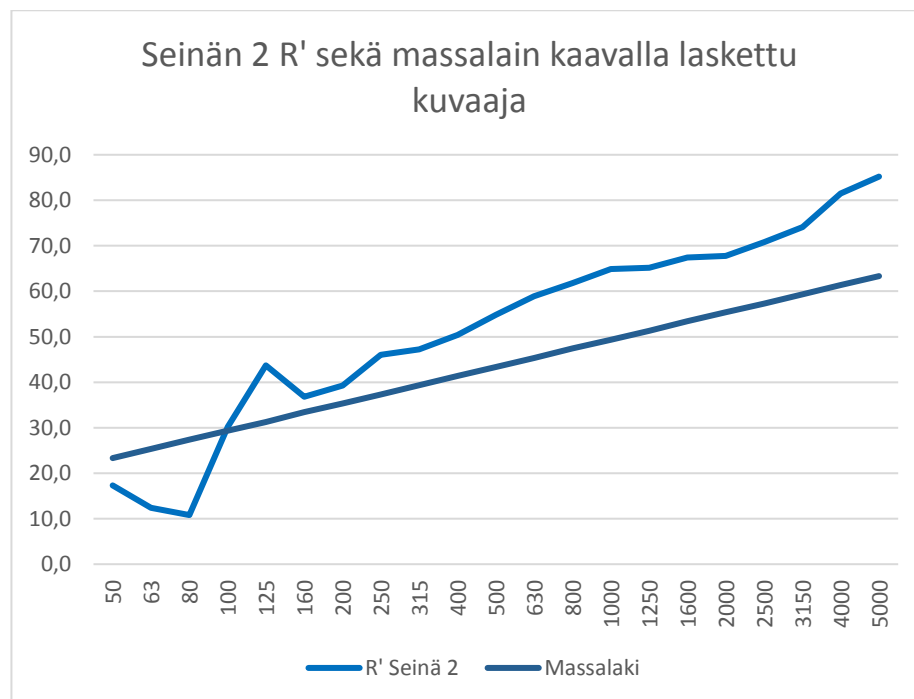


Kuvio 7. FFT-äänitteen tuloksista tehty Excel-käyrä.

Sillä kohteen seinä on kolmikerrosrakente, piti seinää ajatella tavallaan kaksikerrosrakenteena, eli massa-jousi-massa-rakenteena. Laskennassa otettiin huomioon kipsilevyt, ilmaväli sekä värähtelemätön rakenne eli LVL. Seinän ominaistajuus oli kaavalla 4 laskettuna noin 58 Hz. Eli tällä tavalla saimme vain seinän sisäkuoren toisen puolen laskettua. FFT-kuvaajaan (kuvio 7) verrattuna 58 Hz ei satu juuri kuvaajan huippuun, joten voidaan olettaa, että lasku ei johdu resonanssista.

LVL-X elementin, jonka paksuus on 162 mm koinsidenssin rajataajuus on laskettuna kaavalla 5 noin 83 Hz ja kuvasta 10 katsottuna noin 80 Hz, joka jää 100–3150 Hz alapuolelle. Koinssidenssiä voi ilmetä 83 Hz:stä ylöspäin usealla eri taajuudella. Laskennassa on käytetty Stora Enson antamaa tiheyttä 510 kg/m^3 ja kimmokerrointa 10500 N/mm^2 (Stora Enso 2018, 7).

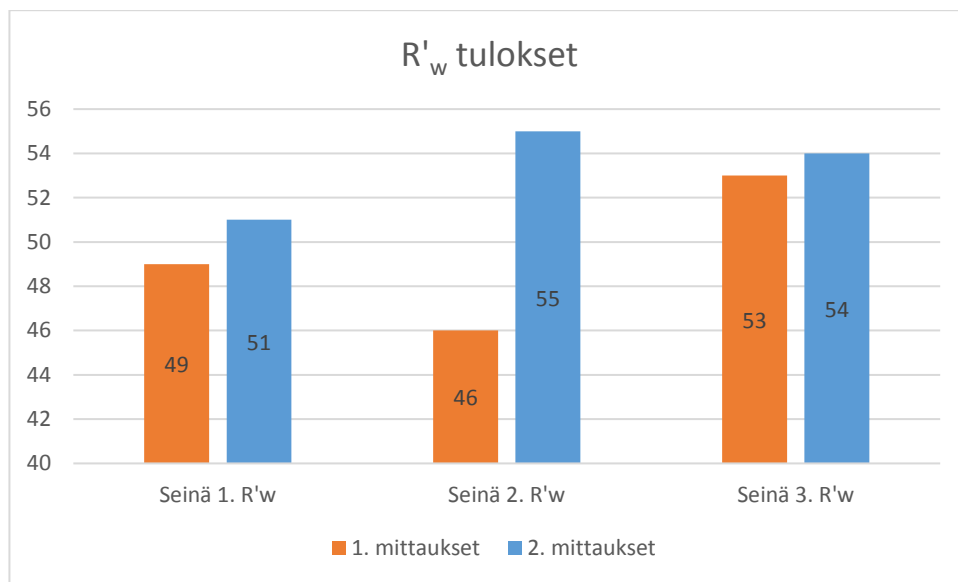
Massalain mukaista kaavaa 3 käyttäen 500 Hz:n kohdilta saatiin tulokseksi noin 43 dB. Tämä luku kuvaa arviota siitä, millainen ilmaääneneristävyys voisi olla massalakiin perustuen. Tässä otetaan huomioon vain LVL-rakenne, eikä muita rakenteita, jolloin todellinen ilmaääneneristävyys on tätä parempi, kuten kuviosta 8 voidaan huomata.



Kuvio 8. Seinän 2 R' ja massalakiin perustuvan kaavan vertailu.

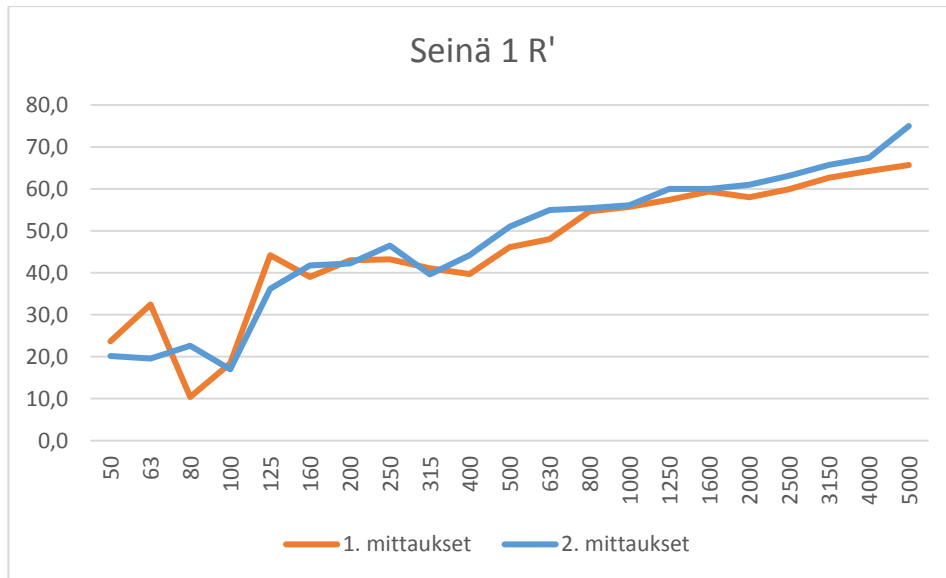
8.4 Ilmaääneneristävyyden R'_w tulokset

Ensimmäisten ja toisten mittausten välillä rakenteissa oli eroavaisuuksia. Ensimmäisellä mittauskerralla huoneistojen seiniä ei oltu vielä tiivistetty, toisella kerralla kaikki pinnat olivat lähes valmiita, tästä johtuen tuloksissa on eroavaisuuksia. Kuten seinien ilmaääneneristyslukuista R'_w (kuvio 9) huomataan, kaikki tulokset eivät täytä Rakentamismääräyskokoelman osan C1 1998 ääneneristävyyksvaatimuksia, jotka ovat $R'_w \geq 55$ dB.



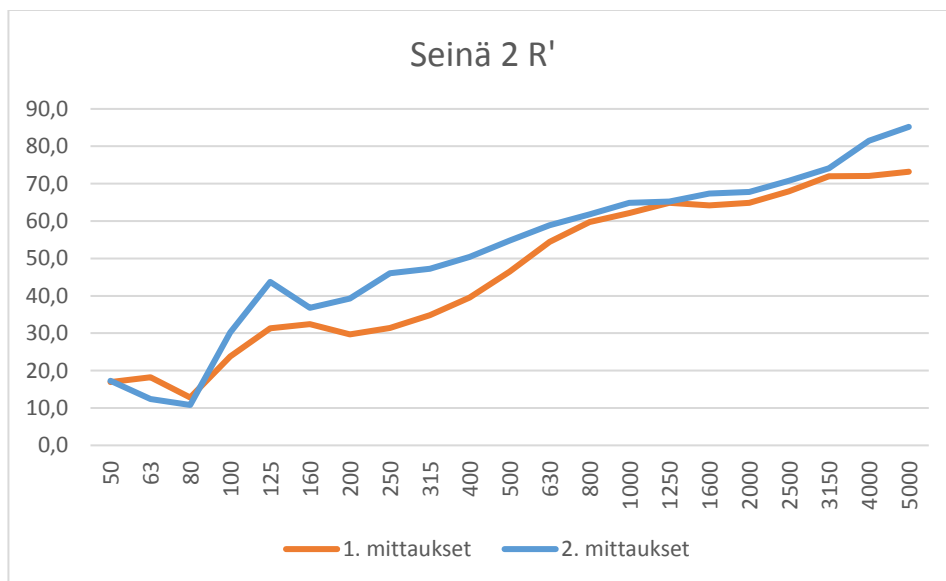
Kuvio 9. Seinien ilmaääneneristysluku R'_w tulokset molemmissa mittauksissa.

Seinässä 1 mitattu ilmaääneneristysluku R'_w toisella mittauskerralla on 51 dB ja ensimmäisellä mittauskerralla 49 dB, mutta kuten kuvasta 20 huomataan, huoneistojen oviaukot ovat lähempänä toisiaan kuin muiden tutkittavien huoneistojen oviaukot. Oviaukkojen sijaintikin on voinut vaikuttaa huonompaan tulokseen kuin muissa seinissä, jos oven tukkimisessa on jäänyt jonkinlainen pieni aukko. Seinässä 1 on myös keittiökalusteet vastakkain huoneistojen välillä, ja keittiössä olevista läpivienneistä ääni on myös voinut kantautua. Mittausten 1 ja 2 välillä ei ole suurta eroa käyrässä, mutta ensimmäisissä mittauksissa käyrä tippuu 80 Hz:n kohdalla huomattavasti verrattuna toisen mittauksen käyrään (kuvio 10).

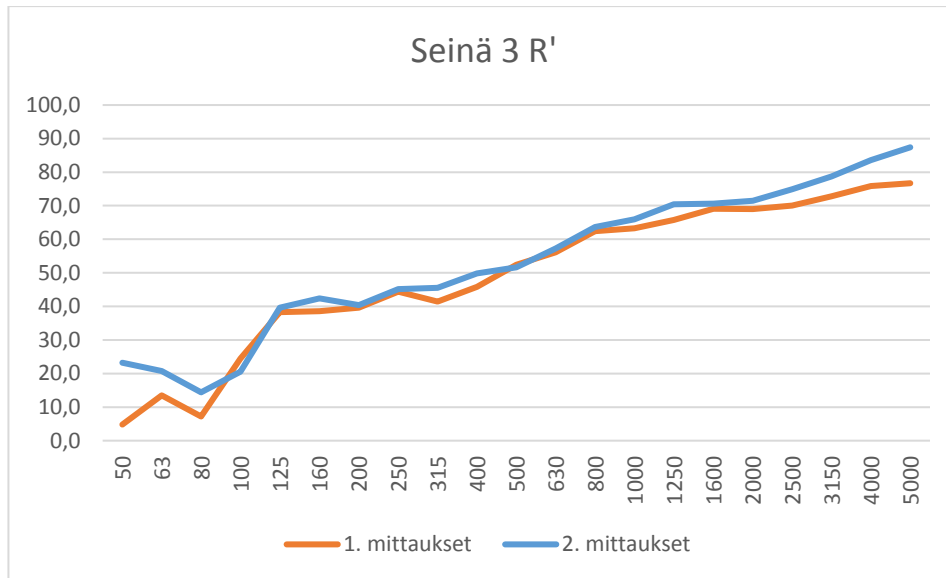


Kuvio 10. Seinän 1 R' tulokset molemmilla mittauskerroilla.

Seinässä 2 (kuvio 9) ensimmäisten ja toisten mittauksen ero on 9 dB ilmaääneneristysluvussa R'_w . Ensimmäisen mittauskerran käyrän tulokset (kuvio 11) taajuuksilla 100-1000 Hz ovat jonkin verran huonommat kuin toisen mittauskerran tulokset. Rakenteiden saumojen tiivistys on voinut vaikuttaa mittaustuloksiin myöhemmässä mittauksessa, sillä rakenteiden tiiveys on tärkeää, jotta voidaan saavuttaa hyvä ilmaääneneristävyys. Seinän 3 tulokset (kuvio 12) ovat hyvin samanäköiset, 1. mittauskerralla käyrä laskee enemmän 80 Hz:n kohdalla.



Kuvio 11. Seinän 2 R' tulokset molemmilla mittauskerroilla.



Kuvio 12. Seinän 3 R' tulokset molemmilla mittauskerroilla.

Tuloksista huomataan, että matalimmat taajuudet ovat puurakenteiselle seinälle ongelmallisimpia. Korkeammille taajuuksille mentäessä ilmasteneristävyyden paranee, noin 400 – 500 Hz:n kohdilla saavutetaan jo 50 dB ja käyrä nousee eli paranee jatkuvasti korkeammalle mentäessä. Suurin osa äänistä asuinrakennuksissa ovat juuri korkeataajuisia ääniä, esimerkiksi puhe on 50 - 10000 Hz (Lahtela 2004, 15).

9 Pohdinta

Kohteella suoritetuista mittauksista saatiin tietoa jonkin verran rakennemateriaalien vaikutuksista ääneneristävyyteen. Opinnäytetyössä suoritettujen ääneneristävyydsmittaukset ovat rakennusvaiheessa mitattu, ja siksi niitä ei voi suoranaisesti verrata valmiin rakennuksen ääneneristävyytuloksiin.

Askelääneneristävyyden mittaustuloksista sekä INSULin simulaatioista huomasimme, että lattiapäällystemateriaalilla ja välipohjan CLT:n alapuolisilla rakenteilla saadaan huomattavasti parannettua askelääneneristävyyttä etenkin korkeilla taajuuksilla. Toisella mittauskerralla mitatuista tuloksista saadut normalisoidut askeläänentasoluvut $L'_{n,w}$ täyttävät Suomen Rakentamismääräyskokoelman osan C1 1998 vaatimukset. Jos mittauksissa olisi käytetty askeläänentasoluvun mittalukua $L'_{nT,w}+C_{I,50-2500}$ olisi tuloksiksi saatu 52, 53 ja 52 dB. Kun huomioidaan spektripainotusermi $C_{I,50-2500}$ ovat tulokset hieman huonommat (liite 1, sivut 7, 8 ja 9), mutta ne silti täyttävät nykyiset määräykset, joissa on vaadittu, että $L'_{nT,w}+C_{I,50-2500} \leq 53$ dB.

Ilmaääneneristävyyden toisen mittauskerran tulokset (liite 2, sivut 1, 2 ja 3) ovat jo lähellä vaadittua $R'_w \geq 55$ dB-tasoa, joten valmiissa rakennuksessa tähän tulokseen luultavasti päästään. Ilmaääneneristävyyttä olisi hyvä mitata myös muissa kerroksissa, sillä LVL-X:n rakennepaksaus ohenee ylemmissä kerroksissa, joten sekin voi vaikuttaa mittaustuloksiin. Valmiin kohteen mittauksissa keittiön kiintokalusteet ovat asennettu, joten ilmaääneneristyslukua R'_w käyttäessä tämä voi vaikuttaa tuloksiin. Tuloksia verratessa huomasimme myös, että ilmaääneneristävyydellä ja standardisoidulla äänitasoeroluvulla on paljon vaikutusta mittaustulokseen. Osa seinistä, jotka eivät olisi täyttäneet Suomen Rakentamismääräyskokoelman osan C1 1998 vaatimuksia ($R'_w \geq 55$ dB), täyttäisivät nykyiset vaatimukset uudella mittaluvulla ($D_{nT,w} \geq 55$ dB).

INSUL-ohjelmassa tehdyn vertailtavan seinärakenteen R_w on 58 dB ja Binderholzin tutkimuksessa 68 dB. Tästä voidaan huomata, että ilmavälillä on huomattava merkitys rakenteen ilmaääneneristävyyteen. INSULilla teimme myös kohteen

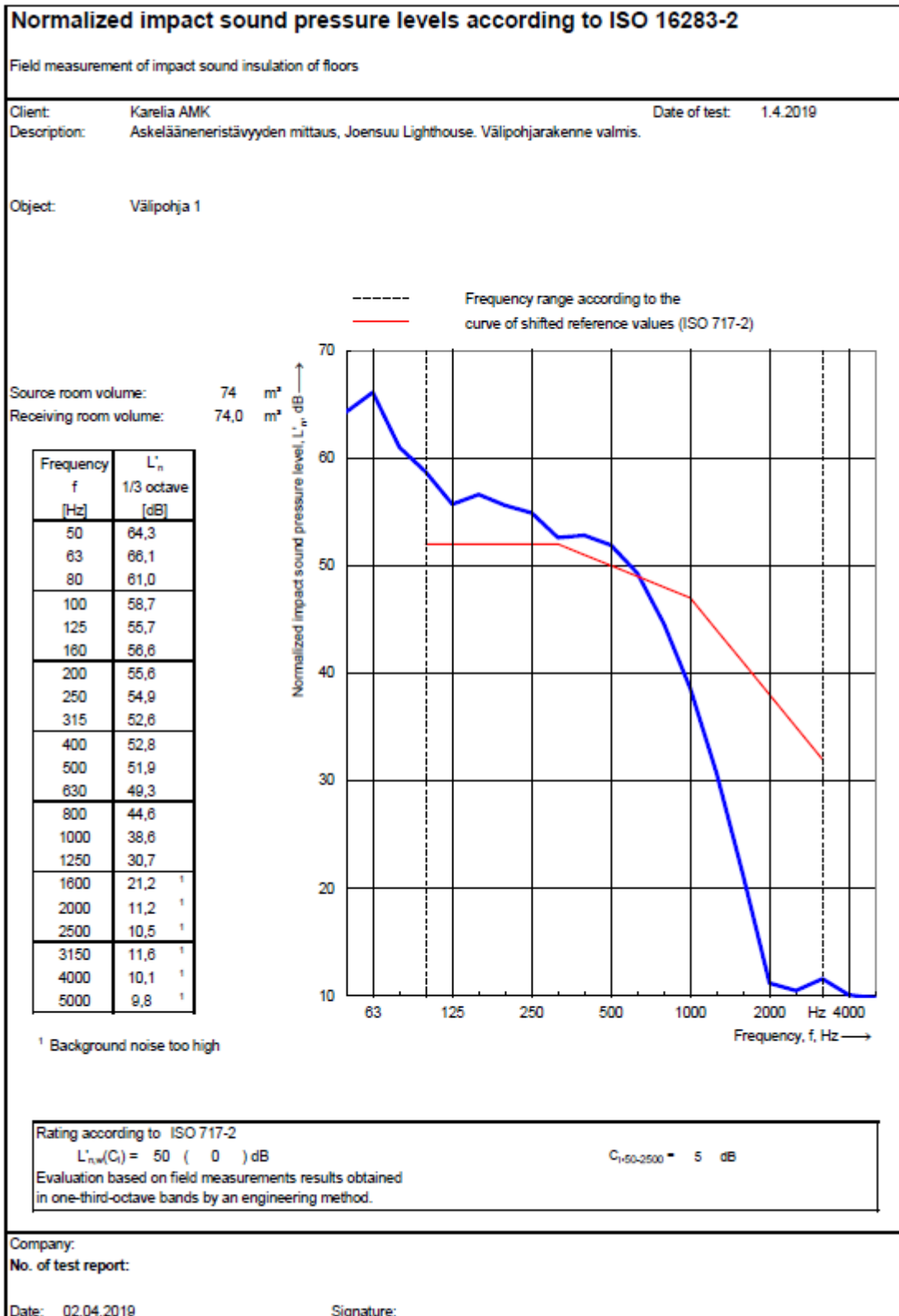
väliseinärakenteen lisäten siihen ilmavälin, jolloin ilmaääneneristyslukuksi saatiin lähes 80 dB. Jos kohteen kantavassa väliseinärakenteessa olisi ollut ilmaväli puurangan ja elementin välissä, olisi ilmaääneneristävyys voinut olla parempi, mutta se olisi taas vaikuttanut muihin rakenneratkaisuihin.

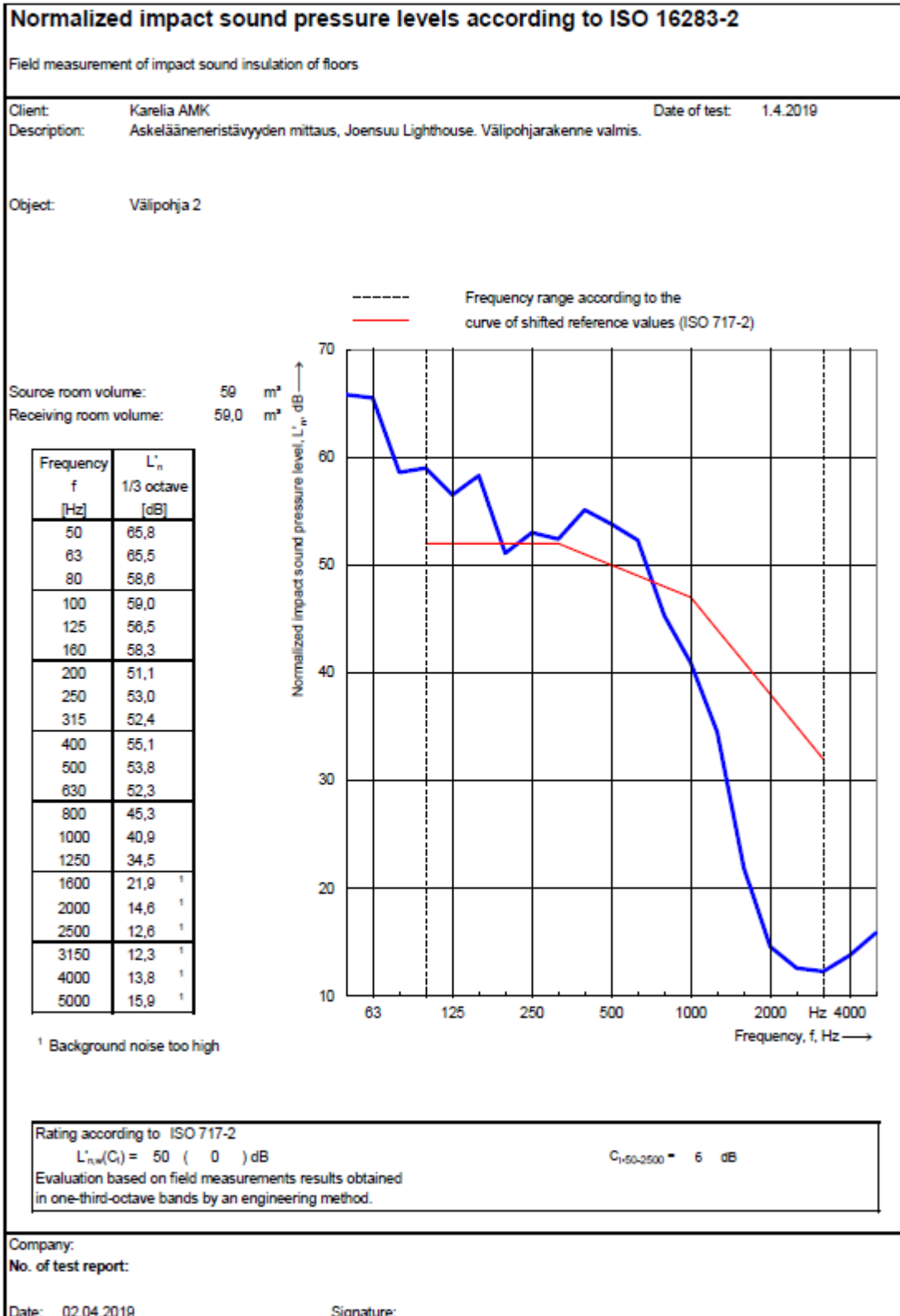
Kohteella olisi hyvä suorittaa yhden ilma- ja askelääneneristävyysmittaukset, jolloin kohde olisi valmiina ja kaikki läpiviennit, ovet, kynnykset sekä tiivistykset olisi tehty. Askelääneneristävyysmittauksiin voisi myös ottaa standardien mukaisen pallon vaihtoehtoiseksi äänilähteeksi korvaamaan askeläänikojeen. Pallolla voitaisiin saada erilaisia tuloksia, sillä pallo vastaa paremmin askelista johtuvaa ääntä, silloin kun ei käytetä kenkiä sisällä. Samankaltaisia kantavia väliseiniä, joissa kantavana rakenteena on massiivipuinen elementti, olisi hyvä tutkia lisää ja perehtyä paremmin siihen, kuinka ilmaväli vaikuttaisi todellisessa rakenteessa ilmaääneneristävyyteen.

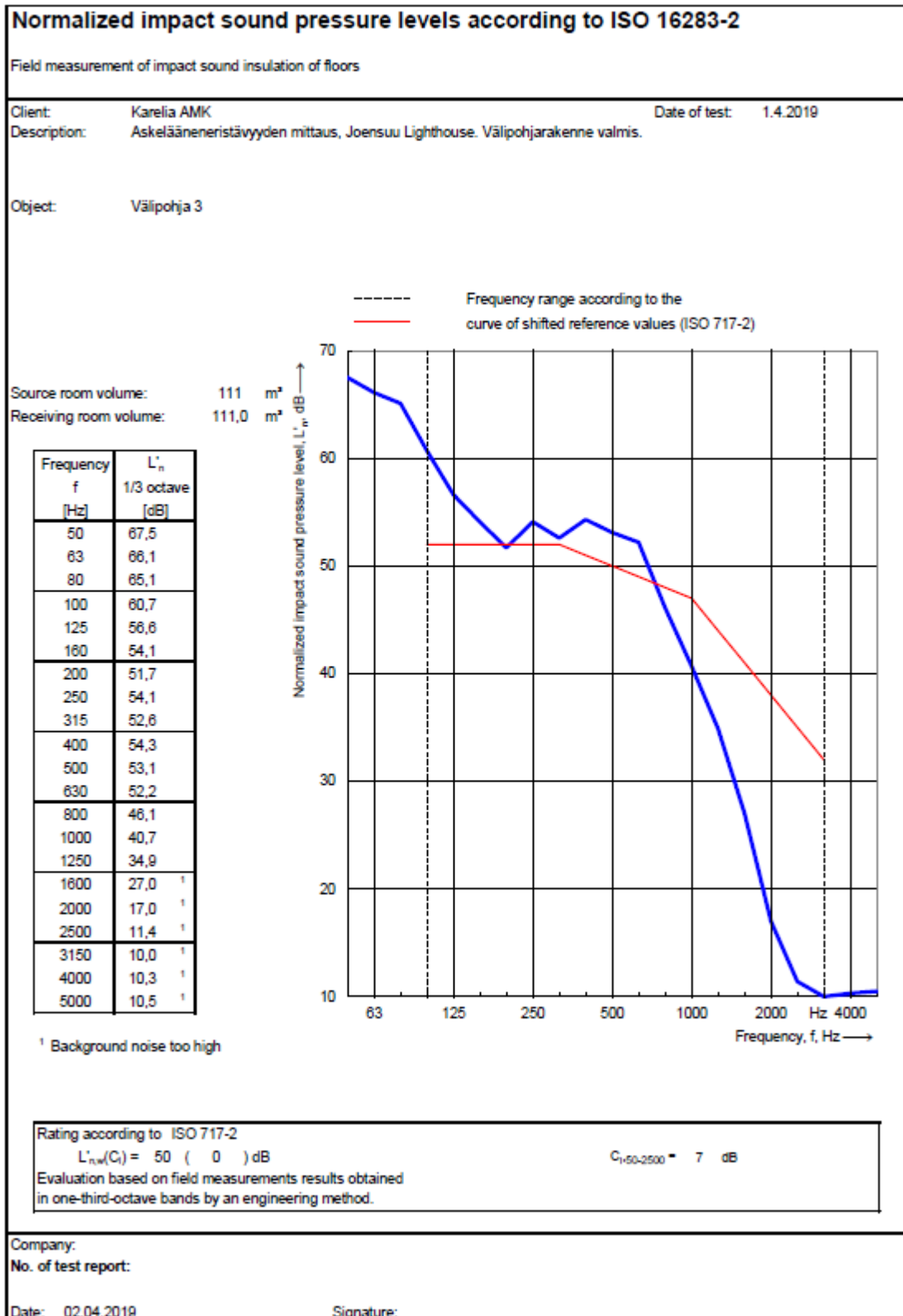
Lähteet

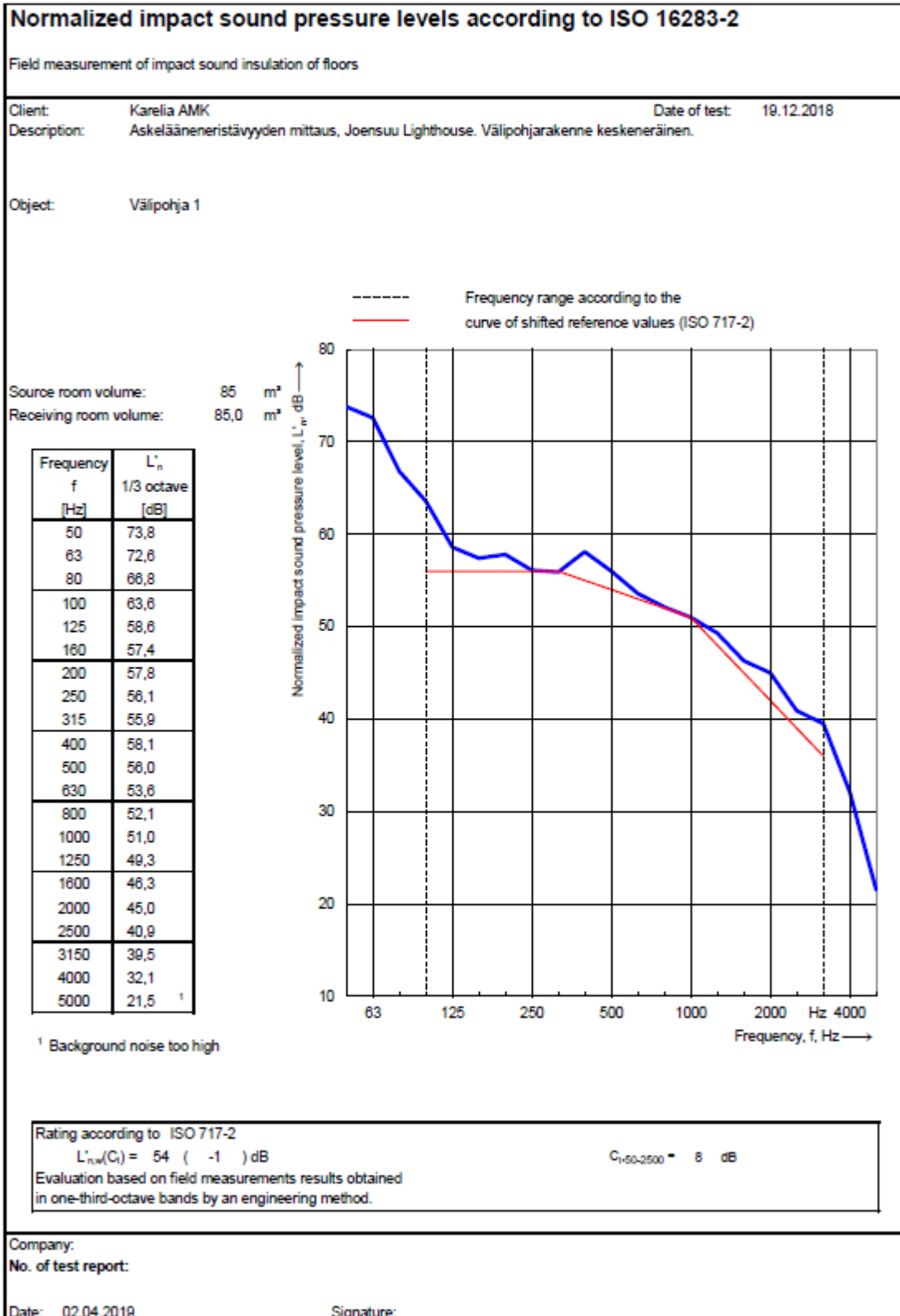
- A-insinöörit Suunnittelu Oy. 2017a. Elementtipiirustus. 16.4.2019.
- A-Insinöörit Suunnittelu Oy. 2017b. ent. Joensuun Juva Oy. Rakennetyypit. 5.2.2019.
- A-Insinöörit Suunnittelu Oy. 2017c. ent. Joensuun Juva Oy. Rakennejärjestelmäkuvaus. 5.2.2019.
- A-Insinöörit Suunnittelu Oy. 2018a. Puurakennedetaljit. 20.4.2019.
- A-Insinöörit Suunnittelu Oy. 2018b. Väliseinädetaljit. 8.2.2019.
- Arcadia Oy arkkitehtitoimisto. 2018. Referenssit/Lighthouse Joensuu. <http://www.arcadia.fi/referenssit/lighthouse>. 11.1.2019.
- Binderholz & British Gypsum. 2010. Tutkimus. http://www.rigips.at/lms/holzbau/handbuch_en/IW06b.pdf. 3.3.2019.
- CLT.info. 2013. Tuotanto. <https://www.clt.info/fi/tuote/clt-massiivipuurakentaminen/tuotanto/>. 21.2.2019.
- fwr. 2019. Puun ominaisuudet rakennusmateriaalina. <http://fwr.fi/puun-ominaisuudet-rakennusmateriaalina/>. 15.1.2019.
- Heilä, S. 2018. Joensuuhun Suomen korkein puukerrostalo. RIA-lehti, 1/2018. RIA ry. <https://www.lukusali.fi/index.html?p=Rakennusinsin%C3%B6rit%20ja%20arkkitehdit%20RIA%20ry&i=61bfe684-186c-11e8-a8f5-00155d64030a>. 1.4.2019.
- Helimäki, H. & Huhtala, T. 2009. Asuinrakennusten äänitekniiikan täydentävä suunnitteluohje. Rakennusteollisuus. http://www.elementtisuunnittelu.fi/Download/21797/Suunnitteluohje_final_osa1.pdf. 1.2.2019.
- Karelia-ammattikorkeakoulu. 2018. Joensuu Light house - tutkimus- ja kehitystoimenpiteet. <https://www.karelia.fi/puurakentaminen/tutkimus/joensuu-light-house-tutkimus-ja-kehitystoimenpiteet/>. 1.2.2019.
- Kylliäinen, M. 2006. Talonrakentamisen akustiikka. Tampereen teknillinen yliopisto. Tutkimusraportti 137. Tampere. 23.2.2019.
- Kylliäinen, M. A-insinöörit. 2019. Blogi. Askelääneneristävyyden arvioimiseksi mitattava taajuusalue laajenee. <https://www.ains.fi/blogit/askelaaneristävyyden-arvioimiseksi-mitattava-taajuusalue-laajenee/>. 2.2.2019.
- Kylliäinen, M., Takala, J. & Hongisto, V. 2015. Ilmaääneneristysluku sekä standardisoitu ja normalisoitu äänitasoeroluku huoneistojen välisen ilmaääneneristävyyden kuvaajina. Tutkimus. http://www.akustinen-seura.fi/wp-content/uploads/2015/09/AP2015_Paperin_palautus_10.pdf. 6.3.2019.
- Lahtela, T. 2004. Ääneneristys puutalossa. Puurakenteisen asuinrakennuksen ääneneristävyyden suunnitteluohje. <https://www.puuinfo.fi/sites/default/files/content/rakentaminen/suunnitteluohjeet/aaneneristys-puutalossa/koko-ohje.pdf>. 18.1.2019.
- Puuinfo. 2014. Stora Enso CLT. Puu – maailman vanhin ja myös modernein rakennusmateriaali. <https://www.puuinfo.fi/sites/default/files/CLT%20image%20brochure%20FI.pdf>. 21.2.2019.
- Puuinfo. 2016. Stora Enso. Esittelyssä uusi LVL by Stora Enso. https://www.puuinfo.fi/sites/default/files/LVL%20General%20Fact%20Sheet_FI_05052016_light.pdf. 21.2.2019.

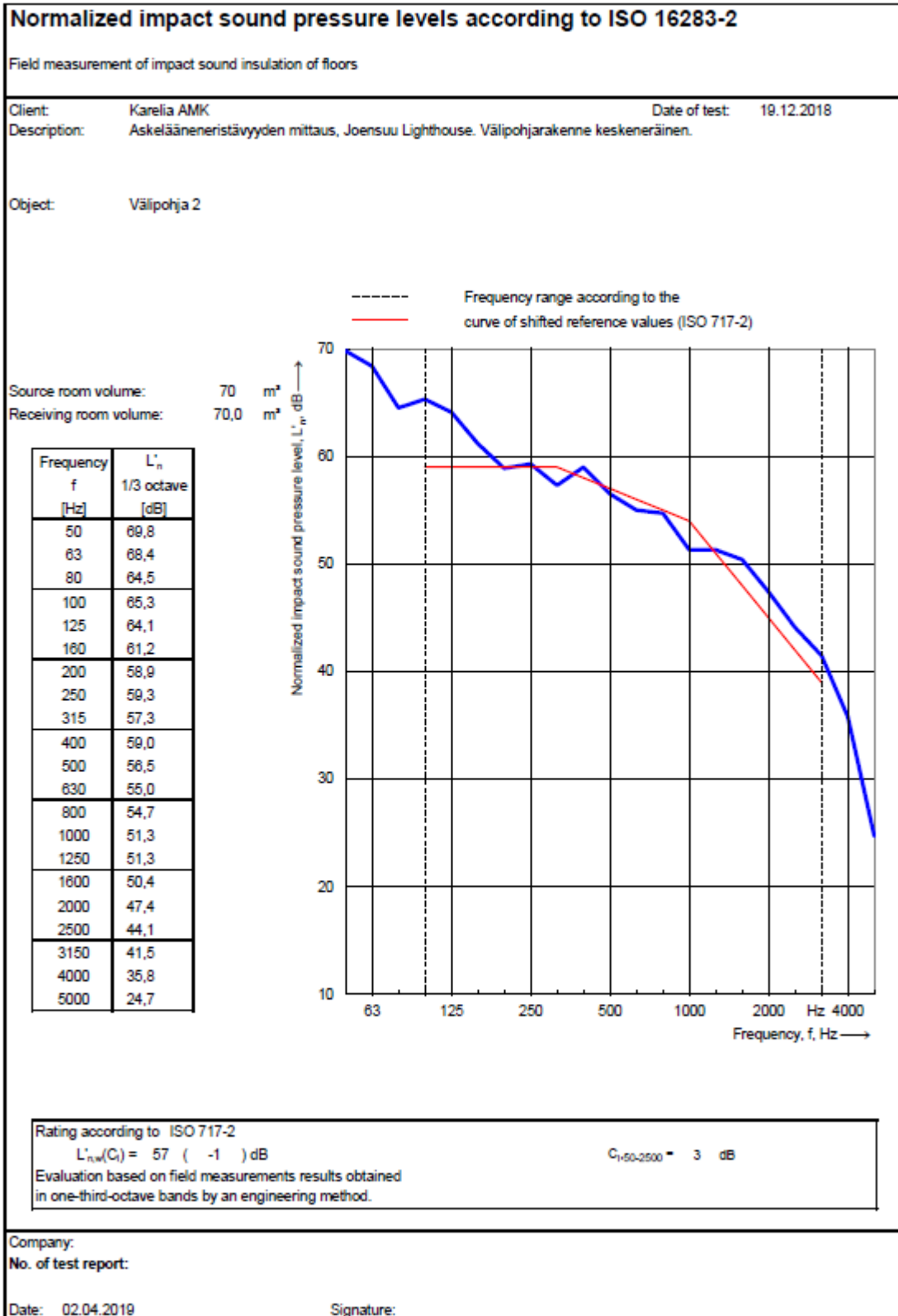
- Puuinfo. 2018. Tiedote. Lighthouse Joensuu hyödyntää puuta täysimääräisesti. <https://www.puuinfo.fi/tiedote/lighthouse-joensuu-hy%C3%B6dynt%C3%A4%C3%A4-puuta-t%C3%A4ysim%C3%A4%C3%A4r%C3%A4isesti>. 9.1.2019.
- Puuinfo. 2019a. Puukerrostalo. <https://www.puuinfo.fi/sites/default/files/content/info/puukerrostalot/puukerrostalo.pdf>. 30.1.2019.
- Puuinfo. 2019b. Puukerrostalon suunnittelu. <https://www.puuinfo.fi/puutieto/puukerrostalon-suunnittelu>. 4.2.2019.
- Puuinfo. 2019c. LVL by Stora Enso (Laminated veneer lumber). <https://www.puuinfo.fi/tuote/lvl-stora-enso-laminated-veneer-lumber>. 21.2.2019.
- RIL ry. 2007. 243-1-2007. Rakennusten akustinen suunnittelu. Akustiikan perusteet. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.
- SFS-EN ISO 16283-1. 2014. Acoustics. Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements. Part 2: Airborne sound insulation (ISO-16283-1:2014).
- SFS-EN ISO 16283-2. 2018. Acoustics. Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements. Part 2: Impact sound insulation (ISO 16283-2:2018).
- SFS-EN ISO 717-1. 2013. Acoustics. Rating of sound insulation in buildings and of building elements. Part 1: Airborne sound insulation (ISO 717-1:2013).
- SFS-EN ISO 717-2. 2013. Acoustics. Rating of sound insulation in buildings and of building elements. Part 2: Impact sound insulation (ISO-717-2:2013).
- Stora Enso. 2018. LVL by Stora Enso. Technical brochure. https://www.storaenso.com/-/media/Documents/Download-center/Documents/Product-brochures/Wood-products/LVL_by_Stora_Enso_Technical_brochure_032018_EN_light.aspx. 11.4.2019.
- Tolppanen, J., Karjalainen, M., Lahtela, T. & Viljakainen, M. 2013. Suomalainen puukerrostalo. Rakenteet, suunnittelu ja rakentaminen. Tampere: Opetushallitus.
- Ympäristöministeriö. 1998. C1. Suomen rakentamismääräyskokoelma. Ääneristys ja meluntorjunta rakennuksessa. Määräykset ja ohjeet 1998. <https://www.finlex.fi/data/normit/1917-c1.pdf>. 4.1.2019.
- Ympäristöministeriö. 2017. Ympäristöministeriön asetus rakennuksen ääniympäristöstä. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20170796>. 4.1.2019
- Ympäristöministeriö. 2018. Ääniympäristö. Ympäristöministeriön ohje rakennuksen ääniympäristöstä. <https://www.ym.fi/download/name/%7B2852D34E-DA43-4DCA-9CEE-47DBB9EFCB08%7D/138568>. 4.1.2019.

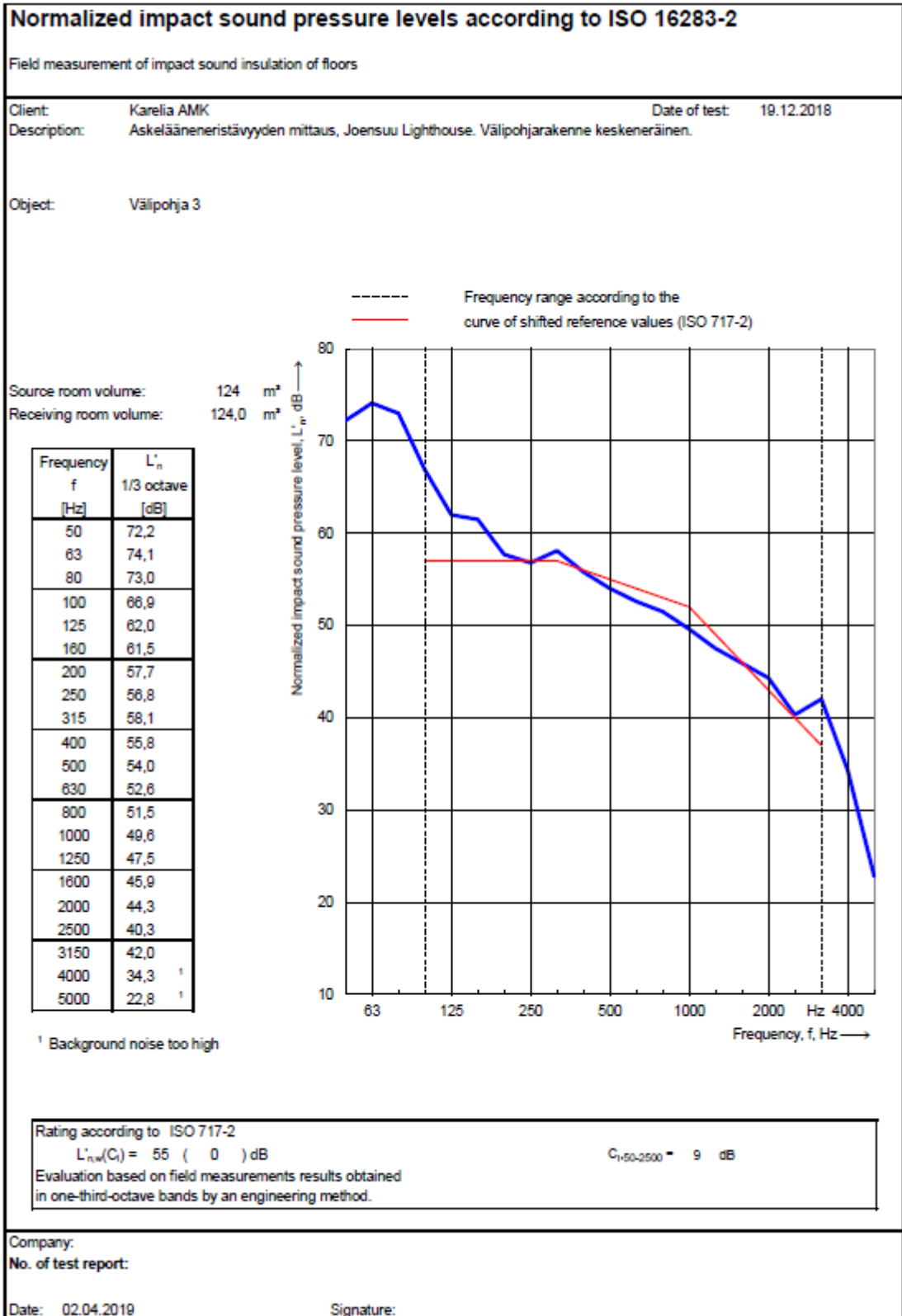


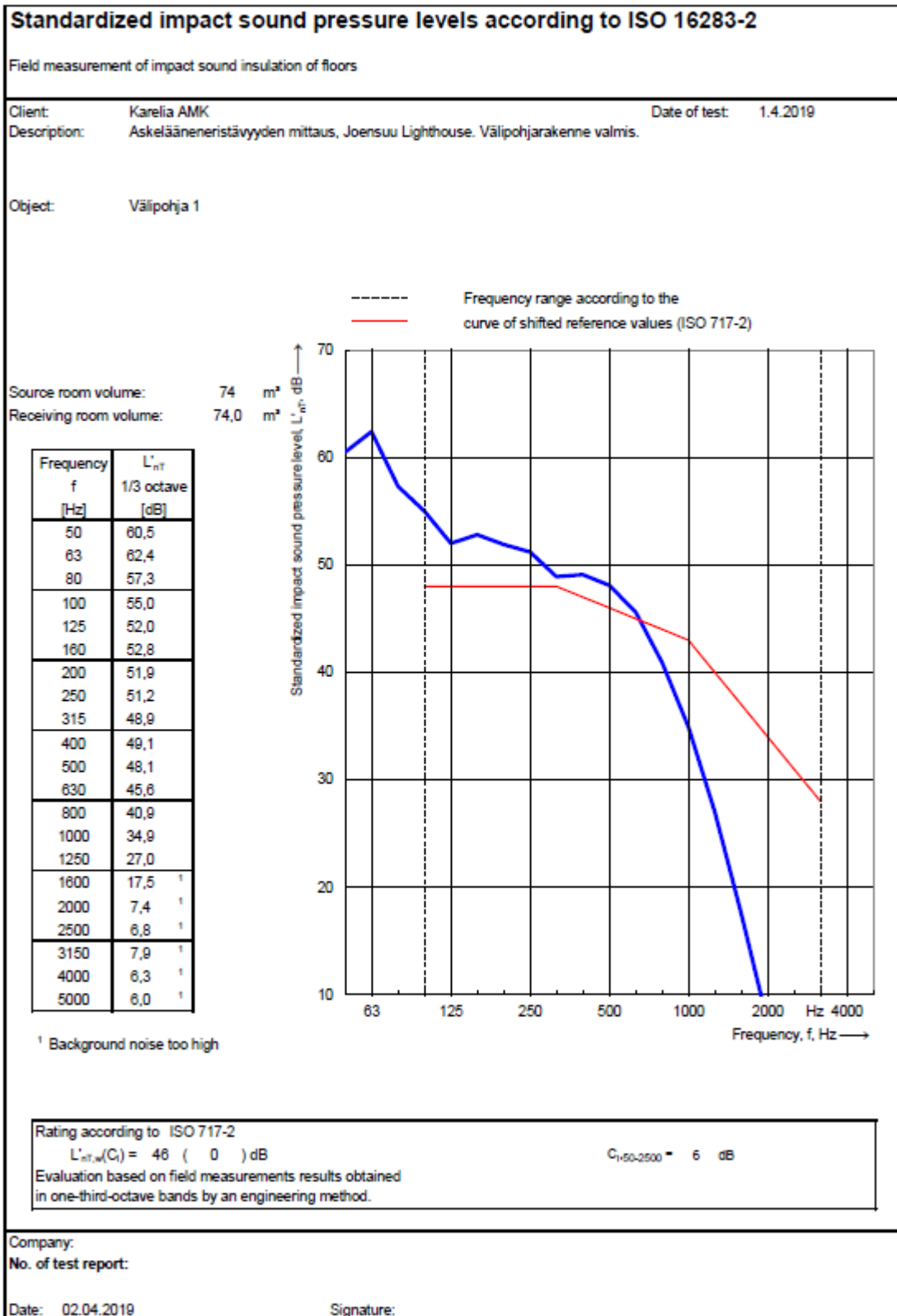


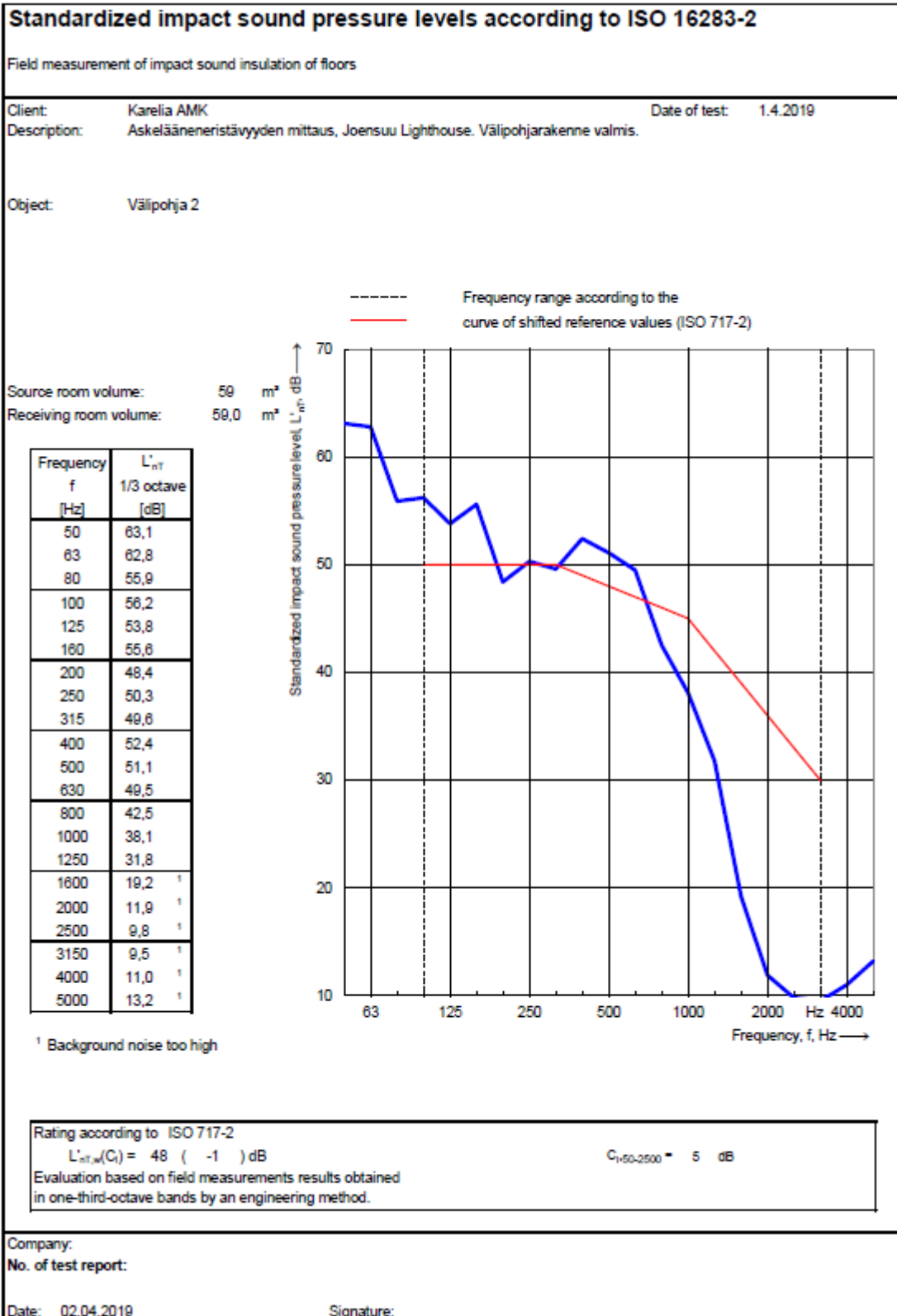


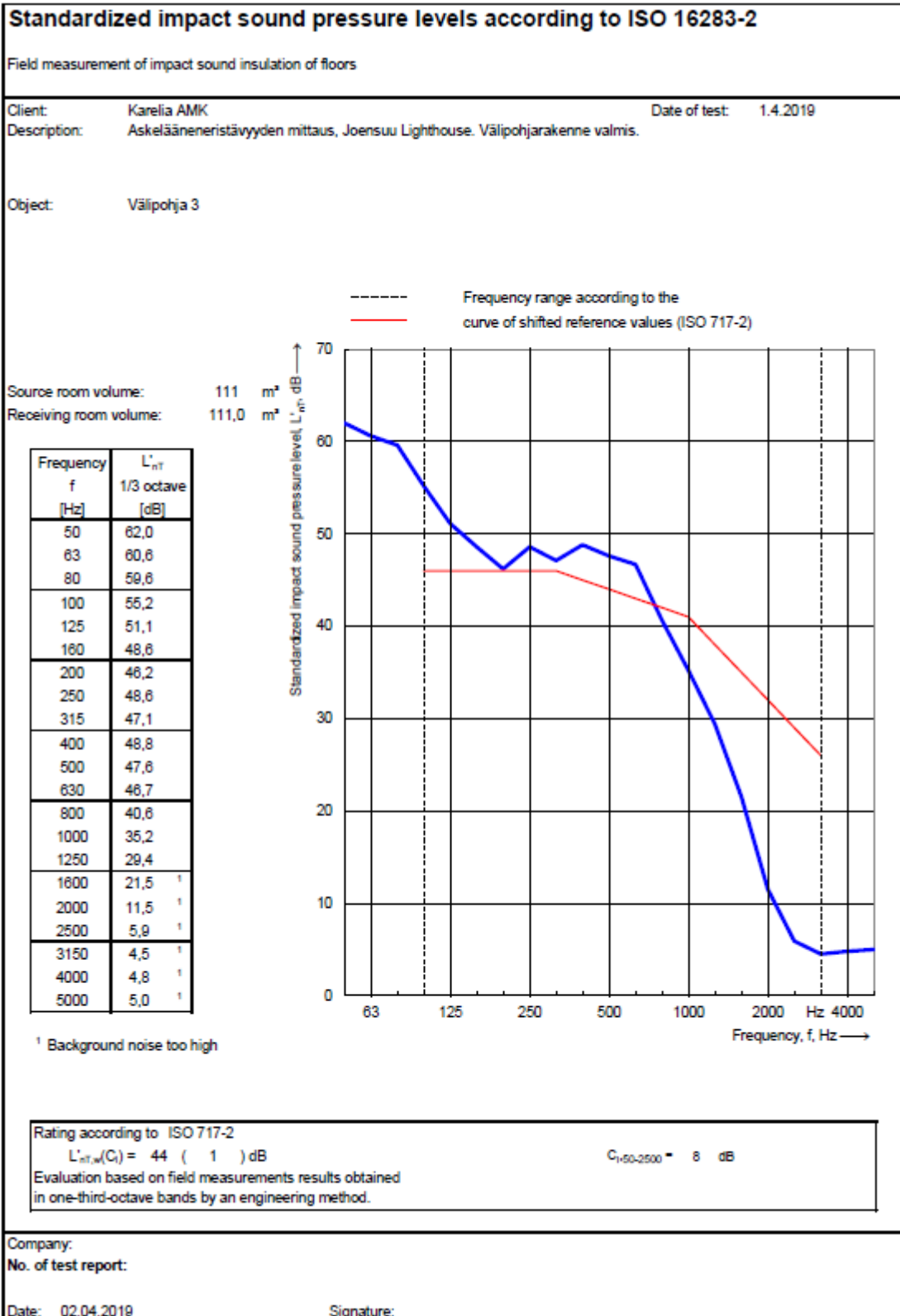


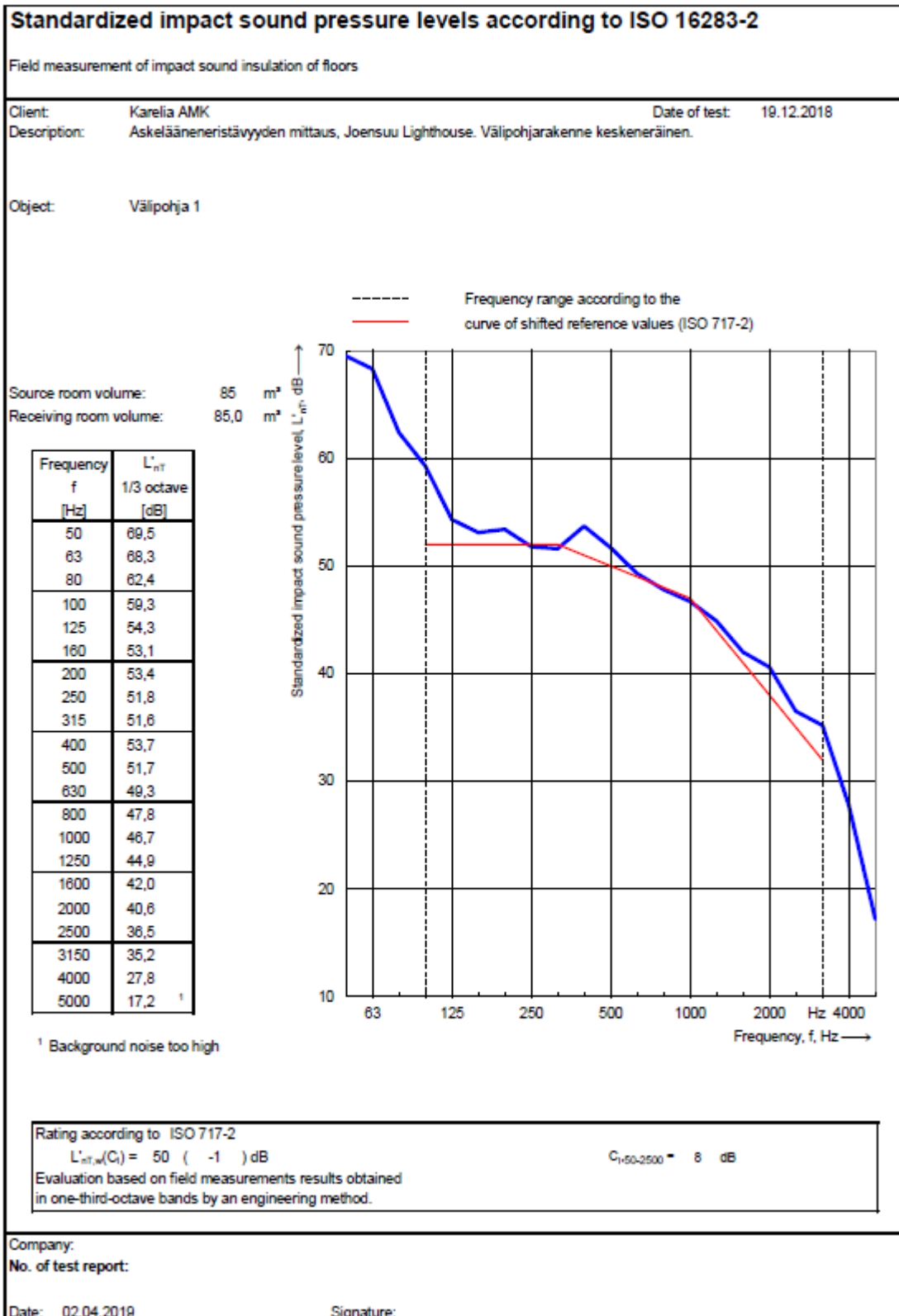


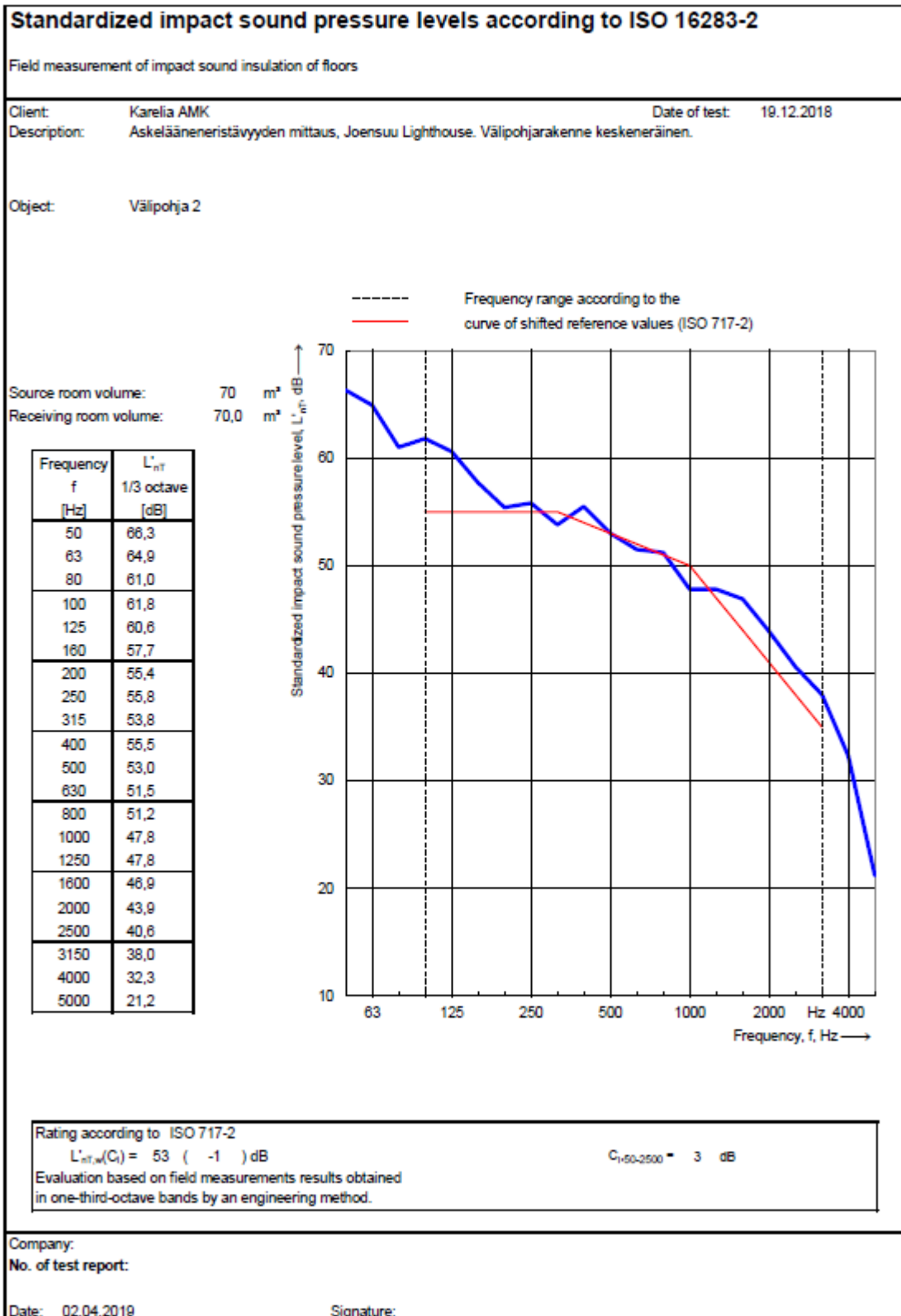


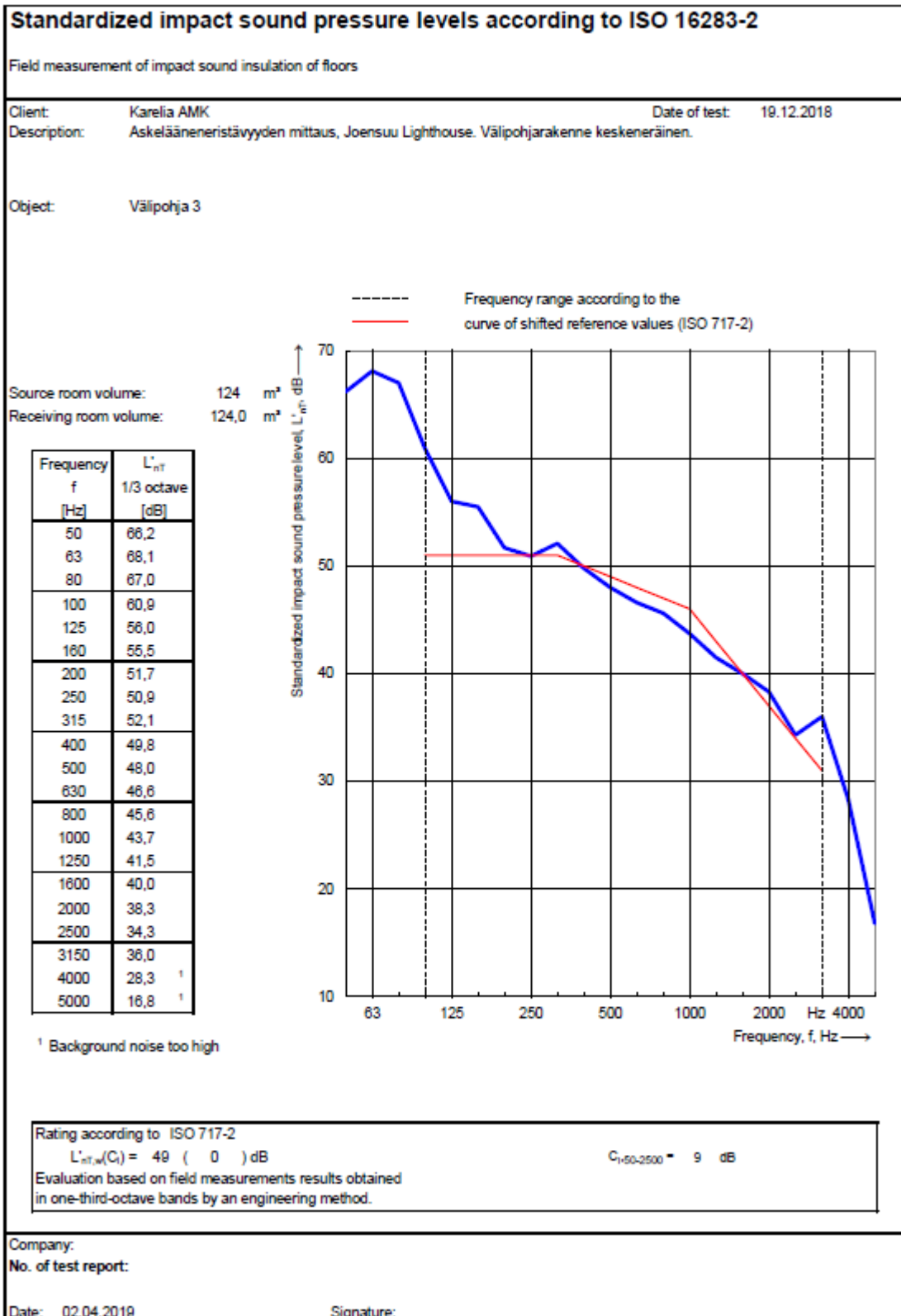












Apparent sound reduction index according to ISO 16283-1

Field measurements of airborne sound insulation between rooms

Client: Karelia AMK

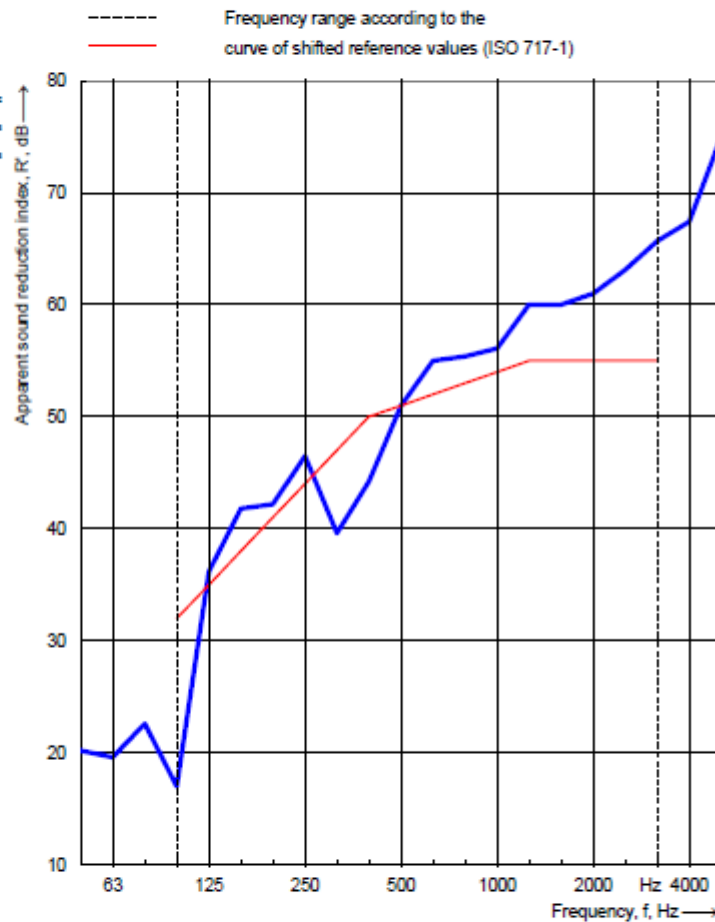
Date of test: 1.4.2019

Description: Ilmääneneristävyyden mittaus, Joensuu Lighthouse. Väliseinä rakenne valmis.

Object: Väliseinä 1

Area S of separating element: 8,40 m²
 Source room volume: 74 m³
 Receiving room volume: 59,0 m³

Frequency f [Hz]	R' 1/3 octave [dB]
50	20,2
63	19,6
80	22,6
100	17,0
125	36,2
160	41,8
200	42,2
250	46,5
315	39,6
400	44,2
500	51,0
630	55,0
800	55,4
1000	56,1
1250	60,0
1600	60,0
2000	61,0
2500	63,1
3150	65,7
4000	67,4
5000	75,0



Rating according to ISO 717-1

 $R'_w(C;C_2) = 51 (-6 ; -14) \text{ dB}$

Evaluation based on field measurements results obtained in one-third-octave bands by an engineering method.

 $C_{50-3150} = -7 \text{ dB}$ $C_{50-5000} = -6 \text{ dB}$ $C_{100-5000} = -5 \text{ dB}$ $C_{17,50-3150} = -16 \text{ dB}$ $C_{17,50-5000} = -16 \text{ dB}$ $C_{17,100-5000} = -14 \text{ dB}$

Company:

No. of test report:

Date: 02.04.2019

Signature:

Apparent sound reduction index according to ISO 16283-1

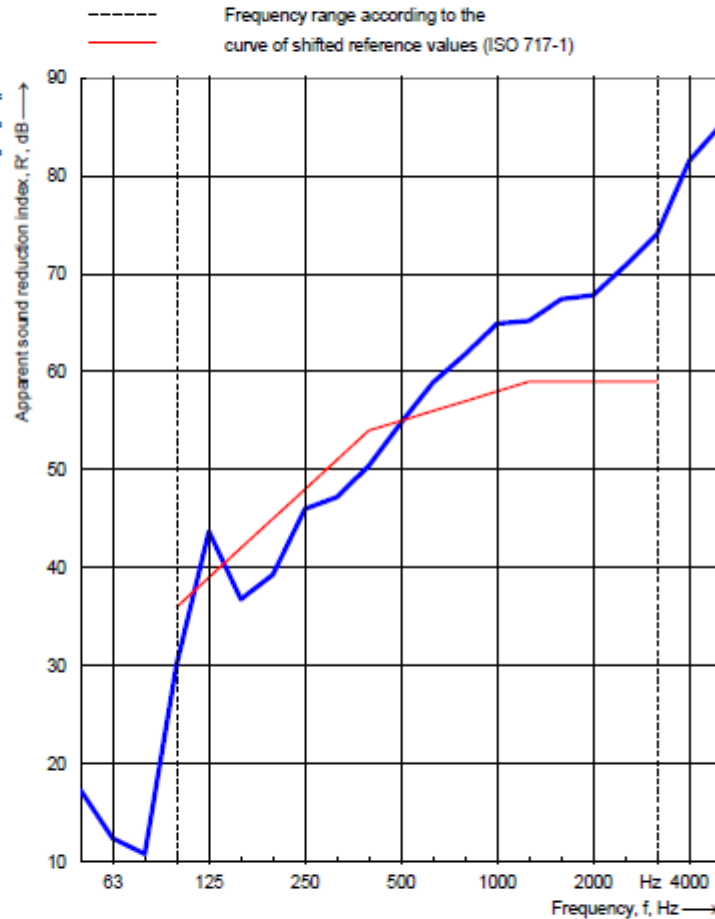
Field measurements of airborne sound insulation between rooms

Client: Karelia AMK Date of test: 1.4.2019
 Description: Ilmaääneneristävyyden mittaus, Joensuu Lighthouse. Väliseinärakenne valmis.

Object: Väliseinä 2

Area S of separating element: 13,00 m²
 Source room volume: 59 m³
 Receiving room volume: 59,0 m³

Frequency f [Hz]	R' 1/3 octave [dB]
50	17,3
63	12,4
80	10,8
100	30,2
125	43,7
160	36,8
200	39,3
250	46,0
315	47,2
400	50,4
500	54,8
630	58,9
800	61,8
1000	64,9
1250	65,2
1600	67,4
2000	67,8
2500	70,8
3150	74,1
4000	81,5
5000	85,2 ¹



¹ Background noise too high

Rating according to ISO 717-1
 $R'_w(C;C_v) = 55 (-2; -8)$ dB
 Evaluation based on field measurements results obtained in one-third-octave bands by an engineering method.

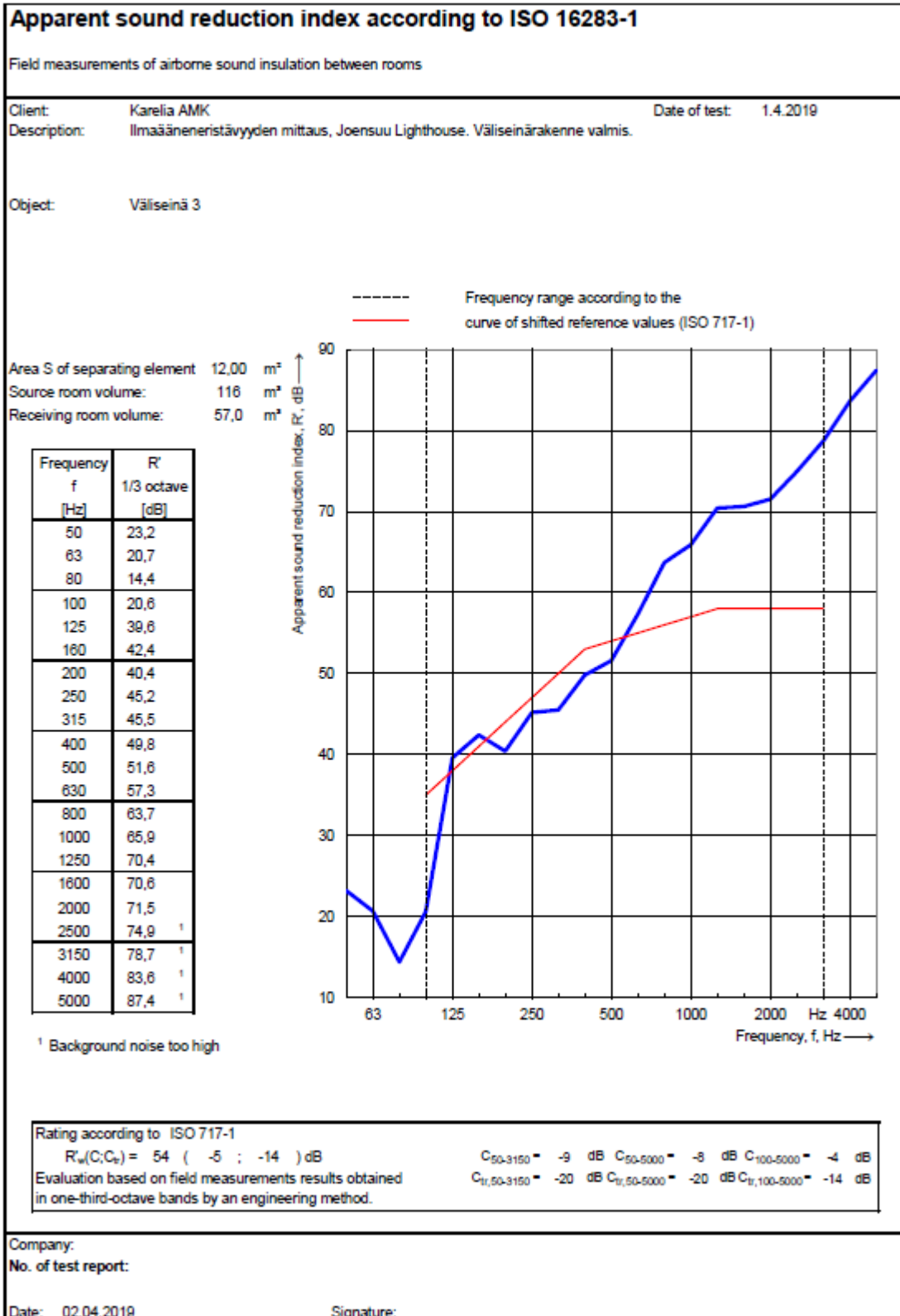
$C_{50-3150} = -13$ dB $C_{50-5000} = -12$ dB $C_{100-5000} = -1$ dB
 $C_{17,50-3150} = -25$ dB $C_{17,50-5000} = -25$ dB $C_{17,100-5000} = -8$ dB

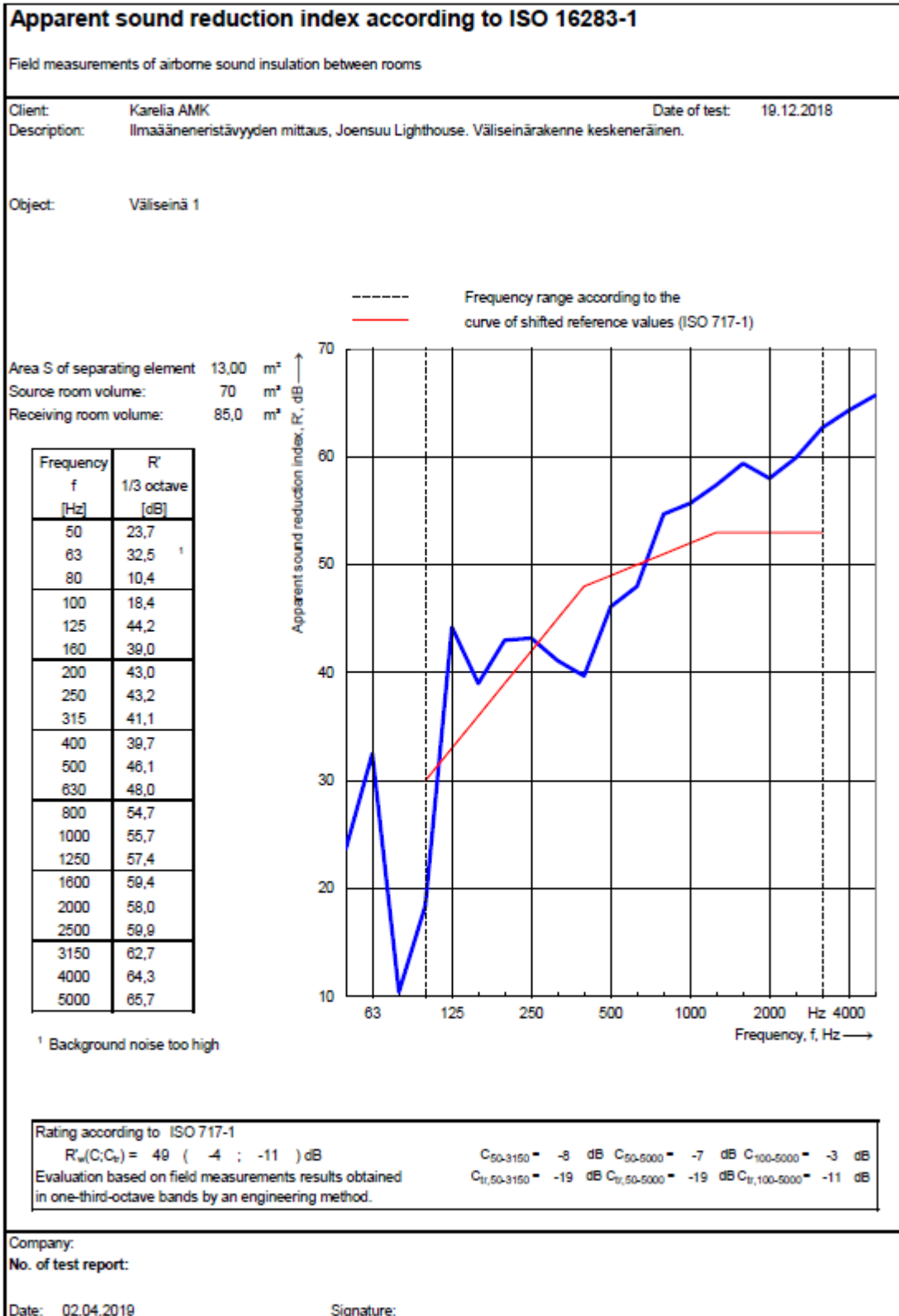
Company:

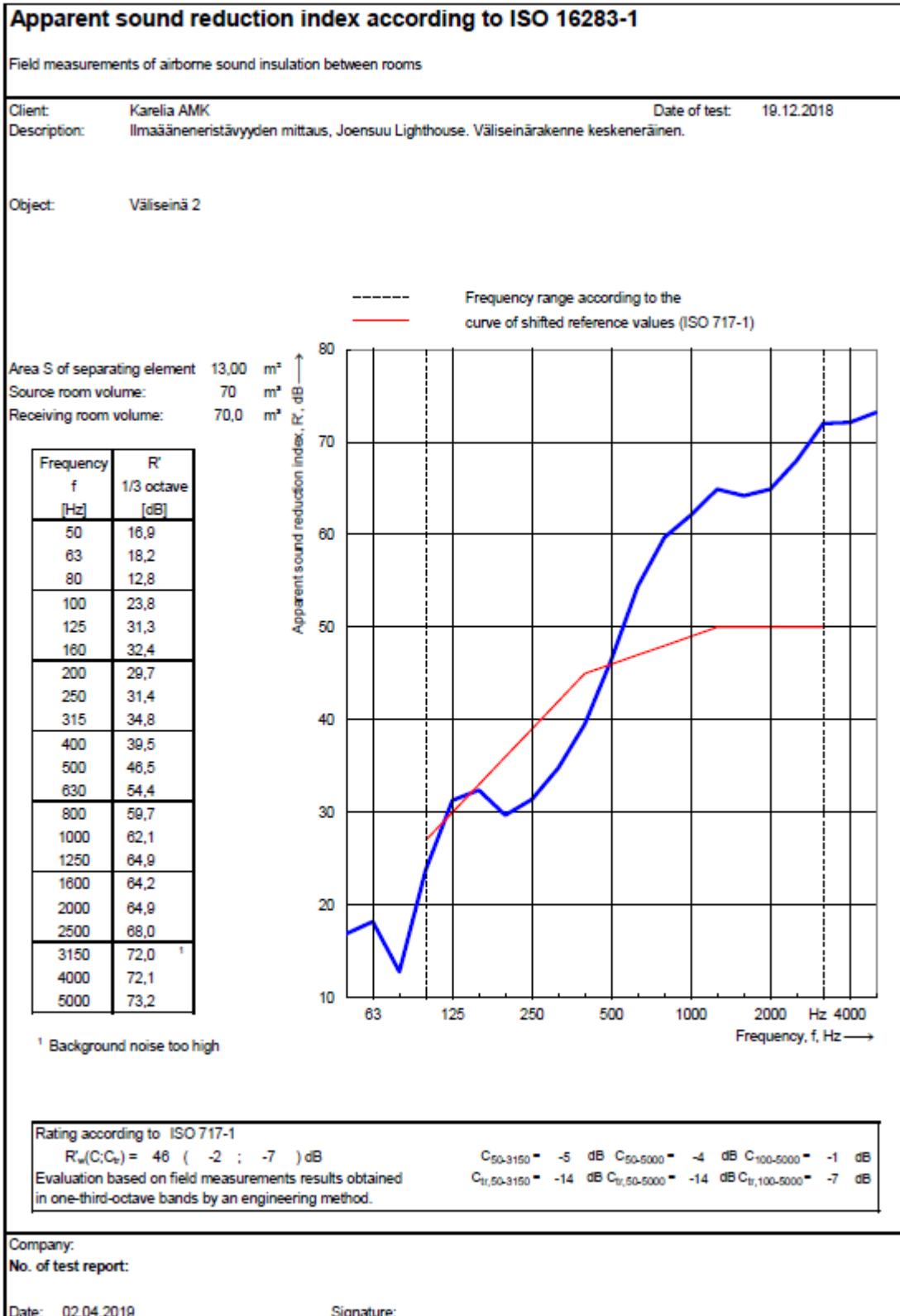
No. of test report:

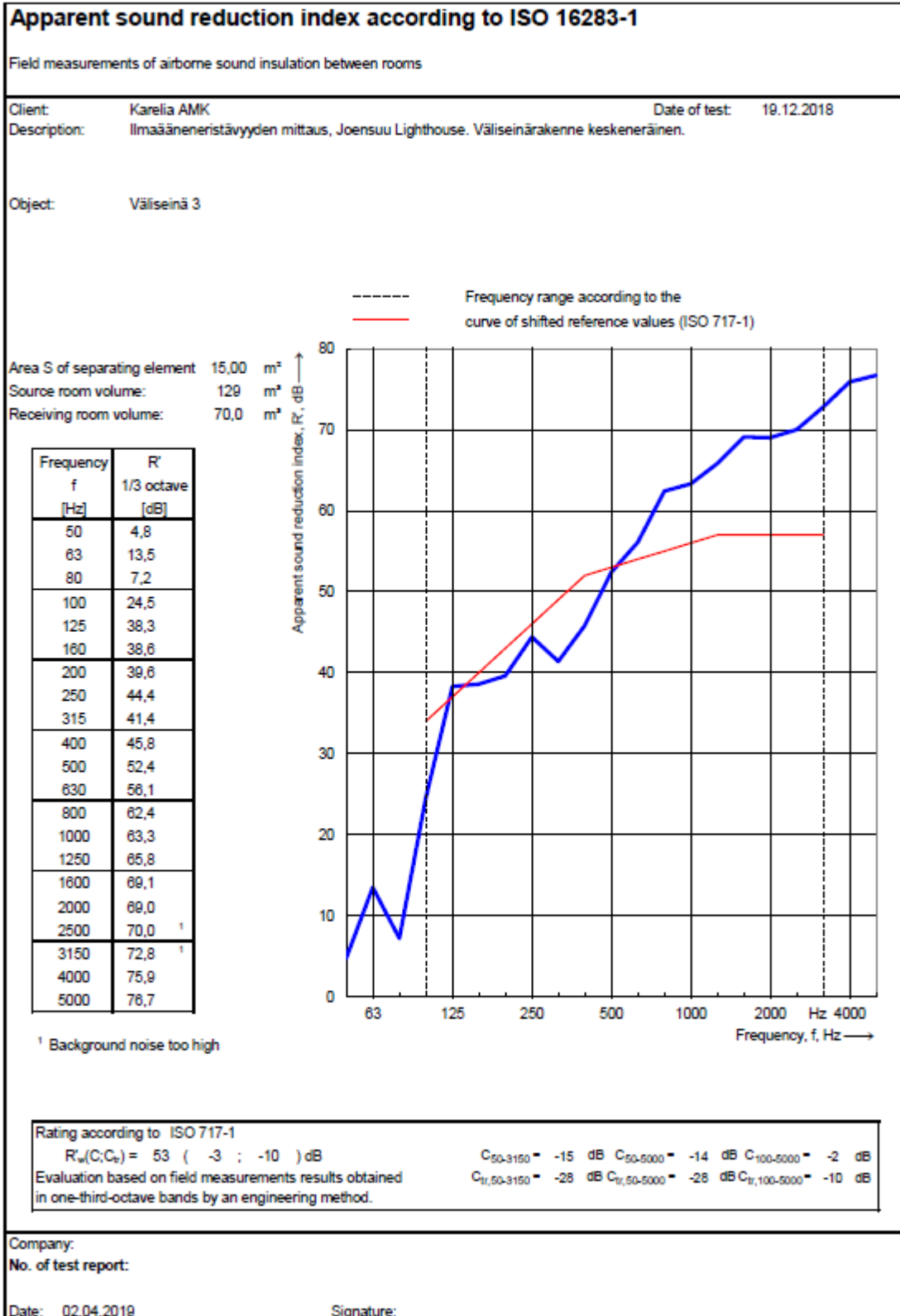
Date: 02.04.2019

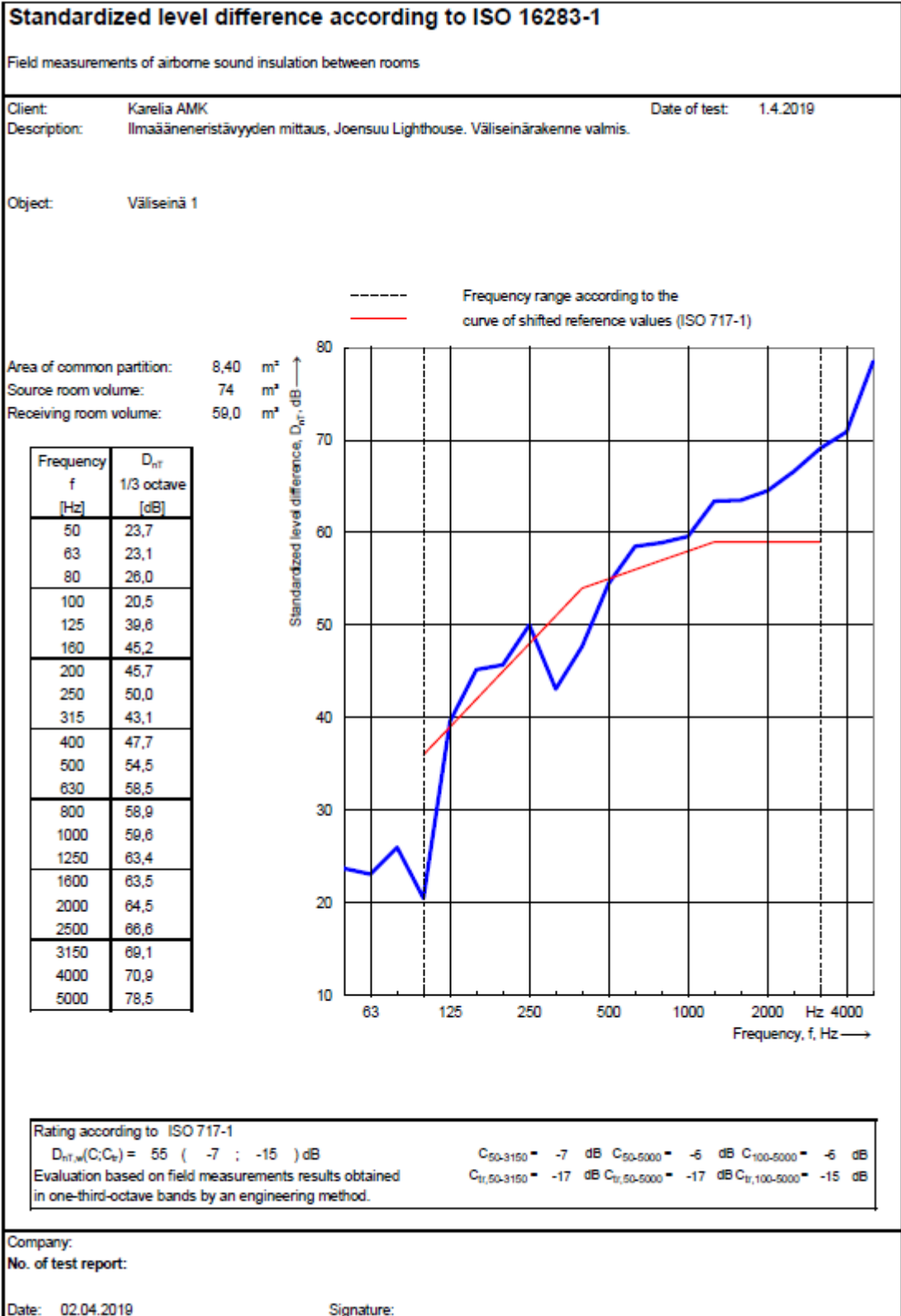
Signature:

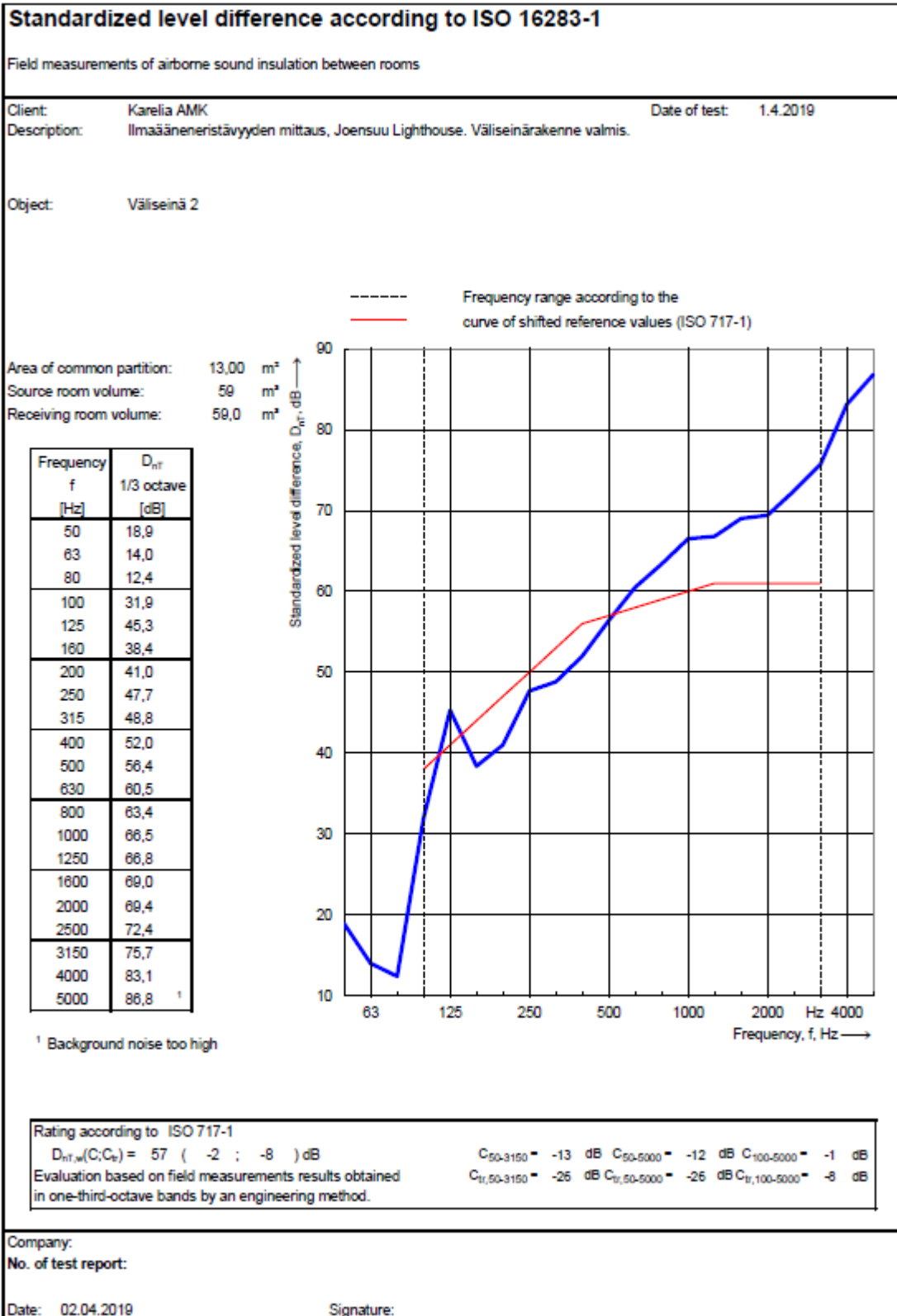


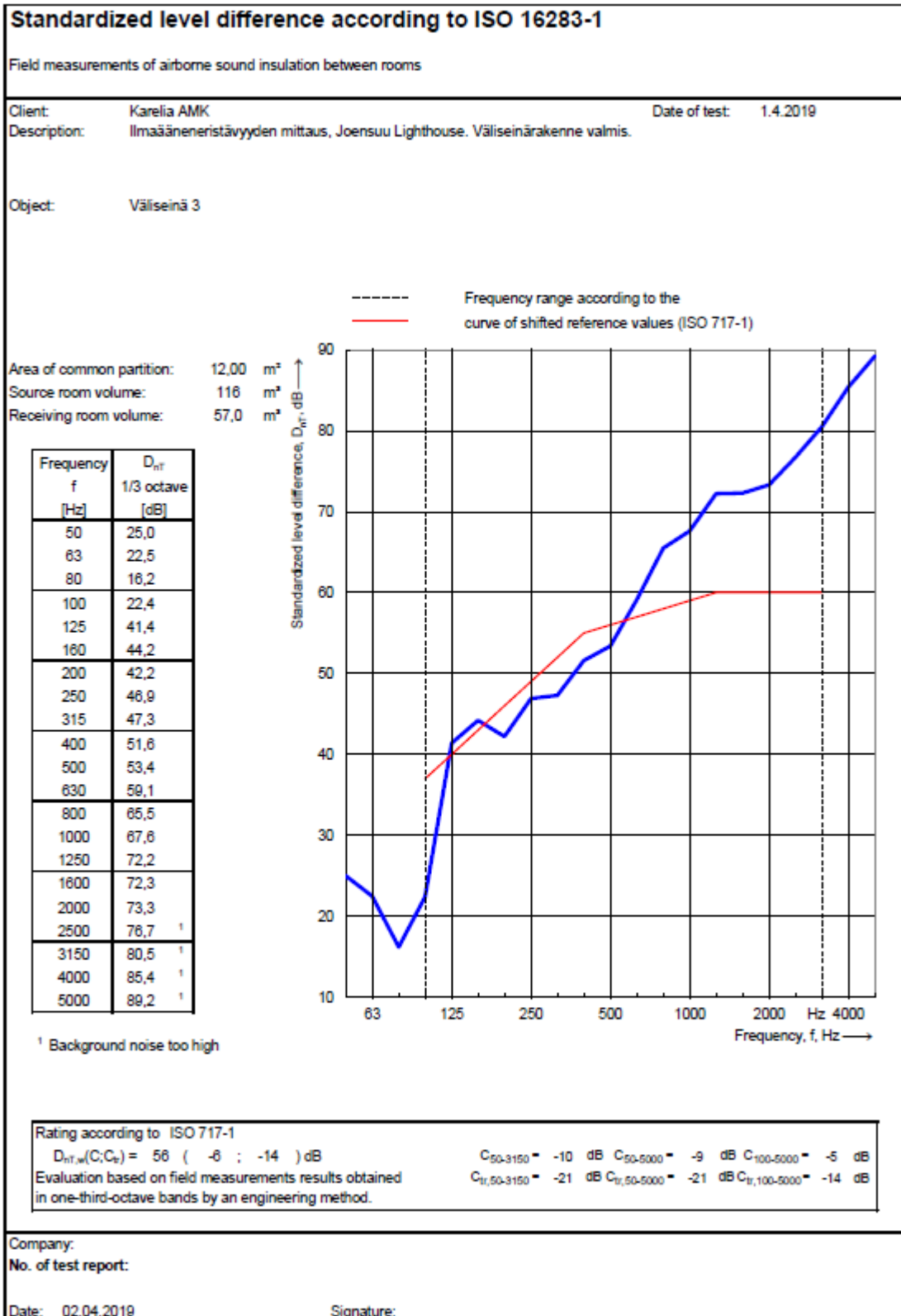


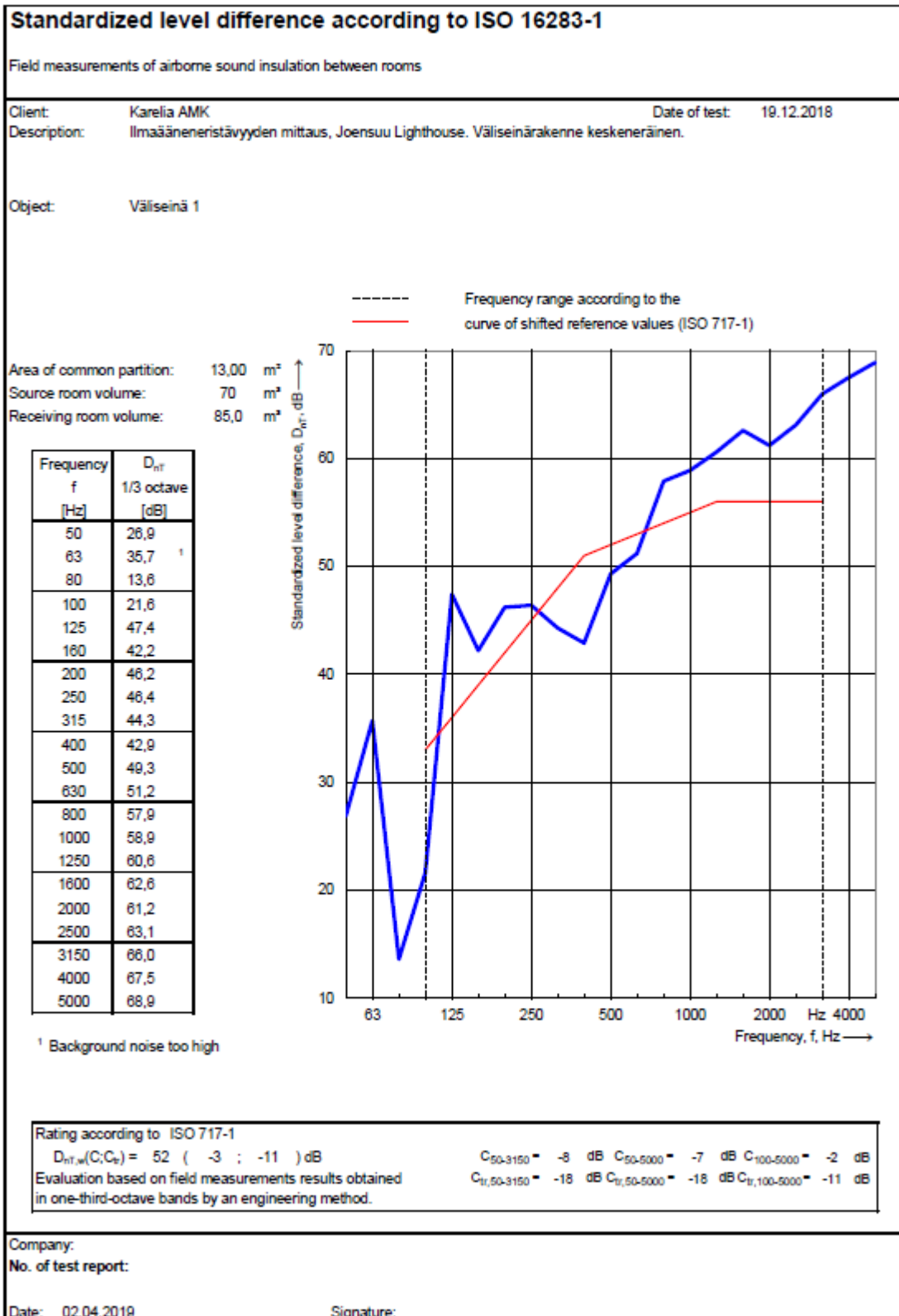


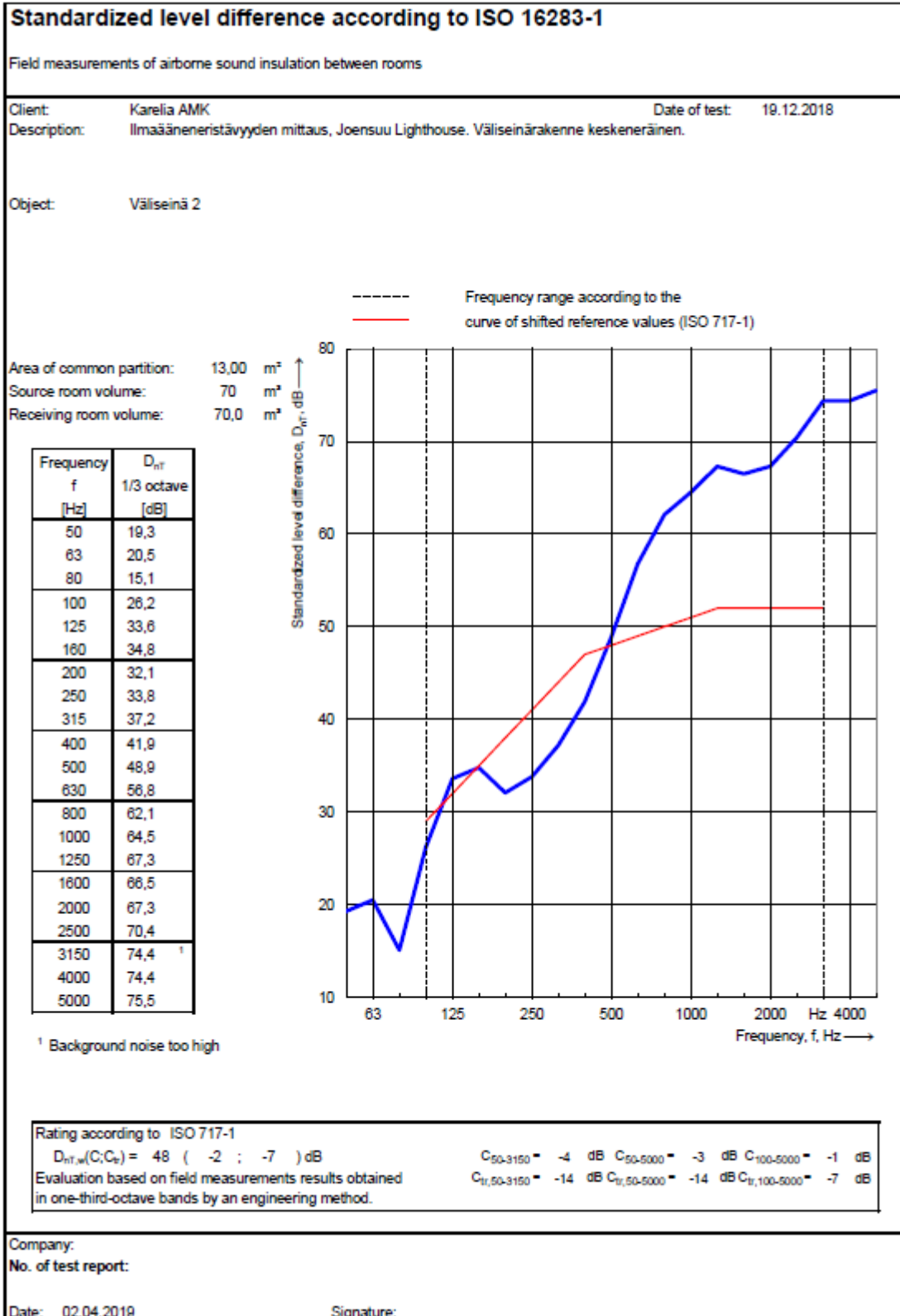


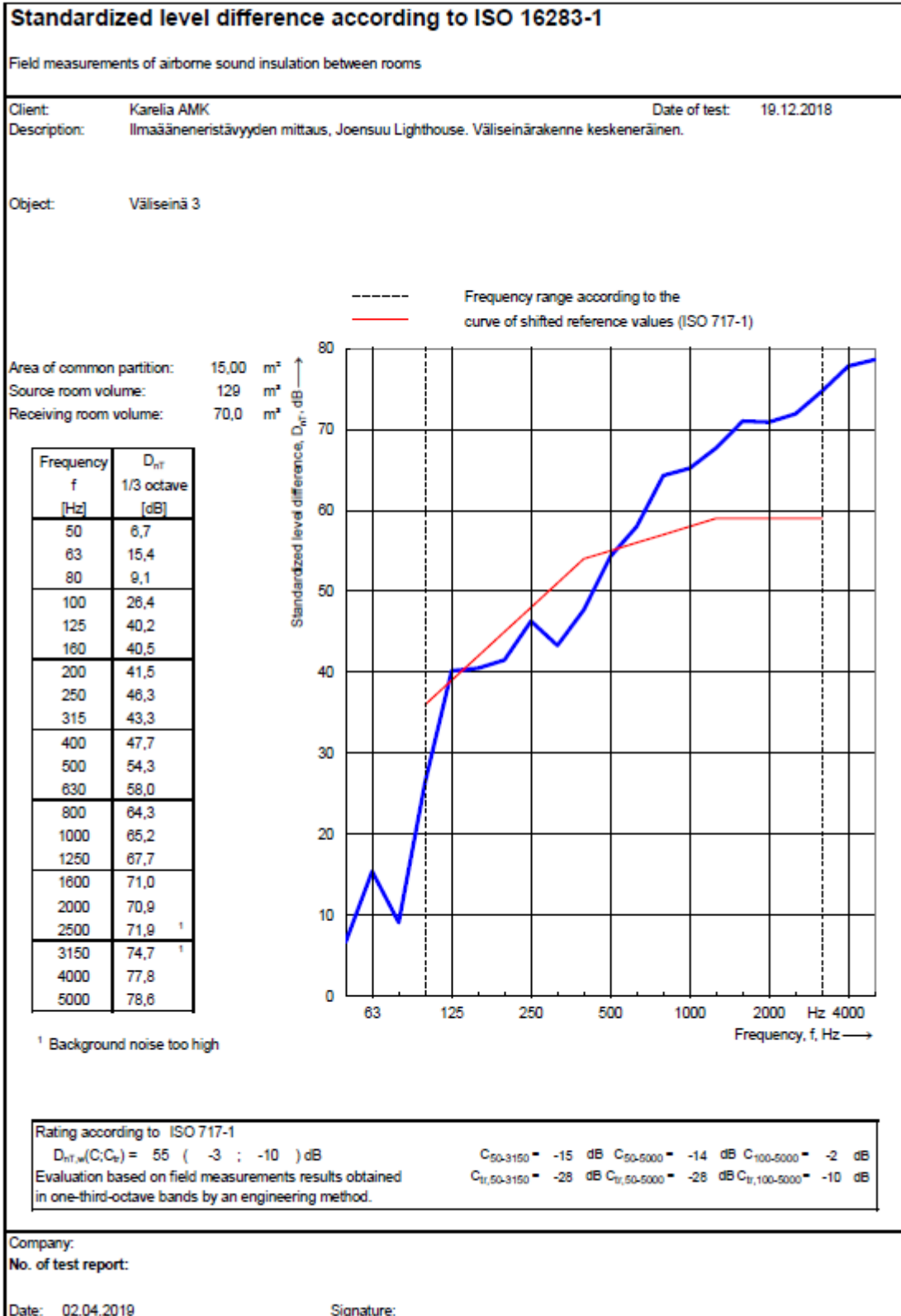












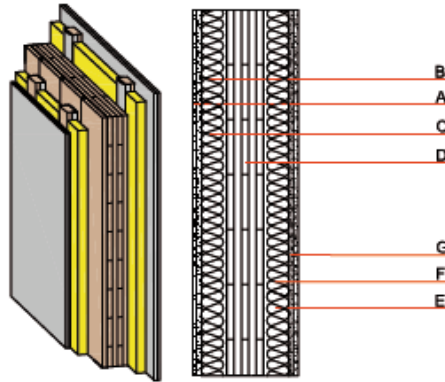


Designation IW06 b

As of: 14. 12. 2010

INTERIOR WALL - SOLID WOOD CONSTRUCTION
- with services level

iwmxd02b-03



PHYSICAL AND ECOLOGICAL RATING

Fire protection	REI	90
max. buckling length $l = 3 \text{ m}$ max. load $(q_{n,d}) = 80,21 \text{ [kN/m]}$; Classification by IBS		
Thermal Insulation	$U \text{ [W/m}^2\text{K]}$	-
	Diffusion behaviour	suitable
	$m_{w,RA} \text{ [kg/m}^2\text{]}$	-
Calculation by HFA		
Noise Insulation	R_{w}	68
	$L_{n,w}$	-
Ecology*	$OL3_{Ken}$	7,9
Calculation by IBO		

MATERIAL INFORMATION FOR DESIGN, CONSTRUCTION LAYERS
(from outside to inside, dimensions in mm)

	Thickness	Material	Thermal protection				Inflammability class
			λ	$\mu \text{ min - max}$	ρ	c	
							EN 13501-1
A	25,0	British Gypsum fire protection board RF (2x15mm) or	0,250	10	900	1,050	A2
A	25,0	British Gypsum fibre board Rigidur H (2x12,5mm)	0,350	19	1200	1,200	A1
B	85,0	Freestanding facing (CW75)					
C	50,0	Mineral wool	0,040	1	18	1,030	A1
D	100,0	Cross Laminated Timber BBS (5 layer)	0,130	50	470	1,600	D
E	85,0	Freestanding facing (CW75)					
F	50,0	Mineral wool	0,040	1	18	1,030	A1
G	25,0	British Gypsum fire protection board RF (2x15mm) or	0,250	10	900	1,050	A2
G	25,0	British Gypsum fibre board Rigidur H (2x12,5mm)	0,350	19	1200	1,200	A1

*Ecological assessment in detail

GWP	AP	PEI _{ne}	PEI _e	EP	POCP
[kg CO ₂ Equiv.]	[kg SO ₂ Equiv.]	[MJ]	[MJ]	[kg PO ₄ Equiv.]	[kg C ₁ H ₄ Equiv.]
-44,339	0,188	795,878	1166,931	0,029	0,039

The structures shown were tested on behalf of binderholz and British Gypsum Saint-Gobain by accredited testing institutes.

This is an extract from the "Solid Timber Manual" planning folder. Alterations and amendments due to improvements to the application of product technology are reserved. You should confirm that you are using the most recent edition. Misprints cannot be ruled out.

