



Karelia-ammattikorkeakoulu
Insinööri, rakennustekniikka

Joensuun konservatorion konserttisalin akustiset ominaisuudet

Heikki Pitkänen

Opinnäytetyö, huhtikuu 2022

www.karelia.fi



Karelia
AMMATTIKORKEAKOULU

OPINNÄYTETYÖ
Huhtikuu 2022
Rakennustekniikan koulutus

Tikkarinne 9
80200 JOENSUU
+358 13 260 600

Tekijä
Heikki Pitkänen

Nimeke
Joensuun konservatorion konserttisalin akustiset ominaisuudet

Toimeksiantaja
Luja Talo Oy

Tiivistelmä

Tässä opinnäytetyössä tutkitaan Joensuun uuden konservatorion konserttisalin akustisia ominaisuuksia ja toimivuutta. Tutkimuksissa mitattiin konservatorion ison konserttisalin jälkikaiunta-aikaa sekä äänen eristävyttä salin ja sitä ympäröivien käytävien välillä. Tutkimusmenetelmänä käytettiin myös äänen intensiteetin mittaustapaa, jolla tutkittiin salin ja aulan välisen oven äänen eristävyttä.

Mittaustuloksista saatujen arvojen perusteella pystyttiin toteamaan, että salin ja ympäröivien käytävien äänen eristävydet täyttivät annettujen raja-arvojen osalta. Salin jälkikaiunta-aika oli suunnitteluarvojen mukainen. Äänen intensiteetin mittauksen tuloksia ei pystytty pitämään luotettavina mittauksen epävarmuuden takia.

Kieli
suomi

Sivuja 29
Liitteet 2
Liitesivumäärä 11

Asiasanat
akustiikka, konserttisali, jälkikaiunta-aika, ilmaääneneristävyys, äänen intensiteetti



THESIS
April 2022
Degree Programme in Construction
Engineering

Tikkarinne 9
80200 JOENSUU
+358 13 260 600

Author
Heikki Pitkänen

Title
Acoustic Properties of the Conservatory Concert Hall in Joensuu

Commissioned by
Luja Talo Oy

Abstract

This thesis investigates the acoustic properties and functionality of the new conservatory concert hall in Joensuu. The studies measured the reverberation time of the conservatory's large concert hall and the sound insulation between the hall and surrounding hallways. Sound intensity measurement method was used to study the sound insulation of the door between the concert hall and the lobby.

Based on the values obtained from the measurement results, the sound insulation of the hall and surrounding corridors met with to the given limit values. Reverberation time of the concert hall was also according to design values. The results of the sound intensity were not reliable due to the uncertainty of the measurement method.

Language
Finnish

Pages 29
Appendices 2
Pages of appendices 11

Keywords
acoustics, concert hall, reverberation time, sound insulation, sound intensity

Sisältö

1	Johdanto	1
2	Akustinen suunnittelu	2
3	Akustiikan peruskäsitteet.....	3
3.1	Taajuus	4
3.2	Ilmaääni.....	5
3.3	Runkoääni	5
3.4	Äänenpainetaso	5
3.5	Taajuuskaista	7
3.6	A-painotus	8
3.7	Äänen intensiteetti sekä intensiteettitaso	10
3.8	Äänen etäisyysvaimennus.....	10
3.9	Absorptio.....	11
3.10	Jälkikaiunta-aika.....	13
3.11	Huonevaimennus	14
3.12	Äänen heijastuminen pinnan muodoista	16
3.13	Sivutiesiirtymä rakenteissa.....	17
4	Konserttisalin akustiset rakenteet.....	18
5	Konserttisalin akustiset mittaukset	19
5.1	Ilmaääneneristävyyden mittaaminen.....	19
5.2	Jälkikaiunta-ajan mittaaminen	21
5.3	Äänen intensiteettimittaus	23
6	Pohdinta	26
6.1	Opinnäytetyön prosessi.....	26
6.2	Tutkimustulosten arviointi.....	27
7	Lähteet	29

Liitteet

Liite 1. Ilmaääneneristävyyden ja jälkikaiunta-ajan mittausraportti

Liite 2. Äänen intensiteettimittausten tulokset

1 Johdanto

Opinnäytetyön tavoitteena on käsitellä Joensuun uuden konservatorion akustisia ominaisuuksia sekä rakenteita. Opinnäytetyötä varten suoritin akustisia mittauksia isossa konserttisalissa, jotka sisälsivät seuraavat äänen eristävyden mittaukset: salin sekä sitä ympäröivien käytävien välillä, salin jälkikaiunta-ajan mittaus sekä salin ja aulan välisen oven äänen intensiteetin mittaus. Mittaukset suoritin lokakuun 2021 aikana.

Opinnäytetyössä käsitellään salin akustisia rakenteita sekä järjestelmiä. Saliin on suunniteltu ja toteutettu muuttuva akustinen järjestelmä, joten äänen jälkikaiuntaajasta saatujen tulosten tulkitseminen korostui.

Opinnäytetyön aihe esiteltiin syksyllä 2020 seminaarissa ja heti alkuun opinnäytetyön aihe tuntui siltä, että tästä haluaisin tehdä työn. Kiinnostus musiikkia ja ääntä kohtaan lisäsi ajatusta siitä, että rakennustekniikan ja oman mielenkiinnon yhdistäminen voisi tuntua luontevalta vaihtoehdolta työssäni.

Lähtökohtia opinnäytetyölle lähdin pohtimaan syksyllä ja ajatus siitä, mitä työni tulisi sisältämään, alkoi olla aika vahva jo silloin. Pieniä tarkennuksia ja ajatuksia oli vielä ilmassa. Keväällä 2021 työn rajaus ja fokusointi alkoi olla ajankoh- taista ja alkuperäisiin ajatuksiin tulikin muutoksia. Alkujaan opinnäytetyöni olisi pitänyt sisältää konservatorion musiikinopetustiloihin kohdistuvaa mittausta ja tutkimista. Kevään aikana rajauksia hieman muutettiin, koska musiikinopetusti- lojen akustisia ominaisuuksia tutki toinen opinnäytetyöpari, joten pääpaino työs- säni tuli olemaan konservatorion ison konserttisalin akustiikka ja akustiset ra- kenteet.

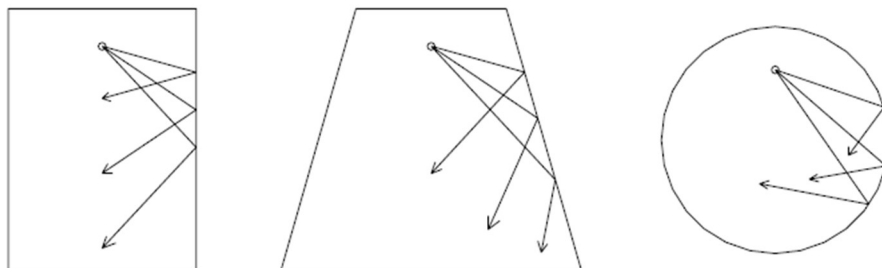
Lähtökohtaisesti pyrkimys on opinnäytetyössä tutkia konserttisalin ja sitä ympäröivien rakenteiden akustisia ominaisuuksia sekä suorittaa mittauksia, jotka kes- kittyvät rakenteissa kulkeutuvan äänen käyttäytymiseen ja sitä kautta tuottaa tutkimustuloksia, joihin opinnäytetyöni nojautuisi.

2 Akustinen suunnittelu

Ääni itsessään voidaan määritellä kahdesta eri näkökulmasta. Ääni on fyysistä värähtelyä tai liikettä, mutta ihmiselle ääni on aistimus, joka syntyy kuulojärjestelmässä. Nämä kaksi näkökulmaa poikkeavat toisistaan huomattavasti, mikä voi johtaa sekaannuksiin, jos käsitteiden käyttötapa ei ole kaikille selvä. (Karjalainen 2000, 4.)

Ihminen aistii äänen ilmanpaineen vaihteluna. Taajuusalue, jolla ihminen voi äänen havaita, on noin 20 Hz - 20 000 Hz välillä. Mikäli taajuus on alle 20 Hz, ihminen aistii äänen fyysisesti värähtelynä. (Kylliäinen 2006, 13.)

Rakennuksen ja tilan akustisessa suunnittelussa lähtökohtana on sen käyttötarkoitus. Tilan käyttötarkoitusta määrää useampi tekijä, kuten tilan muoto (kuva 1), sen sijainti, huoneakustiikan vaatimukset sekä äänen eristävyys ja laitteista aiheutuva äänen sallittu taso. (RIL 243-1-2007, 9.) Tilojen ja rakennuksen yksi tärkeimmistä ominaisuuksista ovat sen ääniominaisuudet. Näillä ominaisuuksilla edistetään tilojen käyttötarkoitusta. (RIL 243-1-2007, 9.)



Kuva 1. Eri tilojen muotoja ja niiden äänen heijastumia (Kylliäinen, 2006).

Ensimmäisenä rakennuksena Suomessa, jota on suunniteltu ja tutkittu akustiikan näkökulmasta, voidaan pitää Eduskuntataloa. Eduskuntatalo on suunniteltu 1920-luvun lopulla ja se valmistui vuonna 1931. Eduskuntatalon istuntosalin kupoli on valmistettu sokeriruo'osta valmistetulla absorboivalla pintamateriaalilla, joka tuotiin Yhdysvalloista. Sittemmin konserttisalien suunnittelussa hyödynnettiin Yleisradion insinöörien akustista tuntemusta sodan jälkeen. (Kylliäinen 2006, 13.)

Konsertti- tai muuta vastaavaa salia suunniteltaessa kiinnitetään huomiota huoneakustiikkaan. Huoneakustiikassa tarkastellaan, miten ääni heijastuu, vaimentuu tai etenee tilassa. Tavoite on luoda tilan käyttäjälle, kuten esiintyjälle, sitä palvelevat olosuhteet. Rakennusteknisesti tilaa tarkastellessa huomioidaan äänen siirtyminen tilasta toiseen ilma-, askel- tai runkoääninä. (RIL 243-1-2007, 24.)

Kun puhutaan yleisesti akustiikasta, puhutaan tilan huoneakustiikasta. Miltä puhe tai musiikki kuulostaa sille tarkoituksen mukaisessa tilassa? Akustiikka yhdistetään usein vaativiin akustisiin kohteisiin, kuten konserttisaleihin ja teattereihin. (RIL 243-1-2007, 24.)

Standardissa SFS-5907 (2004) kerrotaan rakennusten akustisesta luokituksesta ja siellä on määritelty eri tilojen sekä rakennusten akustinen luokittelu ja äänitasot. Kun kyse on konservatoriosta, puhutaan koulusta. Standardin kohdassa 5.5 annetaan arvot koulutilojen ilmaääneneristävyydelle, askeläänelle sekä jälkikaiunnalle. Standardissa ilmenee myös LVIS-laitteiden ohjearvot sekä ulkopuolisten äänilähteiden aiheuttamat äänitasot.

3 Akustiikan peruskäsitteet

Akustiikasta ja ääneneristävyydestä puhuttaessa tulee tuntea termit ja käsitteet, jotta turhilta väärinymmärryksiltä vältyttäisiin. Akustiikkaan on laadittu termistö ja sanasto yhtenäistämään standardien terminologiaa (RIL 243-1-2007, 35).

Akustiikasta puhuttaessa puhutaan myös äänestä, joka liittyy akustiikkaan hyvin läheisesti.

Fysikaalisesti ääni on ilmanpaineen vaihtelua. Kappale, joka värähtelee tai esimerkiksi ihmisen äänihuulen värähtely saavat aikaan ympäröivän ilman tiheyden ja harventumista. Ilmahiukkasten liike ilmassa on muodostavat tällöin pitkittäisaallon, joka etenee ympäristöön. (RIL 243-1-2007, 35). Seuraavissa alaluvuissa käsitellään ja avataan tarkemmin akustiikan perusmääritelmiä.

3.1 Taajuus

Ihminen aistii kappaleen synnyttämän ilmanpaineen vaihtelun kuuloelimellään. Tarkemmin ilmanpaineen vaihtelu saa rumpukalvon, kansanomaisesti tärykalvon, värähtelemään ja kuuloelimet muodostavat tämän pohjalta kuuloaistimuksen. (RIL 243-1-2007, 35.)

Äänen taajuus ilmoitetaan kirjaimella f [Hz] joka tulee kaavasta n , joka on värähtelyjen määrä ilmassa jaettuna ajanjaksolla T [s], jonka aikana värähtely on kuultu ja havaittu (Kaava 1). (RIL 243-1-2007, 35.)

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

Ajanjakso T [s] on yksi sekunti, joten kaava antaa tulokseksi värähtelyjen lukumäärä sekunnissa. Ihmisen kuuloalue sijoittuu noin 20 Hz ja 20 000 Hz välille. Alle 20 Hz taajuudet ovat niin sanottuja infraääniä, jotka ihminen havaitsee ja aistii tärinänä. (RIL 243-1-2007, 24.) Yli 20 000 Hz äänet ovat ultraääniä, joita ihminen ei pysty havaitsemaan. Useat eläimet puolestaan pystyvät näitä taajuuksia havaitsemaan ja jopa tuottamaan. Taulukossa 1 on esitetty esimerkkejä eri äänen taajuuksista sekä aallonpituuksista

Taulukko 1. Äänen taajuudet ja aallonpituudet (SIT 05-310038; RT 07-10881).

Äänen taajuus, hertsi, Hz	Äänilähde	Aallonpituus
20	Kuuloalueen alaraja	17 m
100	Miehen puheäänen perustaajuus	3,4 m
200	Naisen puheäänen perustaajuus	1,7 m
500	Keskitaajuus	68 cm
4000	Puheäänen konsonantit	17 cm
8000	Musiikin diskanttialue	4 cm
20 000	Heinäsiirakan siritys	1,7 mm

3.2 Ilmaääni

Jos ympärillä vallitsisi tyhjiö, ääntä ei muodostuisi, eli ääni tarvitsee kulkeakseen aina väliaineen. Ääntä, joka kulkee ilmassa, kutsutaan ilmaääneksi. Ilmaääntä tuottavat esimerkiksi puhe, soittimet, äänentoistolaitteet sekä LVIS-laitteet ja koneet. (RIL 243-1-2007, 35.) Äänen nopeus ei ole riippuvainen taajuudesta, lämpötila t [°C] puolestaan vaikuttaa äänen nopeuteen c [m/s]. $c = 331 + 0.6t$. (Kylliäinen 2006, 28; RIL 243-1-2007, 35).

Äänennopeus c [m/s] ilmassa on noin 340 m/s ja äänen aallon pituus λ [m] (kaava 2) saadaan jakamalla äänennopeus c [m/s] sen taajuudella f [Hz] (RT 07-10881, 2; RIL 243-1-2007, 36).

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2)$$

3.3 Runkoääni

Ääni voi kulkea muutakin reittiä kuin vain ilmaa pitkin. Silloin puhutaan runkoäänestä, joka johtuu jonkin kiinteän aineen välityksellä, esimerkiksi rakennuksen runko- tai maarakenne. Runkoääni, joka johtuu ympäröivän ilman ilmaäänestä, saa runkorakenteet värähtelemään, jolloin äänen eteneminen tapahtuu taivutusaaltona kohtisuoraan äänen etenemissuunnassa. Runkoääntä voi aiheuttaa myös rakenteisiin kiinnitetty laite värähtelyllään tai jos rakenteisiin kohdistuu isku. (RIL 243-1-2007, 36.)

Runkoäänät, jotka aiheutuvat jonkin iskun seurauksena, kutsutaan askelääniksi. Näiden iskujen vaikutuksesta värähtelevä runko aiheuttaa värähtelyä, joka voidaan aistia ilmaääninä. (Kylliäinen 2006, 29.)

3.4 Äänenpainetaso

Ääni aistitaan ilmanpaineen vaihteluna, joka on hyvin pientä verrattuna staattiseen ilmanpaineeseen. Kun normaali ilmanpaine ilmakehässä on noin 100 kPa, ihminen aistii pienimmillään ilmanpaineen muutoksen, joka on 20 μ Pa. (RIL

243-1-2007, 36.) Äänenä aistittavaa ilmanpaineen muutosta ilmaistaan nimityksellä p [Pa]. Mikäli äänen ilmanpaine ylittää 20 Pa, muuttuu äänen aistittavuus kipuaistimukseksi. (Kylliäinen 2006, 29.)

Lukuarvoina äänenpaineet ovat hyvinkin pieniä, mutta kuulokynnyksen ja kipukynnyksen ero on suhteellisesti suuri, näin ollen äänenpaineita olisi hankalaa käyttää käytännön suunnittelussa sekä laskentatyössä. Tämän takia äänenpainetta p verrataan kuulokynnykseen p_0 20 μ Pa, joka on vertailuäänepaine ja tästä saadaan kuvatuksi äänenpaine L_p [dB] joka saadaan laskettua kaavasta 3. (RIL 243-1-2007, 36.)

$$L_p = 10 \log_{10} \frac{p^2}{p_0^2} = 20 \log_{10} \frac{p}{p_0}. \quad (3)$$

Pienin kuultavissa oleva äänenpainetaso on määritelmien mukaan 0 dB ja äänenpaineentaso, jolloin kipukynnys ylittyy, on 120 dB. Kun verrataan äänilähteiden voimakkuuksia, on otettava huomioon desibeliasteikon logaritmisuus. (RIL 243-1-2007, 37.) Eri äänenpainetasoja ja suositeltuja oleskeluaikoja on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Esimerkkejä eri äänenvoimakkuuksista (RT-07-10881).

Äänitaso dB	Äänilähde esimerkiksi	Oleskeluaika enintään
0	kuulokynnys	
20...25	makuuhuoneiden taustamelu yöllä	
30...40	ilmastoinnin taustamelu	
60...70	puheääni huoneessa	
70...80	voimakas puheääni, liikenne	8 tuntia
85...90	moottoripyörä	2...4 tuntia
90...110	disco tai rock-konsertti	2 tuntia...1 minuutti
110...130	kipukynnys	oleskelua ei suositella

Keskiäänitaso on arvo, joka riippuu äänilähteen tuottaman äänen kestosta ja ajasta, joka mitä sen mittaamiseen on käytetty. Eli mitä pidempi aika mitataan melunlähteestä verrattuna sen toiminta-aikaan, sitä alhaisempi arvo saadaan keskiäänitasoksi. Esimerkkinä äänitaso pysyy muuttumattomana minuutin ajan 60 dB tasolla ja muuten äänitaso on 30 dB. Aika, joka mittaamiseen käytetään,

on 10 minuuttia niin keskiääni arvoksi saadaan tällöin 50 dB ja kun taas jos mitataan tunnin ajan keskiäänitaso, niin se laskee 42 desibeliin. (Kylliäinen 2006, 33.)

Ääniteho, joka äänilähteellä on kyky tuottaa, ilmoitetaan äänitehona W [W]. Äänitehotaso W_0 on 1 pW, joka vastaa kuulokynnystä. Yksinkertaistamiseksi suunnittelussa käytetään lukuarvoa L_w [dB], jossa äänitehotasoa laitteesta verrataan vertailuäänitehotasoon W_0 , joka vastaa kuulokynnystä (kaava 4), jossa vertailuteho on $W_0 = 10^{-12} W$. (Kylliäinen 2006, 33.)

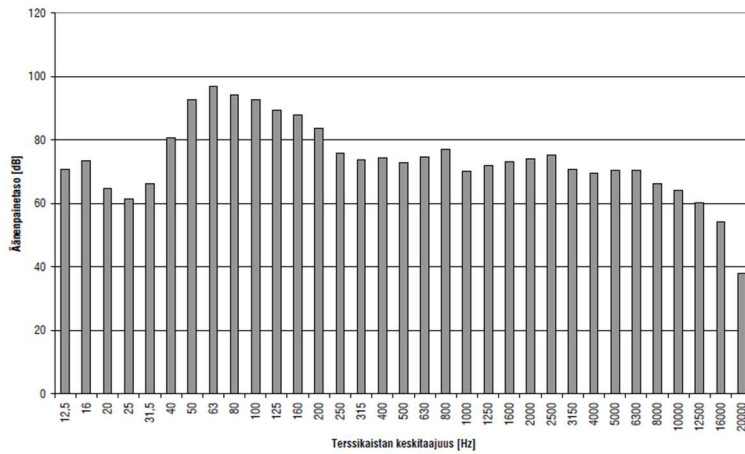
$$L_w = 10 \lg \frac{w}{w_0} \quad (4)$$

Yleisimmin äänipainetasojen sekä A-painotuksen äänitehotason määrittämiseen käytetään oktaavikaistoja. Äänitehotason voi määrittää myös terssikaistoittain, mutta kuten edellä mainittiin, oktaavikaistoittain määrittäminen on yleisempi tapa. (RIL 243-1-2007, 42.) Suoraan mitattuna äänitehotasoa tai äänitasoa ei voida mitata, vaan se täytyy osoittaa ja määrittää laskennallisesti. Suoraan ei voida päätellä äänitehotason perusteella miltä jokin äänilähde eri tiloissa tai ympäristöissä kuulostaa vaan näiden sijaintien ominaisuudet vaikuttavat äänenpainetasoihin, jotka äänilähde synnyttää. (Kylliäinen 2006, 33.)

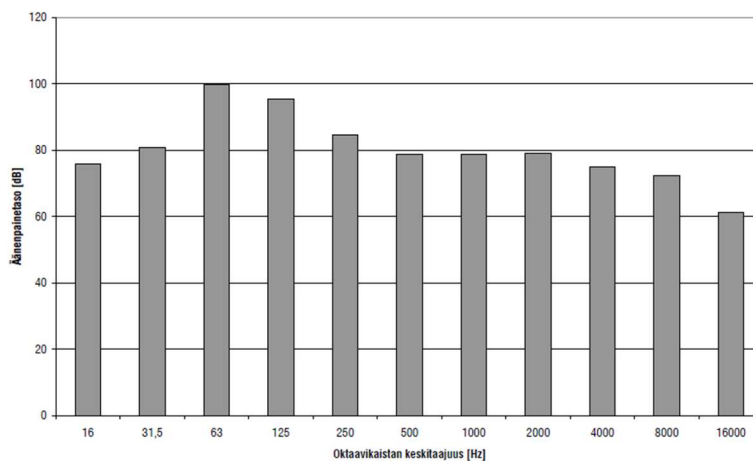
3.5 Taajuuskaista

Äänilähteet tuottavat eri äänenpainetasoja yksittäisillä taajuuksilla, jolloin äänen spektri eli jakauma, jolle taajuudet sijoittuvat, jaetaan pienempiin osiin, joita kutsutaan taajuuskaistoiksi (RIL 243-1-2007, 37). Normaalisti käytössä on joko oktaavikaista tai terssikaista (kuvio 1 ja 2), joka on kolmannesoktaavikaista. Taajuusalueeseen, jolta ääntä mitataan, sisältyy tietty taajuuskaistalla ilmoitettu äänenpainetaso, joka on aina keskitaajuudesta suhteellisen sama osuus. Oktaavikaistalla kaistanleveys on noin 70 %, keskitaajuudesta ja terssikaistalla noin 23 %. Esimerkkinä voi pitää jotain soitinta, jonka äänen korkeus nousee oktaavin niin silloin taajuus kaksinkertaistuu. Vastaavasti, jos äänen korkeus tai sävel nousee kaksi oktaavia, tällöin taajuus nelinkertaistuu. Ihminen aistii yhden oktaavin suhteellisen muutoksen mutta taajuudessa se tuntuu yhtä suurelta

vaikkakin taajuuksien ero on kasvanut jokaisen muutoksen yhteydessä. (Kylliäinen 2006, 29–30).



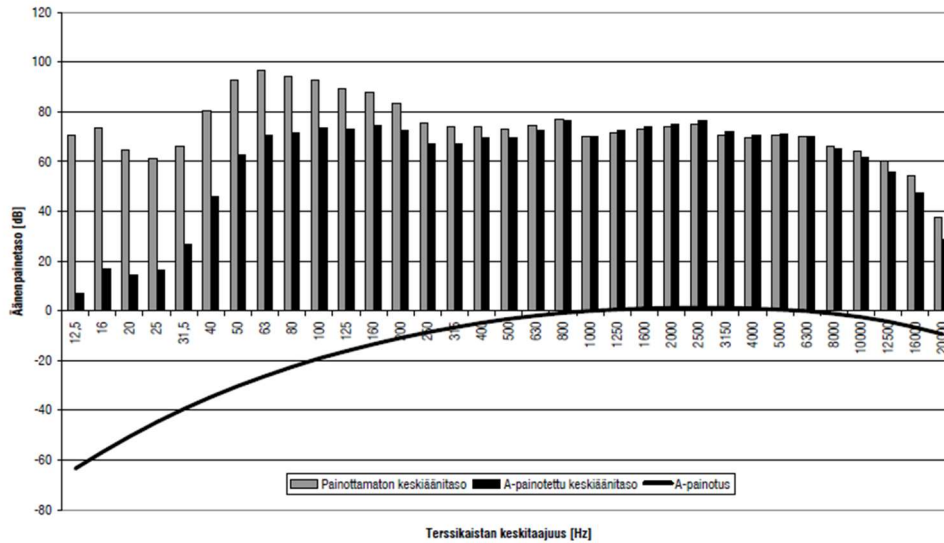
Kuvio 1. Terssikaistan keskitaajuus (Kylliäinen 2006).



Kuvio 2. Oktaavikaistan keskitaajuus (Kylliäinen 2006).

3.6 A-painotus

Äänenpainetasoa koskevassa luvussa puhuttiin äänenpainetasosta L_p , joka kuvaa äänen fyysikaalista voimakkuutta. Taajuusalue, jolla ihmisen kuulon on herkimmillään, sijoittuu 2 000 Hz ja 5 000 Hz väliin. Näiden ylä- ja alapuolella kuulon herkkyysalue madaltuu. Kuviossa kolme ja taulukossa kolme kuuloaistin herkkyys A-painotuksella otetaan huomioon. (RIL 243-1-2007, 39.)



Kuvio 3. Kuuloaistin herkkyys A-Painotuksella (Kylliäinen 2006).

Taulukko 3. Äänenpaine tasot oktaaveittain muutettuna A-painotteiseksi (Kylliäinen 2006).

Oktaavikaistan keskitajuus [Hz]	Äänenpainetaso L_p [dB]	A-painotus [dB]	A-äänitaso L_A [dB]
16	75,7	-56,7	19,0
31,5	80,8	-39,4	41,4
63	99,7	-26,2	73,5
125	95,3	-16,1	79,2
250	84,6	-8,6	76,0
500	78,7	-3,2	75,5
1000	78,8	0	78,8
2000	79	1,2	80,2
4000	75	1	76,0
8000	72,4	-1,1	71,3
16000	61,3	-6,6	54,7

Äänenpaine tasoihin L_p lisätään A-painotus keskitajuuksittain. Äänen voimakkuudella on merkitystä kuulon herkkyyteen. On olemassa myös muitakin painotuksia. C-painotus on näistä muista painotuksista käytetyin, mutta A-painotus on vakiinnuttanut paikkansa, kun sitä käytetään riippumatta äänen voimakkuudesta, joten tämän vuoksi muita painotustapoja ei käytetä tai esitetä. (RIL 243-1-2007, 39.)

3.7 Äänen intensiteetti sekä intensiteettitaso

Äänilähde säteilee äänen intensiteettiä I , joka ilmoitetaan yksikössä $[W/m^2]$. Äänen intensiteetissä määritellään kaavasta 5 ääniteho W pinta-alayksikköä S kohden.

$$I = \frac{W}{S} \quad (5)$$

Äänen intensiteetti lasketaan kaavasta 6, jossa vertailuintensiteettinä on $I_0 = 10^{-12} W/m^2$. (RIL 243-1-2007, 42.)

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad (6)$$

Tehotaso äänilähteelle voidaan määrittää äänen intensiteetin kautta. Äänen intensiteetti suhteen kautta voidaan myös määrittää äänilähteen suunta. Äänen intensiteetin mittaamiseen ja määrittämiseen on ollut jo 1990-luvun alusta saakka kaupallisia laitteita. Standardi ISO-9614-2 on käytetyin ja monipuolisin äänen intensiteetin mittaamiseen oleva standardi. (RIL 243-1-2007, 42.)

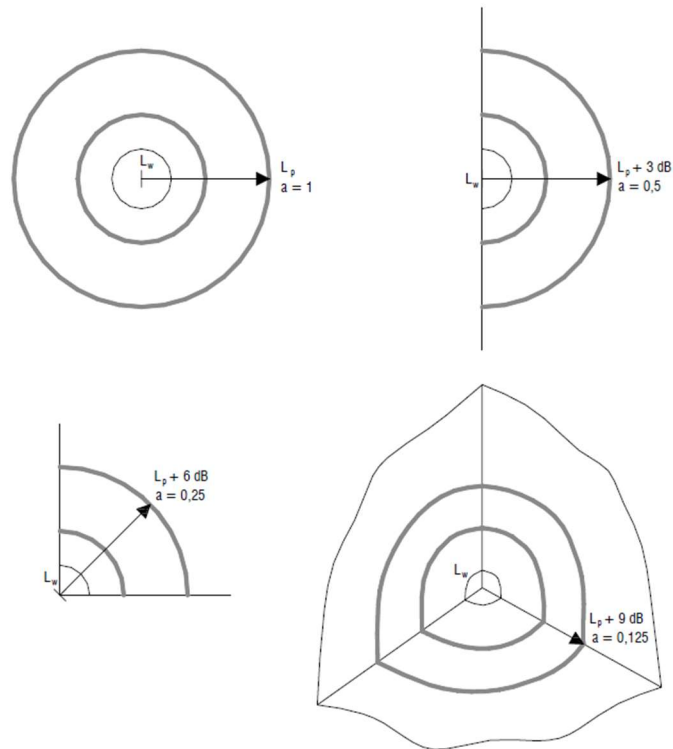
3.8 Äänen etäisyysvaimennus

Äänitehotasoa, jonka äänilähde tuottaa, voidaan käyttää äänenpainetason laskemiseen kiinnostavalla etäisyydellä äänilähteestä. Mikäli äänilähde on piste-mäinen ja se sijaitsee avaruudessa, ääni leviää esteittä joka suuntaan samalla tavalla, eli ääni jakautuu pallon pinta-alalle. Pinta-ala kasvaa sitä mukaan, mitä kauempana äänilähde sijaitsee. Tällaisessa tapauksessa, jossa ääni leviää pallomaisesti joka suuntaan, äänenpainetaso L_p etäisyydellä r [m] lasketaan kaavasta 7. (Kylliäinen 2006, 34.)

$$L_p = L_w - 10 \lg(4\pi r^2) = L_w - 20 \lg r - 11 \quad (7)$$

Kun ääni pääsee leviämään pallomaisesti joka suuntaan, äänipainetaso L_p laskee etäisyyden kaksinkertaistuessa 6 dB (Kylliäinen 2006, 34).

Kuvassa 2 havainnollistetaan, kuinka pistemäisestä äänilähteestä lähtevä ääniteho jakautuu pinta-alalle. Tätä verrataan äänenpainetasoon L_p , joka leviäisi koko pallon pinta-alalle. (Kylliäinen 2006, 35.)



Kuva 2. Pinta-alan vaikutus, jolla ääniteho jakautuu pistemäisestä äänilähteestä (Kylliäinen 2006).

3.9 Absorptio

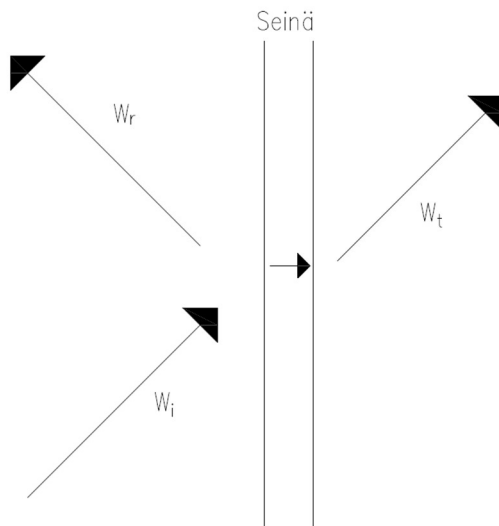
Absorptio ja äänen eristäminen sekoitetaan usein toisiinsa. Absorption vaikutus ääneen tilassa on vaimentava. Absorptiolla viitataan materiaalin pinnan ominaisuudesta, mutta äänen eristävyydellä tarkoitetaan äänen kuulumisen eristämisestä ja rajoittamisesta huonetilasta toiseen. Äänen eristävyys on rakenteiden tiiveyden ominaisuus. (RIL 243-1-2007, 46.)

Absorptioisia pintoja ovat esimerkiksi huokoiset pinnat. Näiden absorptio perustuu siihen, että niihin kohdistuva ääniaalto muuttuu pääsääntöisesti lämpöenergiaksi. Huokoisia pintoja ovat esimerkiksi mineraalivillat, tekstiilit, jotka ovat paksumia sekä ruiskutetut pinnat. (Kylliäinen 2006, 126.)

Kuvassa 3 selviää äänen heijastuminen seinäpinnasta. Osa äänestä heijastuu takaisin huonetilaan, kun taas osa äänestä siirtyy rakenteisiin ja sitä kautta toiseen tilaan. Ääniteho, joka kulkeutuu rakenteen sisällä, muuttuu muotoaan lämpöenergiaksi tai liike-energia äänitehossa muuttuu värähtelyksi. Ääniteho, joka kulkeutuu seinärakenteeseen ja jää siihen, on absorboitunut, kun taas osa voi siirtyä huonetilasta toiseen. (Kylliäinen 2006, 37.)

Absorptiosuhde α , joka on yksikötön, voidaan määrittellä seuraavasta kaavasta 8. (RIL 234-1-2007, 46).

$$\alpha = \frac{W_i - W_r}{W_i} \quad (8)$$

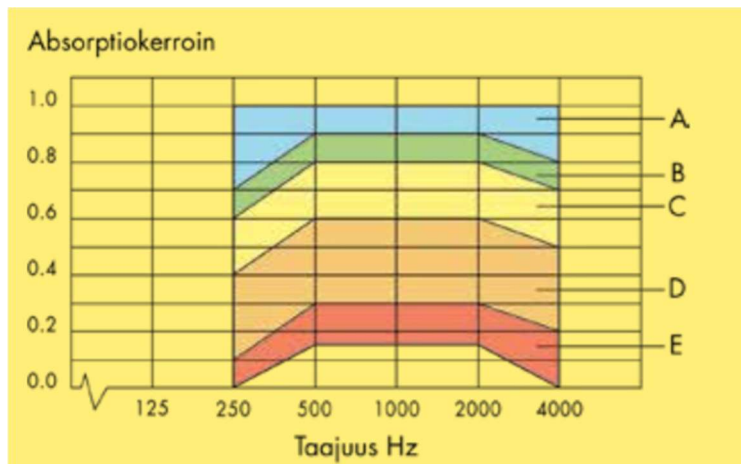


Kuva 3. Ääniteho W_i , joka kohdistuu seinäpintaan ja heijastuu takaisin huonetilaan W_r . Ääniteho W_t rakenteen läpi kulkeutunut ääni. Seinärakenteen sisällä oleva ääni on absorboitunut.

Äänen absorptiosuhteen luku on positiivinen. Arvo, joka absorptiosuhteelle voidaan saada, on nollan ja yhden välillä. Absorptiosuhteiden arvo ei ole vakio, vaan se on riippuvainen äänen taajuudesta. Absorptiosuhde materiaalissa mitataan 0,125 kHz – 4 kHz välillä oktaavikaistoittain keskitaajuuksilla. (Kylliäinen 2006, 37.)

Esimerkiksi Echopon akustiikkalevyille on määritelty absorptiokertoimet 1/1 oktaavisille taajuuskaistoille, jotka ovat 125, 250, 500, 1 000, 2 000 ja 4 000 Hz.

Tulokset mitataan standardin EN ISO 354 mukaan. Akustiikkalevyille on määritetty absorptioluokat, jotka ovat välillä A ja E. A luokan akustiikkalevyt vaimentavat parhaiten ääntä, kun taas luokan E levyt vaimentavat huonoiten. Kuviossa 4 eri vaimennusluokkia. (Saint-Gobain, Ecophon esite, 6.).



Kuvio 4. Absorptioluokat (Saint-Gobain, Ecophon esite).

Kun huonetilassa halutaan alentaa äänen tasoa, hyödynnetään materiaalien absorptiokykyä. Tiloissa, jossa on musiikkiesityksiä tai puhetilaisuuksia, hyödynnetään materiaalien absorptiota, jotta tilat saadaan edellä mainituille tilaisuuksille suotuisiksi. (Kylliäinen 2006, 37–38.)

Huoneakustiikassa absorptioala on yksi tärkeimmistä käsitteistä ja termeistä. Absorptioala on pinta-ala, joka sisältää huoneessa olevat absorptiomateriaalit neliöinä yhteensä. Edellä mainitun alan määritelmä tarkoittaa alaa absorptiomateriaalissa, jonka suhde on yksi. (RIL 234-1-2007, 49.)

3.10 Jälkikaiunta-aika

Jälkikaiunnan mittaamiseen käytetään yksikkö T [s] jolla kuvataan sitä, kuinka nopeasti äänilähteestä lähtenyt äänenpaine laskee mitattavassa tilassa, kun lähde, josta ääni on tuotettu, sammutetaan. Jälkikaiunta-aika saadaan laskettua, kun äänenpaine on laskenut tilassa 60 dB. (RIL 243-1-2007, 50.)

Jälkikaiunta-ajan mittaamiseen käytin opinnäytetyössä standardia SFS-EN ISO 3382-2, joka on selvitetty Karelian omassa toimintaohjeessa jälkikaiunta-ajan mittaamiseen.

Tilassa, jossa pidetään puheita tai muita esityksiä, jälkikaiunta-aika on hyvin lyhyt, jolloin tavut eivät jää soimaan. Mikäli aika olisi pitkä kaiunnan osalta, puhe olisi epäselvää tavujen päällekkäisen soimisen johdosta. Tällöin puhe olisi hyvin epäselvää. (RIL 243-1-2007, 50.) Eri tilojen jälkikaiunta-aikoja on esitetty taulukossa 4.

Tilan jälkikaiunta-ajan suunnittelussa käytetään hyödyksi Sabinen kaavaa (kaava 9), kun määritellään tilan tavoiteltavaan jälkikaiunta-aikaan (T) tarvittava absorptioalaa taajuuskaistoittain, kaavaan tarvitaan absorptioala (A) sekä tilavuus (V). (Kylliäinen 2006, 41.)

$$T = 0,16 * \frac{V}{A} \quad (9)$$

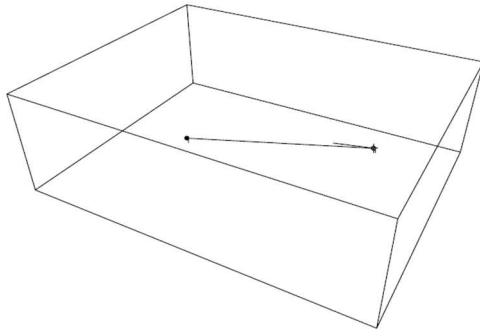
Taulukko 4. Esimerkkejä jälkikaiunta-ajoista eri tiloissa 500 Hz keskitaajuudella (Kylliäinen 2006).

Jälkikaiunta-aika	Esimerkki tilasta
> 5 s	Tampereen tuomiokirkko tyhjänä
2 s...3 s	Suuri aula, jossa ei vaimennusta
1,8 s	Tampere-talon iso sali
1,5 s	Kalustamaton makuuhuone
1,0 s...1,2 s	Teatteri, auditorio
0,6 s...0,8 s	Hyvin suunniteltu luokahuone
0,5 s	Kalustettu makuuhuone
0,3 s...0,8 s	Elokuvateatteri tilavuudesta riippuen
0,2 s...0,3 s	Äänitarkkaamo tilavuudesta riippuen

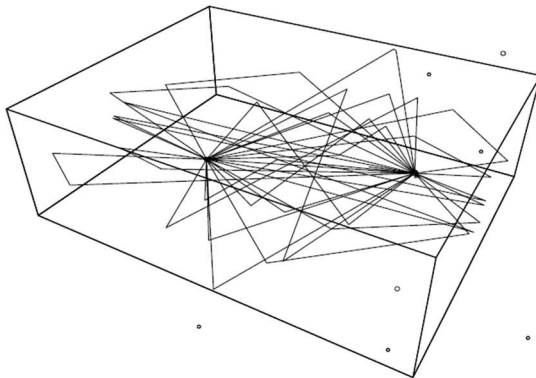
3.11 Huonevaimennus

Kun äänilähde kytketään päälle ja äänilähde aloittaa tuottamaan ääntä, kuulee tilassa oleva ihminen ensimmäisenä äänen suoraan sen lähteestä (kuva 4). Tämän jälkeen saapuvat ihmisen korvaan äänet, jotka ovat ensimmäisiä heijastumia huoneen pinnoista (kuva 5). Kaikista pinnoista heijastuvat äänet korottavat

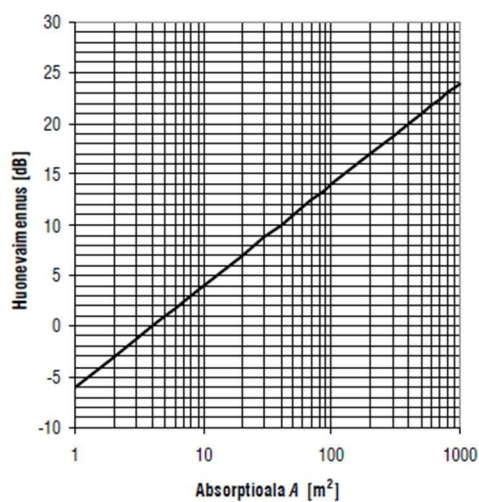
äänenpainetasoa, jos sitä verrataan suoraan tulevaan äänenpainetasoon. Tilanne, jossa huoneessa ei olisi lainkaan pintoja, jotka absorboisivat ääntä ja pinnat heijastaisivat täydellisesti sitä, niin tässä tapauksessa äänenpaineentaso kasvaisi äärettömäksi tilassa, jossa äänilähde sijaitisi (kuva 6) (RIL 234-1-2007, 51.)



Kuva 4. Ääni saapuu ensimmäisenä kuulijalle (Kylliäinen 2006).



Kuva 5. äänen heijastuminen eri pinnoista (Kylliäinen 2006).



Kuva 6. Absorptioalan vaikutus huonevaimennukseen (Kylliäinen 2006).

Tila, jossa absorptiopinta-alaa on enemmän kuin 4m^2 huonevaimennus on positiivinen. Jos taas tilan pinnat olisivat miltei täysin ääntä heijastavia, huonevaimennus olisi tällöin negatiivinen. Huonevaimennus saadaan laskettua kaavasta 10. (Kylliäinen 2006, 43.)

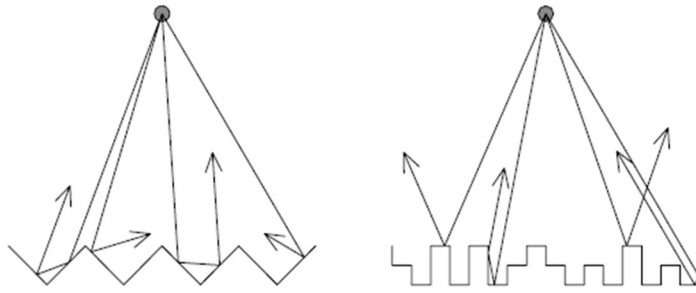
$$10lg * \left(\frac{A}{4}\right) \quad (10)$$

3.12 Äänen heijastuminen pinnan muodoista

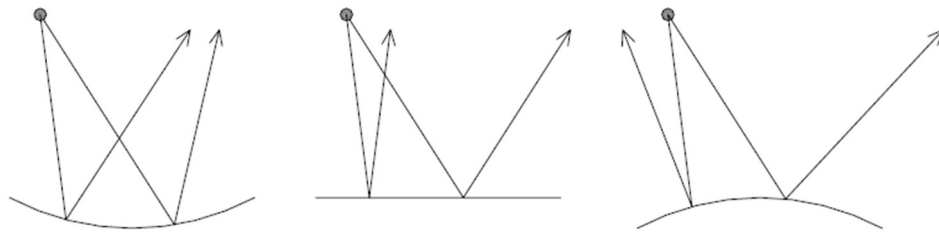
Ääni heijastuu rakenteista eri tavalla eri taajuuksilla. Jos äänen taajuus on matala ja äänen aallonpituus pitkä, täytyy heijastavan pinnan olla suuri, jotta heijastus tapahtuisi. Pienet pinnat eivät aiheuta matalille taajuuksille häiriötä, johon ne kohdistuvat. Taajuus vaikuttaa heijastumiseen ja tämä ilmiö on monimutkainen, mutta tästä voidaan todeta joitain yleisiä periaatteita. (Kylliäinen 2006, 124.)

Heijastuksiin vaikuttaa myös pinnan rakenne sekä sen karkeus. Sileä pinta, johon kohdistuu ääntä, toimii samalla tavoin kuin peili heijastaa valoa. Sileää pintaa rikkomalla voidaan hajottaa ääntä, tällöin laajalla epäsäännöllisellä pinnanmuodon muutoksella pinta hajottaa ääntä laajalla taajuusalueella (kuva 7). Tätä hyödynnetään varsinkin silloin, kun halutaan eron epäsuotuisista heijastuksista, mutta ei haluta kasvattaa absorptiopinta-alaa. Jälkikaiunta-aika laskee, mitä enemmän ääntä hajotetaan, mutta ei niin paljoa kuin siinä tapauksessa, että lisättäisiin absorptiopinta-alaa. Tilassa sijaitsevat kalusteet, kuten konserttisalissa olevat penkit, hajottavat ääntä samalla periaatteella kuin rikutut pinnat. (Kylliäinen 2006, 124.)

Jos tilassa on koveria muotoja, ne ovat heijastusten kannalta vaikeita. Jos äänilähde sijaitsee lähellä koveraa pintaa, niin tällöin kovera pinta saa aikaan äänen keskittymää. Jos äänilähde puolestaan sijaitsee koverasta pinnasta kaukana, niin tällöin pinta hajottaa ääntä. Kupera pinta toimii päinvastoin ääntä hajottavana pintana. Jos näitä kahta muotoa yhdistetään, voidaan niitä hyödyntää ääntä hajottavana pintana (kuva 8).



Kuva 7. Epäsäännöllinen pinnanmuoto ja sen vaikutus ääneen (Kylliäinen, 2006).



Kuva 8. Koveran, tasaisen ja kuperan pinnan vaikutus äänen heijastumiseen (Kylliäinen, 2006).

3.13 Sivutiesiirtymä rakenteissa

Ilmaääneneristävyys luku R'_w mitataan rakennuksen kahden tilan välillä. Se on aina käytännössä alhaisempi kuin R_w luku, joka on mitattu laboratorio-olosuhteissa. Tämä johtuu siitä, että ääntä siirtyy rakenteiden tai ilmastointikanavien kautta tilasta toiseen. (RIL 243-1-2007, 106.)

Sivutiesiirtymällä tarkoitetaan yleensä ottaen kaikkea ääntä, mikä siirtyy suoraan tilojen välisten rakenteiden kautta. Jos ääntä siirtyy reikien tai aukkojen kautta, tällöin kyseessä on rakennus- tai suunnitteluvirhe, joka olisi korjattavissa. Jos äänen kulkeutumisreitti kulkee kahden toisiaan sivuavan huoneen välisen rakenteen kautta, niin tällöin puhutaan rakenteellisesta sivutiesiirtymästä. Sivutiesiirtymää tapahtuu käytännössä aina, koska jos tilassa toimii äänilähde, niin tämä saa ympäröivät rakenteet värähtelemään. Värähtely, joka tapahtuu ilmassa eli ilmaääneneristävyyden värähtely, aiheuttaa runkoääntä joka kulkeutuu lukematto-

mia reittejä pitkin rakenteen sisällä. Sivutiesiirtymiä voidaan rakenteissa ehkäistä tekemällä katkoja tai saumoja, esimerkiksi ilmaväleihin tai mineraalivillalla tai käyttämällä kumikerroksia. (RIL 243-1-2007, 106.)

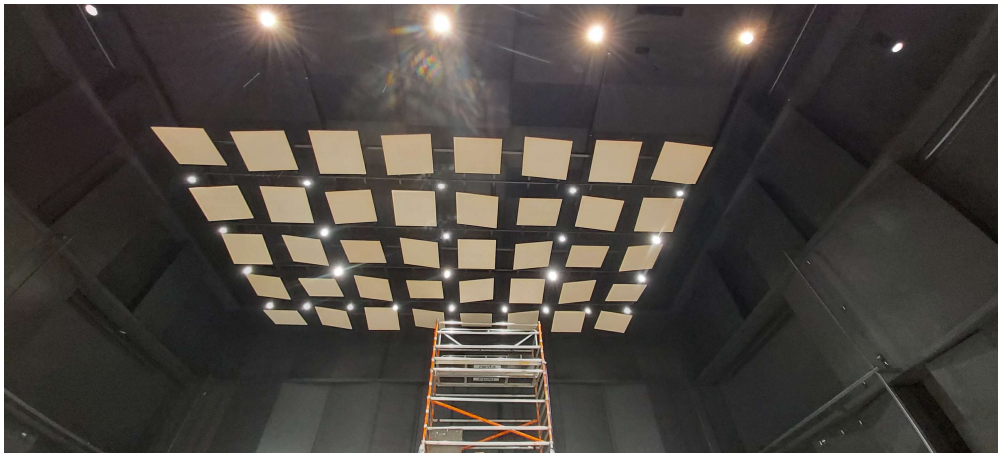
4 Konserttisalin akustiset rakenteet

Konserttisalin huoneakustiikan on suunnitellut A-insinöörit. Akustisista rakenteista kerrotaan akustiikkaselostuksessa Carelia-talon laajennus, akustiikkaselostus, toteutussuunnittelu. Tässä suunnitelmassa konserttisalin akustisista rakenteista on kerrottu seuraavanlaisesti:

- Salissa ei ole kiinteää katsomoa vaan yleisölle on irtotuolit. Penkit ovat kevyesti verhoiltuja varastointisyistä. Kevyen verhoilun takia tuolit eivät vaimenna ääntä vaan ilman yleisöä harjoiteltaessa on jälkikaiuntaikaa vaimennettava muunneltavilla akustisilla rakenteilla.
- Muunneltava akustiikka salissa on toteutettu salin sivuseinille sijoitettuihin moottoroiduilla verhoilla, joiden pinta-ala on yhteensä 180 m². Verhojen etäisyys seinän pinnasta on 100 mm. Verhojen massa on oltava vähintään 300 g/m² ja niiden on laskeuduttava suorana.
- Verhojen edessä on vaakasuuntaiset hyllyt, jotka kääntävät äänen heijastuksen kohti yleisöä. Hyllyt on sijoitettu laskeutuvien verhojen eteen noin 150 mm seinästä irti, hyllyjen leveys on noin 300 mm. Hyllyt tulee tehdä ääntä heijastavasta levystä ja jossa on oltava vähintään 10 kg/m² pintamassaa.
- Konserttisalin katto, etu- ja sivuseinän pinnat toteutetaan diffuosoivilla pinnoilla. Nämä koostuvat kallistetuista levyrakenteista, jotka ulkonevat betoniseinästä kuva 8. Massa levyrakenteen pinnassa on oltava sivu- etu- ja takaseinällä 2,4 m korkeudessa vähintään 20 kg/m², sekä saman verran katon levyrakenteessa. Muilla pinnoilla levyn pintamassa voi olla

massaltaan 10 kg/m^2 . Levypinnat tulee kallistaa noin $7\text{--}10^\circ$ kulmaan salin kantavien seinien suhteessa. Levyn etäisyys kantavasta seinäpinnasta on väillä $100\text{--}400 \text{ mm}$.

- Salissa takaseinän yläosassa akustiikkalevyksi sijoitetaan iskunkestävä akustiikkalevy, esimerkkinä Master Rigid A 20 mm, jonka takana tulee olla 100 mm mineraalivillaa noin 65 m^2 alalla, Takaseinän keskiosaan tulee sijoittaa 40 mm paksua akustiikkamineraalivillaa noin 60 m^2 alalle. Näillä pinnoilla ei ole levyrakenteita.
- Orkesterin yläpuolella on kehikko (kuva 9), johon on sijoitettu heijastinlevyjä, jotka parantavat orkesterin keskinäistä kuuluvuutta. Kehikko on sijoitettu noin 7 m korkeuteen lavasta. Levyjen pintamassa on vähintään 10 kg/m^2 ja levyt ovat kallistettuna $7\text{--}10^\circ$ kulmaan lavan lattian suhteen. (A-insinöörit 2021, 18).



Kuva 9. Konserttisalin lavan yläpuolinen rakenne (Kuva: Heikki Pitkänen).

5 Konserttisalin akustiset mittaukset

5.1 Ilmääneneristävyyden mittaaminen

Ilmääneneristävyyden mittauksen suoritin 30.11.2021 konserttisalin ja sitä ympäröivien käytävien välisistä rakenteista. Konserttisalia ympäröivien varastojen

tai soitonopetustilojen välistä ilmaääneneristävyyttä ei mitattu. Mittaukset suoritettiin konserttisalin ja käytävien K112, K114 ja K102 pääaulan välillä. Konserttisalin äänitasoeroluvun $D_{nT, w}$ tavoitearvoiksi oli akustiikkasuunnitelman mukaan annettu salin K111 ja käytävien välille ≥ 44 dB.

Ilmaääneneristävyydellä tarkoitetaan puheen, musiikin tai muun äänilähteen tuottaman äänen siirtymistä tilasta toiseen huonetilaan. Ilma värähtelee äänilähteen tuottaman äänen seurauksena ja värähtely siirtyy rakenteisiin tilassa, jolloin rakenteen värähtely saa toisen tilan ilman värähtelemään. Tällöin toiseen huonetilaan siirtyy äänitehoa. (Kylliäinen 2006, 47.)

Äänitasoero D_{nT} on standardoitu äänitasoero, joka ilmaisee äänenpainetasoeron mitattavien huoneiden välillä tietyillä taajuuskaistoilla. Standardoitu äänitasoeroluku $D_{nT, w}$ on mittasuure, joka on laskettu 100–3150 Hz välillä mitatuista äänitasoeroista D_{nT} . (Ympäristöministeriö 2018,8)

Ilmaääneneristävyyden mittauksessa noudatin Karelia-Ammattikorkeakoulun toimintaohjetta ilmaääneneristävyyden mittaamista varten. Ohjeessa noudatetaan standardia SFS-EN ISO 16283-1. Mittauslaitteena käytössä oli Nor140-äänimittauslaite, Nor280-vahvistin sekä pallokaiutin Nor276.

Ennen ilmaääneneristävyyden mittaamista mittalaite kalibroitiin Karelia-Ammattikorkeakoulun toimintaohjeen ”Äänimittauslaitteen Norsonic Nor140 kalibrointi” mukaisesti.

Mittauksessa määritin lähettäväksi huoneeksi konserttisalin ja vastaanottavaksi tilaksi käytävän. Molemmista tiloista mittasin taustamelun sekä jälkikaiun. Ilmaäänimittauksia tein tilojen välillä kolmella eri kaiutin sijoituksella. Mittauksilla sain seuraavanlaiset tulokset:

- Konserttisalin K111 ja käytävän K112 välisen ilmaääneneristävyyden $D_{nT, w}$ tulokseksi tuli 50 dB mikä täyttää tavoitearvoksi annetun 44dB:n arvon.
- Konserttisalin K111 ja käytävän K114 välinen $D_{nT, w}$ oli 46 dB, joka myös on suurempi kuin akustiikkasuunnitelmassa annettu tavoitearvo 44dB.

- Konserttisalin K111 ja pääaulan K102 välinen ilmaääneneristävyytluku oli 44 dB, joka täyttää juuri tavoitearvon 44dB.

Mittausten tuloksissa täytyy ottaa huomioon mittausten toistettavuus. Vaikkakin arvot täyttivät niille annetun rajan, voi uusintamittauksissa tulla heittoa suuntaan tai toiseen, joten tuloksia täytyy tarkastella kriittisesti.

5.2 Jälkikaiunta-ajan mittaaminen

Jälkikaiunta-ajan mittaamiseen käytin Karelia-Ammattikorkeakoulun toimintaohjetta. Ohjeessa noudatetaan standardia SFS-EN ISO 3382-2, sekä lisäksi standardia SFS-EN ISO 3382-1, joka on standardi jälkikaiunta-ajan mittaamiseen esiintymistiloissa.

Jälkikaiunta korostuu siinä, että se kulkee yhdessä esiintyjän tuottaman puheen tai musiikin selvyyden kanssa. Kaikkien tilojen, akustisesti vaativien ja vähemmän vaativien suunnittelussa käytetään yhtenä kriteerinä jälkikaiunta-aikaa (Kylläinen 2006, 117). Jälkikaiunta-aikoja on esitetty taulukossa 4, luvussa 3.10

Mitattavan tilan lähtökohta on näkyvillä kuvassa 10. Tilassa ei ollut mitaustilanteessa yleisöä eikä penkkejä, jotka olisivat toimineet jälkikaiunnassa vaimentavina tekijöinä.



Kuva 10. Salin katsomotila (Kuva: Heikki Pitkänen).

Konserttitalin K111 jälkikaiunta-aikaa mittasin kahdella eri kaiutin sijoituksella, jotka olivat lavalla oletetuissa äänilähteissä; tässä tapauksessa lavan molemilla reunoilla (kuva 11). Yhtä äänilähteen sijoitusta kohtaan oli kuusi mikrofoni sijoitusta. Äänenmittauslaite oli sijoitettu telineeseen, joka oli noin 1,2 m korkeudella lattiapinnasta, oletetun kuulijan korvan korkeudella. Mittalaitteen käytössä oli Nor140-äänimittauslaite, Nor280-vahvistin sekä pallokaiutin Nor276.



Kuva 11. Kaiuttimen sijoitus jälkikaiunnan mittaamisessa (Kuva: Heikki Pitkänen).

Konserttitalin muuttuvien akustisten rakenteiden takia mittaukset suoritin niin, että ensin mittasin salin jälkikaiunta-ajan akustiikkaverhot ylhäällä ja tämän jälkeen siten, että verhot oli laskettu alas. Jälkikaiunta-ajan laskin 250, 500, 1 000 ja 2 000 Hz keskiarvolla.

Ensimmäisen mittauksen jälkikaiunta-ajaksi sain 1,86 sekuntia verhojen ollessa ylhäällä. Toisen mittauksen tein samoilla kaiutin sijoituksilla akustiikkaverhojen ollessa laskettuna alas. Tämän mittauksen jälkikaiunta ajaksi tuli 1,64 sekuntia.

Akustiikkasuunnitelmassa jälkikaiunta (T) tavoitearvoksi oli määritelty 1,9...1,2 sekuntia. Tuloksia verrattaessa tavoitearvoon voidaan todeta, että jälkikaiunta-aika täyttää annetut tavoitearvot.

Verhojen ollessa ylhäällä voidaan tuloksista huomata, että jälkikaiunta-aika on pidempi kuin että verhot olisivat laskettuna alas. Tästä voidaan päätellä niiden toimivuus, eli verhot vähentävät salin jälkikaiunta-aikaa. Jälkikaiunta-aikaa olisi mielenkiintoista verrata mittaukseen, joka olisi tehty ilman mitään akustisia rakenteita. Näin saataisiin selville, kuinka paljon ja millä tavalla pinnan muodon muutokset ja absorptioivat pinnat vaikuttavat salin toimivuuteen.

Tuloksia tarkastellessa kuitenkin täytyy ottaa huomioon se seikka, että mittaustilanteessa ei ollut paikan päällä yleisöä, orkesteria eikä muutakaan äänen absorptioon vaikuttavaa tekijää, joten jälkikaiunta-aika voi olla todellisuudessa lyhyempi kuin mittaustilanteessa.

5.3 Äänen intensiteettimittaus

Äänen intensiteettimittausta käytin opinnäytetyössä yksittäisen rakenneosan ääneneneristävyyden mittaamiseen. Mittaustapa on koululle uusi ja tästä ei aikaisemmin ole tietävästi Karelian osalta tehty opinnäytetyötä. Äänen intensiteetin mittaamiselle pyyhkäisymenetelmälle on olemassa standardi ISO 9614-2:1996 ”Acoustics. Determination of sound power levels of noise sources using sound intensity. Part 2: Measurement by scanning (ISO 9614-2:1996)”.

Kun mitataan äänenpainetasoa yhdestä pisteestä yhdellä mikrofonilla, saadaan selville vain sen kohdan äänenpainetaso, joka siinä vallitsee. Tällä mittaustavalla ei saada selville sitä, että mistä suunnasta ääni tulee. Tätä varten on kehitetty menetelmä, joka mittaa äänen intensiteettiä. (RIL 243-1-2007, 67.)

Kaupallisesti on ollut saatavilla jo 1980-luvun alusta saakka kaksoismikrofonianturi, jolla saadaan mitattua äänen intensiteettiä. Mittausanturissa on kaksi lähikäin olevaa mikrofonia, jotka ovat vaihesovitetut. Näiden mikrofonien äänenpainesignaaleista voidaan laskea äänen intensiteetti. 1990-luvun alussa äänen intensiteettimenetelmä standardoitiin ja sitä sovelletaan erikoistapauksiin standardeissa ISO 15186-1, ISO 15186-2 ja ISO 15186-3. (RIL 243-1-2007, 67.)

Äänen intensiteettimenetelmää voidaan hyödyntää niin kentällä kuin laboratoriossa mitattaessa. Menetelmällä saadaan muodostettua äänensäteilykuva rakenteista. Mittaustapaa voidaan hyödyntää seuraavissa tapauksissa:

- Kun halutaan paikantaa näytteestä äänen vuoto- tai säteilykohtia.
- Voidaan määrittää matalien taajuuksien kuten 50 Hz-160 Hz ääneneristävyyttä. Äänenpainemittauksella näissä taajuuksissa mittausepävarmuus on suuri.
- Intensiteettimittausmenetelmällä voidaan määrittää ilmaääneneristävyyttä $R_{i,w}$ tietyistä rakennusosista kentällä, joka on irrotettu muista rakenteista. Tällöin voidaan määrittää ja arvioida eri pintojen osuus äänestä, joka tulee huoneesta.
- Rakenteissa tapahtuvan sivutiesiirtymän pinta voidaan osoittaa. (RIL 243-1-2007, 67.)

Äänen intensiteettimittauksen suoritin äänimittarilla Nor150, johon oli kytkettynä intensiteetti probe (kuva 12). Vahvistimena Nor280 sekä äänilähteenä pallokaiutin Nor276. Mittari kalibroitiin akustisella kalibraattorilla sekä äänen vaihekalibraattorilla.



Kuva 12. Nor150 ja intensiteetti probe (Kuva: Heikki Pitkänen).

Äänimittariin asetin mitta-alueet, jotka vastasivat alueita, jotka määritin mitattavalle pinnalle. Mitattavan pinnan, tässä tapauksessa konserttisalin ja aulan välisen oven, joihin alueisiin, jotka olivat 0,6 metriä leveitä ja 1,25 metriä korkeita (kuva 13).

Konserttisalin puolelle sijoitin äänilähteen ja aulan puolelta mittasin pyyhkäisy-menetelmällä jokaisen lohkon erikseen, pysty sekä vaakasuunnassa. Pyyhkäisy-menetelmä on kuvattu tarkemmin standardissa ISO 9614-2:1996.



Kuva 13. Konserttisalin ja aulan välinen ovi jaettu lohkoiksi (Kuva: Heikki Pitkänen).

Äänimittarin tuloksia tulkitsin Nor850 ohjelmalla, jossa käytin lähettävän huoneen äänenpainetasona ilmaääneneristävyyden mittauksesta saatuja lähtöarvoja. Lisäksi syötin intensiteettimittarista Nor150 saadut arvot Nor850 ohjelmaan. Tästä ohjelmasta sain standardin 15186–2 mukaan $R'lw$ tulokseksi 33dB. $R'lw$ on ilmaääneneristävyys tietystä rakennusosasta kentällä mitattuna. Ovelle oli annettu suunnitteluarvoissa äänen eristävyudeksi R_w 46dB.

6 Pohdinta

6.1 Opinnäytetyön prosessi

Opinnäytetyötä olen tehnyt jo kevästä 2021 asti. Aluksi kartoitettiin työssä käytettäviä menetelmiä. Testauksia suoritin Karelian tiloissa ensin scan&paint-mittaustekniikalla, josta sittemmin luovuttiin. Mittaustekniikoiksi valikoituivat ilmaääneneristävyys sekä jälkikaiunta ja uutena myös äänen intensiteetin mittaus eri tilojen välillä.

Äänen intensiteettimittaus oli minulle sekä muille koulun henkilökunnalle täysin uusi tapa mitata ja koulutusta tämän suorittamiseen sain jonkin verran. Itseopiskelua tekniikan suhteen oli paljon, koska kenelläkään ei aikaisempaa kokemusta juuri ollut.

Konservatorion mittaukset oli tarkoitus tehdä jo kesän 2021 aikana, mutta itsenäni riippumattomista syistä mittaukset viivästyivät lokakuulle 2021 asti. Mittauksia suorittaessa tuli hieman ongelmia niin intensiteetin kuin myös äänen eristävyyden kanssa, joten mittauskertoja tein kaksi. Toiselle kerralla täydensin ilmaääneneristävyyden mittauksia sekä tein äänen intensiteettimittauksen uudestaan. Opinnäytetyöraporttia pääsin kirjoittamaan kunnolla vasta vuoden 2022 alusta.

Opinnäytetyön tekeminen antoi hyvä kuvan akustisesta suunnittelusta haastavassa kohteessa, sekä muuttuvien akustisten rakenteiden toimimisesta ja niiden toteutuksesta.

6.2 Tutkimustulosten arviointi

Ilmaääneneristävyyden tuloksia analysoidessa voi todeta, että ilmaääneneristävyys täyttyy konserttisalin ja ympäröivien käytävien osalta. Toki täytyy todeta myös se, että mittauksen toistettavuudessa voi olla eroja ja näin ollen tulokset voivat poiketa toisistaan.

Konserttisalin jälkikaiunta-ajan mittaukset toivat toivotun tuloksen. Tilasta sai kaksi selkeää mittausta, jotka täyttivät annetun raja-arvon. Lisäksi mittaustuloksista näkyi selvästi se, että konserttisalin sivuilla sijaitsevilla akustiikkaverhoilla oli vaikutusta jälkikaiunta-aikaan. Tuloksia tulkitessa täytyy huomioida se, että tilassa ei ollut yleisöstä tai muuta ääntä absorptoivaa tekijää, joten jälkikaiunta-aika voi olla todellisuudessa saatuja mittaustuloksia alhaisempi.

Verrattaessa minun sekä virallista mittausta voi huomata, että tulokset ovat hyvin yhteneväiset. Virallisen raportin mukaan verhot laskettuna jälkikaiunta-ajaksi on saatu 1,5 sekuntia ja verhot ylhäällä jälkikaiunta-aika oli 1,8 sekuntia. Minun mittaustulokseni antoivat ensimmäiselle mittaukselle 1,64 sekuntia ja jälkimmäiselle 1,86 sekuntia, joten minun mittaustulostani voi näin ollen pitää onnistuneena.

Äänen intensiteetin mittaus oli uusi tapa mitata tiloja erottavaa rakennetta, joten tulosten luotettavuutta voidaan pitää vähäisenä. Tulosten perusteella ei pidä

tehdä päätelmiä oven ääneneristävydestä. Vaikka mittaustapa oli uusi ja tästä ei ole vielä paljoa kokemusta saatu, todettakoon se, että mittaustapa voi olla hyvinkin käytännöllinen.

Mittaustuloksen ja suunnitteluarvon poikkeavuuteen syynä voi olla mittauksen epäonnistuminen tai syynä voisi olla myös sivutiensiiirtymänä tulleet äänivuodot. Syytä on myös ottaa huomioon se, että oven molemmin puolin tiiliverhoilun takana oli ikkunapinnat, joista on voinut tulla äänivuotoa.

Vaikka en osalta mittauksia saanut toivottua tulosta, niin työstä ja tähän saadusta koulutuksesta sekä materiaalista on hyötyä tulevaisuudessa oppilaitokselle sekä itselleni.

7 Lähteet

- A-insinöörit, 2021. Carelia-talon laajennus. Akustiikkaselostus, toteutussuunnittelu. A-insinöörit.
- Karjalainen, M. 2000. Hieman akustiikkaa. Teknillinen korkeakoulu.
- Kylliäinen, M. 2006. Talonrakentamisen akustiikka. Tampereen Teknillinen Yliopisto, Rakennetekniikan laitos.
- RIL-243-2007. 2007. Rakennusten akustinen suunnittelu, akustiikan perusteet. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.
- RT-07-10881. Huoneakustiikka.
- Saint-Gobain Finland Oy. 2022. Ecophon Huoneakustiikka, ohjeita huoneakustiikan toteutukseen – Esite https://www.ecophon.com/globalassets/media/pdf-and-documents/fi/esitteet/ecophon_huoneakustiikkaesite_210x280_2019_n10.pdfSFS. 2009. 16.2.2022
- SFS-5907. Rakennusten akustinen luokitus. Suomen Standardisoimisliitto SFS.
- SFS-EN ISO 15186-1. Acoustics, Measurement of sound insulation in buildings and of building elements using sound intensity. Part 1 Laboratory measurements. Suomen Standardisoimisliitto SFS.
- SFS-EN ISO 15186-3-2002. Acoustics, Measurement of sound insulation in buildings and of building elements using sound intensity. Part 3 Laboratory measurements at low frequencies (ISO 15186-3-2002). Suomen Standardisoimisliitto SFS.
- SFS-EN ISO 16283-1. Acoustics. Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements. Part 1: Airborne sound insulation. Suomen Rakentamistandardointiliitto SFS ry.
- SFS-EN ISO 3382-1. Acoustic measurement of room acoustic parameter part 1 performance spaces.
- SFS-EN ISO 3382-2. Directions for operation - measurement of reverberation time. Suomen Standardisoimisliitto ry.
- SFS-EN ISO 717-2:2020. Rating of sound insulation in buildings and of building elements. Part 1: Airborne sound insulation
- SFS-EN ISO 9614-1. Acoustics. Determination of sound power levels of noise sources using sound intensity. Part 1: Measurement at discrete points (ISO 9614-1:1993). Suomen Standardisoimisliitto SFS.
- SFS-EN ISO-15186-2-2003. Acoustics, Measurement of sound insulation in buildings and of building elements using sound intensity. Part 2 Field Measurement (ISO 15186-2-2003). Suomen Standardisoimisliitto SFS
- SIT 05-310038. Huoneakustiikka.
- Ympäristöministeriö, 2018. Ääniympäristö, Ympäristöministeriön ohje rakennusten ääniympäristöstä. Helsinki: Ympäristöministeriö.



**Ilmäänänen, jälkikaiunta-ajan ja äänen intensiteetin
mittausraportti**

Joensuun Konservatorio

Konserttisali K111

Mittaukset lokakuu 2021

Kohteen tiedotOsoite

Yliopistonkatu2, 80100, Joensuu

Tilaaaja

Lujatalo Oy, projektipäällikkö Erno Olkkonen

Tavoitteet

Mittauksen tavoite oli mitata ilmaääneneristävyys sekä jälkikaiunta-aika konserttisalista K111 ja verrata niitä annettuihin suunnitteluarvoihin sekä mitata salin ja aulan välisen oven ääneneristävyys äänen intensiteettimenetelmällä.

Tekijä

Heikki Pitkänen

Mittaukset

Lokakuu 2021

Kohteen kuvaus

Kohde on Joensuun uuden konservatorion konserttisali, joka rakennettiin Carelia-rakennuksen yhteyteen. Mittauksessa tutkittiin konserttisalin ja sen viereisten käytävien ilmaääneneristävyyttä sekä jälkikaiunta-aikaa konserttisalissa

Konserttisalille oli määritelty akustiikkasuunnitelmassa seuraavallaiset suunnitteluarvot:

Äänitasoero $D_{nT, w}$

Käytävälle ≥ 44 dB

Jälkikaiunta-aika T

1,9...1,2 s

Salin oven R_w

46dB

Menetelmät

Konserttisalin ja käytävän väliseinän äänitasoeroluku $D_{nT, w}$ mittauksessa käytössä oli standardin SFS-EN ISO 16283-1, sekä tulosten esittelyssä käytössä oli standardin SFS-EN ISO 717-1. Jälkikaiunta-ajan mittauksessa tulokset ja raportointi SFS-EN ISO 3382-2 mukaisesti. Standardin mukaan tehtävät mittaukset vaativat edellyttävät, että mittalaitteet täyttävät luokan 1 vaatimukset.

Ilmaääneneristävyysmittaus konserttisalin ja viereisten käytävien välillä. Mittauksen kulussa käytettiin Karelia-ammattikorkeakoulun toimintaohjetta ilmaääneneristävyysmittaukselle. Konserttisalia pidin mittauksessa lähettävänä tilana ja käytäviä vastaanottavina tiloina.

Jälkikaiunta-ajan mittaus konserttisalista kahdella eri kaiutin sijoituksella, jotka sijaitsivat esiintymislavan reunoilla. Jälkikaiunta-aikaa mitattiin 6 eri mikrofonisijoituksella, joka kattoi alan, jolla yleisö on. Konserttisalissa on muuttuvat akustiset rakenteet, tässä tapauksessa sivuverhot, jotka voidaan laskea salin sivuseinille. Jälkikaiunta-ajan mittaus verhot ylhäällä sekä verhot alhaalla, eli kaksi mittausta. Mittalaitteena käytössä oli Nor140 – äänimittauslaite, Nor280 vahvistin sekä pallokaiutin Nor276.

Äänen intensiteetin mittauksen tein salin ja aulan erottavasta ovesta. Mittauksessa pyrin selvittämään erillisen rakenneosan ääneneristävyttä. Mittausmenetelmänä standardi ISO 9614-2:1996. Mittalaite NOR150, äänilähde Nor276 sekä vahvistin Nor280

Huomioitavaa

Äänen intensiteettimittauksen tuloksia (Liite 2) ei voi pitää luotettavana mittauksen ja tuloksen tulkinnan epävarmuuden takia.

Mittaustulokset**Ilmaäänimittaukset tilasta K111**

Äänitasoeroluku $D_{nT, w}$

K112 käytävä – K111 sali

$D_{nT, w}$ (C; Ctr) = 50 (-2; -8) dB

K114 käytävä – K111 sali

$D_{nT, w}$ (C; Ctr) = 46 (0; -2) dB

K102 pääaula – K111 sali

$D_{nT, w}$ (C; Ctr) = 44 (-1; -3) dB

Jälkikaiunta-aika tilasta K111

Akustiset verhot ylhäällä

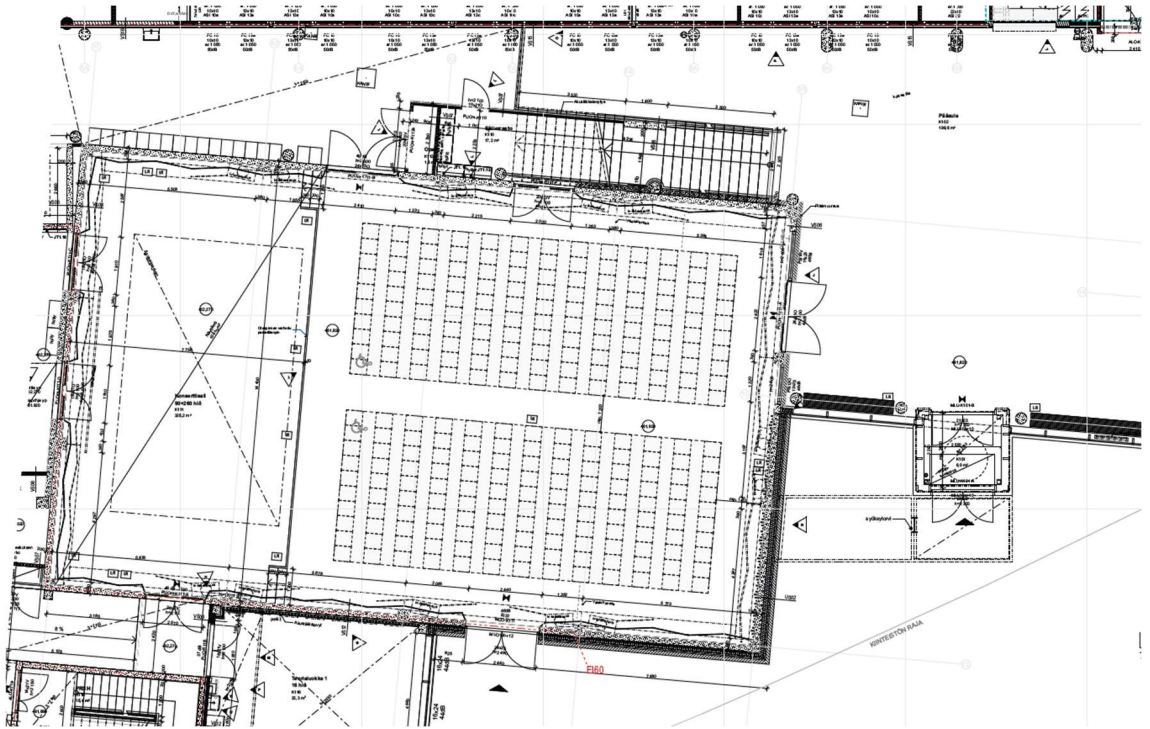
250 Hz	2.05 s
500 Hz	1,97 s
1000 Hz	1,8 s
2000 Hz	1,61 s

Keskiarvo 1,86 s

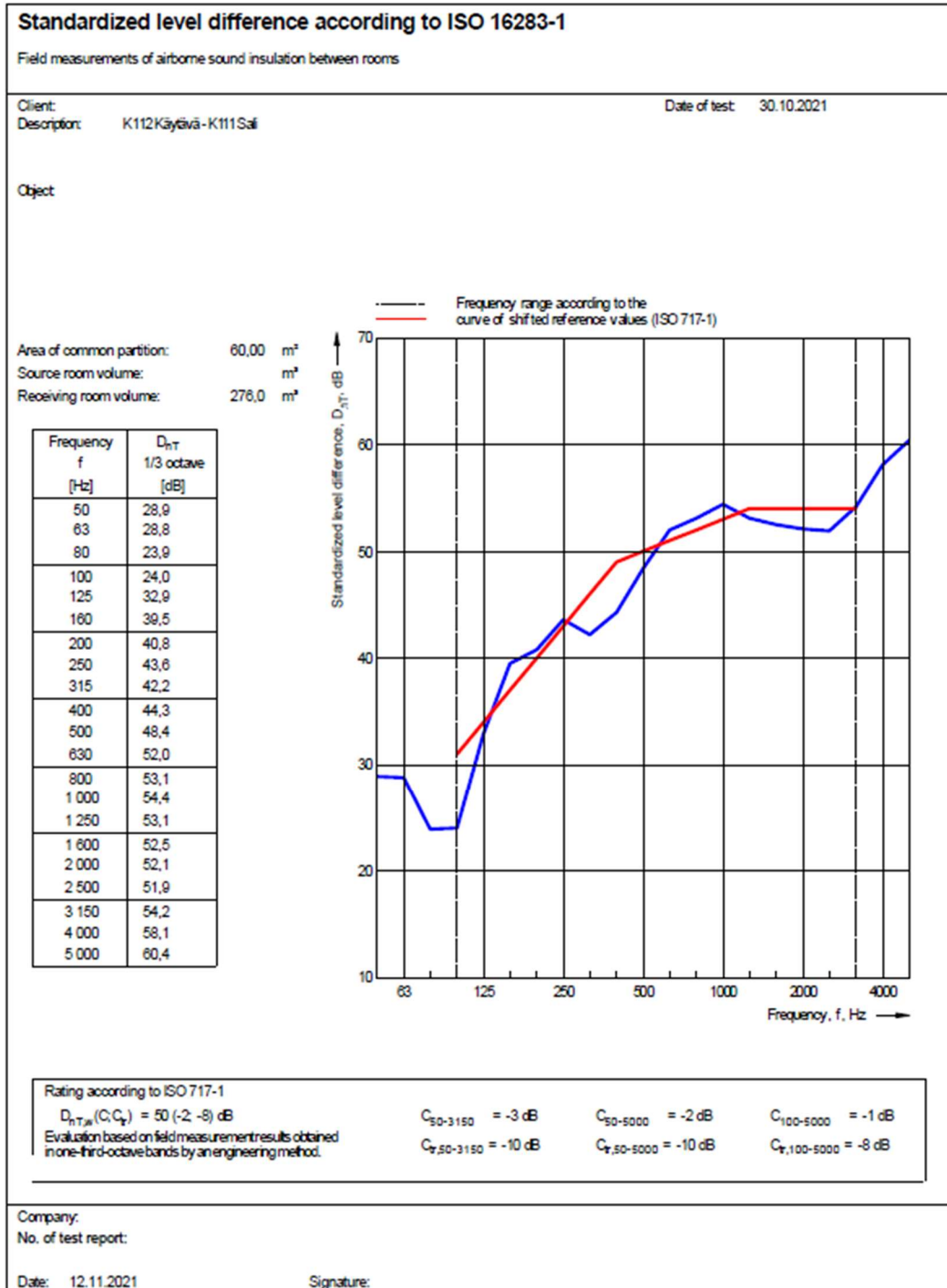
Akustiset verhot alhaalla

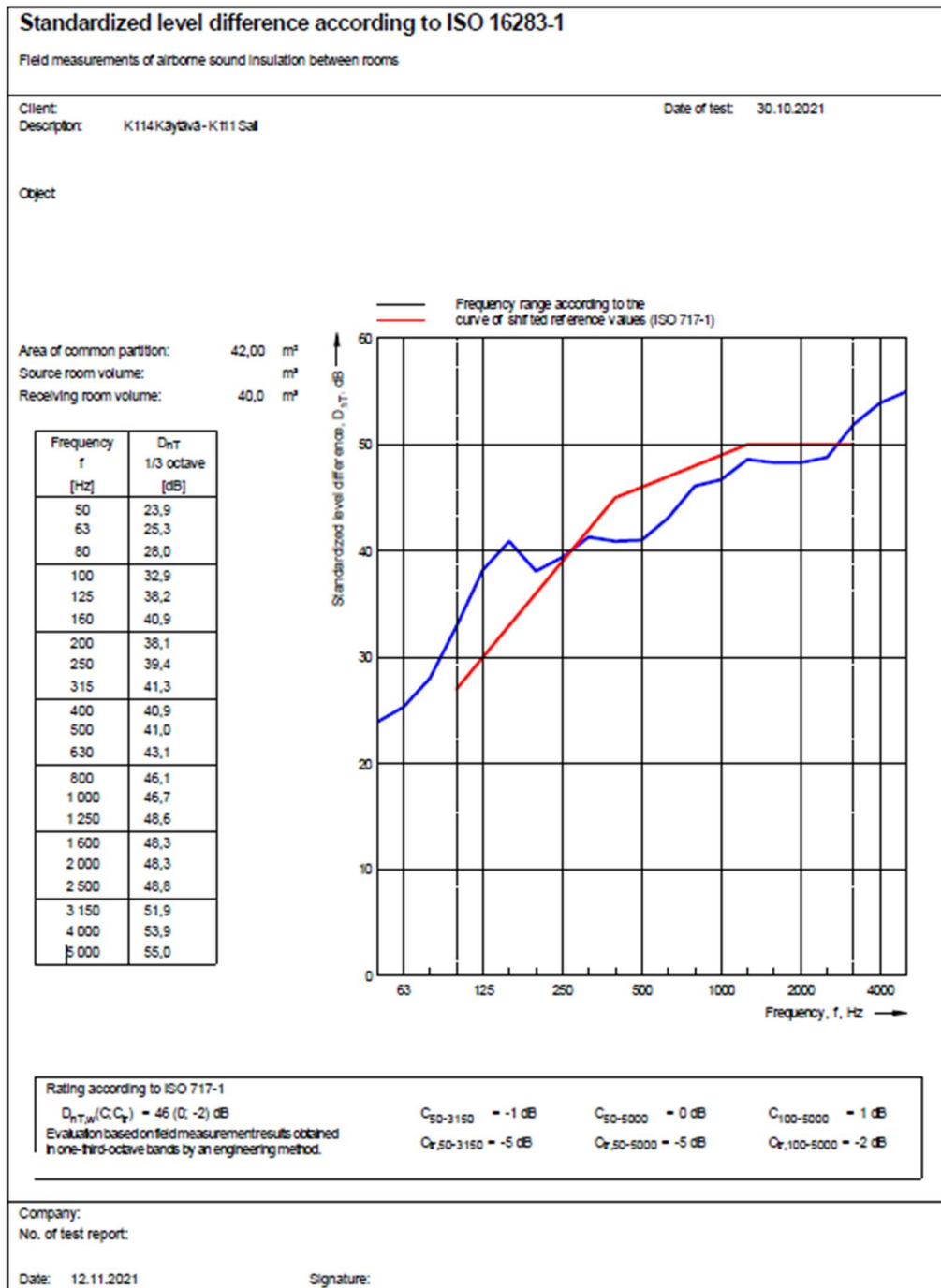
250 Hz	2.01 s
500 Hz	1,81 s
1000 Hz	1,48 s
2000 Hz	1,24 s

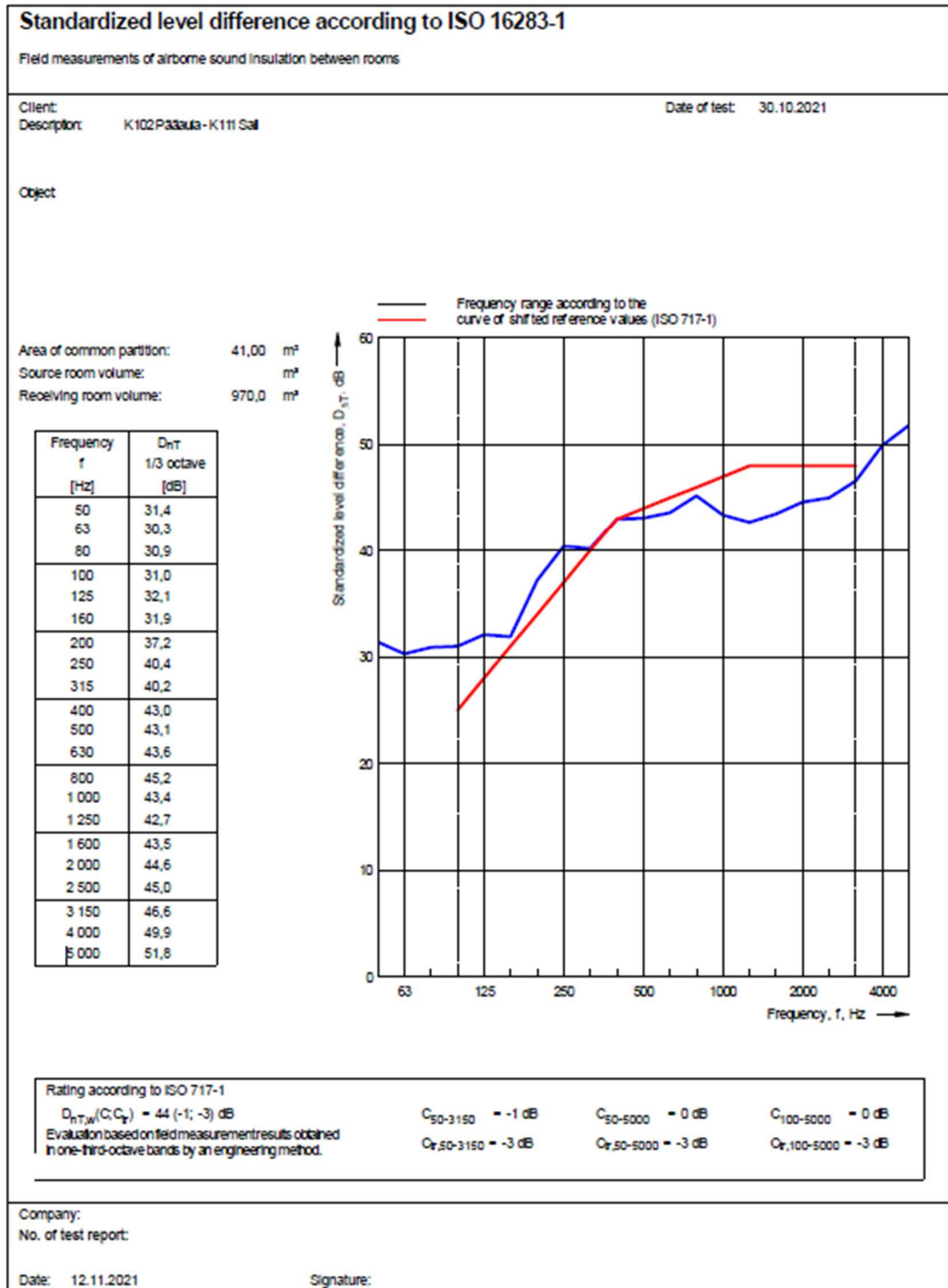
Keskiarvo 1,64 s



Ilmaäänimittausten tulokset







Intensiteettimittauksen tulokset Sali K111 - Aula K102 välinen ovi.

NOR850-ohjelmasta saadut tulokset

Apparent intensity sound reduction index according to ISO 15186-2

Measurement of sound insulation in buildings and of building elements using sound intensity

Rating according to ISO 717-1

 R'_{w} (C;C_{tr})= 33 (0 ; -3) dB

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

C₅₀₋₃₁₅₀= dB C₅₀₋₅₀₀₀= dB C₁₀₀₋₅₀₀₀= dBC_{tr,50-3150}= dB C_{tr,50-5000}= dB C_{tr,100-5000}= dB

Sum of unfavourable deviations: 22,0 dB

Max. unfavourable deviation: 5,2 dB at 400 Hz

Frequency [Hz]	R' _l [dB]	L _{r,1} [dB]	L _{r,2} [dB]	S _{1,10} [dB]	F _{r,10} [dB]	u. Dev. [dB]		
50		70,2	-52,4	26,4	0,0			
63		76,3	-50,3	27,4	8,6			
80	17,8	84,0	57,2	28,9	9,4			
100	16,7	86,8	61,1	31,4	6,6			
125	25,9	88,5	53,6	30,0	10,7			
160	26,2	89,4	54,2	32,1	9,4			
200	24,4	91,9	58,5	29,4	6,9			
250	24,5	91,5	58,0	32,2	6,4	1,5		
315	24,7	88,3	54,6	34,7	5,0	4,3		
400	26,8	88,2	52,4	35,9	5,5	5,2		
500	30,2	88,9	49,7	35,9	6,8	2,8		
630	32,8	88,5	46,7	37,0	8,2	1,2		
800	35,1	89,1	45,0	37,6	7,2			
1000	35,3	88,7	44,4	38,2	8,9	0,7		
1250	35,6	85,6	41,0	40,4	8,7	1,4		
1600	35,1	86,4	42,3	39,5	7,7	1,9		
2000	35,3	86,1	41,8	37,7	7,8	1,7		
2500	35,7	84,2	39,5	37,9	6,8	1,3		
3150	37,0	82,9	36,9	38,3	6,1			
4000	39,9	83,3	34,4	39,7	6,2			
5000	42,6	82,4	30,8	40,6	6,4			

Receiving room volume: 200 m³Source room volume: 3542 m³Area S of separating element: 5,76 m²Area SM of meas. Surface: 11,52 m²

Apparent intensity sound reduction index according to ISO 15186-2

Measurement of sound insulation in buildings and of building elements using sound intensity

Client:
Description:

Date of test: 25.3.2022

Object:

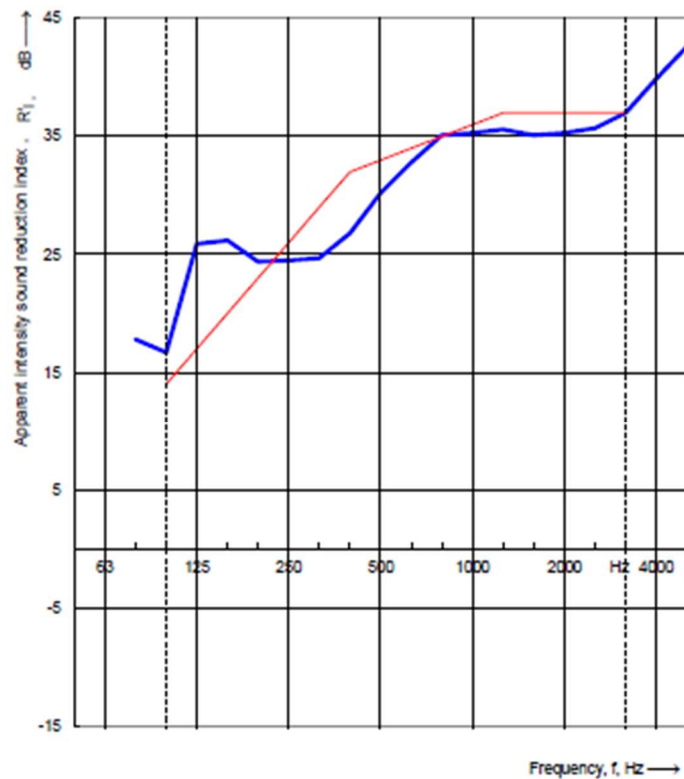
Source room:
Condition:
Type:
Location:

Receiving room:
Condition:
Type:
Location:

Area SM of meas. surface: 11,52 m²
Area S of separating element: 5,76 m²
Source room volume: 3542 m³
Receiving room volume: 200 m³

----- Frequency range according to the
— curve of shifted reference values (ISO 717-1)

Frequency f [Hz]	R _i 1/3 octave [dB]
50	
63	
80	17,8
100	16,7
125	25,9
160	26,2
200	24,4
250	24,5
315	24,7
400	26,8
500	30,2
630	32,8
800	35,1
1000	35,3
1250	35,6
1600	35,1
2000	35,3
2500	35,7
3150	37,0
4000	39,9
5000	42,6



Rating according to ISO 717-1

$R'_{i,w} (C; C_0) = 33 (0 ; -3)$ dB
Evaluation based on field measurement results obtained
in one-third-octave bands by an engineering method.

$C_{50-3150} =$ dB $C_{50-8000} =$ dB $C_{100-8000} =$ dB
 $C_{7,50-3150} =$ dB $C_{7,50-8000} =$ dB $C_{7,100-8000} =$ dB

Name of test institute:

No. of test report:

Date: 25.3.2022

Signature: