

Valtteri Lohi

Kontio-pientalorakenteiden ääneneristävyyksien ja palonkestävyyksien määrittely

Kontio-pientalorakenteiden ääneneristävyyksien ja palonkestävyyksien määrittely

Valtteri Lohi
Opinnäytetyö
Kevät 2024
Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Rakennustekniikka, talonrakennustekniikan suuntautumisvaihtoehto

Tekijä(t): Valtteri Lohi

Opinnäytetyön nimi: Kontio-pientalorakenteiden ääneneristävyyksien ja palonkestävyyksien määrittely

Opinnäytetyön englanninkielinen nimi: Determination of sound insulation and fire resistance of Kontio small house structures

Työn ohjaaja(t): Pekka Kilpinen

Työn valmistuslukukausi ja -vuosi: Kevät 2024

Sivumäärä: 55 + 3 liitettä

Rakennuslupavaiheessa kaivataan yhä useammin tietoa rakenteiden paloteknisistä ja akustisista ominaisuuksista. Opinnäytetyön tavoitteena oli määrittellä Kontiotuote Oy:n pientalorakenteille niiden palonkestävyyden ja ääneneristävyyden ominaisuudet. Palonkestävyyden ominaisuuksiin kuului rakenteiden kantavuuden ja osastoivuuden luokitukset sekä rakenteessa käytettyjen rakennusosien tarvike- ja pintaluokat. Ääneneristävyyden ominaisuuksiin kuului ulkoseinärakenteiden ja yläpohjarakenteiden ilmajääleneristävyyksien määrittely sekä osastoivien väliseinärakenteiden äänitasoerolukujen määrittely.

Työn alussa tutustuttiin rakennusakustiikan ja rakenteiden paloturvallisuuden teoriaan sekä pientalon ääneneristävyyttä ja palonkestävyyttä koskeviin viranomaismääräyksiin. Rakenteiden ääneneristävyyksien määrittelyä varten tutkittiin rakenteiden ja rakennusosien ilmajääleneristävyyksien laskentaan esitettyjä teorioita ja laskentamalleja.

Rakenteiden kantavuuden ja osastoivuuden arvot määriteltiin eurooppalaisiin suunnittelustandardeihin perustuvilla laskentaohjelmilla ja rakenteiden rakennusosien tarvike- ja pintaluokat määriteltiin ohjekirjojen ja tuotevalmistajien ilmoittamien tietojen mukaan. Ulkoseinä ja yläpohjarakenteiden ilmajääleneristävyydet määriteltiin laskennallisesti yksinkertaisen levyn ja kaksinkertaisen levyrakenteen laskentamalleja soveltaen. Osastoivien väliseinärakenteiden äänitasoeroluvut määriteltiin tuotevalmistajien rakenteiden ja rakennusosien ilmoitettujen ominaisuuksien mukaan.

Rakenteille saatiin määriteltyä niiden palotekniset ominaisuudet hyvällä tarkkuudella standardiin perustuvien laskentaohjelmien sekä ohjekirjojen ja tuotevalmistajien antamien tietojen perusteella. Rakenteiden ilmajääleneristävyyksistä saatiin työssä käytetyllä laskentamallilla laskettua ja esitettyä arviot rakenteiden todellisista ilmajääleneristävyyksistä. Käytetyn laskentamallin tarkkuus olisi jatkossa hyvä varmistaa vertaamalla tuloksia laboratoriomittauksista saatuihin tuloksiin, jolloin laskentamallin pohjalta olisi mahdollista kehittää laskentaohjelma manuaalisen laskennan nopeuttamiseksi.

Asiasanat: Ilmajääleneristys, palonkestävyys, kantavuus, osastoivuus, pientalo

ABSTRACT

Oulun University of Applied Sciences
Degree Programme in Civil Engineering, Option of House Building Engineering

Author(s): Valtteri Lohi

Title of thesis: Determination of sound insulation and fire resistance of Kontio small house structures

Supervisor(s): Pekka Kilpinen

Term and year when the thesis was submitted: Spring 2024

Number of pages: 55 + 3 appendices

Information on the fire performance and acoustic properties of structures is increasingly needed at the building permit stage. The aim of the thesis was to determine the fire resistance and sound insulation properties of the small house structures of Kontiotuote Oy. The fire resistance characteristics included the load bearing and fire separation of the structures, as well as material and surface classifications of the components used in the structure. The sound insulation characteristics included the airborne sound insulation performance of the exterior wall structures and the upper floor structures, as well as the sound level difference of the fire separation wall.

At the beginning of the thesis, the theory of building acoustics and fire safety of structures was studied, as well as the official regulations on sound insulation and fire resistance of small houses. To determine the sound insulation performance of the structures, theories and calculation models for calculating the airborne sound insulation performance of structures and building components were studied.

The load bearing and fire separation values of the structures were determined using calculation software based on European design standards, and the material and surface classifications of the structural components were determined according to the information provided in manuals and by product manufacturers. The airborne sound insulation performances of the exterior wall and upper floor structures were determined by calculations using the single plate and double plate structure calculation models. The sound difference levels of the fire separation walls were determined according to the declared characteristics of the product manufacturers' structures and building components.

The fire performances of the structures were determined with good accuracy using the calculation programs based on standards, manuals and the information provided by product manufacturers. Estimates of the actual airborne sound insulation values of the structures were able to be calculated using the calculation model used in this thesis. The accuracy of the calculation model used should be verified in the future by comparing the results with those obtained from laboratory measurements, then a calculation program based on the verified calculation model could be developed to speed up manual calculations.

Keywords: Airborne sound insulation, fire resistance, load bearing, fire separation, small house

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	7
2	RAKENNUSAKUSTIIKKA.....	8
2.1	Ääni	8
2.2	Äänenpainetaso	8
2.3	Äänen taajuus	9
2.4	Koinsidenssi	9
2.5	Ominaistaajuus ja resonanssi.....	10
2.6	Leikkausaallot.....	11
2.7	Ilmaääneneristävyys.....	11
2.7.1	Ilmaääneneristysluku	12
2.7.2	Äänitasoeroluku	13
2.7.3	Spektripainotustermit	14
2.8	Yksinkertainen ja kaksinkertainen rakenne	15
3	PALOTURVALLISUUS	17
3.1	Paloluokat.....	17
3.2	Rakennusosan kantavuus ja osastointi	18
3.3	Rakennustarvikkeiden ja pintojen luokitus.....	19
4	VIRANOMAISMÄÄRÄYKSET JA OHJEISTUKSET.....	21
4.1	Meluntorjunta ja ääniolosuhteet.....	21
4.1.1	Ympäristöministeriön asetus rakennuksen ääneneristävydestä ja meluntorjunnasta	21
4.1.2	Asemakaavamerkintä	21
4.2	Paloturvallisuus	22
4.2.1	Puurakenteisen pientalon palotekniset vaatimukset	22
4.2.2	Palon leviämisen estäminen naapurirakennukseen	24
4.2.3	Palon leviämisen estäminen oman tontin rakennukseen	27
5	ILMAÄNENERISTÄVYYDEN LASKENTAMALLI	28
5.1	Yksinkertaisen levyn malli	28

5.2	Kaksinkertainen levyrakenne.....	30
5.2.1	Täydellisesti ääntä absorboiva kaviteetti.....	30
5.2.2	Epätäydellisesti ääntä absorboiva kaviteetti.....	32
5.2.3	Jäykkä kytkentä levyjen välissä	33
6	RAKENTEIDEN PALONKESTÄVYYDEN MÄÄRITTELY	35
6.1	Ulkoseinät.....	35
6.1.1	Hirsiseinät	35
6.1.2	Pystyrunkoseinät ja ristikon kaulusrakenteet	37
6.2	Osastoivat väliseinät	41
7	RAKENTEIDEN ÄÄNENERISTÄVYYDEN MÄÄRITTELY	42
7.1	Ulkoseinät.....	42
7.1.1	Pystyrunkoseinät ja ristikon kaulusrakenteet	42
7.1.2	Hirsiseinät	45
7.2	Yläpohjat	47
7.3	Osastoivat väliseinät	49
8	YHTEENVETO	51
	LÄHTEET.....	53
	Liite 1 Rakenteen US161 ääneneristävyyslaskelmat	
	Liite 2 Rakenteen US103 ääneneristävyyslaskelmat	
	Liite 3 Rakenteen YP116 ääneneristävyyslaskelmat	

1 JOHDANTO

Rakennuslupavaiheessa suunnitelmiin kaivataan yhä enenevässä määrin tietoa rakenteiden ääneneristävyyden ja palonkestävyyden ominaisuuksista. Rakennusluvan hankkiminen helpottuu, kun rakenteille on valmiiksi määritellyt ominaisuudet, sillä näin voidaan osoittaa rakenteille vaaditut määräykset täyttyväksi jo heti rakennuslupavaiheen alussa. Vakiorakenteille määritellyistä ominaisuuksista on myös hyötyä jo suunnitteluvaiheessa ja etenkin tietomallintamisessa, kun olemassa olevat rakenteet ominaisuuksineen voidaan yksinkertaisesti valita ja sijoittaa tietomalliin.

Opinnäytetyön tavoitteena on määritellä Kontio-talorakennetyyppien palotekniset ja akustiset ominaisuudet. Määritellyt ominaisuudet tulevat käyttöön Kontion sisäisiin järjestelmiin, joissa määritellyjä ominaisuuksia voidaan hyödyntää esimerkiksi tietomallintamisessa.

Työn alussa perehdytään aluksi yleisesti talonrakentamisen akustiikkaan ja paloturvallisuuteen sekä niitä koskeviin asetuksiin ja ohjeistuksiin. Sen jälkeen määritellään rakenteiden ilmaääneneristävyydet, paloluokitukset sekä rakenteiden rakennustarvikkeiden ja pintojen luokitukset. Rakenteiden määritellyt ominaisuudet taulukoidaan ja ne tallennetaan toimeksiantajan käyttöön sen sisäiseen verkostoon.

Työn on tilannut Kontiona yleisemmin tunnettu Kontiotuote Oy, joka on maailman suurin hirsirakennuksia valmistava yritys. Kontio toimii koko Suomen alueella työllistäen yli 200 työntekijää. Kontiolla on kotimaan myynnin lisäksi vientiä useaan eri maahan, joista tärkeimpiä ovat Ruotsi ja Ranska. Ruotsissa Kontiolla on tytäryhtiö Kontio Hus AB. Kontion tehdas sijaitsee Pudasjärvellä, jossa se valmistaa itse tuotteensa pohjoisen metsistä kaadetuista tukeista aina valmiiksi lopputuotteeksi saakka. (1.)

2 RAKENNUSAKUSTIIKKA

Rakennusakustiikka tutkii äänen kulkeutumista ja vaimentumista rakennuksen kahden eri tilan välillä ilman ja rakenteiden kautta (2).

2.1 Ääni

Ääni on mekaanista aaltoliikettä, joka vaatii edetäkseen väliaineen. Väliaineena voi toimia kaasu, neste tai kiinteä aine. Ääni etenee ilmassa pitkätaajaisena, ja tätä ilmassa kulkevaa ääntä kutsutaan ilmaääneksi. Ihminen voi aistia ilmaääntä kahdella eri tavalla. Pääasiassa ilmaääni aistitaan kuuloaistilla äänen taajuuksilla 20–20 000 Hz, minkä lisäksi matalammilla taajuuksilla ilmaäänä voi aistia kehossa värinä. Ilmaääntä syntyy sekä rakennuksen sisältä että sen ulkopuolelta, joista molemmat on otettava huomioon rakennuksen akustisessa suunnittelussa. (3, s. 6.)

Ääni etenee kiinteässä aineessa sekä pitkätaajais- että poikittaistaajaisena. Rakentamisessa kiinteänä väliaineena toimii rakennuksen runko. Rakennuksen rungossa etenevä ääni saa rakennusosan värähtelemään, joka puolestaan saa sen ympärillä olevan ilman värähtelemään, synnyttäen ilmaääntä. Toisaalta ilmaääni saa rakennusosan kohdatessaan, sen rungon värähtelemään. Runkoääni ja ilmaääni ovat näin yhteyksissä toisiinsa. (3, s. 6.)

2.2 Äänenpainetaso

Äänenpaine on ilmanpaineen muutosta staattiseen ilmanpaineeseen verrattuna. Äänenpainetta merkitään kirjaimella p ja sen yksikkö on pascal [Pa]. Ilmanpaineen muutoksen suuruus vaikuttaa siihen, kuinka voimakkaana ihminen aistii äänen. Alin ilmanpaineen muutos, minkä ihminen aistii, on 0,00002 Pa ja tätä kutsutaan kuulokynnykseksi. Ihmisen kuulo saavuttaa kipukynnyksen 20 Pa:n kohdalla. (3, s.8.)

Äänenpaineen lukuarvojen vaihteluvälin suuruuden takia sille on kehitetty logaritminen asteikko, jota kutsutaan äänenpainetasoksi L_p , ja jota merkitään yksiköllä desibeli [dB]. Desibeliasteikolla

kuulokynnys on 0 dB, ja kipukynnys on 120 dB. Äänenpaineeseen verrattuna desibeliasteikkoa on helpompi tulkita, sillä esimerkiksi kuulokynnyksen ja kipukynnyksen erotus lukuarvona on vain 120, kun taas äänenpaineena niiden ero on miljoonakertainen. Asteikon logaritmisuuden takia on huomioitava, että äänenpaineen p arvon kaksinkertaistaminen, kasvattaa desibeliasteikolla L_p arvoa vain 6 dB. Taulukossa 1 on esitetty äänenpaineen ja äänenpainetason vastaavuuksia. (3, s.8.)

TAULUKKO 1. Äänenpaineen ja äänenpainetason vastaavuuksia (3, s.9)

Suuntaa-antava kuvaus	Äänenpaine p	Äänenpainetaso L_p $L_p = 20 \log_{10} \frac{p}{p_0}$	Suhde kuulokynnykseen $\frac{p}{p_0}$
Kuulokynnys (p_0)	0,00002 Pa	0 dB	1
Hiljainen asuinhuoneisto	0,0002 Pa	20 dB	10
Toimistotyöympäristö	0,00356 Pa	45 dB	178
Normaali puhe	0,02 Pa	60 dB	1000
Katumelu	0,2 Pa	80 dB	10000
Piikkaukone	2 Pa	100 dB	100000
Kipukynnys	20 Pa	120 dB	1000000
Suihkumoottori	200 Pa	140 dB	10000000

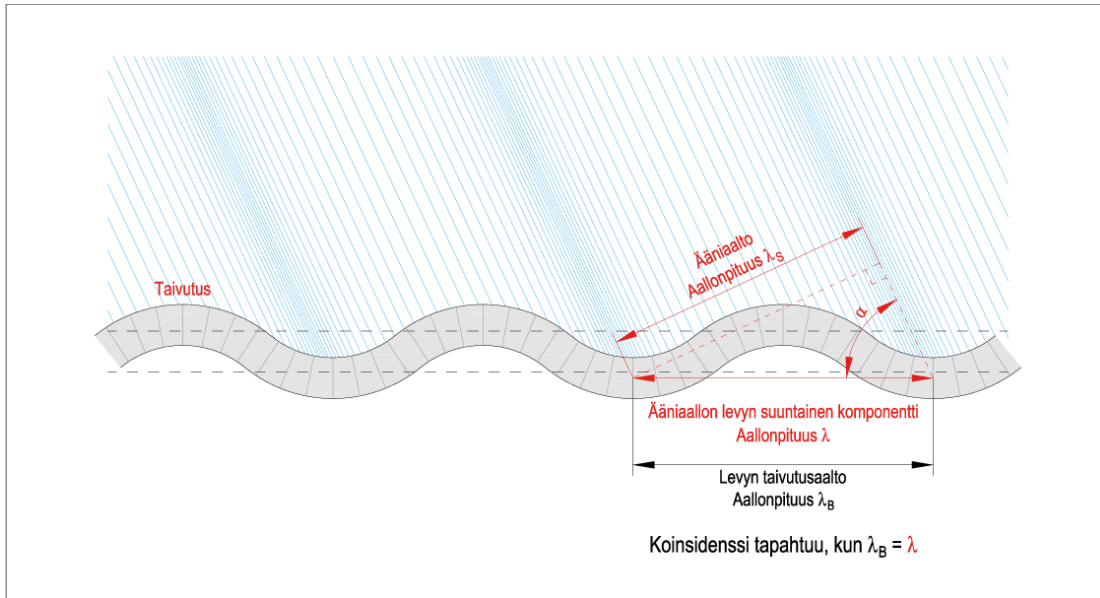
2.3 Äänen taajuus

Äänen taajuus tarkoittaa ääniaaltojen värähtelyn määrää sekunnissa, ja sen yksikkö on hertsi [Hz]. Ihminen kuulee äänen sitä korkeampana, mitä suurempi äänentaajuus on. Ihmisen normaali kuuloalue on 20–20 000 Hz. Kuuloaluetta korkeampia ääniä ei kuule ollenkaan ja matalampia ääniä ei kuule, mutta ne voi aistia tärinänä. Ihmisen kuulo on herkimmillään 2 000–5 000 Hz:in välillä oleville äänille. Äänentaajuus vaikuttaa äänenpainetasoon sekä rakennuksen akustiseen toimintaan ja ääneneristävyyskykyyn. Rakennuksen ääneneristävyyttä tarkastellaan akustisessa suunnittelussa tämän takia taajuuskaistoittain taajuusvälillä 100–3 150 Hz. (3, s. 8; 4, s. 37.)

2.4 Koinsidenssi

Koinsidenssin rajataajuus on taajuus, jolla levyyn tietyssä kulmassa osuva ääniaalltorintama saa levyn väreilemään sellaisella aallonpituudella, joka on sama kuin siihen kohdistuvan ääniaalltorintaman levyn suuntaisen komponentin aallonpituus. Tällöin levyyn kohdistuva ääniaalltorintama ja

levyn taivutusaalto kulkevat samalla nopeudella rinnakkain "lävistäen" levyn. Rakennusosan ilma-ääneneristävyys heikkenee huomattavasti koinsidenssin rajataajuudella, kun ääneneristävyys perustuu lähinnä häviömekanismeihin. Kuvassa 1 on esitetty koinsidenssi-ilmiötä. (3, s. 10.)



KUVA 1. Koinsidenssi-ilmiö levyssä (3, s. 10)

Koinsidenssin rajataajuus on yleensä taajuuksilla 100–3 150 Hz, jotka ovat juuri akustisen suunnittelun kannalta tärkeimmällä taajuusalueella, minkä takia koinsidenssin rajataajuus pyritään saamaan ulos tältä alueelta. Levyn paksuus, tiheys ja jäykkyys vaikuttavat koinsidenssin rajataajuuteen. Esimerkiksi paksulla betoniseinällä on matala koinsidenssin rajataajuus ja kipsilevyllä on korkea rajataajuus, minkä takia ne muodostavat yhdessä hyvin koinsidenssi-ilmiötä vastustavan rakenteen. (3, s. 10.)

2.5 Ominaistaajuus ja resonanssi

Ominaistaajuudella tarkoitetaan taajuutta, jolla värähtelijä saavuttaa suurimman amplitudin, eli värähtelyvoimakkuuden. Ominaistaajuutta merkataan kirjaimella f [Hz]. Ominaistaajuuteen vaikuttavat rakennusosan massa, jäykkyys ja mitat. (3, s. 11.)

Resonanssi-ilmiö on tilanne, jossa värähtelijän ominaistajuus on samalla taajuudella, kuin siihen kohdistuvan ulkopuolisen herätteen, esimerkiksi ääniaallon taajuus. Resonanssissa oleva värähtelijä saa jatkuvasti ulkopuolisesta samalla taajuudella värähtelevästä herätteestä vahvistusta, mikä saa sen värähtelemään suurella amplitudilla. Resonanssi-ilmiötä voidaan pienentää vaimennuksella. Vaimennuksen lisääminen rakennusosiin on kuitenkin käytännössä vaikeaa. Vaimennusta tulee jonkin verran myös rakenteiden liitoksien jäykkyydestä. (3, s. 11.)

Ominaistaajuus on merkittävä resonanssi-ilmiössä, sillä rakennusosa värähtelee voimakkaammin sen ominaistaajuuden alapuolella, kuin sen yläpuolella. Ääneneristävyys kasvaa merkittävästi rakennusosan ominaistaajuuden yläpuolella, minkä takia rakennusosan alimman ominaistaajuuden olisi hyvä olla mahdollisimman pieni, jotta se eristäisi tehokkaasti ääntä taajuusalueella 100–3 150 Hz. Resonanssilla on todellisuudessa pieni merkitys akustisen suunnittelun kannalta verrattuna koinsidenssi-ilmiöön. (3, s. 11.)

2.6 Leikkausaallot

Levyssä esiintyy taivutusaallon lisäksi leikkausaaltoja, jotka heikentävät levyn ääneneristävyys kasvua leikkausaaltojen rajataajuuden f_n [Hz] yläpuolella. Leikkausaaltojen vaikutukset ovat merkittäviä etenkin paksuilla levyillä kuten betoni- ja massiivipuorakenteilla. (3, s. 12.)

2.7 Ilmaääneneristävyys

Ilmaääneneristävyys tarkoittaa vähentää ilmaääneneriä siirtymistä ääntä eristävän rakenteen läpi toiseen huonetilaan. Ilmaääni kohtaa rakenteen ääniteholla W_1 , joka saa sen värähtelemään. Rakenteen tuottaa värähtelyllään ilmaääntä toiselle puolelle ääniteholla W_2 . Äänitehon W_2 suuruus riippuu rakenteen ilmaääneneristävydestä, jota merkataan kirjaimella R . Ilmaääneneristävyys R on riippuvainen rakenteen rakennekerroksista ja niiden ominaisuuksista sekä rakenteiden välisten liitoksien ominaisuuksista ja tiiviyydestä. Ilmaääneneristävyys arvo riippuu taajuuksista, ja se määritellään yleensä 16 keskitaajuudella taajuusvälillä 100–3 150 Hz. Ilmaääneneristävyys lasketaan äänitehojen W_1 ja W_2 suhteella, mikä on esitetty kaavassa 1. (3, s. 13; 4, s. 57; 5, s. 17.)

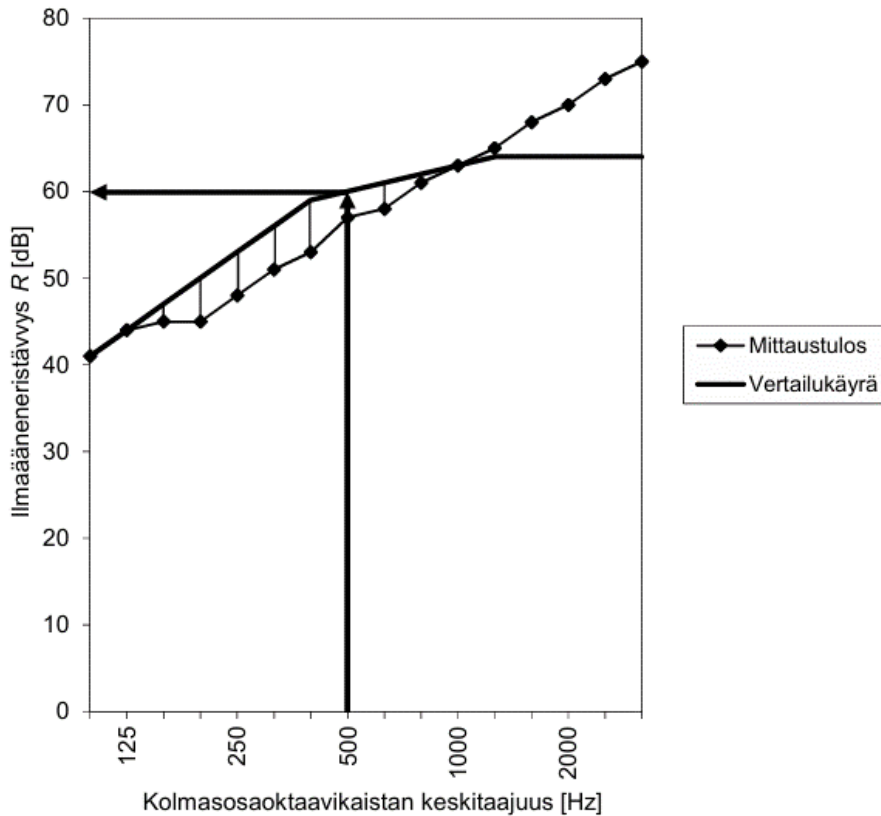
KAAVA 1. Ilmaääneneristävyyden määritelmä (4, s. 58)

$$R = 10 \lg \frac{W_1}{W_2}$$

2.7.1 Ilmaääneneristysluku

Rakenteiden ääneneristävyyden vaatimukset ovat ilmoitettu yksilukuarvoina, minkä takia rakennusosan ilmaääneneristävyys ilmoitetaan myös yksiarvoisena ilmaääneneristävyytlukuna R_w . Tämän yksilukuarvon määritelmä on esitetty standardissa SFS-EN ISO 717-1. Ilmaääneneristävyytluku saadaan laskettua rakenteen eri keskitaajuuksilla määritellyistä ilmaääneneristävyyksistä R . (3, s. 13; 5, s. 17; 6.)

Ilmaääneneristysluku voidaan määritellä laboratorikokeilla mitatuista tai laskemalla saaduista ilmaääneneristävyyksistä vertailukäyrämenettelyllä. Vertailukäyrämenettelyssä ilmaääneneristävyydelle R saatuja tuloksia verrataan vertailukäyrään, minkä muoto on aina sama. Vertailukäyrää liikutetaan 1 dB portaittain ankkuritaajuudella 500 mahdollisimman suureksi siten, että R arvojen poikkeamien summa vertailukäyrän alapuolella on maksimissaan 32 dB. Ilmaääneneristävyytluku R_w saadaan vertailukäyrän arvosta ankkuritaajuuden kohdalla. Kuvassa 2 on havainnollistettu vertailukäyrämenetelmää. (3, s. 13; 5, s. 17.)



KUVA 2. Vertailukäyrämenetelmä, jossa ilmaääneneristävyyksiksi R_w on saatu 60 dB (5, s. 18)

2.7.2 Äänitasoeroluku

Äänitasoeroluku $D_{nT,w}$ on yksiarvoluku, jolla ilmoitetaan tilojen välistä ääneneristävyyttä. Äänitasoeroluku lasketaan taajuuskaistoittain mitatuista tilojen välisistä äänitasoeroista D_{nT} . Äänitasoeroluku voidaan laskea myös ilmaääneneristävyyksluvusta R_w . Äänitasoeroluku kuvaa ilmaääneneristävyykslukua paremmin todellista tilojen välistä ääneneristävyyttä, sillä se ottaa huomioon tilojen välillä olevat rakenteelliset sivutiesiirtymät, ääntä eristävän rakenteen pinta-alan sekä tilan jälkikaiunta-ajan ja koon. Äänitasoeroluvun määritelmä on esitetty standardissa SFS-EN ISO 717-1. (3, s. 13; 6.)

2.7.3 Spektripainotustermit

Ilmaääneneristävyydsluvun R_w vertailukäyrä perustuu osittain puheen äänispektriin. Jos äänilähteenä toimii puheen sijaan jokin muu, ei ilmaääneneristysluku sovi parhaalla tavalla rakenteen ääneneristysten arvioimiseen. Tätä varten on standardissa SFS-EN ISO 717-1 määritelty spektripainotustermejä, jotka ottavat huomioon puheäänestä poikkeavia äänispektrejä. Spektripainotustermit lasketaan yleensä taajuusalueella 100–3 150 Hz, jolloin sitä ei tarvitse ilmoittaa erikseen. Jos ne ovat laskettu jollain muulla taajuusalueella, taajuusalue merkataan alaindeksinä, esimerkiksi $C_{50-3150}$. (4, s. 79; 6; 7, s. 71–72.)

Suomessa käytetään raide- ja lentoliikennemelun vaikutusta ääneneristävyyteen spektrikorjaustermiä C ja tieliikennemelusta termiä C_{tr} . Tieliikennemelu aiheuttaa suomessa noin 85 % ympäristömelun altistumisista, minkä takia rakenteiden ilmaääneneristyskykyä ilmoitetaan yleensä ilmaääneneristävyyden ja tieliikennemelun spektripainotustermin summana R_w+C_{tr} . Raide- ja lentoliikennemelun yhteydessä ilmaääneneristävyyttä merkataan R_w+C . Spektripainotustermin C_{tr} arvo on yleensä noin -2–5 dB raskaille rakenteille, ja 5–15 dB levyrakenteille. Taulukossa 2 on esitetty äänispektrien vaikutusta äänenpainetasoon eri taajuuksilla. (4, s. 79–80; 6; 7, s. 71–72.)

TAULUKKO 2. Äänispektrien vaikutus äänenpainetasoon (4, s. 79)

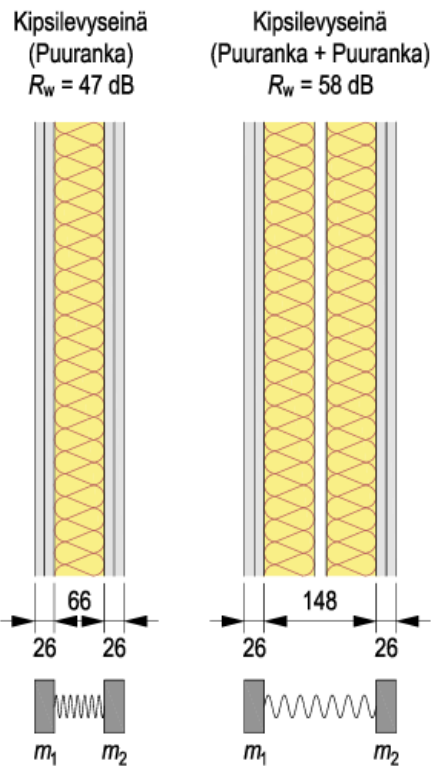
Keskitajuus [Hz]	C	$C_{50-3150}$	$C_{50-5000}$	C_{tr}
	L_1	L_2	L_3	L_4
50	-	-40	-41	-25
63	-	-36	-37	-23
80	-	-33	-34	-21
100	-29	-29	-30	-20
125	-26	-26	-27	-20
160	-23	-23	-24	-18
200	-21	-21	-22	-16
250	-19	-19	-20	-15
315	-17	-17	-18	-14
400	-15	-15	-16	-13
500	-13	-13	-14	-12
630	-12	-12	-13	-11
800	-11	-11	-12	-9
1000	-10	-10	-11	-8
1250	-9	-9	-10	-9
1600	-9	-9	-10	-10
2000	-9	-9	-10	-11
2500	-9	-9	-10	-13
3150	-9	-9	-10	-15
4000	-	-	-10	-16
5000	-	-	-10	-18

2.8 Yksinkertainen ja kaksinkertainen rakenne

Yksinkertaiseksi rakenteeksi lasketaan sellaiset rakenteet, jotka koostuvat kauttaaltaan samasta materiaalista tai rakenteen rakennekerrokset ovat niin tiiviissä yhteydessä toisiinsa, että ne värähtelevät yhtenä kokonaisuutena. Yksinkertaisessa rakenteessa ilmasteneristävyys perustuu pääasiassa rakenteen massaan ja jäykkyyteen. Puurakenteet ovat kevyitä, minkä takia ne eivät ole yksinkertaisina rakenteina hyviä eristämään ääntä. Esimerkiksi 180 mm paksun betoniseinän ääneneristävyys saavutetaan massiivipuulla vasta 600 mm:n paksuudella. (3, s. 20–21.)

Massan lisääminen valmiiksi paksuun rakenteeseen ei yleensä tuota merkittävää kasvua ilmasteneristävydessä. Sen takia kevyistä, varsinkin puurakenteista muodostetaan kaksinkertainen rakenne. Kaksinkertaisessa rakenteessa rakenne koostuu kahdesta levymaisesta massasta (m_1 , m_2) sekä niiden välisestä ilmavälisestä (ilmajousi). Kaksinkertaisen rakenteen ilmasteneristävyys perustuu ilmajousen kykyyn vähentää värähtelyn siirtymistä levyjen välillä. Mitä suurempi ilmaväli levyjen välissä on, sen parempi ilmasteneristävyys rakenteelle saadaan. (3, s. 23; 4, s. 68.)

Usein levyjen välissä on ilmajousen lisäksi runko, joka yhdistää levyt mekaanisesti toisiinsa, jolloin ilmajousen vaikutus vähenee. Ideaalisesti rakenne toteutettaisiin kaksoisrungolla, jossa levyjen välille ei synny mekaanista liitosta, joka parantaa ilmasteneristävyttä huomattavasti. Ilmajousen lisäksi levyjen massa ja jäykkyys vaikuttaa ilmasteneristävyteen, kuten yksinkertaisessa rakenteessa. Kipsilevy on yleinen rakennusmateriaali kaksinkertaisissa rakenteissa, sillä se on ohuudeltaan huolimatta hyvä keino lisätä rakenteen massaa ja jäykkyyttä sekä sillä on korkea koinsidenssin rajataajuus. Kuvassa 3 on esitetty ja vertailtu yksirunkoisen ja kaksoisrunkoisen seinän ilmasteneristävyksiä. (3, s. 23–24; 4, s. 72.)



KUVA 3. Kaksinkertaisia puurakenteita, yksirunkoinen ja kaksoisrunkoinen rakenne (3, s. 24)

3 PALOTURVALLISUUS

Rakennus on jo suunnitteluvaiheessa suunniteltava paloturvalliseksi siten, että se täyttää käyttötarkoituksen mukaan sille asetetut määräykset. Rakennuksen on palon sattuessa pystyttävä vähimmäisajan pitämään rakenteellinen kantavuus rakennuksen käyttäjien poistumisen ajan. Rakennuksen palotilanteessa tulee myös helpottaa pelastus- ja sammutushenkilökunnan toimintaa mahdollisuuksien mukaan. (8.)

3.1 Paloluokat

Rakennukset voidaan jakaa käyttötarkoituksen, koon ja palosuunnittelun vaatimusten mukaan neljään paloluokkaan: P0, P1, P2 ja P3. Paloluokissa P1, P2 ja P3 käytetään taulukkomitoitusta, eli rakennus suunnitellaan noudattaen palomääräysten paloluokkia ja lukuarvoja. P0-paloluokassa käytetään toiminnallista mitoitusta, jossa rakennus suunnitellaan osin tai kokonaan oletettuun palonkehitykseen perustuen. Oletettu palonkehitys kattaa kyseisessä rakennuksessa todennäköisesti esiintyvät palotilanteet. Taulukossa 3 on esitetty paloluokkien kuvaukset sekä niiden tyypillisiä rakennuskohteita (9, s. 9; 10.)

TAULUKKO 3. Paloluokat (9, s. 10)

Paloluokka	Kuvaus	Tyypillisiä rakennuskohteita
P0	<ul style="list-style-type: none">• Toiminnallisen palomitoituksen mukaan (henkilömäärää ja palokuormaa koskevat tiedot ilmoitettava)	<ul style="list-style-type: none">• Yli 28 m korkea asuinrakennus• Yli 28 m korkea työpaikkarakennus
P1	<ul style="list-style-type: none">• Rakennuksen kantavien rakenteiden oletetaan kestävän sortumatta palon ja jäähtymisvaiheen aikana ilman, että paloa sammutetaan (yleensä yli 2-kerroksisessa rakennuksessa)• Rakennuksen kokoa ja henkilömäärää ei ole rajoitettu	<ul style="list-style-type: none">• Rakennukset, jotka eivät ole sallittuja paloluokissa P2 ja P3
P2	<ul style="list-style-type: none">• Rakennuksen kantavien rakenteiden vaatimukset voivat olla P1-paloluokkaa lievemmat• Riittävä turvallisuustaso saavutetaan asettamalla vaatimuksia erityisesti pintaosien ominaisuuksille ja paloturvallisuutta parantaville laitteille• Rakennuksen kokoa ja henkilömäärää on rajoitettu käyttötarkoituksesta riippuen	<ul style="list-style-type: none">• Enintään 8-kerroksinen 28 m korkea asuinrakennus• Enintään 8-kerroksinen 28 m korkea hoitolaitos (pois lukien suljettu rangaistuslaitos)• Enintään 8-kerroksinen 28 m korkea majoitusrakennus• Enintään 8-kerroksinen 28 m korkea työpaikkarakennus• Enintään 4-kerroksinen 14 m kokoontumis- ja liikerakennus• 1-kerroksinen tuotanto- ja varastorakennus ¹⁾
P3	<ul style="list-style-type: none">• Rakennuksen kantavilta rakenteilta ei yleisesti vaadita palonkestävyyttä, joitakin tapauksia lukuun ottamatta (esimerkiksi osastoivilla rakenteilla myös R-vaatimus)• Riittävä turvallisuustaso saavutetaan rajoittamalla rakennuksen kokoa ja henkilömäärää käyttötarkoituksesta riippuen	<ul style="list-style-type: none">• Enintään 2-kerroksinen 9 m korkea asuinrakennus (kerrokset samaa palo-osastoa)• Enintään 1-kerroksinen 9 m korkea hoitolaitos• Enintään 2-kerroksinen 9 m korkea majoitusrakennus• Enintään 2-kerroksinen 9 m korkea työpaikkarakennus• Enintään 2-kerroksinen 9 m korkea kokoontumis- ja liikerakennus• 1-kerroksinen 14 m korkea tuotanto- ja varastorakennus ¹⁾

Taulukkomitoitusta käytettäessä rakennus katsotaan täyttävän paloturvallisuuden kannalta olennaiset vaatimukset, kun se täyttää yksityiskohdissaan asetuksessa annetut luokka- ja lukuarvot. Taulukossa 4 on esitetty rakennuksen olennaisia paloturvallisuuden ominaisuuksia sekä niihin vaikuttavia päätekijöitä. (9, s. 9; 10.)

TAULUKKO 4. Paloturvallisuuden suunnittelun olennaiset vaatimukset (9, s. 10)

Olennainen vaatimus	Pääasiallisia tekijöitä paloturvallisuuden suunnittelussa
Kantavilla rakenteilla tulee olla vaadittu palonkestävyys	<ul style="list-style-type: none"> Rakennuksen paloluokka Palokuormaryhmä Rakennusosien kantavuus R
Palon ja savun kehittyminen ja leviäminen tulee olla rajoitettua	<ul style="list-style-type: none"> Rakennuksen paloluokka Palo-osaston koko Rakennusosien osastoivuus EI Sisäpuolisten pintojen luokka Julkisivun ja parvekkeiden pintojen luokka Katteen luokka Suojaverhous Sprinklaus
Palon leviäminen viereisiin rakennuksiin tulee rajoittaa	<ul style="list-style-type: none"> Suojaetäisyys viereisiin rakennuksiin Julkisivun ja parvekkeiden pintojen luokka Katteen luokka Palomuri Ulkovaipan osastoivuus EI Sprinklaus
Palotilanteessa henkilöiden tulee voida poistua rakennuksesta tai heidät tulee voida pelastaa muiden avustuksella	<ul style="list-style-type: none"> Rakennuksen paloluokka Henkilömäärä rakennuksessa Rakennuksen pinta-ala Rakennuksen korkeus Poistumisteiden rakennusosien kantavuus R Poistumisteiden rakennusosien osastoivuus EI Poistumisteiden lukumäärä Varapoistumistie Poistumisteiden mitat Poistumisteiden pintojen luokka Poistumisteiden merkinnät ja valaistus Palovaroittimet Paloilmaisimet Savupöisto Ovien avautumissuunnat Sprinklaus
Pelastushenkilöstön turvallisuus tulee ottaa huomioon	<ul style="list-style-type: none"> Rakennuksen paloluokka Rakennusosien kantavuus R Rakennusosien osastoivuus EI Pelastustiet Sammutusreitit Savunpoisto Sprinklaus

3.2 Rakennusosan kantavuus ja osastointi

Rakennuksen paloteknisen suunnittelun kannalta tärkeimpiä tekijöitä ovat rakennuksen rungon ja osastoitujen rakenteiden palonkestävyys. Rakenteiden palonkestävyyden vaatimukset esitetään REI-luokkina. R tarkoittaa rakennuksen kantavuutta, E rakennuksen tiiviyyttä (savukaasu- ja lämpösäteilytiiviyys) ja I eristävyttä (lämmöneristävyys). Lisäksi kirjaimien perään merkataan palonkesto-aika minuutteina, joka määrittelee minkä ajan rakenteen on säilytettävä palotilanteessa kantavuus, tiiviys ja eristävyys. Esimerkiksi REI 60 -luokitellun rakenteen tulee palotilanteessa säilyttää kantavuus tiiviys ja eristävyys 60 minuuttia. REI-luokat voidaan määrittellä rakenteille eurokoodi 5:ssä (SFS-EN 1995-1-2) esitetyillä laskentamenetelmillä tai polttokokeilla. (9, s. 9; 10.)

3.3 Rakennustarvikkeiden ja pintojen luokitus

Rakennustarvikkeet jaotellaan eri luokkiin niiden paloon osallistumisen perusteella. Luokat kertovat siitä, miten tarvike osallistuu paloon, ja miten se palotilanteessa tuottaa savua sekä palavia pisaroita ja osia. Luokkamerkintä muodostuu yleensä kolmesta osasta. Merkinnän ensimmäinen osa kertoo rakennustarvikkeen osallistumisesta paloon ja merkintävaihtoehtoja on seitsemän: A1, A2, B, C, D, E ja F. Merkinnän toinen osa kertoo tarvikkeen savun tuotosta palotilanteessa, ja merkintöjä ovat s1, s2 ja s3. Loppuosa kertoo tarvikkeen palavien pisaroiden ja osien tuotosta palotilanteessa, ja merkinnät ovat d0, d1 ja d2. Esimerkiksi massiivipuu kuuluu ja merkitään luokkaan D-s2, d0. Rakennustarvikkeen luokkamerkinnän muodostumista on esitetty tarkemmin taulukossa 5. (9, s. 23.)

TAULUKKO 5. Rakennustarvikkeen luokkamerkinnän muodostuminen. (9, s. 23)

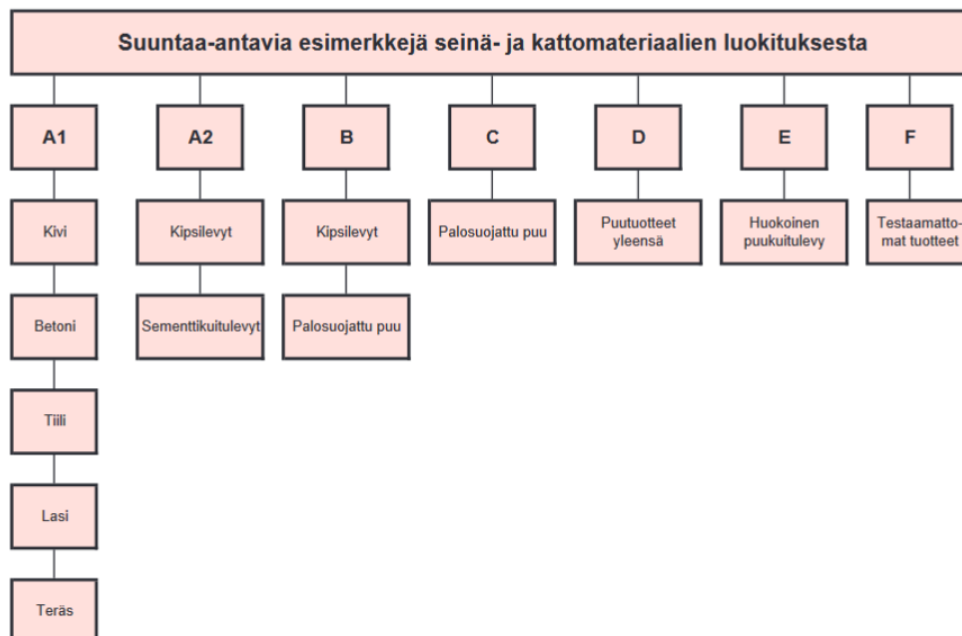
Osallistuminen paloon		Savun tuotto		Palavien pisaroiden ja osien tuotto	
Kuvaus	Merkintä	Kuvaus	Merkintä	Kuvaus	Merkintä
Ei osallistu paloon	A1	Erittäin vähäinen	s1	Ei esiinny	d0
Osallistuu erittäin rajoitetusti	A2	Vähäinen	s2	Nopeasti sammuvia esiintyy	d1
Osallistuu hyvin rajoitetusti	B	Muu kuin s1 tai s2	s3	Muu kuin d0 tai d1	d2
Osallistuu rajoitetusti	C				
Osallistuminen hyväksyttävää	D				
Käyttäytyminen hyväksyttävää	E				
Käyttäytymistä ei ole määritetty	F				

Rakennuksen pintamateriaalilla on merkittävä vaikutus palon leviämiseen, lämmön tuottoon, lieskahduksen alkamishetkeen sekä savun ja pisaroiden tuottoon. Tästä syystä rakennuksen sisä- ja ulkopinnoille on myös asetettu luokkavaatimuksia. Pintamateriaalien luokkaan vaikuttaa merkittävästi materiaalin lisäksi sen tiheys, paksuus, asennustapa sekä materiaalin alusrakenne. Pinta-luokkien määräytymistä on esitetty tarkemmin taulukossa 6. (9, s. 23.)

TAULUKKO 6. Pintaluokan määräytymiseen vaikuttavia tekijöitä (9, s. 24)

Rakennustarvikkeen luokka	Vaikutus saavutettavaan pintaluokkaan		
	Asennustapa	Tiheys	Paksuus
A1	Ei vaikutusta	Ei vaikutusta	Ei vaikutusta
A2	Ei vaikutusta	Ei vaikutusta	Ei vaikutusta
B	Vaikuttaa (osaksi pinnoitetussa tuotteessa B-luokan pinta palon puolelle)	Vaikuttaa	Vaikuttaa
C	Vaikuttaa (osaksi pinnoitetussa tuotteessa C-luokan pinta palon puolelle)	Vaikuttaa	Vaikuttaa
D	Vaikuttaa (ks. taulukot 13...18)	Vaikuttaa (ks. taulukot 13...18)	Vaikuttaa (ks. taulukot 13...18)
E	Ei vaikutusta	Vaikuttaa	Vaikuttaa

Rakennustarvikkeiden luokitus perustuu palon alkutilanteeseen, ja useimpien tarvikkeiden palokäyttäytyminen muuttuu palonkehityksen aikana. Rakennustarvikkeen palokäyttäytymistä kuvaavina luokkina voidaan pitää vain A1 ja A2-s1, d0 luokkia, sillä ne ovat palamattomia materiaaleja. Muihin luokkiin kuuluvat materiaalit ovat yleensä useammasta osa-aineesta koostuvia tuotteita, jossa tuotteen pinta toimii palon alkutilanteessa, mutta ydin osallistuu paloon myöhemmässä vaiheessa. Rakennustarvikkeiden luokituksen määrittelemisen tapahtuu standardin SFS-EN 13501-1 mukaisilla polttokokeilla. Kuvassa 4 on esitetty suuntaa antavia esimerkkejä tunnettujen rakennusmateriaalien luokituksista. (9, s. 23; 33.)



KUVA 4. Esimerkkejä rakennusmateriaalien luokituksista (9, s. 25)

4 VIRANOMAISMÄÄRÄYKSET JA OHJEISTUKSET

Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan pientalon rakenteita ja perehdytään siten vain pientaloa koskeviin ääneneristävyyden ja paloturvallisuuden asetuksiin ja ohjeistuksiin. Pientalon määritelmä on yksikerroksinen tavanomaisia tilaratkaisuja sisältävä asuinrakennus, tai jos kerroksia on enemmän, asuinhuoneistot eivät ole osittainkaan päällekkäin. Pientaloja ovat omakotitalot, paritalot ja rivitalot. (11.)

4.1 Meluntorjunta ja ääniolosuhteet

Rakennuksen ääniympäristöstä on määrätty Ympäristöministeriön asetuksessa 796/2017. Asetus on astunut voimaan 1.1.2018. Pientalojen osalta katsotaan asuinrakennukselle asetettuja määräyksiä. (12.)


4.1.1 Ympäristöministeriön asetus rakennuksen ääneneristävyydestä ja meluntorjunnasta

Asuntojen suunnittelussa pienin sallittu äänitasoeroluku $D_{nT,w}$ tilojen välillä on 55 dB, ja uloskäytävästä asuintiloihin on 39 dB. Asetuksen pykälän 5 § mukaan rakennuksen ulkovaipan ääneneristävyyden tulee olla vähintään 30 dB, eikä impulssimaisen, kapeakaistaisen tai pientaajuisen melun yhden tunnin keskiäänitaso saa ylittää nukkumiseen tai lepoon käytettävissä huoneissa 25 dB. Ulkovaipan ääneneristävyyden riittäminen edellyttää ulkovaipan kaikilta osilta riittävää ilmaääneneristävyyttä $R_{w+C_{tr}}$. (12; 13, s. 20.)

4.1.2 Asemakaavamerkintä

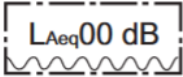
Ääniympäristöasetuksen lisäksi rakennuksen ääneneristävyyden vaatimukset voidaan ilmoittaa asemakaavassa. Asemakaavassa ilmoitettuja vaatimuksia käytetään suunnittelussa ensisijaisesti ja ääniympäristöasetuksen 5 § lukuarvoja käytetään toissijaisesti. Erityisesti melualueella voidaan

vaatia rakennukselta erityistä ääneneristävyyttä, jolloin vaatimukset voidaan merkitä asemakaavaan. Vaatimukset voidaan ilmoittaa asemakaavassa rakennuksen ulkovaipan ääneneristävyyden vaatimuksena. Tämä merkintätapa on esitetty kuvassa 5. (13, s. 27; 14, s. 195.)

132  *Merkintä osoittaa rakennusalan sivun, jonka puoleisten rakennuksen ulkoseinien sekä ikkunoiden ja muiden rakenteiden ääneneristävyyden liikennemelua vastaan on oltava vähintään 00 dBA.*

KUVA 5. Asemakaavamerkintä 132, rakennuksen ulkovaipan ääneneristävyyden määräys (14, s. 195)

Vaatimukset voidaan ilmoittaa myös rakennuksen ulkopuolisena melutasona, josta voidaan laskea ulkovaipan ääneneristävyyden vaatimukset. Tätä merkintätapaa on esitetty kuvassa 6. (14, s. 195.)

 *Rakennuksen ulkopuolinen melutaso, jonka perusteella voidaan määrittää vaatimus ulkoseinän kokonaisääneneristävyydelle.*

KUVA 6. Asemakaava merkinnän 132 sijasta käytettävä merkintä, rakennuksen ulkopuolinen melutaso (14, s. 195)

4.2 Paloturvallisuus

Rakennuksen paloturvallisuudesta on määrätty Ympäristöministeriön asetuksessa 848/2017. Asetus on astunut voimaan 1.1.2018. Pientalot kuuluvat paloluokkiin P3 ja P2, ja määräyksiä tarkastellaan tässä työssä P3 ja P2 paloluokkien osalta. (15.)

4.2.1 Puurakenteisen pientalon palotekniset vaatimukset

Rakennuksen paloteknisiin vaatimuksiin vaikuttaa rakennuksen käyttötarkoitus, paloluokka ja koko. Taulukossa 7 on esitetty tyypillisten puurunkoisten pientalojen ja rivitalojen paloteknisiä vaatimuksia P3-paloluokassa. (9.)

TAULUKKO 7. P3-paloluokan puurunkoisten pientalojen ja rivitalojen paloteknisiä vaatimuksia (9, s. 19)

P3	Nimitys	Käyttö	Sprinklaus ⁵⁾	Kerrosala [m ²]	Palo-osasto [m ²]	Kork. [m]	Krs. [kpl]	Hlö ⁶⁾ [kpl]	Runko ⁷⁾
	Pientalo ¹⁾	Asunto	-	≤ 2400	huoneistoittain	≤ 9	1	≤ 250	-
			-	≤ 1600	huoneistoittain	≤ 9	2	≤ 150	-
	Rivitalo ²⁾	Asunto	-	≤ 2400	huoneistoittain	≤ 9	1	≤ 250	-
			pakollinen	≤ 4800	huoneistoittain	≤ 9	1	≤ 500	-
			-	≤ 1600	huoneistoittain	≤ 9	2	≤ 150	-
			pakollinen	≤ 2400	huoneistoittain	≤ 9	2	≤ 250	-

Taulukkoa 7 tarkasteltaessa huomataan, että P3-paloluokassa ei ole asetettu vaatimuksia pientalo- ja rivitalorakennuksen rungolle. Pientalon henkilömäärää ja kerrosalaa on rajoitettu, kun kerroksia on enemmän kuin yksi. Rivitalossa vaaditaan sprinklaus, kun rakennus on yksikerroksinen ja sen kerrosala on suurempi kuin 2 400 m², mutta pienempi kuin 4 800 m², tai rakennus on kaksikerroksinen ja kerrosala on enemmän kuin 1 600 m², mutta pienempi kuin 2 400 m². P3 paloluokan pientalo ja rivitalo saavat olla korkeudeltaan maksimissaan 9 metriä. (9.)

Taulukossa 8 on esitetty tyypillisten puurunkoisten pientalojen ja rivitalojen paloteknisiä vaatimuksia P2-luokassa (9).

TAULUKKO 8. P2-luokan puurunkoisten pientalojen ja rivitalojen paloteknisiä vaatimuksia (9, s. 20)

P2	Nimitys	Käyttö	Sprinklaus ⁵⁾	Kerrosala [m ²]	Palo-osasto [m ²]	Kork. [m]	Krs. [kpl]	Hlö ⁶⁾ [kpl]	Runko ⁷⁾
	Pientalo ¹⁾	Asunto	-	-	huoneistoittain	≤ 9	1..2	ei rajoitusta	R 30
			-	≤ 12000	huoneistoittain	≤ 14	3..4	≤ 1000	R 45
			pakollinen	≤ 12000	huoneistoittain	≤ 14	3..4	≤ 1000	R 30
	Rivitalo ²⁾	Asunto	-	ei rajoitusta	huoneistoittain	≤ 9	1..2	ei rajoitusta	R 30
			-	≤ 12000	huoneistoittain	≤ 14	3..4	≤ 1000	R 45
			pakollinen	≤ 12000	huoneistoittain	≤ 14	3..4	≤ 1000	R 30

Taulukosta 8 huomataan että P2 luokassa paloteknisiä vaatimuksia on huomattavasti enemmän. Alle 9 metriä korkea ja 1- tai 2-kerroksinen pientalo voidaan toteuttaa R 30 -luokitellulla rungolla. 3- tai 4-kerroksinen pientalo, minkä korkeus on alle 14 metriä ja kerrosala maksimissaan 12 000 m² voidaan toteuttaa R 45 -luokitellulla rungolla, paitsi jos rakennuksessa on sprinklaus, jolloin rungon luokitukseksi riittää R 30. 1- ja 2-kerroksisessa pientalossa ei ole rajoitettu henkilömäärää, ja 3- ja 4-kerroksisen pientalon rajoitus on 1 000 henkilöä. (9.)

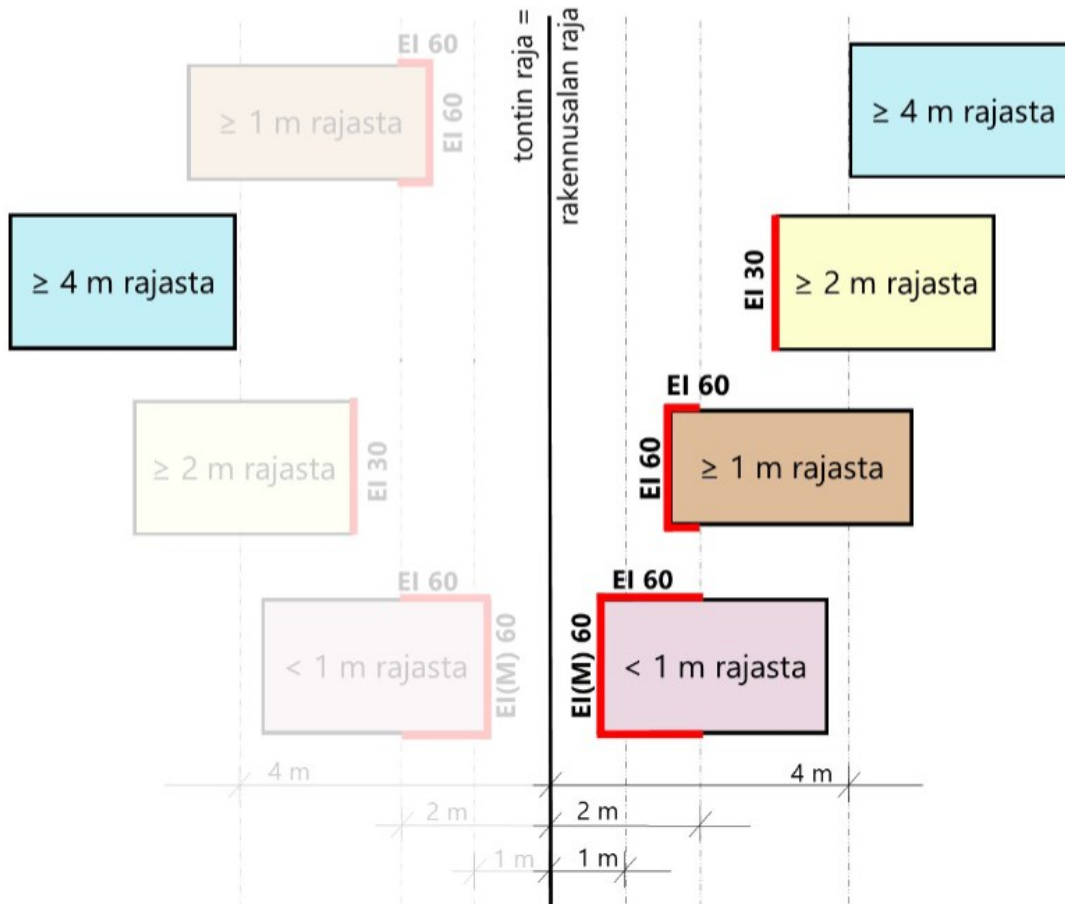
P2-luokan 1- ja 2-kerroksinen, alle 9 metriä korkea rivitalo voidaan toteuttaa R 30 -luokitellulla rungolla. 3- tai 4-kerroksinen, alle 14 metriä korkea ja kerrosalaltaan alle 12 000 m²:n rivitalo voidaan toteuttaa sprinklaamattomana R 45 -luokitellulla rungolla ja sprinklattuna R 30 -luokitellulla rungolla. Henkilömäärä on rajoitettu 3- ja 4-kerroksisissa, mutta ei 1- ja 2-kerroksisissa rivitaloissa. (9.)

Rakennusten katon ja seinien sisäpuolisten pintojen tulee P3- ja P2-luokan asuinrakennuksessa täyttää vähintään luokkavaatimus D-s2, d2. (15.)

4.2.2 Palon leviämisen estäminen naapurirakennukseen

Rakennuksen tontin rajan puoleiselle seinälle voidaan vaatia palo-osastointi rakennuksen ja tontin rajan etäisyyden mukaan. Kun rakennusaloja ei ole määritetty tai ne ovat kiinni tontin rajassa, noudatetaan seuraavassa kappaleessa esitettyjä ohjeita. (16, s. 5.)

Jos rakennus on vähintään 4 metrin etäisyydellä rajasta, osastointia ei tarvita. Jos rakennus on lähempänä kuin 4 m, mutta kauempana kuin 2 m, vaaditaan tontin rajan puoleiselta seinältä palo-osastointi EI 30. Kun etäisyys on vähemmän kuin 2 m, mutta enemmän kuin 1 m, vaaditaan rajan puoleisella seinällä sekä sivuavilla seinillä 2 metrin etäisyyteen rajasta asti osastointi EI 60, mikäli naapurilla on mahdollisuus rakentaa alueelle. Jos rakennus on alle metrin päässä rajasta, vaaditaan seinälle palomuurin EIM 60 tai palomuurinomaisen rakenteen EI(M) 60 sekä sivuaville seinille 2 metrin päähän rajasta asti osastointi EI 60. Kuvassa 7 on havainnoitu rakennuksien ja tontin rajan etäisyyttä ja vaadittuja palo-osastointeja. (16, s. 5.)



KUVA 7. Palo-osastoinnin vaatimuksen riippuvuus rakennuksen ja tontin rajan etäisyydestä (16, s. 5)

Kun rakennusalat on määritetty, eivätkä ne ole kiinni tontin rajassa ja rakennus ylittää rakennusalan, tulee sen rajan puoleinen seinä osastoida EI 60, jos rakennetaan yli metrin päähän tontin rajasta, tai EI(M) 60, jos rakennetaan alle metrin päähän rajasta, mikäli naapuri voi rakentaa vaikutusalueelle. Kun molempien tonttien rakennusalat on määritetty, voidaan tapauskohtaisesti rakennukselle määrät osastointivaatimuksia EI 30, EI 60 ja EI(M) 60 välillä. Tapaukset riippuvat rakennuksien etäisyyksistä toisiinsa ja tontin rajoihin sekä rakennusalojen etäisyyksistä toisiinsa. Esimerkitapauksia esitetty kuvissa 8 ja 9. (16, s. 5–9.)

TAPAUS 2a

Tonttien rakennusalojen rajat alle 8 metrin etäisyydellä toisistaan, toisella tonteista rakennusalan raja < 4 metrin etäisyydellä tontin rajasta.

Vasen tontti:

Rakennusalan raja vähintään 4 metrin päässä tontin rajasta, rakennetaan rakennusalan rajan sisäpuolelle

Ei vaatimuksia

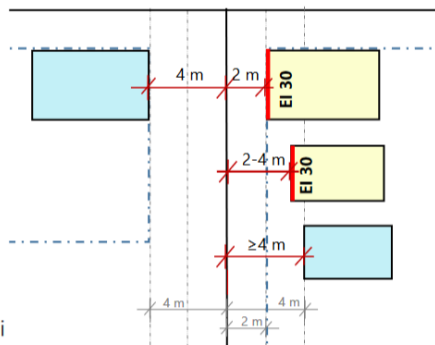
Oikea tontti:

Rakennusalan raja ≥ 2 metrin mutta < 4 metrin päässä tontin rajasta, rakennetaan kiinni rakennusalan rajaan tai välille 2-4 m rajasta

EI 30

Rakennetaan ≥ 4 metrin päähän rajasta (vaikka rakennusalan raja lähempänä tontin rajaa):

Ei vaatimuksia



KUVA 8. Esimerkkitapaus rakennuksen seinien palo-osastoinnista, kun rakennusalojen rajat määritelty (16, s. 7)

TAPAUS 2f

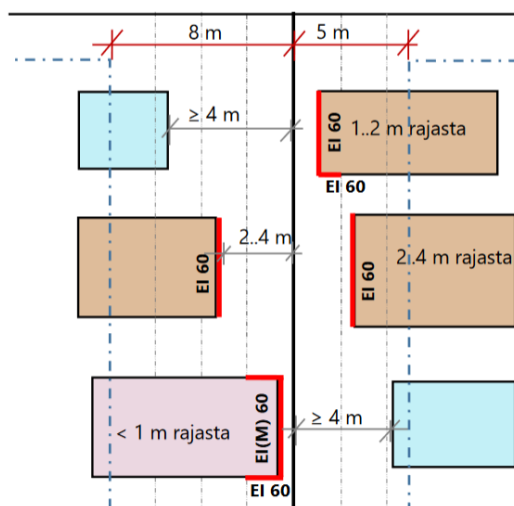
Tonttien rakennusalojen rajojen väli on suurempi kuin 8 m, molemmilla tonteilla yli 4 m.

Vasen tontti:

Rakennusala, 8 m rajasta, ylitetty. Osastointitarvetta ei ole, jos tontin rajalle vähintään 4 m.

Oikea tontti:

Rakennusala, 5 m rajasta, ylitetty. Osastointitarvetta ei ole jos tontin rajalle vähintään 4 m.



KUVA 9. Esimerkkitapaus rakennuksen seinien palo-osastoinnista, kun rakennusalojen rajat määritelty (16, s. 8)

Samalla tontilla sijaitseville pientaloille vaaditaan EI 30 -luokiteltu palo-osastointi jos talot ovat yhdessä tai niiden välinen etäisyys on alle 8 metriä (16, s. 11).

4.2.3 Palon leviämisen estäminen oman tontin rakennukseen

Asuinrakennus tai sen viereinen autosuoja on palo-osastoitava, mikäli niiden välinen etäisyys ei ole riittävä. Palo-osastointi vaaditaan, kun autosuojan pinta-ala on 60 m² tai alle, ja autosuojan etäisyys asuinrakennukseen on alle 4 metriä, tai jos autosuojan pinta-ala on yli 60 m² ja autosuojan etäisyys asuinrakennukseen on alle 8 metriä. Palo-osastointi tehdään yleensä EI 30 -luokitellulla rakenteella. Rakenteen palo-osastointi toteutetaan joko asuinrakennuksessa tai autosuojassa. Autosuojan yhteydessä oleva varastotila voidaan osastoida yhteen joko asuinrakennuksen tai autosuojan kanssa. (16, s. 12–14.)

Autosuojan palo-osastointi tehdään yhtenäisenä ja aukottomana perustuksista katon tasoon asti ja käännetään katon sisäpinnalle, tai viedään seinälinjalla vesikatteeseen asti. Asuinrakennuksessa palo-osastointi toteutetaan osastoimalla rakennuksen autosuojan puoleinen ulkoseinä ulkopuolista paloa vastaan EI 30 -rakenteella. Asuinrakennuksen parvekkeet, ulokkeet ja katokset on otettava huomioon palosuojauksessa, mikäli ne sijaitsevat palovyöhykkeellä. (16, s. 14.)

5 ILMAÄNENERISTÄVYYDEN LASKENTAMALLI

5.1 Yksinkertaisen levyn malli

Yksinkertaisen ohuen levyn ääneneristävyys voidaan laskea kaavalla 2, kun äänikenttä lähetys-huoneessa on diffuusi ja levyn pinta-ala oletetaan äärettömäksi. (7, s. 77.)

KAAVA 2. Yksinkertaisen levyn ilmaääneneristävyyslaskentakaava (7, s. 77)

$$R = \begin{cases} 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{\pi m' f}{\rho_0 c_0} \right) + 20 \cdot \log_{10} \left(1 - \left(\frac{f}{f_c} \right)^2 \right) - 5, & f < f_c \\ 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{\pi m' f}{\rho_0 c_0} \right) + 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{2\eta f}{\pi f_c} \right), & f \geq f_c \end{cases}$$

Kaavassa m' on levyn pintamassa [kg/m^2], f on taajuus [Hz], c_0 on äänen nopeus ilmassa huoneenlämmössä 20°C (343 m/s), ρ_0 on ilman tiheys huoneenlämmössä 20°C ($1.204 \text{ kg}/\text{m}^3$) ja η on levyn kokonaishäviökerroin. Ylempi yhtälö on massalain alue, joka koskee ei resonoivan värähtelyn taajuusalueita. Alempi yhtälö koskee resonoivan värähtelyn taajuusalueita. Levyn koinsidenssin rajataajuus f_c [Hz] voidaan laskea kaavalla 3. (7, s. 77.)

KAAVA 3. Levyn koinsidenssin rajataajuuden laskentakaava (7, s. 73)

$$f_c = \frac{c_0^2}{2\pi} \sqrt{\frac{12(1-\mu^2)m'}{Eh^3}}$$

Kaavassa E on materiaalin kimmomoduuli [Pa], h on levyn paksuus [m] ja μ on Poissonin suhde. Poissonin suhde on metalleille noin 0,30, kumille ja bitumille noin 0,40 ja muille materiaaleille noin 0,20. (7, s. 73; 17, s. 2.)

Edellä mainitut kaavat toimivat ohuen levyn ilmaääneneristävyyden arviointiin. Levy on akustisesti katsottuna ohut, kun sen paksuus on huomattavasti pienempi kuin aallonpituus levyssä. Rajataajuus f_h [Hz], minkä yläpuolella levy ei enää täytä ehtoa, voidaan laskea kaavalla 4. (7, s. 80.)

KAAVA 4. Akustisesti katsotun ohuen ja paksun levyn rajataajuus (7, s. 80)

$$f_h = \frac{1}{f_c} \left(\frac{c_0}{6h} \right)^2$$

Rajataajuuden yläpuolella, niin sanotun massiivilevyn ilmaääneneristävyys voidaan laskea kaavalla 5 (7, s. 80).

KAAVA 5. Massiivilevyn ilmaääneneristävyyden laskentakaava (7, s. 80)

$$R = 20 \log_{10} \left(\frac{\omega m'}{2Z_0} \right) + 10 \log_{10} \left(\frac{2\eta_{tot}}{\pi} \right) + 10 \log_{10} \left(\frac{f}{f_c} \right)$$

Kaavassa $\omega = 2\pi f$ on kulmataajuus [Hz] ja $Z_0 = \rho_0 c_0 \approx (412 \text{ kg/m}^2\text{s})$ on ilman akustinen ominaisimpedanssi huoneenlämmössä 20°C. Kokonaishäviökerroin η ja koinsidenssin rajataajuus f_c lasketaan kuten ohuella levyllä. (7, s. 80.)

Jos kaksi tai useampi ohut levy asennetaan päällekkäin siten, että ne värähtelevät erillisinä levyinä sekä ilman, että niiden välissä on kaviteettia, voidaan niiden yhteinen ilmaääneneristävyys laskea kaavalla 6 (7, s. 78).

KAAVA 6. Kahden tai useamman levyn yhteinen ilmaääneneristävyys (7, s. 78)

$$R_N = 20 \cdot \log_{10} \left(\sum_{i=1}^N 10^{R_i/20} \right)$$

5.2 Kaksinkertainen levyrakenne

Kaksinkertaisen levyrakenteen ilmasteneristävyyttä lasketaan huomioiden rakenteen ilmasteneristävyyttä kaviteettia R_c [dB] sekä rankoja R_b [dB] pitkin. Kaviteetin ja rankojen yhteinen ilmasteneristävyyttä lasketaan kaavalla 7. (7, s. 84.)

KAAVA 7. Kaviteetin ja rankojen yhteisääneneristävyyttä (7, s. 84)

$$R = -10 \cdot \log_{10} \left(10^{-R_c/10} + 10^{-R_b/10} \right)$$

Kaviteetin R_c ilmasteneristävyyttä voidaan käyttää kahdella eri tavalla laskettua kaviteetin ilmasteneristävyyttä riippuen siitä, onko kaviteetti täydellisesti ääntä absorboiva R_{cl} vai epätäydellisesti ääntä absorboiva R_{cII} . Samoin kuin kaviteetissa, rankojen ilmasteneristävyyttä voidaan käyttää kahta eri tavalla laskettua arvoa riippuen siitä, onko levyjen välissä jäykkä kytkentä R_{bI} vai joustava kytkentä R_{bII} . Mikäli levyjen välissä ei ole ollenkaan kytkentää, R_b saa arvon ∞ , jolloin kaviteetin ääneneristävyyttä R_c on määräävä. Tässä työssä käsitellään vain rakenteita, joissa levyjen välillä ei ole kytkentää tai kytkentä on jäykkä. (7, s. 84.)

5.2.1 Täydellisesti ääntä absorboiva kaviteetti

Täydellisesti ääntä absorboivan kaviteetin ilmasteneristävyyttä R_{cl} voidaan laskea kaavalla 8, kun kaviteetti on täydellisesti ääntä absorboiva ja levyjen välissä ei ole mekaanista kytkentää (7, s. 84).

KAAVA 8. Täydellisesti ääntä absorboivan kaviteetin laskentakaava (7, s. 84)

$$R_{cl} = \begin{cases} 20 \cdot \log_{10} \left(10^{R_1/20} + 10^{R_2/20} \right) + R_{mam}, & f < f_{mam} \\ R_1 + R_2 + 20 \cdot \log_{10} (fd) - 29, & f_{mam} < f < f_d \\ R_1 + R_2 + 6, & f > f_d \end{cases}$$

Kaavassa R_1 ja R_2 [dB] ovat pintalevyjen 1 ja 2 ilmaääneneristävyydet, d [m] on kaviteetin paksuus. Rakenteen ilmaääneneristävyys on heikoimmillaan massa-ilma-massa resonanssitaajuuden f_{mam} [Hz] kohdalla, kun levyt 1 ja 2 sekä niiden välinen ilmajousi resonoivat. Resonanssitaajuuden alapuolella rakenteen ilmaääneneristävyys on sama, kuin jos rakenteen levyt olisivat yhdessä ja niitä tarkasteltaisiin yksinkertaisena levynä. Tämä resonanssitaajuus voidaan laskea kaavalla 9. (7, s. 84.)

KAAVA 9. Massa-ilma-massa resonanssitaajuuden laskentakaava (7, s. 84)

$$f_{mam} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1.8\rho_0 c_0^2 (m'_1 + m'_2)}{d m'_1 m'_2}} = 80 \sqrt{\frac{(m'_1 + m'_2)}{d m'_1 m'_2}}$$

Kaavassa 9 m'_1 ja m'_2 ovat pintalevyjen 1 ja 2 pintamassat [kg/m²] ja d on kaviteetin paksuus [m].

Rajataajuus f_d [Hz] on taajuus, jolloin kaviteetin paksuus on noin 16 % aallonpituudesta. Tämän rajataajuuden yläpuolella levyjen nähden poikittainen äänikenttä alkaa syntyä ja ilmaääneneristävyyden kasvu putoaa nopeudesta 18 dB/oktaavi nopeuteen 12 dB/oktaavi. (7, s. 84.)

Massa-ilma-massa resonanssitaajuudella f_{mam} ilmaääneneristävyydessä esiintyy kuoppa R_{mam} , joka voidaan halutessaan ottaa huomioon laskelmissa. Kuopan syvyys ja muoto on vaikea ennustaa ja mittaepätarkkuudet taajuuskaistoittain pienillä taajuuksilla ovat suuria. Tässä työssä ei ole otettu kuoppaa huomioon laskelmissa, jolloin R_{cl} laskennassa käytetyt yhtälöt ovat kaavan 10 mukaiset. (7, s. 84.)

KAAVA 10. Täydellisesti ääntä absorboivan kaviteetin laskentakaava, kun R_{mam} ei huomioida laskennassa

$$R_{cl} = \begin{cases} 20 \cdot \log_{10} (10^{R_1/20} + 10^{R_2/20}) & f < f_{mam} \\ R_1 + R_2 + 20 \cdot \log_{10} (fd) - 29, & f_{mam} < f < f_d \\ R_1 + R_2 + 6, & f > f_d \end{cases}$$

5.2.2 Epätäydellisesti ääntä absorboiva kaviteetti

Kun kaviteetti ei ole ollenkaan tai vain osittain täytetty absorptiomateriaalilla, voidaan sen ilmaääneneristävyys laskea kaavalla 11 (7, s. 85).

KAAVA 11. Epätäydellisesti ääntä absorboivan kaviteetin laskentakaava (7, s. 85)

$$R_{cII} = R_{cI} + \Delta R_{abs}$$

Kaavassa täydellisesti ääntä absorboivan kaviteetin ilmaääneneristävyyden arvoon R_{cI} lisätään heikennystermi ΔR_{abs} [dB]. Heikennystermi lasketaan kaavalla 12. (7, s. 85.)

KAAVA 12. Heikennystermi ΔR_{abs} (7, s. 85)

$$\Delta R_{abs} = \begin{cases} 0, & f < f_{c1} \\ 10 \cdot \log_{10}(\alpha_{eff}), & f \geq f_{c1} \end{cases}$$

Kaavassa f_{c1} [Hz] on kaviteetin alin resonanssi, minkä alapuolella kaviteetti ei kaiu ja absorptiomateriaali ei vaikuta ääneneristävyyteen. Resonanssitaajuus voidaan laskea kaavalla 13. (7, s. 85.)

KAAVA 13. Kaviteetin alin resonanssitaajuus (7, s. 85)

$$f_{c1} = \frac{c_0}{2 \cdot \max[L_{x,c}; L_{y,c}; L_{z,c}]}$$

Kaavassa $L_{x,c}$, $L_{y,c}$ ja $L_{z,c}$ [m] ovat kaviteetin leveys, korkeus ja paksuus.

Osittain täytetyn kaviteetin efektiivinen absorptiosuhde α_{eff} saadaan laskettua kaavalla 14 (7, s. 85).

KAAVA 14. Osittain täytetyn kaviteetin efektiivinen absorptiosuhde (7, s. 85)

$$\alpha_{eff} = \alpha_c \cdot FR$$

Kaavassa α_c on kaviteettimateriaalin absorptiosuhde ja FR on kaviteetin täyttösuhde, joka voi saada arvoja väliltä 0–1.0. Mineraalivillaa käytettäessä kaviteettimateriaalina absorptiosuhteena α_c voidaan käyttää arvoa 1.0. (7, s. 85; 17, s. 4.)

Kaviteetin absorptiosuhde ei tyhjälläkään kaviteetilla ole nolla, vaan tyhjässä kaviteetissa toimii kaksi heikkoa absorptiomekanismia, kaviteetin kovien sisäpintojen absorptio ja kaviteetin suurten levyntojen viskoosit kitkahäviöt, kun ääni kulkee pintojen suunnassa. Tyhjän kaviteetin todellista absorptiota on vaikea ennustaa, mutta sen arviolta on esitetty laskentatapa, joka on esitetty kaavassa 15. (7, s. 85.)

KAAVA 15. Tyhjän kaviteetin absorptiosuhde (7, s. 85)

$$\alpha_{eff} = \begin{cases} 0.5, & d \leq 0.02 \text{ m} \\ 0.01/d, & d > 0.02 \text{ m} \end{cases}$$

Kaavassa d [m] on kaviteetin paksuus.

5.2.3 Jäykkä kytkentä levyjen välissä

Kun rakenteen levypuoliskoja yhdistää jäykkä kytkentä, rakenteen ilmaääneneristävyyden kytkentää pitkin lasketaan kaavalla 16 (7, s. 86).

KAAVA 16. Ilmaääneneristävyys jäykkää kytkentää pitkin (7, s. 86)

$$R_{bI} = 20 \cdot \log_{10} \left(10^{R_1/20} + 10^{R_2/20} \right) + \Delta R_b$$

Kaavassa ΔR_b [dB] tulee olla > 0 dB ja se voidaan laskea kaavalla 17. Parannusluku ΔR_b on taa-juudesta riippumaton. (7, s. 86.)

KAAVA 17. Jäykän kytkennän parannusluku (7, s. 86)

$$\Delta R_b = 10 \cdot \log_{10}(bf_{cL}) + 20 \cdot \log_{10}\left(\frac{m'_1}{m'_1 + m'_2}\right) - 18$$

Kaavassa b [m] on viivakytkentöjen väli, eli koolausjako ja m'_1 sekä m'_2 [Kg/m²] ovat levyjen 1 ja 2 pintamassat. f_{cL} [Hz] voidaan laskea kaavalla 18. (7, s. 86.)

KAAVA 18. f_{cL} laskentakaava (7, s. 86)

$$f_{cL} = \left[\frac{m'_1 \sqrt{f_{c2}} + m'_2 \sqrt{f_{c1}}}{m'_1 + m'_2} \right]^2$$

Kaavassa f_{c1} ja f_{c2} [Hz] ovat levyjen 1 ja 2 koinsidenssin rajataajuudet.

6 RAKENTEIDEN PALONKESTÄVYYDEN MÄÄRITTELY

Rakenteille määriteltäviä paloteknisiä ominaisuuksia olivat rakenteiden kantavuutta ja osastointia kuvaavat REI-luokat sekä rakenteiden osamateriaalien tarvike- ja pintaluokat. Palotekniset ominaisuuden määriteltiin 21:een eri rakenteeseen, jotka jakautuivat hirsiseiniin, pystyrunkoseiniin, ristikon kaulusrakenteisiin ja osastoihin väliseiniin.

6.1 Ulkoseinät

Määriteltävissä ulkoseinärakenteissa oli kolmea erityyppistä rakennetta, hirsiseiniä, pystyrunkoseiniä sekä ristikon kaulusrakenteita. Jokaiselle rakennetyypille määriteltiin REI-luokitus sekä materiaalien tarvike- ja pintaluokat tai niiden vaatimukset, mikäli materiaalia ei ollut tarkkaan määritelty.

6.1.1 Hirsiseinät

Hirsiseiniä oli 9 erilaista rakennetta, joista jokaisessa rakenteen runkona toimi 205 mm paksu lamellihirsi. Hirren palonkestävyys on hyvin tunnettu ja eripaksuisille ja erityyppisille hirsille on tehty runsaasti polttokokeita. Suomen johtavien hirsitalotehtaiden yhteinen järjestö Hirsitaloteollisuus Ry, johon muun muassa Kontio kuuluu on esittänyt suunnitteluohjeessaan ”Tietopaketti hirsitaloja koskevista palomääräyksistä julkisissa rakennuksissa” eripaksuisten ja -tyyppisten hirsien kantavuutta ja osastointia palotilanteessa. Taulukossa 9 on esitetty näitä tietoja. (18.)

TAULUKKO 9. Lamellihirsien palonkestoluokkia (18)

Hirsityyppi	Palonkestoluokka			
Lamellihirsi	R30	R60	R90	R120
leveys x korkeus (mm ²)	92 x 170	138 x h ¹⁾	138 x h ¹⁾	-
sauman leveys (mm)	70	116	156	
	EI30	EI60	EI90	EI120
leveys x korkeus (mm ²)	92 x 170	148 x h ¹⁾	199 x h ¹⁾	-
sauman leveys (mm)	70	126	175	

¹⁾h = 170 mm – 195 mm

Taulukosta huomataan, että jo 199 mm paksu ja vähintään 170 mm korkea hirsi saavuttaa palonkestoluokan REI 90. Tässä työssä tarkasteltujen rakenteiden hirret olivat 205 mm leveitä ja 275 mm korkeita, joiden palonkestoluokaksi määriteltiin siis REI 90. Osa hirsiseinärakenteista oli lisäeristettyjä sisäpuolelta, joissa lisäeristys suojaa hirttä palon alkuvaiheessa. Jokaisen rakenteen ulkopintana oli kuitenkin hirsi, jolloin ulkopuolista paloa vastaan rakenteet saivat paloluokituksen REI 90.

Rakenteiden osamateriaalien tarvikeluokat määriteltiin tuotevalmistajien ilmoittamien tuotteiden suoritusasoilmoituksien sekä Puuinfon ”paloturvallinen puutalo” kirjasta löytyvien taulukoiden mukaan, joissa on kerrottu eri materiaalien ja rakennustarvikkeiden palokokeilla määritellyjä paloluokkia. Taulukossa 10 on esimerkki hirsisenä rakenteesta US103, johon materiaalien paloluokat määriteltiin. (9; 19; 20.)

TAULUKKO 10. Työssä tarkastellun hirsiseinärakenteen US103 tarvike- ja pintaluokat

US103				
		Käyttötarkoitus	Nimike	Mat. Paloluokat
REI	90	Ulkoseinän pinnoite	Ark-piirustusten mukaan	Vaatimus D-s2, d2
		Ulkoseinä	LH205	D-s2, d0
		Koolaus	39/42x66	D-s2, d0
		Liukukiinnike	Liukukulmakiinnike 131	F
		Lämmöneriste, ulkoseinä	Katso käyttötarkoitusluettelo	A1/E
		ilman-/höyrinsulku	Katso käyttötarkoitusluettelo	E
		sisäverhousolevy	Kipsilevy EK. 13x1200x2600	A2-s1, d0
		Sisäseinän pintamateriaali	Rakennus-/huoneselostuksen mukaan	Vaatimus D-s2, d2

Taulukossa olevan rakenteen ulko- ja sisäpintojen pintamateriaalia ei ole määritelty, joten pintojen paloluokituksista ilmoitettiin vain niille Ympäristöministeriön asetuksessa (848/2017) esitetyt vaatimukset D-s2, d2. Rakenteen hirsi sekä koolauspuut saivat paloluokituksen D-s2, d0. Liukukiinnikkeiden palokäyttäytymistä ei ole määritelty, jolloin se sai luokituksen F. Ilman-/höyrinsulku osallistuu paloon hyväksyttävästi, minkä takia se sai paloluokituksen E. Ulkoseinän lämmöneristeen luokitus riippui siitä, mitä eristettä rakenteessa tarkasteltiin. Mineraalivillaa käytettäessä valittiin paloluokka A1 ja puukuitueristettä käytettäessä valittiin paloluokka E. Kipsilevyille valittiin paloluokka A2-s1, d0. Muiden hirsiseinärakenteiden osalta toimittiin samalla periaatteella. (15.)

6.1.2 Pystyrunkoseinät ja ristikon kaulusrakenteet

Työssä oli tarkasteltavana 4 pystyrunkoseinä rakennetta ja 4 ristikon kaulusrakennetta. Pystyrunkoseinien ja kaulusrakenteiden kantavuudet ja osastoivuudet laskettiin Eurokoodi 5:ssä (SFS-EN 1995-1-2) sekä suunnitteluohje RIL 205-2-2019 esitettyjen laskentamenetelmien mukaan. Laskennassa käytettiin apuna Puuinfon julkiseen käyttöön tarkoitettuja Excel-pohjaisia laskureita, jotka perustuvat suunnitteluohjeeseen RIL 205-2-2019. (21; 22; 23; 24.)

Laskennat tehtiin jokaiselle rakenteelle neljällä eri kokoonpanolla. Eristeenä käytettiin laskelmissa kivivillaa tai lasivillaa, ja sisäverhousmateriaalina 23 mm paksua hirsipaneelia tai 13 mm paksua EK-kipsilevyä. Rakennekokoonpanoja olivat kivivilla ja hirsipaneeli, kivivilla ja kipsilevy, lasivilla ja hirsipaneeli sekä lasivilla ja kipsilevy. Hirsipaneelin ja kipsilevyn välillä ei ollut havaittavissa suurta muutosta tuloksissa, mutta kivivillan tai lasivillan käytöllä oli vaikutus tuloksiin.

Taulukossa 11 on esitetty eräs työssä tarkasteltavista pystyrunkorakenteista sekä sen tietoja ja laskentatuloksia.

TAULUKKO 11. Pystyrunkorakenteen US161 kokoonpano ja tuloksia

US161	42x145			
42x145				
REI		Käyttötarkoitus	Nimike	Mat. paloluokat
Kiviv. Paneeli	30	Ulkooverhouslauta/-paneeli	23x275 Hirsipaneeli S UV	D-s2, d0
Kiviv. Kipsilevy	30	Koolaus	25x95	D-s2, d0
Lasiv. Paneeli	15	Tuulensuoja	Tuulensuojalevy, 12x1200x2700	E
Lasiv. Kipsilevy	15	Lämmöneriste, ulkoseinä	Katso käyttötarkoitusluettelo	A1/E
		Pystyrunko	42x145	D-s2, d0
		ilman-/höyrinsulku	Katso käyttötarkoitusluettelo	E
		Sisäseinän pintamateriaali	Katso käyttötarkoitusluettelo	Vaatimus D-s2, d2

Kuvassa 10 on esitetty Puuinfon laskuri sekä sillä lasketun pystyrunkorakenteen US161 valittuja ominaisuuksia. Laskurilla voidaan määrittellä rakenteen kantavuus maksimissaan R 90 -luokkaan asti. (23.)

1.0 RAKENTEEN TIEDOT Info

Palosuojaus Raakaponttilauta 23 ($\rho \geq 290$ kg/m³)

Poikkileikkauksen leveys b = 42 mm

Poikkileikkauksen korkeus h = 145 mm

Rangan lujuusluokka Sahatavara C24 ($\rho \geq 290$ kg/m³)

Ontelon täyte Kivilla ($\rho \geq 28$ kg/m³)

Palon sijainti Toisella puolella

Palonkesto aika 30 minuuttia

Tuenta Y-suunnassa Palon vastaisen puolen levytys

Rangan nurjahduspituus Z-suunnassa L_{e,z} = 3000 mm

Normaalivoima (puristus) X-suunnassa (ORT) N_{d,x,fi} = 15,00 kN

Momentti epäkeskisyydestä Z-suunnassa (ORT) M_{d,y,e,fi} = 0,00 kNm

Momentti vaakakuormasta Z-suunnassa (ORT) M_{d,y,fi} = 0,00 kNm

⊖ ⊕

■ = Palosuojaus suojaa rankaa
■ = Ranka hiihtyy palosuojauksen takana
■ = Ranka hiihtyy suurella nopeudella (palosuojaus on murtunut)
■ = Ranka hiihtyy normaalilla nopeudella (hiiltymissyvyys on ≥ 25 mm)

2.0 MITOITUSTULOKSET Info

Puristuskestävyys Nurjahdus- ja kiepahduskestävyys [Z]		Puristuskestävyys Nurjahduskestävyys [Y]	
N _{d,x}	N _{d,x} + M _{d,y}	N _{d,x}	N _{d,x} + k _m · M _{d,y}
OK	OK	OK	OK
63 %	78 %	25 %	35 %

Liittimien vähimmäispituus	Rakenteen luokka
Levytys	R 30
ℓ _{t,1} = Vakio	
ℓ _{t,2} = -	

KUVA 10. Puuinfon rakenteiden kantavuuden laskuri (23)

Laskuria käytetään valitsemalla ensin rakenteen palosuojaus, rakenteen rungon poikkileikkaus sekä lujuusluokka, rakenteessa käytettävä eriste, palon sijainti ja palonkesto aika sekä rakenteen

tuenta. Laskuri näyttää alareunassa rakenteen kantavuuden luokituksen. Kun luokitus on valkoisella taustalla, rakenne kestää valituilla ominaisuuksilla kyseisen palonkestoajan. Kun rakenteen kestävyys ei riitä valittua palonkestoaikaa, rakenteen luokka näkyy punaisella taustalla. Laskurissa valitaan myös rakenteen maksimikorkeus ja siihen kohdistuva normaalivoima. Tässä työssä tarkasteltiin vain rakennetta, eikä todellista rakennuksen kokoa ja kuormitusta ollut tiedossa. Laskennassa pystyrunkorakenteille käytettiin maksimikorkeutta 3 000 mm ja normaalivoiman arvoa 15 kN.

Rakenteelle US161 saatiin kantavuuden luokituksiksi R 30, kun eristeenä käytettiin kivivillaa ja sisäverhouksena hirsipanelointia tai kipsilevyä. Lasivillaa käytettäessä saatiin hirsipaneloinnilla ja kipsilevyllä R 15.

Kivivilla suojaa rakenteen runkoa palolta, jolloin runko palaa vain yhdeltä suunnalta kerrallaan. Lasivilla sulaa palon aikana, jolloin rakenteen runko altistuu palolle kolmelta suunnalta, minkä takia lasivillan käyttö heikentää rakenteen palonkestävyyttä. Lasivillaa käytettäessä rakenteen palonkestävyys perustuu palosuojauksen suojaamaan aikaan (panelointi ja kipsilevy suojaavat 15 minuuttia), kun oletetaan, että rakenteen palon vastaisen puolen levytys jäykistää rakenteen runkoa palosuojauksen ajan. Palosuojauksen murtumisen jälkeen myös palon vastaisen puolen levytys on palolle alttiina, kun se ei ole eristeen suojaama. (25.)

Rakenteen kantavuuden lisäksi REI-luokitus vaatii rakenteelta osastoivuuden EI määrittelemistä. Rakenteiden osastoivuus määriteltiin Puuinfon Excel-pohjaisella laskurilla. Kuvassa 11 on esitetty Puuinfon osastoivuuden laskuri sekä pystyrunkoseinän US161 valitut ominaisuudet. Laskurilla voidaan määritellä rakenteen osastoivuus maksimissaan EI 60 -luokkaan asti, jolloin rakenteiden REI-luokituksiksi saadaan kantavuudesta R riippumatta maksimissaan REI 60. Tämä on hyväksyttävää, sillä REI 60 -luokituksella saadaan täytettyä pientaloja koskevat palomääräykset EI(M) 60 palomuurin omaista rakennetta lukuun ottamatta. (25.)

1.0 RAKENTEEN TIEDOT

Rakennekerros 1

Levytyks
 Saumatyyppi

Läpiviennit

Rakennekerros 2

Levytyks
 Saumatyyppi

Läpiviennit

Rakennekerros 3

Ontelon täyte
 Ontelon paksuus
 Täytteen paksuus

Rakennekerros 4

Levytyks
 Saumatyyppi

Läpiviennit

Rakennekerros 5

Levytyks
 Saumatyyppi

Läpiviennit

2.0 MITOITUSTULOKSET

Info

	1	2	3	4	5	Rakenteen luokka
$t_{ins,0,1}$	7 min	0 min	29 min	0 min	7 min	EI 60
$k_{pos,1}$	0,84	0,00	1,00	0,00	3,90	
$k_{j,1}$	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	
$t_{ins,1}$	6 min	0 min	29 min	0 min	27 min	

KUVA 11. Puuinfon rakenteen osastoivuuden laskuri (24)

Laskuriin syötettiin rakenteen levymäisten rakennekerroksien materiaalit, paksuudet sekä saumatyytit. Hirsipaneelin paksuus määräytyi paneelin ohuimman kohdan mukaan, joka tässä tapauksessa oli paneelin pontin kohdalla. Rakennekerroksen 3 kohdalle syötettiin rungon ja eristeen paksuus sekä käytettävä eristetyyppi.

Rakenteen US161 osastoivuudeksi saatiin molemminpuolista hirsipaneeliverhousta ja kivivillaa käytettäessä EI 60 sekä lasivillaa ja molemminpuolista hirsipanelointia käytettäessä EI 22. Suurin kivivillalla saatu kantavuus oli R 30, johon osastoivuus kivivillalla riittää. Suurin lasivillalla saatu

kantavuus oli R 15, johon hirsipaneelilla ja lasivillalla saatu osastoivuus riittää. Kipsilevyn käyttäminen sisäverhouslevynä paransi osastoivuutta, mutta kantavuuden ollessa molemmilla sama, osastoivuus määräytyi vähemmän osastoivan eli hirsipaneelin mukaan.

Muiden pystyrunkorakenteiden ja ristikon kaulusrakenteiden kantavuudet ja osastoivuudet laskettiin samalla tavalla käyttäen samoja laskureita ja periaatteita sillä erotuksella, että kaulusrakenteiden maksimikorkeutena käytettiin 2 000 mm ja vaikuttavana normaalivoimana 10 kN. Tätä perusteltiin sillä, että kaulusrakenteet eivät yleensä ole yhtä korkeita kuin pystyrunkoseinät, eikä niihin kohdistu yhtä paljon kuormitusta. Sekä pystyrunkorakenteiden että kaulusrakenteiden osamateriaalien tarvike- ja pintaluokat määriteltiin samalla tavalla kuin hirsiseinärakenteille.

6.2 Osastoivat väliseinät

Osastoivia väliseiniä oli 4, joista kaksi oli puurankaisia ja kuuluvat Kontion rakenteisiin sekä kaksi harkkoväliseiniä, jotka eivät kuulu Kontion vakiorakenteisiin, mutta joita käytetään Kontion rakennuksissa.

Väliseinärakenteisiin oli valmiiksi ilmoitettuna niiden osastoivuuden luokitukset, mutta nämä päätettiin tarkistaa. Puurankaiset väliseinät mitoitettiin Puuinfon laskurilla ja niille saatiin osastoivuuden luokitukset EI 60, jotka olivat samat luokitukset mitkä niille oli jo valmiina ilmoitettu. Harkkoväliseinille löydettiin Weberin rakennekirjastosta olemassa olevat täysin samanlaiset rakenteet F52 01 08 ja F52 01 13, joiden ilmoitettujen tietojen perusteella molempien harkkoväliseinien valmiiksi annetut osastoivuuden arvot todettiin paikkaansa pitäviksi. (26.)

Osastoivien väliseinien tarvike- ja pintaluokat määriteltiin samalla tavalla kuin hirsiseinä- pystyrunko- ja kaulusrakenteille.

7 RAKENTEIDEN ÄÄNENERISTÄVYYDEN MÄÄRITTELY

Työhön kuuluville ulkoseinä- ja yläpohjarakenteille määriteltiin niiden ilmaääneneristävydet R_w , R_w+C_{tr} sekä R_w+C . Osastoiville väliseinille määriteltiin äänitasoeroluvut $D_{nT,w}$. Ulkoseinien ilmaääneneristävydet laskettiin soveltaen luvussa 5 esitettyä laskentamallia.

Laskentaa koskevien rakenteiden ilmaääneneristävyksistä ei ollut olemassa valmiita mittaustuloksia, joihin laskennasta saatuja tuloksia olisi voitu verrata. Laskennasta saatuja tuloksia pyrittiin vertaamaan mahdollisimman samanlaisiin rakenteisiin, joiden ilmaääneneristävydet olivat tiedossa. Laskennasta saadut tulokset ovat arvioita rakenteiden todellisista ilmaääneneristävyksistä. Laskennassa käytettiin PTC Mathcad -laskentaohjelmaa ja Excel-taulukkolaskentaohjelmaa.

Osastoivien väliseinien äänitasoeroluvut määriteltiin tuotevalmistajien ilmoittamista rakenteiden ääniluokista sekä tuotevalmistajien rakennekirjastoista löytyviin rakenteisiin ja niiden ilmoitettuihin äänitasoerolukuihin vertaamalla.

7.1 Ulkoseinät

Ulkoseinärakenteisiin kuuluivat pystyrunkoseinät, ristikon kaulusrakenteet sekä hirsiseinät. Osassa ulkoseinärakenteista käytettiin rakenteen sisäpuolella samoja sisäverhouslevyjä, joiden ilmaääneneristävyksiä kerran laskettuna voitiin hyödyntää myös muissa laskuissa.

7.1.1 Pystyrunkoseinät ja ristikon kaulusrakenteet

Rakenteen ilmaääneneristävyden laskenta aloitettiin laskemalla rakenteeseen kuuluvien yksinkertaisten ohuiden levyjen ilmaääneneristävydet 16 taajuudella taajuusväliillä 100–3 150 Hz. Laskentaa varten jokaisesta levystä selvitettiin lähtötiedot, materiaalin kimmomoduuli, tiheys, levyn paksuus ja kokonaishäviökerroin. Kokonaishäviökertoimena voidaan reunoiltaan kiinnitetyle levylle käyttää lukua 0,02. Laskentaa varten käytetyt arvot äänen nopeudelle ilmassa, ilman tiheydelle ja

Poissonin suhdeluvulle on esitetty luvussa 5. Levyn pintamassa laskettiin levyn paksuuden ja tiheyden perusteella. (17, s. 2.)

Tarkastellaan pystyrunkorakennetta US161, joka on eräs opinnäytetyön rakenteista, jolle ilmaääneneristävyys määriteltiin. Rakenteen US161 rakennekerrokset ovat ulkoverhouslauta hirsipaneeli 23 mm, koolaus 25 mm, tuulensuojalevy 12 mm, pystyrunko+lämmöneriste 145 mm ja sisäverhouslevy. Seinän ilmaääneneristävydet laskettiin kolmella eri sisäverhouksella: hirsipaneeli 23 mm, erikoiskova kipsilevy EK 13 mm ja 2x erikoiskova kipsilevy EK 13 mm.

Rakenteen ilmaääneneristävyden laskentaa varten rakenne jaettiin kahteen levypuoliskoon sekä niiden väliseen ilmajouseen. Ilmajousena käytettiin rakenneosaa runko+lämmöneriste 145 mm, levypuoliskona 1 ulkoverhous hirsipaneeli+tuulensuojalevy ja levypuoliskona 2 sisäverhouslevy (hirsipaneeli 23 mm, kipsilevy EK 13 mm tai 2x kipsilevy EK 13 mm).

Levypuoliskon 1 ilmaääneneristävyys saatiin laskemalla ensin yksinkertaisten levyjen, hirsipaneelin ja tuulensuojalevyn ilmaääneneristävydet luvussa 5 esitetyllä yksinkertaisen levyn mallilla. Hirsipaneelin ja tuulensuojalevyn yhteinen ilmaääneneristävyys saatiin laskettua luvussa 5 esitetyllä kaksinkertaisen levyrakenteen laskentamallilla. Huomioitavaa laskennassa oli, että hirsipaneelin ja tuulensuojalevyn välillä on jäykkä kytkentä ja niiden välinen kaviteetti on tyhjä. Hirsipaneelin tiheytenä käytettiin 420 kg/m^3 , joka on yleisimpien rakennuspuulajien kuusen ja männyn tiheyksien keskiarvo ja kimmomoduulina käytettiin 11 GPa. Hirsipaneeli on laskennassa oletettu kauttaaltaan 23 mm paksuksi, eikä esim. pontin kapeampaa kohtaa ole otettu huomioon. Tuulensuojalevyn tiheytenä käytettiin 258.3 kg/m^3 ja kimmomoduulina 0.3 GPa. (4, s. 64; 17, s. 78; 27.)

Levypuoliskon 2 sisäverhouslevyt laskettiin yksinkertaisen levyn laskentamallilla. Hirsipaneelin ilmaääneneristävyden arvoina käytettiin samoja arvoja, kuin ulkoverhouksen hirsipaneelilla. Kipsilevyn kimmomoduulina käytettiin 3 GPa ja pintamassaa 9.9 kg/m^2 . Kuvassa 12 on laskennasta saatuja tuloksia yksinkertaisille rakennuslevyille. (28.)

Hirsipaneeli 23 mm	Kipsilevy EK 13mm	2x Kipsilevy EK 13mm
$R_{100.2} := 12.02$	$R_{100.2} := 12.522$	$R_{100.2} := 18.543$
$R_{125.2} := 13.783$	$R_{125.2} := 14.452$	$R_{125.2} := 20.473$
$R_{160.2} := 15.607$	$R_{160.2} := 16.582$	$R_{160.2} := 22.603$
$R_{200.2} := 17.062$	$R_{200.2} := 18.5$	$R_{200.2} := 24.52$
$R_{250.2} := 18.186$	$R_{250.2} := 20.405$	$R_{250.2} := 26.426$
$R_{315.2} := 18.676$	$R_{315.2} := 22.36$	$R_{315.2} := 28.38$
$R_{400.2} := 17.451$	$R_{400.2} := 24.346$	$R_{400.2} := 30.366$
$R_{500.2} := 9.375$	$R_{500.2} := 26.15$	$R_{500.2} := 32.171$
$R_{630.2} := 15.029$	$R_{630.2} := 27.936$	$R_{630.2} := 33.956$
$R_{800.2} := 18.142$	$R_{800.2} := 29.63$	$R_{800.2} := 35.651$
$R_{1000.2} := 21.049$	$R_{1000.2} := 30.972$	$R_{1000.2} := 36.993$
$R_{1250.2} := 23.956$	$R_{1250.2} := 31.888$	$R_{1250.2} := 37.909$
$R_{1600.2} := 27.173$	$R_{1600.2} := 31.858$	$R_{1600.2} := 37.878$
$R_{2000.2} := 30.08$	$R_{2000.2} := 29.204$	$R_{2000.2} := 35.224$
$R_{2500.2} := 32.987$	$R_{2500.2} := 26.609$	$R_{2500.2} := 32.63$
$R_{3150.2} := 35.998$	$R_{3150.2} := 29.62$	$R_{3150.2} := 35.641$
$f_c := 539.927$	$f_c := 2463.069$	$f_c := 2463.069$
$m' := 9.66$	$m' := 9.9$	$m' := 9.9$

KUVA 12. Ohuiden yksinkertaisten levyjen ilmastäneristävyyden laskentatuloksia taajuuskaistoittain

Kun levypuoliskojen ääneneristävyydet oli laskettu, voitiin koko rakenteen ilmastäneristävyys laskea kaksinkertaisen levyrakenteen mallilla. Laskennassa otettiin huomioon rakenteen levypuolisko-kojen välinen jäykkä kytkentä. Rakenteen levypuolisko-kojen välinen kaviteetti oli täysin mineraalivil- lalla täytetty ja se oletettiin laskennassa täydellisesti ääntä absorboivaksi.

Taajuuskaistoittain lasketuista ääneneristävyyksistä laskettiin yksiarvoinen ilmastäneristysluku R_w vertailukäyrämenetelmällä (luku 2.7.1) sekä tieliikennemelun spektripainotustermillä korjattu il- mastäneristävyys R_w+C_{tr} . Vertailukäyrämenetelmään ja spektrikorjaustermiin laskemiseen käy- tettiin Excel-taulukkolaskentaohjelmaa. Taulukossa 12 on esitetty pystyrunkorakenteen US161, jossa sisäverhouksena kipsilevy EK 13 mm laskenta ilmastäneristysluvulle ja spektripainotuster- mille tieliikennemelua vastaan.

TAULUKKO 12. US161 sisäverhous kipsilevy EK 13 mm ilmääneneristysluku ja spektripainotus tieliikennemelua vastaan (vertailukäyrä kuvaajassa sinisellä viivalla)

Taajuus	R	vertailuarvot	Vert. käyrä	erotus	L2	L2-R	10*(L2-R)/10
100	16,683	Rw-19	21	4,317	-20	-36,683	0,0002146347
125	21,118	Rw-16	24	2,882	-20	-41,118	0,0000773036
160	25,452	Rw-13	27	1,548	-18	-43,452	0,0000451648
200	28,471	Rw-10	30	1,529	-16	-44,471	0,0000357191
250	30,797	Rw-7	33	2,203	-15	-45,797	0,0000263209
315	32,673	Rw-4	36	3,327	-14	-46,673	0,0000215130
400	34,358	Rw-1	39	4,642	-13	-47,358	0,0000183738
500	34,404	Rw	40	5,596	-12	-46,404	0,0000228876
630	38,626	Rw+1	41	2,374	-11	-49,626	0,0000108993
800	42,606	Rw+2	42	-0,606	-9	-51,606	0,0000069088
1000	46,381	Rw+3	43	-3,381	-8	-54,381	0,0000036467
1250	49,736	Rw+4	44	-5,736	-9	-58,736	0,0000013378
1600	52,639	Rw+4	44	-8,639	-10	-62,639	0,0000005446
2000	54,549	Rw+4	44	-10,549	-11	-65,549	0,0000002787
2500	56,416	Rw+4	44	-12,416	-13	-69,416	0,0000001144
3150	58,586	Rw+4	44	-14,586	-15	-73,586	0,0000000438
				28,418 <32			0,0004856916

US161 ilmääneneristävyudeksi saatiin $R_w=40$ ja $R_w+C_{tr}=33$, kun sisäverhouslevynä kipsilevy EK 13 mm. US161 ilmääneneristävyudeksi, kun sisäverhouslevynä hirsipaneeli 23 mm saatiin $R_w=36$ ja $R_w+C_{tr}=30$. US161 ilmääneneristävyys, kun sisäverhouslevynä 2x kipsilevy EK 13 mm saatiin $R_w=44$ ja $R_w+C_{tr}=37$. Liitteessä 1 on esitetty tarkemmat laskelmat rakenteelle US161, sisäverhous kipsilevy EK 13 mm.

7.1.2 Hirsiseinät

Hirsiseinien ilmääneneristävyden laskeminen poikkesi pystyrunkoseinien laskemisesta siinä, että hirsiseinärakenteiden hirttä tarkasteltiin laskennassa massiivilevynä, kun pystyrunkoseinissä kaikki levyrakenteet olivat akustisesti ohuita. Hirsiseinärakenteet, jotka olivat rakenteeltaan kaksinkertaisia, voitiin laskea samalla tavalla kaksinkertaisen levyrakenteen mallilla kuin pystyrunkorakenteetkin, kunhan ensin oli laskettu toisena levypuoliskona käytetyn hirren ilmääneneristävyys luvussa 5 esitetyllä yksinkertaisen massiivilevyn laskentamallilla.

Tarkastellaan hirsiseinärakennetta US103, joka on kaksinkertainen rakenne, jossa toisena levypuoliskona on 205 mm paksu lamellihirsi ja toisena levypuoliskona käytetään sisäverhouslevynä hirsipaneelia 23 mm, kipsilevyä EK 13 mm tai 2x kipsilevy EK 13 mm. Levyjen välissä on 66 mm paksu koolaus ja kaviteetti on täytetty täysin mineraalivillalla.

Laskennassa toimittiin samalla tavalla kuin pystyrunkoseinien laskennassa. Ensin laskettiin levypuoliskojen ilmääneneristävyudet, minkä jälkeen laskettiin niiden yhteinen ilmääneneristävyys

kaksinkertaisen levyrakenteen mallilla. Sisäverhouslevyt oli laskettu jo aikaisemmin pystyrunkoseiniä varten ja samoja arvoja voitiin käyttää myös hirsiseinien laskennassa. 205 mm paksun lamelli-hirren ääneneristävyys laskettiin luvussa 5.1 esitetyllä tavalla ja sen lähtöarvoiksi valittiin kimmoduuli 11 GPa ja tiheys 500 kg/m². Hirren kokonaishäviökertoimenä ei voitu käyttää samaa arvoa kuin reunoiltaan kiinnitetyille levyille, vaan se laskettiin kaavalla 19. (4, s. 64.)

KAAVA 19. Kokonaishäviökerroin kun pintamassa enintään 800 kg/m² (4, s. 64)

$$\eta = \eta_{int} + \frac{m'}{485\sqrt{f}}$$

Kaavassa η_{int} on materiaalin sisäinen häviökerroin. Puun sisäinen häviökerroin on 0.01. (4, s. 64.)

Rakenteen US103 laskennassa otettiin huomioon levyjen välinen jäykkä kytkentä ja levyjen välinen kaviteetti oletettiin täydellisesti ääntä absorboivaksi. Taulukossa 13 on esitetty hirsiseinärakenteen US103, jossa sisäverhouksena kipsilevy EK 13 mm laskenta ilmäääneneristysluvulle ja spektripainotustustermille tieliikennemelua vastaan.

TAULUKKO 13. US103 sisäverhous kipsilevy EK 13 mm ilmäääneneristysluku ja spektripainotus tieliikennemelua vastaan (vertailukäyrä kuvaajassa sinisellä viivalla)

Taajuus	R	vertailuarvot	Vert. käyrä	erotus	L2	L2-R	10*(L2-R)/10
100	24,722	Rw-19	34	9,278	-20	-44,722	0,0000337132
125	28,616	Rw-16	37	8,384	-20	-48,616	0,0000137531
160	35,192	Rw-13	40	4,808	-18	-53,192	0,0000047951
200	40,551	Rw-10	43	2,449	-16	-56,551	0,0000022126
250	45,082	Rw-7	46	0,918	-15	-60,082	0,0000009813
315	48,894	Rw-4	49	0,106	-14	-62,894	0,0000005136
400	52,186	Rw-1	52	-0,186	-13	-65,186	0,0000003030
500	54,957	Rw	53	-1,957	-12	-66,957	0,0000002015
630	57,697	Rw+1	54	-3,697	-11	-68,697	0,0000001350
800	60,474	Rw+2	55	-5,474	-9	-69,474	0,0000001129
1000	63,042	Rw+3	56	-7,042	-8	-71,042	0,0000000787
1250	65,599	Rw+4	57	-8,599	-9	-74,599	0,0000000347
1600	68,403	Rw+4	57	-11,403	-10	-78,403	0,0000000144
2000	70,891	Rw+4	57	-13,891	-11	-81,891	0,0000000065
2500	73,496	Rw+4	57	-16,496	-13	-86,496	0,0000000022
3150	76,387	Rw+4	57	-19,387	-15	-91,387	0,0000000007
			25,943	<32			0,0000568584

Xa2	Ctr	Rw+Ctr
42,4521	-11	42

US103 ilmäääneneristävydeksi saatiin $R_w=53$ ja $R_w+C_{tr}=42$, kun sisäverhouslevynä kipsilevy EK 13 mm. US103 ilmäääneneristävydeksi, kun sisäverhouslevynä hirsipaneeli 23 mm saatiin $R_w=49$ ja $R_w+C_{tr}=41$. US103 ilmäääneneristävyys, kun sisäverhouslevynä 2x kipsilevy EK 13 mm saatiin

$R_w=56$ ja $R_w+C_{tr}=45$. Liitteessä 2 on esitetty tarkemmat laskelmat rakenteelle US103, sisäverhous kipsilevy EK 13 mm.

7.2 Yläpohjat

Yläpohjarakenteet koostuivat ohuista levyistä, joiden ilmaääneneristävydet voitiin laskea kuten pystyrunkoseinissä. Yläpohjarakenteet vaativat laskennassa lisärakenteeksi vesikaton, joka muodostaa yhdessä yläpohjan sisäkaton sisäverhouksen kanssa kaksinkertaisen rakenteen. Vesikattona käytettiin laskennassa tiivissaumakattea ja teräspeltikatetta. Tiivissaumakate koostui 3 mm paksusta kumibitumihuopakatteesta, minkä alapuolella oli 20 mm paksu yhtenäinen raakaponttilaudoitus. Teräspeltikattona käytettiin 0.5 mm paksua teräspeltiä, minkä alla harvalaudoitus. Harvalaudoitus otettiin laskennassa huomioon koolauksena yhteydessä runkoon, eikä levyrakenteena.

Kumibitumihuovan kimmomoduuli on alhainen ja laskennassa sille käytettiin arvoa 0.1 GPa. Tätä alhaisemmalla kimmomoduulilla ei huomattu olevan suurta merkitystä tuloksiin. Kumibitumihuovan tiheys oli 1 000 kg/m³. 20 mm paksun yhtenäisen raakaponttilaudoituksen kimmomoduulina ja tiheytenä käytettiin samoja arvoja kuin hirsipaneelin laskennassa. Teräspeltikatteen kimmomoduuli oli 213 GPa ja tiheys 7 800 kg/m³. (17, s. 78.)

Tarkastellaan yläpohjarakennetta YP116. YP116 on harja- tai pulpettiristikkorakenne, jossa on suora sisäkatto. Rakenteessa on 500 mm paksu lämmöneriste, minkä alla on ristiin koolaus 25 mm + 45 mm ja sisäverhouslevy. Kaikki yläpohjarakenteet laskettiin kahdella vesikatolla, ja kolmella sisäverhouslevyllä. Vesikatteenä oli edellä mainitut tiivissaumakate ja teräspeltikate ja sisäverhouslevynä oli 14 mm paksu puinen kattopaneeli, kipsilevy EK 13 mm ja 2x kipsilevy EK 13 mm. Jokainen rakenne laskettiin siis kuudella eri kokoonpanolla. Sisäverhouslevyistä kipsilevyille voitiin käyttää aiemmin laskettuja arvoja, mutta kattopaneeli laskettiin yksinkertaisen levyn laskentamallilla samoilla tiheyden ja kimmomoduulin lähtöarvoilla kuin hirsipaneeli 23 mm.

Kun yksinkertaiset levyrakenteet oli laskettu, voitiin yläpohjan YP116 ilmaääneneristävyys laskea kaksinkertaisen levyrakenteen laskentamallilla. Laskennassa otettiin huomioon levyjen välinen jäykkä kytkentä ja levyjen välinen kaviteetti laskettiin osittain ääntä absorboivana. 500 mm paksun

7.3 Osastoivat väliseinät

Osastoiville väliseinille määriteltiin äänitasoeroluvut $D_{nT,w}$ tuotevalmistajien rakennekirjastoista löytyviin samanlaisiin rakenteisiin ja niiden ilmoitettuihin ääniluokkiin vertaamalla tai suoraan valmistajan rakennusosille ilmoittamiin arvoihin vertaamalla. Ympäristöministeriön asetuksessa 796/2017 on määrätty asuntojen ja majoitus- tai potilashuoneiden väliselle äänitasoeroluvulle vähimmäisvaatimus 55 dB. Voidaan todeta, että rakenteen tilojen välinen ääneneristävyys on riittävä, kun sen äänitasoeroluku on vähintään 55 dB. (12.)

Osastoivaa väliseinärakennetta OVS101 verrattiin Saint-Gobain Gyprocin rakennekirjastosta löytyvään väliseinärakenteeseen Gyproc GD 66/66x2 (600) KN-NK A132. Molemmissa rakenteissa runkona oli 2x66 mm kytkemätön tuplaranka sekä 2x66 mm ja yhteensä 132 mm paksu eriste. Kummankin rakenteen molemmilla puolen verhouksena oli kaksinkertainen kipsilevy. Gyprocin rakennekirjastosta löytyvälle väliseinärakenteelle oli ilmoitettu äänitasoeroluvuksi 57 dB, jota käytettiin myös rakenteen OVS101 äänitasoeroluvun arvona. (29.)

OVS102 on rakenteen OVS101 kanssa muuten täysin samanlainen, mutta OVS101:ssä on kaksinkertaisen kipsilevyn lisäksi vielä hirsipaneeli. OVS102 rakenteen voitiin olettaa saavuttavan vähintään sama äänitasoeroluku kuin OVS101, joka ylittää vähimmäisvaatimuksen 55 dB.

Väliseinärakenne OVS103 ei kuulunut Kontion vakiorakenteisiin ja sille löydettiin vastaava rakenne Saint-Gobain Weberin rakennekirjastosta, nimettynä F52 01 08. OVS103 osastoiva väliseinä sekä rakenne F52 01 08 koostuivat Weber Kahi Desibelipontti 300x240x128 harkoista, joiden oli ilmoitettu soveltuvan asuntojen väliseksi seinäratkaisuksi, eli se täyttää ainakin vähimmäisvaatimuksen 55 dB. (26; 30.)

Osastoiva väliseinärakenne OVS104 ei myöskään kuulunut Kontion vakiorakenteisiin ja se koostuu kahdesta Weber Kahi Runkopontti 300x130x198 harkosta, joiden välissä on 50 mm paksu väli, jossa on 30 mm paksu eriste. Kyseinen rakenne löytyi tuotevalmistajan rakennekirjastosta nimellä F52 01 13, mutta sille ei oltu ilmoitettu äänitasoerolukua $D_{nT,w}$. Rakenteen ilmaääneneristysluku R_w oli kuitenkin ilmoitettu ja se oli huomattavasti suurempi kuin esimerkiksi rakenteessa F52 01 08.

Tällä perusteella rakenteen OVS104 voitiin luotettavasti todeta saavuttavan ainakin huoneistojen väliselle äänitasoeroluvulle asetettu vähimmäisvaatimus 55 dB. (26.)

8 YHTEENVETO

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli määrittää Kontio-pientalorakenteiden palotekniset ja ääneneristävyyden ominaisuudet sekä tutustua niitä koskeviin viranomaismääräyksiin. Rakennetyyppejä olivat hirsi- tai puupystyrunkoiset ulkoseinät ja ristikon kaulusrakenteet, puurunkoiset tai muuratut osastoivat väliseinärakenteet sekä puurunkoiset yläpohjarakenteet.

Palotekniset arvot saatiin määriteltyä rakenteille hyvällä luotettavuudella standardeihin ja suunniteltuohjeisiin perustuvilla laskentaohjelmilla sekä määrittelemällä rakenteen palotekniset arvot vertaamalla niitä samanlaisten rakenteiden aikaisemmista tutkimuksista saatuihin tuloksiin tai tuotevalmistajan ilmoittamiin rakenteiden paloteknisiin arvoihin. Paloteknisiä ominaisuuksia määriteltessä otettiin huomioon myös rakenteen vaihtoehtoisia kokoonpanoja, kuten rakenteen sisäverhouslevyn tai lämmöneristeen tyyppi.

Osastovien väliseinien ääneneristävyydet määriteltiin tuotevalmistajien ilmoittamien vastaavien rakenteiden ja rakennusmateriaalien ääneneristävyyksien arvojen perusteella.

Ulkoseinä- ja yläpohjarakenteiden ilmaääneneristävyydet laskettiin soveltamalla yksinkertaisen levyn ja kaksinkertaisen levyrakenteen laskentamalleja. Laskennassa otettiin huomioon erilaisia kokoonpanoja rakenteille, kuten esimerkiksi sisäverhouslevyn ja vesikaton tyyppi. Rakenteiden ilmaääneneristävyyksien laskenta osoittautui työn aikana erittäin hankalaksi, sillä monikerroksisten rakenteiden laskentaan vaikuttavia tekijöitä oli paljon. Laskentaa varten saatavaa tietoa ja ohjeistusta oli saatavilla niukasti ja saatavilla oleva ohjeistus oli osittain tulkinnan varaista. Loppujen lopuksi ilmaääneneristävyyksille saadut tulokset olivat keskenään säännöllisiä ja vastaavanlaisiin rakenteisiin sekä niiden ilmoitettuihin arvoihin verrattuna järkeviä.

Laskentamallia ei ole validoitu työn aikana, minkä takia laskennasta saadut tulokset ovat vain arvioita rakenteiden todellisista ilmaääneneristävyyksistä. Vielä tarkempia arvioita varten laskentamallin toimivuutta pitäisi tarkastella vertaamalla sillä saatuja tuloksia rakenteiden mittaamalla saatuihin

ilmääneneristävyyksiin ja parantamalla laskentamallia saatujen vertailutuloksien mukaan. Ilmaääneneristävyyksien laskenta manuaalisesti on hidasta ja työlästä, ja laskennan helpottamista varten validoidusta laskentamallista voitaisiin kehittää jatkossa laskentaohjelma.

LÄHTEET

1. Kontiotuote Oy. Kontio. Hakupäivä 8.4.2024. <https://www.kontio.com/fi-FI/kontiotuote-oy/>.
2. Puucomp 2021. Rakennusakustiikka ja rakennusten akustinen suunnittelu. Hakupäivä 18.4.2024. <https://www.puucomp.com/fi/blogi/rakennusten-akustinen-suunnittelu>.
3. Lahtela, Tero, Kylliäinen, Mikko, Lietzen, Jesse, Kovalainen, Ville & Talus, Lauri 2021. Ääneneristys puutalossa. Helsinki: Puuinfo Oy. Hakupäivä 8.4.2024. <https://puuinfo.fi/suunnittelu/ohjeet/aaneneristys-puutalossa/>.
4. Kylliäinen, Mikko, Tervo, Sakari & Yli-Pietilä, Arttu 2023. Talonrakentamisen akustiikka. Tampere: Tampereen yliopisto. Hakupäivä 9.4.2024. <https://trepo.tuni.fi/handle/10024/144820>.
5. Kylliäinen, Mikko 2011. Kivitalojen ääneneristys. Helsinki: Suomen rakennusmedia Oy. Hakupäivä 8.4.2024. <https://kivitaloinfo.fi/julkaisut/suunnitteluohjeet/kivitalojen-aaneneristys/>.
6. SFS-EN ISO 717-1:2020:en. Acoustics. Rating of sound insulation in buildings and of building elements. Part 1: Airborne sound insulation. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. Vaatii lisenssin.
7. Hongisto, Valtteri 2023. Rakennusakustiikka ja meluntorjunta. Hakupäivä 11.4.2024. https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/2155741/mod_folder/content/0/Hongisto%2026012023%20FI.pdf?forcedownload=1.
8. Ympäristöministeriö 2024. Suomen rakentamismääräyskokoelma. Hakupäivä 17.4.2024. <https://ym.fi/rakentamismaaraykset>.
9. Puuinfo 2021. Paloturvallinen puutalo. Helsinki: Puuinfo Oy. Hakupäivä 17.4.2024. <https://puuinfo.fi/suunnittelu/ohjeet/paloturvallinen-puutalo-asuin-ja-toimitilarakentaminen/>.
10. Puuinfo 2020. Paloturvallisuus. Hakupäivä 17.4.2024. <https://puuinfo.fi/suunnittelu/maaraykset/paloturvallisuus/>.
11. Suomi.fi 2024. Rakennetun ympäristön sanasto. Pientalo. Hakupäivä 18.4.2024. <https://sanastot.suomi.fi/terminology/95d5a174-01af-4825-bae2-fd5fcaed1774/concept/0507353b-b04c-4d6e-ac82-dc9ea1654ad9>.
12. Ympäristöministeriö 2017. Suomen rakentamismääräyskokoelma. Meluntorjunta ja ääniolosuhteet. Hakupäivä 18.4.2024. <https://ym.fi/rakentamismaaraykset>.

13. Ääniympäristö 2018. Ympäristöministeriön ohje rakennuksen ääniympäristöstä. Helsinki: Ympäristöministeriö. Hakupäivä 18.4.2024. https://ym.fi/documents/1410903/38439968/Ymparistoministerion-ohje-rakennuksen-aainymparistosta-2852D34E_DA43_4DCA_9CEE_47DBB9EFCB08-138568.pdf.
14. Ympäristöministeriö 2003. Maankäyttö- ja rakennuslakiopas. Asemakaavamerkinnot ja -määräykset. Hakupäivä 18.4.2024. <https://ym.fi/documents/1410903/155128351/Opas+12+Asemakaavamerkinnot%20ja+sivut+109-210.pdf/0b84fbbd-02df-8737-9723-56e8ea1e4029/Opas+12+Asemakaavamerkinnot%20ja+sivut+109-210.pdf?t=1680090390202>.
15. Ympäristöministeriö 2017. Suomen rakentamismääräyskokoelma. Paloturvallisuus. Hakupäivä 18.4.2024. <https://ym.fi/rakentamismaaraykset>.
16. Topten 2022. Pientalon palokortti. P3-paloluokan pientalon paloturvallisuuden perusteita. Hakupäivä 19.4.2024. <https://toptenrava.fi/tulkintakortti/p3-paloluokan-pientalon-paloturvallisuuden-perusteita/>.
17. Hongisto, Valtteri 2007. Levyrakenneseinien ilmaääneneristävyyden mallintaminen. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennetekniikan laitos. Hakupäivä 22.5.2024. https://www.researchgate.net/profile/Valtteri-Hongisto-2/publication/267202272_Levyrakenneseinien_ilmaaaneneristavyyden_mallintaminen/links/54d667fd0cf2970e4e6c9ad7/Levyrakenneseinien-ilmaaaneneristavyyden-mallintaminen.pdf.
18. Hirsitaloteollisuus Ry. Suunnittelijalle. Palomääräykset julkisissa rakennuksissa. Hakupäivä 4.5.2024. <https://www.hirsikoti.fi/fi/suunnittelijalle>.
19. Saint-Gobain Isover 2024. Tuotteet. Kevyet rakennuseristeet. Hakupäivä 4.5.2024. <https://www.isover.fi/tuotteet/isover-premium-33-0#tuotekuvaus>.
20. Ekovilla 2020. Tuotteet ja palvelut. Ekovillalevy. Hakupäivä 4.5.2024. <https://ekovilla.com/tuotteet/ekovillalevy/>.
21. SFS-EN 1995-1-2. Puurakenteiden suunnittelu. Osa 1-2: Yleistä. Puurakenteiden palomitoitus. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. Vaatii lisenssin.
22. RIL 205-2-2019. Puurakenteiden palomitoitus. Eurokoodi EN 1995-1-2. Helsinki: Suomen Rakennusinsinööriliitto RIL ry.

23. Puuinfo 2020. Mitoitustyökalut. Kantavan seinän palomitoitus. Hakupäivä 4.5.2024.
<https://puuinfo.fi/suunnittelu/mitoitustyokalu/kantavan-seinan-palomitoitus/>.
24. Puuinfo 2019. Mitoitustyökalut. Seinän osastoivuuden mitoitus. Hakupäivä 4.5.2024.
<https://puuinfo.fi/suunnittelu/mitoitustyokalu/seinan-osastoivuuden-mitoitus/>.
25. Puuinfo 2013. Tekninen tiedote. Puurakenteen palomitoitus. Hakupäivä 5.5.2024.
https://vanha.oamk.fi/~pekkaki/puurakenteet_2/suunnitteluohjeita/palomitoitus/puura-kenteenpalomitoitus.pdf.
26. Saint-Gobain Weber 2024. Mallidetallit. Kahi-väliseinät, rakennetyypit. Hakupäivä 5.5.2024.
<https://www.fi.weber/mallidetallit/detaljit-kahi-tiili-ja-harkkorakenteet/kahi-valiseinat-rakennetyypit>.
27. Puuinfo 2020. Puun ominaisuudet. Lujuusteknisiä ominaisuuksia. Hakupäivä 23.5.2024.
<https://puuinfo.fi/puutieto/puun-ominaisuuksia/lujuusteknisia-ominaisuuksia/>.
28. Saint-Gobain Gyproc 2024. Tuotteet. Gyproc GEK 13 ERIKOISKOVA. Hakupäivä 23.5.2024.
<https://www.gyproc.fi/Tuotteet/gyproc-gek-13-erikoiskova#marketing-description>.
29. Saint-Gobain Gyproc 2024. Rakenteet. Kevyet väliseinärakenteet. Hakupäivä 27.5.2024.
<https://www.gyproc.fi/rakenteet>.
30. Saint-Gobain Weber 2024. Kahi-tiilet ja -harkot. Kahi-harkot. Hakupäivä 27.5.2024.
<https://www.fi.weber/kahi-tiilet-ja-harkot/kahi-harkot/kahi-desibelipontti-300x240x128>.

Vakioita

Poissonin suhde	Äänen nopeus ilmassa	Häviökerroin	Ilman tiheys 20 °C
$\mu := 0.2$	$c_0 := 343 \frac{m}{s}$	$\eta := 0.02$	$p_0 := 1.2041 \frac{kg}{m^3}$

Yksinkertaisen levyn malli

$$R := 20 \cdot \log \left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0} \right) + 20 \cdot \log \left(1 - \left(\frac{f}{f_c} \right)^2 \right) - 5 \quad f < f_c$$

$$R := 20 \cdot \log \left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0} \right) + 10 \cdot \log \left(\frac{2 \eta \cdot f}{\pi \cdot f_c} \right) \quad f \geq f_c$$

$$f_c := \frac{c_0^2}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{12 (1 - \mu^2) m'}{E \cdot h^3}}$$

E=kimmokerroin, h=levyn paksuus, m'=levyn pintamassa

23x275 Hirsipaneeli

$$E := 11000000000 \text{ Pa} \quad p_m := 420 \frac{kg}{m^3} \quad h := 0.023 \text{ m} \quad m' := p_m \cdot h = 9.66 \frac{kg}{m^2}$$

$$f_c := \frac{c_0^2}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{12 (1 - \mu^2) m'}{E \cdot h^3}} = 539.927 \text{ Hz}$$

 $f < f_c$

$$f := 100 \text{ Hz}$$

$$R_{100.1} := 20 \cdot \log \left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0} \right) + 20 \cdot \log \left(1 - \left(\frac{f}{f_c} \right)^2 \right) - 5 = 12.02$$

$$f := 125 \text{ Hz}$$

$$R_{125.1} := 20 \cdot \log \left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0} \right) + 20 \cdot \log \left(1 - \left(\frac{f}{f_c} \right)^2 \right) - 5 = 13.783$$

$$f := 160 \text{ Hz}$$

$$R_{160.1} := 20 \cdot \log \left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0} \right) + 20 \cdot \log \left(1 - \left(\frac{f}{f_c} \right)^2 \right) - 5 = 15.607$$

$$f := 200 \text{ Hz}$$

$$R_{200.1} := 20 \cdot \log\left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0}\right) + 20 \cdot \log\left(1 - \left(\frac{f}{f_c}\right)^2\right) - 5 = 17.062$$

$$f := 250 \text{ Hz}$$

$$R_{250.1} := 20 \cdot \log\left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0}\right) + 20 \cdot \log\left(1 - \left(\frac{f}{f_c}\right)^2\right) - 5 = 18.186$$

$$f := 315 \text{ Hz}$$

$$R_{315.1} := 20 \cdot \log\left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0}\right) + 20 \cdot \log\left(1 - \left(\frac{f}{f_c}\right)^2\right) - 5 = 18.676$$

$$f := 400 \text{ Hz}$$

$$R_{400.1} := 20 \cdot \log\left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0}\right) + 20 \cdot \log\left(1 - \left(\frac{f}{f_c}\right)^2\right) - 5 = 17.451$$

$$f := 500 \text{ Hz}$$

$$R_{500.1} := 20 \cdot \log\left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0}\right) + 20 \cdot \log\left(1 - \left(\frac{f}{f_c}\right)^2\right) - 5 = 9.375$$

$$f \geq f_c$$

$$f := 630 \text{ Hz}$$

$$R_{630.1} := 20 \cdot \log\left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0}\right) + 10 \cdot \log\left(\frac{2 \eta \cdot f}{\pi \cdot f_c}\right) = 15.029$$

$$f := 800 \text{ Hz}$$

$$R_{800.1} := 20 \cdot \log\left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0}\right) + 10 \cdot \log\left(\frac{2 \eta \cdot f}{\pi \cdot f_c}\right) = 18.142$$

$$f := 1000 \text{ Hz}$$

$$R_{1000.1} := 20 \cdot \log\left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0}\right) + 10 \cdot \log\left(\frac{2 \eta \cdot f}{\pi \cdot f_c}\right) = 21.049$$

$$f := 1250 \text{ Hz}$$

$$R_{1250.1} := 20 \cdot \log\left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0}\right) + 10 \cdot \log\left(\frac{2 \eta \cdot f}{\pi \cdot f_c}\right) = 23.956$$

$$f := 1600 \text{ Hz}$$

$$R_{1600.1} := 20 \cdot \log\left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0}\right) + 10 \cdot \log\left(\frac{2 \eta \cdot f}{\pi \cdot f_c}\right) = 27.173$$

$$f := 2000 \text{ Hz}$$

$$R_{2000.1} := 20 \cdot \log\left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0}\right) + 10 \cdot \log\left(\frac{2 \eta \cdot f}{\pi \cdot f_c}\right) = 30.08$$

$$f := 2500 \text{ Hz}$$

$$R_{2500.1} := 20 \cdot \log\left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0}\right) + 10 \cdot \log\left(\frac{2 \eta \cdot f}{\pi \cdot f_c}\right) = 32.987$$

$$f := 3150 \text{ Hz}$$

$$R_{3150.1} := 20 \cdot \log\left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0}\right) + 10 \cdot \log\left(\frac{2 \eta \cdot f}{\pi \cdot f_c}\right) = 35.998$$

$$R_{100.1} = 12.02$$

Hirsipaneeli

$$R_{125.1} = 13.783$$

$$R_{160.1} = 15.607$$

$$R_{200.1} = 17.062$$

$$R_{250.1} = 18.186$$

$$R_{315.1} = 18.676$$

$$R_{400.1} = 17.451$$

$$R_{500.1} = 9.375$$

$$R_{630.1} = 15.029$$

$$R_{800.1} = 18.142$$

$$R_{1000.1} = 21.049$$

$$R_{1250.1} = 23.956$$

$$R_{1600.1} = 27.173$$

$$R_{2000.1} = 30.08$$

$$R_{2500.1} = 32.987$$

$$R_{3150.1} = 35.998$$

Tuulensuojalevy 12mm

$$E := 300000000 \text{ Pa} \quad m' := 3.1 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \quad p_m := 258.3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad h := 0.012 \text{ m}$$

$$f_c := \frac{c_0^2}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{12 (1 - \mu^2) m'}{E \cdot h^3}} = 4914.541 \text{ Hz}$$

$$f := 100 \text{ Hz}$$

$$R_{100.2} := 20 \cdot \log\left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0}\right) + 20 \cdot \log\left(1 - \left(\frac{f}{f_c}\right)^2\right) - 5 = 2.448$$

$$f := 125 \text{ Hz}$$

$$R_{125.2} := 20 \cdot \log\left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0}\right) + 20 \cdot \log\left(1 - \left(\frac{f}{f_c}\right)^2\right) - 5 = 4.384$$

$$f := 160 \text{ Hz}$$

$$R_{160.2} := 20 \cdot \log\left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0}\right) + 20 \cdot \log\left(1 - \left(\frac{f}{f_c}\right)^2\right) - 5 = 6.524$$

$$f := 200 \text{ Hz}$$

$$R_{200.2} := 20 \cdot \log\left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0}\right) + 20 \cdot \log\left(1 - \left(\frac{f}{f_c}\right)^2\right) - 5 = 8.457$$

$$f := 250 \text{ Hz}$$

$$R_{250.2} := 20 \cdot \log\left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0}\right) + 20 \cdot \log\left(1 - \left(\frac{f}{f_c}\right)^2\right) - 5 = 10.387$$

$$f := 315 \text{ Hz}$$

$$R_{315.2} := 20 \cdot \log\left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0}\right) + 20 \cdot \log\left(1 - \left(\frac{f}{f_c}\right)^2\right) - 5 = 12.382$$

$$f := 400 \text{ Hz}$$

$$R_{400.2} := 20 \cdot \log\left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0}\right) + 20 \cdot \log\left(1 - \left(\frac{f}{f_c}\right)^2\right) - 5 = 14.435$$

$$f := 500 \text{ Hz}$$

$$R_{500,2} := 20 \cdot \log\left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0}\right) + 20 \cdot \log\left(1 - \left(\frac{f}{f_c}\right)^2\right) - 5 = 16.34$$

$$f := 630 \text{ Hz}$$

$$R_{630,2} := 20 \cdot \log\left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0}\right) + 20 \cdot \log\left(1 - \left(\frac{f}{f_c}\right)^2\right) - 5 = 18.294$$

$$f := 800 \text{ Hz}$$

$$R_{800,2} := 20 \cdot \log\left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0}\right) + 20 \cdot \log\left(1 - \left(\frac{f}{f_c}\right)^2\right) - 5 = 20.28$$

$$f := 1000 \text{ Hz}$$

$$R_{1000,2} := 20 \cdot \log\left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0}\right) + 20 \cdot \log\left(1 - \left(\frac{f}{f_c}\right)^2\right) - 5 = 22.084$$

$$f := 1250 \text{ Hz}$$

$$R_{1250,2} := 20 \cdot \log\left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0}\right) + 20 \cdot \log\left(1 - \left(\frac{f}{f_c}\right)^2\right) - 5 = 23.808$$

$$f := 1600 \text{ Hz}$$

$$R_{1600,2} := 20 \cdot \log\left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0}\right) + 20 \cdot \log\left(1 - \left(\frac{f}{f_c}\right)^2\right) - 5 = 25.56$$

$$f := 2000 \text{ Hz}$$

$$R_{2000,2} := 20 \cdot \log\left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0}\right) + 20 \cdot \log\left(1 - \left(\frac{f}{f_c}\right)^2\right) - 5 = 26.899$$

$$f := 2500 \text{ Hz}$$

$$R_{2500,2} := 20 \cdot \log\left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0}\right) + 20 \cdot \log\left(1 - \left(\frac{f}{f_c}\right)^2\right) - 5 = 27.809$$

$$f := 3150 \text{ Hz}$$

$$R_{3150,2} := 20 \cdot \log\left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0}\right) + 20 \cdot \log\left(1 - \left(\frac{f}{f_c}\right)^2\right) - 5 = 27.822$$

$$\begin{aligned}
 R_{100,2} &= 2.448 \\
 R_{125,2} &= 4.384 \\
 R_{160,2} &= 6.524 \\
 R_{200,2} &= 8.457 \\
 R_{250,2} &= 10.387 \\
 R_{315,2} &= 12.382 \\
 R_{400,2} &= 14.435 \\
 R_{500,2} &= 16.34 \\
 R_{630,2} &= 18.294 \\
 R_{800,2} &= 20.28 \\
 R_{1000,2} &= 22.084 \\
 R_{1250,2} &= 23.808 \\
 R_{1600,2} &= 25.56 \\
 R_{2000,2} &= 26.899 \\
 R_{2500,2} &= 27.809 \\
 R_{3150,2} &= 27.822
 \end{aligned}$$

tuulensuojalevy

Levyjen yhteinen ilmaääneneristävyys

$$m'_1 := 9.66 \quad m'_2 := 3.1 \quad d := 0.025 \quad c_0 := 343$$

Kaksinkertainen levyrakenne

$$R := -10 \cdot \log \left(10^{\frac{-R_1}{10}} + 10^{\frac{-R_2}{10}} \right)$$

Täydellisesti ääntä absorboiva kaviteetti

$$R_{cf} := 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_1}{20}} + 10^{\frac{R_2}{20}} \right) \quad f < f_{mam}$$

$$R_{cf} := \boxed{R_1} + R_2 + 20 \cdot \log(f \cdot d) - 29 \quad f_{mam} < f < f_d$$

$$R_{cf} := \boxed{R_1} + R_2 + 6 \quad f > f_d$$

$$f_{mam} := 80 \cdot \sqrt{\frac{(m'_1 + m'_2)}{d \cdot m'_1 \cdot m'_2}} = 330.275$$

$$f_d := \frac{c_0}{2 \cdot \pi \cdot d} = 2183.606$$

$$f < f_{mam}$$

$$R_{cl,100} := 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{100,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{100,2}}{20}} \right) = 14.511$$

$$R_{cl,125} := 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{125,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{125,2}}{20}} \right) = 16.318$$

$$R_{cl,160} := 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{160,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{160,2}}{20}} \right) = 18.223$$

$$R_{cl,200} := 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{200,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{200,2}}{20}} \right) = 19.805$$

$$R_{cl,250} := 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{250,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{250,2}}{20}} \right) = 21.155$$

$$R_{cl,315} := 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{315,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{315,2}}{20}} \right) = 22.107$$

$$f_{mam} < f < f_d$$

$$R_{cl,400} := R_{400,1} + R_{400,2} + 20 \cdot \log(400 \cdot d) - 29 = 22.886$$

$$R_{cl,500} := R_{500,1} + R_{500,2} + 20 \cdot \log(500 \cdot d) - 29 = 18.653$$

$$R_{cl,630} := R_{630,1} + R_{630,2} + 20 \cdot \log(630 \cdot d) - 29 = 28.269$$

$$R_{cl,800} := R_{800,1} + R_{800,2} + 20 \cdot \log(800 \cdot d) - 29 = 35.442$$

$$R_{cl,1000} := R_{1000,1} + R_{1000,2} + 20 \cdot \log(1000 \cdot d) - 29 = 42.092$$

$$R_{cl,1250} := R_{1250,1} + R_{1250,2} + 20 \cdot \log(1250 \cdot d) - 29 = 48.662$$

$$R_{cl,1600} := R_{1600,1} + R_{1600,2} + 20 \cdot \log(1600 \cdot d) - 29 = 55.774$$

$$R_{cl,2000} := R_{2000,1} + R_{2000,2} + 20 \cdot \log(2000 \cdot d) - 29 = 61.959$$

$$f > f_d$$

$$R_{cl,2500} := R_{2500,1} + R_{2500,2} + 6 = 66.796$$

$$R_{cl,3150} := R_{3150,1} + R_{3150,2} + 6 = 69.821$$

Epätäydellisesti ääntä absorboiva kaviteetti

$$R_{cII} := \overline{R_{cl}} + \Delta R_{abs}$$

$$\Delta R_{abs} := 10 \cdot \log(a_{eff})$$

$$a_{eff} := \frac{0.01}{0.025} = 0.4 \quad 0.025 \text{ kaviteetin paksuus}$$

$$\Delta R_{abs} := 10 \cdot \log(a_{eff}) = -3.979$$

$$R_{cII,100} := R_{cl,100} + \Delta R_{abs} = 10.532$$

$$R_{cII,125} := R_{cl,125} + \Delta R_{abs} = 12.338$$

$$R_{cII,160} := R_{cl,160} + \Delta R_{abs} = 14.244$$

$$R_{cII,200} := R_{cl,200} + \Delta R_{abs} = 15.826$$

$$R_{cII,250} := R_{cl,250} + \Delta R_{abs} = 17.175$$

$$R_{cII,315} := R_{cl,315} + \Delta R_{abs} = 18.128$$

$$R_{cII,400} := R_{cl,400} + \Delta R_{abs} = 18.906$$

$$R_{cII,500} := R_{cl,500} + \Delta R_{abs} = 14.674$$

$$R_{cII,630} := R_{cl,630} + \Delta R_{abs} = 24.29$$

$$R_{cII,800} := R_{cl,800} + \Delta R_{abs} = 31.463$$

$$R_{cII.1000} := R_{cI.1000} + \Delta R_{abs} = 38.112$$

$$R_{cII.1250} := R_{cI.1250} + \Delta R_{abs} = 44.682$$

$$R_{cII.1600} := R_{cI.1600} + \Delta R_{abs} = 51.795$$

$$R_{cII.2000} := R_{cI.2000} + \Delta R_{abs} = 57.979$$

$$R_{cII.2500} := R_{cI.2500} + \Delta R_{abs} = 62.817$$

$$R_{cII.3150} := R_{cI.3150} + \Delta R_{abs} = 65.841$$

Jäykkä kiinnitys välissä

$$R_{bf} := 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_1}{20}} + 10^{\frac{R_2}{20}} \right) + \Delta R_b$$

$$\Delta R_b := 10 \cdot \log (b \cdot f_{cL}) + 20 \cdot \log \left(\frac{m'_1}{m'_1 + m'_2} \right) - 18$$

$$b := 0.6$$

$$f_{cL} := \left(\frac{m'_1 \cdot \sqrt{f_{c2}} + m'_2 \cdot \sqrt{f_{c1}}}{m'_1 + m'_2} \right)^2$$

$$f_{c1} := 539.927 \quad f_{c2} := 4914.541$$

$$f_{cL} := \left(\frac{m'_1 \cdot \sqrt{f_{c2}} + m'_2 \cdot \sqrt{f_{c1}}}{m'_1 + m'_2} \right)^2 = 3447.744 \quad m' := \left(\frac{f_{c1} \cdot \sqrt{m'_2} + f_{c2} \cdot \sqrt{m'_1}}{f_{c1} + f_{c2}} \right)^2 = 8.849$$

$$\Delta R_b := 10 \cdot \log (b \cdot f_{cL}) + 20 \cdot \log \left(\frac{m'_1}{m'_1 + m'_2} \right) - 18 = 12.739$$

$$R_{bf} := 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_1}{20}} + 10^{\frac{R_2}{20}} \right) + \Delta R_b = ?$$

$$\begin{aligned}
 R_{bf,100} &:= 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{100,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{100,2}}{20}} \right) + \Delta R_b = 27.251 \\
 R_{bf,125} &:= 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{125,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{125,2}}{20}} \right) + \Delta R_b = 29.057 \\
 R_{bf,160} &:= 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{160,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{160,2}}{20}} \right) + \Delta R_b = 30.963 \\
 R_{bf,200} &:= 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{200,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{200,2}}{20}} \right) + \Delta R_b = 32.544 \\
 R_{bf,250} &:= 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{250,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{250,2}}{20}} \right) + \Delta R_b = 33.894 \\
 R_{bf,315} &:= 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{315,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{315,2}}{20}} \right) + \Delta R_b = 34.847 \\
 R_{bf,400} &:= 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{400,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{400,2}}{20}} \right) + \Delta R_b = 34.833 \\
 R_{bf,500} &:= 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{500,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{500,2}}{20}} \right) + \Delta R_b = 32.298 \\
 R_{bf,630} &:= 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{630,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{630,2}}{20}} \right) + \Delta R_b = 35.574 \\
 R_{bf,800} &:= 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{800,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{800,2}}{20}} \right) + \Delta R_b = 38.036 \\
 R_{bf,1000} &:= 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{1000,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{1000,2}}{20}} \right) + \Delta R_b = 40.342 \\
 R_{bf,1250} &:= 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{1250,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{1250,2}}{20}} \right) + \Delta R_b = 42.643 \\
 R_{bf,1600} &:= 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{1600,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{1600,2}}{20}} \right) + \Delta R_b = 45.164 \\
 R_{bf,2000} &:= 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{2000,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{2000,2}}{20}} \right) + \Delta R_b = 47.394 \\
 R_{bf,2500} &:= 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{2500,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{2500,2}}{20}} \right) + \Delta R_b = 49.538 \\
 R_{bf,3150} &:= 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{3150,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{3150,2}}{20}} \right) + \Delta R_b = 51.599
 \end{aligned}$$

$$R_{100} := -10 \cdot \log \left(10^{\frac{-R_{cL100}}{10}} + 10^{\frac{-R_{dL100}}{10}} \right) = 10.441$$

$$R_{125} := -10 \cdot \log \left(10^{\frac{-R_{cL125}}{10}} + 10^{\frac{-R_{dL125}}{10}} \right) = 12.247$$

$$R_{160} := -10 \cdot \log \left(10^{\frac{-R_{cL160}}{10}} + 10^{\frac{-R_{dL160}}{10}} \right) = 14.152$$

$$R_{200} := -10 \cdot \log \left(10^{\frac{-R_{cL200}}{10}} + 10^{\frac{-R_{dL200}}{10}} \right) = 15.734$$

$$R_{250} := -10 \cdot \log \left(10^{\frac{-R_{cL250}}{10}} + 10^{\frac{-R_{dL250}}{10}} \right) = 17.084$$

$$R_{315} := -10 \cdot \log \left(10^{\frac{-R_{cL315}}{10}} + 10^{\frac{-R_{dL315}}{10}} \right) = 18.036$$

$$R_{400} := -10 \cdot \log \left(10^{\frac{-R_{cL400}}{10}} + 10^{\frac{-R_{dL400}}{10}} \right) = 18.797$$

$$R_{500} := -10 \cdot \log \left(10^{\frac{-R_{cL500}}{10}} + 10^{\frac{-R_{dL500}}{10}} \right) = 14.599$$

$$R_{630} := -10 \cdot \log \left(10^{\frac{-R_{cL630}}{10}} + 10^{\frac{-R_{dL630}}{10}} \right) = 23.978$$

$$R_{800} := -10 \cdot \log \left(10^{\frac{-R_{cL800}}{10}} + 10^{\frac{-R_{dL800}}{10}} \right) = 30.599$$

$$R_{1000} := -10 \cdot \log \left(10^{\frac{-R_{cL1000}}{10}} + 10^{\frac{-R_{dL1000}}{10}} \right) = 36.075$$

$$R_{1250} := -10 \cdot \log \left(10^{\frac{-R_{cL1250}}{10}} + 10^{\frac{-R_{dL1250}}{10}} \right) = 40.534$$

$$R_{1600} := -10 \cdot \log \left(10^{\frac{-R_{cL1600}}{10}} + 10^{\frac{-R_{dL1600}}{10}} \right) = 44.31$$

$$R_{2000} := -10 \cdot \log \left(10^{\frac{-R_{cL2000}}{10}} + 10^{\frac{-R_{dL2000}}{10}} \right) = 47.03$$

$$R_{2500} := -10 \cdot \log \left(10^{\frac{-R_{cL2500}}{10}} + 10^{\frac{-R_{dL2500}}{10}} \right) = 49.339$$

$$R_{3150} := -10 \cdot \log \left(10^{\frac{-R_{cL3150}}{10}} + 10^{\frac{-R_{dL3150}}{10}} \right) = 51.438$$

$$m' := \frac{m'_1 + m'_2}{2} = 6.38 \quad f_c := f_{cL} = 3447.744$$

Vakioita

Poissonin suhde	Äänen nopeus ilmassa	Häviökerroin	Ilman tiheys 20 °C
$\mu := 0.20$	$c_0 := 343 \frac{m}{s}$	$\eta := 0.02$	$p_0 := 1.2041 \frac{kg}{m^3}$

Yksinkertaisen levyn malli

$$R := 20 \cdot \log \left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0} \right) + 20 \cdot \log \left(1 - \left(\frac{f}{f_c} \right)^2 \right) - 5 \quad f < f_c$$

$$R := 20 \cdot \log \left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0} \right) + 10 \cdot \log \left(\frac{2 \eta \cdot f}{\pi \cdot f_c} \right) \quad f \geq f_c$$

$$f_c := \frac{c_0^2}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{12 (1 - \mu^2) m'}{E \cdot h^3}}$$

E=kimmokerroin, h=levyn paksuus, m'=levyn pintamassa

Kipsilevy EK 13mm

$$E := 3000000000 \text{ Pa} \quad h := 0.013 \text{ m} \quad m' := 9.9 \frac{kg}{m^2} \quad p_m := \frac{m'}{h} = 761.538 \frac{kg}{m^3}$$

$$f_c := \frac{c_0^2}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{12 (1 - \mu^2) m'}{E \cdot h^3}} = 2463.069 \text{ Hz}$$

 $f < f_c$

$$f := 100 \text{ Hz}$$

$$R_{100} := 20 \cdot \log \left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0} \right) + 20 \cdot \log \left(1 - \left(\frac{f}{f_c} \right)^2 \right) - 5 = 12.522$$

$$f := 125 \text{ Hz}$$

$$R_{125} := 20 \cdot \log \left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0} \right) + 20 \cdot \log \left(1 - \left(\frac{f}{f_c} \right)^2 \right) - 5 = 14.452$$

$$f := 160 \text{ Hz}$$

$$R_{160} := 20 \cdot \log \left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0} \right) + 20 \cdot \log \left(1 - \left(\frac{f}{f_c} \right)^2 \right) - 5 = 16.582$$

$$f := 200 \text{ Hz}$$

$$R_{200} := 20 \cdot \log \left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0} \right) + 20 \cdot \log \left(1 - \left(\frac{f}{f_c} \right)^2 \right) - 5 = 18.5$$

$$f := 250 \text{ Hz}$$

$$R_{250} := 20 \cdot \log \left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0} \right) + 20 \cdot \log \left(1 - \left(\frac{f}{f_c} \right)^2 \right) - 5 = 20.405$$

$$f := 315 \text{ Hz}$$

$$R_{315} := 20 \cdot \log \left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0} \right) + 20 \cdot \log \left(1 - \left(\frac{f}{f_c} \right)^2 \right) - 5 = 22.36$$

$$f := 400 \text{ Hz}$$

$$R_{400} := 20 \cdot \log \left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0} \right) + 20 \cdot \log \left(1 - \left(\frac{f}{f_c} \right)^2 \right) - 5 = 24.346$$

$$f := 500 \text{ Hz}$$

$$R_{500} := 20 \cdot \log \left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0} \right) + 20 \cdot \log \left(1 - \left(\frac{f}{f_c} \right)^2 \right) - 5 = 26.15$$

$$f := 630 \text{ Hz}$$

$$R_{630} := 20 \cdot \log \left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0} \right) + 20 \cdot \log \left(1 - \left(\frac{f}{f_c} \right)^2 \right) - 5 = 27.936$$

$$f := 800 \text{ Hz}$$

$$R_{800} := 20 \cdot \log \left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0} \right) + 20 \cdot \log \left(1 - \left(\frac{f}{f_c} \right)^2 \right) - 5 = 29.63$$

$$f := 1000 \text{ Hz}$$

$$R_{1000} := 20 \cdot \log\left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0}\right) + 20 \cdot \log\left(1 - \left(\frac{f}{f_c}\right)^2\right) - 5 = 30.972$$

$$f := 1250 \text{ Hz}$$

$$R_{1250} := 20 \cdot \log\left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0}\right) + 20 \cdot \log\left(1 - \left(\frac{f}{f_c}\right)^2\right) - 5 = 31.888$$

$$f := 1600 \text{ Hz}$$

$$R_{1600} := 20 \cdot \log\left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0}\right) + 20 \cdot \log\left(1 - \left(\frac{f}{f_c}\right)^2\right) - 5 = 31.858$$

$$f := 2000 \text{ Hz}$$

$$R_{2000} := 20 \cdot \log\left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0}\right) + 20 \cdot \log\left(1 - \left(\frac{f}{f_c}\right)^2\right) - 5 = 29.204$$

$$f \geq f_c$$

$$f := 2500 \text{ Hz}$$

$$R_{2500} := 20 \cdot \log\left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0}\right) + 10 \cdot \log\left(\frac{2 \cdot \eta \cdot f}{\pi \cdot f_c}\right) = 26.609$$

$$f := 3150 \text{ Hz}$$

$$R_{3150} := 20 \cdot \log\left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0}\right) + 10 \cdot \log\left(\frac{2 \cdot \eta \cdot f}{\pi \cdot f_c}\right) = 29.62$$

$R_{100} = 12.522$	$R_{100.2} := 12.522$
$R_{125} = 14.452$	$R_{125.2} := 14.452$
$R_{160} = 16.582$	$R_{160.2} := 16.582$
$R_{200} = 18.5$	$R_{200.2} := 18.5$
$R_{250} = 20.405$	$R_{250.2} := 20.405$
$R_{315} = 22.36$	$R_{315.2} := 22.36$
$R_{400} = 24.346$	$R_{400.2} := 24.346$
$R_{500} = 26.15$	$R_{500.2} := 26.15$
$R_{630} = 27.936$	$R_{630.2} := 27.936$
$R_{800} = 29.63$	$R_{800.2} := 29.63$
$R_{1000} = 30.972$	$R_{1000.2} := 30.972$
$R_{1250} = 31.888$	$R_{1250.2} := 31.888$
$R_{1600} = 31.858$	$R_{1600.2} := 31.858$
$R_{2000} = 29.204$	$R_{2000.2} := 29.204$
$R_{2500} = 26.609$	$R_{2500.2} := 26.609$
$R_{3150} = 29.62$	$R_{3150.2} := 29.62$

$$R := 29$$

2x Kipsilevy

$$R_N := 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_1}{20}} + 10^{\frac{R_2}{20}} \right) = 18.543 \quad m := 9.9 \quad f_c := 2463.069$$

$$R_{N,100} := 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{100}}{20}} + 10^{\frac{R_{100}}{20}} \right) = 18.543$$

$$R_{N,125} := 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{125}}{20}} + 10^{\frac{R_{125}}{20}} \right) = 20.473$$

$$R_{N,160} := 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{160}}{20}} + 10^{\frac{R_{160}}{20}} \right) = 22.603$$

$$R_{N,200} := 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{200}}{20}} + 10^{\frac{R_{200}}{20}} \right) = 24.52$$

$$R_{N,250} := 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{250}}{20}} + 10^{\frac{R_{250}}{20}} \right) = 26.426$$

$$R_{N,315} := 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{315}}{20}} + 10^{\frac{R_{315}}{20}} \right) = 28.38$$

$$R_{N,400} := 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{400}}{20}} + 10^{\frac{R_{400}}{20}} \right) = 30.366$$

$$R_{N,500} := 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{500}}{20}} + 10^{\frac{R_{500}}{20}} \right) = 32.171$$

$R_{N,630} := 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{630}}{20}} + 10^{\frac{R_{630}}{20}} \right) = 33.956$		
$R_{N,800} := 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{800}}{20}} + 10^{\frac{R_{800}}{20}} \right) = 35.651$		
$R_{N,1000} := 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{1000}}{20}} + 10^{\frac{R_{1000}}{20}} \right) = 36.993$		
$R_{N,1250} := 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{1250}}{20}} + 10^{\frac{R_{1250}}{20}} \right) = 37.909$		
$R_{N,1600} := 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{1600}}{20}} + 10^{\frac{R_{1600}}{20}} \right) = 37.878$		
$R_{N,2000} := 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{2000}}{20}} + 10^{\frac{R_{2000}}{20}} \right) = 35.224$		
$R_{N,2500} := 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{2500}}{20}} + 10^{\frac{R_{2500}}{20}} \right) = 32.63$		
$R_{N,3150} := 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{3150}}{20}} + 10^{\frac{R_{3150}}{20}} \right) = 35.641$		
Hirsipaneeli 23 mm	Kipsilevy EK 13mm	2x Kipsilevy EK 13mm
$R_{100,2} := 12.02$	$R_{100,2} := 12.522$	$R_{100,2} := 18.543$
$R_{125,2} := 13.783$	$R_{125,2} := 14.452$	$R_{125,2} := 20.473$
$R_{160,2} := 15.607$	$R_{160,2} := 16.582$	$R_{160,2} := 22.603$
$R_{200,2} := 17.062$	$R_{200,2} := 18.5$	$R_{200,2} := 24.52$
$R_{250,2} := 18.186$	$R_{250,2} := 20.405$	$R_{250,2} := 26.426$
$R_{315,2} := 18.676$	$R_{315,2} := 22.36$	$R_{315,2} := 28.38$
$R_{400,2} := 17.451$	$R_{400,2} := 24.346$	$R_{400,2} := 30.366$
$R_{500,2} := 9.375$	$R_{500,2} := 26.15$	$R_{500,2} := 32.171$
$R_{630,2} := 15.029$	$R_{630,2} := 27.936$	$R_{630,2} := 33.956$
$R_{800,2} := 18.142$	$R_{800,2} := 29.63$	$R_{800,2} := 35.651$
$R_{1000,2} := 21.049$	$R_{1000,2} := 30.972$	$R_{1000,2} := 36.993$
$R_{1250,2} := 23.956$	$R_{1250,2} := 31.888$	$R_{1250,2} := 37.909$
$R_{1600,2} := 27.173$	$R_{1600,2} := 31.858$	$R_{1600,2} := 37.878$
$R_{2000,2} := 30.08$	$R_{2000,2} := 29.204$	$R_{2000,2} := 35.224$
$R_{2500,2} := 32.987$	$R_{2500,2} := 26.609$	$R_{2500,2} := 32.63$
$R_{3150,2} := 35.998$	$R_{3150,2} := 29.62$	$R_{3150,2} := 35.641$
$f_c := 539.927$	$f_c := 2463.069$	$f_c := 2463.069$
$m' := 9.66$	$m' := 9.9$	$m' := 9.9$

Vakioita			
Poissonin suhde $\mu := 0.20$	Äänen nopeus ilmassa $c_0 := 343$	Häviökerroin $\eta := 0.02$	Ilman tiheys 20 °C $\rho_0 := 1.2041$
US161 sisäverhous kipsilevy			
Aikaisemmin laskettu 23x275 Hirsipaneeli +Tuulensuojalevy 12mm		Aikaisemmin laskettu 13 mm EK kipsilevy	
$R_{100.1} := 10.441$	$f_{c1} := 3447.744$	$R_{100.2} := 12.522$	$f_{c2} := 2463.069$
$R_{125.1} := 12.247$	$m_1 := 6.38$	$R_{125.2} := 14.452$	$m_2 := 9.9$
$R_{160.1} := 14.152$		$R_{160.2} := 16.582$	
$R_{200.1} := 15.734$		$R_{200.2} := 18.5$	
$R_{250.1} := 17.084$		$R_{250.2} := 20.405$	
$R_{315.1} := 18.036$		$R_{315.2} := 22.36$	
$R_{400.1} := 18.797$		$R_{400.2} := 24.346$	
$R_{500.1} := 14.599$		$R_{500.2} := 26.15$	
$R_{630.1} := 23.978$		$R_{630.2} := 27.936$	
$R_{800.1} := 30.599$		$R_{800.2} := 29.63$	
$R_{1000.1} := 36.075$		$R_{1000.2} := 30.972$	
$R_{1250.1} := 40.534$		$R_{1250.2} := 31.888$	
$R_{1600.1} := 44.31$		$R_{1600.2} := 31.858$	
$R_{2000.1} := 47.03$		$R_{2000.2} := 29.204$	
$R_{2500.1} := 49.339$		$R_{2500.2} := 26.609$	
$R_{3150.1} := 51.438$		$R_{3150.2} := 29.62$	
$R := -10 \cdot \log \left(10^{\frac{R_1}{10}} + 10^{\frac{-R_2}{10}} \right)$		Rungon ja eristeen paksuus $d := 0.145$	
Täydellisesti ääntä absorboiva kaviteetti			
$R_{cf} := 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_1}{20}} + 10^{\frac{R_2}{20}} \right)$		$f < f_{mam}$	
$R_{cf} := R_1 + R_2 + 20 \cdot \log(f \cdot d) - 29$		$f_{mam} < f < f_d$	
$R_{cf} := R_1 + R_2 + 6$		$f > f_d$	
$f_{mam} := 80 \cdot \sqrt{\frac{(m'_1 + m'_2)}{d \cdot m'_1 \cdot m'_2}} = 106.661$		$f_d := \frac{c_0}{2 \cdot \pi \cdot d} = 376.484$	

$$f < f_{mam}$$

$$R_{cl,100} := 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{100,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{100,2}}{20}} \right) = 17.564$$

$$f_{mam} < f < f_d$$

$$R_{cl,125} := R_{125,1} + R_{125,2} + 20 \cdot \log(125 \cdot d) - 29 = 22.865$$

$$R_{cl,160} := R_{160,1} + R_{160,2} + 20 \cdot \log(160 \cdot d) - 29 = 29.044$$

$$R_{cl,200} := R_{200,1} + R_{200,2} + 20 \cdot \log(200 \cdot d) - 29 = 34.482$$

$$R_{cl,250} := R_{250,1} + R_{250,2} + 20 \cdot \log(250 \cdot d) - 29 = 39.675$$

$$R_{cl,315} := R_{315,1} + R_{315,2} + 20 \cdot \log(315 \cdot d) - 29 = 44.59$$

$$f > f_d$$

$$R_{cl,400} := R_{400,1} + R_{400,2} + 6 = 49.143$$

$$R_{cl,500} := R_{500,1} + R_{500,2} + 6 = 46.749$$

$$R_{cl,630} := R_{630,1} + R_{630,2} + 6 = 57.914$$

$$R_{cl,800} := R_{800,1} + R_{800,2} + 6 = 66.229$$

$$R_{cl,1000} := R_{1000,1} + R_{1000,2} + 6 = 73.047$$

$$R_{cl,1250} := R_{1250,1} + R_{1250,2} + 6 = 78.422$$

$$R_{cl,1600} := R_{1600,1} + R_{1600,2} + 6 = 82.168$$

$$R_{cl,2000} := R_{2000,1} + R_{2000,2} + 6 = 82.234$$

$$R_{cl,2500} := R_{2500,1} + R_{2500,2} + 6 = 81.948$$

$$R_{cl,3150} := R_{3150,1} + R_{3150,2} + 6 = 87.058$$

Jäykkä kiinnitys välissä

$$R_{bf} := 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_1}{20}} + 10^{\frac{R_2}{20}} \right) + \Delta R_b$$

$$\Delta R_b := 10 \cdot \log (b \cdot f_{cL}) + 20 \cdot \log \left(\frac{m'_1}{m'_1 + m'_2} \right) - 18$$

$$b := 0.6$$

$$f_{cL} := \left(\frac{m'_1 \cdot \sqrt{f_{c2}} + m'_2 \cdot \sqrt{f_{c1}}}{m'_1 + m'_2} \right)^2$$

$$f_{c1} = 3447.744 \quad f_{c2} = 2463.069 \quad m'_1 = 6.38 \quad m'_2 = 9.9$$

$$f_{cL} := \left(\frac{m'_1 \cdot \sqrt{f_{c2}} + m'_2 \cdot \sqrt{f_{c1}}}{m'_1 + m'_2} \right)^2 = 3042.174$$

$$\Delta R_b := 10 \cdot \log (b \cdot f_{cL}) + 20 \cdot \log \left(\frac{m'_1}{m'_1 + m'_2} \right) - 18 = 6.477$$

$$R_{bf} := 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_1}{20}} + 10^{\frac{R_2}{20}} \right) + \Delta R_b = ?$$

$$\begin{aligned}
 R_{bf,100} &:= 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{100,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{100,2}}{20}} \right) + \Delta R_b = 24.041 \\
 R_{bf,125} &:= 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{125,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{125,2}}{20}} \right) + \Delta R_b = 25.917 \\
 R_{bf,160} &:= 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{160,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{160,2}}{20}} \right) + \Delta R_b = 27.949 \\
 R_{bf,200} &:= 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{200,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{200,2}}{20}} \right) + \Delta R_b = 29.724 \\
 R_{bf,250} &:= 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{250,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{250,2}}{20}} \right) + \Delta R_b = 31.4 \\
 R_{bf,315} &:= 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{315,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{315,2}}{20}} \right) + \Delta R_b = 32.962 \\
 R_{bf,400} &:= 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{400,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{400,2}}{20}} \right) + \Delta R_b = 34.505 \\
 R_{bf,500} &:= 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{500,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{500,2}}{20}} \right) + \Delta R_b = 34.665 \\
 R_{bf,630} &:= 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{630,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{630,2}}{20}} \right) + \Delta R_b = 38.678 \\
 R_{bf,800} &:= 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{800,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{800,2}}{20}} \right) + \Delta R_b = 42.625 \\
 R_{bf,1000} &:= 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{1000,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{1000,2}}{20}} \right) + \Delta R_b = 46.39 \\
 R_{bf,1250} &:= 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{1250,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{1250,2}}{20}} \right) + \Delta R_b = 49.742 \\
 R_{bf,1600} &:= 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{1600,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{1600,2}}{20}} \right) + \Delta R_b = 52.644 \\
 R_{bf,2000} &:= 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{2000,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{2000,2}}{20}} \right) + \Delta R_b = 54.556 \\
 R_{bf,2500} &:= 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{2500,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{2500,2}}{20}} \right) + \Delta R_b = 56.428 \\
 R_{bf,3150} &:= 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{3150,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{3150,2}}{20}} \right) + \Delta R_b = 58.592
 \end{aligned}$$

$$R_{100} := -10 \cdot \log \left(10^{\frac{-R_{ct,100}}{10}} + 10^{\frac{-R_{of,100}}{10}} \right) = 16.683$$

$$R_{125} := -10 \cdot \log \left(10^{\frac{-R_{ct,125}}{10}} + 10^{\frac{-R_{of,125}}{10}} \right) = 21.118$$

$$R_{160} := -10 \cdot \log \left(10^{\frac{-R_{ct,160}}{10}} + 10^{\frac{-R_{of,160}}{10}} \right) = 25.452$$

$$R_{200} := -10 \cdot \log \left(10^{\frac{-R_{ct,200}}{10}} + 10^{\frac{-R_{of,200}}{10}} \right) = 28.471$$

$$R_{250} := -10 \cdot \log \left(10^{\frac{-R_{ct,250}}{10}} + 10^{\frac{-R_{of,250}}{10}} \right) = 30.797$$

$$R_{315} := -10 \cdot \log \left(10^{\frac{-R_{ct,315}}{10}} + 10^{\frac{-R_{of,315}}{10}} \right) = 32.673$$

$$R_{400} := -10 \cdot \log \left(10^{\frac{-R_{ct,400}}{10}} + 10^{\frac{-R_{of,400}}{10}} \right) = 34.358$$

$$R_{500} := -10 \cdot \log \left(10^{\frac{-R_{ct,500}}{10}} + 10^{\frac{-R_{of,500}}{10}} \right) = 34.404$$

$$R_{630} := -10 \cdot \log \left(10^{\frac{-R_{ct,630}}{10}} + 10^{\frac{-R_{of,630}}{10}} \right) = 38.626$$

$$R_{800} := -10 \cdot \log \left(10^{\frac{-R_{ct,800}}{10}} + 10^{\frac{-R_{of,800}}{10}} \right) = 42.606$$

$$R_{1000} := -10 \cdot \log \left(10^{\frac{-R_{ct,1000}}{10}} + 10^{\frac{-R_{of,1000}}{10}} \right) = 46.381$$

$$R_{1250} := -10 \cdot \log \left(10^{\frac{-R_{ct,1250}}{10}} + 10^{\frac{-R_{of,1250}}{10}} \right) = 49.736$$

$$R_{1600} := -10 \cdot \log \left(10^{\frac{-R_{ct,1600}}{10}} + 10^{\frac{-R_{of,1600}}{10}} \right) = 52.639$$

$$R_{2000} := -10 \cdot \log \left(10^{\frac{-R_{ct,2000}}{10}} + 10^{\frac{-R_{of,2000}}{10}} \right) = 54.549$$

$$R_{2500} := -10 \cdot \log \left(10^{\frac{-R_{ct,2500}}{10}} + 10^{\frac{-R_{of,2500}}{10}} \right) = 56.416$$

$$R_{3150} := -10 \cdot \log \left(10^{\frac{-R_{ct,3150}}{10}} + 10^{\frac{-R_{of,3150}}{10}} \right) = 58.586$$

Vertailukäyrästä

Rw=40 Rw+Ctr=33

Vakioita

Poissonin suhde	Äänen nopeus ilmassa 20 °C	Häviökerroin	Ilman tiheys 20 °C
$\mu := 0.2$	$c_0 := 343$	$\eta_{int} := 0.01$	$p_0 := 1.2041$

Kulmataajuus Ilman ominaisimpedanssi 20 °C

$\omega := 2 \cdot \pi \cdot f$ $Z_0 := 413$

Lamellihirsi 205mm

$E := 11000000000$ $p_m := 500$ $h := 0.205$ $m' := p_m \cdot h = 102.5$

$$f_c := \frac{c_0^2}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{12 (1 - \mu^2) m'}{E \cdot h^3}} = 66.095$$

Ohuen ja massiivilevyn rajataajuus

$$f_h := \frac{1}{f_c} \cdot \left(\frac{c_0}{6 \cdot h} \right)^2 = 1176.545$$

$$\eta := \eta_{int} + \frac{m'}{485 \cdot \sqrt{f}}$$

kun $f < f_h$ tarkastellaan ohuena levynä

$$R := 20 \cdot \log \left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0} \right) + 20 \cdot \log \left(1 - \left(\frac{f}{f_c} \right)^2 \right) - 5 \quad f < f_c$$

$$R := 20 \cdot \log \left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0} \right) + 10 \cdot \log \left(\frac{2 \eta \cdot f}{\pi \cdot f_c} \right) \quad f \geq f_c$$

$f \geq f_c$

$f := 100$ $\eta := \eta_{int} + \frac{m'}{485 \cdot \sqrt{f}} = 0.031$

$$R_{100.1} := 20 \cdot \log \left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0} \right) + 10 \cdot \log \left(\frac{2 \eta \cdot f}{\pi \cdot f_c} \right) = 22.608$$

$f := 125$ $\eta := \eta_{int} + \frac{m'}{485 \cdot \sqrt{f}} = 0.029$

$$R_{125.1} := 20 \cdot \log \left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0} \right) + 10 \cdot \log \left(\frac{2 \eta \cdot f}{\pi \cdot f_c} \right) = 25.192$$

$f := 160$	$R_{160.1} := 20 \cdot \log \left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0} \right) + 10 \cdot \log \left(\frac{2 \eta \cdot f}{\pi \cdot f_c} \right) = 28.065$	$\eta := \eta_{int} + \frac{m'}{485 \cdot \sqrt{f}} = 0.027$
$f := 200$	$R_{200.1} := 20 \cdot \log \left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0} \right) + 10 \cdot \log \left(\frac{2 \eta \cdot f}{\pi \cdot f_c} \right) = 30.676$	$\eta := \eta_{int} + \frac{m'}{485 \cdot \sqrt{f}} = 0.025$
$f := 250$	$R_{250.1} := 20 \cdot \log \left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0} \right) + 10 \cdot \log \left(\frac{2 \eta \cdot f}{\pi \cdot f_c} \right) = 33.3$	$\eta := \eta_{int} + \frac{m'}{485 \cdot \sqrt{f}} = 0.023$
$f := 315$	$R_{315.1} := 20 \cdot \log \left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0} \right) + 10 \cdot \log \left(\frac{2 \eta \cdot f}{\pi \cdot f_c} \right) = 36.031$	$\eta := \eta_{int} + \frac{m'}{485 \cdot \sqrt{f}} = 0.022$
$f := 400$	$R_{400.1} := 20 \cdot \log \left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0} \right) + 10 \cdot \log \left(\frac{2 \eta \cdot f}{\pi \cdot f_c} \right) = 38.869$	$\eta := \eta_{int} + \frac{m'}{485 \cdot \sqrt{f}} = 0.021$
$f := 500$	$R_{500.1} := 20 \cdot \log \left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0} \right) + 10 \cdot \log \left(\frac{2 \eta \cdot f}{\pi \cdot f_c} \right) = 41.534$	$\eta := \eta_{int} + \frac{m'}{485 \cdot \sqrt{f}} = 0.019$
$f := 630$	$R_{630.1} := 20 \cdot \log \left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0} \right) + 10 \cdot \log \left(\frac{2 \eta \cdot f}{\pi \cdot f_c} \right) = 44.309$	$\eta := \eta_{int} + \frac{m'}{485 \cdot \sqrt{f}} = 0.018$
$f := 800$	$R_{800.1} := 20 \cdot \log \left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0} \right) + 10 \cdot \log \left(\frac{2 \eta \cdot f}{\pi \cdot f_c} \right) = 47.192$	$\eta := \eta_{int} + \frac{m'}{485 \cdot \sqrt{f}} = 0.017$
$f := 1000$	$R_{1000.1} := 20 \cdot \log \left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0} \right) + 10 \cdot \log \left(\frac{2 \eta \cdot f}{\pi \cdot f_c} \right) = 49.898$	$\eta := \eta_{int} + \frac{m'}{485 \cdot \sqrt{f}} = 0.017$

kun $f > f_h$ tarkasteellaan massiivilevynä

$$R := 20 \cdot \log \left(\frac{\omega \cdot m'}{2 \cdot Z_0} \right) + 10 \cdot \log \left(\frac{2 \cdot \eta}{\pi} \right) + 10 \cdot \log \left(\frac{f}{f_c} \right) \quad \omega := 2 \cdot \pi \cdot f$$

$f > f_h$

$f := 1250$ $\eta := \eta_{int} + \frac{m'}{485 \cdot \sqrt{f}} = 0.016$

$$R_{1250.1} := 20 \cdot \log\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot m'}{2 \cdot Z_0}\right) + 10 \cdot \log\left(\frac{2 \cdot \eta}{\pi}\right) + 10 \cdot \log\left(\frac{f}{f_c}\right) = 52.618$$

$f := 1600$ $\eta := \eta_{int} + \frac{m'}{485 \cdot \sqrt{f}} = 0.015$

$$R_{1600.1} := 20 \cdot \log\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot m'}{2 \cdot Z_0}\right) + 10 \cdot \log\left(\frac{2 \cdot \eta}{\pi}\right) + 10 \cdot \log\left(\frac{f}{f_c}\right) = 55.641$$

$f := 2000$ $\eta := \eta_{int} + \frac{m'}{485 \cdot \sqrt{f}} = 0.015$

$$R_{2000.1} := 20 \cdot \log\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot m'}{2 \cdot Z_0}\right) + 10 \cdot \log\left(\frac{2 \cdot \eta}{\pi}\right) + 10 \cdot \log\left(\frac{f}{f_c}\right) = 58.387$$

$f := 2500$ $\eta := \eta_{int} + \frac{m'}{485 \cdot \sqrt{f}} = 0.014$

$$R_{2500.1} := 20 \cdot \log\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot m'}{2 \cdot Z_0}\right) + 10 \cdot \log\left(\frac{2 \cdot \eta}{\pi}\right) + 10 \cdot \log\left(\frac{f}{f_c}\right) = 61.145$$

$f := 3150$ $\eta := \eta_{int} + \frac{m'}{485 \cdot \sqrt{f}} = 0.014$

$$R_{3150.1} := 20 \cdot \log\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot m'}{2 \cdot Z_0}\right) + 10 \cdot \log\left(\frac{2 \cdot \eta}{\pi}\right) + 10 \cdot \log\left(\frac{f}{f_c}\right) = 64.013$$

$R_{100.1} = 22.608$	$R_{100.1} := 22.608$
$R_{125.1} = 25.192$	$R_{125.1} := 25.192$
$R_{160.1} = 28.065$	$R_{160.1} := 28.065$
$R_{200.1} = 30.676$	$R_{200.1} := 30.676$
$R_{250.1} = 33.3$	$R_{250.1} := 33.3$
$R_{315.1} = 36.031$	$R_{315.1} := 36.031$
$R_{400.1} = 38.869$	$R_{400.1} := 38.869$
$R_{500.1} = 41.534$	$R_{500.1} := 41.534$
$R_{630.1} = 44.309$	$R_{630.1} := 44.309$
$R_{800.1} = 47.192$	$R_{800.1} := 47.192$
$R_{1000.1} = 49.898$	$R_{1000.1} := 49.898$
$R_{1250.1} = 52.618$	$R_{1250.1} := 52.618$
$R_{1600.1} = 55.641$	$R_{1600.1} := 55.641$
$R_{2000.1} = 58.387$	$R_{2000.1} := 58.387$
$R_{2500.1} = 61.145$	$R_{2500.1} := 61.145$
$R_{3150.1} = 64.013$	$R_{3150.1} := 64.013$

Vertailukäyrästä

Rw=44 Rw+Ctr=38

Vakioita

Äänen nopeus ilmassa 20°C Ilman tiheys 20°C
 $c_0 := 343$ $p_0 := 1.2041$

US103 LH205mm + 66mm lisäeriste + Kipsilevy EK 13mm

Aikaisemmin laskettu LH 205mm		Aikaisemmin laskettu kipsilevy EK 13mm
$R_{100.1} := 22.608$		$R_{100.2} := 12.522$
$R_{125.1} := 25.192$	$f_{c1} := 66.095$	$R_{125.2} := 14.452$ $f_{c2} := 2463.069$
$R_{160.1} := 28.065$	$m'_1 := 102.5$	$R_{160.2} := 16.582$ $m'_2 := 9.9$
$R_{200.1} := 30.676$		$R_{200.2} := 18.5$
$R_{250.1} := 33.3$		$R_{250.2} := 20.405$
$R_{315.1} := 36.031$		$R_{315.2} := 22.36$
$R_{400.1} := 38.869$		$R_{400.2} := 24.346$
$R_{500.1} := 41.534$		$R_{500.2} := 26.15$
$R_{630.1} := 44.309$		$R_{630.2} := 27.936$
$R_{800.1} := 47.192$		$R_{800.2} := 29.63$
$R_{1000.1} := 49.898$		$R_{1000.2} := 30.972$
$R_{1250.1} := 52.618$		$R_{1250.2} := 31.888$
$R_{1600.1} := 55.641$		$R_{1600.2} := 31.858$
$R_{2000.1} := 58.387$		$R_{2000.2} := 29.204$
$R_{2500.1} := 61.145$		$R_{2500.2} := 26.609$
$R_{3150.1} := 64.013$		$R_{3150.2} := 29.62$

$$R := -10 \cdot \log \left(10^{\frac{-R_1}{10}} + 10^{\frac{-R_2}{10}} \right)$$

Täydellisesti ääntä absorboiva kaviteetti

$$R_{c1} := 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_1}{20}} + 10^{\frac{R_2}{20}} \right)$$

$$R_{c1} := R_1 + R_2 + 20 \cdot \log(f \cdot d) - 29$$

$$R_{c1} := R_1 + R_2 + 6$$

Koolaus ja eristeen paksuus $d := 0.066$

$$f < f_{mam}$$

$$f_{mam} < f < f_d$$

$$f > f_d$$

$$f_{mam} := 80 \cdot \sqrt{\frac{(m'_1 + m'_2)}{d \cdot m'_1 \cdot m'_2}} = 103.639$$

$$f_d := \frac{c_0}{2 \cdot \pi \cdot d} = 827.123$$

$$f < f_{mam}$$

$$R_{cl,100} := 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{100,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{100,2}}{20}} \right) = 24.974$$

$$f_{mam} < f < f_d$$

$$R_{cl,125} := R_{125,1} + R_{125,2} + 20 \cdot \log(125 \cdot d) - 29 = 28.973$$

$$R_{cl,160} := R_{160,1} + R_{160,2} + 20 \cdot \log(160 \cdot d) - 29 = 36.12$$

$$R_{cl,200} := R_{200,1} + R_{200,2} + 20 \cdot \log(200 \cdot d) - 29 = 42.587$$

$$R_{cl,250} := R_{250,1} + R_{250,2} + 20 \cdot \log(250 \cdot d) - 29 = 49.055$$

$$R_{cl,315} := R_{315,1} + R_{315,2} + 20 \cdot \log(315 \cdot d) - 29 = 55.748$$

$$R_{cl,400} := R_{400,1} + R_{400,2} + 20 \cdot \log(400 \cdot d) - 29 = 62.647$$

$$R_{cl,500} := R_{500,1} + R_{500,2} + 20 \cdot \log(500 \cdot d) - 29 = 69.054$$

$$R_{cl,630} := R_{630,1} + R_{630,2} + 20 \cdot \log(630 \cdot d) - 29 = 75.623$$

$$R_{cl,800} := R_{800,1} + R_{800,2} + 20 \cdot \log(800 \cdot d) - 29 = 82.275$$

$$f > f_d$$

$$R_{cl,1000} := R_{1000,1} + R_{1000,2} + 6 = 86.87$$

$$R_{cl,1250} := R_{1250,1} + R_{1250,2} + 6 = 90.506$$

$$R_{cl,1600} := R_{1600,1} + R_{1600,2} + 6 = 93.499$$

$$R_{cl,2000} := R_{2000,1} + R_{2000,2} + 6 = 93.591$$

$$R_{cl,2500} := R_{2500,1} + R_{2500,2} + 6 = 93.754$$

$$R_{cl,3150} := R_{3150,1} + R_{3150,2} + 6 = 99.633$$

Jäykkä kiinnitys välissä

$$R_{bf} := 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_1}{20}} + 10^{\frac{R_2}{20}} \right) + \Delta R_b$$

$$\Delta R_b := 10 \cdot \log (b \cdot f_{cL}) + 20 \cdot \log \left(\frac{m'_1}{m'_1 + m'_2} \right) - 18$$

$$b := 0.6$$

$$f_{c1} = 66.095 \quad f_{c2} = 2463.069 \quad m'_1 = 102.5 \quad m'_2 = 9.9$$

$$f_{cL} := \left(\frac{m'_1 \cdot \sqrt{f_{c2}} + m'_2 \cdot \sqrt{f_{c1}}}{m'_1 + m'_2} \right)^2 = 2113.619$$

$$\Delta R_b := 10 \cdot \log (b \cdot f_{cL}) + 20 \cdot \log \left(\frac{m'_1}{m'_1 + m'_2} \right) - 18 = 12.231$$

$$R_{bf} := 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_1}{20}} + 10^{\frac{R_2}{20}} \right) + \Delta R_b = ?$$

$$R_{bf,100} := 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{100,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{100,2}}{20}} \right) + \Delta R_b = 37.205$$

$$R_{bf,125} := 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{125,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{125,2}}{20}} \right) + \Delta R_b = 39.637$$

$$R_{bf,160} := 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{160,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{160,2}}{20}} \right) + \Delta R_b = 42.349$$

$$R_{bf,200} := 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{200,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{200,2}}{20}} \right) + \Delta R_b = 44.818$$

$$R_{bf,250} := 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{250,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{250,2}}{20}} \right) + \Delta R_b = 47.305$$

$$R_{bf,315} := 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{315,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{315,2}}{20}} \right) + \Delta R_b = 49.898$$

$$R_{bf,400} := 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{400,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{400,2}}{20}} \right) + \Delta R_b = 52.595$$

$$R_{bf,500} := 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{500,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{500,2}}{20}} \right) + \Delta R_b = 55.13$$

$$R_{bf,630} := 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{630,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{630,2}}{20}} \right) + \Delta R_b = 57.768$$

$$R_{bf,800} := 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{800,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{800,2}}{20}} \right) + \Delta R_b = 60.503$$

$$R_{bf,1000} := 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{1000,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{1000,2}}{20}} \right) + \Delta R_b = 63.06$$

$$\begin{aligned}R_{bf,1250} &:= 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{1250,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{1250,2}}{20}} \right) + \Delta R_b = 65.613 \\R_{bf,1600} &:= 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{1600,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{1600,2}}{20}} \right) + \Delta R_b = 68.416 \\R_{bf,2000} &:= 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{2000,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{2000,2}}{20}} \right) + \Delta R_b = 70.915 \\R_{bf,2500} &:= 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{2500,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{2500,2}}{20}} \right) + \Delta R_b = 73.537 \\R_{bf,3150} &:= 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{3150,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{3150,2}}{20}} \right) + \Delta R_b = 76.408\end{aligned}$$

Created with PTC Mathcad Express. See www.mathcad.com for more information.

$$R_{100} := -10 \cdot \log \left(10^{\frac{-R_{ct,100}}{10}} + 10^{\frac{-R_{of,100}}{10}} \right) = 24.722$$

$$R_{125} := -10 \cdot \log \left(10^{\frac{-R_{ct,125}}{10}} + 10^{\frac{-R_{of,125}}{10}} \right) = 28.616$$

$$R_{160} := -10 \cdot \log \left(10^{\frac{-R_{ct,160}}{10}} + 10^{\frac{-R_{of,160}}{10}} \right) = 35.192$$

$$R_{200} := -10 \cdot \log \left(10^{\frac{-R_{ct,200}}{10}} + 10^{\frac{-R_{of,200}}{10}} \right) = 40.551$$

$$R_{250} := -10 \cdot \log \left(10^{\frac{-R_{ct,250}}{10}} + 10^{\frac{-R_{of,250}}{10}} \right) = 45.082$$

$$R_{315} := -10 \cdot \log \left(10^{\frac{-R_{ct,315}}{10}} + 10^{\frac{-R_{of,315}}{10}} \right) = 48.894$$

$$R_{400} := -10 \cdot \log \left(10^{\frac{-R_{ct,400}}{10}} + 10^{\frac{-R_{of,400}}{10}} \right) = 52.186$$

$$R_{500} := -10 \cdot \log \left(10^{\frac{-R_{ct,500}}{10}} + 10^{\frac{-R_{of,500}}{10}} \right) = 54.957$$

$$R_{630} := -10 \cdot \log \left(10^{\frac{-R_{ct,630}}{10}} + 10^{\frac{-R_{of,630}}{10}} \right) = 57.697$$

$$R_{800} := -10 \cdot \log \left(10^{\frac{-R_{ct,800}}{10}} + 10^{\frac{-R_{of,800}}{10}} \right) = 60.474$$

$$R_{1000} := -10 \cdot \log \left(10^{\frac{-R_{ct,1000}}{10}} + 10^{\frac{-R_{of,1000}}{10}} \right) = 63.042$$

$$R_{1250} := -10 \cdot \log \left(10^{\frac{-R_{ct,1250}}{10}} + 10^{\frac{-R_{of,1250}}{10}} \right) = 65.599$$

$$R_{1600} := -10 \cdot \log \left(10^{\frac{-R_{ct,1600}}{10}} + 10^{\frac{-R_{of,1600}}{10}} \right) = 68.403$$

$$R_{2000} := -10 \cdot \log \left(10^{\frac{-R_{ct,2000}}{10}} + 10^{\frac{-R_{of,2000}}{10}} \right) = 70.891$$

$$R_{2500} := -10 \cdot \log \left(10^{\frac{-R_{ct,2500}}{10}} + 10^{\frac{-R_{of,2500}}{10}} \right) = 73.496$$

$$R_{3150} := -10 \cdot \log \left(10^{\frac{-R_{ct,3150}}{10}} + 10^{\frac{-R_{of,3150}}{10}} \right) = 76.387$$

Vertailukäyrästä

Rw=53

Rw+Ctr=42

Vakioita

Poissonin suhde	Äänen nopeus ilmassa	Häviökerroin	Ilman tiheys 20 °C
$\mu := 0.20$	$c_0 := 343$	$\eta := 0.02$	$p_0 := 1.2041$
$\mu_b := 0.40$ (bitumille)			

Yksinkertaisen levyn malli

$$R := 20 \cdot \log \left(\frac{\pi \cdot m \cdot f}{p_0 \cdot c_0} \right) + 20 \cdot \log \left(1 - \left(\frac{f}{f_c} \right)^2 \right) - 5 \quad f < f_c$$

$$R := 20 \cdot \log \left(\frac{\pi \cdot m \cdot f}{p_0 \cdot c_0} \right) + 10 \cdot \log \left(\frac{2 \cdot \eta \cdot f}{\pi \cdot f_c} \right) \quad f \geq f_c$$

$$f_c := \frac{c_0^2}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{12 (1 - \mu^2) m}{E \cdot h^3}}$$

E=kimmokerroin, h=levyn paksuus, m'=levyn pintamassa

Raakapontti 20 mm

$$E := 11000000000 \quad p_m := 420 \quad h := 0.020 \quad m' := p_m \cdot h = 8.4$$

$$f_c := \frac{c_0^2}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{12 (1 - \mu^2) m'}{E \cdot h^3}} = 620.916$$

$$f < f_c$$

$$f := 100$$

$$R_{100} := 20 \cdot \log \left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0} \right) + 20 \cdot \log \left(1 - \left(\frac{f}{f_c} \right)^2 \right) - 5 = 10.881$$

$$f := 125$$

$$R_{125} := 20 \cdot \log \left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0} \right) + 20 \cdot \log \left(1 - \left(\frac{f}{f_c} \right)^2 \right) - 5 = 12.688$$

$$f := 160$$

$$R_{160} := 20 \cdot \log\left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0}\right) + 20 \cdot \log\left(1 - \left(\frac{f}{f_c}\right)^2\right) - 5 = 14.595$$

$$f := 200$$

$$R_{200} := 20 \cdot \log\left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0}\right) + 20 \cdot \log\left(1 - \left(\frac{f}{f_c}\right)^2\right) - 5 = 16.179$$

$$f := 250$$

$$R_{250} := 20 \cdot \log\left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0}\right) + 20 \cdot \log\left(1 - \left(\frac{f}{f_c}\right)^2\right) - 5 = 17.532$$

$$f := 315$$

$$R_{315} := 20 \cdot \log\left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0}\right) + 20 \cdot \log\left(1 - \left(\frac{f}{f_c}\right)^2\right) - 5 = 18.491$$

$$f := 400$$

$$R_{400} := 20 \cdot \log\left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0}\right) + 20 \cdot \log\left(1 - \left(\frac{f}{f_c}\right)^2\right) - 5 = 18.494$$

$$f := 500$$

$$R_{500} := 20 \cdot \log\left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0}\right) + 20 \cdot \log\left(1 - \left(\frac{f}{f_c}\right)^2\right) - 5 = 16.009$$

$$f \geq f_c$$

$$f := 630$$

$$R_{630} := 20 \cdot \log\left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0}\right) + 10 \cdot \log\left(\frac{2 \eta \cdot f}{\pi \cdot f_c}\right) = 13.208$$

$$f := 800$$

$$R_{800} := 20 \cdot \log\left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0}\right) + 10 \cdot \log\left(\frac{2 \eta \cdot f}{\pi \cdot f_c}\right) = 16.321$$

$f := 1000$
 $R_{1000} := 20 \cdot \log\left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0}\right) + 10 \cdot \log\left(\frac{2 \eta \cdot f}{\pi \cdot f_c}\right) = 19.228$
 $f := 1250$
 $R_{1250} := 20 \cdot \log\left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0}\right) + 10 \cdot \log\left(\frac{2 \eta \cdot f}{\pi \cdot f_c}\right) = 22.136$
 $f := 1600$
 $R_{1600} := 20 \cdot \log\left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0}\right) + 10 \cdot \log\left(\frac{2 \eta \cdot f}{\pi \cdot f_c}\right) = 25.352$
 $f := 2000$
 $R_{2000} := 20 \cdot \log\left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0}\right) + 10 \cdot \log\left(\frac{2 \eta \cdot f}{\pi \cdot f_c}\right) = 28.259$
 $f := 2500$
 $R_{2500} := 20 \cdot \log\left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0}\right) + 10 \cdot \log\left(\frac{2 \eta \cdot f}{\pi \cdot f_c}\right) = 31.166$
 $f := 3150$
 $R_{3150} := 20 \cdot \log\left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0}\right) + 10 \cdot \log\left(\frac{2 \eta \cdot f}{\pi \cdot f_c}\right) = 34.178$

$R_{100.1} := 10.881$
 $R_{125.1} := 12.688$
 $R_{160.1} := 14.595$
 $R_{200.1} := 16.179$
 $R_{250.1} := 17.532$
 $R_{315.1} := 18.491$
 $R_{400.1} := 18.797$
 $R_{500.1} := 16.009$
 $R_{630.1} := 13.208$
 $R_{800.1} := 16.321$
 $R_{1000.1} := 19.228$
 $R_{1250.1} := 22.136$
 $R_{1600.1} := 25.352$
 $R_{2000.1} := 28.259$
 $R_{2500.1} := 31.166$
 $R_{3150.1} := 34.178$

Raakapontti 20mm

Created with PTC Mathcad Express. See www.mathcad.com for more information.

Tiivissaumakate 3 mm

$$E := 100000000$$

$$p_m := 1000$$

$$h := 0.003$$

$$m' := p_m \cdot h = 3$$

Bitumin kimmomoduuli
alhainen, käytännössä $f_c =$
niin suuri että tarkastellaan
kaikilla taajuuksilla kaavalla
 $f < f_c$. käytetään $E = 0.1$ GPa

$$f_c := \frac{c_0^2}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{12(1 - \mu_b^2) m'}{E \cdot h^3}} = 62663.895$$

$$f := 100$$

$$R_{100} := 20 \cdot \log\left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0}\right) + 20 \cdot \log\left(1 - \left(\frac{f}{f_c}\right)^2\right) - 5 = 2.166$$

$$f := 125$$

$$R_{125} := 20 \cdot \log\left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0}\right) + 20 \cdot \log\left(1 - \left(\frac{f}{f_c}\right)^2\right) - 5 = 4.104$$

$$f := 160$$

$$R_{160} := 20 \cdot \log\left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0}\right) + 20 \cdot \log\left(1 - \left(\frac{f}{f_c}\right)^2\right) - 5 = 6.249$$

$$f := 200$$

$$R_{200} := 20 \cdot \log\left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0}\right) + 20 \cdot \log\left(1 - \left(\frac{f}{f_c}\right)^2\right) - 5 = 8.187$$

$$f := 250$$

$$R_{250} := 20 \cdot \log\left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0}\right) + 20 \cdot \log\left(1 - \left(\frac{f}{f_c}\right)^2\right) - 5 = 10.125$$

$$f := 315$$

$$R_{315} := 20 \cdot \log\left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0}\right) + 20 \cdot \log\left(1 - \left(\frac{f}{f_c}\right)^2\right) - 5 = 12.132$$

$$f := 400$$

$$R_{400} := 20 \cdot \log\left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0}\right) + 20 \cdot \log\left(1 - \left(\frac{f}{f_c}\right)^2\right) - 5 = 14.207$$

$$f := 500$$

$$R_{500} := 20 \cdot \log\left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0}\right) + 20 \cdot \log\left(1 - \left(\frac{f}{f_c}\right)^2\right) - 5 = 16.145$$

$$f := 630$$

$$R_{630} := 20 \cdot \log\left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0}\right) + 20 \cdot \log\left(1 - \left(\frac{f}{f_c}\right)^2\right) - 5 = 18.152$$

$$f := 800$$

$$R_{800} := 20 \cdot \log\left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0}\right) + 20 \cdot \log\left(1 - \left(\frac{f}{f_c}\right)^2\right) - 5 = 20.227$$

$$f := 1000$$

$$R_{1000} := 20 \cdot \log\left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0}\right) + 20 \cdot \log\left(1 - \left(\frac{f}{f_c}\right)^2\right) - 5 = 22.164$$

$$f := 1250$$

$$R_{1250} := 20 \cdot \log\left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0}\right) + 20 \cdot \log\left(1 - \left(\frac{f}{f_c}\right)^2\right) - 5 = 24.101$$

$$f := 1600$$

$$R_{1600} := 20 \cdot \log\left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0}\right) + 20 \cdot \log\left(1 - \left(\frac{f}{f_c}\right)^2\right) - 5 = 26.243$$

$$f := 2000$$

$$R_{2000} := 20 \cdot \log\left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0}\right) + 20 \cdot \log\left(1 - \left(\frac{f}{f_c}\right)^2\right) - 5 = 28.178$$

$$f := 2500$$

$$R_{2500} := 20 \cdot \log\left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0}\right) + 20 \cdot \log\left(1 - \left(\frac{f}{f_c}\right)^2\right) - 5 = 30.111$$

$$f := 3150$$

$$R_{3150} := 20 \cdot \log\left(\frac{\pi \cdot m' \cdot f}{p_0 \cdot c_0}\right) + 20 \cdot \log\left(1 - \left(\frac{f}{f_c}\right)^2\right) - 5 = 32.111$$

$R_{100,2} := 2.166$	tiivissaumakate
$R_{125,2} := 4.104$	
$R_{160,2} := 6.249$	
$R_{200,2} := 8.187$	
$R_{250,2} := 10.125$	
$R_{315,2} := 12.132$	
$R_{400,2} := 14.207$	
$R_{500,2} := 16.145$	
$R_{630,2} := 18.152$	
$R_{800,2} := 20.227$	
$R_{1000,2} := 22.164$	
$R_{1250,2} := 24.101$	
$R_{1600,2} := 26.243$	
$R_{2000,2} := 28.178$	
$R_{2500,2} := 30.111$	
$R_{3150,2} := 32.111$	

Levyjen yhteinen ilmaääneneristävyys

$$R_N := 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_1}{20}} + 10^{\frac{R_2}{20}} \right) = ?$$

Tiivissaumakate+raakapontti 20mm

$$R_{N,100} := 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{100,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{100,2}}{20}} \right) = 13.594$$

$$R_{N,125} := 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{125,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{125,2}}{20}} \right) = 15.436$$

$$R_{N,160} := 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{160,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{160,2}}{20}} \right) = 17.409$$

$$R_{N,200} := 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{200,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{200,2}}{20}} \right) = 19.092$$

$$R_{N,250} := 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{250,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{250,2}}{20}} \right) = 20.616$$

$$R_{N,315} := 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{315,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{315,2}}{20}} \right) = 21.901$$

$$R_{N,400} := 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{400,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{400,2}}{20}} \right) = 22.822$$

$$R_{N,500} := 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{500,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{500,2}}{20}} \right) = 22.098$$

$$R_{N,630} := 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{630,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{630,2}}{20}} \right) = 22.048$$

$$R_{N,800} := 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{800,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{800,2}}{20}} \right) = 24.512$$

$$R_{N,1000} := 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{1000,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{1000,2}}{20}} \right) = 26.84$$

$$R_{N,1250} := 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{1250,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{1250,2}}{20}} \right) = 29.195$$

$$R_{N,1600} := 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{1600,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{1600,2}}{20}} \right) = 31.83$$

$$R_{N,2000} := 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{2000,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{2000,2}}{20}} \right) = 34.239$$

$$R_{N,2500} := 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{2500,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{2500,2}}{20}} \right) = 36.675$$

$$R_{N,3150} := 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{3150,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{3150,2}}{20}} \right) = 39.226$$

$$R_{100,1} := 13.594$$

$$R_{125,1} := 15.436$$

$$R_{160,1} := 17.409$$

$$R_{200,1} := 19.092$$

$$R_{250,1} := 20.616$$

$$R_{315,1} := 21.901$$

$$R_{400,1} := 22.822$$

$$R_{500,1} := 22.098$$

$$R_{630,1} := 22.048$$

$$R_{800,1} := 24.512$$

$$R_{1000,1} := 26.84$$

$$R_{1250,1} := 29.195$$

$$R_{1600,1} := 31.83$$

$$R_{2000,1} := 34.239$$

$$R_{2500,1} := 36.675$$

$$R_{3150,1} := 39.226$$

$$f_{c1} := 620.916 \quad f_{c2} := 62663.895 \quad m'_1 := 8.4 \quad m'_2 := 3$$

$$f_c := \left(\frac{m'_1 \cdot \sqrt{f_{c2}} + m'_2 \cdot \sqrt{f_{c1}}}{m'_1 + m'_2} \right)^2 = 36484.558$$

$$m' := \frac{m'_1 + m'_2}{2} = 5.7$$

Vakioita			
Poissonin suhde	Äänen nopeus ilmassa	Häviökerroin	Ilman tiheys 20 °c
$\mu := 0.20$	$c_0 := 343$	$\eta := 0.02$	$p_0 := 1.2041$
$\mu_b := 0.40$ (bitumille)			
tiivissaumakate +raakapontti 20mm	Kipsilevy EK 13mm	Ilmaväli 700mm (200mm tuuletusväli +500mm eriste)	
		$d := 0.700$	
$R_{100.1} := 13.594$	$R_{100.2} := 12.522$		
$R_{125.1} := 15.436$	$R_{125.2} := 14.452$		
$R_{160.1} := 17.409$	$R_{160.2} := 16.582$		
$R_{200.1} := 19.092$	$R_{200.2} := 18.5$		
$R_{250.1} := 20.616$	$R_{250.2} := 20.405$		
$R_{315.1} := 21.901$	$R_{315.2} := 22.36$		
$R_{400.1} := 22.822$	$R_{400.2} := 24.346$		
$R_{500.1} := 22.098$	$R_{500.2} := 26.15$		
$R_{630.1} := 22.048$	$R_{630.2} := 27.936$		
$R_{800.1} := 24.512$	$R_{800.2} := 29.63$		
$R_{1000.1} := 26.84$	$R_{1000.2} := 30.972$		
$R_{1250.1} := 29.195$	$R_{1250.2} := 31.888$		
$R_{1600.1} := 31.83$	$R_{1600.2} := 31.858$		
$R_{2000.1} := 34.239$	$R_{2000.2} := 29.204$		
$R_{2500.1} := 36.675$	$R_{2500.2} := 26.609$		
$R_{3150.1} := 39.226$	$R_{3150.2} := 29.62$		
$f_{c1} := 36484.558$	$f_{c2} := 2463.069$		
$m'_1 := 5.7$	$m'_2 := 9.9$		

Kaksinkertainen levyrakenne

$$R := -10 \cdot \log \left(10^{\frac{-R_1}{10}} + 10^{\frac{-R_2}{10}} \right)$$

Täydellisesti ääntä absorboiva kaviteetti

$$R_{cl} := 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_1}{20}} + 10^{\frac{R_2}{20}} \right) \quad f < f_{mam}$$

$$R_{cl} := R_1 + R_2 + 20 \cdot \log(f \cdot d) - 29 \quad f_{mam} < f < f_d$$

$$R_{cl} := R_1 + R_2 + 6 \quad f > f_d$$

$$f_{mam} := 80 \cdot \sqrt{\frac{(m'_1 + m'_2)}{d \cdot m'_1 \cdot m'_2}} = 50.275$$

$$f_d := \frac{c_0}{2 \cdot \pi \cdot d} = 77.986$$

$f > f_d$

$$R_{cl,100} := R_{100,1} + R_{100,2} + 6 = 32.116$$

$$R_{cl,125} := R_{125,1} + R_{125,2} + 6 = 35.888$$

$$R_{cl,160} := R_{160,1} + R_{160,2} + 6 = 39.991$$

$$R_{cl,200} := R_{200,1} + R_{200,2} + 6 = 43.592$$

$$R_{cl,250} := R_{250,1} + R_{250,2} + 6 = 47.021$$

$$R_{cl,315} := R_{315,1} + R_{315,2} + 6 = 50.261$$

$$R_{cl,400} := R_{400,1} + R_{400,2} + 6 = 53.168$$

$$R_{cl,500} := R_{500,1} + R_{500,2} + 6 = 54.248$$

$$R_{cl,630} := R_{630,1} + R_{630,2} + 6 = 55.984$$

$$R_{cl,800} := R_{800,1} + R_{800,2} + 6 = 60.142$$

$$R_{cl,1000} := R_{1000,1} + R_{1000,2} + 6 = 63.812$$

$$R_{cl.1250} := R_{1250.1} + R_{1250.2} + 6 = 67.083$$

$$R_{cl.1600} := R_{1600.1} + R_{1600.2} + 6 = 69.688$$

$$R_{cl.2000} := R_{2000.1} + R_{2000.2} + 6 = 69.443$$

$$R_{cl.2500} := R_{2500.1} + R_{2500.2} + 6 = 69.284$$

$$R_{cl.3150} := R_{3150.1} + R_{3150.2} + 6 = 74.846$$

Epätäydellisesti ääntä absorboiva kaviteetti

$$R_{clI} := R_{cl} + \Delta R_{abs}$$

$$\Delta R_{abs} := 10 \cdot \log(a_{eff})$$

$$a_c := 1.0 \quad FR := \frac{500}{700} = 0.714 \quad \text{Ilmaväli 700mm eristepaksuus 500mm}$$

$$a_{eff} := a_c \cdot FR = 0.714$$

$$\Delta R_{abs} := 10 \cdot \log(a_{eff}) = -1.461$$

$$R_{clI.100} := R_{cl.100} + \Delta R_{abs} = 30.655$$

$$R_{clI.125} := R_{cl.125} + \Delta R_{abs} = 34.427$$

$$R_{clI.160} := R_{cl.160} + \Delta R_{abs} = 38.53$$

$$R_{clI.200} := R_{cl.200} + \Delta R_{abs} = 42.131$$

$$R_{clI.250} := R_{cl.250} + \Delta R_{abs} = 45.56$$

$$R_{clI.315} := R_{cl.315} + \Delta R_{abs} = 48.8$$

$$R_{clI.400} := R_{cl.400} + \Delta R_{abs} = 51.707$$

$$R_{clI.500} := R_{cl.500} + \Delta R_{abs} = 52.787$$

$$R_{clI.630} := R_{cl.630} + \Delta R_{abs} = 54.523$$

$$R_{clI.800} := R_{cl.800} + \Delta R_{abs} = 58.681$$

$$R_{cII.1000} := R_{cI.1000} + \Delta R_{abs} = 62.351$$

$$R_{cII.1250} := R_{cI.1250} + \Delta R_{abs} = 65.622$$

$$R_{cII.1600} := R_{cI.1600} + \Delta R_{abs} = 68.227$$

$$R_{cII.2000} := R_{cI.2000} + \Delta R_{abs} = 67.982$$

$$R_{cII.2500} := R_{cI.2500} + \Delta R_{abs} = 67.823$$

$$R_{cII.3150} := R_{cI.3150} + \Delta R_{abs} = 73.385$$

Jäykkä kiinnitys välissä

$$R_{bf} := 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_1}{20}} + 10^{\frac{R_2}{20}} \right) + \Delta R_b$$

$$\Delta R_b := 10 \cdot \log (b \cdot f_{cL}) + 20 \cdot \log \left(\frac{m'_1}{m'_1 + m'_2} \right) - 18$$

$$b := 0.9$$

$$f_{cL} := \left(\frac{m'_1 \cdot \sqrt{f_{c2}} + m'_2 \cdot \sqrt{f_{c1}}}{m'_1 + m'_2} \right)^2$$

$$f_{c1} = 36484.558 \quad f_{c2} = 2463.069$$

$$f_{cL} := \left(\frac{m'_1 \cdot \sqrt{f_{c2}} + m'_2 \cdot \sqrt{f_{c1}}}{m'_1 + m'_2} \right)^2 = 19418.767$$

$$\Delta R_b := 10 \cdot \log (b \cdot f_{cL}) + 20 \cdot \log \left(\frac{m'_1}{m'_1 + m'_2} \right) - 18 = 15.68$$

$$R_{bf} := 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_1}{20}} + 10^{\frac{R_2}{20}} \right) + \Delta R_b = ?$$

$$\begin{aligned}
 R_{bf,100} &:= 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{100,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{100,2}}{20}} \right) + \Delta R_b = 34.775 \\
 R_{bf,125} &:= 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{125,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{125,2}}{20}} \right) + \Delta R_b = 36.658 \\
 R_{bf,160} &:= 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{160,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{160,2}}{20}} \right) + \Delta R_b = 38.706 \\
 R_{bf,200} &:= 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{200,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{200,2}}{20}} \right) + \Delta R_b = 40.501 \\
 R_{bf,250} &:= 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{250,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{250,2}}{20}} \right) + \Delta R_b = 42.211 \\
 R_{bf,315} &:= 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{315,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{315,2}}{20}} \right) + \Delta R_b = 43.834 \\
 R_{bf,400} &:= 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{400,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{400,2}}{20}} \right) + \Delta R_b = 45.318 \\
 R_{bf,500} &:= 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{500,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{500,2}}{20}} \right) + \Delta R_b = 46.058 \\
 R_{bf,630} &:= 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{630,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{630,2}}{20}} \right) + \Delta R_b = 47.182 \\
 R_{bf,800} &:= 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{800,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{800,2}}{20}} \right) + \Delta R_b = 49.143 \\
 R_{bf,1000} &:= 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{1000,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{1000,2}}{20}} \right) + \Delta R_b = 50.85 \\
 R_{bf,1250} &:= 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{1250,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{1250,2}}{20}} \right) + \Delta R_b = 52.346 \\
 R_{bf,1600} &:= 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{1600,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{1600,2}}{20}} \right) + \Delta R_b = 53.544 \\
 R_{bf,2000} &:= 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{2000,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{2000,2}}{20}} \right) + \Delta R_b = 53.782 \\
 R_{bf,2500} &:= 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{2500,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{2500,2}}{20}} \right) + \Delta R_b = 54.725 \\
 R_{bf,3150} &:= 20 \cdot \log \left(10^{\frac{R_{3150,1}}{20}} + 10^{\frac{R_{3150,2}}{20}} \right) + \Delta R_b = 57.389
 \end{aligned}$$

$$R_{100} := -10 \cdot \log \left(10^{\frac{-R_{ct,100}}{10}} + 10^{\frac{-R_{ef,100}}{10}} \right) = 29.233$$

$$R_{125} := -10 \cdot \log \left(10^{\frac{-R_{ct,125}}{10}} + 10^{\frac{-R_{ef,125}}{10}} \right) = 32.39$$

$$R_{160} := -10 \cdot \log \left(10^{\frac{-R_{ct,160}}{10}} + 10^{\frac{-R_{ef,160}}{10}} \right) = 35.606$$

$$R_{200} := -10 \cdot \log \left(10^{\frac{-R_{ct,200}}{10}} + 10^{\frac{-R_{ef,200}}{10}} \right) = 38.23$$

$$R_{250} := -10 \cdot \log \left(10^{\frac{-R_{ct,250}}{10}} + 10^{\frac{-R_{ef,250}}{10}} \right) = 40.56$$

$$R_{315} := -10 \cdot \log \left(10^{\frac{-R_{ct,315}}{10}} + 10^{\frac{-R_{ef,315}}{10}} \right) = 42.632$$

$$R_{400} := -10 \cdot \log \left(10^{\frac{-R_{ct,400}}{10}} + 10^{\frac{-R_{ef,400}}{10}} \right) = 44.42$$

$$R_{500} := -10 \cdot \log \left(10^{\frac{-R_{ct,500}}{10}} + 10^{\frac{-R_{ef,500}}{10}} \right) = 45.222$$

$$R_{630} := -10 \cdot \log \left(10^{\frac{-R_{ct,630}}{10}} + 10^{\frac{-R_{ef,630}}{10}} \right) = 46.447$$

$$R_{800} := -10 \cdot \log \left(10^{\frac{-R_{ct,800}}{10}} + 10^{\frac{-R_{ef,800}}{10}} \right) = 48.685$$

$$R_{1000} := -10 \cdot \log \left(10^{\frac{-R_{ct,1000}}{10}} + 10^{\frac{-R_{ef,1000}}{10}} \right) = 50.553$$

$$R_{1250} := -10 \cdot \log \left(10^{\frac{-R_{ct,1250}}{10}} + 10^{\frac{-R_{ef,1250}}{10}} \right) = 52.146$$

$$R_{1600} := -10 \cdot \log \left(10^{\frac{-R_{ct,1600}}{10}} + 10^{\frac{-R_{ef,1600}}{10}} \right) = 53.399$$

$$R_{2000} := -10 \cdot \log \left(10^{\frac{-R_{ct,2000}}{10}} + 10^{\frac{-R_{ef,2000}}{10}} \right) = 53.62$$

$$R_{2500} := -10 \cdot \log \left(10^{\frac{-R_{ct,2500}}{10}} + 10^{\frac{-R_{ef,2500}}{10}} \right) = 54.518$$

$$R_{3150} := -10 \cdot \log \left(10^{\frac{-R_{ct,3150}}{10}} + 10^{\frac{-R_{ef,3150}}{10}} \right) = 57.281$$

Vertailukäyrästä

Rw=49

Rw+Ctr=44

Rw+C=48