



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Ehituse ja arhitektuuri instituut

PUITKARKASSMOODULHOONETE VAHELAGEDE
HELIISOLATSIOONINÕUETE TAGAMINE. MOODULITE
KORRUSTEVAHELISTE KINNITUSSIDEMETE JA VIBRATSIOONI
ISOLATSIOONI MATERJALI MÕJU VAHELAGEDE
AKUSTILISELE TOIMIVUSELE

COMPLYING WITH ACOUSTIC REQUIREMENTS OF INTERMEDIATE FLOORS IN
TIMBER FRAMED MODULAR BUILDINGS. THE EFFECT OF FASTENERS AND
VIBRATION ISOLATION MATERIALS BETWEEN MODULES ON THE ACOUSTIC
PERFORMANCE OF INTERMEDIATE FLOORS

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane:	Kitty Saar
Üliõpilaskood:	072186 EAEI
Juhendaja:	Marko Ründva, B. Sc.

(Tiitellehe pöördel)

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad,

kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

“.....” 201.....

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

“.....” 201.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”201... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Ehituse ja arhitektuuri instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Kitty Saar, 072186

Õppekava, peeriala: EAEI 02/02, Ehitiste projekteerimine ja ehitusjuhtimine

Juhendaja(d): Marko Ründva, TTÜ Liginullenergiahoonete uurimisrühm, 6202405

Lõputöö teema:

Puitkarkassmoodulhoonete vahelagede heliisolatsiooninõuete tagamine. Moodulite korrustevaheliste kinnitussidemete ja vibratsiooni isolatsiooni materjali mõju vahelagede akustilisele toimivusele.

Complying with acoustic requirements of intermediate floors in timber framed modular buildings.
The effect of fasteners and vibration isolation materials between modules on the acoustic performance of intermediate floors.

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Anda ülevaade eluhoonete vahelagede heliisolatsiooninõuetest moodulhoonete olulistes eksportriikides ja nende omavahelisest võrreldavusest.
2. Uurida puitkarkassmoodulhoonete moodulite korrustevahelise vibratsiooni isolatsiooni materjali ning erinevate kinnitustüüpide mõju vahelae heliisolatsiooni näitajatele.
3. Analüüsida konkreetse vahelaetüübi näitel puitmoodulhoonete vahelagede heliisolatsiooni projekteerimise võimalikkust akustikatarkvara abil. Tuua välja olulised aspektid moodulhoone vahelae helipidavuse tagamisel.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Alusteooriaga tutvumine. Vahelagede helipidavusnõuded olulistes sihtriikides. Mõõdistuste ettevalmistus. Mõõdistused.	31.04.19
2.	Teoreetilised arvutused. Tulemuste analüüs. Vahelagede helipidavusnõuete tagamine.	06.12.19
3.	Lõputöö esitamine.	06.01.20

Töö keel: Eesti

Lõputöö esitamise tähtaeg: 06. jaanuar 2020.a

Üliõpilane: Kitty Saar

.....
/allkiri/

“.....”2020.a

Juhendaja: Marko Ründva

.....
/allkiri

“.....”2020.a

SISUKORD

EESSÕNA.....	6
Lühendite ja tähiste loetelu	7
SISSEJUHATUS	8
1 TEOREETILINE TAUST JA VAHELAGEDE HELIISOLATSIOONINÕUDED ERINEVATES SIHTRIIKIDES	11
1.1 Puitkarkassmoodulhooned.....	11
1.2 Varasemad uuringud	12
1.3 Heli olemus ja põhimääratlused.....	14
1.4 Hoonete heliisolatsioon	16
1.4.1 Õhuheli isolatsioon.....	16
1.4.2 Löögimüra isolatsioon	18
1.4.3 Spektrilähendustegurid	19
1.5 Eluhoonete vahelagedele kehtivad heliisolatsiooni nõuded olulisemates ekspordriikides	19
1.5.1 Õhuheli isolatsiooninõuded	20
1.5.2 Löögiheli isolatsiooninõuded.....	22
1.5.3 Eri riikides kehtivate heliisolatsiooninõuete võrreldavus	24
2 VAHELAGEDE HELIPIDAVUSE MÕÕTMINE.....	27
2.1 Mõõdistuse üldpõhimõtted	27
2.1.1 Õhumüra isolatsiooni mõõdistus	27
2.1.2 Löögimüra isolatsiooni mõõdistus.....	28
2.2 Mõõdistused tehasetingimustes.....	29
2.2.1 Testmooduli kirjeldus	29
2.2.2 Kasutatud mõõteriistad ja mõõtemääramatus.	30
2.2.3 Katsetatavad materjalid ja kinnitustüübid	31
2.2.4 Mõõtmistulemused	32
2.3 Mõõdistused objektil.....	42
2.3.1 Mõõtmistulemused pärast moodulite paigaldust objektil.....	42
2.4 Mõõdistuste kokkuvõtte ja järelused	45
3 HOONETE HELIISOLATSIOONI PROJEKTEERIMINE	47
3.1 Üldpõhimõtted	47
3.1.1 Õhuheli isolatsioon.....	47
3.1.2 Löögiheli isolatsiooni arvutamine.....	50

3.2 Arvutustarkvarad.....	51
3.2.1 Insul	51
3.2.2 Bastian	52
3.3 Teoreetilised arvutused.....	53
3.3.1 Vahelae õhuheli isolatsioon	53
3.3.2 Vahelae löögiheli rõhutasemete arvutus	58
3.3.3 Siirdehelide arvutus Bastianis.....	59
3.4 Arvutustulemuste kokkuvõte ja järelused	62
4 MOODULHOONETE VAHELAGEDE HELIISOLATSIOONINÕUETE TAGAMINE.....	64
4.1 Projekteerimisfaas.....	64
4.1.1 Vahelae konstruktsioon.....	64
4.1.2 Moodulitevaheline sõlm.....	67
4.2 Helipidavuse parendamisvõimalikkus peale hoone montaaži	69
KOKKUVÕTE	71
SUMMARY	73
KASUTATUD KIRJANDUS.....	75
LISAD	79

EESSÕNA

Käesolevas magistritöös keskenduti puitkarkassmoodulhoonete vahelagede heliisolatsioonile. Eesmärgiks oli uurida milline on korrustevahelise vibratsiooni isolatsiooni materjali ning moodulite omavaheliste kinnitussidemete mõju vahelae tarindi heliisolatsiooni toimivusele ning kas akustikatarkvarade abil on võimalik hinnata moodulhoonete vahelagede akustilisi näitajaid. Töö raames viidi autori ettepanekul läbi tehasetingimustes vahelae heliisolatsiooni mõõdistused kahest moodulist koosnevate testpüstakutega, mille käigus katsetati kolme erinevat vibratsiooni isolatsiooni materjali ning kahte tüüpi kinnitussidemeid. Lisaks mõõdistati moodulite vahelagede heliisolatsiooni objektil peale hoone montaaži analoogsed moodulis. Akustikatarkvarade Insul ning Bastian abil tehti eelnevalt mõõdistatud vahelaele teoreetilised arvutused ning tulemusi võrreldi omavahel. Lisaks toodi välja ka kirjandusest ning teadustöödest leitud moodulhoonete vahelagede heliisolatsiooni projekteerimist puudutavaid aspekte.

Tehases korraldatud vahelagede heliisolatsiooni mõõdistused viidi läbi Harmet OÜ moodulitehases ning objektimõõdistused sama moodulitehase toodetud ja püstitatud hoones. Suured tänud Harmet OÜ juhatuse esimehele, Toomas Kalevile, kelle loal mõõdistused tehases võimalikuks said ning Alo Tammele. Lisaks soovin tänada toe ja abi eest kogu tehase tiimi Andy Andlat, Argo Kesküla, Taimer Kösterit ja kõiki teisi kes vähemal või rohkemal määral olid mõõdistustega seotud.

Tänud ka Rauno Loonurmele, Eve Pesurile, Kusti Lilleoksale, Peeter Mittile, Mihkel Karusele ning Ott Raiglale. Materjalide hankimise eest tänud Indrek Lasselile ning ostuosakonnale ja samuti Tarmo Ivanovile.

Siirad tänud lõputöö juhendajale Marko Ründvale pühendatud aja, hea nõu ning akustikatarkvara Insul kasutamise võimaldamise eest. Samuti Margit Errapartile ning Liisa Sellile, kes tehases korraldatud mõõdistuste maratoni aitasid läbi viia.

Akustikatarkvara kasutamise võimaldamise eest tänan Gerda Kaasikut.

Südamest tänan mõistva suhtumise ning kannatlikkuse ja abi eest oma elukaaslast Kristjanit ning meie lapsi ja loomulikult laste vanavanemaid.

puitkarkassmoodulhoone, heliisolatsioon, vahelagi, magistritöö

Lühendite ja tähiste loetelu

A – ekvivalentne neeldumispind vastuvõttavas ruumis, m^2

A_0 – normatiivne ekvivalentne neeldumispind, m^2

$C_{I,50-2500}$ – löögiheli spektrilähendustegur standardi ISO 717-2 kohaselt

C_{sab} – Sabine'i koefitsient, s/m

D_n – taandatud helitasemete vahe, dB

D_{nT} – standarditud helitasemete vahe, dB

$D_{nT,w}$ – kaalutud standarditud helitasemete vahe, dB

f – helisagedus, Hz

f_c – kriitiline sagedus, Hz

f_I – piirsagedus, Hz

f_0 – massi-elastsuse resonantssagedus, Hz

L_p – helirõhutase, dB,

L_n – löögiheli taandatud rõhutase, dB

L_{nT} – löögiheli standarditud rõhutase, dB

L'_n – löögiheli taandatud rõhutase reaalses olukorras, dB

$L'_{n,w}$ – löögiheli kaalutud taandatud rõhutase reaalses olukorras ISO 717-2:2013 kohaselt, dB

L'_{nT} – löögiheli standarditud rõhutase reaalses olukorras, dB

$L'_{nT,w}$ – löögiheli kaalutud standarditud rõhutase reaalses olukorras, dB

L_{pA} – A–korrigeeritud helirõhutase, dB

L_{pC} – C–korrigeeritud helirõhutase, dB

p – helirõhk, Pa

p_0 – standardse helirõhu nullväärtus suurusega 20×10^{-6} Pa

R – heliisolatsiooniindeks, dB

R' – tegelik heliisolatsiooniindeks, dB

R_w – kaalutud heliisolatsiooniindeks, dB

R'_w – kaalutud tegelik heliisolatsiooniindeks, dB

T – järelkõlakestus vastuvõttavas ruumis, s

T_0 – järelkõlakestuse normatiivväärtus, eluhoonete puhul on 0,5 s

SISSEJUHATUS

Eesti on olnud Euroopa juhtiv puithoonete eksportija aastast 2010, müües kuni 90% kogutoodangust Eestist välja. Ekspordimahud on seejuures olnud pidevas kasvamises, ulatudes 2019. aastal üle 394 miljoni euro. [1] Puitu kui jätkusuutlikku ja keskkonnasõbralikku ehitusmaterjali on hakatud üha enam väärtustama ja propageerima. Sellele annavad kinnitust viimasel kümnendil ja ka varem asutatud erinevad puitehitisi soosivad organisatsioonid nagu näiteks 2006 aastal asutatud „Nordic Wooden Cities“, millega on tänaseks liitunud 11 linna. [2] Puidu kui ehitusmaterjali oluline eelis tänase kliimakriisi taustal, tagada hoonete ehitusel võimalikult väike CO₂ jalajälg ning teisalt moodulhoonete ehitusprotsessist saavutatav võimalik kõrgem kvaliteet ning ajaline võit annavad aimu puitkarkassmoodulhoonete jätkuvast nõudluse kasvust ka tulevikus.

Magistritöö käigus keskendutakse puitkarkassmoodulhoonete vahelagede, kui ruumelementmaja kõige keerukaima konstruktsioonitüübi, akustilisele toimivusele. Töös uuritakse ühe lihtsamat tüüpi moodulhoone vahelae näitel, kas ja millist mõju vahelae akustilisele toimivusele avaldab ülemise ja alumise korruse moodulite vahel kasutatavad erinevat tüüpi vibratsiooni isolatsiooni materjalid ning moodulite vahelised kinnitussidemed. Samuti vaadeldakse sama vahelae näitel kuivõrd on võimalik teoreetiliselt hinnata vahelaetarindi heliisolatsiooni näitajaid nii Soome Ehitusinseneride Liidu RIL ry poolt välja antud akustilist projekteerimist käsitlevas väljaandes RIL 243-1-2007 „Hoonete akustiline projekteerimine. Akustika alused“ [3] toodud juhiste kui akustikatarvarade Insul [4] ja Bastian [5] abil.

Hoone kvaliteedi seisukohalt on oluline osa tagada selle ruumides ka piisav, nõuetele vastav heliisolatsioon, mille projekteerimine on kergkonstruktsioonhoonete korral tunduvalt keerulisem kui massiivsete tarinditega hoonete puhul. [3] Moodulhoone vahelagi moodustub ülemise korruse mooduli põhjaelemendist ning alumise korruse mooduli laeelemendist peale hoone montaaži. Sõltuvalt kuidas ülemise ja alumise mooduli vastavad elemendid on lahendatud ning milline on kasutatud materjalide valik ja paiknemine konstruktsioonis on võimalik moodustada väga palju erinevaid vahelaetüüpe. Erineva materjali kasutus ning kinnitustüüpide ja karkassisammu ning ristlõigete varieeruvus moodustunud vahelagedes, samuti ülemise ja alumise mooduli kokkupuutes tekkiv sõlmalahendus mõjutavad kõik vähesel või rohkemal määral heli levikut ühest ruumist teise, mis teeb selle konstruktsiooni heliisolatsiooni toimivuse hindamise äärmiselt keeruliseks.

Töö peamiseks eesmärgiks on moodulhoonete vahelaetarindite heliisolatsiooni mõjutavate tegurite uurimine, teadvustamine ja koondamine, mille põhjal oleks võimalik juhinduda projekteerimisfaasis tehtavate valikute ja otsuste tegemisel, saavutamaks moodulhoonete vahelagedes helipidavusnõuete tagamine.

Magistritöö on jaotatud neljaks peatükiks. Esimeses osas antakse ülevaade varasematest teadustöödest, seletatakse lahti olulisemad hoone heliisolatsiooni puudutavad mõisted ning vaadeldakse, millised on moodulhoonete ekspordi seisukohalt olulistes sihtriikides kehtivad heliisolatsiooninõuded korteritevahelistele vahelagedele ning kuidas neid omavahel võrrelda.

Teises osas uuritakse ühe lihtsama moodulhoone vahelae näitel, kas ja millist mõju avaldavad vahelae akustilisele toimivusele erinevad moodulitevahelised vibratsiooni isolatsiooni materjalid ning moodulite omavahelised kinnitussidemed. Selle raames viidi läbi tehasetingimustes vahelae heliisolatsiooni mõõdistused kahest moodulist koosnevate testpüstakutega. Mõõdistati vahelae õhuheli isolatsiooni ning löögiheli standarditud rõhutasemeid kolme erineva isolatsioonimaterjaliga ning kahte tüüpi kinnitussidemetega. Lisaks ka kinnitamata olukord, ning olukord, mil moodulite vaheline isolatsioonimaterjal puudus. Lisaks teostati I ja II ning II ja III korruse vahelise vahelagede heliisolatsiooni mõõdistused analoogmoodulites objektil valmis hoones peale moodulite montaaži, saamaks teada, palju tehases teostatud mõõdistustulemused erinevad tulemustest, mis saavutatakse peale moodulite montaaži ning kas neid tulemusi on võimalik hoonele üle kanda.

Kolmandas peatükis tehakse teoreetilised arvutused teises peatükis katsetatud vahelaele ning võrreldakse neid objektil saadud mõõdistustulemusega. Selle osa põhiliseks eesmärgiks on välja selgitada lihtsa vahelae näitel, kas ja millisel määral on võimalik akustikatarkvarade Insul ja Bastian ning RIL 243-1-2007 toodud juhiste abil hinnata moodulhoone vahelagede akustilisi näitajaid.

Magistritöö viimases peatükis koondatakse kokku teisest ja kolmandast peatükist saadud teadmised ning lisaks töö tegemise käigus erinevatest teadustöödest ning kirjandusest leitud olulised aspektid, mis võivad olla abiks moodulhoone vahelae projekteerimisel tarindi parema akustilise toimivuse saavutamiseks.

Töö käigus korraldatud tehasemõõdistused viidi läbi Harmet OÜ moodulitehases. Lisaks on töös kasutatud näidetena vahelagede heliisolatsiooni mõõdistustulemusi erinevatelt Harmet OÜ poolt ehitatud hoonetest, milles esinenud konstruktsioonitüüpe ning sõlmilahendusi ei ole moodulitootja

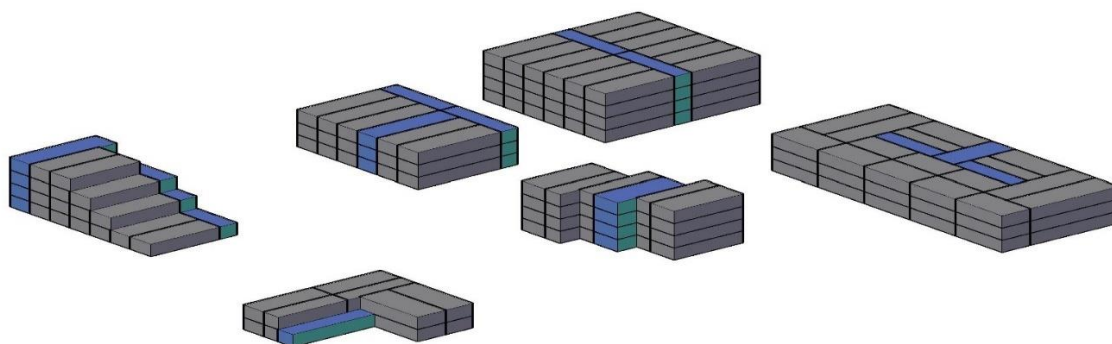
ärisaladuste kaitsmise huvides töös täpsustatud. Samal eesmärgil ei ole välja toodud ka teises peatükis tehtud mõõdistustel katsetatud konkreetseid vibratsiooni isolatsiooni tooteid ning on piirdutud vaid nende üldise kirjeldusega. Täpsustamata on ka vahelaetarindi viimistluskihid ning nende täpne paigaldusmeetod.

1 TEOREETILINE TAUST JA VAHELAGEDE

HELIISOLATSIOONINÕUDED ERINEVATES SIHTRIIKIDES

1.1 Puitkarkassmoodulhooned

Puitkarkassmoodulhoonete põhiline erinevus muude puitkarkasshoonetega võrreldes on asjaolu, et moodulhoonete puhul on hoone jagatud nn. ruumelementideks, mis toodetakse tehasetingimustes ning transporditakse seejärel ehitusplatsile, kus need omavahel kokku monteeritakse. Ruumelemendi suuruse määravad üldjuhul tehase erisused ning transpordi tingimused. Eestis tegutsevate moodulmaja tehaste toodangu gabariidid küündivad 5,3x14,5 m põhjamõõtudeni ning kuni 5,6 m kõrguseni. [6] [7] [8] Ühe ruumelemendi paigaldus ehitusplatsil vältab sõltuvalt hoone keerukusest 20 – 60 minutit.



Joonis 1.1 Ruummoodulite võimalikke paiknemisskeeme



Joonis 1.2 ARSprojekt OÜ nägemus ruummoodulitest koosnevast ridaelamust. Rahvusvahelise konkursi võidutöö „NIHE“ [9]

Ehkki moodulsüsteemis ehitamine seab teatud piirid hoone arhitektuursele ning konstruktiivsele lahendusele on sellise tehnoloogia kasutamisel mitmeid eeliseid võrreldes muude meetoditega. Need võiks kokkuvõtvalt iseloomustada järgmiste märksõnadega – kvaliteet, kiirus ja kokkuhoid.

Ruummoodulite ehitamine kuivades, ilmastikust sõltumatutes tehasetingimustes võimaldab tagada kõigil töötappidel parema kontrolli ning seeläbi saavutada kõrgem kvaliteet. Liinitootmise kasutamine võimaldab oluliselt kiirendada ruummooduli valmimisprotsessi, kuna kaasata saab üheaegselt suuremat hulka töölisi. Ruummoodulid valmistatakse tehases, sõltuvalt hoone arhitektuurist ning konstruktiivsest lahendusest, 80 – 95% valmidusastmeni, mis minimeerib tööjõu, aja ning materjali kulu ehitusplatsil. Ehkki moodulsüsteemis ehitades dimensioneeritakse konstruktsiooni kandev osa mõnevõrra seoses tõstete tegemise vajadusega üle, on materjalikasutus siiski võrreldes algusest lõpuni platsil ehitatud puitkarkasshoonega tunduvalt efektiivsem ning kokkuhoid materjalikasutuses võib moodustuda ehitusmaksumusest koguni 3–4% [10] Üheks suurimaks eeliseks, mis moodulmajad investorile jaoks atraktiivseks teeb on kogu ehitusprotsessi ajaline võit, mis saavutatakse asjaoluga, et vundamendi tööd viiakse läbi paralleelselt moodulite ehitusega tehases.

1.2 Varasemad uuringud

Puitehitiste propageerimine ja puitkonstruktsioonide aktiivne kasutuselevõtt Skandinaavias ja mujal Euroopas viimasel kahel kümnendil on ühtlasi aktiveerinud puitkonstruktsioonil põhinevate hoonete akustilisi toimivusi hõlmavaid uuringuid. Aastal 2008 alustas Euroopa teaduse- ja tehnoloogiaalane koostööorganisatsioon COST laiapõhjalise uuringuga COST Action FP0702 – „Net-Acoustics for Timber Based Lightweight Buildings and Elements“, millest võttis osa 15 Euroopa riiki ning lisaks veel Austraalia ning Uus-Meremaa. Uuringus keskenduti puidul põhinevate kergkonstruktsioonhoonete ning hoone tarindite akustilisele toimivusele madalsageduslikus piirkonnas (50 – 100 Hz). [11]

Rootsis läbiviidud mitmetes eluhoonete akustilisi omadusi käsitlevates uuringutes tuuakse esile, et kergkonstruktsioonhoonetes tajuvad elanikud madalsageduslikke löögist lähtuvaid helisid häirivamalt kui massiivtarinditega hoonetes isegi kui löögimüra tase vastab või ületab riigis kehtivaid vastavaid miinimumnõudeid. [12] [13] Suuremahulises uuringus „Acoustics in wooden buildings. State of art 2008“, mis viidi läbi 2007 – 2008 aastal Rootsis koostöös erinevate teadlaste ning juhtivate ehitusettevõtete ja materjalitootjatega, tuuakse välja konkreetsed probleemkohad seoses heliisolatsiooniga puithoonetes, mis vajavad edasisi uurimusi. Üheks olulisemaks

kitsaskohaks, mis välja tuuakse, on kergkonstruktsioonis hoonete heliisolatsiooni projekteerimiseks sobivate arvutusmodelite puudumine, kusjuures eraldi rõhutatakse vajadust arendada moodulhoonetele sobivaid arvutusmudeleid seoses neis kasutatavate tarindite keerukusega. [12]

Aastatel 2009 – 2013 viidi Rootsis läbi riiklik teadusprojekt „Akulite“, mis ühendas Rootsi ehitustööstuse ning akustika uurimisgruppe ühise eesmärgi nimel töötamaks välja heli- ning vibratsioonikriteeriumid kergkonstruktsioonihoonetes, mis oleks inimtajuga vastavuses. [14] „Akulite“ projekti täiendab 2010 – 2013 projekt „AcuWood“, milles teostatud uuringud hõlmasid lisaks Rootsile ka muid Euroopa riike. [15] Mainitud kahe projekti tulemid on aluseks järgmisele sammule – WoodWisdom Net+ poolt 2014. aastal ellu kutsutud teadusprojektile „Silent Timber Build“, mille põhieesmärgiks oli arendada mitmekorruseliste puithoonete heliisolatsiooni arvutusmudeleid. [16] Projekti tulemused hinnatakse rahuldavaks, kuid nenditakse, et ehkki saavutatud on selgem arusaam heliisolatsiooni arvutusmodelite modelleerimiseks on siiski veel mõningaid väljakutseid. [17]

Moodulhoonete heliisolatsiooniga seonduvaid teadustöid ja uuringuid on viimasel kümnendil läbi viidud palju. Mitmetes valmishitatud moodulhoonetes läbiviidud akustilisi mõõtmisi hõlmavates uuringutes selgub, et vahelagede puhul on kõrgematel korrustel löögimüra heliisolatsioon paremini tagatud kui alumistel. [18] [19] 2016. aastal Lund'i Ülikoolis Ola Flodén poolt kaitstud doktoritöö „Vibration transmission in lightweight buildings. Numerical prediction models“ esimeses osas käsitleb autor ruumelementhoonete korrustevahelise elastomeeri mõju vibratsioonide levikule. Vibratsiooni ülekanded kahekorruselise moodulsüsteemis hoones simuleeriti kasutades lõplike elementide meetodil põhinevat mudelit. Uuriti olukordi, kus muudeti elastomeeri materjali omadusi ning asetust. Töö käigus leiti, et elastomeeri klotside asukohamuutuse mõju, juhul kui materjali samm ei muutunud, oli tühine. Küll aga avaldas olulist mõju elastomeeri jäikuse muutmine. Üldiselt leiti, et pehmema elastomeeri kasutamine vähendab vibratsioonide ülekannet ülemise mooduli põrand ja alumise mooduli lae vahel, mõningate eranditega teatud sagedustel. Väga jäikade elastomeeride kasutamine võib aga viia vastupidise efektini, ning teatud sagedustel võivad vibratsioonid hoopis suurened. [20]

Kokkuvõtvalt võib öelda, et ehkki heliisolatsiooniga seotud uuringuid ning teadustöid puitkarkasskonstruktsioonis hoonete ja ka konkreetset moodulhoonete kohta on viimastel kümnenditel hulganisti läbi viidud, siis puitkarkass moodulhoonete vahelagede projekteerimine heliisolatsiooni koha pealt on jätkuvalt väga keeruline teema, mis vajab edasisi uuringuid. Moodulmajade tootjate seisukohalt on oluline saada selgust, millist mõju vahelae heliisolatsioonile

avaldatakse eri tüüpi materjalide ja jäikussidemete kasutamine, leidmaks projektidele optimaalseid lahendusi.

1.3 Heli olemus ja põhimääratlused

Heli on füüsikaline nähtus, mis avaldub rõhu kõikumises ümbritseva keskkonna staatilise rõhu suhtes. Helitekitajateks saavad olla igasugused vibratsiooniallikad, mille vibratsioon kandub üle ümbritsevasse keskkonda, tekitades selles tihendusi ja hõrendusi. Helilained saavad levida kõikides gaasilistes, vedelates ja tahketes ainetes mis omavad elastsust ja inertsust. [21] [3]

Heli leviku kiirus c sõltub keskkonna omadustest – elastsustest, mida kirjeldab aine elastsusmoodul K (N/m²) ning tihedusest ρ (kg/m³). Tahkistes ning vedelikes on helikiirus leitav valemiga

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (1.1)$$

kus c – helilaine levimise kiirus vaadeldavas keskkonnas, m/s. [22]

Praktilistel kaalutlustel kasutatakse õhuheli levimise kiiruse arvutamiseks valemit, kus levimiskiirus on sõltuvuses õhu absoluutsest temperatuurist

$$c = 20.05\sqrt{T} \quad (1.2)$$

kus T – õhu absoluutne temperatuur, K. [22]

Õhuheli levib toatemperatuuril kiirusega 340 – 345 m/s. [22]

Kuulmisaisting tekib, kui rõhu kõikumine paneb kõrvas kuulmekile võnkuma. Helilaine võngete sagedus on tajutav heli kõrgusena. Helisagedus f (Hz) näitab täisvõngete arvu n ajaühikus T (s), mille jooksul võnkeid mõõdeti. [22]

$$f = \frac{n}{T} \quad (1.3)$$

kus f – helisagedus, Hz,

n – täisvõngete arv,

T – periood, s.

Sagedus on määratud heliallikaga. Heli levimisel ühest keskkonnast teise jääb sagedus muutumatuks, kuid muutub heli levimise kiirus ning lainepikkus. Heli sageduse, leviku kiiruse ning lainepikkuse vahelist seost kirjeldab järgnev võrrand

$$c = f\lambda \quad (1.4)$$

kus λ – lainepikkus, m. [21]

Väiksema sagedusega võnked on tajutavad madalama toonina, kõrgemad kõrgema toonina. Inimese keskmine kuulmisvahemik on 20 Hz kuni 20 kHz. Alla 20 Hz sagedusega heli tajub inimene vibratsioonina. [3]

Helirõhutase L_p ehk helitase kirjeldab füüsikalise helirõhu tugevust. [3]

$$L_p = 20 \lg \frac{p}{p_0} \quad (1.5)$$

kus L_p – helirõhutase, dB,

p – helirõhk, Pa,

p_0 – standardse helirõhu nullväärtus suurusega 20×10^{-6} Pa, vähim inimkõrvale tajutav rõhu muutus, Pa.

Helirõhutaseme määratluse järgi on kuuldeläve helirõhutase 0 dB ja valuläve helirõhu helirõhutase 120 dB. [3]

Helirõhutasemed üksiksagedustel on heliallikast lähtuvalt erinevad ning üldjuhul on helitekitajaid rohkem kui üks, mistõttu sagedusspektri analüüsi jaoks jagatakse helispekter sagedusribadeks. Enamasti kasutatakse oktaavribasid ning tertsribasid. Helirõhutasemete näitamine terstribadena kirjeldab uuritava heli omadusi täpsemalt kui mõõtmise oktaavribadena. [21] [3]

Inimese kuulmistundlikkus ei ole kogu kuuldepiirkonna sagedusalas ühesugune vaid väheneb madalamatel ning kõrgematel sagedustel. Kuulmisaistingu tundlikkuse arvesse võtmiseks ning heli mõõdistustulemuste paremaks tõlgendamiseks kasutatakse erinevaid sageduskorrektsioone, millest enimkasutatud on A- ning C-korrektsioon. [3]

Helirõhutaseme A-korrigeeritud arvutuslik väärtus L_{pA} määratakse sagedusvahemikus 63 – 4000 Hz ning C-korrigeeritud arvutuslik väärtus L_{pC} sagedusvahemikus 31,4 – 4000 Hz. Need väärtused leitakse järgnevate valemitega [23]

$$L_{pA} = 10 \lg \sum_{i=0}^n 10^{0,1(L_{pi}-A_i)} \quad (1.6)$$

$$L_{pC} = 10 \lg \sum_{i=0}^n 10^{0,1(L_{pi}-C_i)} \quad (1.7)$$

kus L_{pi} – helirõhutase i -oktaavribas, dB; A_i ja C_i – vastavalt A- ja C-korrektsoon, dB.

Tabel 1.1 A- ja C-korrektsooni väärtused vastavalt oktaavribadele [23]

f (Hz)	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000
A (dB)	-	-26,2	-16,1	-8,6	-3,2	0	+1,2	+1,0
C (dB)	-3,0	-0,8	-0,2	0	0	0	-0,2	-0,8

1.4 Hoonete heliisolatsioon

Hoone ruumide ja tarindite akustilisi omadusi hinnatakse ühearvuliste parameetritega. Sõltuvalt ehitise ning selles olevate ruumide kasutusotstarbest ning ümbritseva keskkonna müratasemest määratakse ehitise sise- ning välispiiretele heliisolatsiooni nõuded, mille täitmisel tagatakse hoones ja selle ruumides akustiline mugavus. Ehituskonstruksioonid peavad säilitama neile esitatud heliisolatsiooninõuded hoone kasutusaja vältel. [23]

Hoone ja hoone tarindite heliisolatsioonimõõtmised tehakse 1/3 oktaavribades, mille kesksageduste sagedusvahemik jääb piiridesse 50 Hz või 100 Hz kuni 3150 või 5000 Hz. Mõõtmistulemuste paremaks tõlgendamiseks kasutatakse EN ISO 717 standardiseerias tooduid hinnangumeetodeid, mille järgi on võimalik kõiki tertsribasid hõlmavat 16 – 21 mõõteväärtust esitleda ühearvulise suurusena. [3]

1.4.1 Õhuheli isolatsioon

Ehitise sisepiirete õhumüra ruumidevahelist heliisolatsiooni hinnatakse tegeliku heliisolatsiooniindeksi R' (dB) kaudu, mis iseloomustab heli levikut läbi vaadeldava piirdetarindi ja sellega külgnevate tarindite. Laboratooriumis mõõdetud tarindi heliisolatsiooniindeksit tähistab suurus R (dB), mis heli kaudset ülekannet ei arvesta. [23]

Heliisolatsiooniindeks R avaldub katsekehale langeva helivõimsuse ning katsekeha läbinud helivõimsuse suhte kümnekordse hariliku logaritmina [24]

$$R = 10 \lg \left(\frac{W_1}{W_2} \right) \quad (1.8)$$

Tegelik heliisolatsiooniindeks R' (dB) avaldub vastuvõtvasse ruumi kiirguva koguhelivõimsuse W_{tot} ning eraldavale tarindile langeva helivõimsuse W_1 suhte kümnekordse miinuslogaritmina. [24]

$$R' = -10 \lg \left(\frac{W_{\text{tot}}}{W_1} \right) \quad (1.9)$$

Enamasti koosneb vastuvõtvasse ruumi kanduv üldine helivõimsus erinevatest helivõimsustest nagu eraldava ning külgnevate elementide poolt kiiratavad helivõimsused ja muudest komponentidest. R' (dB) leitakse üldjuhul mõõdistustulemuste põhjal järgneva valemi abil: [24]

$$R' = L_1 - L_2 + \left(10 \lg \frac{S_s}{A} \right) \quad (1.10)$$

kus L_1 – keskmine helirõhutase lähteruumis, dB; L_2 – keskmine helirõhutase vastuvõtvas ruumis, dB; S_s – eraldava elemendi pindala, m²; A – ekvivalente helineeldumispind vastuvõtvas ruumis, m².

Ühearvulised nn kaalutud suurused R'_w ja R_w vastavalt hoone või elemendi heliisolatsiooni toimivuse hindamiseks saadakse mõõtetulemuste põhjal õhuheli normväärtuste graafiku abil standardis EN ISO 717-1 kirjeldatud viisil. [25]

Standarditud helitasemete vahe D_{nT} on ajas ja ruumis keskmistatud helirõhutasemete vahe kahe ruumi vahel, mis on tekitatud ühe või mitme heliallika poolt ühes neist ning viidud vastavusse normatiivse järelkõlakesusega vastuvõtvas ruumis. D_{nT} leitakse järgneva valemiga: [24]

$$D_{nT} = L_1 - L_2 + 10 \lg \frac{T}{T_0} \quad (1.11)$$

kus T – järelkõlakesus vastuvõtvas ruumis, s ning T_0 – järelkõlakesuse normatiivväärtus, milleks eluhoonete puhul on 0,5 s.

Järelkõlakesus T (s) on leitav Sabine'i valemi abil

$$T = \frac{0,163V}{A} \quad (1.12)$$

kus V – vaadeldava ruumi ruumala, m³ ja A – ekvivalente helineeldumispind vaadeldavas ruumis, m².

Taandatud helitasemete vahe D_n on ajas ja ruumis keskmistatud helirõhutasemete vahe kahe ruumi vahel, mis on tekitatud ühe või mitme heliallika poolt ühes nendest ruumidest ning viidud vastavusse normatiivse ekvivalentse helineeldumispinnaga vastuvõtvas ruumis. Leitakse mõõdistustulemuste põhjal järgneva valemi abil: [24]

$$D_n = L_1 - L_2 - 10 \log \frac{A}{A_0} \quad (1.13)$$

kus A_0 – normatiivne neeldumispind, milleks on eluhoonete puhul 10 m^2 .

Helitasemete vahed on tegeliku heliisolatsiooniindeksiga seotud järgnevalt: [24]

$$D_n = R' + \left(10 \log \frac{A_0}{S_s} \right) = R' + \left(10 \log \frac{10}{S_s} \right) \quad (1.14)$$

$$D_{nT} = R' + 10 \log \frac{0,16V}{T_0 S_s} = R' + 10 \log \frac{0,32V}{S_s} \quad (1.15)$$

kus V on vastuvõtva ruumi kubatuur, m^3 .

Kaalutud standarditud helitasemete vahe $D_{nT,w}$ ühenumbiline hoone toimivust näitav väärtus (dB) saadakse graafiku nihutamisel standardkõvera ümbruses vastavalt standardis EN ISO 717-1 toodud meetodile. [25]

1.4.2 Löögimüra isolatsioon

Hoone ruumidevahelist löögiheliisolatsiooni on võimalik kirjeldada kahe 1/3 oktaavribades või oktaavribades määratud suuruste L'_n või L'_{nT} abil, mis määratakse vastavalt standardile ISO 16283 -2. [26]

Löögiheli taandatud rõhutase L'_n – suurus detsibellides, mis väljendab löögiheli rõhutaset vastavalt vastuvõtva ruumi normatiivsele ekvivalentsele neeldumispinnale. [26]

$$L'_n = L_i + 10 \log \left(\frac{A}{A_0} \right) \quad (1.16)$$

kus L_i – vastuvõtvas ruumis mõõdetud löögiheli rõhutase, dB,

A – vastuvõtvas ruumis mõõdetud ekvivalentne neeldumispind, m^2 ,

A_0 – normatiivne ekvivalentne neeldumispind, mis elumajade puhul võetakse 10 m^2 .

Löögiheli standarditud rõhutase L'_{nT} on seevastu leitav vastavalt järelkõlakestuse normatiivväärtusele vastuvõtvas ruumis ja saadav vastavalt valemile [26]

$$L'_{nT} = L_i - 10 \log \left(\frac{T}{T_0} \right) \quad (1.17)$$

kus T – järelkõlakestus vastuvõttavas ruumis, s ning T_0 – järelkõlakestuse normatiivväärtus, mis elumajade puhul võetakse 0,5 s.

Löögiheli taandatud rõhutaseme ning standarditud rõhutaseme vaheline seos on toodud standardis EVS-EN 12354-2:2017. [26]

$$L'_{nT} = L'_n - 10 \log \left(\frac{C_{sab} V}{A_0 T_0} \right) = L'_n - 10 \log 0,032 V \quad (1.18)$$

kus V – vastuvõtvaruumi kubatuur, m^3 ja C_{sab} – Sabine'i koefitsient, $C_{sab} = 0,16 \text{ s/m}$.

Sagedusribades määratud suuruste alusel leitakse standardis EN ISO 717-2:2013 kirjeldatud viisil hoone löögiheliisolatsiooni kirjeldav ühenumbiline kaalutud väärtus, mis tähistatakse vastavalt kas $L'_{n,w}$ või $L'_{nT,w}$. [26]

1.4.3 Spektrilähendustegurid

Kui õhumüraallika sagedusjaotus erineb oluliselt kõne sagedusjaotusest ei pruugi ühe arvuna väljendatav õhumüraisolatsiooni indeks olla piisavalt hea, mistõttu kasutatakse teatud juhtudel erinevaid spektrilähendustegureid. Spektrilähendustegurite arvutamine on toodud standardis ISO 717-1. [3]

Löögimürataseme indeksi korrigeerimiseks kasutatakse spektrilähendustegurit C_1 ning $C_{1,50-2500}$ kuna kõndimise ja löögimüra masina tekitatud helirõhutasemete sagedusjaotused ning tugevused erinevad olulisel määral teineteisest. Vastavad spektrilähendustegurite arvutamiseks vajalikud avaldised on toodud standardis ISO 717.2. [3]

1.5 Eluhoonete vahelagedele kehtivad heliisolatsiooni nõuded olulisemates eksportiikides

Eesti puitmajatootjate põhilisteks sihtturgudeks 2017. aastal oli statistikaameti andmetel Norra ja Rootsi, kuhu eksporditi üle poole kogutoodangust. Neile järgnesid Saksamaa 17% ning märkimist väärivad ka Holland, Soome, Suurbritannia ning Prantsusmaa, mille osakaal eesti puitmajatoodete ekspordi osas jäi kõigil 6 – 7% vahemikku. [27]

Suuremate puitkarkassmoodulhoonete tootjate põhiosa toodangust eksporditakse samuti põhjamaadesse – Norra, Rootsi ja vähemal määral ka Soome. Samuti võib eksportriikide hulgast leida Taani ning Islandi, mille turuosa ülejäänutest on tunduvalt väiksem. [28] [27] Huvipakkuvateks sihtturgudeks on ka kõik teised eelnevalt mainitud Euroopa riigid, eelkõige aga Suurbritannia ja Saksamaa, mis omavad moodulite transportimise kohapealt soodsat geograafilist asukohta ning on ühtlasi ühed suurima rahvaarvuga riike Euroopas [29] .

Järgnevalt uuritakse eluhoonete kortereid eraldavatele vahelagedele kehtivaid heliisolatsiooninõudeid Eestis ning peamiste puitkarkassmoodulhoonete eksportriikide ja huvipakkuvate võimalike uute sihtturgude lõikes.

1.5.1 Õhuheli isolatsiooninõuded

Eestis on hoonetele ja hoone osadele esitatavad minimaalsed heliisolatsiooninõuded normitud standardiga EVS 842:2003 „Ehitiste heliisolatsiooninõuded. Kaitse müra eest“, mille kohaselt korterite eluruumide ning korterite ning üldkasutatavate ruumide ja bürooruumide vaheliste tarindite kaalutud tegeliku heliisolatsiooniindeksi väärtuseks peab olema $R'_w \geq 55$ dB. [23]

Norras on heliisolatsiooninõuded määratletud standardis NS 8175:2012 „Acoustic conditions in buildings. Sound classification of various types of buildings“. Mainitud dokumendis on heliisolatsiooni nõuded jagatud nelja kvaliteediklassi – A, B, C ja D, millest A tähistab kõrgeimat ning D madalaimat klassi. Klass C tähistab uue hoone miinimumnõuet. Heliklasse kirjeldatakse standardis järgnevalt: [30]

Klass A – Tagab eriti head akustilised tingimused, milles inimesed on harva helidest ning mürast häiritud.

Klass B – Tagab väga head heli isoleerivad tingimused. Teatud määral võib esineda häiringut helidest ja mürast.

Klass C – Tagab rahuldavad tingimused enamikele ruumis viibijatele.

Klass D – Tagab tingimused, milles suurem osa inimesi on tõenäoliselt mürast ja helidest häiritud.

Tabel 1.2 Eluhoone eluruumidevahelistele tarinditele kehtivad õhuheli isolatsiooninõuded (dB) vastavalt kvaliteedi klassidele [30]

	Klass A	Klass B	Klass C	Klass D
$R'_w + C_{50-5000}$	63	58	-	-
R'_w	-	-	55	50

Rootsis kehtivaid eluhoonetele esitatavaid heliisolatsiooninõudeid käsitletakse standardis SS 25267:2015 „Acoustics – Sound classification of spaces in buildings – Dwellings“. Sarnaselt Norra standardile on ka rootsi standardis jagatud heliisolatsiooni nõuded nelja kvaliteediklassi, millest A tähistab kõrgemat klassi. Klasse A, B ja D on käsitletud standardis SS 25267:2015. Klassi C, mis tagab rahuldavad tingimused enamikule elanikest ja on ühtlasi miinimumnõuetele vastav heliklass uute hoonete puhul käsitletakse eraldi dokumendis „Boverkets byggregler – föreskrifter och allmänna råd, BBR“ [31] [32]

Tabel 1.3 Eluhoone eluruumidevahelistele tarinditele kehtivad õhuheli isolatsiooninõuded (dB) vastavalt kvaliteedi klassidele [31] [32]

	Klass A	Klass B	Klass C	Klass D
$D_{nT,w,50}$	60	56	52	-
$D_{nT,w,100}$	-	-	-	48

$$D_{nT,w,50} = D_{nT,w} + C_{50-3150} \text{ [32]}$$

Soomes on heliisolatsiooninõuded hoonetes määratud standardiga SFS 5907 „Acoustic classification of spaces in buildings“. Standardijärgselt on hooned jagatud samuti nelja heliklassi – A, B, C ning D, millest A tähistab kõrgeimat ning D madalaimat klassi. Klass C esindab miinimumnõudeid uute hoonete puhul. [33] Ühtlasi on uutele hoonetele kehtivad minimaalsed heliisolatsiooni nõuded sätestatud Soome keskkonnaministri määrmuses nr. 796/2017 [34]

Tabel 1.4 Eluhoone korterivahelisele tarindile kehtivad õhuheli isolatsiooninõuded (dB) vastavalt standardile SFS 5907 ning Soome keskkonnaministri määrusele 796/2017 [33] [34]

	Klass A	Klass B	Klass C	Klass D
$R'_w + C_{50-3150}$	63	58	-	-
R'_w	-	-	55	49
$D_{nT,w}$	-	-	55	-

Saksamaal on heliisolatsiooni miinimumnõuded sätestatud standardis DIN 4109-1 „Sound insulation in buildings – Part 1: Minimum requirements“. Lisaks on Saksa Inseneride Ühenduse VDI poolt koostatud VDI standard: VDI 4100:2012-10 „Schallschutz im Hochbau – Wohnungen – Beurteilung und Vorschläge für erhöhten Schallschutz“, mis käsitleb miinimumnõuetest kõrgema tasemega heliisolatsiooni klasse. [35]

VDI 4100 eristatakse kolme heliisolatsiooni klassi:

SSt I – Miinimumnõudeid on tõstetud 3dB võrra. Naabrite vali kõne on raskesti arusaadav.

SSt II – Vastab keskmisele mugavustasemele. Naabrite vali kõne on kuulda, kuid ei ole üldiselt arusaadav.

SSt III – Tagab kõrgeima mugavustaseme. Välised helid on vaevu märgatavad. Valju häälega kõne naaberkorterist ei ole arusaadav. [36]

Tabel 1.5 Korterimaja korterivahelisele vahelaele kehtivad õhuheli isolatsiooninõuded (dB) vastavalt DIN 4109 ja VDI 4100 [36]

	Min	SSt I	SSt II	SSt III
R_w	54	-	-	-
$D_{nT,w}$	-	56	59	64

Suurbritannias puudub ühtne regulatsioon heliisolatsiooni nõuetele eluhoonetes. Briti standardi BS 8233:2014 kohaselt on heliisolatsioon eluhoonetes reguleeritud erinevate piirkondade ehitusmäärustele vastavalt. [37]

Tabel 1.6 Suurbritannias eluhoone vahelaele kehtivad õhuheli isolatsiooninõuded (dB) vastavalt eri piirkondade ehitusmäärustele [37] [38] [39] [40]

Piirkond	Indikaator	Miimumnõue
Inglismaa, Wales, Põhja-Iirimaa	$D_{nT,w} + C_{tr}$	45
Šotimaa	$D_{nT,w}$	56

1.5.2 Löögheli isolatsiooninõuded

Eestis on korteritevahelise heliisolatsiooni miimumnõudeks löögimüra puhul vastavalt standardile EVS 842:2003 löögiheli kaalutud taandatud rõhutaseme väärtus $L_{n,w} \geq 53$ dB, kusjuures nõue ei laiene löögimüra eest kaitstava korteri vannitoale, WC-le jmt ruumidele. Samuti kehtestab mainitud määrus miimumnõuded korterisisesele eluruumidevahelisele vahelaele, juhul kui korter on läbi mitme korruse. Sel juhul kehtib nõue löögimüra isolatsioonile ülevalt alla ning selle väärtuseks on $L_{n,w} \geq 63$ dB. [23]

Norras standardijärgselt kehtestatud löögiheli kaalutud taandatud rõhutaseme maksimumväärtused korteritevahelisele vahelaele vastavalt heliklassidele on toodud alljärgnevas tabelis. Kõrgemate heliklasside puhul tuleb arvesse võtta ka sagedusi alla 100 Hz. [30]

Tabel 1.7 Eluhoone vahelagedele kehtivad löögiheli isolatsiooninõuded (dB) Norras [30]

	Klass A	Klass B	Klass C	Klass D
$L_{n,w} + C_{1,50-2500}$	43	48	-	-
$L_{n,w}$	-	-	53	58

Rootsis kehtivad löögimürataseme indeksi väärtused vastavalt standardile SS 25267 ning eelnevalt mainitud dokumendile BBR on esitatud järgnevas tabelis:

Tabel 1.8 Korterteivahelisele vahelaele kehtivad löögiheli isolatsiooninõuded (dB) Rootsis [31] [32] [41]

	Klass A	Klass B	Klass C	Klass D
$L'_{nT,w} + C_{1,50-2500}$	48	52	56	-
$L'_{nT,w}$	-	-	-	60

Soome standardis SFS 5907 ning keskkonnaministri määruses nr. 796/2017 toodud korterivahelised maksimumväärtused löögiheli kaalutud taandatud rõhutaseme ning löögiheli kaalutud taandatud rõhutaseme ja spektrilähendusteguri summa väärtused vastavalt heliklassidele on esitatud allpool. Ühtlasi on standardis märgitud, et spektrilähendustegurit $C_{1,50-2500}$ on soovitatav rakendada ka heliklassi C puhul. Öeldud on ka, et nõuded ei laiene tehnilistele ning ladustamis-, märgadele ning muudele taolistele ruumidele, mida kasutatakse aeg ajalt. [33] [34]

Tabel 1.9 Korterteivahelisele vahelaele kehtivad löögiheli isolatsiooninõuded (dB) Soomes [33] [34]

	Klass A	Klass B	Klass C	Klass D
$L'_{n,w} + C_{1,50-2500}$	43	49	-	-
$L'_{n,w}$	-	-	53	63
$L'_{nT,w} + C_{1,50-2500}$	-	-	53	-

Saksa standardis DIN 4109 toodud maksimaalsed väärtused indeksile $L'_{n,w}$ ning VDI 4100 toodud nõuded $L'_{nT,w}$ väärtusele vastavalt heliisolatsiooni klassidele on esitatud alljärgnevas tabelis. Saksa standardites esitatakse korterelamutele ning paaris- ja ridaelamutele erinevad nõuded, kusjuures kortermajade nõuded on leebemad. Käesolevas töös vaatleme ainult kortermajadele esitatud nõudeid. [35] [36]

Tabel 1.10 Saksamaal kehtivad korterteivahelisele vahelaele kehtivad löögiheli isolatsiooninõuded (dB) [35] [36]

	Min	SSt I	SSt II	SSt III
$L'_{n,w}$	50	-	-	-
$L'_{nT,w}$	-	51	44	37

Suurbritannias eri piirkondade ehitusmäärustega kehtestatud maksimaalväärtused löögiheli kaalutud standarditud rõhutasemetele on toodud alljärgnevas tabelis:

Tabel 1.11 Suurbritannias kehtestatud löögiheli isolatsiooninõuded korterivahelisele vahelaele (dB) [40] [37] [38] [39]

Piirkond	Indikaator	Miimumnõue (maks. väärtus)
Inglismaa, Wales, Põhja-Iirimaa	$L'_{nT,w}$	62
Šotimaa	$L'_{nT,w}$	56

1.5.3 Eri riikides kehtivate heliisolatsiooninõuete võrreldavus

Käsitletud riikides kehtestatud õhuheli isolatsiooninõudeid on defineeritud riigiti erineval moel. Enamuses on kasutusel lisaks miimumnõuetele ka erinevad heliisolatsiooni kvaliteediklassid. Eraldi heliisolatsiooni kvaliteedi klasse ei ole määratletud vaid Eesti ning Suurbritannia normdokumentides.

Numbriliste väärtuse võrdlemise teeb keeruliseks asjaolu, et kasutatud indikaatorid on riigiti erinevad ning nende võrreldavaks muutmiseks on vajalik eelnevalt teisendada ühisele näitajale.

Kaalutud tegelik heliisolatsiooniindeksi R'_w ja kaalutud standarditud helirõhutasemete vahe $D_{nT,w}$ (dB) vahelist seost iseloomustab järgmine valem [35]

$$D_{nT,w} = R'_w - 10 \log \frac{3,1m}{l} \quad (1.19)$$

kus l – eraldava elemendi pindalaga risti olev ruumi mõõt, m.

Valemist on näha, et eraldava pinnaga risti oleva ruumi mõõdu $l=3,1$ m korral oleks $D_{nT,w}$ ja R'_w väärtused võrdsed.

Sarnane seos on olemas suuruste $L'_{n,w}$ ja $L'_{nT,w}$ vahel [35]

$$L'_{nT,w} = L'_{n,w} - 10 \log \frac{V}{m^3} + 15 \quad (1.20)$$

kus V – vastuvõtva ruumi kubatuur, m^3 .

Teisendustes kasutame ruumi parameetreid $l=2,5$ m ja $V=38$ m^3 kuna põranda puhul on l ruumi kõrgus ning kubatuur on valitud toa pindala järgi 15 m^2 .

COST Action TU0901 on toodud soovituslikud indikaatorid $D_{nT,50}$ ja $L'_{nT,50}$, mis võiks olla ühtselt kasutusel õhuheli isolatsiooni ja löögiheli isolatsiooni kirjeldava näitajana kõigis Euroopa riikides. Mainitud dokumendis tuuakse välja ka teoreetilisi-empüürlisi seoseid erinevate heliisolatsiooni

kirjeldavate suuruste vahel, mille abil oleks võimalik igal riigil oma nõuded uuele ühisele indikaatorile ümber teisendada. [42]

Tabel 1.12 Teoreetilised ja empiirilised seosed erinevate heliisolatsiooni kirjeldavate suuruste vahel

Heliisolatsiooni kirjeldav suurus, dB	Teisendus suurusele $D_{nT,50}$ või $L_{nT,50}$, dB
$R_w \geq X$	$D_{nT,50} \geq X - 1,0 + (5,2 - 0,12R_w)$
$D_{nT,w} \geq X$	$D_{nT,50} \geq X + 5,2 - 0,12(D_{nT,w} + 1,0)$
$D_{nT,A100} \geq X$	$D_{nT,50} \geq X + 1 + 5,2 - 0,12(D_{nT,A100} + 2,0)$
$D_{nT,Atr100} \geq X$	$D_{nT,50} \geq X + 5 + 5,2 - 0,12(D_{nT,Atr100} + 6,0)$
$L_{n,w} \leq X$	$L_{nT,50} \leq X - 2,3 + (30,0 - 0,51L_{n,w})$
$L_{nT,w} \leq X$	$L_{nT,50} \leq X + 30,0 - 0,51(L_{nT,w} + 2,3)$
$L_{nT,A100} \leq X$	$L_{nT,50} \leq X$

Erinevad indikaatorid lahti kirjutatuna:

$$D_{nT,w,50} = D_{nT,w} + C_{50-3150} \text{ [32]}; D_{nT,50} = D_{nT,w} + C_{50-3150} \text{ [42]}$$

$$D_{nT,A100} = D_{nT,w} + C \text{ [42]}; D_{nT,A} \approx D_{nT,w} + C \text{ [42]}$$

$$D_{nT,Atr100} = D_{nT,w} + C_{tr} \text{ [42]}$$

$$L_{nT,w,50} = L_{nT,w} + C_{I,50-2500} \text{ [32]}; L_{nT,50} = L_{nT,w} + C_{I,50-2500} \text{ [42]}$$

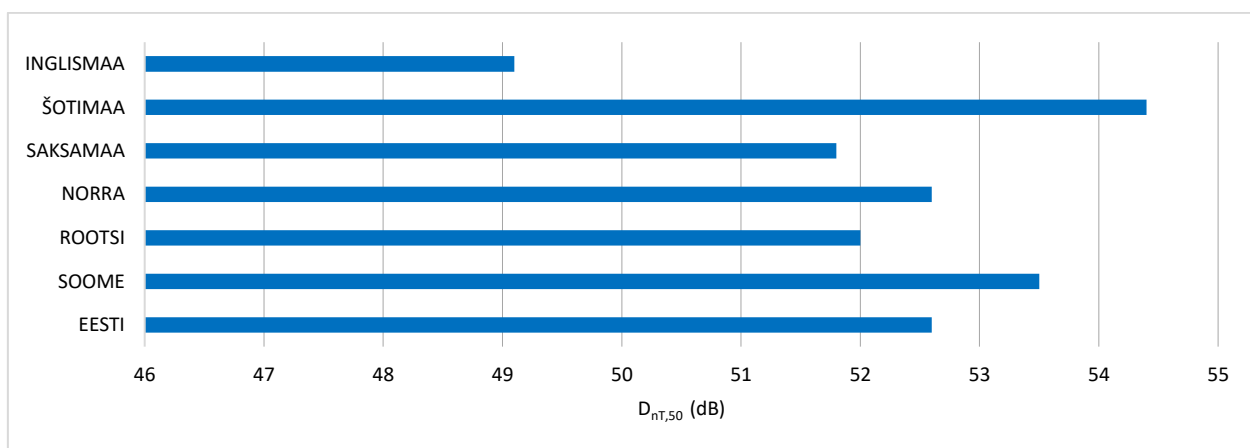
$$L_{nT,A100} = L_{nT,w} + C_I \text{ [42]}$$

Tabel 1.13 Eri maades korteritevahelisele vahelaale kehtestatud õhuheli isolatsiooni miinimumnõuded ja nende teisendused. Ümardus on tehtud arvestusega, et nõue oleks rangem

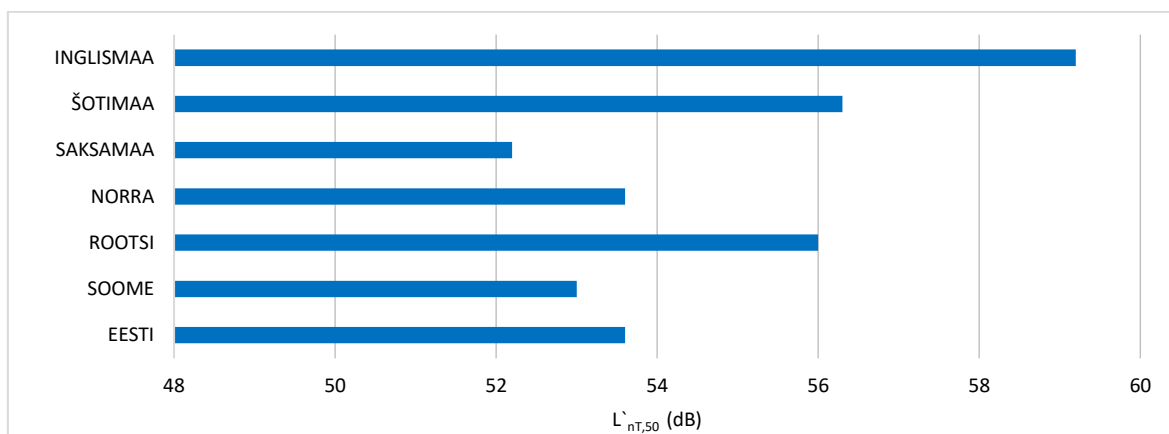
	Min. nõude indikaator	Min. nõude suurus, dB	Teisendus R_w , dB	Teisendus $D_{nT,w}$, dB	Teisendus $D_{nT,50}$, dB
Eesti	R_w	55	55	55 (54,1)	53 (52,6)
Soome	R_w	55	55	55 (54,1)	53 (52,6)
	$D_{nT,w}$	55	56 (55,9)	55	54 (53,5)
Rootsi	$D_{nT,w} + C_{50-3150}$	52	-	-	52
Norra	R_w	55	55	55 (54,1)	53 (52,6)
Saksamaa	R_w	54	54	54 (53,1)	52 (51,7)
Šotimaa	$D_{nT,w}$	56	57 (56,9)	56	55 (54,4)
Inglismaa, Wales, Põhja Iirimaa	$D_{nT,w} + C_{tr}$	45	-	-	50 (49,1)

Tabel 1.14 Eri riikides korteritevahelisele vahelaale kehtestatud löögimüra isolatsiooninõude maksimaalväärtused. Ümardus on tehtud arvestusega, et nõue oleks rangem

	Min nõude indikaator	Min. nõude suurus, dB	Teisendus $L'_{n,w}$, dB	Teisendus $L'_{nT,w}$, dB	Teisendus $L'_{nT,50}$, dB
Eesti	$L'_{n,w}$	53	53	52 (52,2)	53 (53,7)
Soome	$L'_{n,w}$	53	53	52 (52,2)	53 (53,7)
	$L'_{nT,w} + C_{I,50-2500}$	53	-	-	53
Rootsi	$L'_{nT,w} + C_{I,50-2500}$	56	-	-	56
Norra	$L'_{n,w}$	53	53	52 (52,2)	53 (53,7)
Saksamaa	$L'_{n,w}$	50	50	49 (49,2)	52 (52,2)
Šotimaa	$L'_{nT,w}$	56	55 (55,2)	56	56 (56,3)
Inglismaa, Wales, Põhja Iirimaa	$L'_{nT,w}$	62	62 (62,7)	62	59 (59,2)



Joonis 1.3 Eluhoonete korterivahelistele vahelagede õhuheli isolatsiooninõuete miinimumnõuete võrdlus eri riikides.



Joonis 1.4 Eluhoonetes eri riikides korterite vahelaale kehtivate löögiheli isolatsiooninõuete võrdlus

2 VAHELAGEDE HELIPIDAVUSE MÕÕTMINE

2.1 Mõõdistuse üldpõhimõtted

2.1.1 Õhumüra isolatsiooni mõõdistus

Õhuheli isolatsiooni mõõtmisel kasutatakse müratekitajana kahte samatüübilist kõlarit või ühte kõlarit vähemalt kahel erineval positsioonil. Kõlari asukoha minimaalne kaugus külgnestest tarinditest peab olema vähemalt 0,5 m ning ühtlasi ei tohi kõlar lähteruumi vastuvõtvas ruumist eraldavale tarindile olla lähemal kui 1 m. Kõlari kaks positsiooni ei tohi paikneda üksteisele lähemal kui 1,4 m ning samuti ei tohi 2 positsiooni paikneda paralleelselt piirdetarindiga, kui kaugus tarindist jääb alla 0,7 m. [43]

Heli mõõdistamiseks vastuvõtvas ruumis võib kasutada fikseeritud mikrofoni, mehaaniliselt liikuvat mikrofoni või käsitsi skaneerimist. Mikrofone positsioonide valikul tuleb jätta tarindi ning mikrofone vahele vähemalt 0,5 m ning kahe fikseeritud positsiooni vahel peab jääma minimaalselt 0,7 m. Mikrofon ei tohi paikneda kõlarile lähemal kui 1,0 m. [43]

Mõõdistatakse helirõhutasemed nii lähteruumis kui vastuvõtvas ruumis ning ühtlasi ka taustmüra helirõhutasemed standardi EVS-EN ISO 16283-1:2014 kohaselt. Heli allika ning taustmüra kombineeritud mõõdistatud helirõhutaseme ning taustmüra helirõhu tasemete vahe peaks olema vähemalt 6 dB igas sagedusribas. Kui nende tasemete vahe jääb 6 – 10 dB piiridesse, arvutatakse helirõhutasemete parandused vastavalt [43]

$$L = 10 \lg \left(10^{\frac{L_{sb}}{10}} - 10^{\frac{L_b}{10}} \right) \quad (2.1)$$

kus, L – korrigeeritud heli tase, dB,

L_{sb} – mõõdetud heli allika ja taustmüra kombineeritud helirõhutase, dB,

L_b – mõõdetud taustmüra helirõhutase, dB.

Kui mainitud helirõhutasemete vahe on mõnes sagedusribas 6 dB või vähem, tuleb kasutada 1,3 dB parandustegurit. [43]

Iga heli allika positsioonile leitakse standarditud helitasemete vahe või heliisolatsiooniindeks vastavalt valemitele 1.11 või 1.10 ning saadud tulemuste põhjal leitakse standarditud helitasemete vahe D_{nT} või tegelik heliisolatsiooniindeks R' valemitega 2.2 või 2.3 [43]

$$D_{nT} = -10 \lg \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m 10^{\frac{-D_{nT,j}}{10}} \quad (2.2)$$

$$R' = -10 \lg \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m 10^{\frac{-R_j}{10}} \quad (2.3)$$

kus, m – kõlari positsioonide arv,

$D_{nT,j}$ – standarditud tasemete vahe kõlaripositsioonil j , dB,

R'_j – heliisolatsiooni indeks kõlaripositsioonil j , dB.

Täpsemalt on õhuheliisolatsiooni mõõtmisest võimalik lugeda standardist EVS-EN ISO 16283-1:2014.

2.1.2 Löögimüra isolatsiooni mõõdistus

Löögiheli isolatsiooni hindamiseks hoonetes kasutatakse löögiheli tekitamisel standardikohast löögimüramasinat, milles on viis poole kilo raskust vasarat paigutatud ühte ritta tsentraalsete vahekaugustega 100 mm ning mis kukuvad põrandale 40 mm kõrguselt. Standarditud on nii haamrite mõõdud, nende kukkumise kiirus, suund ning sagedus. Löögimasina kaal ei tohi ületada 25 kg, et mitte liigselt koormata kergkonstruktsioonis hoone põrandatarindeid ning põrandakatteid. [44]

Löögimüra masin paigutatakse heli lähtruumi põrandale põranda talade suunaga 45 kraadise nurga alla. Olenevalt ruumi põrandapindalast kasutatakse vähemalt nelja paiknemispositsiooni, mille vahel ei ole korrapärast seost. Löögimasina minimaalne kaugus piirnevatest tarinditest peab jääma vähemalt 0,5 m kaugusele. [44]

Veendumaks, et heliallika poolt tekitatud helitase vastuvõtvas ruumis ei oleks taustamürast mõjutatud, mõõdetakse taustamüra helirõhutasemeid. Sõltuvalt taustamüra helirõhutaseme ning taustamüra ning heliallika poolt koos tekitatud helirõhutasemete vahe suurusest arvutatakse helirõhutasemete korrigeeritud väärtused vastavalt standardis EVS-EN ISO 16283-2:2018 toodud juhiste. [44]

Eraldava tarindi pindala jäämisel alla 50 m² mõõdetakse löögimüramasina tekitatud heli vastuvõtvas ruumis fikseeritud mikrofoni asukohti kasutades või mikrofoni käsitsi skanneerides vähemalt sama arv positsioonidelt iga löögimüramasina asukoha kohta. N positsioonilt saadud helirõhutasemed ruumis keskmistatakse standardis toodud alljärgnevat valemit kasutades [44]

$$L_i = 10 \log \left(\frac{\frac{L_1}{10^{\frac{10}{10}}} + \frac{L_2}{10^{\frac{10}{10}}} + \dots + \frac{L_n}{10^{\frac{10}{10}}}}{n} \right) \quad (2.4)$$

kus $L_1, L_2, \dots, L_n$ on n eri mõõtmispunktides mõõdetud keskmised helirõhutasemed, dB.

Tekkiv helirõhutase ruumis sõltub vastava ruumi ekvivalentsest helineeldumispinnast A (m^2), mille määramiseks on vajalik mõõta ruumi kubatuur V (m^3) ning järelkõlakestus T (s). Taandatud lööghelitasemed eri sagedustel leitakse seejärel valemiga 1.16.

2.2 Mõõdistused tehasetingimustes

2.2.1 Testmooduli kirjeldus

Moodulite korrustevahelise materjali ning erinevate kinnitustüüpide mõju vahelagede heliisolatsioonile testiti tehasetingimustes nelja identse ruumilahendusega mooduli abil, millest moodustati kaks kahekorruselist torni. Testmooduli laius 3878 mm, pikkus 9352 mm ning kõrgus 3044 mm. Mooduli lühemates külgedes on välisseinad ning pikemates külgedes kandvad seinad 95 mm puitkarkassil, mis hoone kokkupanekul ehitusplatsil moodustavad koos kõrvalmooduli kandva seinaga korteritevahelise seina. Mooduli ühes otsaseinas on korteri välisuks, teises otsaseinas on aken ning rõduuks.



Joonis 2.1 Tehasemõõdistuse olukord. Vasakpoolne TT1, parempoolne TT2

Moodul on jaotatud neljaks ruumiks. Mõõdistused viikase läbi suurimas, 15,3 m² pindalaga ruumis, mille kõrgus on 2500 mm ning mille välisseinas on rõduuks ning aken. TT1 ülemise mooduli ruumi kubatuur on 36,7 m³ ning alumise mooduli kubatuur on 38,2 m³. Erinevus on tingitud asjaolust, et alumise korruse moodulil puudusid ventilatsioonikastid. TT2 kubatuurid olid vastavalt ülemisel 38,2 m³ ning alumisel 38,0 m³.

Kandvad külgmised seinad on ehitatud 45x95 mm puitkarkassil sammuga 600 mm. Karkassi vahel 100 mm kivivill ning ruumipoolses pinnas kaks kipsplaadi kihti, mille paksused ruumi poolt vaadates on 15 mm ja 13 mm.

Välisseinad on 45x220 mm karkassil, mille vahel 220 mm kivivill. Välispinnas 13 mm tuuletõkkekips, roov ning fassaadilaudis, sisepinnas 15 mm vineer ning 13 mm kipsplaat.

Moodulite laed on ehitatud 45x145 mm puitkarkassist sammuga 1200 mm. Karkassi vahel on paigaldatud 100 mm kivivill, perimeetris on kivivill 150 mm. Karkassi küljes on 28 mm puitroov, millele on kinnitatud 15 mm tuletõkkekipsplaat ning sellele omakorda 11 mm puidupõhine viimistlusplaat.

Ülemiste korruste moodulite põhjatarindid on 45x220 mm puitkarkassil sammuga 600 mm. Karkassi vahe täidetud esimese testtorni TT1 puhul kivivillaga, mis toetub geotekstiili peale. TT2 on põhjakarkassis vill ainult perimeetris 400 mm ulatuses. Karkassi peale paigaldatud 22 mm PLP plaat, mille peale paigaldatud parketi alusvaip ning parkett.

2.2.2 Kasutatud mõõteriistad ja mõõtemääramatus.

Mõõtmised ja arvutused teostati normatiivdokumentide EVS-EN-ISO 16283-1/-2 ja EVS-EN ISO 717-1/-2 alusel alljärgnevas tabelis esitatud mõõteseadmetega. Mõõdistused nii tehases kui objektil teostati Kajaja Acoustics OÜ poolt. Osaliselt kasutati Tallinna Tehnikaülikooli mõõtmeseadmeid.

Tabel 2.1 Tehase ja objektimõõdistusel kasutatud mõõteseadmed

Seade	Tüüp	Tehase tähis	Kalibreerimise kuupäev
Müramöödik	Brüel & Kjær 2270/G4	3024730	30.08.2018
Mikrofon	Brüel & Kjær	3147980	30.08.2018
Kalibraator	Brüel & Kjær	3022014	30.08.2018
Kõlar	NTi Audio DS3 Dodecahedron Loudspeaker	D-1073-A3	04.03.2019
Löögimüramasin	NTi Audio Tapping Machine TM3	TP02238	30.10.2018
Mürageneraator	NTi Audio PA3 Power Amplifier	1169	

Vastavalt mõõdistusi läbiviinud ettevõtte andmetele on mõõtemääramatused Standardi EVS-EN ISO 12999-1:2014 kirjeldatud olukorrale A leitud kaalutud tegeliku heliisolatsiooniindeksi R'_w mõõtmistulemuste laiendmääramatus ± 2 dB ning löögiheli kaalutud taandatud rõhutaseme $L'_{n,w}$ mõõtmistulemuste laiendmääramatus on ± 2 dB. Sama standardi põhisel olukorrale C, mille puhul mõõdistused viiakse läbi sama mõõdistaja poolt, samas asukohas ning samade seadmetega on standardmõõtemääramatus ISO 717-1 põhjal määratud ühenumbriliste suuruste R_w , R'_w ja $D_{nT,w}$ puhul $\pm 0,4$ dB ning spektrilähendusteguri $C_{50-3150}$ lisandumisel $\pm 0,6$ dB. ISO 717-2 põhjal määratud ühenumbriliste suuruste $L'_{n,w}$ ja $L'_{nT,w}$ puhul on olukorrale C vastav standardne mõõtemääramatus $\pm 0,5$ dB. [45]

2.2.3 Katsetatavad materjalid ja kinnitustüübid

Ülemise ja alumise korruse vahel katsetati 3 eri tüüpi vibratsiooni isolatsiooni materjali ning kaht tüüpi kinnituslahendust ülemise ja alumise korruse moodulite omavaheliseks sidumiseks erinevates kombinatsioonides. Lisaks katsetati olukorda, kus ülemise ja alumise korruse moodulite vaheline vibratsiooni isolatsiooni materjal puudus ning moodulid ei olnud omavahel kinnitatud.

Tabel 2.2 Tehasemõõdistusel katsetatavad korrustevahelised materjalid ja nende iseloomulikud parameetrid

Katsetatav materjal	Kasutamiseks määratud koormusvahemik, N/mm ²	Paksus, mm	Vertikaalsuunaline deformatsioon maksimaalse koormuse all, mm
Materjal 1	Kuni 23,0	15	3,5
Materjal 2	0,22 – 0,45	25	4,5
Materjal 3	Pole teada	20	>5

Esimeseks katsetatavaks vahematerjaliks on Saksamaal valmistatud toode, mis koosneb üksteise peale liimitud kartonglainepapi kihtidest, mille õhukanalid on täidetud kuiva peene kvartsliivaga ning ääred suletud vee- ning õhutiheda teibiga. Toote tööpõhimõte on konstruktsioonis leviva vibratsiooni muundamine kuivas liivas liivaosakeste kineetiliseks energiaks vähendades seeläbi vibratsioonide kandumist külgnevasse elementi. Materjal on 15 mm paksune ning suure koormustaluvusega – seda on katsetatud kuni 526 kN testkoormuse all. [46] Materjali testiti kahes osas – kasutades seda jätkuva ribana terves mooduli perimeetris ning vähendades materjali poole võrra suurendades seeläbi materjali pinnaühikule langevat koormust.

Teise tootena katseti polüuretaanist valmistatud vibratsiooni summutavat materjali, mille paksus on 25 mm ning pikkus ja laius vastavalt 100 mm ja 145 mm. Materjalid paigaldati moodulite vahele

600 mm sammuga ning nende vahed täidetakse kivivillaribadega. Katsetatava materjali tootelehe kohaselt on materjali mõeldud kasutamiseks kuni $0,45 \text{ N/mm}^2$ staatilise koormuse piires ning dünaamiliste ja staatiliste koormuste koosarvestuses kuni $0,70 \text{ N/mm}^2$ piires, mille korral toote maksimaalseks deformatsiooniks vertikaalsuunas on 4,5 mm. [47]

Kolmanda materjalina kasutame samuti elastsest polüuretaanist toodet, mis põhiosas, so 90% ulatuses on valmistatud taaskasutatud vahtplastist, millele on lisatud 10% ulatuses uut vahtplasti. See toode on mõeldud kasutamiseks eelkõige mürasummutava kihina ujuvpõrandates ent on leidnud palju kasutust ka korrustevahelise vibratsioonisummutusmaterjalina mooduli perimeetris ülemise ja alumise mooduli kontaktpinnas. Materjali vertikaalsuunaline deformatsioon $0,025 \text{ N/mm}^2$ koormuse juures on ligikaudu 20%. [48] [49] Testis kasutati 20 mm paksuseid ribasid analoogselt kahes osas. Esimesel juhul jätkuva ribana terve mooduli ulatuses ning teisel juhul vähendati toetuspinda 50% võrra.

Kinnitustüüpide kasutati kruvikinnitust $6,5 \times 200 \text{ mm}$ puidukruvidega sammuga 900 mm ning 1800 mm mooduli pikkades külgedes ning naelutusplaatidega kinnitust mooduli neljast nurgast. Ühtlasi mõõdistati kõiki isolatsioonimaterjale ka ilma moodulite omavahelise kinnitusega.

2.2.4 Mõõtmistulemused

Tehases viidi läbi kahe päeva jooksul 48 mõõdistust moodulite korrustevahelise vahelae õhuheli- ning löögheliisolatsiooni väljaselgitamiseks eelnevalt kirjeldatud materjalide ning kinnitustüüpide kombinatsioonides.

Õhu- ja löögheliisolatsiooni mõõdistamisel kasutati kõikide testide puhul ühesuguseid müraallikate ning mikrofoni positsioone, et kõrvaldada võimalikke positsioonidest tulenevaid erinevusi mõõdistustulemustes. Löögheli isolatsiooni mõõtmisel kasutati igal mõõtmisel nelja löögimüraaparaadi positsiooni ning õhumüra mõõdistusel kasutati kahte kõlari positsiooni, mis olid läbi kõikide mõõdistuste samad. Testis kasutatud kõlari, löögimüraaparaadi ning mikrofoni positsioonide asukohad on toodud töö lisades.

Kuna kahe testtorni vahelagi erineb ülemise korruse mooduli põrandakonstruktsiooni villa osas ning samuti vahelae kogupaksuse osas 45 mm võrra ja arvestades asjaolu, et katsetuse ajal ei olnud kõik moodulid identselt ühel valmidustasemel, käsitletakse eri tornide katsetulemusi eraldiseisvalt.

Kahes alljärgnevas tabelis on välja toodud tehases läbiviidud mooduli vahelae löögheli ja õhuheli isolatsiooni mõõdistustulemused. Esimene tabel koondab mõõdistustulemused korrustevahelise

kinnituse puudumisel, kus ülemine moodul oli asetatud lahtiselt alumise mooduli peale, et oleks võimalik vaadelda konkreetset, kas ja millist mõju avaldab korruste vahele paigaldatud materjal vahelae heliisolatsiooni tulemustele. Teises tabelis on kajastatud tulemused katsetelt, milles ülemise ja alumise korruse moodulid olid omavahel kruvidega ühendatud. Tulemuste lahtris " – " tähistab katsetulemuse puudumist. Tulemused on esitatud Rootsis kasutatavate heliisolatsiooni indikaatoreid kasutades, kuna tehasemöödistusel kasutatud moodulid on projekteeritud Rootsi turule.

Tabel 2.3 TT1 ja TT2 vahelae löögiheli isolatsiooni ja õhuheli isolatsiooni möödistuste tulemused katsetatud materjalide lõikes

Test	Koht	Materjal. Paigaldusviis	Koormus materjali pinnaühikule, N/mm ²	$L_{nT,w}$ dB	$L_{nT,w,50}$ dB	$D_{nT,w}$ dB	$D_{nT,w,50}$ dB
A4	TT1	Materjal 1 täisriba	0,011 – 0,019	49	51	58	55
B4	TT1	Materjal 1 -50%	0,023 – 0,046	50	52	58	56
F4	TT1	Materjal 2 Samm 600	0,049 – 0,095	51	52	60	58
C4	TT1	-	-	49	51	57	55
D4	TT2	Materjal 3 Täisriba	0,010 – 0,016	52	53	58	56
E4	TT2	Materjal 3 -50%	0,019 – 0,038	49	51	59	56

Tabel 2.4 TT1 ja TT2 vahelagede löögiheli isolatsiooni ja õhuheli isolatsiooni möödistuste tulemused erinevate materjalide lõikes moodulite omavahelisel kruvimisel

Test	Koht	Materjal. Paigaldusviis	Koormus materjali pinnaühikule, N/mm ²	$L_{nT,w}$ dB	$L_{nT,w,50}$ dB	$D_{nT,w}$ dB	$D_{nT,w,50}$ dB
A1	TT1	Materjal 1 täisriba	0,011 – 0,019	51	52	-	-
B1	TT1	Materjal 1 -50%	0,023 – 0,046	51	53	56	54
F1	TT1	Materjal 2 Samm 600	0,049 – 0,095	53	54	59	57
C1	TT1	-	-	52	53	56	54
D1	TT2	Materjal 3 Täisriba	0,010 – 0,016	52	54	57	54
E1	TT2	Materjal 3 -50%	0,019 – 0,038	52	54	59	55

Nii TT1-s kui TT2-s tehtud mõõdistuste järgi moodulite lahtise asetuse kui kruvitud olukorras ületab kaalutud standarditud helitasemete vahe $D_{nT,w,50} \geq 54$ dB ning $D_{nT,w} \geq 56$ dB, mis ühtlasi tähendab, et katsetatud vahelagi täidab õhuheli isolatsiooninõuded kõikide eelnevas peatükis vaadeldud riikide lõikes. TT1-s katsetatud vahematerjalide mõju kaalutud standarditud helitasemete vahe ühenumbrielsele väärtusele võrreldes olukorraga, kus vahematerjal puudus, ulatus kuni +3 dB, seda nii moodulite vaheliste kinnitussidemete puudumisel kui ka nende olemasolu korral. Väikest osa õhuheli isolatsiooni paranemises mängib siinkohal ka ülemise korruse põrandaelemendi ning alumise korruse laeelemendi vahelise õhkvahe suurenemine katsetatava materjali paksuse võrra, mis 1. materjali puhul oli 15 mm ning 2. materjali puhul 25 mm. Ühtlasi on õhumüra mõõdistuste puhul märgata seost tulemuse paranemise ja moodulite omavahelise kokkupuutepindade vähenemise vahel – parim tulemus on TT1 mõõdistuste puhul materjalil 2, mille 100x145 mm suurused klotsid on paigutatud 600 mm sammuga. Samuti on nii TT1 kui TT2 katsete puhul näha, et ühesuguste kinnitustüüpide lõikes täisribana paigaldatud materjal annab võrreldes materjali vähendamisega poole võrra $D_{nT,w,50}$ või $D_{nT,w}$ suuruse vähenemise 1 kuni 2 dB. Õhuheli isolatsiooni paranemise seos vahematerjali hulga vähenemisega võib olla osaliselt tingitudki ülemise ja alumise mooduli vahelise kontakti vähenemisest. Siinkohal saab võrdluseks tuua paralleeli õhkvahega seinte akustilise toimivusega. Kahe seinapoole vaheliste sidemete hulga kasvades, näiteks ülemise ja alumise ühendava vöö või külgmiste puitpostide, mis ühendavad seina mõlema poole pinna plaate, hulga suurenedes halveneb seina heliisolatsiooni võime. Sellekohaseid näiteid on toodud Kanadas S. Schoenwald, B. Zeiter jt poolt läbi viidud suuremahulises uurimustöös „Acoustics – Sound Insulation in Mid-Rise Wood Buildings“, milles toodud andmed põhinevad laborikatsetuste tulemustel. [50]

Löögiheli mõõdistused eri materjalide lõikes olid mõnevõrra üllatuslikud, kuna selgus, et moduleid eraldava vahematerjalita oli tulemus ühendussidemeteta olukorras samaväärne või isegi 1 kuni 2 dB võrra parem. Üheks põhjuseks siinkohal võib olla asjaolu, et ülemise mooduli kaal on võrdlemisi väike ning vähemalt materjal 2, mis andis vaadeldavatest materjalidest halvima tulemuse, oli tugevalt alakoormatud ning ei töötanud talle ette nähtud koormusvahemikus. Selle materjali kasutamiseks määratud koormusvahemik on 0,22 – 0,45 N/mm² ent tehasekatsetusel jäid koormused katsetatud ruumi perimeetrisse jäävatel materjaliklotsidel vahemikku 0,049 – 0,095 N/mm². Sarnaste tulemusteni, kus elastomeeri kasutamine halvendab vahelae löögiheli isolatsiooni, on jõutud ka varem. Näiteks F. Ljunggreni ning A. Ågreni tehtud uurimustöös „Potential solution to improved sound performance of volume based lightweight multi-story timber buildings“ korraldati kahekordse moodulhoonega katse, milles võrreldi analoogselt elastomeeride mõju. [51]

Samuti on täheldatud Å. Blomsvik'i ja A. Brandt'i läbi viidud uurimustöös „Damping assessment of light wooden assembly with and without damping material“ et jäikade elastomeeride kasutamine võib kaasa tuua konstruktsioonis levivate vibratsioonide ülekannete suurenemist eelkõige sagedustel 20–70 Hz, mis mõjutab olulisel määral ka vahelae saavutatavat löögiheli kaalutud standarditud rõhutaseme väärtust. [52]

Ola Flodèn'i doktoritöö „Vibration transmission in lightweight buildings. Numerical prediction models“ osas A kasutati lõplike elementide mudelit uurimaks erinevate elastomeeride omaduste mõju vibratsioonide levikule kahekordses hoones ülemise korruse põrandalt alumise korruse laeelementi. Töös leiti samuti, et liiga jäiga materjali kasutamine võib soodustada vibratsioonide levikut. [20]

Kinnitussidemete kasutamine korruste vahel mõjutas enim olukorda C, mil materjal moodulite vahel puudus. Kruvimise negatiivne mõju löögiheli kaalutud standarditud rõhutaseme väärtusele on näha ka kõigi teiste materjalide puhul, ent muutus võrreldes sidemeteta olukorraga on väiksem, jäädes vahemikku 0 dB kuni 2 dB.

Alljärgnevates tabelites on välja toodud kõikide mõõdistuste erinevate materjali ja kinnitustüüpide kombinatsioonide vahelae löögimüra ja õhuheli isolatsiooni mõõtmistulemuste ühenumbriliste väärtuste erinevus võrreldes referentskombinatsiooni C4 tulemustega testtorn TT1 puhul ning kombinatsiooniga D4 testtorn TT2 korral. Kombinatsiooni C4 puhul oli ülemine moodul alumise mooduli peale tõstetud ilma vahematerjalita ning moodulite vahelised kinnitused puudusid. TT2 võrdluskombinatsioon D4 korral oli ülemise ja alumise korruse moodulite vahel perimeetris jätkuva ribana materjal 3 ning moodulite vahelised kinnitused puudusid.

Tabel 2.5 Testtorn TT1-s mõõdetud vahelae löögiheli kaalutud standarditud rõhutasemete ning kaalutud standarditud helitasemete vahe tulemuste väärtuste erinevus võrreldes referentsmöödistusega C4. $L_{nT,w}$ ja $L_{nT,w}$ puhul tähistab „+“ numbri ees tulemuse halvenemist ning $D_{nT,w}$ ja $D_{nT,w,50}$ puhul tulemuse paranemist võrreldes referentsolukorraga

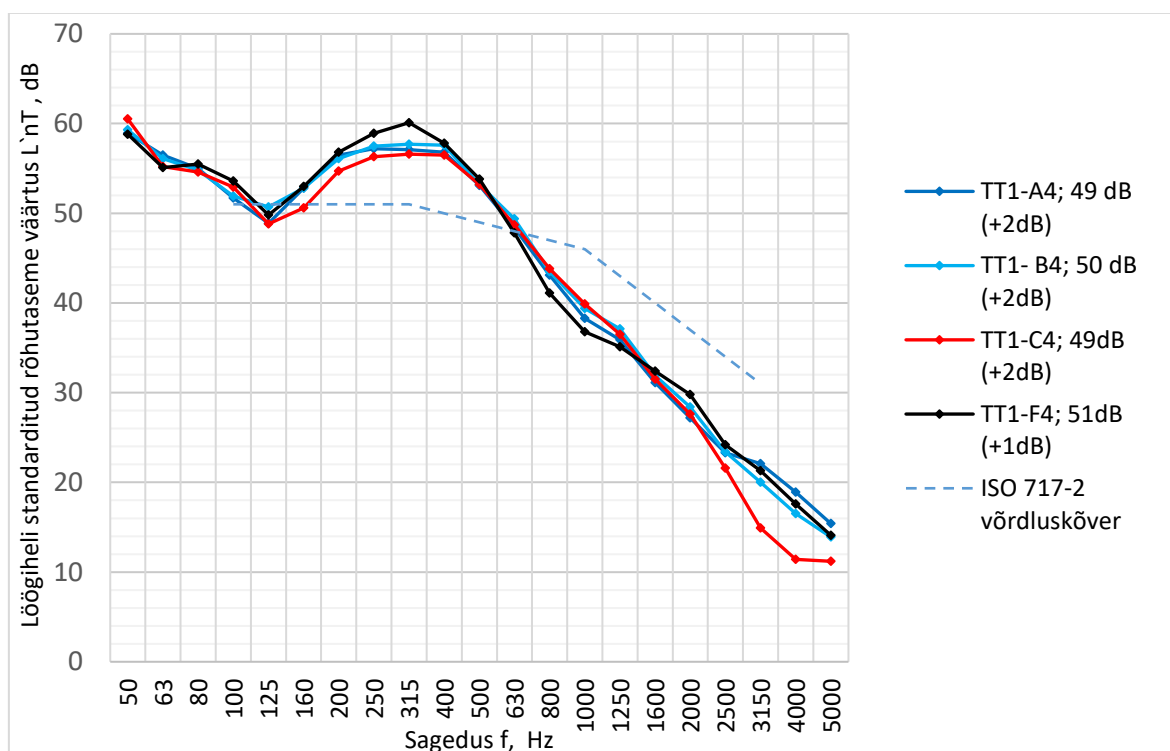
Test	Kirjeldus	$\Delta L_{nT,w}$ dB	$\Delta L_{nT,w,50}$ dB	$\Delta D_{nT,w}$ dB	$\Delta D_{nT,w,50}$ dB
A1	Materjal 1, jätkuvriba, kruvi s. 900mm	+2	+1	-	-
A2	Materjal 1, jätkuvriba, kruvi s. 1800mm	+1	+1	0	0
A3	Materjal 1, jätkuvriba, kinnitus nurkadest	-1	-2	0	0
A4	Materjal 1, jätkuvriba, kinnitamata	0	0	+1	0
B1	Materjal 1, vähendatud 50%, kruvi s. 900mm	+2	+2	-1	-1
B2	Materjal 1, vähendatud 50%, kruvi s. 1800mm	+2	+1	0	0
B3	Materjal 1, vähendatud 50%, kinnitus nurkadest	+1	+1	0	0
B4	Materjal 1, vähendatud 50%, kinnitamata	+1	+1	+1	+1
C1	Kruvi s.900	+3	+2	-1	-1
C2	Kruvi s.1800	-	-	-1	-1
C3	Kinnitus nurkadest	+1	+1	0	0
F1	Materjal 2, samm 600, kruvi s. 900	+2	+1	+2	+2
F2	Materjal 2, samm 600, kruvi s. 1800	+3	+3	+2	+2
F3	Materjal 2, kinnitus nurkadest	+2	+1	+4	+3
F4	Materjal 2, kinnitamata	+2	+1	+3	+3

Tabel 2.6 Testtorn TT2-s mõõdetud vahelae löögiheli kaalutud standarditud rõhutasemete ning kaalutud standarditud helitasemete vahe tulemuste väärtuste erinevus võrreldes referentsmöödistusega D4. $L_{nT,w}$ ja $L_{nT,w}$ puhul tähistab „+“ numbri ees tulemuse halvenemist ning $D_{nT,w}$ ja $D_{nT,w,50}$ puhul tulemuse paranemist võrreldes referentsolukorraga

Test	Kirjeldus	$\Delta L_{nT,w}$ dB	$\Delta L_{nT,w,50}$ dB	$\Delta D_{nT,w}$ dB	$\Delta D_{nT,w,50}$ dB
D1	Materjal 3, jätkuvriba, kruvi s. 900mm	0	+1	-1	-2
D3	Materjal 3, jätkuvriba, kinnitus nurkadest	0	0	0	0
E1	Materjal 3, vähendatud 50%, kruvi s. 900mm	0	+1	+1	-1
E3	Materjal 3, vähendatud 50%, kinnitus nurkadest	-1	0	+1	+1
E4	Materjal 3, vähendatud 50%, kinnitamata	-3	-2	+1	0

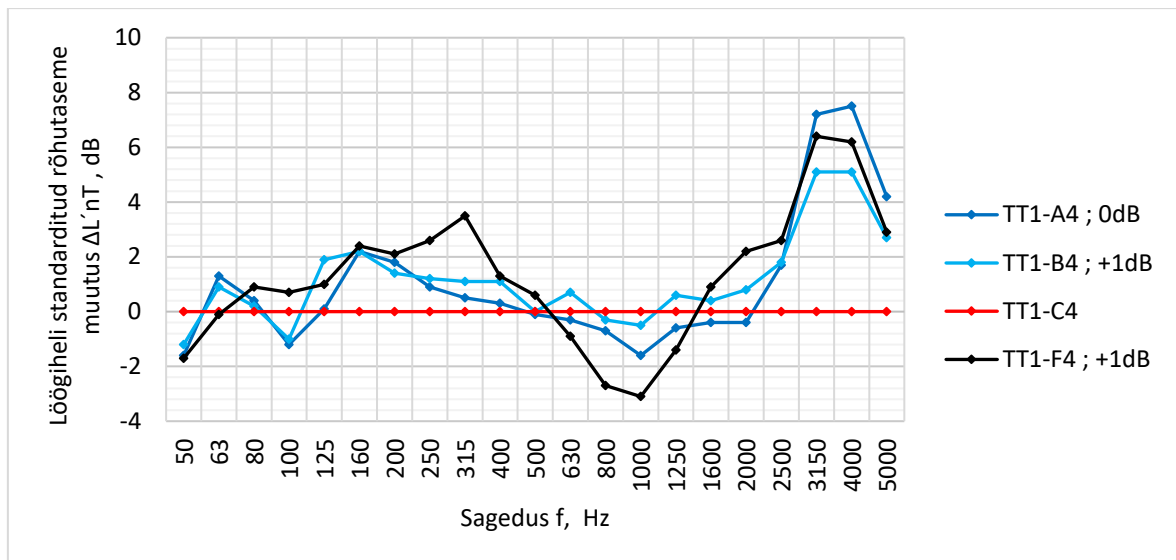
Vaadates möödistustulemusi tunduvad enamus neist usaldusväärsed kuna ühtivad eeldustega, et ühendussidemete lisamine moodulite vahel viib vahelae akustiliste omaduste halvenemisele. Kahe möödistuse osas esineb siin aga kõrvalekaldeid, mistõttu tuleks neisse konkreetsetesse suhtuda ettevaatusega. Näiteks kombinatsiooni F3, milles on ülemine ja alumine moodul

omavahel ühendatud nurkadest, on õhumüra isolatsiooni mõõdistusel $D_{nT,w}$ väärtus saadud 1 võrra parem tulemus kui olukorras F4, mil moodulite vahelised kinnitused puudusid. Teiseks mõõdistuseks, mille tulemuse võime kahtluse alla seada on kombinatsiooni A3 löögiheli kaalutud standarditud rõhutaseme väärtused, kuna võrreldes jällegi olukorraga A4, milles moodulitevahelised kinnitussidemed puudusid, on sidemete lisandumine vahelae löögiheli kaalutud standarditud rõhutaset vähendanud. Analüüsid samu olukordi kõikide teiste materjalide korral, ei järgi mainitud kaks kombinatsiooni üldiseid trende ning seetõttu ei ole usaldusväärseid. Millistel põhjustel kirjeldatud kõrvalekalded on tekkinud on ebaselged.

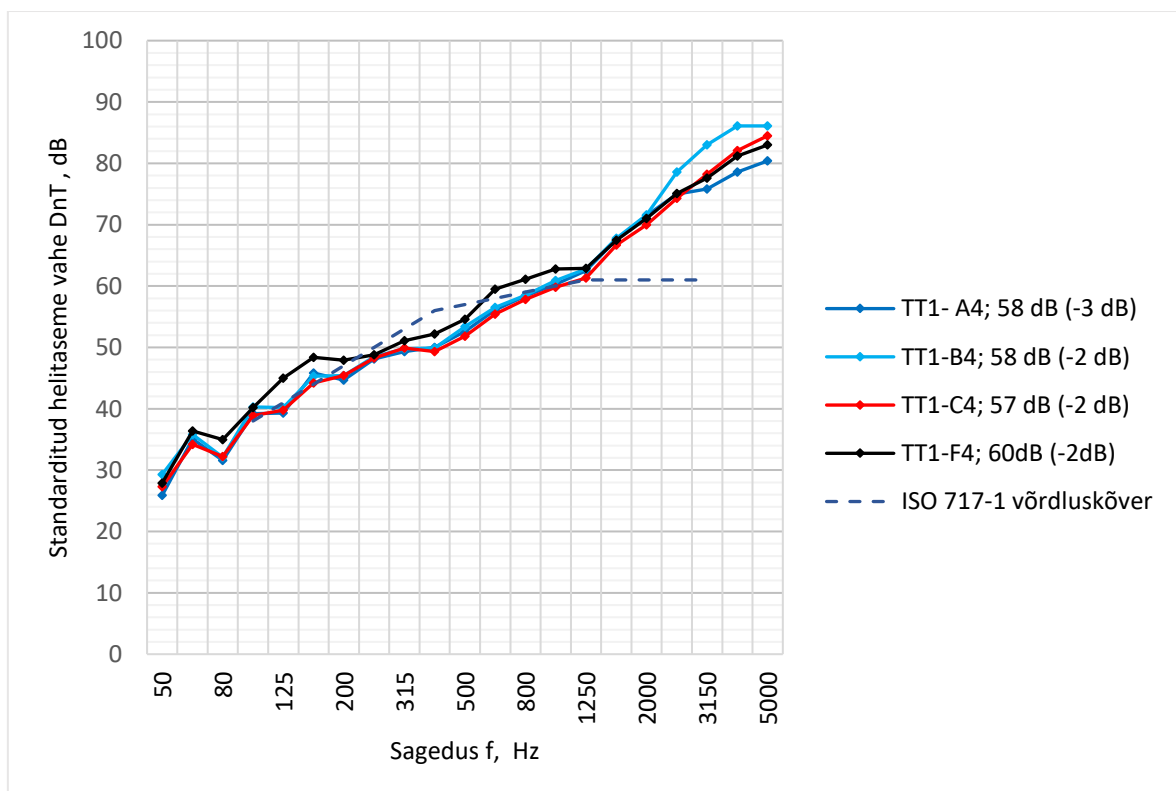


Joonis 2.2 TT1-s katsetatud moodulite vahematerjalide mõju vahelae löögiheli standarditud rõhutasemetele. Nime taga on $L_{nT,w}$ ühenumbiline väärtus ning sulgudes spektrilähendusteguri $C_{l,50-2500}$ parandus

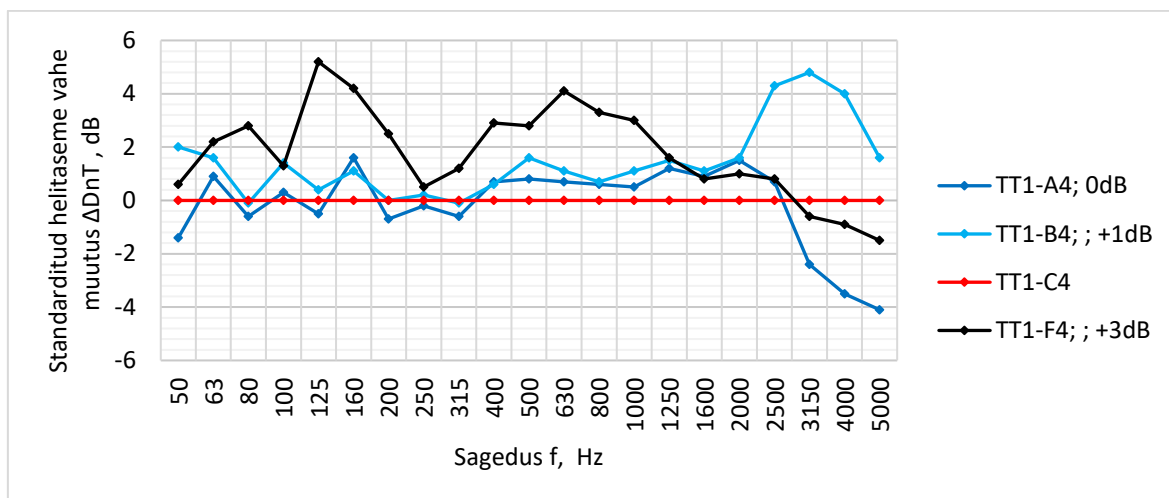
Joonisel 2.2 kujutatud graafiku kohaselt, kuhu on märgitud ka ISO 717-2 võrdluskõver, mõjutavad enim $L_{nT,w}$ ühenumbulist väärtust tulemused sagedustel 160Hz – 630 Hz. Joonisel 2.3 on selgemalt näha testitud materjalide käitumine erinevatel sagedusribadel võrreldes referentsolukorraga C4. Võrreldes referentsolukorraga on materjali 2 puhul rõhutasemed sageduspiirkondades 63 – 500 Hz ning kõrgematel sagedustel alates 1600 Hz-st. Seejuures ühenumbilise väärtuse suurenemine on tingitud madalama sageduspiirkonna ebasoodsatest hälvetest.



Joonis 2.3 TT1-s katsetatud moodulite vahematerjalide mõju vahelae löögiheli standarditud rõhutasemetele võrreldes referentsolukorraga C4. Nime taga on ühenumbrielse suuruse $L'_{nT,w,50}$ muutus võrreldes referentsolukorraga

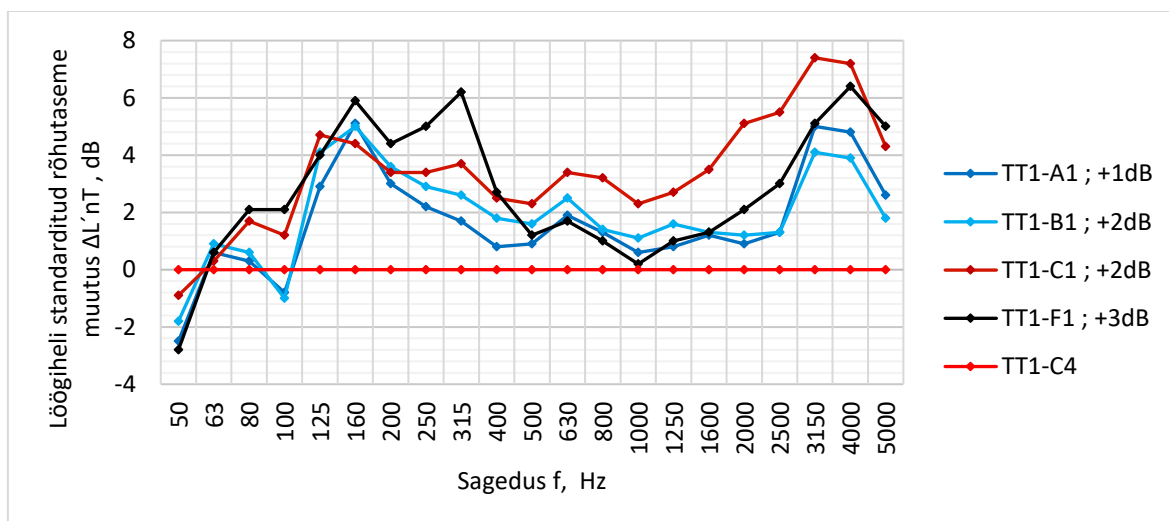


Joonis 2.4 TT1-s katsetatud moodulite vahematerjalide mõju vahelae standarditud helitasemete vahele. Nime taga on $D_{nT,w}$ ühenumbrielse väärtus ning sulgudes spektrilähendusteguri $C_{50-3150}$ parandus

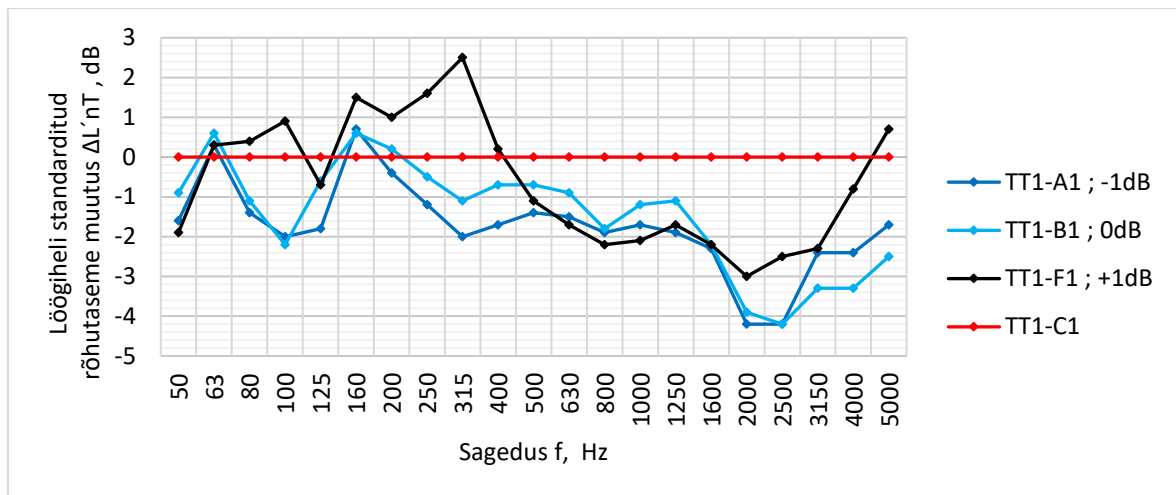


Joonis 2.5 TT1-s katsetatud moodulite vahematerjalide mõju vahelae standarditud helitasemete vahele võrreldes referentsolukorraga C4. Nime taga on ühenumbrielse suuruse $D_{nT,w,50}$ muutus võrreldes referentsolukorraga

Tuginedes joonisel 2.4 toodud õhuheli standarditud helitasemete vahe graafikule on testitud tarindi osas õhuheli isolatsiooni ühenumbrielse suuruse kasvu piiravateks sagedusteks alla 630 Hz jäävad sagedused. Suurima negatiivse hälbe ISO 717-1 võrdluskõveraaga annavad sagedused vahemikus 315 Hz kuni 500 Hz.



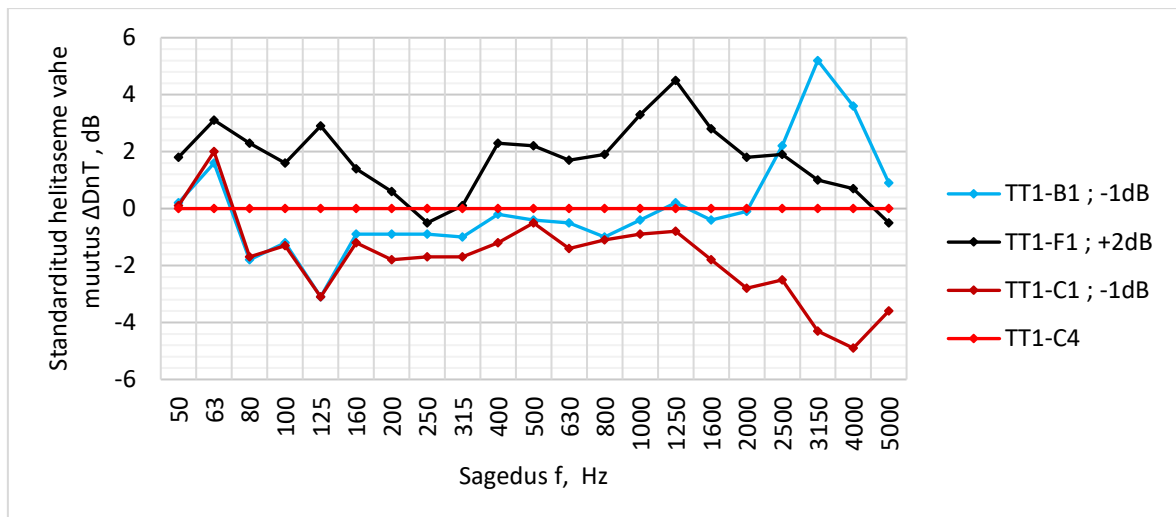
Joonis 2.6 Kruvimise mõju vahelae löögiheli standarditud rõhutasemetele erinevate vahematerjalide kasutamise korral TT1-s võrreldes referentsolukorraga C4. Nime taga on ühenumbrielse suuruse $L'_{nT,w,50}$ muutus võrreldes referentsolukorraga



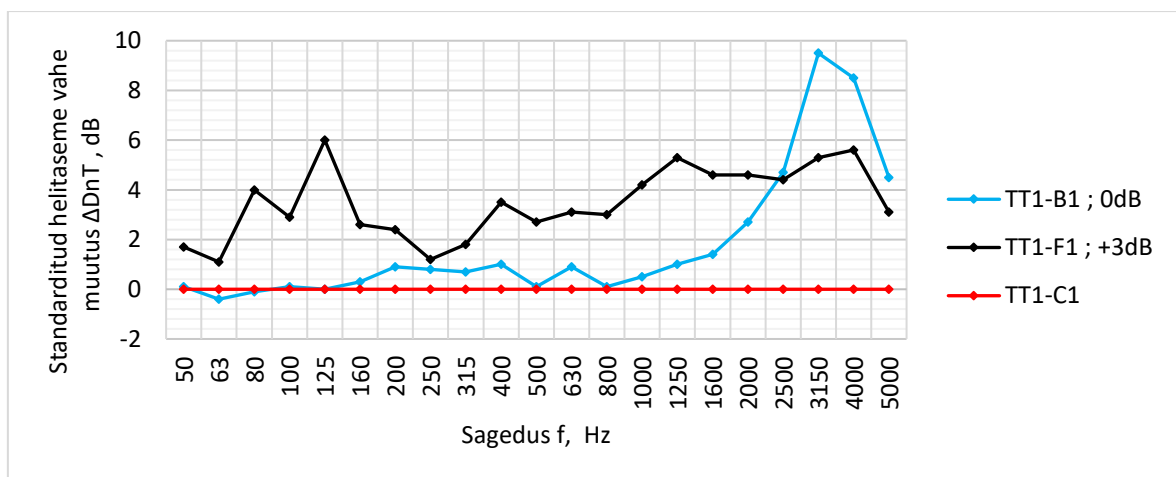
Joonis 2.7 Moodulitevahelise materjalide ja kruvikinnituse koosmõju vahelae löögiheli standarditud rõhutasetele TT1-s võrreldes referentsolukorraga C1. Nime taga on ühenumbriilise suuruse $L'_{nT,w,50}$ muutus võrreldes referentsolukorraga

Mõõdistustest selgub, et moodulite omavaheline kokku krüvimine suurendab heliülekanneid kõikides sagedusribades. Enim on aga mõjutatud sagedused alates 2000 Hz ja kõrgemad ning vahemik 125 Hz kuni ca 315 Hz. Olukorras C1, kus moodulitevaheline materjal puudus, on krüvimise mõju heliülekanne suurenemisele läbi sagedusribade ühtlasem. Materjal 1 täisribana kasutatuna suudab löögiheli standarditud rõhutaset pea kõikidel sagedustel 1 kuni 2 dB võrra vähendada võrreldes olukorraga C1. Kõrgematel, üle 2000 Hz sagedustel mõnevõrra rohkemgi. Materjal 2 töötab sagedustel alates 500 Hz-st sama tõhusalt ent vaadates jooniselt 2.2 $L'_{nT,w}$ ja $L'_{nT,w,50}$ ühenumbriilist väärtust määrava standardkõvera kuju, siis testitud vahelae puhul on löögiheli kaalutud standarditud rõhutase väärtuse kujunemisel määravaim mõju helirõhu tasemetel sageduste juures kuni 630 Hz. Kui materjal ei tööta hästi või koguni soodustab selles piirkonnas heliülekanneid nagu on näha materjali 2 puhul (kombinatsioon F1) joonisel 2.7, on tulemuseks vahelae löögiheli rõhutase ühenumbriilise näitaja halvenemine, mida ei suuda kompenseerida kõrgematel sagedustel materjali positiivne tulemus helirõhutasete vähendamisel.

Moodulitevahelise materjali 1 ja materjali 2 mõju krüvimise korral tarindi õhuheli isolatsioonile on näha kahelt järgnevalt graafikult.



Joonis 2.8 Kruvimise mõju vahelae standarditud helitaseme vahele erinevate vahematerjalide kasutamise korral TT1-s võrreldes referentsolukorraga C4. Nime taga on ühenumbriilise suuruse $D_{nT,w,50}$ muutus võrreldes referentsolukorraga



Joonis 2.9 Moodulitevahelise materjalide ja kruvikinnituse koosmõju vahelae standarditud helitaseme vahele TT1-s võrreldes referentsolukorraga C1. Nime taga on ühenumbriilise suuruse $D_{nT,w,50}$ muutus võrreldes referentsolukorraga

TT2-s testitud materjali 3 mõõdistustulemuste graafikud on toodud lisas. Kuna TT2 vahelae tarind erines olulisel määral TT1 omast ei ole erinevates testtornides saadud tulemused omavahel vahematerjali ning kinnitustüüpide osas võrreldavad, sest vahelae ülemise ja alumise plaadi vaheline kaugus ning villa olemasolu talade vahel mõjutavad tulemusi. Ühtlasi ei olnud ka moodulite valmidusaste täpselt ühesugune, mille tõttu võivad tulemused olla mõjutatud ka helilekete osakaalu erinevusest tornide vahel. Üldiselt võib aga öelda, et materjal 3 puhul moodulitevaheliste ühendussidemete lisamine suurendas analoogselt tulemustele TT1-s

vibratsioonide levikut ülemiselt moodulilt alumise mooduli tarinditesse, halvendades seeläbi vahelae löögiheli isolatsiooni näitajaid. Õhuheli isolatsiooni mõjutas kruvide lisamine samuti halvemuse poole, ent standarditud helitasemete vahe ühenumbriks näitaja muutus jäi erinevatel katsetel vahemikku 0 kuni -1 dB.

2.3 Mõõdistused objektis

2.3.1 Mõõtmistulemused pärast moodulite paigaldust objektis

Lisaks tehasekatsetele viidi läbi löögiheli isolatsiooni ja õhuheli isolatsiooni mõõdistus vahelagedele identses moodulis objektis pärast paigaldust. Mõõdistuse ajal oli hoone ehitus lõppfaasis. Lõpetatud oli moodulite ühendamine, fassaadide viimistlus, rõdude ja käiguteede paigaldus. Samuti suurem osa sisetöid. Ruumide kubatuur oli kõikidel korrusel sama $V=36,7 \text{ m}^3$ ning eraldava tarindi pindala $S=15,3 \text{ m}^2$.

Mõõdistustel valiti löögimüraaparaadi ning kõlari positsioonid samasugused nagu oli kasutatud tehase mõõdistusel viimaks helitekitaja positsioonidest tingitud kõrvalekalded minimaalseks.

Tabel 2.7 Vahelagede löögiheli isolatsiooni ja õhuheli isolatsiooni mõõdistuste tulemused pärast moodulite paigaldamist objektis vastavalt I ja II korruse ning II ja III korruse vahel

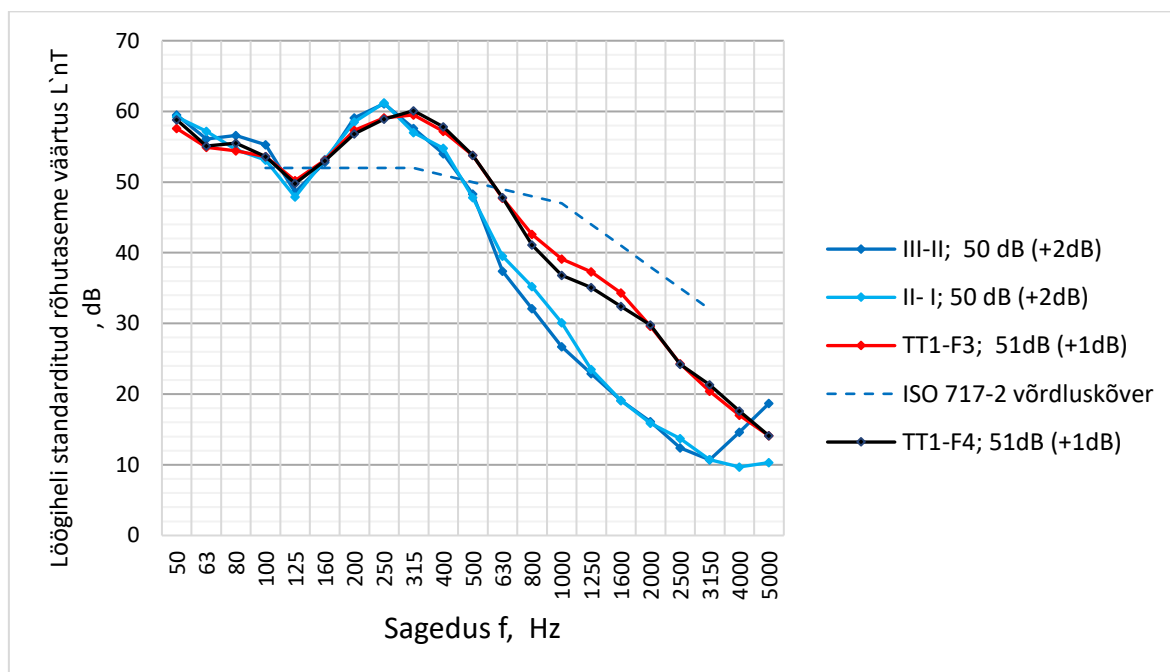
Vahelae korrus	Materjal	Koormus materjali pinnaühikule, N/mm^2	$L_{nT,w}$ dB	$L_{nT,w,50}$ dB	$D_{nT,w}$ dB	$D_{nT,w,50}$ dB
I-II	Sylomer SR850	0,199-0,430	50	52	60	58
II-III	Sylomer SR450	0,103-0,310	50	52	61	58

Ehkki eri korruste moodulitevahelised elastomeerid olid koormatud erinevalt, siis vahelagede löögiheli standarditud rõhutasemete ühenumbriksed suurused olid mõõdistuste põhjal samad ning ühtlasi oli tulemus hoone asukohariigi miinimumnõudest 4dB võrra parem. Ka sagedusribade lõikes kattusid löögiheli standarditud rõhutaseme väärtused eri korruste vahelagede mõõdistuse puhul või olid minimaalsete vahedega üksikutel sagedusribadel.

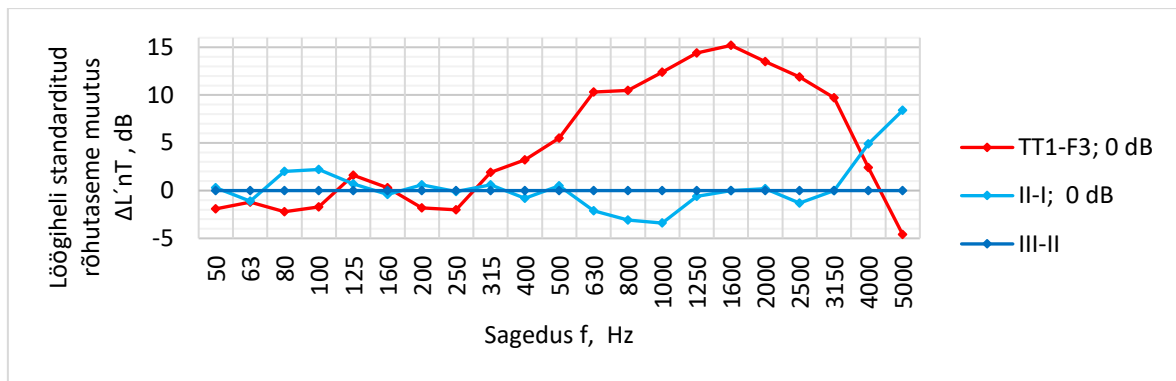
Koormuste jaotus elastomeeri klotsidele mõlema korruse puhul on toodud lisas. Analüüsid vahematerjali klotside tõhusust vibratsioonide isoleerimisel rakendatud koormustel tootjapoolse programmiga FreqCalc [53], selgub, et mõlema vahelae puhul mooduli pikkade ehk korteritevaheliste seinte all olevad elastomeerid alakoormatud ning üksnes nurkades ning välisseina all olevatele klotsidele rakendub piisavalt koormust, mis võimaldab elastomeeri

efektiivsust vibratsioonide isoleerimisel oluliselt suurendada. FreqCalc-is tehtud arvutuslikud katsed erinevate koormuste rakendamisel samale tüübile elastomeerile näitavad, et materjalile rakenduva koormuse vähendamisel suureneb materjali omasagedus ning elastomeer hakkab üha kõrgematel sagedustel vibratsiooni ülekannet hoopis soodustama. FreqCalc arvutuste kuvatõmmised on toodud lisades.

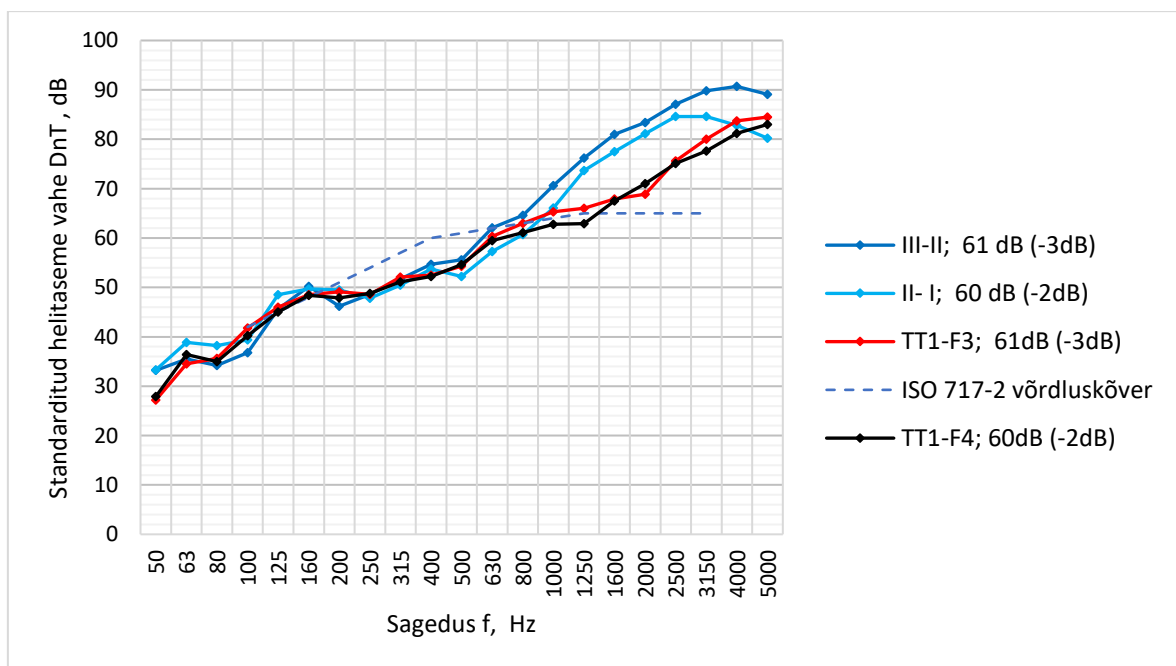
Veel üheks oluliseks märkuseks seoses elastomeeri klotside erineva koormatusega antud projekti puhul on asjaolu, et kuna kandvad talad põrandates on risti mooduli pikkade külgedega, on eriti oluline, et just pikkades külgedes olevad elastomeerid oleksid valitud õige koormusvahemiku jaoks, sest tõenäoliselt ülemise korruse põrandale tekitatud vibratsioonidest kandub suurem osa läbi vahelaetalade toetuspunktide alumisele tarinditele.



Joonis 2.10 Vahelagede löögiheli isolatsiooni mõõdistuste tulemused peale moodulite paigaldamist objektile ning analoogkombinatsiooni mõõdistustulemus tehasekatsetel. Nime taga on $L'_{nT,w}$ ühenumbriline väärtus ning sulgudes spektrilähendusteguri $C_{I,50-2500}$ parandus



Joonis 2.11 Tehasemõõdistuse ja objektimõõdistuse II-I korruse vahelae löögiheli standarditud rõhutase muutus võrreldes objektimõõdistuse III-II korruse vahelise tarindi tulemustega sagedusribade kaupa. Nime taga on ühenumbriilise suuruse $L'_{nT,w,50}$ muutus võrreldes referentsolukorraga



Joonis 2.12 Vahelagede õhuheli isolatsiooni mõõdistuste tulemused peale moodulite paigaldamist objektile ning analoogkombinatsiooni mõõdistustulemus tehasekatsetel. Nime taga on $D_{nT,w}$ ühenumbriiline väärtus ning sulgudes spektrilähendusteguri $C_{50-3150}$ parandus

Ehkki platsimõõdistuste ja tehases mõõdetud analoogkombinatsiooni ühenumbriilised väärtused nii löögiheli standarditud rõhutase kui ka standarditud helitasemete vahe puhul olid kas samad või erinesid kõige enam 1dB võrra on joonistel 2.10 ning 2.12 näha tulemuste selge lahknevus kõrgematel sagedustel. Kõige tõenäolisem põhjus sellele on tehasekatsetuses kasutatud moodulite oluliselt madalam viimistlusaste. Läbiviikude tihenduste puudumine, lae ja põranda liistude osaline puudumine, ventilatsioonikastide lõpetamatus ja akna palede viimistluse puudumine tähendab oluliselt suuremal hulgal helilekkeid võimaldavaid pragusid võrreldes olukorraga platsil.

2.4 Mõõdistuste kokkuvõte ja järeldused

Kokkuvõtvalt võib öelda, et tehasekatsetuste vahelae heliisolatsiooni mõõdistustulemused olid üllatavalt väikeste vahedega nii erinevate vahematerjalide võrdluses kui kinnitussidemete mõju võrdluses. Selle peamiseks põhjuseks oli ilmselt ülemise korruse kerge kaal ning ülemise ja alumise korruse vaheline liiga nõrk sidumine.

Katsetatud materjalide võrdluses oli huvitav tõdeda, et ka mooduleid eraldava vibratsiooni isoleeriva vahematerjalita on vaadeldav vahelae tarind võimeline täitma esimeses peatükis mainitud riikides kehtivaid miinimumnõudeid nii õhuheli isolatsiooni kui löögiheli isolatsiooni osas. Sellise lahenduse kasutamist võiks kaaluda kuni kahekordsete moodulhoonete korral, mille ülemise korruse moodulite ning katuse omakaalu koormused on väikesed ning puudub vajadus kasutada väga tugevaid kinnitussidemeid korruste vahel.

Materjal 1 puhul oli näha, et toode töötas paremini täisribana kasutatuna. Materjali vähendamisel halvenesid nii löögimüra isolatsiooni näitajad kui ka õhuheli isolatsiooni näitajad. Põhjus on ilmselt materjali iseloomulikus ehituses – suurendades koormust pinnale, surutakse liivaosakesed tihedamalt üksteise vastu ning vibratsioonide muundamine osakeste kineetiliseks energiaks ei ole enam nii efektiivne nende väiksema liikumisvabaduse tõttu. Löögiheli isolatsiooni näitajate võrdluses andis materjal 1 võrdväärse tulemuse olukorraga, mil materjal puudus. Õhuheli isolatsiooni tulemused andsid referentsolukorraga võrreldes pisut parema tulemuse.

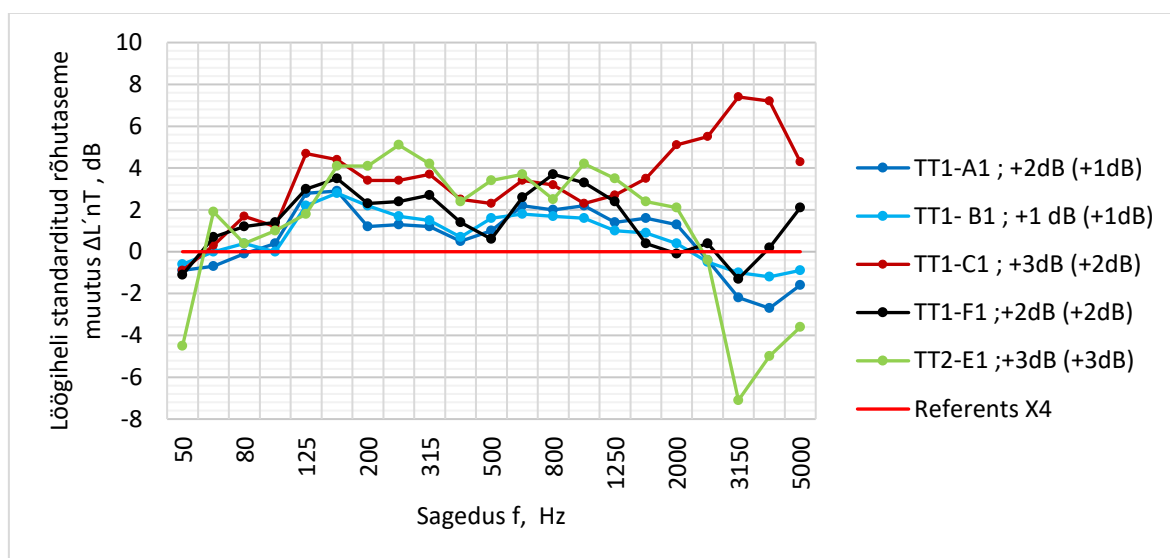
Materjal 2 puhul täheldati TT1-s katsetatud materjalide võrdluses löögiheli isolatsiooni puhul halvimat tulemust, mis suure tõenäosusega on tingitud liiga väikesest materjalile langevast pinnakoormusest, mille tõttu elastomeeriklotsi omasagedus suureneb ning vibratsiooniülekanne selle sageduspiirkonna läheduses võimenduvad. Samas õhumüra isolatsiooni näitajate puhul suutis materjal 2 anda parima toimivuse, mis võis osalt olla tingitud ülemise ja alumise korruse moodulite omavahelise kontaktpinna vähesusest.

Materjal 3 täisribana kasutatuna toimib löögimüra isoleerimisel halvemini vastupidiselt materjal 1-le. Materjal 3 sarnaneb oma koostiselt materjaliga 2 ning võib oletada, et ka üks võimalik põhjus, miks täisribana kasutatuna olid tulemused löögimüra osas halvemad võib olla seotud jällegi liiga vähesel koormatusega. Kõnealuse materjali puhul kahjuks ei ole antud koormusvahemikku, milles võiks ta vibratsiooni isoleerivad omadused olla maksimaalsed, mistõttu antud väites lõpuni kindel olla ei saa. Õhuheli isolatsiooni mõõtmistulemustest andis parema tulemuse materjali kasutamine 50% võrra vähendatuna nagu ka materjal 1 puhul. Kõigi kolme materjali puhul võib paremate

õhuheli isolatsiooni näitajate saavutamine olla osaliselt tingitud ülemise ja alumise korruse omavahelise kokkupuutepunktide vähenemisest.

Moodulite korrustevaheliste ühendussidemete mõju mõõdistustulemuste põhjal on märgata, et kui vahematerjali korruste vahel mitte kasutada, kasvavad löögiheli standarditud rõhutasemed pea kõikides sagedusribades suurema hüppega võrreldes referentsolukorraga, mil moodulid asetsevad lahtiselt üksteise peal. Vahematerjali kasutamisel ei ole vahed võrreldes kruvimata olukorraga nii suured.

Õhuheli isolatsiooni tulemusi mõjutas kinnitussidemete kasutamine mõnevõrra vähem.



Joonis 2.13 Kruvimise mõju vahelae löögiheli standarditud rõhutasemetele erinevate vahematerjalide kasutamise korral võrreldes referentsolukorraga sama materjali kasutamisel ilma kruvimiseta. Nime taga on ühenumbri suurus $L'_{nT,w}$ ja sulgudes $L'_{nT,w,50}$ muutus võrreldes referentsolukorraga

Platsimõõdistustel saadud löögiheli standarditud rõhutasemete ning standarditud helitasemete vahe graafiku kujude sarnasus tehase mõõdistuse omadega annab kinnitust, et mõõdistused tehasetingimustes on usaldusväärsed. Hinnates võimalikku helilekete osakaalu suurenemist seoses mooduli valmidusastmega ning asjaolu, et tehasekatsetusel puuduvad mooduli kõrval olevad moodulid ning nende omavahelised tihendamised, on taoliste katsete tulemustest võimalik siiski suhteliselt hea täpsusega saada aimu ka vahelagede akustilisest toimivusest reaalses olukorras platsil.

3 HOONETE HELIISOLATSIOONI PROJEKTEERIMINE

3.1 Üldpõhimõtted

3.1.1 Õhuheli isolatsioon

Puitkarkassmoodulhoonetes on kõik tarindid enamasti puitkarkassil, mis on kas ühelt või mõlemalt poolt kaetud ühes või mitmes kihis mingit tüüpi õhukese plaadiga. Üheks lihtsamaks meetodiks, kuidas leida õhukese plaadi õhuheli isolatsiooni, on jagades plaadi heliisolatsioon kaheks sageduspiirkonnaks. Madalamatel ja kesksagedustel, kuni kointsidentsi piirsageduse f_c poolde ulatusse, kehtib nn massiseadus – see on piirkond, kus heliisolatsioonivõime kasvab sageduse kahekordistumisel 6 dB. Kointsidentsi-nähtuse piirkonnas heliisolatsioonivõime langeb, saavutades madalaima punkti sagedusel f_c , (Hz) mille saab leida alljärgneva valemiga: [3]

$$f_c = \frac{c_0^2}{2\pi} \sqrt{\frac{12(1-\mu^2)m'}{Eh^3}} \quad (3.1)$$

kus c_0 – heli kiirus õhus, 343 m/s

μ – Poissoni tegur, mille väärtuseks võib võtta $\mu=0,25$ ehitusplaatde puhul, $\mu=0,30$ metallide ja $\mu=0,40$ kummi ning bituumeni puhul.

m' – plaadi pinnamass, kg/m²; h – plaadi paksus, m ; E – materjali elastsumoodul, Pa

Plaadi heliisolatsiooniindeksi R (dB) eri sagedustel saab arvutada valemiga: [3]

$$R = \begin{cases} 20 \log m' f - 48, & f < 0,5 f_c \\ 20 \log m' f + 10 \log \left[\eta \left(\frac{f}{f_c} - 1 \right) \right] - 44, & f \geq f_c \end{cases} \quad (3.2)$$

kus η – sagedusest sõltuv kaotegur.

Kaoteguri mõju avaldub kergkonstruktsioonide puhul vaid kointsidentsi piirsagedusest kõrgemal ning servadest kinni kruvitud plaadi kaoteguri väärtuseks võib võtta 0,2. [3]

Ideaalse tarindi, mille mõlemal küljel olevad plaadid on teineteisega sidumata ning mille õhkvahe on helineelav materjal, heliisolatsiooniindeksi R_{ideal} saab leida avaldisega: [3]

$$R_{ideal} = \begin{cases} 20 \log(m'_1 + m'_2) f - 48 & f < f_{mam} \\ R_1 + R_2 + 20 \log f d - 29 & f_{mam} < f < f_I \\ R_1 + R_2 + 6 & f > f_I \end{cases} \quad (3.3)$$

Kus m'_1, m'_2 – vastavalt 1. ja 2. plaadi pinnamassid, kg/m²; R_1, R_2 – plaatpindade 1 ja 2 heliisolatsiooniindeksid, dB; f_{mam} – mass-õhk-mass resonantssagedus, Hz; f_I – piirsagedus, Hz; d – õhkvahe laius, m.

$$f_1 = \frac{c_0}{6d} \quad (3.4)$$

$$f_{\text{mam}} = 80 \sqrt{\frac{m'_1 + m'_2}{dm'_1 m'_2}} \quad (3.5)$$

Kui õhkvahe helineeldematerjal ei ole ideaalne ning vähendab tarindi heliisolatsioonivõimet, saab heliisolatsiooniindeksi muutuse ΔR_{abs} leida avaldisega: [54]

$$\Delta R_{\text{abs}} = 10 \log \alpha_{\text{eff}} \quad (3.6)$$

kus α_{eff} – õhkvahe helineeldetegur.

Sidumata plaatidega topelttarindi lõpliku heliisolatsiooniindeksi saame avaldisest: [54]

$$R_{\text{ideal}} = \begin{cases} R_{\text{ideal}}, & f < f_L \\ R_{\text{ideal}} + \Delta R_{\text{abs}}, & f \geq f_L \end{cases} \quad (3.7)$$

Kus f_L – piirsagedus, millest madalamatel sagedustel ei teki õhkvahe seisulaineid.

$$f_L = \frac{c_0}{2L} \quad (3.8)$$

kus L – õhkvahe laius või kõrgus, sõltuvalt kumb on suurem, m.

Kui plaatide vahel on jäigad sidemed puitsõrestiku kujul, levib heli läbi tarindi lisaks ka karkassi kaudu. Plaatide vahelise karkassi negatiivne mõju heliisolatsioonile algab sildsagedusest f_{br} kõrgematel sagedustel. [3]

$$f_{\text{br}} = f_{\text{mam}} \left[\frac{\pi b f_c}{2c_0} \left(\frac{m'_1}{m'_1 + m'_2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{4}} \quad (3.9)$$

kus b – joonsidemete ehk karkassi postide või talade omavaheline kaugus, m.

Selles piirkonnas korrigeeritakse heliisolatsiooni suurusega ΔR_M ,

$$\Delta R_M = 10 \log(b f_c) + 20 \log \frac{m'_1}{m'_1 + m'_2} - 18 \quad (3.10)$$

ehk siis sildsagedusest kõrgematel sagedustel leitakse tarindi heliisolatsioon järgnevalt: [54]

$$R_{\text{br}} = R_M + \Delta R_M \quad (3.11)$$

Standardis EVS-EN ISO 12354-1 on toodud arvutusmudelid hindamaks külgnevate ruumide vahelist õhuheli isolatsiooni hoones. Standardis esitatud detailse arvutusmudeli põhjal

$$R' = -10 \log(\tau') = -10 \log(\tau_d + \sum_{f=1}^n \tau_f + \sum_{e=1}^m \tau_e + \sum_{s=1}^k \tau_s) \quad (3.12)$$

kus τ' – üldine ülekande tegur, so vastuvõttvasse ruumi kiirgava koguhelivõimsuse ja eraldava elemendi ühisele osale toimiva helivõimsuse suhe,

τ_d – eraldava elemendi ühise osa kaudu kiirgava helivõimsuse ja eraldava elemendi ühisele osale toimiva helivõimsuse suhe (trajektooriid Dd ja Fd),

τ_f – vastuvõttvas ruumis asuva külgneva elemendi f kaudu kiirgava helivõimsuse ja eraldava elemendi ühisele osale toimiva helivõimsuse suhe (trajektooriid Df ja Ff),

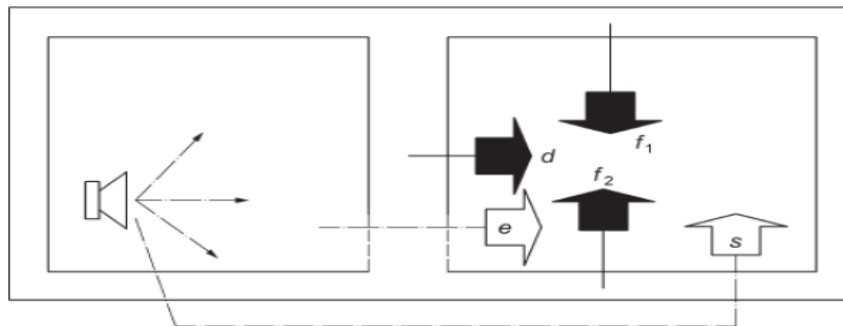
τ_e – eraldava elemendi sees olevale elemendile toimiva õhuheli otsese ülekande tõttu vastuvõttvasse ruumi edastatud helivõimsuse ja eraldava elemendi ühisele osale toimiva helivõimsuse suhe,

τ_s – õhuheli kaudsele ülekandesüsteemile s toimiva ning selle süsteemi poolt vastuvõttvasse ruumi edastatud helivõimsuse ja eraldava elemendi ühisele osale toimiva helivõimsuse suhe,

n – külgnevate elementide arv,

m – õhuheli otsesel ülekandel osalevate elementide arv,

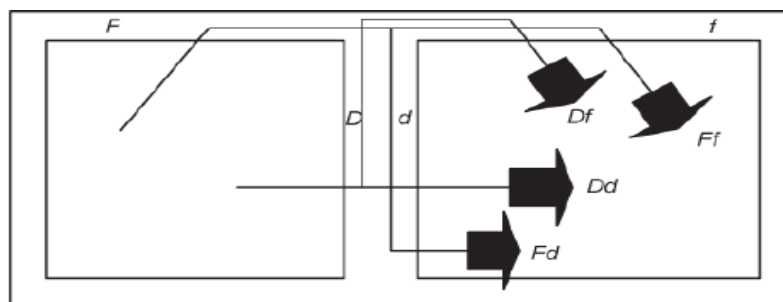
k – õhuheli kaudsel ülekandel osalevate süsteemide arv.



Selgitused

- d kiirgub vahetult eraldavast elemendist
- f_1 ja f_2 kiirgub külgnevatest elementidest
- e kiirgub eraldavale elemendile paigutatud komponentidest
- s kaudne ülekanne

Joonis 3.1 Ruumi üldist heliülekannet mõjutavate komponentide panused vastavalt EVS-EN ISO 12354-1



Selgitused

- Dd otsene otsetrajektor
- Df otsene külgsuunaline trajektor
- Fd külgsuunaline otsene trajektor
- Ff külgsuunaline külgtajektor

Joonis 3.2 Kahe ruumi vaheliste heliülekande trajektooriide määratlemine vastavalt EVS-EN ISO 12354-1

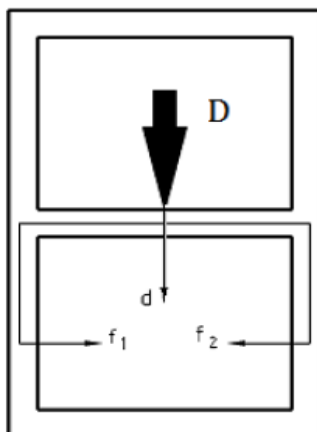
Antud lähenemise puhul on tegu küllalt üldise meetodiga, mis võimaldab käsitleda eri tüüpi konstruktsiooni elemente, seal hulgas ka kergkonstruktsioone. Suurimaks piiranguks mudeli rakendamisele kergkonstruktsioonide korral on sisendandmete puudulikus elemendilt elemendile kulgevate ülekandetrajektooride vibratsiooni isolatsiooniindeksite puhul. [24]

3.1.2 Löögiheli isolatsiooni arvutamine

Standardis EVS-EN ISO 12354-2:2017 on toodud detailne ning lihtsustatud arvutusmeetod löögiheli isolatsiooni hindamiseks 2 ruumi vahel hoones. Detailse mudeli puhul on teineteise peal paiknevate ruumide puhul löögiheli üldine rõhutase L'_n (dB) vastuvõttvas ruumis leitav järgneva valemiga: [26]

$$L'_n = 10 \log \left(10^{\frac{L_{n,d}}{10}} + \sum_{j=1}^n 10^{\frac{L_{n,ij}}{10}} \right) \quad (3.13)$$

kus $L'_{n,d}$ – otsesest heliülekandest tingitud löögiheli taandatud rõhutase, dB; $L_{n,ij}$ – külgsuunalisest heliülekandest tingitud löögiheli taandatud rõhutase, dB; n – elementide arv.



Selgitused

d	löögiheli otsene ülekanne
Dd	otsene ülekandetrajektoor
Df ₁ või Df ₂	külgnev ülekandetrajektoor

Joonis 3.3 Heliülekandetrajektooride määratlemine üksteise kohal asuvate ruumide korral vastavalt standardile EVS-EN ISO 12354-2

Mudelit kasutatakse hoone toimivuse arvutamiseks sagedusribades ning tulemustest on võimalik arvutada ühe arvuga esitatav hoone toimivusnäitaja. Arvutused tuleb teha 1/3 oktaavribade puhul vähemalt sagedustel 100 Hz – 3150 Hz. Madalamate sageduste kasutamisel puudub info arvutustulemuste täpsuse kohta. Sisendandmetena võib kasutada nii laborimõõdistusandmeid kui ka teoreetiliselt tuletatud meetoditest saadavaid andmeid heli leviku kohta ehituselementides. Detailset mudelit saab kasutada ainult selliste tarindite kombinatsiooni puhul, mille kohta on

olemas andmed vibratsiooniindeksi või taandatud vibratsioonitasemete vahe kohta või on seda võimalik hinnata teadaolevate tasemete alusel. [26]

Kui homogeensete vahelaekonstruktsioonide löögiheli taandatud rõhutaset L_n on võimalik arvutada täpselt kõnealuse standardis lisa B välja toodud valemit kasutades, siis kergkonstruktsioonis vahelagede puhul puuduvad usaldusväärsed meetodid löögiheli taandatud rõhutase leidmiseks. [3]

3.2 Arvutustarkvarad

Akustika tarkvarasid hoone tarindite heliisolatsiooni hindamiseks on mitmeid. Käesolevas töös tehakse kontrollarvutused juba eelnevalt mõõdistatud vahelaekonstruktsiooni tarindi akustilisele näitajatele kasutades neist kahte – Insulit ning Bastianit, mis on erinevate akustikabüroode poolt ühed enim kasutatavad.

3.2.1 Insul

Insul on akustikatarkvara hindamiseks hoone üksiktarindite – seinte, lagede, põrandate, katuste ning akende heliisolatsiooni. Programmi on arendatud üle 20 aasta – esimene kommertsversioon tuli välja juba 1997. aastal ning tänaseks on Insul laialdaselt üle maailma akustikaettevõtete poolt kasutatav. [55] Insulil on mugav kasutajaliides ning sisseehitatud andmebaas karkassitüüpide ning ehitusmaterjalide osas, mis võimaldab kasutajal lihtsalt ja kiirelt genereerida erinevaid tarinditüüpe. Üheks oluliseks eeliseks paljude teiste hoone konstruktsioonide heliisolatsiooni arvutusprogrammide ees on asjaolu, et Insul võimaldab kasutajal sisestada andmebaasi materjale juurde. Arvutustulemused esitatakse 1/3 oktaavribas koos vastava ühenumbrihelise heliisolatsiooniindeksiga ning ühtlasi tuuakse välja ka mõned spektrilahendustegurid.

Puitkonstruktsioonis tarindite puhul võimaldab Insul kasutajal genereerida kuni kolmekihilise plaadistusega tarindeid, mille iga kihi vahel on plaate ühendav karkass ning iga kiht võib omakorda koosneda kuni kuuest plaat- või lehtmaterjalist. Karkassi puhul on programmis võimalik valida lisaks tavapärasele üherealisele karkassile ka eraldi vöödega topeltkarkass või vahelduvkarkass ühisel vööil. Muuta on võimalik karkassipostide ristõiget ja sammu ning karkassivahelist isolatsioonimaterjali.

Tarkvara kasutusjuhendis ning kodulehel ei ole detailselt välja toodud valemeid, millel Insuli arvutused täpsemalt põhinevad, ent on viidatud erinevatele teooriatele. Homogeensete plaatide õhuheli isolatsioonivõime arvutuses lähtutakse madalamatel ning keskmistel sagedustel

massiseadusest ning arvesse võetakse kointsidentsiefekti . Kointsidentsi piirsagedusest kõrgematel sagedustel kasutab programm Cremeri teooriat. [56] Õhkvahega eraldatud paneelide puhul jagatakse kogu sagedusala kolmeks või neljaks piirkonnaks sõltuvalt õhkvahe oleva karkassi ja isolatsioonimaterjali olemasolust ja tüübist ning arvutustes kasutatakse peamiselt B. H. Sharpi ning J. H. Rindeli teooriat. [55] [57] Talade mõju hindamiseks löögiheliisolatsiooni arvutuses madalsageduslikus piirkonnas kasutatakse Gibbsi jt teooriat. [56]

Insuli arvutustulemuste vastavus laborimõõtmistele on sõltuv arvutatava konstruktsiooni keerukusest. Kui lihtsamate tarindite puhul on hinnanguliseks täpsuseks ± 3 dB, siis erinevate kihtide ja komponentide lisandumisel ei suuda tarkvara enam sellist täpsust tagada. Võrdlustulemustest laborimõõtmistega on täheldatud, et vahelagede löögiheli isolatsiooni arvutamisel on programm enamike massiivsete pörandate puhul suutnud jääda täpsusvahemikku ± 3 – 5 dB ning kergkonstruktsioonide puhul, mille kogupaksus jääb väiksemaks kui 250–350 mm, ± 3 – 6 dB. Kergkonstruktsioonis pörandate, mille kogupaksus jääb vahemikku 350–750 mm, löögiheli isolatsiooni hindamisel, võib erinevus ületada ka ± 10 dB, kusjuures kolmandik oktaavribade lõikes võivad madalamatel kui 100 Hz sagedustel erinevused mõõtmistulemustega olla ka üle 10 dB. [56]

Oluline on märkida, et Insul võimaldab kiirelt hinnata tarindi õhumüra isolatsiooni ning pörandate löögi müra isolatsiooni kuid saadud tulemused ei ole ülekantavad reaalsesse olukorda ruumis, mille puhul on oluline osa ka heli kaudsel levikul läbi külgnervate piirdetarindite ning nende omavaheliste ühenduste. Samas on võimalik Insulis genereeritud tarindite arvutustulemusi kasutada sisendandmetena mitmetes teistes akustika programmides, mis võimaldavad ruumi ning ruumidevaheliste tarindite akustilist projekteerimist.

3.2.2 Bastian

Bastian on DataKustik GmbH poolt hoone akustilise projekteerimise jaoks välja töötatud tarkvara, mis võimaldab hinnata ruumidevahelist õhuheli- ning löögi müraisolatsiooni ning samuti väliskeskkonnast tuleva õhuheli isolatsiooni. Bastiani ruumidevahelise õhuheliisolatsiooni arvutused põhinevad Euroopa standardil EN 12354-1 ning löögi müra isolatsiooni arvutused vastavalt standardil EN 12354-2. Arvutused esitatakse 1/3 oktaavribades ning ühenumbriliste väärtustega vastavalt standarditele ISO 717-1 ning ISO 717-2. [5]

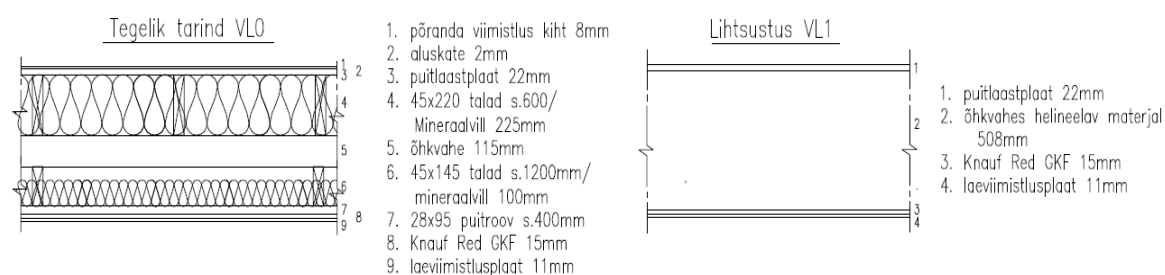
Bastianil on rikkalik sisseehitatud erinevate tarinditüüpide ning müraallikate andmebaas, millest osa konstruktsioonitüüpe põhineb eri materjalitootjate katseandmetel ning osa kirjandusest. Samuti on kasutajal võimalik elemente sisse tuua.

3.3 Teoreetilised arvutused

Käesolevas alapeatükis esitatakse peatükis 2 katsetatud vahelaetarindi õhuheli isolatsiooni ning löögimüra rõhutasemete arvutuslikud näitajad ning võrreldakse saadud tulemusi reaalsete tulemustega, mis saavutati platsimöödistusel. Õhuheli isolatsiooni arvutused vahelaetarindile tehakse nii alapeatükis 3.1.1 toodud juhiste järgi kui ka eelnevalt mainitud arvutustarkvara Insuliga. Löögimüra rõhutasemete arvutused vahelae tarindile teostatakse ainult Insuliga. Tulemusi võrreldakse objektimöödistustulemustega ning kasutatakse siirdehelide arvutuseks Bastanis. Kuna eelnevalt on teada, et Insul ei arvesta kaudsete helide ülekannet läbi külgnevate piirdetarindite ja ühenduste, eeldatakse et saadavad arvutuslikud väärtused peaksid andma möödistustulemusega võrreldes paremad näitajad.

3.3.1 Vahelae õhuheli isolatsioon

Vahelae õhuheli isolatsiooni arvutused tehakse esmalt alapeatükis 3.1.1 toodud juhiste järgi. Kuna moodulhoones on ülemise korruse põhjaelement ning alumise korruse lae element teineteisest lahus ning omavahelised kokkupuutepunktid asuvad vaid perimeetris, siis vaadeldakse vahelae lihtsustusena kui sidumata plaatidega ideaalset tarindit, mille ülemises pinnas on 22 mm puitlaastplaat ning alumises pinnas 15 mm Knauf tuletõkkekips ning 11 mm puitlaastplaadist siseviimistlusplaat. Põrandakatte jäetakse arvutusest välja, kuna ei ole teada selle materjali pinnamass ning elastsusmoodul.



Joonis 3.4 Tegelik tarind ning lihtsustus ideaalsele tarindile

Järgnevas tabelis on toodud arvutatavas tarindis esinevate plaatide heliisolatsioonivõime leidmiseks vajalikud algandmed. Tuletõkkekipsplaadi andmed on võetud Knauf'i tootekataloogist [58] ning Knauf RED GKF toote tehniliste andmete lehelt [59]. Puidupõhiste plaatide pinnamassid ning elastsusmoodulid on võetud dBBuilding uurimustöös „Sound insulation of Finnish building boards“ tehtud möödistustulemuste hulgast. [60]

Tabel 3.1 Vahelaetarindi plaatide andmed

Materjal	Paksus h , m	Pinnamass m' , kg/m ²	Elastsusmoodul E , Pa	Poissoni tegur μ	Kaotegur η
Knauf RED GKF	0,015	14,2	$2,2 \cdot 10^9$	0,25	0,2
Puitlaastplaat 1	0,011	9,2	$6,3 \cdot 10^9$	0,25	0,2
Puitlaastplaat 2	0,022	13,9	$3,4 \cdot 10^9$	0,25	0,2

Kointsidentsi piirsagedus f_c igale materjalile arvutatakse vastavalt valemile 3.1 ning tulemused on esitatud järgnevas tabelis.

Tabel 3.2 Arvutatava vahelae plaatmaterjalide kointsidentsi piirsagedused

Materjal	Kointsidentsi piirsagedus f_c , Hz	Pool kointsidentsi piirsagedusest $0,5 \cdot f_c$, Hz
Knauf RED GKF	2747	1374
Puitlaastplaat 1	2080	1040
Puitlaastplaat 2	1231	615

Tarindi ülemise ja alumise pinna plaatide heliisolatsiooniindeks eri sagedustel arvutatakse vastavalt valemile 3.2. Alumise pinna plaatide õhuheli isolatsiooni arvutusel arvestatakse pinnamassiks m' kahe plaadi pinnamasside summa.

$$m' = 14,2 + 9,2 = 23,4 \text{ kg/m}^2$$

Kointsidentsi piirsageduse väärtusena kasutame alumiste plaatide puhul madalamat väärtust ehk $f_c = 2080 \text{ Hz}$ ning $0,5 \cdot f_c = 1040 \text{ Hz}$.

Kogu tarindi heliisolatsiooni arvutamiseks vajalikud piirsagedused f_{mam} ja f_1 saame valemite 3.4 ja 3.5 abil

$$f_{\text{mam}} = 80 \sqrt{\frac{23,4+13,9}{0,508 \cdot 23,4 \cdot 13,9}} = 38 \text{ Hz} \qquad f_1 = \frac{343}{6 \cdot 0,508} = 113 \text{ Hz}$$

Järgnevas tabelis on esitatud ülemise ja alumise plaadipindade heliisolatsiooniindeksid R_1 ja R_2 , mis on arvutatud valemi 3.2 järgi ning lihtsustatud tarindi heliisolatsiooniindeks R valemi 3.3 kohaselt. Standarditud helitasemete vahe väärtused on saadud vastavalt seosele 1.15, kasutades ruumi kubatuuri ning eraldava tarindi pindalana objektimöödistuse ruumi andmeid $V=36,7 \text{ m}^3$ ning $S_S=15,3 \text{ m}^2$.

Tabel 3.3 Vahelae heliisolatsiooniindeksi ning standarditud helitasemete vahe arvutuslikud tulemused ning $D_{nT,w}$ väärtuse määramine

Sagedus f (Hz)	R_1 , dB	R_2 , dB	R , dB	D_{nT} , dB	ISO 717-1 Võrdlusköver, dB	Ebasoodne hälve, dB
50	13,4	8,8	21,3	20,1	-	-
63	15,4	10,8	27,3	26,2	-	-
80	17,4	12,9	33,5	32,3	-	-
100	19,4	14,9	39,4	38,3	44	5,7
125	21,3	16,8	44,1	43,0	47	4,0
160	23,5	18,9	48,4	47,3	50	2,7
200	25,4	20,9	52,3	51,2	53	1,8
250	27,3	22,8	56,1	55,0	56	1,0
315	29,4	24,8	60,2	59,1	59	0,0
400	31,4	26,9	64,3	63,2	62	0,0
500	33,4	28,8	68,2	67,1	<u>63</u>	0,0
630	35,4	26,5	67,9	66,8	64	0,0
800	37,4	23,6	67,0	65,9	65	0,0
1000	39,4	20,1	65,5	64,4	66	2,6
1250	37	15,7	58,7	57,6	67	9,4
1600	34,7	27,7	68,4	67,3	67	0,0
2000	32,2	35,8	74,0	72,9	67	0,0
2500	29,3	39,9	75,2	74,1	67	0,0
3150	38,0	43,7	87,7	86,6	67	0,0
4000	45,0	47,4	98,4	97,3	-	-
5000	49,5	50,7	106,2	105,1	-	-

Ebasoodsate hälvetete summa $27,2 \text{ dB} \leq 32 \text{ dB}$, seega $D_{nT,w} = 63 \text{ dB}$.

Lisaks leiame vastavalt standardis EVS EN ISO 717-1:2013 toodud juhiste järgi spektrilähendusteguri $C_{50-3150}$.

Tabel 3.4 Vahelae R_w , $D_{nT,w}$ ja $D_{nT,w,50}$ arvutustulemused ning tulemuste erinevus tegeliku tarindi mõõmistulemustega

	R_w , dB	$D_{nT,w}$, dB	$\Delta D_{nT,w}$, dB	$C_{50-3150}$, dB	$D_{nT,w,50}$, dB	$\Delta D_{nT,w,50}$, dB
Vahelagi VL1	64	63	+2	-8	55	-3

Arvutustarkvaras Insul on küll olemas mahukas andmebaas erinevatele materjalidele, ent kuna tarkvara võimaldab ka kasutajal uusi materjale sisestada ja et arvutustulemused oleksid paremini võrreldavad eelnevalt saadud tulemustega ning võimalikult lähedased reaalse vahelaega, siis sisestati programmi arvutuse tarbeks tabelis 3.1 kirjeldatud parameetrite põhjal uued plaatmaterjalid. Töö teostamise käigus selgus, et tarkvara iseärasuste tõttu ei ole võimalik Insulis modelleerida arvutuse jaoks täpset tegelikkusele vastavat tarindit, mistõttu tuli teha teatud

lihtsustusi. Kokku moodustati neli erinevat vahelae varianti VL2, VL3, VL4 ja VL5. Kõigi puhul on jäetud ülemise ja alumise plaadi vaheline kaugus samaks.

VL2 puhul kasutati õhkvahega eraldatud karkassi. Karkasside vaheline õhkvahe on ligikaudu sama nagu tegelikul tarindil. Samuti on villa kogupaksus sama nagu tegelikul tarindil. Karkasside ja villa kogupaksus on jaotatud võrdselt ülemise ja alumise elemendi vahel ning puudub laeplaadi tagune roovitus.

VL3 lihtsustuse puhul on kasutatud aluseks kolmekordse plaadistusega tarindit, et oleks võimalik lisada ka laeplaadi tagused roovid. Vältimaks jäiga plaadi olemasolu roovide ja laetalade vahel valiti talade ja roovide vahele 0,4 mm mineraalvillaplaadi kiht. Õhkvahe pörandi ja laeelemendi vahel on jäetud jällegi võimalikult lähedane tegelikule tarindile. Sellise lahenduse puhul lubab Insul kasutada pörandi ja laeelemendi talastiku erinevat sammu, mida VL2 variandi puhul programm ei võimaldanud.

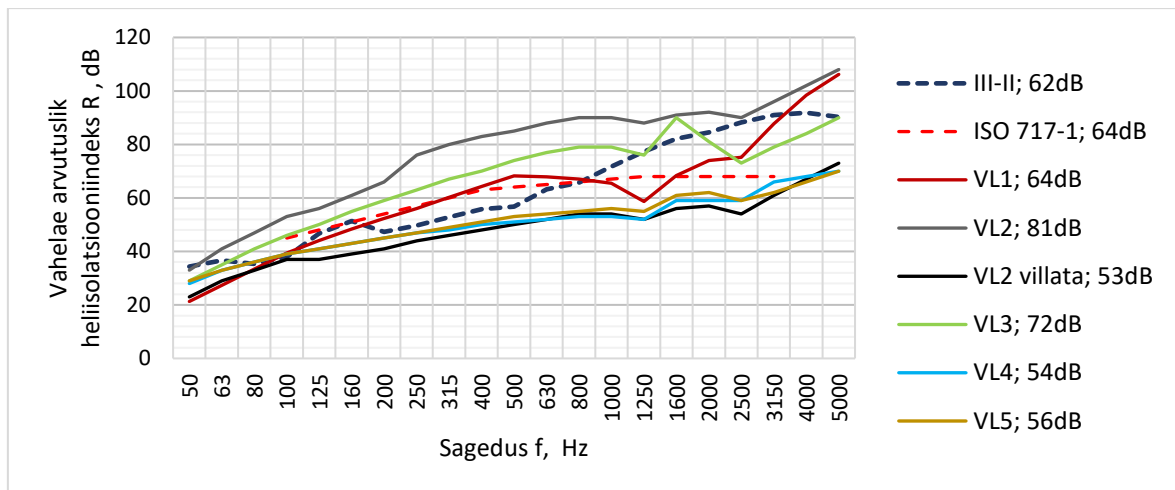
VL4 puhul on kasutatud pörandi ja lae elemendi vahel õhkvahe asemel elastsetel kummipuksidel riputeid imiteerimaks pörandi ja laeelemendi kontakti perimeetris.

VL5 puhul moodustati lihtne ühekordse karkassiga tarind, mille tala samm on viidud maksimumini, mida programm võimaldas (3 m).

Täpsed joonised kõikidest lihtsustusvariantidest on toodud lisas. Samuti on esitatud lisas väljavõtted Insuli arvutustulemustest. Vahelae $D_{nT,w}$ väärtus on arvutatud Insulis saadud tulemuste baasil ning seose 1.15 abil kasutades objektimõõdistuse ruumi andmeid $V=36,7 \text{ m}^3$ ning $S_S=15,3 \text{ m}^2$. Lisaks on arvutatud kõikidele vahelae lihtsustustele ka spektrilähendustegur $C_{50-3150}$ ning tulemused esitatud alljärgnevas tabelis.

Tabel 3.5 Vahelae R_w , $D_{nT,w}$ ning $D_{nT,w,50}$ Insulis saadud arvutustulemused ning tulemuste vahed $\Delta D_{nT,w}$ ja $\Delta D_{nT,w,50}$ tegeliku tarindi mõõmistulemustest

	R_w , dB	$D_{nT,w}$, dB	$\Delta D_{nT,w}$, dB	$C_{50-3150}$, dB	$D_{nT,w,50}$, dB	$\Delta D_{nT,w,50}$, dB
Vahelagi VL2	81	80	+19	-11	69	+11
Vahelagi VL2 villata	53	52	-9	-2	50	-8
Vahelagi VL3	72	71	+10	-8	63	+5
Vahelagi VL4	54	53	-8	-1	52	-6
Vahelagi VL5	56	55	-3	-2	53	-5



Joonis 3.5 Lihtsustatud vahelagede (VL1-VL5) arvutuslikud heliisolatsiooniindeksi tulemused ning tegeliku tarindi objektimõõdistusel (III-II) saadud tegelike heliisolatsiooniindeksite tulemused. Legendis on kajastatud ka vastavate tulemuste kaalutud väärtused

Tulemustest selgub, et eelnevalt käsitletud vahelae konstruktsiooni puhul annab lihtsustus ja arvutus nn ideaalsele tarindile suhteliselt täpse ühenumbrielse tulemuse võrreldes mõõdistusega, ületades $D_{nT,w}$ puhul mõõdistustulemust 2 dB võrra ning jäädes $D_{nT,w,50}$ puhul 3 dB alla. Arvestades asjaolu, et arvutusest jäeti välja põrandaviimistluskihi (laminaatparkett) mõju, mis eeldatavasti suurendaks läbi pinnamassi lisandumise vastavalt valemile 3.2 ülemise plaadi heliisolatsiooniindeksi väärtust ning seeläbi ka kogu tarindi arvutuslikku heliisolatsiooniindeksi tulemust, oleks tõenäoliselt ka $D_{nT,w,50}$ arvutuslik tulemus mõõdistusele lähemal olnud või seda ületanud ning eeldusele paremini vastanud.

Insulis teostatud arvutustest andis lähima tulemuse $D_{nT,w}$ ning $D_{nT,w,50}$ võrdluses mõõdistustulemusega lihtsustus VL5 ent kuna tulemus on kehvem reaalistest mõõtmistulemustest ja siirdehelide levik eelduste kohaselt halvendaks saadud väärtusi veelgi, siis loeme antud konstruktsiooni puhul õhuheli isolatsiooni arvutamiseks kõige paremini töötavaks lihtsustuseks VL3-e.

Vaadates erinevate lihtsustuste arvutustulemuste suurt varieeruvust võrreldes tegeliku tulemusega võib siiski öelda, et ehkki vaadeldav vahelagi liigitub moodulhoonetes kasutatavate erinevate võimalike vahelagede hulgas lihtsamate hulka, on arvutuse põhjal täpse õhuheli isolatsiooni väärtuse väljaselgitamine ka sellist tüüpi vahelae puhul, kus plaadid paiknevad vaid ülemises ja alumises pinnas, praktiliselt võimatu. Kui on tehtud reaalne mõõdistus ning teada erinevate lihtsustuste vastavad tulemused Insulis, on võimalik tarkvara abil siiski mõnevõrra hinnata plaatide vahetusest, lisamisest või eemaldamisest tulenevat efekti tarindi heliisolatsiooniindeksi ühenumbrielsele tulemusele. See aga omakorda eeldab jällegi kõikide plaatide võimalikult täpseid andmeid elastsusmooduli ning pinnamassi osas.

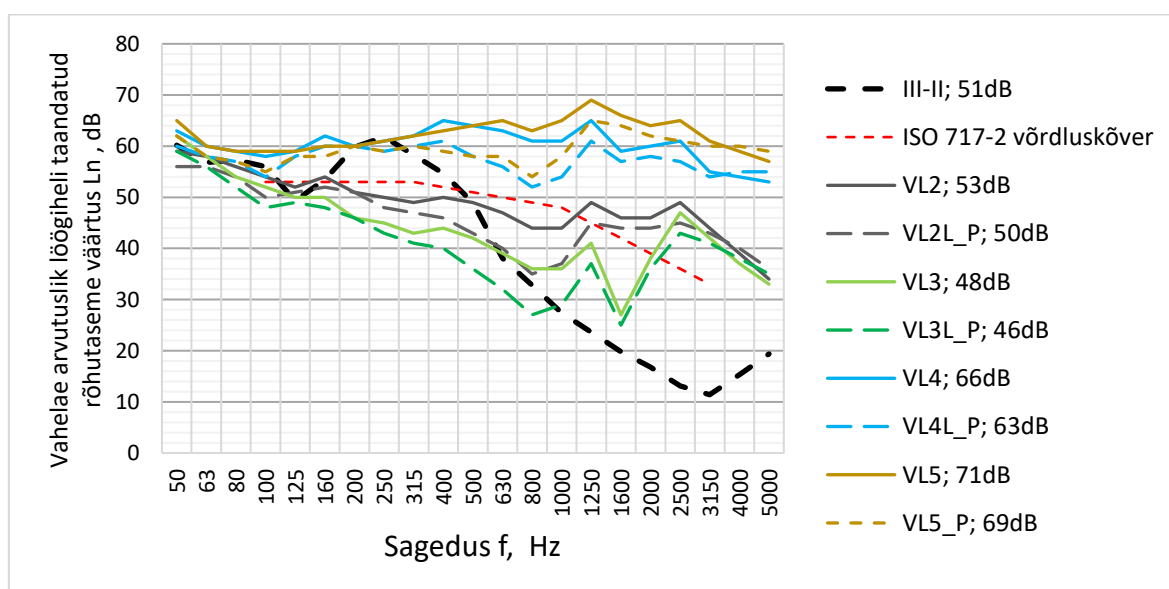
3.3.2 Vahelae löögiheli rõhutasemete arvutus

Vahelagede löögiheli rõhutasemete arvutus viidi läbi samuti kasutades arvutustarkara Insul 9.08. Vahelagede lihtsustused on samad nagu õhuheli isolatsiooni arvutuse puhul. Lisaks on tehtud arvutus ka pörandaviimistluskihiga kasutades tarkvara andmebaasis olnud 7 mm laminaatparketti 2 mm alusvaibal. Pörandaviimistluskihti kasutatud arvutusetel on nimekoodi lõppu lisatud tähis P.

Lisaks arvutati Insulist saadud $L_{n,w}$ tulemuste põhjal $L_{nT,w}$ väärtused vastavalt seosele 1.18 ning kasutades kubatuurina objektimõõdistuse ruumi andmeid $V=36,7\text{m}^3$ ning spektrilähendustegurid $C_{I,50-2500}$ vastavalt standardis EVS-EN ISO 717-2:2013 lisas A toodud juhiste.

Tabel 3.6 Vahelae $L_{n,w}$, $L_{nT,w}$ ning $L_{nT,w,50}$ Insulis saadud arvutustulemused ning tulemuste vahed $\Delta L_{nT,w}$ $\Delta L_{nT,w,50}$; tegeliku tarindi mõõmistulemustest

	$L_{n,w}$, dB	$L_{nT,w}$, dB	$\Delta L_{nT,w}$, dB	$C_{I,50-2500}$, dB	$L_{nT,w,50}$, dB	$\Delta L_{nT,w,50}$, dB
Vahelagi VL2	53	52	-2	-3	49	+3
Vahelagi VL2_P	50	50	0	-2	48	+4
Vahelagi VL3	48	47	+3	+2	49	+3
Vahelagi VL3_P	46	46	+4	+1	47	+4
Vahelagi VL4	66	66	-16	-7	59	-7
Vahelagi VL4_P	63	63	-13	-7	56	-4
Vahelagi VL5	71	70	-20	-9	61	-9
Vahelagi VL5_P	69	67	-17	-8	59	-7



Joonis 3.6 Lihtsustatud vahelagede (VL2-VL5) arvutuslikud löögiheli taandatud rõhutaseme väärtused ning tegeliku tarindi objektimõõdistusel (III-II) saadud löögiheli taandatud rõhutaseme väärtused. Legendis on kajastatud ka vastavate tulemuste kaalutud väärtused

Vahelaelemendile tehtud arvutustulemustest selgub, et teoreetiliste löögimüra isolatsiooni näitajate võrdluses tegeliku tarindi mõõdistustulemusega andis lähima tulemuse lihtsustus VL2, mille variatsioon pörandaviimislusega VL2_P $L_{nT,w}$ väärtuse erinevus tegelikust oli koguni olematu ning $L_{nT,w}$ andis 4 dB võrra parema tulemuse. Seejuures on oluline märkida, et sama lihtsustus õhuheli osas ei toiminud, andes $D_{nT,w}$ väärtuse koguni 19 dB ning $D_{nT,w,50}$ väärtuse 11 dB parema tulemuse võrreldes objektimõõdistusega. Sarnaselt lihtsustusega VL2 näitab ka lihtsustus VL5 R_w puhul head korrelatsiooni tegelikkusega, olles 6 dB võrra madalam, ent ei sobinud jällegi $L_{nT,w}$ arvutuseks, andes võrdluses objektimõõdistusega vahe koguni 17 dB. Kokkuvõttes võib öelda, et kõige paremini toimis vaadeldud vahelae puhul lihtsustus VL3, mis andis nii õhuheli isolatsiooni kui löögiheli isolatsiooni näitajate arvutuses kaalutud väärtuste võrdluses platsimõõdistustulemustega pisut paremad tulemused ning kuna Insul ei arvesta kaudse heli levikuga vastavad seetõttu VL3 tulemused kõige paremini peatüki 3.3 alguses tehtud eeldustele.

3.3.3 Siirdehelide arvutus Bastianis

Siirdehelide arvutus vahelaele tehti Bastianis kasutades Insulis saadud vahelae lihtsustuse VL3 tulemusi. Külgnevate elementide tarbeks tehti eelnevalt Insulis arvutused ka kõikidele moodulis katsetatud ruumis esinenud seinatüüpidele, mis on tähistatud järgnevalt – 70SS ruumide vaheline sisesein, VS – mooduli välissein; MVS I mooduli pika külje sein; MVS II mooduli pika külje sein püstitatud hoones, koosneb kahest MVS I, mis on eraldatud 30 mm õhkvahega. Seinte arvutustulemuste väljavõtted on toodud lisas.

Bastianis koostati eelnevalt Insulis arvutatud tarinditest kolmemõõtmeline ruum, mille suurus vastas ligikaudselt reaalsele olukorrale. Tubade kõrguseks määrati 2,5 m, laiuks 3,6 m ning ruumi külgmiste seinte pikkuseks 4 m.

Moodustati 3 arvutusmodelit:

Arvutusmodel I – ruum moodustati eraldiseisva mooduli põhiselt, st kasutati pikkades külgedes seinu MVS I. Mooduli ühes otsaseinas kasutati välisseina VS ning selle vastas siseseina 70 SS. Siseseina ja pörandaelemendi sõlmetüübiks valiti sõlm 19, mille korral vahelaelement jätkub teisel pool siseseina, ülejäänud külgedes sõlmetüüpi nr 20.

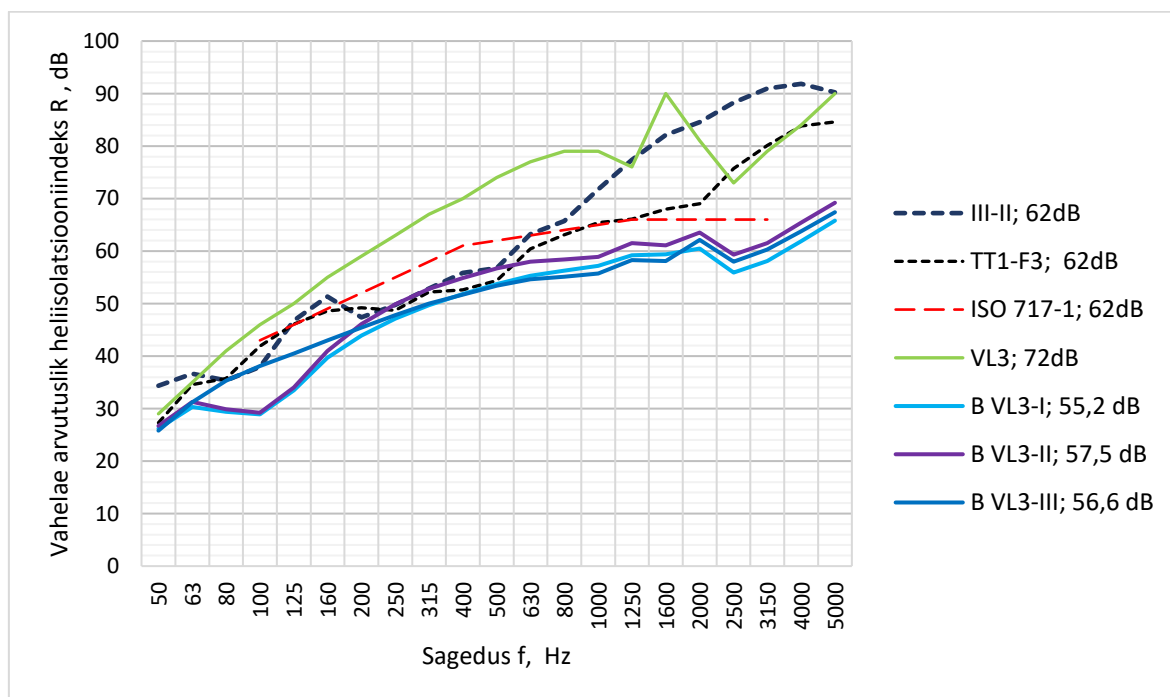
Arvutusmodel II – analoogne arvutusmodelile I. Erinevus mooduli pikkade külgede seintes, milleks kasutati topelttarindust MVS II, eesmärgiga proovida mudel viia rohkem vastavusse olukorraga, mil moodulid on hooneks kokku monteeritud.

Arvutusmodel III – see model koostati ühte siseseinteta ruumi sisaldava mooduli põhimõttel. Otsaseintena on kasutatud välisseina VS ning külgliseintena ühekordseid mooduli seinu MVS I.

Arvutusmodelite põhimõttelised skeemid on toodud lisas ning samuti on lisas toodud arvutustulemuste väljavõtted kõigile kolmele modelile.

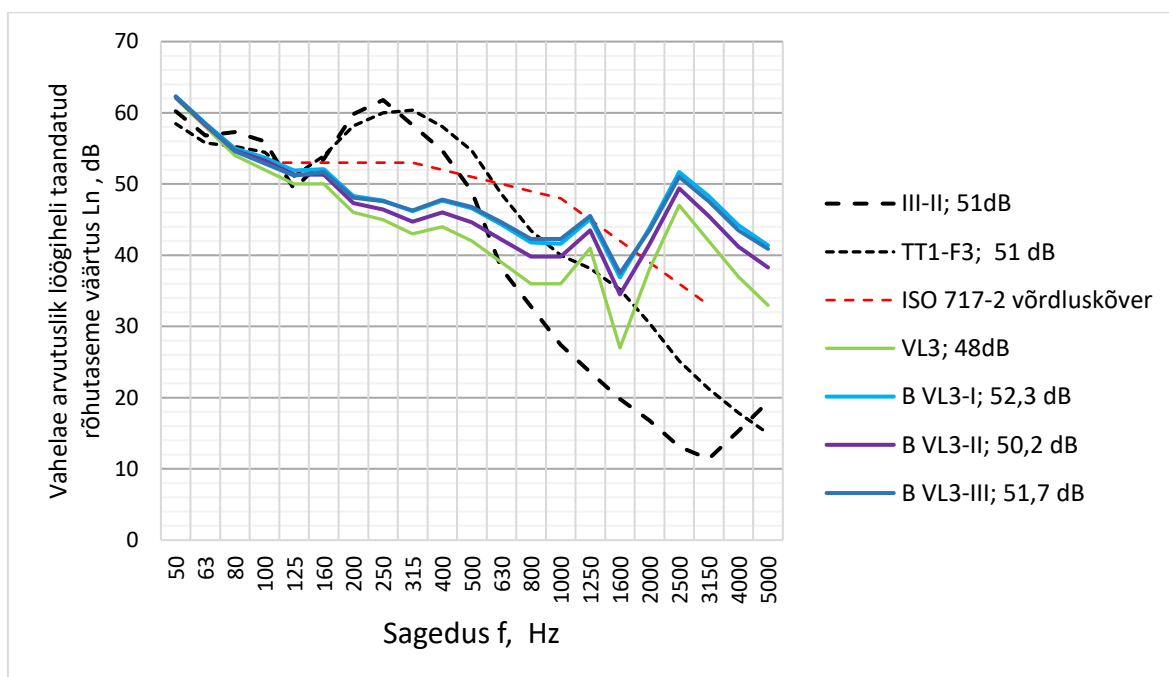
Tabel 3.7 Bastianis koostatud arvutusmodelite tulemuste kokkuvõte

	Element	Sõlm	Arvutusmodel I				Arvutusmodel II				Arvutusmodel III			
			R_w		$L_{n,w}$		R_w		$L_{n,w}$		R_w		$L_{n,w}$	
			dB	%	dB	%	dB	%	dB	%	dB	%	dB	%
d	VL3		68,2	5	47,7	32	70	6	47,7	54	68,5	6	47,7	36
f1	70 SS	19	59,4	41	45,5	19	64	64	45,5	32	-	-	-	-
f1_III	VS	20	-	-	-	-	-	-	-	-	62,7	24	41,9	9
f2	VS	20	62,7	19	41,9	8	62,7	30	41,9	14	62,7	24	41,9	9
f3	MVS I	20	63,1	17	45,7	20	-	-	-	-	63,1	22	45,7	23
f4	MVS I	20	63,1	17	45,7	20	-	-	-	-	63,1	22	45,7	23
f3_II	MVS II	20	-	-	-	-	97,6	0,	19,6	0,	-	-	-	-
f4_II	MVS II	20	-	-	-	-	97,6	0,	19,6	0,	-	-	-	-
Kokku (dB):			55,2		52,3		57,5		50,2		56,6		51,7	



Joonis 3.7 Arvutuslike heliisolatsiooniindeksi tulemuste võrdlus reaalse mõõdistustulemusega. Legendis nimetuse järgi toodud ka vastavad kaalutud väärtused. III-II tähistab objektimõõdistust, TT1-F3 vastavat tulemust tehasekatsetusel, VL3 – Insulis saadud arvutuslik tulemus ning esitähisega „B“ vastavad tulemused Bastiani arvutustest

Siirdehelide arvutustulemusest selgub, et õhuheli isolatsiooni puhul kandub otse läbi tarindi kõikide arvutusmodelite puhul väga väike osa ning suurem osa kandub edasi siirdehelidena läbi ruumi seinte. Samas arvutusmodelite I ja II tulemused, kus siirdehelide kõige suurem osakaal langeb siseseinale, on tugevalt kaheldav, kuna reaalses olukorras on siseseiina kohal vahelaetarindi moodustava ülemise korruse põhjaelement ning alumise korruse laeelement teineteisest eraldatud, mistõttu peaks suurem osa heliülekannetest siiski toimuma mooduli välisperimeetris olevate seinte kaudu, kus on olemas moodulite vaheline otsene kontakt. Kuna Bastianis on kergkonstruktsioonis sõlmede puhul valikus ainult kaks sõlme, siis ei ole võimalik taolise olukorra kohta nagu moodulites siseseiinte tõttu tekib, tarkvaras adekvaatset arvutusmodelit koostada. Üheruumilise mooduli puhul, mida kirjeldas arvutusmodel III, on võimalik saada reaalsele olukorrale lähedasemaid tulemusi. Kaalutud tegeliku heliisolatsiooniindeksiga võrreldes on arvutusmodeliga III saadud tulemus 5,4 dB võrra halvem. Tegelik ja arvutusliku heliisolatsiooni graafikud on suhteliselt heas korrelatsioonis kuni sagedusribani 800 Hz. Kõrgematel sagedustel ulatuvad erinevused üle 30 dB.



Joonis 3.8 Arvutuslike taandatud löögiheli rõhutasemete väärtuste tulemuste võrdlus reaalse mõõdistustulemusega. Legendis nimetuse järgi toodud ka vastavad kaalutud väärtused. III-II tähistab objektimõõdistust, TT1-F3 vastavatu tulemust tehasekatsetusel, VL3 – Insulis saadud arvutuslik tulemus ning esitähisega „B” vastavad tulemused Bastiani arvutustest

Löögiheli taandatud rõhutasemete puhul langes seintele arvutuslikult väiksem siirdehelide osakaal ning suurem osa müra tuli hinnanguliselt otse läbi vahelae kõigi kolme mudeli puhul. Siinkohal tekitab jällegi kahtlusi siseseinale langev protsent arvutusmodelite I ja II puhul. Samuti ei ole korrektne arvutusmodeli II puhul külgmistest moodulivahelistest seintest tulenev nulli lähedane

osakaal. Viimase puhul on kitsaskohaks jällegi piirangud arvutusmodeli koostamisel sõlmede valiku vähesuse tõttu, mis ei võimalda koostada reaalse moodulhoonega sarnast olukorda, kus üks osa seinast MVS II on kõrvalmooduli osa ning moodulite vahed on tihendatud.

Löögiheli taandatud rõhutasemete arvutuse puhul saavutati Bastianiga siirdehelide mõju lisamisel reaalsete mõõdistustulemustega võrreldes väga lähedased löögiheli kaalutud taandatud rõhutasemete tulemused, jäädes kõigest +0,8 kuni -1,3 dB piiresse. Samas Jooniselt 3.8 on näha, et sageduste 1/3 oktaavribade lõikes annab arvutuslik tulemus reaalse mõõdistustulemusega lähedase tulemuse ainult väga väikeses osas madalamatel sagedustel kuni 160 Hz-ni. Ülejäänud osas küündivad erinevused isegi kuni pea 40 dB, mistõttu ei saa tulemusega rahul olla.

3.4 Arvutustulemuste kokkuvõte ja järeldused

Arvutustulemustega saadi lõpuks pärast siirdehelide leviku mõjude arvestamist Bastianis võrreldes reaalsete objektimõõdistustulemustega lähedased ühenumbriks kaalutud väärtused, kus arvutuslik kaalutud heliisolatsiooniindeks R_w jäi kaalutud tegelikust heliisolatsiooniindeksi $R'_{w,w}$ väärtusest 5,4 dB võrra väiksemaks ning $L_{n,w}$ ja $L'_{n,w}$ vahe sama arvutusmodeli puhul jäi alla 1 dB. Selline täpsus on siiski pigem saavutatud arvutuse esimeses etapis vahelae lihtsustusvariantide tulemuste vahel tehtud teadlike valikute tulemusena, kuna antud olukorras oli ette teada reaalne mõõtmistulemus. Graafikutelt 3.5 kuni 3.8 on näha suured erinevused arvutuslike ning reaalsete tulemuste vahel eri sagedusribades, mistõttu tuleb tõdeda, et ka vaadeldud vahelae osas, mis liigitub moodulhoonete puhul lihtsamate hulka, ei ole võimalik tarkvaraga piisavalt usaldusväärseid andmeid saada.

Suurimaks probleemiks mõlema tarkvara puhul on piirangud täpsete reaalsele olukorrale vastavate arvutusmodelite sisestamiseks. Ka lihtsamad moodulhoonete vahelagede konstruktsioonid on Insulisse sisestamiseks liiga keerulised, mistõttu on vaja teha teatud lihtsustusi. Seejuures raskendatud on nii õhkvahe imiteerimine kui ülemise ja alumise vahelae osa erinevate karkassi sammude sisestamine. Kui ei ole eelnevalt võrdlusmomenti kuidas mingit tüüpi vahelae konstruktsioon akustiliselt toimib on erinevate võimalike lihtsustuste hulgast õige valiku tegemine praktiliselt võimatu. Samuti on väga oluline, et arvutuseks kasutatakse plaatmaterjalide õigeid parameetreid – pinnamassi ning elastsusmoodulit, mida on tegelikkuses aga paljude plaatmaterjalide ja viimistlusplaatide puhul väga raske leida. Tarkvara ei suuda vahet teha ka plaatide kinnitusviisidel nagu liimimine või kruvimine, klammerdamine, mis võib tulemustesse tuua samuti erinevusi.

Bastiani puhul on oluliseks piiranguks moodulhoones esinevate võimalike sõlmedele vastavate sõlmilahenduste puudumine. Programmis oli kergkonstruktsioonis elementide liitumissõlmedele kõigest kaks valikut, mis kirjelduse järgi põhinesid tegelikult kahekordsete plaattarindiga elementide liitumissõlmedel, mistõttu kolmekordse või ühekordse plaadistusega kergtarindite kasutamisel on siirdehelide osakaalu arvestuslikud tulemused tõenäoliselt suurema kõrvalekaldega reaalselt olukorrast. Samas Bastiani poolt arvutusmudeli III puhul saadud siirdehelide tulemuste osas võib objekti ja tehasemöödistusel kogetu põhjal väita, et nende suurusjärgud võivad olla tegelikkusele lähedal. Nimelt oli objektil õhuheli isolatsiooni mõõtmisel vastuvõtvas ruumis kuulda heli kostumist seintest, mitte vahelaest. Löögimüra puhul tuli suurem osa müraest ikkagi vahelaest.

Positiivseks võib lugeda esimesena tehtud õhuheli isolatsiooni teoreetilist arvutust ideaalse tarindina, mis andis antud konstruktsiooni puhul üllatavalt hea tulemuse, erinedes reaalsest möödistusest kõigest 2 dB võrra. Seega võib väita, et teatud lihtsamate vahelaest tarindite korral, kus plaadistus on vaid ülemises ja alumises pinnas ning on teada plaatide täpsed parameetrid, on võimalik antud lähenemist kasutada tarindi kaalutud heliisolatsiooniindeksi esialgseks ligikaudseks hindamiseks või plaatide asendamise mõju ligikaudseks hindamiseks.

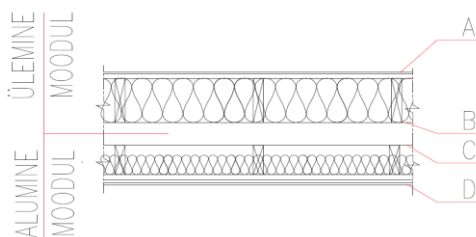
4 MOODULHOONETE VAHELAGEDE HELIISOLATSIOONINÕUETE TAGAMINE.

4.1 Projekteerimisfaas

Eelneva peatüki tulemustest selgus, et puitmoodulhoonete vahelagede akustilise toimivuse hindamine tarkvarade abil on keeruline ja tulemused võivad olla ettearvamatud, mistõttu tuleb tulemustesse suhtuda ettevaatlikkusega ning ainult arvutustele tuginedes ei ole võimalik ennustada vahelagede tegelikke väärtusi kaalutud heliisolatsiooniindeksi ning löögiheli kaalutud rõhutasemetele. Sellest tulenevalt on vahelagede projekteerimine heliisolatsiooninõuete tagamise osas reaalseid mõõtmistulemusi omamata ülimalt keeruline. Järgnevalt tuuakse välja olulised aspektid, mida moodulhoonete vahelagede projekteerimise juures võiks arvesse võtta tagamaks tarindi akustiliselt parem toimivus.

4.1.1 Vahelae konstruktsioon

Konstruktsioonitüüpide valik saab alguse lähteülesandest ning hoone staatika lahendamisest. Seoses moodulhoonete vahelae olulise eripäraga, kus lõplik vahelae element moodustub alles peale hoone monteerimist ülemise ja alumise mooduli elementide kombinatsioonis, on võimalik ülemise mooduli põrandatalade alla ning alumise mooduli laetalade peale lisada erinevaid plaatmaterjale. Põhjuseid sellisteks lahendusteks võib olla nii staatikaarvutustest lähtuvaid kui monteerimise lihtsustamiseks, vahelae villa ja muude materjalide kaitseks ilmastiku eest või põrandaelemendi villa toestamiseks. Vahelae helipidavuse seisukohalt joonisel 4.1 toodud pindades B ja C jäiga plaadistuse kasutamine mõistlik ei ole, kuna halvendab oluliselt nii löögiheli kaalutud taandatud rõhutaseme kui kaalutud heliisolatsiooniindeksi väärtusi. Uuringud on näidanud, et pinnas C vineeri kasutamine ei halvenda vahelae akustilisi omadusi vaid juhul, kui vastav plaat on perforeeritud vähemalt 40% ulatuses (190 mm avade puhul) ning pinnas B plaadistus puudub. [61]



Joonis 4.1 Vahelae tarind moodulhoones

Kui pinnas C plaadi kasutamine staatika seisukohalt on hädavajalik, siis kindlasti ei tohiks pinnas B plaati kasutada, kuna lähestikku asetsevate plaatide vahel tekkiv mass-õhk-mass resonantssagedus tekitab kaalutud heliisolatsiooniindeksi väärtuse määramisel olulistes sagedusribades heliisolatsiooni graafikus nõrgestuse, mis võib viia tarindi õhuheli isolatsiooni nõuetele mittevastavaks. Kahe plaadi vahelise mass-õhk-mass resonantssagedust tarindites, kus plaadistus ainult kahes pinnas, on võimalik määrata eelmises peatükis toodud valemi 3.5 abil. Kolme plaadi puhul saab plaatide vahel tekkivaid resonantssagedusi hinnata alljärgnevale valemitega: [62]

$$f_1 = \frac{\sqrt{2}}{4\pi} \sqrt{\frac{\lambda_1 + \lambda_2 - \sqrt{(\lambda_1 - \lambda_2)^2 + 4k_1k_2m_1^2m_3^2}}{m_1m_2m_3}} \quad (4.1)$$

$$f_2 = \frac{\sqrt{2}}{4\pi} \sqrt{\frac{\lambda_1 + \lambda_2 + \sqrt{(\lambda_1 - \lambda_2)^2 + 4k_1k_2m_1^2m_3^2}}{m_1m_2m_3}} \quad (4.2)$$

kus $\lambda_1 = k_1m_3(m_1 + m_2)$,

$\lambda_2 = k_2m_1(m_2 + m_3)$,

$k_i = \rho_0c_0^2/d_i$,

m_1, m_2, m_3 – plaadikihtide pinnamassid, kg/m²,

k_i – i-nda õhkvahe ekvivalentne jäikus,

ρ_0 – õhu tihedus, kg/m³,

d_i – i-nda õhkvahe sügavus, m.

Tarindi parema akustilise toimivuse saavutamiseks on oluline viia mass-õhk-mass resonantssagedused võimalikult madalaks, soovitatavalt alla 50 Hz.

Kuna plaatide vahekaugus on otseses seoses tala ristlõike kõrgusega, siis eelnevalt mainitud põhjusel võiks ristlõike valikul eelistada suurema ristlõikega talasid. Teine põhjus suuremate ristlõigete eelistamisele on see, et üldjuhul väiksema ristlõike peale minnes võib olla vajalik vähendada ka talade sammu. Plaadi taguse taladest moodustunud ribistiku tihedus mõjutab taladele kinnitatud plaadi omasagedust, millel välise ergutuse tulemusel tekkiv resonants tekitab samuti nõrgestusi heliisolatsiooni graafiku vastavates sagedusribades. Talastikule toetuva plaadi omasageduse saab leida järgneva valemiga: [63]

$$f_{11} = \gamma \frac{c^2}{4f_c} \left(\left(\frac{1}{l_x} \right)^2 + \left(\frac{1}{l_y} \right)^2 \right) \quad (4.3)$$

kus f_c – plaadi kointsidentsi sagedus, Hz,

l_x ja l_y – taladele toetuva plaadiosa mõõtmed meetrites x ja y suunal, kus x ühtib talade sammuga, γ – sõltuv tegur, mis jääb enamasti vahemikku 1.3 kuni 2. Väärtust 2 sobib kasutada näiteks täisklammerduse puhul.

Tabel 4.1 Plaadi taga oleva karkassi sammu mõju plaadi omasagedusele erinevate f_c väärtustega plaatide korral

	f_{11} (Hz), kui $l_x=0,1$ m	f_{11} (Hz), kui $l_x=0,3$ m	f_{11} (Hz), kui $l_x=0,6$ m
Plaat 1, $f_c=3500$ Hz	1682	189	49
Plaat 2, $f_c=2500$ Hz	2353	265	69
Plaat 3, $f_c=1500$ Hz	3926	441	115

Omasageduspiirkonnas plaadis tekkiva resonantsi negatiivset mõju heliisolatsioonile saab suure osa plaatide puhul vältida valides plaadi taga oleva talastiku sammuks ligikaudu 0,6 või siis 0,1 meetrit. 0,3 meetri ja selle lähedusse valitud talade samm viib sageduse f_{11} R_w suhtes ebamugavasse piirkonda, mis avaldab kaalutud heliisolatsiooniindeksile suuremat mõju, kui juhud, mil f_{11} on viidud piisavalt madalaks või siis kõrgematele sagedusaladesse, mis nii suurt mõju R_w indeksile ei avalda.

Plaatide puhul on oluliseks nõrgestuskohaks heliisolatsioonis ka kointsidentsi sagedus f_c , millest võib täpsemalt lugeda RIL 243-1-2007 juhendmaterjalist. Kointsidentsi nähtusest tulenevad nõrgestuskohad on hästi väljajoonistunud ka käesoleva töö raames teostatud teoreetilistes arvutustes nii õhuheli isolatsiooni kui löögheli rõhutasete graafikutel, ent tegelikel mõõdistustel saadud tulemuste graafikutel on need vähesel määral aimatavad vaid õhuheli isolatsiooni puhul. Viimane võib osaliselt olla tingitud asjaolust, et mõõdistatud tarindis oli olemas ka põrandaviimistluskate, mida teoreetilise arvutuse puhul ei arvestanud. Kui kasutatakse mitut eri tüüpi plaati, mille f_c sagedused ei ühti, siis ühe plaadi nn kointsidensti lohu katavad mingil määral ära teiste plaatide õhuheli isolatsiooni võimed vastaval sagedusel. Teine põhjus peitub ilmselt siirdehelide suhteliselt suures osakaalus läbi seinatarindite, mis tuli välja Bastiani arvutusel ja mida kinnitab ka reaalsel mõõdistustel kogetu. Eelnevat arvesse võttes võib öelda, et f_c sageduse mõju moodulhoone vahelae akustilisele toimivusele on oluline pigem jälgida juhul, kui kõikidel või suuremal osal kasutatavatel plaatidel langeb f_c sagedus sarnasesse piirkonda või kui enamusel plaatidest jääb see keskmistele sagedustele, mitte kõrgematesse.

Mineraalvilla kasutamine moodulhoone vahelae tarindis talade vahel on moodulhoone puhul vajalik resonantsi põhjustavate seisulainete tekke vältimiseks ning seeläbi tarindi paremate akustiliste omaduste tagamiseks. [3] Seejuures on oluline eelistada pehmeid minerallvilla tooteid. Katsed mineraalvilla tiheduse mõju vahelae löögheli kaalutud taandatud rõhutasele on

näidanud, et tavapärase pehme mineraalvilla asendus tihedama vastu on halvendanud $L'_{n,w} + C_{L,50-2500}$ väärtust 1 dB võrra. [61] Kui suur on villa tiheduse mõju vahelae akustilisele toimele sõltub ka vahelae konstruktsiooni tüübist, seega mainitud katse tulemust ei saa kanda üks-ühele üle kõikidele vahelagedele.

4.1.2 Moodulitevaheline sõlm

Vibratsiooni isolatsiooni materjalide valik on lai mistõttu valiku tegemine võib projekteerijal olla keeruline ning igale projektile tuleks läheneda individuaalselt. Teises peatükis tehtud mõõtmistulemuste analüüsist selgus, et vahematerjali kasutamine moodulite vahel ei ole alati õigustatud ning halva valiku või teatud materjali kasutamine valedes koormusvahemikes võib tulemusi koguni halvendada võrreldes olukorraga, mil vahematerjali ei kasutata. Vibratsiooni isolatsiooni materjali mitte kasutamist võiks kaaluda eelkõige kahekorruseliste hoonete puhul, kui alumise korruse moodulite vahelagedele langevad koormused on väikesed ning ülemise ja alumise korruse vaheliste ühendussidemete hulk ei ole väga suur.

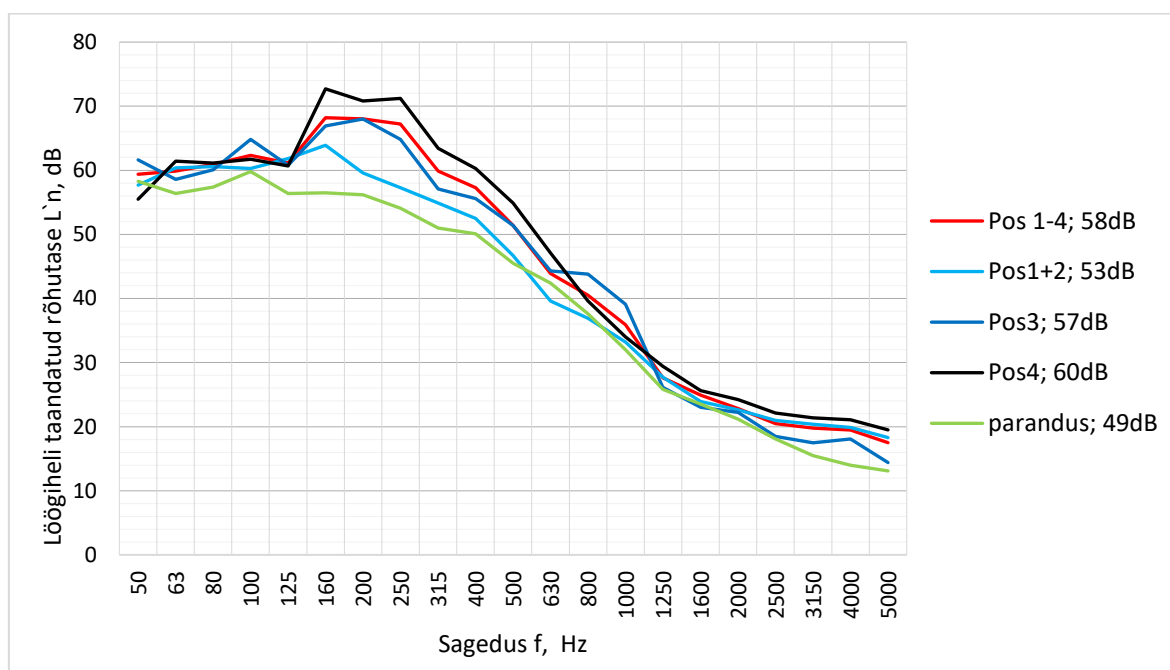
Hoone korruselisuse kasvades on vibratsiooni isolatsiooni materjalide kasutamine siiski oluline, kuna üldjuhul tekib kõrgemate hoonete puhul vajadus kasutada moodulite korruste vahelisteks ühendamiseks rohkem sidemeid. Käesoleva töös läbiviidud katsetulemustele tuginedes saab väita, et suuremate sidemete hulga kasutamisel suureneb korruste vahel kasutatava vibratsiooni isolatsiooni materjali positiivne efekt vahelae heliülekannete isoleerimisel võrreldes olukorraga, kui materjal korruste vahel puudub.

Materjali tüübi osas võiks eelistada materjale, millel on valikus erinevate koormusvahemikele mõeldud tooted. Üks ja sama toode eri koormustel ei suuda tagada samaväärset mõju vibratsioonide isoleerimisel, mistõttu võib tekkida olukord, kus ühe korruse heliisolatsiooni tulemused on oluliselt paremad kui teisel korrusel. 2008. ja 2009. aastal Rootsis läbiviidud uuringute kohaselt, kus mõõdistati 4 korruselise moodulhoone vahelagesid, leiti läbivalt, et alumise korruse korterite puhul on vahelae akustiline toimivus oluliselt halvem kui ülemiste korruste vahelagede oma. Mõõdetud hoonete puhul oli kasutatud moodulitevahelise materjalina täisriba toodet mooduli perimeetris, mille kohta puudus tehniline info millistele koormusvahemikele toode kasutamiseks on mõeldud. [18] [64] Vahematerjali hoolikal valikul on võimalik korrustevahelisi erinevusi ühtlustada või sootuks vältida.

Moodulite transpordist tulenevalt on ühe ruumelemendi mõõtmed piiratud, mistõttu suuremad ruumid paigutuvad läbi mitme mooduli. Moodulte liitumisalades moodustuvad seetõttu laiemad avad, mis tekitavad sillete toepunktidesse oluliselt suuremad koormused võrreldes muude mooduli

külgedega. Samuti tekib sel juhul ülemise ja alumise korruse ruume eraldavasse vahelaetarindisse piirkond, mis erineb oluliselt ühe mooduliga piirneva ruumi omast, kuna ülemise mooduli põhjaelement ja alumise korruse laeelement on omavahel moodulite ühenduskohas otseses kontaktis. Selliste olukordade esinemisel ei ole soovitatav kasutada vibratsioone isoleerivat materjali täisribalahendusena isegi juhul, kui tegu on materjaliga, mille tootevalikus on erinevatele koormusvahemikele mõeldud tooted. Suurte sillete puhul on keeruline hinnata täisribalahenduse jaoks täpseid alasid kuhu määrata üleminekukohad pehmemalt tootelt jäigemale, kuna arvestada tuleks ka eri koormusvahemikele mõeldud toodete kokkusurumisega.

Ühtlasi on mooduleid läbiva ruumi korral moodulite ühenduskohas tekkiv piirkond väga tundlik löögiheli rõhutasemete mõõdistamisele. Kuna mõõdistajad pole üldjuhul kursis moodulsüsteemis ehitiste eripäraga ning ka standardis käsitletakse mõõdistuspositsioonide valikut ainult ruumigeomeetria põhiselt, siis mooduleid läbivates ruumides võivad mõõtmistulemused sõltuvalt löögimüraaparaadi positsiooni valikust, olla väga suurte vahedega.



Joonis 4.2 Löögiheli taandatud rõhutasemete mõõdistusgraafikud mooduleid läbivas ruumis erinevatelt löögimüraaparaadi positsioonidelt. Pos. 1-4 näitab mõõdistustulemuse keskmist. Pos3 ja Pos4 on saadud löögimüraaparaadi paiknemisel moodulite ühenduskoha läheduses. Nimetusega „parandus“ on tähistatud uuel mõõdistusel saadud $L'_{n,w}$ väärtust peale ülemise ja alumise korruse vibratsiooni isolatsiooni materjali vahetust. Andmed objektimõõdistuselt

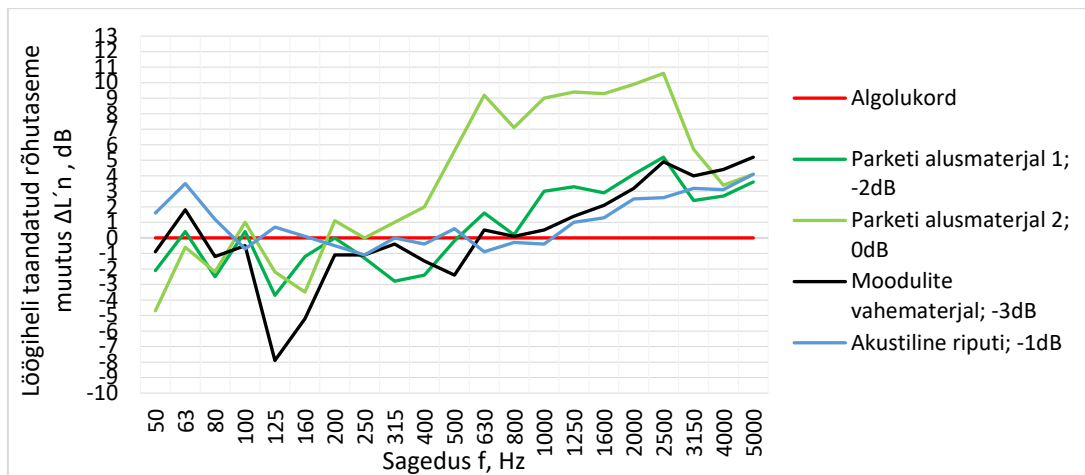
4.2 Heliapidavuse parendamisvõimalikkus peale hoone montaaži

Vahelagede akustilise toimivuse parendamine peale hoone montaaži on tülikas ettevõtmine ning ühtset nõuannet ja juhiseid ei ole võimalik siinkohal jagada. Igale juhtumile on vaja läheneda individuaalselt ning sõltuvalt tarindi konkreetsest tüübist, ruumiplaneeringust, sõlmlahendusest, kasutatud materjalidest, nende paigaldusviisidest ja muust, ei pruugi kõik lähenemised soovitud tulemust anda.

Lisapiiranguid paranduslahenduste osas võivad tulla ka seoses eluruumidele esitatud normatiivsetest minimaalsetest suurusnõuetest. Kui näiteks eluruumi kõrgus on projekteeritud täpselt miinimumnõude järgi, siis ei ole võimalik vahelae heliisolatsiooni parandada tarindi üla- või alapinda lisakihtide paigaldamisega ja peaks otsima muid lahendusi.

Pärast hoone montaaži kontrollmöödistuse käigus leitud heliisolatsiooninõuetele mittevastava vahelaetarindile ning sellega seonduvatele sõlmedele tuleks teha analüüs ja leida võimalik põhjus. Kui probleem on lokaalne ja esineb vaid kindlas ruumis võib olla tegu ehitusest tingitud veaga ebapiisavast tihendamistest või sõlmede halvast lahendusest, kus näiteks ujuvpõrand ei ole piisavalt hästi isoleeritud läbiviikudest või külgnevatest tarinditest. Sellisel juhul võib olla piisav kui probleemkohad korrastada.

Kui õhuheli isolatsiooni või löögiheli rõhutasemete nõuete täitmine ei ole saavutatud hoones mitmete ruumide või korterite puhul, võib probleem olla tingitud tarindi konstruktsioonist, sõlmlahendustest, materjali valikust. Väiksemate kõrvalekallete puhul võib abi olla ka lihtsatest meetmetest – näiteks parketi alusvaiba väljavahetamisest. Ent kui põhjus on tingitud moodulite vahelise materjali vales valikust ja kõrvalekalded nõuetest on üle 3 dB, on konstruktsiooni kihtide väljavahetamise või asendamisega keeruline heliisolatsiooninõuete täitmiseni jõuda. Kui kõrguses on piisavat ruumi ja konstruktsioon on algselt ilma ujuvpõranda lahenduseta, siis võib aidata ujuvpõranda lisamine. Laborikatsetused on näidanud, et ujuvpõranda kasutamine annab tunduvalt suurema efekti löögiheli kaalutud taandatud rõhutaseme alandamisel kui näiteks lisakihi kipsi kasutamine põrandal või kipsi vahetamine suurema tihedusega kipsi vastu. [61]



Joonis 4.3 Erinevate parketi alusmaterjalide, akustilise riputite kasutamise ning moodulivahelise materjali muudatusest saavutatud mõju vahelae löögiheli taandatud rõhutasetele 1/3 oktaavribade lõikes. Andmed objektimõõdistuselt reaalses olukorras

Kui kõrguses ruumi ei ole, et tarindi kogupaksust kasvatada, võib mõnel juhul olla abi ka mooduli perimeetris olevate seinte muutmisest. Kolmandas peatükis tehtud siirdehelide arvutuse põhjal kandub suur osa siirdehelidest läbi seinatarindite. Vastavate seinte heliisolatsiooni parendamine avaldab tõenäoliselt mõju ka siirdehelide levikule, vähendades läbi seinte kanduvat kaudse heli osakaalu.

Juhul kui on ilmnenud, et probleem on tingitud moodulite korrustevahelise materjali vales valikust, on kindlam siiski teha muudatus isolatsiooni materjali osas. Seejuures on oluline märkida, et rahuldava tulemuseni võib viia ka muudatus kõigest väikeses alas, kus näiteks on selgunud materjali ilmselge üle või alakoormatus. Joonisel 4.3 olevalt graafikult on näha kuidas erinevad modifikatsioonid vahelae materjalide vahetuse ja ülemise ning alumise korruse mooduli kokkupuute sõlme osas mõjutasid löögiheli taandatud rõhutaset erinevatel sagedustel. Suurima mõju $L'_{n,w}$ väärtusele andis moodulite vahematerjali muudatus paari meetri pikkusel alal.

Üldjuhul on kõiksugused peale hoone montaaži tehtavad parandused kulukad nii aja, tööjõu kui materjali koha pealt ning mõistlik on hoones kasutatavad sõlmed ja tarinditüübid projekteerimisfaasis hoolikalt läbi mõelda. Võimalusel kasutada lahendusi, mille kohta on varasemalt tehtud õhuheli isolatsiooni ja löögiheli rõhutasete mõõdistusi ning mille akustiline toimivus on teada. Täiesti uute lahenduste kasutusse võtmisel võib tehases tehtud kastemõõdistus olla odavam viis veendumaks lahenduse vastavuses heliisolatsiooni nõuetele ning ennetamaks hilisemaid probleeme ja võimalikke kulusid vahelagade heliisolatsiooni parendamiseks peale hoone püstitamist.

KOKKUVÕTE

Magistritöös keskenduti ruumelementhoonete vahelagede heliisolatsioonile. Eesmärk oli välja selgitada, kuidas projekteerimisfaasis tehtavad valikud vahelae konstruktsioonis ning moodulite ühendussõlmes mõjutavad vahelae akustilist toimivust ja teadvustada ning koondada üldised aspektid, mida vahelagede projekteerimisel silmas pidada, tagamaks tarindi piisav heliisolatsiooni võime.

Töös toodi kõigepealt välja moodulhoonete eksportriikides kehtestatud heliisolatsiooninõuded korterite vahelistele vahelagedele, teadvustamaks kehtivate normide erinevusest ning nende võimalikust võrreldavusest. Seejärel uuriti ülemise ja alumise korruse moodulite vahelist sõlme, katsetades erinevate vibratsiooniisolatsiooni materjalide ning moodulite omavaheliste kinnitussidemete mõju tarindi õhuheli ning löögimüra isolatsioonile. Samuti kontrolliti eelnevalt mõõdistatud vahelaetarindi näitel, kas projekteerimisefaasis on võimalik kasutada moodulhoone vahelae heliisolatsiooni näitajate hindamiseks teoreetilisi arvutusi. Lisaks eelnevale toodi välja ka kirjandusest ning teadustöödest leitud moodulhoonete vahelagede heliisolatsiooni projekteerimist puudutavaid aspekte.

Tehasekatsetuse tulemustest selgus üllatusena, et katsetatud vahelaetarindi tüübi puhul on ka vahematerjali puudumisel tagatud heliisolatsiooni miinimumnõuded pea kõikide töös vaadeldud eksportriikide lõikes, välja arvatud Saksamaa. Vibratsiooni isolatsiooni materjali kasutamine ei pruugi alati olla vajalik ning teatud materjalide puhul võib mõju tarindi akustilisele toimivusele olla isegi negatiivne. Kõikide katsetatud materjalide puhul ilmnes, et õhuheli isolatsiooni mõõtmistulemused paranesid, kui materjali kogust vähendati, st. ei kasutatud täisribalahendust. Lisaks veenduti, et moodulite korrustevahelised ühendussidemed suurendavad heliülekandeid ning seeläbi halvendavad vahelaetarindi heliisolatsiooni ühenumbilisi väärtusi. Ehkki tehasekatsetusel oli kinnitussidemete hulk väike, oli mõju ilmne ning võib eeldada, et kinnitussidemete hulga kasvades halvenevad tulemused veelgi. Sidemete mõju mõõdistusel selgus ühtlasi, et vibratsiooni isolatsiooni materjalide kasutamisel vähenes kinnitussidemete negatiivne mõju vahelae heliisolatsioonile võrreldes olukorraga, mil moodulite vaheline isolatsioonimaterjal puudus. Tehasekatsetuste mõõdistustulemuste hea kattuvus mõõdistustulemustega objektil näitab, et taoliste kahe mooduliga korraldatud katsete mõõtmistulemustest on võimalik saada hea ülevaade kuidas toimiks ja millised võiksid olla katsetatud vahelae heliisolatsiooni näitajad reaalses hoones peale moodulite paigaldust, mistõttu saaks sellist meetodit edukalt kasutada uute vahelaetüüpide akustilise toimivuse hindamiseks.

Kolmandas peatükis tehtud teoreetilised arvutused näitasid, et ehkki mõni tehtud vahelaekonstruktsiooni lihtsustus andis reaalse mõõdistustulemusega üsnagi lähedase ühenumbrielse kaalutud väärtuse, on teoreetilise ning tegeliku heliisolatsiooni tulemused 1/3 oktaavribade lõikes väga suurte erinevustega, ulatudes kõrgematel sagedustel isegi kuni 30 dB nii R kui L_n puhul. 1/3 oktaavribade graafikute suur erinevus tegeliku ning teoreetiliste tulemuste vahel näitab, et arvutustarkvarade abil moodulhoonete vahelagede heliisolatsiooni väärtuste hindamine ei ole võimalik. Suurimaks puuduseks nii Insuli kui Bastiani puhul on piirangud tegelikule olukorrale vastava arvutusmudeli sisestamiseks keerulisemate konstruktsioonide puhul. Kui ei ole teada, kuidas tarkvara ühte või teist olukorda arvutuses käsitleb, ei ole võimalik kasutajal teha keerulisematest tarinditest lihtsustatud mudeleid, mille arvutustulemus võiks olla heas vastavuses tegelike heliisolatsiooni väärtustega.

Moodulhoonete vahelaed oma konstruktsiooni paksuse ning ülemise ja alumise mooduli elementide otsese kontakti puudumise tõttu mujal kui perimeetris omavad head potentsiaali saavutamaks väga häid heliisolatsiooni näitajaid. Siiski näitasid töös tehtud mõõdistused ning juba varasemalt tehtud uurimustööd ning katsed, et tulemused on oluliselt mõjutatavad vahelaes kasutatavate plaatmaterjali kihtide paiknemisest lõikes ning samuti sõlmedes kasutatavast materjalist ning kinnitussidemetest. Projekteerijatel puuduvad puitmoodulhoonete vahelagede heliisolatsiooni projekteerimist käsitlevad juhendmaterjalid ning akustikatarkvarad ei ole veel võimalised nii keerulisi konstruktsioone piisava täpsusega arvutama. Moodulhoonete vahelagede heliisolatsiooni mõjutavate tegurite väljaselgitamine ja täpsustamine ning adekvaatsete arvutustarkvarade väljaarendamine nõuab kindlasti jätkuivaid uuringuid nii sõlmlahenduste kui konstruktsioonitüüpide ning materjalikasutuse seisukohalt üldisemalt. Samuti oleks vajalik täiendavaid uuringuid, kui suur on moodulhoonete vahelagede heliisolatsiooni mõõtmisel müraallika positsioonide valikust tulenev võimalik mõju ühenumbrielsele heliisolatsiooni kirjeldavatele suurustele ning milliseid meetmeid või juhiseid oleks mõistlik rakendada mõõdistuse juures positsioonide valiku suhtes minimeerimaks mõõdistustulemuste varieeruvust.

SUMMARY

The focus of this master's thesis was on the sound insulation of intermediate floors in timber framed modular buildings. The aim was to find out how the choices made during the design phase in the design of the intermediate floors and in the junction of the modules affect the acoustic performance of the floors and also to acknowledge and summarize the general aspects to consider in the design of intermediate floors in order to achieve sufficient sound insulation.

Firstly minimum requirements of sound insulation for separating floors in several export countries of modular buildings were brought out, in order to acquaint with the differences in existing standards and their potential comparability. Subsequently, the junction between the upper and lower modules was studied by measuring the effect of different vibration insulation materials and fasteners between the modules on the airborne and impact sound insulation.

The possibility of using theoretical calculations in the design phase to evaluate the sound insulation characteristics of a modular building's separating floor on the basis of previously measured floor structure was also studied. In addition, different aspects found in this thesis and in previous research studies considering sound insulation in the design of intermediate floors of modular buildings were pointed out.

Surprisingly, the sound insulation measurements results conducted in the factory showed that the use of vibration insulation material may not always be necessary, and for some materials, the impact on the acoustic performance of the structure may even be unfavorable in some cases. For all materials tested, it was found that the single-number values of airborne sound insulation improved when the amount of vibration isolation material between the modules was reduced. In addition, it was verified that the use of fasteners between the modules increase the sound transmissions and thereby deteriorate the single-number values of the sound insulation indicators of the separating floor structure. Although the amount of fasteners used in the experiment was small, the effect was obvious thus it can be expected that as the number of fasteners increases, the results will degrade further. The measurement results also revealed that the use of vibration isolation materials reduced the negative effect on the sound insulation of the separating floor caused by the fasteners compared to the absence of insulation between the modules. The good overlap between the results gained in factory measurements and the field measurements shows the eligibility of such testing method using two modules for evaluating sound insulation characteristics for new types of separating floors in module based buildings after assembly.

Theoretical calculations made in Chapter 3 showed that while some of the simplifications in the calculation model of the floor construction yielded a fairly close single-number value to the real measurement result, the variance between theoretical and actual sound insulation results across 1/3 octave bands are very large, reaching up to 30 dB at higher frequencies. The poor correlation between the actual and the theoretical results in the 1/3 octave bands graphs clearly shows that evaluation of sound insulation values of modular building intermediate floors by using sound insulation prediction software is too inaccurate and therefore unreliable. The biggest disadvantages of professionally used software – Insul and Bastian, are limitations on insertion of precise computational models for complex designs. Unless it is known how the software handles one or another situation in the calculation, it is not possible for the user to simplify models of more complex structures so that the result would be predictable and in correlation with the actual sound insulation values.

Due to the construction thickness and lack of direct contact between the upper and lower module elements, the intermediate floors of modular buildings seem to have great potential for achieving very good sound insulation performance. However, the measurements carried out in this work, as well as previous research and experiments have showed that the results might be significantly influenced by the selection of the vibration isolation materials and fastening ties used in the junctions, as well as the by the choice in which layer different construction boards are used. Regarding the design of sound insulation of intermediate floors in lightweight modular buildings, designers have no instructional material to follow and acoustic software is not yet able to calculate such sophisticated structures with sufficient accuracy.

Identifying and refining the factors affecting the sound insulation of intermediate floors of timber framed modular building and developing adequate computing software will certainly require ongoing research, both in terms of junction design and construction types as well as material use in general. Further research is needed to study how the positioning of impact source in measuring the sound insulation of intermediate floors in timber framed modular houses will affect the single number result for impact sound insulation and what positioning options or adjustments would be reasonable to consider to minimize the dispersion of results.

KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] „Puitmajad arvudes,” Eesti Puitmajaliit, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://puitmajaliit.ee/miks-eesti-puitmaja/puitmajad-arvudes>. [Kasutatud 26 12 2019].
- [2] „Nordic Wooden Cities,” Nordic Wooden Cities, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.nordicwoodencities.com/>. [Kasutatud 26 12 2019].
- [3] Soome Ehitusinseneride Liit RIL, RIL 243-1-2007 "Hoonete akustiline projekteerimine. Akustika alused", Tallinn: ET-INFOkeskuse AS, 2009.
- [4] Insul, „Insul,” <http://www.insul.co.nz/>.
- [5] DataKustik, „BASTIAN,” <https://www.datakustik.com/products/bastian/bastian/>.
- [6] „Ehitame ruumelementidest,” Kodumaja AS, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.kodumaja.ee/et/Ehitusviis-ja-tehnoloogia/Ehitame-ruumelementidest>. [Kasutatud 23 märts 2019].
- [7] „Moodul,” AS Matek, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.matek.ee/et/module/>. [Kasutatud 23 märts 2019].
- [8] „Moodulhooned,” Timbeco Woodhouse OÜ, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://timbeco.ee/tooted/moodulmajad/>. [Kasutatud 23 märts 2019].
- [9] „Puit tüüpimajad tulevad tarbijale lähemale,” Eesti puitmajaliit, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://puitmajaliit.ee/uudised/puit-tuupmajad-tulevad-tarbijale-lahemale>. [Kasutatud 14 aprill 2019].
- [10] M. Lawson, R. Ogden ja C. Goodier, Design in Modular Construction, London: CRC Press, 2014.
- [11] COST, „European COST action FP0702,” 26 august 2012. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://extranet.cstb.fr/sites/cost/default.aspx>. [Kasutatud 21 märts 2019].
- [12] „Acoustics in wooden buildings. State of art 2008,” SP Technical Research institute of Sweden, Stockholm, 2008.
- [13] C. Simmons, K. Hagberg ja E. Backman, „Acoustical performance of apartment buildings - Resident's survey and field measurements,” SP Technical Research Institute of Sweden, Stockholm, 2011.
- [14] F. Ljunggren, C. Simmons ja K. Hagberg, „Findings from the Akulite projekt: Correlation between measured vibro-acoustic parameters and subjektive perception in lightweight buildings,” Luleå University of Technology, Luleå, 2013.
- [15] „ERA-LEARN,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.era-learn.eu/network-information/networks/woodwisdom-net-2/sustainable-competitive-processing-and-end-use/acoustics-in-wooden-buildings-overview>. [Kasutatud 23 märts 2019].
- [16] K. Hagberg, P. Leistner, M. Spaeh, A. Liebl, A. Saarinen ja O. Bartlome, „AcuWood – Acoustics in Wooden Constructions,” WoodWisdom - Net, 2010-2013.
- [17] „Silet Timber Build,” Wood Wisdom Net+ programme, 2014-2017. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://silent-timber-build.com/final-reports/>. [Kasutatud 21 märts 2019].
- [18] R. Ökvist, F. Ljunggren ja A. Agren, „Variations in sound insulation in multi-story lightweight timber constructions,” Luleå University of Technology, Luleå, 2009.
- [19] R. Ökvist, „The uncertainty in sound insulation of an industrially prefabricated lightweight timber constructions,” Inter-Noise, Melbourne, 2014.
- [20] O. Flodén, "Vibration transmission in lightweight buildings. Numerical prediction models. Doctoral Thesis.", Lund: Lund Univesity, 2016.

- [21] R. J. Peters, B. J. Smith ja M. Hollins, "Acoustics and Noise Control", Harlow: Pearson Education Limited, 2011.
- [22] I. L. Ver ja L. Barenek, "Noise and Vibration Control Engineering. Principles and Applications.", New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, 2006.
- [23] Eesti Standardikeskus, EVS 842:2003 "Ehitiste heliisolatsiooninõuded. Kaitse müra eest", Tallinn: Eesti Standardikeskus, 2003.
- [24] Eesti Standardikeskus, EVS-EN ISO 12354-1:2017 "Ehitusakustika. Hoonete akustilise toimivuse hindamine elementide akustilise toimivuse põhjal. Osa 1: Ruumidevaheline õhuheli isolatsioon.", Tallinn: Eesti Standardikeskus, 2017.
- [25] Eesti Standardikeskus, EVS-EN ISO 717-1:2013 "Akustika. Hoonete ja ehituselementide heliisolatsiooni hindamine. Osa 1: Õhuheli isolatsioon", Tallinn: Eesti Standardikeskus, 2013.
- [26] Eesti Standardikeskus, EVS-EN ISO 12354-2:2017 "Ehitusakustika. Hoonete akustilise toimivuse hindamine elementide akustilise toimivuse põhjal. Osa 2: Ruumidevaheline löögheli isolatsioon.", Tallinn: Eesti Standardikeskus, 2017.
- [27] „The Cutting Edge: Estonia`s Leading Timber Construction Enterprises,“ Eesti Puitmajaliit, Eesti Puitmajaklaster, Tallinn, 2018.
- [28] „Kodumaja turud,“ Kodumaja AS, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.kodumaja.ee/et/Tutvustus/Kodumaja-turud>. [Kasutatud 04 märts 2019].
- [29] „European Countries by population,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.worldometers.info/population/countries-in-europe-by-population/>. [Kasutatud 30 märts 2019].
- [30] "Acoustic conditions in buildings. Sound classifications of various types of buildings", Standard Norge 8175:2012, 2012.
- [31] Swedish Standard 25267:2015 "Acoustics – Sound classification of spaces in buildings – Dwellings", Swedish Standards Institute, 2015.
- [32] „Boverkets byggregler – föreskrifter och allmänna råd,“ 2011. [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://www.boverket.se/contentassets/a9a584aa0e564c8998d079d752f6b76d/konsolide-rad_bbr_2011-6.pdf. [Kasutatud 10 märts 2019].
- [33] Suomen Standardisoimisliitto SFS 5907 "Acoustic classification of spaces in buildings", Helsinki: SFS Suomen Standardisoimisliitto, 2006.
- [34] Finlex, „Ympäristöministeriön asetus rakennuksen ääniympäristöstä,“ 2017. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20170796>. [Kasutatud 10 märts 2019].
- [35] O. Kornadt ja A. Vogel, „New regulation on sound insulation in buildings in Germany,“ 2016. [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://www.acoustics.asn.au/conference_proceedings/AASNZ2016/papers/p113.pdf. [Kasutatud 10 märts 2019].
- [36] P. Lein, „Forum Holzbau,“ 2013 03 2013. [Võrgumaterjal]. Saadaval: http://www.forum-holzbau.com/pdf/HBS_bauphysik_13_Lein.pdf. [Kasutatud 16 märts 2019].
- [37] British Standard 8233:2014, "Guidance on sound insulation and noise reduction for buildings", London: BSI Standards Publication, 2014.
- [38] „Building Regulations (Northern Ireland) 2012,“ 2012. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.buildingcontrol-ni.com/regulations/technical-booklets>.
- [39] „Building Standards. Technical Handbook 2017: Domestic buildings,“ 2017. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.gov.scot/publications/building-standards-2017-domestic/>. [Kasutatud 24 märts 2019].

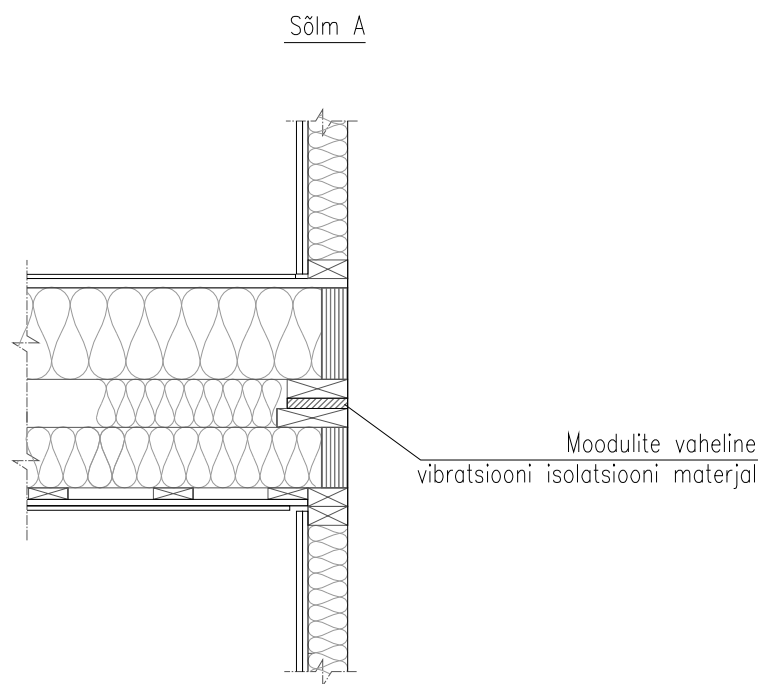
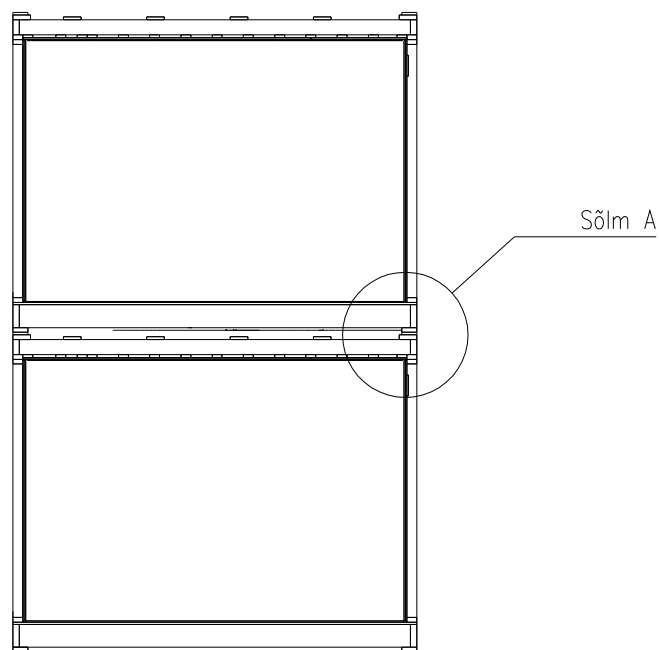
- [40] „The building Regulations 2010. Resistance to the passage of sound. Approved document E,” HM Government, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.gov.uk/government/publications/resistance-to-sound-approved-document-e>. [Kasutatud 24 märts 2019].
- [41] Boverket, „PBL KUNSKAPSBANKEN– en handbok om plan- och bygglagen,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.boverket.se/sv/PBL-kunskapsbanken/regler-om-byggande/boverkets-byggregler/bullerskydd/ljudisolering-mellan-utrymmen/>. [Kasutatud 24 märts 2019].
- [42] COST, „European COST action TU0901: building acoustics throughout Europe- Volume 1: Towards a common framework in building acoustics throughout Europe,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://www.cost.eu/wp-content/uploads/2018/07/Part_I.pdf. [Kasutatud 23 märts 2019].
- [43] EVS Eesti Standardikeskus EVS-EN ISO 16283-2:2014, "Akustika. Heliisolatsiooni mõõtmine hoonetes ja hoone osadel. Osa 1: Õhuheli isolatsioon", Tallinn: Eesti standardikeskus, 2014.
- [44] Eesti Standardikeskus EVS-EN ISO 16283-2:2018 "Akustika. Heliisolatsiooni mõõtmine hoonetes ja hooneosadel. Osa 2: Löögiheli isolatsioon.", Tallinn: Eesti Standardikeskus, 2018.
- [45] Eesti Standard EVS-EN ISO 12999-1:2014 " Acoustics - Determination and application of measurement uncertainties in building acoustics – Part 1: Sound insulation (ISO 12999-1:2014)", Eesti Standardikeskus, 2014.
- [46] „Phonestrip,” Wolf Bavaria GmbH, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.wolf-bavaria.com/downloadcenter/brosch%C3%BCren-flyer-1/>. [Kasutatud 19 10 2019].
- [47] „Sylomer,” Getzner, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.getzner.com/en/products/sylomer>. [Kasutatud 19 10 2019].
- [48] „Stepisol,” AB Svensk Emballageteknik, [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://ziladoc.com/download/ladda-hem_pdf. [Kasutatud 19 10 2019].
- [49] „Emballage Technologies Tallinn OÜ,” ETTeam Baltic OÜ, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.et-tallinn.ee/et/stepisoli-andmed>. [Kasutatud 19 10 2019].
- [50] S. Schoenwald, B. Zeiter, F. King ja I. Sabourin, „Acoustics – Sound Insulation in Mid - Rise Wood Buildings,” National Research Council Canada, 2014.
- [51] F. Ljunggren ja A. Ågren, „Potential solutions to improved sound performance of volume based lightweight multy-storey timber buildings,” Applied Acoustics, 2011.
- [52] Å. Blomsvik ja A. Brandt, „Damping assessment of light wooden assembly with and without damping material,” Engineering Structures, 2013.
- [53] Getzner, „Freqcalc,” <https://apps.getzner.com/en/dashboard/freqcalc/>.
- [54] V. Hongisto, "Levyrakebbeseinien ilmaääneneristävyyden mallintaminen, Rakennusfysiikka.", Tampere, 2007.
- [55] „Insul. Tech Info,” Marshall Day Acoustics, 2019. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.insul.co.nz/tech-info/>. [Kasutatud 05 mai 2019].
- [56] „Insul. Sound Insulation Prediction Program. User Manual,” Mashall Day Acoustics, Auckland, 2017.
- [57] J. E. Cambridge, "An evaluation of various sound linsulation programs and their use in the design of silent rooms", Göteborg: Chalmers University of Technology, 2006.
- [58] „Knauf. Kipsplaadid, tsementplaadid, metallprofiilid ja abimaterjalid. Tootekataloog,” 2017. [Võrgumaterjal]. Saadaval:

<http://www.knauf.ee/et/allalaadimiseks/tootekataloogid/index.php>. [Kasutatud 01 12 2019].

- [59] „Knauf. GKF/DF, Knauf Red. Tuletõkkekiisplaad,“ 2016. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.knauf.ee/et/allalaadimiseks/tootelehed/index.php>. [Kasutatud 01 12 2019].
- [60] P. Virjonen, V. Hongisto ja J. Hakala, „Sound insulation of Finnish building boards,“ Turku, 2006.
- [61] F. Ljunggren, „Improved Sound Insulation in Module Based Timber Framed Buildings,“ Reykjavik, 2008.
- [62] F. Xin ja T. Lu, „Analytical modeling of sound transmission through clamped triple -panel partition separated by enclosed air cavities,“ *European Journal of Mechanics - A/Solids*, p. 261, 6 Mai 2011.
- [63] J. H. Rindel, "Sound Insulation in Buildings", New York: Taylor and Francis Group, 2018.
- [64] F. Ljunggren, „Using elastic layers to improve sound insulation in volume based multi-storey lightweight buildings,“ Inter-Noise, Ottawa, 2009.

LISAD

Lisa 1 Joonised



**TAL
TECH**

TTÜ INSENERITEADUSKOND
Ehituse ja arhitektuuri instituut

Magistritöö

Leht:

1.1

Koostaja:

Kitty Saar

Joonis:

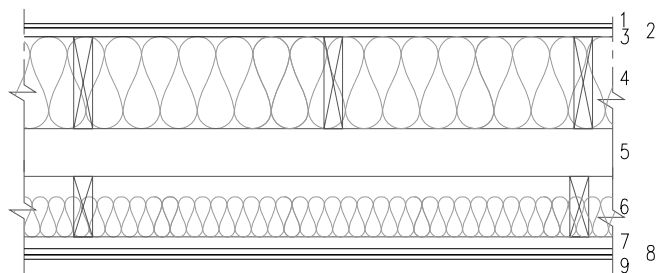
Testtorni lõige ja moodulite liitumissõlm

Juhendaja:

Marko Ründva

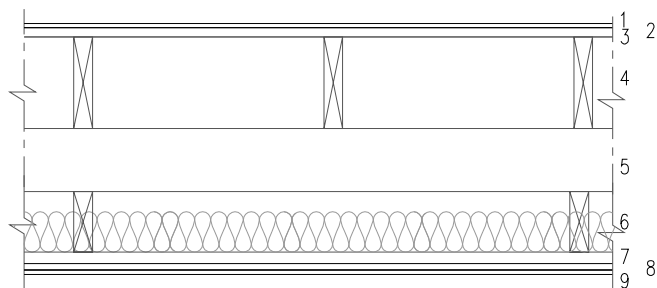
Puitkarkassmoodulhoonete vahelagede helipidavuse tagamine. Moodulitevaheliste jäikussidemete ning korrusevahelise heliisolatsioonimaterjali mõju vahelagede akustilisele toimivusele.

TT1 Vahelagi VL0.1



1. põranda viimistlus kiht 8mm
2. aluskate 2mm
3. puitlaastplaat 22mm
4. 45x220 talad s.600/ Mineraalvill 225mm
5. õhkvahe 115mm
6. 45x145 talad s.1200mm/ mineraalvill 150mm
7. 28x95 puitroov s.400mm
8. Knauf Red GKF 15mm
9. laeviimistlusplaat 11mm

TT2 Vahelagi VL0.2



1. põranda viimistlus kiht 8mm
2. aluskate 2mm
3. puitlaastplaat 22mm
4. 45x220 talad s.600
5. õhkvahe 155mm
6. 45x145 talad s.1200mm/ mineraalvill 150mm
7. 28x95 puitroov s.400mm
8. Knauf Red GKF 15mm
9. laeviimistlusplaat 11mm

**TAL
TECH**

TTÜ INSENERITEADUSKOND
Ehituse ja arhitektuuri instituut

Magistritöö

1.2

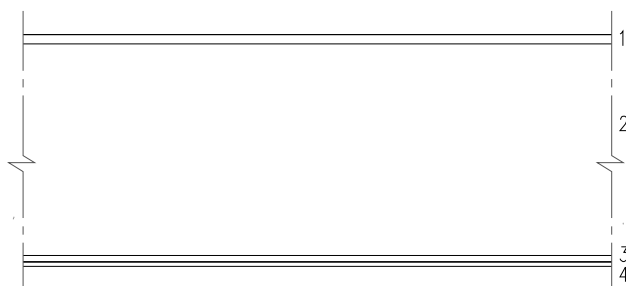
Koostaja:
Kitty Saar

Juhendaja:
Marko Ründva

Joonis:
Testmoodulite TT1 ja TT2 vahelaed

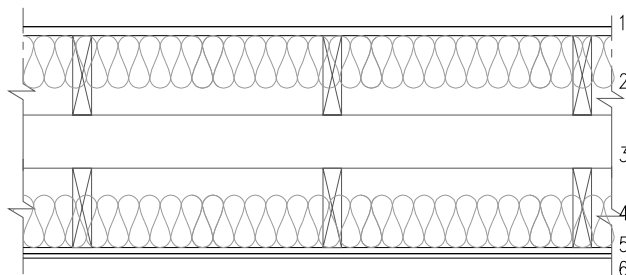
Puitkarkassmoodulhoonete vahelagede helipidavuse tagamine. Moodulitevaheliste jäikussidemete ning korrusevahelise heliisolatsioonimaterjali mõju vahelagede akustilisele toimivusele.

Vahelagi VL1



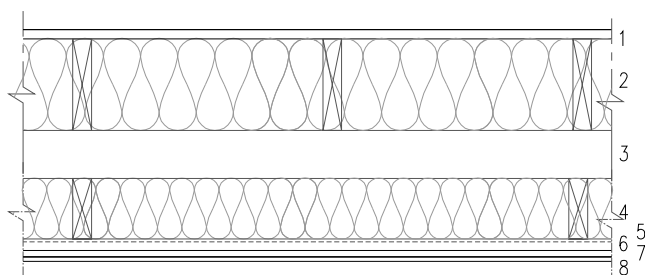
1. puitlaastplaat 22mm
2. õhkvahe 508mm
3. Knauf Red GKF 15mm
4. laevimistlusplaat 11mm

Vahelagi VL2



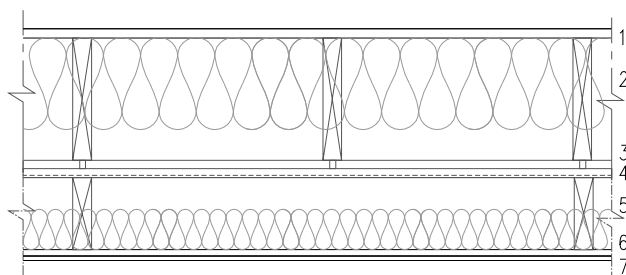
1. puitlaastplaat 22mm
2. 45x195 talad s.600/ mineraalvill 160mm
3. õhkvahe 118mm
4. 45x195 talad s.600mm/ mineraalvill 160mm
5. Knauf Red GKF 15mm
6. laevimistlusplaat 11mm

Vahelagi VL3



1. puitlaastplaat 22mm
2. 45x180 talad s.600/ mineraalvill 160mm
3. õhkvahe 118mm
4. 45x180 talad s.600mm/ mineraalvill 160mm
5. 0,4mm mineraalvill
6. 28x95 puitroov s.400
7. Knauf Red GKF 15mm
8. laevimistlusplaat 11mm

Vahelagi VL4



1. puitlaastplaat 22mm
2. 45x340 talad s.600/ mineraalvill 220mm
3. akustilised riputid
4. 0,4mm mineraalvill
5. 45x167 talad s.1200mm/ mineraalvill 100mm
6. Knauf Red GKF 15mm
7. laevimistlusplaat 11mm

**TAL
TECH**

TTÜ INSENERITEADUSKOND
Ehituse ja arhitektuuri instituut

Magistritöö

1.3

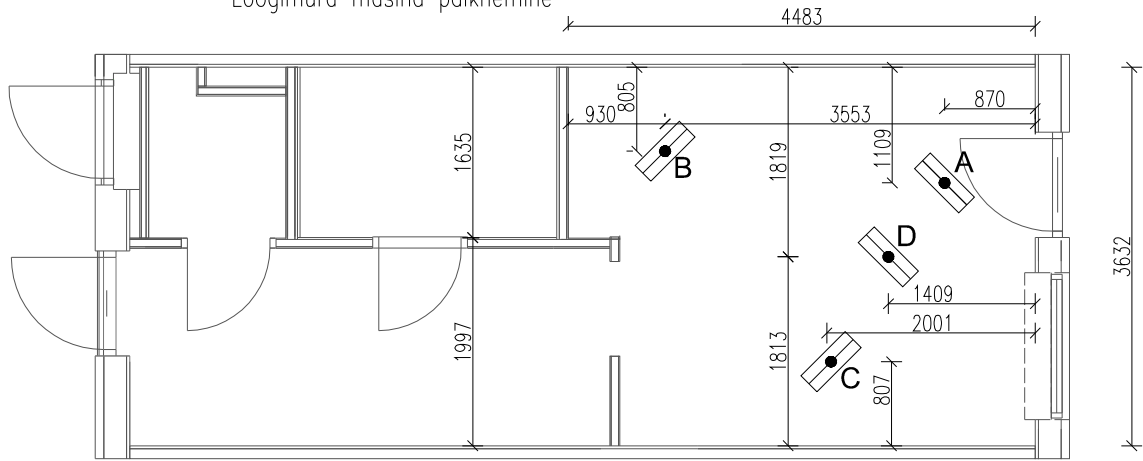
Koostaja:
Kitty Saar

Juhendaja:
Marko Ründva

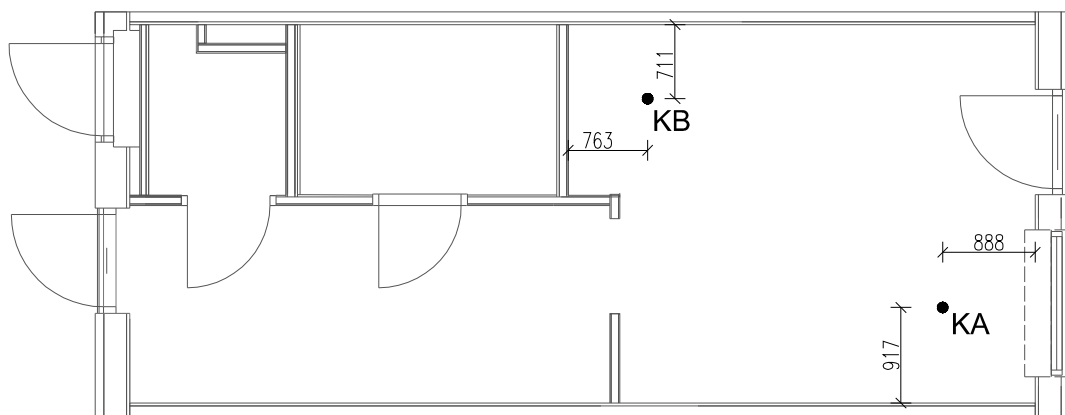
Joonis:
Vahelae lihtsustused

Puitkarkassmoodulhoonete vahelagede helipidavuse tagamine. Moodulitevaheliste jäikussidemete ning korrusevahelise heliisolatsioonimaterjali mõju vahelagede akustilisele toimivusele.

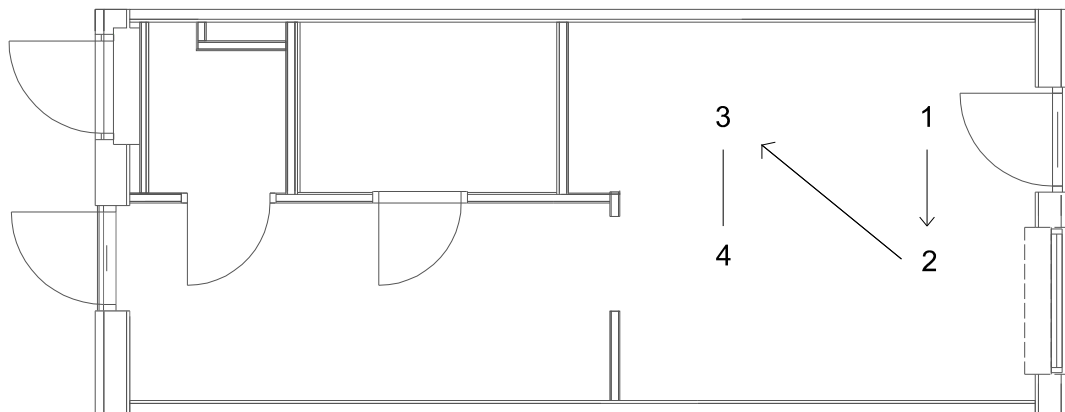
Löögimüra masina paiknemine



Kõlari paiknemine



Mõõtmispositsioonid heli vastuvõtvas ruumis



Ruumi parameetrid:
 Kõrgus $H=2500\text{mm}$
 Pindala $A=15,3\text{ m}^2$
 Ruumala tehases $V=38,2\text{ m}^3$
 Ruumala objektis $V=36,7\text{ m}^3$

**TAL
TECH**

TTÜ INSENERITEADUSKOND
 Ehituse ja arhitektuuri instituut

Magistritöö

Leht:

2.1

Koostaja:

Kitty Saar

Joonis:

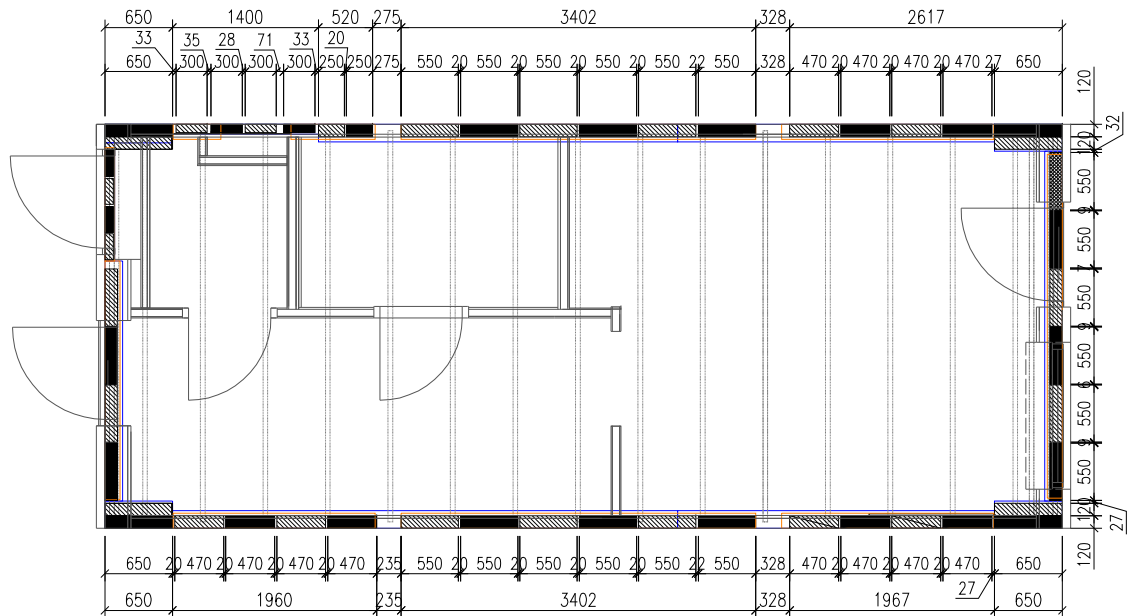
Müraallika paiknemised heli lähteruumis.
 Ruumi parameetrid.

Juhendaja:

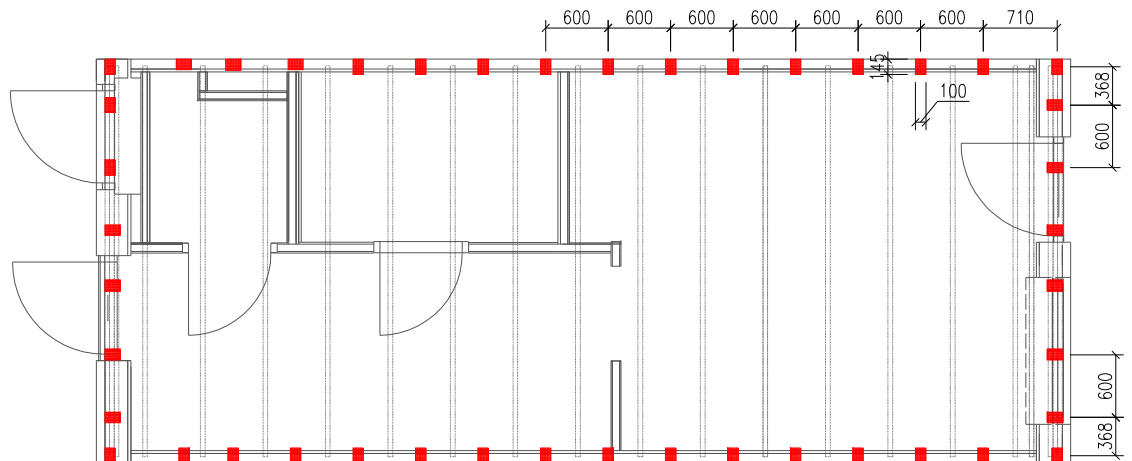
Marko Ründva

Puitkarkassmoodulhoonete vahelagade helipidavuse tagamine. Moodulitevaheliste jäikussidemete ning korrusevahelise heliisolatsioonimaterjali mõju vahelagade akustilisele toimivusele.

Moodulitevaheline materjal 1 ja materjal 3

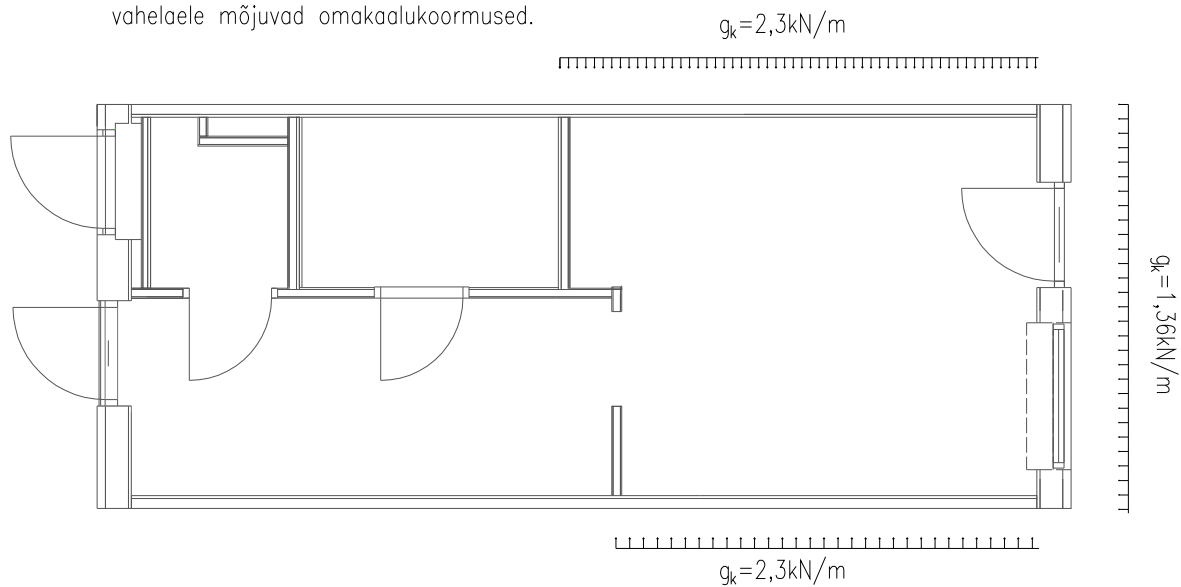


Moodulitevaheline materjal 2



	TTÜ INSENERITEADUSKOND Ehituse ja arhitektuuri instituut		Magistritöö	Leht: 3.1
	Koostaja: Kitty Saar		Joonis: Moodulite vahelise materjali paiknemise skeemid	
Juhendaja: Marko Ründva				
Puitkarkassmoodulhoonete vahelagede helipidavuse tagamine. Moodulitevaheliste jäikussidemete ning korrusevahelise heliisolatsioonimaterjali mõju vahelagede akustilisele toimivusele.				

Tehasemöödistuse alumise korruse testmooduli
vahelaele mõjuvad omakaalukoormused.



**TAL
TECH**

TTÜ INSENERITEADUSKOND
Ehituse ja arhitektuuri instituut

Magistritöö

Leht:

4.1

Koostaja:

Kitty Saar

Joonis:

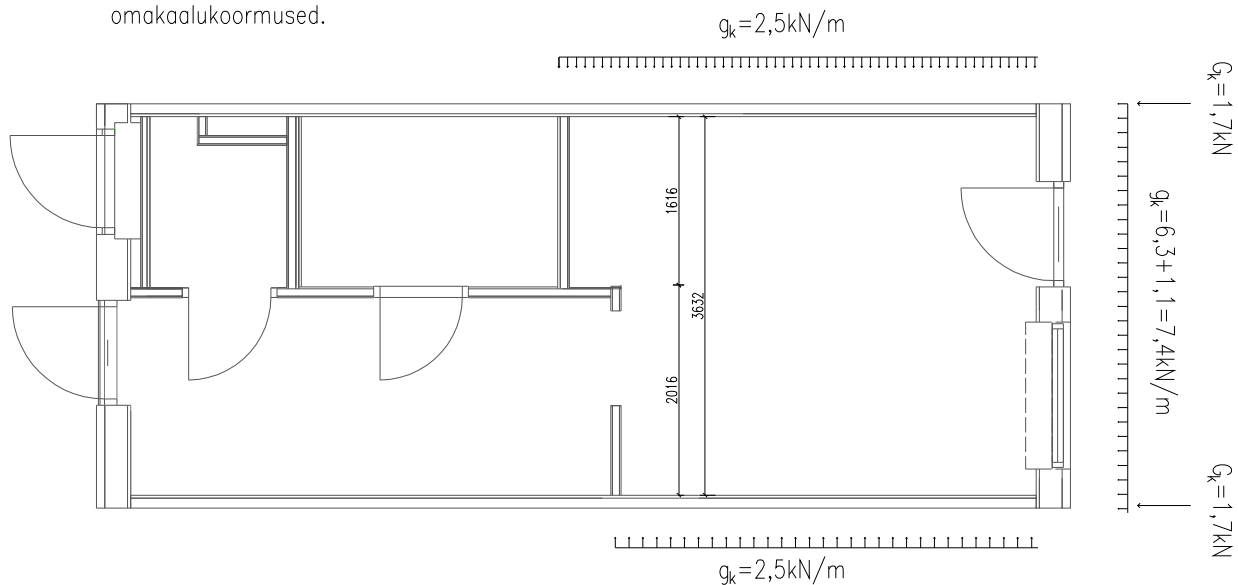
Koormused mooduli vahelaele mõõdistatava
ruumi osas tehases.

Juhendaja:

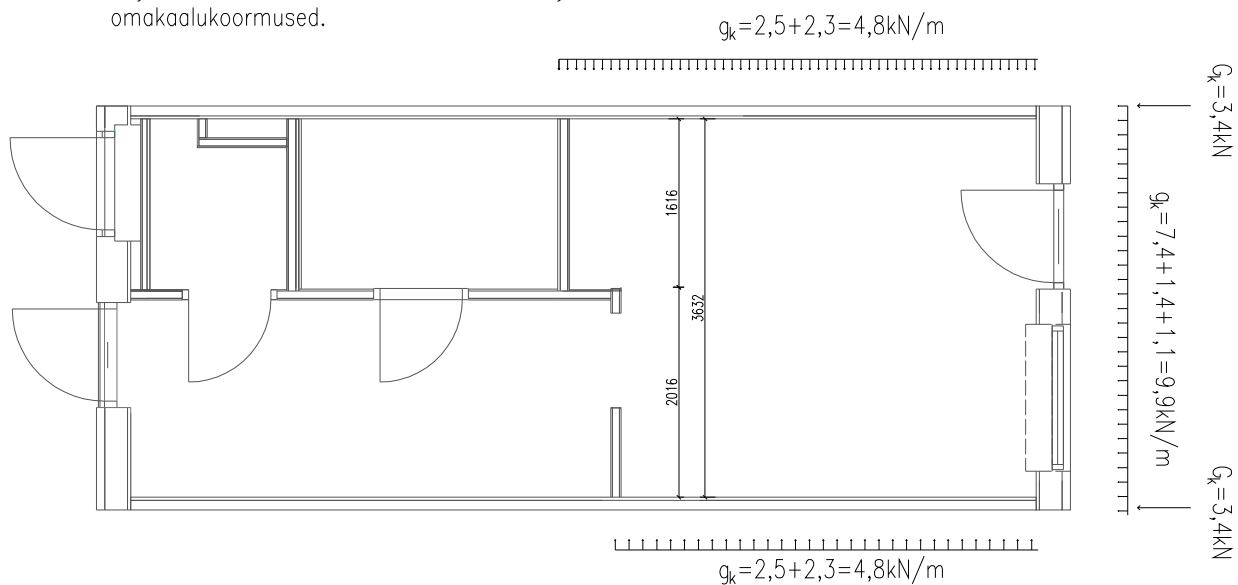
Marko Ründva

Puitkarkassmoodulhoonete vahelagede helipidavuse tagamine. Moodulitevaheliste jäikussidemete ning korrusevahelise heliisolatsioonimaterjali mõju vahelagede akustilisele toimivusele.

Objektimõõdistuse II korruse vahelaele mõjuvad omakaalukoormused.



Objektimõõdistuse I korruse vahelaele mõjuvad omakaalukoormused.



**TAL
TECH**

TTÜ INSENERITEADUSKOND
Ehituse ja arhitektuuri instituut

Magistritöö

Leht:

4.2

Koostaja:

Kitty Saar

Joonis:

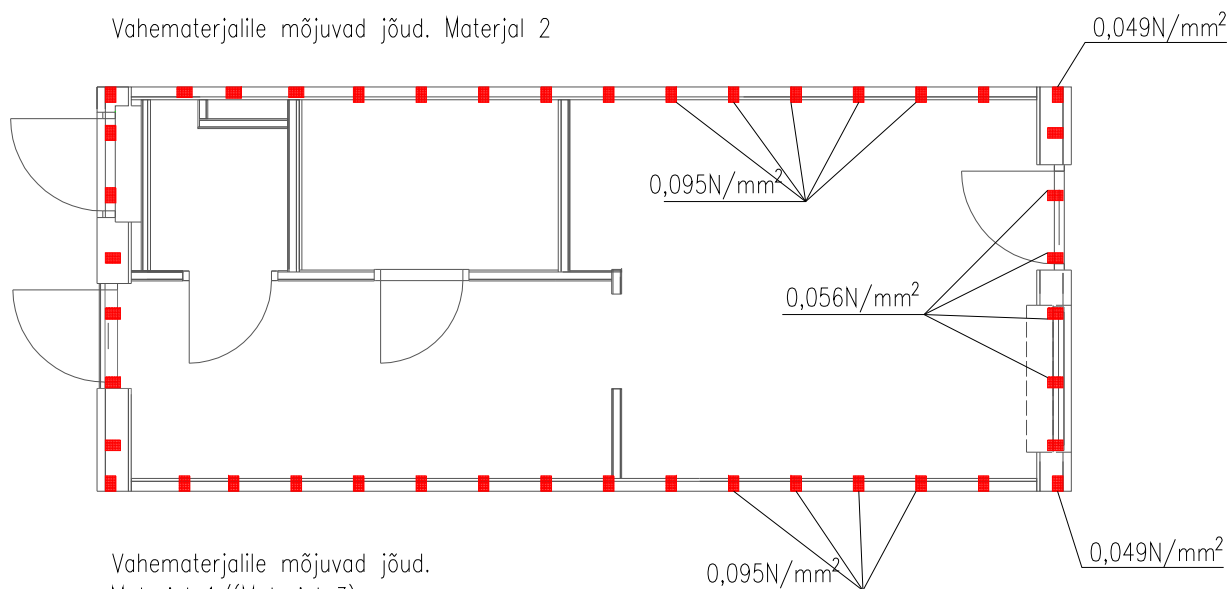
Koormused mooduli vahelaele mõõdistatava
ruumi osas objektis.

Juhendaja:

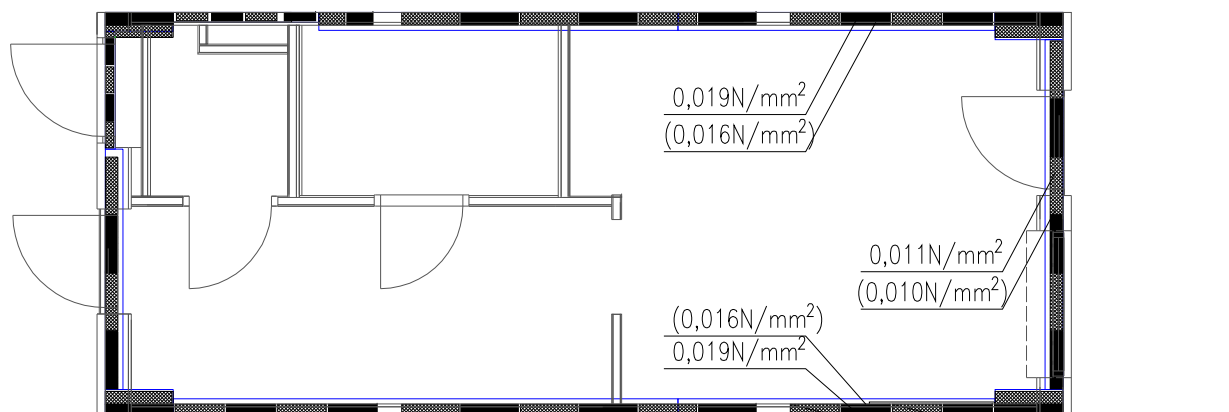
Marko Ründva

Puitkarkassmoodulhoonete vahelagede helipidavuse tagamine. Moodulitevaheliste jäikussidemete ning korrusevahelise heliisolatsioonimaterjali mõju vahelagede akustilisele toimivusele.

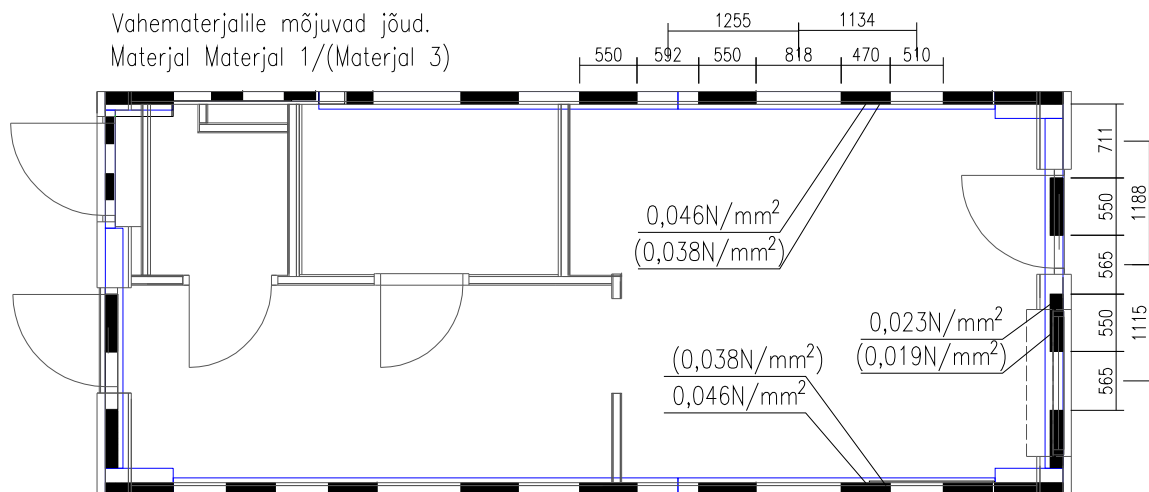
Vahematerjalile mõjuvad jõud. Materjal 2



Vahematerjalile mõjuvad jõud.
Materjal 1/(Materjal 3)



Vahematerjalile mõjuvad jõud.
Materjal Materjal 1/(Materjal 3)



**TAL
TECH**

TTÜ INSENERITEADUSKOND
Ehituse ja arhitektuuri instituut

Magistritöö

Leht:

4.3

Koostaja:

Kitty Saar

Joonis:

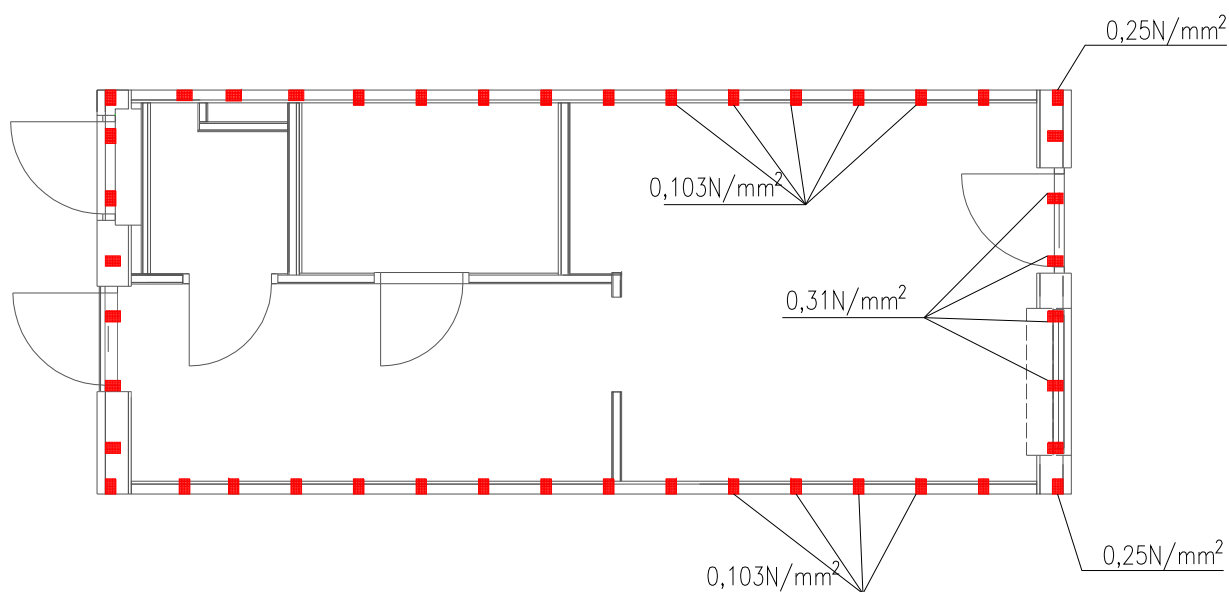
Vahematerjalile mõjuvad jõud mõõdistava
ruumi osas tehases.

Juhendaja:

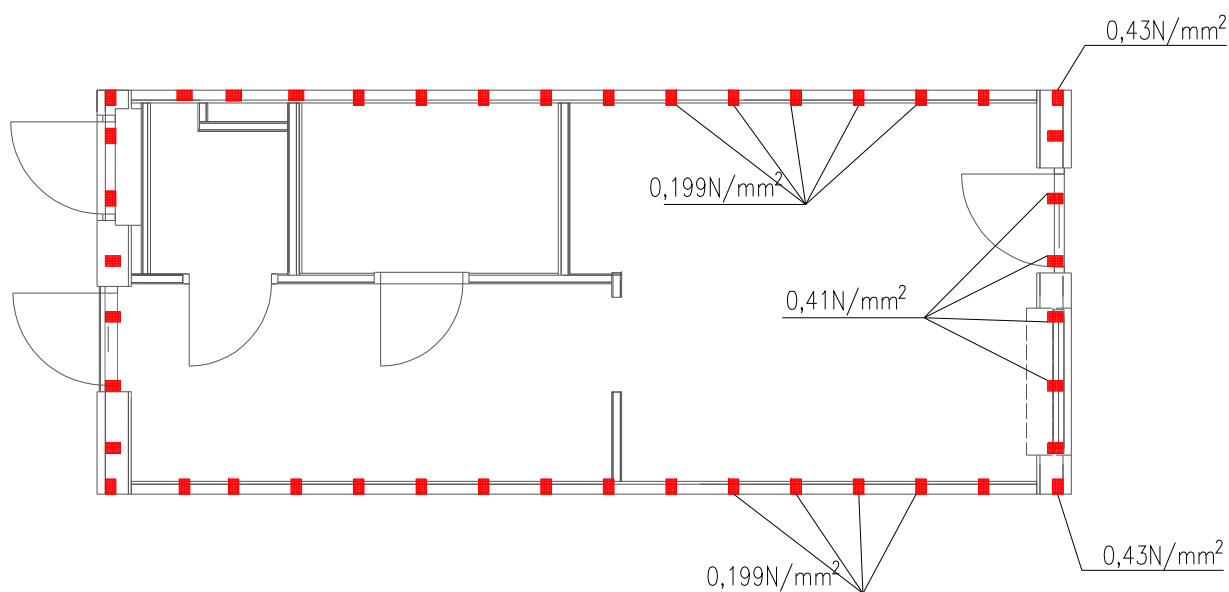
Marko Ründva

Puitkarkassmoodulhoonete vahelagede helipidavuse tagamine. Moodulitevaheliste jäikussidemete ning korrusevahelise heliisolatsioonimaterjali mõju vahelagede akustilisele toimivusele.

II korruse vahematerjalile mõjuvad jõud.

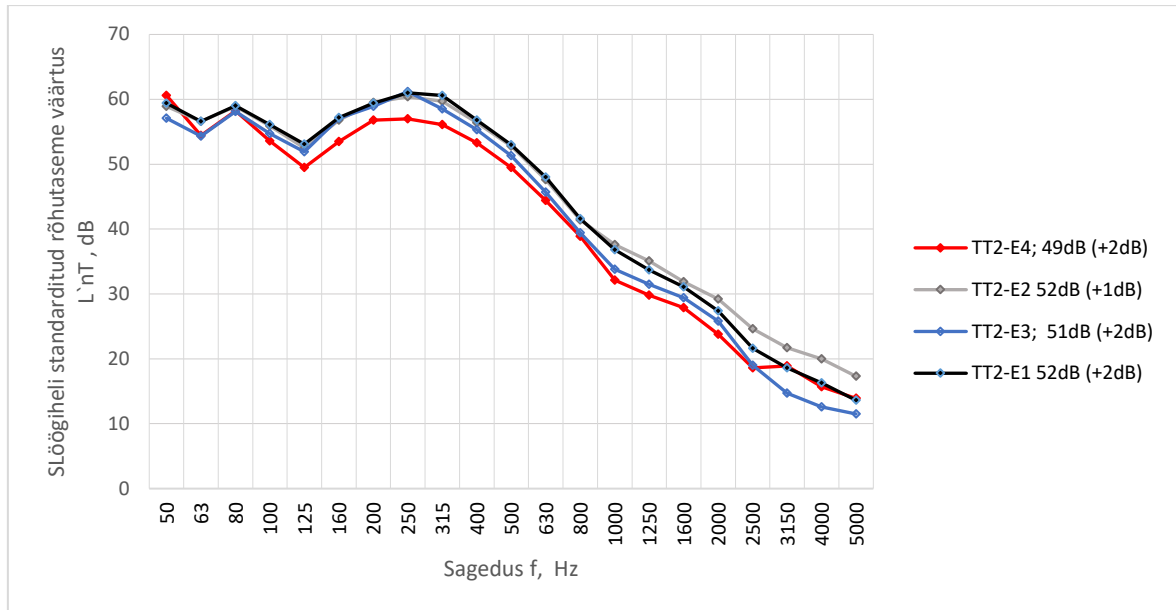


I korruse vahematerjalile mõjuvad jõud.

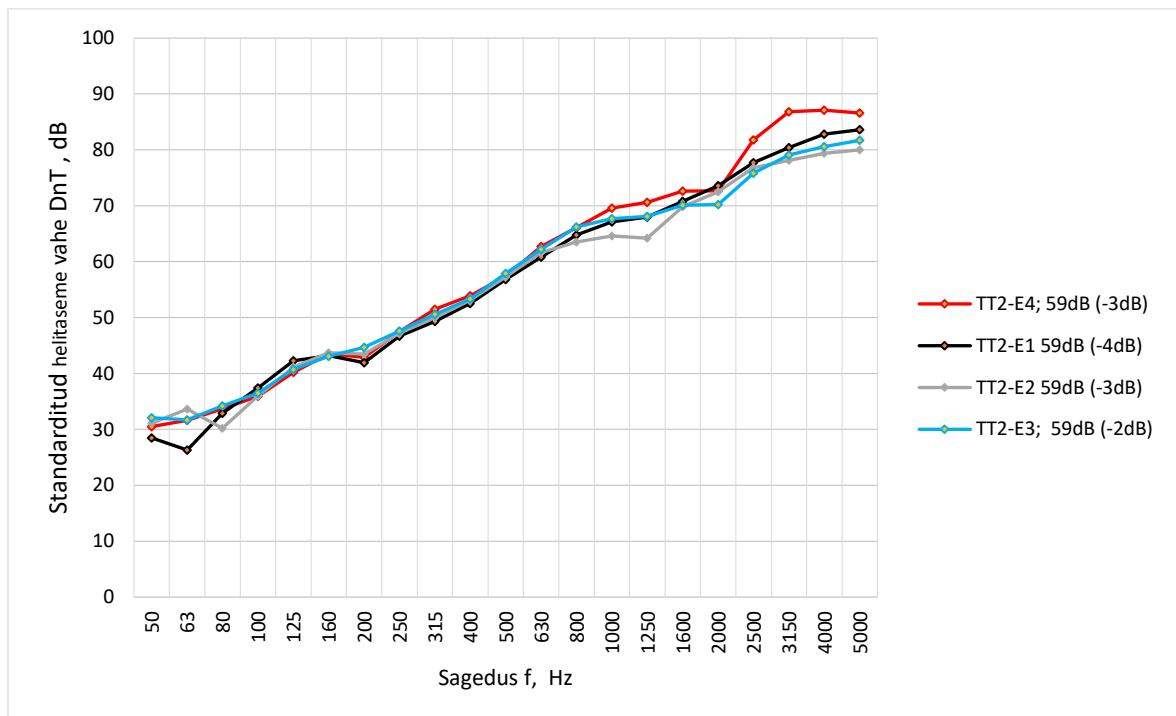


	TTÜ INSENERITEADUSKOND Ehituse ja arhitektuuri instituut	Magistritöö	Leht: 4.4
Koostaja: Kitty Saar		Joonis: I ja II korruse vahelael olevale vibratsiooni isolatsiooni materjalile mõjuvad jõud mõõdistava ruumi osas objektis.	
Juhendaja: Marko Ründva			
Puitkarkassmoodulhoonete vahelagede helipidavuse tagamine. Moodulitevaheliste jäikussidemete ning korrusevahelise heliisolatsioonimaterjali mõju vahelagede akustilisele toimivusele.			

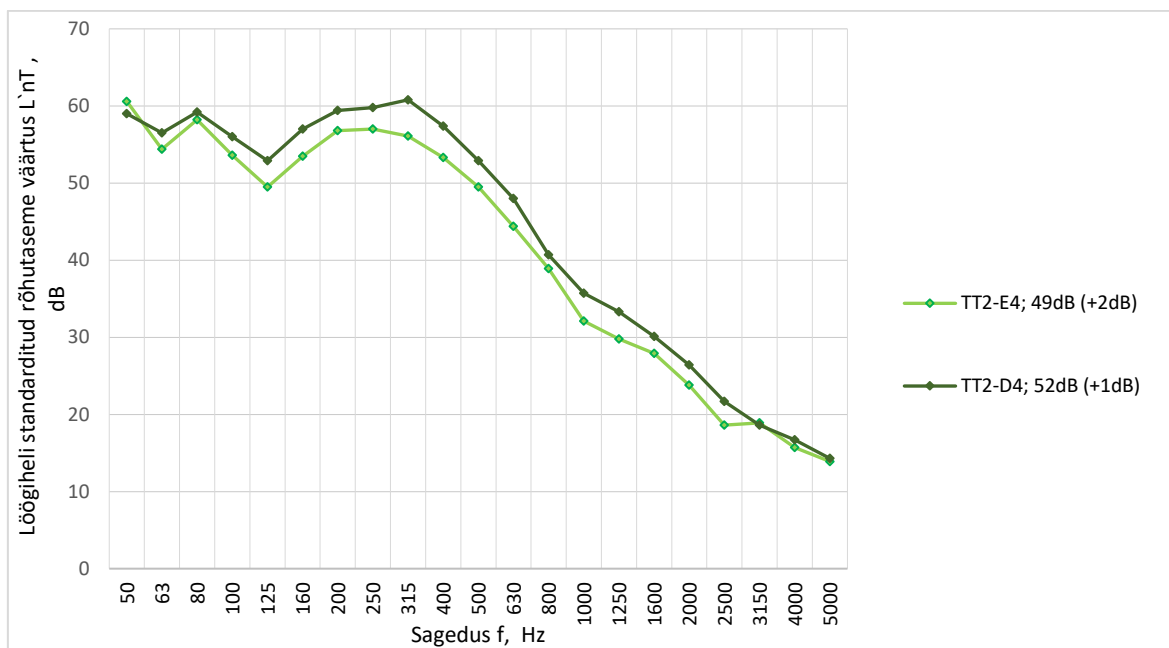
Lisa 2 TT2-s katsetatud vahelae heliisolatsiooni mõõdistustulemused



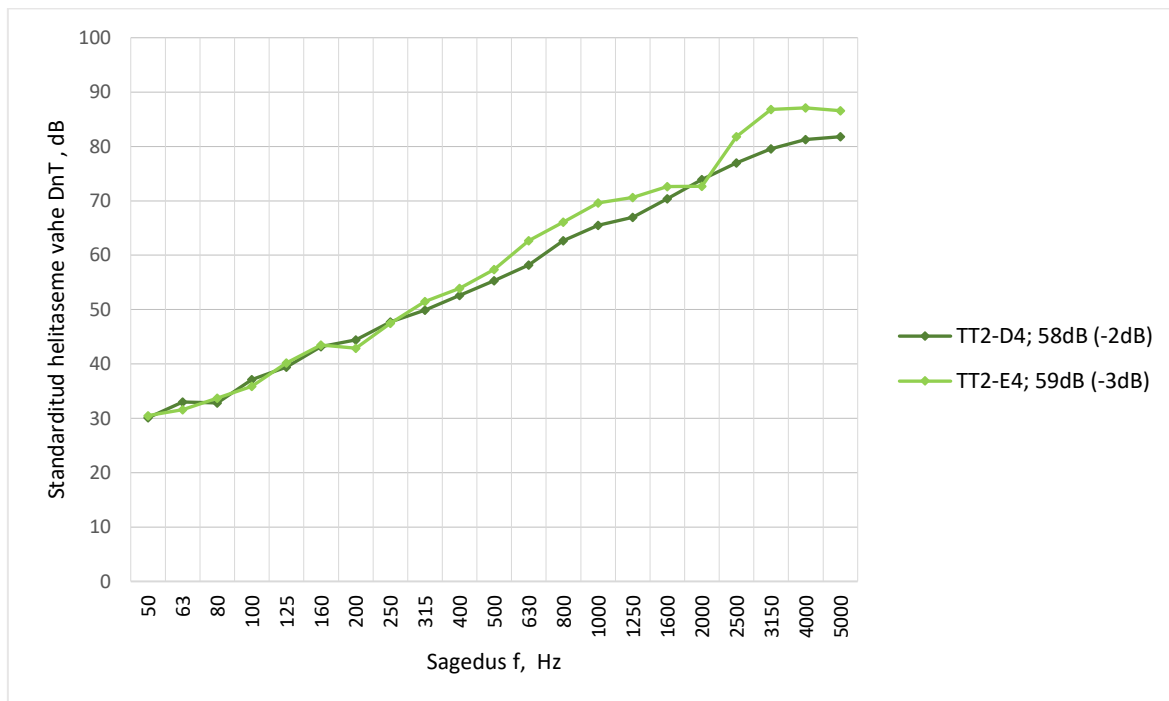
Joonis L1 TT2-s katsetatud moodulite vahematerjalide mõju vahelae löögiheli standarditud rõhutasemetele erinevate moodulitevaheliste kinnituste korral. Nime taga on $L'_{nT,w}$ ühenumbiline väärtus ning sulgudes spektrilähendusteguri $C_{L,50-2500}$ parandus



Joonis L2 TT2-s katsetatud moodulite vahematerjalide mõju vahelae standarditud helirõhutasemete vahele erinevate moodulitevaheliste kinnituste korral. Nime taga on $D_{nT,w}$ ühenumbiline väärtus ning sulgudes spektrilähendusteguri $C_{50-3150}$ parandus

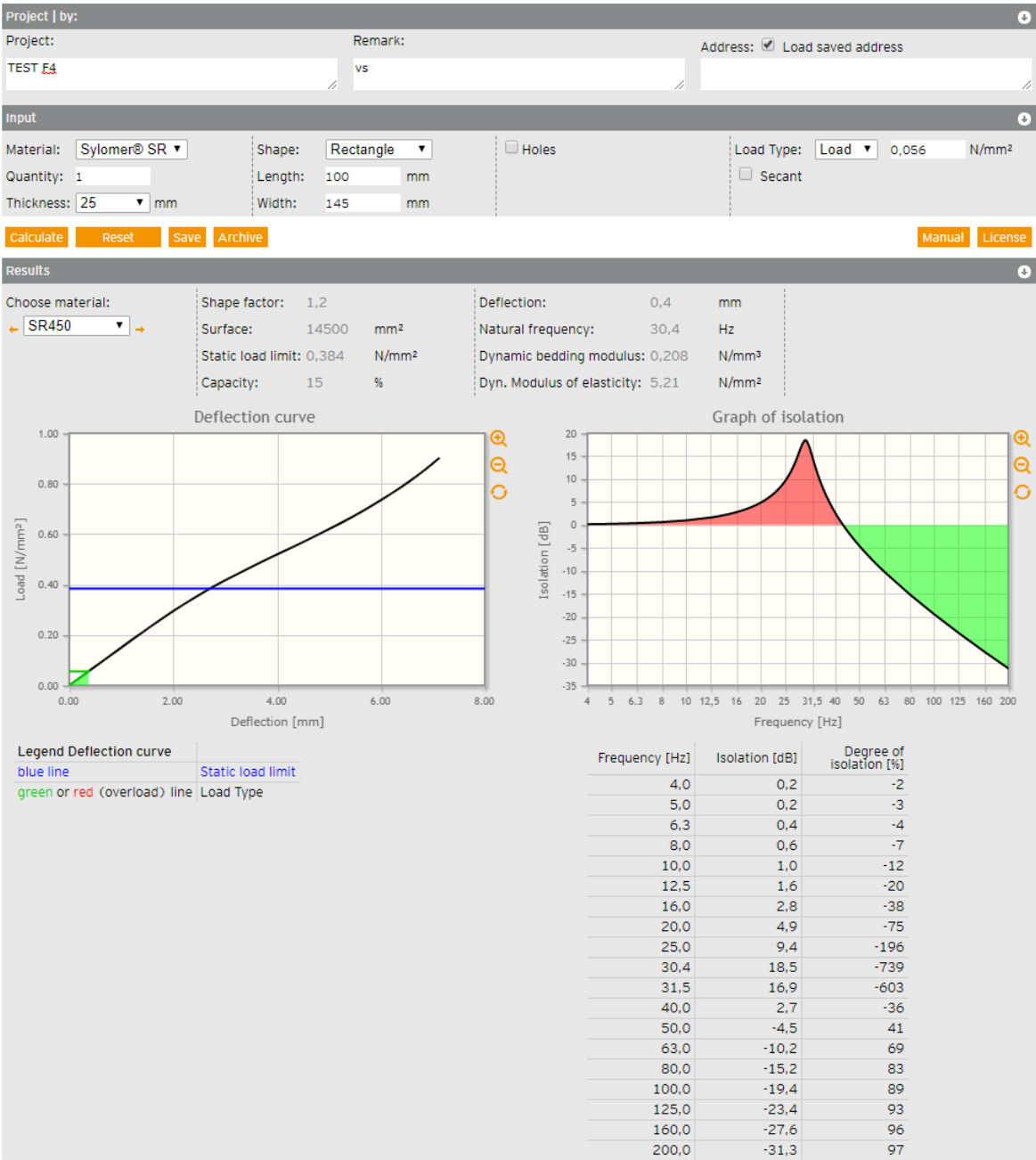


Joonis L3 TT2-s katsetatud moodulite vahematerjalide mõju vahelae löögiheli standarditud rõhutasemetele. Nime taga on $L_{nT,w}$ ühenumbiline väärtus ning sulgudes spektrilähendusteguri $C_{1,50-2500}$ parandus

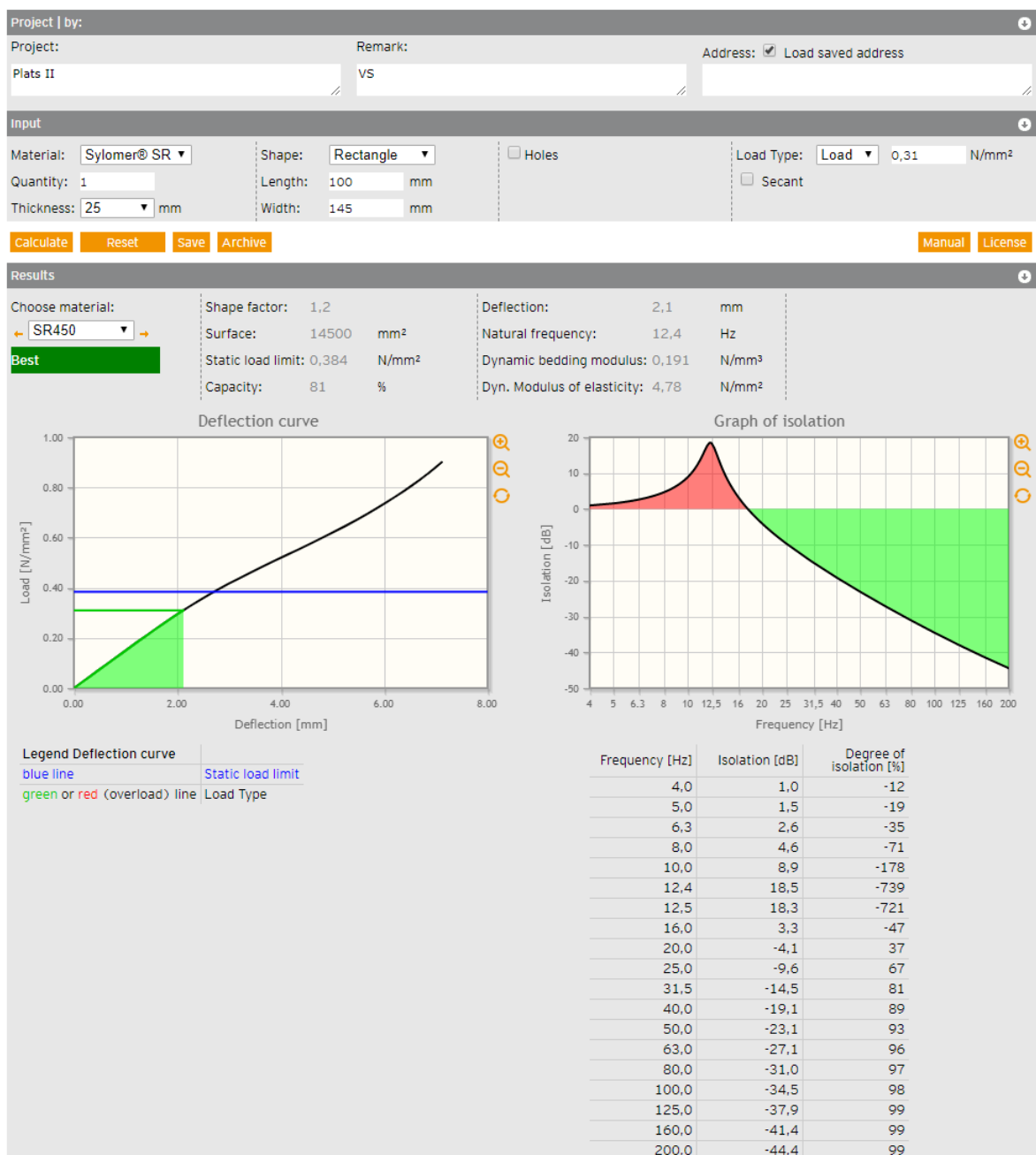


Joonis L4 TT2-s katsetatud moodulite vahematerjalide mõju vahelae standarditud helitasemete vahele. Nime taga on $D_{nT,w}$ ühenumbiline väärtus ning sulgudes spektrilähendusteguri $C_{50-3150}$ parandus

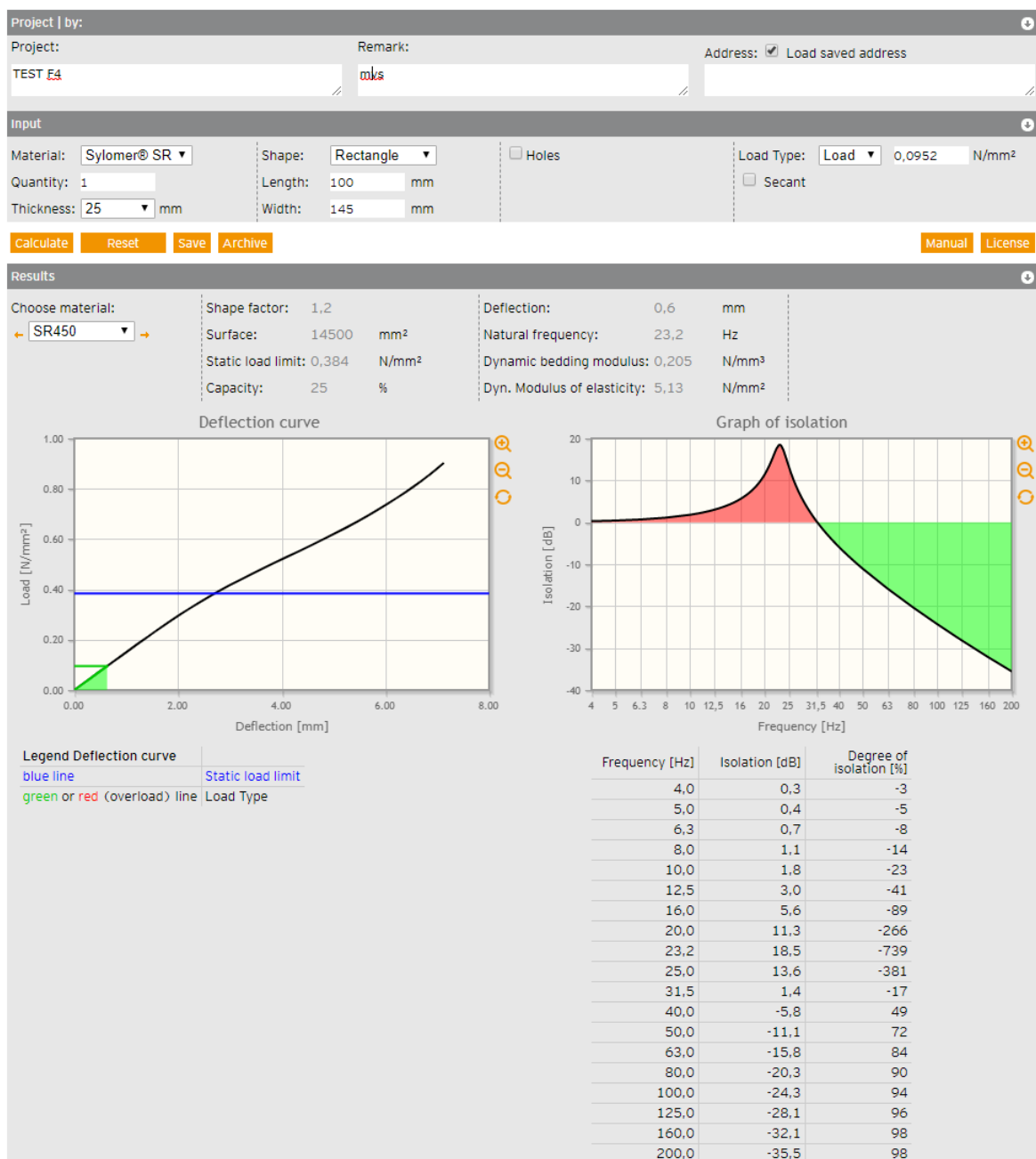
Lisa 3 FreqCalc kuvatõmmised



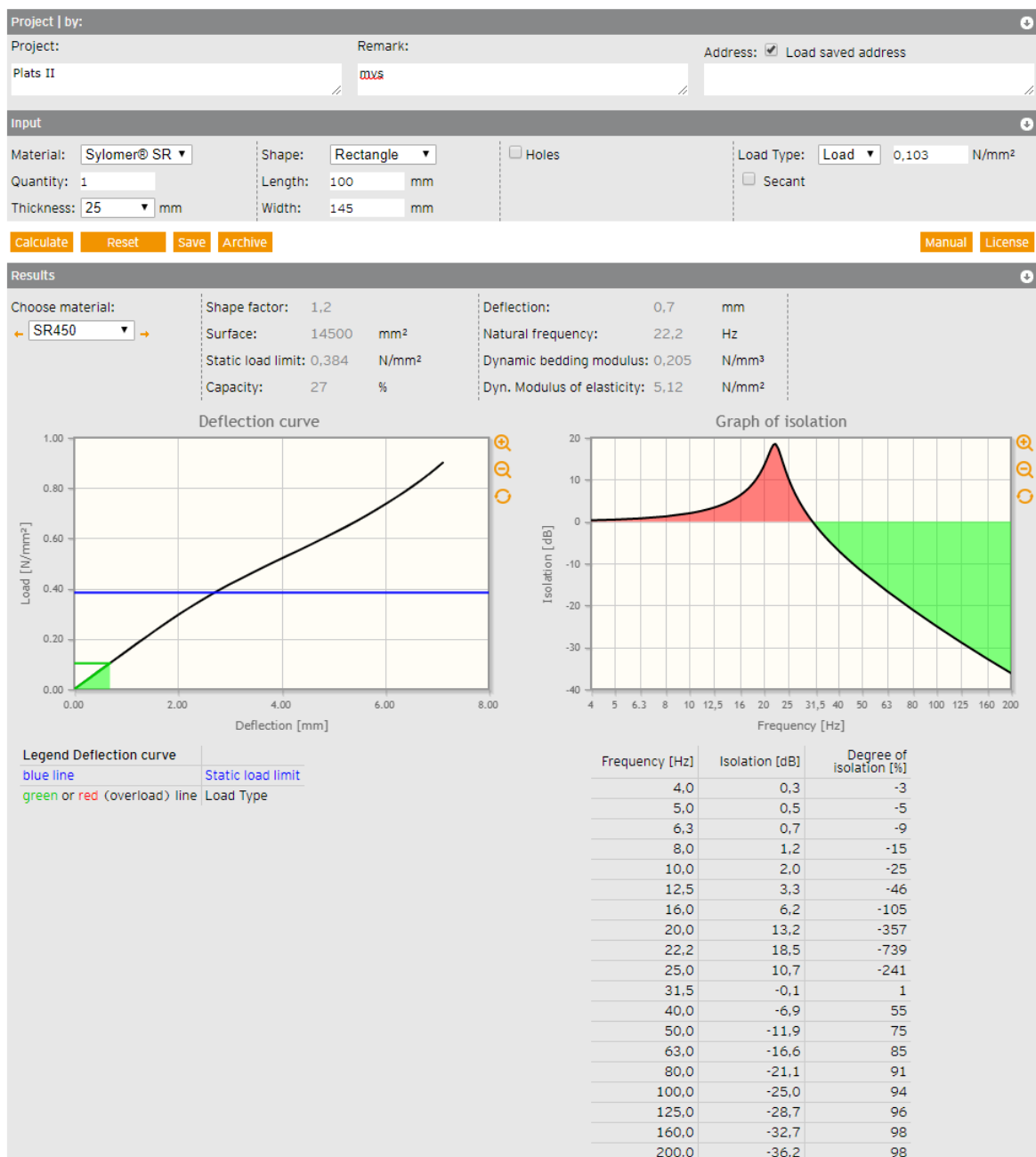
Joonis L5 Kuvatõmmis FreqCalc-ist tehasemõõdistusel mooduli lühikeses küljes vahelaes paikneva vibratsiooni isolatsiooni materjali arvutustulemustest



Joonis L6 Kuvatõmmis FreqCalc-ist objektimõõdistusel mooduli lühikeses küljes II-III korruse vahelaes paikneva vibratsiooni isolatsiooni materjali arvutustulemustest



Joonis L7 Kuvatõmmis FreqCalc-ist tehasemõõdistusel mooduli pikas küljes vahelaes paikneva vibratsiooni isolatsiooni materjali arvutustulemustest



Joonis L8 Kuvatõmmis FreqCalc-ist objektimõõdistusel mooduli pikas küljes II-III korruse vahelaes paikneva vibratsiooni isolatsiooni materjali arvutustulemustest

Lisa 4 Väljavõtted Insuli arvutustulemustest

Sound Insulation Prediction (v9.0.8)

Program copyright Marshall Day Acoustics 2017

margin of error is generally within $R_w \pm 3$ dB

- Key No. 5722

Job Name:

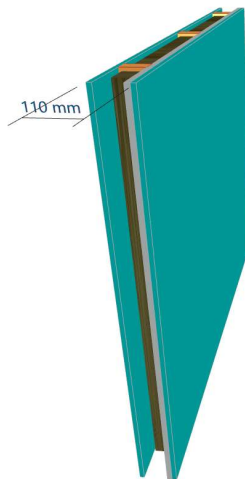
Job No.:

Date: 02.01.2020

File Name:

Initials: K. Saar

Notes:



R_w 43 dB

$C_{50-5000}$ -4 dB

$C_{tr, 50-5000}$ -13 dB

Mass-air-mass resonant frequency = 79 Hz

Panel Size = 2,5 m x 3,6 m

Partition surface mass = 29,9 kg/m²

System description

Panel 1 : 1 x 12,5 mm Knauf GKB/A

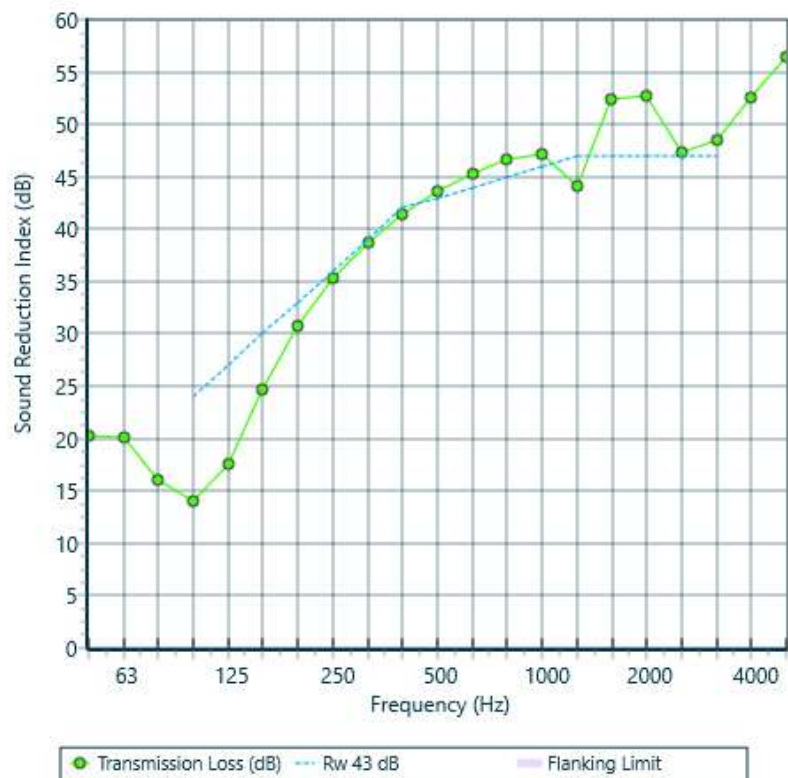
Frame: Timber stud; Cavity Width 70 mm, Stud spacing 600 mm, 1 x Rockwool (33kg/m³) Thickness 70 mm

Panel 2 + 1 x 15 mm Plywood fin 15

+ 1 x 12,5 mm Knauf GKB/A

Floor Cover: Thickness 0,02 mm

freq.(Hz)	TL(dB)	TL(dB)
50	20	
63	20	18
80	16	
100	14	
125	18	17
160	25	
200	31	
250	35	34
315	39	
400	41	
500	44	43
630	45	
800	47	
1000	47	46
1250	44	
1600	52	
2000	53	50
2500	47	
3150	49	
4000	52	51
5000	56	

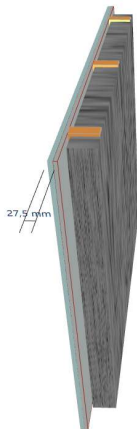


Sound Insulation Prediction (v9.0.8)

Program copyright Marshall Day Acoustics 2017
margin of error is generally within $R_w \pm 3$ dB
- Key No. 5722
Job Name:
Job No.:
Date:16.04.2019
File Name:MVS I 95 -01

Initials:K. Saar

Notes:MVS I 95 -01



Rw 47 dB

C₅₀₋₅₀₀₀ -1 dB

Ctr₅₀₋₅₀₀₀ -7 dB

Panel Size = 2,5 m x 4,0 m
Partition surface mass = 22,8 kg/m²

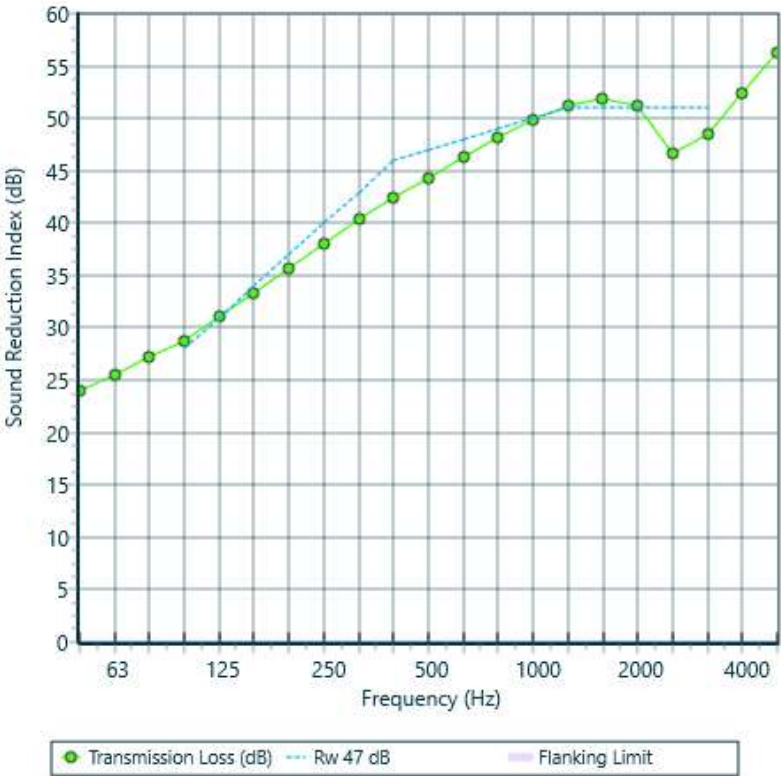
System description

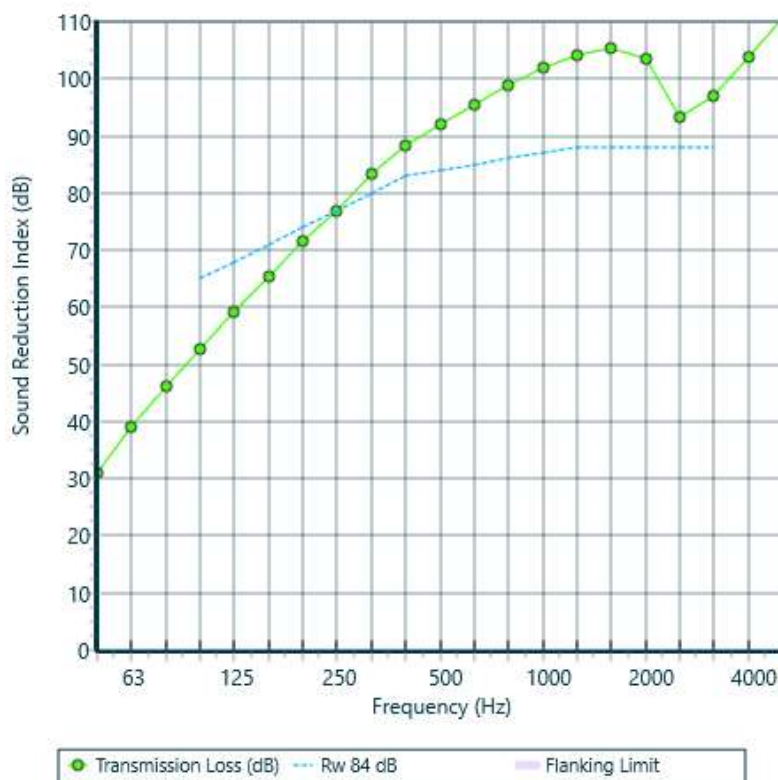
Panel 1 : 1 x 15 mm Knauf Red GKF 15mm + 1 x 12,5 mm Knauf GKB/A 12,5mm

Porous facing:: Rockwool (33kg/m3) Thickness 95 mm

Floor Cover: Thickness 0,02 mm

freq.(Hz)	TL(dB)	TL(dB)
50	24	25
63	26	
80	27	
100	29	31
125	31	
160	33	
200	36	38
250	38	
315	40	
400	42	44
500	44	
630	46	
800	48	49
1000	50	
1250	51	
1600	52	49
2000	51	
2500	47	
3150	49	51
4000	52	
5000	56	





Sound Insulation Prediction (v9.0.8)

Program copyright Marshall Day Acoustics 2017

margin of error is generally within $R_w \pm 3$ dB

- Key No. 5722

Job Name:

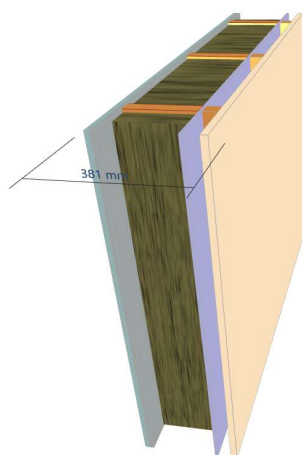
Job No.:

Date: 16.04.2019

File Name:

Initials: K. Saar

Notes:



R_w 46 dB

$C_{50-5000}$ 0 dB

$C_{tr, 50-5000}$ -8 dB

Mass-air-mass resonant frequency = 38 Hz, 117 Hz

Panel Size = 2,5 m x 3,6 m

Partition surface mass = 49,9 kg/m²

System description

Panel 1 : 1 x 15 mm Knauf Red GKF 15mm

+ 1 x 15 mm Plywood fin15

Frame: Timber stud; Cavity Width 220 mm, Stud spacing 600 mm, 1 x Rockwool (33kg/m³) Thickness 225 mm

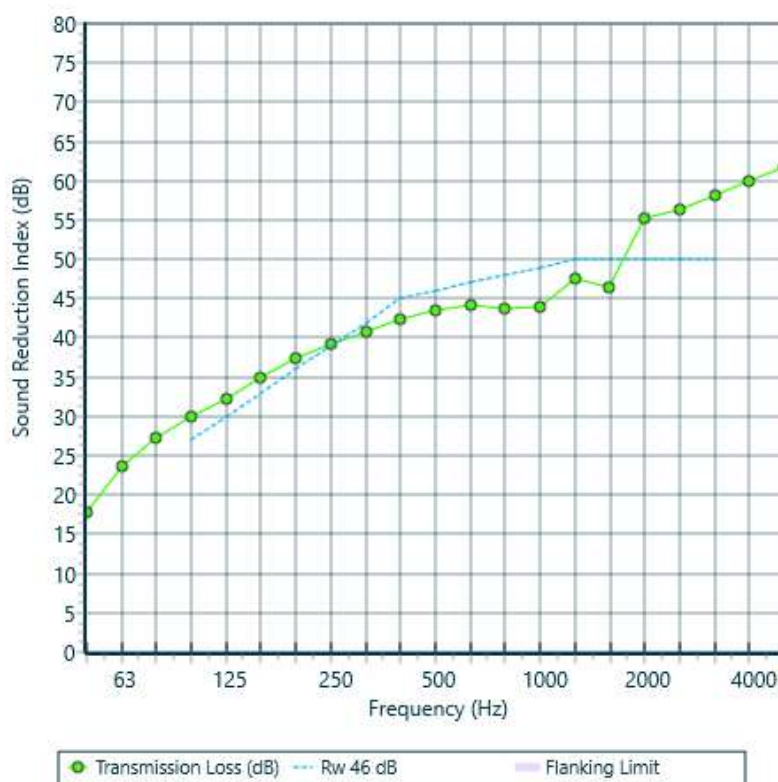
Panel 2 + 1 x 9,5 mm Gyproc GTS 9,5mm

Frame: Timber stud; Cavity Width 100 mm

Panel 3 + 1 x 21 mm Pine

Floor Cover: Thickness 0,02 mm

freq.(Hz)	TL(dB)	TL(dB)
50	18	
63	24	21
80	27	
100	30	
125	32	32
160	35	
200	37	
250	39	39
315	41	
400	42	
500	43	43
630	44	
800	44	
1000	44	45
1250	48	
1600	46	
2000	55	50
2500	56	
3150	58	
4000	60	60
5000	62	



Sound Insulation Prediction (v9.0.8)

Program copyright Marshall Day Acoustics 2017
margin of error is generally within $R_w \pm 3$ dB
- Key No. 5722
Job Name:EKS VL2
Job No.:
Date:07.12.2019
File Name:Insulation

Initials:K. Saar

Notes:



R_w 81 dB

$C_{50-5000}$ -10 dB

$C_{tr,50-5000}$ -24 dB

Mass-air-mass resonant frequency = 24 Hz
Panel Size = 2,5 m x 4,0 m
Partition surface mass = 42,5 kg/m²

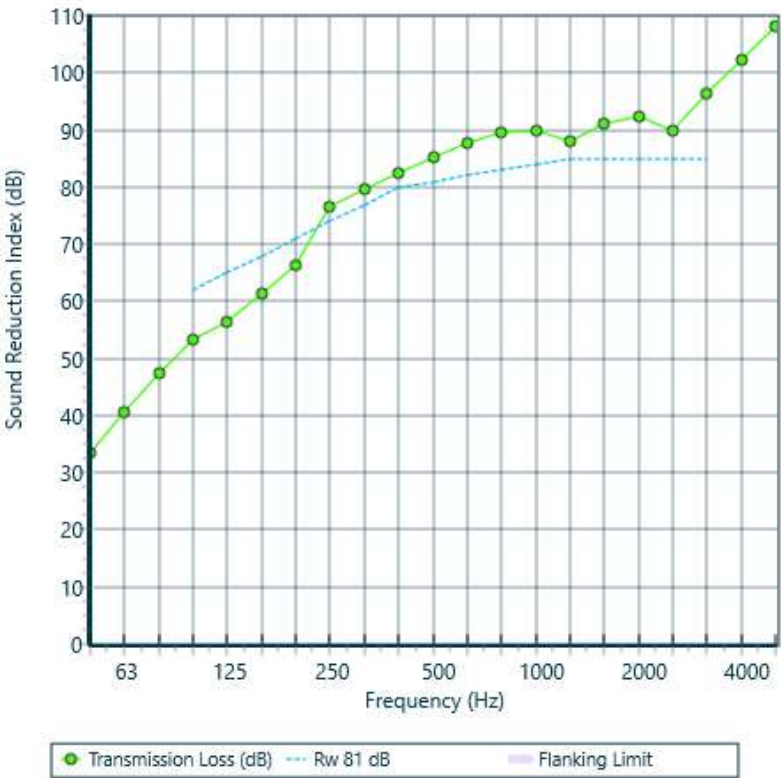
System description

Panel 1 : 1 x 22 mm Chipboard 22mm

Frame: Separate Joists; Cavity Width 508 mm ,Stud spacing 600 mm , 2 x Rockwool (33kg/m3) Thickness 160 mm
Panel 2 + 1 x 15 mm Knauf Red GKF 15mm + 1 x 11 mm Brannit 11mm

Floor Cover: None Thickness 0,02 mm

freq.(Hz)	TL(dB)	TL(dB)
50	33	
63	41	37
80	47	
100	53	
125	56	56
160	61	
200	66	
250	76	70
315	80	
400	83	
500	85	85
630	88	
800	90	
1000	90	89
1250	88	
1600	91	
2000	92	91
2500	90	
3150	96	
4000	102	100
5000	108	

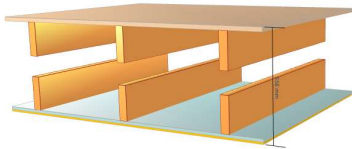


Sound Insulation Prediction (v9.0.8)

Program copyright Marshall Day Acoustics 2017
margin of error is generally within $R_w \pm 3$ dB
- Key No. 5722
Job Name:EKS VL2
Job No.:
Date:07.12.2019
File Name:Insulation Prediction

Initials:K. Saar

Notes:



Rw 53 dB

C₅₀₋₅₀₀₀ -1 dB

C_{tr 50-5000} -9 dB

Mass-air-mass resonant frequency = 27 Hz
Panel Size = 2,5 m x 4,0 m
Partition surface mass = 37,3 kg/m²

System description

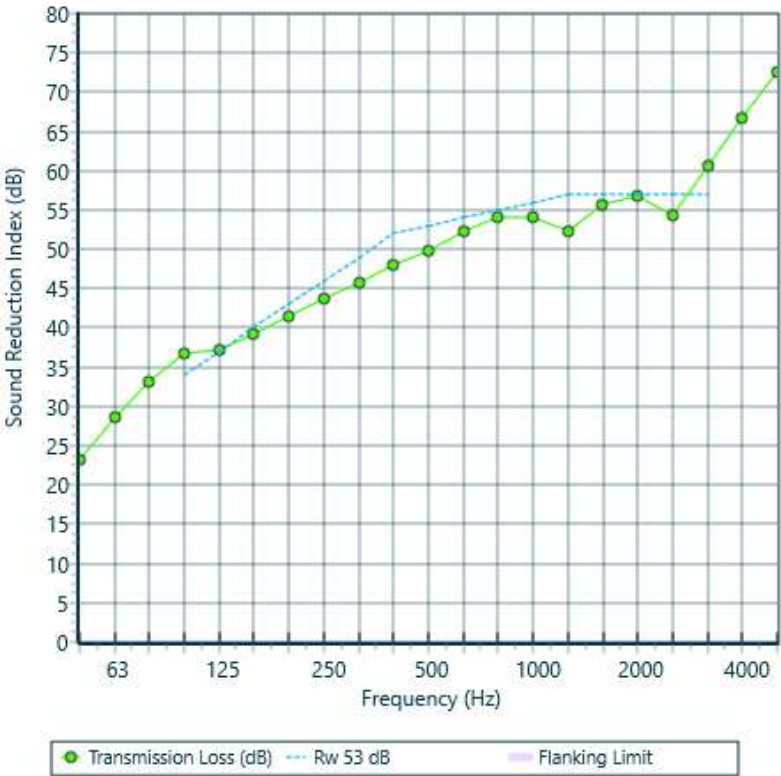
Panel 1 : 1 x 22 mm Chipboard 22mm

Frame: Separate Joists; Cavity Width 508 mm
Panel 2 + 1 x 15 mm Knauf Red GKF 15mm

+ 1 x 11 mm Brannit 11mm

Floor Cover: Timber (7mm LOC Laminate on 2mm foam underlay) Thickness 7 mm

freq.(Hz)	TL(dB)	TL(dB)
50	23	
63	29	27
80	33	
100	37	
125	37	38
160	39	
200	41	
250	44	43
315	46	
400	48	
500	50	50
630	52	
800	54	
1000	54	53
1250	52	
1600	56	
2000	57	55
2500	54	
3150	61	
4000	67	64
5000	73	



Sound Insulation Prediction (v9.0.8)

Program copyright Marshall Day Acoustics 2017

margin of error is generally within $L_{n,w}$ +/- 3 dB

- Key No. 5722

Job Name:EKS VL2

Job No.:

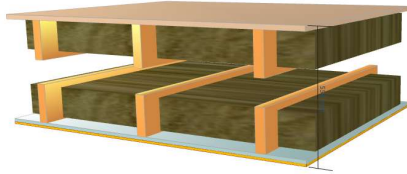
Initials:K. Saar

Date:07.12.2019

File Name:Insulation



Notes:



$L_{n,w}$ 53 dB

Mass-air-mass resonant frequency = 29 Hz

Panel Size = 2,5 m x 4,0 m

Partition surface mass = 42,5 kg/m²

System description

Panel 1 : 1 x 22 mm Chipboard 22mm

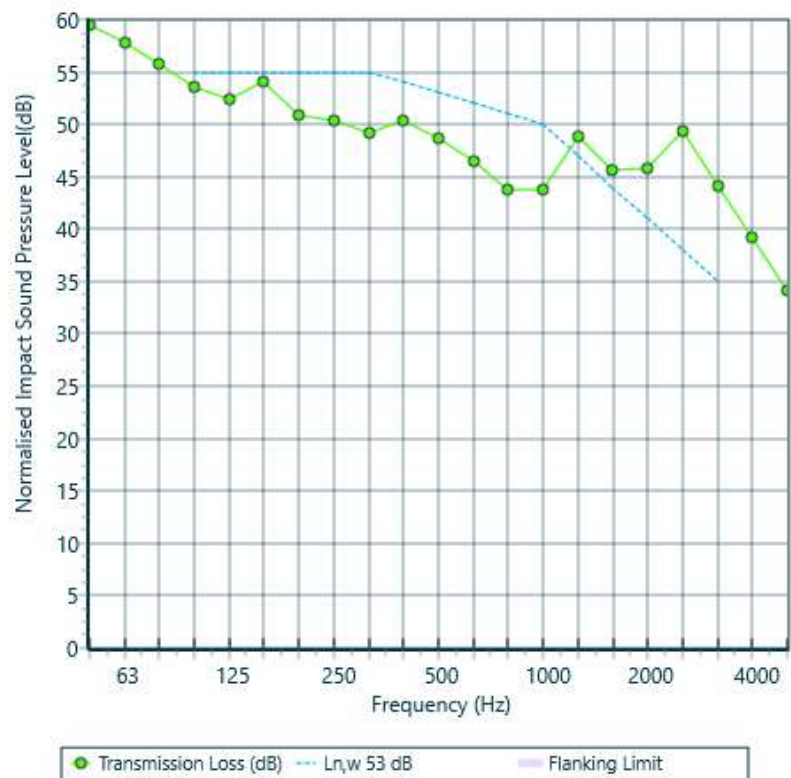
Frame: Separate Joists; Cavity Width 508 mm ,Stud spacing 600 mm , 2 x Rockwool (33kg/m³) Thickness 160 mm

Panel 2 + 1 x 15 mm Knauf Red GKF 15mm

+ 1 x 11 mm Brannit 11mm

Floor Cover: None Thickness 0,02 mm

freq.(Hz)	TL(dB)	TL(dB)
50	59	
63	58	63
80	56	
100	54	
125	52	58
160	54	
200	51	
250	50	55
315	49	
400	50	
500	49	54
630	47	
800	44	
1000	44	51
1250	49	
1600	46	
2000	46	52
2500	49	
3150	44	
4000	39	46
5000	34	



Sound Insulation Prediction (v9.0.8)

Program copyright Marshall Day Acoustics 2017
margin of error is generally within $L_{n,w}$ +/- 3 dB
- Key No. 5722
Job Name:EKS VL2
Job No.:
Date:07.12.2019
File Name:Insulation Prediction

Initials:K. Saar

Notes:



$L_{n,w}$ 50 dB

Mass-air-mass resonant frequency = 29 Hz
Panel Size = 2,5 m x 4,0 m
Partition surface mass = 42,5 kg/m²

System description

Panel 1 : 1 x 22 mm Chipboard 22mm

Frame: Separate Joists; Cavity Width 508 mm ,Stud spacing 600 mm , 2 x Rockwool (33kg/m3) Thickness 160 mm
Panel 2 + 1 x 15 mm Knauf Red GKF 15mm + 1 x 11 mm Brannit 11mm

Floor Cover: Timber(7mm LOC Laminate on 2mm foam underlay) Thickness 7 mm

freq.(Hz)	TL(dB)	TL(dB)
50	56	
63	56	60
80	54	
100	50	
125	51	56
160	52	
200	51	
250	48	54
315	47	
400	46	
500	43	49
630	40	
800	35	
1000	37	46
1250	45	
1600	44	
2000	44	49
2500	45	
3150	43	
4000	40	45
5000	36	



Sound Insulation Prediction (v9.0.8)

Program copyright Marshall Day Acoustics 2017

margin of error is generally within $R_w \pm 3$ dB

- Key No. 5722

Job Name:

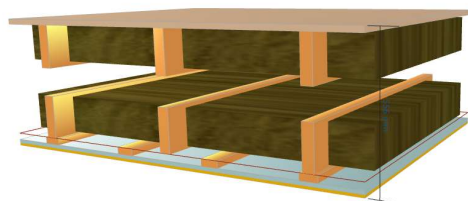
Job No.:

Initials:K. Saar

Date:07.12.2019

File Name:Insulation Prediction

Notes:



R_w 72 dB

$C_{50-5000}$ -7 dB

$C_{tr,50-5000}$ -20 dB

Mass-air-mass resonant frequency = ∞ Hz, 0 Hz

Panel Size = 2,5 m x 4,0 m

Partition surface mass = 43,3 kg/m²

System description

Panel 1 : 1 x 22 mm Chipboard 22mm

Frame: Separate Joists; Cavity Width 480 mm ,Stud spacing 600 mm , 2 x Rockwool (33kg/m³) Thickness 160 mm

Panel 2 + 1 x 0,4 mm Rockwool T150

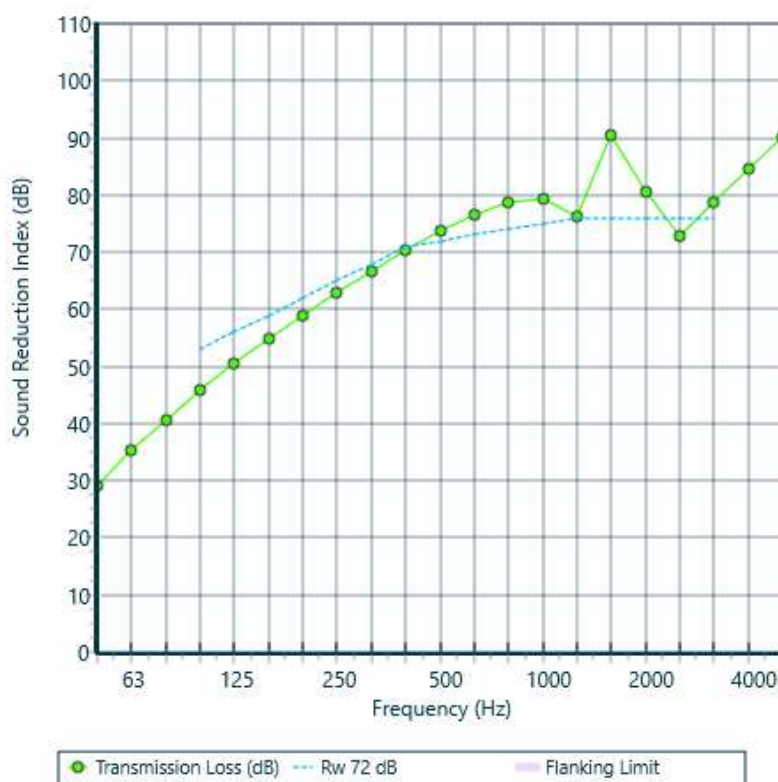
Frame: Timber stud; Cavity Width 28 mm

Panel 3 + 1 x 15 mm Knauf Red GKF 15mm

+ 1 x 11 mm Brannit 11mm

Floor Cover: None Thickness 0,02 mm

freq.(Hz)	TL(dB)	TL(dB)
50	29	
63	35	33
80	41	
100	46	
125	50	49
160	55	
200	59	
250	63	62
315	67	
400	70	
500	74	73
630	77	
800	79	
1000	79	78
1250	76	
1600	90	
2000	81	77
2500	73	
3150	79	
4000	84	82
5000	90	



Sound Insulation Prediction (v9.0.8)

Program copyright Marshall Day Acoustics 2017

margin of error is generally within $L_{n,w} \pm 3$ dB

- Key No. 5722

Job Name:

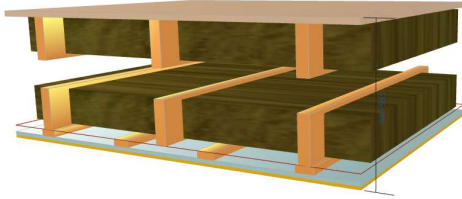
Job No.:

Initials:K. Saar

Date:07.12.2019

File Name:Insulation Prediction

Notes:



$L_{n,w}$ 48 dB

Mass-air-mass resonant frequency = ≈ 0 Hz, 0 Hz

Panel Size = 2,5 m x 4,0 m

Partition surface mass = 19,2 kg/m²

System description

Panel 1 : 1 x 22 mm Chipboard 22mm

Frame: Separate Joists; Cavity Width 480 mm ,Stud spacing 600 mm , 2 x Rockwool (33kg/m³) Thickness 160 mm

Panel 2 + 1 x 0,4 mm Rockwool T150

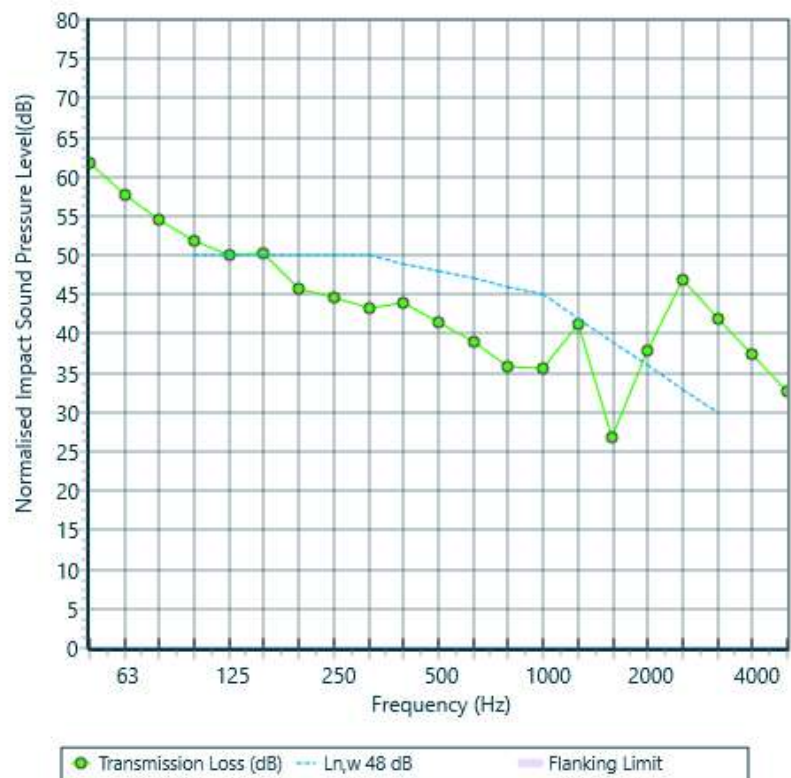
Frame: Timber stud; Cavity Width 28 mm

Panel 3 + 1 x 15 mm Knauf Red GKF 15mm

+ 1 x 11 mm Brannit 11mm

Floor Cover: None Thickness 0,02 mm

freq.(Hz)	TL(dB)	TL(dB)
50	62	
63	58	64
80	54	
100	52	
125	50	55
160	50	
200	46	
250	45	49
315	43	
400	44	47
500	42	
630	39	
800	36	
1000	36	43
1250	41	
1600	27	
2000	38	47
2500	47	
3150	42	
4000	37	44
5000	33	



Sound Insulation Prediction (v9.0.8)

Program copyright Marshall Day Acoustics 2017

margin of error is generally within $L_{n,w} \pm 3$ dB

- Key No. 5722

Job Name:

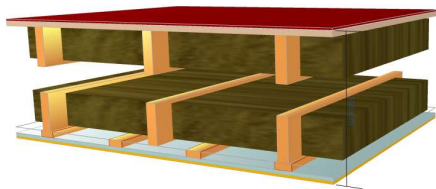
Job No.:

Initials: K. Saar

Date: 09.12.2019

File Name:

Notes:



$L_{n,w}$ 46 dB

Mass-air-mass resonant frequency = ≈ 0 Hz, 0 Hz

Panel Size = 2,5 m x 4,0 m

Partition surface mass = 19,2 kg/m²

System description

Panel 1 : 1 x 22 mm Chipboard 22mm

Frame: Separate Joists; Cavity Width 480 mm, Stud spacing 600 mm, 2 x Rockwool (33kg/m³) Thickness 160 mm

Panel 2 + 1 x 0,4 mm Rockwool T150

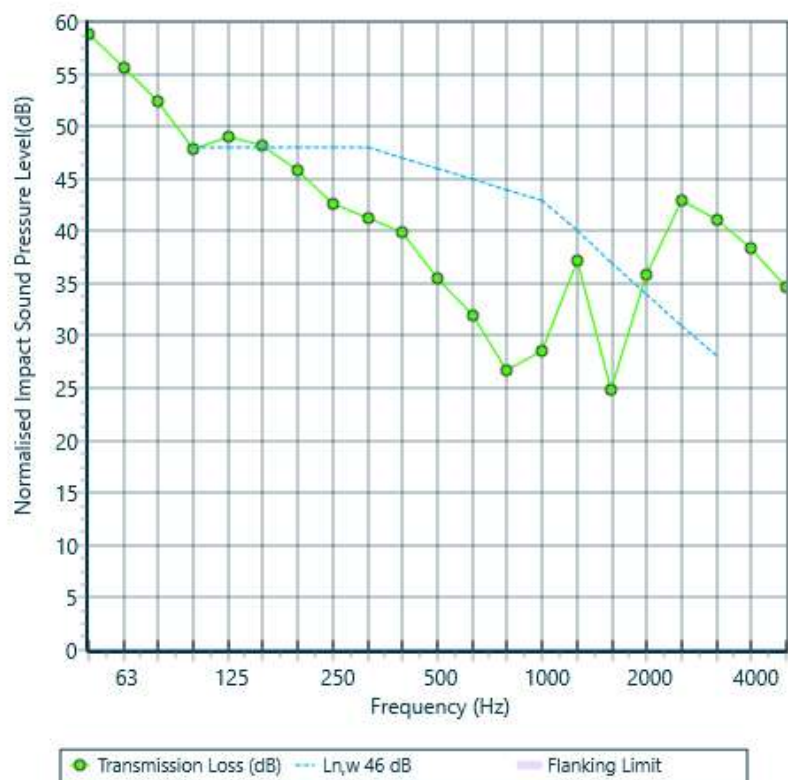
Frame: Timber stud; Cavity Width 28 mm

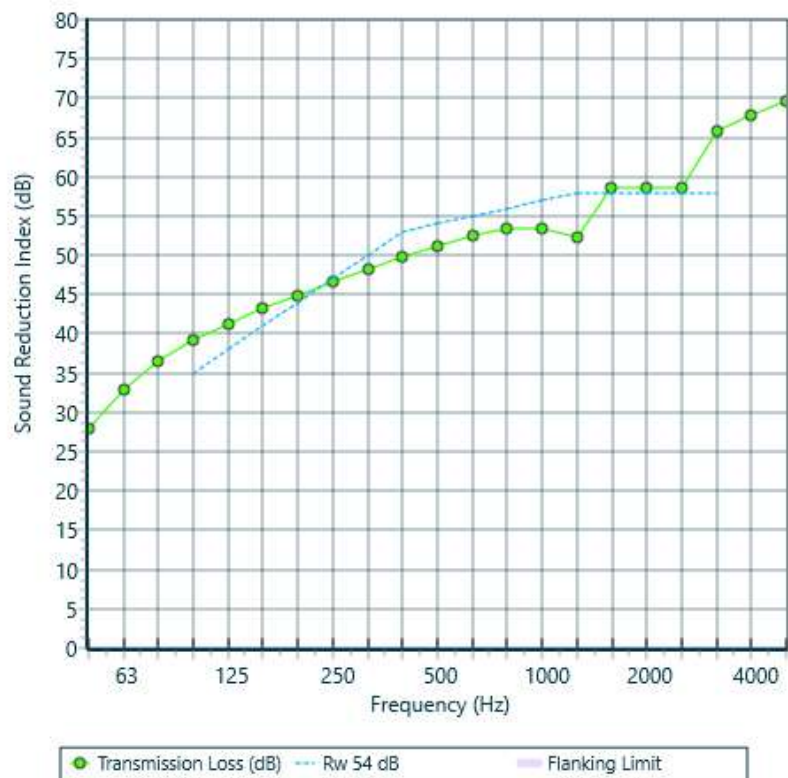
Panel 3 + 1 x 15 mm Knauf Red GKF 15mm

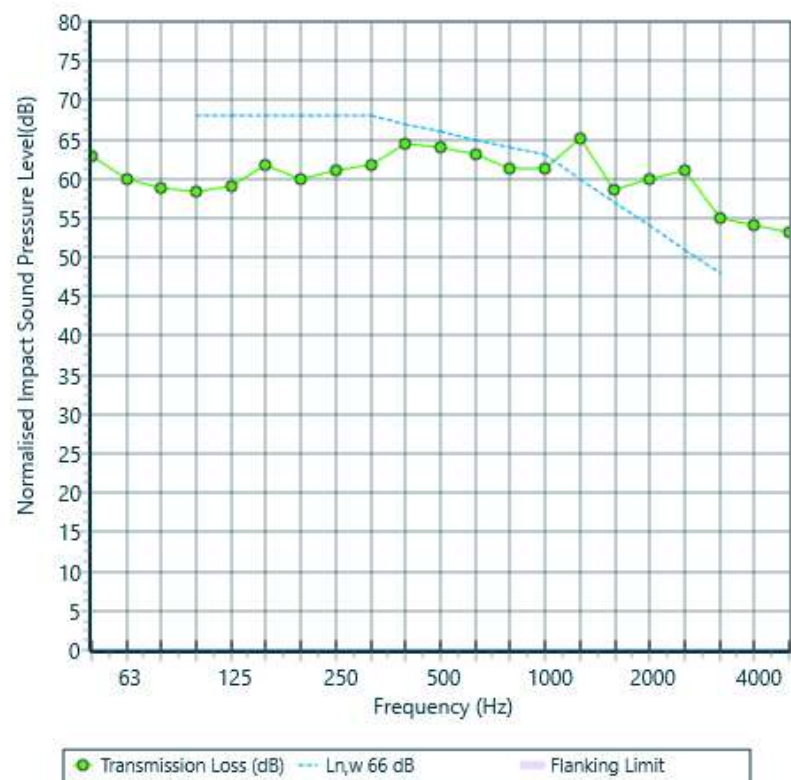
+ 1 x 11 mm Brannit 11mm

Floor Cover: Timber (7mm LOC Laminate on 2mm foam underlay) Thickness 7 mm

freq.(Hz)	TL(dB)	TL(dB)
50	59	
63	56	61
80	52	
100	48	
125	49	53
160	48	
200	46	
250	43	48
315	41	
400	40	
500	36	42
630	32	
800	27	
1000	29	38
1250	37	
1600	25	
2000	36	44
2500	43	
3150	41	
4000	38	43
5000	35	







Sound Insulation Prediction (v9.0.8)

Program copyright Marshall Day Acoustics 2017

margin of error is generally within $L_{n,w}$ +/- 3 dB

- Key No. 5722

Job Name:

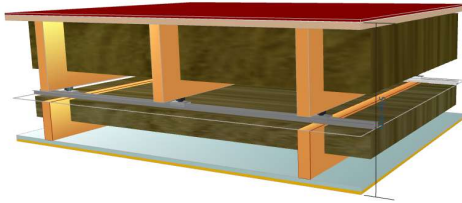
Job No.:

Initials:K. Saar

Date:09.12.2019

File Name:

Notes:



$L_{n,w}$ 63 dB

Mass-air-mass resonant frequency = ≈ 0 Hz, 0 Hz

Panel Size = 2,5 m x 4,0 m

Partition surface mass = 21,1 kg/m²

System description

Panel 1 : 1 x 22 mm Chipboard 22mm

Frame: Viga Rígida con Soporte Antivibratorio; Cavity Width 340 mm ,Stud spacing 600 mm , 1 x Rockwool (33kg/m³) Thickness 220 mm

Panel 2 + 1 x 0,6 mm Rockwool T150

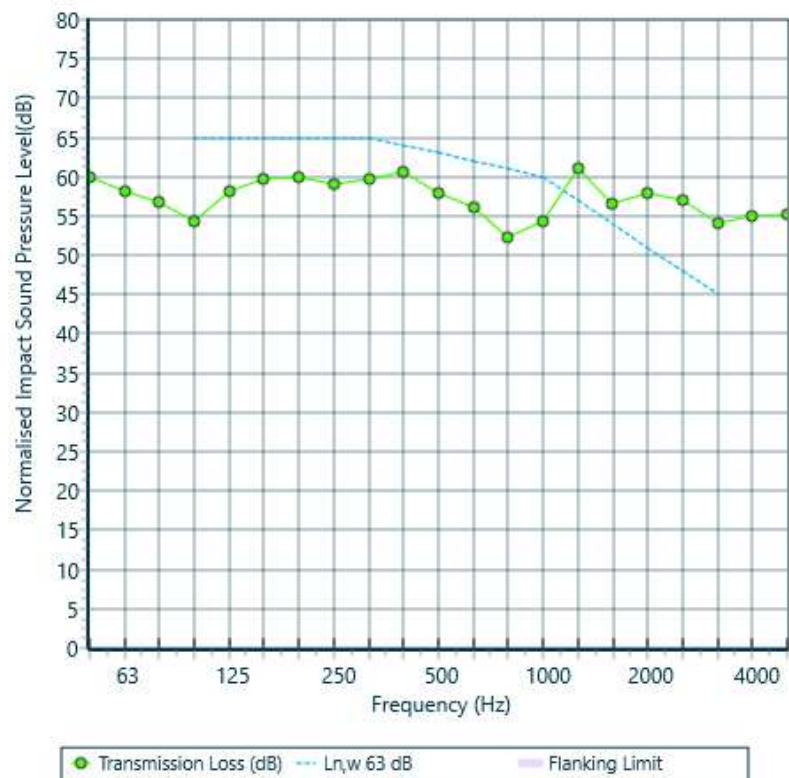
Frame: Solid Joist; Cavity Width 167 mm ,Stud spacing 1200 mm , 1 x Rockwool (33kg/m³) Thickness 100 mm

Panel 3 + 1 x 15 mm Knauf Red GKF 15mm

+ 1 x 11 mm Brannit 11mm

Floor Cover: Timber(7mm LOC Laminate on 2mm foam underlay) Thickness 7 mm

freq.(Hz)	TL(dB)	TL(dB)
50	60	
63	58	63
80	57	
100	54	
125	58	63
160	60	
200	60	
250	59	64
315	60	
400	61	
500	58	63
630	56	
800	52	
1000	54	62
1250	61	
1600	57	
2000	58	62
2500	57	
3150	54	
4000	55	60
5000	55	



Sound Insulation Prediction (v9.0.8)

Program copyright Marshall Day Acoustics 2017

margin of error is generally within $R_w \pm 3$ dB

- Key No. 5722

Job Name:

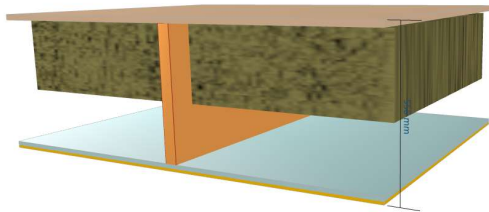
Job No.:

Date: 08.12.2019

File Name: VL5

Initials: K. Saar

Notes:



R_w 56 dB

$C_{50-5000}$ -1 dB

$C_{tr,50-5000}$ -8 dB

Mass-air-mass resonant frequency = 24 Hz

Panel Size = 2,5 m x 4,0 m

Partition surface mass = 47,1 kg/m²

System description

Panel 1 : 1 x 22 mm Chipboard 22mm

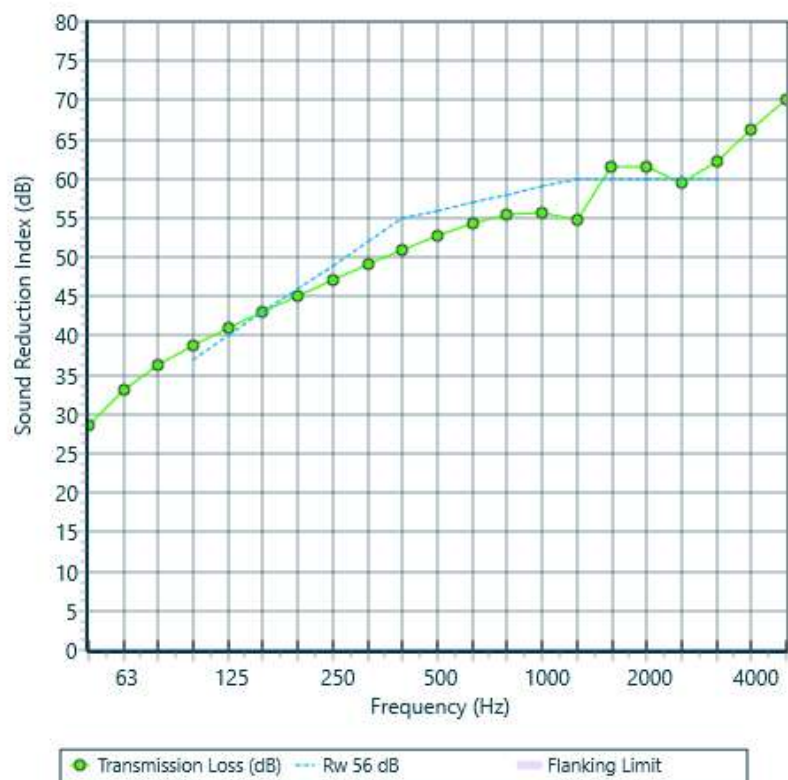
Frame: Solid Joist; Cavity Width 508 mm, Stud spacing 3000 mm, 1 x Rockwool (33kg/m³) Thickness 300 mm

Panel 2 : 1 x 15 mm Knauf Red GKF 15mm

+ 1 x 11 mm Brannit 11mm

Floor Cover: None Thickness 0,02 mm

freq.(Hz)	TL(dB)	TL(dB)
50	29	
63	33	31
80	36	
100	39	
125	41	41
160	43	
200	45	
250	47	47
315	49	
400	51	
500	53	52
630	54	
800	55	
1000	56	55
1250	55	
1600	61	
2000	62	61
2500	59	
3150	62	
4000	66	65
5000	70	



Sound Insulation Prediction (v9.0.8)

Program copyright Marshall Day Acoustics 2017

margin of error is generally within $L_{n,w} \pm 3$ dB

- Key No. 5722

Job Name:

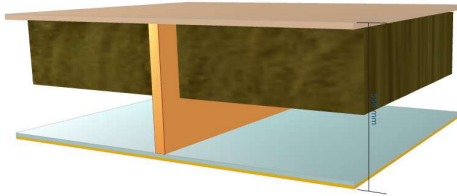
Job No.:

Initials:K. Saar

Date:08.12.2019

File Name:

Notes:



$L_{n,w}$ 71 dB

Mass-air-mass resonant frequency = 29 Hz

Panel Size = 2,5 m x 4,0 m

Partition surface mass = 47,1 kg/m²

System description

Panel 1 : 1 x 22 mm Chipboard 22mm

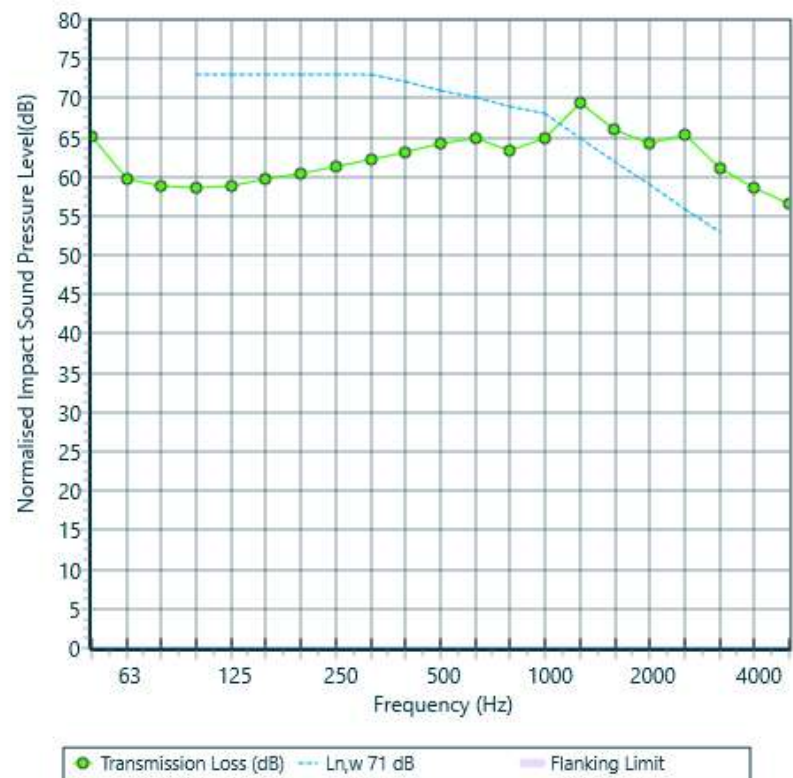
Frame: Solid Joist; Cavity Width 508 mm ,Stud spacing 3000 mm , 1 x Rockwool (33kg/m³) Thickness 300 mm

Panel 2 + 1 x 15 mm Knauf Red GKF 15mm

+ 1 x 11 mm Brannit 11mm

Floor Cover: None Thickness 0,02 mm

freq.(Hz)	TL(dB)	TL(dB)
50	65	
63	60	67
80	59	
100	59	
125	59	64
160	60	
200	60	
250	61	66
315	62	
400	63	
500	64	69
630	65	
800	63	
1000	65	71
1250	69	
1600	66	
2000	64	70
2500	65	
3150	61	
4000	59	64
5000	57	



Sound Insulation Prediction (v9.0.8)

Program copyright Marshall Day Acoustics 2017

margin of error is generally within $L_{n,w}$ +/- 3 dB

- Key No. 5722

Job Name:

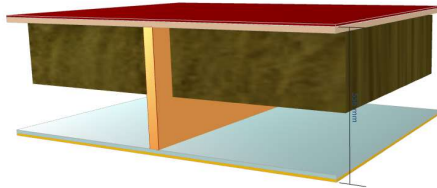
Job No.:

Initials:K. Saar

Date:09.12.2019

File Name:

Notes:



$L_{n,w}$ 69 dB

Mass-air-mass resonant frequency = 29 Hz

Panel Size = 2,5 m x 4,0 m

Partition surface mass = 47,1 kg/m²

System description

Panel 1 : 1 x 22 mm Chipboard 22mm

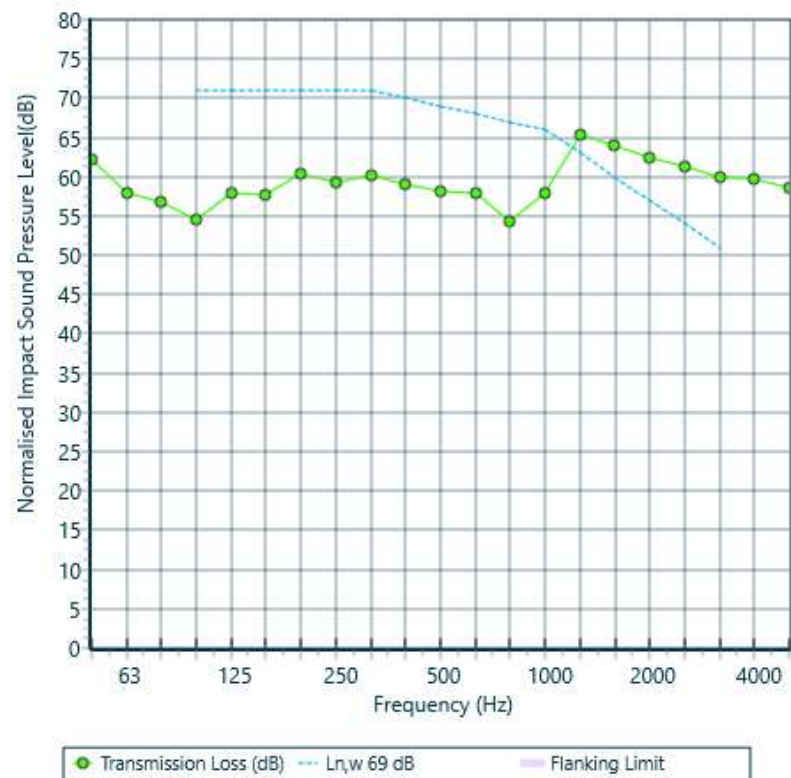
Frame: Solid Joist; Cavity Width 508 mm ,Stud spacing 3000 mm , 1 x Rockwool (33kg/m³) Thickness 300 mm

Panel 2 + 1 x 15 mm Knauf Red GKF 15mm

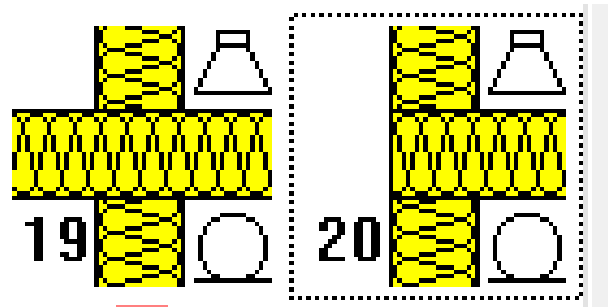
+ 1 x 11 mm Brannit 11mm

Floor Cover: Timber(7mm LOC Laminate on 2mm foam underlay) Thickness 7 mm

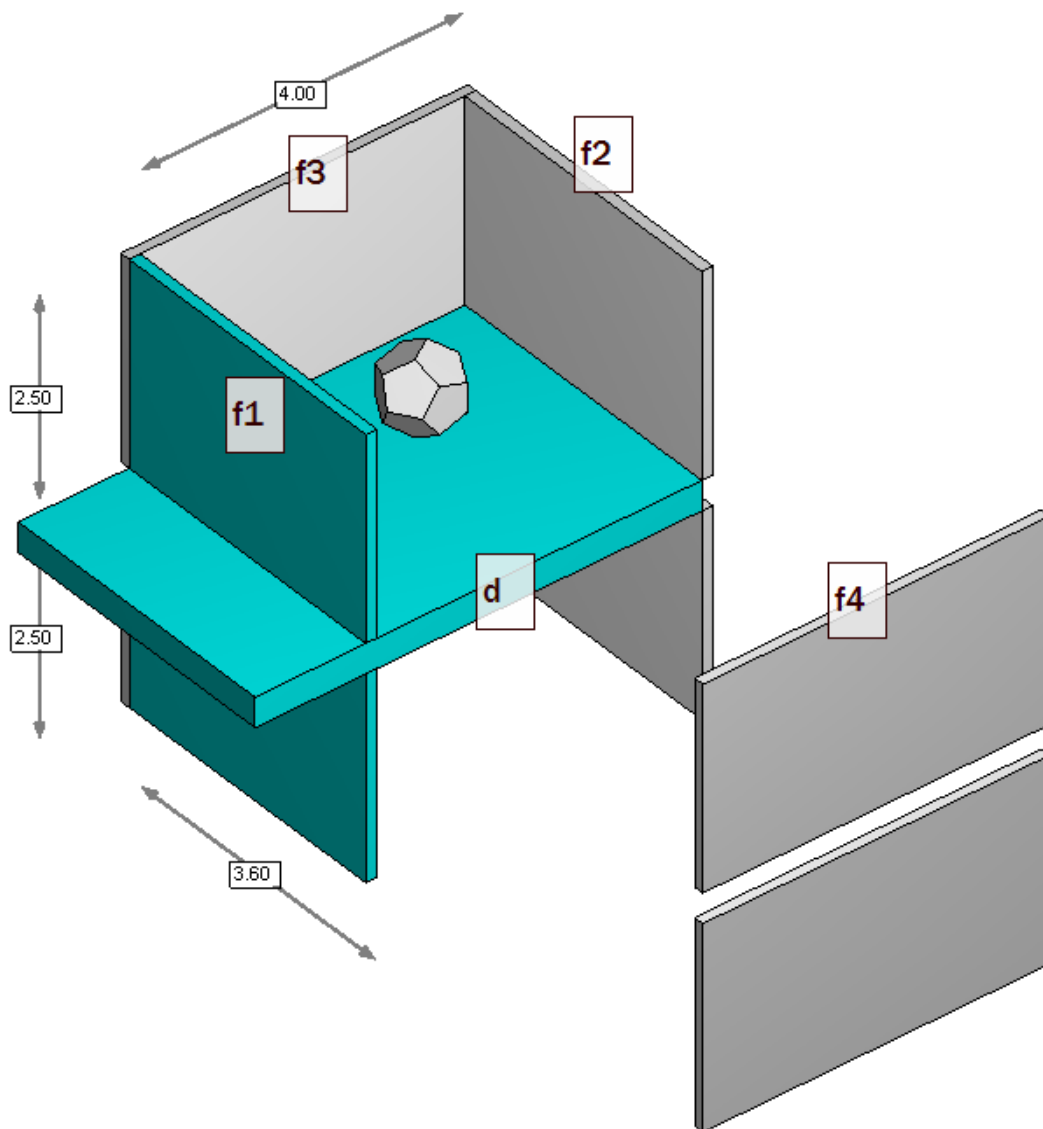
freq.(Hz)	TL(dB)	TL(dB)
50	62	
63	58	64
80	57	
100	55	
125	58	62
160	58	
200	60	
250	59	65
315	60	
400	59	
500	58	63
630	58	
800	54	
1000	58	66
1250	65	
1600	64	
2000	62	67
2500	61	
3150	60	
4000	60	64
5000	59	



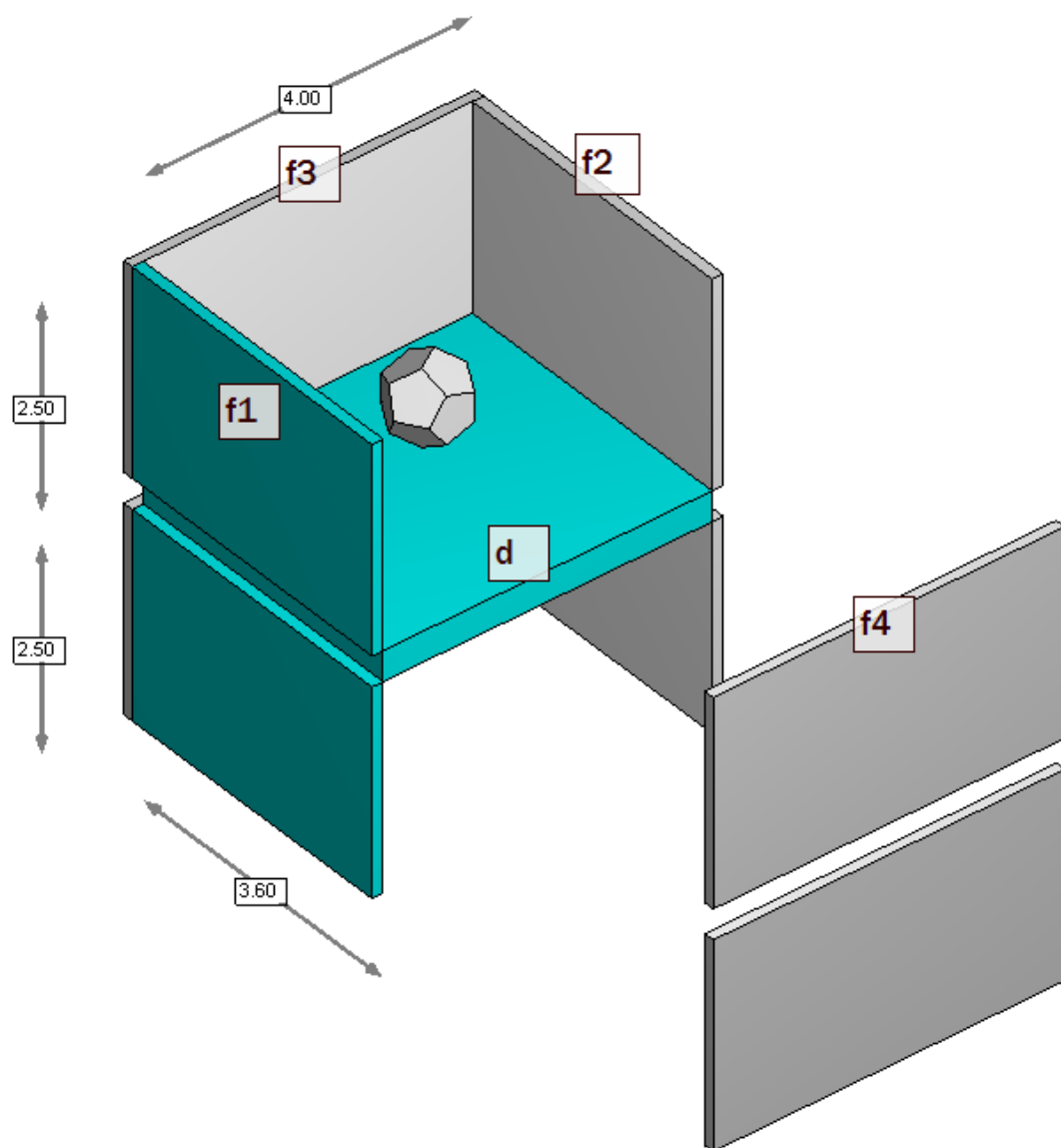
Lisa 5 Kuvatõmmised Bastianist. Väljavõtted Bastiani arvutustulemustest



Joonis L9 Kuvatõmmis arvutusmodelites I, II ja III kasutatud sõlmetüüpidest 19 ja 20



Joonis L10 Kuvatõmmis Bastianist. Arvutusmodeli I ja arvutusmodeli II skeem

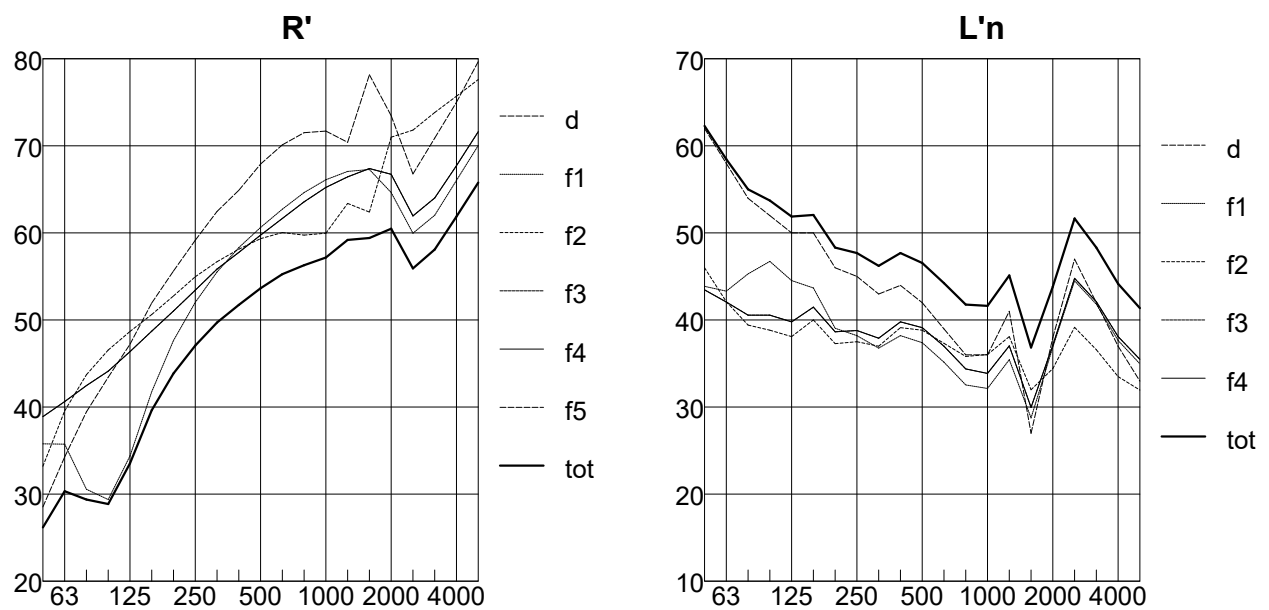


Joonis L10 Kuvatõmmis Bastianist. Arvutusmodeli III skeem

Worksheet-Table

		Sending Room		Junction	Receiving Room		R'w		L'n,w	
M	t	Basic Element	Additional Layer	Type-No.	Basic Element	Additional Layer	dB	%	dB	%
X	d	EKS VL03					68.2	5	47.7	32
X	f1	EKS 70 SS		19	EKS 70 SS		59.4	41	45.5	19
X	f2	EKS VS		20	EKS VS		62.7	19	41.9	8
X	f3	EKS MVS I		20	EKS MVS I		63.1	17	45.7	20
X	f4	EKS MVS I		20	EKS MVS I		63.1	17	45.7	20
X	f5			2						
						Total:	55.2	100	52.3	100

Resulting Diagram



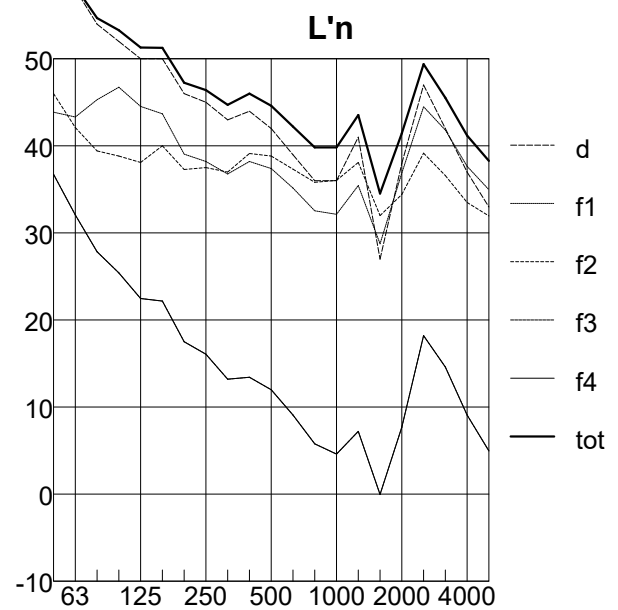
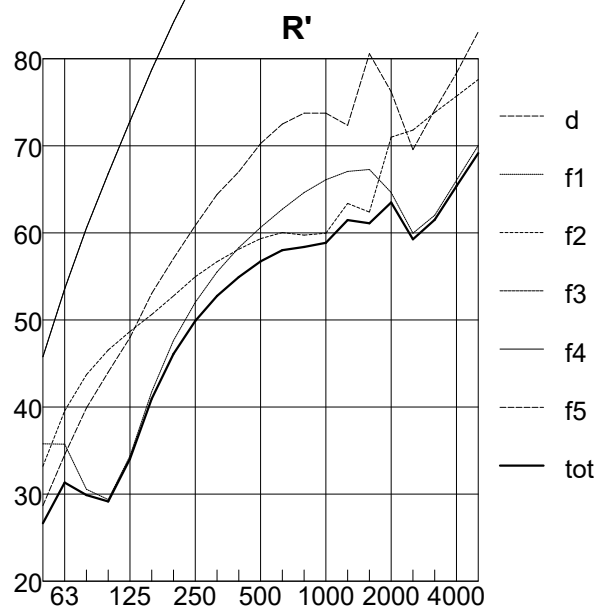
$R'w = 55$
 $R'w + C = 52$
 $R'w + Ctr = 46$
 $R'w + C_{100-5000} = 53$
 $R'w + C_{tr,100-5000} = 46$
 $R'w + C_{50-5000} = 52$
 $R'w + C_{tr,50-5000} = 44$
 $R'w + C_{50-3150} = 52$
 $R'w + C_{tr,50-3150} = 44$

$L'n,w = 53$
 $L'n,w + C_i = 45$
 $L'n,w + C_{i,50-2500} = 51$

Worksheet-Table

		Sending Room		Junction	Receiving Room		R'w		L'n,w	
M	t	Basic Element	Additional Layer	Type-No.	Basic Element	Additional Layer	dB	%	dB	%
X	d	EKS VL03					70.0	6	47.7	54
X	f1	EKS 70 SS		19	EKS 70 SS		59.4	64	45.5	32
X	f2	EKS VS		20	EKS VS		62.7	30	41.9	14
X	f3	EKS mvs II		20	EKS mvs II		97.6	0.	19.6	0.
X	f4	EKS mvs II		20	EKS mvs II		97.6	0.	19.6	0.
X	f5			2						
						Total:	57.5	100	50.2	100

Resulting Diagram



$$R'w = 57$$

$$R'w + C = 54$$

$$R'w + C_{tr} = 47$$

$$R'w + C_{100-5000} = 55$$

$$R'w + C_{tr,100-5000} = 47$$

$$R'w + C_{50-5000} = 54$$

$$R'w + C_{tr,50-5000} = 44$$

$$R'w + C_{50-3150} = 53$$

$$R'w + C_{tr,50-3150} = 44$$

$$L'n,w = 51$$

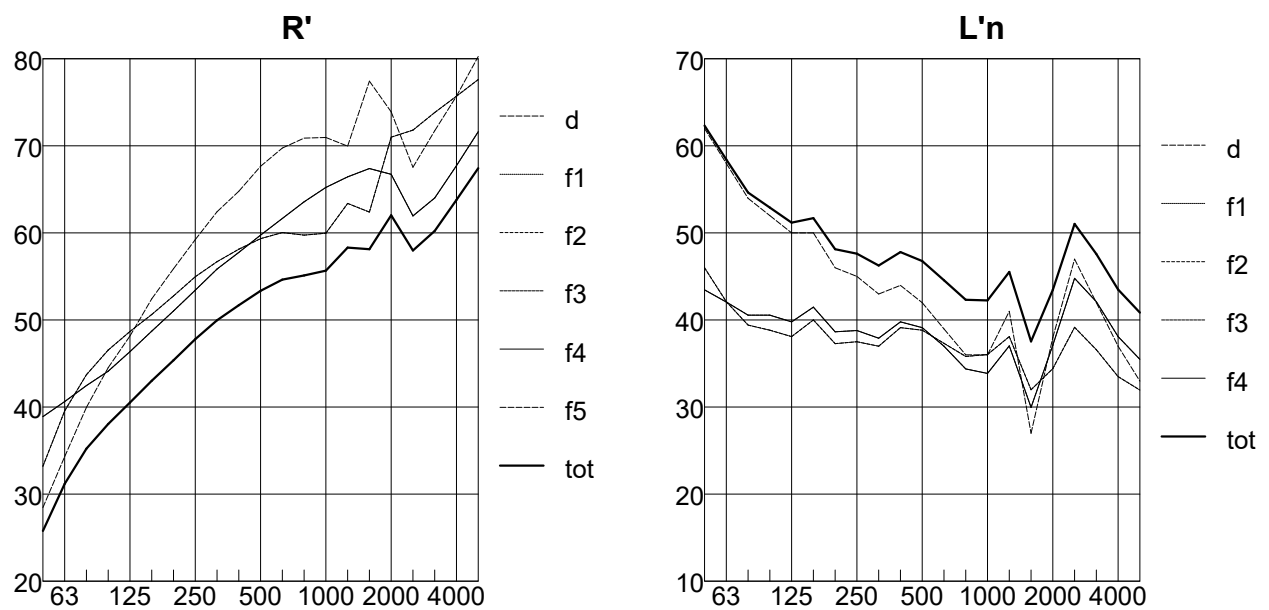
$$L'n,w + C_i = 44$$

$$L'n,w + C_{i,50-2500} = 50$$

Worksheet-Table

		Sending Room		Junction	Receiving Room		R'w		L'n,w	
M	t	Basic Element	Additional Layer	Type-No.	Basic Element	Additional Layer	dB	%	dB	%
X	d	EKS VL03					68.5	6	47.7	36
X	f1	EKS VS		20	EKS VS		62.7	24	41.9	9
X	f2	EKS VS		20	EKS VS		62.7	24	41.9	9
X	f3	EKS MVS I		20	EKS MVS I		63.1	22	45.7	23
X	f4	EKS MVS I		20	EKS MVS I		63.1	22	45.7	23
X	f5			2						
						Total:	56.6	100	51.7	100

Resulting Diagram



$$R'w = 56$$

$$R'w + C = 55$$

$$R'w + C_{tr} = 51$$

$$R'w + C_{100-5000} = 56$$

$$R'w + C_{tr,100-5000} = 51$$

$$R'w + C_{50-5000} = 55$$

$$R'w + C_{tr,50-5000} = 47$$

$$R'w + C_{50-3150} = 54$$

$$R'w + C_{tr,50-3150} = 47$$

$$L'n,w = 52$$

$$L'n,w + C_i = 45$$

$$L'n,w + C_{i,50-2500} = 51$$