

# Rapport

## Geluidpadenonderzoek

### TivoliVredenburg

*Opdrachtgever: Gemeente Utrecht*

Rapportnummer: LA.140510.R01

*26 oktober 2014*

De Rondom 10  
5612 AP Eindhoven  
Nederland  
tel. (+31) 040 247 27 00  
fax. (+31) 040 246 36 14

**level**  
acoustics

www.levelacoustics.nl  
info@levelacoustics.nl  
KVKnr. 17196196  
BTWnr. NL817010476B01  
Rek.nr. NL54ABNA0522640923

# Colofon

**Blad:** 2 van 65  
**Rapportnummer:** LA.140510.R01.1

**Datum:** 26 oktober 2014

Rapportnummer: LA.140510.R01

Plaats & Datum: Eindhoven, 26 oktober 2014

Versie: 1

*Opdrachtgever: Gemeente Utrecht*

Uitgevoerd door: Level Acoustics & Vibration

Auteur(s): Arnold Koopman, Eddy Gerretsen, Sven Lentzen

E-mail: [info@levelacoustics.nl](mailto:info@levelacoustics.nl)

Telefoon: (+31) 040 247 27 00

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag openbaar gemaakt worden of aan derden beschikbaar gesteld worden zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Level Acoustics.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden van Level Acoustics, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage tonen van het Level Acoustics rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

## Samenvatting

### Inleiding

In opdracht van de Gemeente Utrecht en in samenwerking met de ontwerpers, bouwers en gebruikers van TivoliVredenburg voert Level Acoustics een onderzoek uit naar de interne geluidisolatie van TivoliVredenburg.

TivoliVredenburg herbergt vijf muziekzalen die, uiteraard, gelijktijdig in gebruik kunnen zijn. In de zalen kunnen de geluidniveaus hoog oplopen, zoals in de popzaal (Ronda), en moet het ook erg stil kunnen zijn, zoals in de Grote Zaal. Dat alles impliceert dat er een goede geluidisolatie dient te zijn tussen de zalen. Bij het ontwerp van het gebouw is daar mee rekening gehouden. Er zijn eisen vastgesteld voor de maximale geluidniveaus die in een zaal moeten kunnen worden gegenereerd en voor de achtergrondgeluidniveaus in een zaal. Per combinatie van zalen volgt daaruit een minimale geluidisolatie die nodig is om in de ene zaal de hoge niveaus mogelijk te maken zonder dat dat in de andere zaal te hoorbaar is. Het uiteindelijke ontwerp (keuze van bouwelementen, afmetingen, etc.) van het gebouw is mede op grond van deze eisen tot stand gekomen. Zo zijn de zalen uitgevoerd als zogenaamde doos-in-doos constructies: dubbele wanden, vloeren en plafonds met daartussen een luchtspouw. Rubber veren tussen de binnendoos en de buitendoos houden de binnendoos vast. Tussen de oudbouw, met de Grote Zaal, en de nieuwbouw, met de overige zalen, is een dilatatie aangebracht.

Vóór de oplevering van het gebouw zijn door Royal Haskoning DHV (RHDHV), bouwfysisch adviseur van het gebouw, geluidmetingen verricht om de gerealiseerde geluidisolatie vast te stellen en te toetsen aan de bij het ontwerp gestelde eisen. Uit deze metingen kwam naar voren dat van de tien zalencombinaties er twee zijn die niet voldoen aan de gestelde eisen: de geluidisolatie tussen de popzaal en de kamermuziekzaal (Hertz) en de geluidisolatie tussen de jazzzaal (Cloud Nine) en de kamermuziekzaal.

De geluidisolatie tussen de popzaal en de kamermuziekzaal is als eerste onderworpen aan onderzoek. Dit rapport legt verslag van de bevindingen hierover. Het onderzoek naar de oorzaak van de te lage geluidisolatie tussen de jazzzaal en de kamermuziekzaal is ook gestart maar loopt voorlopig nog.

### Eis aan de interne geluidisolatie

In de popzaal is het toegelaten een geluidniveau van 105 dB(A) te produceren. Daarbij is het geluidspectrum ook van belang, in dit geval een zogeheten "house-spectrum", welke veel lage tonen bevat. Deze lage tonen zijn maatgevend, ze zijn het moeilijkst te isoleren.

In de kamermuziekzaal mag het achtergrondniveau niet hoger zijn dan 20 dB(A). Het is redelijk te verwachten dat deze eis geldt voor elke stoel in de kamermuziekzaal, en voor elk moment.

Er is dus een geluidisolatie nodig van tenminste 85 dB(A), en dan niet gemiddeld over de zaal maar op elk stoel.

De geluidisolatie tussen de popzaal en de kamermuziekzaal komt, op de meest kritische plek in de kamermuziekzaal, zo'n **9 dB tekort bij de lage tonen**. Gemiddeld over de zaal is het tekort 6 dB.

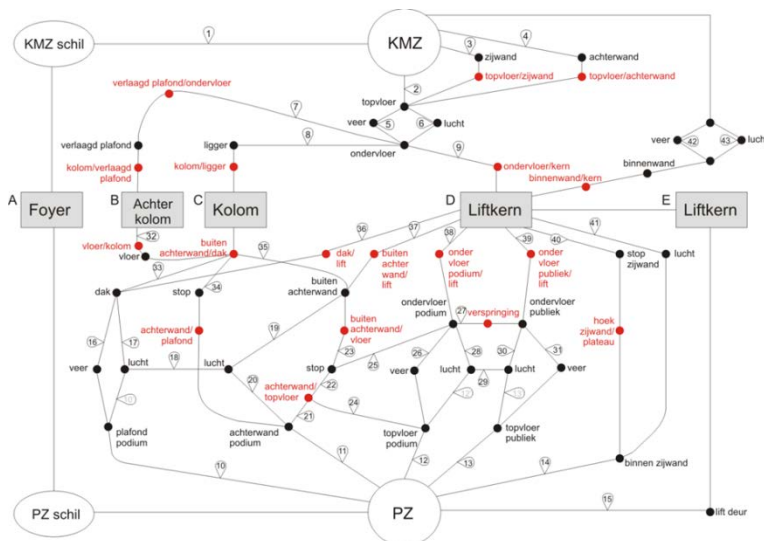
Het gaat met name om de 63 en 125 Hz octaafbanden en in mindere mate ook om de 250 en 500 Hz octaafbanden. Overigens is vastgesteld dat het tekort in geluidisolatie tussen jazzzaal en kamermuziekzaal ongeveer hetzelfde is.

### Onderzoeksvraag

Er zijn over het gevonden tekort verschillende onderzoeksvragen te stellen: hoe heeft dit kunnen gebeuren, hoe erg is dit, wie is hier voor verantwoordelijk, etc. Onderzoek naar de precieze oorzaak is bijzonder complex, mede vanwege de complexiteit van geluidvoortplanting in gebouwen. Een "smoking gun" wordt zelden snel aangetroffen. Er is daarom besloten deze vragen in eerste instantie over te slaan en op zoek te gaan naar oplossingen. **Welke bouwkundige maatregelen moeten worden genomen om de geluidisolatie te laten voldoen aan de eisen?**

### Methode

De geluidisolatie tussen de zalen is de mate waarin het geluid wordt verzwakt als het zich voortplant van de ene zaal naar de andere zaal. De geluidvoortplanting gaat via verschillende wegen: "geluidpaden". Geluid dringt bijvoorbeeld een wand in, plant zich (als trillingen) in die wand voort naar een andere wand, gaat vervolgens een kolom in, treedt een vloerveld in en straalt daar weer af als geluid. Gaandeweg verliest het geluid daarbij energie. Tussen twee zalen is er sprake van een heel netwerk aan paden. De weg van de minste weerstand, waar het geluid de minste energie verliest, is het zogenaamde "dominante pad". Het onderzoek richt zich erop de dominante paden in volgorde van belangrijkheid te identificeren. Is zo'n pad gevonden, dan kan ook worden bedacht hoe dit pad kan worden geblokkeerd.



Om het dominante pad te vinden zijn een aantal stappen ondernomen. Om te beginnen is er een overzicht gemaakt van alle mogelijke geluidpaden. Vervolgens is van al deze geluidpaden op rekenkundige wijze de geluidisolatie bepaald. Omdat dit een theoretische aanpak is zijn de resultaten met onzekerheid omkleedt. Het levert een short list van verdachte paden op waar nader onderzoek naar dient te worden gedaan.

Figuur 1: padenmodel

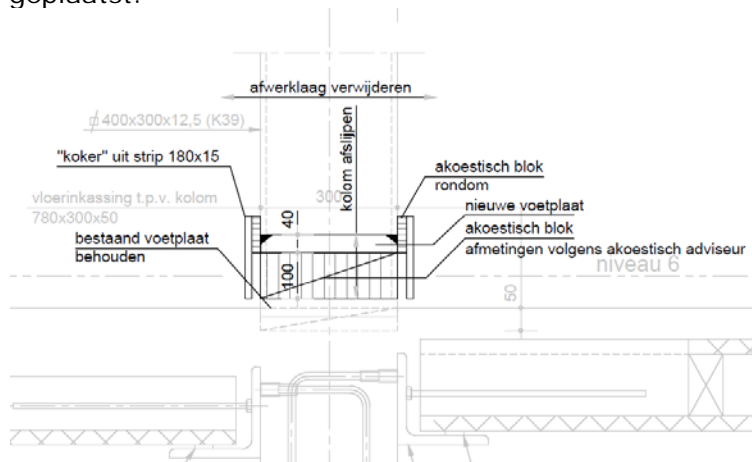
Uitgebreide geluid- en trillingsmetingen met verschillende soorten bronnen op verschillende locaties zijn vervolgens ondernomen om het rekenmodel te verifiëren en van extra gegevens te voorzien, en om aan te tonen dan wel te uit te sluiten dat een verdacht pad dominant is.

Voor de dominante paden worden vervolgens maatregelen bedacht, welke verder worden uitgewerkt met de constructeur, de aannemer, de architect, de bouwfysisch adviseur en de leveranciers van benodigde elementen.

### Bevindingen

De kamermuziekzaal is boven de popzaal gelegen en wordt daarmee constructief verbonden door de twee grote liftkernen (waaraan de kamermuziekzaal en de jazzzaal hangen) en door 4 stalen kolommen via welke de kamermuziekzaal gedeeltelijk rust op de achterwand van de popzaal. Deze constructieve verbindingen waren als geluidpaden in beeld. Daarnaast waren er ook twee paden waarin lucht als tussenstap fungeert: geluid via de foyer, de grote open ruimte waarin de zalen hangen, en geluid via de liftkoker van de goederenlift, welke als een soort orgelpijp een opslingerend effect heeft.

Met modellen en uitgebreide trillingsmetingen is aangetoond dat er sprake is van een dominant geluidpad via de 4 stalen **kolommen** op de 6de verdieping. Hiervoor bestaat een concrete oplossing, namelijk het doorzagen van de kolommen om er rubber veren onder te plaatsen. Het ontwerp hiervan is in volle gang. De veren worden in de winter geplaatst.



**Figuur 2: een eerste ontwerp van veer onder kolom (tekening Zonneveld)**

Aangetoond is verder dat luchtpaden, dus via foyer of liftkoker, geen rol spelen. Open staat de rol van de twee **liftkernen**. De verwachting is dat deze ook een dominant pad vormen. Bouwkundige maatregelen hiertegen zijn echter vrij ingrijpend: doorzagen van een liftkern gaat niet dus er zullen in één of beide zalen ingrepen moeten worden gedaan. Onderzocht wordt hoe de effectiviteit van de binnendoos van de popzaal, of wellicht die van de kamermuziekzaal, verbeterd

kan worden. Het is niet uitgesloten dat bijvoorbeeld de vloer van de popzaal geheel of gedeeltelijk moet worden vervangen door een vloer met betere afwerking. Zodra de maatregelen aan de kolommen zijn genomen zal een meting worden gedaan om te bepalen of de gewenste isolatie is bereikt. Definitieve besluiten over maatregelen in verband met het pad via de liftkern kunnen daarna worden genomen.

# Inhoud

<b>SAMENVATTING</b> .....	<b>3</b>
<b>INHOUD</b> .....	<b>6</b>
<b>1 INLEIDING</b> .....	<b>8</b>
1.1 AANLEIDING.....	8
1.2 TEKORT AAN INTERNE GELUIDISOLATIE.....	9
1.3 ONDERZOEKSVRAAG .....	9
1.4 ONDERZOEKSAANPAK.....	9
<b>2 UITGANGSPUNTEN</b> .....	<b>10</b>
2.1 ONTWERPUITGANGSPUNTEN INTERNE GELUIDISOLATIE .....	10
2.2 INTERPRETATIE VAN DE ONTWERPEISEN .....	11
2.2.1 <i>Variatie in de tijd</i> .....	11
2.2.2 <i>Variatie in de ruimte</i> .....	12
2.2.3 <i>Variatie in frequenties</i> .....	12
2.3 DOELSTELLING INTERNE GELUIDISOLATIE .....	13
2.4 HUIDIG TEKORT.....	13
<b>3 ONDERZOEKSMETHODE</b> .....	<b>15</b>
<b>4 METAMODEL</b> .....	<b>16</b>
4.1 PADENMODEL .....	18
<b>5 INVULLING : THEORETISCH</b> .....	<b>20</b>
5.1 EERSTE GLOBALE BEREKENING.....	20
5.2 AANGEPASTE BEREKENINGEN NA METINGEN .....	22
5.3 CONCLUSIES.....	24
<b>6 INVULLING : EXPERIMENTEEL</b> .....	<b>26</b>
6.1 ONDERZOEKSMETHODE.....	26
6.1.1 <i>Luchtpaden</i> .....	27
6.1.2 <i>Constructieve paden</i> .....	28
6.2 RESULTATEN .....	34
6.2.1 <i>Luchtpaden</i> .....	34
6.2.2 <i>Constructieve paden</i> .....	37
6.3 CONCLUSIES.....	45
<b>7 ANALYSE EN CONCLUSIES</b> .....	<b>46</b>
<b>8 MAATREGELEN</b> .....	<b>48</b>
8.1 KOLOM .....	48
8.1.1 <i>De modelopbouw</i> .....	48
8.1.2 <i>De simulatie</i> .....	50

8.1.3	<i>De resultaten</i> .....	52
8.2	LIFTKERN .....	54
<b>BIJLAGE 1 : GELUIDISOLATIE PER PAD .....</b>		<b>55</b>
<b>BIJLAGE 2: PARAMETERWAARDES EN12354.....</b>		<b>56</b>
<b>BIJLAGE 3: ONBALANS OVERDRACHT TRILLINGEN NAAR GELUID .....</b>		<b>58</b>
<b>BIJLAGE 4: ONTWERPUITGANGSPUNTEN UIT 2009 .....</b>		<b>65</b>

# 1 Inleiding

## 1.1 Aanleiding

In opdracht van de Gemeente Utrecht en in samenwerking met de ontwerpers, bouwers en gebruikers van TivoliVredenburg voert Level Acoustics een onderzoek uit naar de interne geluidisolatie van TivoliVredenburg.

TivoliVredenburg herbergt vijf muziekzalen, die gelijktijdig in gebruik kunnen zijn. In de zalen kunnen de geluidniveaus hoog oplopen, zoals in de popzaal (*Ronda*), en moet het ook erg stil kunnen zijn, zoals in de Grote Zaal. Dat betekent dat er een goede geluidisolatie dient te zijn tussen de zalen. Bij het ontwerp van het gebouw is daar mee rekening gehouden. Er zijn eisen gesteld aan de maximale geluidniveaus die in een zaal moeten kunnen worden gegenereerd en aan de achtergrondgeluidniveaus in een zaal. Per combinatie van zalen volgt daaruit een minimale geluidisolatie die nodig is om in de ene zaal de hoge niveaus mogelijk te maken zonder dat dat in de andere zaal te hoorbaar is. Het uiteindelijke ontwerp (keuze van bouwelementen, afmetingen, etc.) van het gebouw is mede op grond van deze eisen tot stand gekomen.

Vóór de oplevering van het gebouw zijn door Royal HaskoningDHV (RHDHV), de bouwfysisch adviseur van het gebouw, geluidmetingen verricht om de gerealiseerde geluidisolatie vast te stellen en te toetsen aan de bij het ontwerp gestelde eisen. Uit deze metingen kwam naar voren dat van de tien zalencombinaties er twee zijn die niet voldoen aan de gestelde eisen: de geluidisolatie tussen de popzaal en de kamermuziekzaal (*Hertz*) en de geluidisolatie tussen de jazzzaal (*Cloud Nine*) en de kamermuziekzaal.

De geluidisolatie tussen de popzaal en de kamermuziekzaal is als eerste onderworpen aan onderzoek. Dit rapport bevat de bevindingen hiervan. Het onderzoek naar de oorzaak van de te lage geluidisolatie tussen de jazzzaal en de kamermuziekzaal is ook gestart maar loopt voorlopig nog.

In dit rapport worden de volgende afkortingen gebruikt:

**KMZ** Kamermuziekzaal (*Hertz*)

**JZZ** Jazzzaal (*Cloud Nine*)

**PZ** Popzaal (*Ronda*)

Verder wordt er in dit rapport gerefereerd aan een "werkgroep". Dit is een vergadering van betrokken partijen waaraan Level Acoustics rapporteert, die feedback levert op de ontwikkelingen en die de uitvoering van de adviezen ter hand neemt. De vergadering bestaat uit:

- Project Organisatie Stationsgebied
- Gemeente Utrecht, beheerder
- Rob Metkemeijer, adviseur van de gemeente
- TivoliVredenburg, gebruiker
- Architectuurstudio Herman Hertzberger, architect
- Heijmans, aannemer



- Royal HaskoningDHV, bouwfysisch adviseur
- Zonneveld Ingenieurs, constructeur
- Level Acoustics

## 1.2 Tekort aan interne geluidisolatie

In hoofdstuk 2 wordt ingegaan op de bij het ontwerp geformuleerde eisen aan de interne geluidisolatie, hoe dit moet worden geïnterpreteerd en wat dat betekent voor de na te streven prestatie. Hieronder wordt dit alvast kort toegelicht.

In de PZ is het toegelaten een geluidniveau van 105 dB(A) te produceren. Daarbij is het geluidsspectrum ook van belang: in dit geval een zogeheten "house-spectrum", welke veel lage tonen bevat. Deze lage tonen zijn maatgevend, ze zijn het moeilijkst te isoleren. In de KMZ mag (op het zelfde moment) het achtergrondniveau niet hoger zijn dan 20 dB(A). Het is redelijk te verwachten dat deze eis geldt voor elke stoel in de KMZ. Er is dus een geluidisolatie nodig van tenminste 85 dB vanuit de popzaal naar iedere stoel in de kamermuziekzaal.

De geluidisolatie tussen de PZ en de KMZ komt, op de meest kritische plek in de KMZ, zo'n **9 dB tekort bij de lage tonen**. Gemiddeld over de zaal is het tekort 6 dB.

Het gaat met name om de 63 en 125 Hz octaafbanden en in mindere mate ook om de 250 en 500 Hz octaafbanden. Overigens is vastgesteld dat het tekort in geluidisolatie tussen JZZ en KMZ ongeveer hetzelfde is.

## 1.3 Onderzoeksvraag

Er zijn over het gevonden tekort verschillende onderzoeksvragen te stellen: hoe heeft dit kunnen gebeuren, hoe erg is dit, wie is hier voor verantwoordelijk, etc. Onderzoek naar de precieze oorzaak is bijzonder complex, mede vanwege de complexiteit van geluidvoortplanting in gebouwen. Een "smoking gun" wordt zelden snel aangetroffen. Er is daarom besloten deze vragen in eerste instantie over te slaan en op zoek te gaan naar oplossingen. **Welke bouwkundige maatregelen moeten worden genomen om de geluidisolatie te laten voldoen aan de eisen?**

## 1.4 Onderzoeksaanpak

Om maatregelen te kunnen ontwerpen moet eerst de geluidvoortplanting worden begrepen tot een niveau dat kritische paden c.q. bottlenecks kunnen worden geïdentificeerd ten einde daar de geluid- en trillingsvoortplanting tegen te houden (zie hoofdstuk 3). Daartoe is een globaal, beschrijvend model opgezet van de geluidvoortplanting, een "metamodel" genoemd omdat het kader vormt voor nadere berekeningen en metingen. Dit metamodel wordt beschreven in hoofdstuk 4.

Vervolgens is dit model ingevuld met behulp van metingen en berekeningen, hetgeen wordt gerapporteerd in hoofdstukken 5 en 6.

Analyse van de resultaten en de daarop gebaseerde adviezen voor maatregelen staan beschreven in hoofdstuk 7 en 8.

## 2 Uitgangspunten

Doel van het *onderzoek* is een advies over bouwkundige maatregelen, welke door de betrokken partijen kunnen worden uitgewerkt en geïmplementeerd. Het hogere doel is dat een interne geluidisolatie wordt bereikt waardoor het gebouw alsnog zijn beoogde functionaliteit behaalt: storingsvrij gelijktijdig gebruik van alle zalen met in acht name van de vastgelegde maximaal toelaatbare geluidproductie.

De vraag is nu hoe kan worden besloten dat het (hogere) doel is bereikt. Dat is namelijk een belangrijk uitgangspunt voor het onderzoek: wanneer is het genoeg.

De ontwerpeisen vormen het primaire startpunt hiervoor en worden daarom hier in dit hoofdstuk vastgelegd als doelstelling. De ontwerpeisen zijn op bepaalde punten niet volledig expliciet, en die punten worden hier daarom verder uitgewerkt.

### 2.1 Ontwerputgangspunten interne geluidisolatie

In het document *Muziekpaleis Utrecht - Afronding besteksfase* van DHV (nu: RHDHV) van 13 juli 2009 (kenmerk Ks.W7281.R09) worden in hoofdstuk 3 (zie Bijlage 4 van dit rapport) de eisen aan de geluidwering tussen de zalen vastgelegd. Deze kunnen worden beschouwd als zogenaamde "toeisen". Uit deze eisen zijn eisen af te leiden aan de geluidisolatie van bouwdelen (zoals wanden en vloeren), welke weer verder uitgewerkt worden naar eisen aan bouwelementen (zoals voorzetwanden, veren, etc.).

In het bestekdocument worden de toeisen expliciet geformuleerd en uitgewerkt naar isolatie-eisen aan de bouwdelen middels plattegronden en doorsnedes. Met principe details wordt gedemonstreerd hoe deze afgeleide eisen haalbaar zijn. Ontwerp en bestek van de architect en de constructeur zijn hier op gebaseerd. In de praktijk zal zo'n ontwerp gaan afwijken, om allerlei bouwkundige redenen. Dat staat de ontwerpende en uitvoerende partijen vrij, mits dit in overleg gebeurt met de ontwerpers (architect, constructeur, bouwfysisch adviseur, etc.) en zolang de toeisen maar wordt gehaald.

Het heeft dus geen zin om op bouwelement- of op bouwdeelniveau te toetsen of volgens bestek is gebouwd en ook te toetsen of de afgeleide eisen in bestek inderdaad de toeisen garanderen. Hoogstens zou dit zinnig zijn in relatie tot het uiteindelijk gerealiseerde ontwerp. Omdat er echter, na dit bestek, voor zover kon worden nagegaan, geen vastlegging heeft plaatsgevonden van de relatie tussen een (definitief) ontwerp en de akoestische prestatie wordt dit een bijzonder complexe zaak.

Veel haalbaarder, en meer gericht op het oplossen van het probleem (waar het toetsen op afgeleide eisen meer in de richting gaat van onderzoek naar aansprakelijkheid) is een oriëntatie op de toeisen.

In het bestekdocument worden de volgende eisen geformuleerd.

Tabel 1 in paragraaf 3.1.1. geeft als maximaal toelaatbaar equivalente (muziek)geluidniveau (in het document ook "maximaal exploitatieniveau" genoemd):  
PZ: 105 dB(A), met standaard housespectrum

JZZ: 105 dB(A), met standaard popspectrum  
KMZ: 105 dB(A), met standaard popspectrum

Het type spectrum dat genoemd wordt, house of pop, is van belang omdat dit aangeeft hoe de geluidenergie over de frequenties verdeeld is. Aangezien de geluidisolatie van een bouwdeel ook sterk afhangt van de frequentie zal de isolatie voor house anders zijn dan voor pop.

Tabel 4 in dezelfde paragraaf geeft het maximaal toelaatbaar achtergrondniveau:

PZ: 25 dB(A)  
JZZ: 25 dB(A)  
KMZ: 20 dB(A)

Naast een eis in dB(A) wordt er overigens ook nog een eis aan de zogenaamde NR-waarde gegeven, welke bedoeld is voor tonaal installatiegeluid en niet voor de geluidisolatie tussen zalen. Het is er wel bruikbaar voor maar heeft in dit geval geen verstrengend effect.

Uit deze topeisen is de eis aan de geluidisolatie  $D_A$  af te leiden:

PZ-KMZ:  $D_A=85$  dB bij housespectrum  
JZZ-KMZ:  $D_A=85$  dB bij popspectrum

Hierbij zij opgemerkt dat er geen sprake is van een normering naar nagalmtijd (zoals bij  $D_{nT,A}$ ). Die is in dit kader niet logisch.

## 2.2 Interpretatie van de ontwerpeisen

De topeisen vragen wat interpretatie: er is sprake van enige ambivalentie als het gaat om hoe om te gaan met de variatie in het geluidniveau die nu eenmaal optreedt in tijd en in ruimte.

### 2.2.1 Variatie in de tijd

De topeis voor wat betreft geluidproductie in de zalen (105 dB(A) met een bepaald spectrum) is een "maximaal exploitatieniveau" c.q. "maximaal toelaatbaar equivalent geluidniveau". Dit zijn begrippen uit het vakgebied van horecalawaai. Bij exploitatie van de ruimte moet het equivalent geluidniveau onder een zeker niveau blijven. Een equivalent niveau is een (energetisch) over de tijd gemiddeld niveau. De vraag is hoe lang de tijd is waarover gemiddeld moet worden. Dat kan 1 seconde zijn, maar ook een hele avond. Het besteksdokument specificceert dat niet. TivoliVredenburg maakt gebruik van een monitoringsysteem om de geluidproductie te bewaken. Het systeem staat ingesteld op een middelingstijd van 5 minuten. De topeis wat betreft achtergrondgeluidniveau (20 dB(A) in de KMZ) is ook onduidelijk over tijdmiddeling.

### 2.2.2 Variatie in de ruimte

Zowel aan de zendkant (PZ) als aan de ontvangkant (KMZ) varieert het geluidniveau afhankelijk van waar je bent in de ruimte. Gelden de topeisen voor elke plek, of voor een gemiddelde over de plekken, of iets anders? Geluidisolatie (D) is gedefinieerd als een verschil tussen gemiddelden. Het is echter niet logisch om in de KMZ op een stoel meer achtergrondgeluid toe te laten omdat op een andere stoel het achtergrond lager is dan de eis. Aan de zendkant kan de variatie in de ruimte veel sterker zijn dan aan de ontvangkant, omdat, zeker bij versterkte muziek, actief een gebied in de zaal wordt aangestraald, nl. het publiek. De geluidinstallatie wordt wel zo ingeregeld dat het publiek zoveel mogelijk een zelfde geluid ervaart, dus in het gebied wordt de variatie geminimaliseerd en het monitoringsysteem wordt zo ingeregeld dat deze meet wat het publiek ervaart.

Het ligt dus voor de hand om de topeisen nader te specificeren als: gemiddeld over het publiekswak als het gaat om geluidproductie, en voor elke plek in de zaal als het gaat om het achtergrondniveau. De afgeleide eis aan de geluidisolatie dient navenant te worden geïnterpreteerd en is daardoor dus niet meer geheel conform de norm.

### 2.2.3 Variatie in frequenties

De topeisen betreffen eengetalswaarden maar met vastlegging van een spectrum. De eis aan het achtergrondniveau is een A-gewogen niveau. Voor de eis aan de productie worden standaard muziekspectra gebruikt: House en Pop. Onderstaande tabel geeft de definitie voor deze spectra.

	32 Hz	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
House	-38	-13	-8	-8	-7	-7	-9	-10
Pop	$-\infty$	-27	-14	-9	-6	-5	-6	-10

Het standaard housespectrum kent relatief veel lage tonen. Gecombineerd met het feit dat geluidisolatie afneemt bij lage frequenties leidt house muziek dan ook vaak tot overlast in de omgeving. Om die reden wordt bij monitoring van geluid ook expliciet naar de lage tonen gekeken. Dat gebeurt door het gebruik van de eengetalswaarde "dB(C)". Bij de C-weging tellen de lage tonen veel zwaarder mee dan bij de A-weging. Door het gebruik van deze twee eengetalswaarden, de A-gewogen waarde en de C-gewogen waarde zijn zowel het algemene geluidniveau als het laagfrequente aandeel hierin, onderling in evenwicht, te monitoren.

Geluid met het spectrum van house en een geluidniveau van 105 dB(A) heeft een C-gewogen waarde van 117 dB(C). Inderdaad kent het huidige monitoringsysteem in TivoliVredenburg deze twee criteria waarop de geluidman kan sturen: 105 dB(A) en 117 dB(C).

## 2.3 Doelstelling interne geluidisolatie

Voor elke stoel in de KMZ dient te gelden :  
PZ-KMZ:  $D_A=85$  dB bij housespectrum  
JZZ-KMZ:  $D_A=85$  dB bij popspectrum

Om mogelijk te maken dat in de PZ de momentane begrenzing wat ruimer kan zijn dan 105 dB(A) en 117 dB(C) is het wenselijk dat bijvoorbeeld nog 5 dB extra wordt bereikt.

## 2.4 Huidig tekort

Door RHDHV is bij oplevering van het gebouw de volgende geluidisolatie tussen de PZ en de KMZ en tussen de JZZ en de KMZ gemeten.

Referentie:

Raijmakers, TH: *Meetresultaten interne geluidisolatie*, RHDHV rapport  
AW7281\_BL-EH20133504, 16 december 2013

Het tekort bedraagt volgens deze metingen 11 dB. De 63 Hz octaafband draagt relatief veel bij aan dit tekort. Om het tekort weg te werken is een verbetering nodig van ongeveer 12 dB in de banden van 63 en 125 Hz.

Tabel 1: geluidisolatie PZ → KMZ, volgens RHDHV

D [dB]	House	32 Hz	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
<b>Gemeten</b>	<b>74</b>	-	<b>61,9</b>	<b>76,4</b>	<b>87,9</b>	<b>93,0</b>	<b>96,9</b>	<b>103,1</b>	<b>103,2</b>
+/-	<b>-11</b>	-	<b>-10</b>	<b>-1</b>	8	15	19	27	28

Tabel 2: geluidisolatie JZZ → KMZ, volgens RHDHV

D [dB]	Pop	32 Hz	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
<b>Gemeten</b>	<b>74</b>	-	<b>46,7</b>	<b>76,4</b>	<b>87,0</b>	<b>94,8</b>	<b>99,6</b>	<b>105,4</b>	<b>108,5</b>
+/-	<b>-11</b>	-	<b>-11</b>	5	11	16	20	26	34

Bij de start van het onderzoek is de geluidisolatie opnieuw gemeten. Dit leverde een iets ander beeld op. Het tekort is nu aanmerkelijk minder en de oorzaak ligt nu ook bij meer banden, over een groter frequentiegebied.

Tabel 3: geluidisolatie PZ → KMZ (uit Tabel 10)

D [dB]	House	32 Hz	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
<b>Gemeten</b>	<b>77,6</b>	<b>60,8</b>	<b>68,4</b>	<b>75,1</b>	<b>78,4</b>	<b>79,0</b>	<b>88,6</b>	<b>97,9</b>	<b>99,8</b>
+/-	-7	14	-4	-2	1	1	11	22	25

Tabel 4: geluidisolatie JZZ → KMZ (uit Tabel 10)

D [dB]	Pop	32 Hz	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
<b>Gemeten</b>	<b>79</b>	-	<b>57,3</b>	<b>72,6</b>	<b>73,8</b>	<b>84</b>			
+/-	-6	-	-1	2	-2	5			

Er is een verklaring voor het verschil. De geluidisolatie tussen de zalen is dermate goed dat deze niet te bepalen is met de standaard geluidbronnen, zoals bolbronnen, die hiervoor normaal gebruikt worden. Bij de oplevermeting heeft RHDHV een zware geluidinstallatie gehoord, welke op het podium is gezet. Naderhand is er een (tijdelijke) huisinstallatie geplaatst en deze is gebruikt voor dit onderzoek. Uit metingen blijkt dat in de zaal het geluidniveau sterk kan variëren. Andere luidsprekeropstellingen zullen dus de relatieve aanstoting van bouwdeelen beïnvloeden. Maar met name de plaatsing op het podium (terwijl de huisinstallatie gedeeltelijk hangt en gedeeltelijk onder het podium staat) met de daarbij behorende constructieve aanstoting van het podium kan hebben geleid tot hogere niveaus in de constructie, daardoor meer constructiegeluid en daardoor een slechtere isolatiewaarde. Aangezien gebruik van de huisinstallatie meer representatief voor de praktijk is ligt het in de rede om de daarmee bepaalde isolatiewaarden als uitgangspunt te hanteren.

Met een verbetering van 9 dB in de vier falende octaafbanden wordt alsnog de geëiste isolatiewaarde gehaald.

Tabel 5: minimaal benodigd spectrum voor PZ → KMZ

D [dB]	House	32 Hz	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
<b>Doel</b>	<b>85</b>	<b>61</b>	<b>77</b>	<b>84</b>	<b>86</b>	<b>87</b>	<b>89</b>	<b>98</b>	
+/-	0	14	5	7	9	9	11	22	
<i>t.o.v. gemeten</i>	+7		+9	+9	+9	+9			

### 3 Onderzoeksmethode

De geluidisolatie tussen de zalen is de mate waarin het geluid wordt verzwakt als het zich voortplant van de ene zaal naar de andere zaal. De geluidvoortplanting gaat via verschillende wegen: "geluidpaden". Geluid dringt bijvoorbeeld een wand in, plant zich (als trillingen) in die wand voort naar een andere wand, gaat vervolgens een kolom in, treedt een vloerveld in en straalt daar weer af als geluid. Gaandeweg verliest het geluid daarbij energie. Tussen twee zalen is er sprake van een heel netwerk aan paden. De weg van de minste weerstand, waar het geluid de minste energie verliest, is het zogenaamde "dominante pad". Het onderzoek richt zich erop de dominante paden in volgorde van belangrijkheid te identificeren. Is zo'n pad gevonden, dan kan ook worden bedacht hoe dit pad kan worden geblokkeerd.

Om de dominante paden te vinden zijn een aantal stappen ondernomen.

Om te beginnen is er een overzicht gemaakt van alle mogelijke geluidpaden.

Vervolgens is van al deze geluidpaden op rekenkundige wijze de geluidisolatie bepaald.

Omdat dit een theoretische aanpak is zijn de resultaten met onzekerheid omkleedt. Het levert een short list van verdachte paden op waar nader onderzoek naar dient te worden gedaan.

Uitgebreide geluid- en trillingsmetingen met verschillende soorten bronnen op verschillende locaties zijn vervolgens ondernomen om het rekenmodel te verifiëren en van extra gegevens te voorzien, en om aan te tonen dan wel te uit te sluiten dat een verdacht pad dominant is.

Voor de dominante paden worden vervolgens maatregelen bedacht, welke verder worden uitgewerkt met de constructeur, de aannemer, de architect, de bouwfysisch adviseur en de leveranciers van benodigde elementen.

## 4 Metamodel

Om de complexe geluidoverdracht tussen PZ en KMZ te begrijpen is meer nodig dan een aantal metingen of een meer of minder gedetailleerd computermodel. Er is een kader nodig dat overzicht geeft en waarin metingen en berekeningen onder te brengen zijn en in samenhang met elkaar te brengen zijn. Dat is met name noodzakelijk omdat noch met berekeningen alleen noch met metingen alleen een voldoende nauwkeurig beeld van de situatie kan worden opgebouwd. Bovendien geldt voor zowel metingen als berekeningen dat er altijd een achterliggend globaal model van de situatie is om de meting of de berekening op te zetten. In een complexe situatie waarin model en berekening elkaar moeten gaan steunen ligt het voor de hand dat een gemeenschappelijk, bovenliggend model te laten zijn: het metamodel.

Het meest passende metamodel is in dit geval een overzicht van alle geluidpaden tussen PZ en KMZ. Die paden beginnen allen bij het geluidveld in de PZ en gaan dan de constructie in. Daarin plant het geluid zich als trillingen voort. Via de constructie komen de trillingen in de KMZ aan en stoten ze de lucht aan in de KMZ: er wordt afgestraald.

In sommige paden spelen bepaalde luchtvolumes ook een rol in de voortplanting. Dat zijn paden die via de foyer lopen of via de luchtschacht in een van de twee liftkernen (nl. die een deuropening heeft naar het podium van de PZ). Omdat dit vanuit onderzoektechnisch, maar vanuit het oogpunt van maatregelen, een wezenlijk verschil is, worden daarom twee typen paden onderscheiden:

- Luchtpaden. Dit zijn paden die te karakteriseren zijn als een pad via een tussenruimte (de foyer of de luchtschacht) en waarvan de geluidisolatie is op te delen (bij meting en berekening) naar een geluidisolatie tussen PZ en tussenruimte en tussen tussenruimte en KMZ.
- Constructieve paden. Dit zijn paden die geheel via de constructie lopen.

Hierbij zij opgemerkt dat er bij alle paden ook nog sprake is van lucht als overdrachtsmedium op een hoop plekken anders dan de twee tussenruimten, nl. de spouw tussen binnendozen en buitendozen van de doos-in-doos constructie en tussen dozen en bekleding (voorzetwanden). Het grote verschil is dat deze, vaak zeer smalle, ruimten niet worden gekarakteriseerd met een te meten of te berekenen geluiddrukkniveau, zoals dat wel bij de tussenruimten het geval is. Ze komen in de berekeningen voor als stijfheden, invoegverliezen e.d., en er wordt niet in gemeten.

Er zijn 5 bottlenecks voor de paden: elk van de paden zal door 1 van deze 5 gaan. Voor de luchtpaden zijn de bottlenecks de tussenruimten:

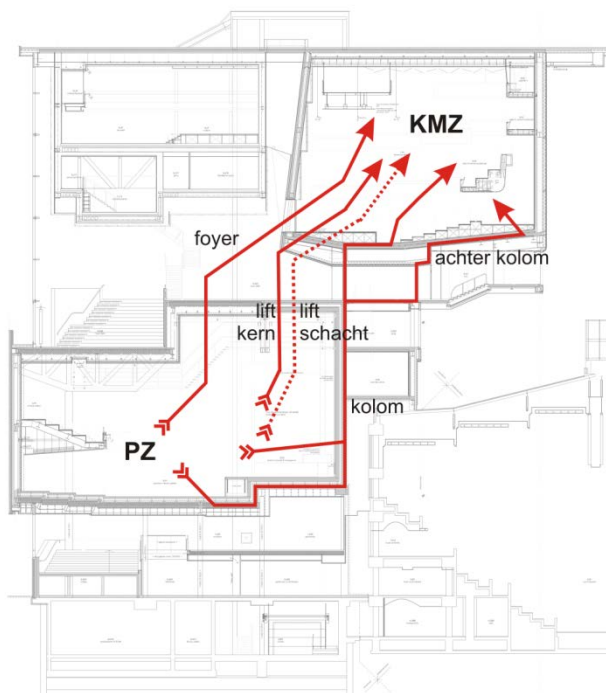
- De **foyer**
- De **liftschacht** met opening naar de PZ (dus het luchtvolume in de betonnen koker waarin de goederenlift beweegt die direct het podium van de PZ bedient)

Voor de constructieve paden zijn de bottlenecks:



- De **liftkernen** (dus de betonnen kokers waarbinnen de liften bewegen)
- Vier **kolommen** in de foyer op vloer 6 waarop de KMZ gedeeltelijk rust en die afsteunen op de achterwand van de PZ
- Kolommen en trekstangen bij de ingang van de KMZ: de "**achterkolommen**".

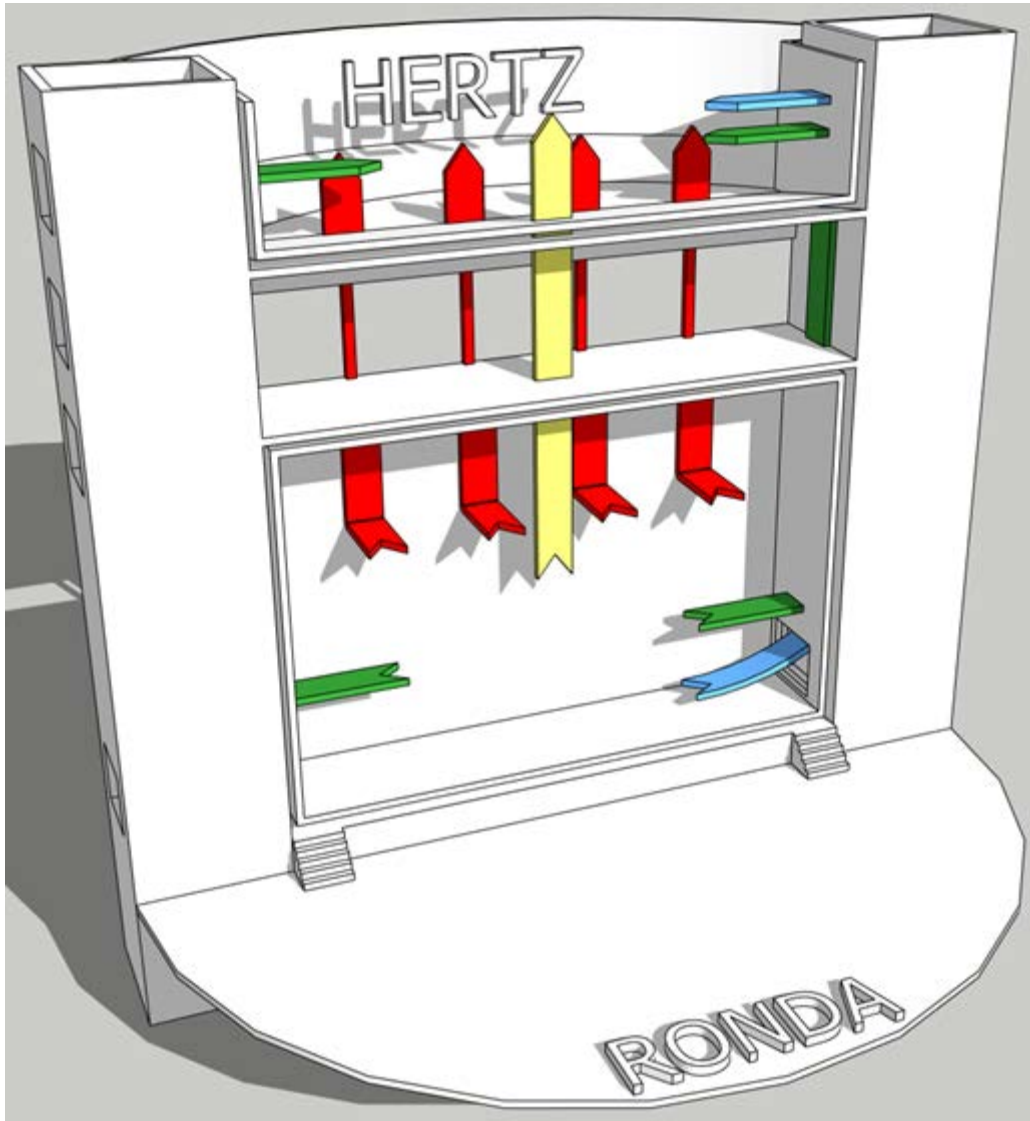
Het geheel aan alle mogelijke paden worden onderverdeeld naar deze vijf bottlenecks. Deze vijf verzamelingen van paden, worden in dit rapport aangeduid "het pad via de foyer", "het pad via de kolommen" etc., of als "de hoofdpaden".



**Figuur 3: in zijaanzicht een overzicht van de 5 paden;**

Figuur 3 en Figuur 4 geven een beeld van de vijf hoofdpaden. Daarbij zij opgemerkt dat de "feeders", de verzameling van subpaden die uitkomen op 1 van de 5 bottlenecks niet nader zijn uitgewerkt in deze schets.

Het indelen naar de 5 bottlenecks heeft twee belangrijke voordelen. De bottlenecks vormen enerzijds logische punten voor *metingen*, om het relatieve belang van het bijbehorende hoofdpad te bepalen. Anderzijds zijn ze voor de hand liggende punten om *maatregelen* te nemen: alle subpaden van een te blokkeren hoofdpad komen daar samen.



Figuur 4: in vooraanzicht een overzicht van de paden

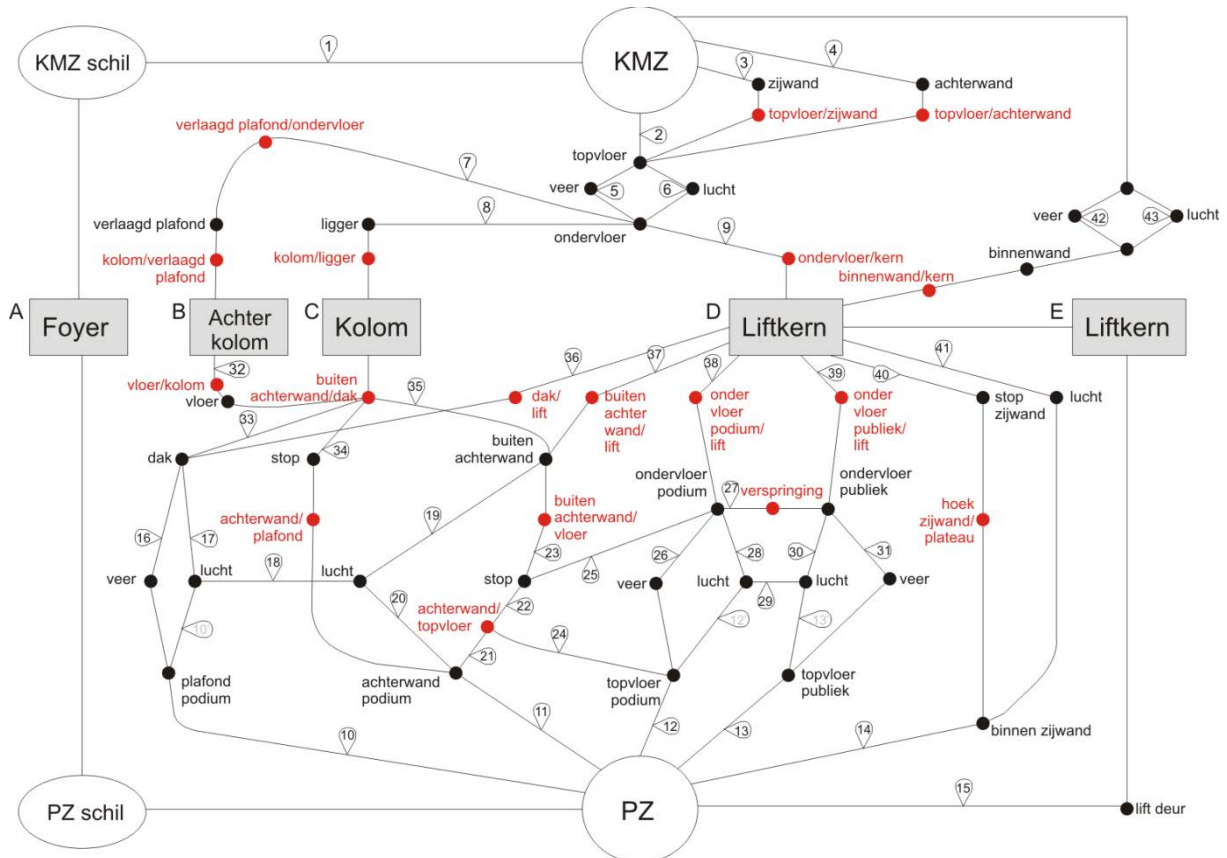
#### 4.1 Padenmodel

Het metamodel is uitgewerkt tot het padenmodel in Figuur 5.

Het is een netwerk van knooppunten en verbindinglijnen. De knooppunten zijn de tastbare onderdelen van het gebouw: wanden, plafonds, luchtruimten, etc. De verbindinglijnen geven weer wat met wat is verbonden.

Centraal zijn de 5 onderdelen die bottlenecks vormen. Deze knooppunten zijn opgeblazen tot vierkante blokken.

Aan de uiteinden staan de 2 onderdelen die in- resp. uitgang zijn van het geluid dat zich door het netwerk voortplant: de PZ en de KMZ.



Figuur 5: padenmodel

In de flanken zijn nog twee ovalen te zien. Dat zijn stukken netwerk die niet nader zijn uitgewerkt naar de onderdelen. Uitwerking ervan is niet noodzakelijk voor de metingen of de modellering, maar voegt wel een groot aantal knooppunten en verbindingen toe zonder dat dat dus direct van nut is.

In rood zijn de knooppunten waarvan de tastbare onderdelen iets abstracter van aard zijn: de bouwknopen, de verbindingen tussen constructieve onderdelen.

De verbindingslijnen zijn genummerd en worden bijv. gebruikt om in het theoretisch model de paden te schetsen (zie bijlage).

## 5 Invulling : theoretisch

Met het geschetste meta-model wordt inzichtelijk gemaakt langs welke paden het geluid van de ene zaal naar de andere kan worden overgedragen. Daarbij is reeds op grond van inzicht en ervaring een selectie gemaakt van de relevante paden. Om aan te geven in welke mate er door elk van die paden daadwerkelijk een geluidbijdrage wordt geleverd is het noodzakelijk de geluidoverdracht via elk van die paden op grond van de bouwconstructie te schatten. Voor de overdracht tussen twee naastgelegen ruimten in bijvoorbeeld woningen is een beproefde aanpak omschreven in de Europese norm EN 12354. De principes van die aanpak kunnen echter evenzeer worden toegepast op complexere bouwsituaties, al zal het aangeven van de betrouwbaarheid in dat geval moeilijker zijn. Ook bij TivoliVredenburg vindt overdracht niet direct van ruimte naar ruimte plaats maar via een tussenliggende bouwconstructie. Voor elk pad tussen twee ruimten kan in navolging van EN 12354 de overdracht, het geluidniveauverschil  $D_{ij}$  voor het pad van constructie  $i$  in de ene ruimte en constructie  $j$  in de andere ruimten in de gegeven situatie, als volgt worden geschreven:

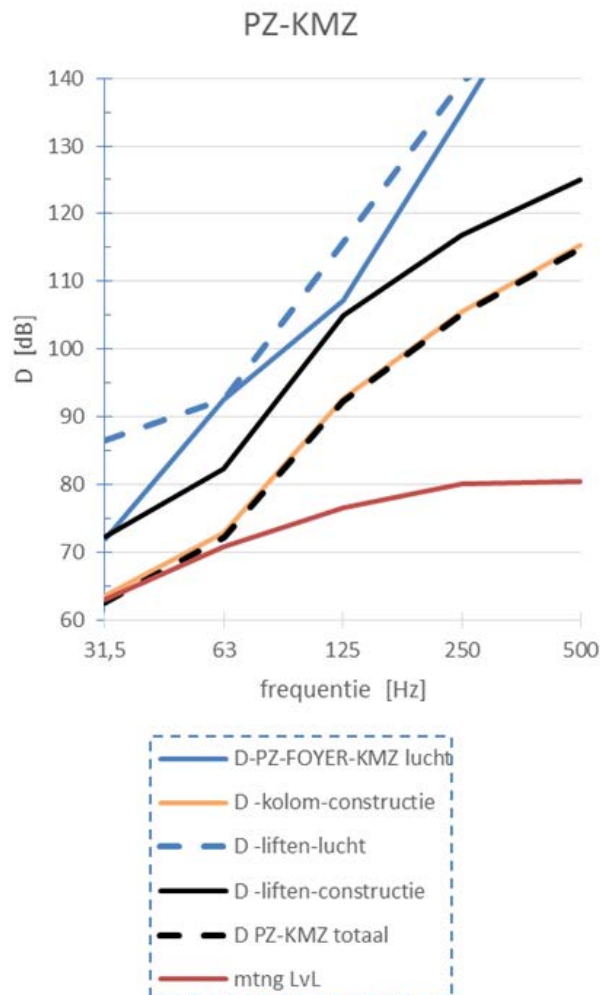
$$D_{ij} = \frac{R_i}{2} + \Delta R_i + \frac{R_j}{2} + \Delta R_j + K_{ij} + 10 \lg \frac{V_{ont}}{6T_{ont} l_{ij}} \quad (1)$$

Hierin is  $R$  de geluidisolatie van een basisconstructie,  $\Delta R$  de isolatieverbetering door een voorzetwand, verlaagd plafond of verend opgelegde dekvloer en  $K_{ij}$  de trillingoverdrachtsverzwakking over het constructieve pad tussen de beide constructies.  $V_{ont}$  is het ontvangvolume met een kenmerkende nagalmtijd van  $T_{ont}$  en  $l_{ij}$  is de effectieve lengte waarover de beide constructie met elkaar zijn verbonden. Bij meerdere knooppunten wordt de schatting van deze trillingoverdrachtsverzwakking complexer en moet er rekening worden gehouden met verschillende typen constructiegeluidgolven. Daarnaast moet bij de schatting van de geluidisolaties ook rekening worden gehouden met de grotere constructieafmetingen dan in de woningbouw gebruikelijk. Voor het schatten van de geluidisolatie en de geluidisolatieverbetering van de diverse constructies is gebruik gemaakt van het rekenmodel BASlab, rekening houdend met de grote afmetingen van de constructies. Er wordt hier bewust gesproken van schatten aangezien de afmetingen, randcondities en detaillering van de constructies over het algemeen zo complex en gevarieerd zijn dat het niet mogelijk is in detail met al dergelijke variaties rekening te houden.

### 5.1 Eerste globale berekening

Een eerste globale berekening, waarbij in die eerste fase niet alle constructiedetails vanuit de tekening geheel duidelijk waren, gaf aan dat de luchtgeluidoverdracht niet relevant was maar overdracht via de kolommen en via de liftkernen beide relevant konden zijn. De resultaten van een verfijndere benadering van de uitgangssituatie, mede

na het ter plaatste bekijken van de complexe constructie is weergegeven in Figuur 6. Hierbij is voor de schatting van de akoestische prestatie van de diverse bouwelementen uitgegaan van de goede uitvoering, ook al waren er indicaties dat op onderdelen deze uitvoering minder was dan gewenst. De overdracht tussen de popzaal (PZ) en de Kamermuziekzaal (KMZ) is in drie groepen van overdrachtswegen samengevat: luchtgeluidoverdracht van de PZ naar de foyer naar de KMZ, overdracht langs diverse constructieve paden via de vier kolommen in de foyer en geluid langs verschillende paden via de beide liftkernen, waarbij nog onderscheid is gemaakt tussen lucht- en constructiegeluid.



Figuur 6: schatting van de geluidoverdracht (niveauverschil  $D$ ) voor verschillende groepen overdrachtspaden

Deze eerste schatting geeft aan dat de luchtgeluidpaden waarschijnlijk onbelangrijk zijn, dat overdracht via de kolommen bepalend is maar die via de kernen mogelijk ook nog relevant kan zijn. Boven 63 Hz wijkt het rekenresultaat vrij sterk af van de meting. Hiervoor zijn diverse redenen. Bij hogere frequenties worden de meetresultaten minder betrouwbaar door de invloed van het achtergrondgeluid en representeren een ondergrens van het feitelijke niveauverschil. Kleine defecten in constructieonderdelen, beperkte koppelingen of iets minder uitgevoerde ont koppelingen hebben vooral bij hogere frequenties effect. De vele overdrachtspaden die vooraf verwaarloosd zijn zullen vooral bij hogere frequenties toch een bijdrage kunnen leveren. Omdat de lage frequenties in het probleem bepalend zijn zullen we ons daarop verder concentreren.

## 5.2 Aangepaste berekeningen na metingen

De vervolgens uitgevoerde metingen (zie hoofdstuk 6) bevestigen dat de beide luchtgeluidpaden (foyer en liftschacht) onbelangrijk zijn. Deze schattingen zijn daarom niet verder uitgewerkt of aangepast.

De specifieke metingen met trillingaanstoting bieden de mogelijkheid de overdracht via de constructieve paden meer apart te onderzoeken en waar nodig en mogelijk de schattingen aan te passen.

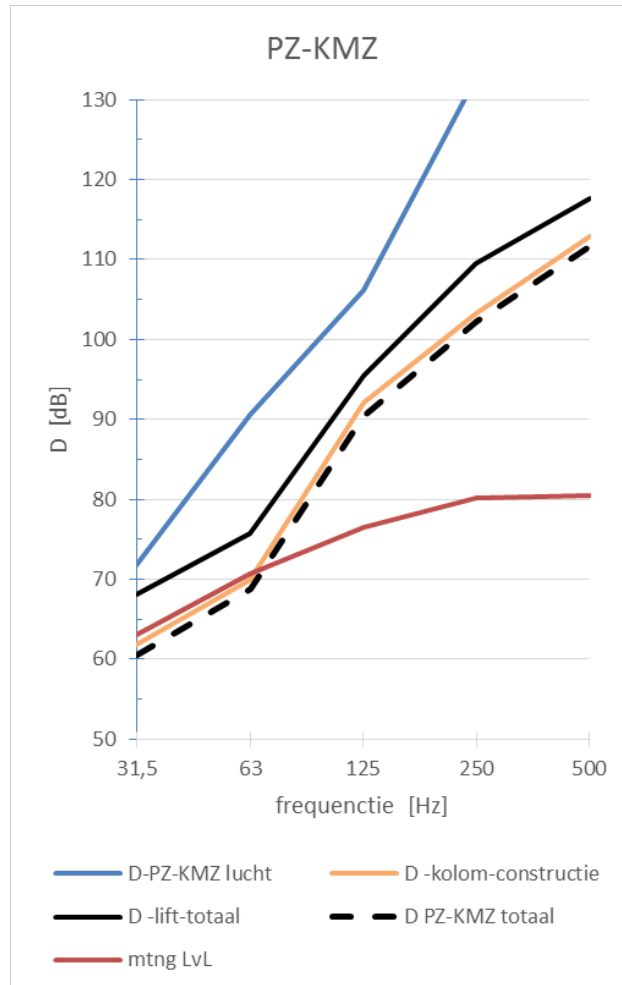
Bij de schatting in Figuur 6 zijn alleen zogenaamde 1<sup>e</sup> orde paden meegenomen, dat wil zeggen dat paden tussen twee constructies met de minste knooppunten als bepalend worden beschouwd. Uit metingen blijkt o.a dat in dit geval het pad van de podiumvloer via de ondervloer naar de buitenste achterwand en zo naar de kolommen niet verwaarloosd kan worden ten opzichte van het pad van de podiumachterwand naar de kolommen; de eerste van de twee kan zelfs bepalend zijn. De overige secundaire paden, zoals podiumvloer naar achterwand en liftkern, lijken uit een verdere analyse terecht te zijn verwaarloosd.

Tabel 6: berekende geluidoverdracht (waardes behorende bij Figuur 7)

D [dB]	House	32 Hz	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz
Foyer	102	72	91	106	133			
Lift	89	68	76	95	110			
Kolom	83	62	70	92	103			
<b>Samen</b>	<b>82</b>	<b>61</b>	<b>69</b>	<b>90</b>	<b>102</b>			
<i>Meting</i>	<i>77,6</i>	<i>60,8</i>	<i>68,4</i>	<i>75,1</i>	<i>78,4</i>			

Bij een hernieuwde berekening is dit verwerkt waarbij tevens de overdracht via een aantal elementen enigszins is aangepast om globaal een betere overeenstemming te verkrijgen met de trillingsmetingen. Met name de verzwakking tussen de binnendoos van

het podium en de achterwand is lager dan eerst was aangenomen. Dit kan het gevolg zijn van sterke koppelingen bij de stops<sup>1</sup> of de verende vloerelementen. Het resultaat van deze aangepaste schatting is gegeven in Figuur 7. Tabel 6 geeft de waarden van deze figuur. Octaafbanden 500, 1000 en 2000 Hz zijn niet berekend.



**Figuur 7: schatting van de geluidsoverdracht (niveauverschil  $D$ ) voor verschillende groepen overdrachtspaden, aangepast aan de hand van de trillingsmetingen, en vergeleken met de meest recente meting van Level Acoustics**

<sup>1</sup> Een stop is een element dat op druk vast zit tussen twee constructieve elementen en dient om een kracht over te dragen. De binnendoos van het podium van de PZ is een redelijk zelfdragend "gebouw" dat toch aan de bovenkant en aan de onderkant, daar waar de buitenhoek van de binnendoos genest zit in de binnenhoek van de buitendoos, een afsteuning nodig heeft ten behoeve van de horizontale stabiliteit. Het is niet duidelijk of deze stop als een verend element is uitgevoerd of als een stijf element.

In grote lijnen zijn de resultaten gelijksoortig. De totale schatting is nu iets pessimistischer. Het kolomoverdrachtspad is nog steeds dominant, maar de overdracht via de liftkernen is iets minder verwaarloosbaar.

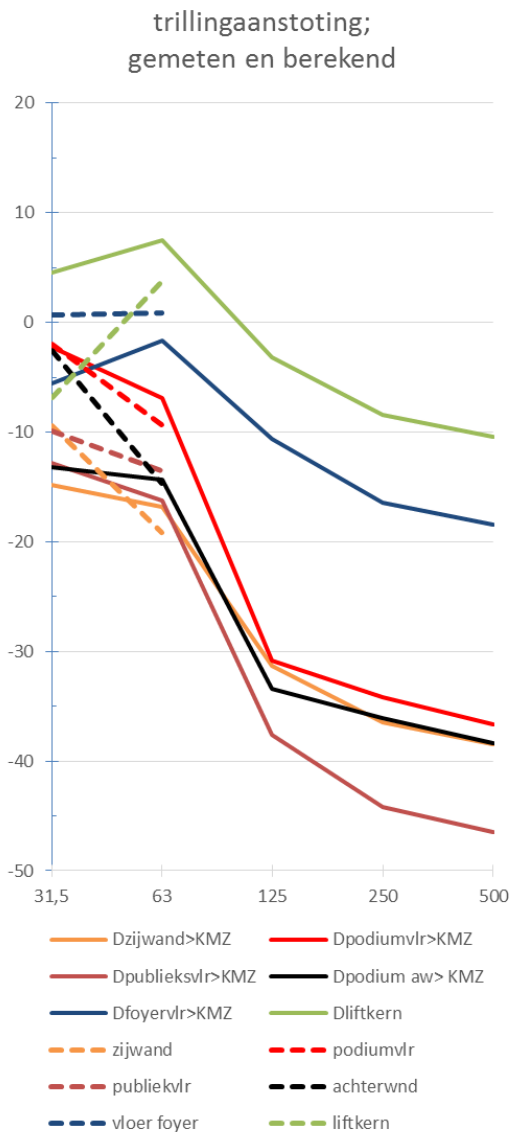
De definitieve invoer van het model wordt gerapporteerd in bijlagen 1 en 2 van dit rapport. Figuur 8 toont een deelresultaat: vergelijking van berekend en gemeten overdrachten (na tuning van het rekenmodel).

### 5.3 Conclusies

De theoretische schattingen van de overdrachtspaden gaven aan dat de luchtgeluidspaden (foyer en liftschacht) niet relevant zijn, hetgeen door metingen is bevestigd. Van de constructieve paden zijn die via de kolommen dominant, maar die via de liftkern niet te verwaarlozen. Dit beeld blijft hetzelfde nadat de theoretische schattingen op onderdelen aan de resultaten van de uitgevoerde trillingmetingen zijn aangepast. Daaruit bleek een eerder buiten beschouwing gelaten secundair pad van de podiumvloer via de buitenste achterwand naar de kolommen belangrijk terwijl de verzwakking van de podium binnendoos naar de achterwand ook minder is dan verwacht.

Als de overdracht via de kolommen sterk wordt verzwakt, is op grond van de laatste schatting te verwachten dat bij lage frequenties de geluidreductie tussen PZ en KMZ 5 tot 7 dB verbetert. De overdracht via de liftkern wordt dan dominant.





Figuur 8: vergelijking van berekende relatie tussen trillingaanstoting in de PZ en geluidniveau in de KMZ waarmee het theoretisch model nader is bijgesteld

## 6 Invulling : experimenteel

Het padenmodel toont vijf bottlenecks voor de geluidoverdracht.

Twee "lucht"paden:

- De foyer
- De liftschacht (de lucht in de goederenlift die opent naar de zaal)

Drie constructieve paden:

- De twee stijven kernen, de liftkernen
- De vier kolommen in de foyer waarmee de KMZ (gedeeltelijk) rust op de achterwand van de PZ
- De vier (achterste) kolommen en de trekstangen waarmee een gedeelte van de foyer hangt aan de KMZ

Het laatste pad is qua verdere aansluitingen aan KMZ kant en PZ kant vrijwel identiek aan het vierde pad, maar bevat een extra omweg. Dit maakt dat pad sowieso niet dominant kan zijn. Dit blijkt ook uit het theoretisch model. Eerder is door RHDHV middels metingen al vastgesteld dat het trillingsniveau in de achterste kolommen lager is dan in de voorste kolommen. Om die reden is het vijfde pad niet aan nader experimenteel onderzoek onderworpen.

Voor de eerste vier paden zijn twee experimenten opgezet. Voor de luchtpaden zijn luchtgeluidisolatiemetingen gedaan. Voor de constructieve paden zijn trillingsmetingen gedaan (in combinatie met geluidmetingen).

### 6.1 Onderzoeksmethode

Het experimentele onderzoek heeft zich geheel gericht op het identificeren van de relatieve dominantie van de vier paden (en dus niet op de relatieve bijdrage van deelpaden teneinde het hele metamodel te vullen).

Om deze dominante paden aan te tonen dan wel uit te sluiten zijn achtereenvolgens de volgende stellingen opgesteld, welke door middel van metingen kunnen worden aangetoond dan wel ontkracht.

- 1) De foyer is een dominante luchtpad. Dat betekent dat de geluidisolatie tussen PZ en de foyer opgeteld bij de geluidisolatie tussen foyer en KMZ gelijk is aan de geluidisolatie tussen PZ en KMZ, of daar niet meer dan 10 dB van afwijkt.
- 2) De liftschacht is een dominant luchtpad. Dat betekent dat de geluidisolatie tussen PZ en de liftschacht opgeteld bij de geluidisolatie tussen liftschacht en KMZ gelijk is aan de geluidisolatie tussen PZ en KMZ, of daar niet meer dan 10 dB van afwijkt.
- 3) De liftkernen vormen een dominant constructief pad. Dat betekent dat de luchtpaden geen bijdrage leveren en dat de bijdrage van de 4 kolommen geringer is dan die van de liftkern.

- 4) De 4 kolommen vormen een dominant constructief pad. Dat betekent dat de luchtgeluidpaden geen bijdrage leveren en dat de bijdrage van de liftkernen aanzienlijk geringer is dan die van de 4 kolommen.

De eerste twee stellingen zijn onafhankelijk toetsbaar. De laatste twee zijn dat helaas niet en vragen toetsing van de eerste twee. Het toetsen van de rol van constructieve paden is niet straightforward. Het is geen kwestie van het vergelijken van trillingsniveaus. In tegenstelling tot een geluidmeting geeft een trillingsmeting geen direct beeld van de intensiteit (vermogenstroom) van een pad. Voor het bepalen van de intensiteit is ook de zogenaamde impedantie (weerstand) van het pad van belang. Bij lucht is dat altijd hetzelfde, de lucht in de foyer is dezelfde als de lucht in de liftschacht. Bij constructies is dat steeds anders: de impedantie van een kolom is anders dan die van de liftkern. Bij een constructief pad dient dus extra informatie te worden toegevoegd. De relatieve rol tussen constructieve paden is daarmee alsnog onderscheidbaar te maken. Maar voor een vergelijking met een luchtpad worden de onzekerheden rondom de bepaling van intensiteit te groot en is een andere benadering noodzakelijk. In dit geval is er voor gekozen om in de stelling de hypothese op te nemen dat de luchtpaden niet van belang zijn.

De metingen leveren, naast antwoord op deze vragen, ook tussenresultaten, meetdata, waarmee het theoretisch model wordt onderbouwd en/of bijgesteld.

### 6.1.1 Luchtpaden

Voor het toetsen van de eerste twee stellingen is het noodzakelijk om metingen te doen aan de in de stellingen genoemde luchtgeluidisolaties.

Daartoe zijn de volgende metingen verricht:

- Geluidisolatiemeting tussen de PZ en de KMZ. Hierbij is gebruik gemaakt van de "huisinstallatie" van de PZ, de vaste geluidinstallatie in de zaal, als geluidbron. Dit is in feite een nieuwe vaststelling van de geluidisolatie tussen de twee zalen, direct te toetsen aan de topeis, met dit verschil dat niet een unieke luidsprekeropstelling wordt gebruikt, zoals bij de oplevermetingen begin 2014, maar de werkelijk in gebruik zijnde luidsprekers. De luidsprekeropstelling kan namelijk een effect hebben op de mate waarin bouwdeelen worden aangestraald (of direct met trillingen worden aangestoten door de luidsprekers), hetgeen de geluidisolatie beïnvloedt.
- Geluidisolatiemeting tussen de PZ en de foyer op de 5<sup>de</sup> en op de 6<sup>de</sup> verdieping, bij gebruik van de huisinstallatie in de PZ. In principe is alleen de 6<sup>de</sup> verdieping van belang, omdat op die verdieping de KMZ in de foyer steekt. Omdat de foyer zo groot en grillig is dat van een "ideale" en enkelvoudig volume niet meer kan worden gesproken is ook naar de 5<sup>de</sup> gemeten, teneinde een beeld te krijgen van de invloed daarvan.
- Geluidisolatiemeting tussen foyer op de 6<sup>de</sup> en de KMZ. Hiervoor is de huisinstallatie in de PZ als geluidbron gebruikt, en zijn de deuren naar de foyer opengezet. Enerzijds is dit uit praktisch oogpunt gedaan, zodat er geen speciale installatie hoefde te worden geplaatst in de foyer of in de KMZ. Anderzijds is de

overweging geweest dat dit een aanstraling van de KMZ levert die in de buurt komt van wat het normale luchtpad doet, hetgeen niet onbelangrijk is gegeven de grillige geometrie van de foyer. Nadeel is dat uiteindelijk slechts een ondergrens van de isolatie kan worden bepaald: enerzijds weet de installatie in de PZ de foyer maar gedeeltelijk te vullen met geluid waardoor bij hoge geluidisolatie het te meten ontvangniveau in de ruis komt, anderzijds worden ook de andere paden aangestoten waardoor het ontvangniveau bepaald kan gaan worden door die paden.

- Geluidislatiemeting tussen de PZ en de liftschacht. Hierbij is de huisinstallatie in de PZ als bron gebruikt. De metingen zijn verricht onder verschillende situaties wat betreft de plaats van de goederenlift: onder de PZ, bij de PZ of tussen PZ en KMZ.
- Geluidislatiemeting tussen de liftschacht en de KMZ. Daartoe is de liftschacht aangestraald met een eigen geluidbron, geplaatst in de liftzolder.

Steeds is bij een meting naar de KMZ niet een gemiddelde over de zaal van de KMZ maar zijn, steekproef gewijs, een aantal specifieke plaatsen gekozen.

Bij metingen naar de foyer is gemiddeld over de ruimte. Zoals gezegd niet de hele foyer, maar een gedeelte van de foyer: de 5<sup>de</sup> resp. de 6<sup>de</sup> verdieping.

Bij metingen naar de liftschacht is op een aantal hoogtes gemeten. Gezien de quasi-1 dimensionale geometrie van een liftschacht en de relatief lage frequenties waar het hier om gaat is een relevante opslinging door staande golven (orgelpijpeffect) te verwachten. De buik van het geluidveld is gezocht en het gebied eronder en erboven verkend.

Gebruikte apparatuur:

- Rion 31 geluidmeter (metingen aan zendkant)
- Dirac meetsysteem, met microfoon B&K 4189 (metingen aan ontvangkant)
- Huisinstallatie PZ (laatste van 3 op proef geïnstalleerde PA-systemen, uiteindelijk niet de definitieve)
- Geluidbron (fabricaat Acoustics Engineering)

Het gebruikte meetsignaal was roze ruis.

### 6.1.2 Constructieve paden

Voor het toetsen van het tweede duo stellingen, die de constructieve paden betreffen, worden eerst de stellingen over de luchtpaden getoetst. Gesteld dat het resultaat daarvan inderdaad is dat de luchtpaden geen bijdragen leveren, kan een trillingstechnische meting worden ingericht dat zich geheel richt op de relatieve bijdragen van de twee constructieve paden.

Overigens bestond bij de start van het onderzoek het beeld dat er wel degelijk een luchtpad belangrijk was: dat via de liftschacht. Dit was namelijk de voorzichtige conclusie van eerder verkennend onderzoek uitgevoerd door RHDHV, welke de opmaat

vormde van het huidige onderzoek. Ware zo'n luchtpad inderdaad belangrijk, dan zouden de nu uitgevoerde trillingsmetingen op zich nog onvoldoende uitsluitsel hebben gegeven.

Voor het toetsen van de relatieve rol van de constructieve paden wordt onderzocht hoe de relatie tussen het trillingssignaal van een bouwdeel en het geluidssignaal in de KMZ varieert onder omstandigheden. De bouwdelen worden op dit variatiegedrag onderling vergeleken. Het bouwdeel dat de meest consistente relatie laat zien, waar dus sprake is van een goede correlatie tussen trillingsniveau en geluidniveau, is een dominant pad. Dat betekent niet dat het andere pad geen belangrijke bijdrage meer levert (en bij aanpak van het dominante pad niet alsnog de isolatie significant beperkt). Daarom wordt in een tweede stap uit de gemeten signalen een relatieve bijdrage berekend.

#### 6.1.2.1 Meetopstelling

In de foyer zijn voornamelijk op de 6<sup>de</sup> verdieping op 8 meetpunten trillingssensoren bevestigd. Per meetpunt gaat het steeds om 3 sensoren: 1 per richting (twee horizontaal, haaks op elkaar, en vertikaal). In totaal zijn er dus 24 sensoren geplaatst:

Tabel 7: locatie van de 8 3D meetpunten

Nummer	Bouwdeel	Plek op bouwdeel
1	Kolom 3	1,7 meter boven vloer
2	Achterwand podium PZ	5 <sup>de</sup> verdieping, garderobe, 1,7m boven vloer
3	Kolom 4	Net boven de vloer
4	Kolom 4	1,7 meter boven vloer
5	Vloer	5 meter van kolom, 6 meter van liftkern
6	Liftkern	1,7 meter boven vloer, midden op wand
7	Liftkern	1,7 meter boven vloer, hoek van liftkern
8	Liftkern	4 meter boven vloer, hoek van liftkern

Hierbij is kolom 3 de derde kolom als men in de foyer richting de ingang van de KMZ kijkt. De liftkernsensoren waren, vanuit dat zelfde standpunt, bevestigd aan de rechter kern. De hoek van de liftkern betreft, wederom vanuit dat standpunt, de rechter hoek.

De trillingsopnemers zijn dus vooral verdeeld over de twee constructieve bottlenecks: de kolommen en de liftkernen, waarbij enige redundantie is toegepast om eventuele lokale verschillen te signaleren: meetpunt 3 en 6 zijn "gedubbeld" als meetpunten 1 en 7. Meetpunt 1 is overigens op een gegeven moment nog verhuisd naar de vloer, aan de voet van kolom 4, voor analyse van de rotatie op dat punt. Tevens zijn voor nadere analyse van het dynamisch gedrag van de bouwdelen twee punten op een andere plek (hoger resp. lager) van de twee bouwdelen geplaatst: meetpunten 3 en 8. Tot slot zijn twee meetpunten geplaatst net buiten het pad, voor eventuele nadere duiding van de resultaten: meetpunten 2 en 5.

De trillingsopnemers op meetpunten 2, 6 7 en 8 zijn vastgeschroefd in het beton. Die van meetpunten 1 3 en 4 zijn met spanbanden en kleefpasta (AK22) vastgeklemd aan de kolom. Meetpunt 5 rust, met kleefpasta, op de grond.

Verder zijn 4 microfoons geplaatst in de KMZ.

**Tabel 8: locatie van de 4 microfoons**

Nummer	Gebied	Plek in gebied
1	Podium	Midden voor, ter plekke van solist.
2	Publiek, beneden	Stoel B27
3	Publiek, 2 <sup>de</sup> balkon	
4	Publiek, beneden	Stoel B27

Meetpunt 2 is gekozen omdat deze het meest kritische punt in de zaal blijkt te zijn als het gaat om geluid vanuit de PZ. Meetpunt 1, het podium is het meest relevant voor de muzikanten en ter referentie meegenomen.

Om eventuele verschillen te vinden in de mate waarin de "feeders", de afstralende bouwdelen in de KMZ, worden geactiveerd door verschillende constructieve paden is ook een meetpunt ver van meetpunten 1 en 2 gekozen: meetpunt 3 op het 2<sup>de</sup> balkon. Microfoon 4 staat op dezelfde plek als microfoon 2, dus op meetpunt 2, en vervult slechts een meettechnische rol.

De microfoons zijn met behulp van statieven geplaatst op oorhoogte.

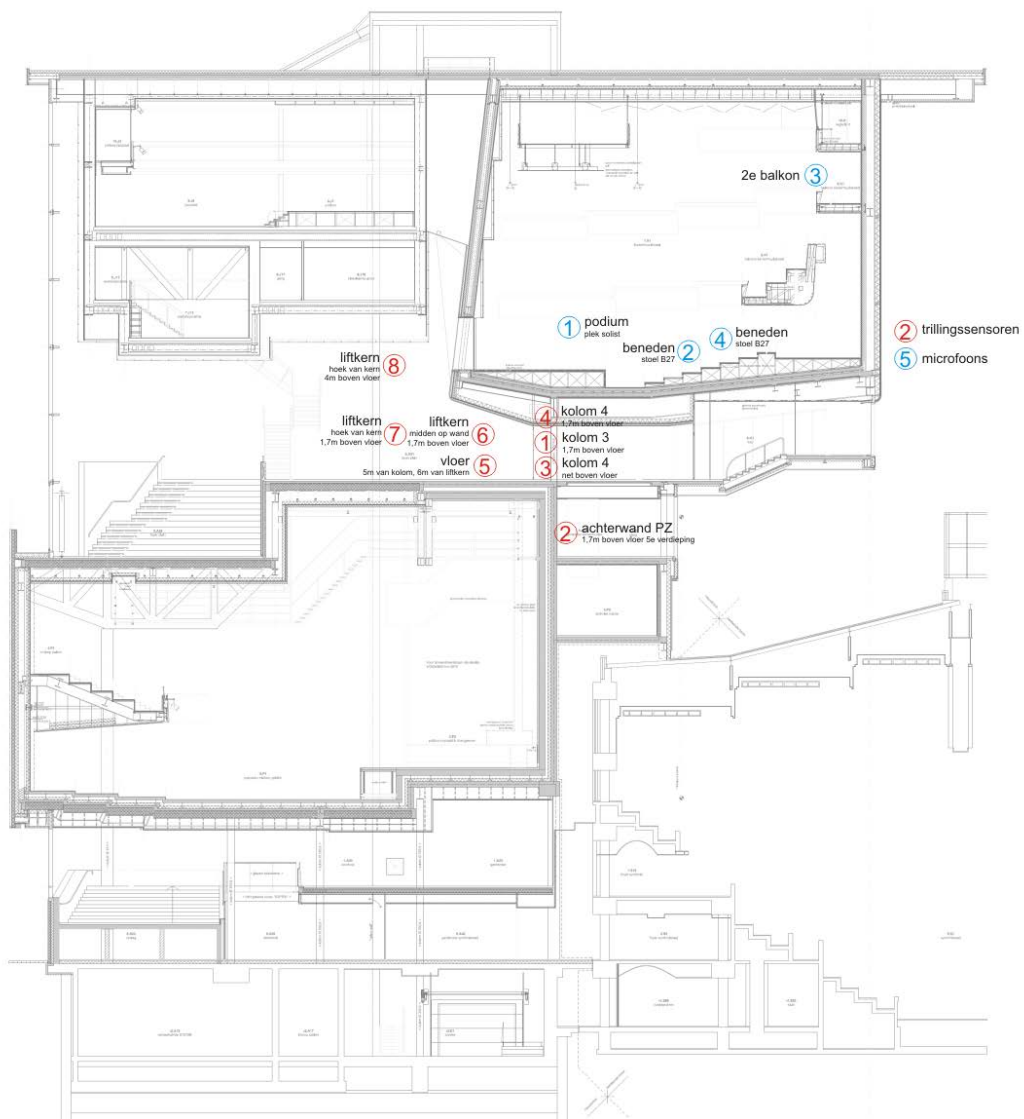
Er zijn twee bronnen gebruikt:

- Geluidbron: de huisinstallatie van de PZ
- Trillingsbron: een "onbalans". Dit is een apparaat bestaande uit een motor die twee cilinders aandrijft die tegen elkaar in draaien. De cilinders worden met metalen stiften gevuld waardoor ze onbalans raken. Dit genereert een kracht loodrecht op de draairichting. Het toerental bepaalt de frequentie.

De trillingsbron is op verschillende posities geplaatst om variërende omstandigheden te creëren. Het gaat met name om variatie in de aanstoting van de feeders in de PZ: de verschillende onderdelen van de binnendoos. Verder is de trillingsbron ook in de foyer geplaatst op posities die één van beide paden met name aanstoot. Omdat een constructief pad in principe nog nader onder te verdelen is naar golf types, waarvan buiggolven en (semi-) longitudinale golven de belangrijkste zijn, is ter onderscheiding die selectieve aanstoting in twee aanstootrichtingen gedaan ("uit het vlak" en "in het vlak").

Voor de posities aan de wand (4, 5, 10, 12, 13 en 14) zijn ankers/draadeinden geplaatst voor de bevestiging van de onbalans. Aangezien de dynamische kracht van de onbalans een veelvoud bedraagt van het eigengewicht, en bij activatie de bron dus gaat stuiteren, was er ook een fixatie nodig voor de vloerposities. Voor punt 1 zijn er draadeinden

geplaatst. Op de overige posities is de onbalans onder twee mobiele liftjes van TivoliVredenburg geklemd.



Figuur 9: overzicht van de meetpunten

Tabel 9: aanstootposities onbalans

Meting	Ruimte, bouwdeel	Plek op bouwdeel
1	PZ, podium	Midden
2	PZ, podium	Links achter (gezien vanuit achterkant zaal)
3	PZ, podium	Rechts voor
4	PZ, zijwand podium	Boven liftdeur, 4 meter hoogte
5	PZ, achterwand podium	Rechts midden, 4 meter hoogte
6	PZ, zaal	Midden, voor podium
7	PZ, zaal	Rechts, voor podium
8	PZ, zaal	Links, naast trap
9	PZ, zaal	Midden, onder balkon
10	Foyer, achterwand podium	Vloer 5 garderobe, 0,5m hoogte onder kolom 4
11	Foyer, vloer 6 <sup>de</sup> verdieping	7 meter van kern, 6 meter van kolommen
12	Foyer, liftkern	boven keuken, midden op wand, 2m hoogte
13	Foyer, als 10, in het vlak	boven keuken, rechterhoek, 2m hoogte
14	Foyer, als 12, in het vlak	boven keuken, rechterhoek, 5m hoogte

#### 6.1.2.2 Meetprocedure

Na plaatsing van de trillingssensoren en microfoons is een meting uitgevoerd met geluid (roze ruis) als bron.

Vervolgens is de trillingsbron ingezet. Deze werd achtereenvolgens op de 14 posities geïnstalleerd en daar geactiveerd. Omdat het een sinusbron betreft, die dus 1 specifieke frequentie genereert werd een getrapte sweep gemaakt: in stappen van 1 Hz is het frequentiegebied tussen 25 Hz en 90 Hz afgewerkt. De meetduur bedroeg 20 seconden voor sinussen tussen 25 en 40 Hz, 15 seconden tussen 40 en 60 Hz en 10 seconden tussen 60 en 90 Hz.

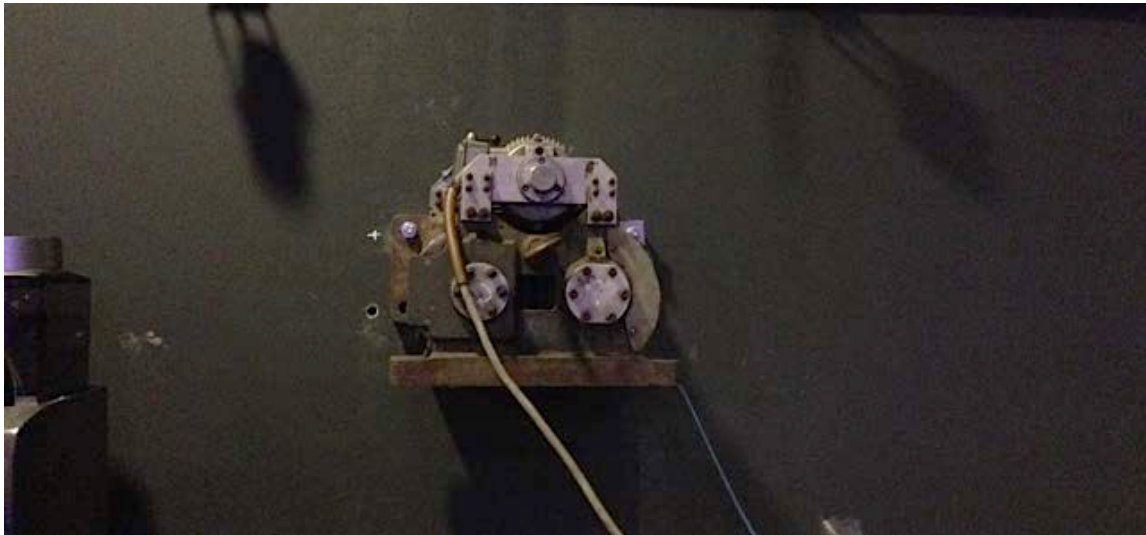
Alle trillingssensoren en microfoons werden bemonsterd door één 32-kanaals systeem en onbewerkt vastgelegd. De sample frequentie bedroeg 20 kHz. De trillingssensoren werden analoog (laagdoorlaat) afgefilterd op 200 Hz, de microfoons op 10 kHz. Uitzondering is microfoon 4, welke niet is afgefilterd. Omdat er in de KMZ door een beveiligingssysteem een pieptoon bij 20,8 kHz wordt gegeneerd leverde dat, door aliasing, een stoorsignaal op bij ongeveer 800 Hz.

#### 6.1.2.3 Gebruikte apparatuur

- Sundstrand QA700 servo-versnellingsopnemers (24, voor meetpunten 1 t/m 8)
- Rion 21 geluidmeters (microfoons 1 t/m 3). Via de AC uitgang wordt het geluidsignaal analoog naar de acquisitie gevoerd.
- B&K 4189 microfoon (microfoon 4)
- Venne en Vishay conditioning, filtering en versterking van de versnellingsopnemers, naar TNO ontwerp



- Dewetron DEWE-801 64-kanaals acquisitiesysteem
- DEWESoft 7 acquisitiesoftware



Figuur 10: onbalans, hangend aan de liftkern in de foyer op vloer 6, aanstotend in het vlak



Figuur 11: Meetpunt 1: 3 sensoren op kolom 3

## 6.2 Resultaten

### 6.2.1 Luchtpaden

#### 6.2.1.1 Totale geluidisolatie

Als eerste wordt de gemeten totale geluidisolatie tussen de PZ en de KMZ gepresenteerd. Deze isolatiemeting vormt de basis voor de analyse: het is de som van alle paden en elk pad dat een (veel) grotere isolatie kent vormt geen dominant pad. Zie Tabel 10.

Er is een gemiddelde over de zaal bepaald en van alle bemeeten plekken in de zaal de worst case genomen, zijnde stoel B27. Dit is vooraan op de tweede rij, in het midden. De meting was gericht op de lage frequenties, vanaf 1000 Hz kwam het geluid uit de PZ in de KMZ niet boven de achtergrondruis terecht. Voor die banden is het resultaat van RHDHV over genomen. Deze octaafbanden vormen geen probleem dus er was geen noodzaak deze opnieuw vast te stellen.

Tabel 10: geluidisolatie PZ → KMZ

D [dB]	House	32 Hz	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
gemiddeld	79,4	63,0	70,8	76,6	80,1	80,5	88,6	97,9	99,8
worst case	77,6	60,8	68,4	75,1	78,4	79,0			
te toetsen	<b>77,6</b>	<b>60,8</b>	<b>68,4</b>	<b>75,1</b>	<b>78,4</b>	<b>79,0</b>	88,6	97,9	99,8
+/-	<b>-7</b>	14	<b>-4</b>	<b>-2</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	11	22	25

Voor de algemene beoordeling van de geluidisolatie tussen PZ en KMZ wordt de rij "te toetsen" gebruikt, welke bestaat uit de door Level Acoustics gemeten worst case, aangevuld met de door RHDHV gemiddelde waarden. Zoals gezegd hebben deze aanvullende waarden geen werkelijke consequenties voor de beoordeling.

Voor analyse van de luchtpaden wordt de worst case gebruikt.

De laatste rij in Tabel 10 betreft het verschil van de toetsen waarden met het standaard housespectrum bij 85 dB.

#### 6.2.1.2 Pad via foyer

Het pad via de foyer is in twee stappen gemeten: eerst de isolatie van PZ naar foyer en vervolgens de isolatie van foyer naar KMZ.

Tabel 11 presenteert de deelbijdragen.

De gemeten geluidisolatie tussen foyer en KMZ betreft een ondergrens. Dit komt omdat het geluidniveau in de KMZ niet significant steeg toen de deuren van de PZ werden opengezet om de foyer te vullen met geluid voor de verschil meting tussen foyer en KMZ. Dat betekent dat andere paden verantwoordelijk waren voor de geluidoverdracht, ook bij open deuren. Tabel 12 toont de gemeten geluidisolatie tussen de drie ruimten bij open deuren van de PZ.

Tabel 11: geluidisolatie PZ → foyer → KMZ

D [dB]	House	32 Hz	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
PZ→foyer		47,6	49,8	53,2	56,7	57,7			
foyer→KMZ		>20	>26	>33	>39	>41	>49	>55	
totaal	<b>&gt;88</b>	<b>&gt;68</b>	<b>&gt;76</b>	<b>&gt;87</b>	<b>&gt;95</b>	<b>&gt;99</b>			
target	85	61	77	84	86	87			

Tabel 12: geluidisolatie PZ → foyer → KMZ bij open deuren van PZ

D [dB]	32 Hz	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz
PZ → KMZ	61,4	67,9	73,9	79,0	79,1
PZ → foyer	41,1	41,8	40,3	40,5	37,9
foyer → KMZ	<b>20,3</b>	<b>26,1</b>	<b>33,6</b>	<b>38,5</b>	<b>41,2</b>

Nu is het resultaat, >88 dB, nog oncomfortabel dicht bij het doel : 85 dB. Het is duidelijk dat de foyer nu geen dominant pad vormt maar zou na het vinden en verhelpen van de paden die wel dominant zijn deze paden elk ook rond de 85 dB uitkomen, dan zal met het foyer pad erbij alsnog net de 85 dB kunnen worden onderschreden. De kans is echter zeer klein dat dit gebeurt. De vastgestelde ondergrens van de geluidisolatie tussen foyer en KMZ ligt ver van wat van de geluidisolatie mag worden verwacht. Worden de invoergegevens van het theoretisch model gebruikt dan ziet het pad er als volgt uit.

Tabel 13: geluidisolatie PZ → foyer → KMZ, met berekende waardes voor foyer → KMZ

D [dB]	House	32 Hz	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
PZ→foyer		47,6	49,8	53,2	56,7	57,7			
foyer→KMZ		26	37	55	72	85			
totaal	<b>99,4</b>	<b>73,6</b>	<b>86,8</b>	<b>108,2</b>	<b>128,7</b>	<b>142,7</b>			
target	85	61	77	84	86	87			

#### 6.2.1.3 Pad via liftschacht

Het pad via de liftschacht is in twee stappen gemeten : eerst de isolatie van PZ naar liftschacht en vervolgens de isolatie van liftschacht naar KMZ.

Tabel 14 presenteert de deelbijdragen.

De goederenlift stond tijdens de isolatiemetingen van PZ naar liftschacht op verdieping - 2, dus onder de PZ en niet in het geluidpad van PZ naar KMZ. Dit is in principe de minst gunstige positie voor de geluidisolatie. In de regel zal de goederenlift bijvoorbeeld vaak staan op verdieping B2, het podium van de PZ. Meest gunstig, in theorie, is een positie tussen B2 en 7 (KMZ) in. Verplaatsing van de goederenlift naar verdieping 6 laat inderdaad een verbetering van de geluidisolatie zien, maar alleen bij 32 Hz en 63 Hz : respectievelijk 2 en 4 dB.

Overigens is in deze situaties steeds gemeten met een gesloten luik voor de (gesloten) liftdeur in de PZ.

**Tabel 14: geluidisolatie PZ → liftschacht → KMZ**

D [dB]	House	32 Hz	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
PZ→lift		33,4	38,1	38,1	43,6	48,1	48,8	49,9	56,8
lift→KMZ		>40	49,2	55,7	59,4	62,1	67,2		
totaal	<b>97,5</b>	<b>&gt;73</b>	<b>87,3</b>	<b>93,8</b>	<b>103,1</b>	<b>110,2</b>	<b>116,0</b>		
target	85	61	77	84	86	87			

Uit Tabel 14 moet de conclusie worden getrokken dat het luchtpad via de liftschacht beslist géén dominant pad is. Ook als straks maatregelen zijn genomen aan de dominante paden zal de liftschacht niet alsnog de gewenste 85 dB isolatie bedreigen.

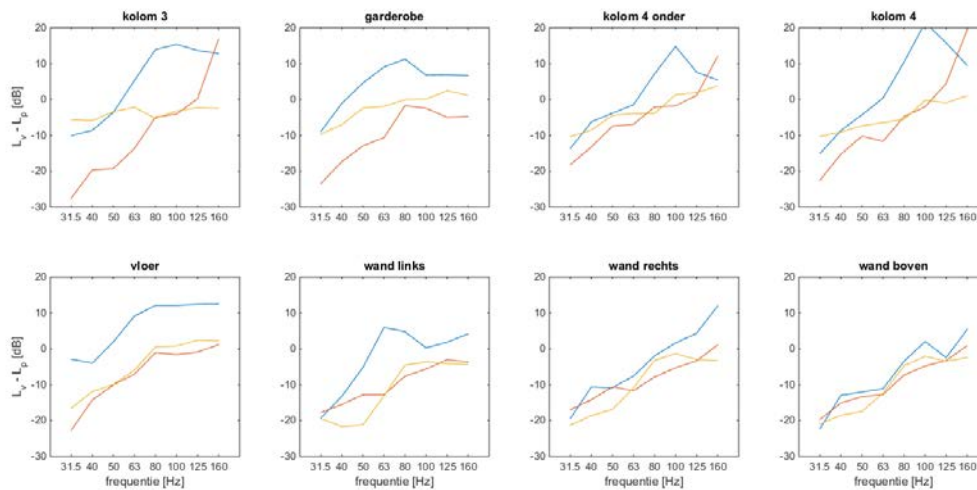
Als het luik, voor de goederenlift, in de PZ wordt geopend verandert dat: het geluidniveau in de liftschacht neemt over het volle frequentiegebied met tenminste 17 dB toe en de geluidisolatie van dat pad, waar het luik een kritiek onderdeel van is, zakt navenant. De totale geluidisolatie van PZ naar KMZ, de som van alle paden, zakt echter maar iets (van 77,6 naar 77,0 dB). Dit is een harde indicatie dat het pad via de liftschacht nu niet dominant is, want het grote effect van openen van het goed isolerende luik in dit pad heeft nauwelijks effect op het geheel. Indien de wel dominante paden zijn verbeterd gaat het luik echter alsnog een kritieke functie vervullen. Als het luik niet dicht is zal de liftschacht alsnog het dominante pad worden met een isolatie van slechts ongeveer 78 dB.

De liftdeur, achter het luik, is niet werkelijk van belang: de invloed daarvan is niet meer dan 1 dB.

## 6.2.2 Constructieve paden

Gesteld dat de luchtpaden niet bijdragen, wat inderdaad de conclusie is van de voorgaande paragraaf, resteert de vraag welke van de twee overgebleven constructieve paden, de kolommen of de liftkernen, dominant is, en in welke mate. Om dit te onderzoeken wordt niet, zoals bij de twee luchtpaden, de geluidisolatie van een constructief pad gemeten, want dat is niet op een hele directe wijze te doen. In plaats daarvan wordt de *relatieve* bijdrage aan het geluidniveau in de KMZ bepaalt.<sup>2</sup>

### 6.2.2.1 Trillingen vanwege geluid



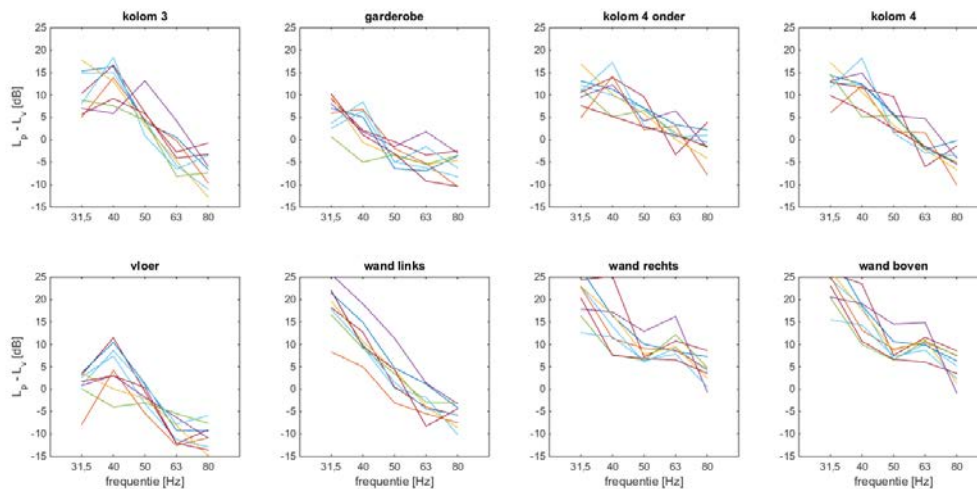
**Figuur 12:**  $L_v - L_p$ , relatie tussen trillingsniveau in de constructie en geluidniveau bij stoel B27 in de KMZ bij geluidproductie in de PZ; blauw is het trillingsniveau uit het vlak, maatgevend voor buiggolven, oranje en rood zijn niveaus in het vlak, respectievelijk in de richting van de KMZ en daar haaks op, gedeeltelijk gerelateerd aan buiggolven en gedeeltelijk aan longitudinale golven; referentiewaarde voor trillingsniveau  $L_v$  is 5e-8 m/s;

<sup>2</sup> Op z'n minst kan worden aangetoond welk pad beter correleert met het geluid in de KMZ. Dat pad is dan in de huidige situatie het dominante pad. Mogelijk kan het andere pad nog zoveel bijdragen dat deze ook deze moet aangepakt. Mogelijk is daar onvoldoende zekerheid over te krijgen uit de relatieve metingen. De benodigde verbetering is immers 9 dB en de precieze bijdrage van een secundair pad dat meer dan, zeg 6 dB, minder is dan die van het dominante pad is met zo'n relatieve meting niet meer goed vast te stellen. Het secundaire pad kan 18 dB zwakker zijn, wat goed uitkomt, maar ook 8 dB, wat het alsnog tot een probleem maakt.

Om te beginnen zijn de verhoudingen tussen het geluidniveau in de KMZ en het trillingsniveau van de liftkern en de kolommen bepaald voor de praktijksituatie: geluid (ruis) in de PZ als bron. Deze verhoudingen zijn er ook voor de twee extra constructieve punten, dichtbij de twee bottlenecks: de achterwand-buitendoos van de PZ (c.q. garderobewand op vloer 5) en het dak-buitendoos van de PZ (c.q. vloer op vloer 6). Figuur 12 toont de resultaten.

#### 6.2.2.2 Trillingen vanwege trillingen

Vervolgens zijn deze verhoudingen, tussen trillingen en geluid ook bepaald voor de metingen met de trillingsbron, de onbalans. Met de onbalans zijn 14 metingen uitgevoerd, op 12 posities, waarbij op 2 posities in twee richtingen is aangestoten. De resultaten van al deze metingen staan in Bijlage 3. Figuur 13 vat een gedeelte van de resultaten samen: per trillingsmeetpunt een grafiek met lijnen die relatie tussen geluid en trillingen van elk van de negen aanstootposities in de PZ (meting 1 t/m 9) representeren.



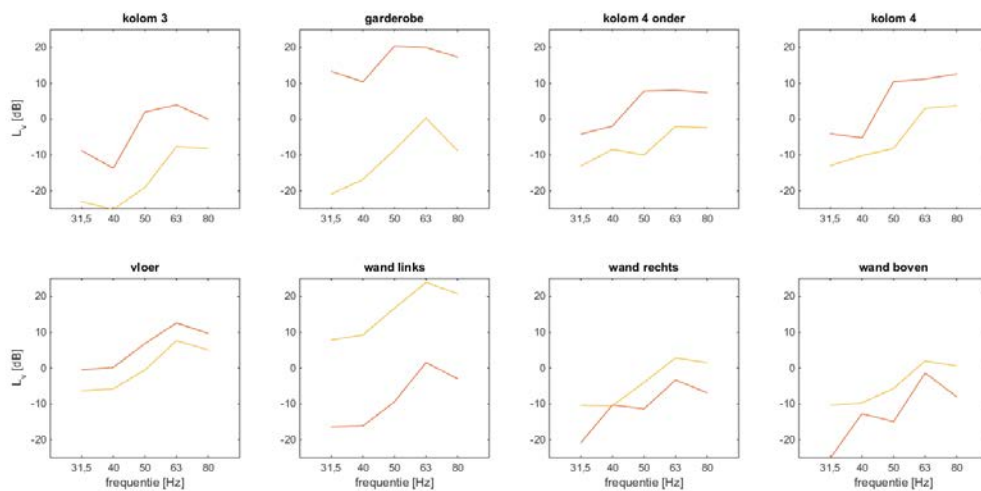
**Figuur 13:  $L_p-L_v$ , relatie tussen trillingsniveau in de constructie en geluidniveau bij stoel B27 in de KMZ bij trillingsproductie op de verschillende aanstootposities in de PZ**

Een trillingspunt in het dominante pad zal in principe een relatie  $L_p-L_v$  hebben die niet te gevoelig is voor de aanstootpositie, mits de aanstootposities allemaal tot de feeders behoren. Trillingspunten in minder belangrijke paden kunnen meer spreiding hebben, tenzij deze als zijpad toch sterk correleren met het dominante pad. In ieder geval is spreiding een teken van gebrek aan dominantie, maar omgekeerd geldt dat niet. Figuur 13 geeft in ieder geval onvoldoende uitsluitsel om een pad als niet dominant aan te wijzen.

Twee posities van de onbalans stoten heel specifiek maar één van de twee paden aan:

- de positie op de achterwand, in de garderobe; deze ligt recht onder de kolommen en stoot dus primair de kolommen aan
- de positie direct op de liftkern; deze stoot dus primair de liftkern aan

Op deze posities is niet alleen loodrecht op het vlak geëxciteerd (meting 10 en 12 van Tabel 9), waarmee buiggolven worden opgewekt, maar ook in het vlak (meting 13 en 14) om de voor constructieve voortplanting vaak ook belangrijke longitudinale golven op te wekken.



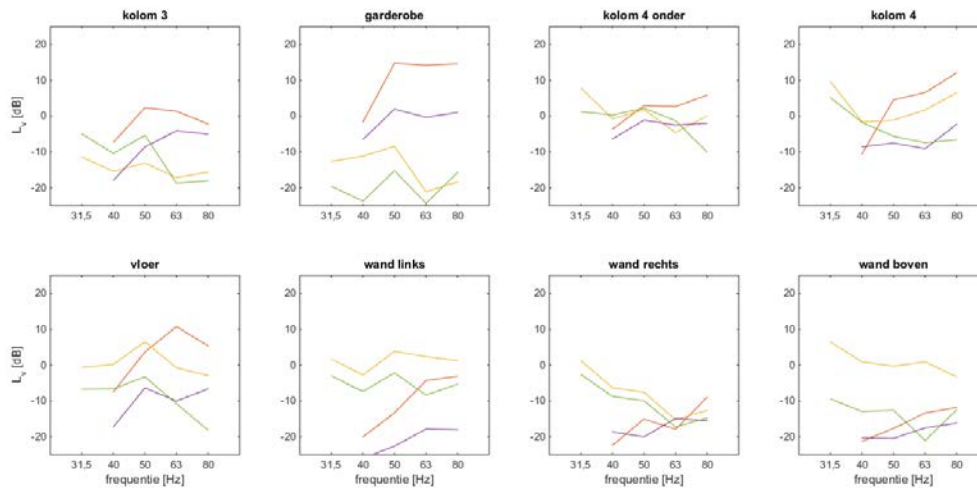
**Figuur 14: trillingsniveau  $L_v$  [dB, Re  $5E-8$  m/s] (uit het vlak) op de verschillende meetpunten bij aanstoting in de garderobe (rood) en op de liftkern (oranje)**

De metingen op deze bronposities zijn uitermate geschikt om de nadere rol van elk van de paden te onderzoeken.

Dat die bronposities werkelijk het ene pad veel meer aanstoten dan het andere blijkt uit Figuur 14. De kolommen reageren vooral op aanstoting vanuit de garderobe, de liftkern reageert vooral op aanstoting op de liftkern. Overigens is het verschil minder groot op de hoek van de liftkern ("wand rechts" en "wand boven") bij 40 en 60 Hz. Indien de liftkern dominant is zal dat in de verdere analyse tot een zekere overschatting van de rol van de kolommen leiden.

Figuur 15 is iets complexer. Het zijn de responsies bij aanstoting *in het vlak*, in de garderobe en op de liftschacht. Dit moet dus primair longitudinale golven opwekken. De getoonde responsies zijn nu niet alleen van trillingen uit het vlak (rood en oranje voor respectievelijk aanstoting in de garderobe en op de liftschacht) maar ook in het vlak (respectievelijk paars en groen). Wat opvalt is dat ondanks de aanstoting in het vlak de responsie uit het vlak (geel of rood) groter is. Dit heeft o.a. te maken met het grote verschil in impedantie voor trillingen in het vlak en trillingen uit het vlak. Bij een zelfde

hoeveelheid trillingsenergie is de amplitude van een longitudinale golf veel kleiner dan die van een buiggolf.



**Figuur 15: trillingsniveau  $L_v$  bij aanstoting in het vlak in de garderobe (rood en paars) en op de liftkern (oranje en groen) ; rood en oranje zijn de trillingen uit het vlak, paars en groen trillingen in het vlak**

### 6.2.2.3 Voorwaartse berekening, bijdrage van de paden

De *verhoudingen* die volgen uit de pad-selecterende metingen met de onbalans zijn vervolgens vermenigvuldigd met de trillingsniveaus bij de metingen met geluid als bron. Er zijn vier verhoudingen:

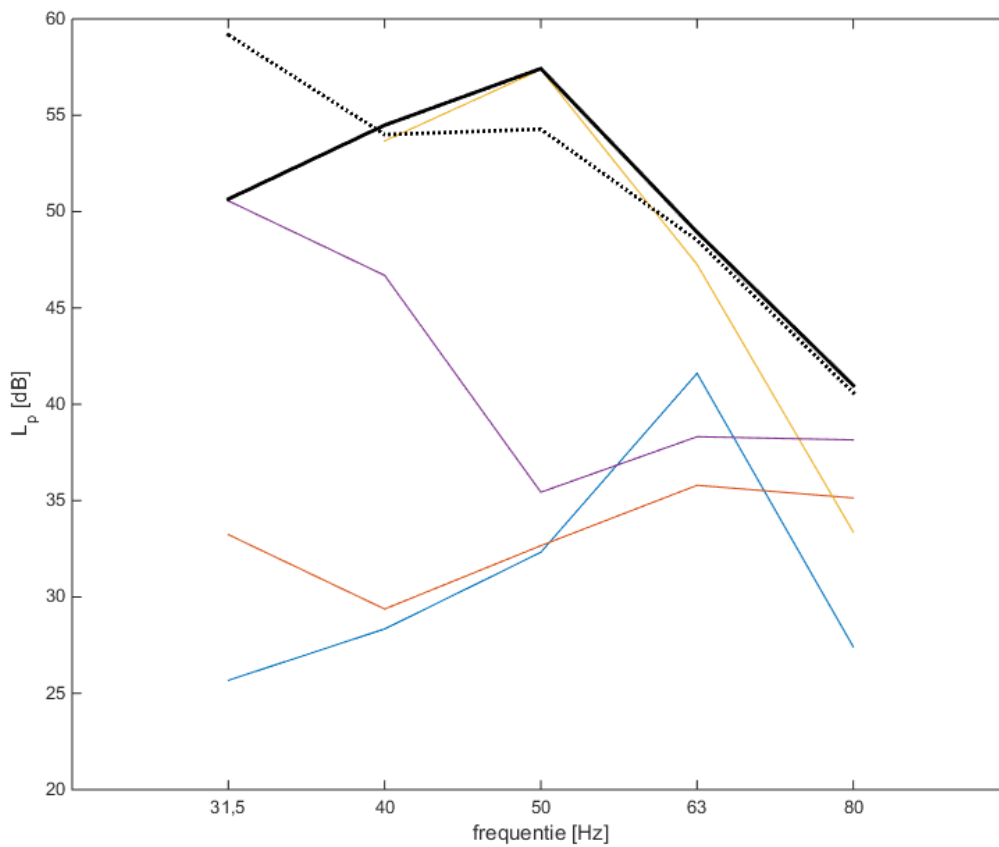
- Trillingen uit het vlak (buiggolven) in de kolom ten opzichte van het geluiddrukkniveau in de KMZ (meting 10)
- Trillingen in het vlak (longitudinale golven) in de kolom ten opzichte van het geluiddrukkniveau in de KMZ (meting 13)
- Trillingen uit het vlak (buiggolven) in de liftkern ten opzichte van het geluiddrukkniveau in de KMZ (meting 12)
- Trillingen in het vlak (longitudinale golven) in de liftkern ten opzichte van het geluiddrukkniveau in de KMZ (meting 14)

Vermenigvuldiging van deze verhoudingen met de trillingsniveaus tijdens ruis levert een voorspelling op van de relatieve bijdrage van de vier paden aan het geluid in de KMZ vanwege geluid in de PZ. Het totaal moet in principe gelijk zijn aan wat er direct in de KMZ gemeten is. Het resultaat staat in Figuur 16.

Tot en met de 63 Hz tertsband is de longitudinale golf in de kolom dominant. Bij 80 Hz neemt de buiggolf in de kolom het over. Bij 31,5 is er helaas geen gemeten bijdrage van de longitudinale golf in de kolom: deze band was in de meetsessie overgeslagen. Het ligt echter zeer voor de hand dat ook in die band de longitudinale golf in de kolom dominant is.



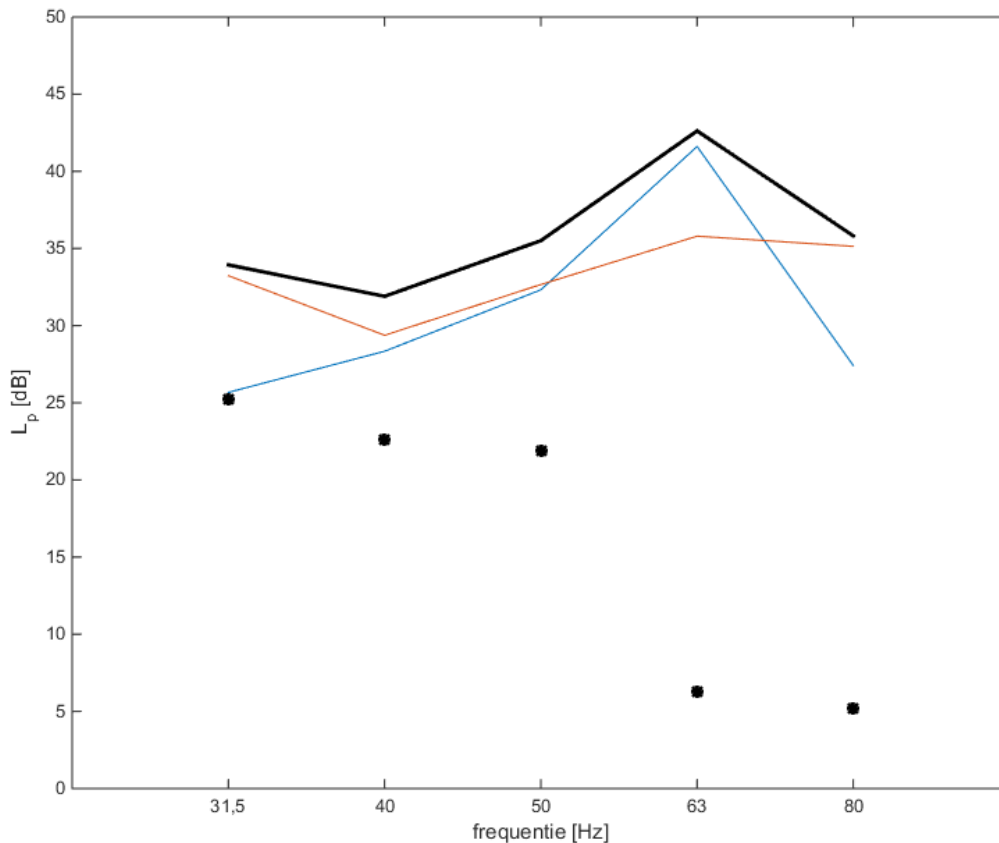
De berekende deelbijdragen tellen opmerkelijk goed op tot het direct gemeten niveau. Bij 31,5 Hz is er weliswaar een verschil maar dat is te wijten aan het missen van de bijdrage van de longitudinale golf in de kolom. Bij 50 Hz is er een overshoot van een paar dB. De goede match tussen berekend en gemeten totaal geeft vertrouwen in de conclusie die uit de grafiek kan worden getrokken dat de kolom in het algemeen en het longitudinale pad daarin in het bijzonder dominant is.



**Figuur 16: bijdrage van elk van de paden aan het geluidniveau in de KMZ; geel is de longitudinale en paars de buiggolf in de kolom; blauw de buiggolf en rood de longitudinale golf in de liftkern; de zwarte lijn is de som van de bijdragen, de gestippelde zwarte lijn het direct gemeten geluid**

Vanaf 63 Hz is de bijdrage van de liftkern niet meer te verwaarlozen. In de 63 Hz tertsbands zelf is er sprake van een piek in de buiggolfbijdrage, wellicht verband houdend met een specifieke trillingsmode in de kern.

Figuur 17 presenteert de situatie waarin de kolommen als pad zouden zijn afgesneden, en dus alleen de liftkern rest. Het effect van het doorsnijden van de kolommen is rond de 20 dB tot en met 50 Hz en rond de 6 dB bij 63 Hz en 80 Hz.

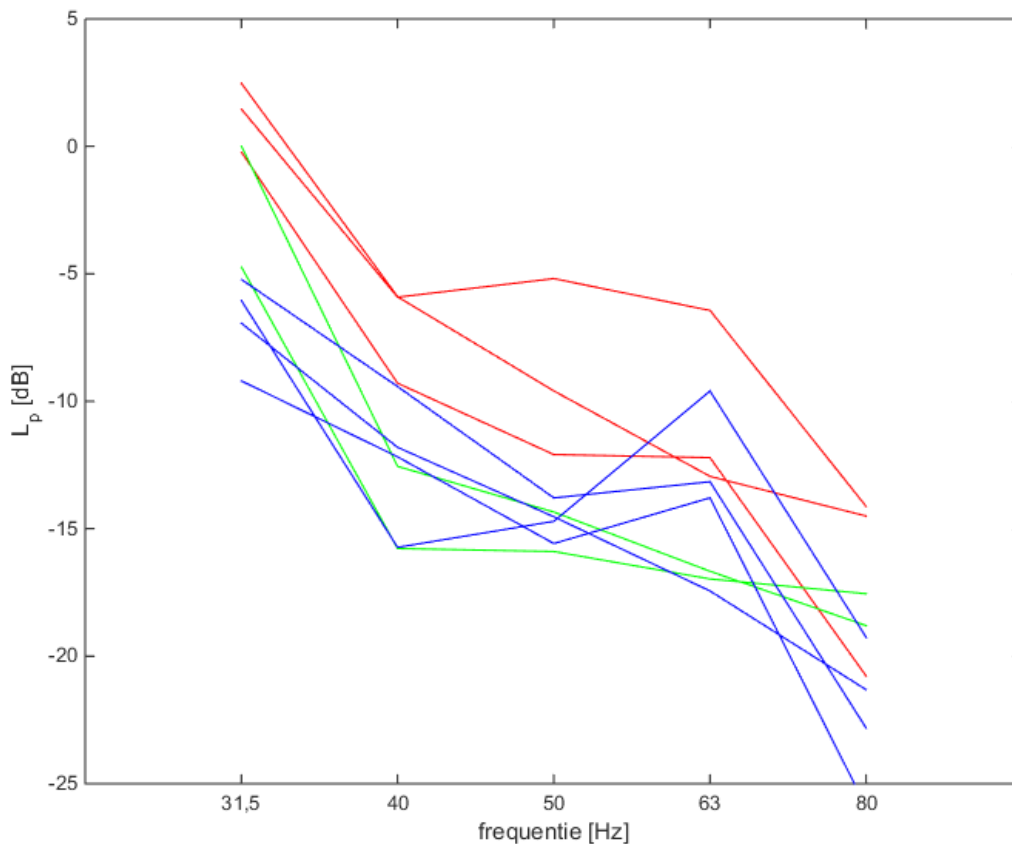


**Figuur 17: bijdrage van elk van de paden aan het geluidniveau in de KMZ bij doorsnijden van de kolommen; blauw is de buiggolf en rood de longitudinale golf in de liftkern; de zwarte lijn is de som van de bijdragen, de vijf stippen betreffen de geluidreductie ten opzichte van de situatie met kolommen**

#### 6.2.2.4 Bijdrage van de feeders in de PZ

Terug naar de metingen waarbij de onbalans niet op een pad selecterend punt was aangebracht maar rondreisde door de PZ geven de "absolute" geluidniveaus een beeld van het relatieve belang van de feeders, de bouwdeelen die worden aangestoten: de podiumvloer, de publieksvloer, de achterwand van het podium en de zijwand van het

podium. Het gaat om een beeld: het trillingsvermogen dat zo'n bouwdeel *in* gaat is wellicht niet steeds hetzelfde geweest omdat naast de kracht van de bron ook de impedantie (massa, demping en stijfheid) van het bouwdeel het doorgegeven vermogen bepaalt. Gezien het relatief grote gewicht van de bouwdelen is overigens niet te verwachten dat de variatie in ingangsvermogen meer zal zijn geweest dan 3 dB. De volgende figuur toont het geluidniveau in de KMZ bij verschillende aanstootposities.



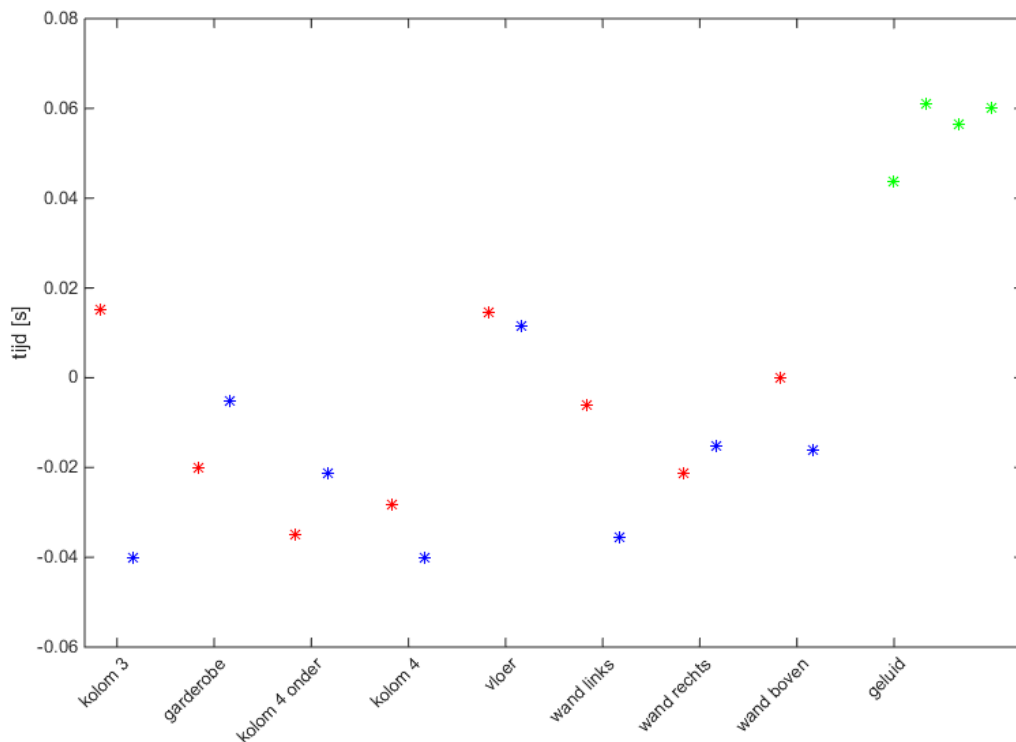
**Figuur 18: geluidniveau in de KMZ bij verschillende aanstootposities in de PZ, genormaliseerd naar een aanstoting van 1 N; rood is podiumvloer, groen is de podiumwand, blauw de publieksvloer**

De podiumvloer zorgt voor de hoogste geluidniveaus in de KMZ. Dit suggereert dat dit een dominante feeder is. De podiumwanden, welke toch dichterbij de centrale paden naar de KMZ liggen (kolommen en liftkernen) zijn minder belangrijk. Dit suggereert dat trillingen vanaf de podiumvloer niet via de wanden maar via de ondervloer in de buitendoos terecht komen en vandaar de kolommen en de kernen bereiken. De afvering van de podiumvloer is waarschijnlijk ook niet optimaal uitgevoerd. Zo is er tijdens de

bouw een “zwakke plek” geconstateerd, juist bij aanstoting op deze plek wordt het hoogste niveau gemeten (bovenste rode lijn).

#### 6.2.2.5 Bijdrage van de feeders in de KMZ

Tot slot kan er nog worden gekeken naar de bijdrage van de verschillende golftypes (buiggolven versus longitudinale golven) en naar de afstraling in de KMZ door de doorkomsttijden op de verschillende meetpunten te bepalen. De tijdsvertraging is geschat als de verschiltijd die de frequentie-afhankelijke fase-relatie tussen twee meetpunten het best verklaard.



**Figuur 19: doorkomsttijden van de sinus (aanstoting met onbalans op podium PZ), relatief t.o.v. meetpunt “wand boven”; groen zijn de microfoons, rood zijn de trillingen uit het vlak (buiggolven) en blauw de trillingen in het vlak (longitudinale golven)**

Het voornaamste wat uit deze grafiek is af te lezen is de tijdvertraging tussen de microfoons onderling en tussen de microfoons en de trillingsopnemers. De snelheid van het geluid in lucht is 340 m/s, de snelheid in de constructie is velen malen hoger, in de orde van duizenden meters per seconde, afhankelijk van het type golf (buig of longitudinaal) en (bij buiggolven) ook de frequentie. Het tijdverschil tussen de microfoons en de trillingsopnemers van minimaal 0,05 seconde komt overeen met 17 meter voorplanting door de lucht (en orde 200 meter in de constructie). Inderdaad

liggen de microfoons, althans nr. 1, 2 en 4, midden in de zaal, op een afstand van meer dan 10 meter van de wanden. Ze staan wel op slechts ongeveer 1,5 meter boven de vloer. Dit suggereert dat niet de vloer maar de wanden, en dan met name de zijwanden geluid afstralen. Dat beeld wordt bevestigd door microfoon 3, hoog in de zaal op het 2<sup>de</sup> balkon. Deze ontvang het geluid gelijktijdig met de anderen, wat dus betekent dat het geluid niet van beneden uit de zaal maar van de wanden moet komen. Overigens toont de relatief vroege binnenkomst van microfoon 1 (podium) dat er een zekere onnauwkeurigheid in deze bepalingen zit.

### 6.3 Conclusies

Uit de geluidmetingen volgt dat de luchtpaden (foyer en schacht) geen dominante paden vormen. Dit wordt onderbouwd door de trillingsmetingen welke de geluidoverdracht volledig kunnen verklaren uit de bijdragen van de kolommen en de liftkernen. De kolommen zijn dominant. Deze dienen dus te worden aangepakt. Maar vanaf de 63 Hz tertsband speelt ook de liftkernen een rol. Zodra de kolommen zijn aangepakt zullen de liftkernen dominant worden en zal de totale verbetering beperkt blijven tot 5 a 6 dB bij 63 en 80 Hz.

Het is onduidelijk wat er vanaf 100 Hz gebeurt. Te verwachten is dat daar de kolommen nog steeds dominant zijn (maar nu door buiging) maar de rol van de liftkern niet zal ophouden.

Uit de trillingsmetingen zijn nog (voorzichtige) conclusies te trekken over de "feeders", de subpaden die aansluiten op de kolommen en de liftkernen.

Het beeld is dat in de PZ het geluid voornamelijk via de podiumvloer en z'n ondervloer in de buitendoos van de zaal terecht komt. Daarbij zij opgemerkt dat de binnendoos niet uitputtend is doorgemeten: de rol van het plafond bijvoorbeeld is niet bepaald.

In de KMZ lijkt het geluid vooral door de wanden (en de balkons?) te worden afgestraald, in tegenstelling tot de beneden vloer.

## 7 Analyse en conclusies

Het theoretisch model en de metingen komen elk apart tot dezelfde conclusies over het belang van de verschillende paden.

Het dominante pad is die door de kolommen. Als dit pad wordt weggenomen verbetert de geluidisolatie met ongeveer 6 dB, zo blijkt uit zowel de berekeningen als de metingen. Het pad kan worden weggenomen door het doorzagen van de kolommen om vervolgens een veer in te brengen om de statische last te dragen. De veer dient in eerste instantie de verticale trillingen te reduceren maar moet ook voldoende torsieslap zijn om de horizontale- en rotatietrillingen te verminderen.

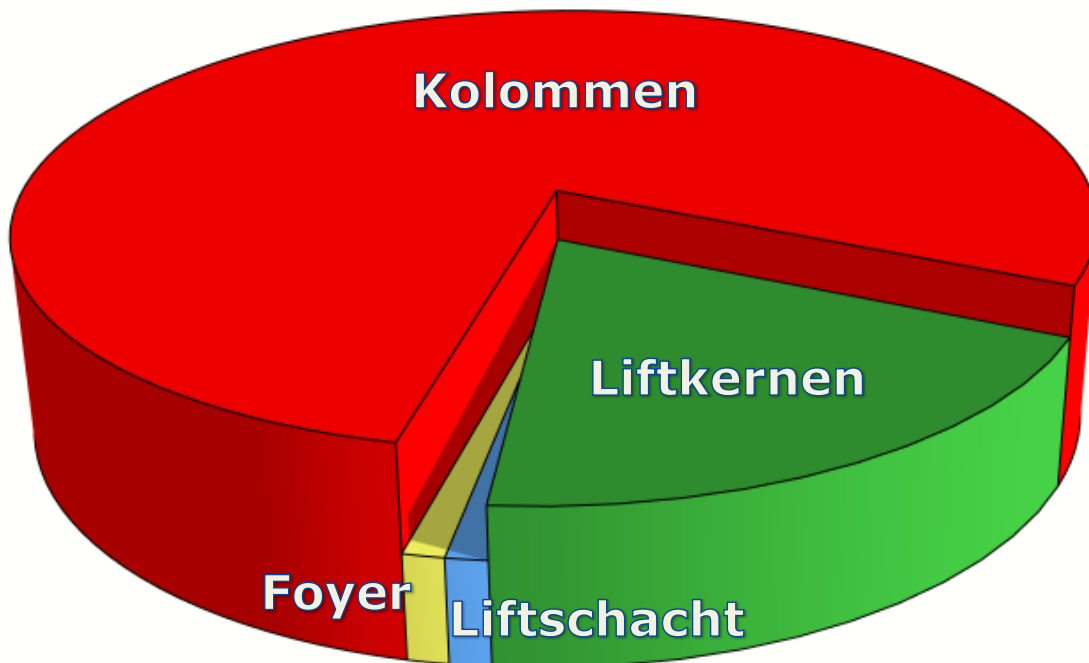
Na het wegnemen van de kolommen als pad resteert een tekort van 3 dB, zo is de verwachting. Het dominante pad is dan die via de liftkernen.

Doorzagen van de liftkern is geen optie. In plaats daarvan moet óf de instraling óf de afstraling worden aangepakt. Aan de bronkant, in de PZ, is volgens de metingen de vloer van het podium de belangrijkste verdachte. Volgens de berekeningen, waarin i.t.t. de metingen *alle* feeders in ogenschouw zijn genomen, zijn in volgorde van belangrijkheid de verdachte feeders: de podiumvloer, de publieksvloer en de zijwanden van het podium.

Aan de ontvangkant, in de KMZ, zijn het de wanden die naar alle waarschijnlijkheid voor teveel geluidafstraling zorgen.

Het is mogelijk dat de podiumvloer in de PZ en/of wanden in de KMZ minder goed geluid tegenhouden dan beoogd. Metingen suggereren dat dat in ieder geval aan de hand is met de podiumvloer. Vervanging/reparatie kan dan al verbetering opleveren. De vloer kan bij vervanging/reparatie ook lagerfrequent worden afgeveerd, waardoor de prestatie verder verbeterd.

Voor het aanpakken van deze feeders is nader onderzoek nodig. Het huidige onderzoek heeft zich geconcentreerd op het bepalen van de dominante paden, waarmee al een groot deel van de puzzel, maar nog niet de gehele is opgelost.



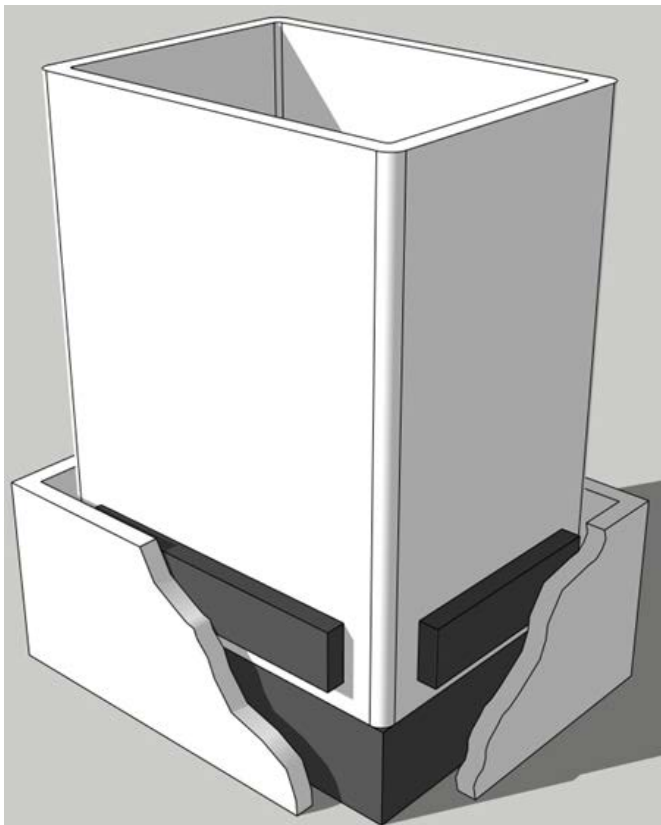
Figuur 20: relatieve bijdrage aan de totale geluidenergie in de KMZ vanwege geluid uit de PZ

## 8 Maatregelen

Er dient in ieder geval een maatregel te worden genomen aan de kolommen. Waarschijnlijk zijn er ook maatregelen nodig in verband met de overdracht via de liftkernen.

### 8.1 Kolom

Het dominante geluidpad via de vier stalen kolommen is akoestisch te onderbreken door de kolommen door te zagen om er rubber veren onder te plaatsen. De eigenschappen van de veren worden zodanig gekozen dat de afveerfrequentie zo laag mogelijk, namelijk bij 10 Hz ligt. Bij 20 Hz en hoger is er dan sprake van een reductie van de trillingsvoortplanting. Vanaf 30 Hz kan dat zeker 12 dB bedragen. De effectiviteit van de veer en de afveerfrequentie die wordt bereikt, hangt bij een relatief lichte constructie als de KMZ ook af de dynamica van de constructie die er op rust. Er is geen sprake van een ideaal "massa-veer-systeem".



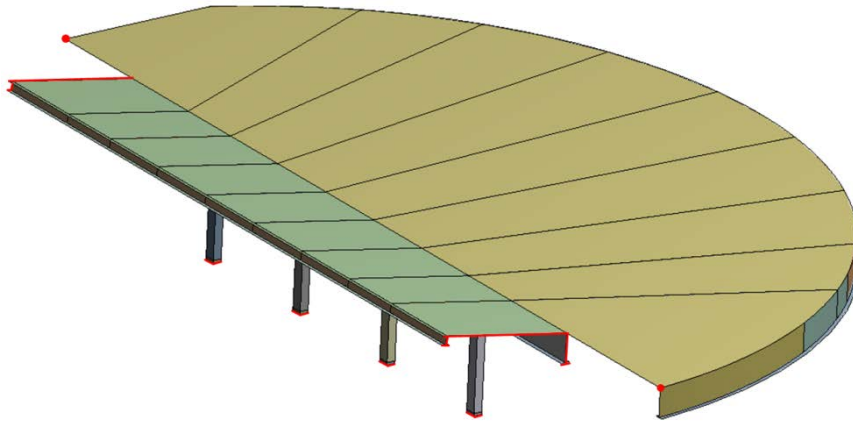
De statische last die op een kolom rust is relatief slap en zal bij binnenkomende trillingen niet in zijn geheel meegaan. Het gedeelte dat wel mee gaat, de "dynamische massa" bepaalt, samen met de veer, de effectiviteit van de veer. Om de veer te ontwerpen dient dus eerst de dynamische massa te worden bepaald. Daartoe is een numeriek model gemaakt op basis van de eindige elementen methode. In het volgende worden het model, de simulatie en de resultaten beschreven.

#### De modelopbouw

De vloer van de kamermuziekzaal is gemodelleerd als een samenstel van betonnen platen en stalen liggers/kolommen. In Figuur 22 wordt de geometrie van het model weergegeven.

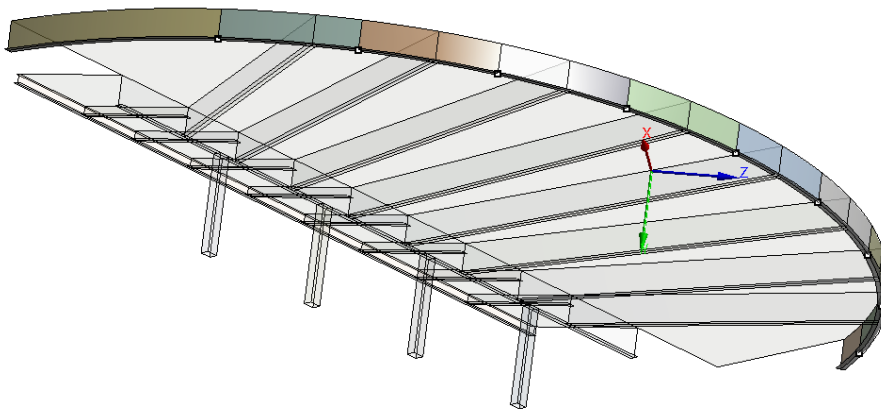
Figuur 21: veer onder de kolom



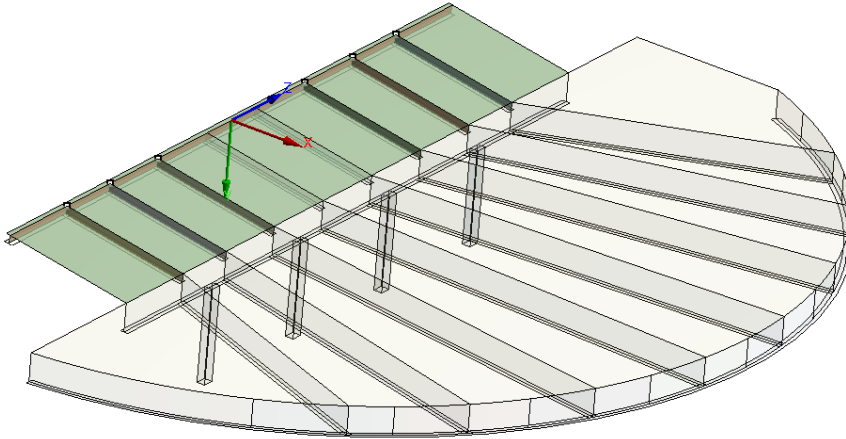


**Figuur 22: de geometrie van het eindige elementen model van de vloer van de kamermuziekzaal.**

Met rood is aangegeven waar de vloeren en de liggers/kolommen verbonden zijn met de vaste wereld. Aangezien de vier kolommen de kern van dit onderzoek betreffen, zijn zij expliciet in het model meegenomen. De overige kolommen zijn niet expliciet gemodelleerd. Deze zijn grotendeels vervangen door veren die aan de vaste wereld verbonden zijn. De veerstijfheden zijn zo gekalibreerd, dat de statische last in de 4 kolommen van het onderzoek overeenkomen met de statische lasten zoals aangeleverd door Zonneveld. In Figuur 22 en Figuur 23 worden de posities van de gekalibreerde veren met witte stippen aangegeven.

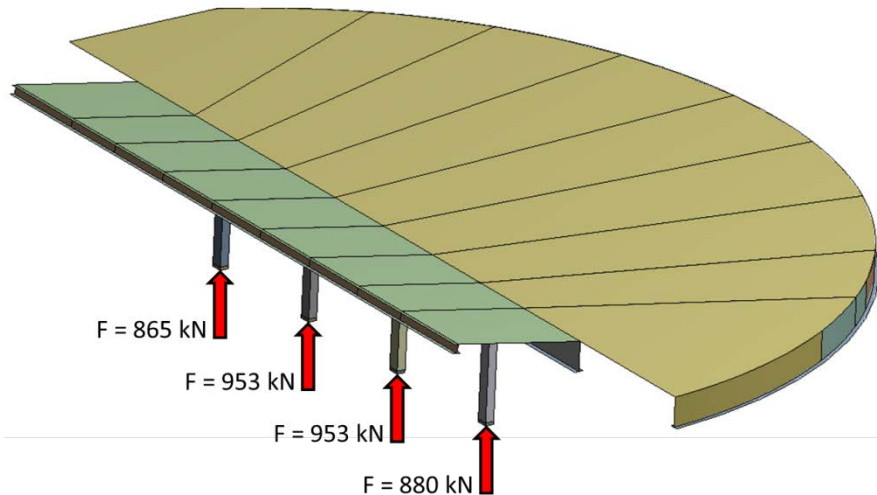


**Figuur 23: met negen witte stippen zijn de posities van de gekalibreerde veren onder de vloer aangegeven**



Figuur 24: met zes witte stippen zijn de posities van de gekalibreerde veren boven de vloer aangegeven

De veerstijfheid van de veren in Figuur 22 is bepaald als  $k = 6 \cdot 10^7$  N/m, en de veerstijfheid van de veren in Figuur 23 is bepaald als  $k = 9 \cdot 10^7$  N/m. De resulterende statische lasten in de vier kolommen zijn in Figuur 25 weergegeven.

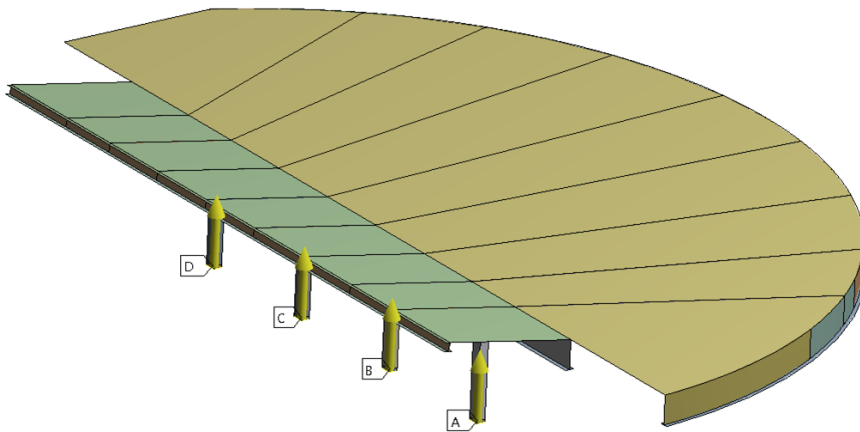


Figuur 25: de resulterende statische last in de kolommen na kalibratie van de veren

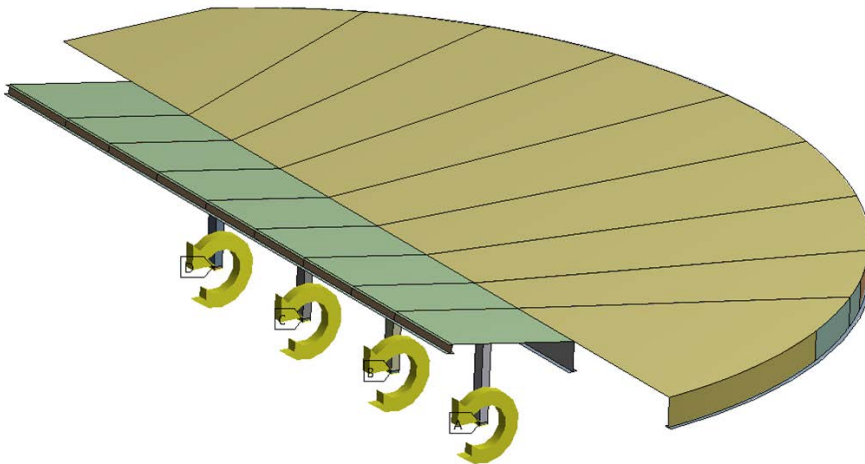
### 8.1.2 De simulatie

Het effect van de veren onder de vier kolommen wordt aangetoond met behulp van een harmonische responsie analyse van de trillingsamplitude gemiddeld over de vloer. Twee

aanstoetvormen zijn onderzocht. In het eerste geval is er sprake van een éénheidsverplaatsing onder de kolommen in verticale richting, zie Figuur 26. In het tweede geval is er sprake van een éénheidsverdraaiing onder de kolommen, zie Figuur 27. Beide aanstoetvormen zijn van belang bij het geluidpad via de kolommen.



Figuur 26: de verticale éénheidsverplaatsing als aanstootbron onder de kolommen



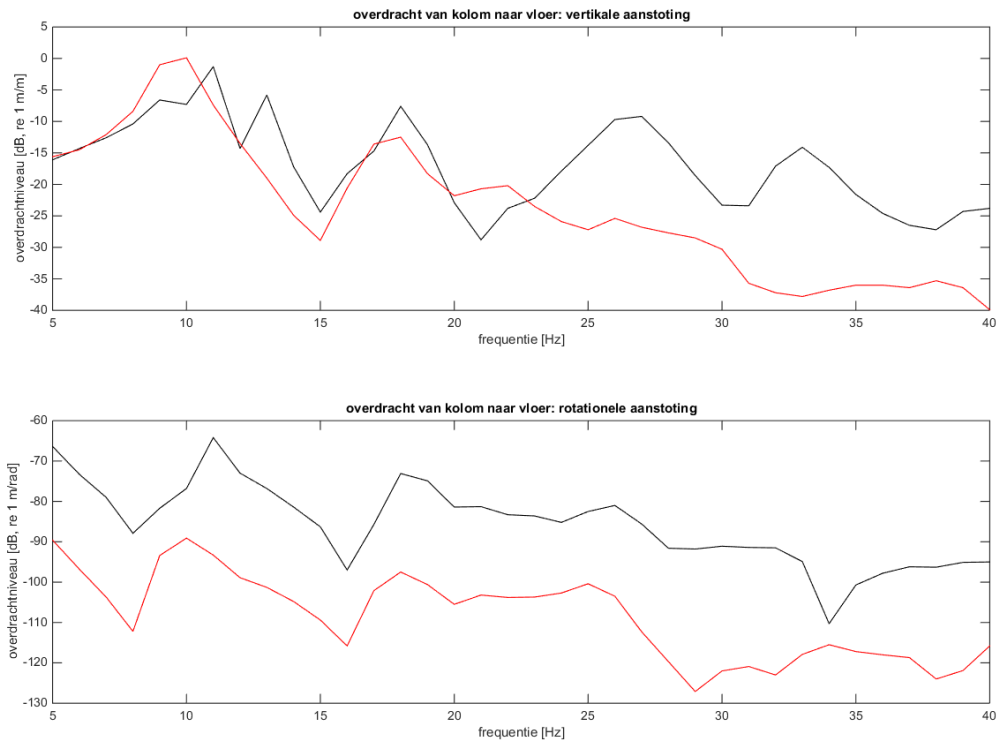
Figuur 27: de éénheidsverdraaiing als aanstootbron onder de kolommen

Beide typen aanstotingen worden toegepast in een model zonder, dan wel met afvering van de vier kolommen. Door de harmonische responsie van de vloer in beide gevallen met elkaar te vergelijken, kan de afveerfrequentie en het ontkoppelende effect bij de hogere frequenties aangetoond worden.

De harmonische responsie is berekend in het frequentiebereik van 5 Hz t/m 40 Hz. In het gehele frequentiedomein is voor alle onderdelen van het model een dempingsratio van 3% aangenomen, hetgeen een afschatting is van de systeemdemping.

### 8.1.3 De resultaten

De rubber veren onder de kolommen zijn zodanig gemodelleerd dat de verhouding tussen de verticale (translatie-) stijfheid en de rotatiestijfheid overeenkomt met de verhouding in een werkelijke veer die de lengte en breedte heeft van de kolom. De benodigde (translatie-) stijfheid van de rubber veren onder de kolommen is bepaald op  $1,8 \cdot 10^8 \text{ N/m}$ . De resulterende harmonische responsies zijn in Figuur 28 weergegeven.



**Figuur 28: trillingsoverdracht zonder veren (zwart) en met veren (rood) bij verplaatsing (boven) en rotatie (onder)**

De grafieken laat de harmonische responsie zien van de trillingsamplitude van de vloer van de KMZ (gemiddeld over de vloer) ten gevolge excitatie onder de kolommen. De eerste grafiek betreft een excitatie door een eenheidsverplaatsing, wat karakterstiek is

voor longitudinale golfvoortplanting. De tweede grafiek betreft een eenheidsrotatie, welke optreedt bij buiggolven.

In beide grafieken worden de responsies met rubber veren (rood) en zonder rubber veren (Zwart) met elkaar vergeleken.

Uit de eerste grafiek blijkt door de opslingering van de rode curve, dat de afveerfrequentie van de toegepaste rubbers bij 10 Hz ligt. De akoestische ontkoppeling bij frequenties boven de afveerfrequentie, vanaf 25 Hz, is ook duidelijk te zien. Uit deze afveerfrequentie volgt een dynamische last van **455 kN**, hetgeen de helft is van de statische last.

Boven de 25 Hz is het invoegverlies van de veren zo'n 15 tot 20 dB daar waar de vloer sterk opslingeren en slechts 5 tot 10 dB waar de vloer al relatief stil staat. Dit kan worden verklaard uit dynamisch gedrag van de vloer ter plekke van de aansluiting met de kolommen. Bij die frequenties waar de kolommen aansluiten op *buiken* van een staande golf in de vloer voelt de vloer voor de kolom relatief slap en is de modale (meewerkende) massa relatief hoog. Het inbrengen van de rubberen veer krijgt daar het karakter van een effectief massa-veer systeem met een relatief hoge massa, bijbehorende lage afveerfrequentie en daaruit volgend relatief hoog invoegverlies bij de aanstootfrequentie. Bij de frequenties waar de kolom aansluit op *knopen* van een staande golf is het omgekeerde aan de hand. De vloer is relatief stijf voor de kolom, komt ook daardoor weinig op gang, de kolomaanstoting krijgt het karakter van een krachtaanstoting en het invoegen van een veer verandert daar weinig aan.

Uit de tweede grafiek blijkt dat de effectieve rotatiestijfheid van de toegepaste rubbers zo laag is dat de afveerfrequentie onder 5 Hz ligt. Voor frequenties binnen en boven het geanalyseerde frequentiedomein werken de rubber veren voor rotatieaanstotingen als een scharnier.

## 8.2 Liftkern

Aan de liftkern zelf is weinig te doen. De constructie is bijzonder massief en speelt een belangrijke rol in de stabiliteit van het gebouw.

Dat betekent dat, indien blijkt dat na de aanpak van de kolommen er nog teveel geluidoverdracht resteert, de "feeders" moeten worden aangepakt: die bouwdelen in de PZ of de KMZ die het geluid naar de liftkern brengen en van de liftkern de zaal in.

Akoestisch maakt het niet zoveel uit of aan de zendkant (de PZ) of aan de ontvangkant (de KMZ) de maatregelen worden genomen.

Aan een van beide kanten moet één of beide ingrepen plaatsvinden:

- de buitendoos akoestisch ontkoppelen van de liftkern
- de binnendoos beter ontkoppelen van de buitendoos

Heel concreet wordt op dit moment gedacht aan het vervangen van de zwevende dekvloer in de PZ. Dit is nog onderwerp van nadere studie.

## Bijlage 1 : geluidisolatie per pad

Volgens het theoretisch model, na update met meetresultaten

pad	nr	31,5	63	125	250	house
D-PZzaaldak	9 a	48	56	53	62	60
D-PZpodiumdak	9 b	61	61	68	78	72
D-PZvlr-spouw>dak	9 c	65	80	106	155	93
D-PZpodiumaw>dak	9 d	82	86	101	111	99
<b>D PZ-Foyer</b>		24	36	54	71	49
D-vloerkmz	1 a	35	39	58	72	52
D-wndpkmz	1 b	25	39	56	79	52
<b>D-FOYER-KMZ</b>		26	37	55	72	
<b>A. via foyer</b>		<b>72</b>	<b>91</b>	<b>106</b>	<b>133</b>	<b>102</b>
Podiumaw>dak>kolom>vloer	11-20-19-34-7-5/6-2	70	76	97	107	88
Podiumdak>kolom>vloer	10-16/17-32-7-5/6-2	86	91	113	123	104
Dak2>>kolom>vloer	nog niet in schets	72	82	96	108	94
Podiumvlr>aw>dak>kolom>vloer	12-26/28-25-23-34-7-5/6-2	63	72	99	109	84
<b>B. via kolom</b>		<b>62</b>	<b>70</b>	<b>92</b>	<b>103</b>	<b>83</b>
Ddeur>schacht>kmz	15-41-nw pad	90	96	119	143	108
Dzijwand>kern>kmz	14-39/40-nw pad	80	86	102	116	99
Dpodiumvlr>kern>kmz	12-26/28-37-nw pad	74	83	105	119	96
Dpublklvr>kern>kmz	13-30/31-38-nw pad	77	84	107	122	97
Dpodiumaw>kern>kmz	11-21-22-23/20/19-36-nw pad	88	93	108	122	106
Dpodiumdak>kern>kmz	10-16/17-35-nw pad	89	93	108	122	106
Ddeur>schacht>kmz vlr	15-41-8-5/6-2	93	99	127	147	112
Dzijwand>kern>kmz vlr	14-39/40-8-5/6-2	89	95	118	128	108
Dpodiumvlr>kern>kmz vlr	12-26/28-37-8-5/6-2	83	92	121	131	105
Dpublklvr>kern>kmz vlr	13-30/31-38-8-5/6-2	85	93	123	134	106
Dpodiumaw>kern>kmz vlr	11-21-22-23/20/19-36-8-5/6-2	97	102	124	134	115
Dpodiumdak>kern>kmz vlr	10-16/17-35-8-5/6-2	94	99	121	131	112
<b>C. via liftkern</b>		<b>68</b>	<b>76</b>	<b>95</b>	<b>110</b>	<b>89</b>
<b>D PZ-KMZ totaal</b>		<b>61</b>	<b>69</b>	<b>90</b>	<b>102</b>	<b>82</b>

## Bijlage 2: parameterwaardes EN12354

Het theoretisch model, gebaseerd op EN12354, is gevoed met de volgende parameterwaardes.

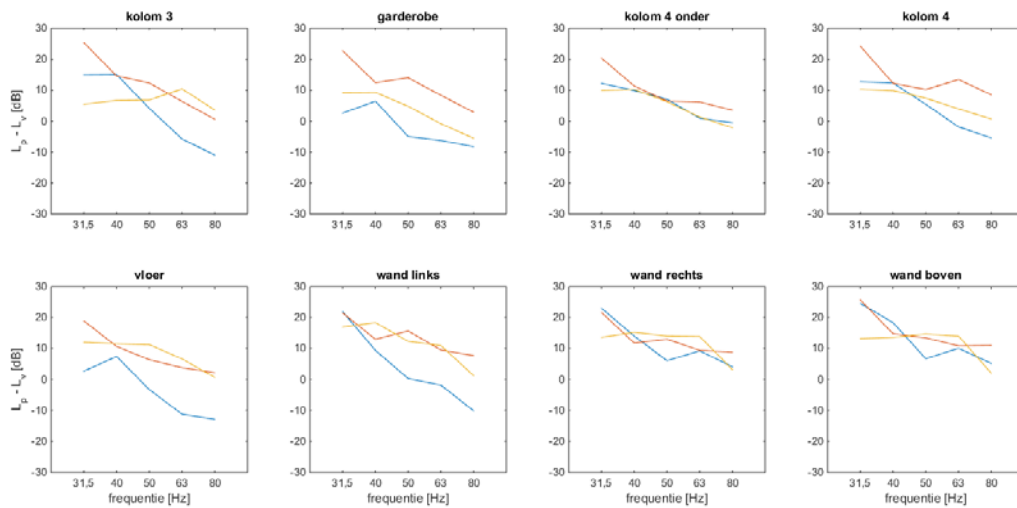
R (15 x 20m2)	31,5	63	125	250	500	1000	2000	pop	house	binnengeluid
KMZ lichte spouw 500mm	22	37	53	76	102	110	91	62	49	74
KMZ vlr dil s12Hz	36	40	58	73	86	99	114	66	53	79
PZ btwnd dil	56	59	69	79	87	94	101	80	70	87
PZvlr s16HZ dil	32	36	53	68	80	93	108	62	49	74
PZ lichtdak 150bt	33	36	31	35	45	54	62	41	37	46
PZ liftdeur	30	35	45	55	55	55	55	53	46	55
<b>R (alleen vrij)</b>										
wnd 400 beton (vrij)	41	37	45	54	62	69	74	56	48	62
wnd 300 beton (vrij)	39	33	38	48	56	64	71	50	43	56
vlr 600 kg/m2 = 260 beton (7x20)	39	34	36	47	55	63	70	49	42	55
vlr 600 kg/m2 = 260 beton (15x20)	40	33	35	45	54	62	69	47	41	53

knooppunt	Kij (dB/oct)
300bt T 300bt-T	6
300bt T 300bt-hoek	-2
120bt>300bt	3
kern langs foyer vloer	4
kern naar KMZvlr	6
wnd-koker-wand/ 1 koker	5
vloer-kolom-vloer/ 1 kolom	10
zij > kern>krn kmz	6
zij > kern>vlr kmz	15
pod/publvr > kern>krn kmz	17
pod/publvr > kern>vlr kmz	28
plaf > kern>krn kmz	8
plaf > kern>vlr kmz	16
awj > kern>krn kmz	15
awj > kern>vlr kmz	26

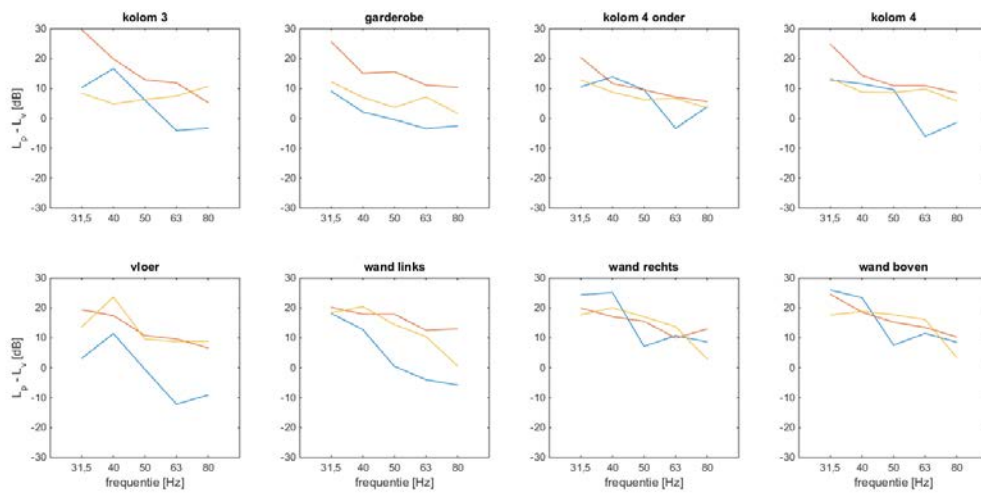


$\Delta R$	31,5	63	125	250	500	1000	2000
PZ podiumdoos300	21	26	31	31	31	30	30
PZ podiumdoos met koppelingen	15	20	25	25	25	25	25
PZvlr 12Hz 300m2	-1	8	20	20	20	20	20
PZvlr 16Hz 300m2	-3	5	20	20	20	20	20
KMZ tussenruimte rond liftkern	2	7	10	15	15	15	15
KMZ vlr dil s12 300 m2	0	7	20	20	20	20	20
vrijhangend plaf, grote spouw	10	15	17	22	27	30	30

### Bijlage 3: onbalans overdracht trillingen naar geluid

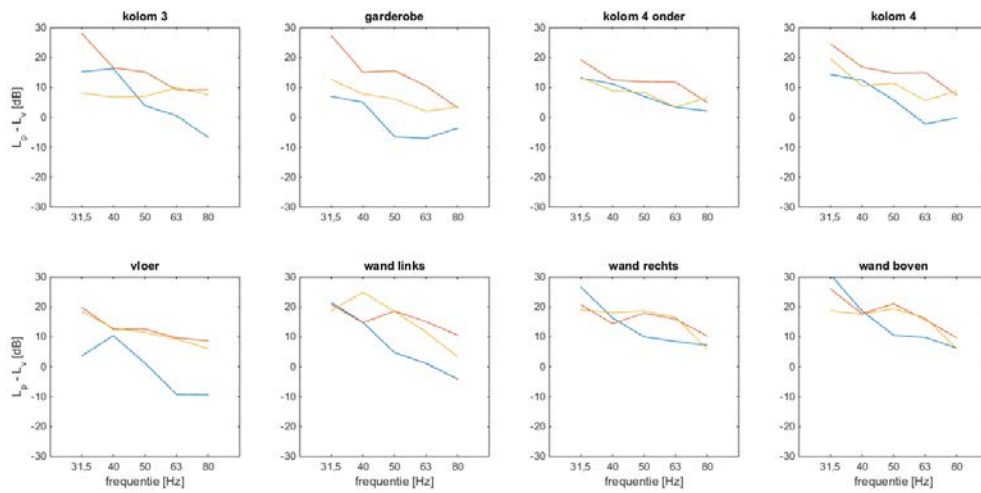


Figuur 29: aanstoting op podium vloer, aanstootpositie 1, P1

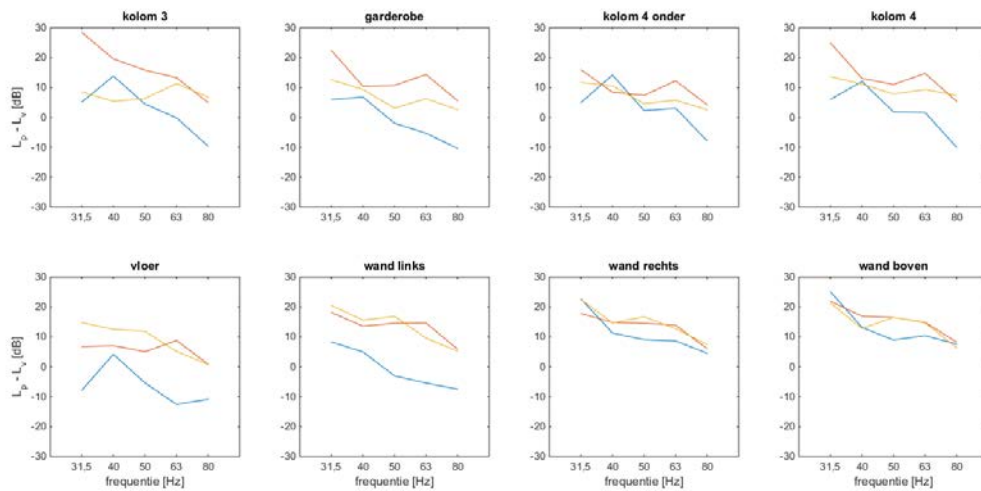


Figuur 30: aanstoting op podium vloer, aanstootpositie 2, P2

Datum: 26 oktober 2014

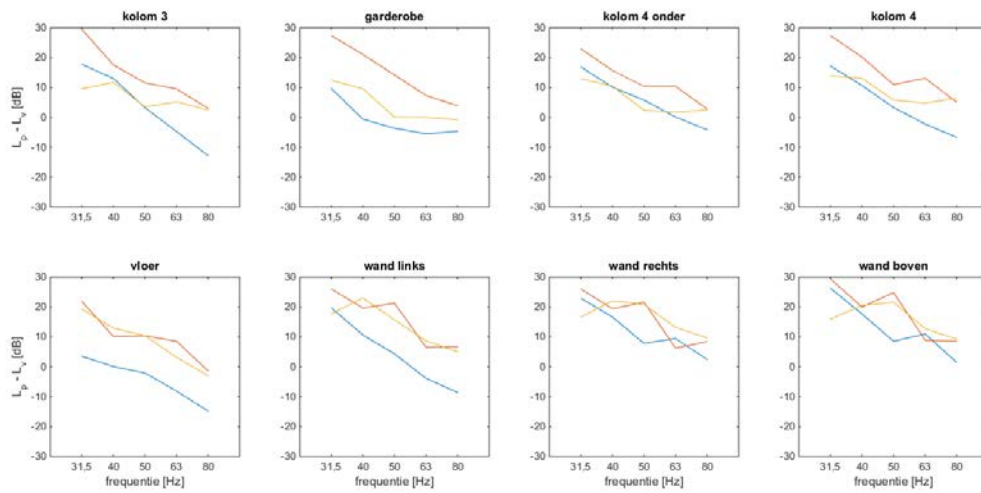


Figuur 31: aanstoting op podium vloer, aanstootpositie 3, P3

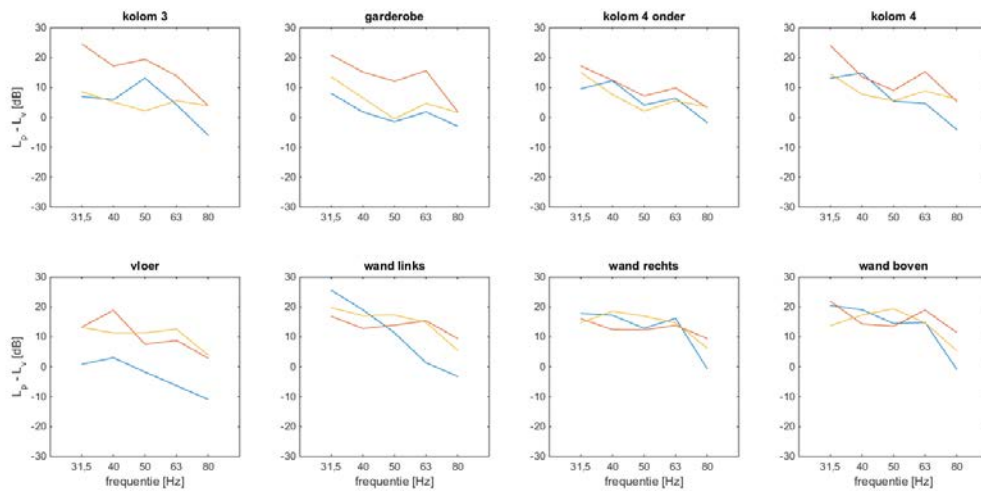


Figuur 32: aanstoting op zijwand podium, aanstootpositie 4

Datum: 26 oktober 2014

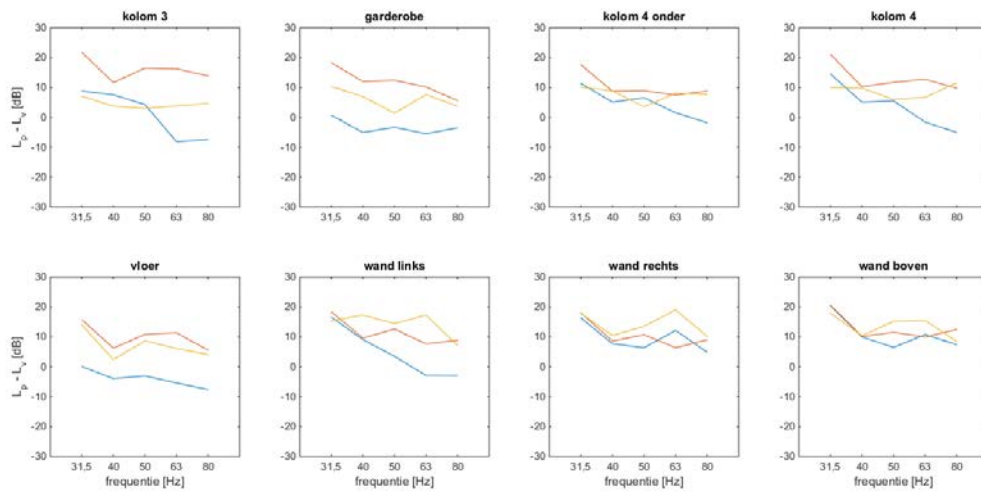


Figuur 33: aanstoting op achterwand, aanstootpositie 5

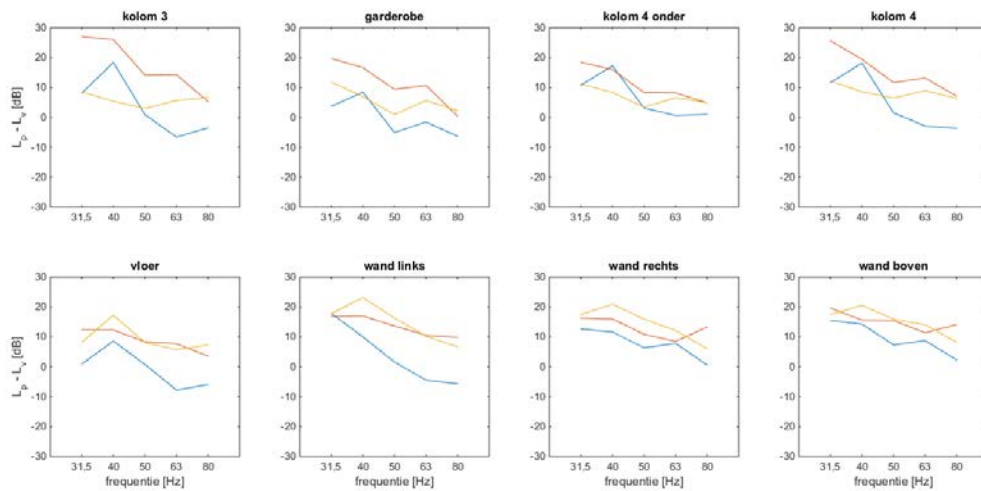


Figuur 34: aanstoting op publiekvvloer, aanstootpositie 6, Z1

Datum: 26 oktober 2014

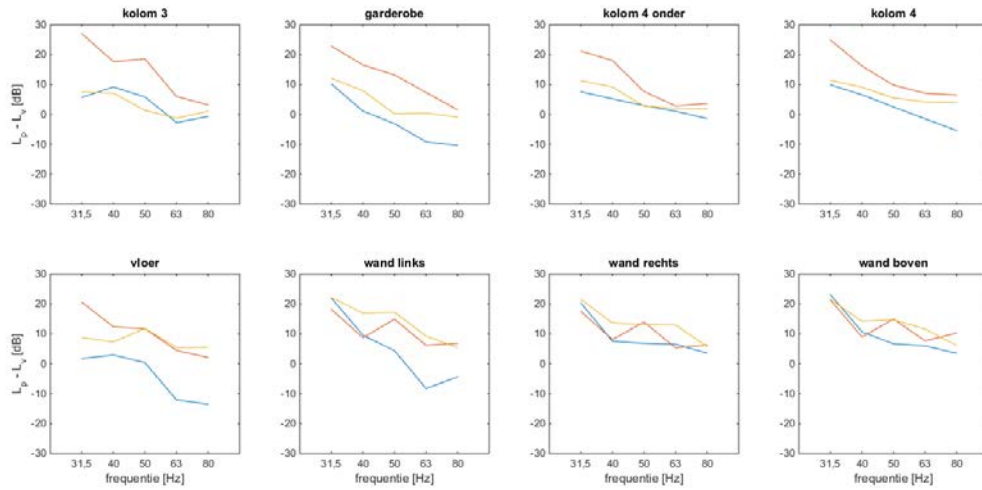


Figuur 35: aanstoting op publiekvvloer, aanstootpositie 7, Z2

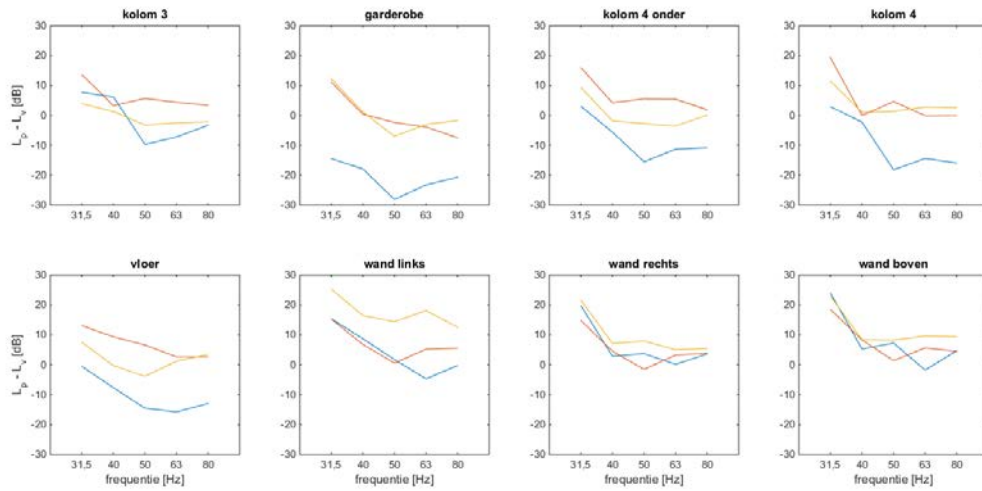


Figuur 36: aanstoting op publiekvvloer, aanstootpositie 8, Z3

Datum: 26 oktober 2014

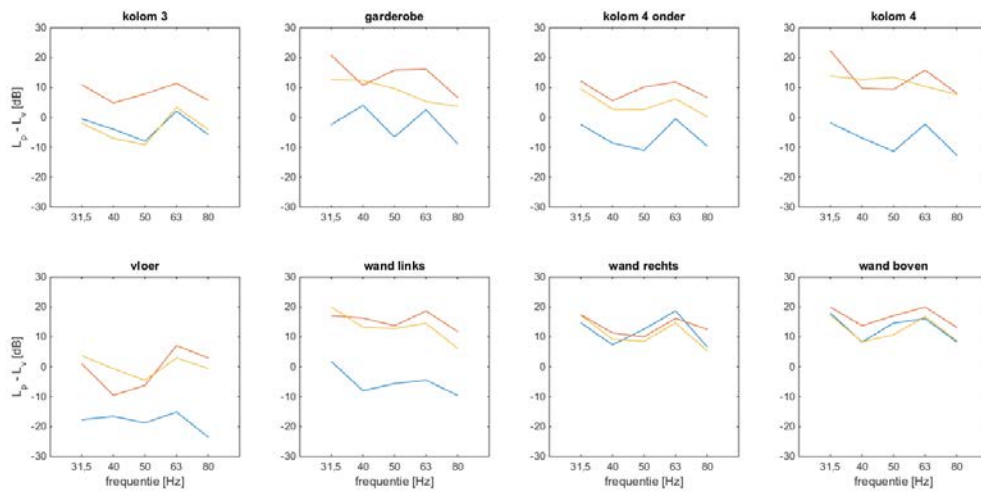


Figuur 37: aanstoting op publiekvvloer, aanstootpositie 9, Z4

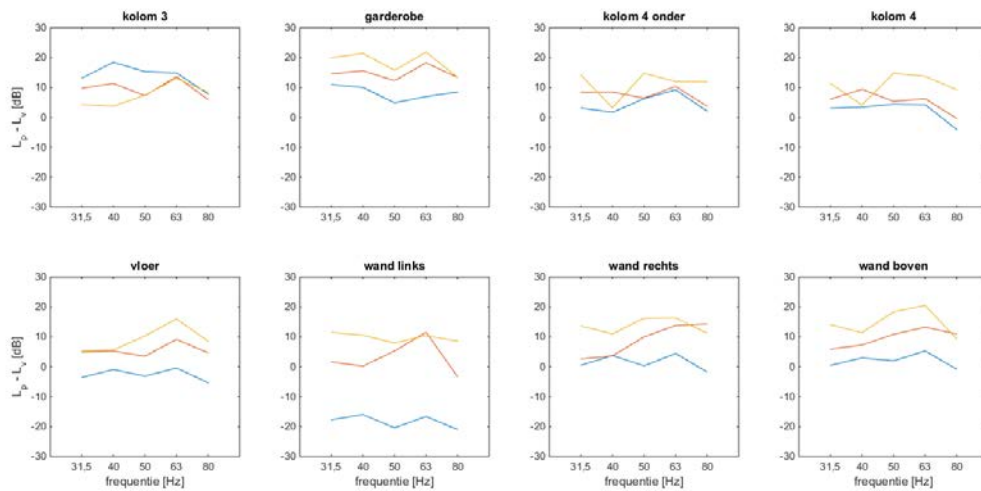


Figuur 38: aanstoting op achterwand / garderobe, aanstoting 10

Datum: 26 oktober 2014

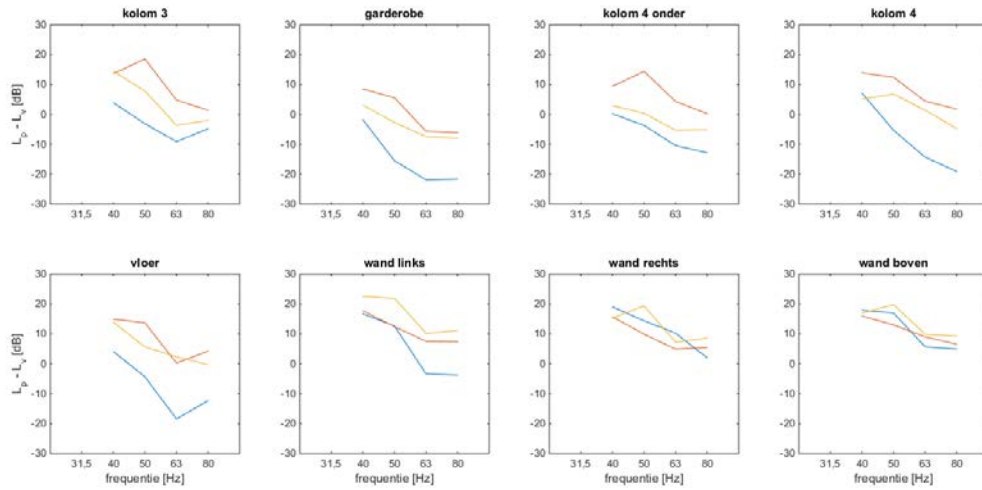


Figuur 39: aanstoting op vloer foyer, aanstootpositie 11

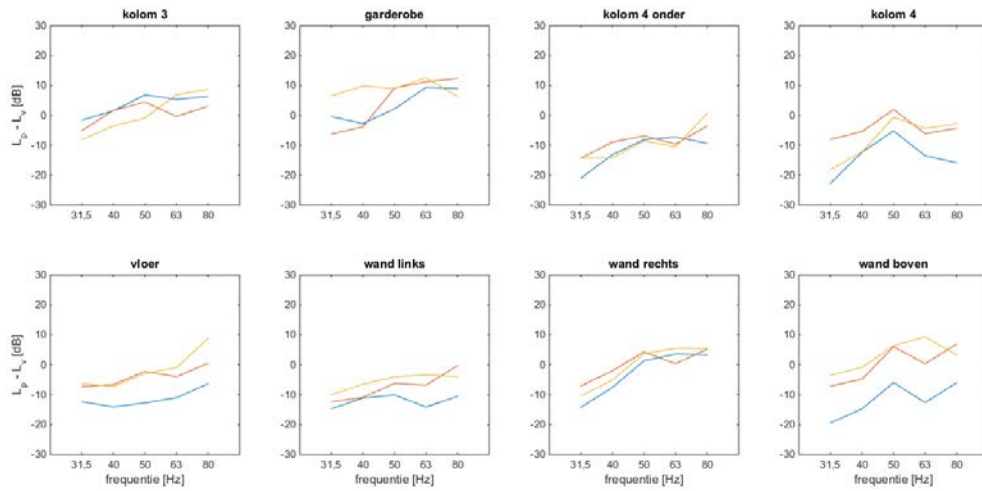


Figuur 40: aanstoting op liftkern, aanstoting 12

Datum: 26 oktober 2014



Figuur 41: aanstoting op achterwand / garderobe, aanstoting 13 (in vlak)



Figuur 42: aanstoting op liftkern, aanstoting 14 (in vlak)



## **Bijlage 4: ontwerpuitgangspunten uit 2009**