



# DE WOBBEL

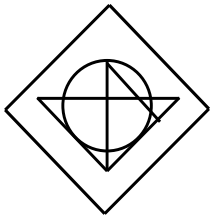
Een innovatief geluidsscherm  
tegen zowel hoog- als  
laagfrequent geluid

Marie-Anne de Gier – 6V  
2 februari 2018

Natuurkunde  
Begeleider: Jaap Teule



*Stilte is niet afwezigheid van geluid. Stilte is de diepste klank.*  
– Tao Meng



# VOORWOORD

## Voorwoord

In dit onderzoek treft u de resultaten aan van mijn profielwerkstuk over geluidsschermen tegen zowel hoog- als laagfrequent geluid op snelwegen. Ik ben al langere tijd geïnteresseerd in de werking van geluidsschermen. Langs de snelwegen zie je ze in talloze uitvoeringen: met of zonder luifel, in verschillende hoogten, lengten en dikten en van verschillende materialen. Daardoor ben ik mij gaan afvragen: Welk materiaal en welke vorm is nu het meest effectief in het weren van geluid?

De bestaande geluidsschermen richten zich op het weren van hoogfrequent geluid. Uit nog niet gepubliceerd RIVM-onderzoek is naar voren gekomen dat de huidige geluidswerende maatregelen, zoals zoab-asfalt, geluidsschermen en betere motorisolatie, er onbedoeld voor zorgen dat de geluidsoverlast van snelwegen toeneemt. Op sommige plekken in ons land is nu het aandeel laagfrequent geluid in de totale geluidsproductie van de snelweg zelfs verdubbeld! Laagfrequent geluid kan - evenals hoogfrequent geluid - tot ernstige gezondheidsproblemen leiden, zoals hartziekten en beroerten. Verder zal het probleem van zowel hoog- als laagfrequent geluid toenemen door het groeiend snelwegverkeer. Dit alles tezamen vormde voor mij de aanleiding me in dit onderzoek te focussen op een innovatief geluidsscherm dat ook laagfrequent geluid weert. Ik noem dit scherm 'de Wobbel', gelet op zijn vorm. Hiermee hoop ik een bijdrage te leveren aan de oplossing van een groeiend maatschappelijk probleem en een aanzet te geven tot verder onderzoek naar dit boeiende, maar complexe terrein!

Met heel veel plezier heb ik gewerkt aan dit profielwerkstuk, er veel van geleerd en behulpzame en interessante mensen ontmoet. Tijdens mijn onderzoek stuitte ik op diverse mogelijkheden, maar ook onmogelijkheden tot verdere uitwerking van mijn ideale geluidsscherm. Zo merkte ik dat de geluidsproblematiek in relatie tot geluidsschermen natuurkundig gezien heel complex is en dat de literatuur daarover nogal versnipperd is. Het kostte me daardoor vrij veel tijd om de problematiek te doorgronden, de resultaten van mijn onderzoek inzichtelijk te maken en het onderzoek verder te brengen. Verder zijn bronnen als de Europese en Nederlandse standaarden (EN- en NEN-normen) die relevant zijn voor geluidsschermen alleen maar indirect te raadplegen. Deze normen zijn namelijk alleen tegen betaling van ruim 50 euro of meer per stuk verkrijgbaar bij het NEN-instituut.

Daarnaast had ik de medewerking van derden nodig voor het ter beschikking stellen van materialen om de geluidsabsorptie ervan te testen en gebruik te maken van de juiste apparatuur om met relevante resultaten te kunnen komen. Gelukkig waren alle bedrijven die ik benaderde voor het verstrekken van testmateriaal bereid mij dit kosteloos en op korte termijn ter beschikking te stellen. Mijn vader haalde vervolgens deze materialen op en bracht ze voor mij naar de nagalmkamer van de TU Delft. Ik had dit zelf niet kunnen doen, omdat sommige materialen, waaronder de houtvezelbetonplaten, heel groot en zwaar waren en de verstreckende bedrijven sterk verspreid over het land lagen.

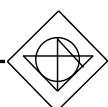
Dat ik gebruik mocht maken van de nagalmkamer van de TU Delft was uniek. Normaliter staat deze kamer met zijn geavanceerde apparatuur niet ter beschikking van een middelbare scholier die een profielwerkstuk schrijft. Via het benaderen van een studentennetwerk ben ik uiteindelijk terecht gekomen bij de juiste persoon en ik heb hem bereid gevonden de nagalmkamer ter beschikking te stellen. Aldaar trof ik een geluidsexpert aan die zelf regelmatig gebruik maakt van de nagalmkamer voor het testen van materialen voor DPA Cauberg-Huygen. Hij was bereid mij uitleg te verschaffen over het gebruik van de apparatuur bij het testen.

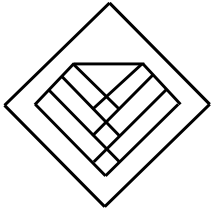
Verder stuitte ik op het probleem dat ik de vormgeving van mijn geluidsscherm slechts gedeeltelijk kon testen. Dit testen heb ik gedaan met behulp van een modelsimulatie met het programma GeoMilieu bij TNO in Den Haag. Normaliter werkt TNO niet mee aan het verder brengen van profielwerkstukken en geeft dit ook aan op zijn website. In eerste instantie ving ik dan ook bot, maar lukte het me uiteindelijk wel daar binnen te komen via een aanbeveling van dr.ing. Jacques Reijniers MBA van de Nyenrode Business Universiteit en het feit dat ik met een vooronderzoek naar geluidsschermen de eerste prijs van de duurzaamheidswedstrijd INESPO had gewonnen<sup>1</sup> en mee ging doen met de grootste wetenschapsolympiade voor middelbare scholieren ter wereld: Intel ISEF in Phoenix. Ik heb daar de derde prijs in de categorie *Environmental Engineering* ontvangen en een eervolle vermelding van de Acoustical Society of America.<sup>2</sup> Om de beperktheid van mijn vormgevingstest te ondervangen, heb ik de resultaten van mijn TNO-onderzoek aangevuld met een onderbouwde hypothese en doe ik suggesties voor verder onderzoek.

Tenslotte wil ik op deze plaats graag enkele mensen persoonlijk bedanken die van grote waarde zijn geweest voor mijn onderzoek. In de eerste plaats mijn natuurkundedocent en begeleider van Atheneum College Hageveld, drs. Jaap Teule. Van Jaap kreeg ik alle ruimte om mijn onderzoek te doen en kon ik altijd op korte termijn mijn onderzoeksopzet en resultaten bespreken. Daardoor wist ik dat ik op de goede weg zat en kon ik mijn onderzoek voortzetten.

Verder dank ik ir. Cas Vrijling (werkvoorbereider, BAM infra), Jan ter Haar (Durisol), Ron Hydra (BituNed), Gerard van Weert (Eurorail) en Paul Jansen (Granuflex) voor het kosteloos ter beschikking stellen van materialen die ik heb getest in de nagalmkamer van de TU Delft. Ten slotte wil ik dr.ir. Erik Verschuur en Henry den Bok van de TU Delft bedanken voor het ter beschikking stellen van de nagalmkamer en Adriaan van Bragt (projectleider bouwfysisch laboratorium, DPA Cauberg-Huygen) voor het assisteren bij de geluidsproeven.

Marie-Anne de Gier  
2 februari 2018





# SAMENVATTING

# Samenvatting

## Probleemanalyse en centrale vraag

Geluidsoverlast door wegverkeer is een groeiend maatschappelijk, maar nog onderschat probleem. Als gevolg van geluidsoverlast kunnen mensen ernstige gezondheidsklachten krijgen, zoals hoge bloeddruk, oorsuizen en hart- en vaatziekten. Verkeerslawaaï kan zelfs dodelijk zijn. Ook blijkt dat het om grote aantallen mensen gaat die last hebben van verkeerslawaaï en dat dit aantal de laatste jaren exponentieel is gestegen.

Geluid is bewegende lucht. Geluidshinder kan veroorzaakt worden door 'normaal geluid' (geluid zoals dat normaliter in de buitenlucht natuurlijk voorkomt) en door laagfrequent geluid (LFg). Het meest voorkomende 'gewone' geluid zit tussen de 125 en 8.000 Hz. Uit de frequentietest (zie paragraaf 4.5) blijkt, dat wat betreft de hoge tonen, het zware verkeer met name de frequentie van 1.250 Hz uitzendt, het middelzware verkeer de frequentie van 2.500 Hz en het lichte verkeer de frequentie van 5.000 Hz. Voor LFg wordt vaak als bovengrens een frequentie van 125 Hz gehanteerd. Uit de frequentietest (zie paragraaf 4.5) blijkt dat alleen het zware snelwegverkeer LFg produceert met frequenties van 51, 63, 82 en 124 Hz.

Geschat wordt dat zo'n 2,5% van de Nederlandse bevolking last heeft van LFg. LFg wordt gehoord als een brommende of zoemende toon, geeft een gevoel van druk, onder meer in de gehoorgang en op het hoofd en zorgt voor trillingen in buik, borst, armen en benen. Ook LFg leidt tot grote gezondheidsproblemen. LFg heeft iets ongrijpbaars, doordat mensen iets bemerken maar het niet in verband kunnen brengen met een zichtbare bron, zoals het wegverkeer.

De overlast door LFg zal de komende jaren toenemen als er geen passende maatregelen worden genomen. Dit komt doordat zowel het wegverkeer toeneemt als bestaande maatregelen tegen geluidsoverlast, zoals zoab-asfalt, geluidsschermen en betere motorisolatie, er onbedoeld voor zorgen dat de geluidsoverlast van snelwegen toeneemt. Deze maatregelen gaan namelijk vooral geluid met hogere frequenties tegen, waardoor LFg beter hoorbaar wordt. Dit blijkt uit een nog niet gepubliceerd RIVM-onderzoek.

De huidige maatregelen tegen geluidsoverlast zijn niet effectief om het gehele probleem van geluidsoverlast van snelwegverkeer op te lossen. Daarom is in dit onderzoek een aanzet gegeven tot een nieuw duurzaam ontwerp van een geluidsscherm voor zowel hoog- als laagfrequent geluid op snelwegen. Daartoe heb ik de volgende centrale vraag geprobeerd te beantwoorden: "Welke materialen en welke vorm van een geluidsscherm langs snelwegen reduceren zowel het laagfrequente als hoogfrequente geluid geproduceerd door weggebruikers optimaal?"

## Oplossing: een innovatief en duurzaam geluidsscherm

Het innovatieve van mijn geluidsscherm bestaat uit twee onderdelen: een combinatie van absorberende materialen, waardoor het scherm zowel hoog- als laagfrequent geluid absorbeert en een nieuwe vorm, waardoor het geluid niet in de omgeving van de snelweg komt, die daar hinder van zou kunnen ondervinden. Gelet op de vorm, heb ik mijn geluidsscherm 'De Wobbel' genoemd.



Voor optimale geluidsreductie is het belangrijk om absorberende materialen te gebruiken. Uit mijn onderzoek naar de materialen die het grootste absorberende vermogen hebben, kwam houtvezelbeton als beste naar voren voor het hoogfrequente geluidsspectrum en had rubbergranulaat de hoogste absorptiecoëfficiënt voor het laagfrequente geluid. Mijn ontwerp bevat dus een combinatie van zowel houtvezelbeton en rubbergranulaat. Beide materialen hebben een groot aantal voordelen ten opzichte van andere dempende materialen, zoals een goede geluidsabsorptie en een grote ontwerpvrijheid. Bovendien kunnen ze allebei duurzaam geproduceerd worden.

De effectiviteit van een geluidsschermvorm hangt af van de mate, waarin het geluidsscherm de afstand tussen de bron en de ontvanger van het geluid weet te vergroten. Die afstand wordt beïnvloed door de hoeveelheid diffractie (het afbuigen) van het geluid over de schermtop. De diffractie is met name hoog bij laagfrequent geluid en moet dus zoveel mogelijk voorkomen worden.

De vormgeving van mijn geluidsscherm heb ik slechts gedeeltelijk kunnen testen door middel van een modelsimulatie. Hieruit blijkt dat een naar buiten hellend ondervlak en een naar binnen hellend bovenzvlak, in combinatie met een verticaal middenvlak, zorgt voor een optimale geluidsreductie. Het geluid wordt dan namelijk zo weg gekaatst dat het niet in de omgeving van de snelweg terecht komt.

In aanvulling hierop heb ik een hypothese over de vorm van de top opgenomen, deze onderbouwd en mogelijke testmethodes uiteengezet. Mijn hypothese is dat diffractie beperkt kan worden door het plaatsen van een trapsgewijze T-top. De traptreden zullen er namelijk voor zorgen dat het geluid vaak moet afbuigen, waardoor er geringe diffractie zal optreden. De hypothese kan naar mijn idee het beste in situ getest worden, volgens de ADRIENNE-meetmethode. Deze testmethode geeft namelijk de meest realistische en nauwkeurige resultaten en voldoet aan de Europese standaard EN-1793.

In een gesprek met A. Eisses, TNO, heb ik tot slot nog een hypothese op kunnen stellen over de totale geluidsreductie van mijn geluidsscherm. Eisses stelde dat de materialen van geluidsschermen doorgaans het totale geluid met vijf decibel verminderen en was van mening dat mijn materiaalcombinatie, het houtvezelbeton en rubbergranulaat, dat in ieder geval ook zouden doen. Uit de simulatie met het programma GeoMilieu bleek dat de vorm op zich al 16 decibel reduceert en wanneer de materiaalreductie daarbij opgeteld wordt komt er een totaal reductie van minstens 21 decibel. Die 21 decibel zal een doorbraak in geluidsreductie met geluidsschermen betekenen, want op dit moment reduceren geluidsschermen in Europa maximaal 20 decibel.

# Summary

## Research problem and key question

Traffic noise is a growing, yet underestimated, societal problem. Traffic noise can cause serious health issues, like high blood pressure, tinnitus and cardiovascular disease. Traffic noise can even be a death sentence. It appears that a large number of people suffer from traffic noise and this number has increased exponentially in recent years. Vibrations that travel through the air produce sound. Traffic noise can result from 'regular sounds' (sounds ordinarily appearing in the open air) and low-frequency sound (Lfs). The most common 'regular' sound ranges between 125 and 8,000 Hz. For high frequencies, the frequency test shows that heavy goods vehicle traffic produces a frequency of 1,250 Hz, medium-duty trucks produce a frequency of 2,500Hz and light-vehicles a frequency of 5,000Hz. The commonly used upper limit for Lfs is 125 Hz. The frequency test shows that only the heavy goods vehicle traffic produces frequencies of 51, 63, 82 and 124 Hz.

An estimation indicates that approximately 2.5% of the Dutch population suffers from Lfs. Lfs resembles a buzzing or humming sound, generates a sense of pressure, among others in the ear and the head and causes vibrations in the stomach, chest, arms and legs. Lfs also causes serious health issues. Lfs has something elusive, because people notice something, but cannot relate it to a visible source, such as traffic. The Lfs traffic noise nuisance will increase in the near future, if no appropriate measures are taken. This is both due to the increasing road traffic and also as existing measures against traffic noise, such as porous asphalt, noise barriers and better motor engine isolation, unintentionally result in an increase of traffic noise caused by highways. These measures are focused on reducing high frequencies, as a result of which Lfs can be more easily detected. This appears from a not-yet published investigation by the RIVM (National Institute for Public Health and the Environment).

The current measures against traffic noise nuisance are not effective to solve the entire traffic noise problem on highways. Therefore, this investigation promotes a new, sustainable noise barrier design, which can absorb both high as well as low frequency noises on highways. In this context I have attempted to answer the following key question: "Which materials and what noise barrier shape on highways optimally reduce both low frequency as well as high frequency traffic noise?"

## Solution: an innovative and sustainable noise barrier design

The innovative part of my noise barrier consists of two parts: a combination of absorbing materials, allowing the noise barrier to absorb both high and low frequency noises and a new shape preventing the noise from entering into the surroundings of the highway, where it could cause nuisance.

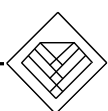
For an optimal noise reduction, it is important to use absorbing materials. The results of my investigation of materials with the highest absorption capacity show that cement-bonded wood fibre is the best solution for the high frequency spectrum and

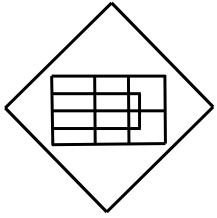
rubber has the highest absorption coefficient for low frequency noise. My design therefore consists of a combination of both cement-bonded wood fibre and rubber. Both materials have a large number of advantages over other muting materials, such as a good sound absorption capacity and they give designers optimum freedom to design. Moreover, they can both be sustainably produced.

The effectiveness of a noise barrier design depends on the degree to which the noise barrier is able to expand the distance between the source and the receiver of the sound. That distance is impacted by the amount of diffraction (deflection) of the noise over the barrier top. The diffraction is particularly high for low-frequency noise and should therefore be prevented as much as is possible.

I have been able to only partially test the design of my screen through a model simulation. These tests show that an optimal noise reduction is achieved by using an outward sloping lower part of the barrier, combined with a vertical middle part and an inward sloping top part. The noise is reflected in such a way, that it will not enter into the surroundings of the highway.

In addition to this, I have developed a hypothesis on the shape of the top, underpinned this and set out various test methodologies. My hypothesis is, that a cascade shaped T-top can limit diffraction. The steps will ensure that the sound has to deflect, resulting in a low diffraction. In my view, the hypothesis should be tested in-situ, according to the ADRIENNE-measurement method. This method provides the most realistic and accurate results and complies with the European standard EN-1793.





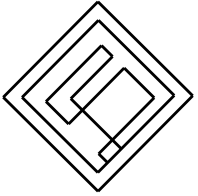
# Inhoudsopgave

# Inhoudsopgave

	Pagina
1. Probleemanalyse	15
2. Centrale vraag	22
3. Programma van eisen	24
4. Frequentieanalyse	27
4.1 Theorie	27
4.2 Onderzoeksvraag	27
4.3 Hypothese	27
4.4 Materialen en methode	28
4.5 Resultaten	29
4.6 Conclusie	29
4.7 Discussie	29
5. Materialen	32
5.1 Test materialen	32
5.1.1 Materiaalkeuze	32
5.1.2 Theorie	32
5.1.3 Onderzoeksvraag	34
5.1.4 Hypothese	35
5.1.5 Materiaal	35
5.1.6 Methode	35
5.1.7 Resultaten	36
5.1.8 Conclusie	38
5.1.9 Discussie	39
5.2 Informatie over rubbergranulaat	40
6. Vorm	42
6.1 Theorie	42
6.2 Testen	47
6.2.1 Onderzoek helling onder- en bovenzvlak	47
6.2.1.1 Onderzoeksvraag	47
6.2.1.2 Hypothese	47
6.2.1.3 Materialen	47
6.2.1.4 Methode	48
6.2.1.5 Resultaten	49
6.2.1.6 Conclusie	49
6.2.1.7 Discussie	50
6.2.2 Onderzoek trapsgewijze T-top	50
6.2.2.1 Onderzoeksvraag	50
6.2.2.2 Hypothese	50
6.2.2.3 Methode	51
7. Conclusie	54
8. Discussie	58
9. Noten	61
10. Literatuurlijst	65

## Bijlagen

1. Tabellen bij frequentieproef	73
2. Vooronderzoek materialen	78
3. Materiaalproefresultaten	81
4. Vooronderzoek vormtest	90
5. Formule definities GeoMilieu	93
6. Volledige resultaten bij vormtest met GeoMilieu	95
7. Logboek	113
8. Eigen werk	116



# 1. PROBLEEM ANALYSE

# 1. Probleemanalyse

## Geluidsoverlast veroorzaakt gezondheidsproblemen

De mobiliteit in ons land, maar ook wereldwijd neemt toe en dat komt vooral tot uiting in een toename van het wegverkeer en daarmee ook in geluidsoverlast. Het wegverkeer zorgt in Nederland namelijk voor de meeste geluidshinder in de woonomgeving. Vooral kinderen, chronisch zieken en ouderen hebben last van geluidshinder, maar ook dieren. Zo broeden veel vogels nu al niet meer in hun natuurlijke habitat, omdat het daar te druk is voor de jongen.<sup>3</sup>

Geluidsoverlast is een onderschat gezondheidsprobleem. Geluidsoverlast is niet alleen onprettig, maar kan ook schadelijk zijn voor de gezondheid op korte en lange termijn. Van de omgevingsfactoren staat verkeersgeluid (7,2%) op nummer twee van de lijst van grootste veroorzakers van gezondheidsproblemen.<sup>4</sup> Gezondheidsproblemen die kunnen optreden zijn hinder, slaapverstoring, tinnitus (oorsuizen), hoge bloeddruk en hart- en vaatziekten. Daarnaast kan langdurige blootstelling aan geluid leiden tot cognitieve effecten zoals een verminderd prestatievermogen en verminderde leesvaardigheid bij schoolkinderen en slechtere werkprestaties bij volwassenen. Verkeerslawaaï kan dodelijk zijn: jaarlijks gaan er 3.000 Europeanen dood aan geluidsoverlast. De WHO stelt dat het wegverkeer in West-Europa alleen al jaarlijks verantwoordelijk is voor het verlies van tenminste een miljoen gezonde levensjaren.<sup>5</sup> Uit recent RIVM-onderzoek blijkt wederom, dat vooral geluidsoverlast door wegverkeer het risico op hartziekten (in het bijzonder een hartinfarct) verhoogt. Bovendien kan lawaai het risico op hoge bloeddruk en beroerte verhogen. Er zijn ook aanwijzingen dat lawaai van het wegverkeer het risico op diabetes en obesitas verhoogt. Zowel de cardiovasculaire en metabole effecten van ruis kunnen gezondheidsschade geven door stress-gerelateerde mechanismen en slaapstoornissen, mogelijk als gevolg van een veranderende hormoonbalans.<sup>6</sup>

In Nederland ondervinden naar schatting 600.000 tot 800.000 volwassenen ernstige hinder door geluid en 300.000 tot 400.000 volwassenen ondervinden ernstige slaapverstoring door geluid van wegverkeer. Ongeveer 84 hartinfarcten (met dodelijke afloop) per jaar zijn gerelateerd aan blootstelling aan geluid van wegverkeer. Dit is 0,3% van het totale aantal acute hartinfarcten dat jaarlijks in Nederland optreedt.<sup>7</sup> Uit een rapport dat het RIVM heeft opgesteld in opdracht van de Europese Commissie blijkt dat minimaal 20 miljoen volwassenen in Europa zijn gehinderd door verkeerslawaaï in steden, van snelwegen, vliegvelden of spoorwegen. Het grootste deel van de geluidsoverlast en 90 procent van de ziektelast door geluid is toe te schrijven aan wegverkeerslawaaï.<sup>8</sup>

Naast de geluidshinder die veroorzaakt wordt door 'normaal geluid' (geluid zoals dat normaliter in de buitenlucht natuurlijk voorkomt), zijn er ook mensen die last hebben van laagfrequent geluid (LFg). Geschat wordt dat dit zo'n 2,5% van de bevolking (dus zo'n 423.500 mensen) is.<sup>9</sup> LFg kan ervaren worden als een brommende of zoemende ondertoon of een druk op de oren.

Er is nog maar weinig onderzoek gedaan naar de gevolgen die langdurige blootstelling aan laagfrequent geluid heeft op mensen die deze frequentie kunnen



waarnemen. Wel is duidelijk dat de impact ernstig van aard kan zijn. De klachten die worden ervaren door LFg komen overeen met de nadelige effecten van hoger frequent geluid, zoals hinder, slaapverstoring, leesachterstanden en verhoogde bloeddruk. Daarnaast ervaren mensen die lang blootgesteld worden aan geluid in lage frequenties duizeligheid, evenwichtsverlies en verschillende vibro-akoestische aandoeningen (VAD).<sup>10</sup> Dit komt waarschijnlijk doordat de structuur en de werking van ons gehoororgaan als gevolg van langdurige blootstelling aan LFg nadelig worden beïnvloed en leiden tot een verlaagde gehoordrempel.<sup>11</sup>

### **Toename geluidsbelasting door groei wegverkeer**

De geluidsoverlast door 'normaal' en laagfrequent geluid zal de komende jaren toenemen als gevolg van de hoge bevolkingsdichtheid, de voortgaande verstedelijking, de economische groei en daarmee de groei van het gemotoriseerd verkeer en de uitbreiding van het wegennet.

Het wegverkeer in de bebouwde kom is verantwoordelijk voor de meeste geluidsoverlast. Van de volwassen Nederlandse bevolking geeft 6% aan dat zij ernstige geluidhinder van wegverkeer ervaren in hun leefomgeving. Dit zijn ongeveer 800.000 mensen die vooral vrachtauto's, en bromfietsen binnen de bebouwde kom als meest hinderlijk ervaren.<sup>12</sup> Ongeveer 20 tot 35% van de ernstige hinder en slaapverstoring door wegverkeer is afkomstig van verkeer op rijkswegen en railverkeer.

### **Wat is te luid?**

De mate waarin iemand last heeft van geluid, hangt samen met het geluidsniveau. Ook spelen ook individuele eigenschappen een rol, zoals geluidgevoeligheid, angst voor en houding ten opzichte van de geluidbron.<sup>13</sup>

Geluid is een hoorbaar luchtdrukverschil. Hoe groter het luchtdrukverschil is, hoe harder het geluid is. De geluidsintensiteit, of geluidsterkte, wordt uitgedrukt in decibel (dB). De snelheid waarmee de hoge en lage druk elkaar afwisselen, bepaalt of een geluid hoog of laag klinkt. Deze trillingsnelheid of frequentie wordt uitgedrukt in hertz (Hz): het aantal trillingen per seconde. Diepe basgeluiden liggen onder de 100 Hz, schrille pieptonen boven de 8.000 Hz.

De WHO stelt als geluidsgrens maximaal 30 dB 's nachts in de slaapkamer en overdag maximaal 35 dB rondom plekken waar de concentratie van mensen optimaal dient te zijn, zoals ziekenhuizen en scholen. De WHO adviseert verder dat mensen op jaarlijkse basis dagelijks aan een gemiddelde van 40 dB blootgesteld mogen worden. Wanneer de geluidswaarden hoger worden, kan dat schadelijk zijn voor hun gezondheid.

Op dit moment voldoen heel veel plekken helemaal niet aan de waarden die de WHO adviseert. In de Europese Unie wordt 40% van de bevolking dagelijks blootgesteld te aan meer dan 55 dB, 20% ontvangt gemiddeld 65 dB per dag en meer dan 30% krijgt gemiddeld geluidslevels boven de 55 dB 's nachts te verduren. De geluidsoverlast door verkeer is dan ook exponentieel gestegen van 40 miljoen in 2002 naar 70 miljoen mensen in 2011.<sup>14</sup> Dat overschrijding van geluidswaarden tot een stijging van ernstige gezondheidsklachten leidt, blijkt uit recent onderzoek: een stijging in verkeersgeluid

met ongeveer tien dB leidt tot een stijging van hartaanvallen en hersenbloedingen van tussen de 7% en 17%.<sup>15</sup>

In artikel 82 van de Wet geluidshinder wordt 48 dB als voorkeursgrenswaarde gesteld voor wegverkeerslawaaï.

### **Laagfrequent geluid heeft iets ongrijpbaars**

De geluidswaarden die de WHO stelt, gaan over 'normaal' hoorbaar geluid. Het menselijk oor neemt geluid waar tussen de 20 en 20.000 Hz. Het meest voorkomende 'gewone' geluid zit tussen de 125 en 8.000 Hz. Hoe meer trillingen per seconde, hoe hoger de frequentie en hoe hoger de toon.

Wetenschappers hanteren voor LFg vaak als bovengrens een frequentie van ongeveer 125 Hz. Geluid onder de 20 Hz is niet hoorbaar, maar wel voelbaar. LFg wordt gehoord via het gehoor, geeft een gevoel van druk, onder meer in de gehoorgang en op het hoofd en zorgt voor trillingen in buik, borst, armen en benen.

LFg leidt dan ook tot grote gezondheidsproblemen (zie hiervoor). Dat komt, omdat weliswaar dichtbij de bron (bijvoorbeeld de snelweg) het LFg niet wordt gehoord, doordat het overstemd wordt door het hoger frequente geluid. Maar op een grotere afstand (meer dan vijf kilometer) van de bron kan het LFg wel waargenomen worden, aangezien het LFg veel verder draagt dan het 'normale geluid'. Ook geldt dat lage tonen bijna geen richting hebben en dus overal vandaan lijken te komen. Verder zijn de lage tonen vaak wel binnen te horen en buiten niet. Dit komt doordat er buiten allerlei geluiden zijn, zoals het geluid van wegen, die het LFg overstemmen. Deuren en ramen van huizen kunnen gaan meetrillen. LFg wordt bijna niet tegengehouden door gevelisolatie en blijft daardoor in de woning en kan zelfs versterkt worden door de woningen en gebouwen zelf. Er treedt bij LFg namelijk sneller resonantie (het trillen van een object in zijn 'eigen frequentie') op dan bij hogere frequenties, doordat de maten van woningen en gebouwen vaak overeenkomen met de golflengtes van het LFg. Mensen bemerken wel iets, maar kunnen dit niet in verband brengen met een zichtbare bron. Door deze combinatie van factoren heeft LFg iets ongrijpbaars.

Er zijn in Nederland geen wettelijke regels voor LFg.<sup>16</sup> Wel is er een GGD-richtlijn laagfrequent geluid van 2002 die momenteel wordt herzien.<sup>17</sup>

### **Huidige maatregelen niet effectief tegen geluidsoverlast snelwegverkeer**

Uit het bovenstaande blijkt dat er maatregelen nodig zijn tegen geluidsoverlast door verkeer. Onderstaand wordt ingegaan op de huidige maatregelen en aangegeven waarom deze niet effectief zijn om het gehele probleem van geluidsoverlast van snelwegverkeer op te lossen.

#### **1. Maatregelen in de omgeving**

Het doel van deze maatregelen is om de geluidsbron, in dit geval de auto, te scheiden van de ontvanger, zoals een woonomgeving, school of ziekenhuis. Bij deze maatregel wordt het geluid dus niet verminderd, maar wordt ervoor gezorgd dat het geluid niet of minder terecht komt in de omgeving door het creëren van een grote afstand. Zo is in 2017 de A9, die eerst dwars door Badhoevedorp liep, om het dorp gelegd om de geluidsoverlast voor

omwonenden te verminderen. Een andere mogelijkheid is het aanleggen van tunnels.

Het nadeel van deze maatregelen is dat er niet altijd genoeg ruimte is om de geluidsbron en de geluidsgevoelige omgeving te scheiden. Dit is juist vaak het geval rond de plekken waar de problemen het grootst zijn, namelijk in bestaande dorpen en steden. Verder zijn omgevingsmaatregelen als het omleggen van een weg of aanleggen van een tunnel heel kostbaar.

## 2. Verkeersmaatregelen

Aangezien het verkeer de veroorzaker is van geluidsoverlast, wordt door verkeersvermindering de geluidsoverlast gereduceerd. Bepaalde zones of wegen rond een geluidsgevoelige omgeving worden minder aantrekkelijk gemaakt door bijvoorbeeld het introduceren van kleine obstakels als snelheidslimieten, tolwegen of verkeersdrempels.

Deze maatregelen zijn niet toepasbaar of effectief voor verkeer op snelwegen.

Verkeersdrempels zijn namelijk alleen toepasbaar in een woonomgeving.

Snelheidslimieten op snelwegen helpen, maar blijven altijd zodanig hoog (> 40 km/h) dat de omgeving last blijft ondervinden van het rolgeluid van auto's.

## 3. Technische maatregelen

a) Maatregelen ten aanzien van de bron, de auto. Bijvoorbeeld auto's met een stillere motor en uitlaat of stillere banden. Elektrische auto's produceren geen enkel motorgeluid. Omdat fietsers en voetgangers elektrische auto's niet horen aankomen, heeft het Europees Parlement bepaald dat elektrische en hybride auto's vanaf 2019 meer geluid moeten maken! Stillere banden hebben een aangepast bandenprofiel en een ander materiaalgebruik. Dat is van belang, omdat vooral het rollen van de banden over het asfalt veel geluid produceert. Vanaf 40 kilometer is het rolgeluid zelfs harder dan het geluid van de motor. Als alle auto's zouden rijden op stillere banden, dan zou het geluid van rijdende auto's afnemen met bijna 3 dB. Dit is een hoorbaar verschil en komt overeen met 2 maal zo weinig verkeer.<sup>18</sup>

Het stiller maken van een motor is effectief voor lage snelheden (zoals in de bebouwde kom) omdat het motorgeluid dan dominant is. Wanneer een voertuig harder dan 40 km/h rijdt (en dit is het geval op de snelweg), wordt het rolgeluid dominant. Dus voor geluidsoverlast van snelwegverkeer is een stillere motor of een elektrische of hybride auto niet effectief.

Stillere banden zijn niet effectief, omdat een geluidsafname van 3 dB niet significant is (daarvoor moet de afname in de buurt van de grenswaarde van 48 dB komen) wat alleen maar bereikt kan worden als iedereen stillere banden gebruikt. Dit laatste is niet reëel.

b) Maatregelen ten aanzien van het wegdek. Thans wordt voor snelwegen zoab (zeer open asfaltbeton), duurzaam zoab, tweelaags zoab en tweelaags zoab-fijn op het Nederlandse wegdek gebruikt en is een ultrastil wegdek (USW) in ontwikkeling.<sup>19</sup>

Zoab is een wegverharding met een hoog percentage holle ruimte (circa 20%). De poreusheid absorbeert een deel van het autogeluid en dempt daarmee het geluid van de autobanden. Zoab bestaat uit een mengsel van

stenen, zand, vulstof en bitumen. De varianten zijn stiller en duurzamer dan gewone zoab.

Een wegdek met zoab helpt geluidsoverlast van snelwegen te reduceren, maar verliest zijn geluid reducerend vermogen snel en is civieltechnisch gezien niet duurzaam. Zo rafelt tweelaags zoab snel en de kleine gaatjes in het asfaltbeton slibben snel dicht door vervuiling, wat tot verlies van geluidsreductie leidt binnen 2 tot 3 jaar na aanleg. Dit leidt tot veel en duur onderhoud. Zo had de dubbellaags zoab van de A10 al na 5 jaar het einde van zijn akoestische werking bereikt als gevolg van een ophoping van stof en vuil.<sup>20</sup>

- c) Maatregelen die tussen de bron en de omgeving geplaatst worden. Bijvoorbeeld een geluidsscherm of -wal, die voorkomt dat het geluid doorgelaten wordt naar de geluidsgevoelige omgeving door reflectie of absorptie van het geluid. Een geluidsscherm moet hoog, lang en zwaar genoeg zijn om het gewenste effect te bereiken. Voor het beste resultaat moet het scherm of de wal zo dicht mogelijk bij de weg staan. Verder moet in het ontwerp rekening worden gehouden met weerkaatsing van het geluid. Geluidsschermen zijn een logische en goede oplossing tegen geluidsoverlast door snelwegverkeer, maar de huidige geluidsschermen werken nog niet optimaal. Zo zijn geluidsschermen vaak gemaakt van beton of kunststof. Deze materialen absorberen het geluid vrijwel niet. Wanneer geluid in contact komt met een object, kan het drie dingen doen: gereflecteerd of geabsorbeerd worden of door iets heen gaan. Aangezien het geluid niet geabsorbeerd kan worden door de geluidswand, omdat beton en kunststof een laag absorberend vermogen hebben en het op de weg geen oorverdovend lawaai is (in dat geval zou het geluid gereflecteerd worden), laten de huidige geluidsschermen het geluid vooral door of gaat het over het scherm heen. Ten aanzien van de gebruikte materialen is er dus ruimte voor verbetering. Daarnaast staan geluidsschermen vaak rechtop of schuin naar buiten. Daardoor laten ze onnodig veel geluid over het scherm heen en begeleiden ze als het ware een deel van het geluid naar de kant achter het scherm, wat eigenlijk niet de bedoeling is. Ook de vorm behoeft dus verbetering.
- d) Maatregelen ten aanzien van de geluidsgevoelige omgeving zelf. Van gebouwen, in de buurt van een weg die geluidsoverlast veroorzaakt, worden vaak de gevel en het dak geïsoleerd en/of worden de ramen van dubbel glas voorzien voor een nog grotere isolatie. De WHO geeft aan dat gevelisolatie en dubbel glas in ramen van gebouwen met name effectief zijn voor geluidsoverlast dat veroorzaakt wordt door de directe omgeving, bijvoorbeeld lawaaijige burens. De isolatie heeft echter een relatief klein effect op geluid dat veroorzaakt wordt uit de omgeving met een grote afstand tot het gebouw, zoals een snelweg en is voor die geluidsoverlast dus geen oplossing.<sup>21</sup>

Verder geldt dat bovenstaande maatregelen gericht zijn tegen geluidshinder door hoogfrequent geluid, maar niet werken tegen LFg. Uit nog niet gepubliceerd RIVM-onderzoek blijkt zelfs dat zoab-asfalt, geluidsschermen en betere motorisolatie er onbedoeld voor zorgen dat de geluidsoverlast van snelwegen toeneemt. Dat komt, omdat deze maatregelen vooral geluid met hogere frequenties tegengaan, waardoor LFg beter hoorbaar wordt. Bij een geluidsscherm werkt dit als volgt. Hoe lager de frequentie van het geluid, hoe meer geluidsenergie er over de schermrand buigt. Dan wordt het geluid als het ware gefilterd en blijven alleen de lage frequenties over, omdat de hogere frequenties niet afbuigen en dus gedempt worden. Doordat woningisolatie LFg nauwelijks tegenhoudt, is op sommige plekken in ons land nu het aandeel LFg in de totale geluidsproductie van de snelweg verdubbeld.<sup>22</sup>

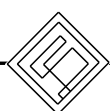
### **Mijn oplossing: een innovatief geluidsscherm tegen zowel hoog- als laagfrequent geluid van snelwegverkeer**

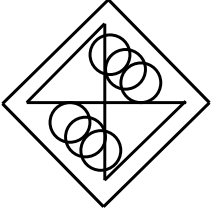
In dit onderzoek kom ik met een ontwerp van een nieuw type geluidsscherm als oplossing voor het probleem van geluidsoverlast veroorzaakt door snelwegverkeer. Dit scherm is uniek, omdat het zowel hoog- als laagfrequent geluid absorbeert. Juist dat LFg van snelwegverkeer vormt een steeds groter probleem.

Voor het tegengaan van geluidsoverlast door snelwegverkeer komt een geluidsscherm als beste maatregel naar voren (zie hierboven). Verder kennen geluidsschermen de volgende voordelen:

- Relatief makkelijk plaatsbaar, waardoor ze snel voor een oplossing kunnen zorgen;
- Maatwerk is mogelijk. Afhankelijk van de omgeving en situatie kan gevarieerd worden in hoogte, dikte, kleur- en vormgeving;
- Multifunctioneel inzetbaar, dus naast vermindering van geluidsoverlast duurzame energie opwekken met behulp van bijvoorbeeld zonnepanelen.

In mijn onderzoek focus ik mij op het vinden van materialen die zowel het hoogfrequente als laagfrequente geluid maximaal absorberen en op een vorm die ervoor zorgt dat het hoog- en laagfrequente geluid van het snelwegverkeer zo min mogelijk bij de ontvanger terecht komt. Verder vind ik het van belang dat het geluidsscherm duurzaam geproduceerd kan worden, dat wil zeggen dat alle of de meeste materialen gerecycled kunnen worden. Rijkswaterstaat wil namelijk in 2030 circulair werken.<sup>23</sup>





# 2. CENTRALE VRAAG

## 2. Centrale vraag

Welke materialen en welke vorm voor een geluidsscherm langs snelwegen reduceren zowel het laagfrequente als hoogfrequente geluid geproduceerd door weggebruikers optimaal?

### Deelvragen

#### Probleemanalyse

- Wat is de invloed van geluidsoverlast op de omgeving van een snelweg?
- Waarom zorgt LFg voor problemen in de omgeving van een snelweg?
- Welke huidige maatregelen worden er genomen?
- Waarom zijn de huidige maatregelen niet effectief?

#### Frequentieproef

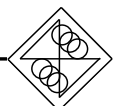
- Uit welke frequenties bestaat LFg?
- Welke frequenties uit het LFg-spectrum worden het meest uitgezonden door het wegverkeer van een snelweg?

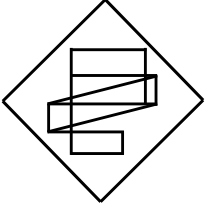
#### Materialen

- Hoe gedraagt geluid zich als het in contact komt met een object?
- Welke manier van geluidsreductie (isolatie of absorptie) is het meest effectief voor geluidsreductie door middel van een geluidsscherm?
- Hoe wordt geluidsabsorptie gemeten?
- Welke materialen worden op dit moment gebruikt voor geluidsschermen?
- Welk materiaal absorbeert LFg het beste?
- Welk materiaal absorbeert hoogfrequent geluid het beste?

#### Vorm

- Hoe plant geluid zich voort?
- Waarom neemt de geluidssterkte af met de afstand die het aflegt?
- Wat is het verband tussen de geluidssterkte en de afstand die het geluid aflegt?
- Wat is diffractie en hoe staat dat tot LFg?
- Hoe kan de afstand tussen de bron en de ontvanger van het geluid gemaximaliseerd worden?
- Hoe kan diffractie zo veel mogelijk beperkt worden?
- Hoe kan een T-top zodanig aangepast worden, dat die effectief is tegen LFg?
- Wat is de invloed van naar het naar binnen en naar buiten hellen van een geluidsscherm op de richting van de reflecties die tegen het scherm kaatsen?
- Wat is de ideale combinatie van naar binnen en naar buiten hellende panelen bij het ontwerp van een geluidsscherm?





# 3. PROGRAMMA VAN EISEN



### 3. Programma van eisen

De te ontwerpen geluidswand moet zorgen dat het geluid, dat geproduceerd wordt door snelwegverkeer, in de desbetreffende omgeving zo min mogelijk te horen is. Daarom mag de gevelbelasting van de gebouwen die het dichtst bij de geluidswand staan maximaal 48 dB zijn, dit is namelijk de wettelijke voorkeurswaarde voor wegverkeerslawaai.

Aan de te ontwerpen geluidswand stel ik de volgende eisen, gelabeld volgens de MoSCoW-methode:

- **Must:** moeten tijdens het project gerealiseerd worden;
- **Should:** moeten gerealiseerd worden, eventueel in vervolgproject;
- **Could:** realiseren wanneer er tijd over is;
- **Wish:** wensenlijst tweede fase.

Omdat ik niet beschik over alle technische gegevens en vereisten ten aanzien van geluidswanden, volsta ik bij bepaalde eisen met een kwalificatie en geen kwantificatie.

#### Eisen aan de geluidswand in zijn geheel

- **S** Moet qua geluidsreductie voldoen aan: NEN-E N 1793-1, 2 en 3:1997, NEN-E N 1794-1 en 2:1998;
- **C** Moet op een optimale hoogte zijn, die:
  - zorgt dat het (grootste deel van) het geluid geabsorbeerd/gereflecteerd wordt;
  - niet zorgt voor (al te veel) horizonvervuiling voor de omgeving;
  - niet zorgt voor een 'tunnelgevoel' voor de weggebruikers.
- **W** Moet qua stijfheids-, sterkte- en stabiliteitseisen voldoen aan: NEN-E N 1793-1, 2 en 3:1997, NEN-E N 1794-1 en 2:1998;
- **W** Moet qua duurzaamheid voldoen aan: NEN-6740, 6743, 6744 en 6788 et cetera, NVN-EN V 1993-1-1:1995; NAD-NVN-EN V 1993-1-1:1995;
- **W** Moet diervriendelijk zijn:
  - De schermen mogen aan de bovenkant niet zodanig transparant zijn dat er vogels tegen aan vliegen;
  - De schermen mogen aan de onderkant niet zodanig transparant zijn dat bodemdieren 's nachts nadeel ondervinden van het licht van de weg.

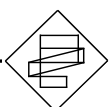
#### Eisen aan het materiaal

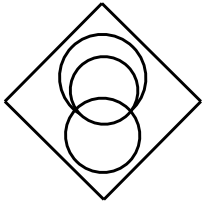
- **M** Qua geluid:
  - minimaal geluid doorlaten (voor de omgeving);
  - mag redelijk reflecteren (niet te veel voor de weggebruikers);
  - maximaal geluid absorberen;
- **S** Een lange levensduur hebben;
- **S** Weerbestendig zijn:
  - waterdicht;
  - windbestendig;

- brandveilig (i.v.m. bliksem);
- vriesbestendig;
- hittebestendig;
- **C** Mag niet te kostbaar zijn;
- **C** Mag niet veel licht reflecteren;
- **W** Mag niet gevoelig zijn voor graffiti.

### **Eisen aan de vorm**

- **M** Onder een optimale hellingshoek staan, waardoor de vorm:
  - zorgt voor een optimale absorptie;
  - zorgt voor een gerichte reflectie (zodat het geluid door de afstand uitdooft).
- **C** Geen nadelige windstromingen veroorzaken:
  - voor de automobilisten en
  - voor de geluidsgedraging.
- **W** Multifunctioneel inzetbaar zijn (bijvoorbeeld voor opwekking van energie).



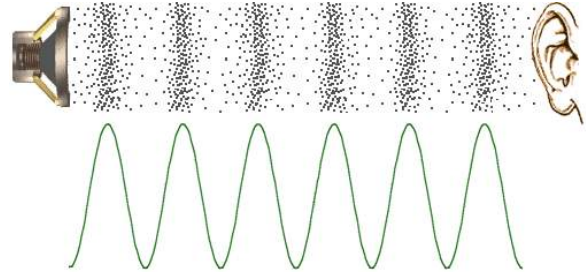


# 4. FREQUENTIE ANALYSE

## 4. Frequentieanalyse

### 4.1 Theorie

Geluid bestaat uit trillingen van luchtdeeltjes, die in beweging worden gebracht door een geluidsbron. Die luchtdeeltjes worden dan naast de bron samengeperst en weer uitgerekt en zorgen zo voor een soort domino-effect, waardoor de luchtdeeltjes daarnaast ook gaan trillen. Door het drukken van luchtdeeltjes op elkaar en daarna het minderen van die druk, ontstaat er een trilling, een geluidsgolf (zie afbeelding hiernaast). Geluid zou je ook wel een hoorbare verandering in luchtdruk kunnen noemen. Aangezien bij geluidsgolven de lucht in dezelfde richting trilt als de richting waarin de golf zich voortplant, worden geluidsgolven ook wel longitudinale golven genoemd.



De voorplantingsnelheid van het geluid beïnvloedt de toonhoogte oftewel de frequentie. De frequentie kan bepaald worden vanuit de trillingstijd ( $T$ ). De trillingstijd is de tijd van één trilling en de frequentie ( $f$ ) is het aantal trillingen per seconde. Hieruit volgt dan ook de formule:  $f = \frac{1}{T}$ .

### 4.2 Onderzoeksvraag

Om materialen en vormen voor de geluidswand te testen, wordt er gebruik gemaakt van verschillende frequenties. Om te zorgen dat de geteste materialen en vormen zo goed mogelijk aansluiten op het geluid dat door snelwegverkeer geproduceerd wordt, dienen eerst verschillende frequenties uit het verkeersgeluid bepaald te worden aan de hand van de trillingstijd. Bij deze test wordt de focus met name gelegd op de lagere frequenties die vallen onder de LFg-normen (<125 Hz).

Het bovenstaande leidt tot de volgende onderzoeksvraag: Wat zijn de meest voorkomende lage frequenties (LFg's) in het geluid dat geproduceerd wordt door licht, middelzwaar en zwaar gemotoriseerd wegverkeer?

Onder licht verkeer wordt doorgaans verstaan: personenauto's (met/zonder aanhangers) en motoren, onder middelzwaar verkeer vallen bakwagens, kleine autobussen en grote bestelauto's al dan niet met aanhanger. Onder zwaar verkeer worden gelede vrachtwagens en grote autobussen zoals touringcars en lijnbussen verstaan.

### 4.3 Hypothese

Aangezien er geen bronnen te vinden zijn waarin frequenties van voertuigen worden genoemd, is het moeilijk een kwalitatieve verwachting te hebben van de frequenties van zware, middelzware en lichte voertuigen. Mijn hypothese luidt: "Ik verwacht dat de frequentie van zwaar verkeer het laagst zal zijn, die van middelzwaar verkeer hoger en dat de hoogst gemeten frequentie te horen zal zijn bij het lichte verkeer". Over het

algemeen geldt namelijk dat een grotere massa een grotere trillingstijd veroorzaakt en daarmee dus zal resulteren in een lagere frequentie.

#### 4.4 Materialen en methode

Voor het uitvoeren van deze proef is gebruikt gemaakt van de volgende materialen:

- Een telefoon (dictafoonapp), om het verkeersgeluid mee op te nemen;
- Een muziekbox om het geluid zodanig te versterken dat de oscilloscoop dit kan opvangen en golven kan weergeven;
- Een oscilloscoop om uit het geluid frequenties te kunnen bepalen;
- Excelprogramma om gemakkelijk de vijf meest voorkomende frequenties te kunnen bepalen.

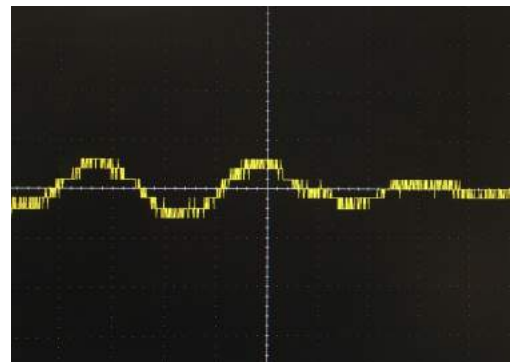
Op 25 oktober 2017 heb ik langs de A4 geluidsopnames gemaakt om 19:10 uur en 19:35 uur. De voertuigen reden minstens 120 km/h, enkelen reden harder (130 km/h). Die avond was het 12 graden Celsius, was de luchtvochtigheid 88%, de luchtdruk 1024 hPa en waaide er een westzuidwesten wind met 10 km/h.

Voor het meten stond ik zo dicht mogelijk bij de snelweg en hield ik mijn telefoon met de dictafoonapp uitgestrekt naar voren (zie de foto rechts). Ik heb twee sets aan metingen gedaan: de eerste opnames waren aan de westkant van de snelweg, de tweede set aan de oostkant. Aan elke kant van de snelweg nam ik ongeveer 10 minuten aan materiaal op, waarin variaties zaten met vrachtwagens, zonder vrachtwagens, weinig auto's, veel auto's, met brommers, et cetera.



Na het opnemen van de geluidsfragmenten, speelde ik deze af via de muziekbox bij de oscilloscoop. Deze zette het opgenomen geluid om in zichtbare golven (zie de afbeelding rechts). Die beelden zette ik op pauze, waardoor ik de tijd had om de frequentie te bepalen. Dat deed ik als volgt:

- Eerst zocht ik een redelijk gelijkmatige golf. In de afbeelding zijn dat de eerste twee trillingen;
- Daarvan bepaalde ik de trillingstijd (T) door het aantal seconden voor één trilling te bepalen door het aantal hokjes op de x-as van dal tot dal in de golf te tellen. In het voorbeeld is dat voor de twee trillingen samen 5,4 hokjes, 1 hokje is gelijk aan 200 microseconden, dus de twee trillingen samen duren 0,00108 seconden;
- Daarna was de frequentie (f) te berekenen door  $f = \frac{1}{T}$ . In het voorbeeld is dat dan  $f = \frac{2}{0,00108} = 1852 \text{ Hz}$ .



## 4.5 Resultaten

In de onderstaande tabel zijn de vaakst voorkomende berekende frequenties per voertuigtype en octaafband genoteerd. De lage, middelhoge en hoge frequenties zijn relatief, dat wil zeggen gerelateerd aan het betreffende verkeer: zwaar, middelzwaar en licht verkeer. Zie voor een volledig overzicht van de resultaten bijlage 1.

Voertuigtype	Ondertoon		1 <sup>e</sup> boventonenset		2 <sup>e</sup> boventonenset	
	Frequentie	Aantal	Frequentie	Aantal	Frequentie	Aantal
<b>Zwaar verkeer</b>	51 Hz	3 keer	395 Hz	4 keer	1.250 Hz	7 keer
	63 Hz	3 keer	410 Hz	4 keer	1.429 Hz	3 keer
	82 Hz	2 keer			1.667 Hz	2 keer
	124 Hz	3 keer				
<b>Middelzwaar verkeer</b>	372 Hz	3 keer	629 Hz	3 keer	2.000 Hz	3 keer
	440 Hz	4 keer	827 Hz	2 keer	2.500 Hz	8 keer
	673 Hz	2 keer	1.252 Hz	3 keer		
<b>Licht verkeer</b>	1.872 Hz	3 keer	2.533 Hz	3 keer	4.545 Hz	3 keer
	2.500 Hz	3 keer	3.261 Hz	3 keer	5.000 Hz	2 keer
					5.556 Hz	2 keer

## 4.6 Conclusie

Uit bovenstaande resultaten blijkt dat enkel het zware verkeer LFg produceert. Daar zijn namelijk frequenties van 51, 63, 82 en 124 Hz meerdere keren gemeten en die vallen allemaal in het spectrum van de LFg ( $20 < \text{frequentie} < 125$ ). De laagste tonen geproduceerd door het middelzware en lichte verkeer (372 en 1.872 Hz) vallen allemaal buiten de LFg. Mijn hypothese: "Ik verwacht dat de frequentie van zwaar verkeer het laagst zal zijn, die van middelzwaar verkeer hoger en dat de hoogst gemeten frequentie te horen zal zijn bij het lichte verkeer" wordt door deze meetresultaten dus bevestigd.

Verder blijkt uit bovenstaande resultaten dat, wanneer het om de hoge tonen gaat, het zware verkeer met name de frequentie van 1.250 Hz uitzendt. Bij het middelzware verkeer komt de frequentie van 2.500 Hz het vaakst voor en bij het lichte verkeer is de frequentie van 5.000 Hz het meest gemeten. De middelhoge tonen uitgezonden door het zware verkeer bevatten voornamelijk frequenties van 410 Hz. Het middelzware verkeer zendt hoofdzakelijk tonen rond de 629 en 827 Hz uit en voor het lichte verkeer zijn dat frequenties van 3.261 Hz.

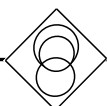
Kortom: de frequenties die door het wegverkeer geproduceerd worden en die in het LFg-spectrum vallen liggen tussen de 50 en 125 Hz. Daarom zal in de vervolgstap gemeten worden met frequenties hoger dan 50 en lager dan 125 Hz.

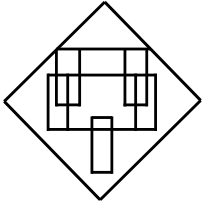
## 4.7 Discussie

Het opnemen, bepalen en berekenen van de frequenties van het wegverkeer verliep allemaal voorspoedig. Toch bevatten de bovenstaande resultaten enige onnauwkeurigheden. Om de resultaten sterker te maken zou namelijk op verschillende plekken (dus niet langs één snelweg) gemeten moeten worden, op verschillende

tijdstippen (dus niet alleen 's avonds), onder verschillende weersomstandigheden en zouden er meer metingen gedaan moeten worden om een modus te krijgen die representatiever is voor de gemiddelde frequenties uit snelwegverkeersgeluid.

Daarnaast was de variatie van het wegverkeer op het meetmoment niet ideaal. De hoeveelheid middelzwaar en zwaar wegverkeer was groot, maar de lichtere vervoersmiddelen waren ondervertegenwoordigd. Het lichtere verkeer is wel degelijk opgenomen in de metingen, maar de hoeveelheid hoeft niet representatief te zijn voor hoeveel er uit die categorie overdag rondrijdt. Daardoor kan het zijn dat de berekende frequentie bij de motoren afwijkt van de gemiddelde frequentie van motoren, omdat de steekproef bij het lichte verkeer te klein was.





# 5. MATERIALEN



## 5. Materialen

### 5.1 Test materialen

#### 5.1.1 Materiaalkeuze

Uit mijn vooronderzoek (zie bijlage 2) blijkt dat zowel rubbergranulaat als PUR-schuim geluid goed dempen. Om te testen of deze materialen een hoger absorberend vermogen hebben dan de absorberende materialen die tegenwoordig in geluidsschermen langs snelwegen gebruikt worden, worden die in deze test met elkaar vergeleken. De absorberende materialen die volgens Redubel BAM tegenwoordig het meest geplaatst worden, zijn: aluminiumcassettes, groencassettes en houtvezelbetonplaten.

Aangezien in het materiaalonderzoek de focus ligt op het verminderen van de lage tonen die worden veroorzaakt door zwaar verkeer en uit een frequentieanalyse van het zware verkeer in de frequentietest (zie bijlage 1) blijkt dat met name tonen met de frequenties 51, 63, 82 en 124 Hz voorkomen bij zwaar verkeer, zal in de test van de materialen met name gekeken worden naar de hoogste absorptiecoëfficiënt bij specifiek die frequenties.

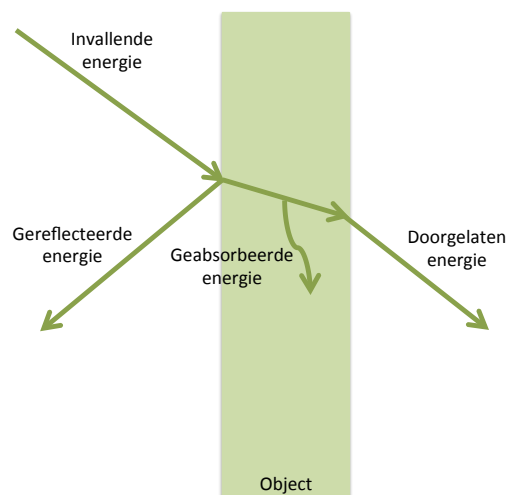
#### 5.1.2 Theorie

Wanneer ergens een geluidsbron staat, brengt die geluidsbron de lucht in de ruimte aan het trillen. Die trillingen worden ook wel longitudinale golven genoemd. De sterkte van het geluid hangt af van de uitwijking van de golf en van de frequentie en kan gemeten worden met een decibelmeter. Deze meter zet de geluidstrillingen om in elektrische trillingen. Van die elektrische trillingen wordt dan de energie bepaald. Met deze energie kan makkelijker gerekend worden dan met de geluidsgolf zelf, wanneer het geluid een object bereikt. Daarom wordt er vaak gesproken over geluidsenergie in plaats van geluidsgolf, wanneer het gaat om berekeningen rondom een object.<sup>25</sup>

Wanneer geluidsenergie uitgezonden wordt, bereikt dit het oor van een waarnemer, maar verdwijnt daarna niet.<sup>26</sup> Dan komt het aan bij een object, bijvoorbeeld een muur, en kan het drie dingen doen: het kan gereflecteerd worden, het kan geabsorbeerd worden en het kan doorgelaten worden (zie afbeelding rechts). In formulevorm ontstaat er dus:

$E_{\text{inval}} = E_{\text{ref}} + E_{\text{abs}} + E_{\text{door}}$

Als alle geluidsenergie gereflecteerd wordt, zal de energie alleen kunnen afnemen door de afstand. Wanneer het geluid geabsorbeerd wordt, laten de geluidsgolven het materiaal waar het inkomt meetrillen. Die beweging wordt vervolgens omgezet in warmte: dit is de absorptie. Tot slot kan het geluid ook nog doorgelaten worden. Deze energie zal minder zijn dan de invallende



energie. Ook wanneer deze volledig omgezet wordt in doorgelaten energie, omdat het materiaal ook weerstand biedt.

Om te zorgen dat het geluid rondom (snel)wegen minder wordt voor de omgeving, moet er voorkomen worden dat het geluid doorgelaten wordt. Die doorgelaten geluidsenergie is immers het probleem. Dan kan de reflectie verhoogd worden en werkt het materiaal dus isolerend. Een hele hoge isolatie en daarmee reflectie, zal echter niet praktisch zijn bij een (snel)weg, omdat dat voor overlast zal zorgen bij de weggebruikers. Daarnaast heeft een hoge isolatie ook een negatief effect op de schaduwzone (dat is het gebied achter de geluidswand waar geen geluid terecht komt), doordat dan het canyoneffect optreedt: door reflecties buigt het geluid makkelijker om de top van een geluidsscherm heen en verkleint daarmee de schaduwzone (zie voor meer uitleg paragraaf 6.1).<sup>25</sup> Dan blijft de absorptie over om te zorgen dat het weggeluid vermindert. In de materiaaltest zal dan ook de focus gelegd worden op het vinden van het materiaal met het beste absorberend vermogen.

De absorptie van een materiaal wordt uitgedrukt in de geluidsabsorptiecoëfficiënt. Dat is een maat voor de hoeveelheid geluid als onderdeel van de totale geluidshoeveelheid, waaraan dat object is blootgesteld dat niet gereflecteerd wordt door het oppervlak. In formulevorm verhoudt de geluidsabsorptiecoëfficiënt zich als volgt tot de eerdergenoemde geluidsenergieën:  $\alpha_{\text{geluid}} = \frac{E_{\text{inval}} - E_{\text{ref}}}{E_{\text{inval}}} = \frac{E_{\text{abs}} + E_{\text{door}}}{E_{\text{inval}}}$ .<sup>26</sup> Wanneer alle energie (100%) dus wordt gereflecteerd, is de geluidsabsorptiecoëfficiënt gelijk aan nul ( $\alpha_{\text{geluid}} = \frac{100-100}{100} = 0$ ) en wanneer alle energie wordt geabsorbeerd, is de geluidsabsorptiecoëfficiënt gelijk aan één ( $\alpha_{\text{geluid}} = \frac{100-0}{100} = 1$ ).

### **Verschillende geluidsabsorptiecoëfficiënten in gebruik**

Aangezien de geluidsabsorptiecoëfficiënt als materiaalgrootte afhankelijk is van verschillende variabelen, waar vooral de hoek van inval belangrijk is, zijn er verschillende geluidsabsorptiecoëfficiënten in gebruik: een geluidsabsorptiecoëfficiënt voor statische inval, één voor normale inval en een derde, die de Sabine absorptiecoëfficiënt heet.<sup>27</sup>

De geluidsabsorptiecoëfficiënt voor statische inval gaat over een oneindig oppervlak en een geluidsenergie-inval van alle kanten. Dit is een geïdealiseerde grootte, die met name in theoretische berekeningen en benaderingen wordt gebruikt.

De normale inval geluidsabsorptiecoëfficiënt wordt gebruikt bij de Proef van Kundt. Daarbij wordt aan het uiteinde van de buis het te testen materiaal neergezet en aan het begin van de buis wordt een luidspreker geplaatst. De luidspreker zendt dan geluidsgolven door de buis, dan gaat het geluid in de buis resoneren en ontstaat er een staande golf. Bij de het materiaal in de buis ontstaat dan een knoop en aan de kant van de luidspreker een buik. Dan kunnen het aantal knopen en buiken geteld worden en als die gelijk zijn aan elkaar, wordt al het geluid gereflecteerd en dus niet geabsorbeerd. De normale inval geluidsabsorptiecoëfficiënt wordt echter weinig gebruikt, omdat het een onbetrouwbare grootte is. De test wordt namelijk met een heel klein monster gedaan en in de praktijk zal het geluid zeer zelden op deze manier invallen.

De derde geluidsabsorptiecoëfficiënt, de Sabine absorptiecoëfficiënt, wordt gebruikt bij het testen van materialen in een nagalmkamer met een diffuus geluidveld. In de praktijk wordt het geluid het meest geabsorbeerd, zoals dat bij een Sabine absorptiecoëfficiënt getest wordt. De Sabine absorptiecoëfficiënt komt namelijk vaak redelijk dicht in de buurt van de geluidsabsorptiecoëfficiënt voor statische inval, maar verschilt toch, omdat bij de Sabine het oppervlak eindig is. Daardoor worden ook de randen meegerekend, die extra absorberen.<sup>28</sup>

### Keuze voor Sabine absorptiecoëfficiënt

Omdat de Sabine absorptiecoëfficiënt het meest dicht bij de praktijk ligt en deze over het algemeen gehanteerd wordt, wordt die in dit onderzoek ook toegepast.<sup>29</sup> Daarom vindt de absorptietest ook plaats in een nagalmkamer.

Een nagalmkamer is bedoeld voor het doen van akoestische metingen en zorgt ervoor dat er staande golven worden voorkomen. Daarom heeft de kamer kale wanden, die zo min mogelijk verschillen en staan alle oppervlaktes (de wanden, het plafond en de vloer) in verschillende hoeken ten opzichte van elkaar. Daardoor ontstaat er een lange nagalmtijd. Die nagalmtijd is meetbaar, de absorptiecoëfficiënt niet. De absorptiecoëfficiënt kan echter wel berekend worden aan de hand van de nagalmtijd. De nagalmtijd is de tijd die nodig is om het geluid met 60 dB, oftewel een factor van 1 miljoen, af te laten nemen.<sup>30</sup>

De formule voor de nagalmtijd van de referentietest is:  $T_0 = \frac{55,3 \cdot V}{c_{\text{lucht}} \cdot A_0}$ <sup>31</sup>, waarbij het volume van de kamer (V) en de geluidssnelheid ( $c_{\text{lucht}}$ ) constant zijn. Omdat bij deze proef niet de nagalmtijd (T) het eindproduct is, maar de absorptiecoëfficiënt (A), wordt de formule als volgt omgeschreven:  $A_0 = \frac{55,3 \cdot V}{c_{\text{lucht}} \cdot T_0}$ . Hiermee wordt dan de absorptiecoëfficiënt van de galmkamer zelf bepaald.

Het berekenen van de absorptiecoëfficiënten van de testmaterialen gaat als volgt in zijn werk:

- Er wordt een meting gedaan met één van de testmaterialen in de galmkamer, waaruit een  $A_{\text{totaal}}$  volgt;
- Aan de hand van de  $A_{\text{totaal}}$  kan de volledige absorptie ( $A_{\text{monster}}$ ), die door het testmateriaal gerealiseerd wordt, bepaald worden door berekening van het verschil tussen de  $A_0$  en de  $A_{\text{totaal}}$ :

$$A_{\text{monster}} = A_{\text{totaal}} - A_0 = \frac{55,3 \cdot V}{c_{\text{lucht}}} \cdot \left( \frac{1}{T_{\text{totaal}}} - \frac{1}{T_0} \right)$$

- Uit de  $A_{\text{monster}}$  volgt dan, na de volgende correctie voor de oppervlakte (S) van het materiaal, de absorptiecoëfficiënt van het testmateriaal ( $\alpha_{\text{monster}}$ ):  $\alpha_{\text{monster}} = \frac{A_{\text{monster}}}{S_{\text{monster}}}$ .

### 5.1.3 Onderzoeksvraag

Welke van de geselecteerde materialen heeft een bovengemiddelde totale absorptiecoëfficiënt en het grootste absorberende vermogen bij frequenties tussen de 50 en 125 Hz?

### 5.1.4 Hypothese

Ik acht het waarschijnlijk dat PUR-schuim de grootste absorptiecoëfficiënt zal hebben van de hieronder genoemde materialen, aangezien het een relatief lage dichtheid heeft en uit mijn vooronderzoek, zie bijlage 2, als meest absorberend uit de testen komt. Omdat uit mijn vooronderzoek blijkt dat ook rubbergranulaat geluid goed dempt, verwacht ik dat ook rubbergranulaat een grote absorptiecoëfficiënt zal hebben.

### 5.1.5 Materiaal

Testmateriaal:

- Aluminiumcassette (aluminium en steenwol) – 1 m<sup>2</sup>
- Groencassette (pvc en steenwol) – 0,86 m<sup>2</sup>
- Houtvezelbeton – 4 m<sup>2</sup>
- Rubber (geperst granulaat) – 2,7 m<sup>2</sup>
- PUR-schuim (dichtheid 120) – 1,7 m<sup>2</sup>

Uitvoeringsmateriaal:

- Microfoon
- IJkmeter
- Rolmaat
- Thermometer
- Computer met software om de geluidsterkte als functie van de tijd in beeld te brengen (Room EQ Wizard)
- Nagalmkamer (200 m<sup>3</sup>) van de TU Delft.

### 5.1.6 Methode

Eerst werd de microfoon in de nagalmkamer geijkt. Hierbij werd een ijkapparaat op de microfoon geplaatst en zond precies 93,85 dB op een frequentie van 1.000 Hz uit. In het programma Room EQ Wizard werd toen de geluidsterkte in beeld gebracht en deze kwam overeen met de 93,85 dB van het ijkapparaat. Voor de microfoon hoefde dus geen correctie doorgevoerd te worden.

Vervolgens werd de temperatuur van de galmkamer gemeten en de relatieve luchtvochtigheid. Allebei hebben namelijk invloed op de geluidssnelheid en de wrijvingsterm van de luchtabsorptie. De temperatuur in de nagalmkamer was 20 graden Celsius en de relatieve luchtvochtigheid was 30%.

Daarna werd als nulmeting eerst de nagalmtijd van de nagalmkamer zonder materiaal erin gemeten door zowel het aantal decibel als de functie van de tijd in een grafiek te zetten. De luidspreker speelde in de kamer frequenties af op een bandbreedte van 50 Hz tot 5 kilohertz (kHz). Er werd hierbij niet gebruik gemaakt van octaafbanden, maar van tertsbanden. De meetresultaten geven hierdoor fijnere frequentie informatie, waardoor de nauwkeurigheid van de nagalmtijd (en daarmee absorptiecoëfficiënt) wordt vergroot. De tertsbanden die bij deze proef zijn ingezet komen overeen met de frequenties die het Nederlands Normalisatie-instituut (NEN) vastgesteld heeft voor absorptiemetingen in een nagalmkamer en deze zijn: 100, 124, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1.000, 1.250, 1.600, 2.000, 2.500, 3.150, 4.000 en 5.000 Hz.

Vervolgens werden de materialen één voor één getest. Telkens werd het testmateriaal in het midden van de kamer gelegd. Het materiaal moest plat op de grond liggen. Recht boven het materiaal hing een microfoon en daarboven een luidspreker, allebei verbonden met de computer in de kamer ernaast (zie de afbeelding rechts). Ook werd de kamer bij elke meting zo



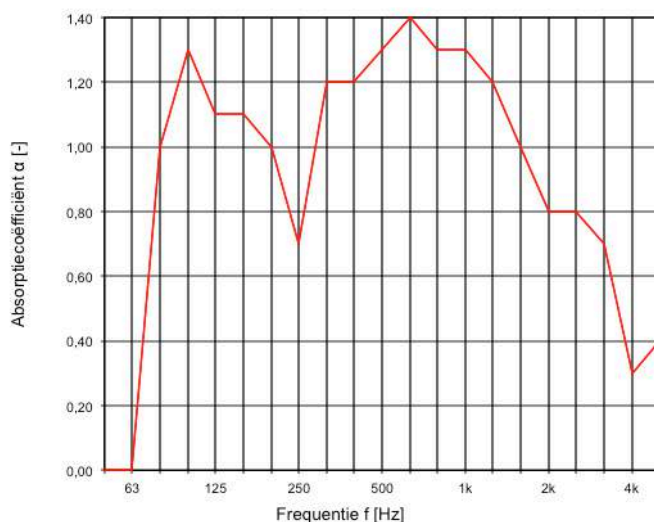
veel mogelijk afgesloten: alleen de gaten, waaruit de kabels kwamen van de galmkamer naar de kamer ernaast, zorgden voor een kleine opening.

De microfoon werd na elke meting voor de volgende meting 45 graden gedraaid om de nauwkeurigheid van de metingen te vergroten. De nagalmtijd van elk materiaal werd dus acht keer gemeten, waaruit een gemiddelde nagalmtijd is berekend. Bij deze gemiddelde nagalmtijd is nog niet de meetonzekerheid (veroorzaakt door de gemeten nagalmtijd en de invloeden van de algehele meetopstelling, inclusief de nagalmkamer zelf en de plaatsing van het testmateriaal) meegenomen. De meetonzekerheid is in onderstaande resultaten wel meegenomen, door de standaarddeviatie ( $\varepsilon_{20}$ ) van de nagalmtijd op  $T_{20}$  te berekenen volgens deze formule:  $\varepsilon_{20} = T \cdot \sqrt{\frac{2,42+3,59/N}{f \cdot T}}$ , waarin  $f$  de middenfrequentie van de tertsband in hertz is en  $N$  het aantal metingen. Bij deze standaarddeviatie is zowel rekening gehouden met de bovengrens ( $T_{20} + \varepsilon_{20}$ ) als de ondergrens ( $T_{20} - \varepsilon_{20}$ ).

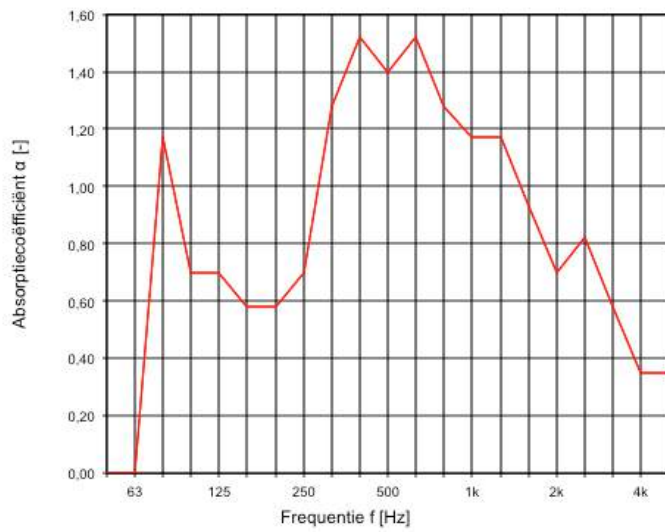
### 5.1.7 Resultaten

In de grafieken hierna is telkens per testmateriaal het verband tussen de uitgezonden toonhoogte en de berekende absorptiecoëfficiënt weergegeven. Zie voor alle resultaten en berekeningen bijlage 3.

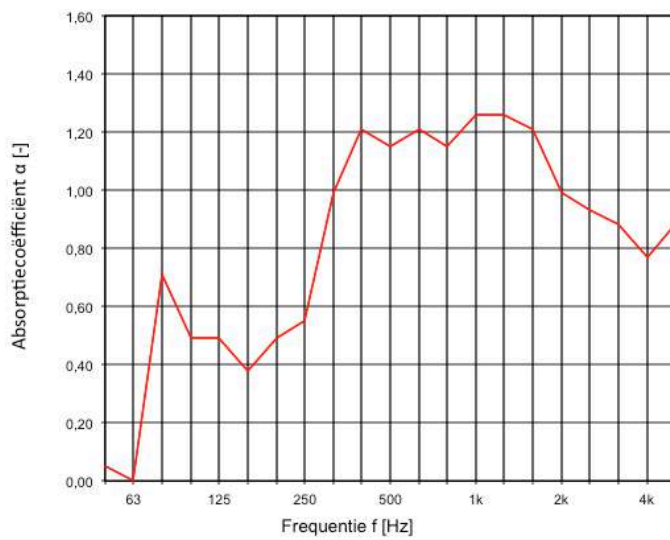
#### Aluminiumcassette



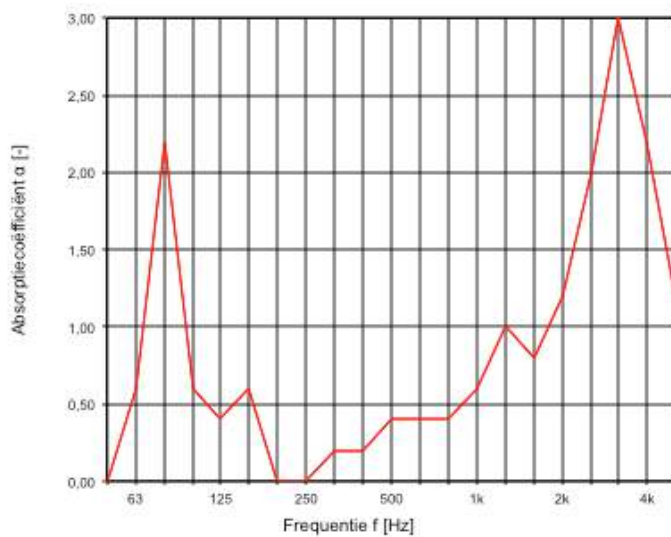
## Groencassette



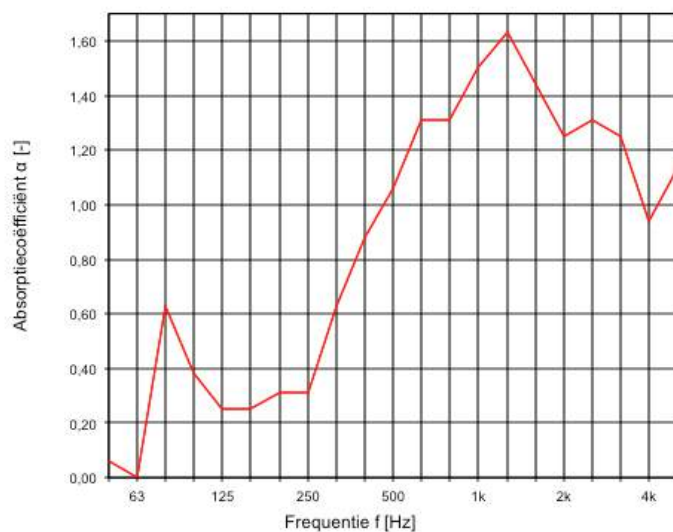
## Houtvezelbeton



## Rubbergranulaat



## PUR-schuim



### Eensgetalswaarden conform NEN-EN-ISO 11654 per materiaal en frequentie

In onderstaande tabel zijn weergegeven de berekende absorptiecoëfficiënten van de verschillende materialen bij de frequenties tussen de 50 en 125 Hz (de frequenties die worden uitgezonden door het wegverkeer in het LFg-spectrum (zie paragraaf 4.5 resultaten frequentietest)).

Frequentie in Hz	Aluminiumcassette	Groencassette	Houtvezelbeton	Rubbergranulaat	PUR-schuim
50	0	0	0,05	0	0,06
63	0	0	0	0,6	0
80	1	1,17	0,71	2,20	0,63
100	1,3	0,7	0,49	0,6	0,38
125	1,1	0,7	0,49	0,4	0,25
<b>Gemiddelde <math>\alpha</math></b>	0,66	0,51	0,35	0,76	0,26

### 5.1.8 Conclusie

Uit de resultaten van de nagalmtijd-materiaalproef blijkt dat, hoewel houtvezelbeton het materiaal is met het totaal hoogste absorberend vermogen gemeten over alle frequenties, rubbergranulaat het materiaal is met de hoogste absorptiecoëfficiënt in het LFg-spectrum. Houtvezelbeton heeft namelijk een totale absorptiecoëfficiënt van 0,95, wat hoger is dan 0,70 (PUR-schuim), 0,65 (zowel de aluminiumcassette als de groencassette) en 0,35 (rubbergranulaat).

Wanneer de gemiddelde absorptiecoëfficiënten in het LFg-spectrum vergeleken worden, komen daar hele andere resultaten uit. Dan eindigt rubbergranulaat met het hoogste absorberend vermogen (0,76), daarna volgt de aluminiumcassette (0,66), vervolgens de groencassette (0,51), dan het houtvezelbeton (0,35) en tot slot het PUR-schuim (0,26).

Het eerste gedeelte van de eerder gestelde hypothese: 'Ik acht het waarschijnlijk dat PUR-schuim de grootste absorptiecoëfficiënt zal hebben van de hieronder genoemde materialen, aangezien het een relatief lage dichtheid heeft en uit mijn eigen vooronderzoek als meest absorberend uit de testen kwam.' wordt hiermee dus niet bevestigd. Het tweede gedeelte van de hypothese 'Omdat ook uit mijn vooronderzoek blijkt dat rubbergranulaat geluid goed dempt, verwacht ik dat ook rubbergranulaat een grote absorptiecoëfficiënt zal hebben.', kan deels bevestigd worden. De absorptiecoëfficiënt in het LFg-spectrum is namelijk uitzonderlijk hoog, terwijl de totale absorptiecoëfficiënt ver onder het gemiddelde ligt. Daarom zal mijn geluidsscherm een combinatie bevatten van houtvezelbeton (om het hoogfrequente geluid te absorberen) en rubbergranulaat (om het laagfrequente geluid te absorberen).

### **5.1.9 Discussie**

Bij het testen van de materialen in de nagalmkamer speelden er enige factoren die gezorgd kunnen hebben voor onnauwkeurigheden/afwijkingen in de resultaten. Zo zijn de randen van de testmaterialen niet meegenomen in de oppervlakte voor de berekening van de absorptiecoëfficiënt, omdat deze onder een andere hoek stonden dan de platte oppervlakte. De randen dragen echter wel bij aan de oppervlakte en omdat niet alle materialen even dik waren (houtvezelbeton was bijvoorbeeld 12,75 cm dik, terwijl rubbergranulaat 8 mm dik was) kunnen zij het absorberend vermogen van de materialen beïnvloeden. Mijn verwachting is dan ook, dat de absorptiecoëfficiënten van houtvezelbeton relatief hoog uitgevallen zijn door de dikke randen en die van rubbergranulaat laag door de zeer dunne randen.

Verder speelt de oppervlaktestructuur (het profiel) van een materiaal ook een rol bij de mate van absorberend vermogen. Aangezien het voor mij voor deze test niet mogelijk was materialen te regelen met hetzelfde profiel, waren hier verschillen in. Het houtvezelbeton had bijvoorbeeld een sterk profiel (wat het absorberend vermogen versterkt) en het rubbergranulaat en de groencassette hadden een zeer minimaal profiel (wat het absorberend vermogen afzwakt). Ik verwacht dat wanneer de materialen met hetzelfde profiel getest worden, houtvezelbeton een lagere absorptiecoëfficiënt zal hebben en dat het rubbergranulaat en de groencassette een grotere zullen opleveren.

Daarnaast zijn er twee houtvezelbetonplaten getest, die naast elkaar lagen. De ene plaat was eerder gemaakt dan de ander, waardoor één van de betonplaten nog niet helemaal uitgehard was. Dat één houtvezelbetonplaat dus nog water bevatte, kan een rol gespeeld hebben voor de nagalmtijd en daarmee de absorptiecoëfficiënt.

Tot slot is er bij deze proef alleen zacht PUR-schuim met een dichtheid van 120 getest. Het is echter onduidelijk of dit ook het polyurethaan is dat het grootste absorberende vermogen heeft. Voor vervolgonderzoek is het wellicht interessant verschillende soorten (hard en zacht, verschillende dichtheden) PUR-schuim te testen om te kijken of die een hogere absorptiecoëfficiënt dan 0,70 halen. Hetzelfde geldt voor het rubbergranulaat: ook daar is maar met één dichtheid getest. Wellicht gaat hier ook de algemene regel op dat een lagere dichtheid het absorberend vermogen van het rubbergranulaat vergroot.



## 5.2 Informatie over rubbergranulaat

Onderstaand geef ik enige informatie over rubbergranulaat, omdat dit materiaal tot op heden niet gebruikt wordt voor geluidsschermen.

Rubber wordt verkregen uit het sap van rubberbomen of synthetisch gemaakt. Rubbergranulaat is fijngemalen rubber. Het wordt vaak gemaakt van gebruikte rubberproducten, zoals autobanden. De korrels kunnen ook van nieuw synthetisch materiaal worden gemaakt.

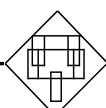
Rubber kan gebruikt worden voor mechanische demping.<sup>31</sup> De dempende werking van rubber ontstaat door de inwendige demping, ook wel hysteresis genoemd. Als rubber wordt ingedrukt, schuren de moleculen langs elkaar en worden ze opgewarmd door de kinetische energie. De kinetische energie wordt dus omgezet in warmte.

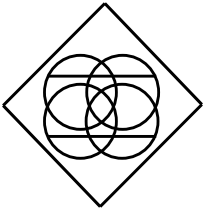
Rubber wordt vooral gebruikt om kleine schokken (zoals trillingen) te dempen, bijvoorbeeld rubberen dopjes onder elektronische apparaten. Daarnaast wordt rubber veel gebruikt in schoenzolen en (auto)banden. Rubbergranulaat wordt ook gebruikt in geluidsisolatiestroken om vloeren te isoleren ten behoeve van machines en gebouwen.<sup>32</sup> Ik ben op het internet zelfs een toepassing van rubbergranulaat tegengekomen op geluidsschermen van beton.<sup>33</sup> Doordat de laatste informatie op de site van dit Kroatische bedrijf Ruconbar van 2016 dateert, heb ik de indruk dat deze geluidsschermen niet geproduceerd worden en dat het dus gebleven is bij een proef, voor de helft gefinancierd door de Europese Unie.

Rubber heeft een groot aantal voordelen ten opzichte van andere dempende materialen. Zo heeft rubber een grote vormvrijheid, waardoor het toegepast kan worden op producten met een ingewikkelde vormgeving. Verder blijft de dempende werking van rubber lang behouden. Ook is het materiaal makkelijk aan te brengen op producten. Ten slotte is rubber relatief erg goedkoop. Een nadeel van rubber is dat het alleen kleine trillingen of schokken goed dempt.<sup>34</sup>

Wat betreft de milieubelastbaarheid van rubber geldt dat het van oorsprong een natuurproduct is, waaraan weekmakers worden toegevoegd om de structuur van rubber te krijgen. Deze weekmakers zijn erg milieubelastend, maar minder milieubelastende weekmakers zijn in ontwikkeling. Synthetische rubbers zijn slecht afbreekbaar. Over het algemeen zijn rubbers dus milieubelastend. Bij verbranding van rubber komen er schadelijke stoffen vrij.<sup>35</sup>

Wat betreft gezondheidsrisico's blijkt uit onderzoek van het RIVM dat in rubbergranulaat heel veel verschillende stoffen zitten, zoals polycyclische aromatische koolwaterstoffen (PAK's), metalen, weekmakers (ftalaten) en bisfenol A (BPA). Door weer en wind (zonlicht en regen) zullen kleine hoeveelheden van deze stoffen in de loop van de tijd vrijkomen uit het rubbergranulaat. Het schadelijke effect op de gezondheid is daardoor praktisch verwaarloosbaar.<sup>36</sup>





# 6. VORM



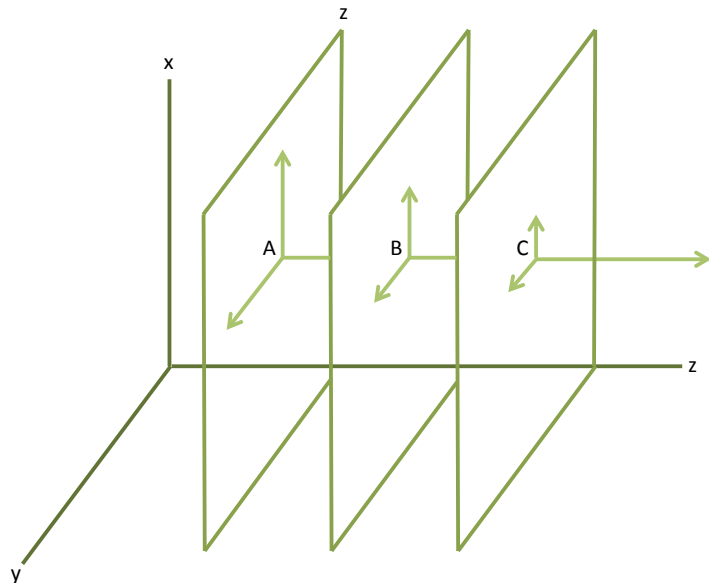
## 6. Vorm

### 6.1 Theorie

#### Voortplanting van geluid

Afhankelijk van de bron kan geluid zich op twee manieren voortbewegen. Wanneer de bron een punt is, zal het geluid rond dat punt alle kanten op gaan en op die manier een bol creëren. Dat heet sferische spreiding. In het andere geval is er niet sprake van een puntbron, maar van een lineaire bron, zoals dat het geval is bij een snelweg. Dan zal een cilindrische spreiding ontstaan vanuit de bron.<sup>37</sup> Aangezien de golf groter wordt om de cilinder met een straal  $r_0$  te vullen, groeit het gebied ( $G$ ) waarin het geluid terechtkomt op de volgende manier:  $G = 2\pi rh \propto r$ .

Het geluid maakt dus een driedimensionale beweging en met die beweging wordt de energie van het geluid verdeeld over drie richtingen. Omdat energie altijd behouden blijft, neemt de energie ( $\epsilon$ ) per gebied  $G$  af bij het voortbewegen van het geluid. Dit wordt verduidelijkt, wanneer de beweging van het geluid op een driebenig assenstelsel wordt geprojecteerd, zoals in de afbeelding rechts. Te zien is in punt A dat het geluid drie kanten opgaat, in punt B is de vector van A die over de z-as loopt ook weer uitgezet voor de beweging van het geluid in de x- en y-richting en in punt C is hetzelfde gedaan voor de vector die vanuit B over de z-as verder gaat. De lengte van vectoren die vanuit de punten A, B en C lopen geven de intensiteit van het geluid aan: hoe langer de vectoren, hoe hoger de geluidsintensiteit. In de afbeelding wordt zichtbaar gemaakt dat, wanneer het geluid een afstand aflegt (over z), er dusdanig energie opgaat aan die voortgaande beweging, dat de lengte van de vectoren vanuit de punten minder wordt en dat daarmee de intensiteit van het geluid afneemt.



Hoe de energie ( $\epsilon$ ) afneemt per gebied  $G$ , staat op de volgende manier in verband met het groter worden van  $r$ :  $\epsilon = \text{constant} = \frac{\epsilon}{2\pi eh} \propto \frac{\epsilon}{r} \propto \frac{A_0}{r} = \text{constant}$ , waarin  $A_0$  de beginamplitude is bij het punt waar de straal nul is.<sup>38</sup>

Om te zorgen dat de geluidsintensiteit verminderd wordt bij de ontvanger van het geluid, moet het geluidsscherm er dus voor zorgen dat de afstand tussen de bron en de ontvanger van het geluid vergroot wordt.

## Formule Maekawa

Hoe het geluidsniveau (L in dB) in verband staat met het vergroten van de afstand tussen de bron van het geluid en de ontvanger, heeft de Japanse akoesticus en natuurkundige Maekawa gevangen in een formule. Maekawa's formule is gebaseerd op het verschil in lengte ( $\delta$ ) tussen de weg die het geluid moet afleggen zonder scherm (c) en de weg die het geluid moet afleggen met scherm (a+b).<sup>39</sup> Hieruit volgt dus in formulevorm:  $\delta = a + b - c$ .

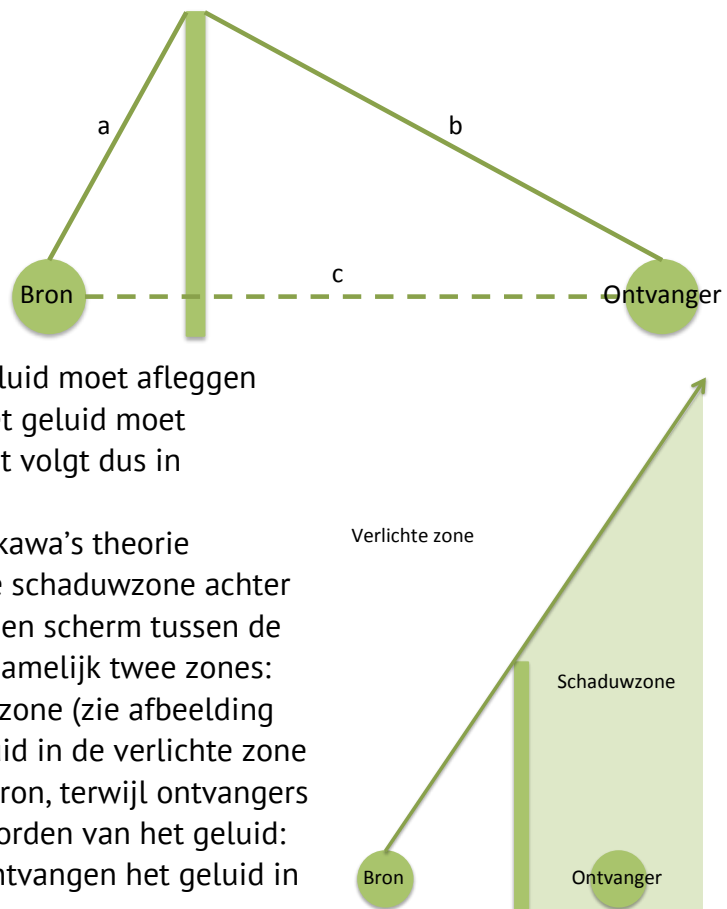
De ontvanger wordt bij Maekawa's theorie gedefinieerd als de ontvanger in de schaduwzone achter het scherm.<sup>40</sup> Bij het plaatsen van een scherm tussen de bron en de ontvanger ontstaan er namelijk twee zones: een verlichte zone en een schaduwzone (zie afbeelding rechts). Een ontvanger van het geluid in de verlichte zone ontvangt het geluid direct van de bron, terwijl ontvangers in de schaduwzone afgeschermd worden van het geluid: alle plaatsen in de schaduwzone ontvangen het geluid in mindere mate.<sup>41</sup>

Maekawa versimpelt in zijn formule de werkelijkheid door geluid te zien als een straal en aan te nemen dat deze geluidsstraal recht van de bron naar de ontvanger gaat (zie de bovenste afbeelding rechts). De extra afstand  $\delta$  wordt gebruikt om het Fresnelgetal te berekenen. Het Fresnelgetal ( $N_0$ ) is een waarde zonder dimensie die gebruikt wordt om de geluidsvermindering tussen de bron en de ontvanger te voorspellen en wordt als volgt berekend:  $N_0 = \frac{2\delta}{\lambda} = \frac{2\delta}{c}$ , waarin  $\lambda$  staat voor de golflengte in meters.<sup>42</sup> Het Fresnelgetal is een parameter in Maekawa's formule, die voor een lineaire geluidsbron het volgende verband heeft met de geluidswaarde van Maekawa ( $L_M$ ):  $L_M = 10\log(2 + 5\frac{1}{2}N_0)$ .<sup>43</sup>

## DiffRACTIE

De b in de formule van Maekawa, de afstand van het scherm tot de ontvanger, wordt met name bepaald door de diffractie (de afbuiging) van het geluid over de rand van het scherm. De diffractie bepaalt namelijk de hoek naar de ontvanger. Diffractie wordt gedefinieerd als het afbuigingsvermogen van een golf om een ondoordringbaar obstakel heen.

Een theoretische basis voor de beschrijving van akoestische golfdiffractie en de verschijnselen die plaatsvinden in de schaduwzone, kan gevonden worden in twee hoofdtheorieën: het principe van Huygens-Fresnel en de Fresnel-Kirchhoff diffractie.<sup>44</sup> Deze theorieën zijn ontwikkeld op basis van de bestaande theorieën over golfoptica. Ze

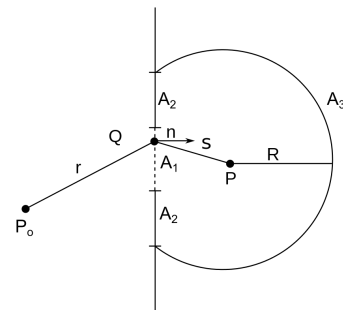


kunnen ook op geluid worden toegepast, omdat de geluidsgolfdiffractie het resultaat is van de interferentie van golven die het observatiepunt bereiken. Dit komt overeen met de wetten van geometrische optica en het ontstaan van golfverstoringen door interactie van de golf met de rand van een obstakel, in dit geval het geluidsscherm.

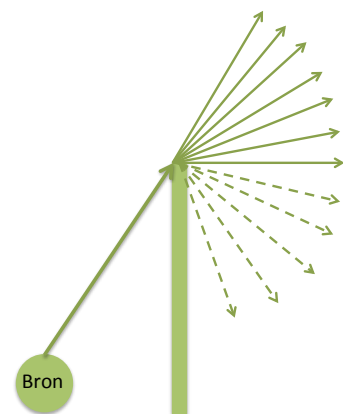
Volgens het principe van Huygens wordt elk punt dat bereikt wordt door het front van de golf een bron van een nieuwe geluidsgolf en het beperken van deze nieuwe golven wordt gebruikt om een nieuw golffront te creëren. Fresnel is vervolgens doorgeshaan op Huygens theorie en introduceerde het effect van interferentie van geluidsgolven die afgebogen worden. Fresnel stelt dat het verschijnsel van diffractie ook wel gezien kan worden als een berekening van het interferentie-effect voor alle golven die een vastgesteld observatiepunt bereiken. Dit is in overeenstemming met de wet van de geometrische optica, gecombineerd met een extra verstoring (een versturende golf) die opgewekt wordt door de interactie met de rand van het obstakel.

De wiskundige achtergrond van de effecten van diffractie is te vinden in de theorie van Kirchhoff, die hij geformuleerd heeft als een element van de scalaire (alleen gericht op grootte, niet op richting) theorie van licht. Kirchhoffs theorie is verder gegaan op het principe van Fresnel. De Fresnel-Kirchhoff diffractieformule luidt als volgt<sup>44</sup>:

$$U(P) = -\frac{ia}{2\lambda} \int_S \frac{e^{ik(r+s)}}{rs} [\cos(n, r) - \cos(n, s)] dS.$$
 Daarin is U de complexe amplitude<sup>45</sup>, i is de hoek die de golf maakt met de opening en k is het golfnummer. De andere variabelen zijn weergegeven in de afbeelding rechts.



Uit de formule van Fresnel-Kirchhoff is, met behulp van de golflengte ( $\lambda$ ), af te leiden wat de invloed is van de frequentie (f) op de diffractie. Het verband tussen de frequentie en de golflengte is namelijk de volgende:  $\lambda = \frac{v}{f}$ . Hierin is de v de geluidssnelheid, die weliswaar temperatuursafhankelijk is, maar bij een constante temperatuur wel constant is. Hoe groter de frequentie dus is, hoe lager de golflengte zal zijn. Hieruit volgt dat bij een hoge frequentie de golflengte klein zal zijn, waardoor de U groter wordt. Een grotere U, oftewel een grotere complexe amplitude, zorgt ervoor dat het geluid moeizamer om de rand van het scherm heen buigt. Dus: hoe lager de frequentie van het geluid, des makkelijker het over de top buigt. Hierdoor dringt LFg dus sneller door in de schaduwzone.<sup>46</sup> In de afbeelding rechts is dit weergegeven met het hoogfrequente geluid in doorlopende lijnen en het LFg in gestippelde lijnen.



## Het geluidsniveau bij de ontvanger

Vervolgens kan met de geluidswaarde van Maekawa het geluidsniveau bij de ontvanger berekend worden, waarbij het geluidsscherm tussen de bron en de ontvanger instaat. Dat kan op twee manieren gebeuren: door de bron als één lijn te zien of door elk voertuig op de weg als een los punt te zien.

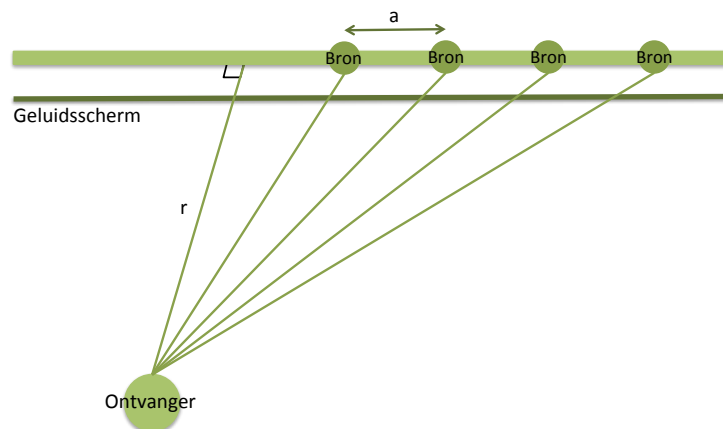
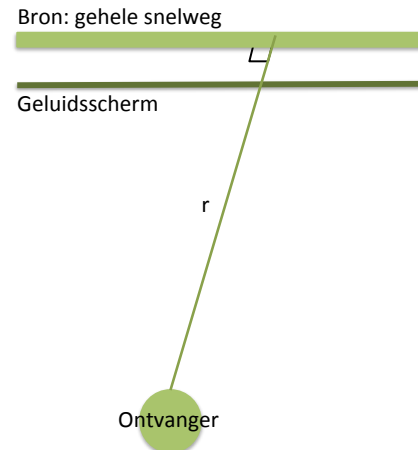
Wanneer er op een versimpelde manier gekeken wordt naar de weg als geluidsbron, worden niet de voertuigen los genomen, maar wordt van alle voertuigen een totale emissie van het geluidsniveau gebruikt.<sup>47</sup> Alle voertuigen samen worden dus gezien als één bron en er wordt ook geen onderscheid gemaakt tussen de verschillende geluidsniveaus die de voertuigen produceren. Het verband tussen de afstand en het geluidsniveau wordt als volgt weergegeven in zo'n situatie:  $L = L_M - 10 \log(r) - 8$ .<sup>48</sup> Daarin is  $L$  het geluidsniveau bij de ontvanger en  $r$  de loodrechte afstand tussen de bron en de ontvanger (zie de afbeelding rechts).

Als de voertuigen niet als één geheel worden gezien, maar als zelfstandige (bewegende) punten die het daadwerkelijk zijn, verandert de formule. De geluidsemissie van de voertuigen is namelijk onafhankelijk en er heerst een bepaalde afstand tussen de voertuigen. In de formule is dat als volgt weergegeven:  $L = L_M - 10 \log(a) - 10 \log(r) - 6$ .<sup>49</sup> Daarin is  $a$  de

afstand tussen twee voertuigen

(zie afbeelding rechts). De gemiddelde afstand  $a$  kan beschreven worden volgens:

$a = 1000 \frac{v}{N}$ , waarin  $v$  de snelheid in km/h is en  $N$  het gemiddelde aantal auto's dat per uur passeert langs een willekeurig meetpunt langs de lijnbron.



## DiffRACTIE tegen gaan

Om te zorgen dat er zo min mogelijk geluid bij de ontvanger terechtkomt, moet de afstand tussen de bron en de ontvanger door het scherm gemaximaliseerd worden. Die afstand wordt met name bepaald door de diffractie. Door het inperken van de diffractie, zal het geluid een langere weg af moeten leggen. Aangezien geluidsdiffractie plaats vindt bij de top van het geluidsscherm, omdat dat de plek is waar het geluid omheen kan buigen, moet het dus ook daar tegen gegaan worden. Er bestaan twee verschillende manieren om geluidsdiffractie tegen te gaan, die gemeenschappelijk hebben dat ze allebei een extra obstakel creëren voor het geluid en zo de diffractie verminderen.<sup>50 51</sup>

## 1. Schermopzetstuk

De eerste oplossing is het verkleinen van de afstand tussen de bron van het geluid en de diffractierand door middel van een zogeheten schermtop. De schermtop, ook wel T-top genoemd, is een horizontaal opzetstuk op een verticaal scherm (zie de afbeelding rechts). Wat de T-top effectief maakt, is dat ze de afstand tussen de bron en de ontvanger vergroot, zoals te zien is in de afbeelding hier rechtsonder.<sup>52</sup>

Bij deze afbeelding is de lengte van de totale geluidswand telkens hetzelfde genomen evenals de afstand tussen de bron, geluidsscherm en ontvanger en de lengte van de T-top panelen zijn willekeurig genomen.

In werkelijkheid wordt de paneellengte voor de T-top natuurlijk niet willekeurig genomen. Uit onderzoek is naar voren gekomen dat de T-top optimaal werkt,

wanneer de lengte van het paneel aan allebei de kanten gelijk is aan de golflengte van de geluidsgolf die tegengehouden dient worden.<sup>53</sup>

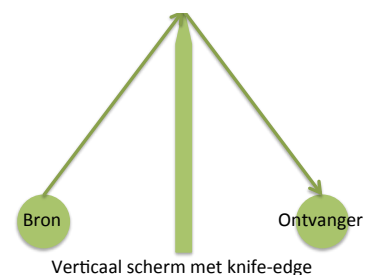
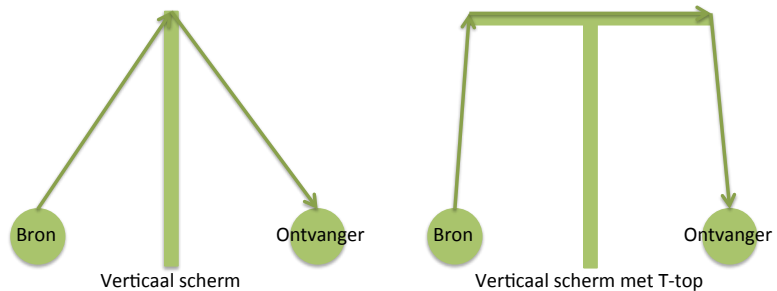
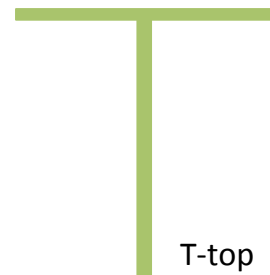
Een T-top op een geluidsscherm plaatsen, draagt significant bij aan geluidsvermindering en is dus wenselijk om in te zetten. Wil de T-top echter optimaal werken voor LFg, dan zou deze zeer lang moeten zijn, omdat de golflengte van LFg heel groot is. Dat is terug te zien in de volgende voorbeeldsom: Het verband tussen de frequentie van een golf en zijn golflengte is:  $\lambda = \frac{v}{f}$ . Daaruit volgt dat LFg (met een frequentie tussen de 50 en 125 Hz) bij de gebruikelijke geluidssnelheid van 343 m/s een lengte heeft van maximaal:  $\lambda = \frac{343}{50} = 6,86$  meter en een minimale lengte heeft van:  $\lambda = \frac{343}{125} = 2,74$  meter.

Een T-top zou dus, om het gehele laagfrequente spectrum te willen dekken, bijna zeven meter lang moeten zijn. Zo'n lengte is echter niet haalbaar, in verband met de veiligheidsregels opgesteld door Rijkswaterstaat.

## 2. Randvorm

Ook de vorm van de rand van het geluidsscherm zelf beïnvloedt de mate van diffractie. Zo zorgt een ronde, glooiende bovenkant van een geluidsscherm ervoor dat de geluidsgolven makkelijker om het scherm heen buigen dan een meer hoekige top.<sup>54</sup> Daarom is er ook geëxperimenteerd met een zogeheten knife-edged-scherm.

Dit scherm heeft een zeer puntige top (zie de afbeelding rechts) en bemoeilijkt met name lage frequenties om over de top te buigen. De knife-edge zorgt voor een decibelreductie met een waarde tussen de 0,5 en 2 dB.



## 6.2 Testen

Bij het onderzoek naar de optimale geluidsschermvorm, worden er twee aparte delen onderscheiden. Het eerste gedeelte zal ingaan op de helling van verschillende vlakdelen van het geluidsscherm en het tweede gedeelte behandelt de effectiviteit van een T-top bij LFg.

### 6.2.1 Onderzoek helling onder- en bovenzvlak

#### 6.2.1.1 Onderzoeksvraag

Welke combinatie van naar binnen en naar buiten hellende vlakken zorgt voor een optimale geluidsreductie van LFg en hoogfrequent geluid bij de ontvanger van het geluid achter het scherm?

#### 6.2.1.2 Hypothese

Uit mijn vooronderzoek (zie bijlage 4) is gebleken dat een naar buiten hellend ondervlak en een naar binnen hellend bovenzvlak met een verticaal middenvlak de optimale geluidsschermvorm is om snelweggeluid zo veel mogelijk te reduceren (zie de afbeelding rechts). Ik verwacht dan ook, ondersteund door de theorie over de vorm, dat deze hellende vlakken zullen zorgen voor geluidsvermindering bij de ontvanger omdat:

- een hellende onderkant (zie de afbeelding rechts) namelijk tot effect zal hebben dat het geluid omhoog wordt gekaatst. Het komt dan via straalkromming op een verdere plek weer naar beneden. Het geluid zal bij het naar beneden gaan terecht kunnen komen bij de ontvanger, maar moet zo'n lange afstand afleggen dat het dusdanig verminderd zal zijn dat de ontvanger er geen last meer van ondervindt.
- een naar binnen hellende bovenkant van het scherm er voor zorgt dat het geluid deels langs deze helling gaat, maar voor een groot deel ook gereflecteerd wordt naar het wegdek. Het geluid wordt dan opgenomen door het wegdek of kaatst weer terug naar boven. In het laatste geval moet het geluid dan een lange afstand afleggen, waardoor het zijn energie en intensiteit verliest.



#### 6.2.1.3 Materialen

- Computer
- GeoMilieu (computerprogramma)



#### 6.2.1.4 Methode

Voor het bepalen van de optimale combinatie tussen naar binnen en naar buiten hellende panelen, heb ik een model gemaakt in het programma GeoMilieu. Het computerprogramma GeoMilieu is een wizard (om te coderen hoef je geen coderingstekst in te voeren, maar kun je met behulp van blokjes en pijlen een model maken) en maakt bij zijn berekeningen gebruik van de volgende formule:  $L_{eq,i,j,n,m} = L_E + \Delta L_{GU} - \Delta L_L + \Delta L_B - C_M - \Delta L_{SW} - \Delta L_R - 58,6$ .<sup>55</sup> Hierin betekenen de variabelen het volgende (zie voor een complete uitwerking van de definities bijlage 5):

- $L_{eq,i,j,n,m}$  is het geluidsniveau bij de ontvanger achter het scherm;
- $L_E$  is de emissie-term;
- $\Delta L_{GU}$  is de geometrische uitbreidingsterm;
- $\Delta L_L$  is de luchtdemping;
- $\Delta L_B$  is de bodemdemping;
- $C_M$  is de meteocorrectie-term;
- $\Delta L_{SW}$  is de schermwerking;
- $\Delta L_R$  is de niveaureductie ten gevolge van reflecties.

Bij het maken van het model in GeoMilieu heb ik gebruikt gemaakt van een casus opgesteld door TNO. Daaruit heb ik de volgende gegevens gehaald en ingevoerd in GeoMilieu:

- Een tweebaansweg en een vluchtstrook, twee kanten op;
- 2-laags zoab voor het wegdek;
- Voor overdag: 3.000 lichte voertuigen (gemiddelde snelheid 115 km/h), 150 middelzware voertuigen (gemiddelde snelheid 85 km/h) en 200 zware voertuigen (85 km/h) per uur langs een willekeurig meetpunt langs de desbetreffende weg;
- Voor 's avonds: 2.000 lichte voertuigen (gemiddelde snelheid 115 km/h), 50 middelzware voertuigen (gemiddelde snelheid 85 km/h) en 100 zware voertuigen (85 km/h) per uur langs een willekeurig meetpunt langs de desbetreffende weg;
- Voor 's nachts: 250 lichte voertuigen (gemiddelde snelheid 115 km/h), 25 middelzware voertuigen (gemiddelde snelheid 85 km/h) en 50 zware voertuigen (85 km/h) per uur langs een willekeurig meetpunt langs de desbetreffende weg;
- Een berm van 0,75 meter en op een afstand van de weg met 2 meter;
- Een wegdekhelling van 0,03% en
- Een geluidsscherm van houtvezelbeton.

Ik plaatste een aantal meetpunten in het model achter het geluidsscherm, met verschillende afstanden tot de weg (70, 80, 90 en 100 meter). Daarnaast plaatste ik ook meetpunten op verschillende hoogtes (op de grond, één meter hoog, twee meter hoog, drie meter hoog, vier meter hoog en vijf meter hoog).

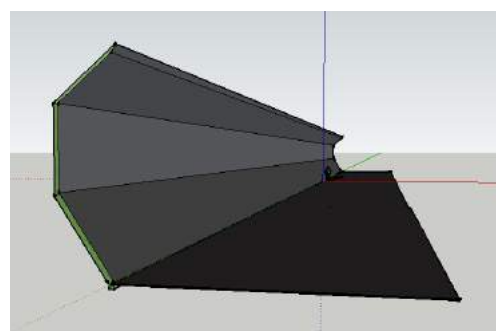
### 6.2.1.5 Resultaten

In de tabel hieronder is de gemiddelde geluidssterkte in dB weergegeven die achter het scherm gemeten is op de verschillende hoogtes en afstanden (zie voor een uitgebreidere versie van de resultaten bijlage 6).

Schermvorm	Geluidssterkte achter scherm in dB
Geen scherm (nul-meting)	55,89
Alle panelen recht	53,66
Alle panelen naar binnen	50,50
Alle panelen naar buiten	51,49
Onder naar binnen, midden recht, boven recht	49,58
Onder naar binnen, midden binnen, boven recht	50,58
Onder naar binnen, midden recht, boven naar binnen	49,60
Onder recht, midden recht, boven naar binnen	49,00
Onder recht, midden naar binnen, boven recht	47,40
Onder naar buiten, midden recht, boven recht	52,50
Onder naar buiten, midden buiten, boven recht	51,56
Onder naar buiten, midden recht, boven buiten	50,46
Onder recht, midden buiten, boven recht	51,85
Onder recht, midden buiten, boven buiten	52,10
Onder recht, midden binnen, boven buiten	46,67
Onder recht, midden buiten, boven binnen	45,12
Onder binnen, midden recht, boven buiten	41,19
Onder binnen, midden buiten, boven recht	41,78
Onder buiten, midden recht, boven binnen	39,86
Onder buiten, midden binnen, boven recht	41,62
Onder binnen, midden buiten, boven binnen	40,58
Onder binnen, midden binnen, boven buiten	40,72
Onder buiten, midden binnen, boven buiten	41,56
Onder buiten, midden buiten, boven binnen	40,48

### 6.2.1.6 Conclusie

Uit bovenstaande resultaten komt naar voren dat een scherm met een ondervlak dat naar buiten helt, een middenvlak dat recht opstaat en een bovenzvlak dat naar binnen helt, het meeste geluid reduceert. Die vorm laat van de oorspronkelijke 55,89 dB maar 39,86 dB over, wat een reductie van 16,03 dB levert. Zie voor een illustratie van deze vorm de afbeelding rechts.



### 6.2.1.7 Discussie

Bij deze modelsituatie is de invloed van de wind niet meegenomen, terwijl uit in situ testen blijkt dat die juist een grote invloed heeft op de effectiviteit van de vorm. Daarom kan het zijn dat deze vorm niet de meest geluidsreducerende vorm is als er winddraaiingen worden meegenomen in het testen.

Daarnaast is in dit model houtvezelbeton gebruikt als materiaal voor de vorm. Uit de materiaaltest (zie paragraaf 5.1.7) blijkt echter dat het effectiever is om een geluidsscherm te maken van zowel rubbergranulaat als houtvezelbeton. Het rubbergranulaat kon echter niet meegenomen worden in GeoMilieu, omdat het programma niet voorziet in het rekenen met dit materiaal. Het rubbergranulaat zal zeker een effect hebben op hoe het geluid zich zal gedragen in de vorm, met name op de reflecties op het onderste en bovenste paneel. Dit kan eventueel nog in vervolgonderzoek getest worden. Naar mijn verwachting zal de vorm er dan nog gunstiger uitkomen, omdat rubbergranulaat nog minder reflecteert en dus minder geluid naar de omgeving toe zal laten.

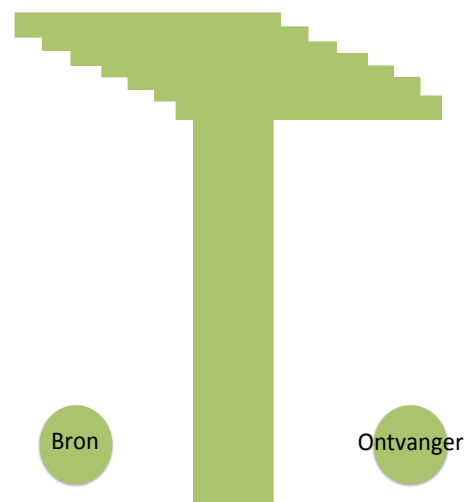
## 6.2.2 Onderzoek trapsgewijze T-top

### 6.2.2.1 Onderzoeksvraag

Zorgt het vergroten van de afstand tussen de geluidsbron en –ontvanger door middel van een trapsgewijze T-top voor geluidsvermindering bij de ontvanger van het LFg achter het scherm?

### 6.2.2.2 Hypothese

De horizontale lengte van een T-top kan niet verlengd worden in verband met de veiligheidsregelgeving, maar zou wel vergroot kunnen worden door het creëren van een ‘trapje’, zoals in de afbeelding rechts. Ik verwacht dat een T-top in deze stijl voor een nog grotere geluidsreductie zal zorgen bij de ontvanger in de schaduwzone, omdat door de traptreden in de top de afstand tussen de bron en de ontvanger nog groter wordt. Het geluid moet namelijk om elk afzonderlijk treetje buigen, wat veel energie kost. Elke keer dat het geluid moet afbuigen om de treetjes, zal er diffractie optreden en zal het geluid niet meer rechtstreeks naar de ontvanger gaan, maar op elk punt diffuseren. Bij die diffusie splitst het geluid op in allerlei verschillende richtingen, wat ervoor zorgt dat de algehele geluidsintensiteit afneemt.



### 6.2.2.3 Methode

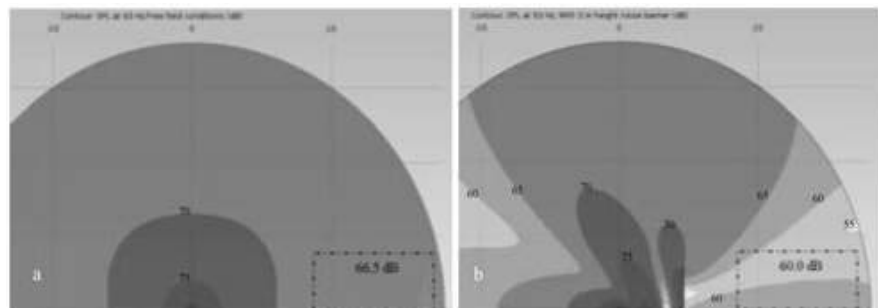
De effectiviteit van de vorm van een geluidsscherm kan op twee manieren worden getest: door middel van een simulatie in een model of door een praktijktest in de werkelijkheid.

#### Modelsimulaties

Er kunnen twee soorten modellen worden onderscheiden: empirische en theoretische modellen. Voor het testen van een empirisch model wordt een casus genomen die zo goed mogelijk wordt nabootst. De hoeveelheid verkeer en de afstand tussen de weg en de ontvanger van het geluid: alles wordt gemeten, een gemiddelde van genomen en verwerkt in het model. Meestal worden naast de echte data ook de studie van Maekawa meegenomen, gebaseerd op het weglengteverschil en het Fresnelgetal.<sup>56</sup>

De basis van theoretische modellen ligt in het algemeen in numerieke oplossingen voor akoestische problemen, zoals limieten, integralen en parabolische vergelijkingen.

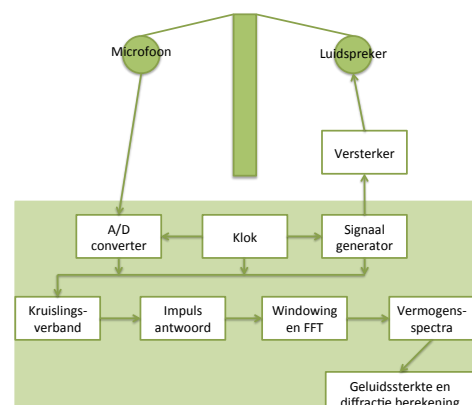
Meestal wordt er een Boundary Element Method (BEM) gebruikt.<sup>57</sup> Met dit model kan vanaf elk mogelijk observatiepunt rondom het geluidsscherm berekend of voorspeld worden hoe hoog de geluidsterkte daar zal zijn. Voor de BEM worden alle gegevens van het ontwerp en een begrensde omgeving ingevoerd. Vervolgens wordt er vanaf een lineaire bron (die de snelweg symboliseert) geluid door de omgeving gediffundeerd. Er wordt daarna met behulp van partieel integreren de 'inhoud' van de begrensde omgeving berekend en dan kan het geluidsniveau, door het tekenen van geluidsisobaren, bepaald worden op elke afstand van het geluidsscherm.<sup>58</sup> In de afbeelding hierboven is te zien hoe met een BEM-model de invloed van een geluidsscherm is gesimuleerd. In a is er geen geluidsscherm en in b staat er wel een geluidsscherm: het effect op de omgeving is een reductie van 6,5 dB.<sup>59</sup>



#### Praktijktest

Een beperking van zowel empirische als theoretische modellen is dat de weersomstandigheden niet meegenomen worden, terwijl die grote invloed kunnen hebben op de resultaten.

Daarom is het nuttig om het geluidsscherm naar het ontwerp te bouwen en te testen. Het testen kan zowel in een nagalmkamer als langs een daadwerkelijke snelweg. Net zoals bij het testen van de materialen van een geluidsscherm wordt namelijk bij het testen van de vorm gebruik gemaakt van de geluidsreflecties.<sup>60</sup> De proefopstelling is schematisch weergegeven in de afbeelding hiernaast.<sup>61</sup> Het

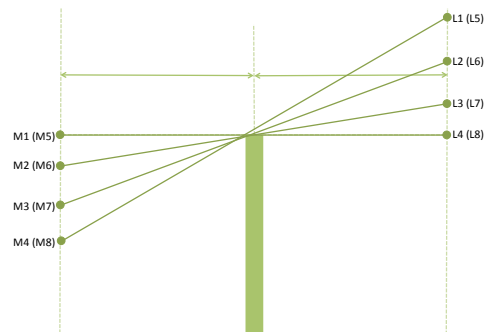


scherm, dat getest wordt, dient minstens vier meter hoog te zijn en 300 meter lang om te zorgen voor nauwkeurige resultaten. Een schaalmodel gebruiken is niet mogelijk, omdat dan de verhouding verandert met de golflengte van de frequenties die de bron uitzendt.

De testen van de vorm worden doorgaans gedaan volgens de Europese standaard: EN 1793-1 tot en met EN 1793-6. In de EN 1793-1 wordt beschreven hoe er in een laboratorium getest moet worden. Er wordt dan een geluidsscherm tussen twee nagalmkamers geplaatst en er wordt verder dezelfde opstelling gehanteerd als in de afbeelding rechtsboven. De laboratoriumopstelling kent enkele beperkingen. Zo wordt er ten eerste vanuit gegaan dat het geluid van de bron (de snelweg) sferisch diffuus is, maar in werkelijkheid spreidt het geluid zich lineair (zie theorie, paragraaf 6.1). Daarnaast is de omgeving van de geluidswand in werkelijkheid een open ruimte in plaats van een geslotene, zoals de nagalmkamer. Om die twee redenen zijn de resultaten van een laboratoriumtest niet helemaal representatief voor hoe het geluid zich in werkelijkheid gedraagt bij de schermvorm.

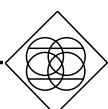
Naast de laboratoriumtesten kunnen ook in situ testen gedaan worden, oftewel testen in een werkelijke situatie. De Europese standaard voor het doen van in situ vormtesten, is de ADRIENNE-methode, die beschreven wordt in de EN 1793-2, EN 1793-3 en EN 1793-4.<sup>62</sup> De basis van de ADRIENNE-meetmethode voor geluidsreflecties zit als volgt in elkaar:

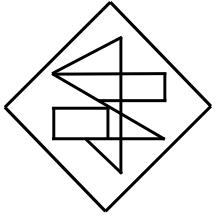
- Geluidsgolven worden door de luidspreker uitgezonden, gaan langs het geluidsscherm en buigen er overheen.
- Er worden vele (minimaal 50) metingen gedaan: de positie van de luidspreker verandert door deze hoger en lager te zetten en de microfoon (ook deze wordt op verschillende hoogtes gezet) meet dan telkens waar het geluid het meest intens terecht komt achter het scherm. Zie voor een illustratie van enkele van de meetpunten de afbeelding rechts. Aan de rechterkant wordt door L de luidsprekerpunten aangegeven en door M de microfoonpositie.
- Het geluidssignaal dat door de luidspreker wordt afgespeeld, is een speciaal soort geluid dat ervoor zorgt dat het achtergrondgeluid dat de microfoons oppikken weg gefilterd wordt.<sup>63</sup>



In situ testen hebben ten opzichte van laboratoriumtesten een aantal voordelen:

- Het verrichten van metingen in aanwezigheid van bestaand verkeersgeluid;
- Controle op de naleving van specificaties voor nieuwe geluidswanden;
- Periodiek testen, waardoor de effecten van veroudering van materialen gekwantificeerd kunnen worden.
- De kosten van in situ testen zijn lager dan van laboratoriumtesten.





# 7. CONCLUSIE

## 7. Conclusie

### Probleemanalyse en centrale vraag

Geluidsoverlast door wegverkeer neemt steeds meer toe en zal de komende jaren blijven groeien. De overlast is het gevolg van onder meer een toenemende bevolkingsdichtheid, voortgaande verstedelijking, economische groei en de daaruit voortvloeiende stijging van het aantal voertuigen op de weg.

Geluidsoverlast is een onderschat probleem. Geluidshinder zorgt voor verschillende problemen bij zowel mensen als dieren. Bij mensen kunnen er ernstige gezondheidsklachten optreden, zoals hoge bloeddruk, oorsuizen en hart- en vaatziekten. Verkeerslawaai kan zelfs dodelijk zijn. Verder blijkt dat het om grote aantallen mensen gaat, die last hebben van verkeerslawaai. Het RIVM heeft becijferd dat minimaal 20 miljoen volwassenen in Europa worden gehinderd door verkeerslawaai. Ten slotte blijkt dat de geluidsoverlast door verkeer de laatste jaren exponentieel is gestegen van 40 miljoen in 2002 naar 70 miljoen mensen in 2011.

Geluid is een hoorbaar luchtdrukverschil. Geluidshinder kan veroorzaakt worden door 'normaal geluid' (geluid zoals dat normaliter in de buitenlucht voorkomt) en door laagfrequent geluid (LFg). Het meest voorkomende 'gewone' geluid zit tussen de 125 en 8.000 Hz. Uit de frequentietest (zie paragraaf 4.5) blijkt, dat wat betreft de hoge tonen, het zware verkeer met name de frequentie van 1.250 Hz uitzendt, het middelzware verkeer de frequentie van 2.500 Hz en het lichte verkeer de frequentie van 5.000 Hz. Voor LFg wordt vaak als bovengrens een frequentie van 125 Hz gehanteerd. Uit de frequentietest (zie paragraaf 4.5) blijkt dat alleen het zware snelwegverkeer LFg produceert met frequenties van 51, 63, 82 en 124 Hz.

Geschat wordt dat zo'n 2,5% van de Nederlandse bevolking (dus zo'n 423.500 mensen) last heeft van LFg. LFg wordt gehoord als een brommende of zoemende toon, geeft een gevoel van druk, onder meer in de gehoorgang en op het hoofd en zorgt voor trillingen in buik, borst, armen en benen. LFg leidt tot grote gezondheidsproblemen, zoals hiervoor genoemd, maar ook tot duizeligheid, evenwichtsverlies en verschillende vibro-akoestische aandoeningen. LFg heeft iets ongrijpbaars, doordat mensen iets bemerken maar het niet in verband kunnen brengen met een zichtbare bron, zoals het wegverkeer.

De overlast door LFg zal de komende jaren toenemen als er geen passende maatregelen worden genomen. Dit komt doordat zowel het wegverkeer toeneemt als bestaande maatregelen tegen geluidsoverlast, zoals zoab-asfalt, geluidsschermen en betere motorisolatie, er onbedoeld voor zorgen dat de geluidsoverlast van snelwegen toeneemt. Deze maatregelen gaan namelijk vooral geluid met hogere frequenties tegen, waardoor LFg beter hoorbaar wordt. Dit blijkt uit een nog niet gepubliceerd RIVM-onderzoek.

De huidige maatregelen tegen geluidsoverlast zijn niet effectief om het gehele probleem van geluidsoverlast van snelwegverkeer op te lossen en zijn bovendien alleen gericht op het middelhoge en hoogfrequente geluid. Zo zijn ruimtelijke en verkeersmaatregelen vaak moeilijk of niet inzetbaar bij snelwegen, heeft een stillere motor geen effect wanneer de auto harder rijdt dan 40 km/h rijdt (wat per definitie het

geval is op een snelweg), verliest zoab heel snel zijn geluidsreducerend vermogen door slijtage en vervuiling, zijn bestaande geluidschermen niet effectief door de reflecterende materialen en naar buiten hellende vorm en tenslotte heeft isolatie van de ontvanger van het geluid (bijvoorbeeld een huis) geen effect op het laagfrequente geluid.

Daarom heb ik in dit onderzoek een aanzet gegeven tot een nieuw duurzaam ontwerp van een geluidsscherm voor zowel hoog- als laagfrequent geluid op snelwegen. Dit heb ik gedaan door de volgende centrale vraag trachten te beantwoorden: “Welke materialen en welke vorm van een geluidsscherm langs snelwegen reduceren zowel het laagfrequente als hoogfrequente geluid geproduceerd door weggebruikers optimaal?”

Het innovatieve van mijn geluidsscherm bestaat uit twee onderdelen: een combinatie van absorberende materialen, waardoor het scherm zowel hoog- als laagfrequent geluid absorbeert en een nieuwe vorm, waardoor het geluid niet in de omgeving van de snelweg komt, die daar hinder van zou kunnen ondervinden. Gelet op de vorm heb ik mijn geluidsscherm ‘De Wobbel’ genoemd.

## **Materialen**

Voor optimale geluidsreductie is het belangrijk om absorberende materialen te gebruiken. Isolerende of reflecterende materialen hebben namelijk als effect op de geluidsgolven dat deze makkelijker over de top van het geluidsscherm buigen en daardoor een hoger geluidsniveau bij de ontvanger van het geluid achterlaten. Dat is een onwenselijk effect.

Om te kunnen bepalen welk materiaal het hoogste absorberende vermogen heeft en dus het meest geschikt is voor geluidsreductie, heb ik diverse materialen (een aluminiumcassette, groencassette, houtvezelbeton, rubbergranulaat en PUR-schuim) in een nagalmkamer van de TU Delft getest. Daaruit blijkt uit paragraaf 5.1.7 dat houtvezelbeton als beste naar voren komt voor het hoogfrequente geluidsspectrum en rubbergranulaat voor het LFg. Momenteel worden voor het absorptievermogen van geluidschermen vooral aluminiumcassettes, groencassettes en houtvezelbetonplaten gebruikt. Voor een te ontwerpen geluidsscherm dat zowel hoog- als laagfrequent geluid absorbeert, is het dus wenselijk om de materialen houtvezelbeton en rubbergranulaat te combineren.

Omdat rubbergranulaat tot nu toe niet gebruikt wordt voor geluidschermen, heb informatie gezocht over dit materiaal (zie paragraaf 5.2). Daaruit blijkt dat rubbergranulaat gemaakt wordt van gerecyclede autobanden of van synthetisch rubber. Rubbergranulaat heeft een groot aantal voordelen ten opzichte van andere dempende materialen: een grote vormvrijheid, de dempende werking blijft lang behouden, het is makkelijk aan te brengen en relatief erg goedkoop. Over het algemeen is rubbergranulaat wel milieubelastend. Ook houtvezelbeton, wat al langer gebruikt wordt in geluidschermen, kent diverse voordelen, waardoor het voor die toepassing geschikt is: een goede geluidsabsorptie en een grote ontwerprijheid. Zowel rubbergranulaat als houtvezelbeton kunnen duurzaam geproduceerd worden.



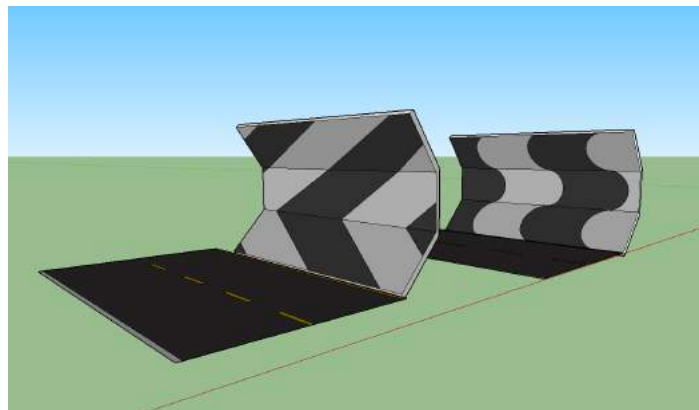
## Vorm

De effectiviteit van een geluidsschermvorm hangt af van de mate, waarin het geluidsscherm de afstand tussen de bron en de ontvanger van het geluid weet te vergroten. Die afstand wordt beïnvloed door de hoeveelheid diffractie (het afbuigen) van het geluid over de schermtop. De diffractie is met name hoog bij LFg en moet dus zoveel mogelijk voorkomen worden.

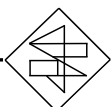
De vormgeving van mijn geluidsscherm heb ik slechts gedeeltelijk kunnen testen. Dit heb ik gedaan door middel van een modelsimulatie met het programma GeoMilieu bij TNO in Den Haag. Hieruit komt naar voren dat een naar buiten hellend ondervlak en een naar binnen hellend bovenzvlak, in combinatie met een verticaal middenvlak, zorgt voor een optimale geluidsreductie. Het geluid wordt namelijk door het ondervlak recht de lucht in gekaatst (waar het niemand tot last is) en het bovenzvlak zal het geluid naar het wegdek kaatsen, waardoor het niet in de omgeving van de snelweg terecht komt. De modelsimulatie heb ik verder onderbouwd met theorie. In aanvulling hierop heb ik een hypothese over de vorm van de top opgenomen, onderbouwd en mogelijke testmethodes uiteengezet. Mijn hypothese is dat diffractie beperkt kan worden door het plaatsen van een trapsgewijze T-top. De traptreden zullen er namelijk voor zorgen dat het geluid dusdanig vaak moet afbuigen voordat het de top bereikt, dat de geluidsenergie in kinetische energie wordt omgezet, daardoor in intensiteit sterk afneemt en niet meer goed kan diffracteren. Deze hypothese kan naar mijn idee het beste in situ getest worden, volgens de ADRIENNE-meetmethode. Deze testmethode geeft namelijk de meest realistische en nauwkeurige resultaten en voldoet aan de Europese standaard EN-1793.

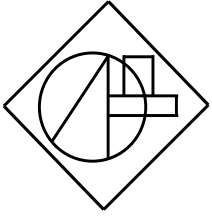
## Het geluidsscherm in zijn totaliteit

In een gesprek met A. Eisses, TNO, heb ik tot slot nog een hypothese op kunnen stellen over de totale geluidsreductie van mijn geluidsscherm. Eisses stelde dat de materialen van geluidsschermen doorgaans het totale geluid met vijf decibel verminderen en was van mening dat mijn materiaalcombinatie, het houtvezelbeton en rubbergranulaat, dat in ieder geval ook zouden doen. Uit de simulatie met het programma GeoMilieu bleek dat de vorm op zich al 16 decibel reduceert en wanneer de materiaalreductie daarbij opgeteld wordt komt er een totaal reductie van minstens 21 decibel. Die 21 decibel zal een doorbraak in geluidsreductie met geluidsschermen betekenen, want op dit moment reduceren geluidsschermen in Europa maximaal 20 decibel.



Voorbeeldontwerp Wobbel: materiaalpatroon en vorm





# 8. DISCUSSIE

## 8. Discussie

### Procesevaluatie

Het onderwerp van geluidsoverlast veroorzaakt door LFg en hoogfrequent geluid is zeer complex. De theorie achter het geluidsscherm (de absorptie en afstand/diffractie) is niet makkelijk. Dat komt met name doordat deze niet voortbouwt op natuurkundige kennis die ik al had, maar vaak volledig nieuw voor me was. Verder was de informatie zeer gefragmenteerd. Het heeft me daarom vrij veel tijd gekost de relevante kennis te verzamelen, te doorgronden en toe te passen. Al heb ik wel het gevoel dat dit gelukt is. Achteraf gezien was het wellicht verstandig geweest niet zo zelfstandig te werken als dat ik nu gedaan heb. Zo had ik meer hulp kunnen vragen aan mijn profielwerkstukbegeleider Jaap Teule. Hij had mij misschien kunnen voorzien van theorie rondom geluid en andere relevante bronnen.

### Suggesties voor vervolgonderzoek

Mijn onderzoek in het kader van het tijdsbestek van een te schrijven profielwerkstuk kan niet meer zijn dan een aanzet tot het verbeteren van geluidsschermen langs snelwegen. Omdat ik graag zou willen dat dit onderzoek wordt voortgezet en verder gebracht, doe ik diverse suggesties voor vervolgonderzoek naar de materialen en vorm van een te ontwerpen geluidsscherm.

### Materialen

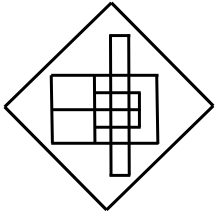
- Welke dichtheid moet een rubbergranulaatplaat hebben voor de hoogste absorptiecoëfficiënt in het LFg-spectrum?
- Welke dikte van de rubbergranulaatplaat zorgt voor een optimale geluidsreductie?
- In welke verhouding werken rubbergranulaat en houtvezelbeton in het geluidsschermontwerp optimaal samen voor een zo groot mogelijke geluidsreductie?
- Wat is de levensduur van rubbergranulaatplaten en hoe kan die eventueel verlengd worden?
- Hoe weerbestendig is een rubbergranulaatplaat en hoe kan dat eventueel vergroot worden?
- Beïnvloedt reliëf op het materiaal de reductie van het LFg positief? Zo ja, welk reliëf zorgt voor een maximale reductie?

### Vorm

- Hoe moeten de hoeken tussen de panelen zijn voor een gunstig reflecterend effect?
- Welke afmetingen (dikte/hogte) van het scherm zorgen voor een maximale geluidsreductie bij de ontvanger van het snelweggeluid?
- Hoeveel traptreden moet een trapsgewijze T-top hebben voor minimale diffractie om de geluidsschermtop?

- Wat zijn de optimale afmetingen van een trapsgewijze T-top voor minimale diffractie om de schermtop?
- Wat is de invloed van de wind op beweging van de geluidsgolven geproduceerd door het snelwegverkeer rondom het geluidsscherm?
  - In welke zin heeft de wind invloed op de richting van de reflecties veroorzaakt door de hellende panelen?
  - Hoe beïnvloedt de wind de mate van diffractie om de schermtop?





# 9. Noten

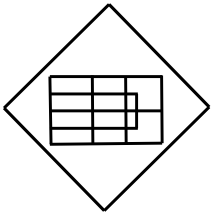
## 9. Noten

1. <http://www.sevendays.nl/inespo>
2. <http://openlab.web.cern.ch/sites/openlab.web.cern.ch/files/press-coverage/Y/M/Intel%20ISEF%202016%20Special%20Awards%20Ceremony.pdf>  
<http://acousticalsociety.org/article/report-asa-participation-67th-international-science-and-engineering-fair-isef-phoenix-az-may>
3. <http://www.rivm.nl/Onderwerpen/G/Geluid>
4. <https://www.volksgezondheidenzorg.info/onderwerp/fysieke-omgeving/cijfers-context/overzicht>
5. [http://www.euro.who.int/\\_\\_data/assets/pdf\\_file/0008/136466/e94888.pdf](http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0008/136466/e94888.pdf)
6. <http://www.rivm.nl/dsresource?objectid=9d31cd9f-abc5-4f88-9047-f9f132e4c065&type=org&disposition=inline>
7. [http://www.ademloos.be/sites/default/files/gezondheid\\_docs/literatuurstudie\\_naar\\_de\\_relatie\\_wegverkeerslawaa\\_i\\_versus\\_gezondheid\\_en\\_leefbaarheid.pdf](http://www.ademloos.be/sites/default/files/gezondheid_docs/literatuurstudie_naar_de_relatie_wegverkeerslawaa_i_versus_gezondheid_en_leefbaarheid.pdf)
8. <https://laagfrequentgeluid.nl/html/informatie/info.html>; RIVM (2014), Health implication of road, railway and aircraft noise in the European Union:
9. [https://www.laagfrequentgeluid.nl/download/VAD\\_alves\\_pereira\\_011211.pdf](https://www.laagfrequentgeluid.nl/download/VAD_alves_pereira_011211.pdf)
10. [https://laagfrequentgeluid.nl/download/2013\\_03\\_OudM\\_tijdschrGeluid.pdf](https://laagfrequentgeluid.nl/download/2013_03_OudM_tijdschrGeluid.pdf)
11. <http://rivm.nl/dsresource?objectid=50e5cd0f-3de8-40ca-b3e5-7b31dbfaa93b>
12. <http://www.noiseandhealth.org/article.asp?issn=1463-1741;year=1999;volume=1;issue=3;spage=45;epage=56;aulast=Guski;>
13. <http://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/noise/data-and-statistics>
14. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S014067361361613X>
15. <https://laagfrequentgeluid.nl/html/informatie/info.html>; <https://demonitor.kro-ncrv.nl/artikelen/vormt-hinder-door-laagfrequent-geluid-ee-n-groeiend-milieu-probleem>
16. <http://www.rivm.nl/dsresource?objectid=a29546b7-20bd-4c52-9ccc-334ff62a997b&type=org&disposition=inline>
17. <http://www.stille-autobanden.com>
18. <https://www.rijkswaterstaat.nl/wegen/wegbeheer/aanleg-wegen/zoab.aspx>
19. <https://www.cobouw.nl/bouwbreed/nieuws/2006/11/dubbellaags-zoab-op-a10-niet-meer-stil-101214671>
20. [http://www.euro.who.int/\\_\\_data/assets/pdf\\_file/0008/136466/e94888.pdf](http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0008/136466/e94888.pdf)
21. RIVM-onderzoek uitgevoerd door geluidsdeskundige Theo Campmans van bureau LBP|SIGHT. Zie ook: <https://demonitor.kro-ncrv.nl/artikelen/rapport-rivm-snelweg-dreunt-2-keer-zo-hard-als-30-jaar-geleden>
22. <https://www.rijkswaterstaat.nl/zakelijk/innovatie-en-duurzame-leefomgeving/duurzame-leefomgeving/circulaire-economie/index.aspx>
23. [https://www.wegenwiki.nl/Gemotoriseerd\\_verkeer](https://www.wegenwiki.nl/Gemotoriseerd_verkeer)
24. <https://www.sonus.nl/dutch/begrippen/toelichtingen/absorptie.html>
25. [https://www.spoorbeeld.nl/sites/default/files/issuu/SPO\\_GELUIDSSCHERM\\_DEF\\_PRINT2\\_0.pdf](https://www.spoorbeeld.nl/sites/default/files/issuu/SPO_GELUIDSSCHERM_DEF_PRINT2_0.pdf)  
<http://asa.scitation.org/doi/abs/10.1121/1.381983>

26. <http://www.troldtekt.com/Product-properties/Good-acoustics/Acoustics-for-advanced/Reverberation-and-absorption>
27. [http://bk.nijsnet.com/0206016\\_TH06\\_MetenAbsorptie.aspx](http://bk.nijsnet.com/0206016_TH06_MetenAbsorptie.aspx)
28. [http://bk.nijsnet.com/0206016\\_TH06\\_MetenAbsorptie.aspx](http://bk.nijsnet.com/0206016_TH06_MetenAbsorptie.aspx)
29. <https://www.natuurkunde.nl/artikelen/2926/nagalmtijd>
30. [http://homepage.tudelft.nl/x4x4j/saddbtreports/0910nj/Akoestisch\\_beton\\_Kevin\\_van\\_der\\_Weijden.pdf](http://homepage.tudelft.nl/x4x4j/saddbtreports/0910nj/Akoestisch_beton_Kevin_van_der_Weijden.pdf)
31. <http://www.rubbervloer.be/cmsmedia/Kristof/bouw/trillingsisolatie.pdf>
32. <https://duofor.eu/nl/producten/dts-geluidsisolatiestroken/eigenschappen>
33. [https://www.researchgate.net/publication/283666661\\_A\\_Concept\\_for\\_Using\\_Recycled\\_Rubber\\_Granules\\_in\\_Noise\\_Reduction\\_Concrete%27s\\_Panels](https://www.researchgate.net/publication/283666661_A_Concept_for_Using_Recycled_Rubber_Granules_in_Noise_Reduction_Concrete%27s_Panels)
34. <https://www.degruyter.com/downloadpdf/j/rjti.2014.3.issue-1/rjti-2015-0019/rjti-2015-0019.pdf>
35. <http://www.rivm.nl/dsresource?objectid=43ac34f7-7b21-415a-8ea0-b3b5fd1add08&type=pdf&disposition=inline>
36. [https://www.sfu.ca/sonic-studio/handbook/Sound\\_Propagation.html](https://www.sfu.ca/sonic-studio/handbook/Sound_Propagation.html)
37. <https://www.cis.rit.edu/class/simg303/Notes/Ch7-PropagationofWaves.pdf>
38. <http://inase.org/library/2014/santorini/bypaper/SYSTEMS/SYSTEMS2-11.pdf>
39. [https://www.fhwa.dot.gov/Environment/noise/noise\\_barriers/design\\_construction/design/design03.cfm](https://www.fhwa.dot.gov/Environment/noise/noise_barriers/design_construction/design/design03.cfm)
40. [http://ijiset.com/vol3/v3s7/IJISSET\\_V3\\_I7\\_24.pdf](http://ijiset.com/vol3/v3s7/IJISSET_V3_I7_24.pdf)
41. <https://www.wsdot.wa.gov/research/reports/fullreports/024.1.pdf>
42. [http://www.daaam.info/Downloads/Pdfs/science\\_books\\_pdfs/2015/Sc\\_Book\\_2015-016.pdf](http://www.daaam.info/Downloads/Pdfs/science_books_pdfs/2015/Sc_Book_2015-016.pdf)
43. <http://przyrbwn.icm.edu.pl/APP/PDF/119/a119z6Ap29.pdf>
44. <https://www.physics.byu.edu/faculty/berrondo/wt642/diffraction.pdf>
45. [https://www.colorado.edu/physics/phys4510/phys4510\\_fa05/Chapter7.pdf](https://www.colorado.edu/physics/phys4510/phys4510_fa05/Chapter7.pdf)
46. [http://phys.uni-sofia.bg/~svetivanov/seminars/Seminari/diffraction%20-%20part%202/Diffraction-part\\_2-7Feb2016.pdf](http://phys.uni-sofia.bg/~svetivanov/seminars/Seminari/diffraction%20-%20part%202/Diffraction-part_2-7Feb2016.pdf)
47. <http://slideplayer.com/slide/601644/>
48. [https://www.google.nl/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=5&ved=0ahUKEwjEoZC-puTYAhUKOsAKHYldBqIQFghKMAO&url=http%3A%2F%2Fpcfarina.eng.unipr.it%2FPublic%2FAcoustics-Course%2FDOC-2012%2F08\\_ghiacci\\_222030.doc&usg=AOvVaw0ebT0mBQJIPhWzPZN6Xj-t](https://www.google.nl/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=5&ved=0ahUKEwjEoZC-puTYAhUKOsAKHYldBqIQFghKMAO&url=http%3A%2F%2Fpcfarina.eng.unipr.it%2FPublic%2FAcoustics-Course%2FDOC-2012%2F08_ghiacci_222030.doc&usg=AOvVaw0ebT0mBQJIPhWzPZN6Xj-t)
49. <https://www.cisco.com/c/en/us/support/docs/optical/synchronous-digital-hierarchy-sdh/29000-db-29000.html>
50. <https://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?referer=https://www.google.nl/&httpsredir=1&article=1674&context=jtrp>
51. Kennisdocument van het Kenniscentrum Spoorgeluid: Geluidbeperkende constructies langs spoorwegen 2009, de Vos, P. 2 maart 2009, documentnummer: IM/VMJB/750605
52. Vooronderzoek 'effect van hellende en absorberende schermen op grotere afstanden', Eisses, A. (TNO), 17 december 1992

53. [http://www.vejdirektoratet.dk/DA/viden\\_og\\_data/publikationer/Lists/Publikationer/Attachments/499/rapport%20194\\_web.pdf](http://www.vejdirektoratet.dk/DA/viden_og_data/publikationer/Lists/Publikationer/Attachments/499/rapport%20194_web.pdf)
54. <https://zoek.officielebekendmakingen.nl/stcrt-2012-11810.html>
55. <https://dgmr.nl/uploads/files/Een%20technische%20beoordeling%20van%20de%20effectiviteit%20van%20geluidsschermen.pdf>
56. [http://www.personal.reading.ac.uk/~sms03snc/fe\\_bem\\_notes\\_sncw.pdf](http://www.personal.reading.ac.uk/~sms03snc/fe_bem_notes_sncw.pdf)
57. [http://www.vejdirektoratet.dk/DA/viden\\_og\\_data/publikationer/Lists/Publikationer/Attachments/499/rapport%20194\\_web.pdf](http://www.vejdirektoratet.dk/DA/viden_og_data/publikationer/Lists/Publikationer/Attachments/499/rapport%20194_web.pdf)
58. <https://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?referer=https://www.google.nl/&httpsredir=1&article=1674&context=jtrp>
59. <http://pub.dega-akustik.de/IN2016/data/articles/000917.pdf>
60. <http://przyrbwn.icm.edu.pl/APP/PDF/119/a119z6Ap29.pdf>
61. [http://file.scirp.org/Html/4-1610065\\_33438.htm#txtF2](http://file.scirp.org/Html/4-1610065_33438.htm#txtF2)
62. <https://www.nzta.govt.nz/assets/Highways-Information-Portal/Technical-disciplines/Noise-and-vibration/Barrier/Case-studies/NZTA-Noise-Barrier-Case-Study-11-performance-testing-v1.0.pdf>





# 10. Literatuurlijst

## 10. Literatuurlijst

- Agentschap NL en CROW in opdracht van het ministerie van Infrastructuur en Milieu (2012). Literatuurstudie naar de relatie wegverkeerslawaaï versus gezondheid en leefbaarheid, uitgevoerd in opdracht van het programma Stiller op Weg, 12 april 2012. [Elektronische versie verkregen op 1 februari 2018 van <http://www.rivm.nl/dsresource?objectid=9d31cd9f-abc5-4f88-9047-f9f132e4c065&type=org&disposition=inline>]
- Ahac, S., Haladin, I., Lakušić, S., Dragčević, V. (2014). Croatia experience in road traffic noise management – concrete noise barriers. Romanian journal of transport infrastructure, Volume 3, no. 1, 1 – 11.d [Elektronische versie verkregen op 1 februari 2018 van <https://www.degruyter.com/downloadpdf/j/rjti.2014.3.issue-1/rjti-2015-0019/rjti-2015-0019.pdf>]
- Alves-Pereira, M. (2011). Vibroacoustic disease: Reality vs. Conceit, symposium over laagfrequent geluid van 1 december 2011 [Elektronische versie verkregen op 1 februari 2018 van [https://www.laagfrequentgeluid.nl/download/VAD\\_alves\\_pereira\\_011211.pdf](https://www.laagfrequentgeluid.nl/download/VAD_alves_pereira_011211.pdf)].
- Basner, M., Babisch, W., Davis, A., Brink, M., Clark, C., Janssen, S., Stansfeld, S. (2014). Auditory and non-auditory effects of noise on health. The Lancet, Volume 383, Issue 9925, 12 – 18 April 2014, 1325 – 1332. [Elektronische versie verkregen op 1 februari 2018 van <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S014067361361613X>]
- Brouwers, R., Royal HaskoningDHV (2016). Handboek geluidsschermen: visie, kaders en uitgangspunten voor geluidsschermen langs het spoor. Uitgave van ProRail in samenwerking met Bureau Spoorbouwmeester. [Elektronische versie verkregen op 1 februari 2018 van [https://www.spoorbeeld.nl/sites/default/files/issuu/SPO\\_GELUIDSSCHERM\\_DEF\\_PRINT2\\_0.pdf](https://www.spoorbeeld.nl/sites/default/files/issuu/SPO_GELUIDSSCHERM_DEF_PRINT2_0.pdf)]
- Cantrell, C.D. (1997). Fresnel – Kirchhoff diffraction theory. The University of Texas at Dallas, Erik Jonsson School PhoTEC. [Elektronische versie verkregen op 1 februari 2018 van <https://www.physics.byu.edu/faculty/berrondo/wt642/diffraction.pdf>]
- Chandler-Wilde, S., and Langdon, S. (2007). Boundary element methods for acoustics. University of Reading, Department of Mathematics, lecture notes. [Elektronische versie verkregen op 1 februari 2018 van [http://www.personal.reading.ac.uk/~sms03snc/fe\\_bem\\_notes\\_sncw.pdf](http://www.personal.reading.ac.uk/~sms03snc/fe_bem_notes_sncw.pdf)]
- Cisco. Introduction to Optical Fibers, dB, Attenuation and Measurements. [Elektronische versie verkregen op 1 februari 2018 van <https://www.cisco.com/c/en/us/support/docs/optical/synchronous-digital-hierarchy-sdh/29000-db-29000.html>]

Cobouw (2006). Dubbellaags zoab op A10 niet meer stil. [Elektronische versie verkregen op 1 februari 2018 van <https://www.cobouw.nl/bouwbreed/nieuws/2006/11/dubbellaags-zoab-op-a10-niet-meer-stil-101214671>]

Covatariu, D., Mihai, B., Rareş-George, T., (2014). A Concept for Using Recycled Rubber Granules in Noise Reduction Concrete's Panels. Bulletin of the Transilvania University of Brasov, Volume 7 (56), Special Issue no. 1, 249 – 254. [Elektronische versie verkregen op 1 februari 2018 van [https://www.researchgate.net/publication/283666661\\_A\\_Concept\\_for\\_Using\\_Recycled\\_Rubber\\_Granules\\_in\\_Noise\\_Reduction\\_Concrete%27s\\_Panels](https://www.researchgate.net/publication/283666661_A_Concept_for_Using_Recycled_Rubber_Granules_in_Noise_Reduction_Concrete%27s_Panels)]

Den Boer, L. (2015). Uitvindingsprijs voor Marie-Anne (15) en Céline (16). *7Days*, 5 juni 2015. [Elektronische versie verkregen op 1 februari 2018 van <http://www.sevendays.nl/inespo>]

Dowell, E.H. (1998). Reverberation time, absorption, and impedance. The Journal of the Acoustical Society of America, Volume 64, Issue 1, 10.1121/1.381983. [Elektronische versie verkregen op 1 februari 2018 van <http://asa.scitation.org/doi/abs/10.1121/1.381983>]

Duofor. DTS-G geluidsisolatiestroken. [Elektronische versie verkregen op 1 februari 2018 van <https://duofor.eu/nl/producten/dts-geluidsisolatiestroken/eigenschappen>]

Eisses, A. (TNO) (1992). Vooronderzoek 'effect van hellende en absorberende schermen op grotere afstanden'.

Flexidal Rubber. Trillingsisolatie. [Elektronische versie verkregen op 1 februari 2018 van <http://www.rubbervloer.be/cmsmedia/Kristof/bouw/trillingsisolatie.pdf>]

Foss, R.N. (1975). Noise barrier screen measurements. Research project: "Single barriers" for Washington State Highway commission. Program report 24.1. [Elektronische versie verkregen op 1 februari 2018 van <https://www.wsdot.wa.gov/research/reports/fullreports/024.1.pdf>]

Ghiacci, A. (2012). Excess attenuation: barriers. University of Bologna, lecture notes. [Elektronische versie verkregen op 1 februari 2018 van [https://www.google.nl/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=5&ved=0ahUKEwjEoZC-puTYAhUKOsAKHYldBqIOFghKMAO&url=http%3A%2F%2Fpcfarina.eng.unipr.it%2FPublic%2FAcoustics-Course%2FDOC-2012%2F08\\_ghiacci\\_222030.doc&usg=AOvVaw0ebT0mBQJPhWzPZN6Xj-t](https://www.google.nl/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=5&ved=0ahUKEwjEoZC-puTYAhUKOsAKHYldBqIOFghKMAO&url=http%3A%2F%2Fpcfarina.eng.unipr.it%2FPublic%2FAcoustics-Course%2FDOC-2012%2F08_ghiacci_222030.doc&usg=AOvVaw0ebT0mBQJPhWzPZN6Xj-t)]

Guarnaccia, C., Quartieri, J., Mastorakis, N.E., (2014). Comparison of acoustic barriers noise reductions evaluated by different calculation methods. Latest Trends on Systems - Volume II, Institute for Natural Sciences and Engineering. [Elektronische versie verkregen op 1 februari 2018 van

<http://inase.org/library/2014/santorini/bypaper/SYSTEMS/SYSTEMS2-11.pdf>]

Guenther, R.D. (1990), Modern Optics, Chapter 7: Diffraction, 106 – 120. [Elektronische versie verkregen op 1 februari 2018 van

[https://www.colorado.edu/physics/phys4510/phys4510\\_fa05/Chapter7.pdf](https://www.colorado.edu/physics/phys4510/phys4510_fa05/Chapter7.pdf)]

Guidorzi, P., Garai, M. (2013). Advancements in sound reflection and airborne sound insulation measurement on noise barriers. Open Journal of Acoustics, Volume 3, No. 2A, Article ID 33438. [Elektronische versie verkregen op 1 februari 2018 van

[http://file.scirp.org/Html/4-1610065\\_33438.htm#txtF2](http://file.scirp.org/Html/4-1610065_33438.htm#txtF2)]

Guski, R. (1999) Personal and social variables as co-determinants of noise annoyance. Noise & Health, Volume 1, Issue 3, 45 – 56. [Elektronische versie verkregen op 1

februari 2018 van <http://www.noiseandhealth.org/article.asp?issn=1463-1741;year=1999;volume=1;issue=3;spage=45;epage=56;aulast=Guski>]

Ivanov, S.S. (2016). Elements of diffraction theory – part II, 1 – 14. Seminar St. Kliment Ohridski University of Sofia. [Elektronische versie verkregen op 1 februari 2018 van op 1

februari 2018 van [http://phys.uni-sofia.bg/~svetivanov/seminars/Seminari/diffraction%20-%20part%202/Diffraction-part\\_2-7Feb2016.pdf](http://phys.uni-sofia.bg/~svetivanov/seminars/Seminari/diffraction%20-%20part%202/Diffraction-part_2-7Feb2016.pdf)]

Jumaily, H.M. Al (July 2016). The effect of design efficiency of the wall barrier (screen) on traffic noise attenuation. IJSET - International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology, Vol. 3 Issue 7. [Elektronische versie verkregen op 1 februari

2018 van [http://ijiset.com/vol3/v3s7/IJSET\\_V3\\_I7\\_24.pdf](http://ijiset.com/vol3/v3s7/IJSET_V3_I7_24.pdf)]

Kragh, J., Pigasse, G. (2011). Optimised noise barriers. Ministry of Transport, Danish Road Directorate, Danish Road Institute. Report 194. [Elektronische versie verkregen op 1

februari 2018 van [http://www.vejdirektoratet.dk/DA/viden\\_og\\_data/publikationer/Lists/Publikationer/Attachments/499/rapport%20194\\_web.pdf](http://www.vejdirektoratet.dk/DA/viden_og_data/publikationer/Lists/Publikationer/Attachments/499/rapport%20194_web.pdf)]

Leeuwen, J.J.A. van (1999). Een technische beoordeling van de effectiviteit van geluidsschermen. Nederlandstalige samenvatting van I-INCE publication 98-1 ‘Technical assessment of the effectiveness of noise walls’. Tijdschrift Geluid nummer 2, april 1999, 60 – 62. [Elektronische versie verkregen op 1 februari 2018 van

<https://dgmr.nl/uploads/files/Een%20technische%20beoordeling%20van%20de%20effectiviteit%20van%20geluidsschermen.pdf>]

Nimwegen, N. van (3 februari 2017). Vormt hinder door laagfrequent geluid een groeiend milieuprobleem? [Elektronische versie verkregen op 1 februari 2018 van <https://demonitor.kro-ncrv.nl/artikelen/vormt-hinder-door-laagfrequent-geluid-een-groeiend-milieuprobleem?>]

NZ Transport Agency (2013). In-situ testing. Transport noise, performance testing. Noise barrier case study 11. [Elektronische versie verkregen op 1 februari 2018 van <https://www.nzta.govt.nz/assets/Highways-Information-Portal/Technical-disciplines/Noise-and-vibration/Barrier/Case-studies/NZTA-Noise-Barrier-Case-Study-11-performance-testing-v1.0.pdf>]

Staatscourant, nr. 11810, van 27 juni 2012. [Elektronische versie verkregen op 1 februari 2018 van <https://zoek.officielebekendmakingen.nl/stcrt-2012-11810.html>]

Oud, M. (2013). Verklaring voor hinder van laagfrequent geluid. Tijdschrift Geluid nummer 1, maart 2013, 6 – 9. [Elektronische versie verkregen op 1 februari 2018 van [https://laagfrequentgeluid.nl/download/2013\\_03\\_OudM\\_tijdschrGeluid.pdf](https://laagfrequentgeluid.nl/download/2013_03_OudM_tijdschrGeluid.pdf)]

Piechowicz, J., (2011). Sound wave diffraction at the edge of a sound barrier. Acta Physica Polonica A, Volume 119, Acoustic and Biomedical Engineering, University of Science and Technology, Kraków, Poland. [Elektronische versie verkregen op 1 februari 2018 van <http://przyrbwn.icm.edu.pl/APP/PDF/119/a119z6Ap29.pdf>]

Radoi, A.M. (2015). The establishing of the insertion loss of the noise barriers. Chapter 16 in Danube Adria Association for Automation & Manufacturing (DAAAM) International Scientific Book 2015, 173 – 188. [Elektronische versie verkregen op 1 februari 2018 van [http://www.daaam.info/Downloads/Pdfs/science\\_books\\_pdfs/2015/Sc\\_Book\\_2015-016.pdf](http://www.daaam.info/Downloads/Pdfs/science_books_pdfs/2015/Sc_Book_2015-016.pdf)]

Rijkswaterstaat. Circulaire economie. [Elektronische versie verkregen op 1 februari 2018 van <https://www.rijkswaterstaat.nl/zakelijk/innovatie-en-duurzame-leefomgeving/duurzame-leefomgeving/circulaire-economie/index.aspx>]

Rijkswaterstaat. Zoab. [Elektronische versie verkregen op 1 februari 2018 van <https://www.rijkswaterstaat.nl/wegen/wegbeheer/aanleg-wegen/zoab.aspx>]

RIVM (2002), Laag Frequent Geluid PDF, GGD richtlijn. [Elektronische versie verkregen op 1 februari 2018 van <http://www.rivm.nl/dsresource?objectid=a29546b7-20bd-4c52-9ccc-334ff62a997b&type=org&disposition=inline>]

RIVM (2011). Hinder, bezorgdheid en woontevredenheid in Nederland : Inventarisatie verstoringen 2008. Rapport 630741001/2011. [Elektronische versie verkregen op 1 februari 2018 van <http://rivm.nl/dsresource?objectid=50e5cd0f-3de8-40ca-b3e5-7b31dbfaa93b>]

RIVM (2014), Health implication of road, railway and aircraft noise in the European Union: Provisional results based on the 2nd round of noise mapping. Rapport 2014-0130. [Elektronische versie verkregen op 1 februari 2018 van <https://laagfrequentgeluid.nl/html/informatie/info.html>; RIVM (2014), Health implication of road, railway and aircraft noise in the European Union]

RIVM (2016). Beoordeling gezondheidsrisico's door sporten op kunstgrasvelden met rubbergranulaat. Rapport 2016-0202. [Elektronische versie verkregen op 1 februari 2018 van <http://www.rivm.nl/dsresource?objectid=43ac34f7-7b21-415a-8ea0-b3b5fd1add08&type=pdf&disposition=inline>]

RIVM (2017). Cardiovascular and metabolic effects of environmental noise Systematic evidence review in the framework of the development of the WHO environmental noise guidelines for the European Region. Report 2017-0078. [Elektronische versie verkregen op 1 februari 2018 van <http://www.rivm.nl/dsresource?objectid=9d31cd9f-abc5-4f88-9047-f9f132e4c065&type=org&disposition=inline>]

RIVM (2018). Geluid. [Elektronische versie verkregen op 1 februari 2018 van <http://www.rivm.nl/Onderwerpen/G/Geluid>]

RIVM (2018). Volksgezondheidszorg.info. Milieufactoren veroorzaken bijna 6% van de totale ziektelast. [Elektronische versie verkregen op 1 februari 2018 van <https://www.volksgezondheidszorg.info/onderwerp/fysieke-omgeving/cijfers-context/overzicht>]

RIVM (nog niet gepubliceerd). Onderzoek uitgevoerd door geluidsdeskundige Theo Campmans van bureau LBP|SIGHT. [Elektronische versie verkregen op 1 februari 2018 van <https://demonitor.kro-ncrv.nl/artikelen/rapport-rivm-snelweg-dreunt-2-keer-zo-hard-als-30-jaar-geleden>]

Rochester Institute of Technology, Chester F. Carlson Center for Imaging Science, Optics for Imaging Syllabus, Chapter 7 Propagation of Waves. [Elektronische versie verkregen op 1 februari 2018 van <https://www.cis.rit.edu/class/simg303/Notes/Ch7-PropagationofWaves.pdf>]

Suh, S.S., Mongeau, L., Bolton, J.S., (2001). Study of the performance of acoustic barriers for Indiana toll roads. Prepared in cooperation with the Indiana department of transportation and the U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration. Report No. FHWA/IN/JTRP-2001/20. [Elektronische versie verkregen op 1 februari 2018 van <https://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?referer=https://www.google.nl/&httpsredir=1&article=1674&context=jtrp>]

Simon Fraser University. Sound propagation. [Elektronische versie verkregen op 1 februari 2018 van [https://www.sfu.ca/sonic-studio/handbook/Sound\\_Propagation.html](https://www.sfu.ca/sonic-studio/handbook/Sound_Propagation.html)]

[Stichting Laagfrequent geluid \(2018\), Informatie.](#) [Elektronische versie verkregen op 1 februari 2018 van <https://laagfrequentgeluid.nl/html/informatie/info.html>]

Stille autobanden – het wordt stiller op straat. [Elektronische versie verkregen op 1 februari 2018 van <http://www.stille-autobanden.com>]

Society for Science & the Public (2016). Intel ISEF 2016 Special Awards Ceremony. Acoustical Society of America, Honorable Mention: ENEV107T The Wobble: A Sustainable Noise Barrier Consisting of Noise Absorbing Materials and a Revolutionary Shape. [Elektronische versie verkregen op 1 februari 2018 van <http://openlab.web.cern.ch/sites/openlab.web.cern.ch/files/press-coverage/Y/M/Intel%20ISEF%202016%20Special%20Awards%20Ceremony.pdf>]

Sonus BV. Geluidsabsorptie, geluidsisolatie en reflectie van geluid. [Elektronische versie verkregen op 1 februari 2018 van <https://www.sonus.nl/dutch/begrippen/toelichtingen/absorptie.html>]

Schwanen, W., Peeters, B. (2016). In-situ testing of acoustical properties of noise barriers. Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. (DEGA), Online Proceedings. [Elektronische versie verkregen op 1 februari 2018 van <http://pub.dega-akustik.de/IN2016/data/articles/000917.pdf>]

Troldtekt. Reverberation and absorption. [Elektronische versie verkregen op 1 februari 2018 van <http://www.troldtekt.com/Product-properties/Good-acoustics/Acoustics-for-advanced/Reverberation-and-absorption>]

TU Delft. Het meten van absorptiecoëfficiënten. [Elektronische versie verkregen op 1 februari 2018 van [http://bk.nijsnet.com/0206016\\_TH06\\_MetenAbsorptie.aspx](http://bk.nijsnet.com/0206016_TH06_MetenAbsorptie.aspx)]

U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration. Noise Barrier Design Handbook. [Elektronische versie verkregen op 1 februari 2018 van [https://www.fhwa.dot.gov/Environment/noise/noise\\_barriers/design\\_construction/design/design03.cfm](https://www.fhwa.dot.gov/Environment/noise/noise_barriers/design_construction/design/design03.cfm)]

Vonk, R. Nagalmtijd. [Elektronische versie verkregen op 1 februari 2018 van <https://www.natuurkunde.nl/artikelen/2926/nagalmtijd>]

Vos, de P., (2009). Geluidbeperkende constructies langs spoorwegen.

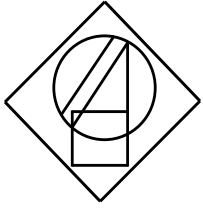
Wegenwiki. Gemotoriseerd verkeer. [Elektronische versie verkregen op 1 februari 2018 van [https://www.wegenwiki.nl/Gemotoriseerd\\_verkeer](https://www.wegenwiki.nl/Gemotoriseerd_verkeer)]

Weijden, K. van der (2011). Akoestisch beton. Onderzoek naar het verbeteren van akoestiek in een ruimte met de toepassing van beton. Eindverslag bouwtechnisch onderzoek, Faculteit der Bouwkunde, Technische Universiteit Delft. [Elektronische versie verkregen op 1 februari 2018 van [http://homepage.tudelft.nl/x4x4j/saddbtreports/0910nj/Akoestisch\\_beton\\_Kevin\\_van\\_der\\_Weijden.pdf](http://homepage.tudelft.nl/x4x4j/saddbtreports/0910nj/Akoestisch_beton_Kevin_van_der_Weijden.pdf)]

Williams, K. (2014). Outdoor propagation – cylindrical field. [Elektronische versie verkregen op 1 februari 2018 van <http://slideplayer.com/slide/601644/>]

World Health Organization Regional Office for Europe (2011), Burden of disease from environmental noise, Quantification of healthy life years lost in Europe, Bonn. [Elektronische versie verkregen op 1 februari 2018 van [http://www.euro.who.int/\\_data/assets/pdf\\_file/0008/136466/e94888.pdf](http://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0008/136466/e94888.pdf)]





# BIJLAGEN

# Bijlage 1

## Tabellen bij frequentieproef

### Zwaar verkeer

#### Hoge tonen

Trillingstijd in microseconden	Frequentie in Hertz
600	1.667
800	1.250
700	1.429
620	1.613
800	1.250
800	1.250
800	1.250
800	1.250
900	1.111
800	1.250
580	1.724
600	1.667
800	1.250
620	1.613
700	1.429
700	1.429
720	1.389
Vaakst voorkomend: 1.250,1.429 en 1.667	

#### Middelhoge tonen

Trillingstijd in microseconden	Frequentie in Hertz
2440	410
2530	395
3827	261
2440	410
2530	395
2632	380
1351	740
3472	288
1528	654
2530	395
2614	383
2440	410
2530	395

1726	579
2440	410
2850	351
2440	410
Vaakst voorkomend: 410, 395	

### Lage tonen

Trillingstijd in microseconden	Frequentie in Hertz
19608	51
15873	63
18519	54
13889	82
8065	124
19608	51
12048	83
10870	92
15873	63
13889	82
8547	117
9709	103
8065	124
15873	63
13889	72
8065	124
10101	99
Vaakst voorkomend: 51, 63, 82 en 124	

### Middelzwaar verkeer

#### Hoge tonen

Trillingstijd in microseconden	Frequentie in Hertz
400	2.500
440	2.273
340	2.941
400	2.500
320	3.125
460	2.174
400	2.500
400	2.500
500	2.000
446	2.242
440	2.273
340	2.941

400	2.500
420	2.381
300	3.333
400	2.500
500	2.000
400	2.500
500	2.000
400	2.500
Vaakst voorkomend: 2.500 en 2.000	

### Middelhoge tonen

Trillingstijd in microseconden	Frequentie in Hertz
1580	633
799	1.252
1001	999
1577	634
809	1.263
724	1.382
909	1.100
781	1.281
1608	622
1590	629
1590	629
1590	629
1001	999
1209	827
1550	645
799	1.252
799	1.252
1208	828
1209	827
1209	827
Vaakst voorkomend: 1.252, 629 en 827	

### Lage tonen

Trillingstijd in microseconden	Frequentie in Hertz
2272	440
2119	472
3690	271
1748	572
3906	256
1486	673

2762	362
2272	440
1486	673
2272	440
2688	372
2688	372
2688	372
2272	440
3115	321
2119	472
1486	673
2272	440
1486	673
1845	542
Vaakst voorkomend: 440, 372 en 673	

## Licht verkeer

### Hoge tonen

Trillingstijd in microseconden	Frequentie in Hertz
180	5.556
220	4.545
200	5.000
220	4.545
190	5.263
230	4.348
180	5.556
200	5.000
220	4.545
210	4.762
Vaakst voorkomend: 5.556, 4.545 en 5.000	

### Middelhoge tonen

Trillingstijd in microseconden	Frequentie in Hertz
395	2.533
307	3.261
438	2.281
395	2.533
381	2.625
307	3.261
180	2.615
460	2.172
395	2.533

307	3.261
Vaakst voorkomend: 2.533 en 3.261	

### Lage tonen

Trillingstijd in microseconden	Frequentie in Hertz
534	1.872
340	2.941
400	2.500
534	1.872
300	3.333
400	2.500
534	1.872
611	1.638
440	2.273
400	2.500
Vaakst voorkomend: 1.872 en 2.500	

## Bijlage 2

### Vooronderzoek materialen

#### Inleiding

Om een zo goed mogelijk geluidsscherm te creëren, heb je een goede vorm nodig én een goed materiaal. In deze proef heb ik met een medescholier onderzocht welk materiaal geluid het beste absorbeert. In de uiteindelijke test hebben we achter het te testen materiaal ook een plastic wand neergezet.

#### Onderzoeksvraag

Welk materiaal absorbeert het meeste geluid?

#### Lijst van materialen

- PUR-schuimen plaat (17 x 12 x 2,3 cm)
- Piepschuim plaat (17 x 12 x 1 cm)
- Koudschuim plaat (17 x 12 x 9,5 cm)
- Traagschuim plaat (17 x 12 x 2 cm)
- Autoband (17 x 12 x 4 cm)
- Polyether plaat (17 x 12 x 4,5 cm)
- Plastic plaat (17 x 12 x 0,3 cm)
- Boterhamzakje met (rubberen)kurken (17 x 12 x 8,3 cm)
- Boterhamzakje met water (1/2 Liter)
- Kartonnen doos
- Schaar
- Plakband
- Meetlint
- Telefoon
- Decibelmeter

#### Methode

In de kartonnen doos hebben we met de schaar een gat gemaakt van 15x10 cm. Uit ieder materiaal haalden wij een blok van 17x12 cm. Achter het gat in de doos, legden wij een telefoon met timer, die na 2 minuten afging (zie de afbeelding hieronder). Deze timer hebben we op 3 verschillende geluiden ingesteld. Met een decibelmeter en met een afstand tot de doos van 20 cm, maten wij het aantal decibels. Wij maten in eerste instantie zonder materiaal vóór de doos. Vervolgens maten we met ieder materiaal het aantal doorgekomen decibels. Dit alles noteerden wij in een tabel.



## Resultaten

### Geluid A:

Beginwaarde decibel	Materiaal	Dikte materiaal	Afstand materiaal tot decibelmeter	Decibel
55	PUR-schuim	2,3 cm	20 cm	45,5
55	Piepschuim	1,00 cm	20 cm	52,2
55	Koudschuim	9,5 cm	20 cm	48,4
55	Traagschuim	2,00 cm	20 cm	50,2
55	Autoband	4 cm	20 cm	47,9
55	Polyether	4,5 cm	20 cm	50,2
55	Plastic	0,3 cm	20 cm	48,3
55	(Rubberen)kurken	8,3 cm	20 cm	51,6
55	Water	1/2 Liter	20 cm	47,3

### Geluid B:

Beginwaarde decibel	Materiaal	Dikte materiaal	Afstand materiaal tot decibelmeter	Decibel
60	PUR-schuim	2,3 cm	20 cm	52,2
60	Piepschuim	1,00 cm	20 cm	56,8
60	Koudschuim	9,5 cm	20 cm	57,1
60	Traagschuim	2,00 cm	20 cm	54,2
60	Autoband	4 cm	20 cm	51,7
60	Polyether	4,5 cm	20 cm	56,3
60	Plastic	0,3 cm	20 cm	54,2
60	(Rubberen)kurken	8,3 cm	20 cm	55,2
60	Water	1/2 Liter	20 cm	52,9

### Geluid C:

Beginwaarde decibel	Materiaal	Dikte materiaal	Afstand materiaal tot decibelmeter	Decibel
75	PUR-schuim	2,3 cm	20 cm	63,1
75	Piepschuim	1,00 cm	20 cm	72,4
75	Koudschuim	9,5 cm	20 cm	66,8
75	Traagschuim	2,00 cm	20 cm	62,6
75	Autoband	4 cm	20 cm	66,2
75	Polyether	4,5 cm	20 cm	72,3
75	Plastic	0,3 cm	20 cm	69,5
75	(Rubberen)kurken	8,3 cm	20 cm	73,2
75	Water	1/2 Liter	20 cm	68,7



## **Conclusie**

Uit het vooronderzoek blijkt dat, met de gegeven dikte, PUR-schuim het beste geluid absorbeert. Een bijkomend voordeel van PUR-schuim is dat het volgens de milieuclassificatie van bouwmaterialen van NIBE in categorie 2b valt, wat volgens hen een goede keuze is.

## Bijlage 3

### Materiaalproefresultaten

#### Lege galmkamer

Frequentie in Hertz	Gemeten nagalmtijd in seconden
50	36,201
63	22,042
80	10,727
100	8,36
125	10,37
160	10,576
200	9,395
250	10,503
315	8,22
400	8,583
500	8,333
630	7,577
800	6,981
1.000	6,406
1.250	5,7
1.600	5,516
2.000	4,852
2.500	4,158
3.150	3,225
4.000	2,67
5.000	2,137

#### Aluminiumcassette

Bij het meten van de nagalmtijd met de aluminiumcassette in de galmkamer zijn de volgende waarden gemeten:

Frequentie in Hertz	Nagalm-tijd 0°	Nagalm-tijd 45°	Nagalm-tijd 90°	Nagalm-tijd 135°	Nagalm-tijd 180°	Nagalm-tijd 225°	Nagalm-tijd 270°	Nagalm-tijd 315°	Nagalm-tijd 360°
50	32,136	40,637	40,573	39,813	38,855	37,941	36,762	40,139	40,285
63	19,353	19,535	15,297	16,669	23,903	21,445	17,838	15,204	18,814
80	12,568	8,804	11,493	7,429	7,079	10,533	10,69	10,265	10,031
100	11,836	8,662	9,107	9,787	9,651	11,823	10,777	8,863	8,433
125	11,419	12,607	10,994	12,293	11,845	12,989	11,816	9,55	9,481
160	10,358	10,699	9,207	9,707	8,025	6,952	8,603	8,991	10,624
200	9,849	10,755	9,403	9,621	9,769	8,971	9,444	9,637	9,344
250	10,987	11,077	10,305	11,048	10,338	9,888	9,976	10,004	10,79
315	8,29	7,611	8,656	8,136	8,191	8,516	8,582	8,802	8,317

400	8,585	8,546	8,785	8,124	7,711	8,941	8,713	9,026	8,559
500	8,322	8,526	8,259	8,483	8,325	8,55	7,574	8,543	8,445
630	7,233	8,045	8,025	7,542	7,085	8,037	7,535	7,992	7,748
800	6,69	7,038	7,121	7,343	6,386	7,226	7,136	7,472	6,993
1.000	6,451	6,983	6,289	6,208	6,979	6,778	6,995	6,857	6,62
1.250	5,821	6,321	6,055	5,687	6,442	6,075	6,212	5,999	6,134
1.600	5,266	5,541	5,78	5,501	5,462	5,438	5,78	5,241	5,226
2.000	4,808	4,943	5,096	4,73	4,895	4,709	4,978	4,726	4,88
2.500	4,077	4,186	4,14	4,321	4,268	4,155	4,04	4,027	4,285
3.150	3,232	3,436	3,161	3,227	3,263	3,248	3,115	3,358	3,128
4.000	2,662	2,732	2,687	2,626	2,714	2,623	2,698	2,733	2,532
5.000	2,16	2,186	2,208	2,153	2,222	2,192	2,262	2,09	2,043

Uit bovenstaande nagalmtijden volgde de gemiddelde nagalmtijd, die na de correctie met de standaarddeviatie (zie methode), als volgt wordt:

Frequentie in Hertz	Gemiddelde nagalmtijd met standaarddeviatie
50	38,334
63	19,01
80	9,962
100	9,465
125	11,337
160	9,374
200	9,619
250	10,492
315	8,332
400	8,557
500	8,336
630	7,682
800	7,038
1.000	6,657
1.250	6,044
1.600	5,475
2.000	4,862
2.500	4,166
3.150	3,239
4.000	2,668
5.000	2,165

Uit de bovenstaande nagalmtijden volgen dan de volgende absorptiecoëfficiënten:

Frequentie in Hertz	Absorptiecoëfficiënt	Frequentie in Hertz	Absorptiecoëfficiënt
50	0,00	630	1,40
63	0,00	800	1,30

80	1,00	1.000	1,30
100	1,30	1.250	1,20
125	1,10	1.600	1,00
160	1,10	2.000	0,80
200	1,00	2.500	0,80
250	0,70	3.150	0,70
315	1,20	4.000	0,30
400	1,20	5.000	0,40
500	1,30	Eengetalswaarde conform NEN-EN-ISO 11654	$\alpha = 0,65$

## Groencassette

Bij het meten van de nagalmtijd met de groencassette in de galmkamer zijn de volgende waarden gemeten:

Frequentie in Hertz	Nagalm-tijd 0°	Nagalm-tijd 45°	Nagalm-tijd 90°	Nagalm-tijd 135°	Nagalm-tijd 180°	Nagalm-tijd 225°	Nagalm-tijd 270°	Nagalm-tijd 315°	Nagalm-tijd 360°
50	39,372	35,158	40,551	42,575	38,633	33,943	33,984	33,673	33,96
63	12,23	14,794	14,212	13,51	12,371	16,858	16,346	18,71	16,862
80	16,127	18,928	14,908	16,957	16,132	10,049	12,446	11,673	10,279
100	18,078	18,761	13,235	18,524	17,834	12,515	13,781	11,981	12,437
125	19,259	19,47	15,624	15,587	19,296	17,799	22,572	16,655	17,735
160	14,002	13,389	13,922	14,026	14,067	14,023	14,259	14,729	14,15
200	14,071	13,256	14,048	13,351	14,138	14,323	13,653	13,251	14,49
250	13,821	12,258	14,309	13,288	13,926	12,783	13,851	13,913	13,605
315	11,704	11,497	11,774	11,861	11,813	12,13	11,578	12,317	12,052
400	12,708	12,965	12,604	11,833	12,646	12,496	13,135	13,258	12,51
500	11,827	12,178	12,114	13,03	11,851	12,154	12,948	12,993	12,578
630	11,519	11,677	11,036	10,93	11,494	11,34	11,687	11,361	11,353
800	9,822	9,773	9,796	9,525	10,163	9,704	9,951	9,724	9,95
1.000	9,013	9,088	9,417	9,008	8,975	9,363	8,838	8,799	8,845
1.250	7,691	7,817	7,741	7,977	7,392	7,913	7,771	8,109	7,857
1.600	6,349	6,315	6,524	6,712	6,275	6,69	6,674	6,602	6,76
2.000	5,458	5,662	5,51	5,602	5,621	5,021	5,644	5,495	5,567
2.500	4,65	4,687	4,895	4,767	4,709	4,693	4,404	4,615	4,637
3.150	3,443	3,405	3,606	3,54	3,467	3,505	3,538	3,341	3,46
4.000	2,811	2,573	2,754	2,655	2,847	2,8	2,785	2,761	2,739
5.000	2,205	2,238	2,222	2,237	2,182	2,238	2,257	2,2	2,248

Uit bovenstaande nagalmtijden volgt de gemiddelde nagalmtijd, die na de correctie met de standaarddeviatie (zie methode), als volgt wordt:

Frequentie in Hertz	Gemiddelde nagalmtijd met standaarddeviatie
50	36,872
63	15,099
80	14,167
100	15,238
125	18,222
160	14,063
200	13,842
250	13,528
315	11,858
400	12,684
500	12,408
630	11,377
800	9,823
1.000	9,039
1.250	7,808
1.600	6,544
2.000	5,509
2.500	4,673
3.150	3,478
4.000	2,747
5.000	2,225

Uit de bovenstaande nagalmtijden volgen dan de volgende absorptiecoëfficiënten:

Frequentie in Hertz	Absorptiecoëfficiënt	Frequentie in Hertz	Absorptiecoëfficiënt
50	0,00	630	1,52
63	0,00	800	1,28
80	1,17	1.000	1,17
100	0,70	1.250	1,17
125	0,70	1.600	0,93
160	0,58	2.000	0,70
200	0,58	2.500	0,82
250	0,70	3.150	0,58
315	1,28	4.000	0,35
400	1,52	5.000	0,35
500	1,40	Eengetalswaarde conform NEN-EN-ISO 11654	$\alpha = 0,65$

## Houtvezelbeton

Bij het meten van de nagalmtijd met het houtvezelbeton in de galmkamer zijn de volgende waarden gemeten:

Frequentie in Hertz	Nagalm -tijd 0°	Nagalm -tijd 45°	Nagalm -tijd 90°	Nagalm -tijd 135°	Nagalm -tijd 180°	Nagalm -tijd 225°	Nagalm -tijd 270°	Nagalm -tijd 315°	Nagalm -tijd 360°
50	39,372	35,158	40,551	42,575	38,633	33,943	33,984	33,673	33,96
63	12,23	14,794	14,212	13,51	12,371	16,858	16,346	18,71	16,862
80	16,127	18,928	14,908	16,957	16,132	10,049	12,446	11,673	10,279
100	18,078	18,761	13,235	18,524	17,834	12,515	13,781	11,981	12,437
125	19,259	19,47	15,624	15,587	19,296	17,799	22,572	16,655	17,735
160	14,002	13,389	13,922	14,026	14,067	14,023	14,259	14,729	14,15
200	14,071	13,256	14,048	13,351	14,138	14,323	13,653	13,251	14,49
250	13,821	12,258	14,309	13,288	13,926	12,783	13,851	13,913	13,605
315	11,704	11,497	11,774	11,861	11,813	12,13	11,578	12,317	12,052
400	12,708	12,965	12,604	11,833	12,646	12,496	13,135	13,258	12,51
500	11,827	12,178	12,114	13,03	11,851	12,154	12,948	12,993	12,578
630	11,519	11,677	11,036	10,93	11,494	11,34	11,687	11,361	11,353
800	9,822	9,773	9,796	9,525	10,163	9,704	9,951	9,724	9,95
1.000	9,013	9,088	9,417	9,008	8,975	9,363	8,838	8,799	8,845
1.250	7,691	7,817	7,741	7,977	7,392	7,913	7,771	8,109	7,857
1.600	6,349	6,315	6,524	6,712	6,275	6,69	6,674	6,602	6,76
2.000	5,458	5,662	5,51	5,602	5,621	5,021	5,644	5,495	5,567
2.500	4,65	4,687	4,895	4,767	4,709	4,693	4,404	4,615	4,637
3.150	3,443	3,405	3,606	3,54	3,467	3,505	3,538	3,341	3,46
4.000	2,811	2,573	2,754	2,655	2,847	2,8	2,785	2,761	2,739
5.000	2,205	2,238	2,222	2,237	2,182	2,238	2,257	2,2	2,248

Uit bovenstaande nagalmtijden volgde de gemiddelde nagalmtijd, die na de correctie met de standaarddeviatie (zie methode), als volgt werd:

Frequentie in Hertz	Gemiddelde nagalmtijd met standaarddeviatie
50	36,872
63	15,099
80	14,167
100	15,238
125	18,222
160	14,063
200	13,842
250	13,528
315	11,858
400	12,684
500	12,408
630	11,377
800	9,823
1.000	9,039

1.250	7,808
1.600	6,544
2.000	5,509
2.500	4,673
3.150	3,478
4.000	2,747
5.000	2,225

Uit de bovenstaande nagalmtijden volgen dan de volgende absorptiecoëfficiënten:

Frequentie in Hertz	Absorptiecoëfficiënt	Frequentie in Hertz	Absorptiecoëfficiënt
50	0,05	630	1,21
63	0,00	800	1,15
80	0,71	1.000	1,26
100	0,49	1.250	1,26
125	0,49	1.600	1,21
160	0,38	2.000	0,99
200	0,49	2.500	0,93
250	0,55	3.150	0,88
315	0,99	4.000	0,77
400	1,21	5.000	0,88
500	1,15	Eengetalswaarde conform NEN-EN-ISO 11654	$\alpha = 0,95$

## Rubbergranulaat

Bij het meten van de nagalmtijd met het rubbergranulaat in de galmkamer zijn de volgende waarden gemeten:

Frequentie in Hertz	Nagalm-tijd 0°	Nagalm-tijd 45°	Nagalm-tijd 90°	Nagalm-tijd 135°	Nagalm-tijd 180°	Nagalm-tijd 225°	Nagalm-tijd 270°	Nagalm-tijd 315°	Nagalm-tijd 360°
50	34,637	35,384	35,57	36,506	37,096	36,82	33,55	35,126	34,637
63	13,726	13,716	13,217	13,563	13,782	13,261	12,958	13,427	13,726
80	10,445	9,267	7,277	8,408	9,118	9,973	10,323	10,524	10,445
100	15,271	15,239	12,371	15,17	12,688	11,759	11,77	12,438	14,128
125	12,968	15,273	16,306	18,217	17,351	16,684	16,471	15,75	12,968
160	11,691	10,461	13,29	12,359	12,21	13,017	13,261	13,631	11,691
200	13,663	14,572	14,2	13,763	12,534	14,961	13,601	14,078	13,663
250	14,126	14,516	13,46	15,173	11,77	14,292	13,684	11,719	14,126
315	11,806	11,55	11,772	11,315	11,857	12,089	10,019	12,006	11,806
400	12,391	11,618	12,466	11,582	12,555	11,765	11,874	12,21	12,391
500	11,266	11,799	11,475	11,861	11,322	11,893	11,407	11,325	11,266

630	10,253	10,613	11,237	10,383	10,678	10,692	10,345	10,702	10,253
800	9,124	9,112	8,988	8,435	9,726	9,44	8,982	9,539	9,124
1.000	8,407	8,123	8,43	8,425	8,323	8,123	8,212	8,352	8,407
1.250	6,982	6,934	7,067	7,088	6,986	6,899	7,065	6,997	6,982
1.600	5,916	6,194	6,178	6,04	5,945	6,064	5,976	5,921	5,916
2.000	5,254	4,705	5,176	5,233	5,049	5,024	4,833	4,572	5,254
2.500	4,218	4,056	4,208	4,004	4,163	3,885	4,046	4,132	4,218
3.150	2,846	2,918	3,003	2,892	3,083	3,144	2,874	3,088	2,846
4.000	2,527	2,56	2,462	2,522	2,564	2,559	2,514	2,402	2,527
5.000	2,098	2,117	2,198	2,042	2,162	2,196	2,157	2,123	2,098

Uit bovenstaande nagalmtijden volgt de gemiddelde nagalmtijd, die na de correctie met de standaarddeviatie (zie methode), als volgt wordt:

Frequentie in Hertz	Gemiddelde nagalmtijd met standaarddeviatie
50	35,586
63	13,456
80	9,417
100	13,299
125	16,128
160	12,49
200	13,921
250	13,592
315	11,552
400	12,058
500	11,544
630	10,613
800	9,168
1.000	8,299
1.250	7,002
1.600	6,029
2.000	4,981
2.500	4,089
3.150	2,981
4.000	2,514
5.000	2,137

Uit de bovenstaande nagalmtijden volgen dan de volgende absorptiecoëfficiënten:

Frequentie in Hertz	Absorptiecoëfficiënt	Frequentie in Hertz	Absorptiecoëfficiënt
50	0,00	630	0,40
63	0,60	800	0,40
80	2,20	1.000	0,60



100	0,60	1.250	1,00
125	0,40	1.600	0,80
160	0,60	2.000	1,20
200	0,00	2.500	2,00
250	0,00	3.150	3,00
315	0,20	4.000	2,20
400	0,20	5.000	1,20
500	0,40	Eengetalswaarde conform NEN-EN-ISO 11654	$\alpha = 0,35$

## PUR-schuim

Bij het meten van de nagalmtijd met het PUR-schuim in de galmkamer zijn de volgende waarden gemeten:

Frequentie in Hertz	Gemiddelde nagalmtijd	Nagalm -tijd 0°	Nagalm -tijd 45°	Nagalm -tijd 90°	Nagalm -tijd 135°	Nagalm -tijd 180°	Nagalm -tijd 225°	Nagalm -tijd 270°	Nagalm -tijd 315°	Nagalm -tijd 360°
50	34,078	35,051	34,653	34,271	32,219	31,821	34,064	34,078	35,051	34,653
63	19,189	15,405	17	24,46	20,324	18,389	20,585	19,189	15,405	17
80	9,966	11,945	7,429	7,741	10,668	11,301	10,592	9,966	11,945	7,429
100	12,014	14,928	13,073	10,931	14,436	11,983	11,061	12,014	15,292	13,073
125	14,783	17,272	16,497	13,876	13,533	13,459	14,909	14,783	17,272	16,497
160	11,76	11,78	12,247	12,499	10,306	11,811	11,969	11,76	11,78	12,247
200	11,567	11,382	11,622	11,064	11,946	10,658	11,614	11,567	11,382	11,622
250	11,183	10,143	11,644	11,799	11,442	11,036	10,673	11,183	10,143	11,644
315	8,633	9,122	8,845	7,876	7,92	9,542	9,107	8,633	9,122	8,845
400	8,21	8,58	7,946	7,734	7,573	8,525	8,39	8,21	8,58	7,946
500	7,577	7,943	7,741	7,012	7,763	7,234	7,533	7,577	7,943	7,741
630	6,488	6,284	6,592	6,632	6,673	6,59	6,473	6,488	6,284	6,592
800	5,962	6,11	6,368	5,846	5,907	6,025	5,768	5,962	6,11	6,368
1.000	5,361	4,872	5,617	5,54	5,564	4,771	5,567	5,361	4,872	5,617
1.250	4,804	5,085	4,708	4,732	5,099	4,743	4,533	4,804	5,085	4,708
1.600	4,445	4,655	4,508	4,282	4,482	4,264	4,314	4,445	4,655	4,508
2.000	4,104	4,051	4,24	3,832	4,177	4,057	4,256	4,104	4,051	4,24
2.500	3,575	3,682	3,501	3,726	3,697	3,631	3,387	3,575	3,682	3,501
3.150	2,871	2,942	2,982	2,752	2,828	2,96	2,868	2,871	2,942	2,982
4.000	2,434	2,452	2,5	2,416	2,321	2,474	2,444	2,434	2,452	2,5
5.000	1,985	2,039	1,983	1,888	1,891	2,027	2,063	1,985	2,039	1,983

Uit bovenstaande nagalmtijden volgt de gemiddelde nagalmtijd, die na de correctie met de standaarddeviatie (zie methode), als volgt wordt:

Frequentie in Hertz	Gemiddelde nagalmtijd met standaarddeviatie
50	34,078
63	19,189
80	9,966
100	12,014
125	14,783
160	11,76
200	11,567
250	11,183
315	8,633
400	8,21
500	7,577
630	6,488
800	5,962
1.000	5,361
1.250	4,804
1.600	4,445
2.000	4,104
2.500	3,575
3.150	2,871
4.000	2,434
5.000	1,985

Uit de bovenstaande nagalmtijden volgen dan de volgende absorptiecoëfficiënten:

Frequentie in Hertz	Absorptiecoëfficiënt	Frequentie in Hertz	Absorptiecoëfficiënt
50	0,06	630	1,31
63	0,00	800	1,31
80	0,63	1.000	1,50
100	0,38	1.250	1,63
125	0,25	1.600	1,44
160	0,25	2.000	1,25
200	0,31	2.500	1,31
250	0,31	3.150	1,25
315	0,63	4.000	0,94
400	0,88	5.000	1,13
500	1,06	Eengetalswaarde conform NEN-EN-ISO 11654	$\alpha = 0,70$

# Bijlage 4

## Vooronderzoek vormtest

### Inleiding

Om een zo goed mogelijk geluidsscherm te creëren, heb je goed materiaal én een goede vorm nodig. Bij deze proef heb ik met een medescholier onderzocht welke vorm van de platen het beste geluid naar boven leidt, zodat er het minste geluid bij de omgeving terechtkomt.

### Onderzoeksvraag

Welke vorm leidt het geluid het beste naar boven, zonder dat de omgeving er nog last van heeft?

### Lijst van materialen

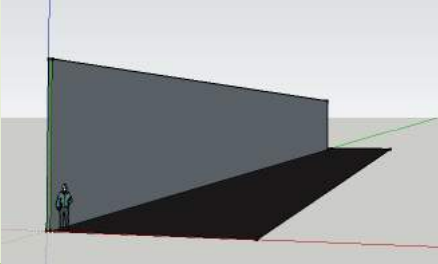
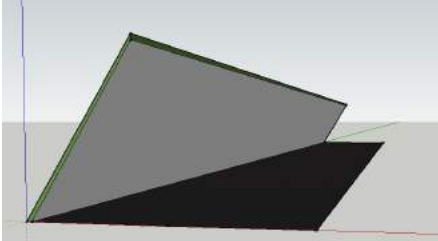
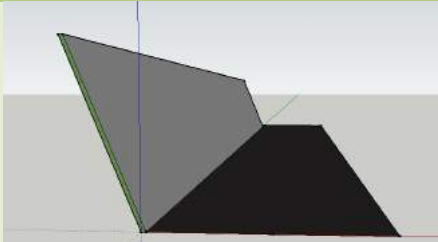
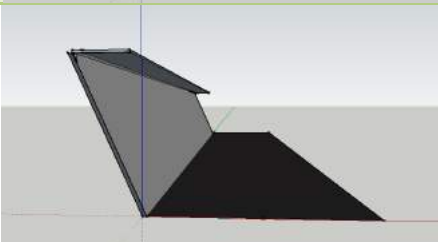
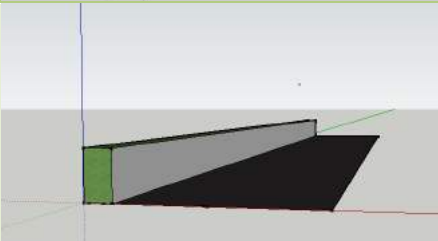
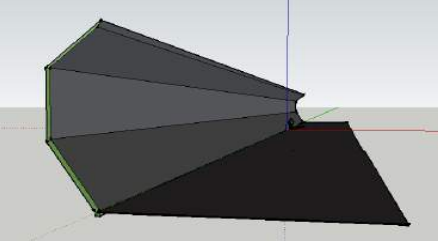
- Piepschuim plaat
- Plakband
- Schaar
- Meetrolmaat
- Telefoon
- Decibelmeter

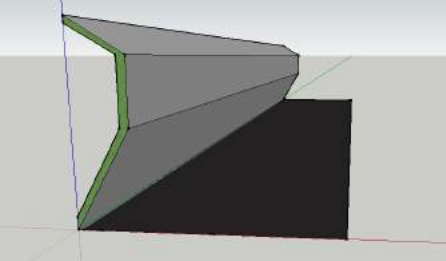
### Methode

Van het piepschuim hebben we eerst een lange plaat genomen als snelweg. We maten zonder platen eerst de decibels van het geluid dat de telefoon maakte, die we op een bepaalde ringtone hadden ingesteld. Dit hebben we met 3 verschillende geluiden gemeten. Vervolgens maakten we van het overige piepschuim platen van de zelfde hoogte, breedte en dikte, alleen een andere vorm. We zetten tegen de beginplaat iedere keer een van de verschillend gevormde platen, de telefoon te midden daarvan. Tussen het uiterste punt van de plaat en de decibelmeter namen we telkens 20 centimeter. De achterkant en voorkant van de stellage lieten wij open, omdat dat op een werkelijke snelweg ook zo is. Toen maten we het doorgelopen aantal decibels en zetten die in een tabel. Vervolgens trokken wij een conclusie over welke vorm volgens ons het beste was.

## Resultaten

### Geluid A:

Beginwaarde decibels	Plaat	Afbeelding van de Vorm	Aantal decibels met plaat	Nummer
72 dB	Rechtop		66 dB	1
72 dB	Tent		68 dB	2
72 dB	Schuin uit elkaar		68 dB	3
72 dB	Met dakje en schuin uit elkaar		68 dB	5
72 dB	Met rand		70 dB	6
72 dB	Wobbel naar binnen		65 dB	7

72 dB	Wobbel naar buiten		70 dB	8
-------	--------------------	--	-------	---

### Geluid B:

Beginwaarde decibels	Plaat	Aantal decibels met plaat	Nummer
75 dB	Rechtop	73 dB	1
75 dB	Tent	71 dB	2
75 dB	Schuin uit elkaar	72 dB	3
75 dB	Met dakje en schuin uit elkaar	69 dB	5
75 dB	Met rand	74 dB	6
75 dB	Wobbel naar binnen	69 dB	7
75 dB	Wobbel naar buiten	73 dB	8

### Geluid C:

Beginwaarde decibels	Plaat	Aantal decibels met plaat	Nummer
78 dB	Rechtop	75 dB	1
78 dB	Tent	74 dB	2
78 dB	Schuin uit elkaar	76 dB	3
78 dB	Met dakje en schuin uit elkaar	75 dB	5
78 dB	Met rand	76 dB	6
78 dB	Wobbel naar binnen	73 dB	7
78 decibel	Wobbel naar buiten	76 dB	8

## Bijlage 5

### Formule definities GeoMilieu

- $L_{eq,i,j,n,m}$  is het geluidsniveau bij de ontvanger achter het scherm
- $L_E$  is de emissie-term

De emissie-term is als volgt te berekenen:

$$\Delta L_E = 10 \log\left(\frac{Q_m}{v_m}\right) + \alpha_{i,m} + \beta_{i,m} \log\left(\frac{v_m}{v_{0,m}}\right) + C_{wegdek} + C_H$$

waarin:

- $Q_m$  de gemiddelde intensiteit van de betreffende voertuigcategorie is
- $v_m$  de gemiddelde snelheid van de betreffende voertuigcategorie is
- $v_0$  de referentiesnelheid van de betreffende voertuigcategorie is
- $\alpha_{i,m} + \beta_{i,m} \log\left(\frac{v_m}{v_{0,m}}\right)$  het A-gewogen equivalente bronvermogensniveau is
- $C_{wegdek}$  de wegdekcorrectie is

De wegdekcorrectie is als volgt te berekenen:

$$C_{wegdek} = \sigma + \tau \log\left(\frac{v_m}{v_{0,m}}\right)$$

waarin:

- $\sigma$  het verschil in dB bij de referentiesnelheid  $v_0$  is
- $\tau$  de snelheidsindex in dB per decade snelheidstoename is

- $C_H$  de hellingcorrectie is

De hellingcorrectie is als volgt te berekenen:

$$C_H = 0,5p_h - 1,5$$

waarin  $p_h$  het hellingspercentage van het betreffende wegvlak is

- $\Delta L_{GU}$  is de geometrische uitbreidingsterm

De geometrische uitbreidingsterm is als volgt te berekenen:

$$\Delta L_{GU} = 10 \log\left(\frac{\Phi}{R_0 \sin(\Theta)}\right)$$

waarin:

- $R_0$  de kortste afstand tussen bron- en waarnemingspunt is
- $\Phi$  de openingshoek van de sector (graden) is
- $\Theta$  de hoek tussen het sectorvlak en het rijlijnsegment (graden) is

- $\Delta L_L$  is de luchtdemping

De luchtdemping wordt als volgt berekend:

$$\Delta L_L = R_0 \delta_{lucht}$$

- $R_0$  is de kortste afstand tussen bron- en waarnemingspunt
- $\delta_{lucht}$  is de luchtdempingscoëfficiënt, die afhankelijk is van de octaafband. De luchtdempingscoëfficiënt hangt af van de octaafband en het verband tussen die twee is in de tabel hieronder weergegeven:

Octaafbandindex	$\delta_{lucht}$ (dB/m)	Octaafbandindex	$\delta_{lucht}$ (dB/m)
1	0	5	0,004
2	0	6	0,010
3	0,001	7	0,023
4	0,002	8	0,058

- $\Delta L_B$  is de bodemdemping
- $C_M$  is de meteocorrectieterm

De meteocorrectieterm is als volgt te berekenen:

$$C_M = 3,5 - 35 \left( \frac{h_b + h_w}{R} \right)$$

waarin:

- R de horizontaal gemeten afstand tussen de bron en de ontvanger is
  - $h_b$  de hoogte van het bronpunt boven de gemiddelde maaiveldhoogte in het brongebied is
  - $h_w$  de hoogte van het waarneempunt boven de gemiddelde maaiveldhoogte in het waarneemgebied is
- $\Delta L_{SW}$  is de schermwerking

De schermwerking is als volgt te berekenen:

$$\Delta L_{SW} = \Delta L_{SWN} + C_{mbs}$$

waarin:

- $\Delta L_{SWN}$  de schermwerking van een afschermend object is  
De schermwerking van een afschermend object is als volgt te berekenen:  
 $\Delta L_{SWN} = HF(N_r)$   
waarin:

- H de effectiviteit van het scherm is  
De effectiviteit van het scherm is als volgt te berekenen:  
 $H = 0,25h_T^{i-1}$   
waarin:
  - $h_T$  de minimale hoogte van het scherm t.o.v. het plaatselijk maaiveld is
  - $i$  de octaafbandindex is

- $F(N_r)$  een functie met het fresnelgetal is  
De functie met het fresnelgetal is als volgt te berekenen:  
 $F(N_r) = 0,37\varepsilon 2^{i-1}$   
waarin  $\varepsilon$  de akoestische omweg is (het verschil tussen de horizontale afstand tussen de bron en de ontvanger en de minimale afstand tussen de bron en de ontvanger met het scherm ertussen)

- $C_{mbs}$  de middenbermcorrectie is

- $\Delta L_R$  is de niveaureductie ten gevolge van reflecties

$$\Delta L_R = N_{refl} \delta_{refl}$$

waarin:

- $N_{refl}$  het aantal reflecties is tussen de bron en het waarnemingspunt
- $\delta_{refl}$  de reflectiecoëfficiënt is

De reflectiecoëfficiënt is als volgt te berekenen:

$$\delta_{refl} = -10 \log(1 - \alpha)$$

waarin  $\alpha$  de absorptiecoëfficiënt is van het materiaal gebruikt voor het geluidsscherm

## Bijlage 6

### Volledige resultaten bij vormtest met GeoMilieu

#### Zonder scherm/nulmeting

Afstand	Hoogte meetpunt	Dag	Avond	Nacht
70	0	62.63	49.97	51.64
70	1	63.53	50.11	52.01
70	2	65.07	51.69	53.57
70	3	65.66	52.27	54.18
70	4	66.02	52.62	54.54
70	5	66.37	52.96	54.89
80	0	62.01	48.87	50.12
80	1	62.76	49.34	51.24
80	2	64.29	50.90	52.79
80	3	64.84	51.45	53.36
80	4	65.17	51.77	53.69
80	5	65.48	52.08	54.00
90	0	61.43	41.20	48.35
90	1	62.07	48.65	50.55
90	2	63.59	50.21	52.10
90	3	64.11	50.73	52.64
90	4	64.42	51.03	52.94
90	5	64.70	51.30	53.22
100	0	61.12	46.31	48.32
100	1	61.45	48.04	49.93
100	2	62.97	49.59	51.48
100	3	63.48	50.09	52.00
100	4	63.76	50.37	52.29
100	5	64.02	50.62	52.54
Gemiddeld: 55.89 dB		64.19	50.79	52.70

#### Alle panelen recht

Afstand	Hoogte meetpunt	Dag	Avond	Nacht
70	0	61.82	48.97	49.54
70	1	62.53	50.11	52.01
70	2	65.07	51.69	52.96
70	3	64.66	52.27	47.87



70	4	66.02	62.62	49.34
70	5	66.37	52.96	52.89
80	0	61.01	47.87	50.12
80	1	62.76	49.34	51.24
80	2	64.29	50.90	52.79
80	3	64.84	50.45	53.36
80	4	62.17	51.77	53.69
80	5	65.48	49.08	50.21
90	0	61.43	41.20	48.73
90	1	61.07	45.65	51.03
90	2	63.59	50.21	51.32
90	3	64.11	48.73	52.64
90	4	63.82	51.03	52.94
90	5	64.70	51.32	53.22
100	0	61.12	46.31	48.32
100	1	59.27	48.04	49.93
100	2	62.97	52.82	51.48
100	3	62.48	54.18	48.82
100	4	63.76	54.54	51.29
100	5	61.02	46.89	47.28
Gemiddeld: 53.66 dB		61.83	48.83	50.33

### Alle panelen naar binnen

Afstand	Hoogte meetpunt	Dag	Avond	Nacht
70	0	59.28	43.75	49.53
70	1	58.33	46.96	52.96
70	2	59.33	47.83	48.87
70	3	55.34	43.63	49.63
70	4	57.90	48.42	49.72
70	5	57.45	47.96	53.64
80	0	55.77	43.87	51.42
80	1	61.08	42.45	49.34
80	2	56.20	47.31	50.90
80	3	63.84	46.45	50.42
80	4	61.03	47.32	51.77
80	5	58.23	43.08	46.31
90	0	59.63	48.96	48.75
90	1	61.07	47.87	52.82
90	2	63.99	49.53	50.14
90	3	63.28	50.90	51.96

90	4	63.82	50.45	50.94
90	5	64.70	45.77	51.22
100	0	59.12	46.36	48.86
100	1	59.27	48.04	49.63
100	2	62.97	47.64	49.13
100	3	63.27	43.18	48.63
100	4	58.82	45.32	48.29
100	5	54.37	43.31	45.72
Gemiddeld: 50.50 dB		57.28	45.28	48.93

### Alle panelen naar buiten

Afstand	Hoogte meetpunt	Dag	Avond	Nacht
70	0	59.28	49.72	44.37
70	1	61.33	52.73	51.37
70	2	59.33	45.69	52.96
70	3	60.23	49.27	47.26
70	4	61.45	61.26	49.34
70	5	62.92	52.96	52.89
80	0	63.61	47.87	46.78
80	1	62.76	49.34	47.91
80	2	64.29	50.90	48.23
80	3	64.84	50.45	49.23
80	4	57.03	51.77	50.74
80	5	58.23	49.08	51.93
90	0	59.63	41.20	46.00
90	1	61.07	45.65	46.63
90	2	63.59	50.21	51.32
90	3	64.11	48.73	52.64
90	4	63.82	51.03	52.94
90	5	64.70	51.32	53.22
100	0	59.12	46.31	48.32
100	1	59.27	48.04	49.93
100	2	62.97	52.82	54.82
100	3	61.27	43.18	48.82
100	4	60.32	47.16	51.29
100	5	61.27	46.19	45.37
Gemiddeld: 51.49 dB		60.82	46.43	47.28

### Onder naar binnen, midden recht, boven recht

Afstand	Hoogte meetpunt	Dag	Avond	Nacht
70	0	61.13	53.42	48.64
70	1	58.33	55.53	51.95
70	2	59.31	43.64	45.87
70	3	60.65	42.63	47.42
70	4	56.34	45.42	48.72
70	5	55.42	46.96	53.64
80	0	54.77	44.23	51.64
80	1	56.08	42.45	49.34
80	2	55.20	47.31	50.90
80	3	62.84	46.45	49.29
80	4	60.42	47.32	51.77
80	5	59.23	43.08	46.31
90	0	56.42	44.96	45.75
90	1	61.07	47.39	47.82
90	2	60.91	43.53	51.14
90	3	60.28	47.29	51.96
90	4	59.64	45.45	50.94
90	5	61.70	47.32	51.22
100	0	57.24	43.08	48.86
100	1	60.28	44.96	49.63
100	2	62.96	43.63	49.13
100	3	60.22	42.54	48.64
100	4	57.24	41.51	46.64
100	5	58.23	44.21	43.53
Gemiddeld: 49.58 dB		56.53	44.28	47.93

### Onder naar binnen, midden binnen, boven recht

Afstand	Hoogte meetpunt	Dag	Avond	Nacht
70	0	61.13	45.42	49.63
70	1	58.33	46.96	49.13
70	2	59.31	44.23	48.64
70	3	60.65	45.42	49.63
70	4	60.28	45.42	49.13
70	5	62.96	46.96	53.64
80	0	60.22	44.23	51.64
80	1	56.08	49.08	49.34
80	2	59.12	41.20	50.90

80	3	59.12	45.65	49.29
80	4	59.27	50.21	51.22
80	5	62.97	48.73	48.86
90	0	61.27	49.08	51.22
90	1	59.27	55.53	48.86
90	2	62.97	46.45	51.14
90	3	61.27	42.45	51.96
90	4	61.13	47.31	50.94
90	5	58.33	47.31	51.22
100	0	59.31	46.45	50.90
100	1	62.96	47.32	49.29
100	2	60.22	47.31	51.22
100	3	56.08	42.45	48.86
100	4	62.96	47.31	50.90
100	5	58.23	49.08	49.29
Gemiddeld: 50.58 dB		57.25	45.34	49.89

### Onder naar buiten, midden buiten, boven recht

Afstand	Hoogte meetpunt	Dag	Avond	Nacht
70	0	59.27	52.33	48.86
70	1	62.97	46.45	51.14
70	2	61.27	42.45	51.96
70	3	59.12	47.87	51.14
70	4	59.27	49.53	52.92
70	5	62.97	50.90	48.86
80	0	61.27	50.45	51.22
80	1	59.12	45.77	48.86
80	2	59.12	46.36	51.14
80	3	62.96	48.04	51.22
80	4	60.22	42.45	48.86
80	5	56.08	47.31	48.86
90	0	62.96	47.31	49.91
90	1	58.23	46.45	48.23
90	2	58.33	47.32	51.23
90	3	59.31	42.45	52.74
90	4	62.96	47.31	51.93
90	5	59.31	47.31	51.22
100	0	60.65	46.45	50.90
100	1	59.27	46.32	49.29
100	2	62.97	47.31	48.35

100	3	61.27	42.45	46.23
100	4	61.13	47.31	49.23
100	5	58.33	46.08	48.44
Gemiddeld: 51.56 dB		58.18	46.29	50.21

### Onder recht, midden recht, boven naar binnen

Afstand	Hoogte meetpunt	Dag	Avond	Nacht
70	0	59.53	48.04	48.86
70	1	54.87	42.45	49.63
70	2	56.08	48.04	49.13
70	3	52.20	42.45	48.63
70	4	61.84	47.31	48.29
70	5	54.77	47.31	48.23
80	0	57.08	46.45	49.23
80	1	55.20	47.32	47.74
80	2	56.84	42.45	50.93
80	3	58.42	46.32	49.22
80	4	59.23	46.31	50.90
80	5	56.42	48.04	45.72
90	0	59.27	49.82	49.91
90	1	62.97	43.18	49.29
90	2	60.65	47.16	48.35
90	3	56.34	46.19	46.23
90	4	59.27	47.32	49.23
90	5	59.31	46.31	48.44
100	0	54.77	48.04	50.90
100	1	56.08	46.82	49.29
100	2	55.20	43.18	48.35
100	3	61.84	42.45	46.23
100	4	59.42	47.31	49.23
100	5	54.53	46.08	48.44
Gemiddeld: 49.60 dB		56.79	43.64	48.38

### Onder buiten, midden recht, boven buiten

Afstand	Hoogte meetpunt	Dag	Avond	Nacht
70	0	60.65	46.19	49.22
70	1	56.34	47.32	50.90
70	2	59.27	46.31	45.72

70	3	59.31	48.04	49.91
70	4	54.77	46.82	49.29
70	5	56.08	43.18	48.35
80	0	55.20	42.45	46.23
80	1	55.20	47.31	49.23
80	2	56.23	46.08	48.44
80	3	56.84	46.32	50.90
80	4	58.42	46.31	50.90
80	5	59.23	48.04	45.72
90	0	56.42	49.82	49.91
90	1	59.27	43.18	49.29
90	2	62.97	47.16	48.35
90	3	56.34	46.45	46.23
90	4	59.27	47.32	48.44
90	5	59.31	42.45	50.90
100	0	59.53	46.32	50.90
100	1	54.87	46.31	45.72
100	2	56.08	48.04	49.91
100	3	52.20	49.82	49.29
100	4	61.84	43.18	48.35
100	5	54.77	47.16	46.23
Gemiddeld: 50.46 dB		57.64	44.53	49.23

### Onder recht, midden naar buiten, boven recht

Afstand	Hoogte meetpunt	Dag	Avond	Nacht
70	0	59.27	42.45	48.23
70	1	62.97	47.31	51.23
70	2	61.27	47.31	52.74
70	3	61.13	46.45	51.93
70	4	58.33	47.32	51.22
70	5	59.31	42.45	50.90
80	0	62.96	47.31	49.29
80	1	60.22	47.31	48.35
80	2	56.08	46.45	46.23
80	3	62.96	46.32	49.23
80	4	58.23	47.31	48.44
80	5	59.23	42.45	45.72
90	0	56.42	49.82	49.91
90	1	59.27	43.18	49.63
90	2	62.97	47.16	49.13

90	3	54.87	46.45	48.64
90	4	56.08	47.32	49.63
90	5	52.20	47.39	49.13
100	0	61.84	43.53	53.64
100	1	54.77	47.29	51.64
100	2	57.08	45.45	49.34
100	3	55.20	47.32	50.90
100	4	56.84	43.08	49.29
100	5	58.42	44.96	51.22
Gemiddeld: 51.85 dB		58.54	46.01	51.00

### Onder naar buiten, midden recht, boven recht

Afstand	Hoogte meetpunt	Dag	Avond	Nacht
70	0	62.97	47.16	48.44
70	1	54.87	46.45	50.90
70	2	56.08	47.32	50.90
70	3	52.20	47.39	45.72
70	4	61.84	43.53	49.91
70	5	54.77	47.29	49.29
80	0	57.08	45.45	48.35
80	1	55.20	47.32	46.23
80	2	56.84	46.45	46.23
80	3	58.42	46.32	49.23
80	4	58.23	47.31	48.44
80	5	54.77	42.45	45.72
90	0	56.08	49.82	49.91
90	1	55.20	43.18	49.63
90	2	55.20	47.16	49.91
90	3	56.23	46.31	49.29
90	4	56.84	48.04	48.35
90	5	58.42	49.82	46.23
100	0	59.23	43.18	49.23
100	1	59.31	47.16	48.44
100	2	59.53	46.19	50.90
100	3	54.87	47.32	50.90
100	4	56.08	46.31	45.72
100	5	52.20	48.04	49.91
Gemiddeld: 52.50 dB		58.98	47.24	51.29

### Onder recht, midden recht, boven naar binnen

Afstand	Hoogte meetpunt	Dag	Avond	Nacht
70	0	56.97	44.35	44.42
70	1	54.87	46.75	49.63
70	2	56.08	44.32	48.63
70	3	52.20	47.23	45.72
70	4	57.84	43.53	49.91
70	5	53.77	44.29	49.29
80	0	57.08	45.75	48.35
80	1	55.20	47.32	45.34
80	2	56.84	46.75	46.23
80	3	55.34	43.32	45.29
80	4	58.23	47.31	46.44
80	5	54.75	42.23	45.72
90	0	56.08	49.82	49.53
90	1	55.34	43.86	49.63
90	2	55.97	47.16	49.64
90	3	56.23	46.34	49.29
90	4	56.84	48.04	48.33
90	5	58.42	43.46	46.64
100	0	59.97	43.18	49.23
100	1	52.31	42.25	48.64
100	2	57.53	42.19	47.90
100	3	54.87	44.32	48.75
100	4	54.25	42.74	44.12
100	5	51.94	43.43	46.74
Gemiddeld: 49.00 dB		55.53	44.24	47.23

### Onder recht, midden naar binnen, boven recht

Afstand	Hoogte meetpunt	Dag	Avond	Nacht
70	0	55.53	42.53	45.42
70	1	53.53	44.23	44.63
70	2	54.64	43.53	45.63
70	3	53.23	45.64	46.72
70	4	53.75	47.34	44.91
70	5	52.47	45.64	46.29
80	0	56.75	44.34	47.35
80	1	55.85	43.64	47.34
80	2	56.54	42.43	47.23



80	3	55.85	44.64	45.29
80	4	55.34	42.34	46.44
80	5	54.75	41.64	45.72
90	0	54.34	45.34	46.53
90	1	53.75	43.23	47.63
90	2	53.34	42.16	47.64
90	3	56.74	46.34	44.29
90	4	53.84	42.04	46.33
90	5	54.42	43.23	47.64
100	0	53.97	43.64	45.23
100	1	54.31	44.75	46.64
100	2	55.75	43.34	44.90
100	3	54.34	42.23	45.75
100	4	53.75	41.64	46.12
100	5	52.42	44.23	44.74
Gemiddeld: 47.40 dB		53.83	42.84	45.53

### Onder recht, midden binnen, boven buiten

Afstand	Hoogte meetpunt	Dag	Avond	Nacht
70	0	54.97	43.35	43.34
70	1	55.43	44.53	44.63
70	2	53.64	45.64	43.65
70	3	53.63	46.45	45.72
70	4	54.34	45.23	47.91
70	5	53.64	43.29	46.29
80	0	52.08	46.75	45.33
80	1	53.20	46.54	44.65
80	2	54.82	47.75	43.24
80	3	53.34	47.23	45.29
80	4	54.53	44.64	46.44
80	5	54.75	43.23	45.64
90	0	56.23	42.83	43.52
90	1	52.34	45.86	46.63
90	2	54.54	44.23	47.64
90	3	52.23	46.34	49.64
90	4	52.34	48.46	48.33
90	5	54.42	47.23	45.23
100	0	55.96	45.12	44.26
100	1	56.31	43.25	46.64
100	2	54.53	41.64	47.34

100	3	53.87	41.23	46.85
100	4	52.25	40.76	46.15
100	5	54.94	41.12	47.23
Gemiddeld: 47.67 dB		53.43	43.34	46.23

### Onder recht, midden buiten, boven buiten

Afstand	Hoogte meetpunt	Dag	Avond	Nacht
70	0	58.84	45.83	47.23
70	1	59.71	46.09	48.31
70	2	60.23	47.38	50.12
70	3	62.39	49.82	51.82
70	4	64.92	51.83	52.73
70	5	66.12	53.00	54.56
80	0	58.89	45.01	46.78
80	1	59.33	45.74	47.91
80	2	60.23	46.32	48.23
80	3	61.45	47.23	49.23
80	4	62.92	49.38	50.74
80	5	63.61	50.78	51.93
90	0	57.72	42.92	46.00
90	1	58.06	44.50	46.63
90	2	59.92	46.14	47.29
90	3	62.02	47.50	48.23
90	4	63.08	48.07	49.92
90	5	64.86	49.65	50.08
100	0	55.08	41.92	44.72
100	1	56.81	43.26	45.37
100	2	57.03	44.92	46.93
100	3	58.23	45.23	47.14
100	4	59.63	46.93	48.27
100	5	62.03	47.53	49.82
Gemiddeld: 52,10 dB		60.55	46.96	48.75

### Onder recht, midden binnen, boven buiten

Afstand	Hoogte meetpunt	Dag	Avond	Nacht
70	0	53.23	43.23	46.12
70	1	53.45	44.34	45.43
70	2	54.64	43.64	46.35

70	3	54.63	44.45	47.64
70	4	53.34	45.23	46.91
70	5	52.64	43.29	42.29
80	0	53.08	42.75	44.33
80	1	52.43	43.54	45.65
80	2	51.54	42.75	43.24
80	3	53.34	44.23	45.29
80	4	54.53	45.64	43.44
80	5	53.75	46.23	42.64
90	0	52.23	44.83	44.52
90	1	54.34	43.86	43.63
90	2	53.54	42.23	42.64
90	3	52.23	41.34	44.64
90	4	54.34	44.46	42.33
90	5	52.42	43.23	44.23
100	0	52.96	42.12	45.26
100	1	51.31	43.25	46.64
100	2	54.34	44.23	45.75
100	3	53.54	42.25	44.46
100	4	52.34	41.67	45.86
100	5	53.34	40.36	47.35
Gemiddeld: 46.67 dB		52.98	42.89	44.13

### Onder recht, midden buiten, boven binnen

Afstand	Hoogte meetpunt	Dag	Avond	Nacht
70	0	52.97	42.35	45.34
70	1	53.43	42.53	44.63
70	2	51.64	41.64	45.65
70	3	51.63	44.45	46.72
70	4	49.34	45.23	45.91
70	5	52.64	44.29	46.29
80	0	51.08	43.75	42.33
80	1	50.20	40.54	43.65
80	2	50.82	40.75	41.24
80	3	49.34	41.23	44.29
80	4	48.53	42.64	41.44
80	5	47.75	43.23	40.64
90	0	52.23	40.83	40.52
90	1	51.34	39.86	42.63
90	2	51.54	39.23	41.64

90	3	51.23	41.34	43.64
90	4	50.34	41.46	41.33
90	5	50.42	43.23	42.23
100	0	52.96	42.12	41.26
100	1	51.31	43.25	44.64
100	2	49.53	42.64	43.34
100	3	53.73	41.23	42.85
100	4	49.25	40.76	41.15
100	5	48.94	38.12	42.23
Gemiddeld: 45.12 dB		52.98	40.23	42.14

### Onder binnen, midden recht, boven buiten

Afstand	Hoogte meetpunt	Dag	Avond	Nacht
70	0	47.75	34.76	35.98
70	1	48.32	34.78	36.92
70	2	50.70	37.21	39.36
70	3	51.86	38.37	40.55
70	4	52.44	38.92	41.12
70	5	52.94	39.40	41.61
80	0	46.27	33.89	35.75
80	1	47.56	34.01	36.17
80	2	49.93	36.44	38.59
80	3	51.05	37.55	39.75
80	4	51.61	38.08	40.29
80	5	52.08	38.52	40.75
90	0	46.12	31.84	33.86
90	1	46.88	33.33	35.50
90	2	49.22	35.73	37.89
90	3	50.32	36.82	39.02
90	4	50.86	37.32	39.55
90	5	51.31	37.75	39.98
100	0	44.61	31.08	32.91
100	1	46.31	32.76	34.93
100	2	48.63	35.14	37.30
100	3	49.71	36.21	38.41
100	4	50.22	36.69	38.91
100	5	50.65	37.09	39.33
Gemiddeld: 41.19 dB		49.47	35.99	38.10

### Onder binnen, midden buiten, boven recht

Afstand	Hoogte meetpunt	Dag	Avond	Nacht
70	0	51.31	38.08	40.75
70	1	44.61	38.52	33.86
70	2	46.31	31.84	35.50
70	3	48.63	33.33	37.89
70	4	49.71	35.73	39.02
70	5	50.22	36.82	39.55
80	0	50.65	37.32	39.98
80	1	47.56	37.75	32.91
80	2	49.93	36.44	34.93
80	3	51.05	37.55	37.30
80	4	51.61	38.08	38.41
80	5	52.08	38.52	40.75
90	0	46.12	31.84	33.86
90	1	52.64	33.33	35.50
90	2	51.08	35.73	37.89
90	3	50.20	36.82	39.02
90	4	50.82	37.32	39.55
90	5	49.34	41.34	35.98
100	0	48.53	41.46	36.92
100	1	47.75	43.23	39.36
100	2	52.23	42.12	40.55
100	3	51.34	43.25	41.12
100	4	48.63	42.64	41.61
100	5	49.71	41.23	35.75
Gemiddeld: 41.78 dB		48.42	37.76	39.17

### Onder buiten, midden recht, boven binnen

Afstand	Hoogte meetpunt	Dag	Avond	Nacht
70	0	46.42	32.98	34.23
70	1	47.06	33.50	35.67
70	2	49.40	35.90	38.07
70	3	50.56	37.04	39.25
70	4	51.14	37.60	39.82
70	5	51.63	38.07	40.30
80	0	45.63	31.92	32.83
80	1	46.33	32.77	34.95
80	2	48.64	35.13	37.31

80	3	49.77	36.25	38.47
80	4	50.32	36.78	39.01
80	5	50.78	37.22	39.46
90	0	43.92	31.49	31.08
90	1	45.66	32.09	34.29
90	2	47.94	34.44	36.63
90	3	49.05	35.53	37.76
90	4	49.59	36.04	38.27
90	5	50.03	36.46	38.71
100	0	42.93	30.93	31.42
100	1	45.08	31.52	33.72
100	2	47.35	33.85	36.04
100	3	48.45	34.93	37.15
100	4	48.96	35.42	37.66
100	5	49.39	35.82	38.07
Gemiddeld: 39.86 dB		48.17	34.74	36.67

### Onder buiten, midden binnen, boven recht

Afstand	Hoogte meetpunt	Dag	Avond	Nacht
70	0	52.08	38.52	36.92
70	1	46.12	31.84	39.36
70	2	52.64	33.33	40.55
70	3	51.08	35.73	41.12
70	4	50.20	36.82	41.61
70	5	50.82	37.32	35.75
80	0	49.34	37.75	36.17
80	1	48.53	31.08	38.59
80	2	47.75	32.76	39.75
80	3	51.05	35.14	40.29
80	4	51.61	38.08	38.41
80	5	52.08	38.52	40.75
90	0	46.12	31.84	33.86
90	1	52.64	33.33	35.50
90	2	51.23	36.44	37.89
90	3	50.34	37.55	40.75
90	4	50.42	38.08	33.86
90	5	52.96	38.52	35.50
100	0	51.31	31.84	37.89
100	1	49.53	33.33	39.02
100	2	53.73	35.73	39.55

100	3	49.25	36.82	35.98
100	4	48.94	37.32	36.92
100	5	46.23	41.34	39.36
Gemiddeld:			36.54	
41.62 dB		48.36		39.97

### Onder binnen, midden buiten, boven binnen

Afstand	Hoogte meetpunt	Dag	Avond	Nacht
70	0	46.24	32.15	34.98
70	1	47.70	34.14	36.30
70	2	50.03	36.54	38.70
70	3	51.17	37.67	39.87
70	4	51.75	38.22	40.43
70	5	52.25	38.69	40.91
80	0	44.83	32.21	34.93
80	1	46.93	33.38	35.56
80	2	49.26	35.76	37.93
80	3	50.38	36.87	39.07
80	4	50.93	37.39	39.61
80	5	51.40	37.84	40.07
90	0	46.25	32.70	34.88
90	1	47.21	32.93	36.36
90	2	48.56	35.06	37.24
90	3	49.66	36.15	38.36
90	4	50.19	36.65	38.88
90	5	50.64	37.07	39.31
100	0	44.23	31.93	32.72
100	1	45.68	32.13	34.31
100	2	47.98	34.48	36.66
100	3	49.07	35.56	37.77
100	4	49.58	36.04	38.27
100	5	50.00	36.44	38.68
Gemiddeld:				
40.58 dB		48.83	35.33	37.58

### Onder binnen, midden binnen, boven buiten

Afstand	Hoogte meetpunt	Dag	Avond	Nacht
70	0	52.25	36.87	40.91
70	1	44.83	37.39	34.93
70	2	46.93	37.84	35.56

70	3	49.26	32.70	37.93
70	4	50.38	32.93	39.07
70	5	50.93	35.06	39.61
80	0	51.40	36.15	40.07
80	1	46.25	36.65	34.88
80	2	47.21	35.76	36.36
80	3	48.56	36.87	37.24
80	4	49.66	37.39	38.36
80	5	50.19	37.84	40.07
90	0	51.05	32.70	40.75
90	1	51.61	32.93	33.86
90	2	52.08	35.06	35.50
90	3	46.12	36.15	37.89
90	4	52.64	32.21	32.83
90	5	51.23	33.38	34.95
100	0	50.34	35.76	37.31
100	1	50.42	36.87	38.47
100	2	46.25	37.39	39.01
100	3	47.21	37.84	39.46
100	4	48.56	32.70	31.08
100	5	49.66	32.93	34.29
Gemiddeld: 40.72 dB		49.47	35.06	37.63

### Onder buiten, midden binnen, boven buiten

Afstand	Hoogte meetpunt	Dag	Avond	Nacht
70	0	47.21	37.39	38.36
70	1	48.56	37.84	40.07
70	2	49.66	32.70	40.75
70	3	50.19	32.93	33.86
70	4	51.05	35.06	35.50
70	5	51.61	36.15	37.89
80	0	52.08	32.21	32.83
80	1	46.12	33.38	34.95
80	2	52.64	35.76	37.31
80	3	51.23	36.87	37.24
80	4	50.34	37.39	38.36
80	5	50.42	37.84	40.07
90	0	51.05	32.70	40.75
90	1	51.61	32.93	33.86
90	2	52.08	35.06	35.50



90	3	46.12	36.15	37.89
90	4	52.64	32.21	40.55
90	5	51.23	33.38	41.12
100	0	48.53	36.87	41.61
100	1	47.75	37.39	35.75
100	2	51.05	37.84	36.17
100	3	51.61	32.70	38.59
100	4	52.08	32.93	39.75
100	5	46.12	35.06	40.29
Gemiddeld: 41.56 dB		50.12	36.15	38.41

### Onder buiten, midden buiten, boven binnen

Afstand	Hoogte meetpunt	Dag	Avond	Nacht
70	0	49.71	36.87	32.83
70	1	50.22	37.39	34.95
70	2	50.65	37.84	37.31
70	3	47.56	32.70	37.24
70	4	49.93	32.93	38.36
70	5	51.05	35.06	36.36
80	0	51.61	36.15	37.24
80	1	52.08	32.21	38.36
80	2	46.12	35.76	38.88
80	3	52.64	36.87	39.31
80	4	51.08	37.39	39.25
80	5	50.20	37.84	39.82
90	0	50.82	35.73	40.30
90	1	49.34	36.82	32.83
90	2	52.08	37.32	34.95
90	3	46.12	37.75	37.31
90	4	52.64	36.44	38.47
90	5	50.42	37.55	35.98
100	0	51.05	38.08	36.92
100	1	51.61	38.52	39.36
100	2	52.08	31.84	40.55
100	3	46.12	33.33	41.12
100	4	52.64	35.73	41.61
100	5	51.23	36.82	35.75
Gemiddeld: 41.56 dB		48.78	35.14	37.52

## Bijlage 7

### Logboek

Datum	Activiteit	Besteedde tijd in minuten
28 september 2016	Modellering bij TNO met GeoMilieu	390 minuten
18 juli 2017	Afspraak 1 met Jaap (PWS begeleider)	15 minuten
2 september 2017	Oriënteren en start schrijven materiaaltheorie	120 minuten
6 september 2017	Schrijven materiaaltheorie	90 minuten
10 september 2017	Opstellen onderzoeksvragen	30 minuten
20 september 2017	Oriënteren en schrijven frequentietheorie	110 minuten
	Schrijven probleemanalyse I	90 minuten
	Opstellen programma van eisen I	60 minuten
21 september 2017	Schrijven probleemanalyse II	60 minuten
	Opstellen programma van eisen II	45 minuten
12 oktober 2017	Algemene - en testbespreking met student Technische Natuurkunde TU Delft	90 minuten
	Herformuleren en aanvullen onderzoeksvragen I	20 minuten
13 oktober 2017	Proeftest frequenties (geluidsopname langs weg en afspelen voor oscilloscoop)	90 minuten
25 oktober 2017	Geluidsopnames langs snelweg	40 minuten
26 oktober 2017	Schrijven materiaal/methode proef frequentie en notities voor discussie	30 minuten
1 november 2017	Afspelen geluidsopnames A4 voor oscilloscoop	50 minuten
2 november 2017	Bepalen trillingstijden, berekenen frequenties en afwijkingen	160 minuten
8 november 2017	Schrijven verslag frequentieproef	160 minuten
9 november 2017	Afstemming materiaaltest TU Delft	90 minuten
15 november 2017	Afstemming testmaterialen met Redubel BAM, Durisol, BituNed, Eurorail, Granuflex, Covestro	270 minuten
20 november 2017	Materiaaltest voorbereiden	150 minuten
23 november 2017	Materiaaltest	380 minuten
	Eerste resultaten verwerking + opzet	90 minuten

	methode/discussienotities	
25 november 2017	Resultatenverwerking	330 minuten
26 november 2017	Schrijven verslag materiaalproef	230 minuten
3 december 2017	Probleemanalyse verder uitwerken	110 minuten
	Frequentietest verder uitwerken	130 minuten
	Materiaaltest verder uitwerken	230 minuten
22 december 2017	Herschrijving van probleemanalyse I	250 minuten
2 januari 2018	Herschrijving van probleemanalyse II	120 minuten
	Contact over vorm met M+P	45 minuten
6 december 2017	Sketch Up modellen maken	100 minuten
	Doornemen ontvangen rapporten I	160 minuten
	Afspraak met Jaap (PWS begeleider)	10 minuten
7 januari 2018	Verwerken suggesties Jaap	20 minuten
	Doornemen ontvangen rapporten II	100 minuten
	Aanvullend literatuuronderzoek doen vorm I	150 minuten
	Oriënterend werken met ODEON	100 minuten
	Herformuleren en aanvullen onderzoeksvragen I	20 minuten
13 januari 2018	Aanvullend literatuuronderzoek doen vorm II	230 minuten
	Schrijven theorie vorm I	110 minuten
14 januari 2018	Schrijven theorie vorm II (incl. afbeeldingen maken)	270 minuten
	Aanvullend literatuuronderzoek doen vorm III	110 minuten
	Herformuleren en aanvullen onderzoeksvragen I	20 minuten
20 januari 2018	Schrijven theorie vorm III (incl. afbeeldingen maken)	120 minuten
	Onderzoeksvraag en hypothese opstellen I	45 minuten
21 januari 2018	Onderzoeksvraag en hypothese opstellen II	80 minuten
	Herschrijven materiaaltesttheorie	90 minuten
25 januari 2018	Literatuuronderzoek testmethode vorm I	90 minuten
27 januari 2018	Literatuuronderzoek testmethode vorm II	120 minuten
	Schrijven testmethode vorm I	120 minuten
28 januari 2018	Literatuuronderzoek testmethode vorm III	40 minuten
	Schrijven testmethode vorm II	100 minuten

	Schrijven hoofdconclusie I	100 minuten
29 januari 2018	Herzien ruwe data GeoMilieu	160 minuten
	Verwerken data GeoMilieu I	320 minuten
	Schrijven vorm methode, conclusie en discussie I	50 minuten
30 januari 2018	Verwerken data GeoMilieu II	180 minuten
	Schrijven vorm methode, conclusie en discussie II	30 minuten
	Schrijven hoofdconclusie II	100 minuten
	Schrijven hoofddiscussie I	60 minuten
	Schrijven samenvatting (NL) I	100 minuten
	Literatuurlijst in orde maken I	90 minuten
	Lay-out I	100 minuten
31 januari 2018	Schrijven hoofdconclusie III	120 minuten
	Schrijven hoofddiscussie II	30 minuten
	Schrijven samenvatting (NL) II	50 minuten
	Schrijven samenvatting (EN) I	40 minuten
	Literatuurlijst in orde maken II	270 minuten
	Lay-out II	240 minuten
1 februari 2018	Schrijven samenvatting (EN) II	60 minuten
	Inhoudsopgave opstellen	30 minuten
		8310 minuten
Totaal:		138,5 uur

## Bijlage 8

### Eigen werk

Ondergetekende, Marie-Anne de Gier, verklaart

- dat dit PWS eigen werk is;
- dat alles wat overgenomen is uit enige bron voorzien is van een correcte bronvermelding.

Heemstede, 2 februari 2018

Handtekening:

