

2018 • 2019
Faculteit Industriële ingenieurswetenschappen
master in de industriële wetenschappen: bouwkunde

Masterthesis

Onderzoek en verbetering van de akoestische performantie van Warsco-units

PROMOTOR :
Prof. dr. ir. Herve DEGEE

PROMOTOR :
ing. Mark BROUWERS

Tim Poncelet, Jan Rochus

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: bouwkunde

Gezamenlijke opleiding UHasselt en KU Leuven



2018•2019

Faculteit Industriële ingenieurswetenschappen
master in de industriële wetenschappen: bouwkunde

Masterthesis

Onderzoek en verbetering van de akoestische performantie van Warsco-units

PROMOTOR :

Prof. dr. ir. Herve DEGEE

PROMOTOR :

ing. Mark BROUWERS

Tim Poncelet, Jan Rochus

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: bouwkunde



KU LEUVEN

Woord vooraf

Deze masterproef is het sluitstuk van het opleidingsonderdeel onderzoek en communicatie, en daarmee ook het einde van onze opleiding als industrieel ingenieurs in de bouwkunde. Dit in combinatie met de bachelorproef laat ons toe om te stellen dat we al wat succes geboekt hebben in het onderzoeken naar nieuwe technologische ideeën en onderwerpen die in de praktijk toepasbaar en realiseerbaar zullen zijn. Dit succes was echter niet mogelijk geweest zonder de uitgebreide kennis die we verworven hebben tijdens onze gezamenlijke vierjarige opleiding aan de universiteiten UHasselt en KU Leuven.

Om als student een project als dit tot een goed einde te brengen is er echter niet alleen behoefte aan voldoende kennis en vaardigheden van de onszelf, maar ook aan goede begeleiding door onze interne en externe promotors. Eveneens externe specialisten, zoals de medewerkers van het WTCB en de bedrijfswereld, spelen hier een belangrijke rol in. Daarom willen we in dit onderdeel even de aandacht geven aan deze personen om ze oprecht te bedanken voor de hulp die zij ons geboden hebben.

Ten eerste zouden we graag onze interne promotor bedanken. Prof. Dr. Ir. Herve Degée steunde ons in het onderzoek door bij te sturen in de juiste richting wanneer dit nodig was en hielp tevens ook mee met het zoeken naar oplossingen, gesteund door de nodige tips om van start te kunnen gaan. Als promotor bood hij een houvast waarop we regelmatig konden terugvallen wanneer het onderzoek zich in een moeilijke fase bevond.

Onze externe promotor, de heer ing. Mark Brouwers, bedanken we oprecht omdat we door zijn inzet en ideeën hebben kunnen meewerken aan dit erg leerrijke en innovatieve project. Het bedrijf zelf, Warsco, bedanken we voor de kans om de officiële metingen uit te laten voeren door deze te financieren en de nodige units, gegevens en materialen ter beschikking te stellen.

De heer Dr. Ir. Pieter Schevenels bedanken we voor het uitvoeren en opvolgen van de officiële lucht- en contactgeluidsmetingen. Daarnaast willen we u ook bedanken om ons de uitgebreide meetverslagen te bezorgen hierbij de toestemming te geven om deze te mogen gebruiken in het vervolledigen van ons onderzoek en scriptie.

Daarnaast dragen wij ook dank uit naar de personen uit de bedrijfswereld die ons geholpen hebben met het zoeken naar en het kosteloos bezorgen van de best toepasselijke testmaterialen. Dhr. Michael Vanstraelen, werkzaam voor CDM, heeft voor ons met behulp van berekeningen in verband met onze situatie het best mogelijke materiaal gekozen uit het uitgebreide gamma van akoestische ontkoppelingen. Ook het bedrijf Insulco zijn we dankbaar voor het opsturen van een testmonster van insulWood.

Tenslotte willen we ook de medewerkers van het WTCB oprecht bedanken om voor ons de uitgebreide informatie verstrekken die voor ons relevant en toepasbaar was. Jullie vriendelijke en vlotte hulp heeft ons enorm geholpen in het opbouwen van een degelijke literatuurstudie en het vormen van ideeën m.b.t. de te zoeken oplossingen. Deze informatie heeft uiteindelijk een grote meerwaarde kunnen betekenen voor ons onderzoek.

Inhoudsopgave

Woord vooraf	1
Inhoudsopgave	3
Lijst van tabellen.....	5
Lijst van figuren	7
Verklarende woordenlijst	9
Abstract	11
Abstract in English.....	13
1 Inleiding.....	15
2 Literatuurstudie.....	17
2.1 Materialen en hun akoestische eigenschappen.....	17
2.2 Akoestische performantie van lichte stalen gebouwen.....	18
2.2.1 Lichte stalen structuren.....	18
2.2.2 Akoestisch ontwerp van lichte stalen structuren	19
2.2.3 Scheidingswanden.....	19
2.2.4 Scheidingsvloeren.....	20
2.2.5 Flankerende transmissie.....	21
2.2.6 Doorvoeren voor technieken.....	22
2.3 Geluidsisolatie van houten vloeren.....	22
2.3.1 Algemeen.....	22
2.3.2 Luchtgeluidsisolatie tussen twee ruimten.....	23
2.3.3 Contactgeluidsisolatie bij houten vloeren.....	24
2.4 Lichte zwevende dekvloeren	26
2.4.1 Bereikbare contactgeluidisolatieverbetering met een lichte zwevende dekvloer.....	26
2.4.2 Contactgeluidsisolatie tussen ruimten.....	26
3 Onderzoek.....	31
3.1 Methode	31
3.2 Opbouw van de units.....	31
3.3 Akoestische analyse van de bestaande situatie	33
3.4 Toepasbare verbeteringssystemen	35
3.4.1 Verbetering contactgeluid	35
3.4.2 Verbetering flankerende transmissie.....	35
3.5 Marktonderzoek.....	35
3.5.1 Akoestische ontkoppeling van de oplegpunten.....	36
3.5.2 Zwevende dekvloer.....	36

4	Testen	39
4.1	Doel van de testen.....	39
4.2	Keuze testmaterialen.....	40
4.2.1	CDM-strip.....	40
4.2.2	Insulco-InsulWood	42
4.3	Geldende Europese normen	43
4.3.1	Luchtgeluid	43
4.3.2	Contactgeluid.....	44
4.4	Testmethoden	46
4.4.1	Meting van de nagalmtijd in de ontvangstruimte	46
4.4.2	Meting van de luchtgeluidsisolatie	47
4.4.3	Meting van het contactgeluid	49
4.5	Testopstellingen	51
4.5.1	Algemeen.....	51
4.5.2	Opsomming van de uitgevoerde metingen in chronologische volgorde	53
4.6	Hypothese	56
5	Testresultaten.....	57
5.1	Resultaten luchtgeluidmetingen	57
5.2	Resultaten contactgeluidmetingen.....	58
6	Bespreking van de resultaten	61
6.1	Luchtgeluid	61
6.2	Contactgeluid	62
7	Besluit.....	65
	Literatuurlijst	67
	Bijlagen.....	69
	Bijlagenlijst.....	69
7.1	Akoestisch rapport - Dienst 21. Metingen luchtgeluidisolatie (conform ISO 16283-1) v1	71
7.2	Akoestisch rapport - Dienst 22. Metingen contactgeluidisolatie (conform ISO 16283-2) v1	95

Lijst van tabellen

Tabel 1: Gestandaardiseerd geluidsdrukniveauverschil tussen twee ruimten bij residentiële bouw.....	43
Tabel 2: Eisen voor luchtgeluidsisolatie in schoolgebouwen	44
Tabel 3: Eisen voor het gestandaardiseerd contactniveauverschil	45
Tabel 4: Eisen voor contactgeluidisolatie in schoolgebouwen	45
Tabel 5: Overzicht meetopstellingen	52
Tabel 6: ééngetalswaarden van het gemeten gestandaardiseerd geluidsdrukniveauverschil.....	57
Tabel 7: ééngetalswaarden van het gemeten gestandaardiseerd contactgeluidniveau	58

Lijst van figuren

Figuur 1: Opbouw dubbele scheidingswand	20
Figuur 2: Opbouw platformvloer	21
Figuur 3: Opbouw Raftvloer	21
Figuur 4: Doorsnede wand-vloer aansluiting	22
Figuur 5: Psychoakoestische bevindingen en bijhorende prestaties van de vloer	23
Figuur 6: Flankerende transmissiewegen	23
Figuur 7: Schematische voorstelling houtskeletbouwvloer	25
Figuur 8: Contactgeluidsisolatieverbetering voor de resonantiefrequenties	26
Figuur 9: In het labo gemeten contactgeluid-isolatieverbetering van een droge lichte zwevende dekvloer aangebracht op drie verschillende houten vloerconstructies.....	27
Figuur 10: Gemeten contactgeluidisolatie tussen boven elkaar gelegen woningen voor en na het aanbrengen van een droge lichte zwevende dekvloer.....	28
Figuur 11: Gemeten contactgeluidisolatie tussen naast elkaar gelegen woningen voor en na het aanbrengen van een droge lichte zwevende dekvloer.....	28
Figuur 12: Gemeten contactgeluidisolatie (L_n herleid op 10 m^2) van een houten vloerconstructie	29
Figuur 13: Gemeten contactgeluidisolatie ($L_n T$ herleid op $0,5s$) tussen boven elkaar gelegen woningen in het houtskeletbouw project.	29
Figuur 14: Connectie langspoor met hoekprofiel.....	32
Figuur 15: Stalen draagconstructie voor de vloer	32
Figuur 16: Schematische voorstelling van de opleg tussen boven elkaar geplaatste units.....	34
Figuur 17: CDM-strips	36
Figuur 18: Flexidal Acoustrip 730	36
Figuur 19: Abriso Acoustic Reflex.....	37
Figuur 20: Insulco insulWood	37
Figuur 21: Resonantiefrequentie i.f.v. de belasting.....	41
Figuur 22: Zakking i.f.v de belasting	41
Figuur 23: Klaptoestel.....	47
Figuur 24: Meetmicrofoon.....	47
Figuur 25: Puntbron.....	48
Figuur 26: Meting door operator	48
Figuur 27: Gestandaardiseerd klopgeluidmachine	49
Figuur 28: Ter beschikking gestelde units	52
Figuur 29: Posities van de klopmachine	53
Figuur 30: Opstelling klopmachine bovenop zwevende dekvloer	54
Figuur 31: Plaatsing CDM-strips tussen de opleggingen	54
Figuur 32: Centreerpen en hijs-oog van de unit.....	55
Figuur 33: Resonantiefrequentie in functie van de belasting	56
Figuur 34: Vergelijking tussen luchtgeluidsmeting L_1 en L_2	57
Figuur 35: Vergelijking tussen contactgeluidmetingen C_1 , C_2 , C_3 en C_4	59
Figuur 36: Overzicht contactgeluidmetingen.....	63

Verklarende woordenlijst

Dynamische stijfheid

De dynamische stijfheid van een materiaal is de weerstand van het materiaal tegen vervormingen ten gevolge van dynamische krachten zoals drukverschillen ten gevolge van geluidsgolven. Deze waarde wordt uitgedrukt in een kracht in N per volumeverandering in mm^3 .

Resonantie

Resonantie van een materiaal is het trillen volgens een frequentie die gelijk is aan een ander materiaal, waarbij de trillingsenergie wordt doorgegeven via de lucht.

Octaafband

Een octaafband is een frequentiespectrum waarbij de grootste en de kleinste frequentie een factor twee van elkaar verschillen.

Witte ruis

Bij witte ruis heeft elke frequentie evenveel energie-inhoud. Bij hoger wordende octaafbanden neemt het frequentie-interval toe en dus ook de energiehoeveelheid. Per octaaf verdubbelt het geluidsniveau wat neerkomt een verschil van 3dB. [1]

Roze ruis

Roze ruis is een geluidssignaal waarbij elke octaafband éénzelfde energiehoeveelheid bezit. Des te lager de octaafband ligt, des te minder frequenties hij bezit. Dit wilt zeggen dat lage frequenties meer energie bezitten en dat er met één luidspreker, versterker toch nauwkeurige metingen kunnen uitgevoerd worden in de lage frequentie-range. [1]

Coïncidentiefrequentie

De coïncidentiefrequentie van een materiaal is een frequentie afhankelijk van het materiaal, waarop dit materiaal zal resoneren. Als de frequentie van het luchtgeluid gelijk is aan de coïncidentiefrequentie gaat het materiaal dus makkelijk trillen.

Abstract

Warsco produceert al meer dan 40 jaar modulaire gebouunits. Deze units waren oorspronkelijk afzonderlijke eenheden die tijdelijk op een bepaalde locatie stonden, maar zijn ondertussen geëvolueerd naar eenheden die bouwdoosgewijs in een groot geheel zullen terechtkomen. Bijgevolg breidt het toepassingsgebied sterk uit, waardoor enkele aspecten van de units herbekeken moeten worden. Eén van deze aspecten is de akoestische performantie aangezien daar tot op heden slechts weinig aandacht aan besteed werd. Deze masterproef beoogt om de akoestisch zwakke plekken bloot te leggen en een eerste aanzet te geven in verbeteringsmethoden.

Het onderzoek begint met een literatuurstudie waarin de reeds aanwezige kennis en bestaande systemen verzameld werden. Vervolgens werd de structurele opbouw van de units bestudeerd en werden hiervan de akoestische zwakke eigenschappen opgespoord. Aan de hand van de verworven kennis uit de literatuurstudie konden vervolgens verbeteringsvoorstellen gedaan worden die dan in de praktijk getest werden om hun effectiviteit binnen de verschillende akoestische aspecten te beproeven.

De oorspronkelijke situatie presteerde voldoende voor normaal akoestisch comfort, maar niet voor verhoogd comfort. De oplossingen bestonden uit enerzijds het plaatsen van een zwevende dekvloer en anderzijds het akoestisch ontkoppelen van de koude knoop tussen de units. De zwevende dekvloer verbeterde de contactgeluidsisolatie met 6dB en de ontkoppeling verbeterde de contactgeluidsisolatie met 2dB en de luchtgeluidsisolatie met 1dB.

Abstract in English

Warsco has been producing modular building units for more than 40 years. These units were originally separate units that were temporarily at a certain location but have since evolved into units that will be incorporated into a large assembly in a modular manner. As a result, the area of application is expanding considerably, which means that some aspects of the units need to be reviewed. One of these aspects is the acoustic performance, since until now little attention has been paid to it. This master's thesis aims to expose the acoustical weaknesses and to give an initial lead in improvement methods.

The research starts with a literature study in which the existing knowledge and systems were collected. Subsequently, the structural construction of the units was studied, and their acoustical weak properties were detected. Based on the knowledge gained from the literature study, improvement proposals could be made, which were then tested in practice to test their effectiveness within the various acoustic aspects.

The original situation performed sufficiently well for normal acoustic comfort, but not for increased comfort. The solutions consisted of, on the one hand, installing a floating floor and, on the other hand, acoustically decoupling the cold connection between the units. The floating screed improved the impact sound insulation by 6dB and the decoupling improved the impact sound insulation by 2dB and the airborne sound insulation by 1dB.

1 Inleiding

Warsco produceert reeds meer dan 40 jaar modulaire gebouunits. De naam bouwunit vertelt al veel over wat het eigenlijk inhoudt; een modulaire unit die als gebouw kan fungeren. De eerste toepassingen van deze units bestonden dan ook namelijk uit het tijdelijk construeren van ruimtes waar het plaatsen van een permanent gebouw overbodig was. De units zijn dan ook het meest bekend in hun toepassing als werfketen, tijdelijke klassen, mobiele kantoren, noodoplossingen bij het onbeschikbaar worden van gebouwen, ...

Omwille van het grote aantal voordelen van de modulaire units ten opzichte van de traditionele gebouwen is het toepassingsgebied van de units gedurende hun bestaansgeschiedenis echter sterk uitgebreid. Zo is hun toepassing geëvolueerd van enkelvoudige ruimtes tot bijvoorbeeld volwaardige kantoorgebouwen. De belangrijkste voordelen die hier oorzaak van zijn worden hieronder opgesomd:

90% prefabricage: De units worden voor het grootste stuk in de fabriek zelf vervaardigd, inclusief het plaatsen van de technieken. Enkel het samenvoegen van de units en het aansluiten van de nutsvoorzieningen dient in situ te gebeuren omwille van de beperkte transportmogelijkheden (afmetingen). Dit zorgt voor bijzonder weinig werken op de werf zelf, wat in sommige situaties van erg groot belang kan zijn (denk hierbij aan een druk bevolkte binnenstad).

Tot 70% kortere bouwtijd: Omdat de units voor een zodanig groot deel klaar zijn bij aankomst op de werf gaat het koppelen en aansluiten ervan bijzonder snel. Hierdoor kan er op enkele uren/enkele dagen (afhankelijk van het project) een volledig gebouw staan waar men volgens traditionele methodes maanden tot jarenlang aan gewerkt zou hebben.

Plaatsing zonder overlast: Door hun lage gewicht zijn de units eenvoudig verplaatsen manoeuvreerbaar. Dit is erg handig voor moeilijk bereikbare locaties zoals dicht bebouwde locaties. Verder zijn er geen zware machines en/of ingrijpende werken nodig die voor lawaai, stof, geurhinder, ... zouden zorgen. Hierdoor wordt de overlast tot een minimum beperkt.

Snel ontwerp: Omwille van de vergaande standaardisatie van de units bestaat het ontwerpen ervan slechts uit het verzamelen van voorkeuren uit de verschillende vaste mogelijkheden. Via tekenprogramma's kan men spelenderwijs het finale ontwerp samenstellen samen met de klant op maximum enkele uren tijd (voor eenvoudige projecten).

Goedkoper dan traditionele gebouwen: Dankzij de gestandaardiseerde bouwprocessen, snelle ontwerpen en het lage materiaalverbruik is het mogelijk om de kostprijs van de modulaire gebouwen erg laag te houden ten opzichte van traditionele gebouwen.

De toepassing van de modulaire units bereikt ondertussen het niveau van permanente woningen en woninguitbreidingen, schoolgebouwen, kantoorgebouwen, enz. In hun toepassing als tijdelijke oplossingen zijn er weinig/minder strenge eisen omtrent hun eigenschappen. Echter zal nu bij toepassingen zoals de uitbreiding van een woning, vormen van een permanent kantoorgebouw, ... de energieprestatie, akoestische eigenschappen, duurzaamheid, ... een veel belangrijker rol gaan spelen.

Omdat er tot op heden weinig aandacht besteed werd aan de akoestische eigenschappen van de units zal deze scriptie handelen over het onderzoek naar enkele van deze eigenschappen, met name de overdracht van lucht- en contactgeluid en hun onderlinge verhouding. Aangezien de Europese Norm eisen stelt aan deze prestaties is er nood aan het in kaart brengen van de huidige toestand, zodat er in een volgend stadium gezocht kan worden naar geschikte oplossingen ter verbetering ervan. De onderzoeksvraag waarop deze scriptie antwoord biedt luidt als volgt: Wat zijn de akoestische prestaties op vlak van lucht- en contactgeluid van Warsco gebouunits en hoe kunnen deze verbeterd worden?

Het antwoord op deze vraag wordt gezocht door de huidige opbouw te bestuderen en akoestisch zwakke plekken bloot te leggen. Vervolgens wordt aan de hand van een marktonderzoek gezocht naar mogelijke verbeteringsmogelijkheden die dan in een later stadium getest zullen worden. Uit deze testen zal blijken welke soort geluidsoverdracht het grootste probleem vormt en eveneens hoe de gekozen testmaterialen hier verbetering in brengen. Deze scriptie zal bijgevolg dus leiden tot een weergave van de akoestische prestaties en de probleempunten, en hun aandeel binnen de totale prestatie van de units. Eveneens zullen de verbeteringen die de geteste materialen verwezenlijken weergegeven worden in de testresultaten. Gezien de beperkte periode waarin het onderzoek heeft kunnen plaatsvinden vormt het een goede aanzet tot verdere optimalisatie van de hierin verworven kennis.

Hoofdstuk 2 bespreekt de bestaande relevante kennis rond de akoestische prestaties van lichte gebouwen, gekende oplossingsmethoden enzovoort om een basis te vormen voor de rest van het onderzoek. Vervolgens wordt in hoofdstuk 3 kort overlopen hoe het onderzoek zelf te werk gaat en welke stappen er ondernomen werden. Hoofdstuk 4 geeft de bestaande opbouw van de unit en brengt hierbij de akoestisch zwakke plekken in kaart. Hierna volgt een overzicht van de relevante en toepasbare verbeteringssystemen, samen met een marktonderzoek naar de materialen en systemen die reeds op de markt te verkrijgen zijn. Hoofdstuk 5 bespreekt de uitgevoerde testen, met onder andere de gekozen materialen en de opstellingen. Hoofdstuk 6 geeft een overzicht van de verkregen resultaten in tabel- en grafiekvormen. In hoofdstuk 7 worden deze resultaten vervolgens besproken en geïnterpreteerd. Ten slotte geeft hoofdstuk 8 een korte samenvatting gevolgd door enkele opties die aanleiding geven naar verder onderzoek.

2 Literatuurstudie

2.1 Materialen en hun akoestische eigenschappen

De isolatie van geluid begint bij het verstaan van het begrip zelf. Geluid kan gedefinieerd worden als een schommeling van de druk in een bepaald medium die zich in vaste cycli herhaalt. De snelheid van deze cycli wordt in deze context uitgedrukt in het aantal cycli dat zich per seconde voordoet, vanaf nu de frequentie genoemd met als eenheid Hertz (Hz). De drukschommeling kan zich in principe in elk medium voordoen, maar in het algemeen spreekt men over schommelingen in luchtdruk of dus luchtgeluid genaamd. Dit is dan ook het soort geluid dat het menselijk oor waarneemt in normale situatie.

De sterkte van het geluid is afhankelijk van de grootte van het drukverschil dat de schommeling veroorzaakt. Deze sterkte wordt in drie vormen uitgedrukt, zijnde geluidsdruk, geluidsintensiteit en geluidsdrukkniveau. De geluidsintensiteit I is het vermogen van de geluidsbron gedeeld door de oppervlakte waarover het vermogen verspreid wordt. De geluidsdruk p is het drukverschil tussen de maximumdruk in de schommeling en de standaard heersende druk in het betreffende medium. Het geluidsdrukkniveau zet beide voorgaande grootheden om in een logaritmische schaal die uitgedrukt wordt in decibel (dB).

De meest gangbare grootheid is het geluidsdrukkniveau. Omdat de fysiologische ervaring van geluidsdrukkniveau niet lineair is met de druk of intensiteit zou het niet logisch zijn om dit uit te drukken in een lineaire schaal. Men vindt namelijk dat voor een ver-tienvoudiging van de intensiteit het geluidsdrukkniveau slechts ervaren wordt als verdubbeld, wat duidelijk een logaritmisch verloop is. De waarde van het geluidsdrukkniveau wordt gegeven door formule 1:

$$(1) \quad L_p = 10 * \log\left(\frac{I}{I_0}\right) = 20 * \log\left(\frac{p}{p_0}\right) [dB] \quad [2]$$

Hierin zijn I_0 en p_0 de referentie- of drempelwaarden voor de intensiteit en de druk, en bedragen respectievelijk $1 * 10^{-12} W/m^2$ en $2 * 10^{-5} Pa$.

Wanneer een materiaal geluidsisolerend is, wilt dit eigenlijk zeggen dat dit materiaal in staat is om een deel van de geluidsenergie die erop toekomt te absorberen. Hierdoor blijft er minder energie over die zal overgaan naar de andere zijde, wat dus voor een reductie in geluidsdrukkniveau zorgt. Een zuiver materiaal zonder dat dit deel uitmaakt van een specifieke combinatie van vormen/lagen/... neemt een hoeveelheid energie op die evenredig is aan zijn massa, wat bijgevolg de massawet genoemd wordt. De massawet stelt dat de akoestische absorptiecoëfficiënt beïnvloed wordt door het medium waar het geluid zich door voortplant, de dichtheid van het materiaal en de frequentie van het toekomstige geluid. Formule 2 geeft voor de geluidsverzwakkingsindex R voor een materiaal waarop het geluid alzijdig invalt.

$$(2) \quad R = 20 * \log \frac{2 * \pi * f * m}{2 * \rho * c} - 5 \text{ [dB]} \quad [2]$$

Met: f = frequentie [Hz]
 m = oppervlakttemassa v.h. materiaal [kg/m^2]
 ρ = massadichtheid v.h. voortplantingsmedium [kg/m^3]
 c = voortplantingssnelheid v.d. geluidsgolp [m/s]

Uit deze formule kan afgeleid worden dat hoe zwaarder een materiaal is, hoe groter de verzwakkingsindex R wordt. Verder wordt duidelijk dat de verzwakkingsindex toeneemt met 6 dB voor elke verdubbeling van de frequentie of massadichtheid van het materiaal. [2]

2.2 Akoestische performantie van lichte stalen gebouwen

2.2.1 Lichte stalen structuren

Lichte stalen structuren zijn vaak opgebouwd uit gegalvaniseerde stalen profielen. Deze profielen halen hun sterkte en stijfheid uit hun koudgewalste vorm, die meestal C- of Z-vormig is. De profielen zijn gemaakt van staalplaten van 0.9 tot 3.2 millimeter dikte en hebben een hoogte van 75 tot 150 millimeter voor muren en 150 tot 300 millimeter voor vloeren. In de lichte staalstructuren worden de profielen in het algemeen geplaatst met een hart-op-hart-afstand van 600 millimeter. Indien deze aan elkaar gekoppeld worden kunnen hiermee overspanningen gerealiseerd worden van 4 tot 6 meter. In knooppunten kunnen de profielen op verscheidene manieren met elkaar verbonden worden, zoals schroeven, bouten, klinknagels of lasverbindingen.

Op de werf dient met deze manier van bouwen enkel de assemblage van de constructie te gebeuren. Dit kan gebeuren op twee manieren. Een eerste manier is dat de profielen met elkaar verbonden worden waardoor het geraamte ontstaat. De bijhorende wand- en vloerpanelen worden geprefabriceerd in de fabriek en worden vervolgens aan het geraamte bevestigd waardoor men een volledige gebouwstructuur verkrijgt. De tweede manier is het volledig prefabriceren van afzonderlijke units die later op de werf met een grote kraan op elkaar gestapeld kunnen worden. Deze prefab units zijn al in grote mate afgewerkt in de fabriek waardoor er snel een volledig gebouw geconstrueerd kan worden. Deze methode wordt modulair bouwen genoemd en is erg gelijkaardig aan het systeem van de Warsco-units.

Zoals de benaming het zegt zijn hierboven genoemde structuren bijzonder licht ten opzichte van traditionele baksteen- en betongebouwen. Hierdoor kunnen deze structuren geplaatst worden op lichtere funderingen en zijn ze bovendien bijzonder geschikt voor het bijbouwen van verdiepen op bestaande gebouwen. De constructie kan via een bodemprofiel rechtstreeks op de betonnen fundering bevestigd worden, al dan niet met thermische onderbreking. Dit is noodzakelijk als de constructie later zal dienen als warme ruimte. Bij de modulaire gebouwen van Warsco wordt er gewerkt met een

koude draagconstructie die aan de binnenkant pas geïsoleerd wordt, waardoor de bevestigingsmethode op de fundering/onderliggende bouwlaag geen aandacht vereist op thermisch vlak.

2.2.2 Akoestisch ontwerp van lichte stalen structuren

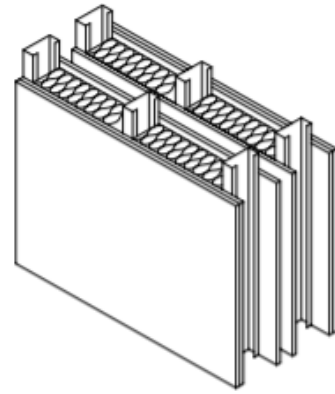
Uit de massawet van geluidsreductie blijkt duidelijk dat lichte stalen structuren geen goede akoestische performantie kunnen hebben omdat ze niet kunnen berusten op de massawet. Om toch behoorlijke akoestische eigenschappen te bekomen wordt er gebruik gemaakt van het massa-veer-massa principe. Dit principe steunt op de opbouw van drie lagen, namelijk twee lagen met een bepaalde massa die tussenliggend verbonden zijn met een veerkrachtig materiaal. Dit materiaal kan bestaan uit gewalste profielen, kunststof verbindingen tussen de twee massadelen of een massief materiaal zoals bijvoorbeeld isolatiemateriaal. Dankzij dit principe kan toch al een behoorlijke geluidsreductiewaarde bekomen worden. In de onderstaande opsomming zijn er een aantal regels gegeven waardoor er eenvoudig kan voldaan worden aan een goed massa-veer-massa systeem.

- Gebruik meerdere lagen voor de massadelen. Door een OSB-plaat en een gipskartonplaat te combineren wordt er een relatief zwaar en luchtdicht deel bekomen.
- De structurele verbinding van de twee massadelen moet zoveel beperkt worden zodat de veerwerking gewaarborgd blijft.
- Tussen de twee panelen die dienen als massadeel is het aangewezen om een afstand te voorzien van minimum 200 millimeter. Hierdoor is er genoeg ruimte voor de veerwerking van het tussenliggende materiaal.
- Aan de ontkoppeling van de draagconstructie met vloeren en wanden dient voldoende aandacht besteed te worden doormiddel van veerkrachtige profielen en lagen.
- Door het volledige gebouw moeten alle luchtlekken afgedicht worden zodat luchtlekken (en dus ook lichtgeluidslekken) tot het minimum beperkt worden.

2.2.3 Scheidingswanden

Scheidingswanden tussen ruimtes moeten enkel geluidsisolatie hebben voor luchtgeluid. Om te isoleren tegen luchtgeluid moet er dan ook al zeker een luchtdichte scheiding zijn tussen de twee ruimtes. Dit kan perfect verkregen worden door aan iedere zijde een gipskartonplaat te voorzien waarbij voldoende aandacht besteed is voor de afdichting aan de randen. In onderstaande figuur wordt een scheidingswand weergegeven die zorgt voor een geluidsreductie van 52 tot 58 dB, wat een volwaardige geluidsisolator is als scheidingswand tussen woningen of appartementen. Om deze aanzienlijke geluidsreductie te bekomen dienen er wel een aantal regels in acht genomen te worden zoals een goede dichting van alle aansluitingen (bijvoorbeeld m.b.v. tape), zodat de luchtstromen tot een minimum beperkt worden. Er is een minimum wanddikte vereist, waarbij de afstand tussen de twee massadelen optimaal gezien groter dient te zijn dan 200 millimeter. Tenslotte heeft de materiaalkeuze ook een erg grote invloed op de totale geluidsreductie van de wand.

Voorbeeld: In Figuur 1 wordt de opbouw van een dubbele scheidingswand volgens bovenstaand principe weergegeven. De platen midden in de wand beïnvloeden de akoestische prestaties nadelig door de hoge resonantiefrequentie die gepaard gaat met de dunne luchtsouw tussen twee massa's.



Figuur 1: Opbouw dubbele scheidingswand [8] p.6

- 2 lagen gipskartonplaat $m \geq 23 \frac{kg}{m^2}$
- Metalstud-wand met minerale wol-isolatie $m = 10 \text{ à } 60 \frac{kg}{m^2}$
- 10 millimeter OSB-plaat
- 25 millimeter minimum open ruimte
- 10 millimeter OSB-plaat
- Metalstud-wand met minerale wol isolatie $m = 10 \text{ à } 60 \frac{kg}{m^2}$
- 2 lagen gipskartonplaat $m \geq 23 \frac{kg}{m^2}$

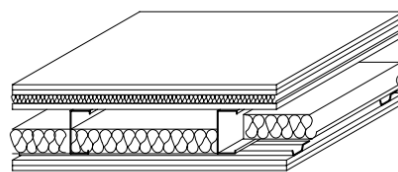
2.2.4 Scheidingsvloeren

Voor scheidingsvloeren is een akoestische isolatie erg belangrijk omdat er hier niet alleen transmissie van luchtgeluid dwars door de vloer kan optreden, maar eveneens contactgeluid ten gevolge van bijvoorbeeld voetstappen of schuivende stoelen. Een goede scheidingsvloer met een hoge akoestische performante kan bekomen worden door het scheiden van de vloer en plafondafwerking doormiddel van een veerkrachtige laag. Deze laag onder de vloerafwerking isoleert tegelijk ook tegen het contactgeluid omdat het meteen de trillingen dempt alvorens ze zich door de vloer uit verderzetten naar de aangrenzende ruimtes.

Een vloer in lichtgewicht structuren is meestal opgebouwd uit stalen C-profielen met daarop OSB platen. De vloerafwerking kan op verschillende manieren aangebracht worden, zoals later beschreven zal worden. De plafonds bestaande uit twee lagen gipskartonpanelen ($m \geq 23 \text{ kg} / m^2$) zijn meestal rechtstreeks bevestigd aan de draagstructuur met behulp van kleine veerkrachtige profielen.

Platformvloer

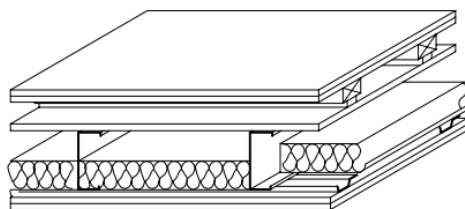
Een schematische voorstelling van een platformvloer wordt getoond in Figuur 2. Bij dit type vloer wordt de vloerafwerking volledig gescheiden van de OSB-platen op de draagstructuur doormiddel van een laag van minerale wol met een dichte structuur. Deze minerale wol moet een oppervlaktemassa hebben van tussen de 120 en de 200 kilogram per vierkante meter om de stabiliteit te kunnen garanderen en eveneens om zijn functie als veerkrachtige laag niet te verliezen.



Figuur 2: Opbouw platformvloer [8] p.7

Raftvloer

Een raftvloer is een veel voorkomende vloeropbouw in lichte staalstructuren, geïllustreerd in Figuur 3. Hierbij wordt er op de OSB-platen een skelet van houten kepers bevestigd met een dun tussenlaagje in minerale wol. De ruimte tussen de kepers wordt dan al dan niet opgevuld met minerale wol naargelang het gewenste eindresultaat. Vervolgens wordt het geheel afgedekt met nog een laag OSB-platen waarop de vloerafwerking komt te liggen.



Figuur 3: Opbouw Raftvloer [8] p.7

Lichte dekvloer

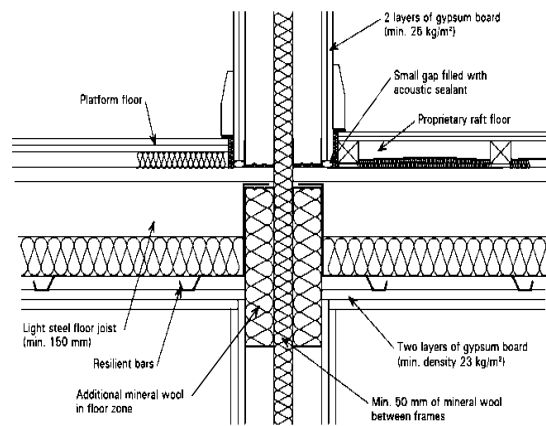
Een laatste methode om de vloerafwerking akoestisch te ontkoppelen van de draagstructuur is met behulp van een lichte dekvloer. Deze dekvloer wordt dan net als een traditionele dekvloer gegoten op een veerkrachtige laag als polyethyleen, minerale wol met dichte structuur, ... waardoor ook een verbeterde akoestische performantie bekomen kan worden

2.2.5 Flankerende transmissie

Flankerende transmissie is geluidsoverdracht die kan optreden via de bouwknopen. Het luchtgeluid gaat dan voor twee naast mekaar gelegen ruimtes niet via de scheidingsmuur maar de via de vloeren en knopen. Door een goede opbouw van de bouwknopen is dit fenomeen sterk reduceerbaar. In Figuur 4 is een voorbeeld gegeven waarbij de vloeren van de ruimtes fysiek van mekaar gescheiden zijn m.b.v. geluidsisolatie waardoor de flankerende transmissies sterk gereduceerd worden. Een aantal belangrijke regels bij het ontwerp van bouwknopen in lichte stalen structuren zijn:

- De stalen structuren van muren moeten volledig gescheiden zijn d.m.v. een veerkrachtige laag.
- Tussen de draagstructuren van twee verdiepen moet een veerkrachtige laag aangebracht worden.

- Open ruimtes in de wanden en vloeren moeten opgevuld worden met minerale wol.
- De vloer moet ter hoogte van een binnenwand onderbroken worden in verband met contactgeluid, maar belangrijk hierbij is dat de wand de stalen structuur niet mag raken in verband met flankerende transmissies. Een goede opbouw is gegeven in figuur 4.



Figuur 4: Doorsnede wand-vloer aansluiting [8] p.10

2.2.6 Doorvoeren voor technieken

Leidingen en kabels die door muren en vloeren moeten gaan zijn onvermijdelijk, maar het is belangrijk dat deze doorboringen luchtdicht afgewerkt worden zodat er geen luchtgeluidslekken kunnen ontstaan. Technieken wegwerken in vloeren is perfect mogelijk bij raftvloeren waar de leidingen en kabels tussen de balken worden geplaatst. Een platformvloer is hiervoor minder geschikt.

2.3 Geluidsisolatie van houten vloeren

2.3.1 Algemeen

In 2001 publiceerde het Wetenschappelijk en Technisch Centrum voor het Bouwbedrijf een artikel waarin onderzocht werd hoe de geluidstransmissie zich voordoet in constructies die houten tussenvloeren bevatten. Dit artikel kwam er door de steeds groeiende populariteit van de houtbouw, waarin er nood bleek aan verbetering van de bestaande opbouwprincipes gekend vanuit de oudere woonhuizen.

Allereerst is het nodig om een streefdoel op vlak van geluidsisolatie vast te leggen. Zo werd er bestudeerd hoe mensen geluiden ervaren die afkomstig zijn vanuit andere kamers dan die waar zij zich in bevinden. De soorten geluiden werden opgesplitst in luchtgeluid (bijvoorbeeld radio, gesprek, ...) en in contactgeluid (voetstappen, stoelen verschuiven, ...). In Figuur 5 is weergegeven vanaf welke luchtgeluidsisolatie en contactgeluidsniveau mensen klagen over het betreffende geluid. Voor normaal akoestisch comfort legde men de grens wanneer 30% van de mensen klaagden over het betreffende geluid. Voor verhoogd akoestisch comfort bedroeg dit slechts 10%. Let hierbij op dat voor luchtgeluid de isolatiewaarde van de vloer weergegeven wordt en voor contactgeluid het resterende geluidsniveau.

PSYCHOAKOESTISCHE BEVINDINGEN	LUCHTGELUIDS-ISOLATIE $D_{nT,w}$	CONTACTGELUIDS-ISOLATIE $L_{n,w}$
<i>Normaal comfort</i> : slechts 30 % van de bewoners klaagt over gebrek aan akoestisch comfort	54 dB	54 dB
<i>Hoog comfort</i> : slechts 10 % van de bewoners klaagt over gebrek aan akoestisch comfort	59 dB	49 dB

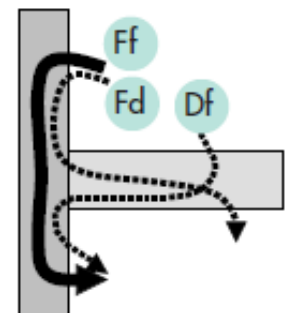
Figuur 5: Psychoakoestische bevindingen en bijhorende prestaties van de vloer [2]

2.3.2 Luchtgeluidsisolatie tussen twee ruimten

Luchtgeluid kan op twee verschillende manieren overgedragen worden tussen twee ruimtes, namelijk via directe transmissie en via flankerende transmissie. Hierbij is de directe transmissie het luchtgeluid dat rechtstreeks door de vloeropbouw uit gaat, en dus ook enkel hiervan afhankelijk is. Flankerende transmissie ontstaat door de overdracht van het luchtgeluid naar de wanden en vloeren, die deze geluidsenergie dan via de structuur naar de andere ruimte zal leiden.

Flankerende transmissie

Flankerende transmissie ontstaat in de lijnvormige connectie tussen wand en vloer, ook wel bouwknoop genoemd. Door deze knoop kan de geluidsoverdracht volgens drie verschillende wegen plaatsvinden, zoals weergegeven in Figuur 6. De mate waarin de geluidsoverdracht zal plaatsvinden voor de wegen l_j (met $l_j = F_f, D_f$ en F_d) kan enkel benaderend begroot worden met formule 3 en steunt hierbij op empirische formules en/of in situ metingen.



Figuur 6: Flankerende transmissiewegen [2]

Met: R_l = Geluidsverzwakkingsindex van de wand aan de zenzijde

R_j = Geluidsverzwakkingsindex van de wand aan de ontvangstzijde

S_s = Oppervlakte van de scheidende vloer

l = Lengte van de knoop tussen wand en vloer

$$(3) \quad R_{lj} = \frac{R_l}{2} + \frac{R_j}{2} + K_{lj} + 10 \log \frac{S_s}{lm.l} \quad [3]$$

Wanneer deze formule toegepast wordt is duidelijk dat vooral de trillingsverzwakkingsindex kan zorgen voor grote verschillen in de flankerende geluidsisolatie. In de norm EN ISO 12354-1:2000 staan empirische formules voor het begroten van de trillingsverzwakkingsindex. Hieruit blijkt dat voor de wegen D_f en F_d deze factor erg groot

wordt ten opzichte van F_f (meer dan 20 dB in veel gevallen voor houten tussenvloeren), waardoor gesteld mag worden dat de flankerende transmissie via de wegen D_f en F_d verwaarloosd mag worden.

De trillingsverzwakkingsindex K_{Ff} is voornamelijk bepaald door de verhouding van de massa van de wand ten opzichte van de vloer. Hierin kan gesteld worden dat hoe zwaarder de wand ten opzichte van de vloer, hoe groter de index zal zijn. Voor houten vloeren stelt de norm de empirische formule 4 voor:

$$(4) \quad K_{Ff} = 3,0 + 14,1 M + 5,7 M^2 \quad [3]$$

$$\text{Met: } M = \log\left(\frac{\text{oppervlakttemassa}_{wand}}{\text{oppervlakttemassa}_{vloer}}\right)$$

De index is bij houten vloeren bijzonder klein in vergelijking met die in het geval van betonnen vloeren, en wordt soms zelfs negatief. Dit bewijst dat voor een houten vloer de flankerende geluidsisolatie zodanig klein is dat deze bepalend zal zijn voor de totale luchtgeluidsisolatie van de structuur. Het is dus niet de directe geluidstransmissie die hier zal bepalen wat de finale verzwakkingsindex R is, maar wel de waarde van de flankerende transmissie. Het spreekt bijgevolg voor zich dat hier in het bijzonder aandacht aan geschonken moet worden.

Directe geluidstransmissie

Zoals beschreven in 2.1 is de invloed van de directe geluidstransmissie in de meeste gevallen ondergeschikt aan de flankerende transmissie. Echter kan door middel van goed doordachte constructies en voorzetwanden deze flankerende transmissie voldoende gereduceerd worden om het belang van de directe transmissie terug naar voor te brengen. Echter omdat er in het probleem dat behandeld wordt in deze scriptie een zeer uitgebreide scheiding is op vlak van directe geluidstransmissie (volledige vloeropbouw en volledige dakopbouw met tussenin nog 175 mm luchtlaag) wordt hier niet verder op ingegaan en zal er voornamelijk geconcentreerd worden op de flankerende transmissie.

2.3.3 Contactgeluidsisolatie bij houten vloeren

Contactgeluid is het geluid dat een oppervlak afstraalt na het ontvangen van een impuls, komende van ofwel direct de bron (voetstappen) ofwel via een ander onderdeel waarmee het oppervlak in contact staat. De mate waarin deze impulsenergie doorgegeven wordt hangt af van de absorptiecapaciteit van de materialen die deze impuls ontvangen. Doorgaans is dit voor stijve materialen (beton hout, metaal, ...) eerder weinig waardoor er zonder zachtere tussenlaag geen goede contactgeluidsisolatie bekomen kan worden. Omdat het onvermijdelijk is dat de draagstructuur van een gebouw bestaat uit stijve materialen omwille van hun sterkte dient er hier bovenop een extra dekvloer voorzien te worden om het contactgeluid op te vangen.

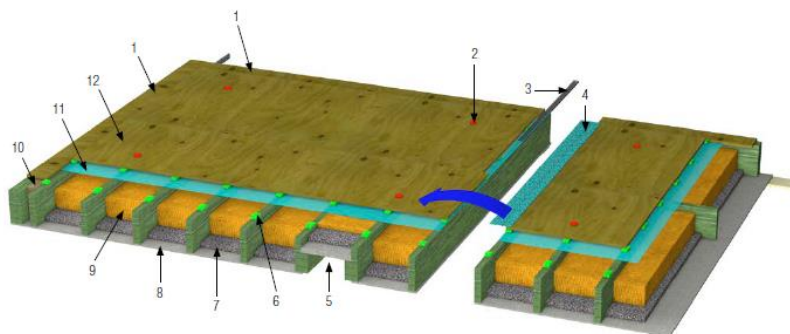
De formule voor het begroten van de verbetering die een zwevende dekvloer veroorzaakt wordt gegeven in deel 4 - Lichte zwevende dekvloeren. Hierbij moet opgemerkt worden dat deze formule begroot is voor massieve homogene draagvloeren. In de formule ziet men dat de contactgeluidsvermindering afhankelijk is van de resonantiefrequentie van de dekvloer. Formule 5 geeft de resonantiefrequentie. In deze formule vindt men de dynamische stijfheid s terug. De dynamische stijfheid van de elastische tussenlaag is echter een moeilijk te begroten begrip (mogelijk via EN 29052-1) en wordt dus voornamelijk gezocht met behulp van labometingen.

$$(5) \quad f_r = \frac{1}{2 \cdot \pi} * \sqrt{\frac{s}{m}} \quad [2]$$

Met: $s =$ Dynamische stijfheid van de elastische laag $[N/m^3]$

$m =$ Oppervlakttemassa van de zwevende dekvloer $[kg/m^2]$

In WTCB Contact 2014-2 [4] wordt er in het artikel “Innovatieve geprefabriceerde hout-skeletbouw-systemen voor appartementsgebouwen” beschreven wat een goede vloeropbouw is volgens laboratoriummetingen. Figuur 7 is de schematische opbouw van deze vloer. In deze figuur is te zien dat er als elastische tussenlaag gebruik gemaakt wordt van een raster van elastische blokjes onder de dekvloer. Dit optimaliseert de



Figuur 7: Schematische voorstelling houtskeletbouwvloer [3]

reductie van contactgeluid aangezien het contact met de draagstructuur op deze manier tot een absoluut minimum beperkt wordt. Voor de verbetering van luchtgeluid werden hier ook enkele maatregelen getroffen, maar omdat hier binnen deze scriptie geen nood aan is wordt er ook niet verder op ingegaan.

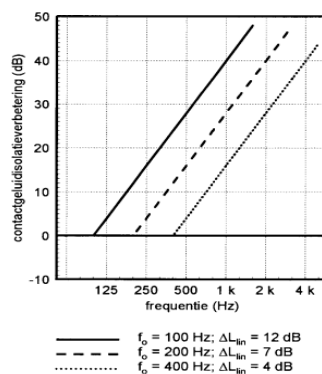
2.4 Lichte zwevende dekvloeren

2.4.1 Bereikbare contactgeluidisolatieverbetering met een lichte zwevende dekvloer

Een vereenvoudigde procedure voor het berekenen van de contactgeluidsisolatieverbetering ΔL is vermeld in de Europese norm EN12354-2. Voor droge lichte zwevende vloersystemen bovenop een homogene zware vloer (beton) is deze ΔL te berekenen aan de hand van formule 6. Figuur 8 geeft een grafische weergave van deze formule, waarbij de resonantiefrequenties 100, 200 en 400 Hz bedragen.

$$(6) \quad \Delta L = 40 * \log \frac{f}{f_0} [dB] \quad [5]$$

Met: f = Octaaf of $\frac{1}{3}$ octaafband frequentie [Hz]
 f_0 = Resonantiefrequentie van het vloersysteem [Hz]
(Berekening van f_0 is gegeven in formule 5)



Figuur 8: Contactgeluidsisolatieverbetering voor de resonantiefrequenties [4] p. 5

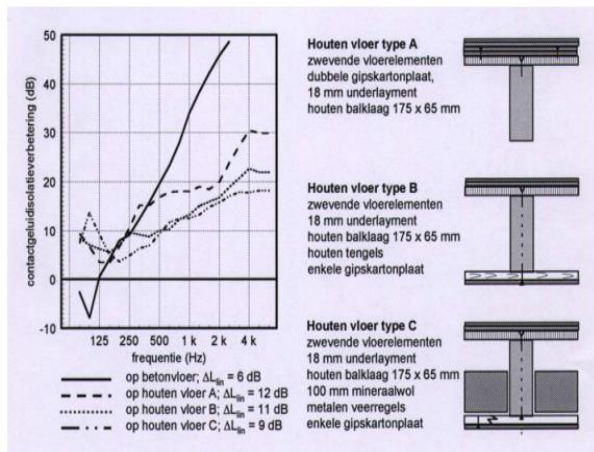
2.4.2 Contactgeluidsisolatie tussen ruimten

In de reeds vermelde norm EN 12354-2 wordt een berekeningsmethode omschreven om ΔL tussen ruimtes te berekenen. Deze berekening is zeer complex waardoor de contactgeluidsisolatieverbetering enkel bepaald kan worden met behulp van laboratoriummetingen. In het onderzoek gevoerd door het Adviesbureau Peutz & Associés B.V. is de contactgeluidsisolatieverbetering onderzocht voor zowel een betonnen als een houten vloerconstructie.

Laboratoriummetingen

In het laboratorium wordt onderzocht welke maximale contactgeluidsisolatieverbetering bereikbaar is en of deze overeenkomt met de waardes die bekomen worden met de vereenvoudigde methode. In het labo wordt om dit te bereiken de dekvloer volledig gescheiden van de draagconstructie door deze op te hangen aan stalen kabels en hierop de klopmachine te plaatsen. De spouw wordt vervolgens opgevuld met een

veerkrachtige laag, in dit geval 10 mm steenwol. De zwevende dekvloer wordt toegepast op een betonnen draagvloer (dikte 150 mm) en op drie verschillende houten draagvloeren. De dragende balken zijn voor alle drie types gelijk, namelijk een doorsnede van 175 mm op 65 mm. Voor type A uit Figuur 9 is er nog extra een dubbele laag gipskartonplaten aangebracht om het gewicht van de dekvloer te verhogen. Voor de types B en C is er een vals plafond aangebracht van gipskartonplaten waarbij in type C de ruimte tussen de balken opgevuld wordt met minerale wol.

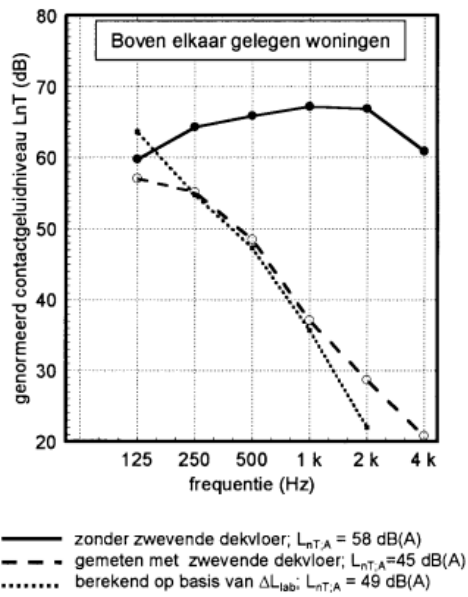


Figuur 9: In het labo gemeten contactgeluid-isolatieverbetering van een droge lichte zwevende dekvloer aangebracht op drie verschillende houten vloerconstructies. [4] p.10

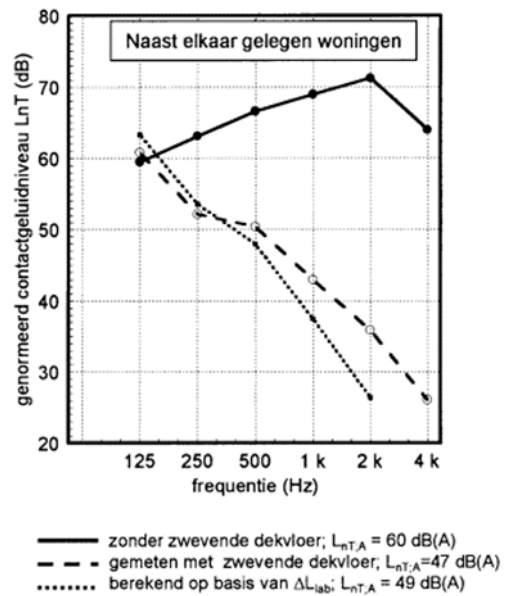
Uit de metingen in het labo blijkt dat een $\Delta L \geq 10$ dB haalbaar is voor houten vloeren. Voor de betonnen vloer is er een negatieve dip in de contactgeluid-isolatieverbetering. Wanneer de contact-geluidisolatie vervolgens herleid wordt naar een eengetalswaarde ziet men dat deze negatieve dip de eengetalswaarde sterk naar beneden brengt. Indien deze negatieve waarde zou teruggebracht worden naar 0 dB dan neemt de eengetalswaarde toe van +6dB toe tot +10 dB

In situ metingen bij toepassing op een betonnen draagvloer

Als droge lichte zwevende dekvloer is er hier gekozen voor twee lagen gipsplaten (dikte 12,5 mm) en als flexibele laag 10 mm steenwol.



Figuur 10: Gemeten contactgeluidisolatie tussen boven elkaar gelegen woningen voor en na het aanbrengen van een droge lichte zwevende dekvloer. [4] p.9

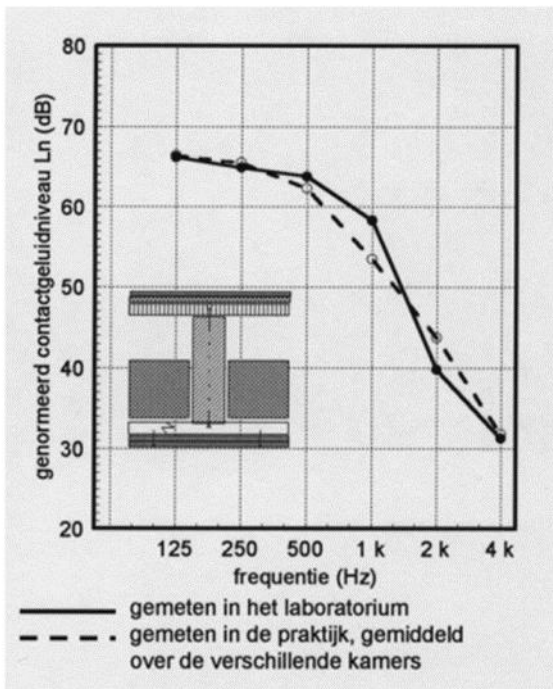


Figuur 11: Gemeten contactgeluidisolatie tussen naast elkaar gelegen woningen voor en na het aanbrengen van een droge lichte zwevende dekvloer. [4] p.9

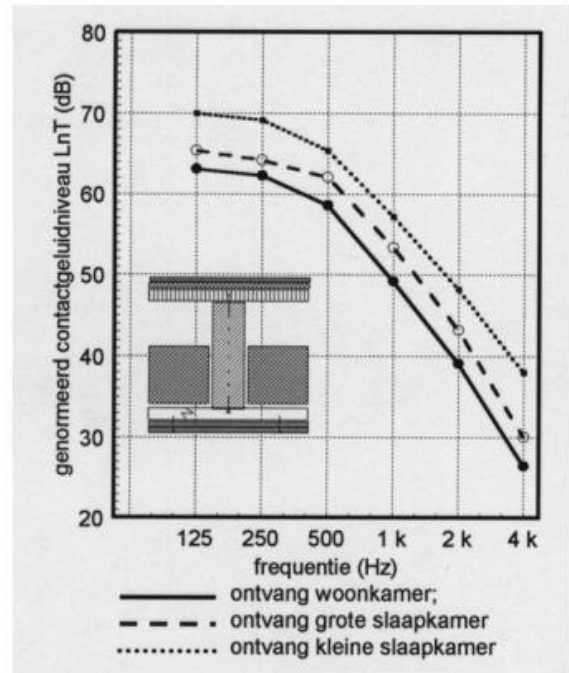
Uit deze metingen blijkt dat de laboratoriummetingen behoorlijk goede prognoses kunnen stellen voor wat de contactgeluidsisolatieverbetering in de praktijk zal bedragen. In Figuur 10 en 11 is ook duidelijk zichtbaar dat de toegepaste dekvloer zijn doel heeft bereikt omdat het contactgeluidsniveau in de hogere tonen zeer sterk afgenomen is. Een $\Delta L \geq 10 \text{ dB}$ kan in praktijk ruimschoots behaald worden.

Praktijksituatie van houten vloeren

In de houtskeletbouw te Aalsmeer waar de metingen in situ werden gedaan is het vloertype C gebruikt. Als flexibele laag is er hier ook gekozen voor 10 mm steenwol. Uit deze metingen blijkt dat in de praktijksituatie de resultaten bijna gelijk zijn aan de metingen in het laboratorium gemiddeld genomen over de verschillende kamers. De resultaten van de metingen worden weergegeven in Figuur 12 en 13. De gemeten waarden tonen aan dat het contactgeluidsniveau het hoogste is de kleine slaapkamer wat wilt zeggen dat de zwevende dekvloer gedimensioneerd moet worden aan de hand van de situatie in de kleinste ruimte.



Figuur 12: Gemeten contactgeluidisolatie (L_n herleid op 10 m^2) van een houten vloerconstructie [4] p.11



Figuur 13: Gemeten contactgeluidisolatie (L_{nT} herleid op 0,5s) tussen boven elkaar gelegen woningen in het hout-skeletbouw project. [4] p.11

3 Onderzoek

3.1 Methode

Het onderzoek start met de analyse van de huidige opbouw van de units. Dit werd gedaan aan de hand van technische tekeningen en een volledige rondleiding doorheen het productieproces. Door de structurele opbouw van de units te schematiseren wordt een duidelijk overzicht bekomen over de materialen en hun onderlinge verbindingen. Aan de hand hiervan kunnen akoestisch zwakke plekken opgespoord worden. Vervolgens worden hiervoor toepasbare verbeteringssystemen onderzocht en met elkaar vergeleken. De eisen die aan deze oplossingen zijn gesteld betreffen niet alleen dat het probleem verbeterd wordt maar ook dat het past in het concept van het modulair bouwen. Dit wilt zeggen dat het op een modulaire manier kan geplaatst en indien nodig terug verwijderd kan worden. Ten slotte is er in het kader van deze oplossingen een marktonderzoek uitgevoerd waarin een aantal materialen zijn uitgelicht. Deze materialen zijn getoetst aan de technische eigenschappen en de toepasbaarheid in de units. Als sluitstuk van het onderzoek wordt er een keuze gemaakt van de meest geschikte materialen en worden er hier in situ uitgebreide metingen op uitgevoerd.

3.2 Opbouw van de units

Het doel van Warsco bouwunits is om een modulair systeem te bieden waarmee op een snelle en degelijke manier gebouwen geconstrueerd kunnen worden. Om modulariteit te bieden is het dus belangrijk om te werken met gestandaardiseerde afmetingen. Bijgevolg wordt breedte van de units als vaste parameter beschouwd en zijn er voor de lengte enkele variaties beschikbaar. Omdat de laatste jaren echter het toepassingsgebied sterk uitbreidt heeft Warsco hun aanbod aangepast om ook volledig maatwerk te leveren zoals de klant het wil indien de standaardafmetingen niet voldoen.

Ongeacht de afmetingen zullen de units echter altijd volgens dezelfde draagstructuur opgebouwd worden. Er kan dan wel variatie zijn in bijvoorbeeld de hoeveelheid profielen in de vloer naargelang de toepassing waarin de unit zal dienen, maar het type profielen zal steeds hetzelfde blijven. De draagstructuur van de units bestaat uit een stalen frame. Dit frame is opgebouwd uit zelf ontworpen en gefabriceerde staalprofielen die bouw pakketgewijs aan elkaar kunnen bevestigd worden. De fabricage van deze stalen profielen gebeurt met behulp van een geautomatiseerd proces waarin vlakke platen op maat geknipt en geplooid worden. Deze automatisatie zorgt voor een constante precisie wat de bouwkwaliteit en constructietijd sterk verbeteren. De profielen worden na het vormen galvaniseerd om een goede duurzaamheid te bekomen.

Het stalen frame dat de draagconstructie van de units vormt is opgebouwd uit vier dragende hoekprofielen waartussen langs- en dwarsbalken geplaatst worden. In Figuur 14 is de connectie tussen een langsbalk en een hoekprofiel te zien. In het onder- en bovenvlak, respectievelijk draagvloer en plafond, worden C-profielen geplaatst om een dragende structuur te bekomen, zoals te zien in Figuur 15. Op deze C-profielen worden vervolgens houten keperbalken bevestigd waarop dan de draagvloer en de plafondplaten bevestigd worden. De tussenruimten worden telkens opgevuld met rotswol. Met de standaard hoekprofielen (deze nemen de verticale lasten op) kunnen gebouwen tot drie bouwlagen hoog geconstrueerd worden.



Figuur 14: Connectie langspijl met hoekprofiel



Figuur 15: Stalen draagconstructie voor de vloer

De wanden van de units bestaan uit stalenframes met een gelijkaardige opbouw dan die van de vloer en het plafond, enkel uitgevoerd met lichtere profielen omdat deze minder lasten zullen moeten opvangen. Deze wanden passen direct tussen de hoek-, langs- en dwarsbalken en worden met behulp van klinknagels hieraan bevestigd. Deze verbinding gebeurt zonder tussenliggend materiaal waardoor de stalen onderdelen direct in contact staan met elkaar. Op de frames van de wanden worden, net zoals in de onder- en bovenframes, houten keperbalken geplaatst met eveneens rotswolisolatie tussen en afgewerkt met een spaanplaat van 8mm dikte.

Het stapelen van de units gebeurt door ze eenvoudig op elkaar te plaatsen, zonder materiaal tussenin. De stalen frames maken dus direct contact met elkaar, waarbij er op wrijving en eigengewicht gerekend wordt om als solide gebouwconstructie te blijven staan. In uitzonderlijke gevallen kan er wel een mechanische bevestiging voorzien worden, maar dit is dus niet gebruikelijk. Ook wanneer er meerdere bouwlagen geconstrueerd worden, worden de units afzonderlijk afgewerkt alsof het alleenstaande gehelen zouden zijn.

3.3 Akoestische analyse van de bestaande situatie

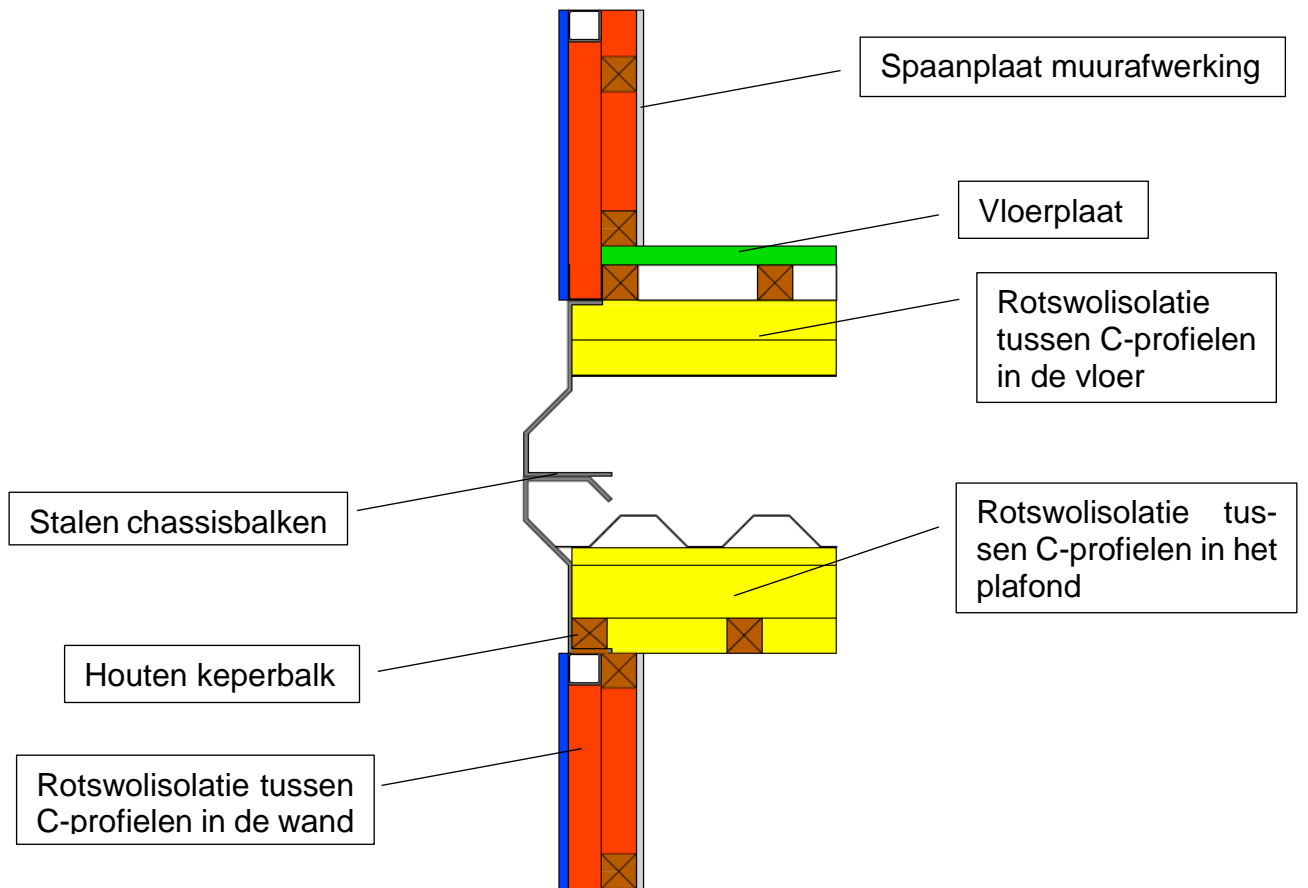
De akoestische performantie van deze units is voorlopig niet optimaal. Het is dan ook de opzet van deze masterproef om te onderzoeken welke soorten van geluidstransmissie er zich voordoen op hoorbaar niveau en vervolgens enkele eenvoudige oplossingen aan te reiken. Voor het zoeken naar de meest storende akoestische eigenschappen bezoeken we enkele gebouwen die met units verwezenlijkt werden. Om vervolgens de akoestisch zwakke plekken te zoeken die tot deze zwakke eigenschappen leiden wordt de opbouw van de units grondig bestudeerd. Op die manier kan er via theoretische kennis die reeds bestaat al een goede inschatting gemaakt worden van de connecties/materialen/... die de algemene akoestische eigenschappen sterk verslechteren.

Tijdens de bezoeken wordt er snel opgemerkt dat het geluid van voetstappen, schuivende stoelen, ... (kortom contactgeluiden) erg aanwezig is in de gebouwen/ruimtes. Ook luchtgeluid blijkt goed hoorbaar doorheen de gebouwen, maar voornamelijk in de aan elkaar grenzende ruimtes.

In het ontwerp van de structurele opbouw van de units is tot nu toe nog geen aandacht geschonken aan de transmissiewegen voor zowel luchtgeluid als contactgeluid. Er werden echter wel reeds enkele labometingen uitgevoerd die de luchtgeluidverzwakingsindex van de buitenwanden onderzocht. Het is dus duidelijk dat er wel reeds aandacht geschonken is aan het afweren van de geluiden van buitenaf, maar nog niet aan de geluiden die zich doorheen het gebouw zelf kunnen voortplanten.

Het schematiseren van de structurele opbouw van de units, zie Figuur 16, legt al snel een probleem bloot dat met grote waarschijnlijkheid een sterke invloed heeft op het contactgeluid. Let hierbij op dat dit voorlopig enkel een kwalitatieve inschatting is en dit achteraf met behulp van de juiste testen pas kan bevestigd worden. Voor het luchtgeluid is de oorzaak van de zwakkere prestaties reeds te verklaren met behulp van formule 2, welke reeds besproken werd in deel 2.1. De units hebben namelijk een zeer lichte structuur in vergelijking met de klassieke stenen gebouwen, waardoor de geluidsverzwakingsindex sterk gereduceerd zal zijn ten opzichte van deze klassieke gebouwen.

Ook op gebied van contactgeluid vallen er delen op in het ontwerp die de prestaties erg nadelig beïnvloeden. De dragende vloerplaat, een spaanplaat van 22 millimeter dik, wordt immers rechtstreeks vastgeschroefd op de stalen draagconstructie. Dit geeft dus een directe verbinding tussen de trillingen van de voetstappen/stoelen/ ... en de draagstructuur van de unit. Omdat vervolgens de draagconstructies van twee boven mekaar staande units koud op mekaar worden geplaatst kunnen trillingen ten gevolge van de bovengenoemde geluiden dus zonder veel weerstand de onderste unit bereiken.



Figuur 16: Schematische voorstelling van de opleg tussen boven elkaar geplaatste units.

3.4 Toepasbare verbeteringssystemen

3.4.1 Verbetering contactgeluid

Deel 3.2 beschrijft dat er om luchtgeluid tot op een bepaald niveau te reduceren een zekere oppervlaktemassa nodig is. Grote hoeveelheden oppervlakte massa toevoegen aan de units is echter geen optie omdat dit niet past in het totaalconcept van modulair bouwen. Daarnaast zijn de units op vlak van stabiliteit niet voorzien om dit tot 3 bouwlagen aan te kunnen. Er bestaat echter wel een andere oplossing die beschreven werd in delen 2.2.3 en 2.2.4 (massa-veer-massasystemen). In deze systemen bestaan de scheidingsconstructies zoals vloeren, wanden of plafonds uit drie delen. Twee delen met een bepaalde massa met daartussen een veerkrachtige laag. Dit systeem is in de units wel perfect mogelijk om toe te passen voor de vloeren door het plaatsen van een droge lichte zwevende dekvloer. De eerste massa-laag is reeds aanwezig, zijnde de houten vloerplaat. Vervolgens dient er een veerkrachtige laag aangebracht te worden en daar bovenop opnieuw een houten vloerplaat waar de afwerking op aangebracht kan worden.

3.4.2 Verbetering flankerende transmissie

Bij het construeren van modulaire gebouwen worden volledig afgewerkte units op elkaar geplaatst. Dit wilt zeggen dat rechtstreekse luchtgeluidtransmissie zich door de vloer, het dak en de dikke tussenliggende luchtlaag moeten verplaatsen. Door deze meerlaagse en dikke opbouw zal de luchtgeluidreductie relatief hoog liggen. Er bestaat echter ook de flankerende geluidstransmissie, die in deze soort gebouwen een belangrijke rol speelt. Dit werd eerder beschreven in deel 2.3.3. Hierdoor zullen de oplegpunten tussen de units bijzondere aandacht vergen omdat deze voorlopig direct met elkaar in contact staan. Deze opleg kan akoestisch gescheiden worden door middel van een veerkrachtige laag, waarbij de stijfheid is bepaald aan de hand van het dode gewicht van de unit, het maximale gewicht en de akoestische ontwerpbelasting. Aan de hand van deze factoren wordt de stijfheid van de elastische laag bepaald in functie van de resonantiefrequentie die het geheel zal hebben. Deze dient immers laag genoeg te liggen zodat deze niet hoorbaar is voor het menselijk oor.

3.5 Marktonderzoek

In deel 3.4 werden de twee akoestische problemen beschreven waarvoor een oplossing dient gevonden te worden. Via een kort marktonderzoek wordt getracht om bij fabrikanten terecht te komen die producten aanbieden die geschikt zijn voor het oplossen de hierboven beschreven problemen. Het marktonderzoek is opgesplitst in twee delen, zijnde het akoestisch ontkoppelen van de oplegpunten en de toepassing van een zwevende dekvloer.

3.5.1 Akoestische ont koppeling van de oplegpunten

CDM – CDM - strips

Een zeer voornamelijk producent van akoestische ont koppelingen is CDM. Dit bedrijf produceert en onderzoekt sinds 1951 akoestische dempingsmaterialen, en is hierbij gegroeid tot een erg innovatief en sterk verspreid bedrijf dat ondertussen een uitgebreid gamma aan materialen en systemen aanbiedt. In hun gamma is er een zeer uitgebreide keuze aan technische mogelijkheden en specificaties. Een typische akoestische ont koppeling van op druk belaste knopen is een polyurethaanstrip zoals weergegeven in Figuur 17, die ze onder andere voor Wienerberger produceren onder de naam Sonic Strip. Deze strips worden echter ook geproduceerd in veel andere variaties zodat ze in praktisch alle soorten toepassingen gebruikt kunnen worden.



Figuur 17: CDM-strips [9]

Flexidal - Acoustrip

Een andere producent van gelijkaardige oplossing is Flexidal. Dit bedrijf spitst zich toe op de vele verschillende toepassingen waar rubber in gebruikt kan worden, waaronder akoestische isolatiestrips. Figuur 18 toont dat deze rubber stroken geproduceerd worden in een aantal breedtes en grote lengte op rol. Deze stroken hebben een dikte van 10mm en zijn voornamelijk geschikt voor hogere lijnlasten.



Figuur 18: Flexidal Acoustrip 730 [10]

3.5.2 Zwevende dekvloer

Om contactgeluid te kunnen reduceren moet er een veerkrachtige laag aangebracht worden bovenop de bestaande vloer met daarop opnieuw een draagvloer, waarbij een zwevende dekvloer bekomen wordt. In de traditionele woningbouw wordt er als veerkrachtige tussenlaag gewerkt met PUR of schuimbeton dat ook rechtstreeks dienst doet als thermische isolatie en als uitvullaag voor de technieken die op de dragende vloer zijn aangebracht. Dit type van veerkrachtige laag in combinatie met een chape zorgt voor een goede performantie van het geheel.

In de modulaire units is het echter niet mogelijk om dezelfde materialen te gebruiken omdat de oppervlaktemassa's van zowel de dragende vloer als van de zwevende dekvloer vele malen kleiner zijn dan bij traditionele gebouwen. Daarom is het van belang dat er voor deze situatie een materiaal wordt gekozen met een aangepaste dynamische stijfheid zodat er toch een performant massa-veer-massasysteem kan gecreëerd worden. Om dit te bekomen is het wenselijk om de resonantiefrequentie van de veerkrachtige laag zo laag mogelijk te krijgen, liefst onder de gehoordrempel van 20 à 25

Hz. Op die manier wordt er binnen het gehoorbereik een voldoende grote geluidsdemping verkregen. De geluidsdemping wordt berekend aan de hand van formule 6.

$$\Delta L = 40 * \log \frac{f}{f_0} [dB]$$

De gewenste dynamische stijfheid kan vervolgens berekend worden door het onvormen van formule 5, waarmee onderstaande formule gevonden wordt:

$$(7) \quad s = (f_r * 2 * \pi)^2 * m [MN/m^3]$$

Uitgaande van een maximale resonantiefrequentie van 25 Hz, en wetende dat de zwevende dekvloer (22 mm spaanplaat + afwerking) een oppervlaktemassa van 15 kg/m² heeft mag de dynamische stijfheid maximaal een waarde hebben van:

$$s = (25 * 2 * \pi)^2 * 15 = 0,37 MN/m^3$$

Volgens deze berekening moet er als veerkrachtige laag een materiaal gezocht worden met een dynamische stijfheid van 0,37 MN/m³ of lager, om een resonantiefrequentie van maximum 25 Hz te verkrijgen.

Abriso - Acoustic Reflex 2 x 3mm

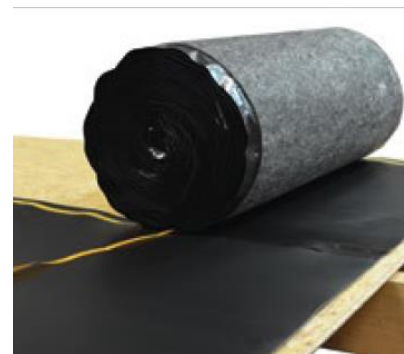
Acoustic Reflex is een geëxtrudeerd polyethyleenschuim dat opgebouwd is uit twee lagen van 3 mm met een dichtheid van 35 kg/m³. Figuur 19 toont dit veerkrachtig materiaal. Het is vochtbestendig en heeft een dynamische stijfheid van 42 MN/m³. Door de hoge stijfheid die het materiaal bezit is het uitermate geschikt om een als veerkrachtige laag te fungeren in massa-veer-massasystemen in waarbij de twee massalagen een relatief grote oppervlaktemassa hebben zoals bij betonnen draagvloer en een cementgebonden chape. De dynamische stijfheid is echter veel te groot voor de toepassing binnen de modulaire units waardoor dit materiaal hiervoor niet in aanmerking zal komen.



Figuur 19: Abriso Acoustic Reflex [11]

Insulco - insulWood

InsulWood van Insulco is opgebouwd uit een polyester viltlaag met daarop een schuimlaag in akoestisch polyolefine. Als toplaag is er een HD-PE-folie (HD-PE = High Density Polyethyleen) aangebracht die het geheel luchtdicht maakt, zoals getoond is in Figuur 20. Deze meerlaagse opbouw van diverse materialen zorgt ervoor dat er een lage dynamische stijfheid van 5 MN/m³ gehaald wordt. Dit maakt het gebruik ervan zeer interessant voor de toepassing in combinatie met een lichte zwevende dekvloer zoals in de units het geval is. Onder belasting heeft insulWood een dikte van 6,5 mm en een dichtheid van 650 g/m².



Figuur 20: Insulco insulWood [12]

4 Testen

4.1 Doel van de testen

Eerder in dit onderzoek werd beschreven wat de verwachte akoestisch zwakke schakels binnen de structurele opbouw van de units zijn. Aan de hand van deze kennis werden er in deel 4.3 twee mogelijke verbeteringssystemen beschreven, maar worden er nog geen concrete materialen gekozen. Voor de testen zal er een keuze gemaakt worden uit de materialen die reeds op de markt verkrijgbaar zijn. Omdat dit onderzoek zich echter niet toespitst op het zoeken van de meest optimale materiaalkeuze die de akoestische prestaties het meest zal verbeteren zullen deze materialen gekozen worden naargelang hun beschikbaarheid, geschiktheid en verwachte prestaties voor in de testopstellingen, maar nog niet geoptimaliseerd worden.

De studie van de structurele opbouw van de units leverde op dat vooral het contactgeluid een probleem ging vormen. De verschillende structurele onderdelen zoals het vloeroppervlak, de ijzeren profielen in de wanden, de draagbalken in de vloer, ... waren allemaal rechtstreeks met elkaar verbonden, waardoor er slechts weinig reductie van de impulsenergie afkomstig van het contactgeluid kon plaatsvinden. Ook de draagstructuren van boven elkaar geplaatste units waren direct met elkaar verbonden, met hetzelfde gevolg van dien. De testopstellingen (beschreven in deel 5.3) zullen moeten uitwijzen hoe de hierboven beschreven problemen zich onderling verhouden in het veroorzaken van contactgeluidsoverdracht, en bijgevolg dus ook welk aspect het meeste zal lonen indien het verbeterd wordt.

Op vlak van luchtgeluidsoverdracht is uit de literatuurstudie gebleken dat lichte gebouwconstructies voornamelijk last hebben van flankerende luchtgeluidsoverdracht. Omdat de draagstructuren van boven elkaar geplaatste units direct met elkaar in contact staan wordt ook hier verwacht dat dit het geval zal zijn. Het akoestisch ontkoppelen van deze knoop gaat buiten het verbeteren van het contactgeluid ook invloed hebben op de luchtgeluidsoverdracht. De testopstellingen zullen dan ook zo gekozen worden dat ermee bepaald kan worden of dit in de praktijk wel degelijk het geval is of niet.

Tot hiertoe zouden de testen dus moeten uitwijzen of de veronderstellingen die gevolgd zijn uit de structurele analyse van de units al dan niet correct zijn. Ook zal er blijken hoe de oorzaken tot elkaar in verhouding staan in de algemene prestaties van de units. Op die manier kan er in toekomstig onderzoek zeer gericht gezocht worden naar oplossingen die zich specifiek op de juiste oorzaken toespitsen.

Uit de testen zullen echter ook de resultaten volgen van de materialen die reeds in dit onderzoek gekozen werden. Dit is ook interessant omdat het over relatief eenvoudige oplossingen gaat die Warsco al kan beginnen toepassen indien ze dit willen. Omdat de metingen officieel zijn en gebeurd zijn volgens de voorschriften uit de norm NBN ISO 140-X (X varieert naargelang de gewenste meting) kunnen de rapporten door

Warsco gebruikt worden als officiële verslagen die de prestaties van hun units aantonen. Dit kan interessant zijn voor klanten die dit eisen, maar eveneens voor het aantrekkelijker maken van de keuze voor modulair bouwen indien de behaalde resultaten goed blijken te zijn.

4.2 Keuze testmaterialen

Deel 4.4 voert een kort marktonderzoek naar de verschillende materiaalstromen, bestaande uit elastische lagen, ... die zich reeds op de markt bevinden. Uit een eerste berekening die hier gedaan werd bleek dat de gewenste dynamische stijfheid erg laag is. Dit komt door de lichte opbouw van het geheel. Uit het marktonderzoek volgde dat er op dit moment geen zodanig “zachte” producten verkrijgbaar zijn bij de fabrikanten die hieraan voldoen. De meest benaderende zal dus gezocht moeten worden. Voor de ontkoppeling van de draagstructuurknopen werd er wel een geschikt materiaal gevonden. Dit wordt hieronder verder beschreven.

4.2.1 CDM-strip

Zoals in het marktonderzoek beschreven werd produceert CDM polyurethaanstrips die geschikt kunnen zijn voor de toepassing binnen de modulaire unitbouw. Omdat deze units relatief licht zijn werd door de ingenieurs van het bedrijf zelf de berekening gemaakt voor de keuze van het optimale type, en werd er aangeraden om de strip van het type CDM-PF-95 te kiezen. Deze strips hebben de dikte van 25 mm en een breedte van 50 mm dewelke overeenkomt met de breedte van de langsprofielen van de units. Met deze strips is het mogelijk om een resonantiefrequentie te behalen van maximum 30 Hz voor enkel het eigengewicht van de units, en 22 Hz bij de akoestische ontwerpbelasting. De bepaling van de ontwerpbelasting en de bijhorende keuze van type wordt hieronder weergegeven.

De units die beschikbaar gesteld werden om de testen op uit te voeren zijn units van 6 meter lang en 3 meter breed. De units zelf hebben een gewicht van 2500 kg (G, permanente last). Dit is enkel de lege ruimte zonder bemeubeling of andere mobiele lasten. De units zijn daarnaast stabiliteitstechnisch ontworpen om een gebruiksbelasting van 300 kg/m² (Q, mobiele last) te kunnen dragen. De units dragen deze lasten via de twee langsprofielen af naar de fundering of naar een onderstaande de unit. De langsprofielen hebben een breedte van 50 mm. Het contactoppervlak waaronder de strips zullen komen heeft dus de volgende oppervlakte:

$$A = 2 * 6\ 000 * 50 = 600\ 000\ mm^2$$

Vervolgens is de uiteindelijke keuze van het juiste type PUR-strip afhankelijk van drie belastingen, zijnde de dode last (minimum), akoestische ontwerpbelasting (verwachte werkbelasting) en de maximumlast. Deze worden als volgt berekend:

- Dode last

$$G = \frac{2\ 500 * 9,81}{600\ 000} = 0,041\ N/mm^2$$

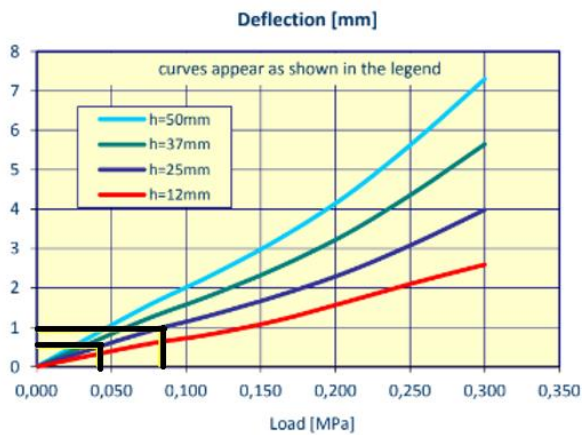
- **Akoestische ontwerpbelasting**

$$G + \left(\frac{Q}{3}\right) = \frac{2\,500 * 9,81 + \frac{300 * 6 * 3 * 9,81}{3}}{600\,000} = 0,07 \text{ N/mm}^2$$

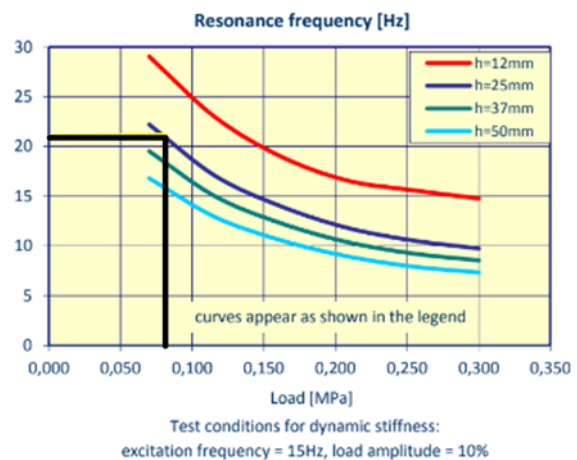
- **Maximale belasting**

$$G + Q = \frac{2\,500 * 9,81 + 300 * 6 * 3 * 9,81}{600\,000} = 0,129 \text{ N/mm}^2$$

CDM levert voor de CDM-strips een technische fiche aan waarmee bepaald kan worden welk type het meest geschikt is voor de beschouwde toepassing. Dit wordt gedaan aan de hand van de inzakking en de resonantiefrequentie, beide in functie van de belasting.



Figuur 22: Zakking i.f.v de belasting [13]



Figuur 21: Resonantiefrequentie i.f.v. de belasting [13]

In het geval van de dode belasting treedt er volgens bovenstaande berekeningen een druk van 0,04 MPa op in de CDM-strips. Uit Figuur 21 blijkt dat deze belasting zorgt voor een zakking van 0,5 mm bij een dikte van 25 mm. In deze toestand is de resonantiefrequentie 30 Hz volgens Figuur 22.

In de gebruikstoestand, waarbij de units belast gaan zijn met de akoestische ontwerpbelasting, is er een druk van 0,07 MPa. Figuur 21 toont dat bij deze belasting en een dikte van 25 mm er een zakking van 1 mm ontstaat. Bij deze belasting de resonantiefrequentie van het materiaal 22 Hz.

4.2.2 Insulco-InsulWood

In het marktonderzoek is gebleken dat er voor in deze toepassingen als doorlopende veerkrachtige laag een materiaal gekozen moet worden met een dynamische stijfheid van 0,37 MN/m³. Dit om een voldoende grote geluidsreductie te krijgen binnen het hoorbereik. Uit het marktonderzoek is echter gebleken dat er geen geschikte materialen op de markt zijn die een zulke lage dynamische stijfheid bezitten. Daarom is er toch als veerkrachtige laag gekozen voor insulWood van Insulco omdat dit materiaal past binnen het principe van modulair bouwen aangezien het ontworpen is om aangebracht te worden op eveneens relatief lichte houten vloeren. De technische eigenschappen van InsulWood liggen ook het dichtst bij de streefwaarde op vlak van dynamische stijfheid.

De dynamische stijfheid van insulWood heeft een waarde van 5 MN/m³ volgens EN 29052-1 en de dekvloer heeft een oppervlaktemassa van 15kg/m². Met formule 5 kan vervolgens de resonantiefrequentie berekend worden:

$$f_r = \frac{1}{2*\pi} * \sqrt{\frac{s}{m}} = \frac{1}{2*\pi} * \sqrt{\frac{5*10^6}{15}} = 91,88 \text{ Hz}$$

Met deze berekening wordt een resonantiefrequentie van ongeveer 92 Hz bekomen. Dit ligt hoger dan de geluidrempel van 20 à 25 Hz, maar volstaat voor de metingen die zullen plaatsvinden omdat de frequentie laag genoeg ligt om invloed te hebben op het gedrag van de structuur. Aan de hand van vergelijking 6 wordt de contactgeluidsreductie bepaald, waaruit besloten kan worden dat enkel bij een geluidsfrequentie hoger dan de resonantiefrequentie effectief een geluidsreductie ΔL gaat optreden ten gevolge van het aanbrengen van de veerkrachtige laag.

$$\Delta L = 40 * \log \frac{f}{f_0} \text{ [dB]}$$

4.3 Geldende Europese normen

4.3.1 Luchtgeluid

Residentiële bouw

De norm in verband met de akoestische eisen in residentiële gebouwen NBN S01-400-1:2008 is enkel geldig indien in de zendruimte het geluidsniveau niet hoger is dan 80 dB. Als de units worden gebruikt in residentiële gebouwen of kantoorgebouwen zal deze grens in normale omstandigheden nooit overschreden worden. Daarnaast kan de norm ook worden opgesplitst in een normaal en een verhoogd akoestisch comfort. Hierbij wordt gesteld dat er respectievelijk tevredenheidspercentages van 70 en 90 procent van de gebruikers van het gebouw gaan zijn.

Zoals in 4.4 beschreven is wordt in de zend- en ontvangtruimte het geluidsdrukniveau gemeten. Het verschil tussen deze metingen wordt nadien gestandaardiseerd in functie van de nagalmtijd. De waarde die dan bekomen wordt is dan het gestandaardiseerd geluidsdrukniveau $D_{nT,w}$ tussen twee ruimtes. In Tabel 1 worden de minimaal vereiste waarden weergegeven.

ZENDRUIMTE buiten de woning	ONTVANGSTRUIMTE binnen de woning	Normaal akoestisch comfort	Verhoogd akoestisch comfort
Elke ruimte	Elke ruimte uitgezonderd een technische ruimte of inkomhal	$D_{nT,w} \geq 54$ dB	$D_{nT,w} \geq 58$ dB
Elke ruimte van een nieuwbouw rijwoning	Elke ruimte van een nieuwbouw rijwoning uitgezonderd een technische ruimte	$D_{nT,w} \geq 58$ dB	$D_{nT,w} \geq 62$ dB
ZENDRUIMTE binnen de woning	ONTVANGSTRUIMTE binnen de woning	Normaal akoestisch comfort	Verhoogd akoestisch comfort
Slaapkamer, keuken, woonkamer en badkamer (die niet alleen toebehoort aan de slaapkamer/ontvangstruimte)	Slaapkamer, studeerruimte	$D_{nT,w} \geq 35$ dB	$D_{nT,w} \geq 43$ dB

Tabel 1: Gestandaardiseerd geluidsdrukniveauverschil tussen twee ruimten bij residentiële bouw [6]

De luchtgeluidsisolatie wordt meestal aangeduid met een correctie voor laagfrequente en niet laag frequente geluidsbronnen, bijvoorbeeld $D_{n,T,w}$ (C;Ctr) = 54 (-1;-5) dB. De eerste correctie C is voor het niet-laagfrequent luchtgeluid zoals bijvoorbeeld spelende kinderen. Ctr is een correctie voor het laagfrequente geluid zoals verkeerslawaaï. De waarden van deze correcties zijn steeds negatief, wat wilt zeggen dat de scheidingsconstructie steeds een lagere akoestische performantie heeft tegen luchtgeluid met zeer lage en hoge frequenties.

Schoolgebouwen

De akoestische eisen omtrent scholenbouw zijn terug te vinden in de norm NBN S01-400-2:2012. Net als bij residentiële gebouwen is er ook in deze norm een onderverdeling in een normaal en een verhoogd akoestisch comfort voorzien. Het verhoogd akoestisch comfort is enkel van toepassing in leslokalen waar kinderen met auditieve of communicatieve beperkingen les krijgen. De eisen omtrent de geluidsreductie tussen ruimtes in schoolgebouwen is afhankelijk van welke functie de zend- en ontvangstruimte hebben. Al deze waarden worden samengevat in Tabel 2. Deze tabel is enkel geldig voor normaal akoestisch comfort. Voor lokalen met een verhoogd akoestisch comfort moet de geluidsreductie met 4 dB verhoogd worden.

$D_A = D_{nT,w} + C$ [dB]	zendruimte										
ontvangstruimte	leslokaal	kleuterklas	lokaal voor muziekonderricht	studiezones / opzoekingsruimte	binnenspeelplaats	sporthal / turnzaal / atelier	leraarskamer	sanitaire ruimte	circulatienuimte (kortstondig gebruik)	circulatienuimte (doorlopend gebruik)	ontmoetingsruimte
leslokaal	≥ 44	≥ 48	≥ 56	(*)	≥ 56	≥ 56	≥ 48	≥ 48	≥ 32	≥ 36	≥ 44
kleuterklas	(*)	≥ 44	≥ 52	(*)	≥ 32	≥ 52	≥ 44	≥ 44	≥ 32	≥ 36	≥ 44
lokaal voor muziekonderricht	(*)	(*)	≥ 52	(*)	≥ 56	≥ 56	(*)	≥ 48	≥ 32	≥ 36	≥ 44
studiezones / opzoekingsruimte	≥ 48	≥ 52	≥ 60	≥ 40	≥ 60	≥ 60	≥ 52	≥ 52	≥ 32	≥ 36	≥ 44
sporthal / turnzaal / binnenspeelplaats / atelier	(*)	(*)	(*)	(*)	≥ 32	≥ 32	(*)	≥ 32	-	-	-
leraarskamer	(*)	≥ 44	≥ 52	(*)	≥ 52	≥ 52	≥ 44	≥ 44	(*)	(*)	(*)
sanitaire ruimte	(*)	(*)	(*)	(*)	≥ 32	≥ 32	(*)	≥ 32	-	-	-
circulatienuimte / ontmoetingsruimte	(*)	(*)	(*)	(*)	-	-	≥ 38	-	-	-	-

Tabel 2: Eisen voor luchtgeluidsisolatie in schoolgebouwen [6]

Ten slotte is er ook nog een eis voor de geluidsreductie tussen ruimtes van een schoolgebouw met ruimtes van een ander naastgelegen gebouw. De eis is als volgt:

$$D_A = D_{n,T,w} + C \geq 56 \text{ dB [6]}$$

Met: D_A = De gecorrigeerde geluidsreductie van de scheiding [dB]
 $D_{n,T,w}$ = De gestandaardiseerde geluidsreductie van de scheiding [dB]
 C = Correctiefactor voor niet – laagfrequente geluidsbronnen [dB]

4.3.2 Contactgeluid

Residentiële bouw

Net als voor de luchtgeluidsreductie tussen ruimtes in residentiële gebouwen worden de akoestische eisen voor contactgeluid in residentiële gebouwen ook beschreven in de norm NBN S01-400-1:2008. Bij contactgeluidsmetingen wordt er in de zendruimte door een gestandaardiseerde klopmachine een contactgeluid uitgezonden. Het resterende geluidsniveau van dat contactgeluid wordt in de ontvangstruimte opgemeten en mag maar een bepaalde maximale waarde $L'_{nT,w}$ hebben. Deze maximale waarden voor normaal en verhoogd akoestisch comfort worden weergegeven in Tabel 3.

ZENDRUIMTE buiten de woning	ONTVANGSTRUIMTE binnen de woning	Normaal akoestisch comfort	Verhoogd akoestisch comfort
Elke ruimte	Elke ruimte uitgezonderd een technische ruimte of inkomhal	$L'_{nT,w} \leq 58$ dB	$L'_{nT,w} \leq 50$ dB
Elke ruimte uitgezonderd een slaapkamer	Slaapkamer	$L'_{nT,w} \leq 54$ dB	$L'_{nT,w} \leq 50$ dB
ZENDRUIMTE binnen de woning	ONTVANGSTRUIMTE binnen de woning	Normaal akoestisch comfort	Verhoogd akoestisch comfort
Slaapkamer, keuken, woonkamer en badkamer (die niet alleen toebehoort aan de slaapkamer/ontvangstruimte)	Slaapkamer, studeerruimte	/	$L'_{nT,w} \leq 58$ dB

Tabel 3: Eisen voor het gestandaardiseerd contactniveauverschil [7]

Het contactgeluidsniveau $L'_{nT,w}$ wordt vaak aangeduid met de correctie c_1 . Deze correctie krijgt een bepaalde waarde als er gemeten wordt op een naakte houten of betonnen vloer. Indien er een zachtere vloerafwerking aanwezig is, zal de waarde van deze correctie verwaarloosbaar zijn.

Schoolgebouwen

Net als bij luchtgeluidsisolatie worden de eisen aan het maximaal toegelaten gestandaardiseerd contactgeluidsniveau weergegeven in de norm NBN S01-400-2:2012. Ook voor het contactgeluid in schoolgebouwen wordt het akoestisch comfort opgedeeld in een normaal en een verhoogd akoestisch comfort. Het verhoogd akoestisch comfort voor contactgeluid is ook enkel van toepassing in lokalen waar kinderen met een auditieve of communicatieve beperking les krijgen. Net als bij de residentiële gebouwen wordt er een gestandaardiseerd klopmachine geplaatst in de zendruimte en wordt er een geluidsmeting uitgevoerd in de ontvangstruimte. Dit contactgeluidsniveau moet dus best zo klein mogelijk zijn, de maximale waarden voor normaal akoestisch comfort worden samengevat in onderstaande tabel. Om een verhoogd akoestisch comfort te behalen dienen deze waarden nog eens met 4dB verlaagd te worden. Maar er mag in dit geval nooit een contactgeluidsniveau van minder dan 45 dB geëist worden.

$L'_i = L'_{nT,w} + C_i$ [dB]	bronruimte							
ontvangstruimte	leslokaal / leraarskamer / sanitaire ruimte	kleuterklas / lokaal voor muziekonderricht	studiezone	opzoekingsruimte	sporthal / turnzaal / binnenspeelplaats / atelier	circulatie ruimte (kortstondig gebruik)	circulatie ruimte (doorlopend gebruik)	ontmoetingsruimte
lokaal voor muziekonderricht / studiezone	≤ 55	≤ 50	≤ 60	≤ 55	≤ 45	≤ 60	≤ 55	≤ 50
leslokaal / kleuterklas	≤ 60	≤ 55	≤ 65	≤ 60	≤ 45	≤ 65	≤ 60	≤ 55
opzoekingsruimte / leraarskamer	≤ 60	≤ 55	≤ 65	≤ 60	≤ 55	≤ 65	≤ 60	≤ 55
sporthal / turnzaal	≤ 65	≤ 65	-	-	≤ 60	-	65	≤ 60
atelier / binnenspeelplaats / sanitaire ruimte / circulatie ruimte / ontmoetingsruimte	-	-	-	-	≤ 65	-	-	-

Tabel 4: Eisen voor contactgeluidisolatie in schoolgebouwen [7]

4.4 Testmethoden

Er zullen globaal gezien twee verschillende soorten testen uitgevoerd worden. Enerzijds wordt de luchtgeluidstransmissie tussen de units gemeten, en anderzijds de contactgeluidstransmissie. Beide metingen vergen een geluidsbron en een meetmicrofoon. De geluidsbronnen zijn voor de twee types van geluidsoverdracht verschillend aangezien het om twee verschillende types van geluid gaat. Alvorens de metingen werden gestart werd de nagalmtijd van de ontvangstruimte bepaald. Hieronder volgt een overzicht van de methodes van de uitgevoerde metingen, samen met de gebruikte meetapparatuur.

4.4.1 Meting van de nagalmtijd in de ontvangstruimte

De nagalmtijd van een ruimte is rechtstreeks afhankelijk van zijn volume, bemeubeling, materiaalstromen, ... en is bijgevolg niet gewenst om invloed te hebben op de metingen die uitgevoerd worden op andere elementen. Concreet wilt dit zeggen dat de nagalm in de ontvangstruimte geen invloed mag hebben op resultaten van een meting die niet bedoeld is om eigenschappen van de ontvangstruimte te onderzoeken. In de metingen die uitgevoerd werden in het kader van deze masterproef was het de bedoeling om de eigenschappen van de structuur te vinden, onafhankelijk van de ter beschikking gestelde units.

Om de invloed van de eigenschappen van de ontvangstruimte uit te sluiten wordt de nagalmtijd van deze ruimte gemeten en later gebruikt als correctiefactor in de berekening van de resultaten. Het is in de keuze van de testopstellingen dus uiterst belangrijk om zoveel mogelijk gebruik te maken van eenzelfde ontvangstruimte om eventuele afwijkingen tussen de metingen onderling hiervan afkomstig tot een minimum te beperken. Indien er toch gebruik gemaakt moet worden van verschillende ontvangstruimtes dient van elke ruimte apart de nagalmtijd bepaald te worden en moet deze correct gekoppeld worden aan de metingen die hier plaatsvonden. In de bespreking van de meetmethoden voor luchtgeluid en contactgeluid wordt verder besproken hoe de gemeten nagalmtijd gebruikt wordt om de gemeten waarden te corrigeren.

De nagalmtijd werd gemeten met de zogenaamde 'integrated impulse response'-methode. Hierbij wordt er met een speciaal klaptoestel (zie Figuur 23) een harde impuls gegenereerd en wordt er vervolgens gemeten hoe lang het duurt vooraleer het geluidsdrukniveau terug 60 dB gezakt is ten opzichte van de gegenereerde piek. De gebruikte meetmicrofoon (zie Figuur 24) is in staat om dit zelfstandig te bepalen. Het is hierbij belangrijk dat de microfoon zich minstens 1 meter van de impulsbron bevindt en niet hier naartoe gericht is. De meting wordt op verschillende plaatsen binnen de ruimte uitgevoerd waarop later de gemiddelde waarde gebruikt zal worden in de correcties.



Figuur 23: Klaptoestel



Figuur 24: Meetmicrofoon

4.4.2 Meting van de luchtgeluidsisolatie

Allereerst dient er voor de metingen rond luchtgeluid gemeten te worden hoeveel omgevingsgeluid er zich in de ruimte voordoet. Het geluidrukniveau van het achtergrondgeluid wordt weergegeven door L_b . Deze meting wordt gedaan omdat de resultaten enkel direct (= zonder tussenbewerkingen) gebruikt mogen worden indien het geluidrukniveau in de ontvangstruimte (gegeven door L_2) minstens 10 dB hoger ligt in elke 1/3-octaaftband. Indien dit niet gehaald wordt, maar wel groter dan 6 dB blijft wordt er een correctie toegepast zoals hieronder door formule 8 is weergegeven:

$$(8) L = 10 \log(10^{\frac{L_{sb}}{10}} - 10^{\frac{L_b}{10}}) [6]$$

Met: L = gecorrigeerd geluidrukniveau in de ontvangstruimte [dB]
 L_{sb} = gemeten geluidrukniveau L_2 in de ontvangstruimte [dB]
 L_b = het achtergrondgeluidrukniveau [dB]

Wanneer er ook geen 6 dB verschil behaald wordt mag er maximaal een meetcorrectie van -1,3 dB toegepast worden. Voor de banden waarin het verschil niet behaald wordt zal L dus overschat worden waardoor de luchtgeluidsisolatie waarde onderschat zal worden.

Nadat het achtergrondgeluid bepaald is kunnen de metingen in de zend- en ontvangstruimte bij actieve geluidsbron uitgevoerd worden. Hiervoor zal er in de zendruimte een puntbron geplaatst worden die een roze ruis uitzendt. De puntbron (zie Figuur 25) wordt op minstens twee verschillende posities geplaatst om de metingen uit te voeren. Deze posities bevinden zich minstens op 1,4 m van elkaar en 1 m van naastgelegen oppervlakken zoals muren, plafond en vloer. Ook de hoogte dient gevarieerd te worden zodat de twee posities uiteindelijk in zowel verticaal als horizontaal in verschillende vlakken liggen.

Tijdens de meting zal eerst het geluidsdruk niveau in de zendruimte gemeten worden (weergegeven als L_1). Hierna wordt het resterende geluidsdruk niveau L_2 in de ontvangstruimte gemeten. Beide metingen gebeuren door de meetmicrofoon driemaal in een halfcirkelvormige beweging te bewegen (straal = 1 armlengte) onder de hoeken 45° à 60° van elkaar verwijderd en steeds met een minimumafstand van 1 meter tot de luidspreker en 0,5 meter tot elk oppervlak. Deze meting duurt minstens 30 seconden. Figuur 25 toont de gebruikte puntbron en Figuur 26 toont de operator die met gestrekte arm de meting uitvoert in de zendruimte.



Figuur 25: Puntbron



Figuur 26: Meting door operator

Om de uiteindelijke luchtgeluidsisolatiewaarde tussen de units te kennen wordt formule 9 gebruikt. Deze formule bevat de correctie die toegepast wordt om de nagalmtijd van de ontvangstruimte te corrigeren, en levert dan ook het gestandaardiseerd geluidsdruk-niveaoverschil tussen de twee ruimtes.

$$(9) D_{nT} = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{T}{T_0} [6]$$

Met:

D_{nT} = gestandaardiseerd geluidsdruk-niveaoverschil [dB]

L_1 = gemeten geluidsdruk-niveau L_1 in de zendruimte [dB]

L_2 = gemeten geluidsdruk-niveau L_2 in de ontvangstruimte [dB]

T = gemeten nagalmtijd van de ontvangstruimte [s]

Uiteindelijk kunnen de bekomen waarden voor de luchtgeluidsisolatie omgevormd worden tot een eengetalswaarde. Deze eengetalswaarde wordt berekend met de resultaten uit het interval tussen 100 Hz en 3150 Hz. Deze eengetalswaarde wordt nog gevolgd door twee correctiefactoren C en C_{tr} . Hierbij moet de factor C toegepast worden indien de geluidsbron voornamelijk hoogfrequent is (bv. spelende kinderen). C_{tr} moet toegepast worden indien de geluidsbron eerder laagfrequent is (bv. verkeer, *tr = traffic*).

4.4.3 Meting van het contactgeluid

Voor de meting van het contactgeluid is de meetmethode grotendeels analoog aan deze voor de metingen van de luchtgeluidsisolatie. De geluidsbron verschilt echter wel sterk van deze voor het luchtgeluid. De geluidsbron die voor het genereren van klop-geluid gebruikt wordt is een klop-geluidmachine. Dit is een gestandaardiseerde machine die een geijkte hoeveelheid energie overbrengt op het vlak waarop hij gepositioneerd is. De machine laat aan een frequentie van 10 Hz vijf hamers die elk 0,5 kg wegen vrijvallen van op een hoogte van 4 cm. Dit is een gestandaardiseerde machine waardoor er in de zendruimte geen enkele meting uitgevoerd moet worden. Figuur 27 toont de klop-geluidmachine die gebruikt werd in de uitgevoerde metingen.



Figuur 27: Gestandaardiseerd klop-geluidmachine

De norm schrijft voor contactgeluid, in tegenstelling tot luchtgeluid, een eengetalswaarde voor van het resterende contactgeluiddrukkniveau afkomstig van een gestandaardiseerde klopgeluidmachine. Dit contactgeluiddrukkniveau wordt eveneens gemeten volgens de voorschriften zoals ze voor luchtgeluid gelden. Ook hier geldt dat het gegenereerde contactgeluiddrukkniveau minstens 10 dB hoger moet liggen voor elke 1/3 - octaafband om de resultaten zonder correctie te mogen gebruiken. Indien het verschil (voor sommige banden) tussen de 6 dB en 10 dB ligt wordt het resultaat volgens dezelfde formule 8 gecorrigeerd. Voor een verschil lager dan 6 dB geldt hier eveneens de maximale reductie van 1,3 dB met dezelfde gevolgen als bij de metingen voor het luchtgeluid.

De uiteindelijke waarde van het contactgeluiddrukkniveau dient eveneens gecorrigeerd te worden aan de hand van de gemeten nagalmtijd. Dit is vervat in formule 10, die het gestandaardiseerd contactgeluidniveau L'_{nT} geeft.

$$(10) L'_{nT} = L_i - 10 \log \frac{T}{T_0} [7]$$

Met:

L'_{nT} = gestandaardiseerd contactgeluidniveau [dB]

L_i = gemeten contactgeluidniveau in de ontvangstruimte [dB]

T = gemeten nagalmtijd van de ontvangstruimte [s]

De eengetalswaarde voor het contactgeluidniveau wordt over dezelfde frequentieband tussen 100 Hz en 3150 Hz genomen en is ook gevolgd door een correctiefactor C_i . Deze correctiefactor moet toegepast worden de vloer waar het contactgeluid gegenereerd wordt een naakte houten vloer of een naakte betonnen vloer betreft. Bij een zachte vloerbekleding of de toepassing van een zwevende dekvloer wordt deze factor dus buiten beschouwing gelaten. Indien de gecorrigeerde eengetalswaarde gebruikt wordt, wordt deze aangeduid als L_I in plaats van L'_{nT} .

4.5 Testopstellingen

4.5.1 Algemeen

Deze masterproef tracht om een goed idee te vormen van de akoestisch zwakke plekken in de opbouw van de units. In de onderzoeksfase werden deze zwakke plekken kwalitatief opgespoord, maar werden er geen berekeningen uitgevoerd die de onderlinge verhoudingen hiervan inschatten. Dit wordt immers uitgezocht aan de hand van gerichte testen. Het is hierbij belangrijk dat deze testen gestructureerd gebeuren op een manier waarbij de resultaten zo veel mogelijk benut kunnen worden in functie van het bovengenoemde doel.

De oplossingen die in 4.2 besproken werden bestaan uit twee verschillende methoden die tevens toegepast zullen worden op twee totaal verschillende plaatsen in de units. Hierbij zal de insulWood bovenop de bestaande draagvloer geplaatst worden om een zwevende dekvloer te vormen, en zullen de CDM-strips tussen de oplegpunten van twee boven elkaar geplaatste units toegepast worden. De elastische laag van Insulco zal hierbij het directe contactgeluid afkomstig van impulsen rechtstreeks op de vloer verminderen, en de CDM-strips zullen zorgen voor een vermindering van zowel contact- als luchtgeluidstransmissie door de akoestische transmissieweg doorheen het oplegpunt te isoleren.

Omdat het aspect contactgeluid verbeterd zal worden door zowel de insulWood als de CDM-strips is het interessant om te leren welke van beide oplossingen hier de meeste invloed op heeft, waardoor eveneens bekend wordt of de vloeropbouw en de koude oplegging voor al dan niet evenveel contactgeluidsoverdracht tussen de units zorgen. De testopstellingen zullen hierdoor zodanig opgesteld moeten worden dat hiertussen een goede vergelijking kan gedaan worden. De luchtgeluidsisolatie zal enkel verbeterd worden door de CDM-strips. Hier is het dus enkel belangrijk dat de meting een keer met en een keer zonder toepassing van de strips zal plaatsvinden.

Tabel 5 geeft de testopstellingen weer, samen met de uit te voeren metingen die hier van toepassing zijn. De nummers in de tabel geven de chronologische volgorde van de uit te voeren metingen aan om deze zo vlot mogelijk te laten verlopen. Het spreekt voor zich dat er enkel metingen uitgevoerd worden wanneer verwacht kan worden dat de verandering in de opstelling hier een invloed zal hebben. Zo zal na toepassing van de zwevende dekvloer bijvoorbeeld niet opnieuw bekeken worden hoe de luchtgeluidstransmissie verloopt. De metingen worden later in dit deel individueel overlopen met de nodige uitleg erbij.

Opstelling	Scheiding knoop	Zwevende vloer	Luchtgeluid	Contactgeluid
1			1	2
2		X		3
3	X		4	5
4	X	X		6

Tabel 5: Overzicht meetopstellingen

Warsco stelde drie units ter beschikking waarop de testen konden uitgevoerd worden, weergegeven in Figuur 28. Deze units waren van het nieuwe type aangezien de opstelling recent veranderd werd en de CDM-strips bijgevolg hiervoor berekend werden. De metingen in het kader van deze masterproef vonden plaats in twee boven elkaar geplaatste units omdat de CDM-strips alleen hier zullen toegepast kunnen worden. Op vraag van Warsco zelf werden eveneens de lucht- en contactgeluidstransmissies gemeten van naast elkaar geplaatste units omdat zij dit in het kader van nieuwe ontwikkelingen interessant vonden. De resultaten hiervan zijn eveneens opgenomen in de akoestische meetrappen en zullen waar nodig gebruikt worden in de bespreking van de resultaten, maar vallen dus niet volledig in het kader van deze proef en worden dus ook minder gedetailleerd besproken.



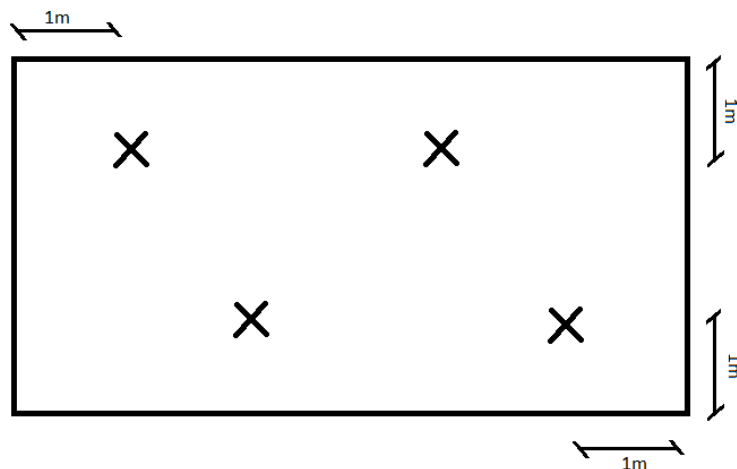
Figuur 28: Ter beschikking gestelde units

4.5.2 Opsomming van de uitgevoerde metingen in chronologische volgorde

- **Meetopstelling 1:**

In meetopstelling 1 zullen de akoestische prestaties van de huidige situatie opgemeten worden. Deze metingen dienen als referentie voor de vergelijking met de prestaties na het toepassen van de gekozen oplossingen, maar geven Warsco eveneens een officieel rapport dat ze kunnen gebruiken in de verkoop van de units zoals ze nu zijn. Deze meting zal vergeleken worden met de bestaande normering rond geluidsisolatie om te controleren in welke mate de units voldoen aan de huidige eisen.

De metingen voor het luchtgeluid (L1 in meetrapport) vonden plaats op twee posities binnen de unit. Omwille van de beperkte afmetingen van de unit en de reglementering rond de meetopstellingen (besproken in 4.4.2) was dit het maximaal aantal mogelijke posities. De metingen van het contactgeluid (C1 in meetrapport) konden plaatsvinden op vier posities binnen de unit. Hierbij werd de klopmachine steeds opgesteld in een hoek van 45° met de stalen liggers onder de vloerplaat om de metingen te laten gelden voor de volledige vloeropbouw. Moest de machine opgesteld worden recht bovenop en in lijn met een stalen ligger zou dit het contactgeluid nadelig beïnvloeden aangezien hier de transmissieweg veel directer is dan dat gemiddeld voor de vloer geldig is. Figuur 29 geeft de posities van de klopmachine weer.



Figuur 29: Posities van de klopmachine

- **Meetopstelling 2:**

In opstelling 2 wordt de werking van de zwevende dekvloer getest. Omdat deze enkel invloed heeft op het contactgeluid zal dus alleen de meting met de klopmachine uitgevoerd worden (C2). Hierbij wordt bovenop de bestaande draagvloer een laag insul-Wood geplaatst met daar bovenop een spaanplaat van 22mm dik (dit is dezelfde plaat als degene die nu als vloerplaat gebruikt wordt). De gecreëerde zwevende dekvloer wordt niet over de volledige vloeroppervlakte van de unit geplaatst omdat het volgens de specialist akoestiek die de metingen uitvoert volstaat om dit enkel te doen onder de kloppoppervlakte van de klopmachine. De afmetingen van de gebruikte zwevende dekvloer bedroeg 2m x 1m. Figuur 30 geeft de opstelling weer van de klopmachine geplaatst op de zwevende dekvloer.



Figuur 30: Opstelling klopmachine bovenop zwevende dekvloer

- **Meetopstelling 3:**

In de derde meetopstelling wordt de zwevende dekvloer terug verwijderd en worden de CDM-strips tussen de opleggingen van de units geplaatst. Deze worden geplaatst over de volledige opleglengte aan weerszijden van de units (2 x 6m). Hiervoor werd de bovenste unit opgetild. Deze meting zal de invloed van de strips op zowel het contact- (C3 in meetrapport) als luchtgeluid (L2 in meetrapport) meten. Figuur 31 geeft weer hoe de stroken tussen de oplegging geplaatst werden.



Figuur 31: Plaatsing CDM-strips tussen de opleggingen

Om de units precies boven elkaar te centreren wordt er door Warsco gebruik gemaakt van centreerpennen op de hoeken van de bovenste unit die passen in de hijsogen van de onderstaande unit. Omdat deze eveneens een direct contact kunnen vormen tussen de twee draagstructuren was het belangrijk om te verzekeren dat de pennen de rand van de gaten niet raakten. Figuur 32 geeft weer hoe dit gedaan werd.



Figuur 32: Centreerpennen en hijs-oog van de unit

- **Meetopstelling 4:**

Na het plaatsen van de CDM-strips wordt nu ook de zwevende dekvloer opnieuw aangebracht. In deze meting zal dus getest worden hoeveel het contactgeluid verminderd wordt indien beide oplossingen gecombineerd worden (C4 in meetrapport). Omdat de zwevende dekvloer geen invloed heeft op het gedrag van de luchtgeluidtransmissie zal deze ook niet opnieuw gemeten worden.

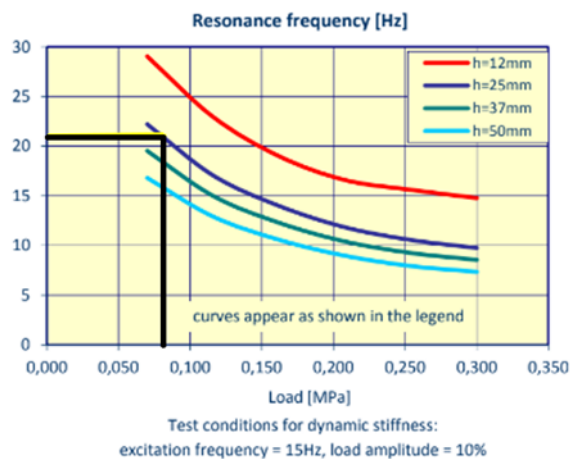
- **Meetopstellingen 5 en 6 (supplementaire metingen op vraag van Warsco):**

Op vraag van Warsco wordt ook de luchtgeluidtransmissie tussen twee naast elkaar geplaatste units gemeten (L3 in meetrapport), samen met het contactgeluid met en zonder toepassing van de zwevende dekvloer die eerder getest werd in de boven elkaar geplaatste units (respectievelijk C6 en C5 in meetrapport).

4.6 Hypothese

Om een eerste gevoel te krijgen welke resultaten te verwachten waren tijdens de metingen werden enkele korte beschouwingen gedaan. Hierbij werd de ideale situatie die de fabrikanten voorschreven vergeleken met de situatie waarin de testen zouden plaatsvinden. Op deze manier konden eventuele afwijking tijdens de metingen meteen verklaard/geïnterpreteerd worden.

De uitvoeringsmethodes van de metingen werden in deel 4.5 besproken. Hierbij is echter te bemerken dat de units die gebruikt zijn niet bemeubeld of belast waren met andere mobiele lasten. De CDM-strips waren echter berekend voor een gebruikslast, die nu niet aanwezig was. De strips waren nu belast volgens de dode last van 0,041 N/mm² en niet volgens de akoestische ontwerpbelasting van 0,07 N/mm². Dit wilt zeggen dat de strips maar voor ongeveer voor de helft van de optimale belasting belast zijn. Dit zal als gevolg hebben dat de indrukking van het PU-schuim kleiner gaat zijn en dat de resonantiefrequentie hoger gaat liggen, wat terug te vinden is in Figuur 33. Met formule 6 kan dan met een snelle berekening aangetoond worden dat de geluidsreductie lager ligt bij de dode last dan bij de akoestische ontwerpbelasting omdat f_0 dus hoger zal liggen en bijgevolg ΔL langer negatief zal blijven (wat wilt zeggen dat er geen extra reductie zal plaatsvinden).



Figuur 33: Resonantiefrequentie in functie van de belasting [13]

De zwevende dekvloer die opgebouwd is uit een spaanplaat met dikte 22mm en als veerkrachtige laag de insulWood, gaat volgens de berekeningen in deze toepassing een resonantiefrequentie hebben van ongeveer 92 Hz. Volgens formule 6 kan er aangetoond worden dat er slechts een geluidsreductie zal plaatsvinden bij contactgeluiden met een frequentie hoger dan deze resonantiefrequentie. Dit zal er dus voor zorgen dat de storende contactgeluiden met een lage frequentie niet extra worden tegengehouden door het toepassen van de zwevende dekvloer.

5 Testresultaten

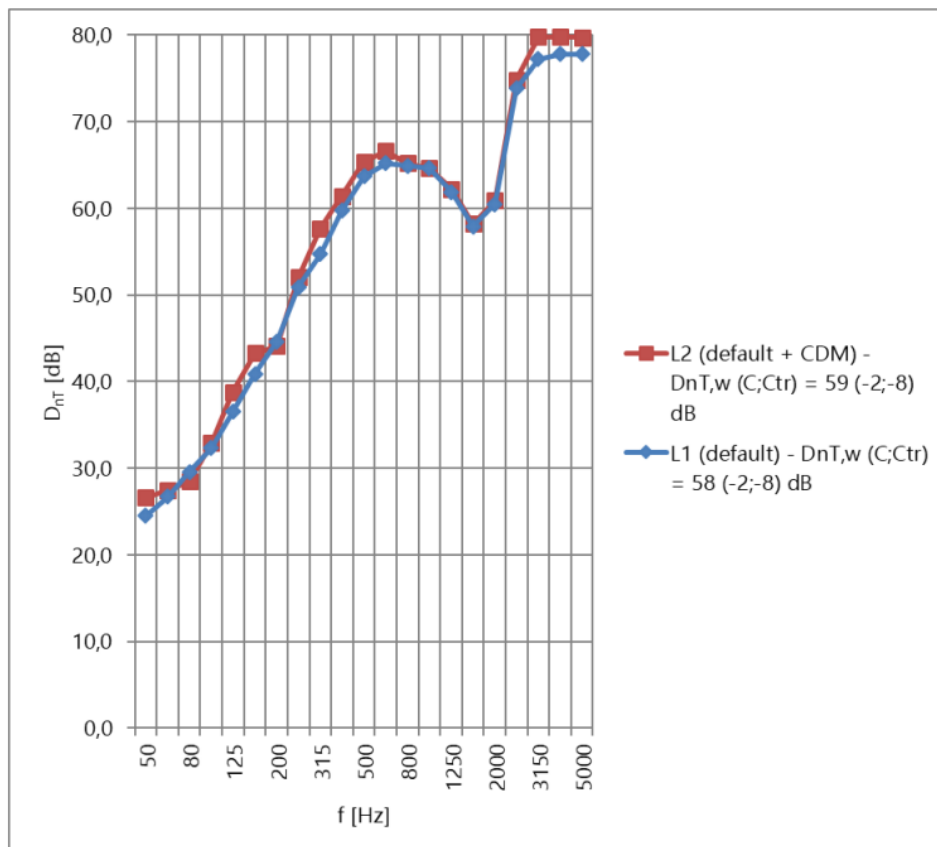
5.1 Resultaten luchtgeluidmetingen

In Tabel 6 zijn de gestandaardiseerde geluidsdrukniveaoverschillen weergegeven voor de luchtgeluidmetingen L1 en L2, met respectievelijke waarden van 58 en 59 dB. Daarnaast is er ook voor iedere meting een D_A -waarde weergegeven. Deze waarden zijn gecorrigeerd voor niet-laag frequentie geluidsbronnen en kunnen met onderstaande formule berekend worden (ook besproken in 4.3.1):

$$D_A = D_{nT,w} + C$$

Nr.	Configuratie	Richting ²	Resultaat: $D_{nT,w}$ [dB]	Resultaat D_A ³ [dB]
L1	Standaard-opbouw	↓	58	56
L2	Standaard-opbouw + CDM-pads	↓	59	57

Tabel 6: ééngetalswaarde van het gemeten gestandaardiseerd geluidsdrukniveaoverschil [6]



Figuur 34: Vergelijking tussen luchtgeluidsmeting L1 en L2 [6]

In Figuur 34: Vergelijking tussen luchtgeluidsmeting L1 en L2 is de vergelijking van de luchtgeluidmetingen L1 en L2 weergegeven. Zoals in de figuur zichtbaar is, is het geluidsdrukniveau van de twee metingen over een frequentiebereik van 50 tot 5000Hz opgemeten, waarbij het verloop van de twee metingen ongeveer identiek zijn. Bij 50

Hz zorgt de standaardopstelling van de units voor een verticale geluidsreductie van 25 dB. Bij de opstelling met CDM-strips is dit 27dB. Vanaf dit punt neemt de geluidsreductie toe tot ongeveer 65dB bij een frequentie van 750 Hz. Vervolgens neemt de geluidsreductie af om dan bij frequentie van 1770 Hz een diepe dip te ondergaan naar ongeveer 58 dB. Tenslotte neemt de geluidreductie terug toe tot ongeveer 80 dB. De ééngetalswaarde van de standaardopstelling komt daarmee uit op 58 dB met als correctiewaardes $C = -2 \text{ dB}$ en $C_{tr} = -8 \text{ dB}$. De ééngetalwaarde neemt toe tot 59 dB met dezelfde correctiewaardes bij de opstelling waarbij er CDM-strips zijn geplaatst tussen de oplegpunten tussen twee units.

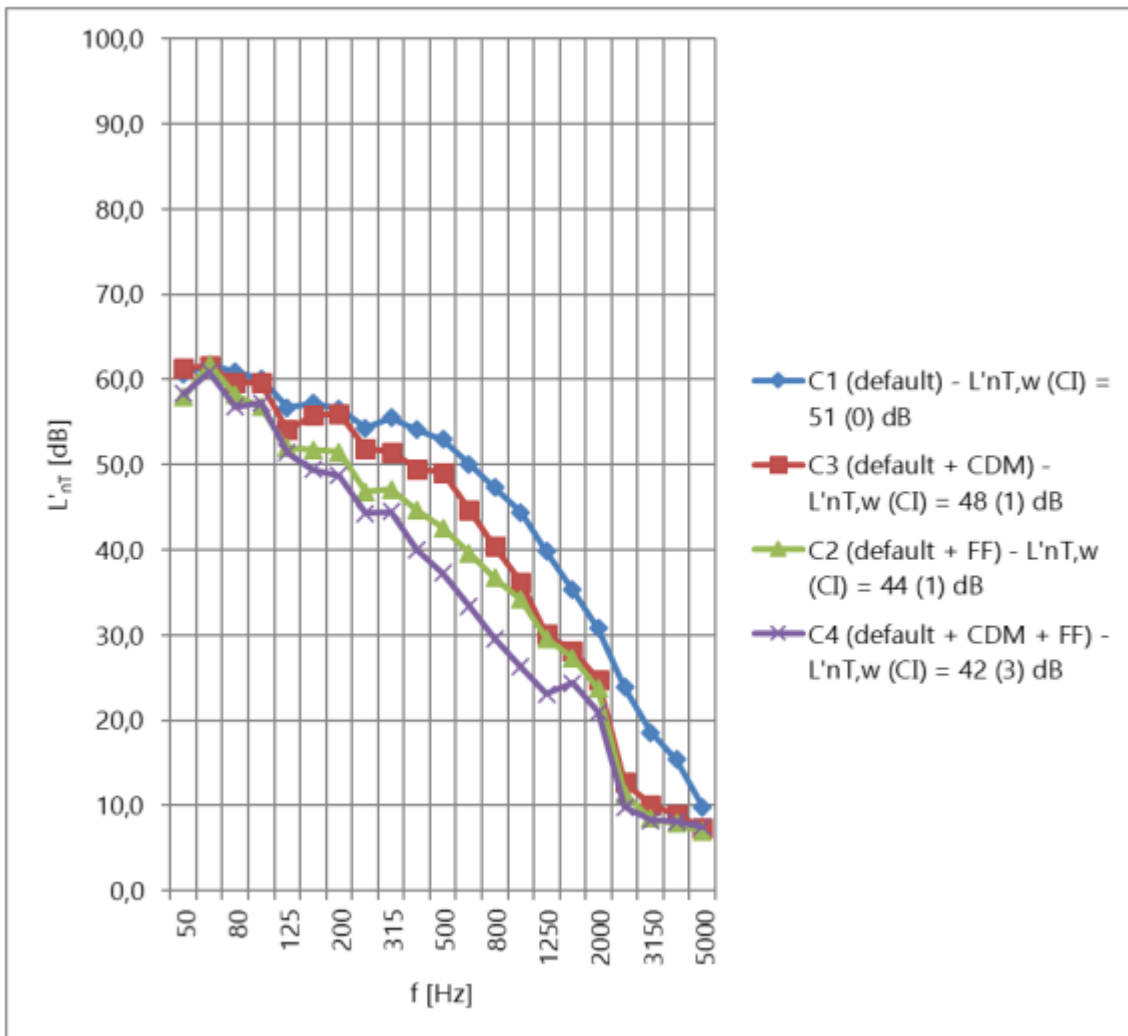
5.2 Resultaten contactgeluidmetingen

In Tabel 7: eengetalswaarde van het gemeten gestandaardiseerd contactgeluidniveau wordt een samenvatting weergegeven van de resulterende eengetalswaarde van de contactgeluidniveau 's $L'_{nT,w}$ voor de vier verschillende opstellingen. In de meest rechtse kolom zijn ook de waardes gegeven voor de vier verschillende gecorrigeerde contactgeluidniveau 's. Voor contactgeluid hangt de correctiefactor af van het type vloer waarop de klopmachine actief was tijdens de meting.

Nr.	Configuratie	Richting ²	Resultaat: $L'_{nT,w}$ [dB]	Resultaat L'_1 ³ [dB]
C1	Standaard-opbouw	↓	51	51
C2	Standaard-opbouw + zwevende dekvloer	↓	44	45
C3	Standaard-opbouw + CDM-pads	↓	48	49
C4	Standaard-opbouw + zwevende dekvloer + CDM-pads	↓	42	45

Tabel 7: eengetalswaarde van het gemeten gestandaardiseerd contactgeluidniveau [7]

In Figuur 35 worden de metingen van de contactgeluidsniveaus over het hele frequentiebereik weergegeven voor de vier verschillende meetopstellingen. Het resterende contactgeluidniveau daalt voor al de vier opmetingen van 60 dB bij een lage frequentie van 50 Hz tot net iets minder dan 10 dB bij een frequentie van 5000 Hz. Hierbij varieert de ééngetalswaarde van 51 dB bij de standaardopstelling tot 42 dB bij het toepassen van de zwevende dekvloer en de akoestische ontkoppeling ter hoogte van de oplegknopen. De correctie voor laagfrequente contactgeluiden is 1 dB voor de opstelling met enkel CDM-strips en de opstelling met enkel de zwevende dekvloer. Voor de opstelling met CDM-strips en de zwevende dekvloer is dit 3 dB. Voor de standaardopstelling is er geen correctie voor laagfrequente geluiden nodig.



Figuur 35: Vergelijking tussen contactgeluidmetingen C1, C2, C3 en C4 [7]

6 Bespreking van de resultaten

6.1 Luchtgeluid

De meetresultaten voor luchtgeluidisolatie zoals in 5.1 beschreven staan, zijn op het eerste zicht behoorlijke goede waardes. Dit wilt zeggen dat er een voldoende grote luchtgeluidsreductie optreedt binnen het spectrum van 100 tot 3150 Hz en dat de units een hoge akoestische performantie hebben op het gebied van luchtgeluid. De standaard opstelling heeft namelijk een $D_{nT,w}$ -waarde van 58 dB, wat wilt zeggen dat zonder het toepassen van zwevende dekvloer of akoestische ontkoppeling van de oplegpunten al aan het verhoogd akoestisch comfort voldaan wordt.

Het toepassen van de CDM-strips met als doel de flankerende transmissies te verhinderen heeft slechts een geringe invloed op de geluidsreductie. Dit toont aan dat de luchtgeluidtransmissie zich vooral zal voortplanten volgens de directe weg door de vloer- en plafondopbouw van de units en dat de flankerende transmissie hierin minder doorslaggevend is. Er kan bijgevolg besloten worden dat voor het verbeteren van de luchtgeluidtransmissie er vooral gefocust moet worden op de directe transmissiewegen. Een mogelijke oplossing hiervoor is het toepassen van een verlaagd plafond. Dit wordt in deze scriptie niet verder besproken maar geeft een goede richting voor verder onderzoek.

De eisen omtrent de geluidsreductie in schoolgebouwen zoals weergegeven is in 4.3.1 kunnen vereenvoudigd worden naar de minimale geluidsreductie tussen twee leslokalen omdat deze het meest voorkomend is. Tussen twee leslokalen moet er minimum een D_A -waarde van 44 dB gehaald worden. Met 56 dB en 57 dB als gemeten waarden is het geen enkel probleem om aan deze eis te voldoen, zowel voor het verhoogd akoestisch comfort voldoet de standaard opstelling.

In de metingen was er duidelijk een diepe dip zichtbaar ter hoogte van 1600 à 1800 Hz. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat er bij een frequentie van 1770 Hz de coïncidentiefrequentie van spaanplaat bereikt wordt. Omdat de volledige wand, vloer, en plafondbekleding bestaat uit spaanplaat zorgt dit voor een extra diepe dip van bijna 10 dB. Deze dip valt in het frequentiebereik voor het berekenen van de ééngetalswaarde waardoor deze sterk beïnvloed wordt. Een verschuiving van deze dip naar een hogere frequentie kan ervoor zorgen dat deze buiten het bereik voor de berekening van deze waarde valt en zo de eengetalswaarde nog sterk verbeterd kan worden. Er kan gesteld worden dat:

$$(11) \quad f_g * d = C^{te} \quad [6]$$

Met:

f_g = coïncidentiefrequentie van de plaat [dB]

d = dikte van de plaat [m]

Uit formule 11 kan besloten worden dat als de dikte van de panelen verkleind wordt, de grensfrequentie (kleinste coïncidentiefrequentie) recht evenredig stijgt. Dus als er gekozen wordt om de dikte van de spaanplaat panelen te verminderen tot 8 mm, stijgt de coïncidentiefrequentie tot ongeveer 4 000 Hz waardoor de dip geen invloed meer zal hebben op de ééngetalswaarde.

Een tweede mogelijkheid voor het verhogen van de coïncidentiefrequentie is het aanpassen van de materiaalkeuze. De spaanplaten hebben een relatief lage oppervlakte-massa maar een wel hoge buigstijfheid. Echter is het zo dat des te stijver het materiaal is des te lager de coïncidentiefrequentie ligt. Daarom is het aangewezen om een buig-slap materiaal te kiezen zodat deze frequentie hoger zal komen te liggen.

Zoals in 3.2 is gebleken is er een luchtspouw van 10 cm tussen het dak en de vloer van twee op elkaar staande units. Een verschijnsel dat kan optreden in dit geval is spouwresonantie. Deze resonantie gaat bij een breedte van 10 cm eveneens liggen op ongeveer 1700 Hz. Het opvullen van de spouwen tussen de unit kan dit verschijnsel verhinderen en zorgen voor een betere akoestisch performantie van het geheel. [6]

6.2 Contactgeluid

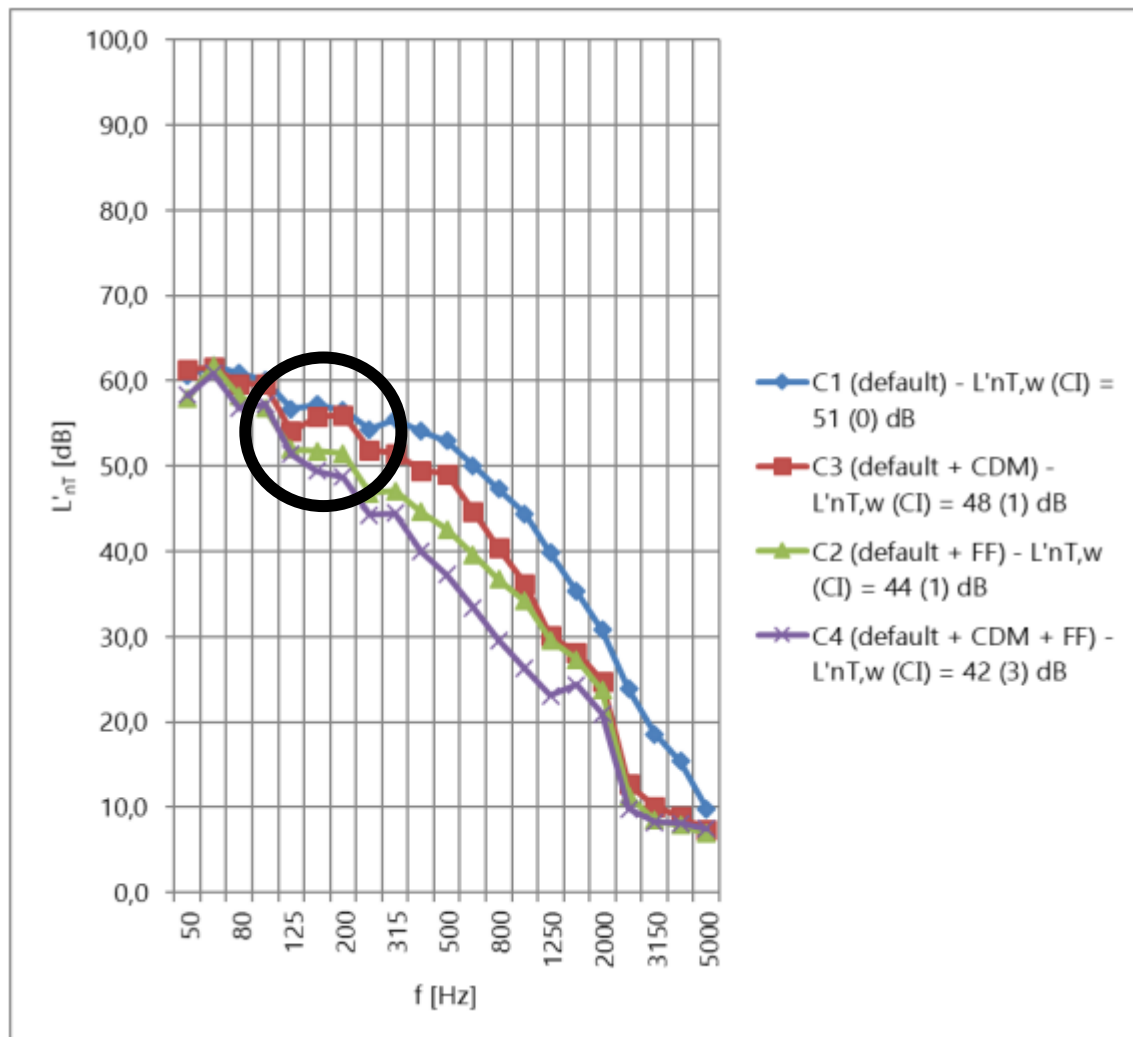
De gemeten waardes zijn de resterende contactgeluidniveaus, dat wilt zeggen om een goede akoestische performantie tegen contactgeluid te hebben moeten deze waardes zo laag mogelijk zijn. In de eis voor residentiële gebouwen is een er voor normaal akoestisch comfort een maximumwaarde van 54 dB vastgelegd, om vervolgens een verhoogd akoestisch comfort te bereiken daalt deze waarde tot 50 dB. Uit de meetresultaten blijkt dat de $L'_{nT,w}$ -waarde voor de standaard-opbouw 51dB is dit betekent dat er meteen zonder aanpassingen aan de units het normaal akoestisch comfort behaald wordt.

Uit de resultaten is gebleken dat er nog aanzienlijke verbeteringen geboekt kunnen worden indien er een akoestische ontkoppeling van de oplegpunten of een zwevende dekvloer wordt aangebracht. De verbetering ten gevolge van de CDM-strips is pas merkbaar bij een frequentie van 250 Hz. Dit betekent dat bij deze frequentie de flankkerende transmissie evenwaardig wordt aan de directe geluidsoverdracht. De strips blijken dus zeker nuttig aangezien er een verbetering in de ééngetalswaarde is van 3dB voor $L'_{nT,w}$ en 2dB voor L'_i . De zwevende dekvloer bewijst zijn efficiëntie al bij contactgeluid vanaf 60 à 80 Hz. Deze oplossing is uiterst effectief aangezien er een verbetering in de ééngetalswaarde is van 7dB voor $L'_{nT,w}$ en 6dB voor L'_i . Het aanbren-gen van een akoestische ontkoppeling en/of een zwevende dekvloer zorgt ervoor dat er voldaan wordt aan het verhoogd akoestisch comfort.

Net zoals bij luchtgeluidsisolatie is er een bijkomende eis voor schoolgebouwen. De meest voorkomende zend- en ontvangstruimtecombinatie is tussen twee leslokalen. Hiermee wordt het maximale contactgeluidniveau 60 dB. Ook deze eis wordt ruimschoots behaald met de standaardopbouw van de units. Om het verhoogd akoestisch comfort in schoolgebouwen te behalen mag er in het ergste geval een L'_i -waarde zijn

van maximum 45 dB. Deze eis is haalbaar na het toepassen van een de akoestische ont koppeling en de zwevende dekvloer.

Zoals in de hypothese besproken is werd er verwacht dat voor de zwevende dekvloer met insulWood als veerkrachtige laag er pas een voldoende grote verlaging van het contactgeluidniveau ging optreden bij een frequentie hoger dan 92 Hz. Deze theoretische verwachting is merkbaar in de meetresultaten aangezien bij de meting met enkel de zwevende dekvloer de L'_{nT} -waarde vrij sterk daalt vanaf deze frequentie, zoals te zien in Figuur 36.



Figuur 36: Overzicht contactgeluidmetingen

7 Besluit

De aanzet van het onderzoek was het vormen van een idee van de huidige akoestische prestaties en het zoeken van eventuele verbeterpunten met bijhorende oplossingen. Uit de metingen is gebleken dat de standaard configuratie waarin ze nu gebouwd worden voor zowel het lucht- als contactgeluid voldoen aan de normen voor normaal akoestisch comfort.

Hierbij valt op te merken dat voor het luchtgeluid op dit moment voor residentiële gebouwen geen rekening gehouden wordt met correctiefactoren ten gevolge van de aard van de geluidsbron. In de toekomst zal dit echter wel ingevoerd worden, met het gevolg dat de units voor luchtgeluidtransmissie niet meer voldoen aan de eisen. Voor schoolbouw zal de norm nog voldoende laag liggen om met de huidige opbouw te voldoen aan de eisen. Aangezien Warsco echter mikt op meer toepassingen in de residentiële bouw, is een verbetering van deze eigenschap dus wel degelijk gewenst.

Op vlak van contactgeluid voldoen de units op dit moment (verticaal) aan de eis voor normaal akoestisch comfort. Voor de eisen voor schoolgebouwen voldoen ze ook voor de meeste ruimtcombinaties. Echter voor de strengere eisen die soms toegepast worden omwille van leerlingen met communicatieve en/of auditieve beperkingen is een verbetering van deze eigenschap nodig. Ook voor het contactgeluid was er dus voldoende reden om te zoeken naar methodes om deze eigenschap te verbeteren.

Het onderzoek heeft succesvol kunnen vaststellen dat op vlak van contactgeluid nog veel verbetering mogelijk is aangezien er tot nu toe in het ontwerp geen rekening mee gehouden werd. Twee voorname probleemzones werden vastgesteld, zijnde de directe verbinding tussen vloer en draagstructuur en de directe oplegging van boven elkaar geplaatste units. Beide problemen vormden stijve knopen tussen elementen die het geluid opvangen en de onderliggende structuren waardoor de geluiden gemakkelijk konden overgedragen worden van de ene naar de andere unit. Op vlak van luchtgeluidtransmissie leverde de literatuurstudie op dat vooral de flankerende transmissie een probleem kan vormen bij lichte gebouwconstructies. De stijve knoop tussen de opleggingen bevestigde dit tijdens de studie van de opbouw van de units.

Uit de testen is gebleken dat voor het contactgeluid de zwevende dekvloer bijzonder effectief was, met een verbetering van 7 dB. De ont koppeling van de oplegging leverde hiervoor een verbetering van 3 dB. Toepassing van beide gaf een verbetering van 9 dB. Voor het luchtgeluid bleek dat de ont koppeling van de oplegging slechts een verbetering opleverde van 1 dB. Door een typische dip rond de 1600 Hz werd bekeken of dit kon liggen aan coïncidentieverschijnselen door invloed van de omgeving, maar dit bleek slechts gedeeltelijk het geval te zijn. Het hoofdbesluit geldt hier uiteindelijk dat voornamelijk de rechtstreekse luchtgeluidtransmissie doorslaggevend is in de totaalprestatie van het geheel.

Door de beperkte tijdsperiode waarover het onderzoek kon plaatsvinden zijn er uiteraard pistes die niet volledig uitgewerkt of simpelweg niet beschouwd werden. Zo werden voor de testen reeds bestaande en eenvoudig toepasbare materialen gekozen. De CDM-strips werden wel specifiek voor deze toepassing gespecificeerd, maar zoals besproken in 4.2.1 besproken werd is dit niet de optimale oplossing door de te hoge stijfheid. Dit kan opgelost worden door het zoeken of ontwikkelen van een nieuw materiaal of het overgaan op elastische blokken in plaats van de doorlopende laag. Dit zal de resonantiefrequentie doen zakken en bijgevolg de prestaties ten goede komen. Omdat het echter niet het doel was om in deze scriptie tot een optimale oplossing te komen is deze piste niet verder uitgewerkt.

Een ander aspect dat in verder onderzoek kan bestudeerd worden is de toepasbaarheid in het productieproces. Het spreekt voor zich dat niet elke oplossing even eenvoudig is om te installeren of op te nemen in het productieproces. Hieraan kan een bijkomende berekening gekoppeld worden die de kostprijsconsequenties van verschillende systemen verder uitklaart om zo Warsco een overzichtelijke studie te geven van mogelijkheden en bijhorende kosten.

Een laatste onderdeel dat ons relevant lijkt om te controleren is de invloed op de stabiliteit van de units indien de CDM-strips zich tussen de opleggingen bevinden. De units zijn oorspronkelijk namelijk tegen horizontale afschuiving beveiligd door middel van centreerpennen, maar deze mogen niet meer in contact staan met de andere unit eens de strips ertussen geplaatst zijn. Hiernaast bestaat het vermoeden dat het gladde oppervlak van de CDM-strips zal zorgen voor een verlaagde wrijvingsweerstand, waardoor dit zeker dient onderzocht te worden.

Om te besluiten mag gesteld worden dat het onderzoek geslaagd is in zijn opzet om akoestisch zwakke plekken bloot te leggen en hierbij een eerste aanzet te geven in het optimaliseren van mogelijke oplossingen. De basisprincipes van de mogelijke verbeteringssystemen werden reeds met bestaande producten getest en bleken al behoorlijke resultaten op te leveren. Warsco kan al overwegen om dit op te nemen in hun aanbod, wat aantoont dat ook de opzet van het reeds verbeteren van de zwakke plekken geslaagd is.

Literatuurlijst

- [1] AV-consulting, „AV consulting B.V. ingenieurbureau,” AV consulting B.V., [Online]. Available: <https://www.av-consulting.nl/artikelen/geluid/roze-witte-ruis/>. [Geopend 27 mei 2019].
- [2] d. i. P. Schevenels, Bouwakoestiek studenten Industrieel Ingenieur, Hasselt: UHasselt.
- [3] i. B. Ingelaere, „Geluidsisolatie van houten vloeren,” *WTCB Tijdschrift*, pp. 36 - 49, 2001.
- [4] i. B. Ingelaere, „Innovatieve geprefabriceerde houtskeletbouwsystemen voor appartementsgebouwen,” *WTCB-Contact*, vol. 2, pp. 20-21, 2014.
- [5] Th.W. Scheers, „Lichte zwevende dekvloeren,” *Nederlands akoestisch genootschap*, p. 13, mei 2000.
- [6] d. i. P. Schevenels, „Akoestisch rapport - Dienst 21: Meting luchtgeluidsisolatie,” PS-acoustics, Sint-Truiden, 2019.
- [7] D. I. P. Schevenels, „Akoestisch rapport - Dienst 22: Meting contactgeluidsisolatie,” PS-acoustics, Sint-Truiden, 2019.
- [8] M. T. Gorgolewski and G. H. Couchman, “Acoustic Performance of Light Steel Framed Systems,” The Steel Construction Institute, Silwood Park, Ascot, 2003.
- [9] „CDM-STRIP,” CDM, 2019. [Online]. Available: <https://cdm.eu/solution/cdm-strip/>. [Geopend 23 05 2019].
- [10] Flexidal, „Flexidal Acoustrip,” Flexidal Rubber, 2019. [Online]. Available: <https://www.piramitsunger.net/wp-content/uploads/2016/11/%C4%B0solgomma-Data-Sheet-5.pdf>. [Geopend 16 04 2019].
- [11] Abriso, „Acoustic Reflex 2x3 mm - 35,” Abriso, 2019. [Online]. Available: <http://www.abriso.com/nl/akoestische-isolatie-acoustic-reflex-2x3-mm-35>. [Geopend 16 04 2019].
- [12] Insulco, „Onderlagen voor houten vloeren,” Insulco, 2019. [Online]. Available: http://www.insulco.be/thermo_acoustique/insulwood-nl.htm. [Geopend 16 04 2019].
- [13] CDM, „CDM-95 Material Data Sheet,” CDM, BE - 3090 Overijse , 2019.

Bijlagen

Bijlagenlijst

Bijlage A:

Akoestisch rapport - Dienst 21. Metingen luchtgeluidisolatie (conform ISO 16283-1) v1

Bijlage B:

Akoestisch rapport - Dienst 22. Metingen contactgeluidisolatie (conform ISO 16283-2) v1

**7.1 Akoestisch rapport - Dienst 21. Metingen luchtgeluidisolatie
(conform ISO 16283-1) v1**

AKOESTISCH RAPPORT – DIENST 21: METINGEN LUCHTGELUIDISOLATIE

Versie: v1

We nodigen u vriendelijk uit om onze [tevredenheidsenquête](#) in te vullen ten einde onze dienstverlening te verbeteren.

Projectgegevens:

Onze ref.	2019/OF078		
Datum	24/04/2019		
Opdrachtgever	Warsco Units NV, Slingerweg 20, 3600 Genk		
Contactpersoon	Mark Brouwers		
Opdracht	Onderzoek lucht- en contactgeluidisolatie units		
Adres project	Slingerweg 20, 3600 Genk		
Overlegmomenten (niet inbegrepen)			
Werfcontroles			
Metingen	18/04/2019		
Gebruikte meetapparatuur	- Akron Qsources QOhm/Qam omnidirectionele luidspreker + versterker - Larson Davis BAS006 impulsbron - Norsonic Nor277 gestandaardiseerde kloggeluidmachine - Norsonic Nor140 klasse 1 geluidsmeter met automatische bepaling van de nagalmtijd in 1/3-octaaftanden - Norsonic Nor1251 calibrator		
Opmaak rapport	dr. ir. Pieter Schevenels, zaakvoerder		

Versiebeheer:

Onderdeel	Dienst	Beschrijving	Besteld	v1	v2	v3
Normen en eisen	/		×	24/04/19		
Metingen	13c	Buitenlawaai				
	21	Luchtgeluidisolatie	×	24/04/19		
	22	Contactgeluidisolatie	×	24/04/19		
	23	Gevelgeluidisolatie				
	24	Installatielawaai				
	25	Nagalmtijd				
	26	Uitstraling omgeving				
Berekeningen	11	Luchtgeluidisolatie				
	12	Contactgeluidisolatie				
	13a	Gevelgeluidisolatie buiten → binnen				
	13b	Gevelgeluidisolatie binnen → buiten				
	14	Installatielawaai – kwalitatieve richtlijnen				
	14a	Ventilatielawaai				
	14b	Geluiduitstraling naar omgeving				
	14c	Trillingsisolatie				
	15	Nagalm en akoestische absorptie				

0. Bondige inleiding tot (bouw)akoestische grootheden

U vindt [hier](#) een overzicht van de belangrijkste grootheden bij akoestiek in gebouwen.

1. Situatie

De geluidsoverdracht tussen modulaire units, gefabriceerd door opdrachtgever Warsco Units NV, wordt onderzocht. Volgende proeven worden uitgevoerd:

- Luchtgeluidisolatie
 - o Verticaal (zie Figuur 1 links)
 - L1: Standaard-opbouw
 - L2: Standaard-opbouw + CDM-pads (zie Figuur 2)
 - o Horizontaal (zie Figuur 1 rechts)
 - L3: Standaard-opbouw (= bevestigd aan elkaar via onderzijde, zie Figuur 3)
- Contactgeluidisolatie
 - o Verticaal
 - C1: Standaard-opbouw
 - C2: Standaard-opbouw + zwevende dekvloer (zie Figuur 4)
 - C3: Standaard-opbouw + CDM-pads
 - C4: Standaard-opbouw + CDM-pads + zwevende dekvloer
 - o Horizontaal
 - C5: Standaard-opbouw (= bevestigd aan elkaar)
 - C6: Standaard-opbouw + zwevende dekvloer

De pads van CDM bestaan uit strookvormige elastische onderbrekingen die onder beide lange zijden van de bovenste units geplaatst worden. Deze zijn berekend door CDM voor een resonantiefrequentie van 22 Hz onder het gewicht van de bovenste unit inclusief gebruikerslast. De proeven gebeurden echter zonder gebruikerslast, wat volgens de berekeningen tot een resonantiefrequentie van 30 Hz zou leiden.

De zwevende dekvloer bestaat uit een elastische tussenlaag InsulWood van Insulit met een $\Delta L_w = 23$ dB (onder parket). Deze tussenlaag bestaat uit een polyolefine-laag van 2 mm met hieronder 4,5 mm vilt. Hierop wordt dezelfde plaat geplaatst als deze die voor de vloer gebruikt wordt in de standaard-opbouw (spaanplaat).

De standaard-opbouw verticaal bestaat uit (van boven naar beneden, vergelijkbaar met opstelling in Figuur 5):

- Spaanplaat + vloerafwerking
- Houten kepers met isolatie
- Kader uit metalen C-profielen met isolatie tussen
- Plaat
- Luchtspouw tussen units
- Steeldeck-plaat
- Kader uit metalen C-profielen met isolatie tussen
- Houten kepers met isolatie
- 8 mm spaanplaat

Horizontaal is de opbouw vergelijkbaar, behalve dat de plaat van puntje 4 een Steeldeck-plaat is.

PS-Acoustics BVBA

Asterstraat 8, 3800 Sint-Truiden

tel: 011 63 23 60 – gsm: 0477 90 36 09 – e-mail: info@ps-acoustics.be – website: www.ps-acoustics.be

IBAN: BE45 7350 3160 3089 – BIC: KREDBEBB

BTW BE 0849.262.219 – RPR Hasselt



Figuur 1: Testopstelling met beproeving van verticale (afbeelding links) en horizontale geluidsoverdracht (afbeelding rechts)



Figuur 2: Afbeelding van de stroken en montage tussen de units (aangeduid door rode stippellijn)



Figuur 3: Horizontale bout-moer-koppeling aan de uiteinden van de onderzijde (twee in totaal, waarvan één zichtbaar in afbeelding links) met ondersteuning op drie plaatsen door betontegels (zie drie pijlen in afbeelding rechts)



Figuur 4: Meting zonder (afbeelding links) en met zwevende dekvloer (afbeelding rechts)



Figuur 5: Standaardopbouw (vloer – wand – plafond) – plafond is niet verlaagd in testopstelling

2. Referentie normen

2.1. Normen met eisen

Verschillende documenten met akoestische eisen worden hieronder besproken.

2.1.1. Residentiële bouw: NBN S01-400-1:2008

De norm NBN S01-400-1:2008 bevat eisen inzake akoestiek in **residentiële bouwwerken** (appartementen, rijwoningen, alleenstaande woningen) en is van toepassing voor alle bouwwerken waarvan de bouwaanvraag dateert van na maart 2008. In deze norm worden twee comfortniveaus gehanteerd: **normaal comfort** en **verhoogd comfort**. Normaal comfort wordt verondersteld 70 % van de gebouwgebruikers tevreden te stellen; verhoogd comfort stelt 90 % van de gebouwgebruikers tevreden. Er is dus steeds een percentage "ontevredenen".

De norm stelt eisen aan luchtgeluidisolatie, contactgeluidisolatie, gevelgeluidisolatie, installatielawaai en nagalm/geluidabsorptie. Het begrip "woning" in het hiernavolgende slaat zowel op een klassieke woning als op appartementen.

Wat betreft luchtgeluidisolatie wordt het **gestandaardiseerd geluidrukniveaoverschil tussen twee ruimtes** $D_{nT,w}$ gehanteerd als grootheid. Hoe *groter* deze waarde is, hoe beter de luchtgeluidisolatie. De eisen met minimaal toegelaten waarden staan vermeld in Tabel 1.

ZENDRUIMTE buiten de woning	ONTVANGSTRUIMTE binnen de woning	Normaal akoestisch comfort	Verhoogd akoestisch comfort
Elke ruimte	Elke ruimte uitgezonderd een technische ruimte of inkomhal	$D_{nT,w} \geq 54$ dB	$D_{nT,w} \geq 58$ dB
Elke ruimte van een nieuwbouw rijwoning	Elke ruimte van een nieuwbouw rijwoning uitgezonderd een technische ruimte	$D_{nT,w} \geq 58$ dB	$D_{nT,w} \geq 62$ dB
ZENDRUIMTE binnen de woning	ONTVANGSTRUIMTE binnen de woning	Normaal akoestisch comfort	Verhoogd akoestisch comfort
Slaapkamer, keuken, woonkamer en badkamer (die niet alleen toebehoort aan de slaapkamer/ontvangstruimte)	Slaapkamer, studeerruimte	$D_{nT,w} \geq 35$ dB	$D_{nT,w} \geq 43$ dB

Tabel 1: Eisen voor het gestandaardiseerd geluidrukniveaoverschil tussen twee ruimten bij residentiële bouw [NBN S01-400-1:2008]

Deze eisen zijn geldig indien het luchtgeluidsniveau in de zendruimte **maximaal 80 dB** bedraagt, dus niet voor fuifzalen, dancings, ... Indien het geluidsniveau in de zendruimte hoger is dan 80 dB, moeten de eisen evenredig verhoogd worden naar het te verwachten zendgeluidsniveau.

Meestal wordt de aanduiding van de grootheid $D_{nT,w}$ aangevuld met twee waarden tussen haakjes, bijvoorbeeld als volgt: $D_{nT,w} (C;C_{tr}) = 54 (-1;-5)$ dB. De eerste grootheid tussen haakjes (C) is een **correctie** die dient gebruikt te worden wanneer het te controleren geluid **eerder niet-laagfrequent** is van aard, zoals bijvoorbeeld spelende kinderen. De tweede grootheid, C_{tr} , dient gebruikt te worden wanneer het te controleren geluid eerder **wel laagfrequent** is van aard, bijvoorbeeld voor verkeerslawaai ("tr" van "traffic"). Deze grootheden zijn steeds kleiner of gelijk aan nul. Ze worden als volgt gebruikt in bovenstaand voorbeeld: $D_{nT,w} + C = 54 + (-1) = 53$ dB en $D_{nT,w} + C_{tr} = 54 + (-5) = 49$ dB, hetgeen betekent dat de scheidingsconstructie 53 dB presteert voor niet-laagfrequent geluid en 49 dB voor wel laagfrequent geluid. Indien van toepassing, staat in de grafieken van dit rapport steeds de volledige aanduiding $D_{nT,w} (C;C_{tr})$, ook al is enkel $D_{nT,w}$ belangrijk.

2.1.2. Scholenbouw: NBN S01-400-2:2012

De norm NBN S01-400-1:2012 bevat eisen inzake akoestiek in **schoolgebouwen** en is van toepassing voor alle bouwwerken waarvan de bouwaanvraag dateert van na oktober 2012. In deze norm worden twee niveaus van eisen gehanteerd: de **normale eis** en de **verhoogde eis**. De normale eis is in het algemeen van toepassing; de verhoogde eis is enkel van toepassing in situaties waarin leerlingen met auditieve beperkingen en/of communicatiestoornissen les dienen te volgen.

De norm stelt eisen aan luchtgeluidisolatie, contactgeluidisolatie, gevelgeluidisolatie, installatielawaai en nagalm/geluidabsorptie.

"Circulatieruimtes voor kortstondig gebruik" worden gedefinieerd als circulatieruimtes die tijdens de lessen niet of amper gebruikt worden. Indien ze wel of vaak gebruikt worden tijdens de lessen, zijn het "circulatieruimtes voor doorlopend gebruik".

2.1.2.1. Tussen ruimtes in het schoolgebouw

In Tabel 2 staan de eisen voor de minimaal toegelaten gewogen gestandaardiseerde geluiddruk-niveaoverschillen (gecorrigeerd met de term C voor midden- tot hoogfrequente geluidbelasting door bijvoorbeeld pratende mensen) in schoolgebouwen voor verschillende combinaties van zend- en ontvangstruimtes. Hoe *groter* deze waarde is, hoe beter.

$D_A = D_{nT,W} + C$ [dB]	zendruimte										
ontvangstruimte	leslokaal	kleuterklas	lokaal voor muziekonderricht	studiezones / opzoekingsruimte	binnenspeelplaats	sporthal / turnzaal / atelier	leraarskamer	sanitaire ruimte	circulatieruimte (kortstondig gebruik)	circulatieruimte (doorlopend gebruik)	ontmoetingsruimte
leslokaal	≥ 44	≥ 48	≥ 56	(*)	≥ 56	≥ 56	≥ 48	≥ 48	≥ 32	≥ 36	≥ 44
kleuterklas	(*)	≥ 44	≥ 52	(*)	≥ 32	≥ 52	≥ 44	≥ 44	≥ 32	≥ 36	≥ 44
lokaal voor muziekonderricht	(*)	(*)	≥ 52	(*)	≥ 56	≥ 56	(*)	≥ 48	≥ 32	≥ 36	≥ 44
studiezones / opzoekingsruimte	≥ 48	≥ 52	≥ 60	≥ 40	≥ 60	≥ 60	≥ 52	≥ 52	≥ 32	≥ 36	≥ 44
sporthal / turnzaal / binnenspeelplaats / atelier	(*)	(*)	(*)	(*)	≥ 32	≥ 32	(*)	≥ 32	-	-	-
leraarskamer	(*)	≥ 44	≥ 52	(*)	≥ 52	≥ 52	≥ 44	≥ 44	(*)	(*)	(*)
sanitaire ruimte	(*)	(*)	(*)	(*)	≥ 32	≥ 32	(*)	≥ 32	-	-	-
circulatieruimte / ontmoetingsruimte	(*)	(*)	(*)	(*)	-	-	≥ 38	-	-	-	-

Tabel 2: Eisen voor luchtgeluidisolatie in schoolgebouwen [NBN S01-400-2:2012]

(*) Eis gedefinieerd in de andere richting.

In ontvangstruimtes waar kinderen/leerlingen/studenten plaatsnemen met **communicatieve en/of auditieve beperkingen** moeten de eisen **met 4 dB verhoogd** (dus verstrengd) worden, maar de geëiste waarde mag nooit hoger zijn dan 62 dB.

Bij **muzieklokalen** met hoge geluidsbelasting moet de eis bij voorkeur verstrengd worden.

Binnenspeelplaatsen die tijdens de lessen niet gebruikt worden, worden bestempeld als circulatieruimtes voor kortstondig gebruik.

De eis tussen **leraarskamer** (zendruimte) en circulatieruimte / opzoekingsruimte (ontvangstruimte) is er omwille van privacyredenen.

Deuren tussen leslokalen onderling of tussen kleuterklassen onderling worden afgeraden. Indien ze toch noodzakelijk zijn, mag de eis van 44 dB verlaagd worden **naar 40 dB**. Deuren tussen ontmoetingsruimtes (zendruimte) en leslokalen, kleuterklassen, muzieklokalen, studiezones of

opzoekingsruimte (ontvangstruimte) worden eveneens afgeraden. Indien toch noodzakelijk, moet deze specifiek bestudeerd worden.

Indien specifiek **laagfrequente** geluiden verwacht worden (in bijvoorbeeld muziekruimten, ateliers, parkeergarages), moeten bijkomende maatregelen getroffen worden om deze componenten efficiënt te isoleren.

Indien de combinatie van ruimtes niet in Tabel 2 terug te vinden is, wordt verwezen naar de bijlagen van de norm om de eis te kunnen bepalen die afhangt van de verwachte geluidsproductie van de zendruimte en de verwachte geluidsgevoeligheid van de ontvangstruimte.

2.1.2.2. Tussen ruimtes in het schoolgebouw en ruimtes in andere gebouwen

Tussen een ruimte in het **schoolgebouw** en een ruimte in een **ander gebouw** geldt als eis:

$$D_A = D_{nT,w} + C \geq 56 \text{ dB}$$

in de veronderstelling dat:

- Ander gebouw → schoolgebouw:
 - o Er in dat ander gebouw normale geluidsbelasting optreedt
 - o De ontvangstruimte in het schoolgebouw geen ruimte is met een zeer hoge geluidsgevoeligheid (cfr. bijlage van de norm)
- Schoolgebouw → ander gebouw
 - o De bronruimte in het schoolgebouw geen ruimte is met een zeer hoge geluidsproductie (cfr. bijlage van de norm)

2.1.3. GRO-duurzaamheidsmeter

Het Facilitair Bedrijf van de Vlaamse Overheid hanteert de **GRO-duurzaamheidsmeter** als handleiding om hun gebouwen aan te toetsen. Deze tool heeft haar wortels in 1987 toen de VN-commissie een rapport in verband met duurzame ontwikkeling uitbracht. Dit rapport heette het Brundtland-rapport, genaamd naar de toenmalige voorzitter van deze commissie, de Noorse Gro Harlem Brundtland.

De documenten met eisen zijn te downloaden op de website van de Vlaamse Overheid via [deze link](#) (bestanden: "GRO_Criteria_v2019.pdf" en "BIN1_Eisentabel.xlsx").

Het aspect akoestiek krijgt de code **BIN 1** mee ("bin" van binnen), en omvat eisen in verband met:

- Luchtgeluidisolatie
- Contactgeluidisolatie
- Gevelgeluidisolatie
- Installatielawaai
- Nagalm
- Geluidsuitstraling naar buiten

De eisen zijn zowel qua grootheden als waarden gebaseerd op de norm NBN S01-400-2:2012: de Belgische norm voor scholenbouw.

2.1.4. BREEAM

De duurzaamheidstool BREEAM werd oorspronkelijk ontwikkeld in Groot-Brittannië. De afkorting staat voor British Research Establishment Environmental Assessment Method. Tegenwoordig wordt de tool over de volledige wereld gebruikt om gebouwen te toetsen op hun duurzaamheid. Deze duurzaamheid

omvat niet alleen energetische parameters, maar nog vele andere, waaronder akoestische. Het is de bedoeling om zoveel mogelijk punten te verdienen om een zo duurzaam mogelijk gebouw te realiseren.

Eén aspect maakt onderdeel uit van de rubriek "Health": HEA 05. Hierin zitten eisen vervat die te maken hebben met het comfortabel gebruiken van het gebouw wat betreft akoestiek. Het gaat om luchtgeluidisolatie, gevelgeluidisolatie, installatielawaai en nagalm.

De in deze rubriek vermelde eisen wijzen **in eerste instantie op het volgen van nationale richtlijnen**. Indien deze er niet zijn, moeten de eisen in rubrieken van BREEAM zelf gevolgd worden.

Een tweede aspect maakt onderdeel uit van de rubriek "Pollution": POL 05. Hierin zitten eisen vervat in verband met maximale geluidsuitstralingswaarden van (onderdelen van) het gebouw naar de omgeving toe.

HEA 05 vermeldt volgende eisen:

- $D_w + L_{AeqT} > 75 \text{ dB}$ tussen twee ruimtes als default-eis
- $D_w + L_{AeqT} > 85 \text{ dB}$ tussen twee ruimtes indien ofwel de zendruimte lawaaiërig is ofwel de ontvangruimte gevoelig

Ruimtes die niet bezet zijn, zoals bergingen, worden niet beschouwd.

D_w is hierbij het geluidrukniveauverschil tussen twee ruimtes (niet gestandaardiseerd naar de nagalmtijd). L_{AeqT} is het maximaal aanbevolen achtergrondgeluid ten gevolge van de werking van installaties, binnendringend verkeersgeluid, ...

Hoe meer achtergrondgeluid er dus is (of in ontwerpfase: mag zijn), hoe minder geluid er hoeft verzwakt te worden tussen de twee ruimtes.

Tabel 3 geeft de L_{AeqT} -waarden voor verschillende ruimtes.

Ruimte	Maximaal achtergrondgeluid L_{AeqT} (*)
Algemene ruimtes (leraarskamers, sanitair, ...)	$\leq 40 \text{ dB}$
Individuele werkplekken	$\leq 40 \text{ dB}$
Meerpersoons-werkplekken	$40 - 50 \text{ dB}$
Vergaderruimtes	$35 - 40 \text{ dB}$
Ontvangstruimtes	$40 - 50 \text{ dB}$
Leslokalen, seminarieruimtes, ...	$\leq 35 \text{ dB}$
Concerthallen, theaters, auditoria	$\leq 30 \text{ dB}$
Caféruimtes, kantines,	$\leq 50 \text{ dB}$
Grootkeukens	$\leq 50 \text{ dB}$
Restaurants	$40 - 55 \text{ dB}$
Bars	$40 - 45 \text{ dB}$
Verkoopruimtes	$50 - 55 \text{ dB}$
Ruimtes voor creatieve kunst	$\leq 55 \text{ dB}$
Opnamestudio's	$\leq 30 \text{ dB}$
Laborruimtes	$\leq 40 \text{ dB}$

Sporthallen, zwembaden	≤ 55 dB
Bibliotheken	40 – 50 dB
Hotelkamers	≤ 35 dB
(*) Indien een bereik vermeld is, geldt de hoogste waarde indien privacy niet belangrijk is en de laagste indien dat wel is.	

Tabel 3: Maximaal aanbevolen achtergrondgeluidniveaus in verschillende ruimtes volgens BREEAM – HEA 05

2.1.5. Lastenboek Toerisme Vlaanderen

Toerisme Vlaanderen hanteert ook aparte akoestische eisen, in termen van twee comfortniveaus: normaal en verhoogd comfort.

Wat betreft luchtgeluidisolatie wordt het **gestandaardiseerd geluidrukniveaoverschil tussen twee ruimtes** $D_{nT,w}$ gehanteerd als grootheid. Hoe *groter* deze waarde is, hoe beter de luchtgeluidisolatie. De eisen met minimaal toegelaten waarden staan vermeld in Tabel 4.

1 LUCHTGELUIDISOLATIE			
L.g	beoordelingsgetal:	$D_{nT,w}$: het gewogen gestandaardiseerde niveaoverschil	
L.m	meetmethode:	NBN EN ISO 140 - 4	
L.b	beoordelingsmethode:	NBN EN ISO 700 - 1	
L.r	rekenmethode:	NBN EN ISO 12354 - 1	
	situatie	eis: minimale $D_{nT,w}$	
		normaal comfort	verhoogd comfort
1.01	slaapkamer ↔ slaapkamer	≥ 45 dB	≥ 50 dB
1.02	slaapkamer ↔ badkamer (van een andere kamer)	≥ 50 dB	≥ 55 dB
1.03	slaapkamer ↔ gang	≥ 35 dB	≥ 40 dB
1.04	slaapkamers ↔ gemeenschappelijke ruimtes (uitgezonderd gang) b.v. refter, onthaal, keuken, kantoren, sanitair, ...	≥ 50 dB	≥ 55 dB
1.05	activiteitenlokaal ↔ activiteitenlokaal	≥ 40 dB	≥ 45 dB
1.06	kantoren ↔ activiteitenlokaal	≥ 45 dB	≥ 50 dB
1.07	kantoor ↔ kantoor of vergaderruimte	≥ 35 dB	≥ 40 dB

Tabel 4: Eisen aan luchtgeluidisolatie in termen van het gestandaardiseerd geluidrukniveaoverschil tussen twee ruimtes

2.2. Meetnormen

De meting en daaropvolgende berekening van de categorieën en/of eengetalswaarden gebeurde conform de normen:

- EN ISO 16283-1:2014 Acoustics – Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements – Part 1: Airborne sound insulation
- NBN S 01-400:1977 Akoestiek – Criteria van de akoestische isolatie → categorieën
- EN ISO 717-1:2013 Acoustics – Rating of sound insulation in buildings and of building elements – Part 1: Airborne sound insulation → eengetalswaarden
- ISO 3382-2:2008 Acoustics – Measurement of room acoustic parameters – Part 2: Reverberation times in ordinary rooms

Voor de bepaling van de categorie is, volgens welbepaalde regels, een beperkte onderschrijding van de meetcurve ten opzichte van de betreffende categoriecurve toegelaten (zie NBN S 01-400:1977).

De eengetalswaarde is af te lezen bij 500 Hz op de referentiecurve die eveneens in onderstaande grafieken afgebeeld is. Deze curve moet op een bepaalde manier, volgens welbepaalde regels, passen op de gemeten curve (zie EN ISO 717-1:2013).

3. Definities

Het **gestandaardiseerd geluidrukniveauverschil tussen twee ruimtes** D_{nT} wordt bepaald via de volgende formule:

$$D_{nT} = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{T}{T_0}$$

Hierin is 'log' het tiendelig logaritme¹, L_1 het geluidrukniveau in de zendruimte, L_2 het geluidrukniveau in de ontvangruimte, T de gemeten nagalmtijd in de ontvangruimte conform ISO 3382-2:2008 en T_0 is de referentienagalmtijd van 0,5 s voor een ruimte van 30 m³ groot, 0,3 s voor een ruimte kleiner dan 20 m³ en tussenliggende waarden voor ruimtes met een tussenliggende grootte. Voor ruimtes groter dan 30 m³ wordt verwezen naar de Belgische normen NBN S01-400-1:2008 en NBN S01-400-2:2012. Voor elke residentiële ruimte groter dan 30 m³ is T_0 bijvoorbeeld 0,5 s; voor reguliere klaslokalen is deze functie van het volume in m³ en gelijk aan $0,35 \times \log(1,25 V)$. De eenheid van D_{nT} is dB.

Het **genormaliseerd geluidrukniveauverschil tussen twee ruimtes** D_n wordt bepaald via de volgende formule:

$$D_n = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{A_0}{A}$$

Hierin is A de absorptieoppervlakte van de ontvangruimte, die uit de nagalmtijd T en het volume van de ontvangruimte V berekend kan worden als volgt:

$$A = 0,16 \frac{V}{T}$$

A_0 is de referentie-absorptieoppervlakte van 10 m². De eenheid van D_n is eveneens dB.

De **schijnbare geluidsverzwakkingsindex** R' wordt bepaald via de volgende formule:

$$R' = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{S}{A}$$

Hierin is S de oppervlakte van de scheidingsconstructie.

4. Meetnauwkeurigheid

De nauwkeurigheid van de meetresultaten bedraagt ± 2 dB tot en met 315 Hz en ± 1 dB voor hogere frequenties.

5. Gebruikte meetapparatuur en meetmethode

5.1. Uitgezonden signaal voor isolatiemetingen

¹ Dit is ook zo verderop in het rapport.

- Aard: roze ruis
- Luidspreker: Akron Qsources QOhm omnidirectionele luidspreker (conform Annex A van EN ISO 16283-1:2014)
- Versterker: Akron Qsources Qam versterker met ingebouwde ruisgenerator

5.2. Uitgezonden signaal voor nagalmmetingen

- Aard: impuls
- Impulsbron: Larson Davis BAS006

5.3. Opgenomen signaal

- Geluidsmeter: Norsonic 140 met ingebouwde software en automatische nagalmtijdbepaling (conform IEC 60651:1979, IEC 60804:1985 en IEC 61260:1995)
- IJkbron: Norsonic 1251 calibrator (conform IEC 60942:1988)

5.4. Meetmethode

5.4.1. Standaardprocedure

5.4.1.1. Bepalen L_1 en L_2

De luidspreker wekt achtereenvolgens in minstens 2 posities een stabiel en voldoende luid geluidveld met continu spectrum (tussen 50 Hz en 5000 Hz, i.e. roze ruis) op in de zendruimte. Het verschil in geluidsdruk niveau tussen twee opeenvolgende 1/3-octaaftanden bedraagt niet meer dan 6 dB. Het geluidsdruk niveau in de ontvangruimte dient 10 dB hoger te zijn dan het achtergrondgeluidniveau in elke 1/3-octaaftand. De luidspreker wordt op minstens 2 verschillende plaatsen met een tussenafstand van minstens 1,4 m geplaatst. De directe scheidingswand en flankerende wanden worden zo weinig mogelijk rechtstreeks aangestraald door de luidspreker.

De geluidsdruk niveaumetingen worden in de zendruimte (L_1) en ontvangruimte (L_2) met een bewegende microfoon gemeten. Deze volgt 3 maal een halfcirkelvormig patroon waarvan de straal overeenkomt met de gestrekte arm van de operator en waarvan de drie vlakken 45° à 60° uit elkaar liggen en dit gedurende minstens 30 s. De hoek met om het even welke ruimtebegrenzing is minstens 10° . De microfoon blijft minstens 50 cm van elk oppervlak en minstens 1 m van de luidspreker gedurende het volgen van dit patroon.

Meer details vindt men in NBN EN ISO 16283-1:2014.

5.4.1.2. Bepalen L_b

Het achtergrondgeluid L_b wordt enkel in de ontvangruimte gemeten wanneer de luidspreker uitgeschakeld is. De overige meetparameters zijn dezelfde als deze voor L_2 .

5.4.1.3. Bepalen T

De nagalmtijd T wordt gemeten met de zogenaamde "integrated impulse response"-methode. Hierbij wordt de tijd gemeten die nodig is voor het geluidsdruk niveau om 60 dB te verminderen na het uitzenden van een impulsief geluid.

5.4.2. Procedure voor lage frequenties (kleine ruimtes en bij 50, 63 en 80 Hz)

In zend- en/of ontvangruimtes kleiner dan 25 m³ dient, naast de standaardprocedure, eveneens de procedure voor lage frequenties toegepast te worden (banden van 50, 63 en 80 Hz), tenminste indien in deze banden een $D_{n(T)}$ gevraagd wordt. Dit is bijvoorbeeld niet nodig voor de bepaling van de "normale" eengetalswaarde $D_{n(T),w}$ die enkel de banden tussen 100 Hz en 3150 Hz in rekening neemt.

5.4.2.1. Bepalen $L_{1,Corner}$ en $L_{2,Corner}$

De luidsprekers staan op dezelfde posities als bij de standaardprocedure. Er gebeuren bijkomende metingen in 4 hoeken van de zend- en/of ontvangruimte (respectievelijk L_1 en L_2). Twee van deze hoeken bevinden zich op vloerniveau en de andere twee op plafondniveau. Ze worden willekeurig gekozen maar er mogen geen objecten in een afstand van 0,5 m van de hoek staan en de microfoon moet zich ook hier op minstens 1 m van de luidspreker bevinden. De meting gebeurt op 0,3 à 0,4 m afstand van elk van de drie vlakken die de hoek vormen en duurt minstens 15 s. Voor elke 1/3-octafband wordt de hoek met het hoogste geluiddrukkniveau weerhouden.

De L_{LF} -waarde (dus bij 50, 63 of 80 Hz) wordt bepaald uit de metingen uit de standaardprocedure (L) en de meting via de procedure voor lage frequenties (L_{Corner}). De eerste tellen voor een gewicht 2/3 mee en de laatste voor een gewicht 1/3:

$$L_{LF} = 10 \log \frac{10^{L_{Corner}/10} + 2 \cdot 10^{L/10}}{3}$$

De verdere bepaling van $D_{n(T)}$ is volledig analoog als hierboven beschreven.

5.4.2.2. Bepalen $L_{b,Corner}$

Het achtergrondgeluid $L_{b,Corner}$ wordt enkel in de ontvangruimte gemeten wanneer de luidspreker uitgeschakeld is. De overige meetparameters zijn dezelfde als deze voor $L_{2,Corner}$.

5.4.2.3. Bepalen T_{Corner}

De nagalmtijd in elk van de 1/3-octafbanden van 50, 63 en 80 Hz wordt gelijk genomen aan deze in de 1/1-octafband van 63 Hz. De overige meetparameters zijn dezelfde als deze voor T .

5.4.3. In dit project

In dit project werd de procedure voor lage frequenties niet toegepast.

6. Mogelijke beperkingen van de metingen

6.1. Achtergrondgeluid

Soms is het niet mogelijk om voor een of meerdere frequentiebanden voldoende signaal-ruisverhouding (S/N) te bekomen (= signaal L (in dB) minus achtergrondgeluid L_b (in dB)). Dit is het geval als het signaal in de ontvangruimte (bij het in werking zijn van de luidspreker in de zendruimte) geen 10 dB hoger ligt dan het achtergrondgeluid (bij het buiten werking zijn van de luidspreker) in de betreffende frequentieband. Wanneer de S/N-verhouding echter nog hoger is dan 6 dB, wordt een meetcorrectie toegepast:

$$L = 10 \log \left(10^{L_{sb}/10} - 10^{L_b/10} \right)$$

met L_{sb} het geluiddrukkniveau L_2 in de ontvangruimte en L_b het achtergrondgeluiddrukkniveau.

Indien voorkomend, worden deze waarden in onderstaande tabellen **in het oranje weergegeven**.

Wanneer het verschil kleiner is dan 6 dB, wordt de maximale meetcorrectie van -1,3 dB toegepast. Het gevolg is dat, tenminste in de banden zijn waarbij dit verschil kleiner is dan 6 dB, het werkelijke geluiddrukkniveauverschil hoger zal zijn dan het berekende (en gecorrigeerde) maar dat dit onbekend blijft. Het resultaat is dan ook dat de resulterende categorie en eengetalswaarde een onderschatting zal zijn en dat de werkelijke – onbekende – waarde beter zal zijn dan de gerapporteerde. De mate van

onderschatting is wellicht beperkt wanneer dit probleem in slechts enkele banden optreedt en is helemaal niet relevant wanneer het probleem slechts optreedt in de banden van 50, 63, 80, 4000 of 5000 Hz daar deze banden niet in beschouwing genomen worden voor de berekening van de categorie noch voor de eengetalswaarde. Indien voorkomend, worden deze waarden in onderstaande tabellen **in het rood weergegeven**.

6.2. Nagalmtijd

Soms is het niet mogelijk om de nagalmtijden te meten in bepaalde frequentiebanden. De oorzaak kan tweërlei zijn.

De kans hiertoe is namelijk het grootst in de laagste frequenties (50 – 80 Hz) bij ruimtes die eerder groot en onregelmatig van vorm zijn: de daling van het geluiddrukkniveau in deze banden kan mogelijk niet lineair genoeg zijn om op een voldoende betrouwbare manier de nagalmtijd af te leiden.

Een andere reden kan zijn dat de S/N-verhouding niet hoog genoeg is: de luidspreker kan met andere woorden niet voldoende geluidenergie uitzenden in de betreffende band(en) vergeleken met het achtergrondgeluid in die banden. Dit is dus vooral mogelijk oorzaak wanneer er veel achtergrondgeluid is, daar de luidspreker op zich voldoende luide signalen kan uitzenden.

De bijbehorende waarden worden dan ook afgebeeld als een schuine streep (/) in onderstaande tabellen en niet afgebeeld in de onderstaande grafieken. Aangezien de eengetalswaarde berekend wordt voor de waarden tussen 100 Hz en 3150 Hz, is er meestal geen invloed hiervan op de berekening van de categorie en eengetalswaarde.

7. Resultaten

In Tabel 5 worden de resultaten samengevat.

Aan het eind van het rapport worden al deze **meetresultaten in tabel- en grafiekvorm** afgebeeld samen met de belangrijkste parameters. Zo mogelijk worden foto's afgebeeld van zend- en ontvangruimte.

Nr.	Configuratie	Richting ²	Resultaat: $D_{nT,w}$ [dB]	Resultaat D_A ³ [dB]
L1	Standaard-opbouw	↓	58	56
L2	Standaard-opbouw + CDM-pads	↓	59	57
L3	Standaard-opbouw (= bevestigd)	→	56	48

Tabel 5: Samenvatting resultaten, vergelijking met eisen en opmerkingen

8. Bespreking

8.1. Toetsing met eisen

Eerst en vooral moet opgemerkt worden dat deze waarden zeer hoog, dus gunstig, zijn. De standaard-opbouw verticaal zou **voldoen aan verhoogd comfort** bij residentiële bouw (**58 dB ≥ 58 dB**). De standaard-opbouw horizontaal voldoet voor residentiële bouw aan **normaal comfort** (**56 dB ≥ 54 dB**).

² → = horizontaal; ↑ = verticaal van beneden naar boven; ↓ = verticaal van boven naar beneden

³ $D_A = D_{nT,w} + C$

Er moet echter vermeld worden dat de toekomstige versie van de norm voor residentiële bouw – die er begin volgend jaar aan komt – mogelijk gebruik zal maken van de D_A -waarden net als de norm voor scholenbouw. De numerieke geëiste waarde zou zakken naar ≥ 53 dB. Met 48 dB wordt de eis voor normaal comfort dan niet gehaald (48 dB < 53 dB).

In de norm voor scholenbouw zijn er maar weinig combinaties zend- en ontvangruimte waarvoor $D_A > 48$ dB geëist wordt. Voor de meeste combinaties (bijv. twee leslokalen) **voldoet de standaard-opbouw dus zowel horizontaal** (bijv. 56 dB \geq 44 dB) als **verticaal** (bijv. 48 dB \geq 44 dB).

8.2. Verticale geluidsoverdracht

Figuur 6 toont aan dat er een **zeer klein verschil** is tussen meetresultaten L1 en L2. Het gebruik van de CDM-pads levert op het eerste zicht geen meerwaarde voor de verticale luchtgeluidsisolatie. Dit wil zeggen dat men in eerste instantie zou vermoeden dat het flankerend pad via het contact tussen beide units bij geen enkele frequentieband domineert.

Er moet vermeld worden dat het mogelijk is dat geluid omliep via de buitenomgeving en weerkaatste tegen de wat verderop gelegen unit doordat de deurbladen niet perfect sloten. In Figuur 7 wordt het verschil getoond van wat er gemeten werd zonder de deuren aan te drukken en mét de deuren extra hard dicht te drukken. Het gaat hier om een meting in één meetpositie en dus geen volledige meting; de vergelijking is daarom slechts indicatief. Toch toont ze aan dat er een merkbaar verschil optreedt in het gebied tussen 500 en 1250 Hz. Het verschil in ééngetalswaarde $D_{nT,w}$ bedraagt 1 dB.

Een andere piste die gevolgd kan worden is omloopgeluid via de buitenomgeving door uit- en intrede via de vensters, die eveneens zwakke schakels zijn in de gevel. Noch de resonantiefrequentie⁴ van dubbel glas 4 – 15 – 4 (rond 250 Hz) (vermoedelijke glasopbouw) noch de coïncidentiefrequentie⁵ van 4 mm dik glas (rond 3500 Hz) is als een dip zichtbaar, dus deze piste moet uitgesloten worden.

De zichtbaar diepe dip in de grafieken bij 1600 Hz wordt verklaard door de coïncidentiefrequentie van de spaanplaten. Voor spaanplaten van 18 mm dikte is deze namelijk gelijk aan 1770 Hz. Deze kan worden opgeschoven naar rechts in de grafieken indien de **dikte afneemt**, aangezien geldt $f_g \times d = \text{constante}$, met f_g de grensfrequentie (kleinste coïncidentiefrequentie). Zo is bij een dikte van 8 mm de coïncidentiefrequentie dermate hoogfrequent (± 4000 Hz) dat deze geen invloed meer heeft op de bepaling van de eengetalswaarde $D_{nT,w}$ (of D_A). Een alternatief is het gebruik van een **ander materiaal**: **gipskarton** staat er om bekend zeer hoge coïncidentiefrequenties te hebben gezien het een licht, buigslap materiaal betreft in plaats van licht, buigstijf zoals een houten plaat. Nog een alternatief is het "uitsmeren" van de coïncidentiedip door **nooit tweemaal dezelfde dikte** aan spaanplaat te gebruiken in de scheidingsopbouw.

Allicht zal het **toevoegen van minerale wol als geluidsabsorptie tussen beide units** in ervoor zorgen dat er geen spouwresonanties optreden. Deze treden vermoedelijk eveneens op vanaf 1700 Hz (gesteld

⁴ Massa-veer-massa-resonantie: fenomeen waarbij twee bladen van een dubbele wand op elkaar resoneren (sterk trillen). De massa's van de bladen en de stijfheid van de tussenliggende laag bepalen de frequentie waarbij dit gebeurt. Dit is ongunstig gezien er meer geluid wordt overgedragen en er ontstaat een dip in het spectrum.

⁵ Coïncidentiefrequentie: fenomeen waarbij een schuin invallende geluidsgolf een lopende resonantie-buiggolf teweegbrengt op een bouwelement. Dit is ongunstig gezien er meer geluid wordt overgedragen en er ontstaat een dip in het spectrum. Per bouwelement treedt dit fenomeen op: komt een element dus meermaals voor in de scheidingsopbouw, zal dit zich manifesteren als een "dubbel"diepe dip.

dat de spouwafstand tussen beide units 10 cm is). Vermijden van spouwresonanties zal zorgen voor een sterke verbetering.

8.3. Horizontale geluidsoverdracht

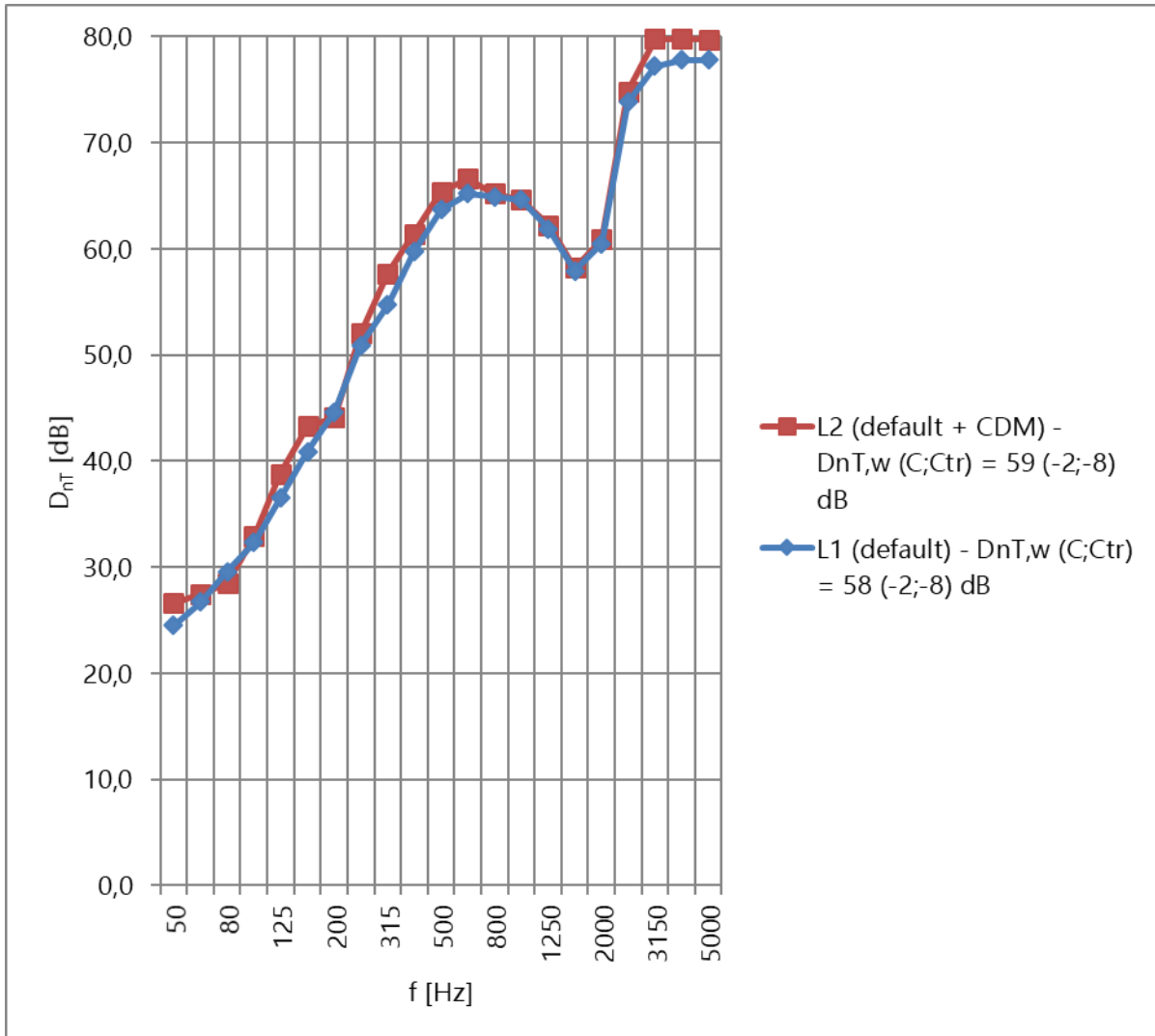
Er is een enorm diepe dip zichtbaar ten gevolge van massa-veer-massa-resonantie van de beide wandafwerkingen ten opzichte van elkaar. Dit heeft een rechtstreeks gevolg voor de lage C-correctieterm (en dus op de D_A -waarde, belangrijk voor de norm voor scholenbouw, voor GRO en mogelijk ook voor de toekomstige versie van de norm voor residentiële bouw!).

Deze dip kan naar links in de grafiek geschoven worden door de massa's van de wandafwerkingen te verhogen en/of de afstand ertussen te verhogen. Geen van beide zijn allicht praktisch haalbaar. Een derde, haalbaarder alternatief is het **plaatsen van minerale wol of andere geluidsabsorptie tussen de wandafwerkingen**, die bovendien de spouwresonanties wegnemen. Dit zal allicht resulteren in waarden die in elke band 5 tot 15 dB hoger zijn, waardoor ook de eengetalswaarden $D_{nT,w}$ en D_A met minstens +5 dB gunstig beïnvloed worden. Dit maakt dat de opbouw meer gewapend is voor de toekomstige norm voor residentiële bouw.

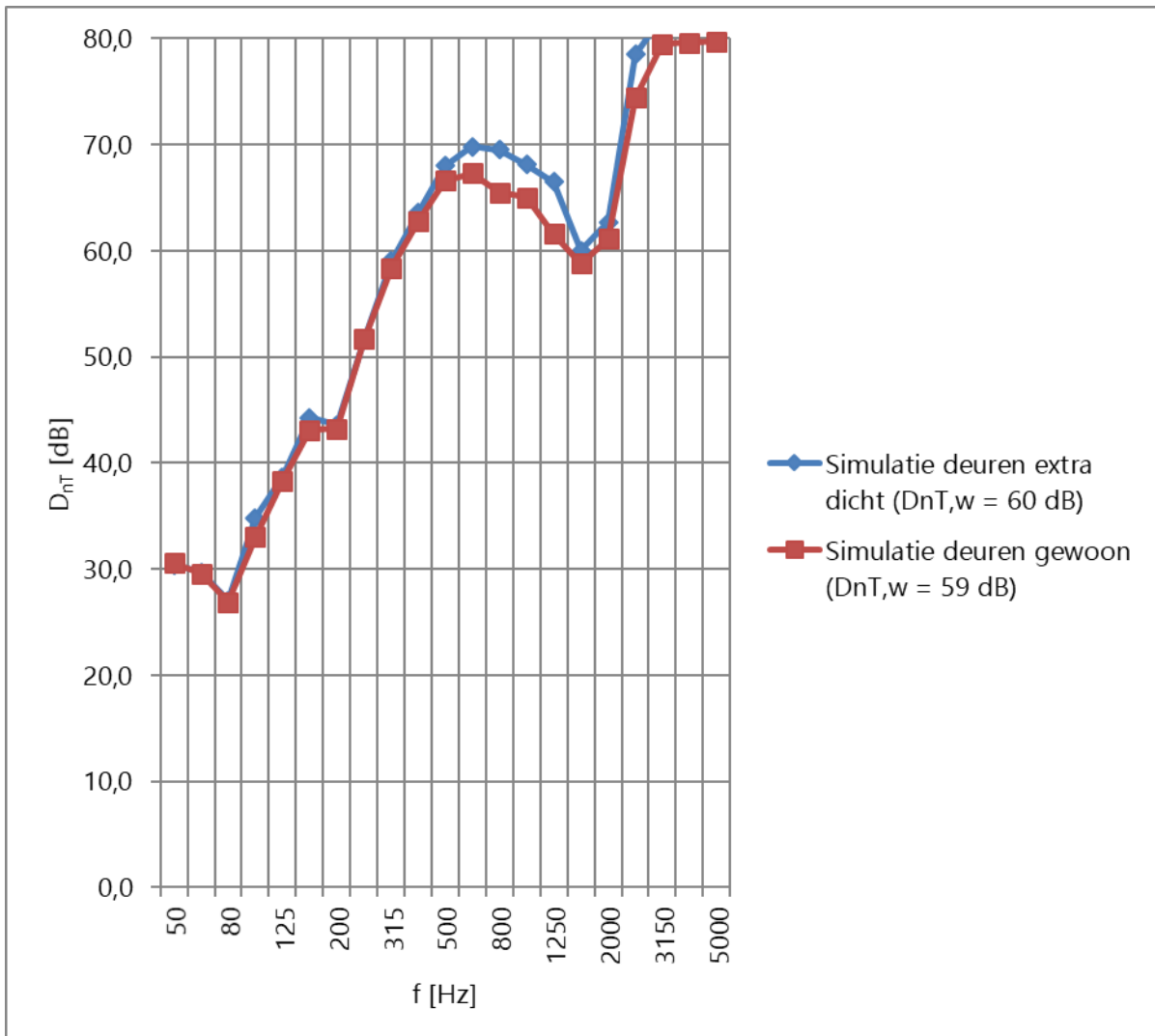
8.4. Invloedsparameters

Verder moet opgemerkt worden dat er een belangrijke invloed is van de afmetingen van de ruimte. Indien de afmeting van de ruimte, loodrecht op het scheidings-element, verdubbelt, stijgen de $D_{nT,w}$ en D_A -waarden met +3 dB. In dit project waren de testruimtes eerder klein van afmetingen, waardoor deze invloedsparameter in realiteit inderdaad belangrijk kan zijn.

Ook de referentienagalmtijd is van invloed. Voor een polyvalente ruimte is deze bijvoorbeeld 1,0 s (zie norm voor scholenbouw) in plaats van 0,5 s waarmee hier gerekend werd. De invloed is echter omgekeerd: bij verdubbeling van de referentienagalmtijd zakt de D_A -waarde met -3 dB.



Figuur 6: Vergelijking tussen meetresultaten L1 en L2 voor de verticale geluidsoverdracht



Figuur 7: Vergelijking voor meetresultaat L2 tussen deuren niet aandrukken en deuren extra hard aandrukken om na te gaan of er invloed is van omlooptgeluid via de buitenomgeving (indicatief resultaat)

Opdrachtgever: Warsco Units NV, Slingerweg 20, 3600 Genk
 Datum proef: 18/4/2019
 Locatie proef: Slingerweg 20, 3600 Genk
 Meting tussen Bovenste unit en Onderste unit
 Volume zend- en ontvangruimte: 40 m³ resp. 40 m³
 Oppervlakte scheidingselement: 16 m²
 Referentienagalmtijd ontvangruimte: 0,5 s

Afbeelding zendruimte



Afbeelding ontvangruimte



f [Hz]	D _{nT} [dB]
50	24,5
63	26,7
80	29,6
100	32,3
125	36,5
160	40,9
200	44,6
250	50,9
315	54,7
400	59,7
500	63,7
630	65,2
800	64,9
1000	64,6
1250	61,9
1600	57,9
2000	60,5
2500	73,8
3150	77,2
4000	77,8
5000	77,8

Eengetalswaarde volgens ISO 717-1 (cfr. referentiecurve):

D_{nT,w} (C;Ctr) = 58 (-2;-8) dB

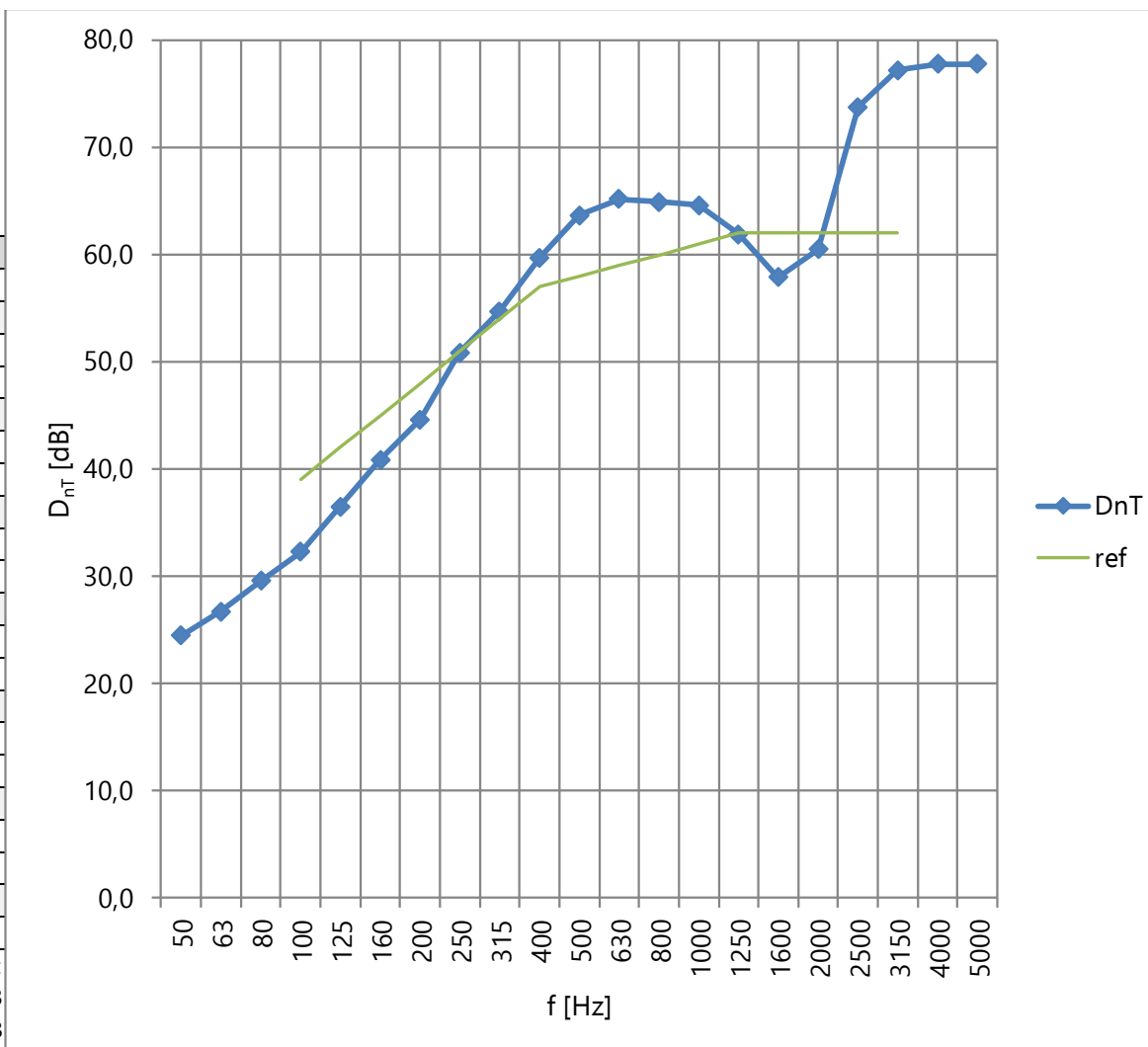
DA = 56 dB

Evaluatie op basis van een methode in situ

Resultaten bekomen via "engineering method", precisie ± 2 dB

Testnr.: 2019-OF078/L1 (default)

Datum rapport: 24/4/2019



Opdrachtgever: Warsco Units NV, Slingerweg 20, 3600 Genk
 Datum proef: 18/4/2019
 Locatie proef: Slingerweg 20, 3600 Genk
 Meting tussen Bovenste unit en Onderste unit
 Volume zend- en ontvangruimte: 40 m³ resp. 40 m³
 Oppervlakte scheidingselement: 16 m²
 Referentienagalmtijd ontvangruimte: 0,5 s

Afbeelding zendruimte



Afbeelding ontvangruimte



f [Hz]	D _{nT} [dB]
50	26,6
63	27,5
80	28,5
100	32,9
125	38,8
160	43,3
200	44,1
250	52,0
315	57,7
400	61,4
500	65,4
630	66,6
800	65,2
1000	64,6
1250	62,2
1600	58,2
2000	60,9
2500	74,8
3150	79,8
4000	79,8
5000	79,7

Eengetalswaarde volgens ISO 717-1 (cfr. referentiecurve):

D_{nT,w} (C;Ctr) = 59 (-2;-8) dB

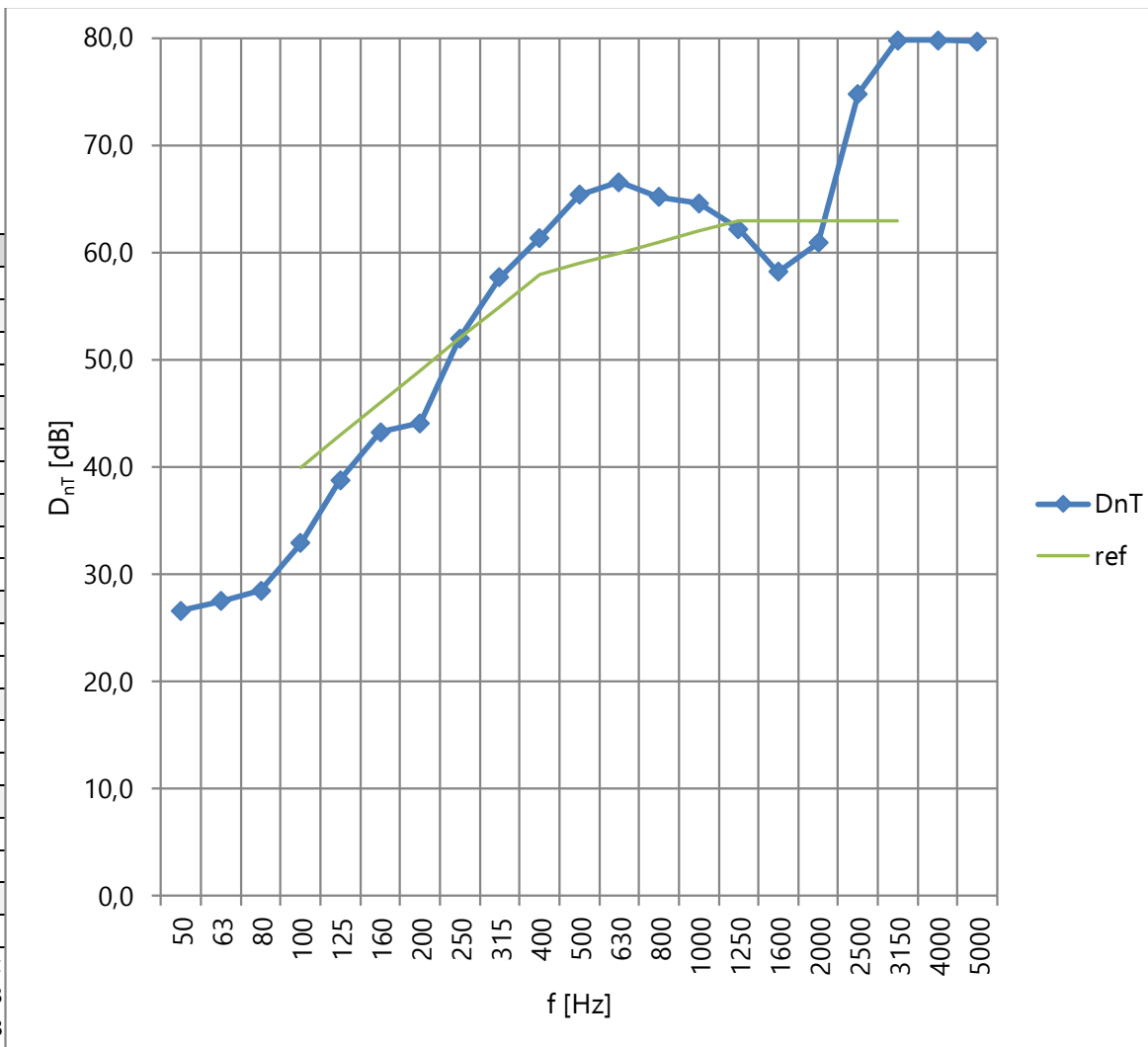
DA = 57 dB

Evaluatie op basis van een methode in situ

Resultaten bekomen via "engineering method", precisie ± 2 dB

Testnr.: 2019-OF078/L2 (default + CDM)

Datum rapport: 24/4/2019



Opdrachtgever: Warsco Units NV, Slingerweg 20, 3600 Genk
 Datum proef: 18/4/2019
 Locatie proef: Slingerweg 20, 3600 Genk
 Meting tussen Bovenste unit en Onderste unit
 Volume zend- en ontvangruimte: 40 m³ resp. 40 m³
 Oppervlakte scheidingselement: 15 m²
 Referentienagalmtijd ontvangruimte: 0,5 s

Afbeelding zendruimte



Afbeelding ontvangruimte



f [Hz]	D _{nT} [dB]
50	11,7
63	6,0
80	15,9
100	22,0
125	26,6
160	35,3
200	43,2
250	51,0
315	56,8
400	62,3
500	67,2
630	71,3
800	71,8
1000	69,6
1250	67,2
1600	67,5
2000	68,5
2500	77,3
3150	81,3
4000	79,8
5000	83,0

Eengetalswaarde volgens ISO 717-1 (cfr. referentiecurve):

D_{nT,w} (C;Ctr) = 56 (-8;-16) dB

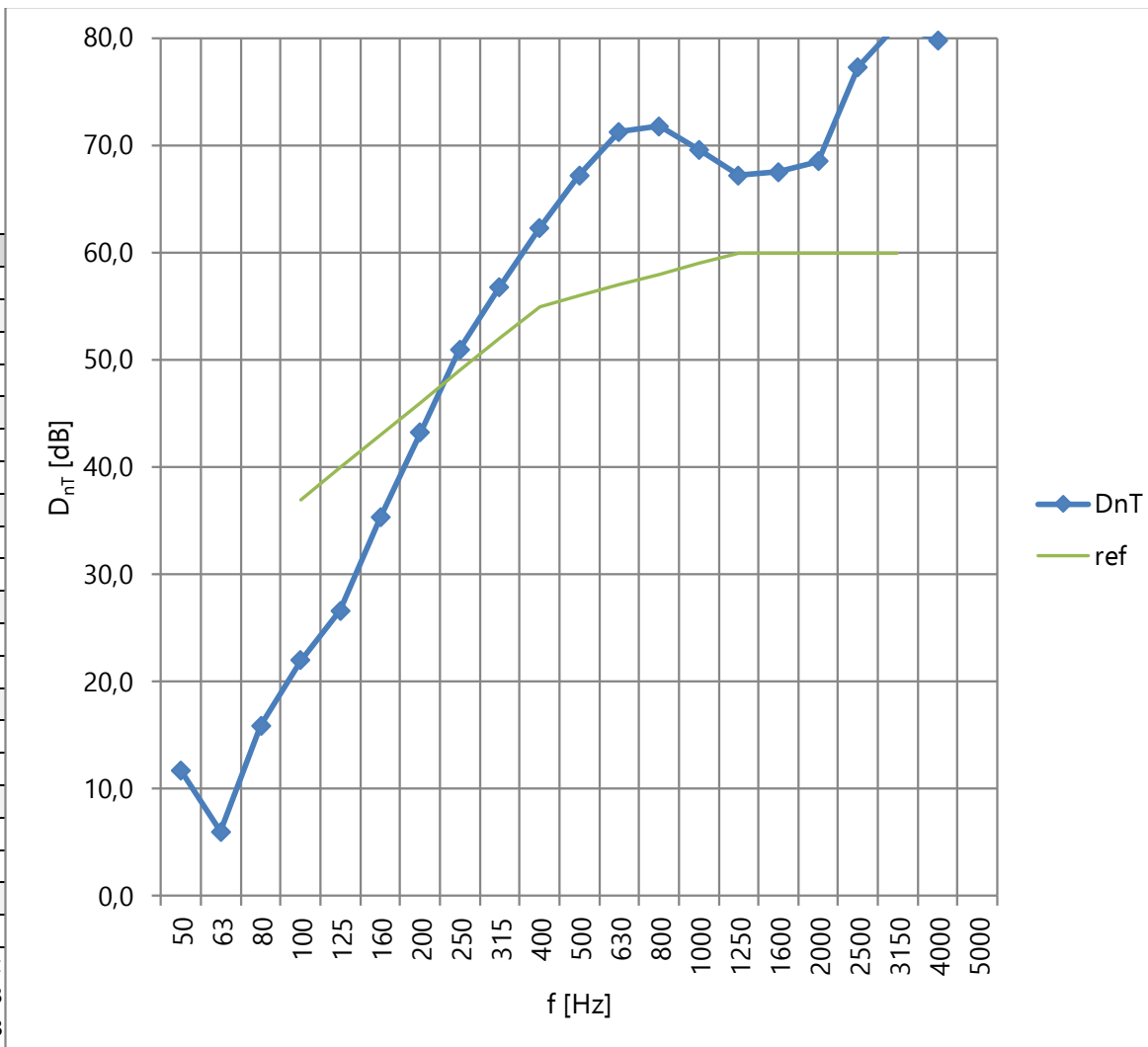
DA = 48 dB

Evaluatie op basis van een methode in situ

Resultaten bekomen via "engineering method", precisie ± 2 dB

Testnr.: 2019-OF078/L3 (fixed)

Datum rapport: 24/4/2019



7.2 Akoestisch rapport - Dienst 22. Metingen contactisolatie (conform ISO 16283-2) v1

AKOESTISCH RAPPORT – DIENST 22: METINGEN CONTACTGELUIDISOLATIE

Versie: v1

We nodigen u vriendelijk uit om onze [tevredenheidsenquête](#) in te vullen ten einde onze dienstverlening te verbeteren.

Projectgegevens:

Onze ref.	2019/OF078		
Datum	24/04/2019		
Opdrachtgever	Warsco Units NV, Slingerweg 20, 3600 Genk		
Contactpersoon	Mark Brouwers		
Opdracht	Onderzoek lucht- en contactgeluidisolatie units		
Adres project	Slingerweg 20, 3600 Genk		
Overlegmomenten (niet inbegrepen)			
Werfcontroles			
Metingen	18/04/2019		
Gebruikte meetapparatuur	<ul style="list-style-type: none"> - Akron Qsources QOhm/Qam omnidirectionele luidspreker + versterker - Larson Davis BAS006 impulsbron - Norsonic Nor277 gestandaardiseerde kloggeluidmachine - Norsonic Nor140 klasse 1 geluidsmeter met automatische bepaling van de nagalmtijd in 1/3-octaaftanden - Norsonic Nor1251 calibrator 		
Opmaak rapport	dr. ir. Pieter Schevenels, zaakvoerder		

Versiebeheer:

Onderdeel	Dienst	Beschrijving	Besteld	v1	v2	v3
Normen en eisen	/		×	24/04/19		
Metingen	13c	Buitenlawaai				
	21	Luchtgeluidisolatie	×	24/04/19		
	22	Contactgeluidisolatie	×	24/04/19		
	23	Gevelgeluidisolatie				
	24	Installatielawaai				
	25	Nagalmtijd				
Berekeningen	26	Uitstraling omgeving				
	11	Luchtgeluidisolatie				
	12	Contactgeluidisolatie				
	13a	Gevelgeluidisolatie buiten → binnen				
	13b	Gevelgeluidisolatie binnen → buiten				
	14	Installatielawaai – kwalitatieve richtlijnen				
	14a	Ventilatielawaai				
	14b	Geluiduitstraling naar omgeving				
	14c	Trillingsisolatie				
15	Nagalm en akoestische absorptie					

0. Bondige inleiding tot (bouw)akoestische grootheden

U vindt [hier](#) een overzicht van de belangrijkste grootheden bij akoestiek in gebouwen.

1. Situatie

De geluidsoverdracht tussen modulaire units, gefabriceerd door opdrachtgever Warsco Units NV, wordt onderzocht. Volgende proeven worden uitgevoerd:

- Luchtgeluidisolatie
 - o Verticaal (zie Figuur 1 links)
 - L1: Standaard-opbouw
 - L2: Standaard-opbouw + CDM-pads (zie Figuur 2)
 - o Horizontaal (zie Figuur 1 rechts)
 - L3: Standaard-opbouw (= bevestigd aan elkaar via onderzijde, zie Figuur 3)
- Contactgeluidisolatie
 - o Verticaal
 - C1: Standaard-opbouw
 - C2: Standaard-opbouw + zwevende dekvloer (zie Figuur 4)
 - C3: Standaard-opbouw + CDM-pads
 - C4: Standaard-opbouw + CDM-pads + zwevende dekvloer
 - o Horizontaal
 - C5: Standaard-opbouw (= bevestigd aan elkaar)
 - C6: Standaard-opbouw + zwevende dekvloer

De pads van CDM bestaan uit strookvormige elastische onderbrekingen die onder beide lange zijden van de bovenste units geplaatst worden. Deze zijn berekend door CDM voor een resonantiefrequentie van 22 Hz onder het gewicht van de bovenste unit inclusief gebruikerslast. De proeven gebeurden echter zonder gebruikerslast, wat volgens de berekeningen tot een resonantiefrequentie van 30 Hz zou leiden.

De zwevende dekvloer bestaat uit een elastische tussenlaag InsulWood van Insulit met een $\Delta L_w = 23$ dB (onder parket). Deze tussenlaag bestaat uit een polyolefine-laag van 2 mm met hieronder 4,5 mm vilt. Hierop wordt dezelfde plaat geplaatst als deze die voor de vloer gebruikt wordt in de standaard-opbouw (spaanplaat).

De standaard-opbouw verticaal bestaat uit (van boven naar beneden, vergelijkbaar met opstelling in Figuur 5):

- Spaanplaat + vloerafwerking
- Houten kepers met isolatie
- Kader uit metalen C-profielen met isolatie tussen
- Plaat
- Luchtspouw tussen units
- Steeldeck-plaat
- Kader uit metalen C-profielen met isolatie tussen
- Houten kepers met isolatie

- 8 mm spaanplaat

Horizontaal is de opbouw vergelijkbaar, behalve dat de plaat van puntje 4 een Steeldeck-plaat is.



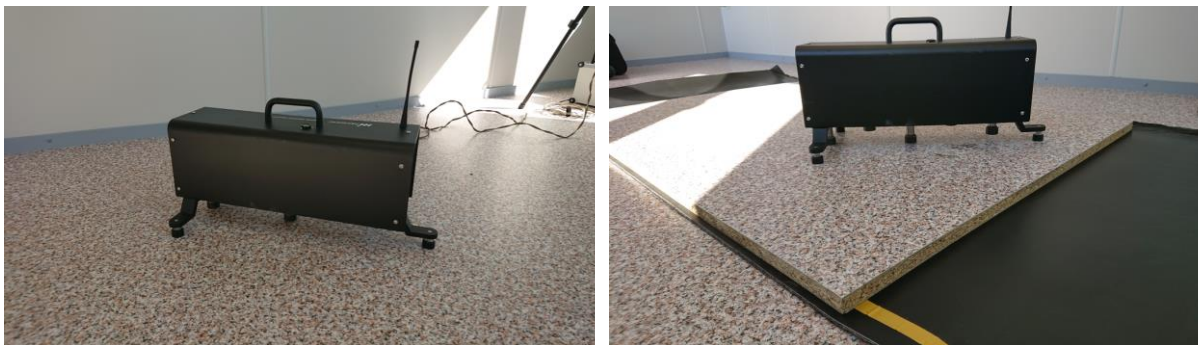
Figuur 1: Testopstelling met beproeving van verticale (afbeelding links) en horizontale geluidsoverdracht (afbeelding rechts)



Figuur 2: Afbeelding van de stroken en montage tussen de units (aangeduid door rode stippellijn)



Figuur 3: Horizontale bout-moer-koppeling aan de uiteinden van de onderzijde (twee in totaal, waarvan één zichtbaar in afbeelding links) met ondersteuning op drie plaatsen door betontegels (zie drie pijlen in afbeelding rechts)



Figuur 4: Meting zonder (afbeelding links) en met zwevende dekvloer (afbeelding rechts)



Figuur 5: Standaardopbouw (vloer – wand – plafond) – plafond is niet verlaagd in testopstelling

2. Referentie normen

2.1. Normen met eisen

Verschillende documenten met akoestische eisen worden hieronder besproken.

2.1.1. Residentiële bouw: NBN S01-400-1:2008

De norm NBN S01-400-1:2008 bevat eisen inzake akoestiek in **residentiële bouwwerken** (appartementen, rijwoningen, alleenstaande woningen) en is van toepassing voor alle bouwwerken waarvan de bouwaanvraag dateert van na maart 2008. In deze norm worden twee comfortniveaus gehanteerd: **normaal comfort** en **verhoogd comfort**. Normaal comfort wordt verondersteld 70 % van de gebouwgebruikers tevreden te stellen; verhoogd comfort stelt 90 % van de gebouwgebruikers tevreden. Er is dus steeds een percentage "ontevredenen".

De norm stelt eisen aan luchtgeluidisolatie, contactgeluidisolatie, gevelgeluidisolatie, installatielawaai en nagalm/geluidabsorptie. Het begrip "woning" in het hiernavolgende slaat zowel op een klassieke woning als op appartementen.

Wat betreft contactgeluidisolatie wordt het **gestandaardiseerd contactgeluidniveau** $L'_{nT,w}$ gehanteerd als grootheid. Hoe *kleiner* deze waarde is, hoe beter de contactgeluidisolatie. De eisen met maximaal toegelaten waarden staan vermeld in Tabel 1.

ZENDRUIMTE buiten de woning	ONTVANGSTRUIMTE binnen de woning	Normaal akoestisch comfort	Verhoogd akoestisch comfort
Elke ruimte	Elke ruimte uitgezonderd een technische ruimte of inkomhal	$L'_{nT,w} \leq 58$ dB	$L'_{nT,w} \leq 50$ dB
Elke ruimte uitgezonderd een slaapkamer	Slaapkamer	$L'_{nT,w} \leq 54$ dB	$L'_{nT,w} \leq 50$ dB
ZENDRUIMTE binnen de woning	ONTVANGSTRUIMTE binnen de woning	Normaal akoestisch comfort	Verhoogd akoestisch comfort
Slaapkamer, keuken, woonkamer en badkamer (die niet alleen toebehoort aan de slaapkamer/ontvangstruimte)	Slaapkamer, studeerruimte	/	$L'_{nT,w} \leq 58$ dB

Tabel 1: Eisen voor het gestandaardiseerd contactgeluidniveau bij residentiële bouw [NBN S01-400-1:2008]

Deze eisen zijn geldig indien het geluidsniveau in de zendruimte overeenkomt met residentiële situaties. Indien men kan verwachten dat het contactgeluidsniveau in de zendruimte hoger zal zijn dan deze in een residentiële context, moeten de eisen verhoogd worden met het te verwachten extra contactgeluidsniveau.

Ook deze grootheid wordt vaak aangevuld met een grootheid tussen haakjes, bijvoorbeeld als volgt: $L'_{nT,w}(C_I) = 54 (-1)$ dB. Deze grootheid tussen haakjes (C_I) is een **correctie** die dient gebruikt te worden wanneer de vloer een **naakte houten vloer** is of een **naakte betonvloer**. Wanneer daarentegen een zachte vloerbekleding of een zwevende dekvloer aanwezig is, wordt gewoon de waarde $L'_{nT,w}$ gebruikt (en zal C_I overigens klein zijn). De grootheid wordt als volgt gebruikt in bovenstaand voorbeeld: $L'_{nT,w} + C_I = 54 + (-1) = 53$ dB. Indien van toepassing, staat in de grafieken van dit rapport steeds de volledige aanduiding $L'_{nT,w}(C_I)$, ook al is enkel $L'_{nT,w}$ belangrijk.

2.1.2. Scholenbouw: NBN S01-400-2:2012

De norm NBN S01-400-1:2012 bevat eisen inzake akoestiek in **schoolgebouwen** en is van toepassing voor alle bouwwerken waarvan de bouwaanvraag dateert van na oktober 2012. In deze norm worden twee niveaus van eisen gehanteerd: de **normale eis** en de **verhoogde eis**. De normale eis is in het algemeen van toepassing; de verhoogde eis is enkel van toepassing in situaties waarin leerlingen met auditieve beperkingen en/of communicatiestoornissen les dienen te volgen.

De norm stelt eisen aan luchtgeluidisolatie, contactgeluidisolatie, gevelgeluidisolatie, installatielawaai en nagalm/geluidabsorptie.

“Circulatieruimtes voor kortstondig gebruik” worden gedefinieerd als circulatieruimtes die tijdens de lessen niet of amper gebruikt worden. Indien ze wel of vaak gebruikt worden tijdens de lessen, zijn het “circulatieruimtes voor doorlopend gebruik”.

2.1.2.1. Tussen ruimtes in het schoolgebouw

In Tabel 2 staan de eisen voor het maximaal toegelaten gewogen gestandaardiseerd contactgeluidniveau (gecorrigeerd met de term C_i) in schoolgebouwen voor verschillende combinaties van bron- en ontvangstruimtes. Hoe *kleiner* deze waarde is, hoe beter.

$L'_I = L'_{nT,w} + C_i$ [dB]	bronruimte							
	leslokaal / leraarskamer / sanitaire ruimte	kleuterklas / lokaal voor muziekonderricht	studiezone	opzoekingsruimte	sporthal / turnzaal / binnenspeelplaats / atelier	circulatieruimte (kortstondig gebruik)	circulatieruimte (doorlopend gebruik)	ontmoetingsruimte
lokaal voor muziekonderricht / studiezone	≤ 55	≤ 50	≤ 60	≤ 55	≤ 45	≤ 60	≤ 55	≤ 50
leslokaal / kleuterklas	≤ 60	≤ 55	≤ 65	≤ 60	≤ 45	≤ 65	≤ 60	≤ 55
opzoekingsruimte / leraarskamer	≤ 60	≤ 55	≤ 65	≤ 60	≤ 55	≤ 65	≤ 60	≤ 55
sporthal / turnzaal	≤ 65	≤ 65	-	-	≤ 60	-	65	≤ 60
atelier / binnenspeelplaats / sanitaire ruimte / circulatieruimte / ontmoetingsruimte	-	-	-	-	≤ 65	-	-	-

Tabel 2: Eisen voor contactgeluidisolatie in schoolgebouwen [NBN S01-400-2:2012]

In ontvangstruimtes waar kinderen/leerlingen/studenten plaatsnemen met **communicatieve en/of auditieve beperkingen** moeten de eisen **met 4 dB verlaagd** (dus verstrengd) worden, maar de geëiste waarde mag nooit kleiner zijn dan 45 dB.

Er wordt aangeraden die combinaties van ruimtes te vermijden waar een waarde van 45 dB geëist wordt (gezien dit erg moeilijk te bereiken is), door bijvoorbeeld bufferruimtes toe te passen.

Bij **muzieklokalen** met percussie-instrumenten en piano's moeten speciaal ontworpen trillingsisolerende montages toegepast worden, ofwel moet de eis verstrengd worden.

Binnenspeelplaatsen die tijdens de lessen niet gebruikt worden, worden bestempeld als circulatieruimtes voor kortstondig gebruik.

De eisen met **circulatieruimtes** als bronruimtes zijn enkel van toepassing indien de ontvangstruimte een verdieping lager ligt of wanneer de circulatieruimte een trap is.

Indien de combinatie van ruimtes niet in Tabel 2 terug te vinden is, wordt verwezen naar de bijlagen van de norm om de eis te kunnen bepalen die afhangt van de verwachte geluidsproductie van de zendruimte en de verwachte geluidsgevoeligheid van de ontvangstruimte.

2.1.2.2. Tussen ruimtes in het schoolgebouw en ruimtes in andere gebouwen

Tussen een ruimte in het **schoolgebouw** en een ruimte in een **ander gebouw** geldt als eis:

$$L'_I = L'_{nT,w} + C_I \leq 50 \text{ dB}$$

in de veronderstelling dat:

- Ander gebouw → schoolgebouw:
 - o Er in dat ander gebouw normale geluidsbelasting optreedt
 - o De ontvangstruimte in het schoolgebouw geen ruimte is met een zeer hoge geluidsgevoeligheid (cfr. bijlage van de norm)
- Schoolgebouw → ander gebouw
 - o De bronruimte in het schoolgebouw geen ruimte is met een zeer hoge geluidsproductie (cfr. bijlage van de norm)

2.1.3. GRO-duurzaamheidsmeter

Het Facilitair Bedrijf van de Vlaamse Overheid hanteert de **GRO-duurzaamheidsmeter** als handleiding om hun gebouwen aan te toetsen. Deze tool heeft haar wortels in 1987 toen de VN-commissie een rapport in verband met duurzame ontwikkeling uitbracht. Dit rapport heette het Brundtland-rapport, genaamd naar de toenmalige voorzitter van deze commissie, de Noorse Gro Harlem Brundtland.

De documenten met eisen zijn te downloaden op de website van de Vlaamse Overheid via [deze link](#) (bestanden: "GRO_Criteria_v2019.pdf" en "BIN1_Eisentabel.xlsx").

Het aspect akoestiek krijgt de code **BIN 1** mee ("bin" van binnen), en omvat eisen in verband met:

- Luchtgeluidisolatie
- Contactgeluidisolatie
- Gevelgeluidisolatie
- Installatielawaai
- Nagalm
- Geluidsuitstraling naar buiten

De eisen zijn zowel qua grootheden als waarden gebaseerd op de norm NBN S01-400-2:2012: de Belgische norm voor scholenbouw.

2.1.4. Lastenboek Toerisme Vlaanderen

Toerisme Vlaanderen hanteert ook aparte akoestische eisen, in termen van twee comfortniveaus: normaal en verhoogd comfort.

Wat betreft contactgeluidisolatie wordt het **gestandaardiseerd contactgeluidniveau** $L'_{nT,w}$ gehanteerd als grootheid. Hoe *kleiner* deze waarde is, hoe beter de contactgeluidisolatie. De eisen met maximaal toegelaten waarden staan vermeld in Tabel 3.

2 CONTACTGELUIDISOLATIE			
2.g	beoordelingsgetal:	$L'_{nT,w}$: het gewogen gestandaardiseerde ontvangniveau	
2.m	meetmethode:	NBN EN ISO 140 - 7	
2.b	beoordelingsmethode:	NBN EN ISO 700 - 2	
2.r	rekenmethode:	NBN EN ISO 12354 - 2	
	situatie	eis: maximale $L'_{nT,w}$	
		normaal comfort	verhoogd comfort
2.01	slaapkamer ↔ slaapkamer	≤ 60 dB	≤ 55 dB
2.02	badkamer (van een andere kamer) → slaapkamer	≤ 55 dB	≤ 50 dB
2.03	gang → slaapkamer	≤ 55 dB	≤ 50 dB
2.04	gemeenschappelijke ruimtes (uitgezonderd gang) b.v. refter, onthaal, keuken, kantoren, sanitair, ... → slaapkamer	≤ 55 dB	≤ 50 dB
2.05	activiteitenlokaal ↔ activiteitenlokaal	≤ 65 dB	≤ 60 dB
2.06	kantoren ↔ activiteitenlokaal	≤ 60 dB	≤ 55 dB
2.07	kantoor ↔ kantoor of vergaderruimte	≤ 65 dB	≤ 60 dB

Tabel 3: Eisen voor het gestandaardiseerd contactgeluidniveau

2.2. Meetnormen

De meting en daaropvolgende berekening van de categorieën en/of eengetalswaarden gebeurde conform de normen:

- NBN EN ISO 16283-2:2016 Acoustics – Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements – Part 2: Impact sound insulation
- NBN S 01-400:1977 Akoestiek – Criteria van de akoestische isolatie → categorieën
- EN ISO 717-2:2013 Acoustics – Rating of sound insulation in buildings and of building elements – Part 2: Impact sound insulation → eengetalswaarden
- ISO 3382-2:2008 Acoustics – Measurement of room acoustic parameters – Part 2: Reverberation times in ordinary rooms

Voor de bepaling van de categorie is, volgens welbepaalde regels, een beperkte overschrijding van de meetcurve ten opzichte van de betreffende categoriecurve toegelaten (zie NBN S 01-400:1977).

De eengetalswaarde is af te lezen bij 500 Hz op de referentiecurve die eveneens in onderstaande grafieken afgebeeld is. Deze curve moet op een bepaalde manier, volgens welbepaalde regels, passen op de gemeten curve (zie EN ISO 717-2:2013).

3. Definities

Het **gestandaardiseerd contactgeluidniveau** L'_{nT} wordt bepaald via de volgende formule:

$$L'_{nT} = L_i - 10 \log \frac{T}{T_0}$$

Hierin is 'log' het tiendelig logaritme¹, L_i het geluidrukniveau in de ontvangruimte, T de gemeten nagalmtijd in de ontvangruimte conform ISO 3382-2:2008 en T_0 is de referentienagalmtijd van 0,5 s voor een ruimte van 30 m³ groot, 0,3 s voor een ruimte kleiner dan 20 m³ en tussenliggende waarden voor ruimtes met een tussenliggende grootte. Voor ruimtes groter dan 30 m³ wordt verwezen naar de Belgische normen NBN S01-400-1:2008 en NBN S01-400-2:2012. Voor elke residentiële ruimte groter dan 30 m³ is T_0 bijvoorbeeld 0,5 s; voor reguliere klaslokalen is deze functie van het volume in m³ en gelijk aan $0,35 \times \log(1,25 V)$. De eenheid van L'_{nT} is dB.

Het **genormaliseerd contactgeluidniveau** L'_n wordt bepaald via de volgende formule:

$$L'_n = L_i + 10 \log \frac{A}{A_0}$$

Hierin is A de absorptieoppervlakte van de ontvangruimte, die uit de nagalmtijd T en het volume van de ontvangruimte V berekend kan worden als volgt:

$$A = 0,16 \frac{V}{T}$$

A_0 is de referentie-absorptieoppervlakte van 10 m². De eenheid van L'_n is eveneens dB.

4. Meetnauwkeurigheid

De nauwkeurigheid van de meetresultaten bedraagt ± 2 dB tot en met 315 Hz en ± 1 dB voor hogere frequenties.

5. Gebruikte meetapparatuur en meetmethode

5.1. Uitgezonden signaal voor kloggeluidmetingen

- Aard: kloggeluid
- Kloggeluidmachine: Norsonic Nor277 gestandaardiseerde kloggeluidmachine (conform Annex A van NBN EN ISO 16283-2)

5.2. Uitgezonden signaal voor nagalmmetingen

¹ Dit is ook zo verderop in het rapport.

- Aard: impuls
- Impulsbron: Larson Davis BAS006

5.3. Opgenomen signaal

- Geluidsmeter: Norsonic 140 met ingebouwde software en automatische nagalmtijdbepaling (conform IEC 60651:1979, IEC 60804:1985 en IEC 61260:1995)
- IJkbron: Norsonic 1251 calibrator (conform IEC 60942:1988)

5.4. Meetmethode

5.4.1. Standaardprocedure

5.4.1.1. Bepalen L_i

De klopgeluidmachine wordt op minstens 4 willekeurige posities geplaatst op de vloer in de zendruimte op minstens 0,5 m van de begrenzingen van de ruimte. De oriëntatie van de lijn van de hamers is 45° ten opzichte van de ruimtebegrenzingen.

De geluidrukniveaumeting wordt in de ontvangruimte (L_i) met een bewegende microfoon gemeten. Deze volgt 2 maal een achtvormig patroon waarvan de grootste tussenafstand minstens 0,7 m bedraagt gedurende minstens 30 s. De hoek met om het even welke ruimtebegrenzing is minstens 10°. De microfoon blijft minstens 50 cm van elk oppervlak en minstens 1 m van de geëxciteerde vloer gedurende het volgen van dit patroon.

Meer details vindt men in NBN EN ISO 16283-2:2016.

5.4.1.2. Bepalen L_b

Het achtergrondgeluid L_b wordt enkel in de ontvangruimte gemeten wanneer de luidspreker uitgeschakeld is. De overige meetparameters zijn dezelfde als deze voor L_2 .

5.4.1.3. Bepalen T

De nagalmtijd T wordt gemeten met de zogenaamde "integrated impulse response"-methode. Hierbij wordt de tijd gemeten die nodig is voor het geluidrukniveau om 60 dB te verminderen na het uitzenden van een impulsief geluid.

5.4.2. Procedure voor lage frequenties (kleine ruimtes en bij 50, 63 en 80 Hz)

In ontvangruimtes kleiner dan 25 m³ dient, naast de standaardprocedure, eveneens de procedure voor lage frequenties toegepast te worden (banden van 50, 63 en 80 Hz), tenminste indien in deze banden een $L'_{n(T)}$ gevraagd wordt. Dit is bijvoorbeeld niet nodig voor de bepaling van de "normale" eengetalswaarde $L'_{n(T),w}$ die enkel de banden tussen 100 Hz en 3150 Hz in rekening neemt.

5.4.2.1. Bepalen $L_{i,Corner}$

De klopgeluidmachine staat op twee posities die overeenkomen twee van de gebruikte posities bij de standaardprocedure. Er gebeuren bijkomende metingen in 4 hoeken van de ontvangruimte. Twee van deze hoeken bevinden zich op vloerniveau en de andere twee op plafondniveau. Ze worden willekeurig gekozen maar er mogen geen objecten in een afstand van 0,5 m van de hoek staan en de microfoon moet zich ook hier op minstens 1 m van de luidspreker bevinden. De meting gebeurt op 0,3 à 0,4 m afstand van elk van de drie vlakken die de hoek vormen en duurt minstens 15 s. Voor elke 1/3-octaaftband wordt de hoek met het hoogste geluidrukniveau weerhouden.

De $L_{i,LF}$ -waarde (dus bij 50, 63 of 80 Hz) wordt bepaald uit de metingen uit de standaardprocedure (L_i) en de meting via de procedure voor lage frequenties ($L_{i,Corner}$). De eerste tellen voor een gewicht 2/3 mee en de laatste voor een gewicht 1/3:

$$L_{i,LF} = 10 \log \frac{10^{L_{i,Corner}/10} + 2 \cdot 10^{L_i/10}}{3}$$

De verdere bepaling van $L'_{n(T)}$ is volledig analoog als hierboven beschreven.

5.4.2.2. Bepalen $L_{b,Corner}$

Het achtergrondgeluid $L_{b,Corner}$ wordt enkel in de ontvangruimte gemeten wanneer de luidspreker uitgeschakeld is. De overige meetparameters zijn dezelfde als deze voor $L_{i,Corner}$.

5.4.2.3. Bepalen T_{Corner}

De nagalmtijd in elk van de 1/3-octaaftanden van 50, 63 en 80 Hz wordt gelijk genomen aan deze in de 1/1-octaaftand van 63 Hz. De overige meetparameters zijn dezelfde als deze voor T .

5.4.3. In dit project

In dit project werd de procedure voor lage frequenties niet toegepast.

6. Mogelijke beperkingen van de metingen

6.1. Achtergrondgeluid

Soms is het niet mogelijk om voor een of meerdere frequentiebanden voldoende signaal-ruisverhouding (S/N) te bekomen (= signaal L (in dB) minus achtergrondgeluid L_b (in dB)). Dit is het geval als het signaal in de ontvangruimte (bij het in werking zijn van de luidspreker in de zendruimte) geen 10 dB hoger ligt dan het achtergrondgeluid (bij het buiten werking zijn van de luidspreker) in de betreffende frequentieband. Wanneer de S/N-verhouding echter nog hoger is dan 6 dB, wordt een meetcorrectie toegepast:

$$L = 10 \log \left(10^{L_{sb}/10} - 10^{L_b/10} \right)$$

met L_{sb} het geluidsdrukniveau L_2 in de ontvangruimte en L_b het achtergrondgeluidsdrukniveau.

Indien voorkomend, worden deze waarden in onderstaande tabellen **in het oranje weergegeven**.

Wanneer het verschil kleiner is dan 6 dB, wordt de maximale meetcorrectie van -1,3 dB toegepast. Het gevolg is dat, tenminste in de banden zijn waarbij dit verschil kleiner is dan 6 dB, het werkelijke geluidsdrukniveauverschil hoger zal zijn dan het berekende (en gecorrigeerde) maar dat dit onbekend blijft. Het resultaat is dan ook dat de resulterende categorie en eengetalswaarde een onderschatting zal zijn en dat de werkelijke – onbekende – waarde beter zal zijn dan de gerapporteerde. De mate van onderschatting is wellicht beperkt wanneer dit probleem in slechts enkele banden optreedt en is helemaal niet relevant wanneer het probleem slechts optreedt in de banden van 50, 63, 80, 4000 of 5000 Hz daar deze banden niet in beschouwing genomen worden voor de berekening van de categorie noch voor de eengetalswaarde. Indien voorkomend, worden deze waarden in onderstaande tabellen **in het rood weergegeven**.

6.2. Nagalmtijd

Soms is het niet mogelijk om de nagalmtijden te meten in bepaalde frequentiebanden. De oorzaak kan tweërlei zijn.

De kans hiertoe is namelijk het grootst in de laagste frequenties (50 – 80 Hz) bij ruimtes die eerder groot en onregelmatig van vorm zijn: de daling van het geluidniveau in deze banden kan mogelijk niet lineair genoeg zijn om op een voldoende betrouwbare manier de nagalmtijd af te leiden.

Een andere reden kan zijn dat de S/N-verhouding niet hoog genoeg is: de luidspreker kan met andere woorden niet voldoende geluidenergie uitzenden in de betreffende band(en) vergeleken met het achtergrondgeluid in die banden. Dit is dus vooral mogelijk oorzaak wanneer er veel achtergrondgeluid is, daar de luidspreker op zich voldoende luide signalen kan uitzenden.

De bijbehorende waarden worden dan ook afgebeeld als een schuine streep (/) in onderstaande tabellen en niet afgebeeld in de onderstaande grafieken. Aangezien de eengetalswaarde berekend wordt voor de waarden tussen 100 Hz en 3150 Hz, is er meestal geen invloed hiervan op de berekening van de categorie en eengetalswaarde.

7. Resultaten

In Tabel 4 worden de resultaten samengevat.

Aan het eind van het rapport worden al deze **meetresultaten in tabel- en grafiekvorm** afgebeeld samen met de belangrijkste parameters. Zo mogelijk worden foto's afgebeeld van zend- en ontvangruimte.

Nr.	Configuratie	Richting ²	Resultaat: $L'_{nT,w}$ [dB]	Resultaat L'_1 ³ [dB]
C1	Standaard-opbouw	↓	51	51
C2	Standaard-opbouw + zwevende dekvloer	↓	44	45
C3	Standaard-opbouw + CDM-pads	↓	48	49
C4	Standaard-opbouw + zwevende dekvloer + CDM-pads	↓	42	45
C5	Standaard-opbouw (= bevestigd)	→	46	47
C6	Standaard-opbouw + zwevende dekvloer	→	42	44

Tabel 4: Samenvatting resultaten, vergelijking met eisen en opmerkingen

² → = horizontaal; ↑ = verticaal van beneden naar boven; ↓ = verticaal van boven naar beneden

³ $L'_1 = L'_{nT,w} + C_1$

8. Bespreking

8.1. Toetsing met eisen

Eerst en vooral moet opgemerkt worden dat deze waarden zeer laag, dus gunstig, zijn. De standaard-opbouw verticaal zou **voldoen aan normaal comfort** bij residentiële bouw (**51 dB ≤ 54 dB**). Er moet hierbij vermeld worden dat in de nieuwe versie van de norm, die er begin volgend jaar aankomt, het onderscheid van al dan niet een slaapkamer als ontvangruimte wegvalt en de eis allicht uniform 54 dB wordt voor alle gevallen tussen twee wooneenheden. De standaard-opbouw horizontaal voldoet voor residentiële bouw aan **verhoogd comfort** (**46 dB ≤ 50 dB**).

In de norm voor scholenbouw zijn er maar weinig combinaties zend- en ontvangruimte waarvoor $L'_1 < 50$ dB geëist wordt. Voor de meeste combinaties (bijv. twee leslokalen) **voldoet de standaard-opbouw dus zowel horizontaal** (bijv. **51 dB < 60 dB**) als **verticaal** (bijv. **47 dB < 60 dB**).

Voor de strengere eisen in deze norm, tot $L'_1 \leq 45$ dB, is de **zwevende dekvloer nodig**, zowel voor de verticale als horizontale geluidsoverdracht.

8.2. Verticale geluidsoverdracht

Figuur 6 toont de vergelijking van de verschillende opstellingen voor de verticale geluidsoverdracht. De **CDM-pads zorgen voor verbetering vanaf 250 Hz**. Dit doet vermoeden dat flankerende geluidsoverdracht vanaf deze frequentie evenwaardig wordt aan directe geluidsoverdracht, waardoor het de moeite loont de flankerende overdracht te onderdrukken door de elastische koppeling. De verbetering in termen van eengetalswaarde is 3 dB (voor $L'_{nT,w}$) en 2 dB (voor L'_i).

De **zwevende dekvloer is echter efficiënter**: de verbetering treedt reeds op vanaf 63 Hz. De verbetering in termen van eengetalswaarde is 7 dB (voor $L'_{nT,w}$) en 6 dB (voor L'_i).

De combinatie van beide ingrepen, CDM-pads en zwevende dekvloer lijkt de optelsom te zijn van beide afzonderlijke ingrepen. De verbetering in termen van eengetalswaarde is 9 dB (voor $L'_{nT,w}$) en 6 dB (voor L'_i). Voor deze laatste grootte is de verbetering dus hetzelfde als met enkel de zwevende dekvloer. Dit komt omdat de C_1 -correctie vooral laagfrequente uitschieters afstraft en deze laagfrequente waarden zijn voor de groene en paarse lijn vrijwel gelijk. Bij de hogere frequenties scoort de combinatie van beide ingrepen echter afgetekend het beste.

De in het rapport over luchtgeluidisolatie aangehaalde verbetering die verwacht wordt door het vullen van de spouw tussen beide units met minerale wol, zal ook hier voor verbetering zorgen.

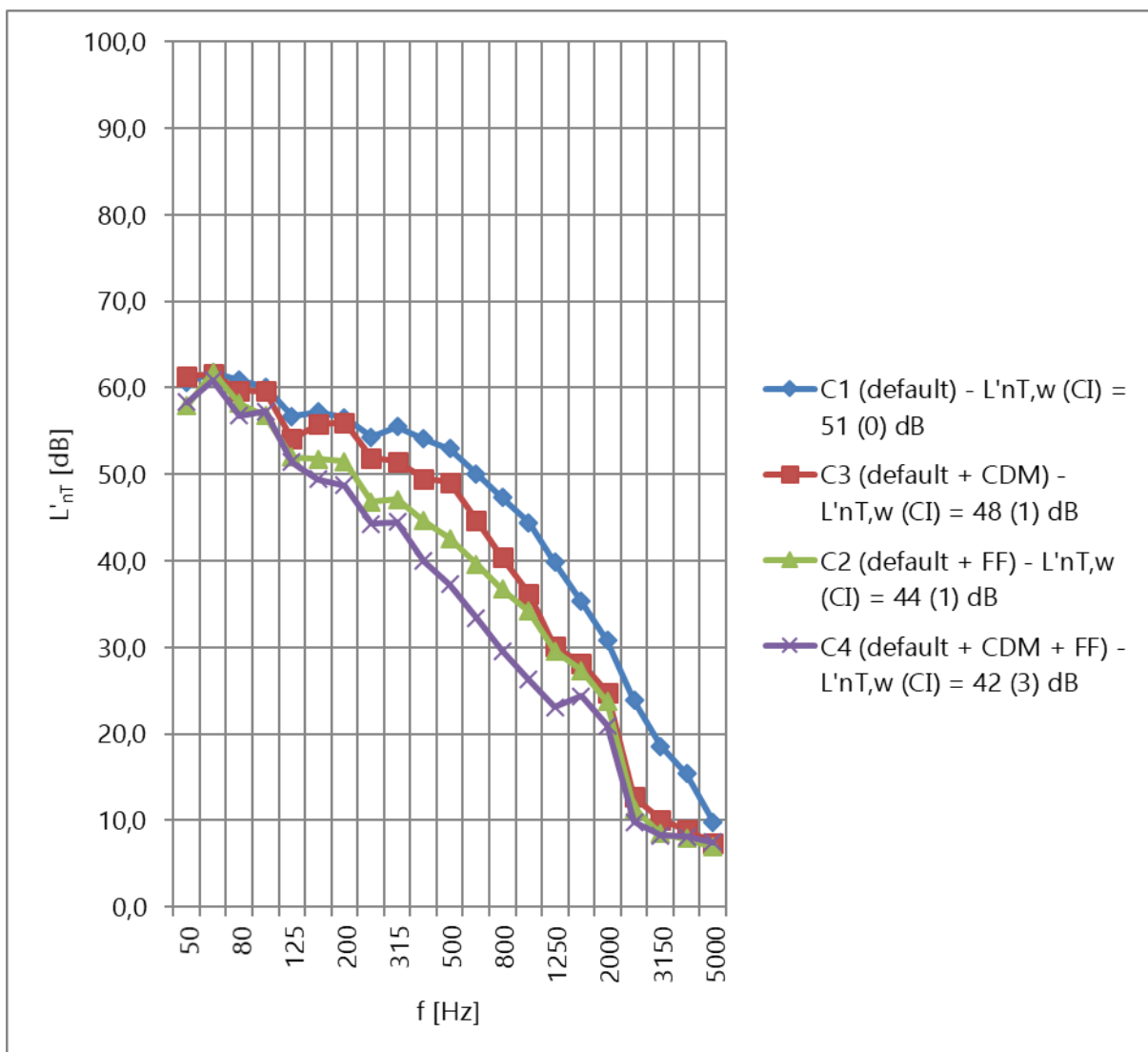
8.3. Horizontale geluidsoverdracht

Figuur 7 toont de invloed van de **zwevende dekvloer** voor de horizontale geluidsoverdracht. De invloed treedt op vanaf 125 Hz en het verschil met de situatie zonder zwevende dekvloer is zeer gelijkaardig als de verbetering door het plaatsen van de zwevende dekvloer in de verticale richting: vanaf de middenfrequenties is er een **verbetering van ± 10 dB**. De verbetering in termen van eengetalswaarde is 4 dB (voor $L'_{nT,w}$) en 3 dB (voor L'_i).

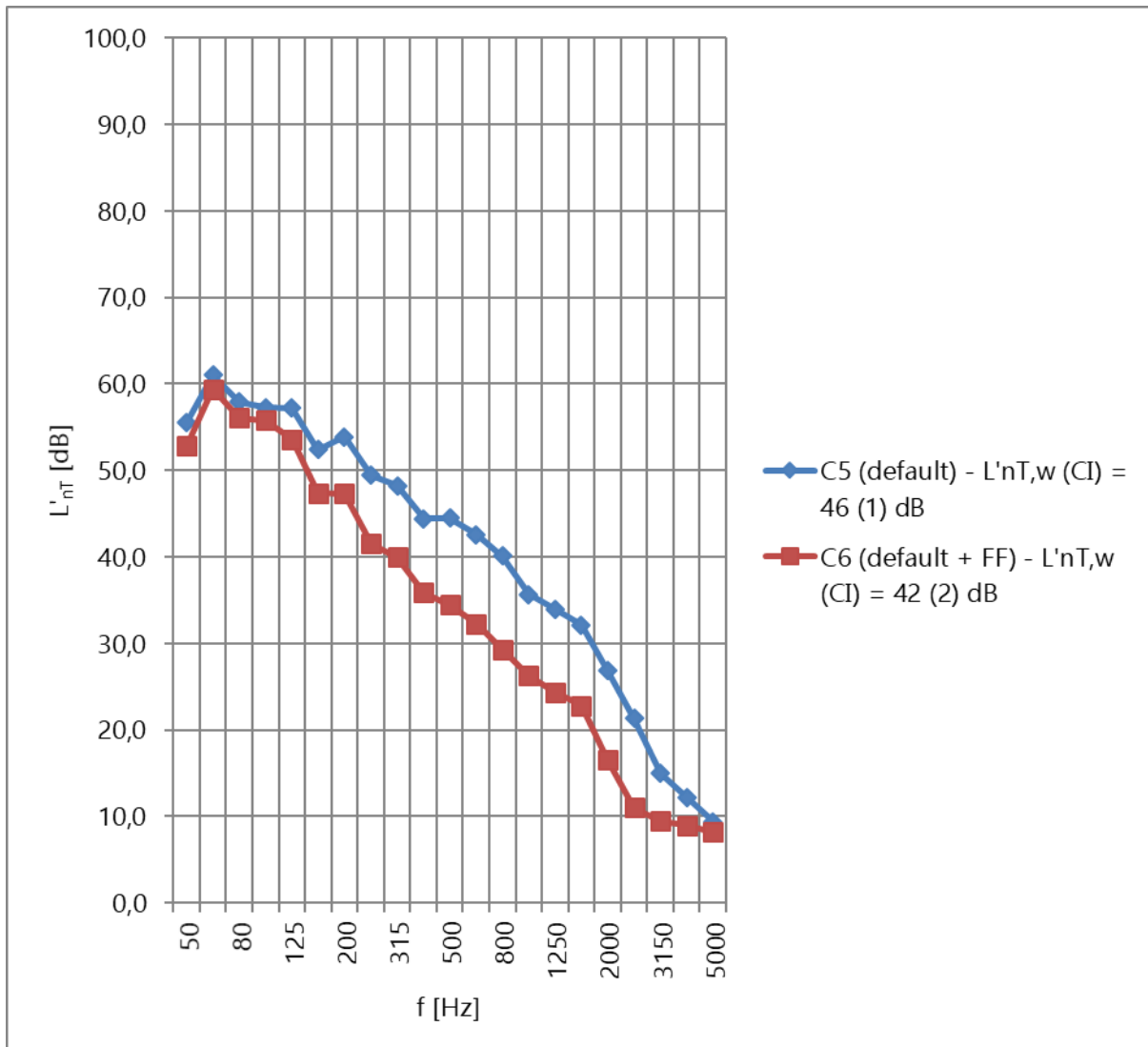
8.4. Invloedsparameters

Verder moet opgemerkt worden dat er een belangrijke invloed is van de afmetingen van de ruimte. Indien de afmeting van de ruimte, loodrecht op het scheidings-element, verdubbelt, zakken de $L'_{nT,w}$ en L'_T -waarden met -3 dB. In dit project waren de testruimtes eerder klein van afmetingen, waardoor deze invloedsparameter in realiteit inderdaad belangrijk kan zijn.

Ook de referentienagalmtijd is van invloed. Voor een polyvalente ruimte is deze bijvoorbeeld 1,0 s (zie norm voor scholenbouw) in plaats van 0,5 s waarmee hier gerekend werd. De invloed is echter omgekeerd: bij verdubbeling van de referentienagalmtijd stijgt de L'_T -waarde met $+3$ dB.



Figuur 6: Vergelijking tussen meetresultaten C1 tot en met C4 voor de verticale geluidsoverdracht



Figuur 7: Vergelijking tussen meetresultaten C5 en C6 voor de horizontale geluidsoverdracht

Opdrachtgever: Warsco Units NV, Slingerweg 20, 3600 Genk
 Datum proef: 18/4/2019
 Locatie proef: Slingerweg 20, 3600 Genk
 Meting tussen Bovenste unit en Onderste unit
 Volume ontvangruimte: 40 m³
 Oppervlakte scheidingselement: 16 m²
 Referentienagalmtijd ontvangruimte: 0,5 s

Afbeelding zendruimte



Afbeelding ontvangruimte



f [Hz]	L' nT [dB]
50	60,6
63	61,8
80	60,9
100	60,1
125	56,7
160	57,2
200	56,6
250	54,3
315	55,5
400	54,1
500	53
630	50,1
800	47,3
1000	44,4
1250	39,8
1600	35,3
2000	30,8
2500	23,9
3150	18,6
4000	15,4
5000	9,8

Eengetalswaarde volgens ISO 717-2 (cfr. referentiecurve):

L'nT,w (CI) = 51 (0) dB

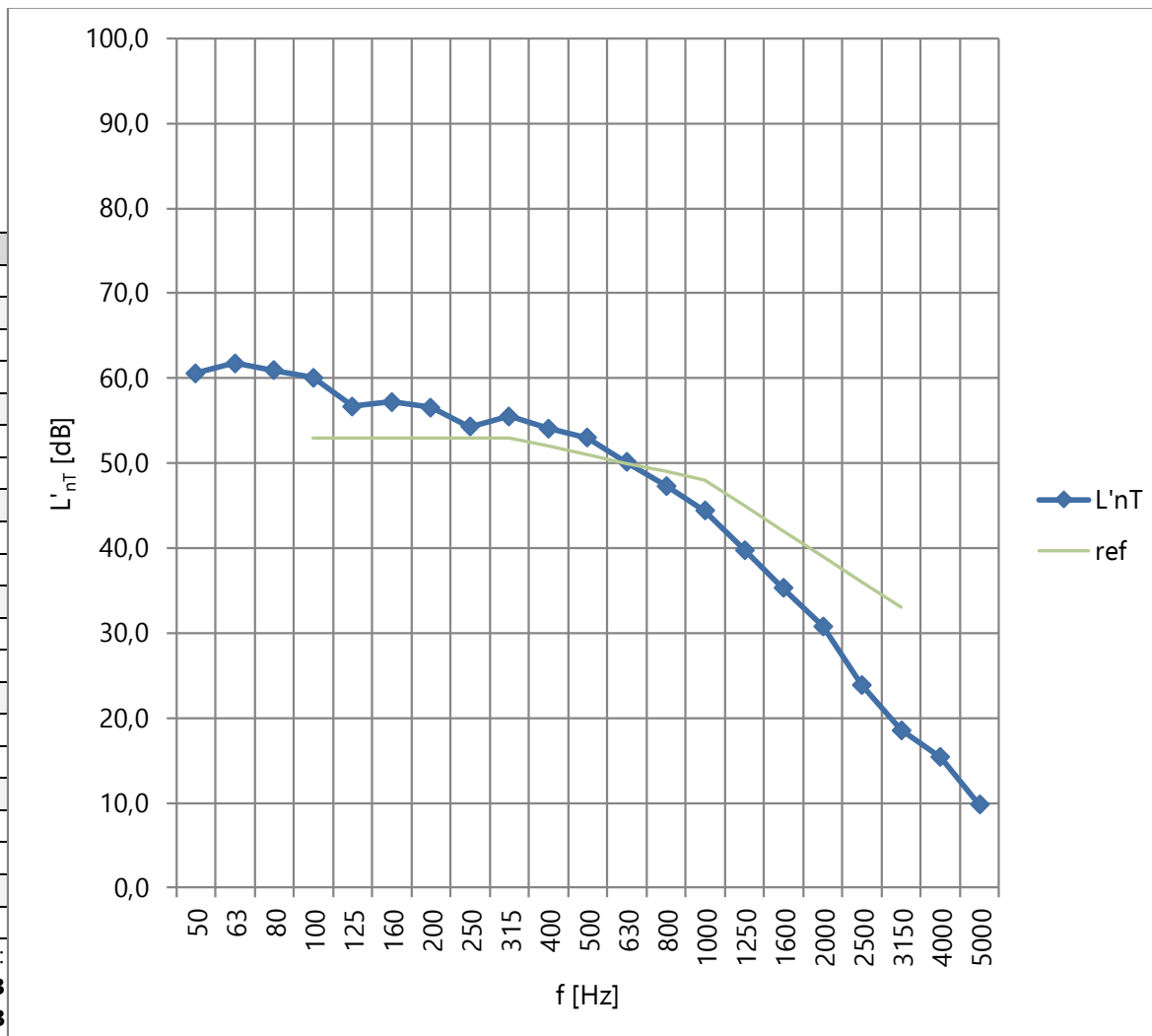
L'I = 51 dB

Evaluatie door middel van kloppluידmachine in situ

Resultaten bekomen via "engineering method", precisie ± 2 dB

Testnr.: 2019-OF078/C1 (default)

Datum rapport: 24/4/2019



PS-Acoustics BVBA

Asterstraat 8, 3800 Sint-Truiden

tel: 011 63 23 60 – gsm: 0477 90 36 09 – e-mail: info@ps-acoustics.be – website: www.ps-acoustics.be

IBAN: BE45 7350 3160 3089 – EIC: KREDBEBB

BTW BE 0849.262.219 – RPR Hasselt

Opdrachtgever: Warsco Units NV, Slingerweg 20, 3600 Genk
 Datum proef: 18/4/2019
 Locatie proef: Slingerweg 20, 3600 Genk
 Meting tussen Bovenste unit en Onderste unit
 Volume ontvangruimte: 40 m³
 Oppervlakte scheidingselement: 16 m²
 Referentienagalmtijd ontvangruimte: 0,5 s

Afbeelding zendruimte



Afbeelding ontvangruimte



f [Hz]	L' nT [dB]
50	57,9
63	61,8
80	58,2
100	56,8
125	52
160	51,8
200	51,5
250	46,8
315	47,1
400	44,6
500	42,6
630	39,6
800	36,7
1000	34,2
1250	29,6
1600	27,3
2000	23,7
2500	11,4
3150	8,5
4000	7,9
5000	6,9

Eengetalswaarde volgens ISO 717-2 (cfr. referentiecurve):

L'nT,w (CI) = 44 (1) dB

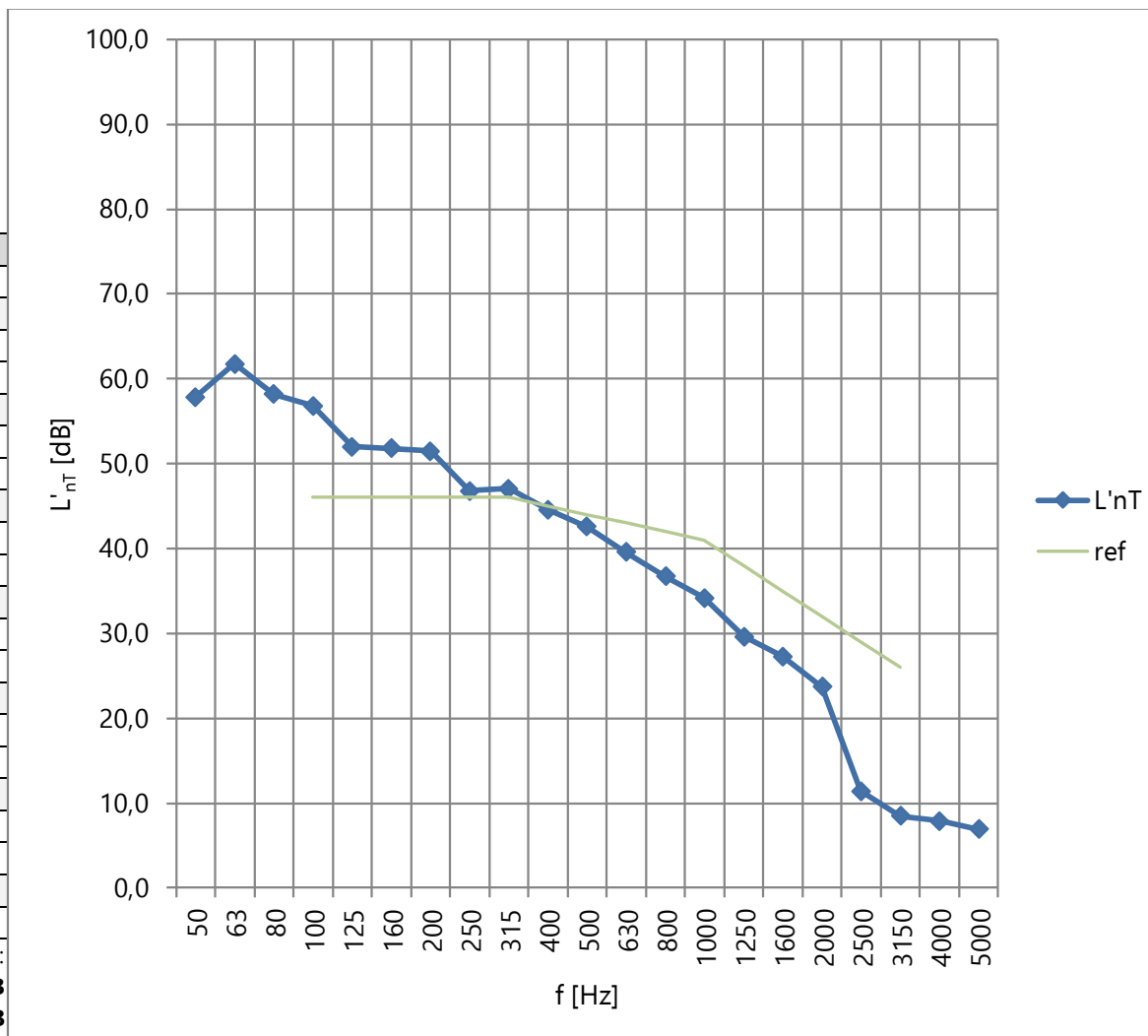
L'I = 45 dB

Evaluatie door middel van kloppluידmachine in situ

Resultaten bekomen via "engineering method", precisie ± 2 dB

Testnr.: 2019-OF078/C2 (default + FF)

Datum rapport: 24/4/2019



PS-Acoustics BVBA

Asterstraat 8, 3800 Sint-Truiden

tel: 011 63 23 60 – gsm: 0477 90 36 09 – e-mail: info@ps-acoustics.be – website: www.ps-acoustics.be

IBAN: BE45 7350 3160 3089 – EIC: KREDBEBB

BTW BE 0849.262.219 – RPR Hasselt

Opdrachtgever: Warsco Units NV, Slingerweg 20, 3600 Genk
 Datum proef: 18/4/2019
 Locatie proef: Slingerweg 20, 3600 Genk
 Meting tussen Bovenste unit en Onderste unit
 Volume ontvangruimte: 40 m³
 Oppervlakte scheidingselement: 16 m²
 Referentienagalmtijd ontvangruimte: 0,5 s

Afbeelding zendruimte



Afbeelding ontvangruimte



f [Hz]	L' nT [dB]
50	61,4
63	61,6
80	59,7
100	59,6
125	54,1
160	55,8
200	56
250	51,9
315	51,5
400	49,5
500	49,1
630	44,7
800	40,4
1000	36,2
1250	30,1
1600	28,2
2000	24,8
2500	12,7
3150	10,1
4000	8,9
5000	7,4

Eengetalswaarde volgens ISO 717-2 (cfr. referentiecurve):

L'nT,w (CI) = 48 (1) dB

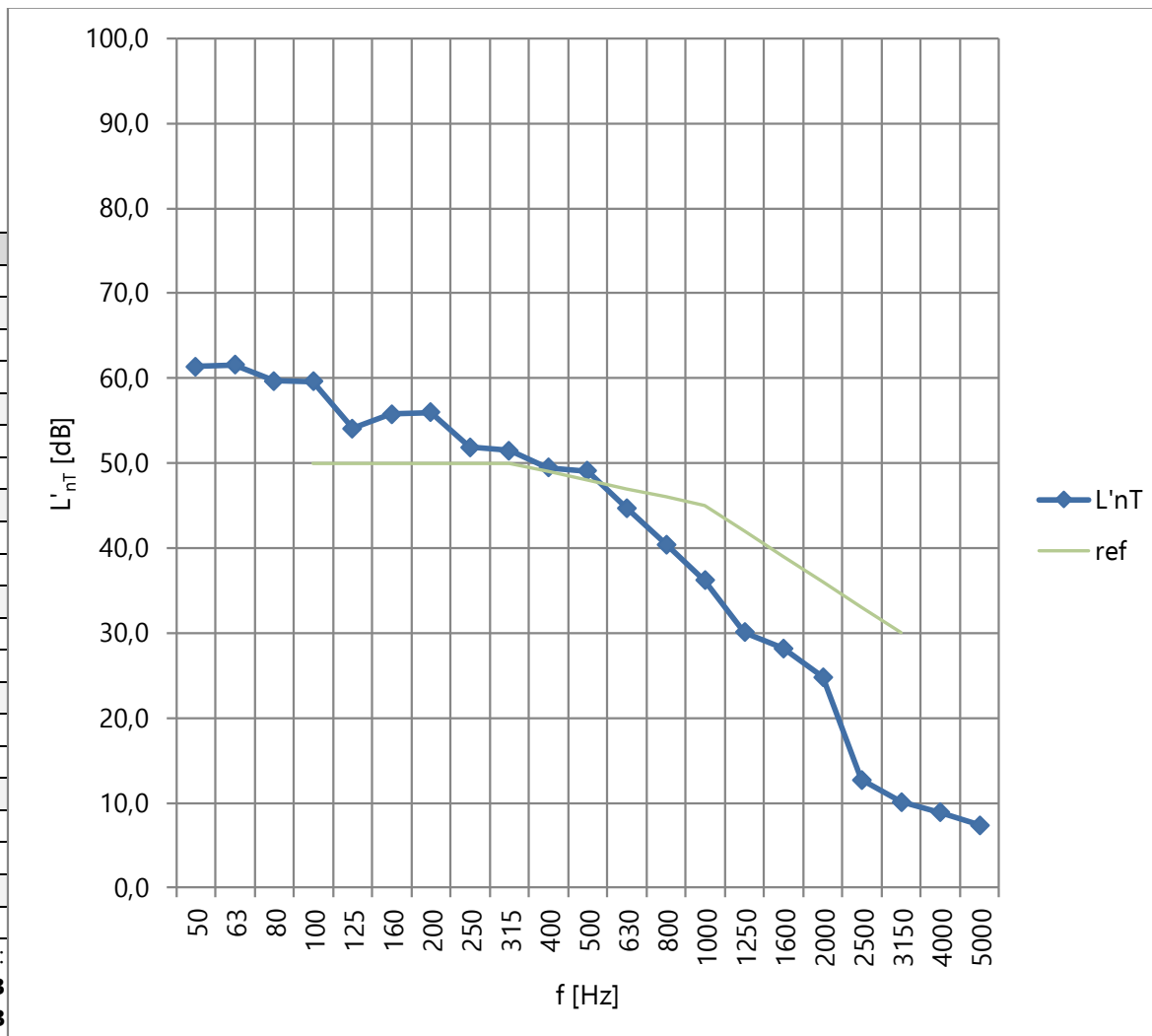
L'I = 49 dB

Evaluatie door middel van klopgeluidmachine in situ

Resultaten bekomen via "engineering method", precisie ± 2 dB

Testnr.: 2019-OF078/C3 (default + CDM)

Datum rapport: 24/4/2019



PS-Acoustics BVBA

Asterstraat 8, 3800 Sint-Truiden

tel: 011 63 23 60 – gsm: 0477 90 36 09 – e-mail: info@ps-acoustics.be – website: www.ps-acoustics.be

IBAN: BE45 7350 3160 3089 – EIC: KREDBEBB

BTW BE 0849.262.219 – RPR Hasselt

Opdrachtgever: Warsco Units NV, Slingerweg 20, 3600 Genk
 Datum proef: 18/4/2019
 Locatie proef: Slingerweg 20, 3600 Genk
 Meting tussen Bovenste unit en Onderste unit
 Volume ontvangruimte: 40 m³
 Oppervlakte scheidingselement: 16 m²
 Referentienagalmtijd ontvangruimte: 0,5 s

Afbeelding zendruimte



Afbeelding ontvangruimte



f [Hz]	L' nT [dB]
50	58,3
63	60,9
80	56,8
100	57,3
125	51,4
160	49,4
200	48,7
250	44,3
315	44,5
400	40
500	37,3
630	33,4
800	29,6
1000	26,3
1250	23,1
1600	24,4
2000	21
2500	9,8
3150	8,3
4000	8,1
5000	7,5

Eengetalswaarde volgens ISO 717-2 (cfr. referentiecurve):

L'nT,w (CI) = 42 (3) dB

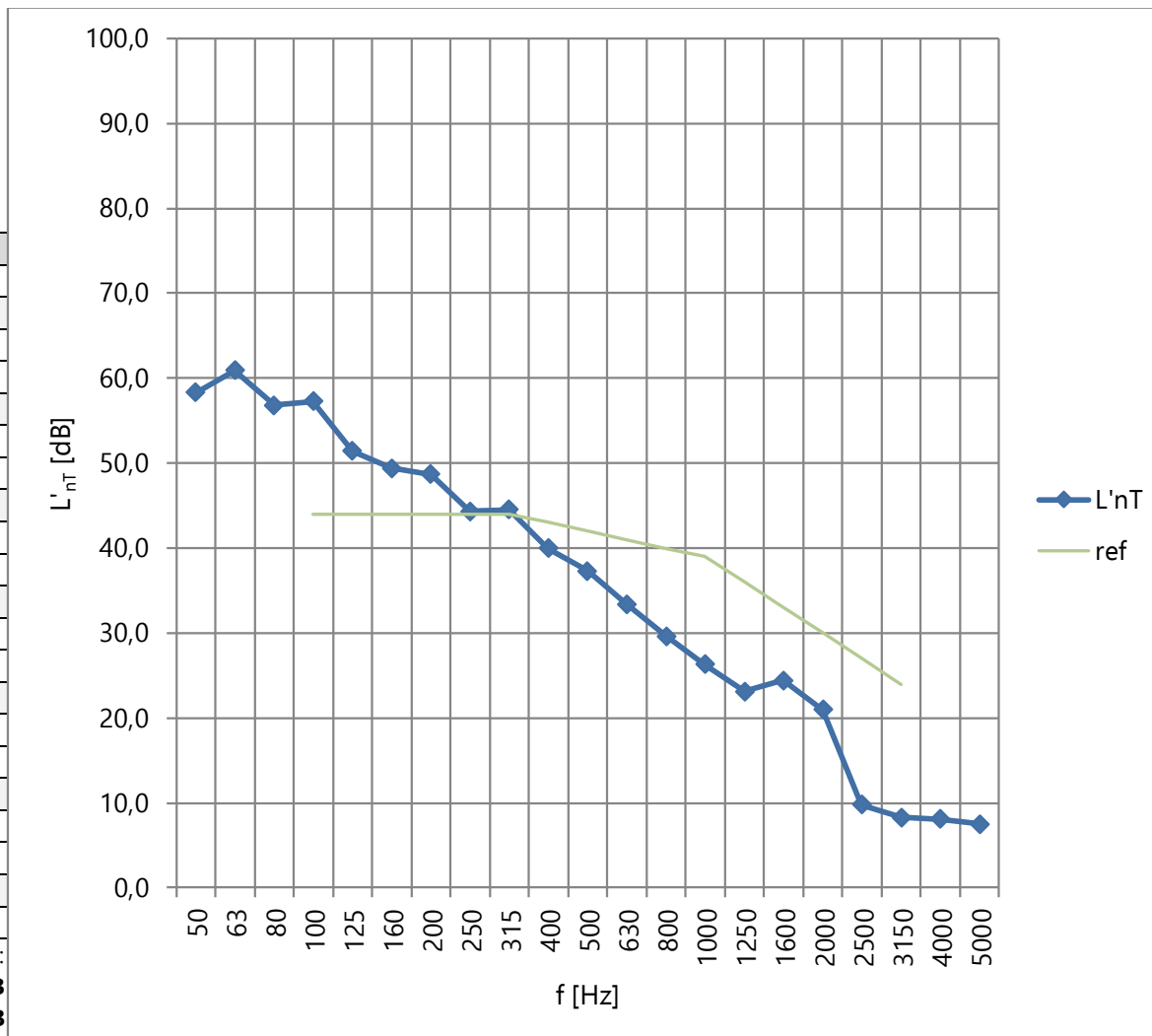
L'I = 45 dB

Evaluatie door middel van klopgeluidmachine in situ

Resultaten bekomen via "engineering method", precisie ± 2 dB

Testnr.: 2019-OF078/C4 (default + CDM + FF) tel: 011 63 23 60 – gsm: 0477 90 36 09 – e-mail: info@ps-acoustics.be – website: www.ps-acoustics.be

Datum rapport: 24/4/2019



PS-Acoustics BVBA

Asterstraat 8, 3800 Sint-Truiden

IBAN: BE45 7350 3160 3089 – EIC: KREDBEBB

BTW BE 0849.262.219 – RPR Hasselt

Opdrachtgever: Warsco Units NV, Slingerweg 20, 3600 Genk
 Datum proef: 18/4/2019
 Locatie proef: Slingerweg 20, 3600 Genk
 Meting tussen Naastgelegen unit en Onderste unit
 Volume ontvangruimte: 40 m³
 Oppervlakte scheidingselement: 15 m²
 Referentienagalmtijd ontvangruimte: 0,5 s

Afbeelding zendruimte



Afbeelding ontvangruimte



f [Hz]	L' nT [dB]
50	55,6
63	61
80	57,9
100	57,3
125	57,2
160	52,4
200	53,9
250	49,4
315	48,2
400	44,4
500	44,5
630	42,6
800	40,1
1000	35,7
1250	34
1600	32,1
2000	26,9
2500	21,3
3150	15
4000	12,2
5000	9,4

Eengetalswaarde volgens ISO 717-2 (cfr. referentiecurve):

L'nT,w (CI) = 46 (1) dB

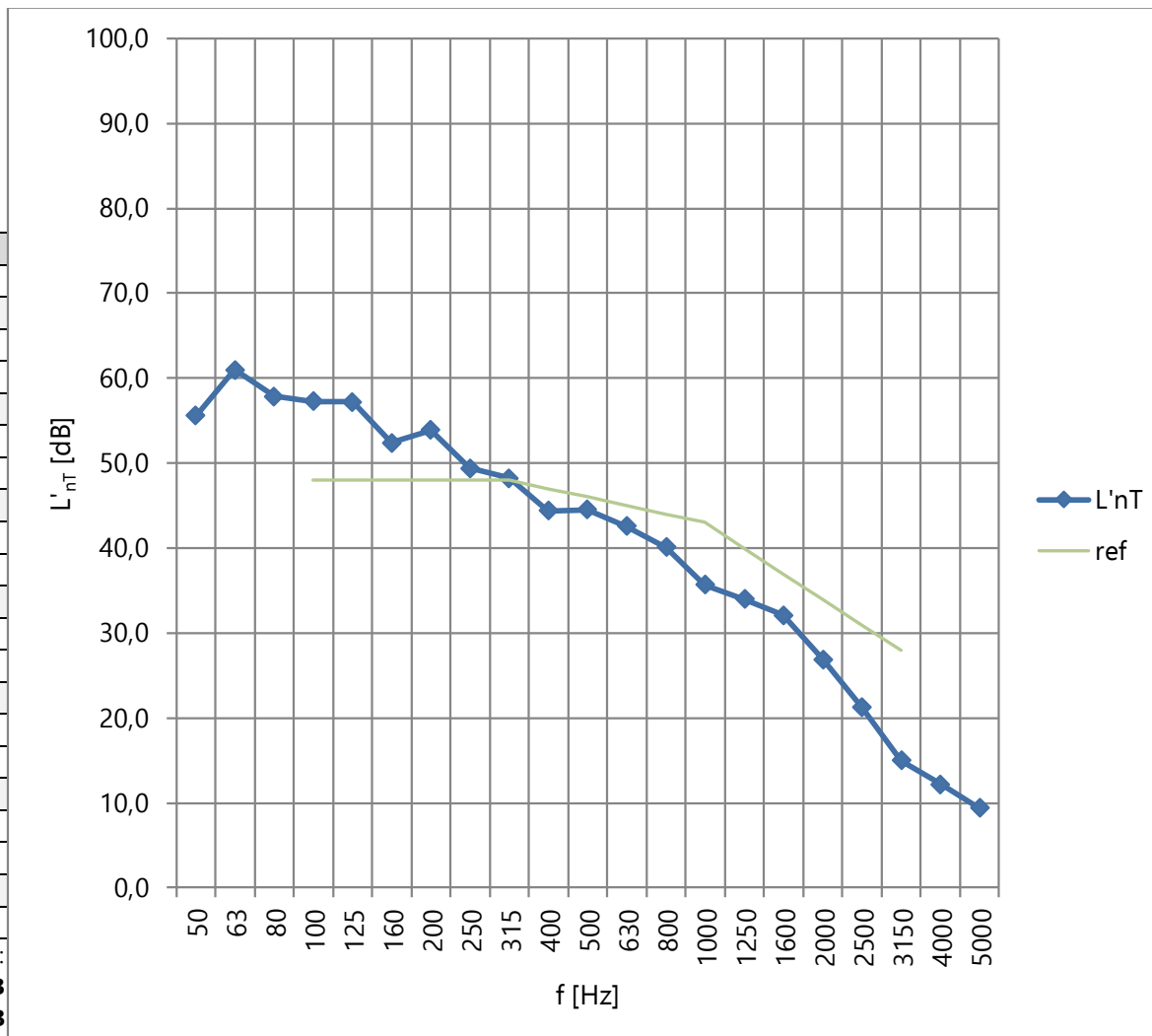
L'I = 47 dB

Evaluatie door middel van klopgeluidmachine in situ

Resultaten bekomen via "engineering method", precisie ± 2 dB

Testnr.: 2019-OF078/C5 (fixed)

Datum rapport: 24/4/2019



PS-Acoustics BVBA

Asterstraat 8, 3800 Sint-Truiden

tel: 011 63 23 60 – gsm: 0477 90 36 09 – e-mail: info@ps-acoustics.be – website: www.ps-acoustics.be

IBAN: BE45 7350 3160 3089 – EIC: KREDBEBB

BTW BE 0849.262.219 – RPR Hasselt

Opdrachtgever: Warsco Units NV, Slingerweg 20, 3600 Genk
 Datum proef: 18/4/2019
 Locatie proef: Slingerweg 20, 3600 Genk
 Meting tussen Naastgelegen unit en Onderste unit
 Volume ontvangruimte: 40 m³
 Oppervlakte scheidingselement: 15 m²
 Referentienagalmtijd ontvangruimte: 0,5 s

Afbeelding zendruimte



Afbeelding ontvangruimte



f [Hz]	L' nT [dB]
50	52,9
63	59,4
80	56,1
100	55,8
125	53,6
160	47,4
200	47,3
250	41,5
315	40
400	35,9
500	34,5
630	32,3
800	29,3
1000	26,3
1250	24,4
1600	22,8
2000	16,6
2500	11
3150	9,5
4000	9
5000	8,2

Eengetalswaarde volgens ISO 717-2 (cfr. referentiecurve):

L'nT,w (CI) = 42 (2) dB

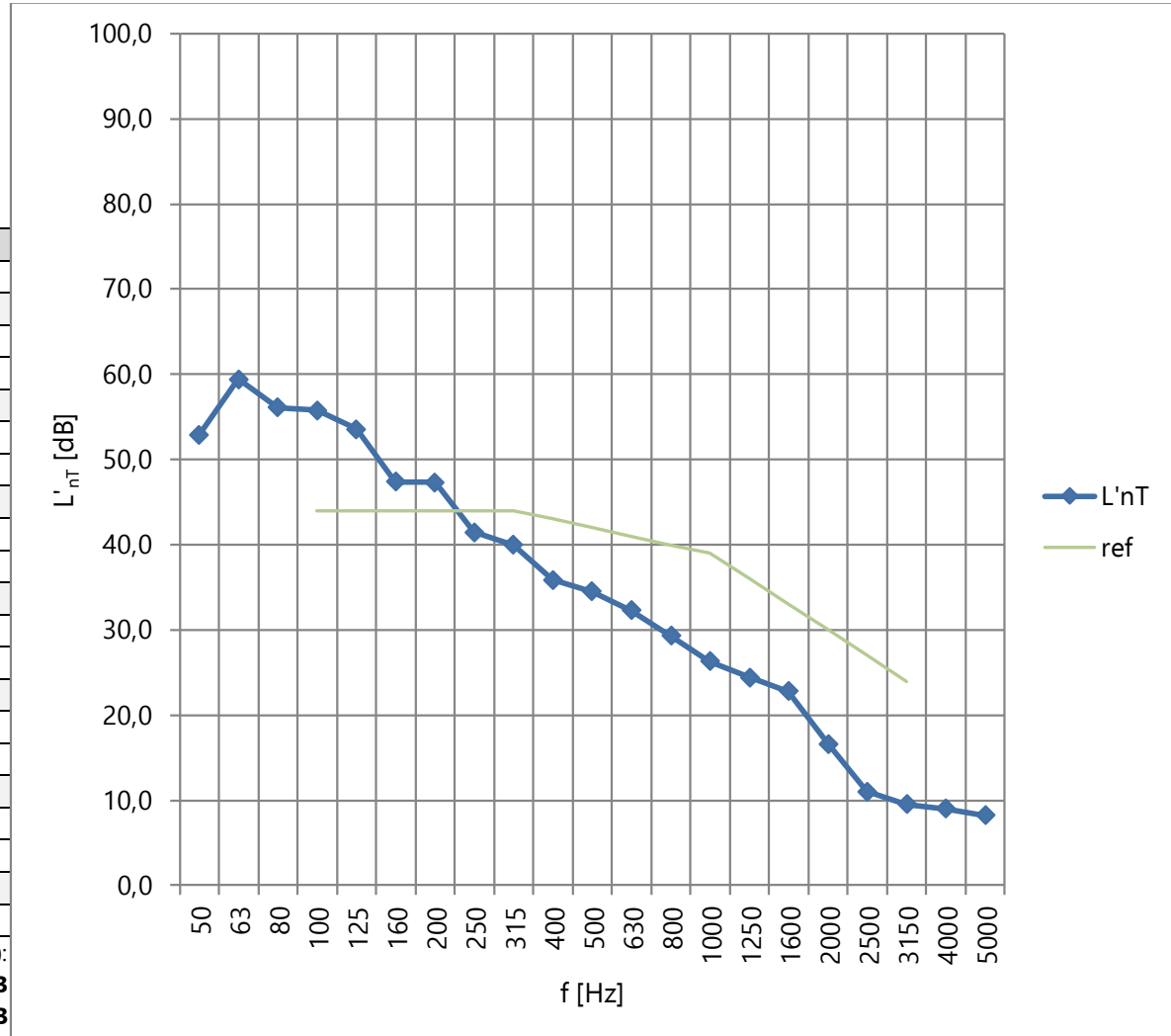
L'I = 44 dB

Evaluatie door middel van kloppluידmachine in situ

Resultaten bekomen via "engineering method", precisie ± 2 dB

Testnr.: 2019-OF078/C6 (fixed + FF)

Datum rapport: 24/4/2019



PS-Acoustics BVBA

Asterstraat 8, 3800 Sint-Truiden

tel: 011 63 23 60 – gsm: 0477 90 36 09 – e-mail: info@ps-acoustics.be – website: www.ps-acoustics.be

IBAN: BE45 7350 3160 3089 – EIC: KREDBEBB

BTW BE 0849.262.219 – RPR Hasselt