



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND

Ehituse ja arhitektuuri instituut

HELIISOLATSIOONINÕUETE TÄITMINE KERGKONSTRUKTSIOONIDEST ELUHOONETES

COMPLYING WITH SOUND ISOLATION REQUIREMENTS IN LIGHTWEIGHT
RESIDENTIAL BUILDINGS

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Kaarel Sepp

Üliõpilaskood: 122571EAEI

Juhendaja: Marko Ründva, B.Sc.

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: Kaarel Sepp, 122571
Õppekava, peeriala: EAEI02/09, Ehitiste projekteerimine ja ehitusjuhtimine
Juhendaja(d): Marko Ründva, TTÜ Liginullenergiahoonete uurimisrühm, 620 2405
Konsultandid: Dmitri Tiško, akustikakonsultant, Akukon Oy Eesti filiaal, 661 6903

Lõputöö teema:

Heliisolatsiooninõuete täitmine kergkonstruktsioonidest eluhoonetes

Complying with sound isolation requirements in lightweight residential buildings

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Tarindite heliisolatsioonilise toimivuse põhimõtete ja tüüpvide teadvustamine
2. Erinevates riikides kehtivate heliisolatsiooninõuete võrdlus Eestis kehtivate nõuetega
3. Tarindite heliisolatsioonilise toimivuse hindamine ning vastavus erinevatele nõuetele

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Lähteandmete saamine projekteerimisbüroodelt, teoreetiliste alustega tutvumine	01.04.18
2.	Teoreetiliste arvutuste teostamine, tulemuste hindamine	15.05.18
3.	Lõputöö esitamine	31.05.18

Töö keel: Eesti

Lõputöö esitamise tähtaeg: “.....”201....a

Üliõpilane: Kaarel Sepp “.....”201....a
/allkiri/

Juhendaja: Marko Ründva “.....”201....a
/allkiri/

Konsultant: Dmitri Tiško “.....”201....a
/allkiri/

SISUKORD

Lühendite ja tähiste loetelu	6
SISSEJUHATUS	7
1 KERGKONSTRUKTSIOONID	9
1.1 Puitelemendid	9
1.2 Ruummoodulid	10
1.3 Sõmlahendused ja ehitustööde kvaliteet	11
2 TEOREETILINE TAUST	14
2.1 Varasem teadustöö	14
2.2 Heli füüsikalised omadused	15
2.3 Heliisolatsioon ehituses	16
2.3.1 Õhumüra heliisolatsiooniindeks R_w (dB)	17
2.3.2 Taandatud löögimürataseme indeks $L_{n,w}$ (dB)	18
2.3.3 Kaalutud standarditud helirõhutasemete vahe $D_{nT,w}$ (dB)	19
2.3.4 Kaalutud löögiheli rõhutase $L'_{nT,w}$ (dB)	20
3 KEHTIVAD HELIISOLATSIOONINÕUDED ERINEVATES RIIKIDES	21
3.1 Heliisolatsiooninõuded Eestis	21
3.2 Heliisolatsiooninõuded Rootsis	22
3.3 Heliisolatsiooninõuded Norras	23
3.4 Heliisolatsiooninõuded Soomes	24
3.5 Heliisolatsiooninõuete võrdlus	25
4 ARVUTUSMEETODITE ÜLEVAADE	27
4.1 Üldpõhimõtted	27
4.1.1 Karkassvaheseinte õhuheliisolatsioonivõime	27
4.2 Arvutustarkvara Insul	29
4.3 Arvutustarkvara BASTIAN	30
5 ERALDISEISVATE ELEMENTIDE ARVUTUSTULEMUSED	33
5.1 Seinakonstruktsioonid puitelementhoonetes	33
5.1.1 Kipsplaatide õhuheliisolatsioonivõime	33
5.1.2 Jäikade mehaaniliste sidemetega karkassvahesein	36
5.1.3 Õhkvahega karkassvahesein	39
5.1.4 Järeldused karkassvaheseinade kohta	42
5.2 Vahelaed puitelementhoonetes	46

5.2.1 Lihtne puitkarkassvahelagi	46
5.2.2 Lisakihtidega puitkarkassvahelagi	48
5.2.3 Järeldused elementvahelagede kohta.....	50
5.2.4 Tüüpvead ja leevendusmeetmed	50
5.3 Ruummoodulid.....	53
5.3.1 Seinakonstruktsioonid ruummoodulhoonetes.....	53
5.3.2 Vahelaed ruummoodulhoonetes	53
5.3.3 Järeldused vahelagede kohta ruummoodulhoonetes.....	56
6 KOLMEMÕÕTMELINE KONSTRUKTSIOON.....	57
6.1 Ülevaade.....	57
6.2 Õhumüraisolatsioon.....	59
6.3 Löögimüraisolatsioon	62
6.4 Järeldused	64
KOKKUVÕTE	65
SUMMARY	67
7 KIRJANDUSE LOETELU	69

Lühendite ja tähiste loetelu

$C_{50-3150}$	õhumüra spektrilähendustegur sagedusdiapasoonis 50 – 3150 Hz (dB)
$C_{I,50-2500}$	löögimüra spektrilähendustegur sagedusdiapasoonis 50 – 2500 Hz (dB)
$D_{nT,w}$	kaalutud standarditud helirõhutasemete vahe, mis on viidud vastavusse normatiivse järelkõlakestusega vastuvõtvas ruumis (dB)
$L_{n,w}$	löögihelitaseme indeks, laboriandmed või arvutuslik (dB)
$L'_{n,w}$	löögihelitaseme indeks, hoones mõõdetud (dB)
$L'_{nT,w}$	kaalutud standarditud löögiheli rõhutase, mis on viidud vastavusse normatiivse järelkõlakestusega vastuvõtvas ruumis (dB)
L_p	helirõhutase (dB)
L_{pA}	A – korrigeeritud helirõhutase (dB)
L_{pC}	C – korrigeeritud helirõhutase (dB)
p_0	helirõhu nullväärtus, 20 μPa
p	helirõhk (Pa)
R_w	õhuheliisolatsiooniindeks, laboriandmed või arvutuslik (dB)
R'_w	õhuheliisolatsiooniindeks, hoones mõõdetud (dB)
T_0	järelkõlakestuse normatiivväärtus, elumajades 0,5 (s)
T	järelkõlakestus vastuvõtvas ruumis (s)
f	sagedus (Hz)

SISSEJUHATUS

Magistritöö käigus uuritakse puitelement- ja ruummoodulhoonete heliisolatsioonilist toimivust. Uuritavateks konstruktsioonideks on tüüpsed Eestis toodetavad ja eksporditavad puitelemendid ning ruummoodulid. Kuna heliisolatsiooninõuete seisukohast puudulikud konstruktsioonilahendused võivad tekitada hoone ekspluatatsiooniperioodil elanikes kaebusi, mis omakorda võivad viia ümberehitusteni või paranduslahenduste vajaduseni, on mõistlik potentsiaalsed kitsaskohad juba projekteerimisfaasis lahendada, seejuures teadvustades, millised tegurid lõplikke heliisolatsiooniomadusi kõige rohkem mõjutavad.

Töös keskendutakse kergkonstruktsioonidest eluhoonete heliisolatsioonilisele toimivusele. Muud hoonete kasutusotstarbed on välja jäetud, kuna firmad, kelle toodangut uuritakse, tegelevad peamiselt eluhoonete projekteerimisega ja tootmisega. Käesoleva magistritöö üks eesmärkidest ongi teadvustada tarindite heliisolatsioonilise toimivuse üldpõhimõtteid, välja tuua tüüpsed vead ning võimalikud paranduslahendused. Töö käigus uuritakse, kas ja kui lihtsalt on võimalik praegu kasutusel olevaid tüüplahendusi heliisolatsioonilise toimivuse seisukohalt parandada.

Eestis on mitmeid puitelementide tootjaid ning puitelementhoonete projekteerimisega tegelevaid ettevõtteid, kelle toodangut müüakse Eestist välja. Firmad, kellega töö lähteandmete osas ühendust võeti, kuuluvad Eesti Puitmajaliitu. Kokku on Eestis puitmajatootjaid ca 250, kellest kuulub hetkel Eesti Puitmajaliitu 50 ettevõtet. Eesti puitmajasektori müügitulu ulatub ligikaudu 350 000 000 euroni, kusjuures Eesti Puitmajaliidu liikmete müügitulu ja töötajate arv moodustab ligikaudu 65% kogu sektorist. [1] Kogutoodangust müüakse ligikaudu 85-90% välismaale, suures osas Skandinaaviasse ning Saksamaale. [2] Eesti puitmajatootjate sihtturud aastal 2017 olid 31% Norra, 23% Rootsi ning nende järel 17% Saksamaa. [3] Samas on Eesti ning Skandinaavia riikide nõuded hoonete akustilisele toimivusele erinevad ehk Eestis kasutatavad tüüpkonstruktsioonid ei pruugi vastata Skandinaavias kehtivatele nõuetele. Käesoleva töö teine eesmärk ongi erinevates riikides kehtivate heliisolatsiooninõuete tutvustamine ja nende erinevuste kirjeldamine, et ettevõtetel oleks teemast selge ülevaade ning ei projekteerijail ega tootjail tekiks tulevikus teadmatusest tulenevaid turuspetsiifilisi probleeme lahenduste välisriikidesse müümisel. Töös tutvustatakse Eesti, Norra, Rootsi ning Soome nõudeid.

Tööks vajalike lähteandmete saamise jaoks võeti ühendust mitmete Eestis tegutsevate puitkonstruktsioonide tootjate ning projekteerijatega eesmärgiga saada ülevaade peamistest

kasutusel olevatest tüüplahendustest. Ühendust võeti selliselt, et esindatud oleks nii elementhoonetega kui ka moodulhoonetega tegelevad ettevõtted ning erinevad eksporditurud. Kõik töös kirjeldatud konstruktsioonid on praegu reaalselt turul olevad lahendused, mis on välja töötatud või kasutatud Eesti ettevõtete poolt. Ühtegi tootjat anonüümsuse säilitamise ning ärisaladuste salajas hoidmise eesmärgil nimeliselt välja ei tooda, välja arvatud need, kelle kodulehekülgedel info avalikult saadaval on.

Kokku pöörduti 10 ettevõtte poole, kellest oli nõus informatsiooni jagama 4 ettevõtet. Lisaks uuriti kahe ettevõtte tüüpkonstruktsioone, mis olid nende kodulehel vabalt saadaval. Lähteandmetena saadeti erinevaid tüüptarindite ja -sõlmede jooniseid, erinevaid heliisolatsiooni mõõtmisprotokolle ning ka valmis projekte, kus oli detailsemalt heliisolatsiooninõuete tagamisega või leevendusmeetmetega tegeletud. Firmadepoolne huvi üldise temaatika suhtes väljendus selgelt, kuna mitmed soovisid lähteandmete vastutasuks analüüsi neil kasutusel olevate tarindite kohta ja küsisid täpsustavaid küsimusi. Vestluste käigus sai selgeks, et temaatika on tootjate ning projekteerijate jaoks veel võõras ja vajab arendamist.

Magistritöö on jaotatud alampunktideks. Esmalt antakse ülevaade kergkonstruktsioonidest ning käsitletavate konstruktsioonitüüpide põhimõttelistest erinevustest. Seejärel esitatakse teoreetiline tutvustus heli füüsikaliste omaduste ning heliisolatsiooniga seotud mõistete kohta ehituses. Järgnevalt tutvustatakse heliisolatsiooninõudeid erinevates riikides ning magistritöös kasutatavaid arvutusmeetodeid. Töö lõpetuseks esitatakse arvutustulemused ning nende põhjal tehtud järeldused peamiste vigade ning probleemide kohta, kirjeldatakse paranduslahendusi ja leevendusmeetmeid. Lisaks tuuakse töös välja mitmed aspektid, mida käesoleva töö raames ei käsitleta, kuid on vajalik tulevikus lähemalt uurida.

1 KERKKONSTRUKTSIOONID

Kerkkonstruktsioonide alla võib liigitada väga mitmeid erinevaid konstruktsioonitüüpe – kandvate profiilplekkidega konstruktsioonid, erinevad terasprofiilidega ühendatud seinad või laed, vineervöödega talakonstruktsioonid, polümeermaterjalidest konstruktsioonid, ristkihtpuidust konstruktsioonid jne. Kõiki neid konstruktsioone ühendav omadus on võimalikult suure kandevõime tagamine võimalikult väikse omakaalu juures ehk põhiline inseneriülesanne on kerkkonstruktsioonide puhul muutuvkoormuste vastuvõtmine ja kasutuspiiriseisundi tagamine. Käesolevas töös käsitletakse kerkkonstruktsioonide all tehasingimustes valmistatud puitelemente ning puidust ruummoduleid. Nimetatud konstruktsioonitüübid osutusid valituks, kuna on turul kõige suuremas mahus esindatud ehk on peamised Eestis toodetavad eksporditüübid kerkkonstruktsioonide osas. Ristkihtpuitkonstruktsioone töös ei analüüsita, kuna nende kohta on tänaseks veel praktikat võrreldes puitelementide ja ruummodulitega vähe, seetõttu pole ka selgelt välja kujunenud tüüplahendusi ega iseloomulikke probleeme. Ristkihtpuidu akustiline toimivus väärrib aga kindlasti tulevikus täpsemat edasist uurimist.

1.1 Puitelemendid

Puitelementhooneteks kutsutakse tehasingimustes valmistatud eraldiseisvatest puitelementidest ehitusplatsil monteeritavaid hooneid. Üldjuhul eristatakse puitelementidest välisseinaelemente, siseseinelemente, vahelaelemente, katuseelemente, rõdulemente ning põrandaelemente. Elementmaja peamiseks eeliseks on kvaliteet, loodussõbralikkus ning kiirus. [2]

Elementid valmistatakse kontrollitud tehasingimustes, mis võimaldab tagada elementide kvaliteeti, vastavust standarditele ja projekteerijate ettekirjutustele. Samuti vastavad puitelemente tootvad tehased rahvusvahelistele ehitusnormidele ja seadustele – tootmisprotsess on standardiseeritud ning kasutatavad materjalid kvaliteedikontrolli läbinud. Puitelementhoonete kandekonstruktsioonid valmistatakse puitmaterjalidest ehk taastuvatest loodusvaradest, mille lagunemine ei koorma loodust, vaid on loodusliku süsinikuringe normaalne osa. Elementhoone tootmisele tehases kulub sõltuvalt hoone keerukusest mõni nädal, sama kaua kestab hoone montaaž. [4]



Joonis 1.1. Puitelementmaja konstruktsioon [5]

1.2 Ruummoodulid

Ruummoodulhooneteks kutsutakse tehasingimuses valmistatud ruumilistest moodulitest hooneid, see tähendab ruummoodulite puhul on põranda-, seinte- ja laeelemendid omavahel tehases tervikuks monteeritud. Võrreldes puitelementhoonetega on ruummoodulhoonetel võimalik saavutada tehasingimustes oluliselt suurem valmidusaste, mis omakorda võimaldab ehitusplatsil kiiremat montaaži ning ressursside kokkuhoidu. Ruummoodulite puhul on võimalik tehasingimustes lõplikult valmis teha siseviimistlus, kommunikatsioonide ja sanitaartechnika paigaldus, möbleerimine jne. [4]



Joonis 1.2 Ruummoodulite konstruktsioon [6]

1.3 Sõlmalahendused ja ehitustööde kvaliteet

Kergkonstruktsioonidest hoonetes on väga tähtis lisaks korrektselt valitud tarinditele projekteerida ka hoolikalt läbimõeldud elementide ühendused, kuna sõlmalahendused mõjutavad siirdehelide levikut ning seeläbi ka kogu hoone akustilist toimivust. Mida parema heliisolatsioonivõimega on eraldavad konstruktsioonid, seda suurem on võimalus, et heli leiab liikumistee mitte läbi eraldava elemendi, vaid läbi liidete.

Põhimõtteline reegel sõlmede projekteerimiseks on heli võimalike levimisteede tõkestamine, see tähendab erinevate elastsete vahekihtide kasutamist ning korterist korterisse jätkuvate tarindikihtide katkestamist. Heaks näiteks on välisseina sisekihi jätkumine korterite vahel – ilma katkestuseta viimistlusplaat annab võimaluse heli liikumiseks korterite vahel ümber eraldava tarindi

ning eraldava elemendi heliisolatsioonivõime parandamine ei anna märgatavat tulemust konstruktsiooni kui terviku akustilisele toimivusele. Mitmekorruseliste moodulhoonete puhul on eraldi ülesanne korrektsete materjalide valik moodulite üksteise peale toetamiseks – vahekihid peavad olema heli leviku takistamiseks piisavalt elastsed, kuid samal ajal vertikaalkoormuste vastuvõtmiseks piisava jäikusega.

Siirdehelid võivad eriti kergkonstruktsioonide puhul hoone akustilist toimivust märgatavalt mõjutada, kuid arvutuslikult on nende levikut väga keeruline hinnata. Erinevaid võimalikke sõlmlahendusi on olemas mitmeid ning kergkonstruktsioonide puhul on siirdehelide arvutuslikuks määramiseks vajalik laboris mõõdetud andmeid elementide taandatud vibratsioonitasemete suunakesmise vahe $\overline{D_{v,lj,n}}$ (dB) kohta. Mõõtmisprotseduurid on kehtestatud standardiseerias EVS-EN ISO 10848. [7] [8]

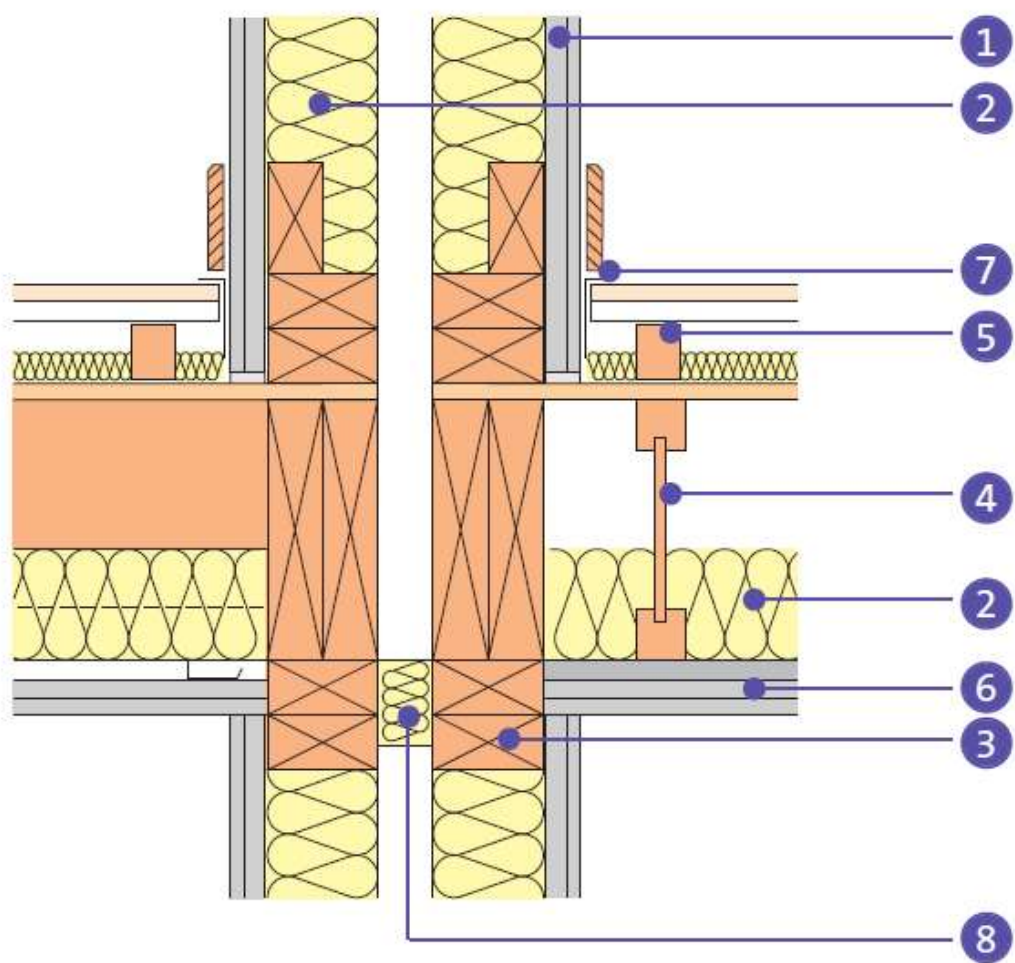
Lisaks sõlmlahenduste korrektsele projekteerimisele on väga tähtis ka üleüldine ehitustööde kvaliteet – kui tarindisse jäetakse ehitusplatsil praod või ujuvpõrand ehitatakse tihedalt vastu külgnevat tarindit, muutub konstruktsiooni akustiline toimivus oluliselt kehvemaks kui algselt ette nähtud. Seetõttu on väga tähtis, et nii projekteerijail kui ka ehitustöölistel oleks ühesugune arusaam sõlmede toimivusest ja ehitustööd tehtaks vastavalt projektis ettekirjutatud lahendustele.

Korrektsete sõlmlahenduste projekteerimist käesolevas töös ei käsitleta, kuid sellest hoolimata on teema eriti kergkonstruktsioonide puhul väga aktuaalne ning väärib tulevikus põhjalikku uurimist.

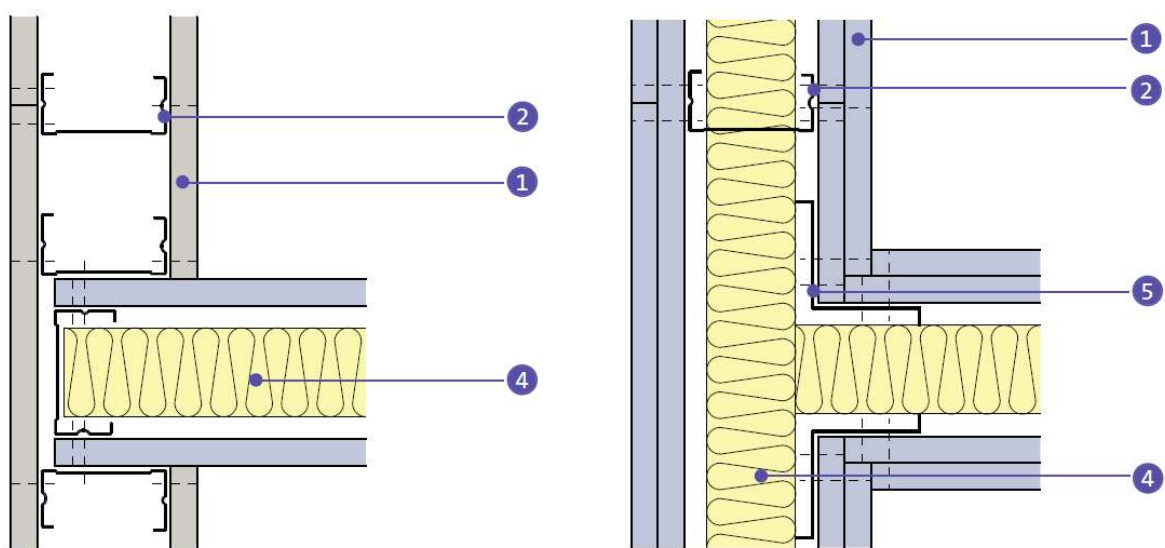
Järgnevalt näidatud põhimõttelised võimalikud sõlmlahendused on esitatud British Gypsumi haridusliku eesmärgiga juhendmaterjalis „Education Sector Guide – 7 – Flanking Sound Transmission“. [9]

Vahelaesõlme puhul tähistavad numbrilised viited: 1 – Gyproc kipsplaat, 2 – Isover helineeldematerjal, 3 – puitsõrestik, 4 – puittalad, sille võimalik mõlemas suunas, 5 – ujuvpõrand, 6 – akustilistel profiilidel ripplagi, 7 – siirdehelide katkestusriba, 8 – Isover õhkvahtäide.

Seinte ühendustel tähistavad numbrilised viited: 1 – Gyproc standardkipsplaat või Glasroc tulekindel kipsplaat, 2 – Gypframe C-klamber, 4 – Isover helineeldematerjal, 5 – Gypframe GA5 sisemine kinnitusnurgik.



Joonis 1.3. Põhimõtteline vahelaesõlm kergkonstruktsioonidest hoones [9]



Joonis 1.4. Põhimõttelised seinte ühendused kergkonstruktsioonidest hoones [9]

2 TEOREETILINE TAUST

2.1 Varasem teadustöö

Seoses kergkonstruktsioonide kasutamise populaarsuse kasvuga ehituses on nende akustiliste omaduste kohta tehtud ka mitmeid varasemaid suuremahulisi uurimistöid. Aastatel 2008-2012 töötasid erinevad töögrupid COST Action FP0702 "Net-Acoustics for timber based lightweight buildings and elements" raames eesmärgiga uurida kergkonstruktsioonide akustilist ning vibratsioonilist toimivust madalsageduslikus piirkonnas. [10] Lisaks on analüüsitud erinevates riikides kehtivaid heliisolatsiooninõuded ning püütud neid ühtlustada COST Action TU0901 "Integrating and harmonizing sound insulation aspects in sustainable urban housing constructions" raames. [11] Rootsi innovatsiooniagentuuri Vinnova toetusel anti suuremahuline ülevaade kergkonstruktsioonidest projektis "Acoustics in wooden buildings. State of the art 2008". [12]

Lisaks suuremahulistele riigiülestele projektidele on ehitusakustika valdkonnas kaitstud ka mitmeid diplomitöid. Käesoleva töö temaatikaga on vahetult seotud näiteks Jason Esan Cambridge magistritöö "An avaluation of various sound insulation programs and their use in the design of silent rooms" [13] ning Erik Backmani ja Henrik Lundgreni magistritöö "Measurement and evaluation uncertainties of impact sound insulation". [14]

Eraldi välja toomist väärivad kindlasti ka teadusajakirjad "Applied Acoustics" [15], "Building Acoustics" [16] ning perioodilised akustikakonverentsid nagu Baltic-Nordic Acoustics meeting [17] ja InterNoise [18], mille jaotusmaterjalidest on töö kirjutamisel palju abi olnud.

Varasemate teadustööde tulemusena on teadvustatud, et kergkonstruktsioonide akustiline toimivus on võrreldes massivsete konstruktsioonidega märgatavalt keerulisem teema. Põhilised probleemid on akustiline toimivus madalsageduslikus piirkonnas, sõlmlahenduste korrektne projekteerimine siirdehelide leviku tõkestamiseks ning universaalsete arvutusmeetodite puudumine, seda nii õhumüra kui ka löögimüra puhul. Lisaks on püütud moodustada riikideülest standardit heliisolatsiooninõuete ühtlustamiseks, mis tänaseks veel jõustunud pole.

Alates aastast 2017 kehtib uus viieosaline EVS-EN ISO 12343 standardiseeria, mis tegeleb hoonete akustilise toimivuse hindamisega elementide akustilise toime põhjal. Esimesed kaks osa on tõlgitud ka eesti keelde. [19] [20] Standardiseeria tegeleb põhimahus massiivsete konstruktsioonidega, kergkonstruktsioonide kohta on informatsiooni märgatavalt vähem.

2.2 Heli füüsikalised omadused

Heli on õhurõhu kõikumine staatilise õhurõhu suhtes. Inimene suudab eristada kahte tähtsat heli omadust – heli kõrgust ning valjusust.

Inimeses tekib kuulmisaisting, kui õhurõhu kõikumine paneb kõrva trumminaha võnkuma. Heliasting sõltub võnkumise sagedusest – võnkumiste arvust n ajaühikus T (s), mõõdetakse hertsides (Hz). Üks herts tähendab võnkumise sagedust üks võnge sekundis.

$$f = \frac{n}{T} \text{ (Hz)}$$

Kui võnked on sagedased, loetakse heli kõrgeks ning kui võnked on väikese sagedusega, loetakse heli madalaks. Inimene on võimeline kuulma helisid vahemikus 20 ... 20 000 Hz. Alla 20 Hz jääva sagedusega heli tajub inimene vibratsioonina. [21]

Helitugevust kirjeldatakse helirõhutasemega L_p , mis on helirõhu p ja standardse helirõhu nullväärtuse $p_0 = 20 \mu Pa$ suhte kahekümnekordne kümnendlogaritm, hinnatakse detsibellides. [22]

$$L_p = 20 \log_{10} \frac{p}{p_0} \text{ (dB)}$$

Standardse helirõhu nullväärtust nimetatakse ka kuuldeläveks, sest tegu on vähima õhurõhu muutusega, mida inimene on võimeline aistima. Heliasting muutub valuaistinguks, kui helirõhk on 20 Pa. Seega on vähima kuulda oleva helirõhu tase 0 dB ning valuläve helirõhu helirõhutase 120 dB. [21]

Kuna inimese kuulmisaisting pole igale sagedusele sama tundlik, kasutatakse kuulmistundlikkuse arvesse võtmiseks helitasemete kirjeldamiseks erinevaid korrektsioone. Inimkõrva kuulmisaistingu tundlikkust võetakse arvesse sageduskorrektsiooniga A. [21] Kasutusel on ka C-korrektsioon. [22] Standardiseerias DIN 4109 „Sound insulation in buildings“ on välja toodud meetod helirõhutasemete korrigeeritud väärtuste arvutamiseks. [23]

A-korrigeeritud helirõhutaseme arvutuslik väärtus sagedusdiapasoonis 63 – 4000 Hz:

$$L_{pA} = 10 * \log_{10} \sum_{i=1}^n 10^{0,1(L_{pi}-A_i)} \text{ (dB)}$$

kus L_{pi} on helirõhutaseme i-oktaavribas ja A_i on i-oktaavriba A-korrektsoon.

C-korrigeeritud helirõhutaseme arvutuslik väärtus sagedusdiapasoonis 31,5 – 4000 Hz:

$$L_{pC} = 10 * \log_{10} \sum_{i=1}^n 10^{0,1(L_{pi}-C_i)} \text{ (dB)}$$

kus L_{pi} on helirõhutaseme i-oktaavribas ja C_i on i-oktaavriba C-korrektsoon.

Tabel 2.1. A- ja C-korrektsoonide väärtused korrigeeritud helirõhutasemete arvutamiseks

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

2.3 Heliisolatsioon ehituses

Heliallikate tekitatavad helirõhutasemed sõltuvad sagedusest. Seetõttu jagatakse ehitusakustikas helispekter sagedusribadeks. Tarindite ja hoonete heliisolatsioonimõõtmised tehakse terts- ehk kolmandik-oktaavribades alates kesksagedustest 50 Hz või 100 Hz kuni kesksagedusteni 3150 Hz või 5000 Hz. [24] [25] Iga järgneva tertsi keskagedus saadakse eelmise korrutamisel arvuga $2^{1/3}$. [21]

EVS-EN ISO 16283 seeria standardite kohaselt tehtud heliisolatsiooni mõõtmistulemuste ühearvuliseks suuruseks teisendamiseks on esitatud juhendid standardite seerias EVS-EN ISO 717. [26] [27] Standardid annavad ka arvutusjuhised spektrilähendusteguri ehk suuruse, mis liidetakse ühearvulisele hinnangule heliallika spektri omaduste arvestamiseks jaoks. Oma olemuselt on spektrilähendustegurid heliisolatsiooniindeksite parandustegurid.

Heliisolatsiooni hoonetes hinnatakse Eestis ühearvuliste parameetritega – õhumüra heliisolatsiooniindeks R'_w (dB) ja taandatud löögi mürataseme indeks $L'_{n,w}$ (dB).

Skandinaavias on kasutusel tähised $D_{nT,w}$ (dB) ehk kaalutud standarditud helirõhutasemete vahe ja $L'_{nT,w}$ (dB) ehk kaalutud löögiheli rõhutase vastavalt järelkõlakestuse normatiivväärtustele vastuvõtvas ruumis. Põhimõtteline erinevus nende vahel on, et Skandinaavias kasutusel olev süsteem on viidud vastavusse ruumi järelkõlakestuse normatiivväärtusega.

2.3.1 Õhumüra heliisolatsiooniindeks R_w (dB)

Õhumüra isolatsiooni indeks on ühenumbiline väärtus, mille abil hinnatakse õhumüra isolatsiooni ehitise ruumide vahel. Õhumüra isolatsiooni hindamisel kasutatakse erinevaid tähistusi - R'_w iseloomustab heli ülekannet läbi vaadeldava piirdekonstruktsiooni ja sellega külgnevate konstruktsioonide; R_w määratakse laboritingimustes või arvutuslikult ega arvesta heli kaudset ülekannet. [22]

Füüsikaliselt väljendab heliisolatsiooniindeks katsekehale langeva helivõimsuse W_1 ja katsekeha läbinud helivõimsuse W_2 suhte kümnekordset logaritmi. [24]

$$R = 10 \log \left(\frac{W_1}{W_2} \right) \text{ (dB)}$$

Seega mida suurem on elemendi õhumüra isolatsiooniindeks, seda vähem helienergiat saab läbi elemendi liikuda ning seda parem on heliisolatsioonivõime.

Õhumüra heliisolatsiooniindeksi ühearvulise väärtuse leidmine katsetulemuste põhjal on kirjeldatud standardis EVS-EN ISO 717-1:2013. [26] Sama standard kehtestab ka meetodi spektrilähendustegurite arvutamiseks.

Õhumüra isolatsiooniindeksi hindamiseks kasutatakse spektrilähendustegurit C , mis arvutatakse vastavalt standardis toodud spektritele. Spektrilähendustegur sõltub tarindi ühearvulisest õhumüraisolatsiooniindeksist.

$$C = X_{Aj} - R_w \text{ (dB)}$$

$$X_{Aj} = -10 \log \sum 10^{0,1(L_i - R_i)} \text{ (dB)}$$

kus i – 1/3 oktaavriiba indeks sagedusdiapasoonis 50 – 3150 Hz (dB)

L_i – standardijärgse spektri nivood sagedusel i Hz (dB)

R_i – heliisolatsiooniindeks sagedusel i Hz (dB)

Tabel 2.2. Helitaseme spektrid lähendustegurite arvutamiseks sagedusdiapasoonis 50-3150 Hz [26]

Sagedus f (Hz)	Spektri väärtus (dB)	Sagedus f (Hz)	Spektri väärtus (dB)
50	-40	500	-13
63	-36	630	-12
80	-33	800	-11
100	-29	1000	-10
125	-26	1250	-9
160	-23	1600	-9
200	-21	2000	-9
250	-19	2500	-9
315	-17	3150	-9
400	-15		

2.3.2 Taandatud lööгимürataseme indeks $L_{n,w}$ (dB)

Taandatud lööгимürataseme indeks on ühenumbiline väärtus, mille abil hinnatakse löögimüra levikut ehitises ja mis iseloomustab piirdekonstruktsioonide löögimüra isolatsiooni. Löögimürataseme indeksi hindamisel kasutatakse erinevaid tähistusi - $L'_{n,w}$ iseloomustab heli ülekannet läbi vaadeldava piirdekonstruktsiooni ja sellega külgnevate konstruktsioonide; $L_{n,w}$ määratakse laboritingimustes või arvutuslikult ega arvesta heli kaudset ülekannet. [22]

Füüsikaliselt väljendab löögiheli taandatud rõhutase löögiheli vastavalt ruumi normatiivsele ekvivalentsele neeldumispinnale. [25]

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

kus L_i – vastuvõttavas ruumis mõõdetud löögiheli rõhutase (dB)

A – vastuvõttavas ruumis mõõdetud ekvivalentne neeldumispind (m^2)

A_0 – normatiivne ekvivalentne neeldumispind, elumajade puhul $A_0 = 10 m^2$

Seega mida väiksem on löögihelitaseme indeksi väärtus, seda väiksem on ka löögimüra tase vastuvõttavas ruumis ehk seda parem on elemendi löögimüraisolatsioonivõime.

Taandatud löögimürataseme indeksi ühearvulise väärtuse leidmine katsetulemuste põhjal on kirjeldatud standardis EVS-EN ISO 717-2:2013. [27] Sama standard kehtestab ka laiendatud sagedusdiapasoonis kasutatava spektrilähendusteguri arvutamiseks kasutatava avaldise.

$$C_{I,50-2500} = L_{n,sum} - 15 - L_{n,w} \text{ (dB)}$$

kus

$$L_{n,sum} = 10 \log \sum_{i=1}^k 10^{0,1L_i} \text{ (dB)}$$

2.3.3 Kaalutud standarditud helirõhutasemete vahe $D_{nT,w}$ (dB)

Standarditud tasemete vahe D_{nT} on ajas ja ruumis keskmistatud helirõhutasemete vahe kahe ruumi vahel, mis on tekitatud ühe või mitme heliallika poolt ühes neist ruumidest ning mis on viidud vastavusse normatiivse järelkõlakestusega vastuvõttavas ruumis. [19]

$$D_{nT} = L_1 - L_2 + \left(10 \lg \frac{T}{T_0}\right) \text{ (dB)}$$

kus T – järelkõlakestus vastuvõttavas ruumis (s)

T_0 – järelkõlakestuse normatiivväärtus, elumajade puhul 0,5 (s)

$D_{nT,w}$ – kaalutud standarditud helirõhutasemete vahe ühenumbiline väärtus detsibellides, mis saadakse graafiku nihutamisel standardkõvera ümbruses vastavalt EN ISO 717-1 esitatud meetodile [28]

$D_{nT,w,50}$ – kaalutud standarditud helirõhutasemete vahe ja spektrilähendusteguri summa ühenumbiline väärtus detsibellides laiendatud sagedusdiapasoonis [28]

2.3.4 Kaalutud löögiheli rõhutase $L'_{nT,w}$ (dB)

L'_{nT} on löögiheli standarditud rõhutase vastavalt järelkõlakestuse normatiivväärtusele vastuvõtvas ruumis. [20] Hinnatakse valemiga:

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

T – järelkõlakestus vastuvõtvas ruumis (s)

T_0 – järelkõlakestuse normatiivväärtus, elumajade puhul 0,5 (s)

$L'_{nT,w}$ – kaalutud standarditud löögiheli rõhutaseme ühenumbiline väärtus detsibellides, mis saadakse graafiku nihutamisel standardkõvera ümbruses vastavalt EN ISO 717-2 esitatud meetodile [28]

$L'_{nT,w,50}$ – suurim väärtus – kas kaalutud standarditud löögiheli rõhutaseme ühenumbiline väärtus või kaalutud standarditud löögiheli rõhutaseme ja spektilähendusteguri summa ühenumbiline väärtus laiendatud sagedusdiapasoonis [28]

$$L_{nT,w,50} = \max(L'_{nT,w}; L'_{nT,w} + C_{I,50-2500})$$

3 KEHTIVAD HELIISOLATSIOONINÕUDED ERINEVATES RIIKIDES

Järgnevalt tuuakse välja erinevates riikides kehtivad heliisolatsiooninõuded. Esitamiseks on valitud lisaks Eesti nõuetele Rootsi, Norra ja Soome ehk Skandinaavia riikide heliisolatsiooninõuded, kuna neisse toimub valdavalt Eesti kergkonstruktsioonide eksport. Töös vaadeldakse eluhoonetele esitatavaid heliisolatsiooninõudeid, kuna töö fookuses olevad ettevõtted tegelevad enamjaolt eluhoonete projekteerimisega.

3.1 Heliisolatsiooninõuded Eestis

Eestis on sätestatud ehitistele esitatavad minimaalsed heliisolatsiooninõuded standardiga EVS 842:2003 "Ehitiste heliisolatsiooninõuded. Kaitse müra eest". Standardis on eraldi käsitletud sisepiiretele esitatavaid heliisolatsiooninõudeid ning välispiiretele esitatavaid heliisolatsiooninõudeid. [22]

Tabel 3.1. Elamu sisepiiretele esitatavad heliisolatsiooninõuded [22]

Õhumüra heliisolatsiooniindeks R'_w	
Ruumi tüüp	Heliisolatsiooni miinimumnõuded
Korterite eluruumide vahel	55 dB
Korterite eluruumide ja üldkasutatavate ruumide ning büroorumide vahel	55 dB
Korterite ja üldkasutatavate ruumide vahel, kui korteri seinas on uks	39 dB
Taandatud löögimürataseme indeks $L'_{n,w}$	
Ruumi tüüp	Heliisolatsiooni miinimumnõuded
Korterist teise korterisse	53 dB
Rõdult, trepilt, koridorist jms ruumidest, vannitoast ja WC-st teise korterisse	58 dB
Kahekorruselise korteri eluruumide vahel	63 dB

3.2 Heliisolatsiooninõuded Rootsisis

Rootsis kehtivad heliisolatsiooninõuded on määratletud standardiga SS 25267 "Byggakustik - Ljudklassning av utrymmen i byggnader – Bostäder". Standard erineb põhimõtteliselt Eesti standardist, kuna heliisolatsiooninõuded on esitatud vastavalt erinevatele heliklassidele. Standardis eristatakse nelja erinevat heliklassi – A, B, C ja D. [28]

Heliklassi C ehk hoonetele esitatavate minimaalsete heliisolatsiooniparameetrite väärtused sätestab Rootsisis dokument „Boverkets byggregler – föreskrifter och allmänna råd, BBR“. [29]

Klassis C on nõutav $D_{nT,w,50} = 52 \text{ dB}$ ning $L_{nT,w,50} = 56 \text{ dB}$.

Tabel 3.2. Heliklasside kirjeldused vastavalt Rootsi standardile SS 25267 [28]

Klass A	Vastab väga headele akustilistele tingimustele. Müra häirib elanikke väga harva.
Klass B	Vastab oluliselt parematele akustilistele tingimustele kui klass C. Hooned kus hea akustiline keskkond on prioriteet.
Klass C	Tagab rahuldavad tingimused enamusele elanikest. Uue hoone miinimumnõuetele vastav heliklass.
Klass D	Kasutatakse juhul kui klassi C ei ole võimalik tagada. Näiteks vanemad hooned, mida pole võimalik tehnilistel, majanduslikel või esteetilistel põhjustel klassile C vastavaks renoveerida. Ei vasta uute hoonete nõuetele.

Tabel 3.3. Õhumüraisolatsiooni indeksi klassifikatsioon vastavalt Rootsi standardile SS 25267 [28]

Heliklass	A	B	D
$D_{nT,w,50}$	60 dB	56 dB	-
$D_{nT,w,100}$	-	-	48 dB

Tabel 3.4. Löögimüra taseme indeksi klassifikatsioon vastavalt Rootsi standardile SS 25267 [28]

Heliklass	A	B	D
$L_{nT,w,50}$	48 dB	52 dB	-
$L'_{nT,w}$	-	-	60 dB

3.3 Heliisolatsiooninõuded Norras

Norras kehtivad heliisolatsiooninõuded on kehtestatud standis NS 8175:2012 “Acoustic conditions in buildings. Sound classification of various types of buildings”. [30] Norras kasutatakse põhjamaadele omast heliklasside süsteemi. Standardijärgselt eristatakse nelja heliklassi – A, B, C ja D.

Tabel 3.5. Heliklasside kirjeldused vastavalt Norra standardile NS 8175:2012 [30]

Klass A	Vastab eriti headele akustilistele tingimustele, kus inimesed on harva müra häiritud.
Klass B	Vastab väga headele akustilistele tingimustele. Teatud määral võivad inimesed müra häiritud olla.
Klass C	Tagab rahuldavad tingimused enamusele elanikest. Uue hoone miinimumnõuetele vastav heliklass.
Klass D	Ei taga rahuldavaid tingimusi. Suurem osa inimestest on müra häiritud.

Tabel 3.6. Õhumüraisolatsiooni indeksi klassifikatsioon vastavalt Norra standardile NS 8175:2012 [30]

Heliklass	A	B	C	D
$R'_w + C_{50-3150}$	63 dB	58 dB	-	-
R'_w	-	-	55 dB	49 dB

Tabel 3.7. Löögimüra taseme indeksi klassifikatsioon vastavalt Norra standardile NS 8175:2012 [30]

Heliklass	A	B	C	D
$L'_{n,w}$	-	-	53 dB	58 dB
$L'_{n,w} + C_{(L,50-2500)}$	43 dB	48 dB	-	-

3.4 Heliisolatsiooninõuded Soomes

Soomes on kehtestatud heliisolatsiooninõuded keskkonnaministri määrusega 796/2017 „Ympäristöministeriön asetus rakennuksen ääniympäristöstä“, mis sätestab uutele hoonetele esitatud minimaalsed heliisolatsiooninõuded. [31] Lisaks kehtib standard SFS 5907 “Acoustic classification of spaces in buildings”. [32]

Soomes on samuti kasutusele võetud heliklasside mõiste ning hooned on vastavalt jaotatud nelja kategooriasse – klassid A, B, C ja D. Klassid A ja B on mõeldud kõrgemate nõuete täitmiseks kui tavapäraselt vajalik, klass C on uuele hoonetele esitatav miinimumnõue ning klass D on ette nähtud vanade hoonete kategoriseerimiseks. Klass D ei täida kehtivaid heliisolatsiooninõudmisi ning uute hoonete puhul kasutamine pole lubatud. [32]

Keskkonnaministri määrus sätestab uute hoonete minimaalseteks heliisolatsiooninõueteks $D_{nT,w} = 55 \text{ dB}$ ja $L'_{nT,w} + C_{I,50-2500} = 53 \text{ dB}$.

Standardis SFS 5907 välja toodud õhumüra isolatsiooni indeksite miinimumväärtused kahe korteri vahel ning kortereid ümbritsevate ruumide vahel:

Tabel 3.8. Õhumüraisolatsiooni indeksi klassifikatsioon vastavalt Soome standardile SFS 5907 [32]

Heliklass	A	B	C	D
$R'_w + C_{50-3150}$	63 dB	58 dB	-	-
R'_w	-	-	55 dB	49 dB

Standardis SFS 5907 välja toodud löögimürataseme indeksite miinimumväärtused kortereid ümbritsevatest ruumidest korterisse:

Tabel 3.9. Löögimürataseme indeksi klassifikatsioon vastavalt Soome standardile SFS 5907 [32]

Heliklass	A	B	C	D
$L'_{n,w}$	-	-	53 dB	63 dB
$L'_{n,w} + C_{(I,50-2500)}$	43 dB	49 dB	-	-

3.5 Heliisolatsiooninõuete võrdlus

Suurim erinevus Eesti ja Põhjamaade heliisolatsiooninõuete vahel on heliklasside mõiste kasutamine. Nii Rootsis, Norras kui ka Soomes on heliklasside mõiste kasutusel ning kõik riigid kasutavad hoonete kategoriseerimiseks sarnast loogikat. Igas riigis on kasutusel klassid A, B, C ja D, kusjuures uutele hoonetele esitatav kohustuslik miinimumnõue on heliklass C. Samuti tähistab klass D kõigis riikides klassi, mis ei taga rahuldavaid tänapäevaseid tingimusi. Lisaks kasutatakse kõigis nimetatud riikides vähemalt klassides A ja B spektrilähendustegureid, mille abil on võimalik arvestada heliallika spektri mõju heliisolatsiooniparameetrite ühenumbriksüsteemidele väärtustele. Eestis selline lähenemine heliisolatsiooninõuetele veel standardite kujul materialiseerunud pole.

Võrdlusest selgub ka tõsiasi, et Põhjamaade nõuded on Eestis kehtivate nõuetega võrreldes spetsiifilisemad ning kokkuvõttes rangemad. See omakorda muudab Eesti kergkonstruktsioonide tootjate elu mõnevõrra keerulisemaks, kuna harjumuspärased Eestis kasutusel olevad konstruktsioonitüübid ei pruugi täita Põhjamaade heliisolatsiooninõudeid.

COST Action TU0901 käigus on esitatud erinevatest teadustöödest tulenevad empiirilised ja teoreetilised seosed erinevate heliisolatsiooniparameetrite vahel. [33]

Tabel 3.10. Erinevate heliisolatsiooniparameetrite empiirilised seosed

Parameeter (dB)	Tähendab sama kui (dB)
$R'_w \geq X$	$D_{nT,50} \geq X - 1,0 + (5,2 - 0,12R'_w)$
$D_{nT,w} \geq X$	$D_{nT,50} \geq X + 5,2 - 0,12(D_{nT,w} + 1,0)$
$L'_{n,w} \leq X$	$L'_{nT,50} \leq X - 2,3 + (30,0 - 0,51L'_{n,w})$
$L'_{nT,w} \leq X$	$L'_{nT,50} \leq X + 30,0 - 0,51(L'_{nT,w} + 2,3)$

Tabel 3.11. Erinevate riikide heliisolatsiooninõuete võrdlus vastavalt heliklassidele

		A	B	C või minimaalne	D
Eesti	R'_w	-	-	55 dB	-
	$L'_{n,w}$	-	-	53 dB	-
Soome	$R'_w + C_{50-3150}$	63 dB	58 dB	-	-
	R'_w	-	-	55 dB	49 dB
	$L'_{n,w} + C_{I,50-2500}$	43 dB	49 dB	-	-
	$L'_{n,w}$	-	-	53 dB	63 dB
	$D_{nT,w}$	-	-	55 dB	-
	$L'_{nT,w} + C_{I,50-2500}$	-	-	53 dB	-
Rootsi	$D_{nT,w,50}$	60 dB	56 dB	52 dB	-
	$D_{nT,w,100}$	-	-	-	48 dB
	$L_{nT,w,50}$	48 dB	52 dB	56 dB	-
	$L'_{nT,w}$	-	-	-	60 dB
Norra	$R'_w + C_{50-3150}$	63 dB	58 dB	-	-
	R'_w	-	-	55 dB	49 dB
	$L'_{n,w} + C_{I,50-2500}$	43 dB	48 dB	-	-
	$L'_{n,w}$	-	-	53 dB	58 dB

4 ARVUTUSMEETODITE ÜLEVAADE

Järgnevalt antakse ülevaade töös kasutatud arvutusmeetoditest ning -tarkvaradest.

Kergkonstruktsioonide osas ei ole olemas ühtset ISO või EN arvutusmodelit, kuna arvutustulemusi mõjutavad väga mitmed tegurid – tööde üldine kvaliteet, erinevate elastsete vahekihtide deformatsioon koormuse all, kinnitusvahendite tihedus ja pingutustugevus, võimalike pragude hulk ja avanemislaius, vibratsiooniparameetrid, võrdlemisi kehv heliisolatsioonivõime madalsageduslikus piirkonnas, sõlmede mõjuga arvestamine jne. Kõigi neid on väga keeruline ühe arvutusmodeliga üldistada. Erinevad teadusasutused on enda jaoks välja töötanud kas katseandmetel või teoreetilistel alustel põhinevad arvutusmeetodid, millel aga on selged piirangud ees. Suure töö on teinud National Research Council Canada, kelle abiga on välja töötatud tarkvara SOCRATES – Sound Classification Rating Estimator [34] tarindite heliisolatsioonivõime hindamiseks ning Kanada ehituskodeksil põhinev tarkvara soundPATHS [35] siirdehelide leviku hindamiseks.

Ühtse arvutusteooria puudumise tõttu kasutavad erinevad tarkvarad lisaks teoreetilistele alustele tulemusteni jõudmiseks ka empiirilisi valemeid ning olemasolevaid mõõtmistulemusi. Lisaks võivad mõõtmistulemused olla erinevatest teguritest mõjutatud, muuhulgas näiteks vastuvõtva ruumi helirõhutasemest või mõõtmistulemuste vähesusest. Täpsemalt on võimalik lugeda Chalmersi ülikoolis tehtud teadustööst „Measurement and evaluation uncertainties of impact sound insulation“ [14] või sama ülikooli teadustööst „An evaluation of various sound insulation software and their applications in the design of silent rooms“. [13]

4.1 Üldpõhimõtted

4.1.1 Karkassvaheseinte õhuheliisolatsioonivõime

Karkassvaheseinte all käsitletakse seinakonstruktsioone, mis koosnevad karkassipostidest ja küljeplaatidest. Karkassvaheseinte õhuheliisolatsioonivõime arvutamiseks kasutatakse meetodit, mis arvestab pinnaplaatide massidega ning õhkvahe suurusega. [21] [36] Arvutusmodel võimaldab leida nii ideaalse kui ka mehaaniliste sidemetega karkassvaheseinte heliisolatsioonivõimet.

Ideaalse ehk ilma mehaanilisi sidemeid omava karkassvaheseina heliisolatsioonivõime arvutatakse eraldi kolmes sagedusvahemikus. [21] [36]

$$R_{ideal} = \begin{cases} 20 \log_{10}(m'_1 + m'_2)f - 48 & f < f_{mam} \\ R_1 + R_2 + 20 \log fd - 29 & f_{mam} < f < f_I \\ R_1 + R_2 + 6 & f > f_I \end{cases}$$

$$f_I = \frac{c_0}{6d}$$

$$f_{mam} = 80 \sqrt{\frac{m'_1 + m'_2}{dm'_1 m'_2}}$$

f – sagedus (Hz)

f_{mam} – mass – õhk – mass resonantssagedus (Hz)

f_I – piirsagedus (Hz)

$m'_1; m'_2$ – plaatpindade 1 ja 2 pinnamassid (kg/m^2)

$R_1; R_2$ – plaatpindade 1 ja 2 heliisolatsioonivõimed (dB)

d – õhkvahe laius (m)

c_0 – heli kiirus õhus 343 (m/s)

Jäiksid mehaanilisi sidemeid, näiteks puitposte omavate karkassvaheseinte heliisolatsioonivõime leidmiseks käsitletakse vaheseina küljeplaate üksteisega koos olevatena. Leitakse õhukese plaadi heliisolatsioonivõime R_M , mida seejärel alates silksagedusest f_{br} ehk sagedusest, millest kõrgemal algab karkassipostide nõrgendav mõju korrigeeritakse parandusteguri ΔR_M võrra. [37]

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

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

$$\Delta R_M = 10 \log_{10}(b f_c) + 20 \log_{10} \frac{m'_1}{m'_1 + m'_2} - 18 \text{ (dB)}$$

f_c – õhukese plaadi kointsidentsi piirsagedus (Hz)

b – karkassipostide samm (m)

Õhukese ehitusplaadi heliisolatsioonivõime erinevatel sagedustel leitakse kasutades meetodit, mis on esitatud artiklis „Levyrakenneseinien ilmaääneneristävyyden mallintaminen“. [38]

$$R = \begin{cases} 20 \log_{10} m' f - 48 \text{ (dB)} & f < \frac{1}{2} f_c \\ 20 \log_{10} m' f + 10 \log_{10} \left[\eta \left(\frac{f}{f_c} - 1 \right) \right] - 44 \text{ (dB)} & f \geq f_c \end{cases}$$

kus η – kaotegur, ehitusplaatidel 0,02

f_c – koitsidentsi piirsagedus (Hz), arvutatakse:

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

kus μ – Poissoni tegur, ehitusplaatidel 0,25

h - plaadi paksus (m)

E – elastsusmoodul (Pa)

Sagedusvahemikus $\frac{1}{2} f_c - f_c$ leitakse õhuheliisolatsioonivõime interpoleerimise teel.

Arvutustulemustest ühearvulise väärtuse saamiseks kasutatakse standardijärgset [26] meetodit.

Sarnase lähenemise on esitanud ka J. H. Rindel raamatus „Sound Insulation in Buildings“. [39]

4.2 Arvutustarkvara Insul

Insul on Uus-Meremaal akustikakonsultatsiooni ettevõtte Marshall Day Acoustics poolt välja töötatud tarkvara, mis võimaldab hinnata erinevate tarindite õhumüra- ja löögimüraisolatsioonivõimet. Tarkvara on mõeldud tarindite kui üksikute konstruktsiooniosade heliisolatsiooniparameetrite arvutamiseks ning ei võimalda modelleerida ruumi kui tervikut, st. ei arvesta siirdehelide levikuga. Käesolevas töös kasutati tarindite hindamiseks tarkvara Insul 9.0, kuna see on laialdaselt kasutusel ka erinevates ehitusakustikaga tegelevates ettevõtetes üle maailma. Lisaks on tegemist võrdlemisi kasutajamugava ning vabalt kättesaadava kommertstarkvaraga, mille võib igaüks endale soetada. Tarkvara esitab tulemused 1/3 – oktaavribas ning leiab automaatselt tarindi ühenumbriks heliisolatsioonivõimeindeksid.

Tulemusteni on jõutud ühendades teoreetilisi arvutusmudeleid EN 12354 standardiseerist, laboratoorseid katsetulemusi ja reaalseid mõõtmisprotokolle. Arendajad hindavad tarkvara täpsuseks $\pm 3 \text{ dB}$. Programmil on olemas andmebaas erinevate karkassitüüpide ning ehitusmaterjalide kohta, mille vahel kasutaja valida saab. Lisaks on võimalik kasutajal ka erinevaid materjale andmebaasi lisada.

Seinakonstruktsioonide puhul on tarkvaraga võimalik hinnata kuni kolmekihiliste tarindite õhumüraisolatsioonivõimet, kusjuures iga kiht võib koosneda kuni kuuest erinevast plaadist ning neid ühendavatest sidemetest. Ühekihiliste plaatelementide heliisolatsioonivõimet hindab programm madalatel sagedustel massiseaduse järgi ning kõrgematel sagedustel võtab arvesse kointsidentsiefekti mõju. Keerulisemate arvutuskäikude kohta on võimalik lugeda Insuli kodulehelt [40] ning Chalmersi ülikoolis tehtud magistritööst „An evaluation of various sound insulation programs and their use in the design of silent rooms“. [13]

Vahelaekonstruktsioonide puhul võimaldab tarkvara arvutada nii tarindite õhumüraisolatsiooni- kui ka löögimüraisolatsioonivõimet. Maksimaalselt on võimalik arvutada samuti kuni kolmekihilisi tarindeid, kuid mida rohkem kihte lisada, seda ebatäpsemaks tulemused muutuvad. Manuaali lugedes selgub, et löögimüra arvutamiseks kasutatav meetod põhineb läbi tarindi kiirgunud löögienergia hindamisel, mida on kirjeldatud uurimustöös „The interaction between the ISO tapping machine and lightweight floors“. [41] Vahelagede arvutamise puhul ei arvesta tarkvara õhumüraisolatsioonivõime leidmise juures põrandakattekihtide mõjuga.

Käesolevas töös kasutatakse Insulit tarindite ühenumbriliste heliisolatsiooniparameetrite arvutamiseks ja nende võrdlemiseks tulemustega, mis saadi eespool kirjeldatud teoreetilist arvutusmudelit kasutades.

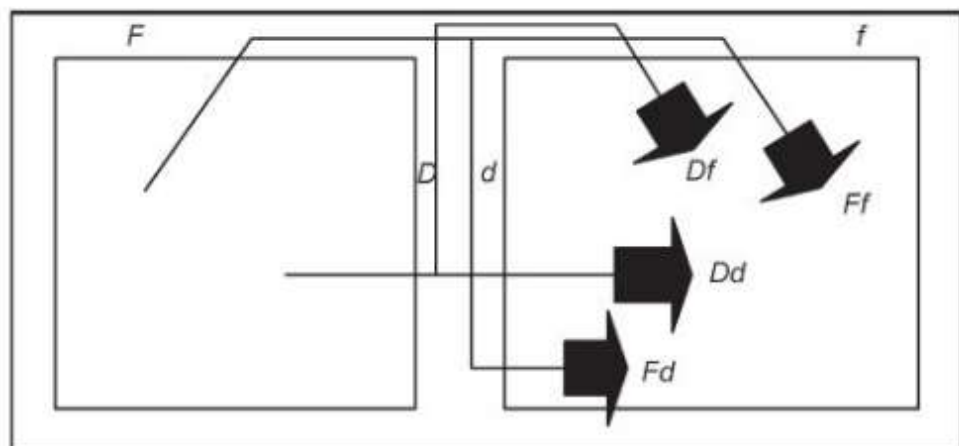
4.3 Arvutustarkvara BASTIAN

DataKustik BASTIAN – The Building Acoustics Planning System on Saksamaal välja töötatud arvutustarkvara ruumidevahelise õhu- ja löögimüraisolatsiooni hindamiseks. DataKustik tegutseb alates aastast 1991 ning lisaks BASTIANILE on nende tootekataloogis ka tarkvarad CadnaA ning CadnaR, mis võimaldavad vastavalt arvutada keskkonnamüra ning ruumidesisest mürataset.

Käesolevas töös kasutatakse teoreetilisteks arvutusteks BASTIANi, kuna erinevalt Insulist võimaldab see modelleerida ruumi kui tervikut, mitte ainult üksikut tarindit. See tähendab, et arvutustulemustes kajastatakse ka siirdehelide osakaalu, mistõttu on võimalik arvestada erinevate ühendussõlmedega ning arvutada kogu konstruktsiooni heliisolatsioonivõimet. Saadud tulemusi on võimalik võrrelda erinevates riikides kehtivate heliisolatsiooninõuetega.

BASTIANi arvutusmeetodid põhinevad standardiseeria EN 12354 osadel 1-3. BASTIANi on võimalik kasutada ruumidevahelise heliisolatsiooni hindamiseks nii korterites kui ka büroohoonetes, koolides, hotellides ja haiglates. [42] Arvutusmeetodite analüüsiga on võimalik tutvuda Chalmersi ülikoolis tehtud magistritöös „An evaluation of various sound insulation programs and their use in the design of silent rooms“. [13]

BASTIANi on sisseehitatud andmebaasid, mis võimaldavad valida tarindeid vastavalt tootjatele (Saint-Gobain Isover, Rigips GmbH, Saint-Gobain Glass) või vastavalt kirjandusele. Andmebaasidega on võimalik lähemalt tutvuda DataKustiku kodulehel. [43] Lisaks olemasolevates andmebaasides olevatele tarinditele on võimalik kasutajal näiteks Insuli arvutuste või reaalse mõõtmistulemuste põhjal uusi konstruktsioonitüüpe lisada.



Selgitused

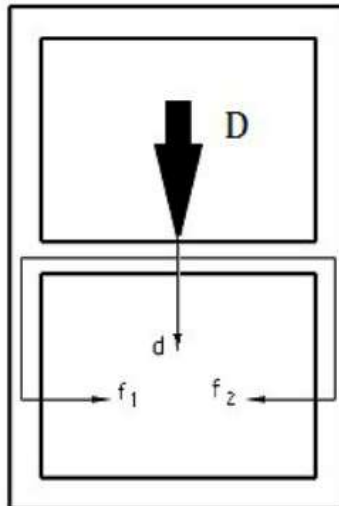
Dd otsene otsetrajektor

Df otsene külgsuunaline trajektor

Fd külgsuunaline otsene trajektor

Ff külgsuunaline külgtrajektor

Joonis 4.1. Kahe ruumi vahelised õhumüra heliülekanetrajektorid standardiseeria EVS EN 12354 kohaselt [19]



Selgitused

- d löögiheli otsene ülekanne
- Dd otsene ülekandetrajektoor
- Df_1 või Df_2 külgnev ülekandetrajektoor

Joonis 4.2. Kahe ruumi vahelised löögimüra heliülekandetrajektoolid standardiseeria EVS EN 12354 kohaselt [20]

5 ERALDISEISVATE ELEMENTIDE ARVUTUSTULEMUSED

Järgnevas peatükis esitatakse eraldiseisvate tarindite heliisolatsiooniparameetrite arvutustulemused. Kuna saadud tulemusi ei ole võimalik otse võrrelda erinevates riikides kehtivate heliisolatsiooninõuetega, siis kasutatakse neid kolmemõõtmeliste arvutusmodelite sisendina.

Esmalt arvutatakse üksiku ehitusplaadi heliisolatsioonivõime, seejärel kergkonstruktsioonidest eluhoonetes kasutatavate tüüpseinte ning -vahelagede heliisolatsioonivõimed. Seinakonstruktsioonide puhul arvutatakse õhumüraisolatsiooni indeks, vahelagede puhul lisaks ka taandatud löögmürataseme indeks. Tarindite puhul leitakse esmalt reaalselt kasutusel oleva tüübi heliisolatsiooniparameetrid ning seejärel pakutakse mõned võimalikud variandid heliisolatsioonivõime parandamiseks.

5.1 Seinakonstruktsioonid puitelementhoonetes

5.1.1 Kipsplaadide õhuheliisolatsioonivõime

Arvutustes kasutatakse KNAUF standardkipsplaati HRK. Pinnamass on võetud KNAUF tootekataloogist [44], ülejäänud arvutuseks vajaminevad abisuurused artiklist „Sound insulation of Finnish building boards“. [45]

Ühe kipsplaadi õhuheliisolatsioonivõime arvutatakse järgmiselt:

$$\mu = 0,25$$

$$E = 3 \text{ (GPa)} = 3 * 10^9 \text{ (Pa)}$$

$$h = 0,013 \text{ (m)}$$

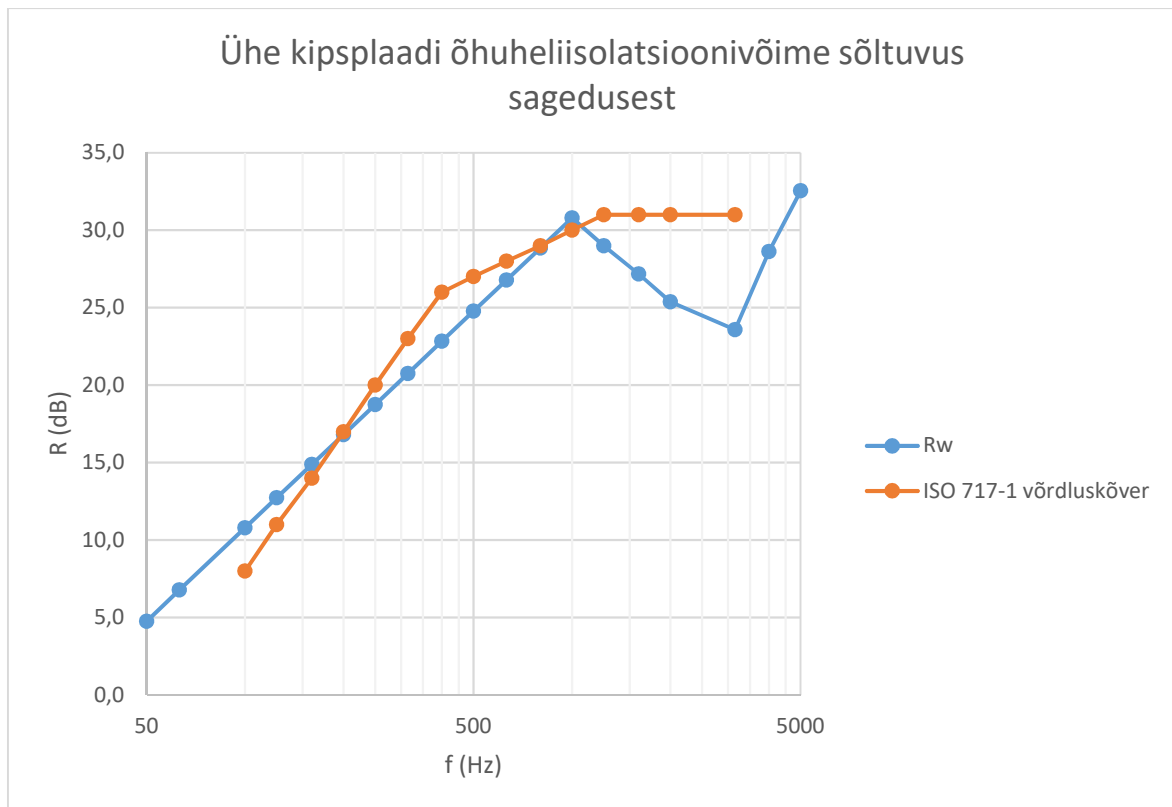
$$\eta = 0,02$$

$$m' = 8,7 \text{ (kg/m}^2\text{)}$$

$$f_c = \frac{c_0^2}{2\pi} \sqrt{\frac{12(1 - \mu^2)m'}{Eh^3}} = \frac{343^2}{2\pi} \sqrt{\frac{12(1 - 0,25) * 8,7}{3 * 10^9 * 0,013}} = 2282 \text{ (Hz)}$$

Tabel 5.1. Ühe 13 mm kipsplaadi R_w ühearvulise väärtuse määramine

f (Hz)	R (dB)	ISO 717-1 standardkõver (dB)	Hälve (dB)
50	4,8		
63	6,8		
100	10,8	8	0,0
125	12,7	11	0,0
160	14,9	14	0,0
200	16,8	17	0,2
250	18,7	20	1,3
315	20,8	23	2,2
400	22,8	26	3,2
500	24,8	27	2,2
630	26,8	28	1,2
800	28,9	29	0,1
1000	30,8	30	0,0
1250	29,0	31	2,0
1600	27,2	31	3,8
2000	25,4	31	5,6
3150	23,6	31	7,4
4000	28,6		
5000	32,5		



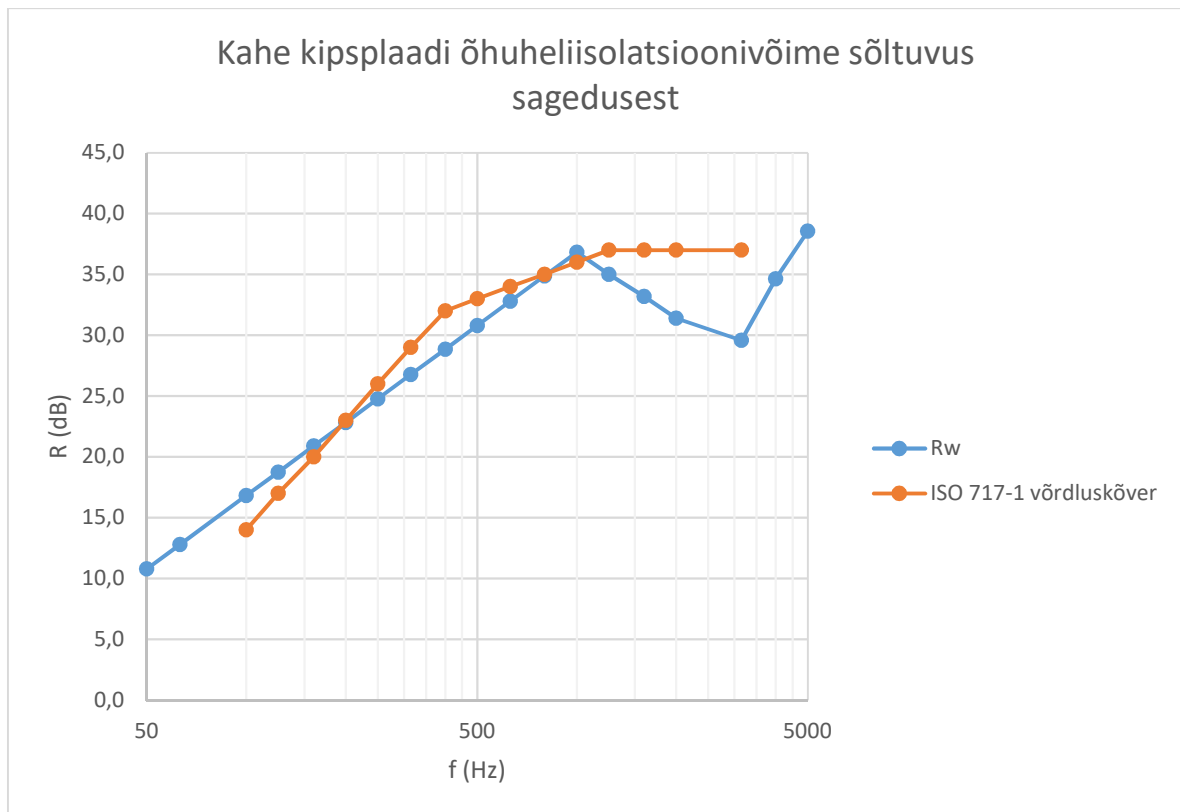
Joonis 5.1. Ühe 13 mm kipsplaadi R_w ühearvulise väärtuse määramine

ISO võrdluskõvera nihutamisel on soovimatute hälvete summa $29,3 \text{ dB} \leq 32 \text{ dB}$. Järelikult on ühe 13 mm kipsplaadi ühearvuline õhuheliisolatsiooniindeks $R_w = 27 \text{ dB}$.

Kahe kõrvuti asetatud kipsplaadi õhuheliisolatsioonivõime arvutamisel muutub ainult plaatide pinnamass. Kointsidentsisagedus on oma olemuselt nähtus, kus õhus ja plaadis levivate helilainete faasid on samad, mistõttu ei teki plaadis takistust helilaine edasikandumisele. Kointsidentsinähtuse madalaimat sagedust nimetatakse kointsidentsi piirsageduseks. [21] Kointsidentsi piirsagedus jääb kahe kõrvuti asetatud plaadi puhul samaks nagu ühe plaadi puhul, kuna neist ei moodustu mitte homogeenne süsteem vaid kaks eraldi võnkuvat elementi.

Tabel 5.2. Kahe 13 mm kipsplaadi R_w ühearvulise väärtuse määramine

f (Hz)	R (dB)	ISO 717-1 standardkõver (dB)	Hälve (dB)
50	10,8		
63	12,8		
100	16,8	14	0,0
125	18,7	17	0,0
160	20,9	20	0,0
200	22,8	23	0,2
250	24,8	26	1,2
315	26,8	29	2,2
400	28,9	32	3,1
500	30,8	33	2,2
630	32,8	34	1,2
800	34,9	35	0,1
1000	36,8	36	0,0
1250	35,0	37	2,0
1600	33,2	37	3,8
2000	31,4	37	5,6
3150	29,6	37	7,4
4000	34,6		
5000	38,6		



Joonis 5.2. Kahe 13 mm kipsplaadi R_w ühearvulise väärtuse määramine

ISO võrdluskõvera nihutamisel on soovimatute hälvete summa $29,1 \text{ dB} \leq 32 \text{ dB}$. Järelikult on kahe kõrvutiasetatud 13 mm kipsplaadi ühearvuline õhuheliisolatsiooniindeks $R_w = 33 \text{ dB}$. Kuna massiseadus sätestab, et massi kahekordistumisel suureneb õhuheliisolatsioonivõime 6 dB, on arvutustulemused usaldusväärsed.

5.1.2 Jäikade mehaaniliste sidemetega karkassvahesein

Tüüpiline jäikade mehaaniliste sidemetega karkassvahesein koosneb kahest kipsplaatidekihist, mis on ühendatud puitpostidega. Postide vahele on paigutatud soojustusmaterjal. Tüüpiliselt on postide mõõdud $45 \times 145 \text{ mm}$, $s = 600 \text{ mm}$. Tarindi joonis on esitatud töö graafilises lisas.

Sildsageduse leidmine:

$$m'_1 = m'_2 = 8,7 \text{ kg/m}^2$$

$$d = 145 \text{ mm} = 0,145 \text{ m}$$

$$f_{mam} = 80 \sqrt{\frac{m'_1 + m'_2}{dm'_1 m'_2}} = 80 \sqrt{\frac{8,7 + 8,7}{0,145 * 8,7 * 8,7}} = 100,7 \text{ (Hz)}$$

$$f_c = 2282 \text{ (Hz)}$$

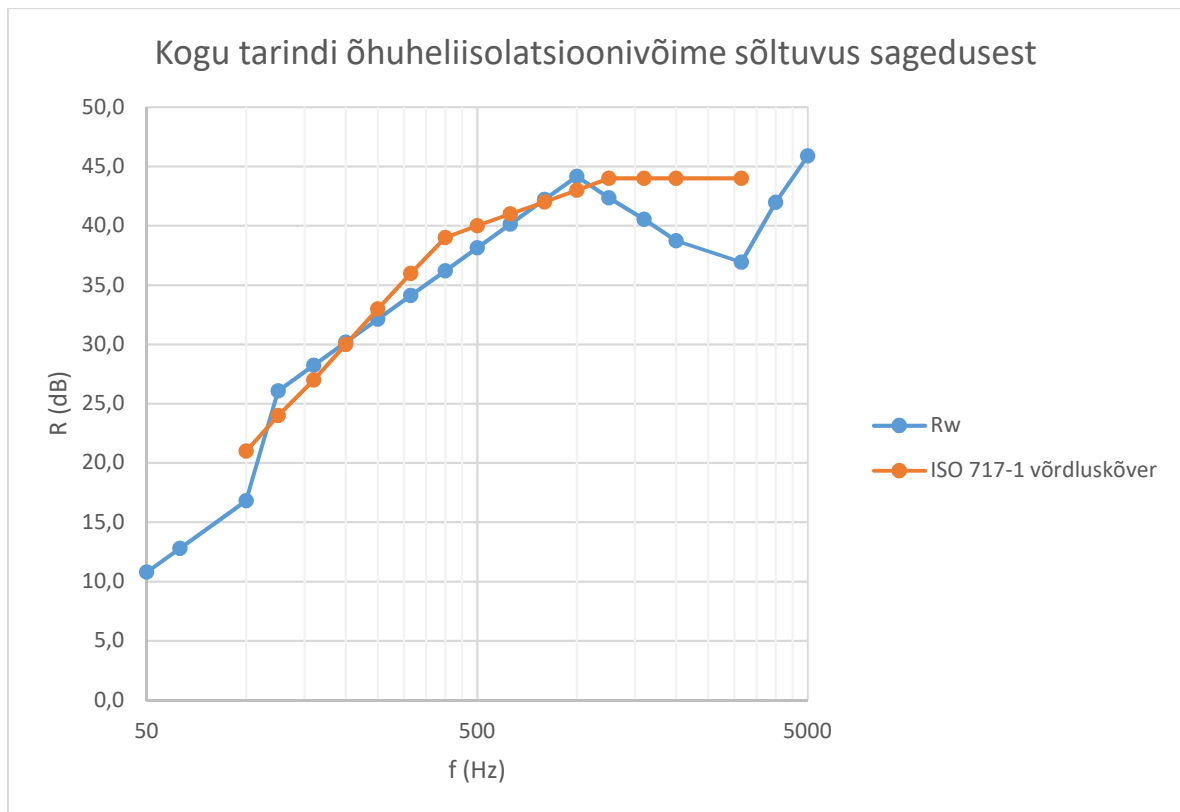
$$f_{br} = f_{mam} \left[\frac{\pi b f_c}{2 c_0} \left(\frac{m'_1}{m'_1 + m'_2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{4}} = 100,7 \left[\frac{\pi * 0,6 * 2282}{2 * 343} \left(\frac{8,7}{8,7 + 8,7} \right)^2 \right]^{\frac{1}{4}} = 112,7 \text{ (Hz)}$$

Parandusteguri leidmine:

$$\begin{aligned} \Delta R_M &= 10 \log_{10}(b f_c) + 20 \log_{10} \frac{m'_1}{m'_1 + m'_2} - 18 = \\ &= 10 \log_{10}(0,6 * 2282) + 20 \log_{10} \frac{8,7}{8,7 + 8,7} - 18 = 7,3 \text{ (dB)} \end{aligned}$$

Tabel 5.3. Kogu tarindi ühearvulise R_w määramine

f (Hz)	R (dB)	ISO 717-1 standardkõver (dB)	Hälve (dB)
50	10,8		
63	12,8		
100	16,8	21	4,2
125	26,1	24	0,0
160	28,2	27	0,0
200	30,2	30	0,0
250	32,1	33	0,9
315	34,1	36	1,9
400	36,2	39	2,8
500	38,1	40	1,9
630	40,1	41	0,9
800	42,2	42	0,0
1000	44,2	43	0,0
1250	42,3	44	1,7
1600	40,5	44	3,5
2000	38,7	44	5,3
3150	36,9	44	7,1
4000	42,0		
5000	45,9		



Joonis 5.3. Kogu tarindi R_w ühearvulise väärtuse määramine

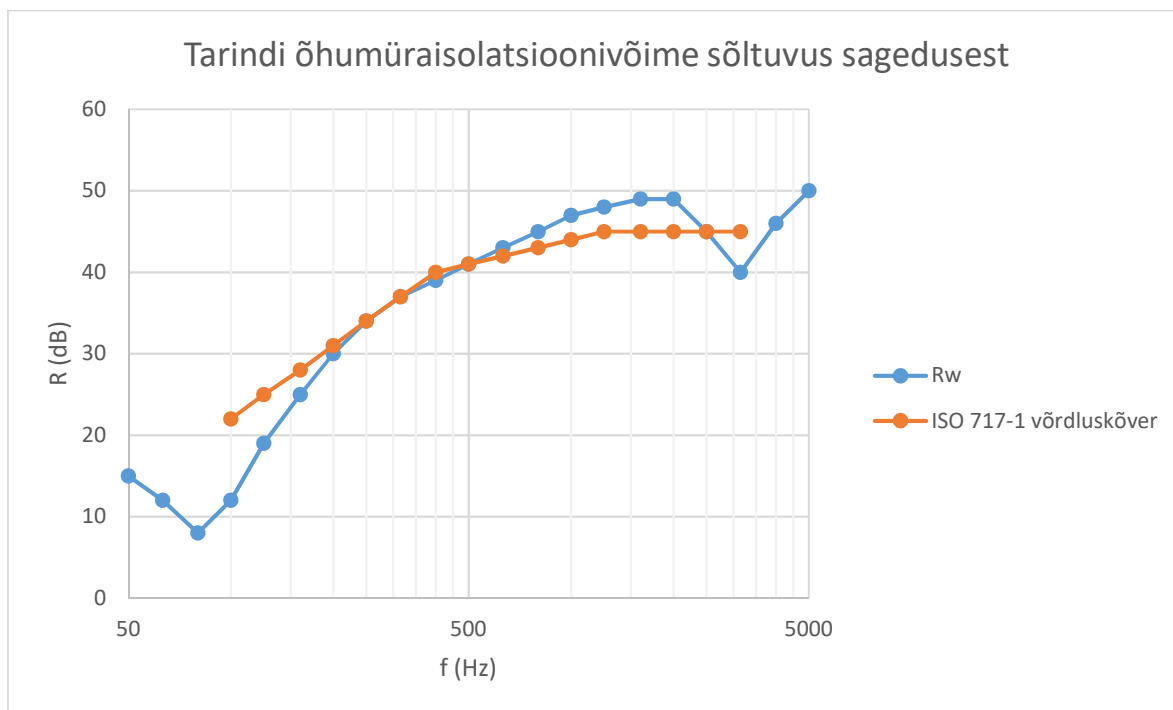
ISO võrdluskõvera nihutamisel on soovimatute hälvete summa $29,9 \text{ dB} \leq 32 \text{ dB}$. Järelikult on tüüpilise jäikade mehaaniliste sidemetega karkassvaheseina arvutuslik $R_w = 40 \text{ dB}$.

Kogu tarindi modelleerimisel arvutusprogrammis Insul 9,0 on arvutuslik $R_w = 41 \text{ dB}$ ja $C_{50-5} = -5 \text{ dB}$. Erinevus tuleb Insulis kasutatavate kipsplaatide parameetrite erinevusest, mida käesolevas töös pole erinevuste illustreerimise eesmärgil muudetud. Arvutustes kasutatakse KNAUF standardkipsplaati HRK. Pinnamass on võetud KNAUF tootekataloogist [44], ülejäänud arvutuseks vajaminevad abisuurused artiklist „Sound insulation of Finnish building boards“. [45] Erinevus 1 dB kinnitab, et arvutusmeetodid on mõlemal puhul siiski sarnased. Insul annab tarkvara lubatud vea piirideks $\pm 3 \text{ dB}$, mille sisse erinevus praegu ka jääb.

Kui teoreetilistes arvutuses kasutada Insuli abisuuruste väärtusi, saadakse $f_c = 2845 \text{ Hz}$ ja kogu tarindi heliisolatsioonivõimeks $R_w = 38 \text{ dB}$. Insulist madalam tulemus illustreerib, et tarkvara oskab hinnata ka karkassi vahel oleva helineeldematerjali mõju tarindi heliisolatsioonivõimele. Sellest hoolimata jääb arvutustulemus Insulis lubatud määramatuse piiridesse.

Tabel 5.4. Arvutustes kasutatud abisuuruste võrdlus

	Teoreetiline arvutus	Insul
E	3 GPa	1,93 GPa
η	0,02	0,01
f_c	2282 Hz	2896 Hz



Joonis 5.4. Kogu tarindi õhumüraisolatsioonivõime sõltuvus sagedusest

5.1.3 Õhkvahega karkassvahesein

Tüüpiline õhkvahega karkassvaheseinakonstruktsioon koosneb kahest 30 mm õhkvahega eraldatud 70x45 mm karkassipostidest, mis on mõlemalt poolt kaetud 2x13 mm kipsplaadikihi. Kõnealusele tarindile on tootja andnud ühearvulise õhuheliisolatsiooniindeksi $R_w = 55 \text{ dB}$. Kirjeldatud tarind on tüüpkonstruktsioon, mida on võimalik modifitseerida kas muutes õhkvahe suurust või kasutades standardkipsplaadide asemel ühte või mitut erikõva kipsplaati. Samuti võivad mõned tootjad seina platsile transportida kahes osas, mis tähendab, et soojustusmaterjal on seestpoolt kaetud ehitusplaadi või terasvõrguga. Kõik sellised modifikatsioonid muudavad seina heliisolatsioonivõimet. Tarindi joonis on esitatud töö graafilises lisas.

Sagedusvahemike leidmine:

$$m'_1 = m'_2 = 2 * 8,7 = 17,4 \text{ kg/m}^2$$

$$d = 170 \text{ mm} = 0,17 \text{ m}$$

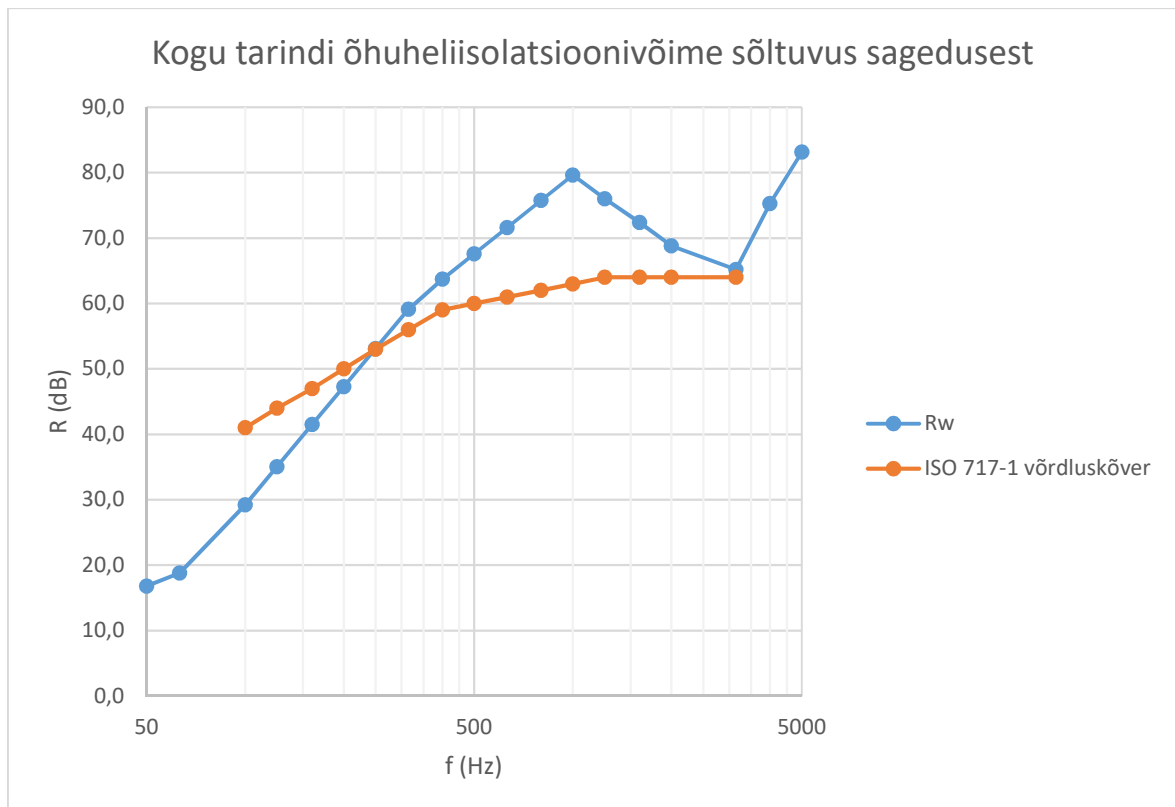
$$f_l = \frac{c_0}{6 * d} = \frac{343}{6 * 0,17} = 336,3 \text{ (Hz)}$$

$$f_{mam} = 80 \sqrt{\frac{m'_1 + m'_2}{dm'_1 m'_2}} = 80 * \sqrt{\frac{17,4 + 17,4}{0,17 * 17,4 * 17,4}} = 65,8 \text{ (Hz)}$$

Kahe 13 mm kipsplaadi heliisolatsioonivõimed erinevatel sagedustel ning ühearvuline õhuheliisolatsiooniindeks $R_w = 33 \text{ dB}$ määrati alapunktis „kipsplaatide õhuheliisolatsioonivõime“.

Tabel 5.5. Kogu tarindi ühearvulise R_w määramine

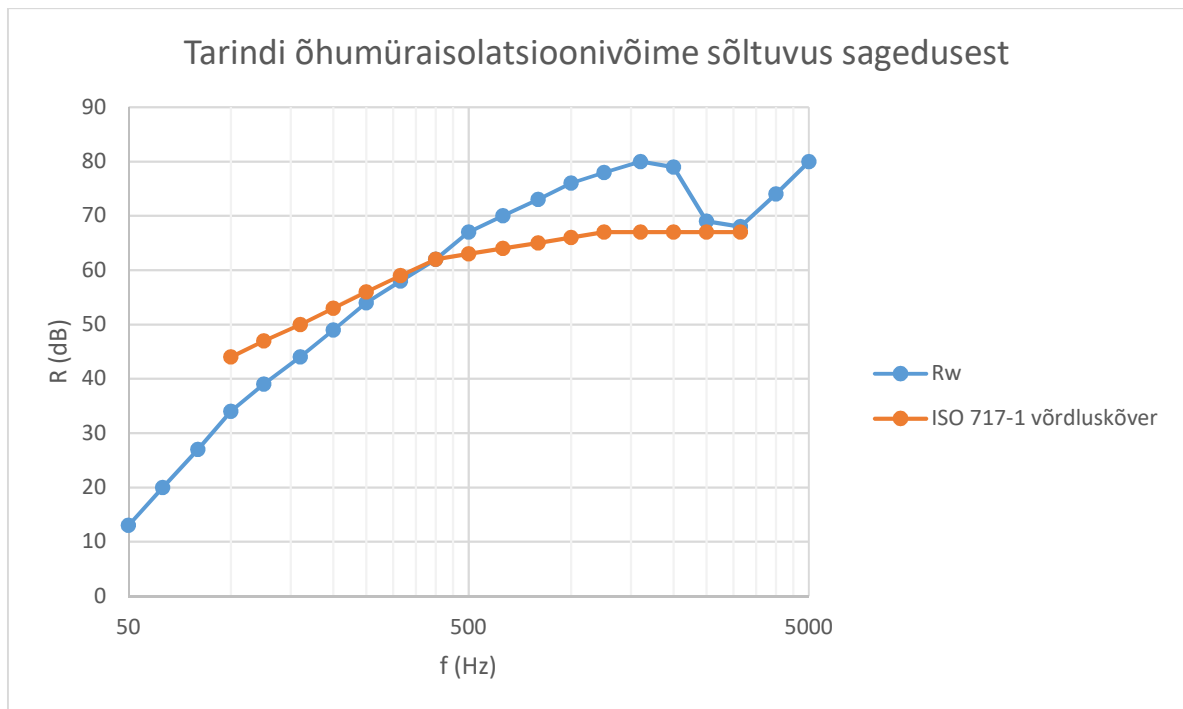
f (Hz)	R (dB)	ISO 717-1 standardköver (dB)	Hälve (dB)
50	16,8		
63	18,8		
100	29,2	41	11,8
125	35,0	44	9,0
160	41,5	47	5,5
200	47,3	50	2,7
250	53,1	53	0,0
315	59,1	56	0,0
400	63,7	59	0,0
500	67,6	60	0,0
630	71,6	61	0,0
800	75,7	62	0,0
1000	79,6	63	0,0
1250	76,0	64	0,0
1600	72,4	64	0,0
2000	68,8	64	0,0
3150	65,2	64	0,0
4000	75,3		
5000	83,1		



Joonis 5.5. Kogu tarindi ühearvulise R_w väärtuse määramine

ISO võrdluskõvera nihutamisel on soovimatute hälvete summa $29,0 \text{ dB} \leq 32 \text{ dB}$. Järelikult on tüüpilise õhuvahega puitkarkass-seina arvutuslik $R_w = 60 \text{ dB}$.

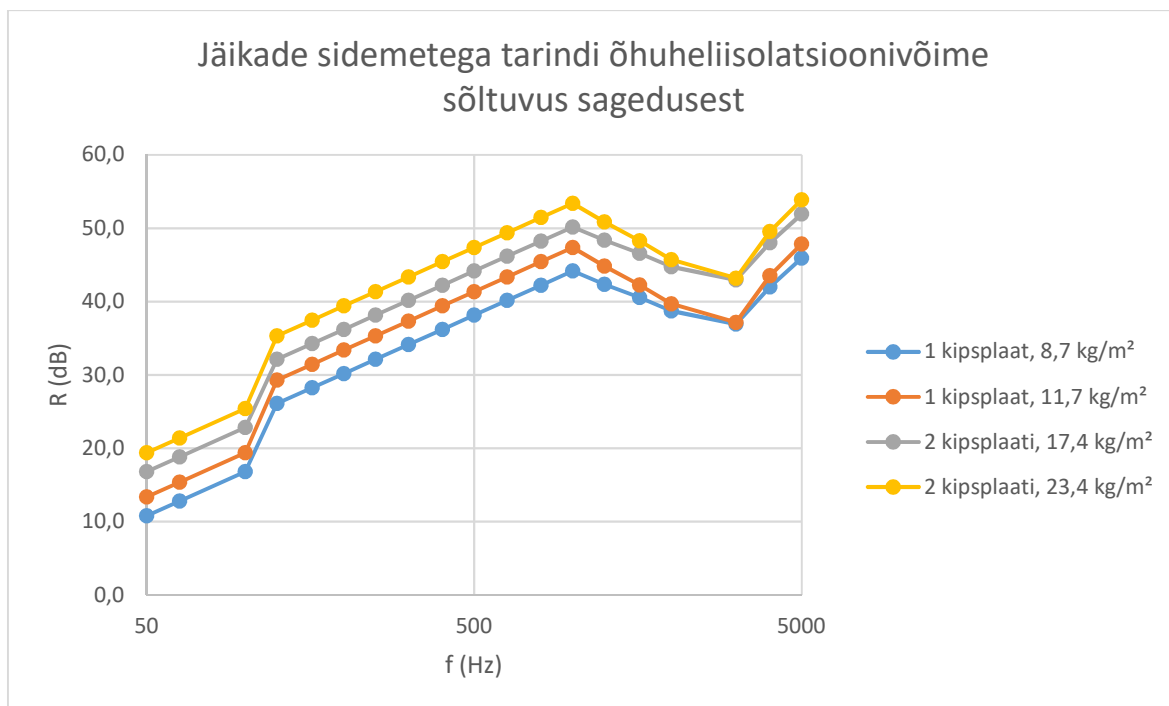
Tarindi modelleerimisel arvutustarkvaras Insul saadi ühearvulise heliisolatsiooniindeksi väärtuseks $R_w = 63 \text{ dB}$ ja $C_{50-5} = -12 \text{ dB}$. Erinevus teoreetiliste arvutustulemustega tekib kipsplaatide parameetrite erinevusest ning ka asjaolust, et tarkvara oskab teatud määral hinnata karkassipostide vahelise helineeldematerjali mõju heliisolatsioonile. Teoreetilistes arvutustes soojustusmaterjali mõju täpselt ei hinnata, tarindi heliisolatsioonivõime leitakse katvate kipsplaatide ning õhuvahe suuruse kaudu. Samas annab arvutustarkvara vea suuruseks $\pm 3 \text{ dB}$, mille sisse praegune tulemus ka jääb.



Joonis 5.6. Kogu tarindi õhumüraisolatsioonivõime sõltuvus sagedusest

5.1.4 Järeldused karkassvaheseinade kohta

Järgnevalt esitatakse karkassvaheseinte arvutuslikud helisolatsioonivõimed, mis on saadud kasutades erinevaid kipsplaate nii ühes kui kahes kihis mõlemal pool seina ning erinevaid õhkvahede suurus. Standardkipsplaadina käsitletakse KNAUF HRK plaati pinnamassiga $m_1 = 8,7 \text{ kg/m}^2$ ning erikõva kipsplaadina Gyproc GEK 13 tugevdatud plaati pinnamassiga $m_2 = 11,7 \text{ kg/m}^2$. [46]



Joonis 5.7. Karkassvaheseinte lahenduste heliisolatsioonivõimete võrdlus

Tabel 5.6. Jäikade sidemetega tarindite ühearvulise heliisolatsiooniindeksi väärtused

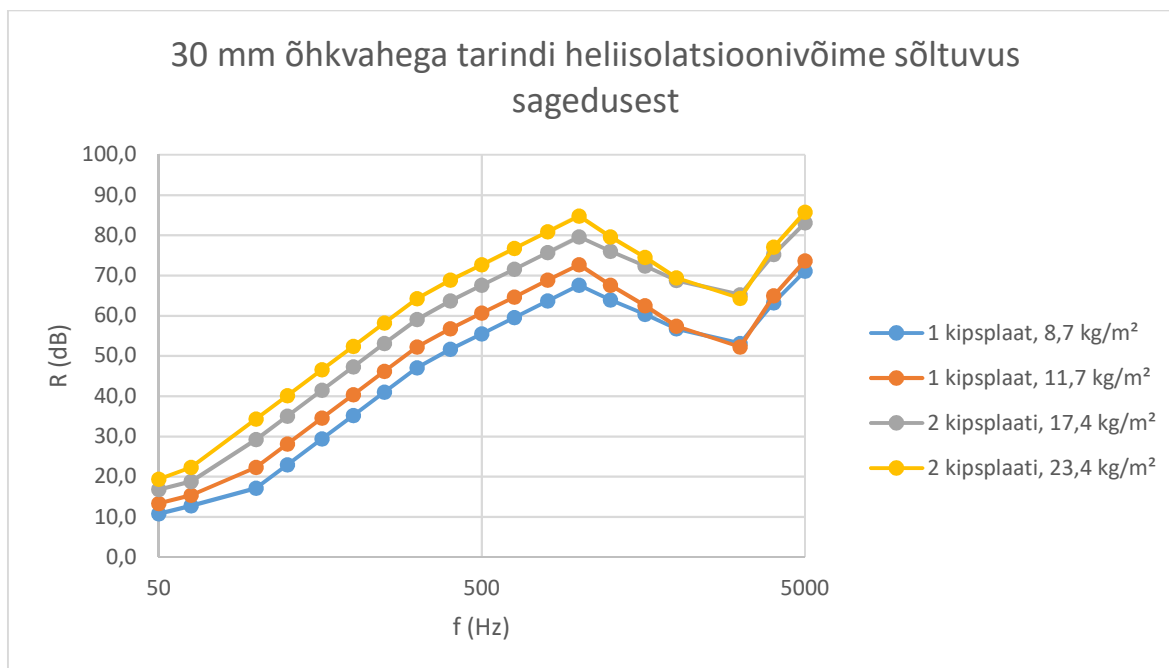
Tarind	R_w
1 kipsplaat, 8,7 kg/m ²	40 dB
1 kipsplaat, 11,7 kg/m ²	42 dB
2 kipsplaati, kokku 17,4 kg/m ²	46 dB
2 kipsplaati, kokku 23,4 kg/m ²	48 dB

Jäikade mehaaniliste sidemetega karkassvaheseinte puhul on selgelt näha, et kipsplaatide pinnamassi suurendamine parandab kogu tarindi õhuheliisolatsiooniindeksit. Pinnamassi $m' = 11,7 - 8,7 = 3,0 \text{ kg/m}^2$ suurendades paranes õhuheliisolatsiooniindeks 2 dB . Lisaks on selgelt näha massiseaduse kehtivus – pinnamassi kahekordsel suurendamisel paraneb õhuheliisolatsiooniindeks 6 dB .

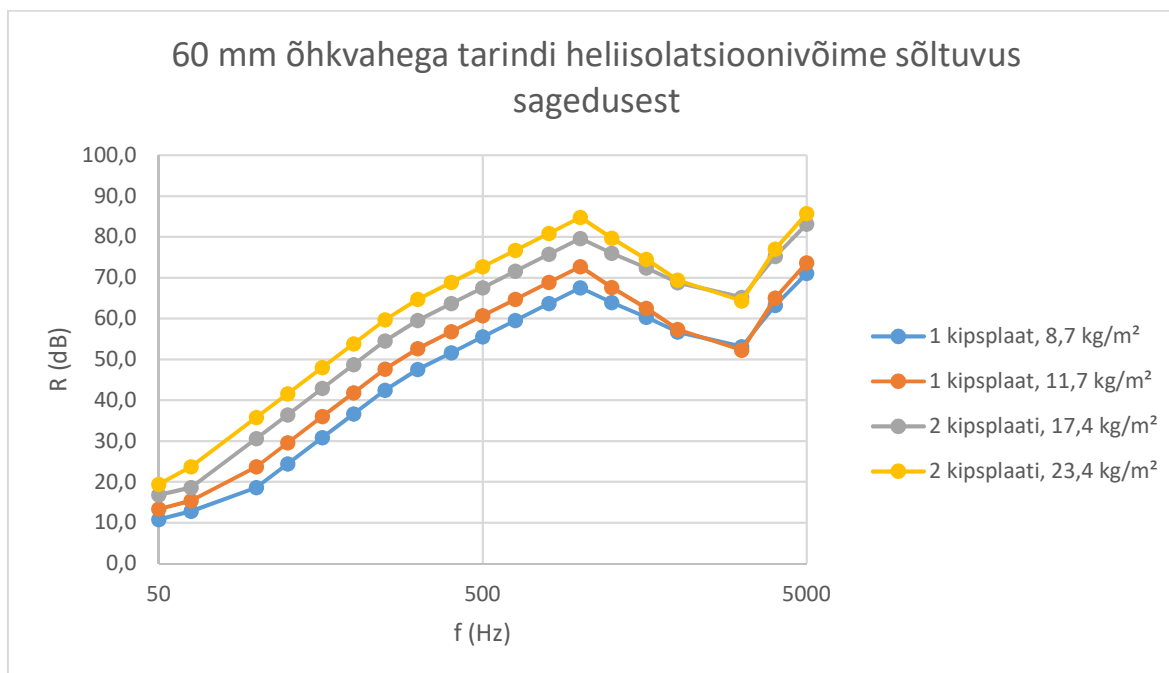
Kui oleks kasutatud kahe kipsplaadi asemel ühte suurema pinnamassiga, aga samal ajal paksemat plaati, oleks kaotatud massi kasvamise arvelt saadav õhuheliisolatsiooniindeksi võit, kuna plaadi paksuse suurenedes koitsidentsi piirsagedus alaneb. See tähendab, et koitsidentsinähtus tekib õhuheliisolatsiooniindeksi seisukohast olulisemas sagedusalas kui õhema plaadi puhul, mistõttu nõrgendab R_w väärtust. Järelikult omab heliisolatsiooni seisukohalt suurimat parandavat efekti nii suurema pinnamassiga, kuid sama paksusega kipsplaatide kasutamine kui ka plaadi lisamine.

Tabel 5.7. Spektrilähendusteguriga arvestamine seotud küljeplaatidega tarindi korral

Tarind	$C_{50-3150}$	$R_w + C_{50-3150}$
1 kipsplaat, 8,7 kg/m ²	-2 dB	38 dB
1 kipsplaat, 11,7 kg/m ²	-2 dB	40 dB
2 kipsplaati, kokku 17,4 kg/m ²	-2 dB	44 dB
2 kipsplaati, kokku 23,4 kg/m ²	-2 dB	46 dB



Joonis 5.8. Karkassvaheseinte lahenduste heliisolatsioonivõimete võrdlus



Joonis 5.9. Karkassvaheseinte lahenduste heliisolatsioonivõimete võrdlus

Tabel 5.8. Sidumata küljeplaatidega tarindite ühearvulise heliisolatsiooniindeksi väärtused

	Õhkvahe	R _w
1 kipsplaat, 8,7 kg/m ²	30 mm	48 dB
	60 mm	49 dB
1 kipsplaat, 11,7 kg/m ²	30 mm	52 dB
	60 mm	53 dB
2 kipsplaati, 17,4 kg/m ²	30 mm	60 dB
	60 mm	61 dB
2 kipsplaati, 23,4 kg/m ²	30 mm	64 dB
	60 mm	65 dB

Sidumata küljeplaatidega karkassvaheseina õhuheliisolatsiooni indeksite arvutustulemuste põhjal on samuti selgelt näha, et sisulist efekti indeksi suurendamiseks annab kipsplaatide pinnamasside suurendamine. Pinnamassi suurendamisel $m' = 23,4 - 17,4 = 6,0 \text{ kg/m}^2$ paraneb õhuheliisolatsioonivõime 4 dB. Õhkvahe suurendamine 30 mm lisab õhuheliisolatsioonivõimele 1 dB. Arvutusmeetodis kasutatakse õhkvahe suurust vaid sagedusvahemikus $f_{mam} < f < f_l$, mis kogu sagedusvahemikust moodustab väikese osa. Järelikult töötab õhkvahega sein sisuliselt nagu kaks eraldiseisvat seinu ning kehtib jäikade sidemetega tarindi juures tehtud tõdemus – heliisolatsioonivõime parandamiseks tasub tarindile lisada plaadikihte.

Tabel 5.9. Spektrilähendusteguriga arvestamine sidumata küljeplaatidega tarindi korral

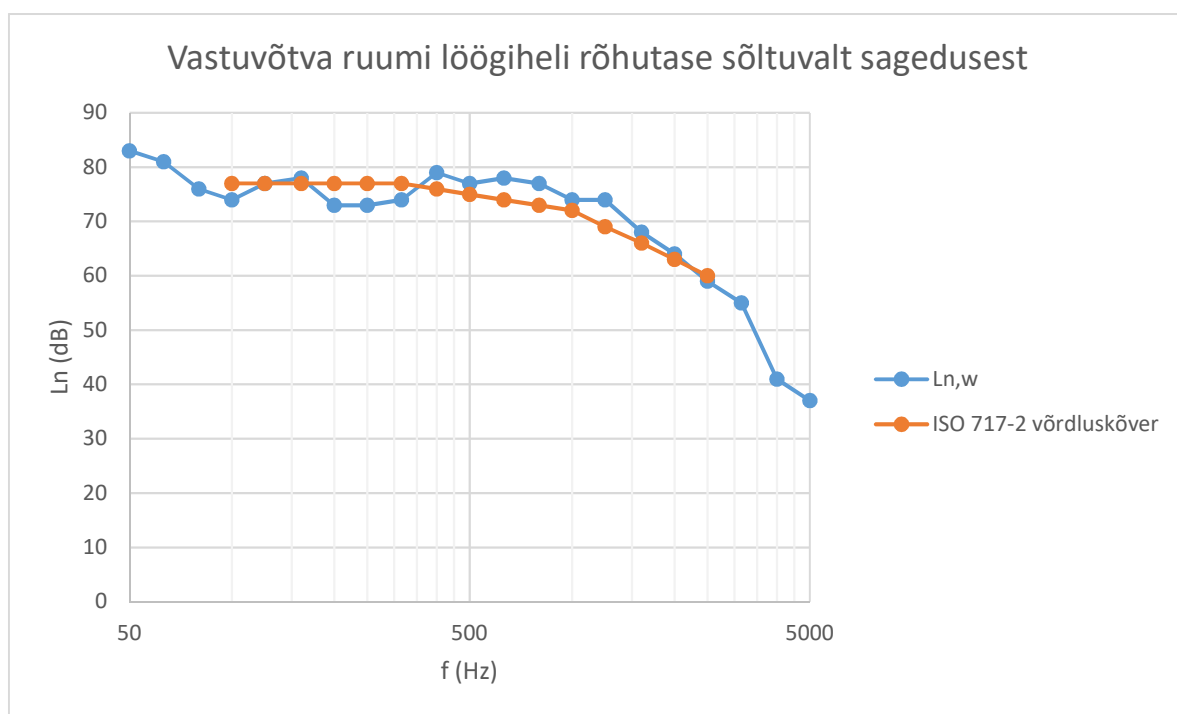
	Õhkvahe	C ₅₀₋₃₁₅₀	R _w + C ₅₀₋₃₁₅₀
1 kipsplaat, 8,7 kg/m ²	30 mm	-5 dB	43 dB
	60 mm	-5 dB	44 dB
1 kipsplaat, 11,7 kg/m ²	30 mm	-5 dB	47 dB
	60 mm	-6 dB	47 dB
2 kipsplaati, 17,4 kg/m ²	30 mm	-9 dB	51 dB
	60 mm	-9 dB	52 dB
2 kipsplaati, 23,4 kg/m ²	30 mm	-9 dB	55 dB
	60 mm	-9 dB	56 dB

5.2 Vahelaed puitelementhoonetes

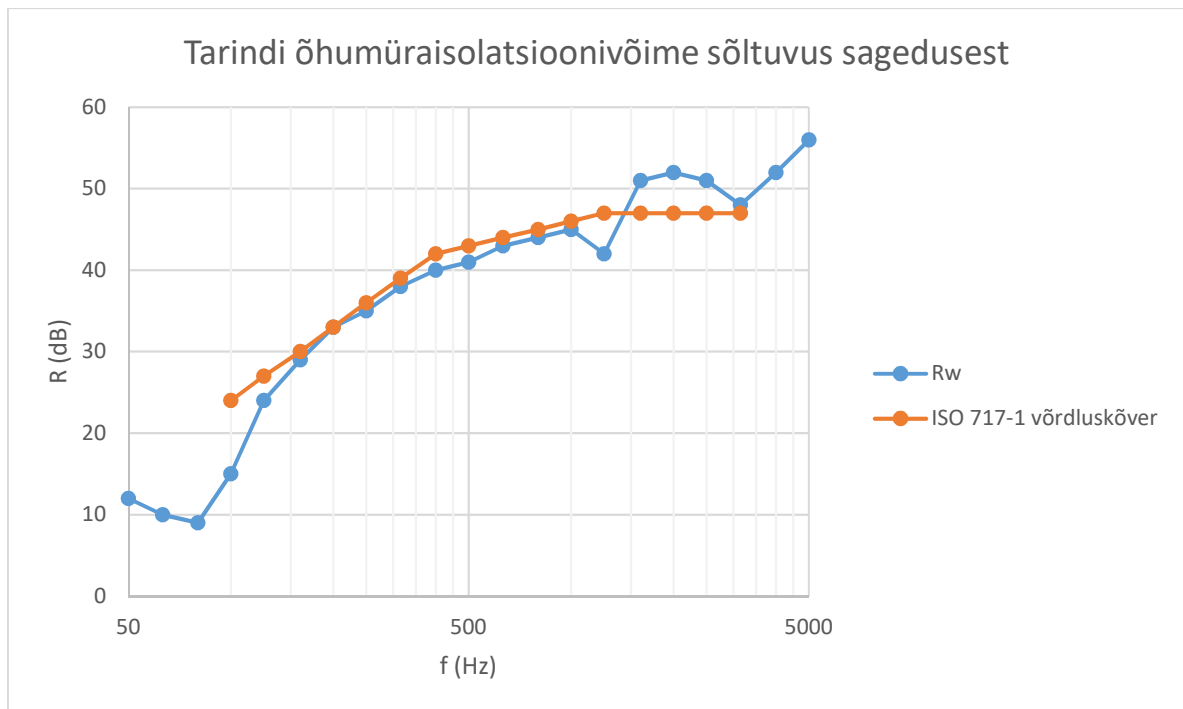
5.2.1 Lihtne puitkarkassvahelagi

Kõige lihtsam kasutusel olev tüüpiline puitkarkassvahelagi koosneb kandvast talastikust mõõtudega $45 \times 195 \text{ mm}$, mille peale on kruvide ja liimi abil kinnitatud 21 mm puitlaastplaat. Talade vahe on täidetud täies ulatuses soojustusmaterjaliga. Talastiku alla on kinnitatud $25 \times 70 \text{ mm}$ roovitus ning 13 mm kipsplaat. Sellist tarindit kasutab näiteks Greentec Houses OÜ, kelle kodulehelt konstruktsioonitüüp ka võetud on. [47] Tarindi joonis on esitatud töö graafilises lisas.

Arvutused on teostatud tarkvaraga Insul 9.0. Arvutuste puhul tehti tarkvara omapäradest tulenevalt tarindis lihtsustus ning roovitust ei käsitleta mitte eraldi kihina, vaid suurendatakse kandva tala ristlõiget roovi kõrguse võrra. Konstruktsiooni ühenumbriks löögiheli rõhutasemeks osutus $L_{n,w} = 75 \text{ dB}$ ning õhumüraisolatsiooniindeksiks $R_w = 43 \text{ dB}$.

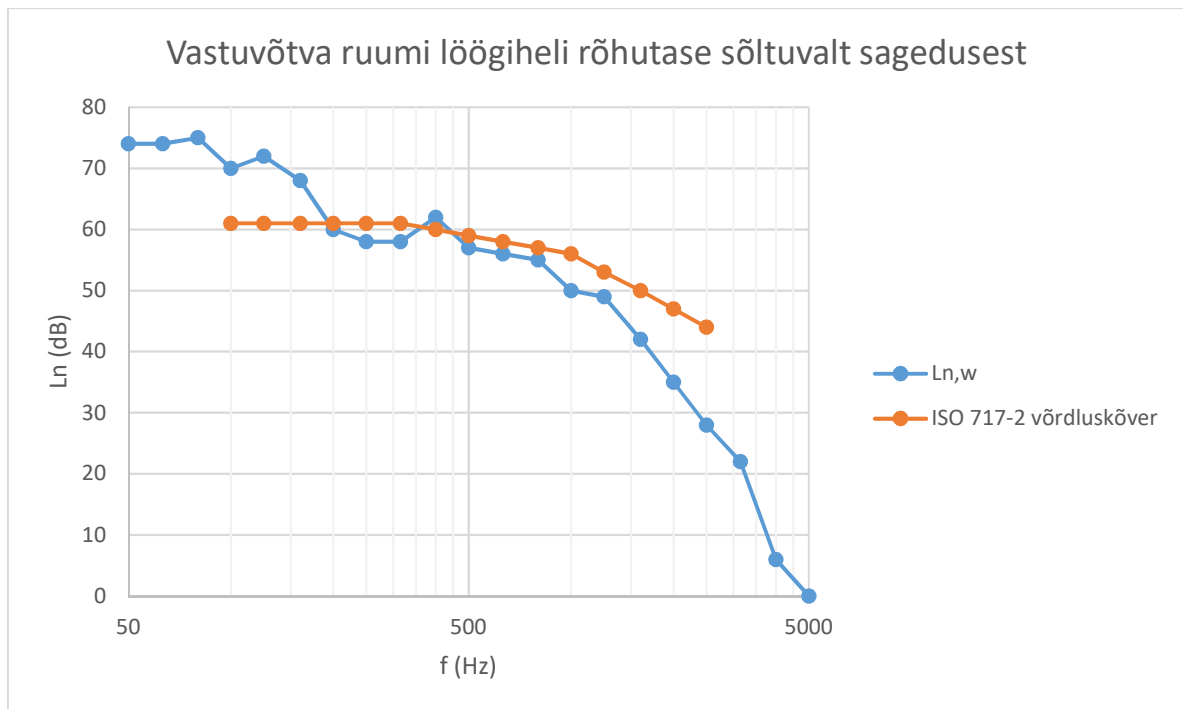


Joonis 5.10. Vastuvõtva ruumi löögiheli rõhutaseme sõltuvus sagedusest lihtsa puitkarkassvahelae korral



Joonis 5.11. Vahelae õhumüraisolatsioonivõime sõltuvus sagedusest

Arvutustulemused näitavad, et kui olemasolevale konstruktsioonile lisada 20 mm madala tihedusega puitkiudplaat (*LDF – low density fibreboard*), mis on paigaldatud elastsest materjalist distantspuksidel olevatele roovidele, väheneb löögheli rõhutase vastuvõtvas ruumis $L_{n,w} = 75 - 59 = 16 \text{ dB}$. Õhumüraisolatsioonivõimet selline lahendus oluliselt ei mõjuta.



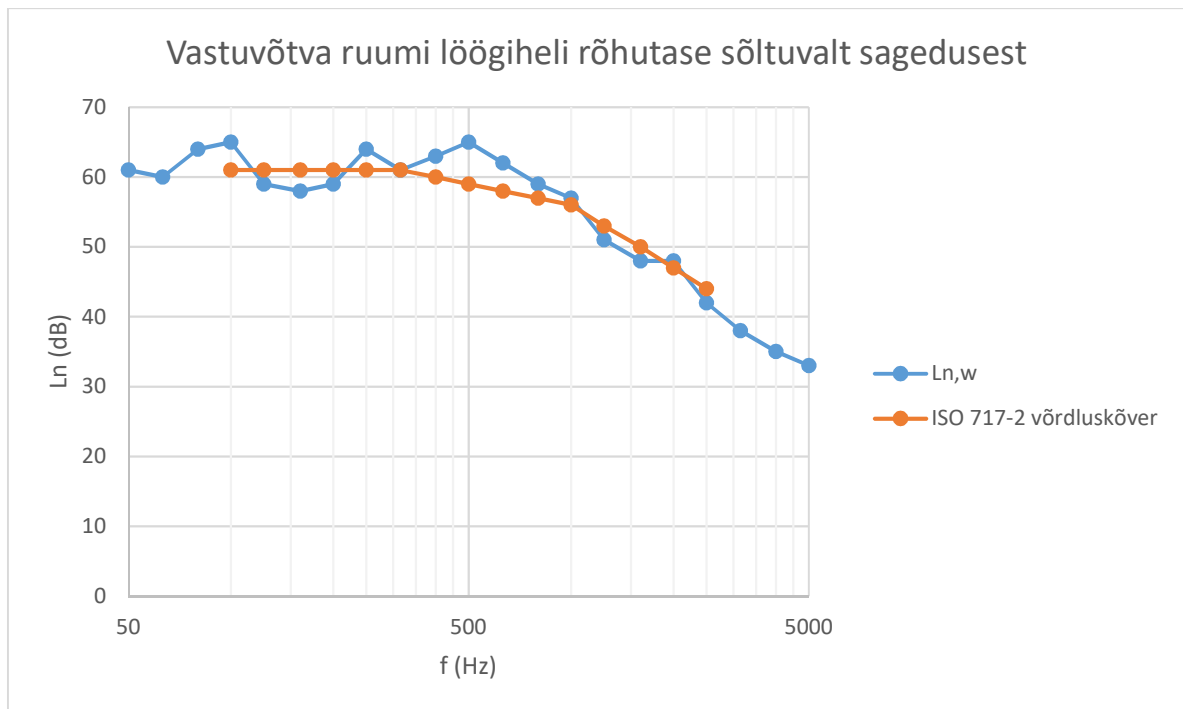
Joonis 5.12. Vastuvõtva ruumi löögiheli rõhutaseme sõltuvus sagedusest lisakihi vahelae korral

5.2.2 Lisakihtidega puitkarkassvahelagi

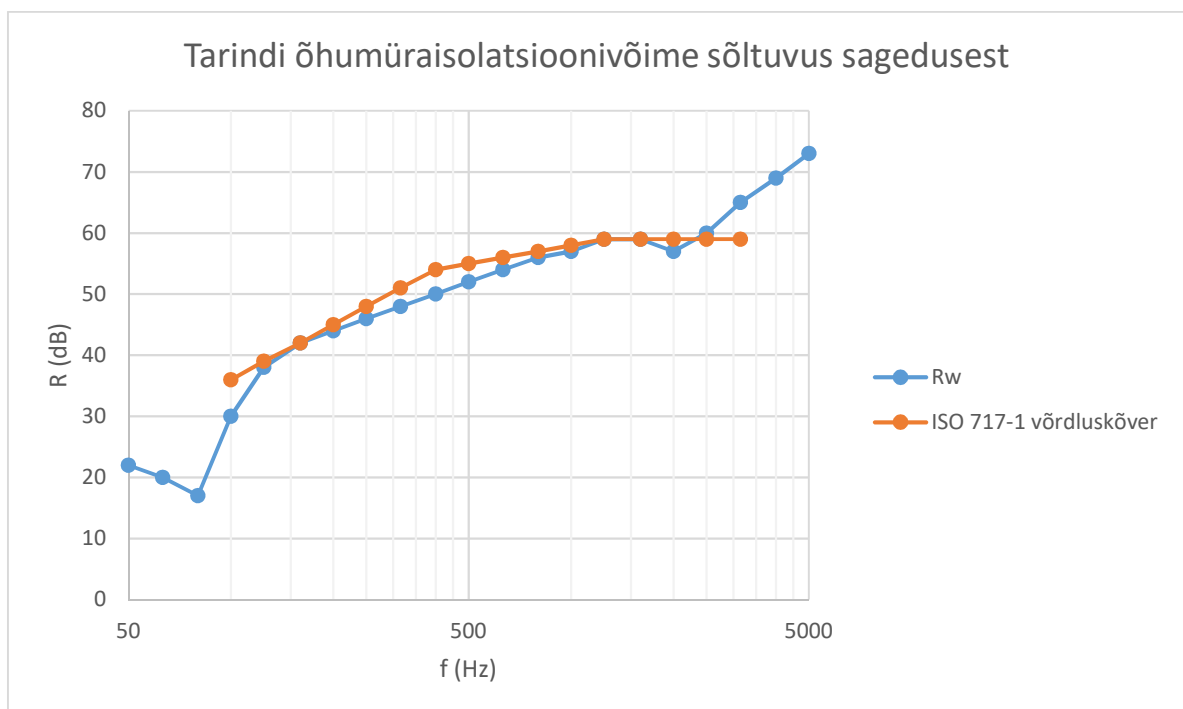
Eestis toodetakse ka oluliselt keerulisemate tarindikihtidega vahelaelemente kui eelmises näites vaadeldud. Järgnevalt vaadeldakse vahelage, mille kandev konstruktsioon on alt tsementplaadiga ning ülevalt puitlaastlaadiga kaetud talastik mõõtudega $45 \times 245 \text{ mm}$. Lisaks on tarindis 9 mm kipsplaat, 25 mm põrandasoojustusmatt (tootja poolt täpsustamata), 16 mm puitlaastplaat ning põrandakate koos alusega, kokku 10 mm . Sellisele tarindile on tootja andnud ühearvulised parameetrid $R_w = 55 \text{ dB}$ ning $L'_{n,w} = 53 \text{ dB}$. Tarindi joonis on esitatud töö graafilises lisas.

Esmalt vaadeldakse tarindit ilma põrandakatteta, seejärel lisatakse põrandakattekiht. Arvutuste jaoks on tarkvara andmebaasist tulenevalt tehtud mõned lihtsustused. Põrandasoojustusmatt on asendatud 25 mm kummimatiga. Kuna puitlaastplaatide täpsemat spetsifikatsiooni esitatud pole, kasutatakse arvutustes suunatud laastudega plaate (*OSB – oriented strand board*).

Arvutustulemused näitasid, et kirjeldatud tarindi ühearvulised näitajad on $L_{n,w} = 59 \text{ dB}$ ning $R_w = 55 \text{ dB}$. Kui vahelaetarindile lisati põrandakate koos alusega, vähenes löögimüra rõhutase vastuvõtvas ruumis $L_{n,w} = 59 - 55 = 4 \text{ dB}$. Põrandakattekihiks arvestati 7 mm laminaatparkett koos 2 mm vahtalusega. Õhumüraisolatsiooni kasutatav lahendus oluliselt ei muuda.



Joonis 5.13. Vastuvõtva ruumi löögiheli rõhutase sõltuvus sagedusest lisakihtidega vahelae korral



Joonis 5.14. Lisakihtidega vahelae õhumürasolatsiooni võime sõltuvus sagedusest

5.2.3 Järeldused elementvahelagede kohta

Tabel 5.10. Arvutustulemuste kokkuvõte

Vahelaekonstruktsioon	R_w	$R_w+C_{50-3150}$	$L_{n,w}$	$L_{n,w}+C_{l,50-2500}$
Konstruktsioon 1	43 dB	38 dB	75 dB	74 dB
Konstruktsioon 1 põrandakattega	43 dB	38 dB	59 dB	66 dB
Konstruktsioon 2	55 dB	49 dB	59 dB	58 dB
Konstruktsioon 2 põrandakattega	55 dB	49 dB	55 dB	55 dB

Esimese konstruktsiooni puhul on nii õhumüraisolatsiooni indeksi kui ka löögimüra rõhutaseme näitajad oluliselt kehvemad kui teise konstruktsiooni puhul. Kuna esimene konstruktsioon ei ole helisolatsiooni mõttes korrektselt projekteeritud, oli see ka oodatav. Samas on võimalik tarindist läbi liikuva löögimüra rõhutaset oluliselt vähendada lisades sellele eraldi kummipuksidel paikneva tõstetud põranda. Õhumüraisolatsioonivõimet oleks võimalik parandada, kui kasutada ühe kipsplaadi asemel mitut.

Teise konstruktsiooni puhul on arvutuslik õhumüraisolatsioonivõime sama kui tootja poolt mõõdetud. Järelikult võib eeldada, et tehtud arvutuseeldused ei ole tarindi toimivust oluliselt muutnud. Löögimüra rõhutaset ei ole võimalik otseselt võrrelda, kuna tootja on andnud $L'_{n,w}$, töös arvutati aga $L_{n,w}$, mis ei arvesta külgnevaid tarindeid pidi liikuva heliga. Kui tootjal oleks huvi parandada vahelae õhumüraisolatsioonivõimet, siis oleks võimalik parem tulemus saavutada kas talastiku alumisse pinda lisaplaadikihi paigaldamisega või ülemises pinnas erikõva kipsplaadi kasutamisega.

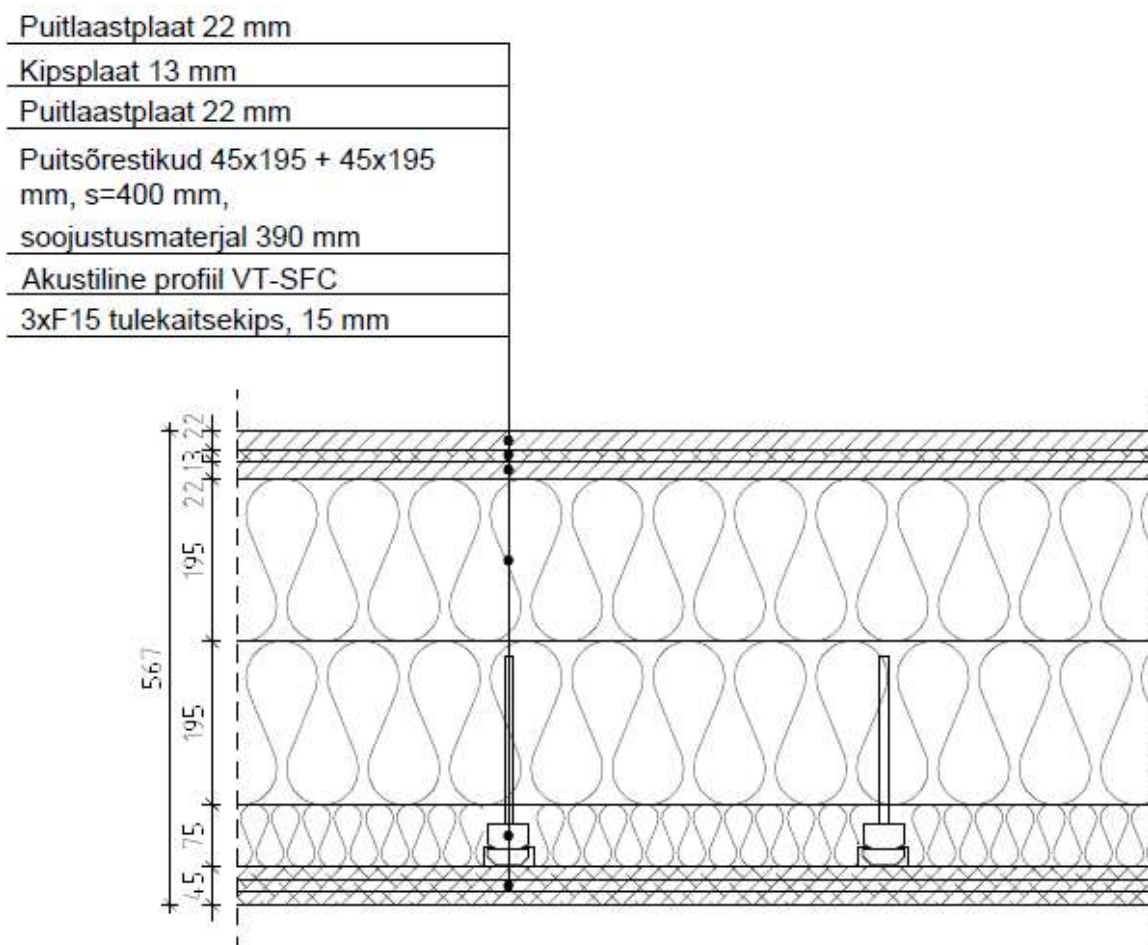
Vahelagede projekteerimise puhul on levinud väärarusaam, et nii löögi- kui ka õhumüraisolatsioonivõime parandamiseks piisab helineeldematerjali kihi paigaldamisest või suurendamisest, kuigi tegelikkuses see nii ei ole. Seda illustreerivad selgelt ka saadud arvutustulemused. Vahelae õhumüraisolatsioon sõltub nagu puitkarkassvaheseinte omagi katteplaatide pinnamassist ning kinnituste tüübist. Sellest hoolimata on vahelagede puhul helineeldematerjali kasutamine otstarbekas, kuna takistab kandetarindisse jääva õhkvahe resoneerimist. Suurimat mõju löögimüraisolatsiooni parandamisel avaldab siiski näiteks ujupõranda või elastselt riputatud ripplae kasutamine.

5.2.4 Tüüpvead ja leevendusmeetmed

Karkassvaheseinte puhul on õhumüraisolatsioonivõime seisukohalt kõige kriitilisem vajaliku pinnamassi olemasolek. Tüüpveaks võib lugeda väärarusaama, et nõutav

õhumüraisolatsioonivõime saavutatakse helineeldematerjali paigaldamisega seinakarkassipostide vahele. Helineeldematerjali osakaal kogu seinakonstruktsiooni õhumüraisolatsioonivõimes on pigem marginaalne. Tüüpilist seinakonstruktsiooni on seetõttu võimalik parandada lisades kas ühele või mõlemale poolele kipspladikiht, vajadusel kasutada erikõva kipsplaati. Kogemuslikult on nii võimalik saada võrreldes esialgse konstruktsiooniga 5 – 10 dB parem tulemus. Õhkvahega seinapuhul kehtib sama reegel, kuid lisaks on võimalik õhumüraisolatsiooni parandada ka õhkvahet suurendades. Lisaks mainitule mõjutab õhumüraisolatsiooni ka üldine ehitustööde kvaliteet, näiteks ebapiisav pahteldamine või vuukide täitmine. [48]

Suurim tüüpviga vahelagede projekteerimise puhul on elastse vahekihi mittekasutamine. Jäik süsteem on oluliselt kehvema löögimüraisolatsioonivõimega kui elastseid vahekihte omav tarind. Kergvahelagede löögimüraisolatsioonivõime parandamiseks saab sellest tulenevalt kasutada mitmeid erinevaid lahendusi, millest levinuimad on elastsete riputitega kinnitatud kipsplaatidest ripplae konstrueerimine, elastsel alusel paikneva puitlaast- või pörandakipsplaatidest ujuvpörandaehitamine või elastse aluskihi kasutamine pörandakatte all. [48] See tähendab, et vahelagede parandamine on võimalik nii ülemisest kui ka alumisest suunast.



Joonis 5.15. Elastsete riputitega paranduslahendus

Sellist lahendust on ka realselt projektis kasutatud ning mõõdetud, seetõttu on toimivus hästi teada. Algselt projektis ette nähtud vahelaekonstruktsioonile on lisatud ülespinda puitlaastplaat 22 mm ning pörandakipsplaat 13 mm. Alumisse kihti oli esialgselt ette nähtud 2 tulekaitsekipsplaati, mis lõpuks asendati 3 elastset riputatud plaadiga. Kuna tegemist oli Rootsi projektiga, siis mõõdeti $D'_{nT,w,50}$ ning $L'_{nT,w,50}$.

Tabel 5.11. Esialgse tarindi ja paranduslahenduse mõõtmistulemuste võrdlus

	$D'_{nT,w,50}$	$L'_{nT,w,50}$
Esialgne tarind	48 dB	64 dB
Paranduslahendus	62 dB	53 dB

Nagu tabelist näha, siis paranduslahendust kasutades paranes $D'_{nT,w,50} = 62 - 48 = 14$ dB ning $L'_{nT,w,50} = |53 - 64| = 11$ dB. Paranduslahendust kasutades muutus konstruktsioon Rootsis kehtivatele heliisolatsiooni miinimumnõuetele vastavaks.

5.3 Ruummoodulid

5.3.1 Seinakonstruktsioonid ruummoodulhoonetes

Ruummoodulites kasutatavad seinakonstruktsioonid on tüüpiliselt analoogsed tavalistes puitelementhoonetes kasutatavate konstruktsioonidega, seega kehtivad kõik järeldused, mis on tehtud puitelementhoonete seinakonstruktsioonide peatükis. Käesolevas töös eraldi ruummoodulite seinakonstruktsioone ei käsitleta.

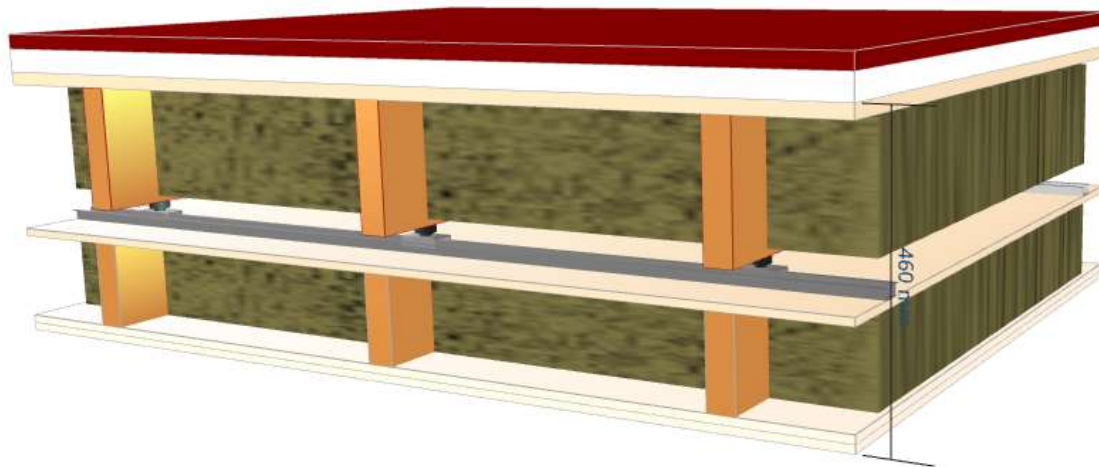
5.3.2 Vahelaed ruummoodulhoonetes

Vahelaekonstruktsioonid ruummoodulhoonetes on märgatavalt keerulisemad kui puitelementhoonetes, eriti kahe mooduli vahelises ühenduses. Tüüpiline kahe mooduli vaheline tarind moodustub kahest eraldiseisvast puitkarkassvahelaest, mis on õhuvahega eraldatud. Konkreetse töös käsitletava vahelaie kihid alates puhtast põrandapinnast loetledes on põrandakate, kipsplaat 13 mm, akustiline aluskiht 36 mm (tootja poolt täpsustamata), puitkiudplaat 22 mm, soojustusmaterjaliga täidetud talastik 45x195 mm, $s = 600$ mm, õhkvahe 60 mm, puitlaastplaat 12 mm, soojustusmaterjaliga täidetud talastik 45x145 mm, roovitus 28x70 mm, $s = 400$ mm ning 2 kihti kipsplaate, kokku 26 mm. Tarindi joonis on esitatud töö graafilises osas.

Arvutustarkvara Insul 9.0 sellist tarindit analüüsida ei suuda, samuti ei ole olemas ühtset üldistatud arvutusmeetodit, mille järgi oleks võimalik sellist vahelaekonstruktsiooni arvutada. Seetõttu on käesolevas töös tehtud mitmeid lihtsustusi, et tarind tarkvarale hoomatavaks teha, arvutustulemused saada ja neid omavahel võrrelda.

Lihtsustus 1:

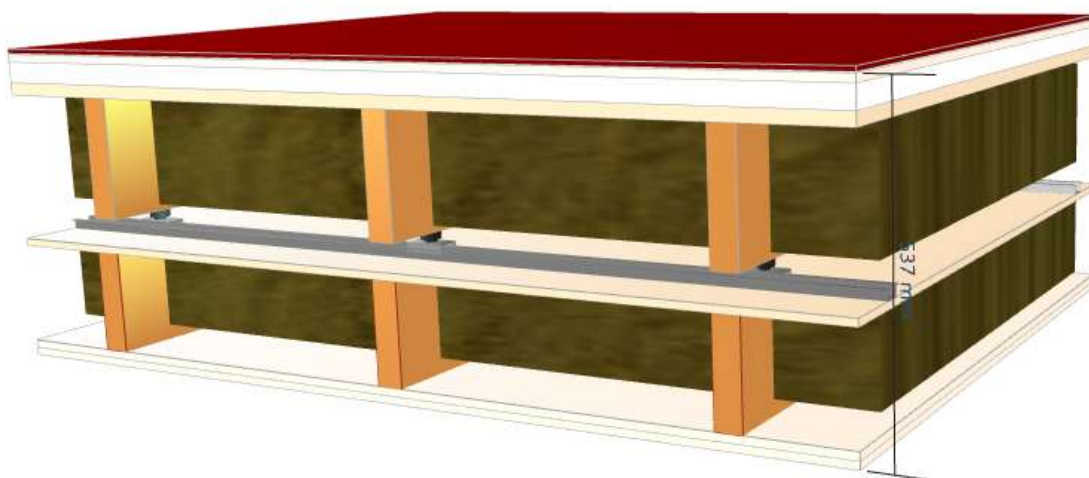
- 2 kihti Fermacell kipskiudplaate, kokku 26 mm
- Rockwool CONLIT kivivillast tuletõkkeplaat 40 mm
- Puitkiudplaat 22 mm
- Talastik $s = 600$ mm kummist distantspuksidel, kokku 255 mm / mineraalvill 195 mm
- Puitkiudplaat 12 mm
- Talastik 145 mm / mineraalvill 145 mm
- 2 kihti kipsplaate, kokku 26 mm



Joonis 5.16. Kuvatõmmis arvutusprogrammist Insul. Lihtsustus 1

Lihtsustus 2:

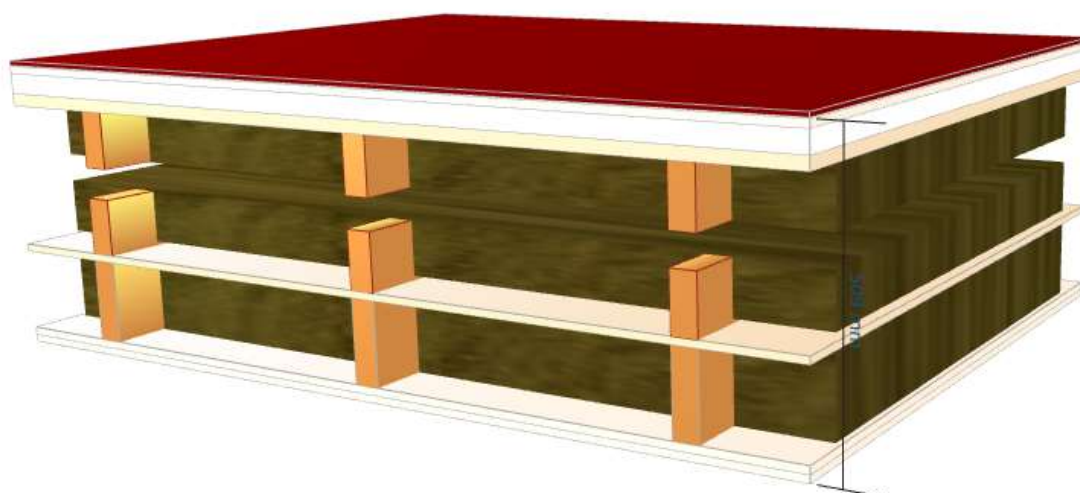
- 7 mm laminaatparkett 2 mm alusel
- Kipsplaat 13 mm
- Kummimaterjal 36 mm
- Puitkiudplaat 22 mm
- Talastik $s = 600 \text{ mm}$ kummist distantspuksidel, kokku 255 mm / mineraalvill 195 mm
- Puitkiudplaat 12 mm
- Talastik 145 mm / mineraalvill 145 mm
- 2 kihti kipsplaate, kokku 26 mm



Joonis 5.17. Kuvatõmmis arvutusprogrammist Insul. Lihtsustus 2

Lihtsustus 3:

- 7 mm laminaatparkett 2 mm alusel
- Kipsplaat 13 mm
- Kummimaterjal 36 mm
- Puitkiudplaat 22 mm
- Katkestusega talastik õhkvahe imiteerimiseks, talad 45x100 mm, $s = 600$ mm, talade katkestus 55 mm / mineraalvill 255 mm
- Puitkiudplaat 12 mm
- Talastik 145 mm / mineraalvill 145 mm
- 2 kihti kipsplaate, kokku 26 mm



Joonis 5.18. Kuvatõmmis arvutusprogrammist Insul. Lihtsustus 3

Tabel 5.12. Konstruksioonitüüpide lihtsustuste arvutustulemuste kokkuvõte

	R_w	$R_w + C_{50-3150}$	$L_{n,w}$	$L_{n,w} + C_{l,50-2500}$
Lihtsustus 1	53 dB	51 dB	46 dB	57 dB
Lihtsustus 2	61 dB	61 dB	58 dB	54 dB
Lihtsustus 3	85 dB	72 dB	31 dB	48 dB

Arvutustulemused näitavad, et erinevad lihtsustused annavad väga erinevaid tulemusi ja reaalses projekteerimises nii keeruliste tarindite puhul usaldusväärset teoreetilist tulemust saada ei ole võimalik. Õhumüraisolatsiooni puhul on erinevus $\Delta R_w = 85 - 53 = 32$ dB ning vastuvõtva ruumi löögimüra helirõhutaseme puhul $\Delta L_{n,w} = 58 - 31 = 27$ dB.

Kuna tootja konstruktsioonitüüpide joonisel on näidatud, et ülemise mooduli puhul kasutatakse erinevate ristlõigetega talastikke, millest suurim on $45 \times 245 \text{ mm}$, siis kontrolliti eelnevalt esitatud tarindeid ka kõrgemate talade puhul. Koos kandva tala kõrguse muutusega muudeti ka mineraalvilla kõrgus vastavaks. Arvutustulemuste märgatavat muutust seoses talade kõrguse muutumisega ei toimunud.

Tabel 5.13. Kõrgema talastikuga konstruktsioonitüüpide lihtsustuste arvutustulemuste kokkuvõte

	R_w	$R_w + C_{50-3150}$	$L_{n,w}$	$L_{n,w} + C_{l,50-2500}$
Lihtsustus 1	53 dB	52 dB	46 dB	56 dB
Lihtsustus 2	61 dB	61 dB	58 dB	54 dB
Lihtsustus 3	87 dB	74 dB	30 dB	47 dB

5.3.3 Järeldused vahelagede kohta ruummoodulhoonetes

Arvutustulemused näitavad ilmekalt, et niivõrd keeruliste konstruktsioonitüüpide puhul kui on kahe mooduli vahelised vahelaed jääb arvutustarkvara selgelt hätta. Suurimaks probleemiks osutub õhkvahe modelleerimine ja tema mõjuga arvestamine. Ükski arvutustulemus ei ole tõsiseltvõetav ega anna võimalust sisuliste järelduste tegemiseks. Kuna tootja pole esitanud katsetulemusi, ei ole ka lähteandmeid teoreetiliste arvutuste katsetulemuste võrdlemiseks ja selle põhjal konstruktsiooni edasise analüüsi tegemiseks. Hinnanguliselt andis kõige lähedasema tulemuse reaalsega võrreldes lihtsustus nr 1.

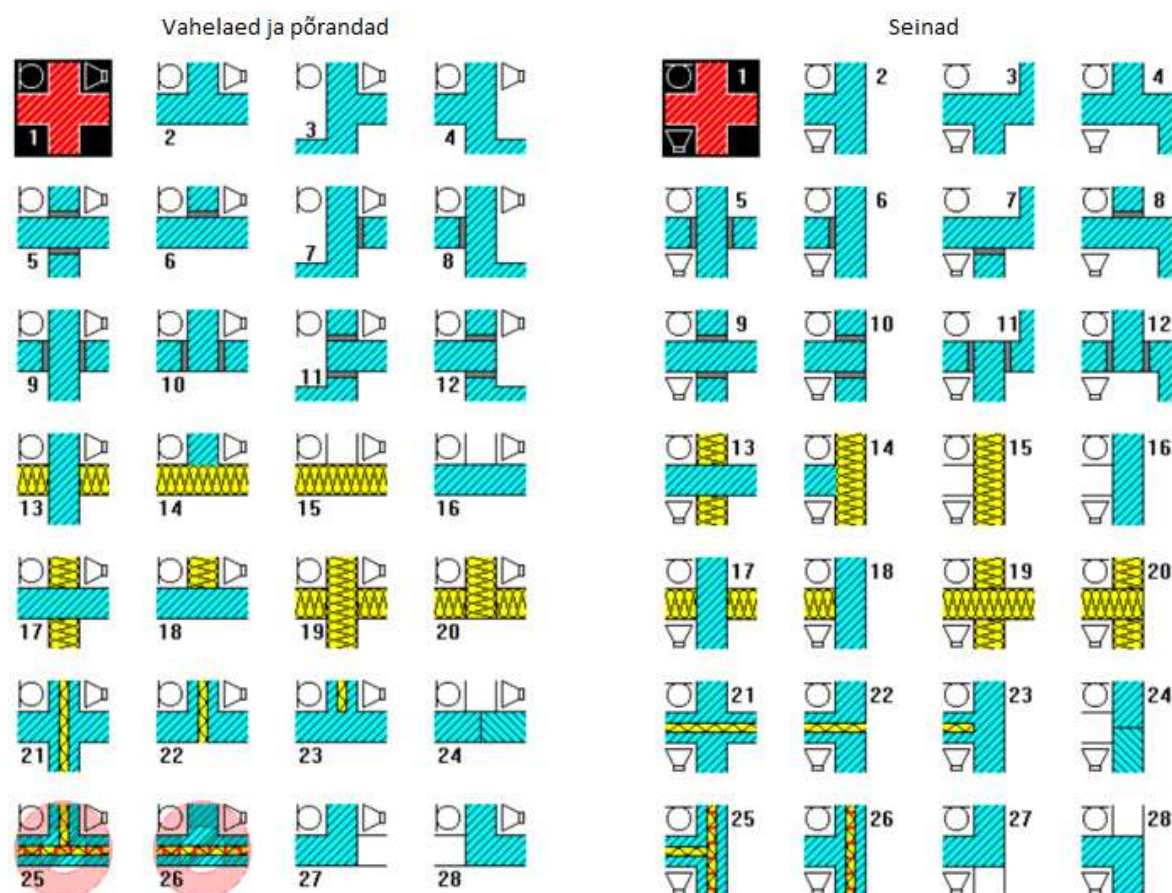
Kuna löögimüraisolatsioon on puitkonstruktsioonide puhul väga tähtis omadus ning puudulikud lahendused selge põhjus võimalikeks elanikepoolseteks kaebusteks, tasuks tootjatel teha oma konstruktsioonide põhjalikud mõõtmised, mille abil oleks tulevikus võimalik teha empiirilisi järeldusi erinevate kasutatavate lahenduste kohta. Käesoleva töö raames näidati, et praegusel hetkel kättesaadava kommertstarkvaraga tehtavad arvutused ei ole usaldusväärsed ja arvutusmeetodid vajavad täiustamist. Arvutusmeetodite täiustamine saab aga toimuda võrdlusandmete olemasolu korral.

6 KOLMEMÕÕTMELINE KONSTRUKTSIOON

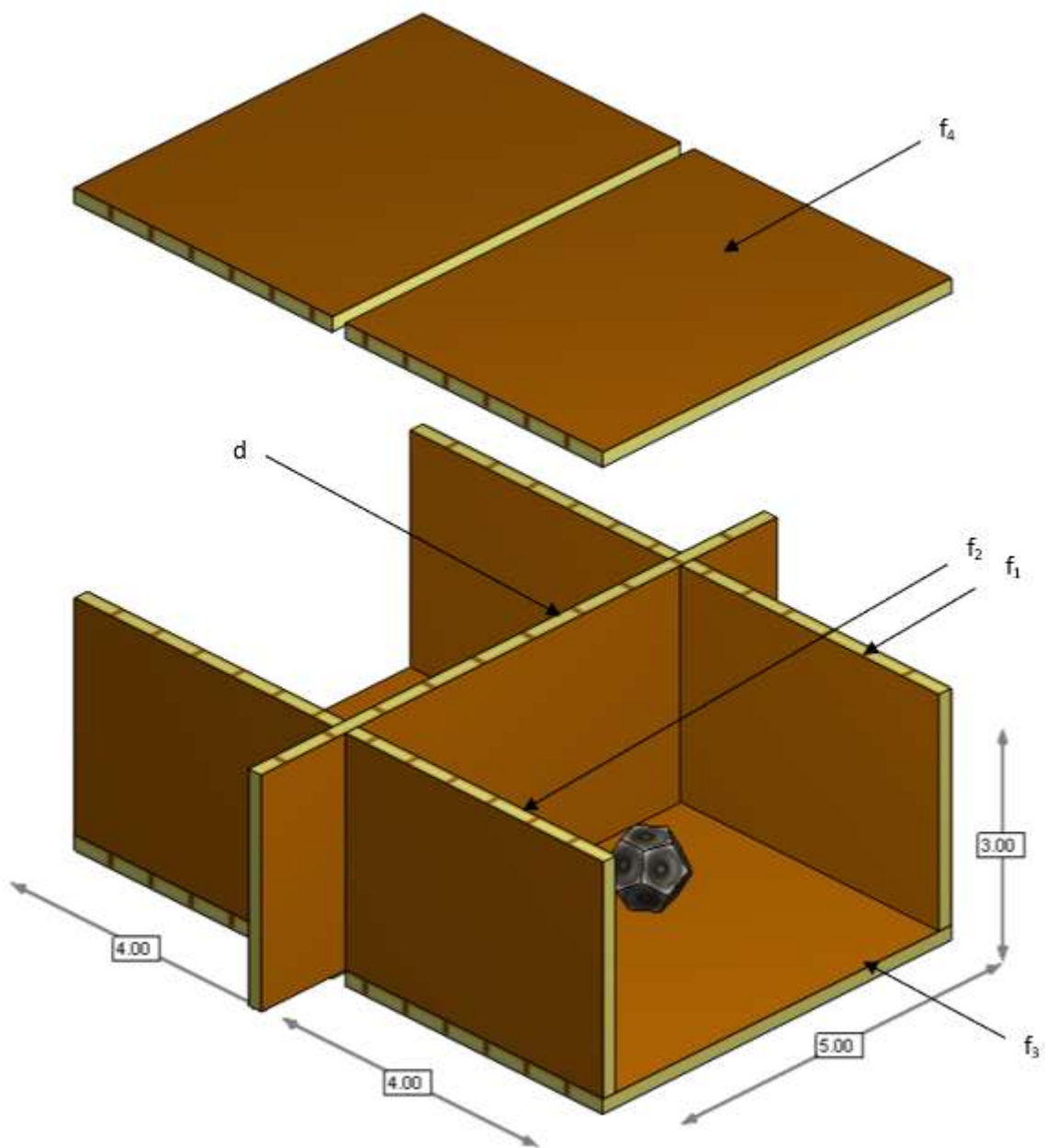
6.1 Ülevaade

Kolmemõõtmeline arvutusmudel võtab lisaks elementide kui konstruktsioonide üksikosade toimivusele arvesse ka konstruktsiooni kui terviku toimivuse ehk siirdehelide leviku hoones. Töös kasutatakse ruumilise konstruktsiooni modelleerimiseks arvutustarkvara BASTIAN, millest anti ülevaade töö alguses. Töös moodustatakse arvutusskeemid kombineerides eelnevalt arvutatud tarindeid või nende modifikatsioone. Arvutuste puhul kasutatakse tarindite toimivuse võrdlemise jaoks ühesugust arvutusskeemi – heliallikaga ruum ning vastuvõttev ruum on sama suured, kusjuures põrandapinnaks on valitud 4×5 m ja ruumi kõrguseks 3 m.

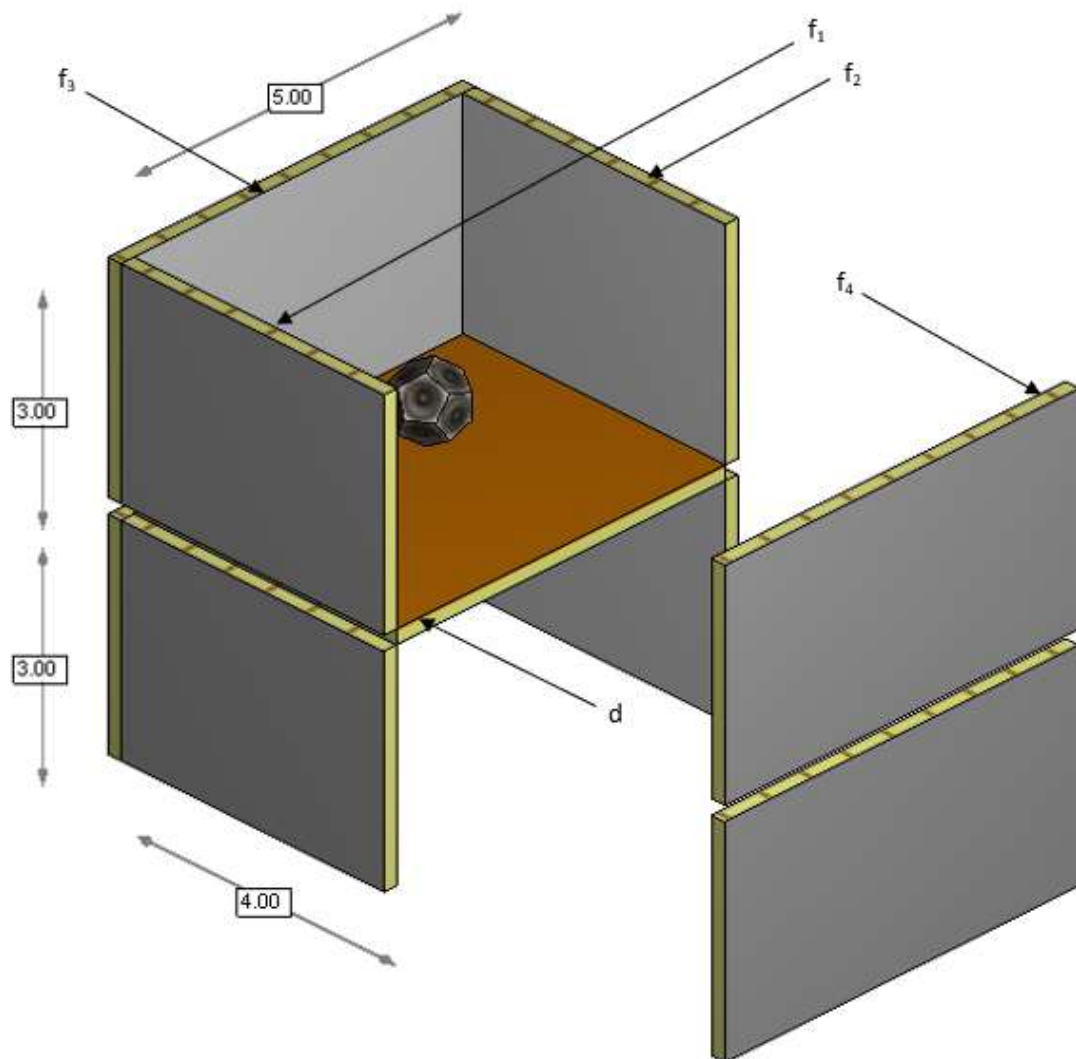
Arvutuste käigus imiteeritakse helide levikut ühest korterist teise. See tähendab, et tarkvaras on valitud sõlmede tüübid vastavalt korteritevaheliste seinade omavahelisele asetsusele. Lagede ja põrandate puhul kasutatakse sõlme tähisega 20 ning seinte liitumisel sõlme tähisega 19.



Joonis 6.1. Võimalikud sõlmetüübid ja nende tähised



Joonis 6.2. Kolmemõõtmeline õhumüra arvutuskeem ja elementide tähised



Joonis 6.3. Kolmemõõtmeline löögimüra arvutuskeem ja tähised

6.2 Õhumüraisolatsioon

Konstruktsiooni õhumüraisolatsioonivõime hindamiseks tehti läbi kolm erinevate tarinditega arvutuskäiku. Tulemused esitatakse kolmes eri käsitluses - R_w , $R_w + C_{50-3150}$ ja $D_{nT,w,50}$.

Esimene konstruktsioon koosneb kõige lihtsamatest turul saadaolevatest elementidest.

d – jäiga karkassiga kergsein, postid $45 \times 145 \text{ mm}$, $s = 600 \text{ mm}$, postide vahe täidetud helineeldematerjaliga ning tarind mõlemalt poolt kaetud ühe kihi standardkipsplaadiga

f_1 – jäiga karkassiga kergsein, postid $45 \times 145 \text{ mm}$, $s = 600 \text{ mm}$, postide vahe täidetud helineeldematerjaliga ning tarind mõlemalt poolt kaetud ühe kihi standardkipsplaadiga

f_2 – jäiga karkassiga kergsein, postid $45 \times 145 \text{ mm}$, $s = 600 \text{ mm}$, postide vahe täidetud helineeldematerjaliga ning tarind mõlemalt poolt kaetud ühe kihi standardkipsplaadiga

f_3 – OSB 21 mm + 195 mm talastik $s = 600 \text{ mm}$ + 25 mm roovitis $s = 600 \text{ mm}$ + 1 standardkipsplaat 13 mm

f_4 – OSB 21 mm + 195 mm talastik $s = 600 \text{ mm}$ + 25 mm roovitis $s = 600 \text{ mm}$ + 1 standardkipsplaat 13 mm

Tabel 6.1. Esimese konstruktsiooni õhumüraisolatsiooni parameetrid

t	Sõlm	R_w (dB)	%	$R_w + C_{50-3150}$ (dB)	%	$D_{nT,w,50}$ (dB)	%
d		41,3	91	35,3	93	36,4	93
f_1	19	56,1	3	51,1	2	52,2	2
f_2	19	56,1	3	51,1	2	52,2	2
f_3	20	58,5	2	53,5	1	54,6	1
f_4	20	60,8	1	55,8	1	56,8	1
Kokku		40,9	100	34,9	100	36	100

Arvutustulemustest on näha, et sellise konstruktsiooni puhul on suurima osakaaluga helileviku tee otse läbi piirdetarindi ning siirdehelide osakaal on väga väike. Tulemus on ka loogiline, kuna kahte korterit eraldava seina õhuheliisolatsioonivõime on väike ehk helienergial on lihtne otse läbi seina liikuda. Ühegi vaatluse all oleva riigi nõuetele selline tarind ei vasta.

Teine konstruktsioon on kombineeritud mõnevõrra keerulisematest elementidest. Korteritevaheline sein on õhkvahega, ülejäänud seintele on lisatud mõlemale poole üks kipsplaat ning vahelagedena käsitletakse varem arvatud lisakihtidega lage.

d – 30 mm õhkvahega kergsein, 2 rida poste $45 \times 70 \text{ mm}$, $s = 600 \text{ mm}$, postide vahe täidetud helineeldematerjaliga ning tarind mõlemalt poolt kaetud 2 kihi standardkipsplaatidega

f_1 – jäiga karkassiga kergsein, postid $45 \times 145 \text{ mm}$, $s = 600 \text{ mm}$, postide vahe täidetud helineeldematerjaliga ning ning tarind mõlemalt poolt kaetud 2 kihi standardkipsplaatidega

f_2 – jäiga karkassiga kergsein, postid $45 \times 145 \text{ mm}$, $s = 600 \text{ mm}$, postide vahe täidetud helineeldematerjaliga ning ning tarind mõlemalt poolt kaetud 2 kihi standardkipsplaatidega

f_3 – OSB 16 mm + kummimatt 25 mm + kipsplaat 9 mm + OSB 22 mm + puitsõrestik $45 \times 245 \text{ mm}$, $s = 600 \text{ mm}$ + tsementplaat Aquafire 13 mm

f_4 – OSB 16 mm + kummimatt 25 mm + kipsplaat 9 mm + OSB 22 mm + puitsõrestik 45x245 mm, $s = 600$ mm + tsementplaat Aquafire 13 mm

Tabel 6.2. Teise konstruktsiooni õhumüraisolatsiooni parameetrid

t	Sõlm	R_w (dB)	%	$R_w + C_{50-3150}$ (dB)	%	$D_{nT,w,50}$ (dB)	%
d		62,2	47	50,2	73	51,2	74
f_1	19	65,8	21	58,8	10	59,9	10
f_2	19	65,8	21	58,8	10	59,9	10
f_3	20	69,4	9	61,4	6	62,5	5
f_4	20	75,1	2	68,1	1	69,2	1
Kokku		58,9	100	48,9	100	49,9	100

Sellise konstruktsiooni puhul on näha, et õhkvahega seina lisamine korterite vahele muudab arvutuslikku olukorda märgatavalt. Suurenenud on siirdehelide osakaalud konstruktsiooni kui terviku töötamises, seda eriti märgatavalt läbi külgmiste seinte. Sellise konstruktsiooni puhul joonistub ka ilmekalt välja erinevate riikide heliisolatsiooninõuete vahe – Eestis kehtivad miinimumnõuded on tagatud, ühegi teise vaadeldava riigi uutele hoonetele esitatavatele minimaalsetele heliisolatsiooninõuetele antud konstruktsioon ei vasta. Nii Soomes, Rootsis kui ka Norras liigitataks selline konstruktsioon heliklassi D.

Viimaseks vaadeldakse heliisolatsioonivõime seisukohast kõige paremini töötavat konstruktsiooni. Vahelaed ning külgmised seinad on samad kui eelmises arvutusmudelis, muutunud on kahte korterit eraldav sein.

d – 30 mm õhkvahega kergsein, 2 rida poste 45x70 mm, $s = 600$ mm, postide vahe täidetud helineeldematerjaliga ning tarind mõlemalt poolt kaetud 2 kihi erikõva kipsplaatidega Gyproc Soundcheck

f_1 – jäiga karkassiga kergsein, postid 45x145 mm, $s = 600$ mm, postide vahe täidetud helineeldematerjaliga ning ning tarind mõlemalt poolt kaetud 2 kihi standardkipsplaatidega

f_2 – jäiga karkassiga kergsein, postid 45x145 mm, $s = 600$ mm, postide vahe täidetud helineeldematerjaliga ning ning tarind mõlemalt poolt kaetud 2 kihi standardkipsplaatidega

f_3 – OSB 16 mm + kummimatt 25 mm + kipsplaat 9 mm + OSB 22 mm + puitsõrestik 45x245 mm, $s = 600$ mm + tsementplaat Aquafire 13 mm

f_4 – OSB 16 mm + kummimatt 25 mm + kipsplaat 9 mm + OSB 22 mm + puitsõrestik 45x245 mm, $s = 600$ mm + tsementplaat Aquafire 13 mm

Tabel 6.3. Kolmanda konstruktsiooni õhumüraisolatsiooni parameetrid

t	Sõlm	R_w (dB)	%	$R_w + C_{50-3150}$ (dB)	%	$D_{nT,w,50}$ (dB)	%
d		69	26	59,0	47	60,0	47
f_1	19	68,9	27	62,9	19	63,9	19
f_2	19	68,9	27	62,9	19	63,9	19
f_3	20	70,5	18	64,5	13	65,6	13
f_4	20	79,3	2	73,3	2	74,4	2
Kokku		63,0	100	55,0	100	56,1	100

Siirdehelide leviku seisukohalt on arvutuskeem taaskord võrreldes eelnevaga muutunud. Kui teise konstruktsiooni puhul liikus otse läbi eraldava tarindi ligikaudu pool helienergiast, siis kolmanda puhul on läbi eraldava tarindi liikuv helienergia ja läbi külseinte liikuv helienergia peaaegu võrdne. Selline tarind vastab kõigis vaadeldavates riikides kehtivatele minimaalsetele uutele hoonetele esitatavatele heliisolatsiooninõuetele. Nii Rootsis kui Soomes liigitatakse arvutuslikult konstruktsioon heliklassi B, Norras heliklassi C.

6.3 Löögimüraisolatsioon

Hoone löögimüraisolatsioonivõime hindamiseks teostati kolmemõõtmeline arvutuskäik eelmises peatükis esitatud konstruktsioonile number 3 ehk olukorrale, mis õhumüraisolatsiooni mõttes toimis. Kortereid eraldav vahesein f_3 on õhkvahega, ülejäänud seinad f_1, f_2 ja f_4 jäikade karkassidega ning vahelagi d eelmises peatükis mainitud lisakihtidega.

Arvutustulemused esitatakse neljas eri käsitluses - $L_{n,w}$, $L_{n,w} + C_i$, $L_{nT,w}$ ning $L_{nT,w} + C_i$, et oleks võimalik saadud tulemusi võrrelda erinevates riikides kehtivate heliisolatsiooninõuetele.

Tabel 6.4. Konstruktsiooni löögimüra parameetrid

t	Sõlm	$L_{n,w}$ (dB)	%	$L_{n,w} + C_i$ (dB)	%
d		54,4	88	53,4	90
f_1	20	39,6	3	37,6	2
f_2	20	39,6	3	37,6	2
f_3	20	38,1	2	37,1	2
f_4	20	40,5	4	38,5	3
Kokku		55,1	100	54,1	100

Tabel 6.5. Konstruktsiooni löögimüra parameetrid

t	Sõlm	$L_{nT,w}$ (dB)	%	$L_{nT,w} + C_i$ (dB)	%
d		51,6	89	50,6	91
f ₁	20	36,7	3	34,7	2
f ₂	20	36,7	3	34,7	2
f ₃	20	35,3	2	33,3	2
f ₄	20	37,7	4	35,7	3
Kokku		52,2	100	51,2	100

Sellise konstruktsiooni löögimüraisolatsioonivõime puhul on võrreldes õhumüraisolatsiooniga vastupidine olukord – Rootsi nõuetele konstruktsioon vastab, kuid ülejäänud riikide omale mitte. Arvutuslikult on näha, et valdav enamus löögihelienergiast liigub otse läbi põrandakonstruktsiooni ning siirdehelide osakaal on võrdlemisi väike. See tähendab, et kui parandada põrandatarindit, paraneb võrdlemisi kiiresti ka konstruktsiooni kui terviku löögimüraisolatsioonivõime.

Põrandatarindi löögimüraisolatsioonivõime parandamiseks asendati arvutustes olemasolev põrandakate (7 mm laminaatparkett 2 mm alusel) uue põrandakattega (20 mm puitkiudplaat, mis paikneb 12 mm puitkiust isolatsiooniplaadil). Sellise muutusega saadi vahelae $L_{n,w} + C_{I(50-2500)} = 51$ dB ehk 4 dB paranemist ning kolmemõõtmeline arvutus tehti ümber.

Tabel 6.6. Konstruktsiooni löögimüra parameetrid muudetud vahelaetarindiga

t	Sõlm	$L_{n,w}$ (dB)	%	$L_{n,w} + C_i$ (dB)	%
d		50,3	91	50,3	91
f ₁	20	34,3	2	34,3	2
f ₂	20	34,3	2	34,3	2
f ₃	20	33,3	2	33,3	2
f ₄	20	35,3	3	35,3	3
Kokku		50,7	100	50,7	100

Tabel 6.7. Konstruktsiooni löögimüra parameetrid muudetud vahelaetarindiga

t	Sõlm	$L_{nT,w}$ (dB)	%	$L_{nT,w} + C_i$ (dB)	%
d		47,4	91	47,4	91
f ₁	20	31,5	2	31,5	2
f ₂	20	31,5	2	31,5	2
f ₃	20	30,5	2	30,5	2
f ₄	20	32,5	3	32,5	3
Kokku		47,9	100	47,9	100

Selline konstruktsioon vastab teoreetiliselt kõigis riikides kehtivatele minimaalsetele heliisolatsiooninõuetele. Ilmekalt joonistub välja ka erinevate riikide löögimüraisolatsiooni nõuete vahe – Eesti nõuetele konstruktsioon vastab, Soomes liigitataks heliklassi C, Rootsis heliklassi A ning Norras heliklassi B.

6.4 Järeldused

Nii õhumüraisolatsiooni kui ka löögimüraisolatsiooni seisukohalt on näha, et arvutuslikult on võimalik olemasolevaid tarindeid mõnevõrra modifitseerides tekitada kõigi vaadeldavate riikide nõuetele vastav kergkonstruktsioon. Siiski peab meeles pidama, et kolmemõõtmelistes arvutustes kasutatud sisendväärtused on samuti arvutuslikud ning praktika näitab, et tarindite mõõtmistulemused on teoreetilistest väärtustest märgatavalt väiksemad. Vestluse käigus Akukon Oy Eesti filiaali akustikakonsultandi Dmitri Tiškoga selgus, et kogemuslikult on erinevus kesktlābi 4 dB. Samuti on sõlmed arvutusmodelites idealiseeritud ning reaalses elus selliseid ei kohta. See tähendab omakorda, et platsil teostatud tööde kvaliteet võib konstruktsiooni heliisolatsioonivõimet märgatavalt langetada. Täiesti võimalik on olukord, kus kahe akustiliselt hästi toimiva tarindi liitumise ebakorrektneteostamine muudab tarindite hea heliisolatsioonivõime tähtsusetuks ehk hea tarind + hea tarind = kehv tulemus.

Kõige lihtsamad konstruktsioonid, mis hoone kandevõime mõttes võivad olla piisavad, ei vasta kehtivatele heliisolatsiooninõuetele ning teemaga on vaja projekteerimistöös eraldi tegeleda. Lisaks näitavad arvutustulemused, et heliisolatsiooniga tuleb tegeleda hoones nii vertikaalse kui ka horisontaalse suuna peal, kumbagi ei tohi tähelepanuta jätta. Kui kõik on korrektselt projekteeritud, siis on võimalik ehitada nii Eesti kui ka Skandinaavia heliisolatsiooninõuetele vastavaid kergkonstruktsioone.

Käesolevas töös ei ole käsitletud edasisi võimalikke akustilisi ülesandeid – tarindite avatäited, veevärgi ja elektri läbiviigud jne, mis tekitavad projekteerijatele ka akustika seisukohast lisakoormuse.

KOKKUVÕTE

Käesolevas töös uuriti kergkonstruktsioonide ehitusakustilist toimivust, täpsemalt heliisolatsioonivõimet. Kergkonstruktsioonide all käsitleti erinevaid turul olevaid puitelemente ning puidust ruummoduleid. Töö eesmärk oli uurida, kas Eestis toodetud ning suures osas Skandinaaviasse eksporditavad kergkonstruktsioonid vastavad erinevate turgude heliisolatsiooninõuetele, seda nii õhumüraisolatsiooni kui ka löögimüraisolatsiooni seisukohalt.

Töös võeti erinevad reaalselt turul olevad konstruktsioonitüübid ning arvutati nende teoreetilised heliisolatsiooniparameetrid, seda kasutades nii teoreetilist arvutusmodelit kui ka spetsiaalset kommertstarkvara Insul 9.0. Tulemusi võrreldi ülevaate saamiseks omavahel ning analüüsiti erinevuste võimalikke põhjuseid. Seejärel moodustati läbiarvutatud tarinditest kolmemõõtmeline konstruktsioon, mida analüüsiti arvutustarkvata DataKustik BASTIAN abil. Lõpuks võrreldi kolmemõõtmelise arvutusskeemi abil saadud tulemusi erinevates riikides kehtivate heliisolatsiooninõuetega. Töös keskenduti erinevate tarindite toimivusele.

Arvutustulemuste põhjal sai järeldada, et turul olevatest konstruktsioonidest on võimalik kombineerida konstruktsioonid, mis vastavad kõigi vaatluse all olevate riikide heliisolatsiooninõuetele. Samuti leiti konstruktsioone, mis vastasid küll Eestis kehtivatele nõuetele, kuid mitte Skandinaavia omadele. Käesoleva töö üks peamistest eesmärkidest oligi lugejale teadvustada, et erinevates riikides on kasutusel erinevad heliisolatsiooninõuded, mis ei pruugi olla omavahel võrreldavad. Rusikareeglina saab välja tuua, et Skandinaavia nõuded on rangemad kui Eesti omad. Seetõttu võib tekkida olukord, kus Eestis kasutusel olev ning projektist projekti korduv tüüpkonstruktsioon ei vasta Skandinaavias kehtivatele nõuetele.

Lisaks oli töö eesmärgiks välja tuua, et kergkonstruktsioonide akustilise toimivuse hindamiseks ei ole praegusel hetkel välja töötatud ühtset kõikehõlmavat arvutusmeetodit. Kõik esitatud tulemused on teoreetilised ning ei pruugi ühtida reaalsete mõõtmistulemustega. Arvutustarkvarad kipuvad tulemusi üle hindama ning olukorda liiga heaks tunnistama. Mõõtmistulemustega korreleeruvad teoreetilised arvutustulemused on võimalik saada võrdlemisi lihtsate konstruktsioonide puhul (näiteks puitkarkassil kipsplaatidega sein), kuid tarindi keerulisemaks muutumise puhul suureneb ka arvutuste viga (nt ruummoodulite vahelised mitmekihilised laed).

Töö tegemise käigus selgus, et erinevate projekteerimisbüroode ning puitkonstruktsioonide tootjate poolne huvi ehitusakustika valdkonna kohta on võrdlemisi suur, mistõttu vajab teema kindlasti edaspidist süvenemist. Tulevikus on kindlasti vaja teostada olemasolevatele tarinditele mõõtmisi ning püüda nende põhjal välja töötada täpsem arvutusmudel ka keerulistele tarinditele. Lisaks ei ole käesolevas töös käsitletud detailsemaid ehitusakustika alaseid ülesandeid – kuidas mõjutavad akustilist toimivust tarindite avad ja avatäited, ventilatsiooni ja veevärgi läbiviigud, ehitustööde üldine kvaliteet jne. Samuti ei uuritud toimivate sõlmlahenduste projekteerimist, mis on tarinditega võrdselt tähtis teema. Nimetatud probleemid väärivad kindlasti täpsemat edaspidist uurimist.

SUMMARY

The main purpose of this thesis was to assess the acoustical performance, sound isolation in particular, of different lightweight structures commonly used in residential buildings. Lightweight structures considered in the thesis were timber-based structures such as prefabricated elements and modular solutions. The aim of this thesis was to investigate whether lightweight structures, which are fabricated in Estonia, but exported mainly to Scandinavia correspond with the sound isolation requirements in different Scandinavian countries, both from the perspective of airborne sound isolation and impact sound isolation.

Various real-world structures were taken into consideration and their theoretical sound isolation parameters were calculated. This was done both manually and with help from special commercial software Insul 9.0. The results were compared with each other and the possible causes for different results were analyzed. After calculating single elements a different commercial software, DataKustik BASTIAN was used for creating a three dimensional calculation model which could take into account the flanking sound transmission in a structure. These results were then further compared with the sound isolation regulations in different countries.

Based on the calculation results, it was concluded that it is entirely possible to combine the structures on the market in a way that the sound isolation requirements in different countries could be fulfilled. During the calculation phase some constructions were found, which for example fulfilled Estonian regulations, but not Scandinavian ones. One of the main goals of this thesis was to make the reader aware that different sound isolation requirements are applicable in different countries. Furthermore, these requirements may not be directly comparable with each other. The rule of thumb here would be that Scandinavian requirements governing sound isolation in structures are stricter than Estonian ones. Therefore, a situation in which the typical structures used in Estonia do not meet the Scandinavian requirements might arise.

The next aim of the thesis was to point out that currently there is no single all-encompassing calculation model for assessing the sound isolation performance of lightweight structures available. All presented calculation results are theoretical and may not match the actual measurement results. Computational software tends to overestimate the results and make the situation seem a bit too good. Theoretical calculation results, which correspond with the actual measured results can be obtained in comparatively simple structures, for example a wall with timber studs and a

gypsum board on each side. Once the structure gets more complicated, for example a multi-layered ceiling between different modular structures, the margin of error tends to increase.

It became clear that the interest of various design companies and manufacturers of timber structures about the field of construction acoustics is relatively high, which is why the subject certainly needs further dedication. In the future it will be necessary to carry out different measurements of existing structures and, based on the results, to work out a more precise calculation model for complicated structures. In addition, this thesis does not address the more detailed tasks of building acoustics – how the acoustic performance of structures is influenced by openings, ventilation and waterworks pipeline penetrations, overall quality of construction etc. Furthermore the topic of junctions was not analyzed in the thesis, although it is as important as the acoustical performance of structures themselves. These issues certainly deserve more precise future research.

7 KIRJANDUSE LOETELU

- [1] Eesti Puitmajaliit, „Liidust,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.puitmajaliit.ee/liidust>. [Kasutatud 15 mai 2018].
- [2] Eesti Puitmajaliit, „Miks Eesti puitmaja,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.puitmajaliit.ee/miks-eesti-puitmaja>. [Kasutatud 15 mai 2018].
- [3] Eesti Puitmajaliit, „Puitmajad arvudes,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.puitmajaliit.ee/miks-eesti-puitmaja/puitmajad-arvudes>. [Kasutatud 15 mai 2018].
- [4] Eesti Puitmajaliit, „Tooted,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.puitmajaliit.ee/tooted/elementmajad>. [Kasutatud 4 Aprill 2018].
- [5] Timbeco, „Elementmajad,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.timbeco.ee/tooted/elementmajad/>. [Kasutatud 15 mai 2018].
- [6] Matek, „Moodul,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.matek.ee/modulars/>. [Kasutatud 15 mai 2018].
- [7] Eesti Standardikeskus, EVS-EN ISO 10848-1:2017 "Akustika. Öhuheli, löögiheli ja ehitise tehniliste seadmete heli mõõtmise külgsuunalisel ülekandel kõrvalolevate ruumide vahel laboratoorses ja ehitise tingimustes", Tallinn: Eesti Standardikeskus, 2017.
- [8] Eesti Standardikeskus, EVS-EN ISO 10848-4:2017 "Acoustics - Laboratory and field measurement of flanking transmission for airborne, impact and building service equipment sound between adjoining rooms - Part 4: Application to junctions with at least one Type A element", Tallinn: Eesti Standardikeskus, 2017.
- [9] British Gypsum, „Education Sector Guide - 7 - Flanking Sound Transmission,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.british-gypsum.com/about-us/sectors/education>. [Kasutatud 30 mai 2018].
- [10] COST, „European COST action FP0702,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://extranet.cstb.fr/sites/cost/default.aspx>. [Kasutatud 21 mai 2018].
- [11] COST, „COST Action TU0901: Integrating and Harmonizing Sound Insulation Aspects in Sustainable Urban Housing Constructions,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.costtu0901.eu/index.html>. [Kasutatud 21 mai 2018].
- [12] Vinnova project 2007-01653, Acoustics in wooden buildings. State of the art 2008, Stockholm: SP Technical Research Institute of Sweden, 2008.
- [13] J. E. Cambridge, An evaluation of various sound insulation programs and their use in the design of silent rooms, Göteborg, 2006.
- [14] H. L. Erik Backman, Measurement and evaluation uncertainties of impact sound insulation, Göteborg: Chalmers University of Technology, 2010.
- [15] Elsevier, „Applied Acoustics,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.journals.elsevier.com/applied-acoustics>. [Kasutatud 21 mai 2018].

- [16] SAGE Publishing, „Building Acoustics,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://uk.sagepub.com/en-gb/eur/building-acoustics/journal202470>. [Kasutatud 21 mai 2018].
- [17] „Baltic-Nordic Acoustics Meeting 2018,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://events.artegis.com/event/BNAM_2018. [Kasutatud 21 mai 2018].
- [18] „InterNoise,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://internoise2018.org/>. [Kasutatud 21 mai 2018].
- [19] Eesti Standardikeskus, EVS-EN ISO 12354-1:2017 Ehitusakustika. Hoonete akustilise toimivuse hindamine elementide akustilise toime põhjal. Osa 1: Ruumidevaheline õhuheli isolatsioon, Tallinn: Eesti Standardikeskus, 2017.
- [20] Eesti Standardikeskus, EVS-EN ISO 12354-2:2017 Ehitusakustika. Hoonete akustilise toimivuse hindamine elementide akustilise toime põhjal. Osa 2: Ruumidevaheline löögheli isolatsioon, Tallinn: Eesti Standardikeskus, 2017.
- [21] Soome Ehitusinseneride Liit RIL ry, RIL 243-1-2007 "Hoonete akustiline projekteerimine. Akustika alused", Tallinn: ET-INFOkeskuse AS, 2009.
- [22] Eesti Standardikeskus, EVS 842:2003 "Ehitiste heliisolatsiooninõuded. Kaitse müra eest", Tallinn, 2003.
- [23] DIN Standards Committee Building and Civil Engineering, DIN 4109 Sound insulation in buildings, 2018.
- [24] Eesti Standardikeskus, EVS-EN ISO 16283-1:2014 "Acoustics - Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements - Part 1: Airborne sound insulation", Tallinn, 2014.
- [25] Eesti Standardikeskus, EVS-EN ISO 16283-2:2015 "Acoustics - Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements - Part 2: Impact sound insulation", Tallinn, 2015.
- [26] Eesti Standardikeskus, EVS-EN ISO 717-1:2013 "Hoonete ja ehituselementide heliisolatsiooni hindamine. Osa 1: Õhuheli isolatsioon", Tallinn, 2013.
- [27] Eesti Standardikeskus, EVS-EN ISO 717-2:2013 "Acoustics - Rating of sound insulation in buildings and of building elements - Part 2: Impact sound insulation", 2013.
- [28] SS 25267 "Byggakustik - Ljudklassning av utrymmen i byggnader - Bostäder", 2004.
- [29] Boverkets byggregler – föreskrifter och allmänna råd, 2011.
- [30] S. Norge, NS8175:2012 "Acoustic conditions in buildings. Sound classification of various types of buildings", 2012.
- [31] Finlex, „Ympäristöministeriön asetus rakennuksen ääniympäristöstä,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20170796>. [Kasutatud 15 mai 2018].
- [32] Suomen Standardisoimisliitto SFS, SFS 5907 "Acoustic classification of spaces in buildings", Helsinki, 2006.
- [33] M. M. P. D. E. G. Birgit Rasmussen, Building acoustics throughout Europe. Volume 1: Towards a common framework in building acoustics throughout Europe. How to translate sound insulation descriptors and requirements, DiScript Preimpresion, S. L., 2014.

- [34] „Socrates - SOund Classification RAtIng ESTimator,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.alfwarnock.info/sound/socindex.html>. [Kasutatud 23 mai 2018].
- [35] National Research Council Canada, „soundPATHS – A web application to predict sound transmission between rooms,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.nrc-cnrc.gc.ca/eng/solutions/advisory/soundpaths/index.html>. [Kasutatud 23 mai 2018].
- [36] S. Ljunggren, „AkuLite Rapport 1 "Ljudisolering i trähus - en handbok för konstruktörer",“ SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut, Stockholm, 2011.
- [37] V. Hongisto, „Levyrakenneseinien ilmaääneneristävyyden mallintaminen,” Tampere, 2007.
- [38] V. Hongisto, „Levyrakenneseinien ilmaääneneristävyyden mallintaminen,” Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere, 2007.
- [39] J. H. Rindel, Sound Insulation in Buildings, Miami: CRC Press, 2017.
- [40] „Isnul,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.insul.co.nz/tech-info/>. [Kasutatud 15 aprill 2018].
- [41] P. H. Jonas Brunskog, The interaction between the ISO tapping machine and lightweight floors, Acta Acustica united with Acustica, Hirzel Verlag, 2003.
- [42] „DataKustik Calculation,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.datakustik.com/en/products/bastian/calculation/>. [Kasutatud 25 aprill 2018].
- [43] „DataKustik Databases,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.datakustik.com/en/products/bastian/databases/>. [Kasutatud 25 aprill 2018].
- [44] KNAUF, „KNAUF tootekataloogid,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.knauf.ee/et/allalaadimiseks/tootekataloogid/index.php>. [Kasutatud 28 mai 2018].
- [45] J. H. V. H. Petra Larm, „Sound insulation of Finnish building boards,” *Work Environmental Research Report Series 22*, p. 34, 23 august 2006.
- [46] Gyproc, „Gyproc tootekataloog,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.gyproc.ee/trukised-ja-videod/gyproc-tootekataloog>. [Kasutatud 28 mai 2018].
- [47] „Greentec Houses OÜ,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.greentec.ee/tehnoloogia/>. [Kasutatud 14 aprill 2018].
- [48] M. M. M. R. L. M. Birgit Rasmussen, COST Action TU0901. Building acoustics throughout Europe. Volume 2: Housing and construction types country by country. Estonia, DiScript Preimpresion, S. L, 2014.

LISAD

Lisa 1. Väljavõtted arvutustarkvaradest

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. 0771

Job Name:

Job No.:

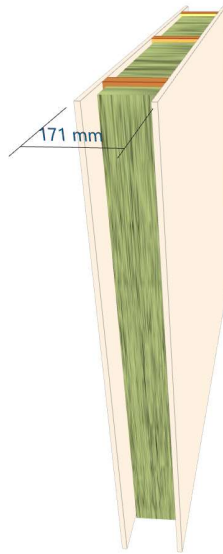
Initials:Dell

Date:23.04.2018

File Name:



Notes:



R_w 41 dB

$C_{50-5000}$ -5 dB

$C_{tr, 50-5000}$ -15 dB

Mass-air-mass resonant frequency = 67 Hz

Panel Size = 2,7 m x 4,0 m

Partition surface mass = 21,1 kg/m²

System description

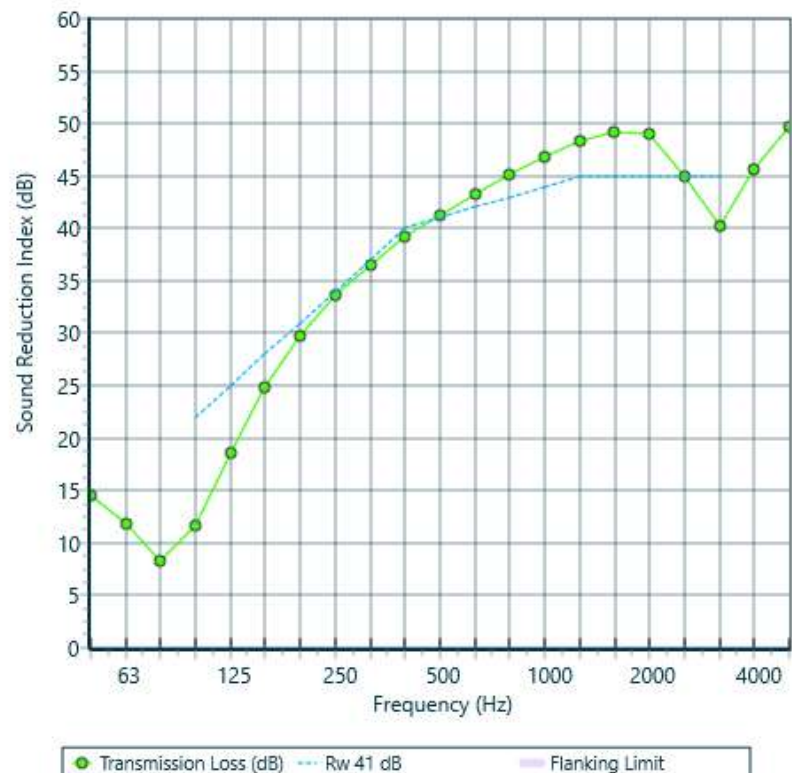
Panel 1 : 1 x 13 mm CSR Gyprock 13mm standard plasterboard

Frame: Timber stud; Cavity Width 145 mm ,Stud spacing 600 mm , 1 x Lana de roca, 50mm, ISOVER Arena Thickness 145 mm

Panel 2 + 1 x 13 mm CSR Gyprock 13mm standard plasterboard

Floor Cover: Thickness 0,02 mm

freq.(Hz)	TL(dB)	TL(dB)
50	15	
63	12	11
80	8	
100	12	
125	19	15
160	25	
200	30	
250	34	32
315	37	
400	39	
500	41	41
630	43	
800	45	
1000	47	47
1250	48	
1600	49	
2000	49	47
2500	45	
3150	40	
4000	46	43
5000	50	



● Transmission Loss (dB) --- R_w 41 dB — Flanking Limit

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. 0771

Job Name:

Job No.:

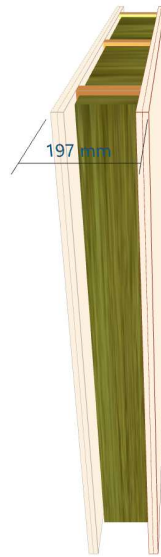
Initials:Kaarel Sepp

Date:17.05.2018

File Name:kahe kipsplaadida sein.ixl



Notes:



R_w 49 dB

$C_{50-5000}$ -7 dB

$C_{tr, 50-5000}$ -19 dB

Mass-air-mass resonant frequency = 47 Hz

Panel Size = 2,7 m x 4,0 m

Partition surface mass = 38 kg/m²

System description

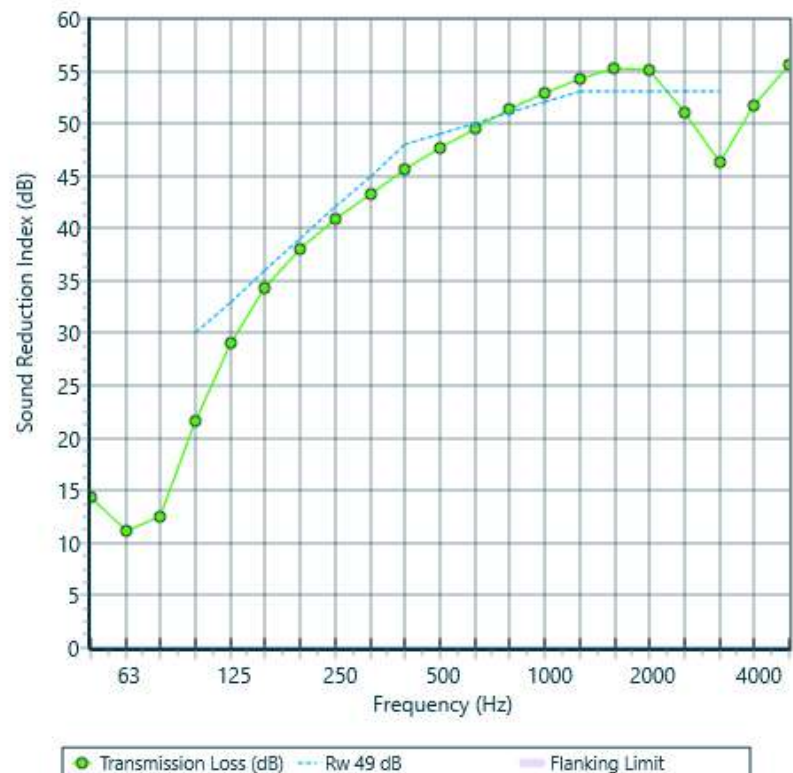
Panel 1 : 2 x 13 mm CSR Gyprock 13mm standard plasterboard

Frame: Timber stud; Cavity Width 145 mm ,Stud spacing 600 mm , 1 x Lana de roca, 50mm, ISOVER Arena Thickness 145 mm

Panel 2 + 2 x 13 mm CSR Gyprock 13mm standard plasterboard

Floor Cover: Thickness 0,02 mm

freq.(Hz)	TL(dB)	TL(dB)
50	14	
63	11	13
80	13	
100	22	
125	29	26
160	34	
200	38	
250	41	40
315	43	
400	46	
500	48	47
630	49	
800	51	
1000	53	53
1250	54	
1600	55	
2000	55	53
2500	51	
3150	46	
4000	52	50
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. 0771

Job Name:

Job No.:

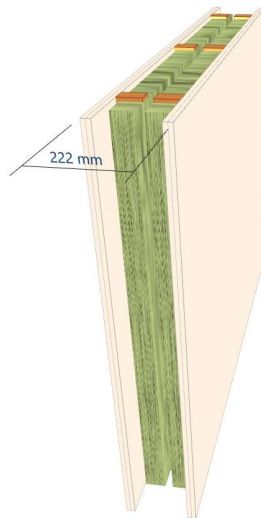
Date: 23.04.2018

File Name:

Initials: Kaarel Sepp



Notes:



R_w 63 dB

$C_{50-5000}$ -12 dB

$C_{tr, 50-5000}$ -27 dB

Mass-air-mass resonant frequency = 43 Hz

Panel Size = 2,7 m x 4,0 m

Partition surface mass = 35,8 kg/m²

System description

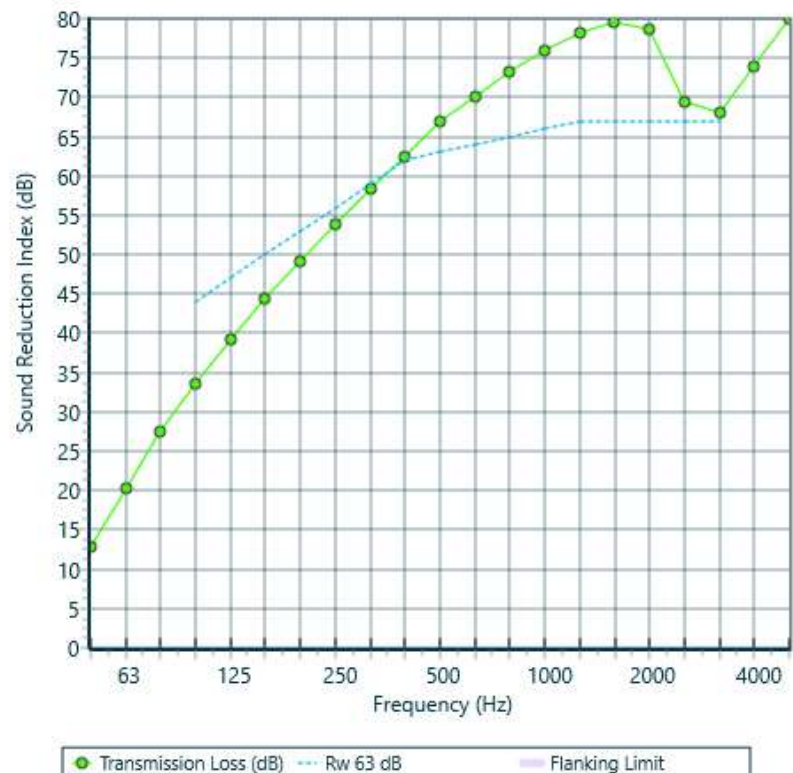
Panel 1 : 2 x 13 mm CSR Gyprock 13mm standard plasterboard

Frame: Double timber stud; Cavity Width 170 mm, Stud spacing 600 mm, 2 x Lana de roca, 50mm, ISOVER Arena Thickness 70 mm

Panel 2 : 2 x 13 mm CSR Gyprock 13mm standard plasterboard

Floor Cover: Thickness 0,02 mm

freq.(Hz)	TL(dB)	TL(dB)
50	13	
63	20	17
80	27	
100	34	
125	39	37
160	44	
200	49	
250	54	52
315	58	
400	62	
500	67	65
630	70	
800	73	
1000	76	75
1250	78	
1600	80	
2000	79	73
2500	69	
3150	68	
4000	74	72
5000	80	



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. 0771

Job Name:

Job No.:

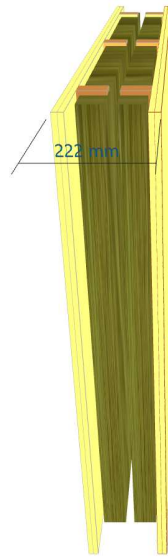
Initials:Kaarel Sepp

Date:17.05.2018

File Name:õhkvahega sein Soundcheck.ixl



Notes:



R_w 70 dB

$C_{50-5000}$ -10 dB

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

Mass-air-mass resonant frequency = 35 Hz

Panel Size = 2,7 m x 4,0 m

Partition surface mass = 54 kg/m²

System description

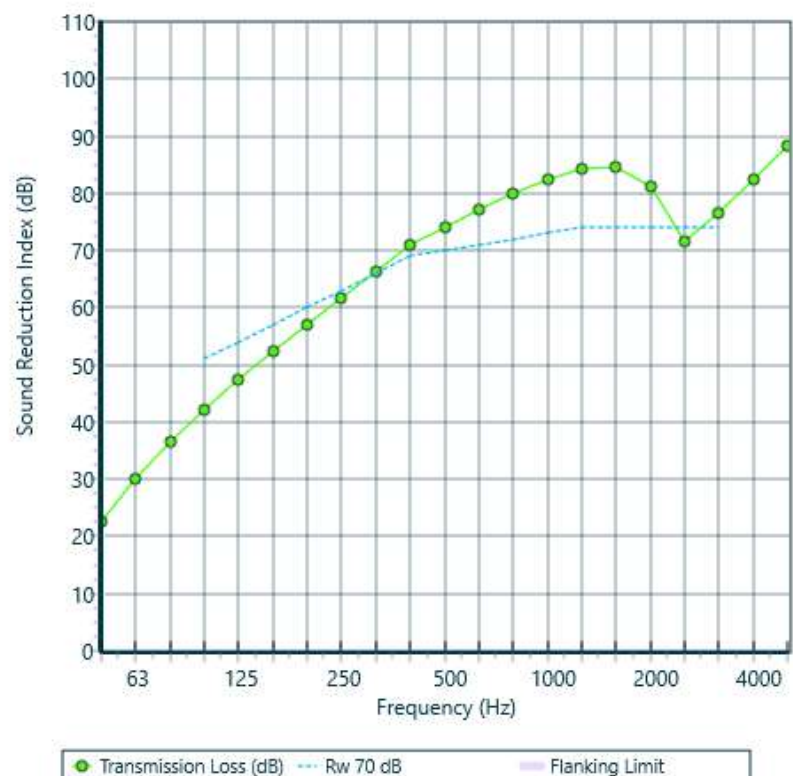
Panel 1 : 2 x 13 mm CSR Gyprock 13mm Soundchek plasterboard

Frame: Double timber stud; Cavity Width 170 mm , Stud spacing 600 mm , 2 x Lana de roca, 50mm, ISOVER Arena Thickness 70 mm

Panel 2 + 2 x 13 mm CSR Gyprock 13mm Soundchek plasterboard

Floor Cover: Thickness 0,02 mm

freq.(Hz)	TL(dB)	TL(dB)
50	23	
63	30	26
80	36	
100	42	
125	47	46
160	52	
200	57	
250	62	60
315	66	
400	71	
500	74	73
630	77	
800	80	
1000	82	82
1250	84	
1600	85	
2000	81	76
2500	72	
3150	76	
4000	82	80
5000	88	



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. 0771

Job Name:

Job No.:

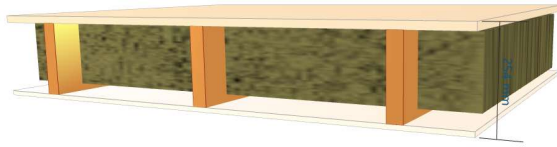
Initials:Kaarel Sepp

Date:26.04.2018

File Name:01 arentec laai.ixl



Notes:



R_w 43 dB

$C_{50-5000}$ -5 dB

$C_{tr, 50-5000}$ -16 dB

Mass-air-mass resonant frequency = 49 Hz

Panel Size = 2,7 m x 4,0 m

Partition surface mass = 26,7 kg/m²

System description

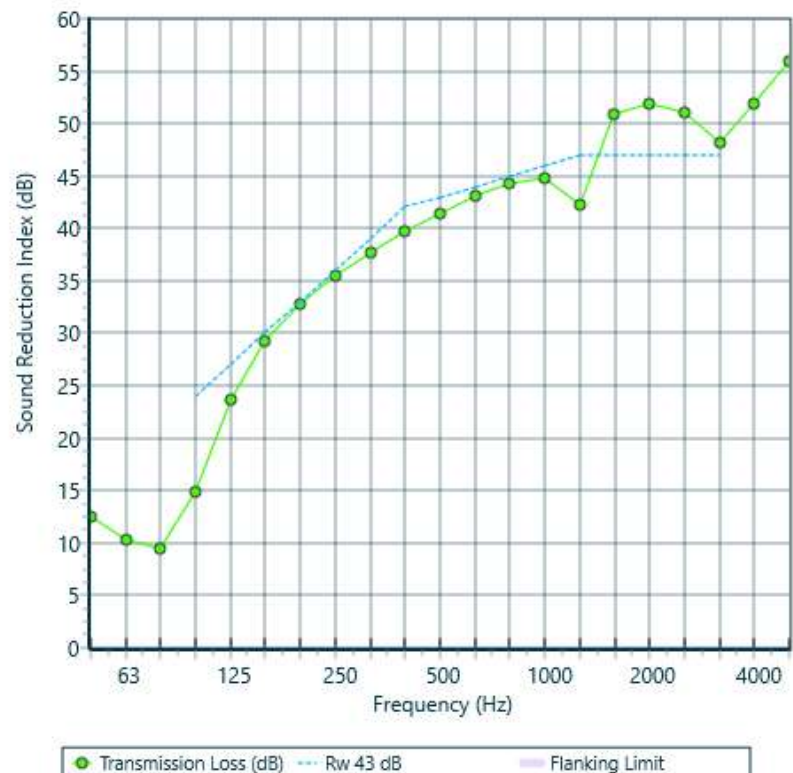
Panel 1 : 1 x 21 mm OSB (Oriented Strand Board)

Frame: Solid Joist; Cavity Width 220 mm, Stud spacing 600 mm, 1 x Rockwool (33kg/m³) Thickness 195 mm

Panel 2 : 1 x 13 mm CSR Gyprock 13mm standard plasterboard

Floor Cover: None Thickness 0,02 mm

freq.(Hz)	TL(dB)	TL(dB)
50	12	
63	10	11
80	9	
100	15	
125	24	19
160	29	
200	33	
250	35	35
315	38	
400	40	
500	41	41
630	43	
800	44	
1000	45	44
1250	42	
1600	51	
2000	52	51
2500	51	
3150	48	
4000	52	51
5000	56	



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. 0771

Job Name:

Job No.:

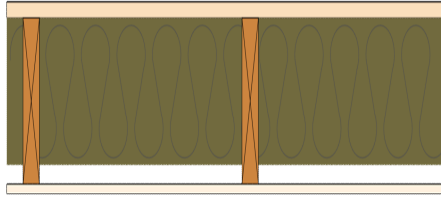
Initials:Kaarel Sepp

Date:14.04.2018

File Name:



Notes:



$L_{n,w}$ 75 dB

Mass-air-mass resonant frequency = 58 Hz

Panel Size = 2,7 m x 4,0 m

Partition surface mass = 26,7 kg/m²

System description

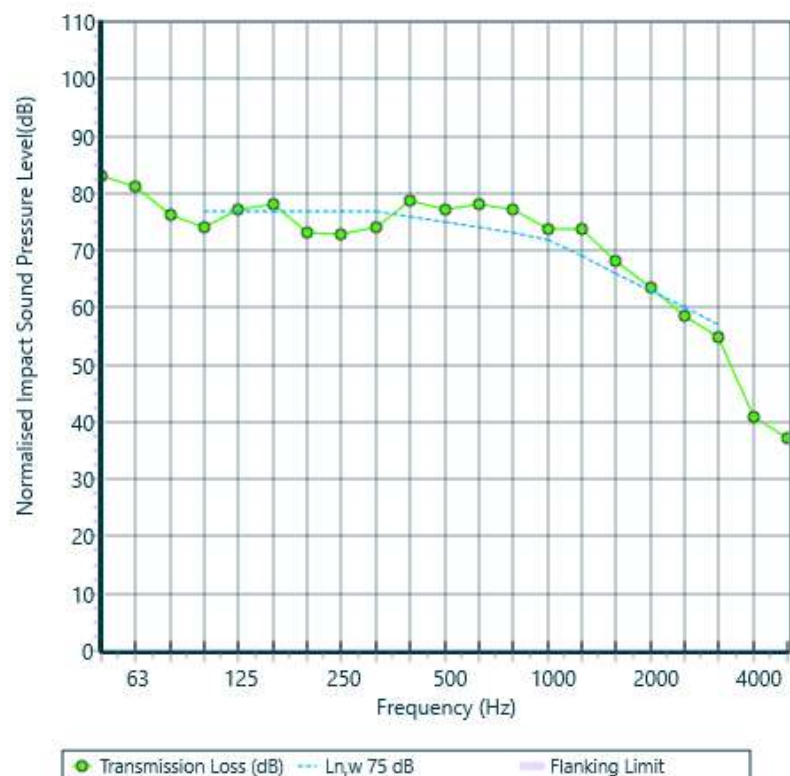
Panel 1 : 1 x 21 mm OSB (Oriented Strand Board)

Frame: Solid Joist; Cavity Width 220 mm, Stud spacing 600 mm, 1 x Rockwool (33kg/m³) Thickness 195 mm

Panel 2 + 1 x 13 mm CSR Gyprock 13mm standard plasterboard

Floor Cover: Thickness 0,02 mm

freq.(Hz)	TL(dB)	TL(dB)
50	83	
63	81	86
80	76	
100	74	
125	77	82
160	78	
200	73	
250	73	78
315	74	
400	79	
500	77	83
630	78	
800	77	
1000	74	80
1250	74	
1600	68	
2000	64	70
2500	59	
3150	55	
4000	41	55
5000	37	



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. 0771

Job Name:

Job No.:

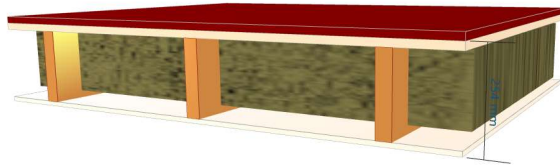
Initials:Kaarel Sepp

Date:26.04.2018

File Name:



Notes:



$L_{n,w}$ 59 dB

Mass-air-mass resonant frequency = 58 Hz

Panel Size = 2,7 m x 4,0 m

Partition surface mass = 26,7 kg/m²

System description

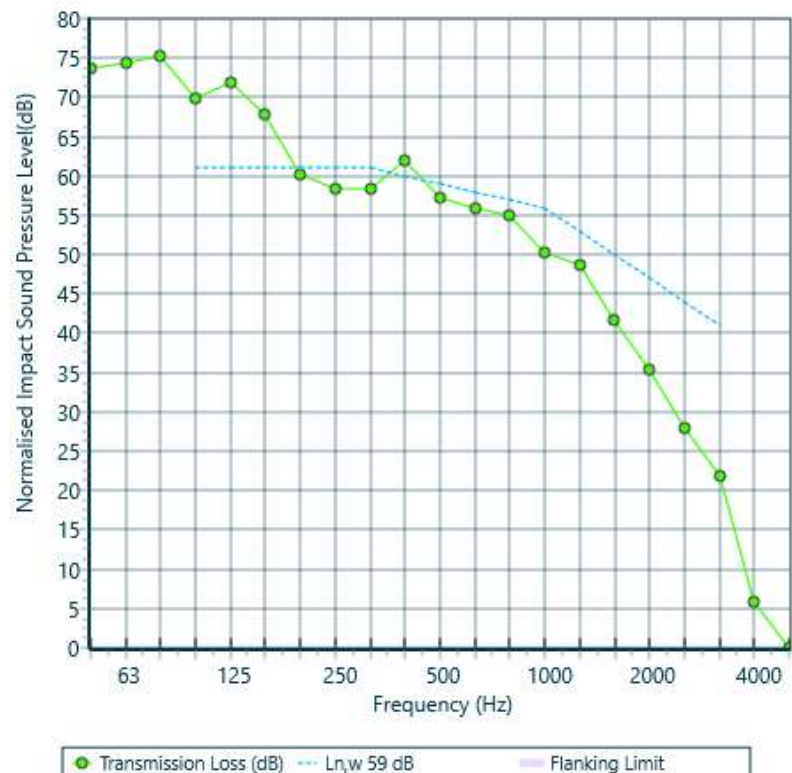
Panel 1 : 1 x 21 mm OSB (Oriented Strand Board)

Frame: Solid Joist; Cavity Width 50 mm ;Stud spacing 600 mm , 1 x Rockwool (33kg/m³) Thickness 195 mm

Panel 2 + 1 x 13 mm CSR Gyprock 13mm standard plasterboard

Floor Cover: 20mm particle board on batten & cradle mounts at 400mm centres Thickness 20 mm

freq.(Hz)	TL(dB)	TL(dB)
50	74	
63	74	79
80	75	
100	70	
125	72	75
160	68	
200	60	
250	58	64
315	58	
400	62	
500	57	64
630	56	
800	55	
1000	50	57
1250	49	
1600	42	
2000	35	43
2500	28	
3150	22	
4000	6	22
5000	0	



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. 0771

Job Name:

Job No.:

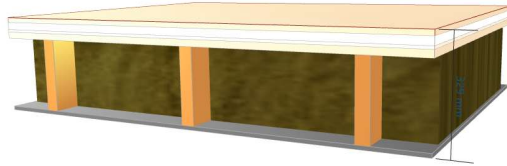
Initials:Kaarel Sepp

Date:26.04.2018

File Name:



Notes:



R_w 55 dB

$C_{50-5000}$ -6 dB

$C_{tr, 50-5000}$ -19 dB

Mass-air-mass resonant frequency = 30 Hz

Panel Size = 2,7 m x 4,0 m

Partition surface mass = 73,9 kg/m²

System description

Panel 1 : 1 x 16 mm OSB (Oriented Strand Board)
+ 1 x 9 mm CSR Gyprock 13mm standard plasterboard

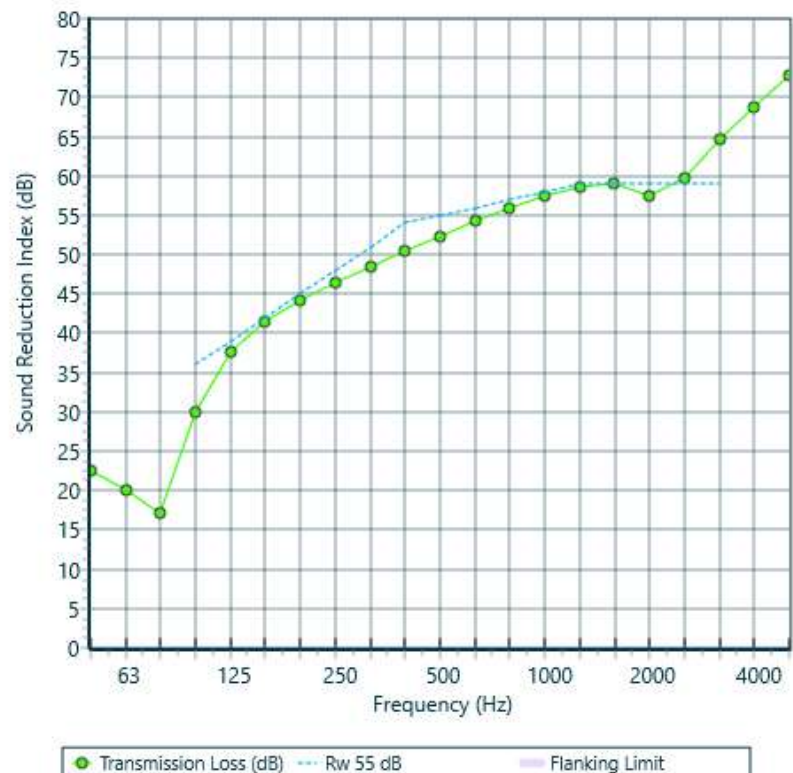
+ 1 x 25 mm Rubber
+ 1 x 22 mm OSB (Oriented Strand Board)

Frame: Solid Joist; Cavity Width 245 mm, Stud spacing 600 mm, 1 x Rockwool (33kg/m³) Thickness 245 mm

Panel 2 + 1 x 12 mm CemBoard

Floor Cover: None Thickness 0,02 mm

freq.(Hz)	TL(dB)	TL(dB)
50	22	
63	20	19
80	17	
100	30	
125	38	34
160	42	
200	44	
250	46	46
315	48	
400	50	
500	52	52
630	54	
800	56	
1000	57	57
1250	59	
1600	59	
2000	57	59
2500	60	
3150	65	
4000	69	68
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. 0771

Job Name:

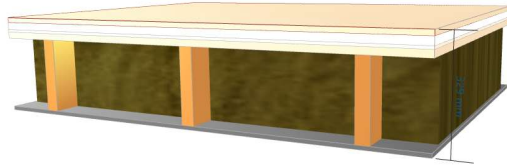
Job No.:

Initials:Kaarel Sepp

Date:26.04.2018

File Name:

Notes:



$L_{n,w}$ 59 dB

Mass-air-mass resonant frequency = 35 Hz
Panel Size = 2,7 m x 4,0 m
Partition surface mass = 73,9 kg/m²

System description

Panel 1 : 1 x 16 mm OSB (Oriented Strand Board)
+ 1 x 9 mm CSR Gyprock 13mm standard plasterboard

+ 1 x 25 mm Rubber
+ 1 x 22 mm OSB (Oriented Strand Board)

Frame: Solid Joist; Cavity Width 245 mm, Stud spacing 600 mm, 1 x Rockwool (33kg/m³) Thickness 245 mm

Panel 2 + 1 x 12 mm CemBoard

Floor Cover: None Thickness 0,02 mm

freq.(Hz)	TL(dB)	TL(dB)
50	61	67
63	60	
80	64	
100	65	66
125	59	
160	58	
200	59	
250	64	66
315	61	
400	63	
500	65	
630	62	68
800	59	
1000	57	
1250	51	
1600	48	52
2000	48	
2500	42	
3150	38	
4000	35	41
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. 0771

Job Name:

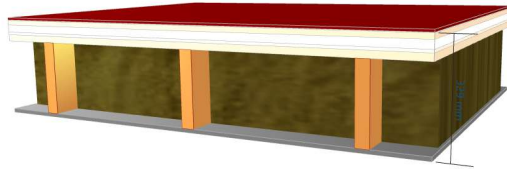
Job No.:

Initials:Kaarel Sepp

Date:26.04.2018

File Name:

Notes:



$L_{n,w}$ 55 dB

Mass-air-mass resonant frequency = 35 Hz
Panel Size = 2,7 m x 4,0 m
Partition surface mass = 73,9 kg/m²

System description

Panel 1 : 1 x 16 mm OSB (Oriented Strand Board)
+ 1 x 9 mm CSR Gyprock 13mm standard plasterboard

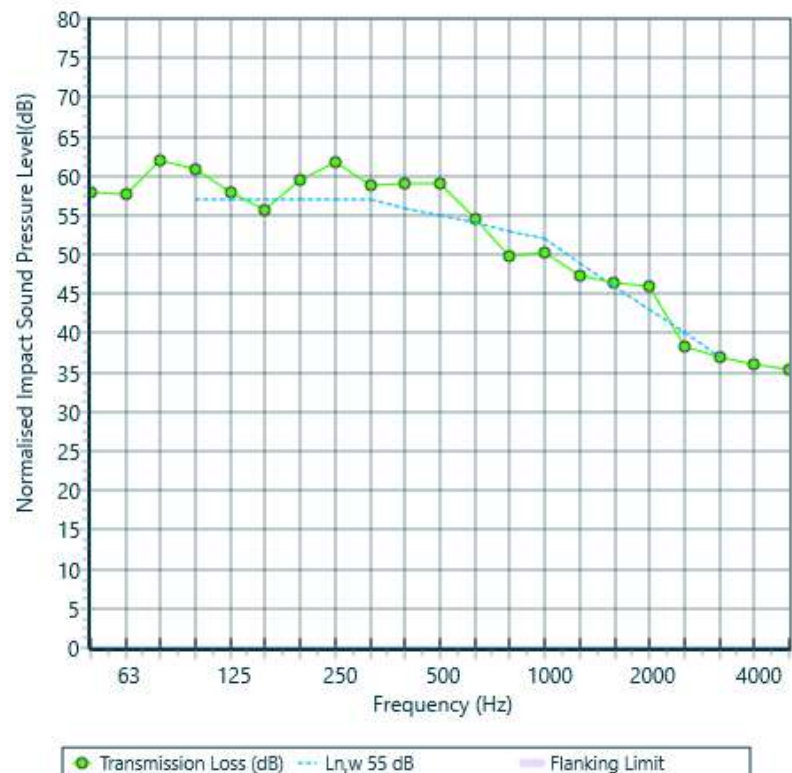
+ 1 x 25 mm Rubber
+ 1 x 22 mm OSB (Oriented Strand Board)

Frame: Solid Joist; Cavity Width 245 mm, Stud spacing 600 mm, 1 x Rockwool (33kg/m³) Thickness 245 mm

Panel 2 + 1 x 12 mm CemBoard

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

freq.(Hz)	TL(dB)	TL(dB)
50	58	
63	58	64
80	62	
100	61	
125	58	63
160	56	
200	59	
250	62	65
315	59	
400	59	
500	59	63
630	55	
800	50	
1000	50	54
1250	47	
1600	46	
2000	46	50
2500	38	
3150	37	
4000	36	41
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. 0771

Job Name:

Job No.:

Initials:Kaarel Sepp

Date:17.05.2018

File Name:

Notes:



$L_{n,w}$ 51 dB

Mass-air-mass resonant frequency = 35 Hz
Panel Size = 2,7 m x 4,0 m
Partition surface mass = 73,9 kg/m²

System description

Panel 1 : 1 x 16 mm OSB (Oriented Strand Board)
+ 1 x 9 mm CSR Gyprock 13mm standard plasterboard

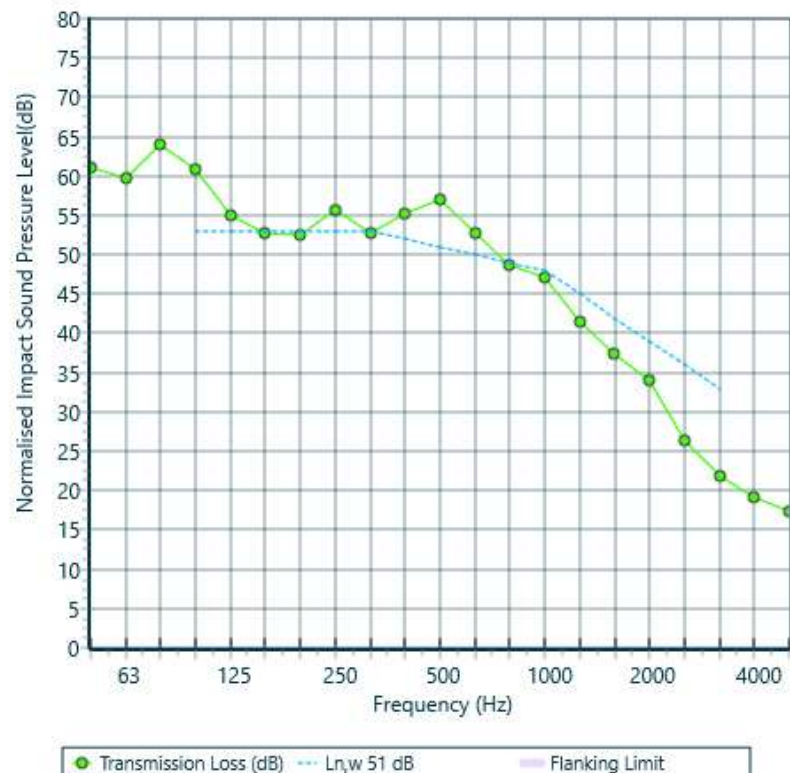
+ 1 x 25 mm Rubber
+ 1 x 22 mm OSB (Oriented Strand Board)

Frame: Solid Joist; Cavity Width 245 mm, Stud spacing 600 mm, 1 x Rockwool (33kg/m³) Thickness 245 mm

Panel 2 + 1 x 12 mm CemBoard

Floor Cover: 20mm particle board on 12mm softboard Thickness 20 mm

freq.(Hz)	TL(dB)	TL(dB)
50	61	
63	60	67
80	64	
100	61	
125	55	62
160	53	
200	52	
250	56	59
315	53	
400	55	
500	57	60
630	53	
800	49	
1000	47	52
1250	41	
1600	37	
2000	34	39
2500	26	
3150	22	
4000	19	25
5000	17	



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. 0771

Job Name:

Job No.:

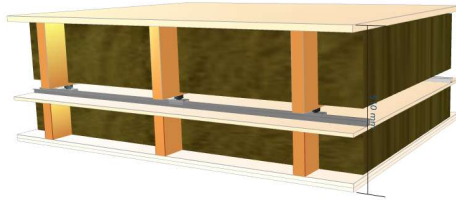
Initials:Kaarel Sepp

Date:17.05.2018

File Name:



Notes:



R_w 53 dB

$C_{50-5000}$ -1 dB

$C_{tr, 50-5000}$ -9 dB

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

Panel Size = 2,7 m x 4,0 m

Partition surface mass = 51,9 kg/m²

System description

Panel 1 : 1 x 22 mm MDF

Frame: Solid Joist with rubber isolation clip; Cavity Width 305 mm ,Stud spacing 600 mm , 1 x Rockwool (33kg/m³) Thickness 245 mm

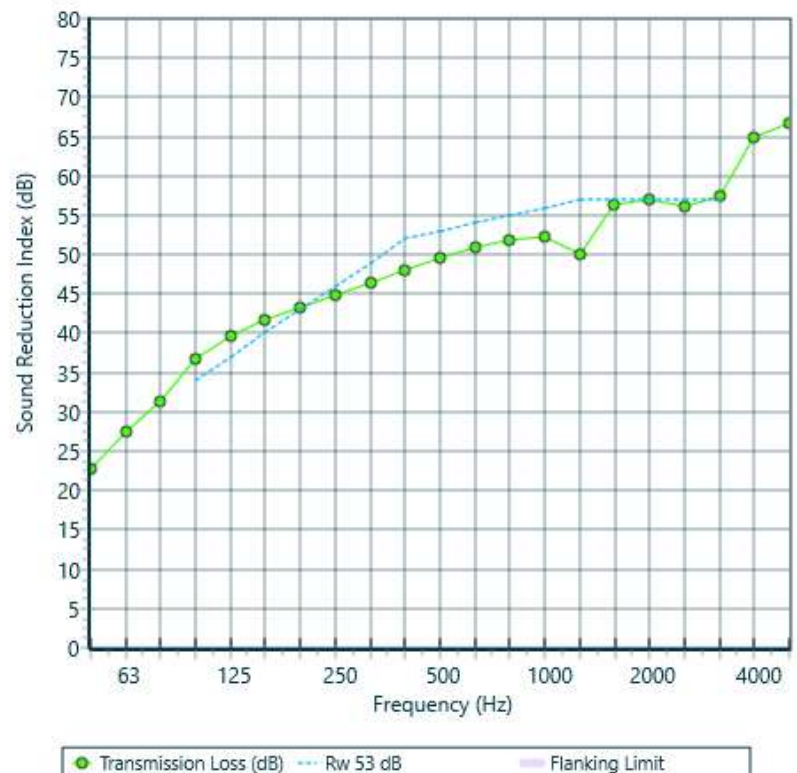
Panel 2 + 1 x 12 mm OSB (Oriented Strand Board)

Frame: Solid Joist; Cavity Width 145 mm ,Stud spacing 600 mm , 1 x Rockwool (33kg/m³) Thickness 145 mm

Panel 3 + 2 x 13 mm CSR Gyprock 13mm standard plasterboard

Floor Cover: 2 layers of 12.5mm Fermacell on 40mm foil backed ROXUL "Cooltek" 165kg/m³ mineral Thickness 95 mm

freq.(Hz)	TL(dB)	TL(dB)
50	23	
63	27	26
80	31	
100	37	
125	40	39
160	42	
200	43	
250	45	45
315	46	
400	48	
500	50	49
630	51	
800	52	
1000	52	51
1250	50	
1600	56	
2000	57	56
2500	56	
3150	57	
4000	65	61
5000	67	



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. 0771

Job Name:

Job No.:

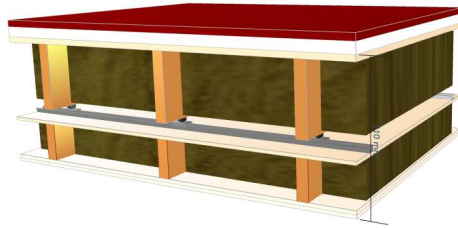
Initials:Kaarel Sepp

Date:17.05.2018

File Name:



Notes:



$L_{n,w}$ 46 dB

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

Panel Size = 2,7 m x 4,0 m

Partition surface mass = 30,2 kg/m²

System description

Panel 1 : 1 x 22 mm MDF

Frame: Solid Joist with rubber isolation clip; Cavity Width 305 mm ,Stud spacing 600 mm , 1 x Rockwool (33kg/m3) Thickness 245 mm

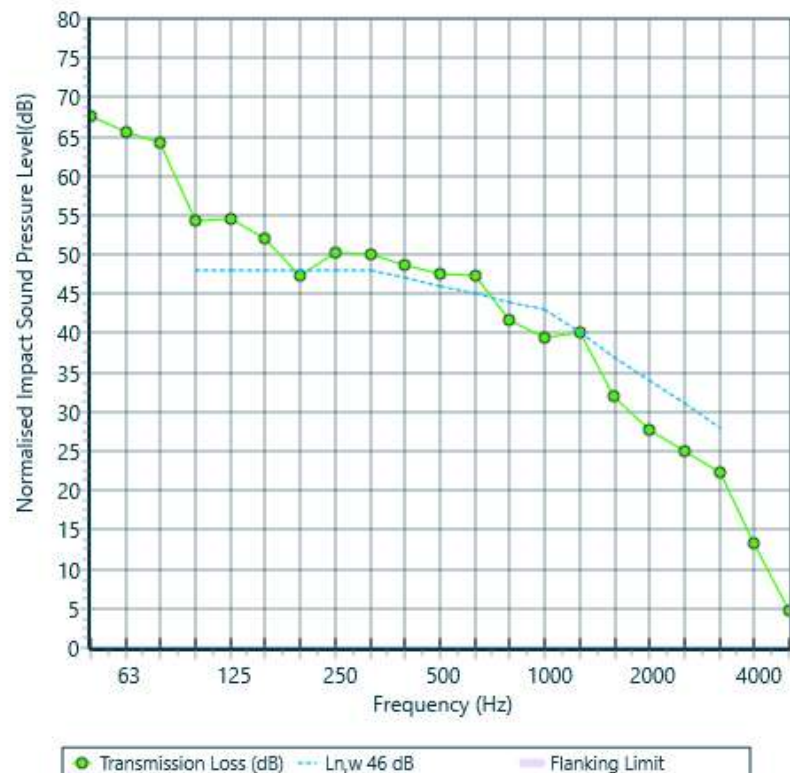
Panel 2 + 1 x 12 mm OSB (Oriented Strand Board)

Frame: Solid Joist; Cavity Width 145 mm ,Stud spacing 600 mm , 1 x Rockwool (33kg/m3) Thickness 145 mm

Panel 3 + 2 x 13 mm CSR Gyprock 13mm standard plasterboard

Floor Cover: 2 layers of 12.5mm Fermacell on 40mm foil backed ROXUL "Celotex" 165kg/m³ mineral Thickness 95 mm

freq.(Hz)	TL(dB)	TL(dB)
50	68	
63	66	71
80	64	
100	54	
125	55	59
160	52	
200	47	
250	50	54
315	50	
400	49	
500	48	53
630	47	
800	42	
1000	39	45
1250	40	
1600	32	
2000	28	34
2500	25	
3150	22	
4000	13	23
5000	5	



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. 0771

Job Name:

Job No.:

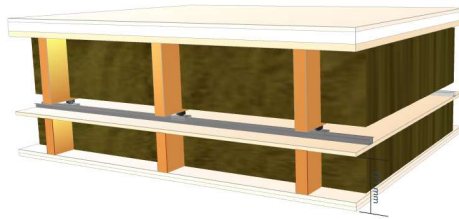
Initials:Kaarel Sepp

Date:17.05.2018

File Name:



Notes:



R_w 60 dB

$C_{50-5000}$ -6 dB

$C_{tr, 50-5000}$ -18 dB

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

Panel Size = 2,7 m x 4,0 m

Partition surface mass = 93,5 kg/m²

System description

Panel 1 : 1 x 13 mm CSR Gyprock 13mm standard plasterboard
+ 1 x 22 mm MDF

+ 1 x 36 mm Rubber

Frame: Solid Joist with rubber isolation clip; Cavity Width 50 mm ;Stud spacing 600 mm , 1 x Rockwool (33kg/m³) Thickness 245 mm

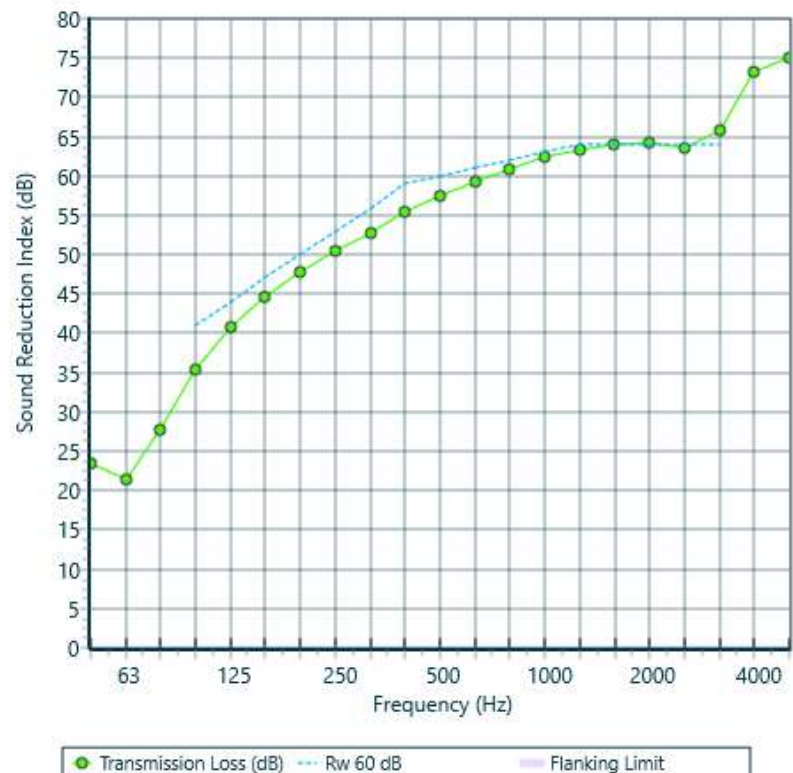
Panel 2 + 1 x 12 mm OSB (Oriented Strand Board)

Frame: Solid Joist; Cavity Width 12 mm ;Stud spacing 600 mm , 1 x Rockwool (33kg/m³) Thickness 145 mm

Panel 3 + 2 x 13 mm CSR Gyprock 13mm standard plasterboard

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

freq.(Hz)	TL(dB)	TL(dB)
50	23	
63	21	23
80	28	
100	35	
125	41	39
160	45	
200	48	
250	51	50
315	53	
400	55	
500	58	57
630	59	
800	61	
1000	62	62
1250	63	
1600	64	
2000	64	64
2500	64	
3150	66	
4000	73	69
5000	75	



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. 0771

Job Name:

Job No.:

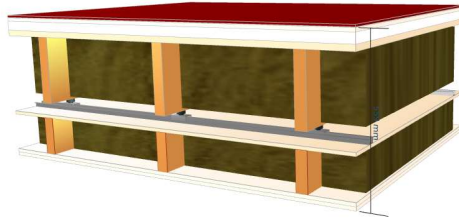
Initials:Kaarel Sepp

Date:17.05.2018

File Name:



Notes:



$L_{n,w}$ 58 dB

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

Panel Size = 2,7 m x 4,0 m

Partition surface mass = 71,8 kg/m²

System description

Panel 1 : 1 x 13 mm CSR Gyprock 13mm standard plasterboard
+ 1 x 22 mm MDF

+ 1 x 36 mm Rubber

Frame: Solid Joist with rubber isolation clip; Cavity Width 50 mm ;Stud spacing 600 mm ; 1 x Rockwool (33kg/m³) Thickness 245 mm

Panel 2 + 1 x 12 mm OSB (Oriented Strand Board)

Frame: Solid Joist; Cavity Width 12 mm ;Stud spacing 600 mm ; 1 x Rockwool (33kg/m³) Thickness 145 mm

Panel 3 + 2 x 13 mm CSR Gyprock 13mm standard plasterboard

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

freq.(Hz)	TL(dB)	TL(dB)
50	55	65
63	59	
80	64	
100	56	59
125	52	
160	54	
200	61	
250	57	
315	52	63
400	53	
500	49	
630	44	
800	41	49
1000	43	
1250	46	
1600	47	
2000	49	
2500	54	56
3150	53	
4000	39	
5000	32	53



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. 0771

Job Name:

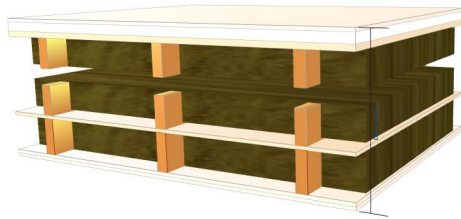
Job No.:

Initials:Kaarel Sepp

Date:17.05.2018

File Name:

Notes:



R_w 87 dB

$C_{50-5000}$ -13 dB

$C_{tr, 50-5000}$ -28 dB

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

Panel Size = 2,7 m x 4,0 m

Partition surface mass = 89,4 kg/m²

System description

Panel 1 : 1 x 13 mm CSR Gyprock 13mm standard plasterboard
+ 1 x 22 mm MDF

+ 1 x 36 mm Rubber

Frame: Separate Joists; Cavity Width 305 mm, Stud spacing 600 mm, 2 x Rockwool (33kg/m³) Thickness 120 mm

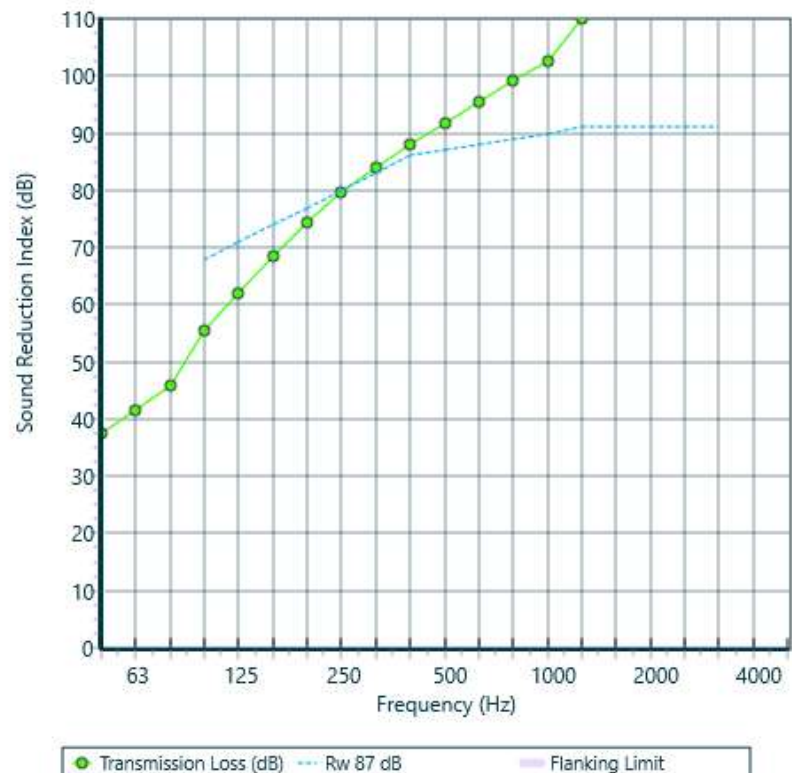
Panel 2 + 1 x 12 mm OSB (Oriented Strand Board)

Frame: Solid Joist; Cavity Width 145 mm, Stud spacing 600 mm, 1 x Rockwool (33kg/m³) Thickness 145 mm

Panel 3 + 2 x 13 mm CSR Gyprock 13mm standard plasterboard

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

freq.(Hz)	TL(dB)	TL(dB)
50	37	
63	42	40
80	46	
100	55	
125	62	59
160	68	
200	74	
250	80	78
315	84	
400	88	
500	92	91
630	95	
800	99	
1000	103	102
1250	110	
1600	118	
2000	117	115
2500	113	
3150	118	
4000	126	122
5000	129	



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. 0771

Job Name:

Job No.:

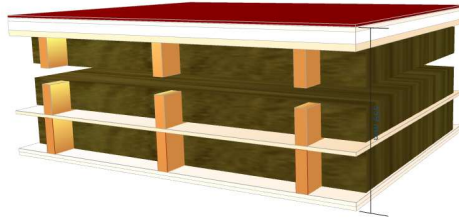
Date: 17.05.2018

File Name:

Initials: Kaarel Sepp



Notes:



$L_{n,w}$ 30 dB

Mass-air-mass resonant frequency = 0 Hz, 0 Hz
Panel Size = 2,7 m x 4,0 m
Partition surface mass = 67,7 kg/m²

System description

Panel 1 : 1 x 13 mm CSR Gyprock 13mm standard plasterboard
+ 1 x 22 mm MDF

+ 1 x 36 mm Rubber

Frame: Separate Joists; Cavity Width 305 mm, Stud spacing 600 mm, 2 x Rockwool (33kg/m³) Thickness 120 mm

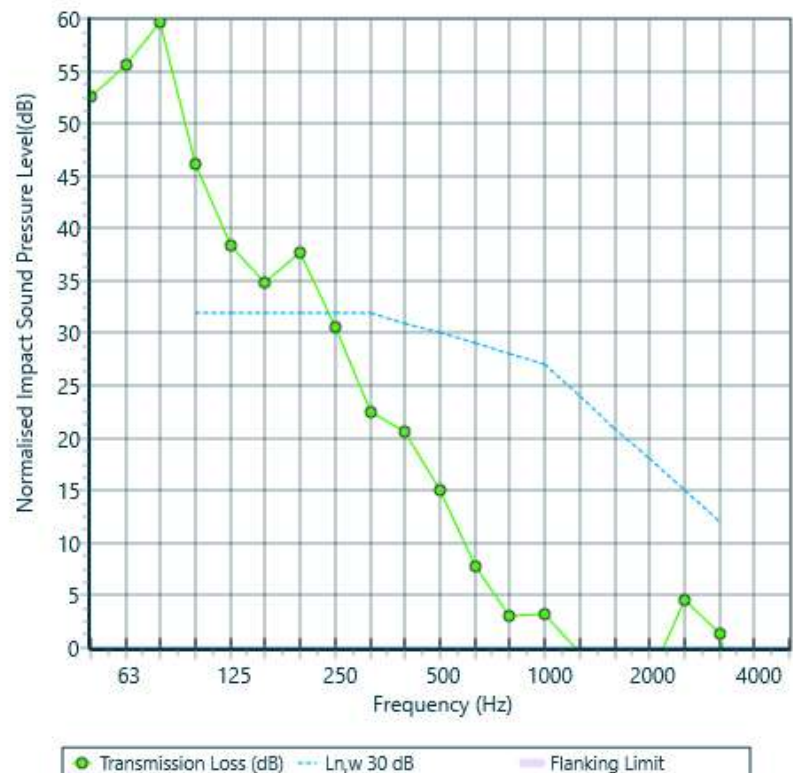
Panel 2 + 1 x 12 mm OSB (Oriented Strand Board)

Frame: Solid Joist; Cavity Width 145 mm, Stud spacing 600 mm, 1 x Rockwool (33kg/m³) Thickness 145 mm

Panel 3 + 2 x 13 mm CSR Gyprock 13mm standard plasterboard

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

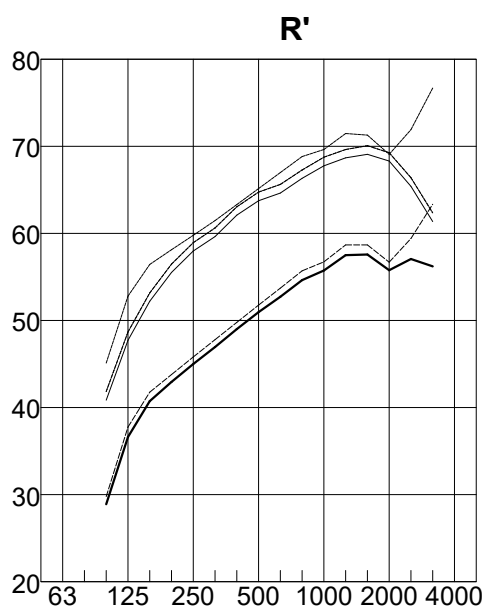
freq.(Hz)	TL(dB)	TL(dB)
50	53	
63	56	62
80	60	
100	46	
125	38	47
160	35	
200	38	
250	31	39
315	22	
400	21	
500	15	22
630	8	
800	3	
1000	3	7
1250	0	
1600	-7	
2000	-3	6
2500	5	
3150	1	
4000	-14	2
5000	-22	



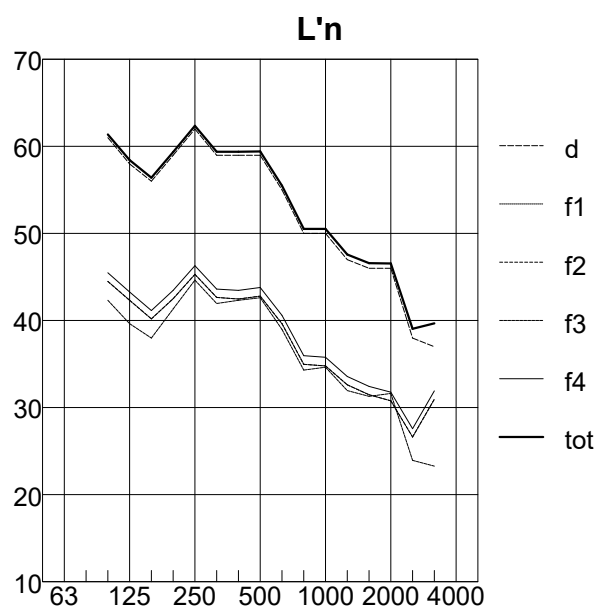
Worksheet-Table

Sending Room			Junction	Receiving Room		R'w		L'n,w	
M t	Basic Element	Additional Lay	Type-No	Basic Element	Additional Lay	dB	%	dB	%
X d	KSP lisakihtidega vahelagi					55.1	78	54.4	88
X f1	KSP jäikade sidemetega sein 2 kips		20	KSP jäikade sidemetega sein 2 kips		66.4	6	39.6	3
X f2	KSP jäikade sidemetega sein 2 kips		20	KSP jäikade sidemetega sein 2 kips		66.4	6	39.6	3
X f3	KSP õhkvahega sein Soundcheck		20	KSP õhkvahega sein Soundcheck		68.7	3	38.1	2
X f4	KSP jäikade sidemetega sein 2 kips		20	KSP jäikade sidemetega sein 2 kips		65.4	7	40.5	4
				Total:		54.0	100	55.1	100

Resulting Diagram



----- d
 ——— f1
 ----- f2
 ——— f3
 ——— f4
 ——— tot



----- d
 ——— f1
 ----- f2
 ——— f3
 ——— f4
 ——— tot

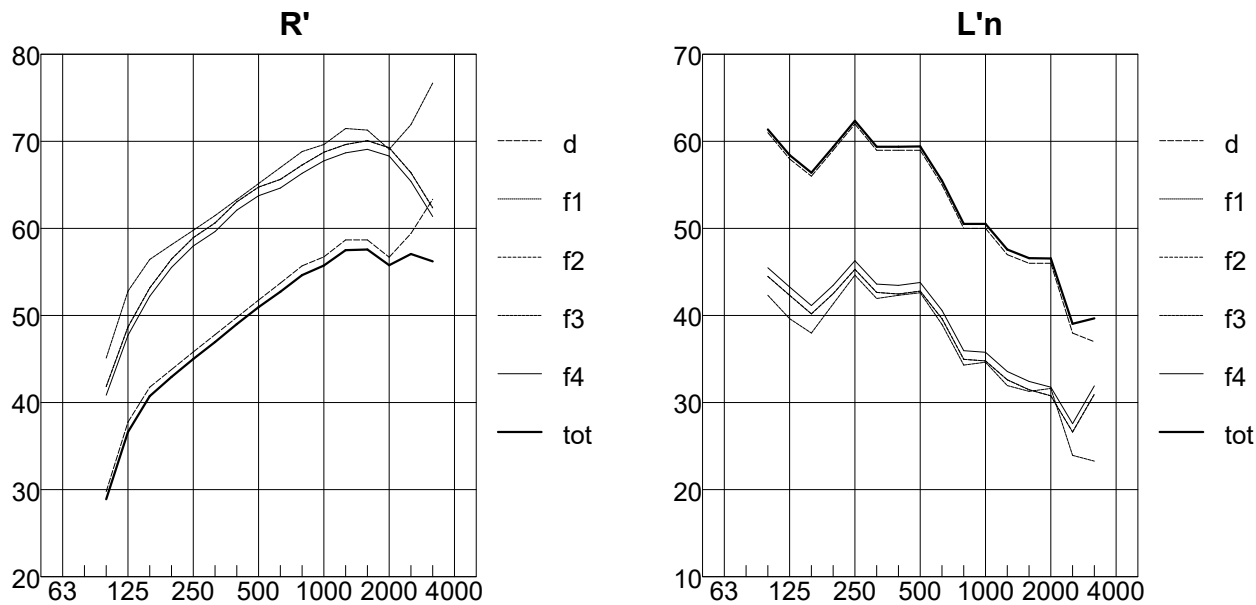
R'w = 54
 R'w + C = 52
 R'w + Ctr = 46

L'n,w = 56
 L'n,w + Ci = 54

Worksheet-Table

Sending Room			Junction	Receiving Room		R'w		L'n,w + Ci	
M t	Basic Element	Additional Lay	Type-No	Basic Element	Additional Lay	dB	%	dB	%
X d	KSP lisakihtidega vahelagi					55.1	78	53.4	90
X f1	KSP jäikade sidemetega sein 2 kips		20	KSP jäikade sidemetega sein 2 kips		66.4	6	37.6	2
X f2	KSP jäikade sidemetega sein 2 kips		20	KSP jäikade sidemetega sein 2 kips		66.4	6	37.6	2
X f3	KSP õhkvahega sein Soundcheck		20	KSP õhkvahega sein Soundcheck		68.7	3	37.1	2
X f4	KSP jäikade sidemetega sein 2 kips		20	KSP jäikade sidemetega sein 2 kips		65.4	7	38.5	3
				Total:		54.0	100	54.1	100

Resulting Diagram



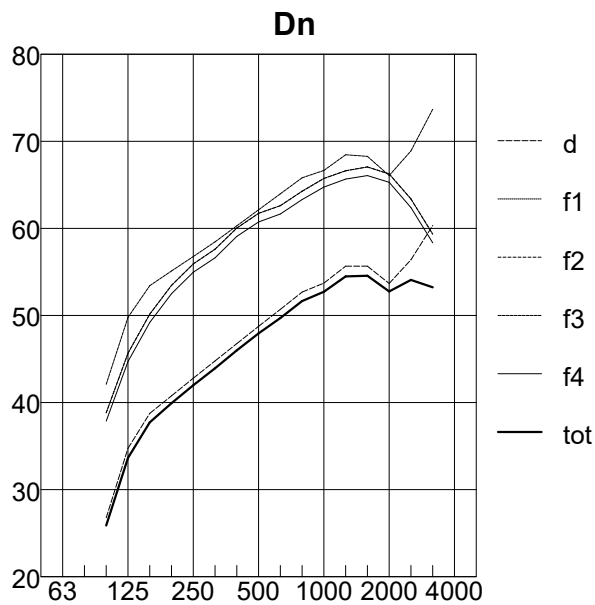
R'w = 54
R'w + C = 52
R'w + Ctr = 46

L'n,w = 56
L'n,w + Ci = 54

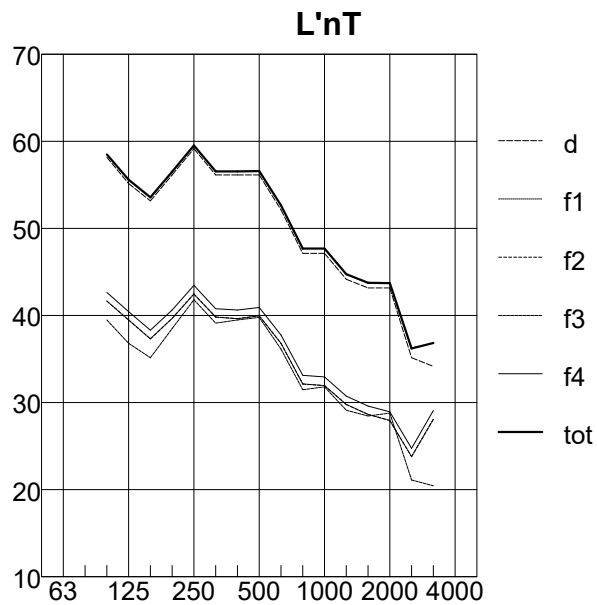
Worksheet-Table

Sending Room			Junction	Receiving Room		Dn,w		L'nT,w (0.5 s)		
M	t	Basic Element	Additional Lay	Type-Nc	Basic Element	Additional Lay	dB	%	dB	%
X	d	KSP lisakihtidega vahelagi					52.1	78	51.6	89
X	f1	KSP jäikade sidemetega sein 2 kips		20	KSP jäikade sidemetega sein 2 kips		63.4	6	36.7	3
X	f2	KSP jäikade sidemetega sein 2 kips		20	KSP jäikade sidemetega sein 2 kips		63.4	6	36.7	3
X	f3	KSP õhkvahega sein Soundcheck		20	KSP õhkvahega sein Soundcheck		65.7	3	35.3	2
X	f4	KSP jäikade sidemetega sein 2 kips		20	KSP jäikade sidemetega sein 2 kips		62.4	7	37.7	4
						Total:	51.0	100	52.2	100

Resulting Diagram



Dn,w = 51
Dn,w + C = 49
Dn,w + Ctr = 43

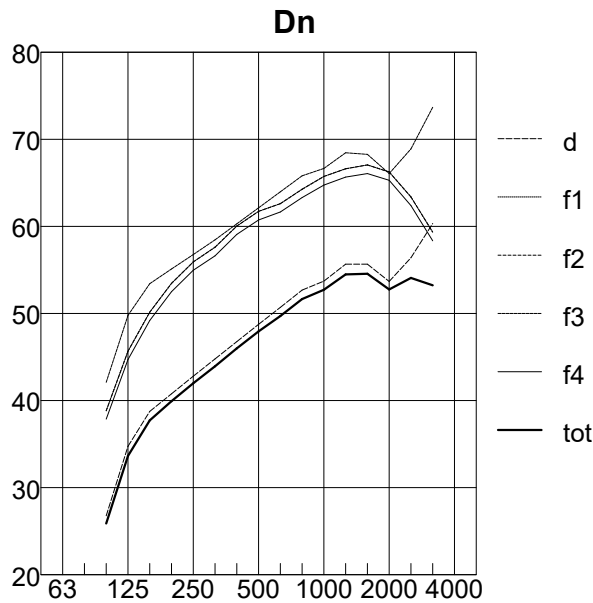


L'nT,w = 53
L'nT,w + Ci = 51

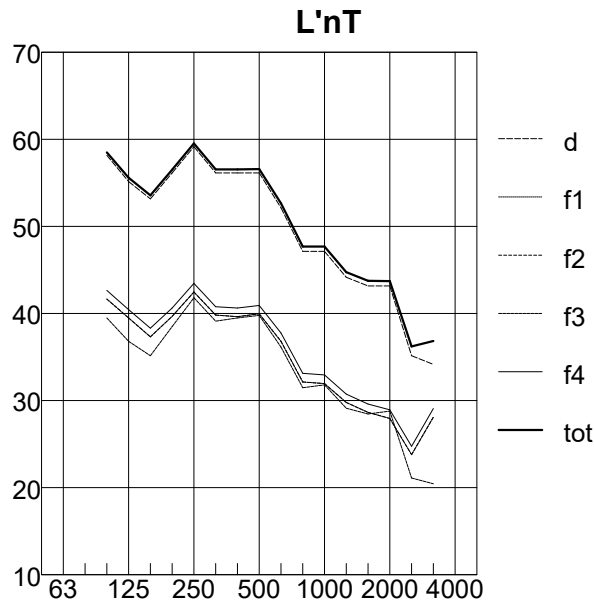
Worksheet-Table

Sending Room			Junction	Receiving Room		Dn,w		L'nT,w (0.5 s) +		
M	t	Basic Element	Additional Lay	Type-No	Basic Element	Additional Lay	dB	%	dB	%
X	d	KSP lisakihtidega vahelagi					52.1	78	50.6	91
X	f1	KSP jäikade sidemetega sein 2 k		20	KSP jäikade sidemetega sein 2 k		63.4	6	34.7	2
X	f2	KSP jäikade sidemetega sein 2 k		20	KSP jäikade sidemetega sein 2 k		63.4	6	34.7	2
X	f3	KSP õhkvahega sein Soundcheck		20	KSP õhkvahega sein Soundcheck		65.7	3	33.3	2
X	f4	KSP jäikade sidemetega sein 2 k		20	KSP jäikade sidemetega sein 2 k		62.4	7	35.7	3
						Total:	51.0	100	51.2	100

Resulting Diagram



Dn,w = 51
Dn,w + C = 49
Dn,w + Ctr = 43

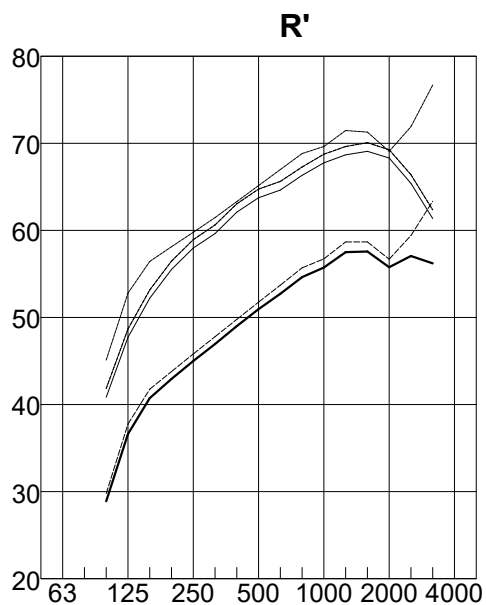


L'nT,w = 53
L'nT,w + Ci = 51

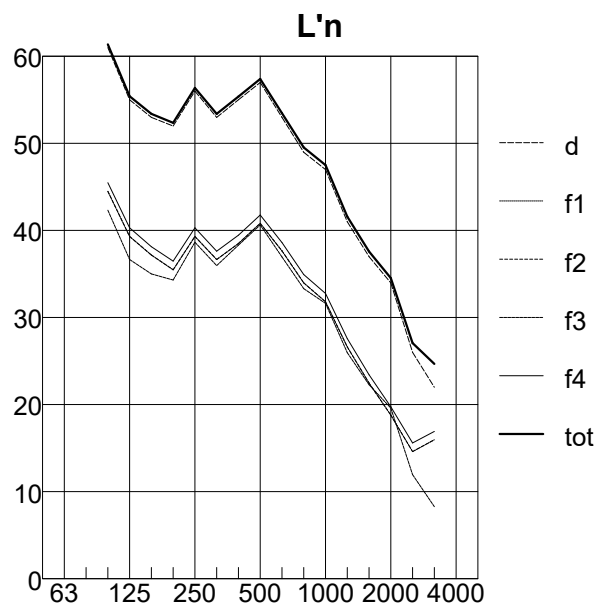
Worksheet-Table

M t	Sending Room		Junction Type-No	Receiving Room		R'w		L'n,w	
	Basic Element	Additional Lay		Basic Element	Additional Lay	dB	%	dB	%
X d	KSP lisakihtidega vahelagi uus pöran					55.1	78	50.3	91
X f1	KSP jäikade sidemetega sein 2 kipsp		20	KSP jäikade sidemetega sein 2 kip		66.4	6	34.3	2
X f2	KSP jäikade sidemetega sein 2 kipsp		20	KSP jäikade sidemetega sein 2 kip		66.4	6	34.3	2
X f3	KSP õhkvahega sein Soundcheck		20	KSP õhkvahega sein Soundcheck		68.7	3	33.3	2
X f4	KSP jäikade sidemetega sein 2 kipsp		20	KSP jäikade sidemetega sein 2 kip		65.4	7	35.3	3
				Total:		54.0	100	50.7	100

Resulting Diagram



R'w = 54
R'w + C = 52
R'w + Ctr = 46

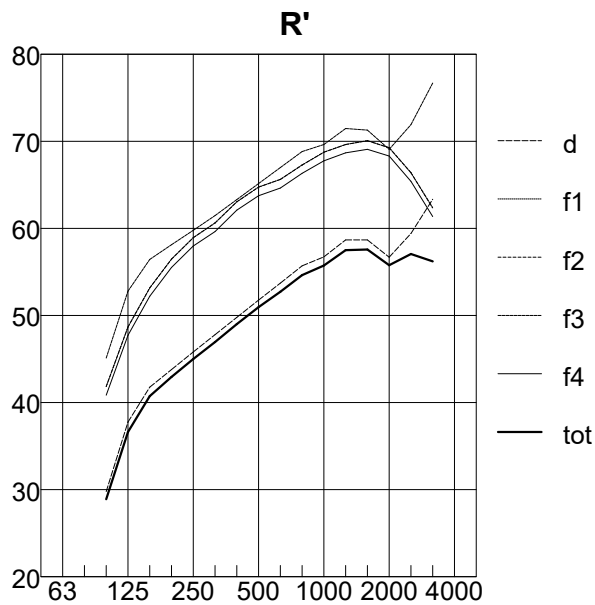


L'n,w = 51
L'n,w + Ci = 51

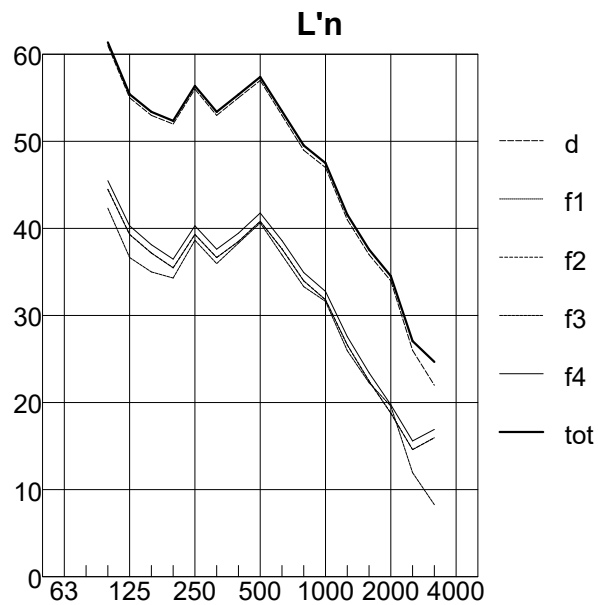
Worksheet-Table

M t	Sending Room		Junction Type-No	Receiving Room		R'w		L'n,w + Ci	
	Basic Element	Additional Lay		Basic Element	Additional Lay	dB	%	dB	%
X d	KSP lisakihtidega vahelagi uus põran					55.1	78	50.3	91
X f1	KSP jäikade sidemetega sein 2 kips		20	KSP jäikade sidemetega sein 2 kip		66.4	6	34.3	2
X f2	KSP jäikade sidemetega sein 2 kips		20	KSP jäikade sidemetega sein 2 kip		66.4	6	34.3	2
X f3	KSP õhkvahega sein Soundcheck		20	KSP õhkvahega sein Soundcheck		68.7	3	33.3	2
X f4	KSP jäikade sidemetega sein 2 kips		20	KSP jäikade sidemetega sein 2 kip		65.4	7	35.3	3
				Total:		54.0	100	50.7	100

Resulting Diagram



R'w = 54
R'w + C = 52
R'w + Ctr = 46

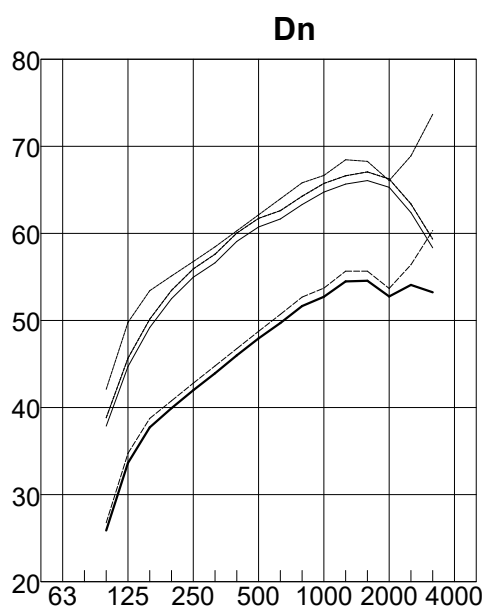


L'n,w = 51
L'n,w + Ci = 51

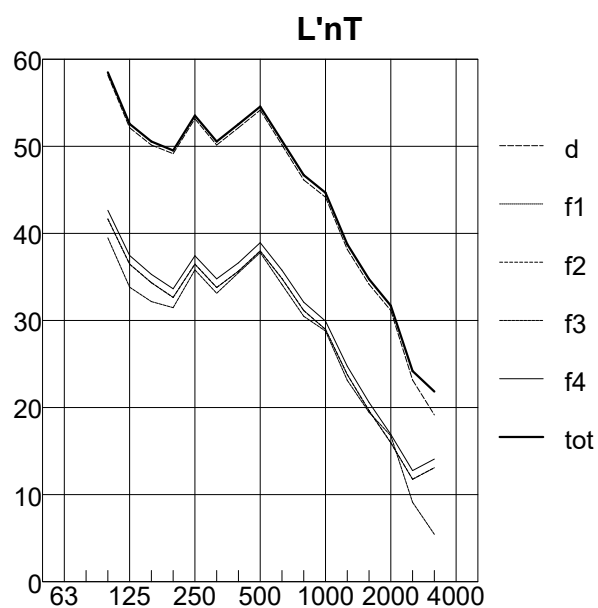
Worksheet-Table

M	t	Sending Room		Junction	Receiving Room		Dn,w		L'nT,w (0.5 s)	
		Basic Element	Additional Lay		Basic Element	Additional Lay	dB	%	dB	%
X	d	KSP lisakihtidega vahelagi uus põrara					52.1	78	47.4	91
X	f1	KSP jäikade sidemetega sein 2 kips		20	KSP jäikade sidemetega sein 2 kips		63.4	6	31.5	2
X	f2	KSP jäikade sidemetega sein 2 kips		20	KSP jäikade sidemetega sein 2 kips		63.4	6	31.5	2
X	f3	KSP õhkvahega sein Soundcheck		20	KSP õhkvahega sein Soundcheck		65.7	3	30.5	2
X	f4	KSP jäikade sidemetega sein 2 kips		20	KSP jäikade sidemetega sein 2 kips		62.4	7	32.5	3
					Total:		51.0	100	47.9	100

Resulting Diagram



Dn,w = 51
Dn,w + C = 49
Dn,w + Ctr = 43

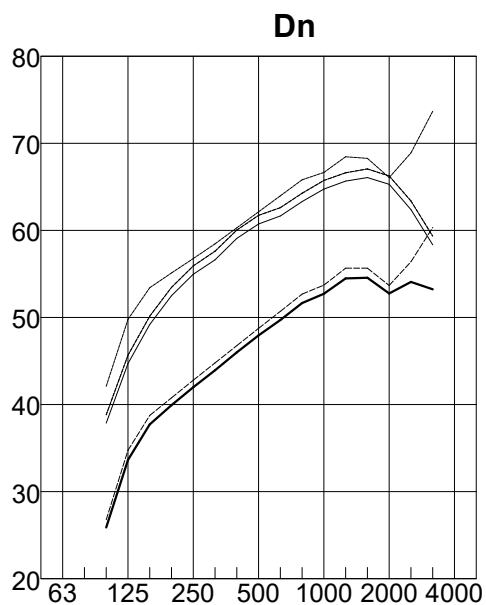


L'nT,w = 48
L'nT,w + Ci = 48

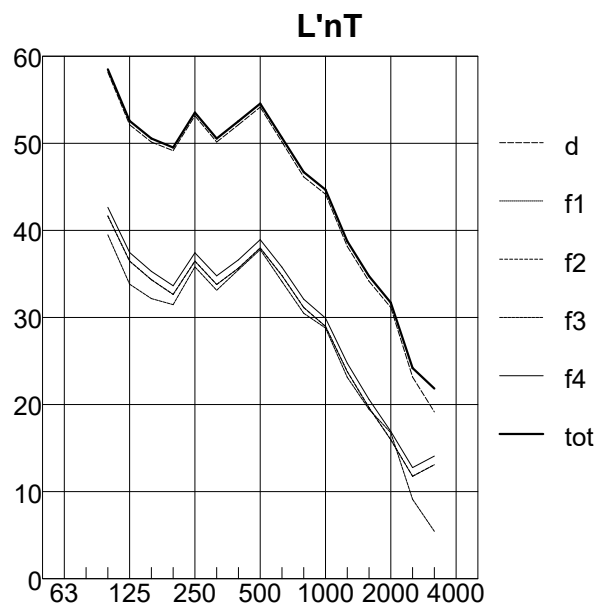
Worksheet-Table

Sending Room			Junction	Receiving Room		Dn,w		L'nT,w (0.5 s) +	
M t	Basic Element	Additional La	Type-No	Basic Element	Additional La	dB	%	dB	%
X d	KSP lisakihtidega vahelagi uus põra					52.1	78	47.4	91
X f1	KSP jäikade sidemetega sein 2 kips		20	KSP jäikade sidemetega sein 2 ki		63.4	6	31.5	2
X f2	KSP jäikade sidemetega sein 2 kips		20	KSP jäikade sidemetega sein 2 ki		63.4	6	31.5	2
X f3	KSP õhkvahega sein Soundcheck		20	KSP õhkvahega sein Soundchec		65.7	3	30.5	2
X f4	KSP jäikade sidemetega sein 2 kips		20	KSP jäikade sidemetega sein 2 ki		62.4	7	32.5	3
				Total:		51.0	100	47.9	100

Resulting Diagram



----- d
 — f1
 ----- f2
 ----- f3
 — f4
 — tot



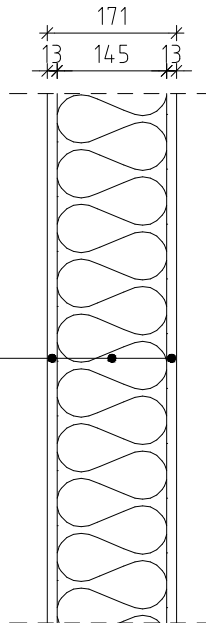
----- d
 — f1
 ----- f2
 ----- f3
 — f4
 — tot

Dn,w = 51
 Dn,w + C = 49
 Dn,w + Ctr = 43

L'nT,w = 48
 L'nT,w + Ci = 48

Lisa 2. Tarindite joonised

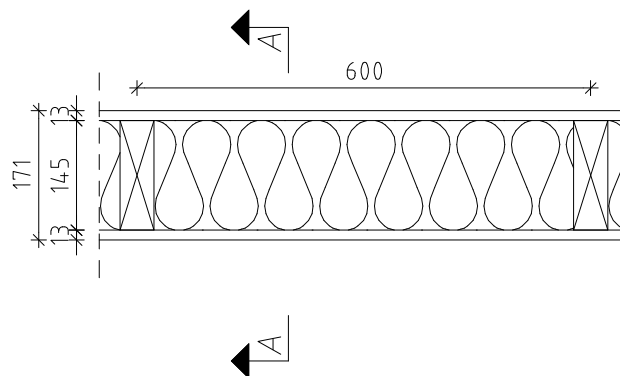
A-A



Kipsplaat 13 mm

Karkassipostid 45x145 mm /
soojustusmaterjal 145 mm

Kipsplaat 13 mm



TTÜ INSENERITEADUSKOND

Magistritöö

Leht/Lehti:

1/6

Koostaja:

Kaarel Sepp

Juhendaja:

Marko Ründva

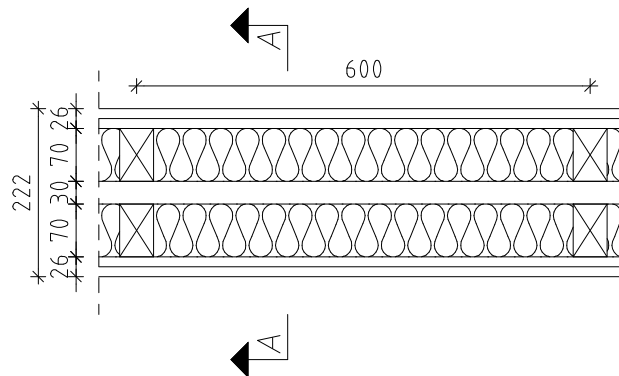
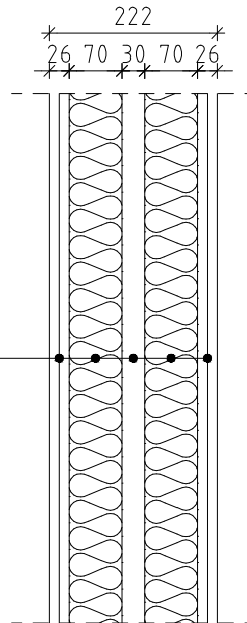
**Jäikade sidemetega
puitkarkassvahesein**

Ehituse ja arhitektuuri instituut

Heliisolatsiooninõute täitmine
kergkonstruktsioonidest hoonetes

A-A

Kipsplaadid 2x13 mm
Karkassipostid 45x70 mm /
Rockwool soojustusmaterjal 70 mm
Õhkvahe 30 mm
Karkassipostid 45x70 mm /
Rockwool soojustusmaterjal 70 mm
Kipsplaadid 2x13 mm



	TTÜ INSENERITEADUSKOND	Magistritöö	Leht/Lehti: 2/6
Koostaja: Kaarel Sepp		Õhkvahega puitkarkassvahesein	
Juhendaja: Marko Ründva			
Ehituse ja arhitektuuri instituut		Heliisolatsiooninõute täitmine kergkonstruktsioonidest hoonetes	

Tegelik tarind

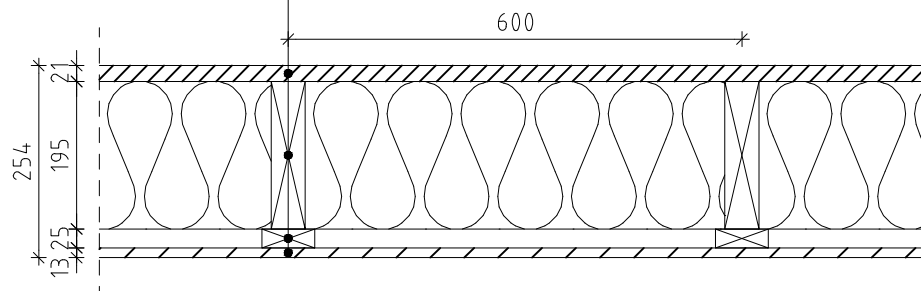
Puitlaastplaat 21 mm

Puitsõrestik 45x195 mm, s=600 mm

soojustusmaterjal 195 mm

Puitroovitus 25x70 mm, s=600 mm

Kipsplaat 13 mm



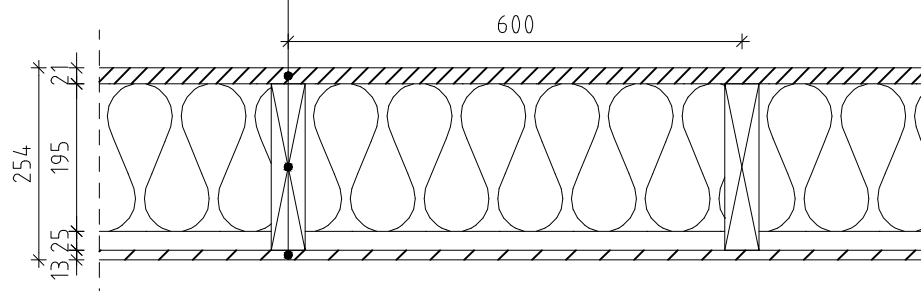
Arvutusskeemi lihtsustus

Puitlaastplaat 21 mm

Puitsõrestik 45x220 mm, s=600 mm

soojustusmaterjal 195 mm

Kipsplaat 13 mm



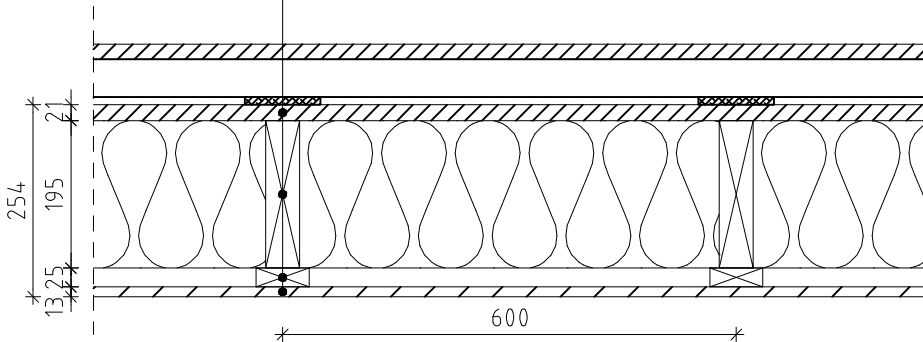
	TTÜ INSENERITEADUSKOND	Magistritöö	Leht/Lehti: 3/6
Koostaja: Kaarel Sepp		Tüüpiline puitvahelagi	
Juhendaja: Marko Ründva			
Ehituse ja arhitektuuri instituut		Heliisolatsiooninõute täitmine kerkkonstruktsioonidest hoonetes	

Võimalik paranduslahendus

Kummipuksidel roovitis, s=600 mm

Puitsõrestik 45x195 mm, s=600 mm

Puitroovitus 25x70 mm, s=600 mm



TTÜ INSENERITEADUSKOND

Magistritöö

4/6

Kaarel Sepp

Marko Ründva

Tüüpiline puitvahelagi, paranduslahendus

Ehituse ja arhitektuuri instituut

Heliisolatsiooninõute täitmine kergkonstruktsioonidest hoonetes

Puitlaastplaat 16 mm

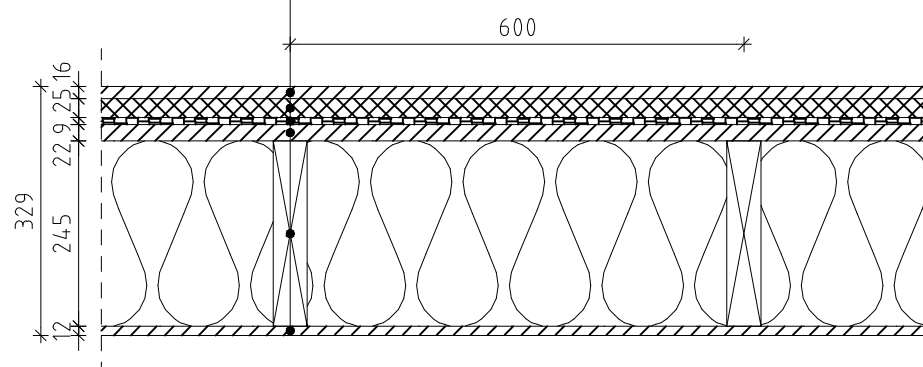
Põrandasoojustusmatt 25 mm
(arvutustes kummimatt 25 mm)

Kipsplaat 9 mm

Puitlaastplaat 22 mm

Puitsõrestik 45x245 mm, s=600 mm
soojustusmaterjal 245 mm

Tsementplaat Aquafire 13 mm



	TTÜ INSENERITEADUSKOND	Magistritöö	Leht/Lehti: 5/6
Koostaja: Kaarel Sepp		Lisakihtidega puitvahelagi	
Juhendaja: Marko Ründva			
Ehituse ja arhitektuuri instituut		Heliisolatsiooninõute täitmine kergkonstruktsioonidest hoonetes	

Kipsplaat 13 mm

Akustiline põrandaplaat 36 mm
(tootja poolt täpsustamata)

Puitkiudplaat 22 mm

Puitsõrestik 45x195 mm, s=600 mm
soojustusmaterjal 195 mm

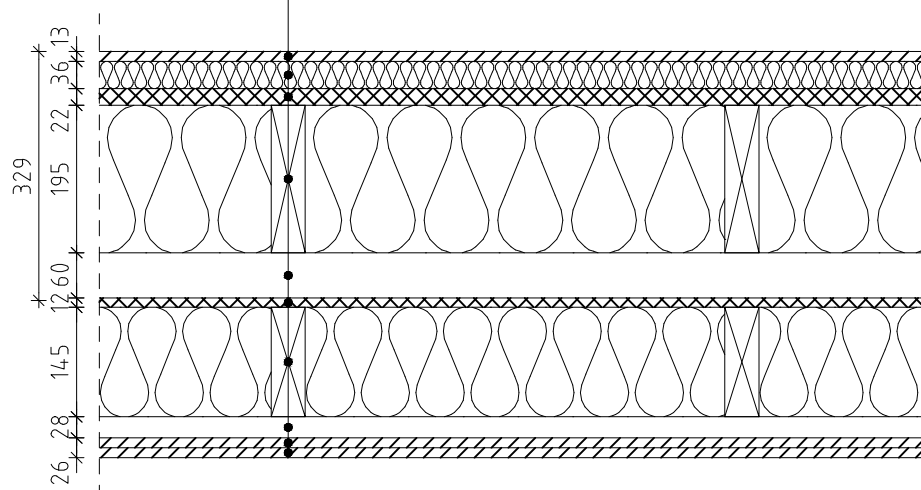
Õhkvahe 60 mm

Puitlaastplaat 12 mm

Puitsõrestik 45x145 mm, s=600 mm
soojustusmaterjal 145 mm

Roovitus 28x70 mm, s=400 mm

2 kipsplaati, kokku 26 mm



TTÜ INSENERITEADUSKOND

Magistritöö

Leht/Lehti:

6/6

Koostaja:

Kaarel Sepp

Juhendaja:

Marko Ründva

Ruummoodulite vaheline
puitvahelagi

Ehituse ja arhitektuuri instituut

Heliisolatsiooninõute täitmine
kergkonstruktsioonidest hoonetes