

30 Mei 2019

Whiswall: Empirisch en Computatief Geluidweringsonderzoek

Een onderzoek naar de geluidwering van de Whiswall door middel van
geluidmetingen en een COMSOL-model

Door J. Ruis – 15101843

Bachelor Thesis
(Technische Natuurkunde)

Begeleider bedrijf:
Ir. R. Cornelis

Begeleider hogeschool:
Drs. D.D. Land



Voorwoord

Het document dat voor u ligt is de afsluiting van een zeventien weken durende afstudeerperiode bij Sweco Nederland. Dit is tevens de afsluiting van de studie HBO-Technische Natuurkunde aan de Haagse Hogeschool te Delft.

Het onderzoek dat is uitgevoerd is mede mogelijk gemaakt door een aantal mensen. Om te beginnen wil ik graag mijn begeleider vanuit Sweco de heer Rob Cornelis en mijn begeleider vanuit de hogeschool de heer Derk Land bedanken.

Hierbij wil ik ook de heren: Ysbrand Wijnant, Eric de Vries en Bert Jan Danker van 4Silence, Arnaud Kok van het RIVM en Nils Yntema van ProRail bedanken. Met veel dank aan de heer François Mandias voor het verstrekken van een trial COMSOL-licentie voor dit onderzoek. Hartelijk dank aan de dames Jeannine van de Vorst en Maartje Daan voor hun bijdrage aan de geluidmetingen. Met dank aan Brigit Valentijn van de Provincie Utrecht voor het verlenen van toestemming voor het uitvoeren van geluidmetingen in Soesterberg.

Hiernaast wil ik de heren Willy Slokkers, Sander Goesten, Pim van de Steeg, Kenneth Wong, Floris Oldewarris, Pieter Bouwma en de dame Mujgan Omary bedanken voor hun hulp, tips en adviezen bij dit onderzoek.

Ik kijk met plezier terug op mijn afstudeerstage bij Sweco en wil graag iedereen bedanken die dit voor mij heeft mogelijk gemaakt.

Samenvatting

Dit onderzoek is uitgevoerd om een inzage te krijgen van de geluidwering van de Whiswall van 4Silence. Hierbij is een theoretische benadering gemaakt door middel van een COMSOL-model dat getoetst is aan de praktijk.

Het COMSOL-model is gebaseerd op een lijnbronkarakteristiek met betrekking tot de afstandsdemping en is getoetst aan L_{eq} waardes die volgen uit passagemetingen van een 60 ± 5 km/u rijdende Ford Mondeo.

De bepaalde geluidwering die volgt uit de metingen varieert op basis van L_{max} tussen 0,0 – 12,6 dB(A) voor verschillende beschouwde posities achter de Whiswall.

De bepaalde geluidwering op basis van L_{eq} varieert tussen -0,2 – 9,5 dB(A) voor dezelfde posities. Hierbij zijn octaafbanden met middenfrequenties van 63 Hz tot en met 8 kHz beschouwd.

Het COMSOL-model voldoet voor een aantal beschouwde situaties.

Hierbij is de geluidwering uit het model per octaafband toegepast over meetresultaten zonder Whiswall en is het totale geluidniveau in dB(A) vergeleken met meetresultaten achter de Whiswall.

Inhoudsopgave

1. Inleiding	1
1.1 Vooronderzoek	2
1.2 Aanleiding	3
1.3 Probleemstelling	3
2. Theorie	4
2.1 Het golfgedrag van geluid	5
2.2 Beoordelingswijze en maatgeving	6
2.2.1 Het menselijk gehoor	7
2.2.2 Frequentiebanden	7
2.3 Geluid naar de omgeving	9
2.3.1 Afstandsdemping voor een punt- en lijnbron	10
2.3.2 Passagemeting van een voertuig	11
2.4 Diffractorprincipe.....	12
3. Meetwijze	13
3.1 Opstelling en gebruikte apparatuur	13
3.2 Werkwijze	14
4. Model.....	16
4.1 Modellerings.....	17
4.2 Simulaties.....	18
5. Resultaten	19
5.1 Geluidmetingen	19
5.1.1 Analyse geluidmetingen.....	19
5.1.1.1 Positie 2.....	20
5.1.1.2 Positie 1.....	21
5.1.2 Geluidwering van de Whiswall.....	22
5.2 Simulaties.....	24
5.3 Toetsing van het model	26
5.3.1 Kritische beschouwing resultaten	27
6. Conclusie	28
7. Aanbeveling	29
7.1 Toepassing resultaat en vervolgonderzoek	29
Referenties.....	31

1. Inleiding

Een gezonde leefomgeving is van groot belang voor iedereen. Geluidoverlast draagt hier niet aan bij en heeft gevolgen voor de gezondheid. Mensen met woningen langs snelwegen, spoorwegen, industrieterreinen en vliegvelden hebben hier vaak last van [1]. De effecten op de gezondheid zijn gedeeltelijk afhankelijk van de eigenschappen van het geluid, zoals de intensiteit, frequentie en duur [2]. Hiernaast spelen psychologische factoren een rol zoals gevoeligheid en angst voor geluid, verwerkingsgedrag en hoe men over de bron van het geluid denkt [2]. Geluiden die wél als prettig worden ervaren hebben wellicht een positief effect op de gezondheid doordat ze stress dempend zouden zijn [2].

“In Nederland worden jaarlijks ongeveer 84 hartinfarcten veroorzaakt door langdurige blootstelling aan wegverkeergeluid” [2]. “Ongeveer 5 hartinfarcten worden per jaar gerelateerd aan verkeergeluid van rijkswegen en ongeveer 7 aan geluid van spoorwegen” [2]. Geluidoverlast van wegverkeer staat samen met passief roken op de gedeelde 2^e plaats van factoren die in de fysieke leefomgeving de meeste ziektelast met zich meebrengen; dit blijkt uit onderzoek van het WHO [3].

Om geluidhinder te beperken kunnen maatregelen genomen worden bij de bron, in de overdracht of bij de ontvanger. Onder traditionele geluidmaatregelen bij rail- en wegverkeer worden onder andere de volgende toepassingen verstaan:

- *Bronmaatregelen*: Stiller wegdek zoals 2-laags Zeer Open Asfalt Beton (ZOAB), dunne deklagen en raildempers.
- *Overdrachtsmaatregelen*: Geluidschermen, geluidwallen, middenbermschermen en schermtoppen
- *Ontvangermaatregelen*: Gevelisolatie.

In de ‘Regeling geluid milieubeheer’ [4] zijn de bovengenoemde geluidbeperkende maatregelen vastgelegd. De rekenkundige toepassing van geluidmaatregelen in akoestische rekensoftware zoals ‘Geomilieu’ gaat conform het Reken- en Meetvoorschrift Geluid 2012 [5]. In dit voorschrift is opgenomen hoe de invloed van een geluidmaatregel bepaald dient te worden ten behoeve van de bepaling van de geluidbelasting. Vervolgens vindt toetsing aan de normstelling uit de wet- en regelgeving plaats.

De huidige Wet geluidhinder en onderliggende besluiten- en regelingen zullen naar verwachting in 2021 komen te vervallen omdat dan de ‘Omgevingswet’ in werking treedt [6]. Voor geluidhinder op geluidgevoelige objecten treedt er dan een nieuwe wet in werking: ‘De Aanvullingswet geluid Omgevingswet’ [7]. De aankomende wet- en regelgeving biedt naar verwachting meer mogelijkheden met betrekking tot de toepassing van innovatieve geluidmaatregelen in tegenstelling tot de huidige wetgeving. Onder innovatieve geluidmaatregelen worden maatregelen verstaan die nog niet gestandaardiseerd zijn binnen wet- en regelgeving.

Omdat de toepassing van innovatieve geluidmaatregelen niet volgens een bepaalde wet- en regelgeving gaat is de toepassing ervan in de dagelijkse adviespraktijk lastiger. Dit komt dus mede omdat er nog geen gestandaardiseerde rekenvoorschriften zijn opgenomen in de huidige wetgeving. Er is echter een steeds grotere vraag naar maatwerkoplossingen. Voor adviesbureaus die akoestisch onderzoek verrichten rondom infrastructuur is het daarom wenselijk om meer inzicht te krijgen in de beschikbare of in ontwikkeling zijnde innovatieve geluidmaatregelen. Hierbij staat onderzoek naar de fysische eigenschappen met betrekking tot geluidwering centraal, zodat met een goede onderbouwing innovatieve geluidmaatregelen aanbevolen kunnen worden in plaats van enkel traditionele oplossingen.

Het bedrijf waarvoor het onderzoek is uitgevoerd is Sweco. Het onderzoek is uitgevoerd binnen de divisie Water en Energie onder de afdeling Bouw. Een team van circa 10 specialisten verricht hierbinnen akoestisch onderzoek rondom infrastructuur. Sweco is het grootste ingenieursadvies- en architectenbureau binnen Europa en houdt zich bezig met het ontwerpen en ontwikkelen van de samenlevingen van de toekomst [8]. Dit door te focussen op duurzame gebouwen, efficiënte infrastructuur en het realiseren van toegang tot elektriciteit en schoon water [8]. Het bedrijf is sinds de overname van 'Grontmij' in april 2016 actief binnen Nederland en heeft wereldwijd ongeveer 15.000 werknemers [8, 9].

1.1 Vooronderzoek

Uit een inventarisatie van huidig beschikbaar of in ontwikkeling zijnde innovatieve geluidmaatregelen zijn de volgende overdrachtsmaatregelen gevonden voor toepassingen langs wegen en spoorwegen:

- *Minischermen*: lage schermen die dicht langs het spoor worden geplaatst (ProRail en diversen)
- *GeluidVangrail*: laag reflecterend scherm dat verkeersgeluid naar de berm reflecteert; toepasbaar op vangrails (Movares en Merford)
- *Geluidsrail*: Scherm met vegetatie dat geluid absorbeert; toepasbaar op vangrails (Metadecor)
- *Diffractoren*: Een goot van resonantieholtes die het geluid naar boven afbuigen (4Silence)

Raadpleeg Bijlage I voor meer informatie over deze maatregelen.

Hierin wordt ingegaan op de fysische eigenschappen met betrekking tot de geluidwering, de achtergrond, varianten en de voor- en nadelen.

1.2 Aanleiding

Met de geraadpleegde literatuur voor het inventarisatierapport is ondervonden dat voor de Geluidsrail en de GeluidVangrail een rekenregel bestaat.

Uit een gesprek met Nils Yntema (ProRail) is gesteld dat de minischermen van ProRail in Geomilieu te modelleren zijn. Yntema gaf aan dat voor de Whisstone (een Diffractorvariant die parallel aan de weg in de grond wordt geplaatst) van 4Silence een rekenregel in ontwikkeling is. De verwachting is dat deze binnen Geomilieu toepasbaar zal worden. Deze rekenregel wordt opgesteld onder leiding van Arnaud Kok (RIVM). Yntema omschreef dat er binnen ProRail behoefte is naar meer inzage over de geluidwering van de Whiswall (een Diffractorvariant die op een geluidabsorberend minischerm geplaatst is) van 4Silence. Uiteindelijk is besloten dat dit principe het meest interessant is om onderzoek naar te verrichten.

Uit een gesprek met Eric de Vries (4Silence) volgde dat er een prototype van de Whiswall langs een weg in Soesterberg opgesteld stond. Er werd door de wegbeheerder toestemming verleend hier onderzoek naar te verrichten.

1.3 Probleemstelling

Om een inschatting te kunnen maken voor de geluidwering van de Whiswall naar de omgeving is zowel praktisch als theoretisch onderzoek verricht.

Voor het praktisch onderzoek zijn geluidmetingen in een geregisseerde situatie uitgevoerd waarbij een auto op een ongeveer zelfde snelheid en versnelling is gehouden. Voor het theoretisch onderzoek is een tweedimensionaal COMSOL-model opgesteld waarmee simulaties zijn uitgevoerd.

Hierbij zijn de volgende onderzoeksvragen gesteld:

Hoofdvraag:

- Kan met behulp van een COMSOL-model een betrouwbare inschatting gemaakt worden voor de geluidwering van de Whiswall?

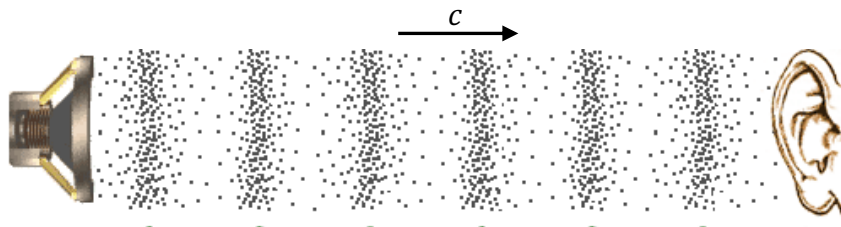
Deelvraag:

- Wat is de geluidwering van de Whiswall die volgt uit geluidmetingen met passages van één auto?

Dit verslag is opgebouwd uit een theoretisch deel (hoofdstuk 2), een deel dat in gaat op de meetwijze (hoofdstuk 3), een deel dat in gaat op de modellering (hoofdstuk 4), een deel dat in gaat op de resultaten (hoofdstuk 5), een conclusie (hoofdstuk 6) en een aanbeveling (hoofdstuk 7).

2. Theorie

Als de lucht in trilling gebracht wordt ontstaat er geluid. Door bijvoorbeeld een luidsprekerconus in trilling te brengen met een bepaalde frequentie, zorgt dat ervoor dat de omliggende luchtdeeltjes drukverschillen ondergaan. Als de conus naar buiten beweegt worden luchtdeeltjes samengeperst ten opzichte van de atmosferische druk. Zodra de conus naar binnen beweegt zetten luchtdeeltjes uit ten opzichte van de atmosferische luchtdruk. De snelheid waarmee luchtdeeltjes hierdoor bewegen v in (m/s) is dus tijdsafhankelijk. De drukverschillen worden doorgegeven aan luchtdeeltjes verder in het medium met een snelheid c in (m/s); dit wordt de voortplantingssnelheid van een geluidsgolf genoemd. Zodra een geluidsgolf het trommelvlies van het menselijk gehoor bereikt met een frequentie tussen 20 en 20.000 Hz, ontstaat er een hoorbare toon [10]. In figuur 2.1 is een ruimtelijke voorstelling weergegeven van dit verschijnsel.



Figuur 2.1: Het ontstaan van geluid in lucht, de voortplanting en ontvangst [11].

Als een trilling zich in een medium voortplant over een afstand wordt er gesproken van een lopende golf. Als een lopende golf ook een vlakke golf is, zijn alle luchtdeeltjes in fase en in één vlak. De geluidsdruk p in (Pa) kan dan als volgt worden omschreven [10]:

$$p = \rho c v(t) \quad (2.1)$$

Waarbij ρ de dichtheid van het medium is in (kg/m³).

In dit hoofdstuk worden de natuurkundige principes van geluid toegelicht die van toepassing zijn op dit onderzoek. Hierbij wordt onder andere ingegaan op het golfgedrag van geluid, de beoordelingswijze- en maatgeving, geluid naar de omgeving en het Diffractorprincipe.

2.1 Het golfgedrag van geluid

De golfvergelijking voor geluid is af te leiden met de gelineariseerde continuïteitsvergelijking voor massabehoud, de gelineariseerde continuïteitsvergelijking voor impulsbehoud en de ideale gaswet [12]. De Amerikaanse natuurkundige en Nobelprijswinnaar, Richard Feynman publiceerde in 1969 een afleiding voor de golfvergelijking in drie dimensies; voor positie x, y, z (m) als functie van de tijd t (s) [12]:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c^2 \nabla^2 p \quad (2.2)$$

Hierbij is $\nabla^2 = \partial^2 / \partial x^2 + \partial^2 / \partial y^2 + \partial^2 / \partial z^2$; de Laplace-operator.

Als vergelijking (2.2) wordt vereenvoudigd naar één dimensie waarbij $p(x, t)$ geeft dit:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \quad (2.3)$$

Over de theorie van differentiaalvergelijkingen in partiële afgeleiden is bekend dat als in dit geval c constant is, de oplossing in de vorm van: $p = A(x - ct) + B(x + ct)$ is [12, 13].

Hierbij zijn de termen A en B tweemaal differentieerbare functies van twee variabelen [14].

De functie: $A(x - ct)$ beweegt zich in de positieve richting van de x -as en de functie:

$B(x + ct)$ in de tegenovergestelde richting.

Het bepaalde geval van een harmonische golfvoortplanting in één richting wordt verkregen door voor óf de A of B term een sinusoïde functie te nemen en de andere te definiëren als 0 [12]. Hiermee kan voor een voortplanting in de positieve richting van de x -as geschreven worden:

$$p(x, t) = p_0 \cos\left(\frac{\omega}{c}(x - ct)\right) = p_0 \cos(kx - \omega t) \quad (2.4)$$

Hierbij is p_0 de amplitude; $\omega = 2\pi f$ de hoekfrequentie in (rad/s) met f de frequentie in (Hz), $k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{c}$; het golfgetal in (rad/m) met λ de golflengte in (m).

De andere schrijfwijze van een harmonische golfvoortplanting in één richting luidt als volgt [13]:

$$p(x, t) = \text{Re}[p_0 e^{j(kx - \omega t)}] = \text{Re}[p(x) e^{j\omega t}] \quad (2.5)$$

Waarin: $j = \sqrt{-1}$. Het symbool Re in vergelijking (2.5) geeft aan dat slechts het reële deel van de complexe functie tussen de vierkante haakjes genomen wordt. Dit wordt in dit document niet volgens deze wijze genoteerd, maar wel geïmpliceerd.

Omdat: $e^{j(kx - \omega t)} = \cos(kx - \omega t) + j \sin(kx - \omega t)$, coïncideren de vergelijkingen (2.4) en (2.5).

Als gesteld wordt dat de geluiddruk in drie dimensies: $p(x, y, z) = p(\mathbf{x})$ afhankelijk is van de ruimtelijke coördinaten: $\mathbf{x}$, en uitgegaan wordt van eenzelfde harmonische tijdsafhankelijkheid met betrekking tot de drukgolven in een beschouwd medium, reduceert vergelijking (2.2) met behulp van vergelijking (2.5) tot een inhomogene Helmholtz vergelijking [15]:

$$\nabla^2 p + \frac{\omega^2}{c^2} p = 0 \quad (2.6)$$

De Helmholtz vergelijking geeft dus een tijdsafhankelijke vorm van de golfvergelijking weer. Uit de vergelijking volgen dus staande golven. De vergelijking wordt veelal toegepast in studies met partiële differentiaalvergelijkingen in ruimte en tijd [16].

2.2 Beoordelingswijze en maatgeving

Om geluid te kunnen beoordelen en te evalueren wordt een maatgeving aan geluid toegekend. Hierbij wordt gesteld dat de sterkte van geluid afhankelijk is van de effectieve geluiddruk p_{rms} ; het subscript 'rms' is een afkorting voor Root Mean Square, oftewel het kwadratisch gemiddelde [17]. De effectieve geluiddruk die over een tijdsduur $t_2 - t_1$ bepaald wordt is gegeven door [10]:

$$p_{rms} = \sqrt{\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} p^2(t) dt} \quad (2.7)$$

De maat van de sterkte van geluid is gebaseerd op de gehoordrempel van de mens; dit wordt de referentiedruk genoemd, $p_{ref} = 20 \mu\text{Pa}$. De sterkte van geluid wordt dan uitgedrukt in de vorm van het geluidniveau en is gegeven in een decibelschaal. Het geluid(druk)niveau L_p is gegeven door [10]:

$$L_p = 10 \log \left(\frac{p_{rms}^2}{p_{ref}^2} \right) \quad (2.8)$$

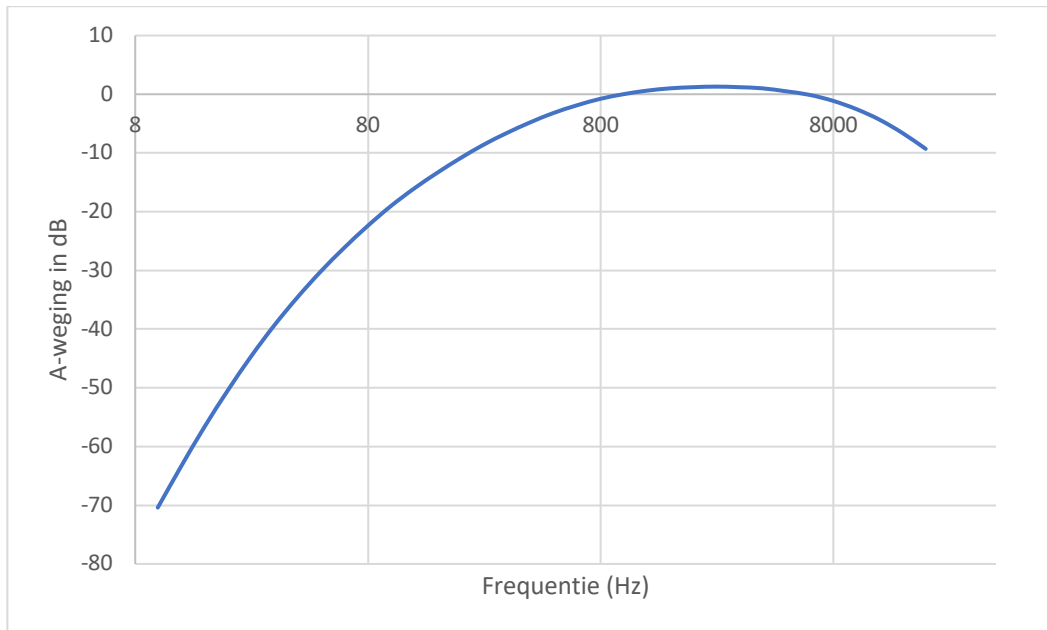
Optredende geluidniveaus worden vaak beoordeeld over een bepaalde tijdsduur, hierbij wordt het equivalente geluidniveau L_{eq} (energetisch gemiddelde geluidniveau) bepaald over deze tijdsduur [10]:

$$L_{eq} = 10 \log \left(\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \frac{p_{rms}^2(t)}{p_{ref}^2} dt \right) \quad (2.9)$$

Hierbij wordt dus gekeken naar hoe de effectieve geluiddruk varieert over een bepaalde tijdsduur. De tijdsduur $t_2 - t_1$ in vergelijking (2.9) is hierdoor een X-aantal maal de tijdsduur beschouwd in vergelijking (2.7).

2.2.1 Het menselijk gehoor

Het menselijk gehoor heeft een filtering wanneer geluid wordt waargenomen. Om geluid ten opzichte van de frequentieafhankelijke responsie van het menselijk gehoor te kunnen beoordelen, wordt er dan gekeken naar dB(A) waardes. Hierbij wordt geluid ten opzichte van de waardes die per beschouwde frequentie uit vergelijking (2.8) zouden volgen, gecorrigeerd met een frequentieafhankelijke weging: de A-weging. Deze is weergegeven in figuur 2.2.



Figuur 2.2: De A-wegingscurve van het menselijk gehoor [18].

2.2.2 Frequentiebanden

Geluid afkomstig van wegen en spoorwegen is vaak opgebouwd uit meerdere frequenties. Binnen de akoestiek zijn bepaalde frequentiebanden gestandaardiseerd; deze zijn gebaseerd op de ISO-normen voor akoestiek [19]. Hierbij wordt geluid door middel van filters in bepaalde frequentiebanden opgedeeld waarbij de effectieve geluiddruk p_{rms} van de geluiddruk voor deze specifieke banden wordt beschouwd. In tabel 2.1 is een overzicht gegeven van de middenfrequenties f_m voor genormaliseerde octaafbanden en tertsbanden. Raadpleeg bron [20] voor meer informatie over frequentiebanden.

Tabel 2.1: Een overzicht van de middenfrequenties van de ISO-genormaliseerde octaafbanden en 3^e- en 6^e-octaafbanden in Hz [20].

f_m (octaaf)	f_m (1/3- octaaf)	f_m (1/6- octaaf)	f_m (octaaf)	f_m (1/3- octaaf)	f_m (1/6- octaaf)
63	50	45	1000	800	710
		50			800
	63	56		1000	900
		63			1000
	80	71		1250	1120
		80			1250
125	100	90	2000	1600	1400
		100			1600
	125	112		2000	1800
		125			2000
	160	140		2500	2240
		160			2500
250	200	180	4000	3150	2800
		200			3150
	250	224		4000	3500
		250			4000
	315	280		5000	4500
		315			5000
500	400	355	8000	6300	5600
		400			6300
	500	450		8000	7100
		500			8000
	630	560		10000	9000
		630			10000

Om het geluid voor afzonderlijke frequentiebanden over een grotere frequentieband te beschouwen, wordt het geluidniveau voor de afzonderlijke frequentiebanden ($L_1, L_2, L_3 \dots, L_n$) energetisch gesommeerd om het geluidniveau over de grotere frequentieband te bepalen [10]:

$$L_{som} = 10 \log \sum_{i=1}^n 10^{(L_i/10)} \quad (2.10)$$

Dit wordt in dit document veelal aangeduid met ‘het totale geluidniveau’. Bij het bepalen van het totale geluidniveau in dB(A) wordt hiervoor eerst de A-weging voor de desbetreffende middenfrequentie op de geluidniveaus van de beschouwde frequentiebanden toegepast.

2.3 Geluid naar de omgeving

Geluid wordt in de buitenlucht tussen de bron (emissiepunt) en het ontvangpunt (immissiepunt) globaal gezien door de volgende factoren beïnvloed [21, 10]:

- Brontype (monopool, dipool of quadrupool)
- Afstandsdemping (het gevolg van de geometrische uitbreiding van het geluid)
- Bodemdemping (de bodem onder de bron kan een deel van het geluid absorberen)
- Luchtdemping (moleculaire absorptie van geluid; voornamelijk bij hogere frequenties op grotere afstanden van invloed)
- Reflecties (geluid wordt door objecten weerkaatst en geabsorbeerd)
- Diffractie (geluid wordt door objecten gekromd)
- Afscherming (door objecten)
- Wind (meewind buigt het geluid naar beneden af en zorgt ervoor dat geluid over grotere afstanden beter hoorbaar is. Tegenwind zorgt voor een tegengesteld effect)
- Temperatuur (wanneer de temperatuur in de hoogte lager wordt, buigt het geluid naar boven af. Wanneer de temperatuur in de hoogte hoger wordt geeft dit een tegengesteld effect)

Het optredende geluidniveau op een bepaalde afstand L_p wordt dan als volgt beschouwd [10]:

$$L_p = L_W - D \quad (2.11)$$

Waarbij D in dB een verzamelterm bestaande uit een sommatie van de verschillende dempingsfactoren naar de omgeving is. Het geluidvermoggenniveau van de bron L_W is hierbij gegeven door [10]:

$$L_W = 10 \log \left(\frac{W}{W_{ref}} \right) \quad (2.12)$$

Waarbij W in (W) het vermogen van de geluidbron is en $W_{ref} = 1$ pW het referentievermogen is van het menselijk gehoor.

2.3.1 Afstandsdemping voor een punt- en lijnbron

De geometrische uitbreiding van emissies uit bronnen is te onderscheiden in de vorm van puntbronnen, lijnbronnen of oppervlaktebronnen [22]. Omdat de geluidemissie van bijvoorbeeld auto's afhankelijk is van meerdere aspecten [23]:

- de motor;
- de versnellingsbak;
- het contact tussen de banden en het wegdek;
- de uitlaat;
- de luchtinlaat en wind;

wordt de geluidemissie van auto's in wet- en regelgeving beschouwd als een geheel hiervan [5]. Een enkel voertuig wordt dan beschouwd als een puntbron en een weg met constant verkeer als een lijnbron [23, 5].

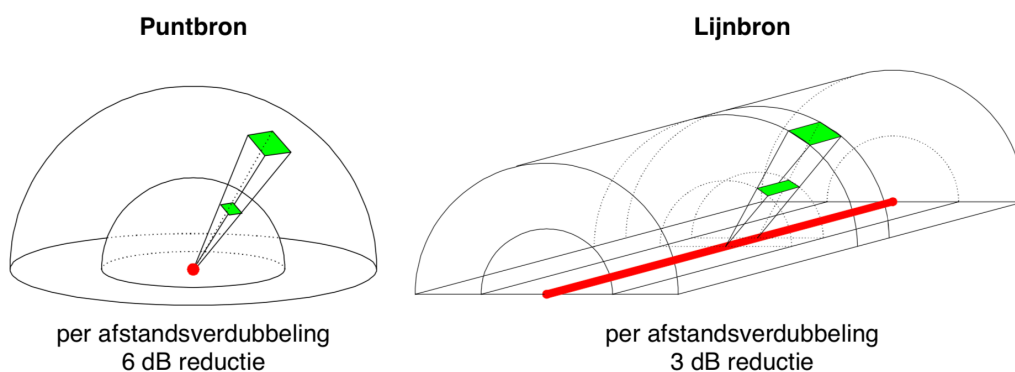
Over de afstand wordt geluid van een puntbron uitgebreid over een bolvormig oppervlak. Hiermee kan vergelijking (2.11) met $D = D_{afstand}$ als volgt worden geschreven:

$$L_p = L_W - 10 \log(4\pi R^2) \quad (2.13)$$

Waarbij R in (m) de rechtstreekse afstand tussen het emissie- en immissiepunt is. Voor een lijnbron wordt het geluid uitgebreid over een cilindrisch oppervlak:

$$L_p = L_W - 10 \log(2\pi R) \quad (2.14)$$

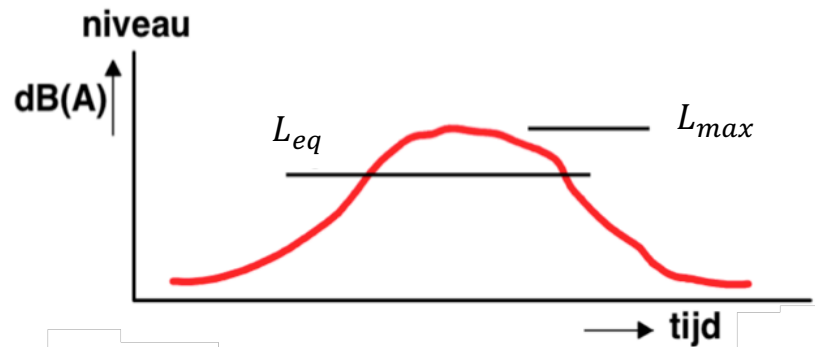
Zie figuur 2.3 voor een schematische weergave van de geometrische uitbreiding van geluid uit een punt- en lijnbron.



Figuur 2.3: Geometrische uitbreiding van geluid uit een punt- en lijnbron [23].

2.3.2 Passagemeting van een voertuig

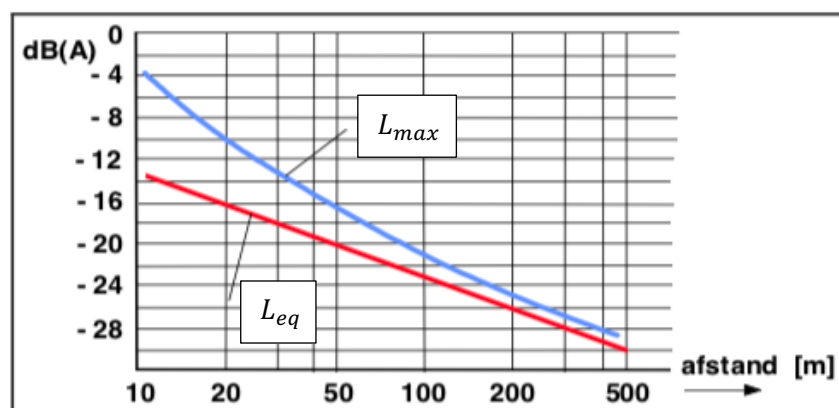
Bij passagemetingen van voertuigen wordt het geluidniveau over de tijd gemeten. Doordat het gemeten geluidniveau sterker wordt naarmate de bron de ontvanger nadert, ziet het gemeten verloop van een passagemeting waarbij de ontvanger stationair is, er zo uit als in figuur 2.4. Dit verloop wordt dus gemeten ten opzichte van het achtergrondgeluid.



Figuur 2.4: Het totale geluidniveau als functie van tijd bij een passage van een voertuig, waarbij de ontvanger stationair is [23].

Het maximale geluidniveau treedt op als het voertuig op een zo klein mogelijke afstand van de meter is verwijderd [23]. De afstandsdemping van het maximale geluidniveau L_{max} vertoont tot ongeveer 30 meter een puntbronkarakteristiek over de afstand; zie figuur 2.5. Hierbij is de demping ongeveer 6 dB per afstandsverdubbeling. Op grotere afstanden vertoont L_{max} steeds meer een lijnbronkarakteristiek.

In wet- en regelgeving wordt wegverkeer beschouwd in de vorm van lijnbronnen, hierbij is gesteld dat het equivalente geluidniveau L_{eq} van een passage een lijnbronkarakteristiek vertoont over de afstand [8]; zie figuur 2.5. Hierbij wordt dus de energie-inhoud van het fluctuerende geluidniveau beschouwd. De afstandsdemping is ongeveer 3 dB per afstandsverdubbeling.



Figuur 2.5: Afstandsdemping van het equivalente- en het maximale geluidniveau [23].

2.4 Diffractorprincipe

De Diffractor is een uitvinding van Ysbrand Wijnant (TU Twente). De Diffractor zorgt ervoor dat het geluid dat over de holtes van het diffractierooster reist, naar de holtes wordt gediffracteerd en hierin wordt geresoneerd [24]. “De holtes van de Diffractor zijn gebaseerd op kwartgolflengteresonatoren, hierdoor ontstaat er een hoge deeltjessnelheid boven in deze holtes, wat voor een weerstand zorgt bij het geluid dat over de Diffractor reist” (Ysbrand Wijnant). Het gevolg hiervan is dat het geluid naar boven wordt afgebogen; zie figuur 2.6.



Figuur 2.6: Een schematische voorstelling van de Diffractorwerking; het geresoneerde geluid van de holtes zorgt voor een weerstand bij het geluid dat over de holtes reist [25].

De geluidwering van de Whiswall wordt in dit onderzoek beschouwd als de invloedterm $D_{Whiswall}$. Deze term wordt als een van de verschillende dempingsfactoren naar de omgeving beschouwd waaruit D is opgebouwd.

Raadpleeg Bijlage I voor meer informatie over de achtergrond, fysische eigenschappen met betrekking tot de geluidwering, de voor- en nadelen en varianten van Diffractoren.

3. Meetwijze

Ten behoeve van dit onderzoek zijn geluidmetingen verricht aan de proeflocatie van de Whiswall in Soesterberg; zie figuur 3.1 voor een weergave van de proeflocatie.

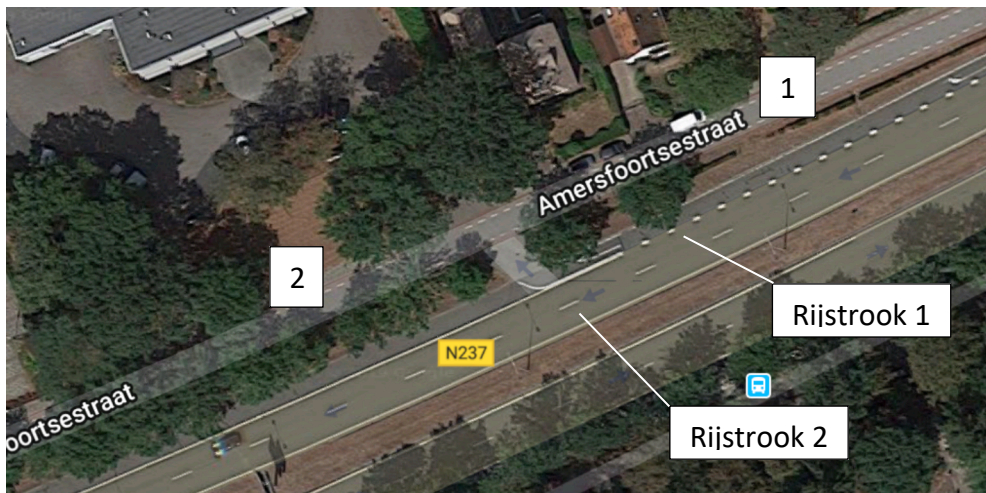


Figuur 3.1: Proeflocatie van de Whiswall in Soesterberg.

3.1 Opstelling en gebruikte apparatuur

Voor de geluidmetingen is gebruik gemaakt van 2 Rion NA-28 geluiddrukmeters, windbollen en microfoonkabels. De geluidsmeters zijn gecertificeerd, gekalibreerd en voldoen aan de IEC 61672-1 norm voor klasse 1 geluidsmeters. De 'Building Acoustics' software module voor de Rion NA-28 biedt de gebruiker de mogelijkheid het geluidsdrukniveau L_p in dB uit te schrijven als functie van de tijd met een samplingtijd van $20,8 \mu s$ [26] voor het gehele meetbereik (10 Hz – 20 kHz [27]) en de octaafbanden uit tabel 2.1. Het tijdsinterval waarvoor de effectieve geluiddruk p_{rms} wordt bepaald en het geluidniveau L_p wordt uitgeschreven is ingesteld op 10 ms voor beide meters.

De metingen zijn in een geregisseerde situatie uitgevoerd. Dit houdt in dat de passerende auto waarmee gemeten wordt door een bestuurder op eenzelfde versnelling en snelheid van 60 ± 5 km/u gehouden wordt. De gebruikte auto is een Ford Mondeo. De metingen zijn uitgevoerd bij een temperatuur- en windsnelheid van 16 ± 3 °C en 5 ± 2 m/s respectievelijk; bron: KNMI.



Figuur 3.2: Positionering geluidmeters en benaming rijstroken langs de proeflocatie van de Whiswall in Soesterberg, bron: Google Maps.

De metingen zijn uitgevoerd met 2 geluidmeters. De meters zijn geplaatst op de aangegeven posities in figuur 3.2:

1. Meting achter Whiswall
2. Meting zonder Whiswall ter referentie

3.2 Werkwijze

De geluidmeters zijn ingesteld op een meetinterval van 10 seconden. De meters zijn tijdens elke passage handmatig aangezet als is ingeschat dat de Ford Mondeo in de opvolgende 10 seconden de desbetreffende meter passeert.

De Ford Mondeo passeert eerst 6 maal over rijstrook 1. Hierbij zijn de geluidmeters de eerste 3 keer gepositioneerd in het midden van het fietspad dat zich het dichtst bij de Whiswall bevindt (meetafstand 1). De andere 3 keer bevinden de geluidmeters zich in het midden van fietspad aan de andere zijde van dezelfde weg (meetafstand 2). De microfoons worden voor beide situaties op een hoogte gezet van 1,5 m; 2,0 m en 3,0 m. Vervolgens is dit herhaald voor 6 passages over rijstrook 2.

In tabel 3.1 zijn de verschillende meethoogtes en afstanden ten opzichte van de Whiswall numeriek weergegeven voor de 12 gemeten passages. De waardes zijn opgemeten in het veld met een rolmaat en een luchtfoto van Nederland in Geomilieu V4.41. De weergegeven onnauwkeurigheden zijn met enige subjectieve veronderstelling bepaald. De afstand van de Whiswall zelf tot rijstrook is vastgesteld op $1,0 \pm 0,1$ m.

Tabel 3.1: De verschillende meethoogtes en afstanden ten opzichte van de Whiswall.

	Horizontale meetafstand t.o.v. de Whiswall (m) $\pm 0,2$ m	Afstand tussen het middelpunt van de rijstrook en de Whiswall (m) $\pm 0,2$ m	Meethoogte t.o.v. de bestrating (m) $\pm 0,2$ m
Situatie 1	4,7	5,4	1,5
Situatie 2	4,7	5,4	2,0
Situatie 3	4,7	5,4	3,0
Situatie 4	8,2	5,4	3,0
Situatie 5	8,2	5,4	2,0
Situatie 6	8,2	5,4	1,5
Situatie 7	4,7	8,7	1,5
Situatie 8	4,7	8,7	2,0
Situatie 9	4,7	8,7	3,0
Situatie 10	8,2	8,7	3,0
Situatie 11	8,2	8,7	2,0
Situatie 12	8,2	8,7	1,5

4. Model

Ten behoeve van dit onderzoek is een trial COMSOL-licentie aangevraagd om de geluidwering van de Whiswall theoretisch te kunnen onderzoeken.

De modellen zijn gerealiseerd voor een tweedimensionale situatie waarbij met behulp van een lijnbron en een doorsnede van de Whiswall een benadering voor de geluidwering kan worden gemaakt.

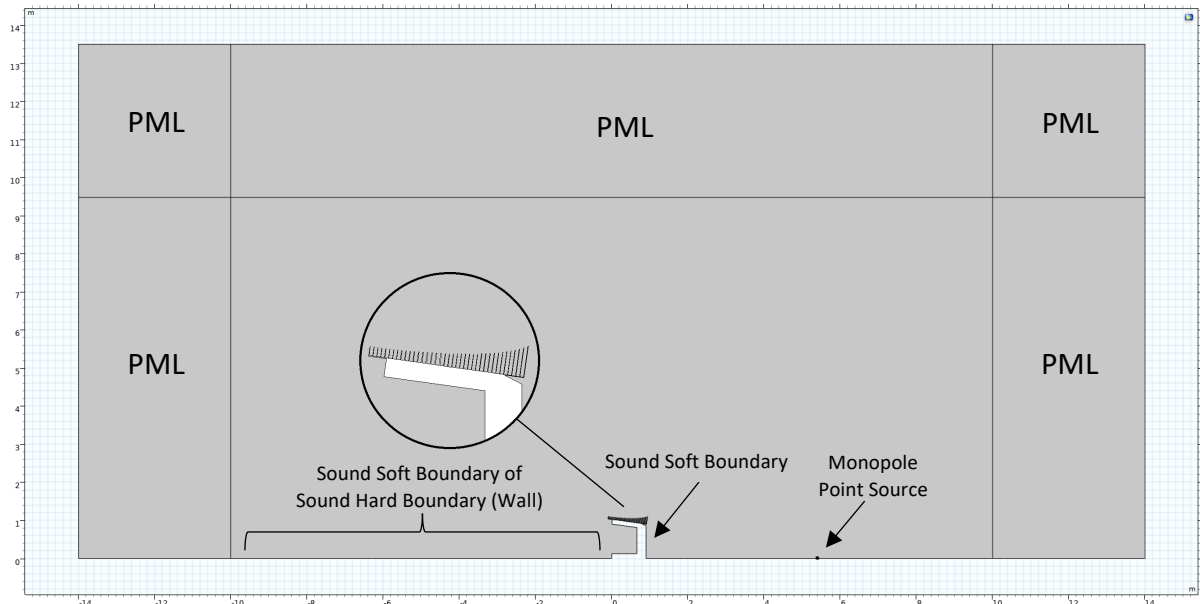
Hierbij is gebruik gemaakt van COMSOL Multiphysics V5.4 en COMSOL's Acoustics Module V5.4. COMSOL Multiphysics wordt toegepast om partiële differentiaalvergelijkingen op te lossen. Dit wordt gedaan met behulp van een iteratieve benaderingsmethode, wat betekent dat een oplossing is bepaald door meerdere iteraties [28].

Voor de modellen is gebruik gemaakt van de Physics Interface: Pressure Acoustics, Frequency Domain. Hierbij wordt een geluidbron beschouwd als een continu uitstralende statische bron. De interface kan gebruikt worden om de voortplanting van drukgolven te simuleren in het frequentiedomein door de Helmholtzvergelijking uit vergelijking (2.6) op te lossen. Hierbij kunnen er rand-, bron- en mediumvoorwaardes gesteld worden binnen en aan een ontworpen 'Geometry' die deze oplossing beïnvloeden. Het medium kan opgedeeld worden in verschillende te berekenen datapunten met behulp van een 'Mesh'. Om de Helmholtzvergelijking op te lossen voor deze punten worden FEM (Finite Element Method) en/of BEM (Boundary Element Method) interfaces toegepast [15].

In de modellen wordt geen gebruik gemaakt van een 'dipole domain source' en wordt er een constante niet complexe dichtheid en constante geluidvoortplantingssnelheid voor het medium verondersteld. De vergelijkingen weergegeven in dit hoofdstuk en in de Bijlage houden rekening met dit gegeven. Niet beschouwde instellingen in dit document worden als standaardinstellingen van COMSOL's Acoustics Module beschouwd.

4.1 Modelling

Ten behoeve van het realiseren van een model van de Whiswall is een Geometry gemaakt van de onderzochte Whiswall uit Soesterberg. Dit is gedaan door middel van metingen met een rolmaat. In figuur 4.1 is de gemaakte Geometry voor het model weergegeven met de toegekende grensvoorwaardes. Het akoestisch middelpunt van de Ford Mondeo is gedefinieerd op een hoogte van 0,005 m. Dit is gedaan omdat er relatief ‘stille zones’ werden waargenomen als de ‘Monopole Point Source’ hoger gepositioneerd werd. Voor meer informatie over de bronmodelleerwijze raadpleeg Bijlage II.



Figuur 4.1: Gemaakte Geometry met de gestelde grensvoorwaarden, bronvoorwaarde en mediumcondities. De Sound Hard Boundary (Wall) grensvoorwaarde is toegekend aan alle niet beschouwde buitengrenzen van de Geometry.

De ‘Sound Hard Boundary (Wall)’ grensvoorwaarde stelt dat de normaal component $\mathbf{n}$ van de acceleratie (en dus de deeltjessnelheid v) gelijk is aan nul op deze grens [15]. Hieruit volgen de relaties:

$$\mathbf{n} \frac{\nabla p}{\rho} = 0, \quad \frac{\partial p}{\partial \mathbf{n}} = 0 \quad (4.1)$$

De relaties gegeven in vergelijking (4.1) gelden over de hele grens van het medium waaraan de voorwaarde is gesteld.

De ‘Sound Soft Boundary’ grensvoorwaarde stelt dat de geluidsdruk verdwijnt op deze grens in het medium. Er wordt dan gesteld dat: $p = 0$ over de hele grens van het medium waaraan de voorwaarde is gesteld [15]. Deze voorwaarde is gesteld aan de voorzijde van de Whiswall omdat deze gemaakt is van een geluidabsorberend poreus materiaal.

De materiaaleigenschappen voor de ‘basiseigenschappen van lucht’ (geselecteerd uit de ‘Material Library’) zijn toegewezen aan elk ‘Domain’ in het model.

In figuur 4.1 staat ‘PML’ voor een ‘Perfectly Matched Layer’. Dit is een absorberend medium dat gebruik maakt van twee verschillende technieken om alle ‘uitgaande’ golven te dempen met minimale reflecties [15]. Op de werking hiervan wordt verder niet op ingegaan in dit document; raadpleeg hiervoor bronnen [15, 29].

4.2 Simulaties

De afstand van de Monopole Point Source is gebaseerd op de afstanden voor de twee beschouwde rijstroken bij de metingen; zie tabel 3.1. De simulaties zijn voor beide bronafstanden uitgevoerd.

De simulaties zijn gedaan voor 2 verschillende grensvoorwaarden achter de Whiswall (zie figuur 4.1) waarbij de Whiswall wél en niet in de Geometry is beschouwd. Zonder Whiswall wordt in de Geometry uit figuur 4.1 aan de onderzijde van de Whiswall de Sound Hard Boundary (Wall) grensvoorwaarde toegekend.

De simulaties zijn uitgevoerd voor de beschouwde middenfrequenties van de 6^e-octaafbanden uit tabel 2.1 met uitzondering van de hoogste octaafband. De 'Element order' is ingesteld op 'Quadratic Lagrange' en de Mesh op minimaal 6 punten voor een golf van 4 kHz; raadpleeg Bijlage II voor de motivatie hiervoor.

De Monopole Point Source is ingesteld op 'User Defined' met een amplitude van $S = 15$ Pa. De 'Relative tolerance' is ingesteld op 0,001.

5. Resultaten

Dit hoofdstuk gaat in op de resultaten die uit het model en de metingen volgen.

Hierbij wordt ingegaan op de verwerkingswijze die is toegepast.

Eerst wordt ingegaan op de geluidmetingen, dan wordt ingegaan op de simulaties, gevolgd door een vergelijking tussen de twee. Geluidniveaus en onnauwkeurigheden worden weergegeven met 1 decimaal.

5.1 Geluidmetingen

Voorafgaand aan de metingen is met beide geluidmeters een meting gedaan aan een ijkbron; zie Bijlage III. De correctiewaarden die hieruit volgen zijn toegepast op de resultaten. De nauwkeurigheid van de geluidmetingen is ingeschat door de positieve en negatieve tolerantie van de geluidmeters te beschouwen; zie Bijlage IV.

5.1.1 Analyse geluidmetingen

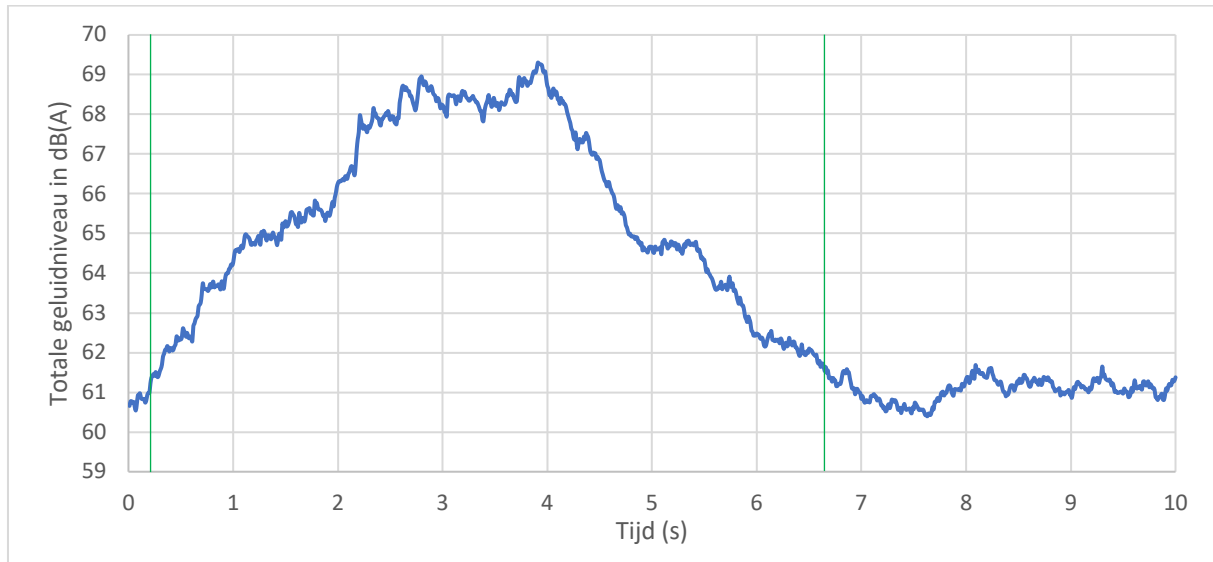
Omdat de meetresultaten van positie 1 veelal van andere aard zijn ten opzichte van de meetresultaten op positie 2, onderscheidt zich dit ook in de selectiewijze voor de analyse.

Eerst wordt de wijze voor positie 2 toegelicht, gevolgd door de wijze voor positie 1.

Voor elke meting is een L_{max} en een L_{eq} waarde bepaald. Hierbij is de L_{max} waarde bepaald door een equivalente geluidsdruk over 0,10 s te berekenen. Hiervoor is gekozen omdat dan een groter deel van de auto wordt beschouwd. Hiermee wordt verwacht dat het effect van meerdere geluidbronnen van de auto meer als geheel wordt genomen; in tegenstelling tot het uitschrijven van een geluidniveau voor 10 ms. L_{eq} waardes zijn bepaald voor een tijdsinterval waarbij de karakteristiek uit figuur 2.4 zich voordoet.

5.1.1.1 Positie 2

De geluidmetingen afkomstig van positie 2 vertonen een relatief duidelijk verloop als gekeken wordt naar het totale geluidniveau in dB(A) over de tijd; zie figuur 5.1. Hierbij is het geluidniveau van alle gemeten octaafbanden A-gewogen en energetisch gesommeerd. De gemeten karakteristiek lijkt in overeenstemming met het verwachte verloop uit figuur 2.4.

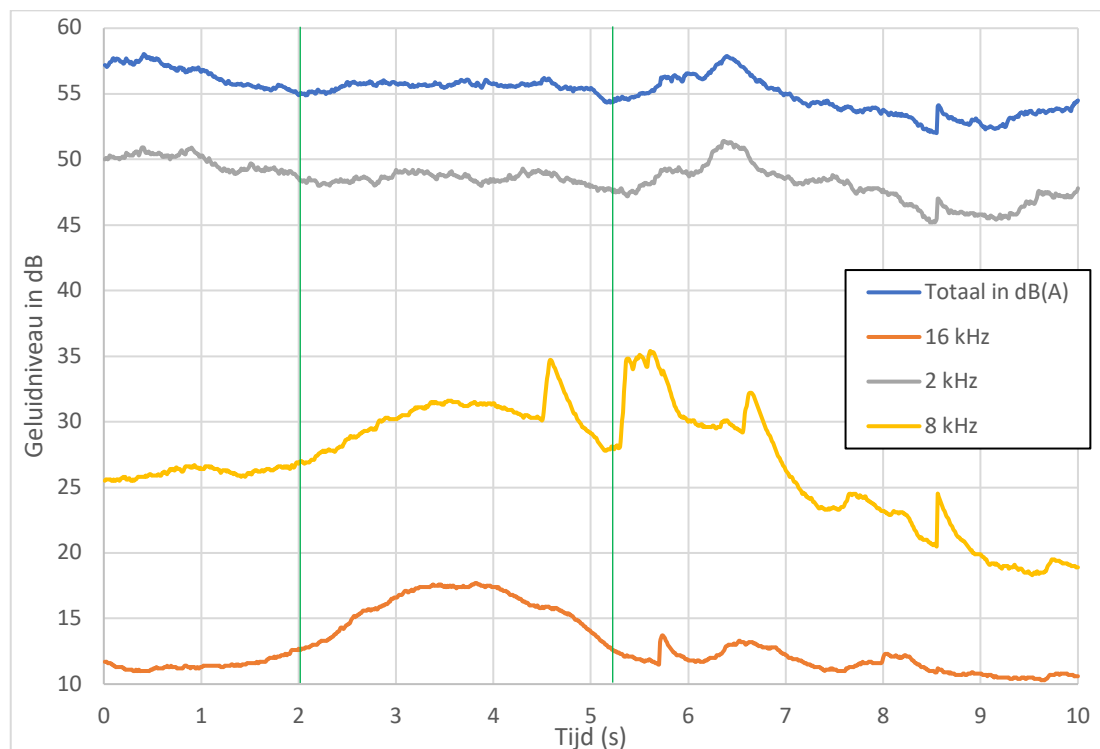


Figuur 5.1: Het totale geluidniveau als functie van de tijd voor een passage langs positie 2.

Het maximale geluidniveau L_{max} is bepaald rond de maximale waarde in figuur 5.1. Het equivalente geluidniveau L_{eq} is bepaald voor het tijdsinterval aangegeven met de groene lijnen in figuur 5.1. De resultaten zijn weergegeven in Bijlage V.

5.1.1.2 Positie 1

De geluidmetingen afkomstig van positie 1 vertonen voor een aantal situaties een onduidelijker verloop als gekeken wordt naar het totale geluidniveau in dB(A) over de tijd; met uitzondering van de metingen op 3,0 m hoog (hiervoor is de analysewijze voor positie 2 toegepast). In figuur 5.2 is het meetresultaat voor situatie 7 weergegeven voor het totale geluidniveau in dB(A) en het geluidniveau voor de 2, 8 en 16 kHz octaafband. Als gekeken wordt naar de hogere octaafbanden is het verwachte verloop uit figuur 2.4 te zien. Hiermee is besloten de analyse op de hogere octaafbanden te baseren. Er is tevens wat stoorgeluid waargenomen, dit is onder andere te zien in het verloop van de 8 kHz octaafband.



Figuur 5.2: Het geluidniveau als functie van de tijd voor verschillende octaafbanden en totaal voor situatie 7 op positie 1.

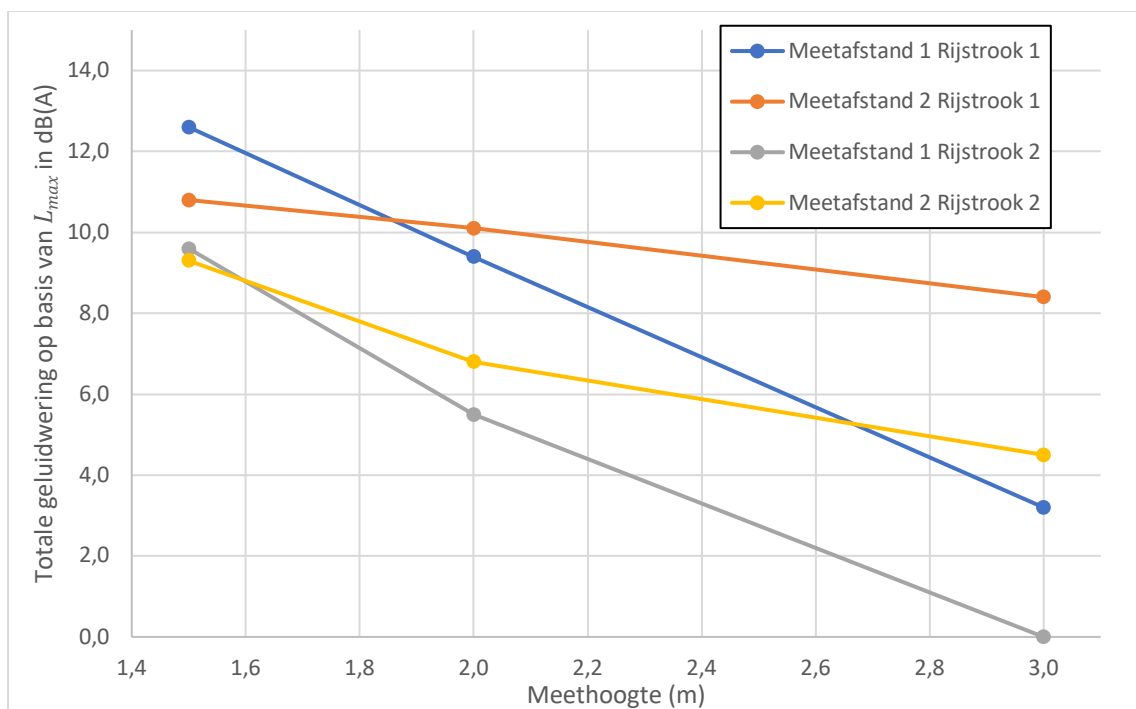
Het maximale geluidniveau L_{max} is bepaald rond de maximale waarde van de hogere octaafbanden in figuur 5.2. Het equivalente geluidniveau L_{eq} is bepaald voor het tijdsinterval aangegeven met de groene lijnen in figuur 5.2. De resultaten zijn weergegeven in Bijlage V.

5.1.2 Geluidwering van de Whiswall

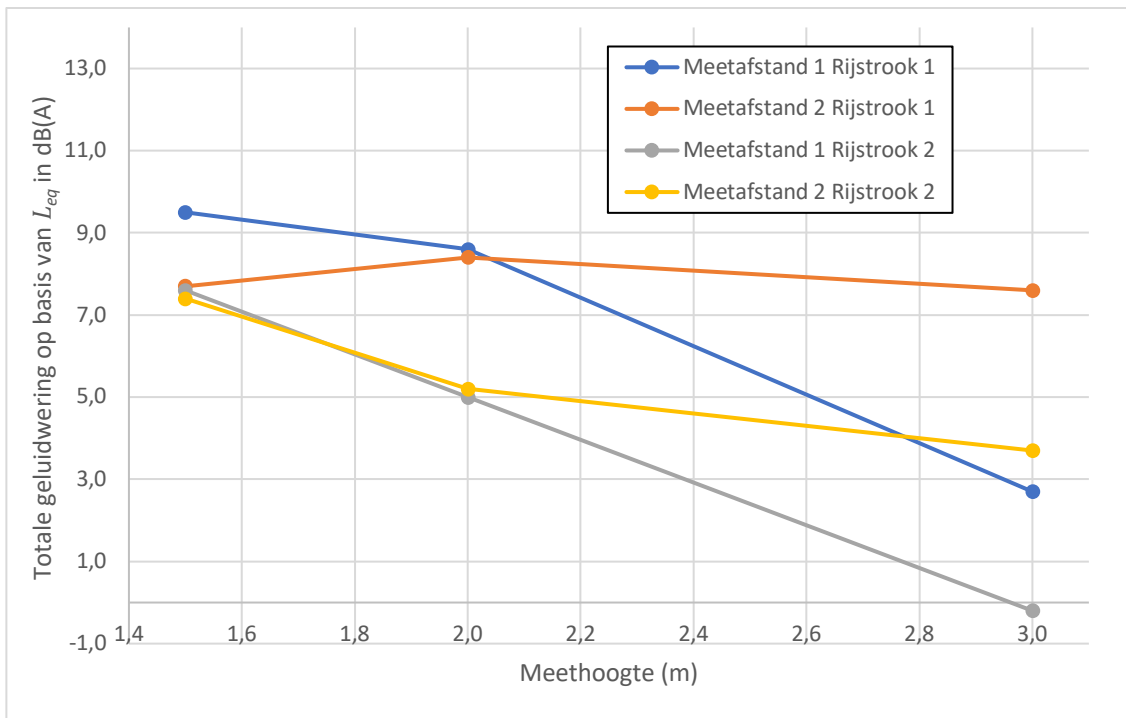
Om de geluidwering van de Whiswall te bepalen wordt voor de wering per octaafband het verschil tussen de berekende L_{max} en L_{eq} waarden van positie 1 en 2 genomen.

Hierbij is aangenomen dat het enige verschil in de dempingsfactoren waaruit D in vergelijking (2.11) is opgebouwd, de geluidwering van de Whiswall $D_{Whiswall}$ is.

De totale geluidwering in dB(A) is dan het verschil tussen het totale geluidniveau in dB(A) van positie 1 en 2. Het resultaat hiervan is weergegeven in figuur 5.3 voor L_{max} en in figuur 5.4 voor L_{eq} . De onnauwkeurigheid van deze resultaten is niet weergegeven in deze figuren, maar is bij benadering de sommatie van de onnauwkeurigheid van het totale geluidniveau in dB(A) voor positie 1 en 2. De grootst verwachte onnauwkeurigheid is dan 2,7 dB(A) op basis van de tolerantie van de geluidmeters.



Figuur 5.3: De totale geluidwering van de Whiswall in dB(A) op basis van L_{max} voor een 60 ± 5 km/u rijdende Ford Mondeo.

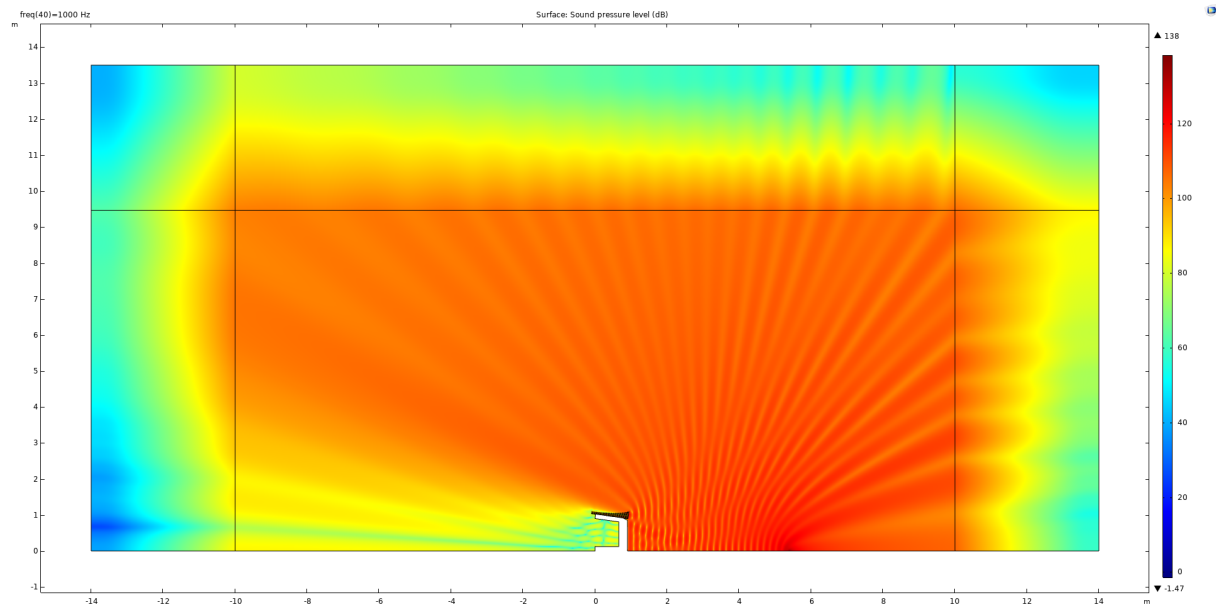


Figuur 5.4: De totale geluidwering van de Whiswall in dB(A) op basis van L_{eq} voor een 60 ± 5 km/u rijdende Ford Mondeo.

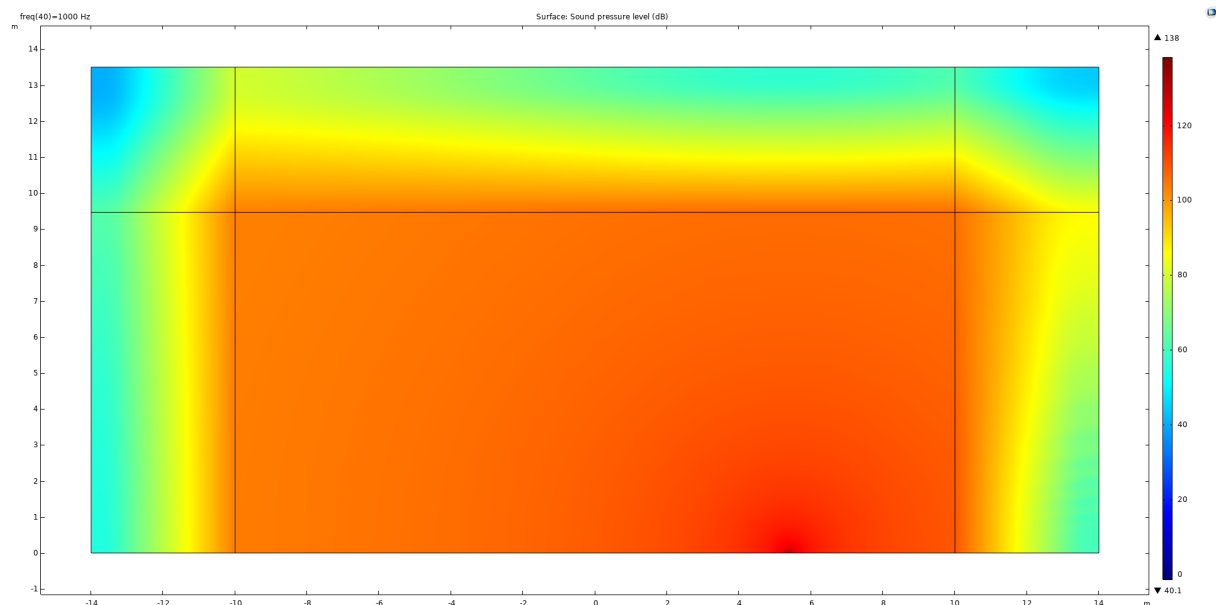
De bepaalde geluidwering op basis van L_{max} varieert tussen 0,0 – 12,6 dB(A) voor posities achter de Whiswall; de bepaalde geluidwering voor L_{eq} varieert tussen -0,2 – 9,5 dB(A) voor dezelfde posities. De waardes zijn enkel representatief voor de gebruikte bron.

5.2 Simulaties

In figuur 5.5 en 5.6 is respectievelijk het resultaat weergegeven voor de simulaties mét en zonder de Whiswall. Hierbij is de Sound Hard Boundary (Wall) grensvoorwaarde op de bodem links van de Whiswall toegekend (zie figuur 4.1).



Figuur 5.5: Simulatie voor een 1 kHz Monopole Point Source, $S = 15$ Pa met Whiswall voor rijstrook 1.



Figuur 5.6: Simulatie voor een 1 kHz Monopole Point Source, $S = 15$ Pa zonder Whiswall voor rijstrook 1.

Op dezelfde punten als de gemeten punten (zie tabel 3.1) is een analyse van het geluidniveau uitgevoerd voor alle middenfrequenties f_m van de 6^e-octaafbanden uit tabel 2.1 (met uitzondering van de laatste octaafband).

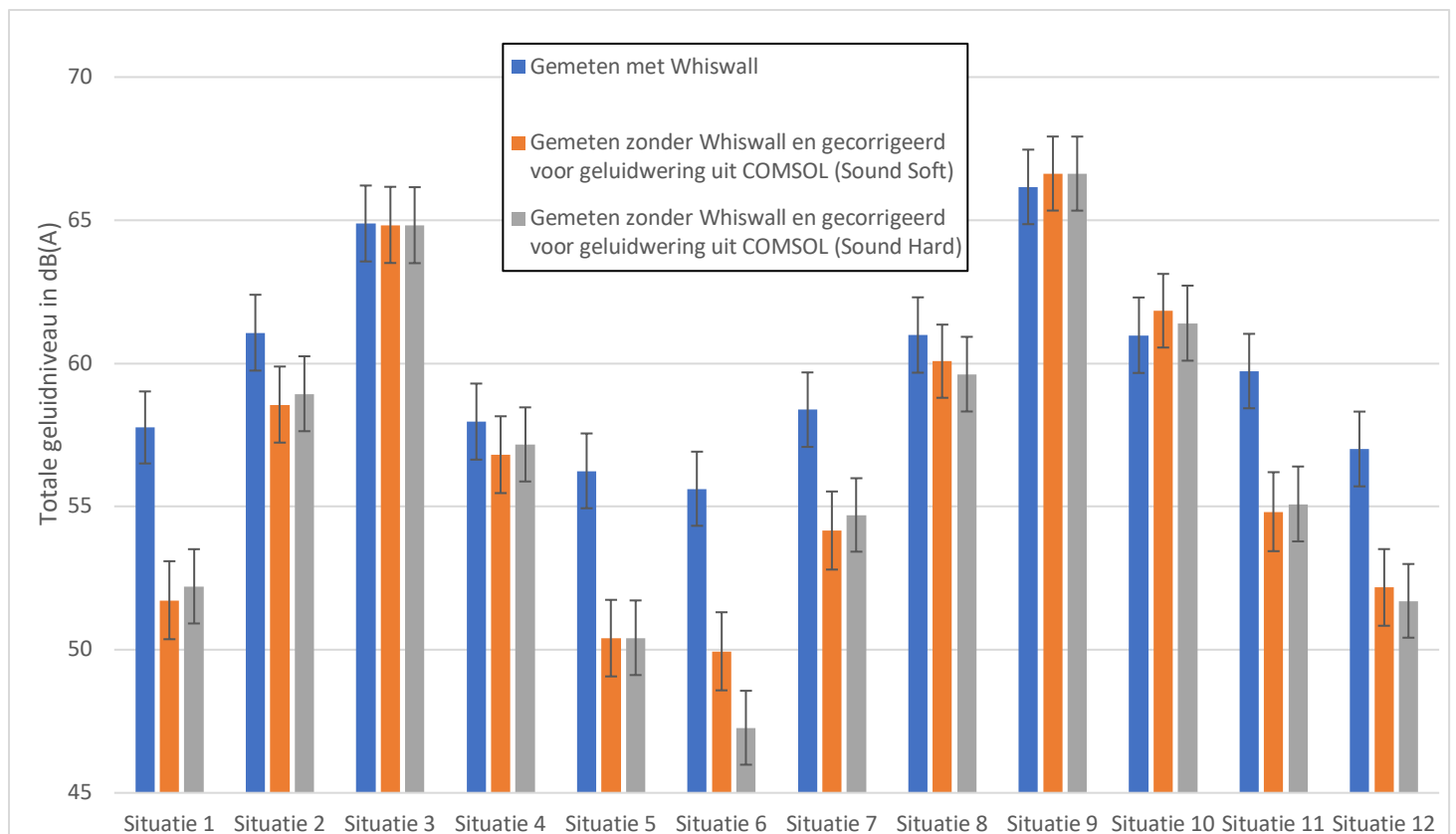
Dit is gedaan voor beide beschouwde grensvoorwaarden links van de Whiswall (zie figuur 4.1), voor zowel mét als zonder Whiswall. Bij het verwerken van de resultaten is de aanname gemaakt dat de geluidwering voor de beschouwde middenfrequenties voor de hele 6^e-octaafbanden gelden.

Als de gesimuleerde geluidniveaus van de middenfrequenties van de 6^e-octaafbanden volgens vergelijking (2.10) energetisch gesommeerd worden om zo octaafbanden te vormen, wordt de geluidwering van de Whiswall $D_{Whiswall}$ bepaald door het verschil tussen het geluidniveau mét en zonder Whiswall te nemen. Hierbij zijn geluidniveaus volgend uit de simulatie zonder Whiswall eerst per frequentie gelijkgesteld aan elkaar binnen de 6^e-octaafbanden. Het verschil tussen de waarde waaraan deze is gelijkgesteld en de werkelijke waarde, is per frequentie opgeteld bij het geluidniveau volgend uit de simulatie met Whiswall.

Hiermee geldt de bepaalde geluidwering per octaafband officieel voor als het geluidniveau van de beschouwde frequenties binnen de octaafband gelijk is en dit de immissie van de bron is op het toetspunt in het model zonder Whiswall. De resultaten zijn weergegeven in Bijlage VI. De gemiddelde simulatietijd was ongeveer 2 uur en 10 minuten.

5.3 Toetsing van het model

Om te bepalen of de bepaalde geluidwering van de Whiswall $D_{Whiswall}$ met COMSOL voldoet, wordt deze getoetst aan de L_{eq} waardes die volgen uit de metingen. Hierbij wordt de geluidwering van de Whiswall die volgt uit COMSOL per octaafband van de meetresultaten zonder Whiswall afgehaald om een vergelijking te maken met de meetresultaten met Whiswall. In figuur 5.7 is het totale geluidniveau voor beide gevallen weergegeven in dB(A). De 8 kHz octaafband is bij de meting zonder Whiswall buiten beschouwing gelaten omdat de geluidwering hiervoor niet bepaald is. Er wordt verwacht dat de 8 kHz octaafband geen significante bijdrage heeft bij het berekenen van het totale geluidniveau omdat de geluidimmissie van de Ford Mondeo voor deze band relatief laag is.



Figuur 5.7: Vergelijking tussen het totale geluidniveau volgens uit metingen met Whiswall en metingen zonder Whiswall die gecorrigeerd zijn voor de geluidwering van de Whiswall bepaald met COMSOL.

Op basis van de gestelde foutmarge komen 6 van de 12 beschouwde situaties overeen. De foutenbalken uit figuur 5.7 zijn bepaald door de tolerantie van de geluidmeters in rekening te brengen bij het berekenen van het totale geluidniveau. De geluidwering die voor de Whiswall is toegepast, is in dit geval dus als foutloos beschouwd.

In figuur 5.7 is te zien dat de waardes overeenkomen voor elke situatie op 3 meter hoogte en voor 2 meter hoogte op meetafstand 1. Uit figuur 5.7 is ook op te maken dat de geluidwering van de Whiswall die uit COMSOL volgt afhankelijk is van de bodem; zie als voorbeeld de resultaten voor situatie 6.

5.3.1 Kritische beschouwing resultaten

Het verschil in het totale geluidniveau voor situatie 1 en 12 van positie 2 betreft voor L_{max} 5,2 dB(A) en 2,9 dB(A) voor L_{eq} . Als aangenomen wordt dat tussen situatie 1 en 12 ongeveer een afstandsverdubbeling is (in verhouding $1,6 \pm 0,2$ maal als de bronhoogte 0 m is) en dempingsfactoren naast de afstandsdemping gelijk zijn, lijkt dit in overeenstemming met de verwachting uit figuur 2.5.

Afwijkende resultaten zijn plausibel door de volgende aspecten:

- Modelfouten (in de Geometry, gestelde grensvoorwaarden of bronmodelleerwijze)
- Analysefouten (het tijdsinterval dat beschouwd is zou niet juist kunnen zijn)
- Meetfouten (te veel stoorgeluid/achtergrondgeluid gemeten. Ook zou een van de dempingsfactoren waaruit D is opgebouwd niet vergelijkbaar kunnen zijn voor de meting zonder en mét Whiswall)

Hierbij zouden afwijkingen kunnen zijn ontstaan doordat de beschouwde frequenties en berekeningswijze voor de geluidwering per octaafband niet representatief zou zijn voor de fouriergetransformeerde van de immissie van de Ford Mondeo op de desbetreffende toetspunten.

6. Conclusie

Het COMSOL-model voldoet voor 6 van de 12 beschouwde situaties voor 2 verschillende gestelde grensvoorwaarden (Sound Hard Boundary (Wall) en Sound Soft Boundary) op de bodem achter Whiswall. Voor beide gestelde grensvoorwaarden betreft dit dezelfde situaties. Hierbij is de geluidwering uit het model per octaafband toegepast op meetresultaten zonder Whiswall en is het totale geluidniveau in dB(A) vergeleken met meetresultaten achter de Whiswall.

Het COMSOL-model voldoet dan voor 2 verschillende horizontale afstanden ($4,7 \pm 0,2$ m en $8,2 \pm 0,2$ m) achter de Whiswall op $3,0 \pm 0,2$ m meter hoogte voor 2 beschouwde geconcentreerde bronafstanden (horizontaal gezien tot de Whiswall $5,4 \pm 0,2$ m en $8,7 \pm 0,2$ m). Het COMSOL-model voldoet ook voor de afstand dicht bij de Whiswall op $2,0 \pm 0,2$ m meter hoogte voor dezelfde bronafstanden. De doorsnede van de Whiswall (gezien vanuit de rijstrook naar de omgeving) is hierbij $1,0 \pm 0,1$ m.

Het COMSOL-model is gebaseerd op een lijnbronkarakteristiek met betrekking tot de afstandsdemping van de bron en is getoetst aan L_{eq} waardes die volgen uit passagemetingen van een 60 ± 5 km/u rijdende Ford Mondeo. De toelaatbare foutmarge is hierbij gebaseerd op de tolerantie van de geluidmeters; deze is maximaal 1,4 dB(A).

De geluidbron in het model is gemodelleerd als een geconcentreerde bron.

De geluidwering die uit het COMSOL-model volgt is afhankelijk van de gestelde grensvoorwaarde aan de bodem achter de Whiswall.

De bepaalde totale geluidwering die volgt uit de metingen varieert op basis van L_{max} tussen $0,0 - 12,6$ dB(A) voor verschillende beschouwde posities achter de Whiswall.

De bepaalde totale geluidwering op basis van L_{eq} varieert tussen $-0,2 - 9,5$ dB(A) voor dezelfde posities. Deze waardes zijn enkel representatief voor de gebruikte bron. De grootst verwachte onnauwkeurigheid is 2,7 dB(A) op basis van de tolerantie van de geluidmeters.

Het gemeten verschil in het totale geluidniveau voor een $1,6 \pm 0,2$ maal afstandsvergroting betreft voor L_{max} 5,2 dB(A) en voor L_{eq} 2,9 dB(A).

7. Aanbeveling

Naast het modelleerprogramma COMSOL is ook onderzoek verricht naar 'OpenPSTD' en 'OpenFOAM'. OpenPSTD is een 'Add-on' voor 'Blender' waarbij het mogelijk is de impulsresponsie voor een geluidspuls in een 2D medium te bepalen met gestelde grensvoorwaarden [30]. OpenPSTD staat echter alleen 'vierkante' geometrie toe. OpenFOAM is een softwarepakket waarmee in combinatie met 'Docker' en 'ParaView' in principe hetzelfde mogelijk is als wat bij dit onderzoek in COMSOL is gesimuleerd [31]. De software is niet toegepast in dit onderzoek, maar kan wel interessant zijn indien er in vervolgonderzoek bespaard zou willen worden op een COMSOL-licentie.

Op basis van het gedane vooronderzoek wordt Sweco aangeraden contact te houden met het RIVM over de voortgang van de rekenregel van de Whisstone en deze wanneer klaar toe te passen in projecten met Geomilieu. Een opzet van deze rekenregel is in vertrouwen opgeleverd aan Sweco. Ook wordt aangeraden de rekenregels van de overige gevonden maatregelen op te vragen bij de desbetreffende ontwikkelaar/leverancier.

Als Sweco in de toekomst het besluit neemt COMSOL toe te passen in akoestiekprojecten, wordt aanbevolen de modelleerwijze van het model uit dit onderzoek te beschouwen. Er is een handleiding opgeleverd aan Sweco voor de modelleerwijze hiervan.

7.1 Toepassing resultaat en vervolgonderzoek

Om te zijner tijd een uitspraak te doen over de invloed van de Whiswall, zou ervoor gekozen kunnen worden de geluidwering die volgt uit de metingen óf COMSOL, toe te passen per octaafband op berekende L_{eq} waardes die bepaald zijn met behulp van het Reken- en Meetvoorschrift Geluid 2012. Hierbij is het van belang dat de afstandsdemping van de L_{eq} waardes naar de omgeving, een afstandsdemping van 3 dB per afstandsverdubbeling hebben. De octaafband met een middenfrequente van 8 kHz dient verwaarloosbaar te zijn als gekeken wordt naar het totale geluidsniveau. De resultaten zijn enkel toepasbaar voor bepaalde L_{eq} waardes op een loodrecht-gelegen lijn van een lijnbron naar de omgeving, waarbij de bronafstand tot de Whiswall, één van de twee beschouwde rijstrookafstanden tot de Whiswall uit dit onderzoek is. Het akoestisch zwaartepunt (bronhoogte) zou hierbij vergelijkbaar moeten zijn met die van een Ford Mondeo of de bronhoogte uit het COMSOL-model. Hierbij zijn de resultaten enkel toepasbaar voor een vlakke bodem.

Om het model statistisch gezien beter te kunnen verantwoorden zijn er meer metingen nodig. Er wordt aangeraden metingen te verrichten voor meerdere voertuigen, bodemgebieden en wegdekken om te bepalen hoe het model standhoudt voor deze situaties. Wellicht was het niet 'stil' genoeg op de gemeten locatie, hierdoor zou het verloop van de passages bij het meten achter de Whiswall lastiger te achterhalen kunnen zijn. Dit zou voor analysefouten kunnen zorgen en kunnen verklaren waarom de meetresultaten te hoog zijn op de lagere hoogtes achter de Whiswall. Bij voorkeur worden nieuwe metingen verricht op een zo'n stil mogelijke locatie met een auto die een hogere geluidemissie heeft. De resultaten uit COMSOL zijn uitgeschreven voor een 'grid' om verdere toetsing te kunnen doen op de juistheid van het model. Deze waardes zijn opgeleverd aan Sweco.

Er zou in vervolgonderzoek een modelparameterstudie gedaan kunnen worden. Hierbij zou bijvoorbeeld onderzoek gedaan kunnen worden naar wat de invloed is van de gestelde grensvoorwaardes in het model. In het model voor dit onderzoek zijn namelijk enkel de Sound Hard Boundary (Wall) en de Sound Soft Boundary grensvoorwaardes beschouwd over de gehele Geometry. Hierbij zou de bron voor meerdere posities beschouwd kunnen worden.

Als de fouriergetransformeerde van de geluidimmissie bekend is waarvoor het model getoetst wordt (hierbij zou het geluidniveau per frequentie afzonderlijk bekend zijn), zou de weging per middenfrequentie van de 6^e-octaafbanden hier eventueel op gebaseerd kunnen worden. Dit zou naar verwachting een meer nauwkeurige indicatie voor de geluidwering geven voor het desbetreffende voertuig. Er zouden eventueel ook meerdere frequenties in het model beschouwd kunnen worden.

Referenties

- [1] Atlas Leefomgeving, „Geluid,” Atlas Leefomgeving, 23 december 2015. [Online]. Available: <https://www.atlasleefomgeving.nl/meer-weten/geluid>. [Geopend 13 februari 2019].
- [2] Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, „Gezondheid,” RIVM, 2 november 2018. [Online]. Available: <https://www.rivm.nl/geluid/effecten-van-geluid/gezondheid>. [Geopend 6 februari 2019].
- [3] World Health Organization, „Burden of disease from environmental noise,” WHO, Copenhagen, 2011.
- [4] De Overheid, „Regeling geluid milieubeheer,” de Overheid, 1 januari 2019. [Online]. Available: <https://wetten.overheid.nl/BWBR0031712/2019-01-01#Bijlage3>. [Geopend 6 februari 2019].
- [5] Kenniscentrum InfoMil, „Rekenen en meten verkeerslawaaï Wgh,” Rijkswaterstaat, [Online]. Available: <https://www.infomil.nl/onderwerpen/geluid/regelgeving/wet-geluidhinder/wegverkeerslawaaï/akoestisch-rapport/rekenen-meten/>. [Geopend 6 februari 2019].
- [6] Rijksoverheid, „Omgevingswet,” Rijksoverheid, [Online]. Available: <https://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/omgevingswet>. [Geopend 6 februari 2019].
- [7] Kenniscentrum InfoMil, „Aanvullingswet geluid,” Rijkswaterstaat, [Online]. Available: <https://www.infomil.nl/onderwerpen/geluid/ontwikkeling/aanvullingswet/>. [Geopend 6 februari 2019].
- [8] Sweco, „Over ons,” 2019. [Online]. Available: <https://www.sweco.nl/over-ons/>. [Geopend 4 februari 2019].
- [9] „Sweco Nederland,” 6 augustus 2018. [Online]. Available: https://nl.wikipedia.org/wiki/Sweco_Nederland. [Geopend 4 april 2019].
- [10] T. J. M. van Diepen, in *Dictaat Akoestiek*, Zoetermeer, Peutz, 2008.
- [11] „VAN GELUIDBRON TOT ONTVANGER,” 14 april 2014. [Online]. Available: <http://www.4nix.nl/geluidbron---ontvanger.html>. [Geopend 3 mei 2018].
- [12] „Acoustic wave equation,” Wikipedia, 1 februari 2019. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Acoustic_wave_equation. [Geopend 4 maart 2019].
- [13] Z. Nazarchuk, V. Skalskyi en O. Serhiyenko, „Main Ideas of the Wave Process,” in *Acoustic Emission 'Methodology and Application'*, Cham, Switzerland, Springer International Publishing, 2017, pp. 32-34.
- [14] W. A. Strauss, „the wave equation,” in *Partial Differential Equations`*, Westford/Stoughton Amerika, Courier, 2008, pp. 33-34.
- [15] COMSOL, „Acoustics Module User's Guide (Version: COMSOL 5.4),” COMSOL, 2018.
- [16] „Helmholtz equation,” Wikipedia, 6 mei 2019. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Helmholtz_equation. [Geopend 21 mei 2019].
- [17] „Effectieve waarde,” Wikipedia, 18 maart 2019. [Online]. Available: https://nl.wikipedia.org/wiki/Effectieve_waarde. [Geopend 23 april 2019].

- [18] „Wegingscurves A en C,” Wikipedia, 28 april 2015. [Online]. Available: https://nl.wikipedia.org/wiki/Wegingscurves_A_en_C. [Geopend 29 april 2019].
- [19] ISO, „Acoustics - Preferred frequencies,” ISO, 1997. [Online]. Available: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:266:ed-2:v1:en>. [Geopend 30 april 2019].
- [20] R. D. Blevins, „Appendix C Standard Octaves and Sound Pressure uit Formulas for Dynamics, Acoustics an Vibration,” 2016. [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/9781119038122.app3>. [Geopend 7 mei 2019].
- [21] „Geluidsvoortplanting,” Wikipedia, 27 jan 2016. [Online]. Available: https://nl.wikipedia.org/wiki/Geluidsvoortplanting#Wind_en_temperatuur. [Geopend 22 mei 2019].
- [22] „Omschrijving Brontypen,” InfoMil, [Online]. Available: https://www.infomil.nl/onderwerpen/lucht-water/luchtkwaliteit/regelgeving/wet-milieubeheer/beoordelen/koppeling/nieuw-nationaal/handreiking-nieuw/handreiking-nieuw-0/3_2_omschrijving/. [Geopend 22 mei 2019].
- [23] F. B. J. Elbers, in *Syllabus voor de Opleiding Milieu-Geluid/Bouwakoestiek Module 6 Weg- en Railverkeerslawaai - Deel 1 wegverkeerslawaai*, Utrecht, dBvision, 2017.
- [24] 4Silence, „Sustainable noise reduction,” 4Silence, [Online]. Available: <https://4silence.nl>. [Geopend 21 mei 2019].
- [25] 4Silence, „Whisstone, de oplossing tegen verkeerslawaai,” 4Silence, [Online]. Available: <http://4silence.nl/producten/whisstone/>. [Geopend 21 mei 2019].
- [26] RION Co., LTD., „Technical Notes Sound Level Meter NA-28,” [Online]. Available: <http://cerium.hr/images/upload/files/rion/mjeraci-zvuka/na28/NA-28TechnicalNotes50863.pdf>. [Geopend 30 april 2019].
- [27] RION CO., LTD., „NA28-EN.pdf,” [Online]. Available: <http://www.tbve.nl/info/NA28-EN.pdf>. [Geopend 30 april 2019].
- [28] A. Goesten, „Hygrothermal simulation model: Damage as a result of insulating historical buildings,” Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven, 2016.
- [29] S. G. Johnson, „Notes on Perfectly Matched Layers (PMLs),” MIT, Cambridge, 2007.
- [30] OpenPSTD, „openPSTD project,” TU Eindhoven, 2018 12 13. [Online]. Available: <http://www.openpstd.org/index.html>. [Geopend 8 mei 2019].
- [31] M. Kraposhin, S. Strijhak en M. Kraposhin, „Computational Aeoacoustics Methods with OpenFOAM v. 4.1,” 23 juli 2017. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.32022.24641> . [Geopend 8 mei 2019].

Bijlage I Inventarisatierapport

Referentienummer: Inventarisatierapport innovatieve geluidoverdrachtsmaatregelen

Datum: 30-05-2019

Inventarisatierapport innovatieve geluidoverdrachtsmaatregelen

Inhoudsopgave

1	Inleiding	1
2	Minischermen	1
2.1	Achtergrond	1
2.2	Fysische eigenschappen	2
2.3	Voor- en nadelen	4
2.4	Varianten	4
3	GeluidVangrail	5
3.1	Achtergrond	5
3.2	Fysiche eigenschappen	5
3.3	Voor- en nadelen	6
4	Geluidsrail	7
4.1	Achtergrond	7
4.2	Fysische eigenschappen	7
4.3	Voor- en nadelen	8
4.4	Varianten	8
5	Diffractoren	9
5.1	Achtergrond	9
5.2	Fysische eigenschappen	9
5.3	Voor- en nadelen	11
5.4	Varianten	12
5.4.1	Whisstone	12
5.4.2	Whisswall/top	12
	Referenties	13

1 Inleiding

Ten behoeve van het afstudeeronderzoek van Jelle Ruis is er een inventarisatie gemaakt van welke innovatieve geluidoverdrachtsmaatregelen er langs wegen en spoorwegen op de markt of in ontwikkeling zijn anno 2019. Dit rapport gaat in op de achtergrond van de maatregelen, de voor- en nadelen, de varianten en de interactie-effecten tussen de geluidbron en de overdrachtsmaatregel; de fysische eigenschappen met betrekking tot de geluidwering.

2 Minischermen

2.1 Achtergrond

Een hoog geluidscherm heeft een relatief grote ruimtelijke impact op de omgeving en is welstandsplichtig [1]. Hierdoor komen hoge geluidschermen steeds met omgevingspartijen tot stand. Minigeluidschermen worden dicht aan het spoor geplaatst en hebben een kleinere ruimtelijke impact. Deze worden beschouwd als onderdeel van het generieke spoor en zijn daarom niet welstandsplichtig [1]. De toepassingen van deze schermen is daarom eenvoudiger.

In 2017 zijn in Hilversum de eerste minigeluidschermen geplaatst binnen Nederland. Er rijden dagelijks treinen door Hilversum en bewoners in de buurt van het spoor hebben hier soms last van [2]. In februari 2014 is door ProRail en de gemeente Hilversum besloten dat het plaatsen van minischermen dé oplossing zou moeten zijn [3, 2]. De geplaatste minischermen zijn 75 cm hoog en staan dicht op het spoor [2]. Hiervoor was er in Nederland nog geen ervaring met minischermen langs het spoor, daarom is dit scherm eerst geplaatst ter beproeving. De minischermen leverden een positief resultaat op met betrekking tot de geluidreductie [4]. Zie het toegepaste minischerm in figuur 2.1.



Figuur 2.1: Toegepast minischerm langs het spoor in Hilversum [5].

Het minischerm uit figuur 2.1 wordt de Green Silence Wall genoemd en is ontwikkeld door: Strukton Prefab Beton. Het scherm is gemaakt van Prefab Beton en het relatief snelgroeiende gras miscanthus. Miscanthus is goed te verwerken in Prefab Beton. De miscanthus vezels creëren een 'open structuur' waardoor het geluid geabsorbeerd wordt [6].

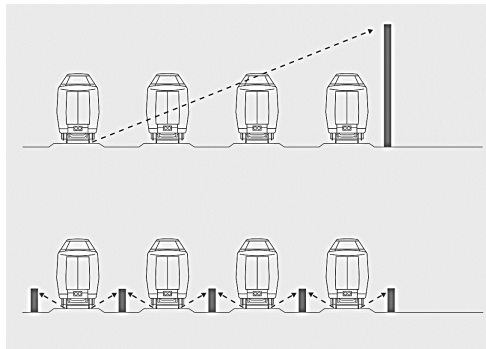
2.2 Fysische eigenschappen

Bij geluidschermen zijn de volgende interactie-effecten met betrekking tot geluid van belang [7]:

- Geluidabsorberende materialen of structuren
- Afscherming van geluidstralen
- Diffractie op de schermtop
- Overdracht van geluid door het scherm

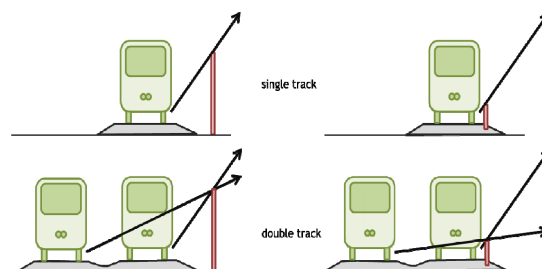
Minischermen dienen bij voorkeur van geluidabsorberende materialen of structuren te worden gemaakt. Als de schermen gebaseerd zouden zijn op geluidreflectie zal naar verwachting het geluid niet gedempt worden maar juist versterken door meervoudige reflecties tussen het scherm en de geluidbron.

Als geluidschermen dicht op de bron worden geplaatst kunnen de schermen lager zijn om onder eenzelfde hoek geluidstralen af te schermen; zie figuur 2.2.



Figuur 2.2: Toepassing van hoge en lage geluidschermen voor een situatie met meerdere spoorlijnen [1].

De toepassing van minischermen bij situaties met meerdere spoorlijnen wordt met meerdere schermen gedaan om onder eenzelfde hoek geluidstralen af te schermen; zie figuur 2.2 en 2.3.



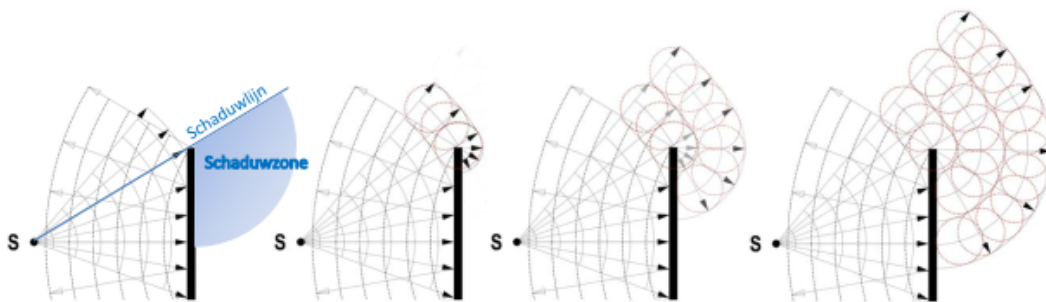
Figuur 2.3: Toepassing van hoge en lage geluidschermen voor een situaties met enkele en meerdere spoorlijnen [8].

Naast het afschermen van geluidstralen is ook de transmissie van geluid door het scherm [9, 10] en de diffractie van geluidgolven aan de schermtop [11, 12] maatgevend voor de geluidwering. De afname in geluidsterkte van geluidstralen door solide materialen is materiaal- en frequentieafhankelijk; zie bron [13]. Diffractie van geluid volgt uit het principe van Huygens-Fresnel [14].

Als regel kan gesteld worden dat er alleen een 'schaduwzone' van verstrooid geluid achter een scherm (of object) ontstaat als de golflengte van het geluid kleiner is dan de afmeting van het voorwerp [15]. Als een vlakke geluidsgolf met een golflengte λ (m) loodrecht op een scherm met een lengte l (m) valt, buigt het geluid bij benadering met een hoek θ in radialen naar beneden ten opzichte van een denkbeeldige loodrecht gelegen normaallijn aan het scherm [15]:

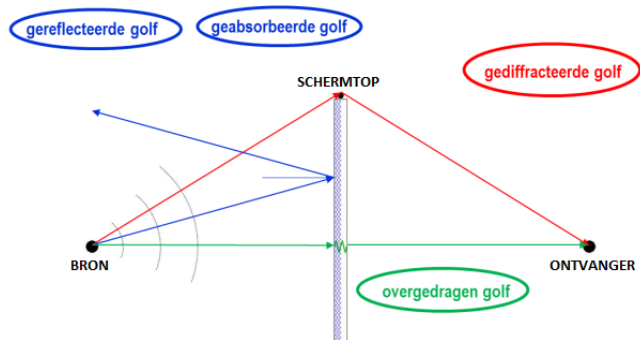
$$\theta \approx \frac{\lambda}{l} \quad (2.1)$$

Er kan dus gesteld worden dat geluid met grotere golflengten onder een grotere hoek θ verstrooid worden. Zie figuur 2.4 voor de wijze waarop geluidgolven verstrooid worden aan een schermtop.



Figuur 2.4: Verstrooide geluidgolven aan een schermtop [7].

Zie figuur 2.5 voor een schematische weergave van alle genoemde interactie-effecten tussen geluid en een scherm.



Figuur 2.5: Interactie-effecten tussen geluid en een scherm [7].

Minischermen worden op 1,70 m van het spoor geplaatst en hebben een hoogte tussen 0,5 en 1,0 m [8]. De gemeten geluidreductie door minischermen varieert tussen de 2 en 10 dB en is afhankelijk van de sterkte van het rolgeluid in vergelijking tot het totale geluid [8].

2.3 Voor- en nadelen

In bepaalde situaties kan de geluidwering van minischermen al voldoende zijn ten opzichte van de toepassing van traditionele schermen [1]. Volgens ProRail staat de toepassing van minischermen bij spoorwegemplacementen centraal [1]. Het voordeel voor de omgeving en bewoners is dat het zicht minder beïnvloed wordt door lage schermen. Vanuit akoestisch perspectief gezien kunnen minischermen meer effectief zijn dan traditionele schermen als de dominante geluidbron zich beneden de top van het scherm bevindt [8]. Vanuit onderhoud- en constructieperspectief is het belangrijk de volgende punten in acht te nemen bij de toepassing van minischermen [8]:

- Zelfs met een kleine fundering kan er een conflict ontstaan met drainage, bekabeling en constructie-elementen dicht bij de spoorlijn
- Spooronderhoud kan lastiger zijn en daarom duurder
- Verhoogd risico voor het personeel dat onderhoud doet aan het spoor
- Risico op sneeuwopbouw tussen de schermen en het spoor
- Kosten kunnen vergelijkbaar zijn met traditionele schermen voor situaties met meerdere spoorlijnen

2.4 Varianten

De volgende varianten van minischermen zijn bekend [8] (andere bron waar vermeld):

- Geluidabsorberende perronkanten [1]
- KP II barrier Ludwigshafen
- KP II barrier Mannheim
- KP II barrier Oberwesel
- KP II barrier Cologne
- Zbloc
- SoundIm Rail
- Brenz
- Stone-filled gabions
- Green Silence Wall [6]
- Minischermen van Rieder [16]

3 GeluidVangrail

3.1 Achtergrond

In 2016 riepen de provincies Noord- en Zuid-Holland samen met de Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RvO) ondernemers op om nieuwe, innovatieve maatregelen te ontwikkelen tegen geluidoverlast langs provinciale wegen [17, 18]. Het project werd het 'SBIR-project Geluidswerende innovaties' genoemd. Op 19 januari 2018 vond de innovatiebijeenkomst GeluidreductiePlus plaats waarbij de winnaars van het project werden bekendgemaakt. Een van de winnaars was de GeluidVangrail ontwikkeld door Merford en Movares [19]; deze is weergegeven in figuur 3.1. De winnaars van het project kregen een eigen proeftraject waar ze hun product kunnen beproeven [19].



Figuur 3.1: GeluidVangrail van Merford en Movares [20].

3.2 Fysieke eigenschappen

De GeluidVangrail is een diagonaal scherm gemaakt van staal en functioneert als vangrail en geluidscherm [21]. Het scherm is gebaseerd op het naar de berm (grond) reflecteren van wegverkeergeluid [17]. Het is dus noodzakelijk dat zich een sterk absorberende ondergrond bevindt onder GeluidVangrail; een ondergrond van gras heeft een relatief sterk absorberend effect [22]. Net als bij een minischerm is het van belang dat de bron dicht op de GeluidVangrail staat, zodat geluidstralen onder een zo'n groot mogelijk uitstralingsgebied naar beneden kunnen worden gereflecteerd. Hierbij is het dus van belang dat het grootste deel van het wegverkeergeluid zich dicht aan de grond bevindt. Toepassingen van GeluidVangrails om vrachtwagengeluid tegen te gaan lijken naar subjectieve veronderstelling niet geschikt, omdat het grootste deel van de geluidemissie meer hooggelegen zou zijn in vergelijking met een personenwagen.

De eerste proeven met de GeluidVangrail leverden een geluidwering op van maximaal 5 dB [17].

3.3 Voor- en nadelen

De GeluidVangrail werd door de jury van het SBIR-project Geluidswerende innovaties geroemd om zijn eenvoud, beperkte omvang en hoge kostenefficiëntie [17]. De volgende punten worden beschouwd als voordelen van de GeluidVangrail [23, 17, 24]:

- Toe te passen op standaard bestaande vangrails en zorgt daardoor voor weinig ruimtebeslag én is eenvoudig
- Duurzaam doordat de GeluidVangrail nauwelijks onderhoud vergt
- Een factor 10 goedkoper dan een geluidscherm van 1 meter met eenzelfde verwachte geluiddemping
- De GeluidVangrail zou veiliger zijn voor motorrijders
- Doordat de GeluidVangrail geen ontwerpproces of bouwvergunning vereist is de geluidmaatregel relatief snel toepasbaar
- Doordat de GeluidVangrail klein en licht is, is er geen fundering nodig om het scherm te plaatsen
- De maatregel kan zonder veranderingen in het bestemmingsplan toegepast worden
- Met de GeluidVangrail zijn er geen aanpassingen aan het 'Reken- en meetvoorschrift geluid' nodig en kan er met de maatregel gerekend worden binnen de huidige wetgeving

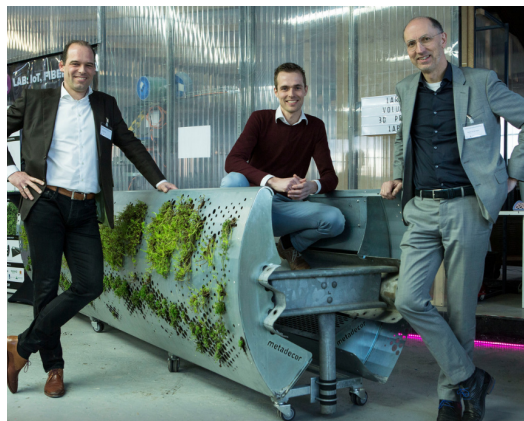
Naar subjectieve veronderstelling worden als nadelen van de GeluidVangrail verwacht dat deze niet geschikt zouden zijn voor:

- Verkeer met een hoger gelegen geluidemissie; zoals vrachtverkeer
- Meerbaanswegen; zie figuur 2.2 en 2.3

4 Geluidsrail

4.1 Achtergrond

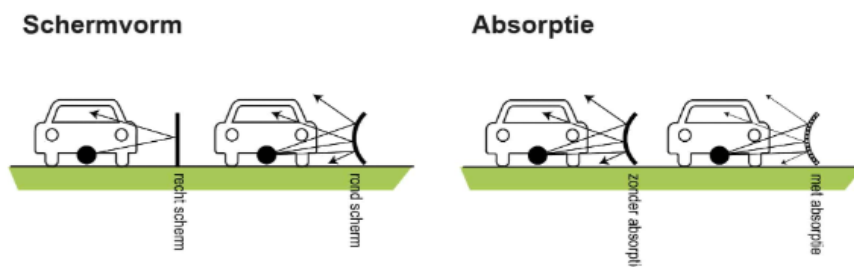
Een van de ingezonden voorstellen en genomineerd voor het SBIR-project Geluidswerende innovaties van het RvO was de Geluidsrail van Metadecor [18]. Ondanks het niet winnen van de prijs gaat Metadecor door met zijn product en wil in 2020 de markt op [25]. Bij het realiseren van de Geluidsrail is Metadecor in samenwerking gegaan met verschillende partners: Soontiens Stadsnatuur, Tinx, abtWassenaar, burowit en Wageningen University & Research [26]. Zie figuur 4.1 voor een weergave van de Geluidsrail.



Figuur 4.1: Geluidsrail en medewerkers van Metadecor [25].

4.2 Fysische eigenschappen

De Geluidsrail is een cilindrisch vormig laag geluidscherm met holtes waar beplanting uit groeit dat bevestigd kan worden aan een vangrail [25]. De cilindrische vorm van het scherm zou naar subjectieve veronderstelling voor minder reflecties tussen het scherm en de geluidbron moeten zorgen in vergelijking tot een recht scherm. Door de toevoeging van beplanting zou het geluid meer geabsorbeerd worden dan gereflecteerd [22]. Zie figuur 4.2 voor een weergave van deze twee effecten. Doordat het scherm zich aan twee zijden van de vangrail bevindt zou het geluid tweevoudig verstrooid worden aan de schermtoppen [7]. Doordat een golf front in een reeks nieuwe secundaire bronnen 'uitgewaaierd' wordt door het diffractieverschijnsel [7] is het aannemelijk dat dit ook bijdraagt aan de geluidwering.



Figuur 4.2: Vergelijking tussen schermvormen en absorptie/reflectie bij de Geluidsrail [26].

De verwachte geluidwering door de Geluidsrail met een hoogte van 1,1 meter voor woningen vlak naast provinciale wegen loopt op tot 6 dB [26]. Dit is een demping tot 5 dB in het referentiepunt van een geluidproductieplafond van 50 meter uit de weg en een hoogte van 4 meter [26].

4.3 Voor- en nadelen

De volgende punten worden als voordelen beschouwd van de Geluidsrail [26, 27]:

- De Geluidsrail biedt een veilige bescherming voor auto's, fietsers en voetgangers
- De Geluidsrail zou veiliger zijn voor motorrijders
- De Geluidsrail heeft een groene, natuurlijke uitstraling
- De Geluidsrail is toe te passen op bestaande standaard vangrails
- Plaatsing van de Geluidsrail is funderingloos
- Van de Geluidsrail zijn akoestische rekenmodellen beschikbaar waarmee de geluidreductie langs de weg is te bepalen
- De Geluidsrail is botsvriendelijk
- Indien periodieke bevochtiging nodig is voor de vegetatie, dan voorziet de Geluidsrail in een waterdruppelsysteem, waardoor handmatige bevochtiging niet nodig is
- De Geluidsrail is leverbaar in verschillende begroeiingsvarianten

De volgende punten worden als nadelen beschouwd van de Geluidsrail [26, 25]:

- Automatisch waterdruppelsysteem die de vegetatie bevochtigt zou naar subjectieve veronderstelling voor relatief veel onderhoud kunnen zorgen
- De holtes in de Geluidsrail zouden minder geschikt zijn voor het tegenhouden van fijnstof en strooizout en zouden ongeschikt kunnen zijn bij ongevallen.
- De vegetatie zou naar subjectieve veronderstelling voor relatief veel onderhoud kunnen zorgen

Naar subjectieve veronderstelling worden als nadelen van de Geluidsrail ook verwacht dat deze niet geschikt zouden zijn voor verkeer met een hoger gelegen geluidemissie en meerbaanswegen.

4.4 Varianten

In het belang van sociale veiligheid, routemarkering en visuele geleiding is het mogelijk de Geluidsrail te voorzien van ledverlichting in tekst of specifieke patronen [26]. De Geluidsrail is leverbaar in begroeiingsvarianten geschikt voor zowel droge en natte condities; de vegetatie kan variëren van ingetogen gras- en mosachtig tot uitbundig en bloemrijk [26]. Alle vegetatie is bestand tegen een agressief milieu met betrekking tot warmte, dooizouten, vorst en droogte en groeit zelfstandig in de Geluidsrail [26].

5 Diffractoren

5.1 Achtergrond

De Diffractor is een uitvinding van Ysbrand Wijnant [28]. Wijnant doceert hogere akoestiek aan de TU Twente en richtte in 2012 het bedrijf 4Silence op om de Diffractor uit te werken tot een product geschikt voor de markt [28]. Tegenwoordig zijn er Diffractoren in meerdere soorten en maten ontwikkeld, zie een voorbeeld van een Diffractorvariant in figuur 5.1.



Figuur 5.1: Diffractor in toepassing bij een weg: de Whisstone [29].

5.2 Fysische eigenschappen

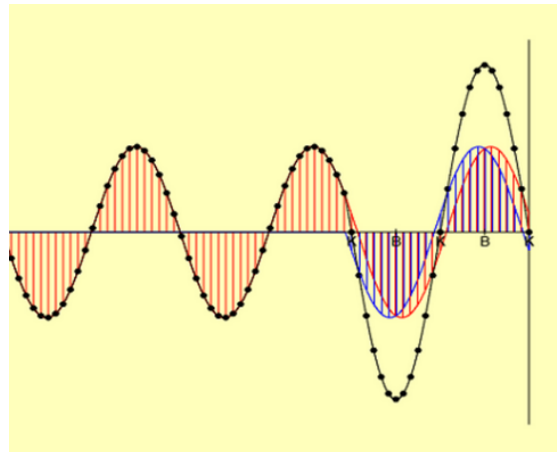
Een Diffractor is een constructie bestaande uit holtes van verschillende afmetingen; de holtes worden ook wel resonatoren genoemd [30]. Deze holtes zorgen ervoor dat het geluid naar boven afgebogen wordt [30]. De fysische werking van Diffractoren berust op het diffractie-effect dat geluid bij objecten vertoont; zie vergelijking (2.1) en figuur 2.4. De wijze waarop het geluid verstrooid wordt is dus geheel afhankelijk van de golflengte λ van het geluid en de lengtes in de hoogte van de holtes l ; de constructie van Diffractoren met betrekking tot de afmetingen van de holtes is dan ook gebaseerd op frequenties die relatief sterk uitgezonden worden door de bron [29].

Als een geluidsgolf loodrecht (zonder invalshoek) in een holte valt en de afmeting van de holte van de open tot gesloten zijde l overeenkomt met een kwart golflengte of een: $(2n - 1)$ aantal kwart golflengten van het invallende geluid kunnen er staande golven ontstaan; resonantie [31, 32]. Hierbij is n een geheel getal en de n -de harmonische van de holte. Voor staande golven in een open-gesloten holte geldt dan de volgende vergelijking:

$$(2n - 1) \frac{\lambda}{4} = (2n - 1) \frac{c}{4f} = l \quad (5.1)$$

In vergelijking (5.1) is c de geluidssnelheid (ongeveer 343 m/s bij 20 °C [33]) en f (Hz) de frequentie van het geluid.

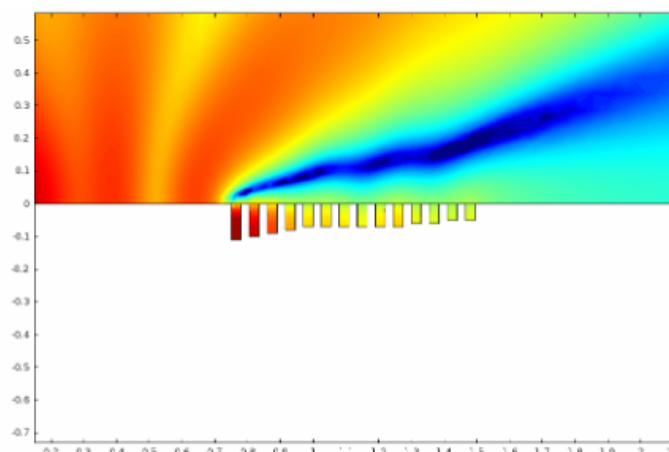
Als de amplitude van het drukverschil van de invallende geluidsgolf niet beïnvloed wordt door het materiaal waarop deze reflecteert, zal de amplitude van de staande golf een verdubbeling zijn van die van de invallende golf. Zie figuur 5.2 voor een weergave van dit effect.



Figuur 5.2: Staande golven met op de x-as de lengte van de holte en op de y-as de geluiddruk. De lijn van de y-as wordt beschouwd als het reflectiepunt van de holte. De druk van de staande golf (zwart) is een sommatie van de invallende golf (rood) en de gereflecteerde golf (blauw) op elk punt in de holte [34].

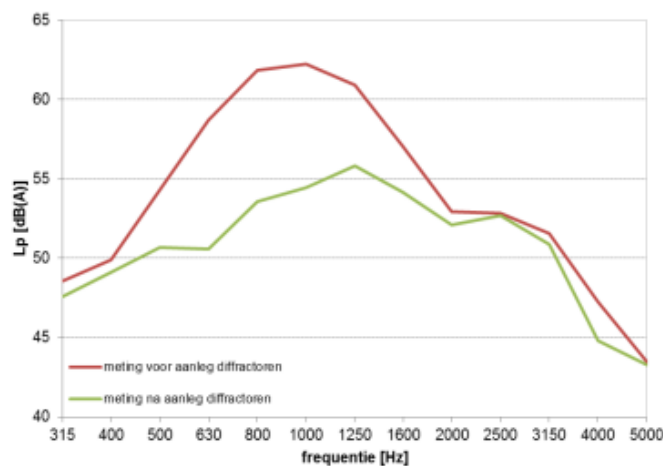
De uitleg van 4Silence over Diffractoren stelt dat het geluid afkomstig van de resonantieholtes voor een weerstand zou zorgen waardoor het geluid boven de Diffractor naar boven verdrongen wordt [35]. “De holtes van de Diffractor zijn gebaseerd op kwartgolflengteresonatoren, hierdoor ontstaat er een hoge deeltjessnelheid boven in deze holtes, wat voor een weerstand zorgt bij het geluid dat over de Diffractor reist” (Ysbrand Wijnant).

Een simulatie van de Diffractorwerking is weergegeven in figuur 5.3.



Figuur 5.3: Simulatie van de werking van een Diffractor, het geluidsdrukkniveau is weergegeven van blauw naar rood in sterkte [29].

Uit metingen blijkt dat het spectrale effect dat relevant is voor wegverkeer tussen de 800 en 1600 Hz ligt en dat de geluiddemping tot circa 5 dB oploopt voor specifieke tertsbanden [30]. Uit onderzoek van TNO kwam een totale geluidreductie van 2 tot 3 dB(A) [29]. Bij geluidmetingen voor en na de aanleg van Diffractoren in Soesterberg bleek het resultaat weergegeven in figuur 5.4.



Figuur 5.4: Resultaten geluidmetingen in Soesterberg voor- en na de toepassing van de Diffractor [29].

In figuur 5.4 is te zien dat de geluiddemping het hoogst is voor frequenties waar de uitgestraalde emissie het hoogst is. Ook is het opmerkelijk dat het geluid gereduceerd wordt rond de 500 Hz wat met behulp van vergelijking (5.1) uitkomt op een golflengte van 0,686 m. Voor een kwartgolflengteresonator geldt dan: $l = 0,172$ m.

5.3 Voor- en nadelen

De volgende punten worden als voordelen beschouwd van Diffractoren [30, 36]:

- Geen lange juridische procedure nodig voor de plaatsing van een Whisstone
- Beperkt ruimtebeslag en verstoring van het uitzicht ten opzichte van traditionele maatregelen
- Toe te passen als lokale maatregel
- Aan te brengen met beperkte verkeershinder
- Goed te combineren met stille wegdekken
- In combinatie met dubbellaags ZOAB is het vermoedelijk mogelijk dat op bepaalde locaties geen geluidschermen meer noodzakelijk zijn

De volgende punten worden als nadelen beschouwd van Diffractoren [37]:

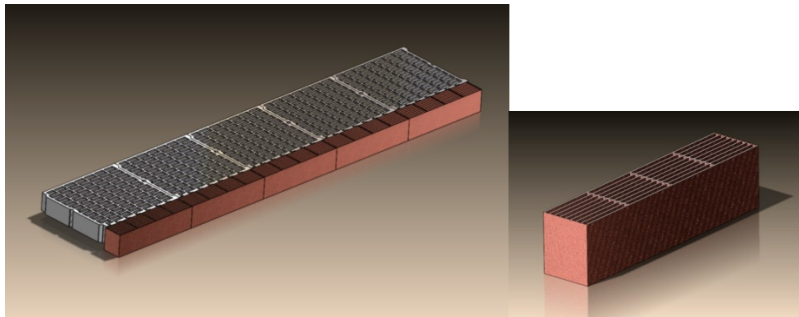
- Lagere geluidreductie ten opzichte van geluidschermen/wallen
- Naar subjectieve veronderstelling wordt verwacht dat er onderhoud nodig is door vuilophoping en begroeiing

5.4 Varianten

Diffractoren komen voor in verschillende soorten en maten, maar zijn globaal te onderscheiden in drie varianten. Alle varianten zijn ontwikkeld door- of in samenwerking met 4Silence.

5.4.1 Whisstone

Een van de inzendingen en winnaars van het SBIR-project Geluidswerende innovaties van het RvO was de Whisstone ZV (Zwaar Verkeer) [18]. De Whisstone is een Diffractor die naast de weg op gelijke hoogte wordt geplaatst. Zie figuur 5.1 voor een normale Whisstone variant en figuur 5.5 voor de Whisstone ZV.



Figuur 5.5: De Whisstone ZV, deze heeft ten opzichte van de 'normale' Whisstone een toevoeging die te zien is op de rechterzijde [38].

De extra toevoeging aan de Whisstone voor de Whisstone ZV is gemaakt om laagfrequent geluid (300 – 500 Hz) te dempen en is gemaakt van Cortenstaal of gietijzer [39].

5.4.2 Whiswall/top

Een van de ingezonden voorstellen van het SBIR-project Geluidswerende innovaties van het RvO was het lage Diffractorscherm van Altena en 4Silence [18]. Dit wordt door 4Silence ook wel de Whiswall genoemd en bestaat uit een minischerm met daarop een gemonteerd diffractierooster; zie figuur 5.6 voor de Whiswall en de Whisstop van 4Silence.



Figuur 5.6: De Whiswall (links) en Whisstop (rechts) van 4Silence [40].

De Whisstop is een innovatieve schermtop die toegepast kan worden op bestaande geluidschermen [41].

Referenties

- [1] R. Brouwers, „Handboek Geluidsschermen,” ProRail, i.s.m. Bureau Spoorbouwmeester, 2016.
- [2] Dura Vermeer, „Mini-Geluidsschermen tegen spoorgeluid in Hilversum,” Dura Vermeer, 20 oktober 2017. [Online]. Available: <https://www.duravermeer.nl/nieuws/minigeluidsschermen-tegen-spoorgeluid-in-hilversum>. [Geopend 20 februari 2019].
- [3] A. de Jong, „Hilversum heeft primeur met minischermen tegen treinerherrie Mussenstraat,” De Gooi- en Eemlander, 3 oktober 2017. [Online]. Available: https://www.gooieneemlander.nl/cnt/dmf20180926_10104029/hilversum-heeft-primeur-met-minischermen-tegen-treinerherrie-mussenstraat?utm_source=google&utm_medium=organic. [Geopend 21 februari 2019].
- [4] Spoorpro, „Proeven met lage geluidsschermen spoor positief,” Spoorpro, 24 april 2018. [Online]. Available: <https://www.spoorpro.nl/spoorbouw/2018/04/24/proeven-met-lage-geluidsschermen-spoor-positief/>. [Geopend 21 februari 2019].
- [5] ProRail, „Foto's: minigeluidsschermen in Hilversum,” ProRail, 4 september 2017. [Online]. Available: <https://www.prorail.nl/nieuws/fotos-minigeluidsschermen-in-hilversum>. [Geopend 21 februari 2019].
- [6] Strukton Prefab Beton, „Green Silence Wall,” Strukton Prefab Beton, 2018. [Online]. Available: <http://www.struktonprefabbeton.nl/producten/green-silence-wall/>. [Geopend 21 februari 2019].
- [7] Acoustic Technologies, „Reductie van wegverkeerslawaaï tijdens de voortplanting- geluidsschermen en (geluids)absorberende wandbekledingen,” Acoustic Technologies, Brussel, 2018.
- [8] N. Craven, F. Elbers, E. Verheijen, J. Oertli, M. Fleckenstein, F. Göçmen, F. Poisson, J. Hlaváček en P. Hübner, „Railway noise Technical Measures Catalogue,” International Union of Railways, Utrecht, 2013.
- [9] M. Schwartz, „Lecture 9: Reflection, Transmission and Impedance,” 2016. [Online]. Available: <http://users.physics.harvard.edu/~schwartz/teaching>. [Geopend 5 maart 2019].
- [10] J. S. Lamancusa, „9. Transmission of sound through structures,” 2000. [Online]. Available: <https://www.mne.psu.edu/lamancusa/me458/>. [Geopend 5 maart 2019].
- [11] H. S. Kim, J. S. Kim, H. J. Kang, B. K. Kim en S. R. Kim, „Sound diffraction by multiple wedges and thin screens,” Korea Institute of Machinery and Materials, Korea, 2005.
- [12] J. Piechowicz, „Sound Wave Diffraction at the Edge of a Sound Barrier,” University of Science and Technology, Kraków, Poland, 2011.
- [13] Z. Nazarchuk, V. Skalskyi en O. Serhiyenko, „Decay of Elastic Waves,” in *Acoustic Emission 'Methodology and Application'*, Cham, Switzerland, Springer International Publishing, 2017, pp. 51-56.
- [14] Wikipedia, „Principe van Huygens-Fresnel,” 14 september 2018. [Online]. Available: https://nl.wikipedia.org/wiki/Principe_van_Huygens-Fresnel. [Geopend 7 maart 2019].
- [15] D. C. Giancoli, „Buiging,” in *Natuurkunde deel 1*, Amsterdam, Pearson Benelux, 2007, pp. 478-479.
- [16] eTs spoor, „Geluidsreductie,” Rieder, [Online]. Available: <https://www.etsspoor.nl/producten/geluidsreductie/>. [Geopend 19 maart 2019].
- [17] FME, „GeluidVangrail va Merford en Movares wint innovatieprijs,” FME, [Online]. Available: <https://www.fme.nl/nl/leden/merford-noise-control-bv/geluidvangrail-merford-en-movares-wint-innovatieprijs>. [Geopend 8 maart 2019].
- [18] RvO, „SBIR: Minder geluid langs de provinciale weg,” RvO, [Online]. Available: <https://www.rvo.nl/subsidies-regelingen/sbir/overzicht-sbir-oproepen/minder-geluid-provinciale-weg>. [Geopend 8 maart 2019].
- [19] M. v. d. Toorn, „Twee geluidswerende innovaties krijgen eigen proeftraject,” Verkeer in beeld, [Online]. Available: <https://www.verkeerinbeeld.nl/project/220118/twee-geluidswerende-innovaties-krijgen-toepassing-in-de-praktijk>. [Geopend 8 maart 2019].
- [20] G. Weijmans en P. Jansen, *SBIR Geluid: Innovatiecompetitie tegen geluidshinder langs provinciale wegen*.
- [21] Merford, „GeluidVangrail van Merford en Movares wint innovatieprijs,” Merford, 24 januari 2018. [Online]. Available: <https://www.merford.com/nl-nl/nieuws/geluidvangrail-van-merford-en-movares-wint-innovatieprijs/>. [Geopend 9 maart 2019].
- [22] T. J. M. van Diepen, Dictaat Akoestiek, Zoetermeer: Peutz, 2008.
- [23] InfraTech, „Inzendingen InfraTech Innovatieprijs 2019,” InfraTech, 2019. [Online]. Available: <https://www.infratech.nl/programma/inzendingen-infratech-innovatieprijs-2019/product-innovatie>. [Geopend 10 maart 2019].
- [24] RvO, „Geluidvangrail,” Movares, 2016. [Online]. Available: <https://www.rvo.nl/subsidies-regelingen/projecten/geluidvangrail>. [Geopend 10 maart 2019].
- [25] J. Selles, „Deze vangrail uit Kampen houdt naast auto's ook geluid tegen,” AD, 29 mei 2018. [Online]. Available: <https://www.ad.nl/kampen/deze-vangrail-uit-kampen-houdt-naast-autoen-s-ook-geluid-tegen~ac32159b/>. [Geopend 10 maart 2019].

- [26] Metadecor, „Kleinschalige Geluidswering,” Metadecor, [Online]. Available: <https://www.metadecor.nl/geluidsrail/>. [Geopend 10 maart 2019].
- [27] RvO, „MD Geluidsrail,” RvO, 2016. [Online]. Available: <https://www.rvo.nl/subsidies-regelingen/projecten/md-geluidsrail>. [Geopend 10 maart 2019].
- [28] M+P, „Nederland heeft dringend behoefte aan innovatieve, kostenefficiënte geluidmaatregelen,” M+P raadgevende ingenieurs BV, 27 maart 2018. [Online]. Available: <https://www.mp.nl/actueel/nederland-heeft-dringend-behoefte-aan-innovatieve-kosteneffici%C3%ABnte-geluidmaatregelen>. [Geopend 13 februari 2019].
- [29] J. Hooghwerf, B. Bobbink, Y. Wijnant en E. de Vries, „PresentationCROWInfradagen2014 - diffractor_0,” 19 juni 2014. [Online]. Available: https://www.mp.nl/sites/all/files/downloads/PresentationCROWInfradagen2014%20-%20diffractor_0.pdf. [Geopend 13 februari 2019].
- [30] J. Hooghwerff, B. Bobbink, Y. Wijnant en E. de Vries, „Diffractor, geluidafbuiger, geluidgoot: wat is het en ... is het wat?,” M+P Raadgevende ingenieurs bv, 2014.
- [31] „Staande golf,” Wikipedia, 25 oktober 2017. [Online]. Available: https://nl.wikipedia.org/wiki/Staande_golf. [Geopend 13 februari 2019].
- [32] Vadim Classes, „interference.pdf,” 12 oktober 2010. [Online]. Available: <http://bolvan.ph.utexas.edu/~vadim/Classes/10f/>. [Geopend 21 februari 2019].
- [33] „Geluidssnelheid,” Wikipedia, 21 november 2018. [Online]. Available: <https://nl.wikipedia.org/wiki/Geluidssnelheid>. [Geopend 21 februari 2019].
- [34] H. Bruning, „Applets,” Natuurkunde.nl, [Online]. Available: <https://www.natuurkunde.nl/applets>. [Geopend 13 februari 2019].
- [35] 4Silence, „WhisStone,” 4Silence, [Online]. Available: <https://4silence.nl/producten/whisstone/>. [Geopend 11 maart 2019].
- [36] „Diffractor,” wegenwiki, 20 augustus` 2017. [Online]. Available: <https://www.wegenwiki.nl/Diffractor>. [Geopend 19 maart 2019].
- [37] 4Silence, „presentatie 4Silence,” Rijkswaterstaat, [Online]. Available: <https://www.platformwov.nl/media/1958/presentatie-4-silence.pdf>. [Geopend 19 maart 2019].
- [38] Rijkdienst voor Ondernemend Nederland, „Openbare samenvatting eindfase 2 project SBIR: Whisstone voor provinciaal wegennet met zwaar verkeer,” Rijkdienst voor Ondernemend Nederland, Den Haag, 2018.
- [39] B. J. Danker, „4Silence winnaar van SBIR uitvraag "minder geluid langs de provinciale weg”,” 4Silence, 22 januari 2018. [Online]. Available: <https://4silence.nl/4silence-winnaar-van-sbir-uitvraag-minder-geluid-langs-de-provinciale-weg/>. [Geopend 13 maart 2019].
- [40] 4Silence, „Producten,” 4Silence, [Online]. Available: <https://4silence.nl/products/>. [Geopend 14 maart 2019].
- [41] 4Silence, „Whistop,” 4Silence, [Online]. Available: <https://4silence.nl/producten/whistop/>. [Geopend 14 maart 2019].

Bijlage II Geluidbron COMSOL

De modelleerwijze van het model uit het verslag is deels gebaseerd op de modelleerwijze die wordt toegelicht in bron [1]. In deze bron wordt gesteld dat de Mesh van het medium gebaseerd moet zijn op de hoogste frequentie van de bron. Hiermee is besloten de 'Element order' in te stellen op 'Quadratic Lagrange' en de Mesh minimaal 6 punten per golflengte te laten beschouwen voor de hoogst te analyseren frequentie. Rekening houdend met de duur van de simulatie is besloten deze in te stellen voor een frequentie van 4 kHz. Hierdoor is ook besloten de laatste octaafband uit tabel 2.1 van het verslag buiten beschouwing te laten voor het model. Geanalyseerde frequenties hoger dan 4 kHz zijn dus niet even nauwkeurig als lagere.

De akoestische bron voor het COMSOL-model wordt als een lijnbron beschouwd. Bij het modelleren van de bron is gebruik gemaakt van een 'Monopole Point Source' bronvoorwaarde. Hiernaast is er onderzoek gedaan naar een 'Normal Acceleration' grensvoorwaarde.

Monopole Point Source Modelleerwijze

De Monopole Point Source Bronvoorwaarde kan toegekend worden aan een 'Point' van een ontworpen Geometry. Deze voorwaarde kent een uniforme bron toe die in alle richtingen gelijk in sterkte is aan een gekozen punt in de Geometry [2]. Dit wordt gedaan door een term toe te voegen aan de rechterzijde van de Helmholtzvergelijking uit vergelijking (2.6) van het verslag [2]. Hieruit volgt dat de volgende vergelijking opgelost wordt voor de beschouwde punten in de Mesh:

$$\nabla^2 p + \frac{\omega^2}{c^2} p = -4\pi S \delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0) \quad (1)$$

Waarbij $\delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0)$ de deltafunctie voor in dit geval twee dimensies is en de bron toevoegt op het punt waar $\mathbf{x} = \mathbf{x}_0$; het geselecteerde punt in de Geometry. In vergelijking (4.3) is S de amplitude van de bron in (Pa) en dus gelijk aan p_0 .

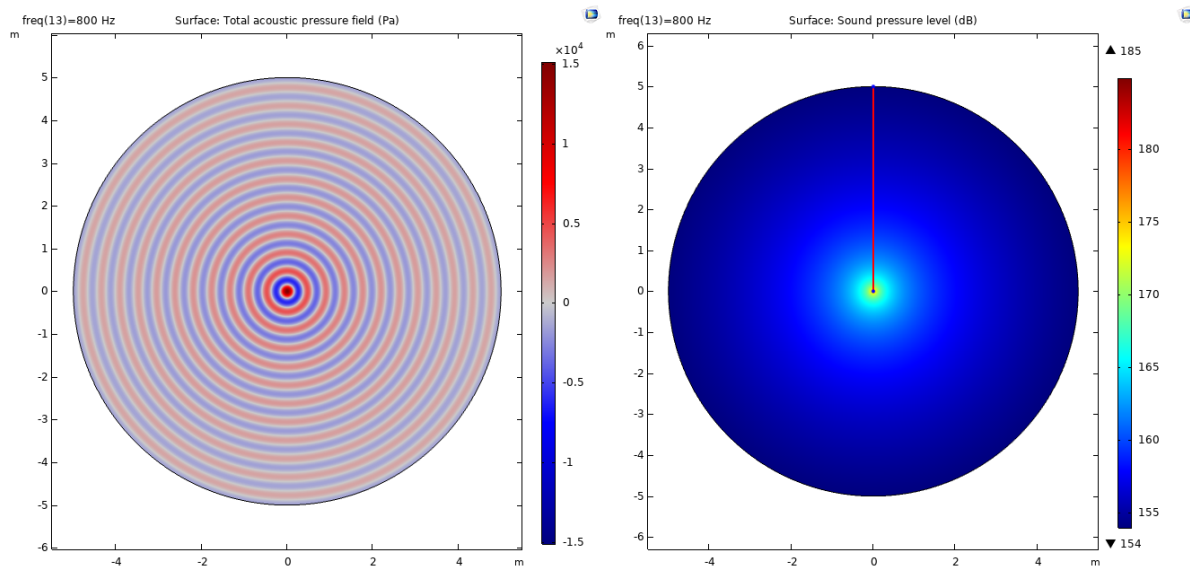
Geluidniveau

COMSOL biedt de mogelijkheid naast de geluiddruk ook het geluid(druk)niveau op te geven. Deze wordt berekend met vergelijking (2.8) uit het verslag, maar omdat de geluiddruk niet tijdsafhankelijk is in de gebruikte interface, wordt p_{rms} hier berekend door [2]:

$$p_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2} p p^*} \quad (2)$$

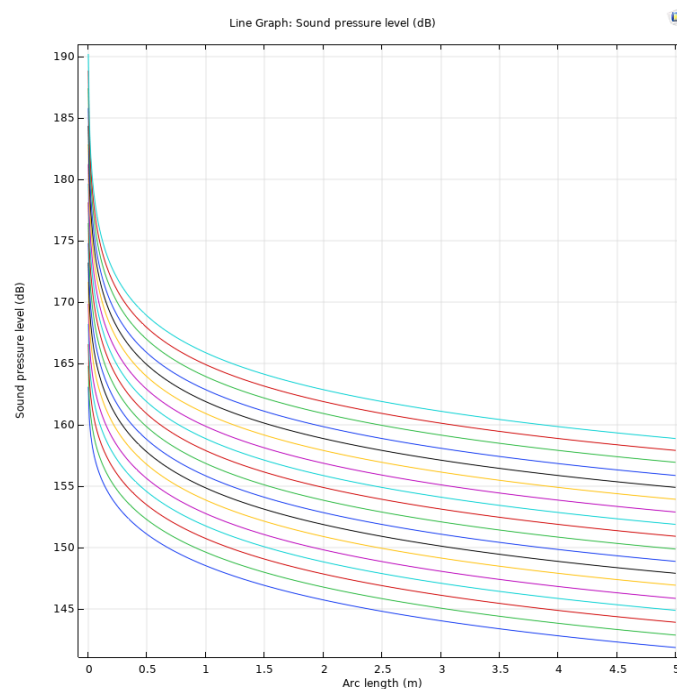
De ster (*) in deze vergelijking representeert de complex geconjugeerde. Dit is een expressie geldig in het geval van een harmonische tijds-variërende druk p [2]. Hierbij wordt dus de reële én complexe oplossing van de geluiddruk beschouwd om te bepalen hoe de druk varieert over de tijd.

Als nu een simulatie wordt gedaan voor een luchtmedium waarbij de materiaaleigenschappen zijn toegewezen voor de 'basiseigenschappen van lucht' (geselecteerd uit de 'Material Library'), volgt hieruit het resultaat weergegeven in figuur 1.



Figuur 1: Simulatie van een Point Source in een luchtmedium met aan de linkerzijde de geluiddruk en aan de rechterzijde het geluidniveau.

Aan de buitenzijden van de Geometry van de simulatie uit figuur 1 is de grensvoorwaarde: 'Cylindrical Wave Radiation' toegekend. Dit houdt in dat cilindrische golven het medium kunnen verlaten met minimale reflecties als de geometrie coïncideert met de golven [2]. Door gebruik te maken van een 'Cut Line' kan het geluidniveau over een afstand geplot worden (rode lijn in figuur 1). Als een simulatie voor meerdere frequenties gedaan wordt, volgt hieruit dat zowel de geluiddruk als het geluidniveau van de bron frequentieafhankelijk is; zie figuur 2 voor het geluidniveau.



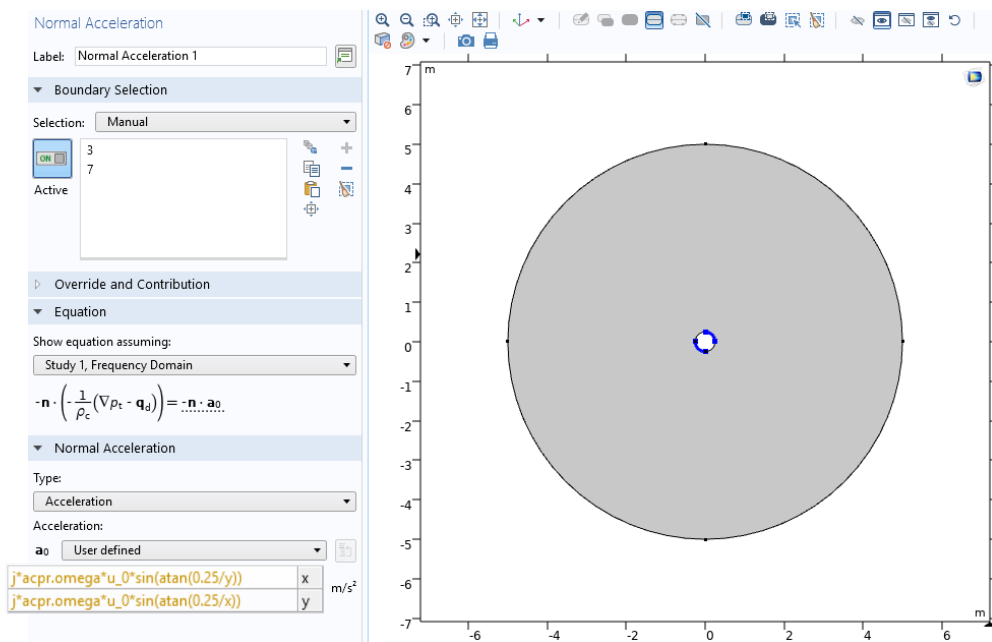
Figuur 2: Het geluidniveau als functie van de afstand voor verschillende frequenties.

De karakteristiek van de curves uit figuur 2 verloopt enigszins hetzelfde op een offset en dicht bij de bron na. De afstandsdeemping in figuur 2 is in overeenstemming met die van een lijnbron (3 dB per afstandsverdobbeling). Er is ondervonden dat de frequentieafhankelijkheid met betrekking tot de geluiddruk en het geluidniveau tevens verschilt per ingesteld 'Point Source Type'.

Omdat de sterkte van de bron niet van belang is, maar alleen eenzelfde verloop voor de uitbreiding van de golven, is gesteld dat de Monopole Point Source voldoet voor het model. Hiermee wordt dan gebruik gemaakt van een 'User defined Source amplitude' Point Source Type S.

Normal Acceleration Modelleerwijze

Een andere wijze voor het modelleren van een lijnbron is om een Normal Acceleration grensvoorwaarde te stellen aan vier kwartcirkelvormige grenzen in de Geometry; zie figuur 3. Dit wordt gedaan door de vergelijkingen uit figuur 3 in te voeren voor de grensvoorwaarde en voor de andere twee kwartcirkelvormige grenzen dezelfde vergelijkingen toe te voegen maar met een minteken in de 'atan-functie'. De waarde 0,25 is hierbij de radius van de cirkel waaraan de grensvoorwaarden worden gesteld en u_0 is hier de maximale deeltjessnelheid (u is gelijk aan v in het verslag) en is gelijkgesteld aan 10 m/s.

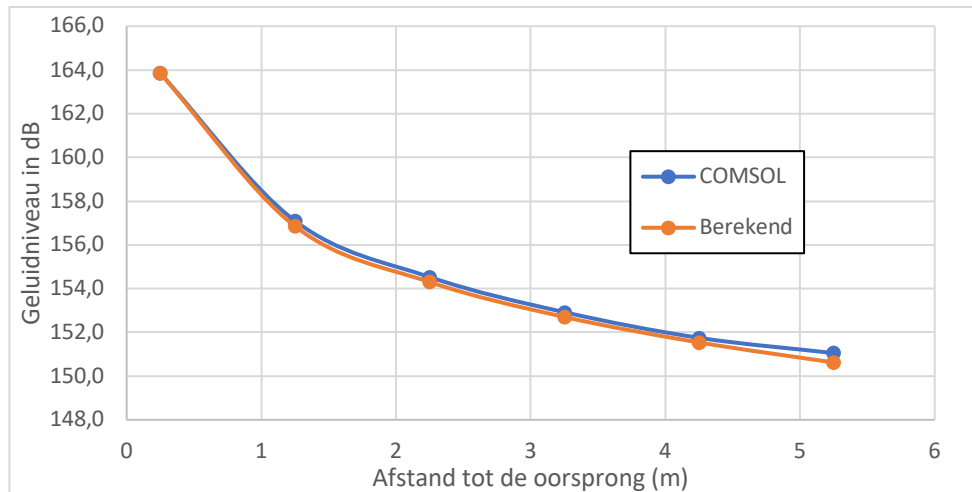


Figuur 3: Display van het invoeren van de condities voor een Normal Acceleration grensvoorwaarde.

Met behulp van vergelijking (2.1) en (2.8) uit het verslag en de relatie $p_{rms} = p_0/\sqrt{2}$, kan een expressie afgeleid worden waarmee de uitkomst van de Normal Acceleration grensvoorwaarde gecontroleerd kan worden:

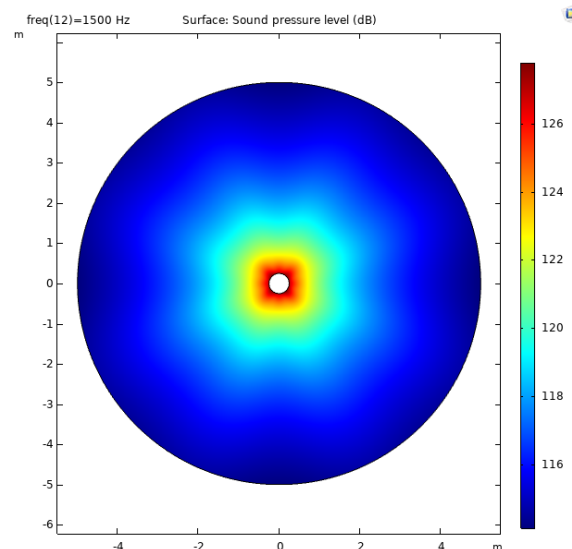
$$L_p = 10 \log \left(\frac{(\rho c v_0 / \sqrt{2})^2}{p_{ref}^2} \right) \quad (3)$$

Hieruit volgt dat voor hogere frequenties zowel de geluiddruk als het geluidniveau overeenkomen met de ingestelde waarden. Dit is waargenomen voor frequenties vanaf 500 Hz; zie figuur 4. Dit is echter niet zo voor kleinere cirkelradiussen, hierbij wordt eenzelfde verband waargenomen als in figuur 2. In figuur 4 is vergelijking (3) ingevuld voor $c = 343$ m/s en $\rho = 1,29$ kg/m³. Hierbij is voor de afstandsdemping vergelijking (2.14) uit het verslag beschouwd.



Figuur 4: Vergelijking tussen de berekende geometrische uitbreiding en bepaald met COMSOL voor $u_0 = 10$ m/s voor een Normal Acceleration grensvoorwaarde. De simulatie is uitgevoerd voor 500 Hz.

Er is echter ondervonden dat voor hogere frequenties het geluiddrukkniveau niet onder elke hoek van uitstraling eenzelfde verloop vertoont; zie figuur 5.



Figuur 5: Simulatie van een Normal Acceleration grensvoorwaarde die is toegekend aan een cirkelvormige Geometry.

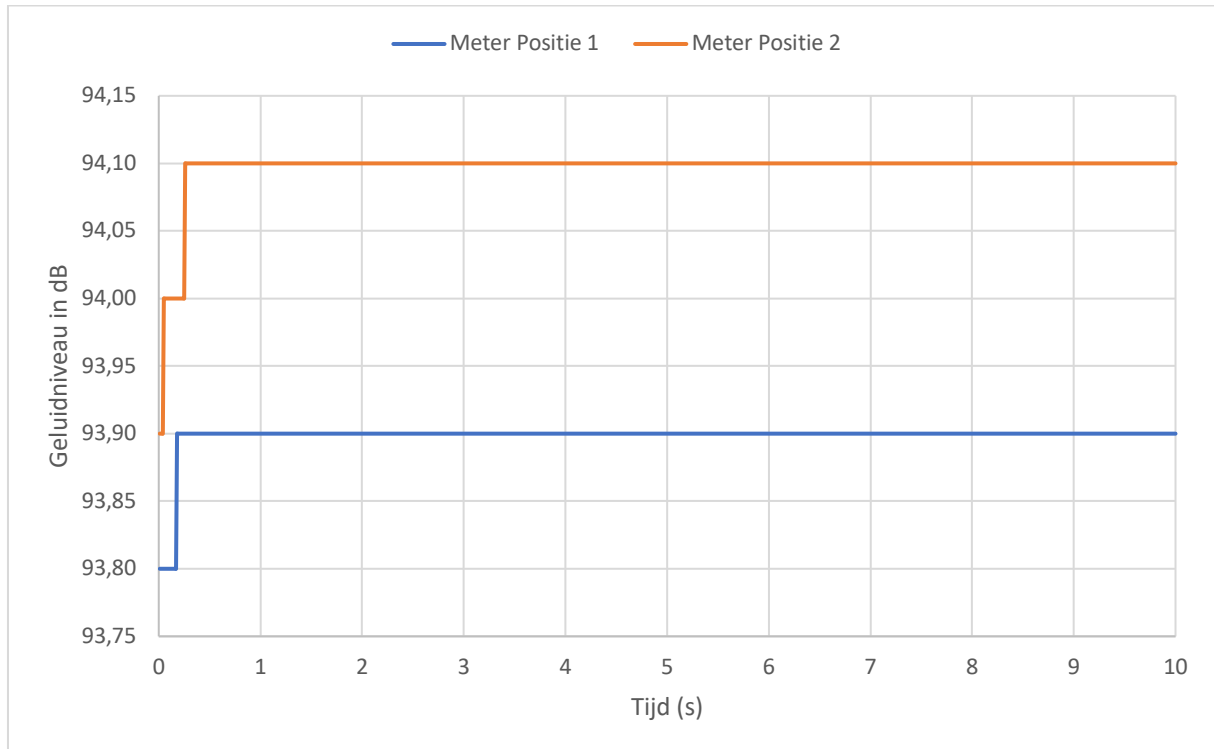
Doordat dit effect is waargenomen en doordat als de straal van de cirkel de nul nadert deze grensvoorwaarde zich nagenoeg hetzelfde gedraagt als een Monopole Point Source, is mede besloten de Point Source te gebruiken voor het model.

Referenties

- [1] AltaSim Technologies, „Tips and Tricks - Resolving Wavelengths,” 23 mei 2013.
[Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=yWtazWjH5nQ&t=312s>.
[Geopend 2019 mei 3].
- [2] COMSOL, „Acoustics Module User's Guide (Version: COMSOL 5.4),” COMSOL, 2018.

Bijlage III Ijkmeting

De gebruikte ijkbron: Sound Level Calibrator, fabricaat Brüel & Kjær, type 4231, geeft een geluidniveau van 94 dB op 1 kHz. In figuur 1 is het gemeten geluidniveau voor de 1 kHz octaafband als functie van de tijd weergegeven voor de gebruikte geluidmeters.



Figuur 1: Het gemeten geluidniveau van een 94 dB ijkbron op 1 kHz voor de octaafband met eenzelfde middenfrequentie voor de gebruikte geluidmeters.

De resultaten in figuur 1 stellen dat de meetresultaten voor positie 1: -0,1 dB afwijken en 0,1 dB voor positie 2.

Bijlage IV Tolerantie Geluidmeters

Voor de onnauwkeurigheid van de geluidmetingen ΔL wordt de tolerantie van klasse 1 geluidmeters beschouwd voor de middenfrequenties van de octaafbanden uit tabel 2.1 van het verslag; zie tabel 1. Deze toleranties zijn opgenomen uit een kalibratierapport van de Rion NA-28. Er is aangenomen dat de negatieve en positieve tolerantie bij de desbetreffende frequenties gelden voor de hele octaafband waarvan deze frequenties de middenfrequentie zijn. Bij het inschatten van de foutmarge voor het totale geluidniveau in dB(A) wordt dan de negatieve en positieve tolerantie per octaafband in rekening gebracht bij de berekening hiervan.

Tabel 1: De negatieve en positieve tolerantie van de geluidmeters in dB per frequentie.

f	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
ΔL^-	1,5	1,5	1,4	1,4	1,1	1,6	1,6	3,1
ΔL^+	1,5	1,5	1,4	1,4	1,1	1,6	1,6	2,1

Bijlage V Analyse Geluidmetingen

In deze bijlage zijn de resultaten voor de analyse van de geluimetingen weergegeven. Bij de tabellen voor L_{eq} waardes is het beschouwde tijdsinterval opgegeven onder Δt . Roodgekleurde L_{eq} waardes duiden aan dat de passage niet in zijn geheel geanalyseerd kan worden omdat deze niet geheel op de meting staat. Deze waardes zijn echter wél meegenomen in het onderzoek.

Positie 1

Tabel 1: De berekende L_{max} waardes per octaafband in dB en totaal in dB(A)- met onnauwkeurigheid voor positie 1.

	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz	Totaal in dB(A)	ΔL^- in dB(A)	ΔL^+ in dB(A)
Situatie 1	57,1	51,9	52,2	50,4	56,1	50,5	43,5	31,8	58,2	1,3	1,3
Situatie 2	56,4	52,2	52,6	51,9	59,5	55,4	47,3	38,9	61,8	1,3	1,3
Situatie 3	55,2	57,5	56,8	55,9	65,1	60,7	54,1	42,6	67,3	1,3	1,3
Situatie 4	56,4	50,8	50,5	49,3	55,6	51,7	47,0	36,0	58,4	1,3	1,3
Situatie 5	59,0	51,2	47,1	49,3	53,0	49,2	43,4	33,7	55,9	1,3	1,3
Situatie 6	60,8	53,1	46,6	47,3	53,5	48,3	42,0	31,5	55,8	1,3	1,3
Situatie 7	59,0	54,6	55,4	53,3	56,3	52,8	43,2	32,0	59,3	1,3	1,3
Situatie 8	57,0	47,5	55,8	53,6	61,4	56,6	50,0	39,3	63,6	1,3	1,3
Situatie 9	55,0	52,2	54,3	57,0	66,1	62,0	52,1	39,9	68,2	1,3	1,3
Situatie 10	56,2	47,2	52,4	52,4	59,9	56,0	49,0	37,4	62,3	1,3	1,3
Situatie 11	57,5	57,6	53,9	51,2	57,4	53,0	45,1	37,5	59,9	1,3	1,3
Situatie 12	56,2	51,7	49,5	50,8	53,5	49,1	41,1	39,3	56,3	1,3	1,3

Tabel 2: De berekende L_{eq} waardes per octaafband in dB en totaal in dB(A)- met onnauwkeurigheid en het beschouwde tijdsinterval voor positie 1.

	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz	Totaal in dB(A)	ΔL^- in dB(A)	ΔL^+ in dB(A)	Δt (s)
Situatie 1	55,3	51,6	49,1	51,0	55,8	49,7	41,3	29,6	57,8	1,3	1,3	2,87
Situatie 2	58,9	51,9	50,9	53,1	58,2	55,3	45,9	33,6	61,1	1,3	1,3	3,13
Situatie 3	53,9	54,7	55,0	54,7	62,1	59,2	51,0	39,5	64,9	1,3	1,3	4,07
Situatie 4	56,5	56,3	49,0	50,2	55,0	51,7	45,0	33,6	57,9	1,3	1,3	3,92
Situatie 5	56,5	48,8	48,2	49,2	53,6	49,5	42,3	31,4	56,2	1,3	1,3	3,32
Situatie 6	59,3	51,8	47,8	47,5	53,2	48,6	41,6	30,5	55,6	1,3	1,3	3,44
Situatie 7	57,9	52,5	54,2	52,5	55,6	51,3	41,9	29,7	58,4	1,3	1,3	4,01
Situatie 8	54,5	47,3	50,8	52,4	58,3	55,0	46,6	35,1	61,0	1,3	1,3	6,06
Situatie 9	54,2	50,1	53,5	54,9	63,8	60,3	50,2	36,7	66,2	1,3	1,3	4,35
Situatie 10	52,1	47,4	50,4	51,6	58,3	55,1	46,9	34,5	61,0	1,3	1,3	5,03
Situatie 11	58,6	58,3	53,1	51,4	57,2	53,0	44,7	32,8	59,7	1,3	1,3	3,95
Situatie 12	57,6	50,2	48,4	49,7	54,4	50,4	42,5	32,2	57,0	1,3	1,3	3,44

Positie 2

Tabel 3: De berekende L_{max} waarden per octaafband in dB en totaal in dB(A)- met onnauwkeurigheid voor positie 2.

	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz	Totaal in dB(A)	ΔL^- in dB(A)	ΔL^+ in dB(A)
Situatie 1	58,8	55,6	58,8	61,5	68,4	64,4	56,7	45,8	70,8	1,3	1,3
Situatie 2	59,1	56,0	59,1	61,9	68,9	64,9	56,3	46,2	71,2	1,3	1,3
Situatie 3	59,4	56,5	57,8	62,2	68,3	63,5	56,6	46,5	70,5	1,3	1,3
Situatie 4	60,0	60,2	54,4	58,1	65,1	58,5	51,4	46,5	66,8	1,2	1,3
Situatie 5	58,3	52,8	54,0	56,3	62,7	60,8	53,6	42,1	66,0	1,4	1,4
Situatie 6	60,7	57,6	56,5	55,6	63,7	61,1	53,4	42,5	66,6	1,3	1,3
Situatie 7	59,5	54,7	56,3	59,2	66,6	62,6	53,2	42,8	68,9	1,3	1,3
Situatie 8	56,1	52,6	57,4	59,5	67,4	61,5	51,5	38,5	69,1	1,2	1,3
Situatie 9	59,8	56,6	56,1	59,4	66,1	61,6	52,2	42,3	68,2	1,3	1,3
Situatie 10	55,1	50,9	50,9	55,8	65,3	59,1	48,8	35,7	66,8	1,2	1,2
Situatie 11	61,8	62,0	56,4	58,4	65,1	58,5	50,2	39,7	66,7	1,2	1,2
Situatie 12	56,4	53,4	53,9	54,8	63,1	59,8	51,2	38,1	65,6	1,3	1,3

Tabel 4: De berekende L_{eq} waarden per octaafband in dB en totaal in dB(A)- met onnauwkeurigheid en het beschouwde tijdsinterval voor positie 2.

	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz	Totaal in dB(A)	ΔL^- in dB(A)	ΔL^+ in dB(A)	Δt (s)
Situatie 1	56,4	53,3	53,8	56,5	64,6	61,7	52,9	40,5	67,3	1,3	1,3	5,58
Situatie 2	57,8	53,3	55,8	59,2	67,3	63,8	54,2	42,7	69,7	1,3	1,3	3,15
Situatie 3	55,6	54,2	54,4	58,1	65,4	61,1	52,4	41,1	67,6	1,3	1,3	5,47
Situatie 4	57,5	61,9	53,5	56,2	63,3	58,7	51,0	39,1	65,5	1,3	1,3	4,61
Situatie 5	56,4	50,3	52,3	54,5	61,8	59,1	50,8	38,2	64,6	1,3	1,3	5,32
Situatie 6	59,0	55,9	52,9	53,4	60,3	57,7	50,3	38,6	63,3	1,3	1,3	5,46
Situatie 7	56,3	53,4	54,2	55,7	63,9	59,7	49,5	37,1	66,0	1,3	1,3	5,91
Situatie 8	57,9	51,8	52,4	56,2	64,1	59,2	49,2	36,7	66,0	1,3	1,3	6,54
Situatie 9	58,7	53,3	55,4	57,0	63,9	59,3	49,3	37,6	66,0	1,3	1,3	6,21
Situatie 10	55,6	50,0	51,5	55,8	62,8	57,7	47,9	35,9	64,7	1,3	1,3	4,35
Situatie 11	61,1	59,5	54,2	54,8	62,5	58,9	48,4	35,6	64,9	1,3	1,3	5,38
Situatie 12	59,5	52,7	54,4	55,6	61,7	58,5	50,1	36,7	64,4	1,3	1,3	4,13

Bijlage VI Geluidwering COMSOL

In deze bijlage zijn de resultaten voor de geluidwering van de Whiswall weergegeven die volgen uit het model.

Sound Hard Boundary (Wall)

Tabel 1: De bepaalde geluidwering van de Whiswall met behulp van COMSOL per octaafband in dB.
Hierbij is de Sound Hard Boundary (Wall) grensvoorwaarde toegekend links van de Whiswall in het model.

	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Situatie 1	5,8	7,2	8,0	10,8	15,1	16,3	18,7
Situatie 2	6,4	7,7	3,9	9,8	11,1	10,9	11,6
Situatie 3	7,1	4,7	1,3	6,9	3,4	1,9	0,8
Situatie 4	5,7	6,7	4,5	9,0	8,6	8,3	8,4
Situatie 5	5,0	5,8	9,2	11,4	14,1	15,2	17,4
Situatie 6	4,8	5,1	7,7	14,9	15,8	18,3	21,6
Situatie 7	5,0	6,4	7,0	9,5	11,5	11,7	13,1
Situatie 8	5,6	6,5	3,0	8,2	7,0	5,6	4,7
Situatie 9	6,0	3,1	0,5	3,0	-0,4	-1,3	-0,1
Situatie 10	4,9	5,5	3,2	6,4	4,0	2,2	0,7
Situatie 11	4,3	5,0	8,1	8,9	10,1	10,0	10,8
Situatie 12	4,0	4,4	7,2	12,3	12,5	13,9	16,1

Sound Soft Boundary

Tabel 2: De bepaalde geluidwering van de Whiswall met behulp van COMSOL per octaafband in dB.
Hierbij is de Sound Soft Boundary grensvoorwaarde toegekend links van de Whiswall in het model.

	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Situatie 1	0,5	0,9	0,6	14,0	17,2	16,1	18,0
Situatie 2	0,7	1,5	3,4	13,2	11,6	10,6	11,2
Situatie 3	1,1	2,5	5,2	6,3	3,3	1,6	0,8
Situatie 4	0,6	1,0	2,5	11,9	9,7	7,8	7,7
Situatie 5	0,4	0,4	-0,6	11,1	15,6	16,6	16,2
Situatie 6	0,3	0,2	-1,9	7,4	17,2	20,8	22,4
Situatie 7	0,3	0,7	0,9	13,1	13,6	10,7	13,3
Situatie 8	0,5	1,2	3,5	10,5	6,0	5,5	4,6
Situatie 9	0,8	2,1	4,2	1,7	-0,5	-1,4	-0,1
Situatie 10	0,4	0,8	2,8	8,4	3,1	2,1	0,5
Situatie 11	0,2	0,3	-0,2	11,2	12,1	9,5	10,6
Situatie 12	0,1	0,1	-1,4	8,0	14,5	16,6	14,2