

HET POTENTIEEL VAN STEENKORVEN ALS INDIVIDUELE GELUIDSREDUCERENDE MAATREGEL

Aantal woorden: 13.426

Ine Van Ginderachter

Stamnummer: 01605523

Promotor: Prof. dr. ir. Timothy Van Renterghem

Masterproef voorgelegd voor het behalen van de graad Master of Science in de milieusanering en het milieubeheer

Academiejaar: 2016 - 2017

Woord vooraf

In kader van mijn studie Master na Master in de Milieusanering en het Milieubeheer heb ik onderzoek uitgevoerd naar het potentieel van steenkorven als individuele geluidsreducerende maatregel. Graag wil ik de mensen bedanken die me geholpen hebben bij het verwezenlijken van deze masterproef.

In de eerste plaats wil ik mijn promotor, Timothy Van Renterghem, bedanken. Zijn begeleiding, advies en feedback waren een grote hulp bij het schrijven van deze thesis. Met al mijn vragen kon ik bij hem terecht waarna hij met zijn vakkennis een duidelijk en gestructureerd antwoord gaf. Bij problemen kon ik altijd binnen springen op zijn kantoor. Ook wil ik graag Pieter Thomas bedanken, zijn begeleiding en uitleg bij de metingen waren zeer leerrijk en nuttig.

Daarnaast wil ik ook Betafence bedanken en meer bepaald meneer Bastiaen. Hij stond me altijd te woord bij vragen en heeft me de eerste dag veel geholpen bij het installeren van de steenkorven. Ook de materialen waren steeds aanwezig en wanneer duidelijk werd dat er niet genoeg Europaletten aanwezig waren, werden deze meteen geleverd. Betafence maakte het mogelijk om deze masterproef te realiseren dankzij de vlotte samenwerking en hun bereidwilligheid.

Vervolgens wil ik mijn vrienden bedanken die me hebben meegeholpen bij het vullen en het legen van de steenkorven. In totaal hebben we meer dan 5000 kg stenen versleurd. Het was een zeer intensieve week maar met veel enthousiasme zijn we erin geslaagd om alle metingen uitvoeren.

Tenslotte wil ik mijn ouders bedanken voor hun onvoorwaardelijke steun en geloof in mij. Ze hebben me altijd de kans gegeven om verder te studeren en hebben me doorheen dit jaar dan ook goed geholpen. Alsook Vincent mijn vriend die me altijd deed lachen en in mij bleef geloven. Al deze mensen hebben het mogelijk gemaakt om deze masterproef te verwezenlijken.

Inhoudsopgave

Woord vooraf	i
Inhoudsopgave	ii
Lijst van afkortingen	iv
Samenvatting	v
1 Literatuurstudie	1
1.1 Geluid	1
1.2 Bronnen geluidshinder	1
1.2.1 Wegverkeer	1
1.2.2 Wegverkeer in Vlaanderen	2
1.3 Reduceren van geluidblootstelling	3
1.4 Geluidsschermen	3
1.4.1 Geluidsschermen langs autosnelwegen	5
1.4.2 Geluidsschermen in stedelijke gebieden	6
1.5 Beleidskader geluidshinder	8
1.5.1 Richtlijn omgevingslawaaï	8
1.5.2 Milieukwaliteitsnormen	8
1.6 Meetmethode geluidsbarrière	9
1.6.1 Europese standaard CEN/TS 1793-5	9
1.7 Onderzoeksopzet	10
2 Methode	12
2.1 Opzet metingen	12
2.2 Soort steenkorven	13
2.3 Verloop metingen	14
3 Resultaten	17
3.1 Herhaalbaarheid bij vaste positionering bron en microfoon	17
3.2 Positioneringsfout microfoons en bron	19
3.3 Spectrale insertion loss	19
3.3.1 Opstelling 1	19
3.3.2 Opstelling 2	20
3.3.3 Opstelling 3	21
3.3.4 Opstelling 4	23
3.4 Metalen frame	24
3.5 Steenkorf 2-140 cm	24
3.6 Totale insertion loss voor wegverkeersgeluid	25

3.6.1	Verkeerssamenstelling	26
4	Discussie	28
4.1	Efficiëntie steenkorven	28
4.2	Steenkorf- haag- conventionele geluidsbarrière.....	29
5	Conclusie	31
6	Referenties.....	32

Lijst van afkortingen

DABM	Decreet houdende de algemene bepaling inzake milieubeleid
dB	Decibels
Departement LNE	Departement leefmilieu, natuur en energie
FHWA	Federal Highway Administration
Hz	Hertz
IL	Insertion loss
L_{den}	Level day- evening en night
L_{night}	Level night
MLS	Maximum length sequence
SWP-lin	lineaire sweep
SWP-log	logaritmische sweep
WN	White noise

Samenvatting

Blootstelling aan geluid in Vlaanderen is een milieuprobleem dat nog steeds zeer relevant is, als gevolg van het dichte wegennetwerk, het groeiende wagenpark, de toename in aantal gereden kilometers en de hoge bevolkingsdichtheid. Deze verhoogde blootstelling aan voornamelijk wegverkeersgeluid leidt tot ernstige hinder en gezondheidsproblemen. Vlaanderen probeert de blootstelling aan geluid te verminderen aan de hand van geluidskaarten en actieplannen. Er bestaan momenteel echter nog geen duidelijke milieukwaliteitsnormen. Tot op heden baseert de overheid zich op een plandrempel, van $L_{den} > 70$ dB, ter prioritering van zijn acties. Deze acties kunnen zowel overdrachtgerichte als ontvanger- en brongerichte maatregelen zijn.

Wanneer een particulier hinder ervaart als gevolg van de blootstelling aan wegverkeersgeluid en de overheid geen geluidsreducerende maatregelen treft dan kan er overgegaan worden tot individuele bescherming zoals lage geluidsbarrières. Conventionele hoge geluidsschermen zijn wegens esthetische en financiële redenen vaak niet toepasbaar in stedelijke gebieden. Een haag daarentegen zorgt slechts voor een beperkte reductie van enkele dB. Steenkorven kunnen een alternatief zijn. Ze vergen geen onderhoud en kennen een stijgende populariteit. Eerder onderzoek wees uit dat een hogere geluidsreductie kan bereikt worden dan met een klassieke vegetatiehaag. In deze masterproef werd getracht een antwoord te geven op de vraag “Beïnvloedt een lage steenkorf de voortplanting van geluid, onder gecontroleerde labo-omstandigheden?”. Hierbij werd specifiek gekeken naar de dikte en het soort steen.

In totaal werden drie steenkorven in detail uitgemeten. Steenkorf 1 heeft een dikte van 20 cm en is opgevuld met keien. Steenkorf 2 heeft een dikte van 20 cm en is opgevuld met lavastenen. Steenkorf 3 heeft een dikte van 30 cm en is eveneens opgevuld met lavastenen. Alle steenkorven hebben een hoogte van 1,6 m en een lengte van 3 m. De steenkorven werden getest bij vier verschillende opstellingen, waarbij gekeken werd naar het verschil bij een harde en een zachte bodem en het verschil in positie van de bron en microfoons. De geluidsreductie bij elke opstelling werd gemeten via de zogenaamde *insertion loss*.

De metingen wezen uit dat steenkorf 3 het meeste geluid reduceert. De lavastenen zijn poreuzer dan keien en zullen het geluid deels absorberen. De absorptie zorgt ervoor dat er minder ongewilde reflectie plaatsvindt naar de overkant. Een grotere dikte bij steenkorf 3 zorgt voor een extra reductie als gevolg van de grotere golflengtes die geabsorbeerd worden. Steenkorf 1, opgebouwd uit keien reduceert het minste geluid. De keien zorgen voor reflectie en geen absorptie. Steenkorf 2 heeft een efficiëntie tussenin als gevolg van de kleinere dikte dan steenkorf 3 maar een absorberende steen in vergelijking met de keien van steenkorf 1. Kortom een steenkorf met een grotere dikte en met absorberende stenen resulteert in de hoogste geluidsreductie.

In dit onderzoek werd ook experimenteel vastgesteld dat het type bodem waarop de steenkorf staat van belang is. Op een harde bodem zal de efficiëntie van de geluidsreducerende maatregel groter zijn. De IL van een steenkorf is namelijk lager bij zachte bodem als gevolg van het bodemeffect dat voor een groot stuk wegvalt. Daarnaast heeft ook de afstand van de bron ten opzichte van de steenkorf een invloed op de geluidsreductie wat typisch is voor elke vorm van schermwerking. Wanneer de bron dicht bij de steenkorf werd geplaatst, werd er een stijging in IL waargenomen bij de steenkorf 1 en 2. Tot slot reduceert een steenkorf voornamelijk de hoge frequenties. Dit omdat lage frequenties

makkelijker afbuigen overheen het scherm alsook via transmissie doorheen de stenen ontvangers bereiken.

Er kan geconcludeerd worden dat steenkorven nuttig kunnen zijn als individuele maatregel om geluid te reduceren in stedelijke gebieden. Zij bieden een hogere geluidsreductie aan dan hagen. Dergelijke lage geluidbarrières vormen een oplossing voor het reduceren van wegverkeersgeluid in stedelijke gebieden wanneer de overheid geen acties onderneemt. Een steenkorf met absorberend materiaal zoals lavastenen verdient de voorkeur. Voor een korf van 1,6 m hoog en een dikte van 30 cm werd op basis van de metingen de totale verkeersgeluidsreductie (stadsverkeer) geschat op 4,5 dB(A).

1 Literatuurstudie

1.1 Geluid

Blootstelling aan geluid kan zowel positieve als negatieve effecten hebben. Zo zal aangenaam geluid zoals muziek en lachende mensen het algemeen welbevinden van de mens bevorderen. Geluiden die als storend ervaren worden, kunnen leiden tot fysische en psychische klachten. Fysische klachten als gehoorschade, cardiovasculaire klachten en slaapverstoring komen voor bij blootstelling aan geluid. Voorbeelden van psychische klachten zijn onder meer geluidshinder en vermoeidheid. De effecten van blootstelling aan geluid zijn afhankelijk van de karakteristieken van het geluid zoals: duur, intensiteit, scherpste, tonaliteit en de niet-akoestische factoren zoals individuele gevoeligheid, verwachtingen en persoonlijke belangen. Bij chronische blootstelling aan geluid kan hinder ontstaan, die dan op zijn beurt stress en andere gezondheidsklachten veroorzaakt. Er is sprake van geluidshinder, wanneer het geluid als ongewenst ervaren wordt in de persoonlijke leefomgeving. Hinder is sterk gerelateerd aan de mate waarin geluid de dagelijkse activiteiten verstoort. Tevens wordt hinder ook sterk beïnvloed door de karakteristieken van de blootstelling, de omgeving en persoonsgebonden factoren (Bockstael et al., 2012).

1.2 Bronnen geluidshinder

Diverse bronnen kunnen aan de basis liggen van geluidshinder, waaronder de industrie, de bevolking (burenlawaai), de energiesector (windturbines) en het transport. Transport (weg- spoor- en vliegverkeer) veroorzaakt het meeste geluidshinder in Vlaanderen (Botteldooren et al., 2007).

1.2.1 Wegverkeer

De geluidsterkte van verkeerslawaai is afhankelijk van de kenmerken van het verkeer (verkeerssamenstelling, verkeersintensiteit, snelheid, versnelling, enz.) de afstand tussen de bron en de ontvanger, de omgeving en meer specifiek het weer.

Kenmerken van het verkeer

De emissie van geluid is recht evenredig met de verkeersintensiteit, bij een verdubbeling van het aantal auto's zal een stijging van 3 dB waargenomen worden. Naast verkeersintensiteit kan ook het voertuigtype een invloed hebben op de mate van geluidsblootstelling. Zwaardere voertuigen zoals vrachtwagens en bussen zenden meer geluid uit dan personenwagens. Tevens dragen snelheid en ritdynamiek bij tot de geluidsblootstelling van verkeer. Naarmate de auto sneller rijdt, zal het motorgeluid en rolgeluid toenemen. Rolgeluid ontstaat ter hoogte van het wiel en is toe te wijzen aan mechanische en aerodynamische effecten. Rolgeluid bij personenwagens overheerst het motorgeluid bij snelheden hoger dan 50-60 km/u. Rolgeluid bij vrachtwagens overheerst het motorgeluid bij snelheden hoger dan 80-90 km/u. Dit wil zeggen dat in de bebouwde kom, waar maximaal 50 km/u mag gereden worden, het motorgeluid van personenwagens en vrachtwagens voornamelijk de blootstelling aan geluid veroorzaakt. De ritdynamiek of ook wel de variaties in snelheid kunnen aanleiding geven tot verschillende niveaus van blootstelling aan geluid. Wanneer een wagen versnelt, wordt een hoger geluidsdruk niveau waargenomen in vergelijken met een wagen die tegen een constante snelheid rijdt (Departement Leefmilieu Natuur en Energie [Departement LNE], s.d.).

Afstand bron ontvanger

Naarmate de afstand tussen de bron en de ontvanger groter is, zal het geluidsdrukniveau afnemen. Dit is vanwege het grotere oppervlak waarover de geluidsenergie verspreid wordt. Een verdubbeling in afstand resulteert in een vermindering van de geluidsenergie met een factor vier, met andere woorden een daling van 6 dB. Eén enkele auto kan als een puntbron voorgesteld worden, echter het verkeer bestaat uit meerdere auto's of ook wel meerdere puntbronnen. Dit wordt ook wel een lijnbron genoemd, hierbij spreidt het geluid zich cilindrisch uit. De relatie tussen geluidsenergie en afstand verloopt dan als $1/r$ waarbij r de afstand is ten opzichte van de weg. Dit wil zeggen dat bij een verdubbeling van de afstand, de geluidsenergie met factor 2 afneemt en het geluidsdrukniveau met 3 dB afneemt (Departement LNE, s.d.).

Omgeving

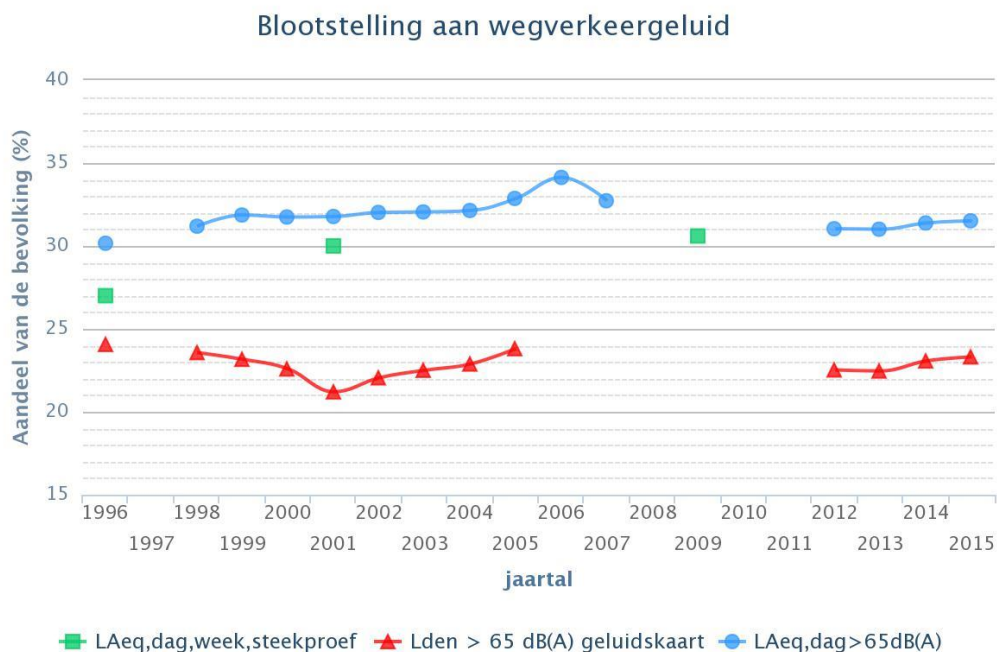
De helling van de weg heeft een invloed op de geluidspropagatie. Zo kan een hellende weg ervoor zorgen dat het geluidsdrukniveau toeneemt, aangezien er meer vermogen moet geleverd worden door de auto. Daarnaast zal geluid interageren met de bodem, deze interactie kan zowel versterking als verzwakking veroorzaken. Tot slot kunnen obstakels de geluidsblootstelling doen dalen. Zowel de interactie met de bodem als de soorten obstakels voor wegverkeersgeluid worden uitvoerig besproken in onderdeel 1.4.

Weer

Het temperatuursprofiel heeft een belangrijke invloed op geluidsblootstelling. Bij zonnig en windstil weer neemt de temperatuur af bij toenemende hoogte. Hierdoor zullen de geluidsgolven naar boven toe afbuigen, waardoor een schaduwzone wordt gevormd (lagere geluidsdrukniveau) op een afstand van de bron. Wanneer de bovenste luchtlagen echter warmer zijn dan de onderste luchtlagen zullen de geluidsgolven naar beneden toe afbuigen waardoor het geluidsdrukniveau toeneemt. Deze situatie doet zich vaak voor in de nacht. Daarnaast heeft wind ook een belangrijke invloed. Wanneer een geluidsgolf in dezelfde richting als de wind propageert, zal deze afbuigen naar beneden. Echter wanneer een geluidsgolf tegen de wind in propageert, zal deze naar boven toe afbuigen en zo ook een schaduwzone vormen. Bij een temperatuursinversie of met de wind mee propageren zal de geluidsgolf afbuigen achter het geluidsschermb. Hierdoor is de schermwerking nagenoeg afwezig, wanneer de afstand tussen de ontvanger en de barrière meer als 200m bedraagt (Departement LNE, s.d.). Een mogelijk oplossing hiervoor is het plaatsen van een vegetatie zone, bijvoorbeeld een rij bomen achter de geluidsschermen zodat de windsnelheid afneemt (Van Renterghem et al., 2015a).

1.2.2 Wegverkeer in Vlaanderen

De blootstelling van de bevolking aan wegverkeer wordt opgevolgd met behulp van een set aan indicatoren. Een veel gebruikte indicator is het percentage van de bevolking in Vlaanderen dat wordt blootgesteld aan geluidsdrukniveaus hoger dan 65 dB(A) (Botteldooren et al., 2007). Op figuur 1 is de evolutie van het percentage van de bevolking blootgesteld aan geluidsdrukniveaus boven de 65 dB(A) ten gevolge van wegverkeer in Vlaanderen tussen 1996 en 2015 weergegeven. De figuur toont aan dat er nog geen dalende trend in blootstelling aan geluid werd gerealiseerd.



Figuur 1. Evolutie van het percentage van de bevolking blootgesteld aan geluidsdrukniveaus boven de 65 dB(A) ten gevolge van wegverkeer (Van Steertegem, 2014).

1.3 Reduceren van geluidblootstelling

Om geluidsblootstelling te beperken kunnen er brongerichte, overdrachtgerichte en ontvangergerichte maatregelen genomen worden. Brongerichte maatregelen zijn onder meer het toepassen van nieuwe technologieën op motoren of stille wegbedekkingen om het geluid te reduceren. Stille motoren zoals hybride en elektrische motoren dragen bij tot het reduceren van geluidsemissies in gebieden waar het motorgeluid domineert (Bossuyt, 2013). Voorbeelden van overdrachtgerichte maatregelen zijn afstandsregels en geluidschermen. Afstandsregels legt een minimumafstand op voor een bepaalde activiteit ten opzichte van een dicht bebouwd gebied. Geluidschermen of het plaatsen van groene zones kunnen het geluid verstrooien en alzo reduceren. Bij het plaatsen van geluidschermen wordt er een daling van het geluidsdrukniveau waargenomen van typisch 5 tot 12 dB(A). Ontvangergerichte maatregelen proberen de immissie, ter hoogte van de ontvanger, te beperken. Het plaatsen van goede isolatie en dubbele beglazing kunnen de immissie in een huis aanzienlijk verminderen (Bossuyt, 2013). In kader van deze studie wordt er verder ingegaan op overdrachtgerichte maatregel, meer bepaald geluidsschermen.

1.4 Geluidsschermen

Bij afwezigheid van een geluidsscherm kan geluidsoverdracht zich voordoen door enerzijds directe propagatie van de bron naar de ontvanger toe en anderzijds door de reflectie van de geluidsgolf op de bodem naar de ontvanger toe. Tussen deze geluidsgolven kan constructieve of destructieve interactie optreden (zie verder). Om het geluid te reduceren kan er een geluidsscherm worden geplaatst. Een geluidsscherm is een constructie die bij voorkeur naast de weg of naast een woning wordt geplaatst. Geluidsschermen zorgen ervoor dat de directe voortplanting van geluid tussen bron en ontvanger verhinderd wordt. Er zijn verscheidene factoren waarmee rekening moet gehouden worden bij het

ontwerp en plaatsen van een geluidsscherm. Deze factoren zijn onder meer hoogte, lengte, locatie en continuïteit.

DiffRACTIE

Het introduceren van een geluidsscherm zorgt ervoor dat diffractie plaatsvindt. Hierbij buigen de geluidsgolven af rond de barrière, meer bepaald aan de boven- en zijanten, en komen achter de barrière neer. Echter niet alle frequenties zijn in gelijke mate onderhevig aan diffractie. Dit is afhankelijk van de golflengte en de grootte van de barrière. Hoge frequenties met kleine golflengtes ten opzichte van de barrière worden minder afgebogen dan lage frequenties met grote golflengtes

Reflectie en absorptie

Geluidsenergie invallend op een geluidsscherm kan zowel geabsorbeerd als gereflecteerd worden, enkel een klein deel zal via transmissie doorheen het scherm de ontvanger bereiken. Wanneer een geluidsscherm is opgebouwd uit hard homogeen materiaal, bijvoorbeeld hout of beton, dan kan verwacht worden dat de geluidsgolf wordt gereflecteerd. Geluidschermen opgebouwd uit absorberend materiaal, bijvoorbeeld houtvezels of minerale wol, kunnen het geluid absorberen. Daarnaast kan reflectie optreden bij parallelle geluidsschermen. Doordat deze tegenover elkaar staan, vinden er meerdere reflectie plaats en wordt de efficiëntie van beide geluidsschermen ondermijnd (Kotzen & English, 1999).

Hoogte en lengte

Het plaatsen van een scherm zorgt ervoor dat de geluidsgolven een langere weg moeten afleggen. Naarmate de hoogte van de barrière toeneemt, zal ook de afgelegde weg toenemen dit resulteert in geluidsreductie. De hoogte van het geluidsscherm is afhankelijk van onder andere de gewenste geluidsreductie en de positionering van het geluidsscherm ten opzichte van bron en ontvanger. Over het algemeen moet de barrière het gezichtsveld tussen de ontvanger en de bron verhinderen, opdat geluid wordt gereduceerd. Wanneer er ontvangers zijn die hoger zijn gelegen zoals bij een appartementsgebouw zal ook de hoogte van het geluidsscherm moeten toenemen. Echter dit gaat gepaard met hoge kosten en visuele belemmeringen (Totté, Nulens, Dubois, 2010). Daarnaast moet de barrière lang genoeg zijn zodat er maar een klein deel van het geluid langs de zijkant afbuigt. Daarom is het ook aangewezen om de geluidsbarrière niet meteen te stoppen na de laatste af te schermen woning maar om deze nog voldoende verder te laten lopen. Over het algemeen moet de lengte van een geluidsscherm een hoek van 160 graden bedekken vanuit het standpunt van de ontvanger.

Locatie

De afstand tussen de bron en de barrière of de ontvanger en de barrière moet zo klein mogelijk zijn. Het plaatsen van de barrière zo dicht mogelijk bij de bron is het meest voorkomend. Echter bij een helling waar de weg beneden is gelegen en de woning boven, is het efficiënter om de barrière bovenaan te plaatsen.

Continuïteit

Onderbrekingen in de geluidsbarrière zorgen ervoor dat deze minder efficiënt zal zijn. Het is dus van belang om een continue geluidsbarrière te ontwerpen zowel horizontaal als verticaal. Indien de barrière toch onderbroken wordt, bijvoorbeeld voor toegangswegen voor voetgangers of fietsers, is het aangewezen om de verschillende stukken van de barrières te laten overlappen.

Zachte en harde bodem

Harde bodems, zoals beton en water, zijn bodems waarbij het invallende geluid voornamelijk wordt gereflecteerd, dit resulteert in een stijging van het geluidsdrukniveau (maximum 6 dB t.o.v. de afwezigheid van een bodemvlak). Zachte bodems, zoals graslanden, weilanden en akkerlanden, daarentegen zijn absorberend en kunnen de fase van de invallende geluidsenergie veranderen. Bij afwezigheid van een barrière zal het geluid propageren over de bodem en zal er demping voorkomen als gevolg van bodemabsorptie, dit is afhankelijk van het type bodem.

Naast absorptie van de geluidsenergie in de bodem is er ook een andere vorm van demping namelijk het bodemeffect. Hierbij is er interactie tussen de directe geluidsgolf van de bron naar de ontvanger toe en tussen het geluid dat door de bodem gereflecteerd wordt. De interactie is afhankelijk van het verschil in weglengte tussen het directe pad en het gereflecteerde pad. De grootte van dit verschil is afhankelijk van de afstand tussen de bron en ontvanger en de bron- en ontvangershoogte. Bij harde bodems komen destructieve of constructieve interferenties voor bij zeer hoge frequenties. De frequenties zijn te hoog om een invloed te hebben op het verkeersspectrum. Hieruit volgt dat de aanwezigheid van een harde bodem globaal leidt tot een verdubbeling van het geluidsdrukniveau. Bij zachte bodems daarentegen treden er destructieve interferenties op in een nuttig frequentiegebied voor omgevingslawaaibronnen. Wanneer er op een zachte bodem een geluidsbarrière wordt geplaatst, verkrijgt men een lagere *insertion loss* (IL). De IL is gelijk aan het verschil van het geluidsdrukniveau voordat de barrière is geplaatst en het geluidsdrukniveau nadat de barrière is geplaatst. De lagere IL kan verklaard worden doordat het bodemeffect wegvalt. Het plaatsen van een geluidsbarrière moet afgewogen worden met de reeds verkregen reductie als gevolg van het bodemeffect (Embleton, 1996). Echter wanneer een geluidbarrière wordt geplaatst, op een harde bodem, verkrijgt men een hogere IL. Dit omdat er meer geluidsreductie is bij aanwezigheid van de steenkorf dan bij afwezigheid. Er kan geconcludeerd worden dat een geluidsbarrière relatief efficiënter is op een harde dan op een zachte bodem (Van Renterghem et al., 2015a).

1.4.1 Geluidsschermen langs autosnelwegen

Reflecties zorgen voor een verminderde efficiëntie van de geluidsschermen doordat de reflecties over de geluidsschermen heen buigen (Federal highway administration [FHWA], 2011). Er zijn verscheidene opties om deze reflecties te voorkomen. Bijvoorbeeld het verhogen van de geluidsbarrière zou een mogelijke oplossing kunnen zijn. Echter dit gaat gepaard met hoge kosten en visuele belemmeringen. Een alternatieve oplossing is het hellen van het geluidsscherm ten opzichte van de verticale as. Hierdoor zullen de geluidsgolven naar boven toe gereflecteerd worden in plaats van naar de ontvanger toe. Een kanteling van 10 graden of meer is voldoende om de geluidsgolf naar boven toe te reflecteren en zo het afbuigen van de geluidsgolf achter het geluidsscherm te voorkomen. Daarnaast kan ook het plaatsen van geluidsschermen met een absorberend oppervlakte, gericht naar het verkeer toe, de reflectie doen dalen door middel van absorptie van de geluidsenergie (Kotzen & English, 1999). Een reductie van 3,9 dB(A) wordt bekomen wanneer men reflecterende schermen vervangt door absorberende schermen (Watts, 1996). De *noise reduction coefficient* bepaalt of het materiaal absorberend is of niet. Een minimum van 0.85 wordt gebruikt als criterium, dit wil zeggen dat maar 15% van de invallende geluidsenergie wordt gereflecteerd (Hendriks, 1998).

Tevens kunnen bestaande geluidsschermen, opgebouwd uit hard materiaal, meer absorberend worden gemaakt door middel van vegetatie. Defrance et al. (2015) vond dat de vegetatie zelf niet significant bijdraagt tot de absorptie in tegenstelling tot het substraat. De grootste reductie wordt bekomen wanneer

de onderste zones van het geluidsscherm worden bedekt. Naast absorptie, zal het substraat er ook voor zorgen dat er vegetatie kan groeien langs de autosnelwegen. De vegetatie voorkomt graffiti, draagt bij tot de biodiversiteit en verlaagt de luchtimmissies. Een andere mogelijkheid om de efficiëntie van een conventioneel geluidsscherm te verhogen, is het toevoegen van een absorberend materiaal op de top. Bijvoorbeeld een T-vormige geluidsscherm zorgt voor een additionele reductie van 2,7 dB (Pigasse & Kragh, 2011). Ook vegetatiekappen dragen bij tot de geluidsreductie en dit voornamelijk voor voetgangers en fietsers nabij de geluidsbarrière en zones tot op maximum 20 meter achter de barrière. Tot slot kan het plaatsen van bomen achter het geluidsscherm resulteren in een additionele reductie. Afhankelijk van de wind en temperatuur kan geluid achter het scherm neerkomen, hierdoor daalt de efficiëntie aanzienlijk. Het plaatsen van bomen reduceert de windsnelheid en houdt de negatieve werking van de wind tegen. Dit is voordelig voor de ontvangers nabij de geluidsbarrière. Echter ontvangers die verder van de geluidsbarrière zijn gesitueerd, worden blootgesteld aan hogere geluidsdrumniveaus dan voordien (enkel geluidsscherm) (Defrance et al., 2015).

Een mogelijk alternatief voor geluidschermen nabij autosnelwegen zijn bermen. De berm kan een driehoekige of een trapeziumvormige vorm aannemen. Bermen met een verticale zijde gericht naar de weg hebben een hogere afschermingscapaciteit. Het ruwer maken van de oppervlakte van de berm zorgt voor een verhoogde efficiëntie. Het ruwer maken van de top met geschulpte profielen, resulteerde in een additionele demping van 3 tot 7 dB(A). Daarnaast kan het aanbrengen van rechthoekige of driehoekige insnijdingen op het bovenoppervlak van een trapeziumvormige berm de geluidsblootstelling reduceren met respectievelijk 4 en 2 dB(A) (Defrance et al., 2015).

1.4.2 Geluidschermen in stedelijke gebieden

In stedelijke gebieden wordt geluid meerder malen gereflecteerd tussen de verschillende gevels in een straat. Ramen, gevels en de straatoppervlakte zijn akoestisch harde materialen, met andere woorden er is geen absorptie van geluid. Door de verschillende reflecties op deze materialen wordt het geluid, afkomstig van het wegverkeer, versterkt. Een mogelijke oplossing voor het reduceren van wegverkeersgeluid in stedelijke gebieden, is het plaatsen van lage geluidsbarrières. Het gebruiken van hoge barrières is in theorie mogelijk maar in de praktijk is het om veiligheids- en esthetische redenen niet aangewezen. Het plaatsen van een lage geluidsbarrière heeft als voordeel dat het nabij de bron of de ontvanger kan geplaatst worden (Van Renterghem et al., 2012). Bovendien is het plaatsen van een lage geluidsbarrière efficiënt aangezien het geluid van een auto (motor- en rolgeluid) zich laag bij de grond bevindt (Van Renterghem et al., 2015a). Een belangrijk voorwaarde opdat een lage geluidsbarrière geluid reduceert, is dat het absorberend is. Indien de geluidsbarrière niet absorberend is, zullen er reflecties plaatsvinden naar recht tegenoverliggende gebouwen. Zoals reeds gezegd kan een geluidsbarrière meer absorberend gemaakt worden aan de hand van vegetatie of klassiek absorberend materiaal (Van Renterghem et al., 2012).

Hagen

Een veel voorkomende visuele barrière in stedelijke gebieden is een haag. Hagen hebben meerdere functies zoals productie van zuurstof, het breken van de wind, visuele bescherming en het creëren van een habitat voor vogels en insecten. Het reduceren van geluid is echter een bijkomende functie die opgesplitst kan worden in twee onderdelen. Ten eerste kunnen de takken, twijgen, stammen en bladeren reducerend werken. Dit kan door verstrooiing, absorptie en gedempte trillingen (Van Renterghem et al., 2014). Verstrooiing als gevolg van de fysische obstructie van de haag zorgt ervoor dat de geluidsgolf in een andere richting wordt uitgezonden. Deze wordt op zijn beurt weer door andere

vegetatie verstrooid, hierdoor wordt de directe propagatie van bron tot ontvanger verstoord. Voornamelijk hoge frequenties worden verstrooid. In tegenstelling tot verstrooiing zal bij absorptie de energie van de geluidsgolf worden omgezet naar warmte. Hierbij is de dichtheid van het blad, de frequentie en de hoek van het blad ten opzichte van de geluidsgolf van belang. Tot slot kunnen de bladeren geluid reduceren door middel van trillingen (Van Renterghem et al., 2015_b). Naast de haag zelf kan de bodem onder de haag het bodemeffect versterken.

Ten tweede kan het visuele aspect van hagen hinder beperken. Wanneer de geluidsbron beperkt zichtbaar is achter de haag, wordt het geluid als minder luid gepercipieerd. Echter wanneer de geluidsbron volledig is afgeschermd, wordt het geluid als luider gepercipieerd (Watts, Chinn & Godfrey, 1999). Watts et al. (1999) vond geen significant effect als gevolg van de visuele aantrekkelijkheid van de vegetatie. Viollon, Lavendier & Drake (2002) daarentegen vonden wel een positief effect op geluidspereceptie als gevolg van de visuele aantrekkelijkheid van de vegetatie. Zij concludeerde dat verkeerslawaaï als minder onaangenaam wordt ervaren wanneer het gebied groener is in plaats van stedelijk. Over het algemeen is er nog geen consensus omtrent de psychologische invloed van vegetatie op de geluidspereceptie.

Van Renterghem et al. (2014) bestudeerde hagen met een dikte van 1,3 tot 2,5m en een hoogte van 1,6 tot 4m. Volgende methodologieën werden toegepast, een *Statistical pass-by* experiment, een *controlled pass-by* experiment en een *transmission loss* experiment. De resultaten van de *Statistical pass-by* experiment toonden aan dat zowel de bodem als de haag zelf een invloed hadden op het wegverkeersgeluid. Het aandeel van de reductie door de bladeren, twijgen en takken bevindt zich tussen de 0,5-0,7 dB(A). Het aandeel van de reductie door de bodem bevindt zich tussen de 1,5-1,9 dB(A). Bodemeffecten hebben een groter aandeel in de reductie van geluid dan de haag zelf. De studie concludeerde dat de reductie door hagen beperkt is voor geluid afkomstig van wegverkeer (Van Renterghem et al., 2014).

Steenkorven

Naast hagen kunnen ook steenkorven gebruikt worden als lage geluidsbarrière. Steenkorven zijn stalen kooien opgevuld met materialen zoals stenen, zand en bodem. Steenkorven worden voornamelijk gebruikt als omheining, maar kunnen ook geluid reduceren (Van Renterghem et al., 2015_a). Koussa et al. (2013) onderzocht de prestatie van steenkorven.

De studie van Koussa et al. (2013) vond dat bij lagere frequenties de efficiëntie van een volle muur beter is dan bij steenkorven. Dit door de transparantie van de steenkorven. Bij middelhoge frequenties zijn steenkorven met een grotere steengrootte efficiënter dan steenkorven met een kleinere steengrootte. Dit is te wijten aan de verhouding van de golflengte ten opzichte van de steengrootte. Een gelaagde structuur in steenkorven bleek verder efficiënter dan een willekeurige structuur. Dit omdat bij een duidelijke overgang tussen de verschillende lagen de geluidsgolf telkens wordt gereflecteerd terug naar de bronzijde. Voor receptoren op 1,5m hoogte werd bij middelhoge en hoge frequenties een reductie tussen de 5,8 en 8,1 dB(A) gemeten. Voor receptoren op 4m hoogte is een reductie van 1,8- 4,5 dB(A) waar te nemen. Deze reductie voor hoge ontvangers is laag omdat de steenkorf (lage geluidsbarrière) de directe geluidsgolf van bron tot receptor onvoldoende onderbreekt (Koussa et al., 2013).

1.5 Beleidskader geluidshinder

1.5.1 Richtlijn omgevingslawaaai

Op Europees niveau bepaalt de richtlijn (2002/49/EG) het beleid inzake omgevingslawaaai. De richtlijn heeft tot doel om via een gemeenschappelijke aanpak de schadelijke invloeden van omgevingslawaaai zoveel mogelijk te voorkomen of te verminderen (Departement LNE, s.d.). De richtlijn is omgezet naar Vlaamse wetgeving en is opgenomen in de VLAREM. De eerste implementatiefase (2006-2011) richt zich tot zowel de belangrijkste agglomeraties als spoorwegen, luchthavens en autowegen. De tweede implementatiefase (2011-2016) richt zich tot dezelfde doelgroep als in fase 1 maar dan ook op minder drukke wegen en steden. Met behulp van geluidsbelastingkaarten, actieplannen en geluidsplanning kan een beleid worden opgemaakt (Departement LNE, 2016).

Geluidsbelastingkaarten tonen de geluidsbelasting aan in de omgeving van verscheidene geluidsbronnen. De geluidsbelastingkaarten worden opgesteld voor de geluidsbelastingindicatoren L_{den} (*level day-evening-night*) en L_{night} (*level night*). " L_{den} is het gewogen gemiddelde van de geluidsniveaus voor de dag, avond en nacht" (Departement LNE, 2016). " L_{night} geeft het equivalent geluidsniveau aan tijdens de nachtperiode" (Departement LNE, 2016). Vervolgens worden er actieplannen opgemaakt op basis van de knelpunten die werden vastgesteld op de geluidsbelastingkaarten. De actieplannen beogen het verminderen van de lawaai-blootstelling. De knelpunten worden bepaald op basis van de overschrijding van de grenswaarden. Grenswaarden zijn die waarden waarbij beperkingsmaatregelen worden getroffen wanneer deze worden overschreden. Het concept van milieukwaliteitsnormen, zoals gedefinieerd in het decreet van 5 april 1995, houdende de algemene bepaling inzake milieubeleid (DABM) onder de vorm van 'grenswaarden' of 'richtwaarden' komen niet overeen met de inhoudelijke bepaling van de Europese richtlijn omgevingslawaaai. Daarom worden er plandrempels gebruikt bij het opmaken van het actieplan omdat deze wel voldoen aan de inhoudelijke bepalingen van de Europese richtlijn omgevingslawaaai. De plandrempel wordt bepaald op basis van de ambitie van de overheid om de geluidsbelasting te verminderen voor de komende jaren. Belangrijk op te merken is dat de plandrempel geen wettelijke norm is en niet mag aanzien worden als een milieukwaliteitsnorm. De plandrempel voor wegverkeer is gelijkgesteld aan L_{den} 70 dB, dit is het niveau waarbij 25% van de Vlamingen potentieel ernstig gehinderd wordt. Al deze bepalingen zijn opgenomen in het milieubeleidsplan dat vijfjaarlijks wordt opgesteld. Hierbij worden de geluidsbelastingkaarten en actieplannen geëvalueerd en waar nodig aangepast (Departement LNE, 2016).

1.5.2 Milieukwaliteitsnormen

Het DABM stelt milieukwaliteitsnormen op voor geluid in open lucht en richtwaarden voor geluid binnenshuis. In 2008 werd er een consensusnota geschreven omtrent de milieukwaliteitsnormen omgevingslawaaai. Hierbij werden gedifferentieerde referentiewaarden bepaald die rekening houden met de wegindeling die in het ruimtelijk structuurplan van Vlaanderen is vastgelegd (Wauters et al., 2015). Er wordt een afweging gemaakt tussen de leefbaarheid en de bereikbaarheid. Bijvoorbeeld bij hoofd- en primaire wegen wordt de prioriteit gegeven aan bereikbaarheid, dit laat een flexibele geluidsnormering toe. De referentiewaarden, weergegeven in tabel 1, zijn niet bindende waarden waarnaar gestreefd moet worden. Bij overschrijding van de referentiewaarden is het aangewezen om de geluidsblootstelling te verminderen. De referentiewaarden worden toegepast in afwachting van officiële milieukwaliteitsnormen voor omgevingslawaaai (Departement LNE, s.d.).

Tabel 1. Gedifferentieerde referentiewaarden voor wegverkeer (Wauters et al., 2016).

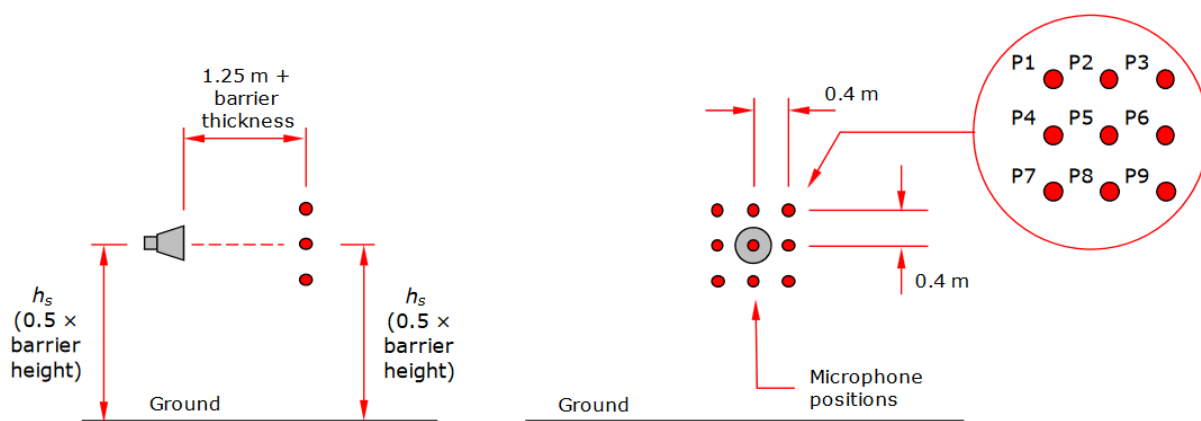
Brontype	Situatie	L_{den} (dB(A))	L_{night} (dB(A))
Hoofd- en primaire wegen	Nieuw	60	50
	Bestaand	70	60
Secundaire en lokale wegen	Nieuw	55	45
	Bestaand	Actie wenselijk bij > 65	Actie wenselijk bij > 55
		Geen toename dB bij > 55	Geen toename dB bij > 45
Nieuwe woonontwikkelingen	Onafhankelijk van de wegingdeling	55	45

1.6 Meetmethode geluidsbarrière

De efficiëntie van een geluidsbarrière kan bestudeerd worden in situ of in een labo experiment. Koussa et al. (2013) onderzocht de prestatie van steenkorven in stedelijke gebieden aan de hand van numerieke simulaties en in situ metingen. Met behulp van de Europese standaard CEN/TS 1793-5 werd de transmissie en reflectie van een steenkorf onderzocht.

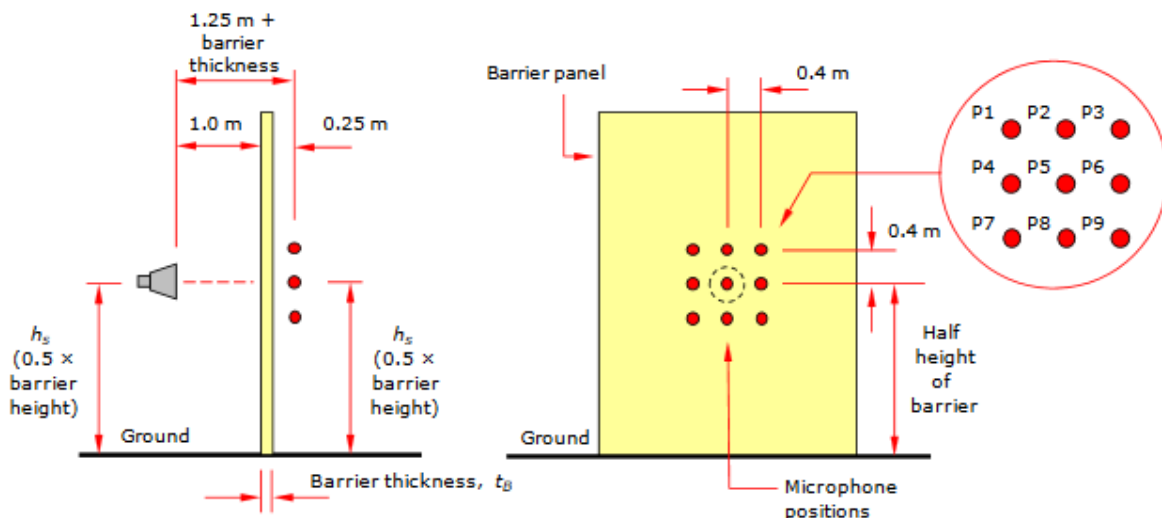
1.6.1 Europese standaard CEN/TS 1793-5

Bij deze methode wordt een microfoon en een luidspreker tegenover elkaar geplaatst. Eerst wordt er een test uitgevoerd bij afwezigheid van de geluidsbarrière, ook wel een vrije veld meting genoemd. Hierbij wordt de directe geluidsgolf van bron naar ontvanger gemeten. De microfoon zelf bevat negen verschillende ontvangersposities, waarvan microfoon vijf (P5) dezelfde hoogte aanneemt als de hoogte van de luidspreker (Watts & Morgan, 2006). Figuur 2 geeft het ontwerp van de meting weer.



Figuur 2. Een vrije veld meting met links het zijaanzicht en rechts het vooraanzicht (Morgan, 2010).

Vervolgens wordt er een meting uitgevoerd bij de aanwezigheid van een geluidsbarrière, zie figuur 3. De luidspreker genereert een impuls. Het geluid dat toekomt ter hoogte van de microfoon is gelijk aan de transmissie van de geluidsgolf doorheen de barrière en de diffractie over de barrière. De gemeten impulsrespons wordt bekeken voor een welbepaald tijdsperiode. Hierdoor kan de transmissie afgezonderd worden van de diffractie. Vervolgens wordt de absorptie- en de transmissiekaracteristieken van de geluidsbarrière bepaald (Watts & Morgan, 2006).



Figuur 3. Transmissie meting met links het zijaanzicht en rechts het vooraanzicht (Morgan, 2010).

1.7 Onderzoekopzet

In Vlaanderen wordt geluid door wegverkeer als de belangrijkste bron van hinder ervaren. Geluidshinder is de tweede belangrijkste factor in de totale milieulast van Vlaanderen. In totaal gaan er 7348 levensjaren verloren als gevolg van geluidshinder. Dit komt omdat een groot deel van de Vlaamse bevolking is blootgesteld aan wegverkeersgeluid. Deze blootstelling is toe te wijzen aan het dichte wegennetwerk, het groeiend aantal auto's op de baan, een stijging in het aantal gereden kilometers en de hoge bevolkingsdichtheid (Vandevenne, 2015).

De Vlaamse overheid wil de bestaande knelpunten aanpakken en voorkomen dat nieuwe knelpunten ontstaan. Er wordt een voorkeur gegeven aan brongerichte maatregelen (motor- en rolgeluid). Bijvoorbeeld aanleggen van stillere wegverharding. Daarnaast onderneemt de Vlaamse overheid ook overdrachtgerichte maatregelen waaronder het plaatsen van geluidsschermen. Echter het plaatsen van geluidsschermen is niet altijd even efficiënt als gevolg van de locatie, aard van het geluid en de geometrie van de omgeving. Bovendien worden enkel die punten aangepakt waarbij de plandrempel wordt overschreden. Het kan dus zijn dat een bewoner hinder ervaart en dat er geen acties door de overheid worden genomen.

Naast de acties die ondernomen worden door de Vlaamse overheid, kunnen ook individuele acties ondernomen worden om de blootstelling aan geluid te verminderen. Wanneer particulieren hinder ervaren en de overheid geen acties onderneemt, zijn zij aangewezen op hun eigen initiatief. Het plaatsen van lage geluidsbarrière is zo een voorbeeld van een individuele actie. Eerder onderzoek heeft aangetoond dat lage geluidsbarrières een efficiënte oplossing is om geluidsblootstelling in stedelijke gebieden te reduceren, op voorwaarde dat de barrière deels absorberend is (Van Renterghem et al., 2012). In hoofdstuk 1.4 werden voor stedelijke gebieden hagen en steenkorven besproken als mogelijke geluidsbarrière. Er werd reeds onderzoek uitgevoerd naar de reducerende werking van hagen (Van Renterghem et al., 2014; Van Renterghem et al., 2015_b). Van Renterghem et al. (2014) vond dat zeer dikke hagen een IL hebben tussen de 1,1 dB(A) en 3,6 dB(A). Onderzoek naar de reducerende werking van steenkorven is echter beperkt. Het onderzoek van Koussa et al. (2013) voerde een numerieke simulatie uit op steenkorven van 1 m hoogte. Hierbij werd een IL van 8 dB waargenomen voor

wegverkeer. Daarnaast voerde Koussa et al. (2013) een in situ meting en schaalmeting uit voor conventionele steenkorven. Een labometing voor lage steenkorven werd nog niet uitgevoerd.

Steenkorven worden veelvuldig gebruikt als omheining bij particulieren. Steenkorven kennen vele voordelen zoals: makkelijk in onderhoud, lange levensduur en individuele ontwerpmogelijkheden. Steenkorven zijn makkelijk te plaatsen en het is vooral voor ontvangers zoals voetgangers en fietsers een efficiënte barrière. Dit omdat de bronnen van wegverkeersgeluid, namelijk motorgeluid en rolgeluid, zich laag ten opzichte van de bodem bevinden. Echter voor hoge ontvangers, bijvoorbeeld op een verdiep in een gebouw, is een lage steenkorf niet efficiënt (Koussa et al., 2013).

Vaak is er vraag naar het geluidsreducerend vermogen van deze steenkorven door particulieren (Bastiaen, J., persoonlijke communicatie, 9 november 2016). Koussa et al. (2013) bestudeerde de steenkorf aan de hand van in situ metingen en numerieke simulaties. Een gecontroleerd labo onderzoek is nog niet uitgevoerd op steenkorven. Het bestuderen van een lage steenkorf in een half-anechoïsche kamer kan leiden tot nieuwe inzichten. Het doel van deze masterproef is het bestuderen van het potentieel van steenkorven als individuele geluidsreducerende maatregel. Tijdens deze masterproef zal er op volgende onderzoeksvraag een antwoord worden gezocht:

- Beïnvloedt een lage steenkorf de voortplanting van geluid, onder gecontroleerde labo-omstandigheden?
- In welke mate hebben dikte en het soort steen een invloed op het geluidsreducerende potentieel van de steenkorf?

In hoofdstuk 2 wordt de methode besproken voor de meting in de half-anechoïsche kamer. In hoofdstuk 3 worden de resultaten uitvoerig besproken. In hoofdstuk 4 wordt er kritisch gereflecteerd en worden de resultaten vergeleken met ander onderzoek. Tot slot wordt in hoofdstuk 5 de conclusie neergeschreven.

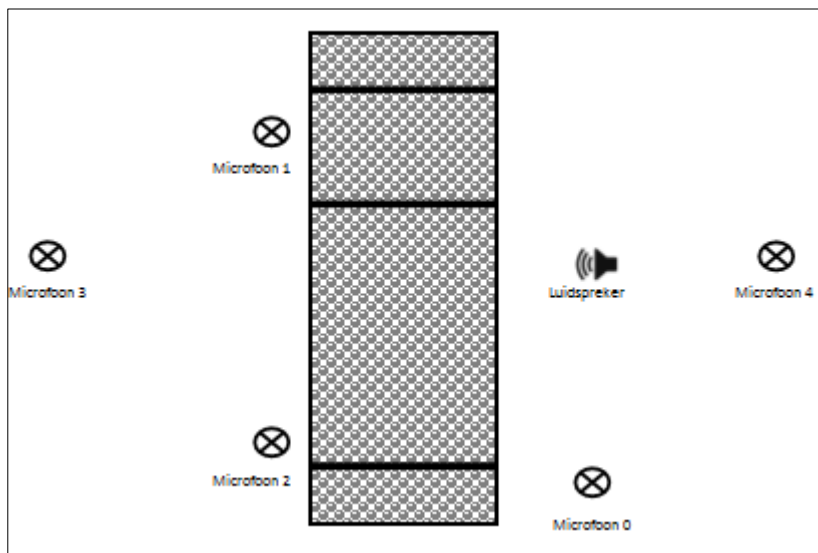
2 Methode

In samenwerking met Betafence was het mogelijk om verschillende testen uit te voeren. De experimenten met de steenkorven worden uitgevoerd in de half-anechoïsche kamer van de WAVES group in het iGent gebouw. Een half-anechoïsche kamer is een kamer waarbij de bodem perfect hard is en de rest van de omgeving absorberend. In deze studie wordt de opstelling deels gebaseerd op die van de CEN/TS 1793-5 standaard. Aan de hand van de IL werd de efficiëntie van de steenkorven bestudeerd.

2.1 Opzet metingen

In kader van deze studie wordt er in een half-anechoïsche kamer verschillende metingen uitgevoerd. Eerst wordt er een signaal uitgezonden waarbij er geen steenkorf aanwezig is. Het signaal wordt gemeten met vijf microfoons. Vervolgens wordt hetzelfde signaal uitgezonden bij aanwezigheid van een steenkorf met exact dezelfde microfoon en bronopstelling.

De CEN/TS 1793-5 standaard maakt gebruik van negen verschillende ontvangers samen in één rooster. Het centrum van het rooster met de microfoons wordt, volgens de standaard, achter de steenkorf geplaatst op een afstand van 0,25 m en op een hoogte gelijk aan de hoogte van de luidspreker. Voor dit onderzoek zullen vijf afzonderlijke half-inch electret microfoons gebruikt worden van het type 1. Deze microfoons hebben een hoge accuraatheid en hebben éénzelfde gevoeligheid over het volledige audiofrequentiegebied. De luidspreker is omnidirectioneel en benadert een puntbron. Figuur 4 geeft de positionering van de luidspreker en microfoons weer voor opstelling 1. De zwarte horizontale lijnen stellen de palen voor van de steenkorf.



Figuur 4. Positionering microfoons en luidspreker in de half-anechoïsche kamer.

Microfoon 0 wordt op een hoogte van 0,8 m en op een afstand van 1 m ten opzichte van de steenkorf geplaatst. Microfoon 1 en 2 worden geplaatst aan de achterkant van de steenkorf op een afstand van 0,25 m ten opzichte van de steenkorf. Bij uniform gedrag van de steenkorf zou een gelijkaardig gedrag moeten verkregen worden bij deze twee microfoons. Microfoon 3 wordt op een hoogte van 1,5 m geplaatst, wat overeenstemt met de hoogte van het menselijk oor, en dit op een afstand van 3 m van de steenkorf. Microfoon 4 wordt op 3 m afstand van de steenkorf geplaatst op een hoogte van 0,8 m.

Microfoon 0 wordt geplaatst in lijn met de luidspreker, opdat eventuele afwijkingen in het bronsignaal tijdig gedetecteerd kunnen worden. Microfoon 1 en 2 zijn onmiddellijk achter de steenkorf geplaatst, conform de norm CEN/TS 1793-5. Microfoons 1, 2 en 3 zijn geplaatst in de schaduwzone en meten zowel de transmissie als de diffractie. Microfoon 4 representeert een voetganger aan de bronzijde van de steenkorf en wordt bepaald door reflectie op de korf.

Voor elke steenkorf zijn er vier verschillende opstellingen. Opstelling 1 is gebaseerd op de standaard CEN/TS 1793-5. De positie van microfoons en luidspreker zijn overgenomen van deze standaard, uitgezonderd het aantal microfoons. Bij opstelling 2 en 3 wordt de luidspreker dichter naar de steenkorf toe opgesteld en op een hoogte van 0,4 m geplaatst, dit stemt overeen met het geluid van een motor. Microfoon 1 en 2 worden op dezelfde hoogte geplaatst als de luidspreker. Bij opstelling 3 is de bodem van de half-anechoïsche kamer gevuld met absorberend materiaal en benadert dit zo een volledige anechoïsche kamer om het verschil in harde en zachte bodem te bestuderen. Bij opstelling 4 wordt de luidspreker verder van de steenkorf geplaatst, namelijk op 2,7 m afstand. Dit komt overeen met een meer realistische situatie in het wegverkeer, echter beperkt door de grootte van de kamer. In bijlage 1 wordt de positionering van elke opstelling weergegeven.

Er werden in totaal vier verschillende signalen uitgezonden: *maximim length sequence* (MLS), *White noise* (WN), *Sweep* lineair (SWP-lin), *Sweep* logaritmisch (SWP-log). Er werd gekozen voor vier signalen opdat een zekere herhaalbaarheid en zekerheid behaald kon worden. In deze studie wordt er gekeken naar de geluidrukniveaus tussen de 100 Hz en de 5 kHz en dit voor het signaal MLS zoals bepaalt in de CEN/TS 1793-5 standaard.

2.2 Soort steenkorven

In kader van deze studie worden de dikte van de steenkorf en het soort steen gevarieerd om de invloed ervan op het geluidsreducerend potentieel van steenkorven te bepalen. Initieel werd er ook geopteerd om een meting uit te voeren op een steenkorf waarbij een laag keien werd omgeven door lavastenen (in totaal 3 lagen). Bij het vullen van deze steenkorf bleek het niet mogelijk om de juiste afmetingen te behouden en de stenen gelijkmatig te verdelen over de verschillende lagen. De gelaagde steenkorf is daarom niet opgenomen in deze studie. De steenkorfdikte die Betafence aanbiedt zijn 12, 20 en 30 cm. Voor deze studie zal er gebruik gemaakt worden van steenkorven met een dikte van 20 en 30 cm. De steenkorven zijn 1,6 m hoog. De soort stenen die voor deze studie werden gekozen zijn lavastenen met een steengrootteverdeling van 40/80 cm en keien met een steengrootteverdeling van 40/60 cm, zie figuur 5. De lengte van de steenkorf is 3 m lang. Gezien de afstanden van microfoon en bron ten opzichte van de steenkorf en de schermhoogte, kan verwacht worden dat het dominante geluidspad over de top van het scherm gaat en niet rond het scherm.

Tabel 2. Testontwerp steenkorven.

	Dikte (cm)	Soort stenen
Steenkorf 1	20	Keistenen
Steenkorf 2	20	Lavastenen
Steenkorf 3	30	Lavastenen



Figuur 5. Soort stenen: lavastenen (links) en keien (rechts).

2.3 Verloop metingen

In een voorafgaande testmeting werd de meetprocedure en signaalverwerking getest met een dik houten scherm. Vervolgens werd steenkorf 3 als eerste opgebouwd. Op figuur 6 is de opstelling van de steenkorf weergegeven alvorens de steenkorf werd gevuld. De steenkorf steunt op een metalen statief (10 cm hoog). De palen konden niet in de grond worden geboord om de vloer van de anechoïsche kamer niet te beschadigen. De palen staan op respectievelijk twee en één meter van elkaar. Ook het effect van enkel de metalen constructie werd opgemeten. De stalen netten worden bijeengehouden door haken en strips. Tijdens het vullen van de steenkorf werden herhaaldelijk haken geplaatst opdat de juiste dikte werd behouden en de stalen netten niet uitzetten als gevolg van de zijwaartse druk door de massa van de stenen. Echter een exacte dikte van 30 en 20 cm werd niet bekomen. Een speling van 2,5 cm werd waargenomen bij beide diktes.



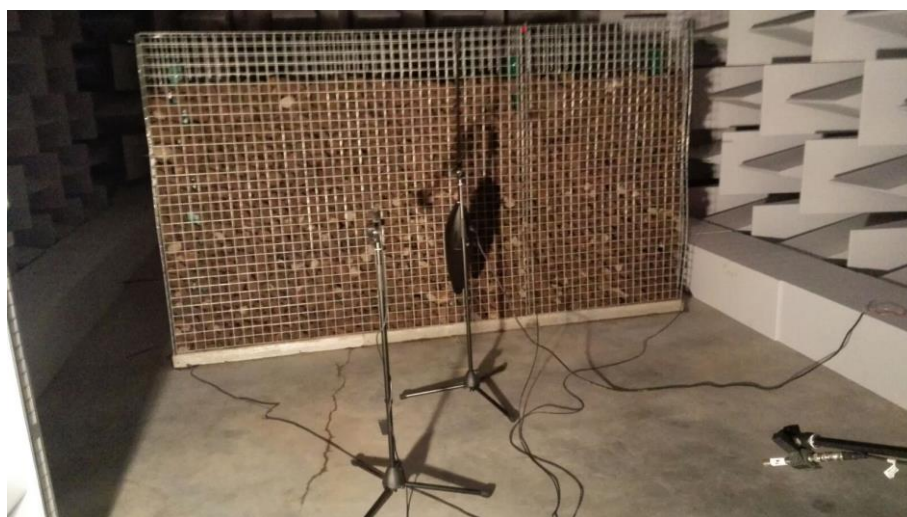
Figuur 6. Steenkorf 3 zonder stenen.

De microfoons werden elke dag in het begin en op het einde gekalibreerd, opdat accurate metingen verzekerd konden worden. Er werd met behulp van een pistonfoon een geluidsniveau van 94 dB bij 1 kHz aan de microfoons geboden waaruit de microfoonsensitiviteit kon achterhaald worden (in mV/Pa). De kalibratiewaarden bleven voldoende constant gedurende de volledige meetperiode.

Tabel 3. Kalibratie microfoons bij 1 kHz.

	10/02/2017		14/02/2017		15/02/2017		16/02/2017	
	Steenkorf 3 (dB)		Steenkorf 2 (dB)		Steenkorf 1 (dB)		Referentiemeting (dB)	
	Ochtend	Avond	Ochtend	Avond	Ochtend	Avond	Ochtend	Avond
MF 0	36,43	36,99	36,88	36,70	36,57	36,83	36,70	36,65
MF 1	36,13	36,56	36,36	36,31	36,26	36,20	36,43	36,05
MF 2	23,37	23,50	23,40	23,35	22,58	23,33	23,43	23,43
MF 3	41,32	40,23	41,43	40,10	39,81	39,03	42,31	39,59
MF 4	33,12	34,20	33,77	34,61	34,41	34,52	34,50	34,33

Steenkorf 3 werd niet volledig gevuld omdat er niet genoeg stenen beschikbaar waren. De steenkorf werd tot een hoogte van 1,40 m gevuld wat overeenkomt met 5 mazen die vrij waren van stenen. De lavastenen, gebruikt bij het vullen van steenkorf 3, waren vochtig aangezien deze buiten werden opgeslagen. De tweede steenkorf die werd opgebouwd, was steenkorf 2. Hiervoor werden dezelfde stenen gebruikt als steenkorf 3. De stenen waren reeds droger omdat zij na de meting met steenkorf 3 werden opgeslagen in de kelder. Steenkorf 2 werd op twee manieren gevuld: volledig en tot op een hoogte van 1,40 m, zie figuur 7, opdat vergelijking met steenkorf 3 mogelijk was.



Figuur 7. Steenkorf 2, opstelling 2.

De laatste steenkorf die werd opgebouwd was steenkorf 1. Deze werden zowel met vochtige als niet vochtige keien gevuld. Dit komt omdat er reeds keien op voorhand binnengehaald waren voor de gelaagde steenkorf die uiteindelijk niet is getest en het andere deel buiten opgeslagen werd. Tot slot werden de referentiemetingen gedaan zonder steenkorf. Op figuur 8 wordt opstelling 3 weergegeven bij afwezigheid van een steenkorf.



Figuur 8. Opstelling 3, zonder steenkorf.

3 Resultaten

3.1 Herhaalbaarheid bij vaste positionering bron en microfoon

Tabel 4, 5 en 6 geven de standaardafwijking per tertsband weer, voor de verschillende steenkorven. De herhaalbaarheid is zeer hoog voor alle steenkorven en microfoons. Gebruik van hetzelfde signaal bij de andere opstellingen gaf een gelijkaardige sterke reproduceerbaarheid. De resultaten geven een minimale afwijking voor alle beschouwde frequenties. Resultaten worden in het vervolg van dit werk enkel weergegeven voor het signaal MLS.

Tabel 4. Standaardafwijking steenkorf 1 per frequentie voor opstelling 1a, 1b en 1c, signaal MLS (in dB).

	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz	315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz	2000 Hz	2500 Hz	3150 Hz	4000 Hz	5000 Hz
MF 0	0,01	0,03	0,01	0,01	0,00	0,00	0,03	0,02	0,01	0,02	0,00	0,03	0,01	0,01	0,00	0,03	0,01	0,01
MF 1	0,02	0,06	0,00	0,01	0,01	0,00	0,03	0,01	0,01	0,02	0,01	0,06	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02
MF 2	0,02	0,06	0,01	0,01	0,01	0,01	0,04	0,02	0,02	0,02	0,01	0,06	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
MF 3	0,01	0,08	0,06	0,07	0,08	0,37	0,04	0,05	0,01	0,03	0,01	0,01	0,05	0,01	0,01	0,01	0,00	0,03
MF 4	0,03	0,04	0,00	0,01	0,02	0,01	0,03	0,01	0,02	0,03	0,03	0,04	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01

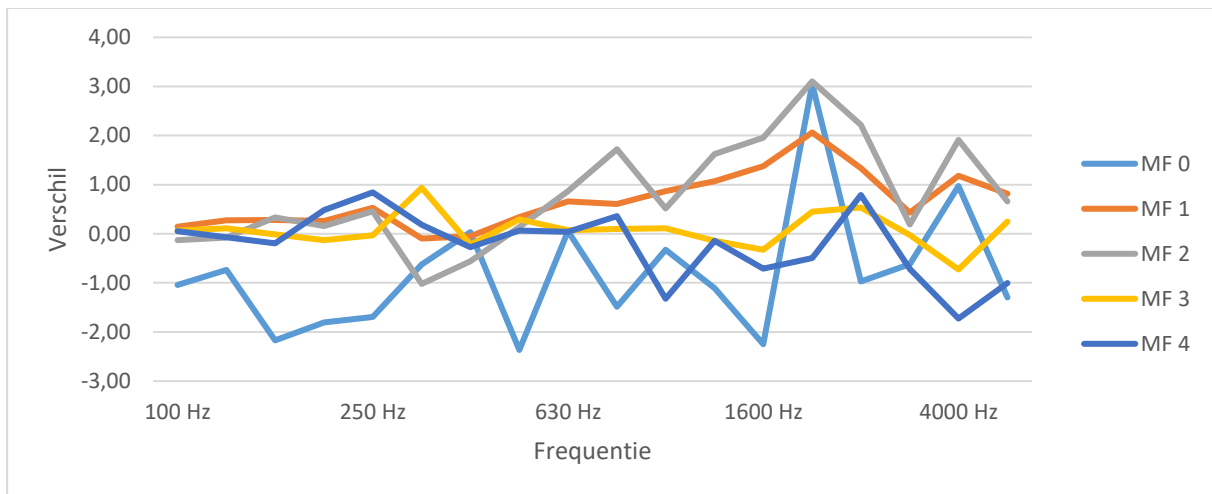
Tabel 5. Standaardafwijking steenkorf 2 per frequentie voor opstelling 1a, 1b en 1c, signaal MLS (in dB).

	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz	315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz	2000 Hz	2500 Hz	3150 Hz	4000 Hz	5000 Hz
MF 0	0,00	0,04	0,01	0,01	0,00	0,00	0,03	0,02	0,01	0,02	0,01	0,03	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
MF 1	0,01	0,06	0,00	0,00	0,02	0,01	0,03	0,01	0,02	0,02	0,02	0,04	0,02	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01
MF 2	0,01	0,06	0,00	0,01	0,03	0,02	0,03	0,01	0,03	0,01	0,01	0,03	0,02	0,00	0,02	0,02	0,01	0,00
MF 3	0,00	0,04	0,01	0,01	0,00	0,00	0,03	0,02	0,01	0,02	0,01	0,03	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
MF 4	0,01	0,06	0,00	0,00	0,02	0,01	0,03	0,01	0,02	0,02	0,02	0,04	0,02	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01

Tabel 6. Standaardafwijking steenkorf 3 per frequentie voor opstelling 1a, 1b en 1c, signaal MLS (in dB).

	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz	315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz	2000 Hz	2500 Hz	3150 Hz	4000 Hz	5000 Hz
MF 0	0,04	0,16	0,02	0,01	0,09	0,06	0,03	0,02	0,08	0,05	0,02	0,06	0,07	0,03	0,03	0,04	0,03	0,02
MF 1	0,04	0,17	0,02	0,01	0,01	0,08	0,03	0,02	0,04	0,06	0,03	0,05	0,07	0,08	0,05	0,01	0,03	0,02
MF 2	0,04	0,18	0,02	0,02	0,08	0,02	0,03	0,02	0,04	0,06	0,03	0,05	0,08	0,05	0,07	0,02	0,02	0,05
MF 3	0,03	0,22	0,02	0,06	0,06	0,15	0,08	0,02	0,05	0,08	0,10	0,02	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,07
MF 4	0,06	0,12	0,01	0,00	0,01	0,12	0,03	0,02	0,05	0,07	0,04	0,04	0,02	0,06	0,02	0,03	0,04	0,05

3.2 Positioneringsfout microfoons en bron



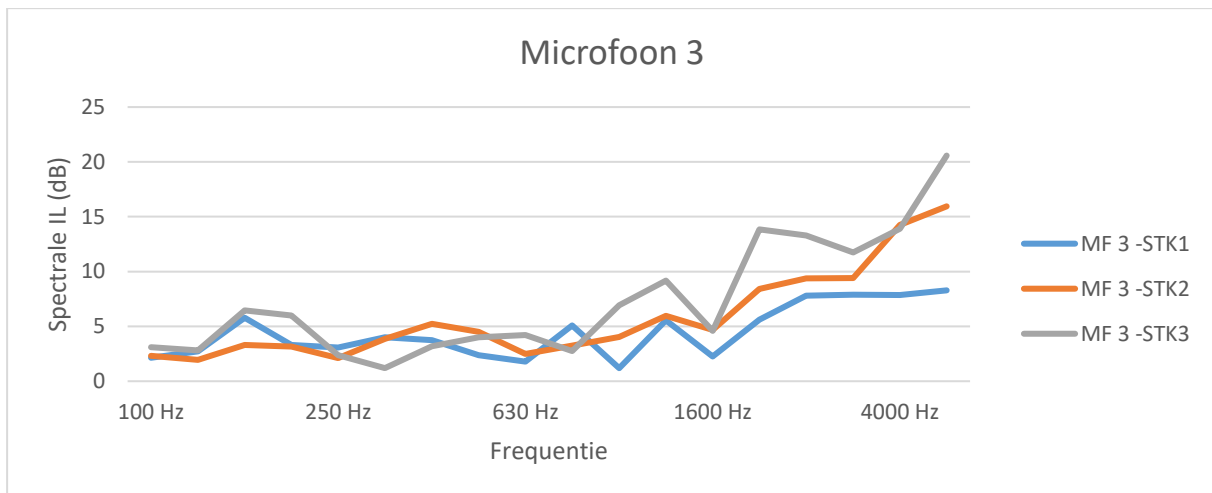
Figuur 9. Positioneringsfout steenkorf 1, opstelling 1 voor signaal MLS; MF= microfoon.

Tijdens het vullen van de steenkorven werd om veiligheidsredenen de microfoons en bron verplaatst. Om de positioneringsfout in te schatten werden tweemaal dezelfde metingen uitgevoerd voor 1 opstelling. De microfoons en de bron werden weggenomen om vervolgens opnieuw op dezelfde plaats teruggezet te worden. Bij de lage frequenties is er weinig verschil tussen de twee metingen – kleine positioneringsfouten zijn verwaarloosbaar ten opzichte van de golflengte. Bij 2000 Hz daarentegen wordt het hoogste verschil waargenomen namelijk 3,1 dB verschil. Dit verschil is toe te wijzen aan de niet exacte manuele positionering van de microfoons. Gelijkaardige fouten worden dus verwacht doorheen de gerapporteerde resultaten. De resultaten van de scherm efficiëntie kunnen bij de hoogste frequenties een positioneringsfout tot 3 dB vertonen.

3.3 Spectrale insertion loss

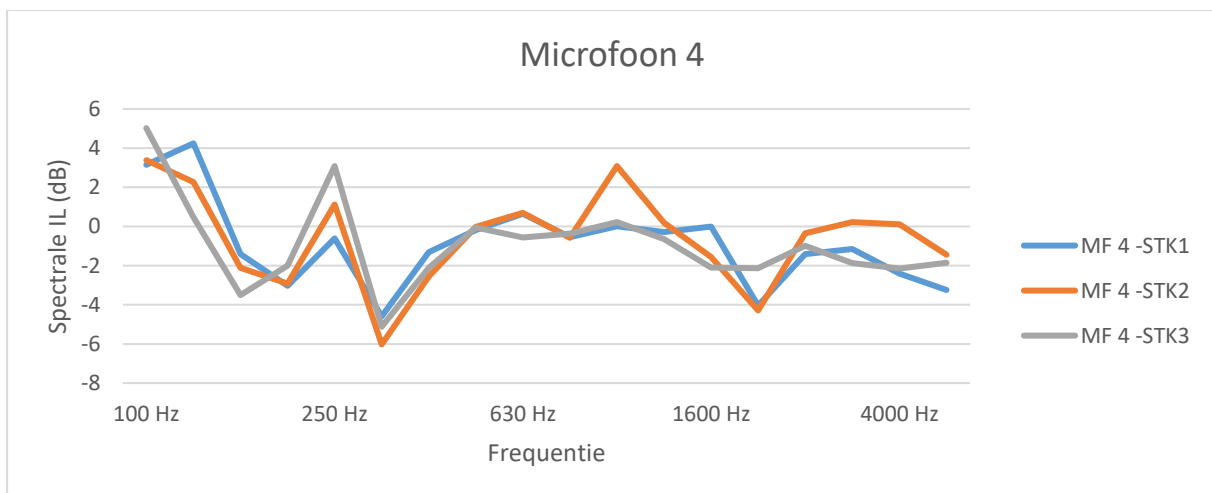
3.3.1 Opstelling 1

De IL voor microfoon 0 voor steenkorf 2 is voornamelijk negatief. De IL voor microfoon 0 voor steenkorf 1 en 3 daarentegen is voornamelijk positief. Het verschil in IL kan toegewezen worden aan de positionering. Microfoon 0 is namelijk dicht bij de bron geplaatst en dus zeer gevoelig aan veranderingen in de positionering. Voor microfoon 1, 2 en 3 (die aan de andere zijde van het scherm geplaatst zijn) is éénzelfde patroon waar te nemen, namelijk de IL neemt toe naarmate de frequentie toeneemt. Dit kan verklaard worden doordat lage frequenties makkelijker zullen diffracteren over het scherm dan hoge frequenties of dat deze meer transmissie doorheen het scherm ondervinden. Steenkorf 3 heeft een grotere IL dan steenkorf 1 en 2 als gevolg van zijn dikte en het soort steen. Steenkorf 1 heeft een hogere IL dan steenkorf 2 bij lage frequenties en gelijkaardig aan korf 3. Bij lage frequenties is vooral de dikte van belang en niet zozeer de individuele absorptiegraad van de stenen. Bij hogere frequenties is de IL van steenkorf 2 hoger dan de IL van steenkorf 1 door de werking van de absorberende lavastenen. Microfoon 3 heeft over het hele spectra een positieve IL en dit voor alle steenkorven, zoals te zien is in figuur 10.



Figuur 10. Spectrale insertion loss van opstelling 1, microfoon 3; STK= steenkorf, MF= microfoon.

Figuur 11 geeft de IL weer voor microfoon 4. Bij midden en hoge frequentie schommelt de IL rond nul. Steenkorf 1 en 3 vertonen een negatieve IL bij hogere frequentie, met andere woorden het geluidsdrukkniveau is hoger bij aanwezigheid van een steenkorf dan bij afwezigheid van een steenkorf. De negatieve IL is het gevolg van reflecties op de steenkorf – wanneer deze reflecties interageren met reflecties op de bodem krijgen we complexe interferenties.



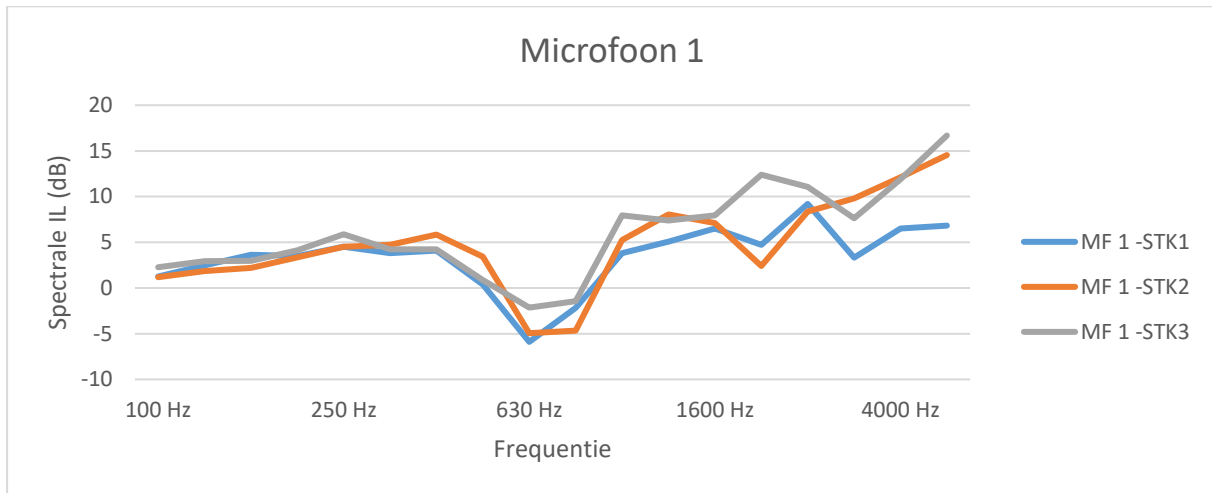
Figuur 11. Spectrale Insertion loss van opstelling 1, microfoon 4; STK= steenkorf, MF= microfoon.

3.3.2 Opstelling 2

Bij opstelling 2 werd de luidspreker- en de microfoonhoogte verlaagd tot de helft en werd de luidspreker dichter tegen de steenkorf geplaatst. Er zijn veel overeenkomsten tussen de resultaten van opstelling 1 en 2, hieronder worden enkel de verschillen aangehaald.

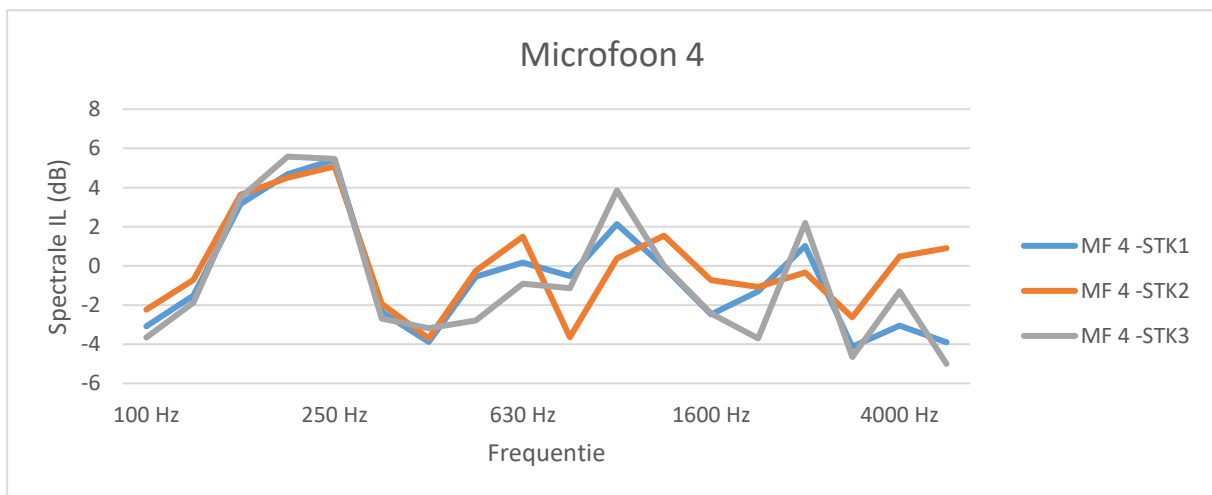
Het dichter plaatsen van de bron ten opzichte van de steenkorf zorgt voor een stijging in IL voor steenkorf 1 en 2 ten opzichte van opstelling 1. Figuur 12 toont aan dat de IL over het gehele spectra positief is voor de drie steenkorven bij microfoon 1. Dit patroon is hetzelfde voor microfoon 2 en 3, alleen is de IL voor microfoon 2 en 3 hoger dan de IL van microfoon 1 bij hoge frequenties. Dit is benoemingswaardig aangezien microfoon 1 en 2 beide op dezelfde positie ten opzichte van elkaar en van de steenkorf zijn geplaatst. Bijvoorbeeld bij een frequentie van 4 kHz is de IL van steenkorf 1 voor

microfoon 1 gelijk aan 6,50 dB en bij microfoon 2 gelijk aan 8,99 dB. Het verschil is nog groter bij steenkorf 3 waar microfoon 1 een IL heeft van 11,91 dB en microfoon 2 een IL heeft van 17,72 dB. Een mogelijke oorzaak voor het verschil in IL tussen microfoon 1 en 2 zou de positionering van de palen kunnen zijn en de invloed hiervan op de verdeling van de stenen. Daarnaast is ook vast te stellen dat de IL tussen tertsband met centrale frequentie 630 en 800 Hz negatief wordt en dit voor alle steenkorven bij microfoon 1, 2 en 3. Dit is toe te wijzen aan een constructieve interferentie.



Figuur 12. Spectrale insertion loss van opstelling 2, microfoon 1; STK= steenkorf, MF= microfoon.

Microfoon 4 vertoont een geheel ander patroon dan bij opstelling 1, zoals te zien in figuur 13. Dit is toe te wijzen aan de verschillende interferenties en reflecties die plaatsvinden op de bodem en steenkorf. Kortom er is geen éénduidig patroon af te leiden als gevolg van de complexe situatie met reflectie en verstrooiing van geluid.

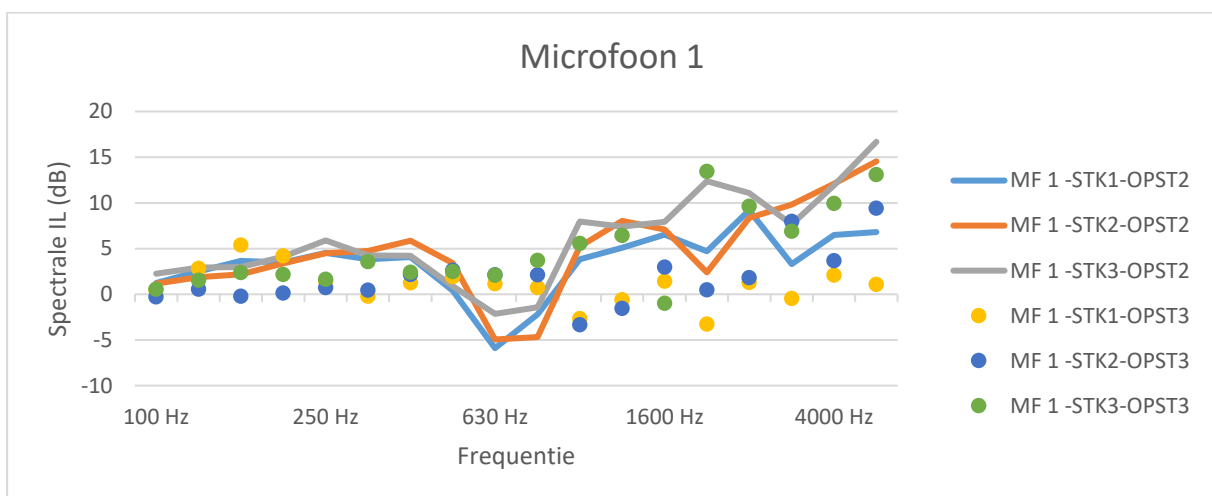


Figuur 13. Spectrale insertion loss van opstelling 2, microfoon 4; STK= steenkorf, MF= microfoon.

3.3.3 Opstelling 3

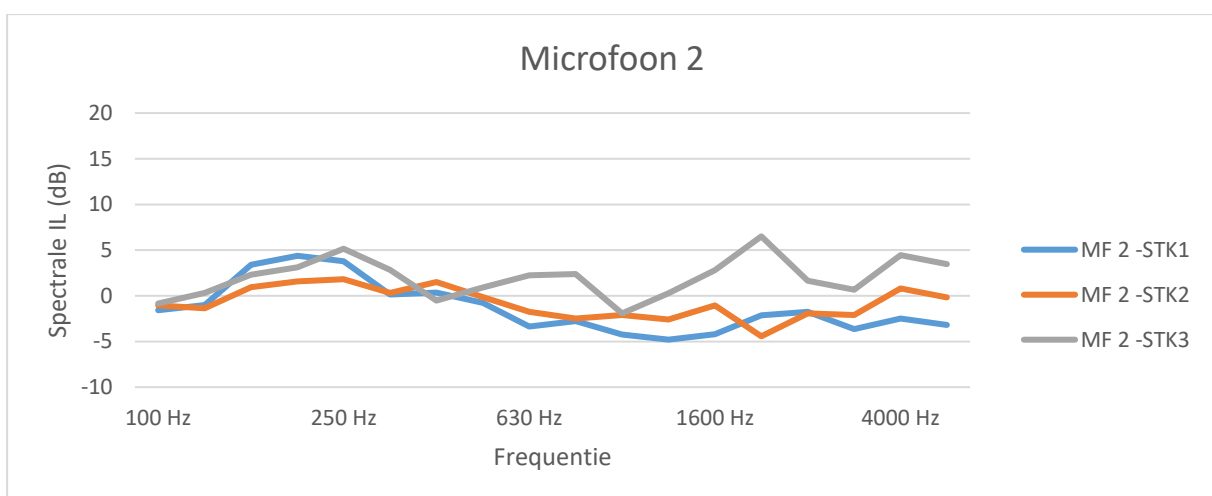
Opstelling 3 verschilt van opstelling 2 door het plaatsen van absorberend materiaal op de bodem. Hierdoor kan het verschil in IL tussen een harde en een zachte bodem, respectievelijk opstelling 2 en 3, worden waargenomen.

Op figuur 14 is de IL voor opstelling 2 en 3 weergegeven voor microfoon 1. Eerst en vooral wordt er een verschil waargenomen in waarde van de IL. De IL is veel hoger bij opstelling 2 (volle lijnen) dan bij opstelling 3 (punten), met andere woorden een steenkorf is relatief efficiënter bij een harde bodem dan bij een zachte bodem. Daarnaast kan opgemerkt worden dat de IL van steenkorf 1 lager is bij hoge frequenties dan bij lage frequenties. Tot slot is het verschil tussen steenkorf 1 en 3 aanzienlijk bij hoge frequenties voor opstelling 3 (punten). Zo is de IL voor steenkorf 1 bij 2000 Hz gelijk aan -3,26 dB en bij steenkorf 3 is dit 13,47 dB. Voor opstelling 2 daarentegen is het verschil kleiner, namelijk de IL voor steenkorf 1 bij 2000 Hz is gelijk aan 4,71 dB en bij steenkorf 3 is dit 12,39 dB. Er kan geconcludeerd worden dat steenkorven efficiënter zijn bij een harde bodem dan bij een zachte bodem. Indien er toch een zachte bodem aanwezig is, is een steenkorf met lavastenen zeker aangewezen. Een steenkorf met keien moet vermeden worden bij aanwezigheid van een zachte bodem aangezien deze een zeer lage en soms een negatieve IL heeft.



Figuur 14. Spectral insertion loss voor opstelling 2 (volle lijnen) en 3 (punten), microfoon 1; STK= steenkorf, MF= microfoon.

Voor microfoon 2 is een gelijkaardig beeld vast te stellen. Steenkorf 1 is minder efficiënt bij hoge frequenties dan bij lage frequenties. Echter bij microfoon 2 wordt ook steenkorf 2 negatief en dit bij 500 Hz en dit tot 4000 Hz. De negatieve IL voor steenkorf 1 en 2 wijzen erop dat het geluidsdruk niveau ietwat hoger is bij aanwezigheid van de steenkorf dan bij afwezigheid van de steenkorf.



Figuur 15. Spectrale insertion loss voor opstelling 3, microfoon 2; STK= steenkorf, MF= microfoon.

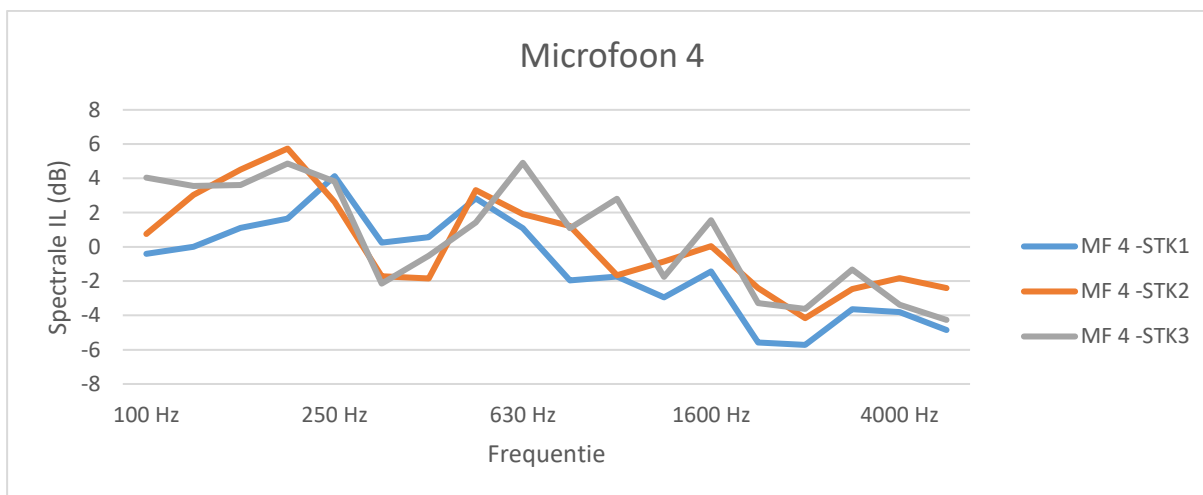
Op figuur 14 en 15 is de IL van microfoon 1 en 2 weergegeven voor opstelling 3. Er is een duidelijk verschil in IL, namelijk de IL van microfoon 2 is lager dan de IL van microfoon 1 bij hoge frequenties desondanks dat beide microfoons op een gelijke afstand staan van de steenkorf. Dit is het tegenovergestelde van wat werd waargenomen bij opstelling 2. Hierbij was de IL van microfoon 1 lager dan de IL van microfoon 2. De wijziging in de efficiëntie zou een gevolg kunnen zijn van een zachte bodem in plaats van een harde bodem en dit in combinatie met de positie van de microfoons ten opzichte van de steenkorven, meer bepaald de palen.

Tabel 7 geeft een overzicht van de totale IL voor een ruisbron, hieruit is af te leiden dat de totale IL zeer laag is in vergelijking met opstelling 2. Dit groot verschil is toe te wijzen aan de absorberende bodem bij opstelling 3.

Tabel 7. Totale IL van opstelling 2 en 3 voor microfoon 1 en 2 voor een ruisbron; STK= steenkorf.

	Microfoon 1			Microfoon 2		
	STK 1 (dB)	STK 2 (dB)	STK 3 (dB)	STK 1 (dB)	STK 2 (dB)	STK 3 (dB)
Opstelling 2	5,8	6,7	8,0	5,9	6,9	8,5
Opstelling 3	2,9	1,5	3,3	1,1	0,4	2,1

De resultaten van microfoon 3 voor opstelling 3 zijn gelijkaardig aan die van opstelling 1 en 2. Microfoon 4 daarentegen vertoont een andere patroon dan de voorgaande vaststellingen, namelijk de IL daalt naarmate de frequentie toeneemt, zie figuur 16. Dit wil zeggen dat de reflectie het grootst is bij hoge frequenties. Dit is in eerste opzicht niet in lijn met de literatuur waarbij meer absorptie wordt verwacht voor poreus materiaal bij hoge frequenties dan bij lage frequenties (Hawkins, 2014). Anderzijds treedt meer verstrooiing op bij hogere frequenties.



Figuur 16. Spectrale insertion loss voor opstelling 3, microfoon 4; STK= steenkorf, MF= microfoon.

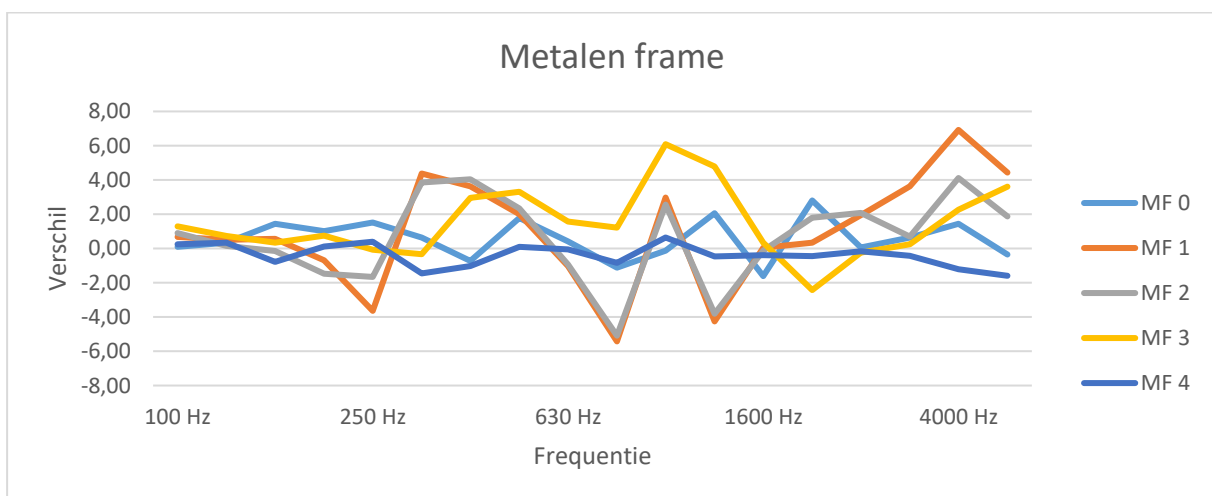
3.3.4 Opstelling 4

Opstelling 4 is gelijkaardig aan opstelling 1, uitgezonderd de luidspreker die verder van de steenkorf wordt geplaatst. Het verder verplaatsen van de luidspreker representeert een realistischere situatie waarbij de auto zich verder van de woning bevindt.

De resultaten voor microfoon 1, 2 en 3 voor opstelling 4 tonen weinig verschil met deze van opstelling 1. Over het algemeen is de IL het grootst bij steenkorf 3 vervolgens bij steenkorf 2 en 1. Dit kan verklaard worden doordat steenkorf 3 is gevuld met lavastenen. De lavastenen zijn poreus waardoor ze meer geluid kunnen absorberen dan bijvoorbeeld de keien (stenkorf 1). Steenkorf 3 absorbeert meer dan steenkorf 2 doordat de steenkorf dikker is en er dus meer stenen zijn die het geluid kunnen absorberen. De IL van microfoon 4 situeert zich tussen -4 en 4 dB afhankelijk van de frequentie. Het verder verwijderen van de bron zorgt ervoor dat de bekomen IL voor microfoon 3 lager is dan wanneer de bron nabij de steenkorf is geplaatst. Dit is in lijn met eerdere bevindingen, waarbij de steenkorf minder efficiënt wordt naarmate de afstand tussen de bron en de geluidsbarrière groter wordt (Departement LNE, s.d.; The Centre for Urban Design, Roads and Maritime Services, 2006).

3.4 Metalen frame

Om de impact van de stenen en het metalen frame uit te splitsen, werd een meting uitgevoerd op het frame zonder stenen. Op figuur 17 is het verschil in geluidsdrukniveau weergegeven. Ontvangers aan de bronzijde van het frame van de steenkorf ervaren geen verschil in geluidsdrukniveau, met andere woorden het metalen frame zorgt niet voor reflectie in tegenstelling tot de stenen. Ontvangers achter het metalen frame van de steenkorf ervaren wel een zekere reductie in geluidsdrukniveau. De IL van microfoon 3 is nagenoeg altijd positief. De IL voor microfoon 1 en 2 tonen weinig verschil alleen bij de hogere frequenties is er verschil tussen beide microfoons waar te nemen. Dit kan te wijten zijn aan de positie van de palen, die niet symmetrisch waren ten opzichte van deze microfoons. Over het algemeen is de IL bij lage frequenties rond de nul.

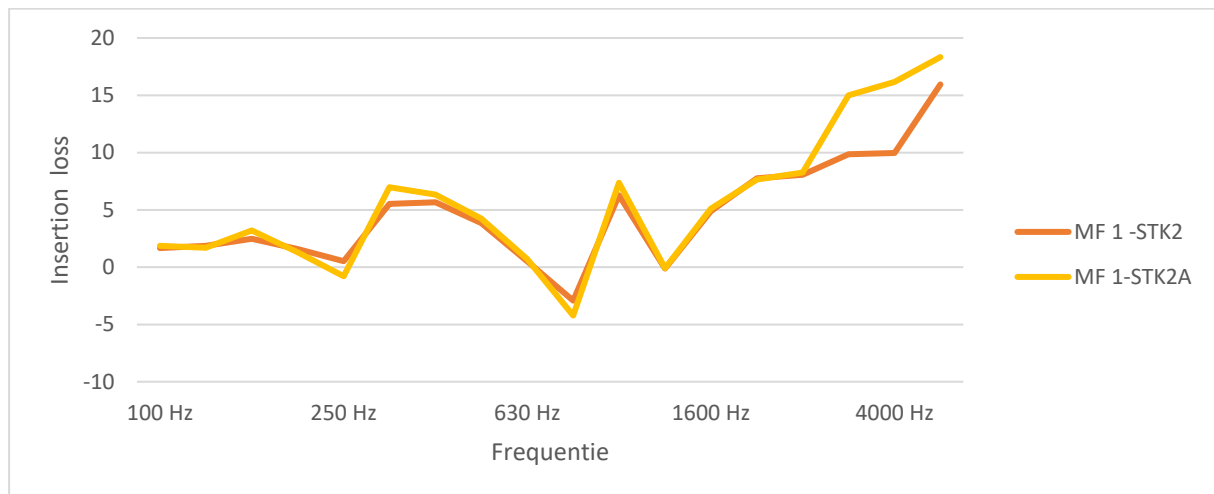


Figuur 17. Het verschil bij aan- en afwezigheid van het metalen frame voor opstelling 1; MF= microfoon.

3.5 Steenkorf 2-140 cm

Bij het vullen van steenkorf 3 waren er niet genoeg stenen aanwezig waardoor de bovenste vijf mazen ongevolgd bleven. Dit komt overeen met een hoogte van 140 cm. Steenkorf 2 werd zowel volledig gevuld, tot op een hoogte van 160 cm, als gevuld tot een hoogte van 140 cm. Steenkorf 2 gevuld tot een hoogte van 140 cm wordt in het vervolg van deze studie benoemd als steenkorf 2A. De meting bij steenkorf 2A werd uitgevoerd voor opstelling 1 en 2.

De IL van steenkorf 2, volledig en gedeeltelijk gevuld, vertonen weinig verschil ten opzichte van elkaar. Op figuur 18 wordt de IL voor steenkorf 2 en 2A afgebeeld. Enkel bij de hoge frequenties is er klein verschil waar te nemen tussen de IL van steenkorf 2 en steenkorf 2A.



Figuur 18. Spectrale insertion loss voor opstelling 1, microfoon 1; STK= steenkorf, MF= microfoon.

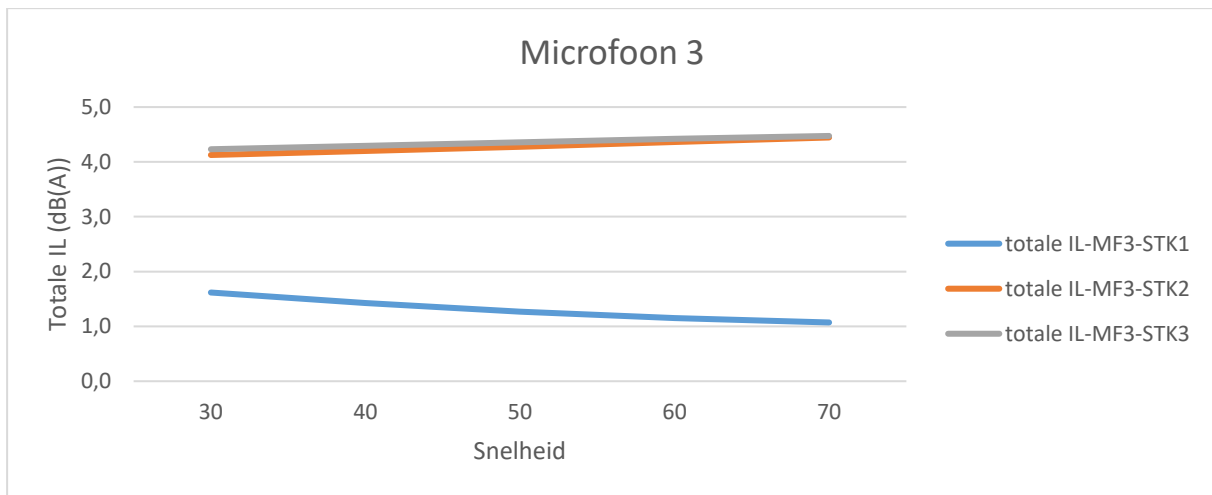
Bij opstelling 2 is hetzelfde patroon waar te nemen, namelijk het verschil tussen de volledige en gedeeltelijk gevulde steenkorf is klein. Echter bij microfoon 3 is de IL van steenkorf 2 hoger dan de IL van steenkorf 2A bij hoge frequenties. Dit wil zeggen dat wanneer de steenkorf maar gedeeltelijk is gevuld (steenkorf 2A) er meer transmissie is naar ontvangers toe. Terwijl een volledig gevulde steenkorf de geluidsgolven beter tegenhoudt doordat het geluid wordt geabsorbeerd, gereflecteerd en het directe pad beter wordt afgeschermd. Het verschil in IL tussen een volledige en een gedeeltelijk gevulde steenkorf blijft klein, aangezien het verschil in hoogte slechts 20cm is.

3.6 Totale insertion loss voor wegverkeersgeluid

Met behulp van het Harmonoise/Imagine bronvermogenmodel wordt op basis van de uitgevoerde metingen de totale IL voor verschillende scenario's van wegverkeer ingeschat. Harmonoise maakt een onderscheid tussen verschillende types voertuigen. De types voertuigen worden onderverdeeld in 4 categorieën. Onder de noemer categorie 1 voertuigen vallen lichte voertuigen zoals personenwagens, bestelwagens en caravans. Categorie 2 omvat de middelmatig zware voertuigen bijvoorbeeld bestelwagens boven de 3,5 ton. Categorie 3 omvat de zware voertuigen zoals vrachtwagens en bussen. Categorie 4 omvat de aangedreven tweewielers zoals, quads, motorfietsen en driewielers (Peeters & Blokland, 2007). In dit onderzoek werd er gekozen voor een verdeling van 5% categorie 3 voertuigen en 95% categorie 1 voertuigen, wat typisch is voor stadsverkeer. Voor het bronvermogenmodel worden enkel de resultaten van microfoon 3 bij opstelling 4 besproken, aangezien deze de meest realistische wegverkeerssituatie voorstelt.

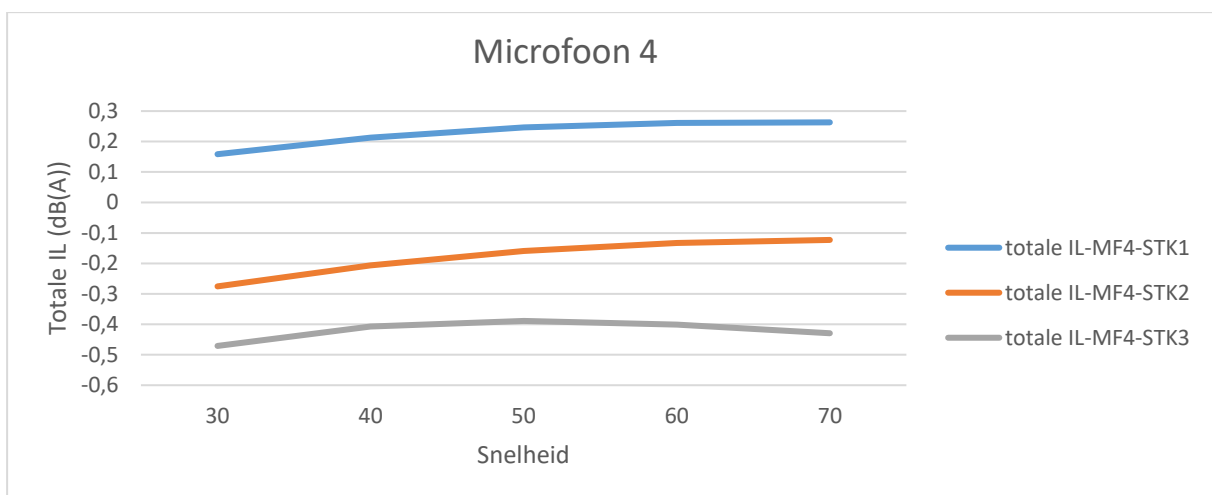
Opstelling 4

Op figuur 19, is te zien dat er weinig verschil is tussen steenkorf 2 en 3 bij een wegverkeersscenario. De IL van opstelling 4 is lager in vergelijking met opstelling 1, met andere woorden het verder plaatsen van de bron zorgt voor een vermindering in de geluidreductie, dit is lijn met de literatuur (Departement LNE, s.d.; The Centre for Urban Design, Roads and Maritime Services, 2006).



Figuur 19. Totale IL voor opstelling 4, microfoon 3; STK= steenkorf, MF= microfoon.

Tot slot heeft steenkorf 3 de laagste IL bij microfoon 4 gevolgd door steenkorf 2 en steenkorf 1. Dit wil zeggen dat de meeste reflectie optreedt bij steenkorf 3. Opmerkelijk is de positieve IL bij steenkorf 1, dit zou kunnen wijzen op destructieve interferentie of transmissie. Er kan geconcludeerd worden, op basis van de lage IL, dat er weinig reflectie is waar te nemen bij het verder verwijderen van de bron.



Figuur 20. Totale IL voor opstelling 4, microfoon 4; STK= steenkorf, MF= microfoon.

3.6.1 Verkeerssamenstelling

Naast snelheid heeft ook de verkeerssamenstelling een invloed op de totale IL. Het verhogen van het aantal zware vrachtwagens, van 5% naar 20%, resulteerde in een lagere efficiëntie van de steenkorven. In tabel 8 is de totale IL van microfoon 3 bij 5% en 20% vrachtwagens weergegeven voor steenkorf 3. De totale IL wordt lager wanneer het aantal zware voertuigen op de weg toeneemt.

Tabel 8. Totale IL bij een verdeling van 5% en 20 % categorie 3 voertuigen voor opstelling 4, microfoon 3.

	30 km/u		50 km/u		70 km/u	
	5%	20%	5%	20%	5%	20%
Steenkorf 3 (dB(A))	4,2	4,1	4,3	4,2	4,5	4,3

Voor alle andere opstelling is éénzelfde patroon waar te nemen, namelijk de totale IL wordt lager bij aanwezigheid van 20% categorie 3 voertuigen. Dit komt overeen met de spectrale IL, waar bij lage

frequenties een veel beperktere geluidsreductie werd opgemeten. Echter het verschil in IL is tussen 5% en 20% zware voertuigen is zeer klein.

4 Discussie

4.1 Efficiëntie steenkorven

De metingen voor de drie verschillende steenkorven, uitgevoerd in de half-anechoïsche kamer, geven een duidelijk antwoord op de onderzoeksvragen. Deze worden achtereenvolgens besproken.

De drie steenkorven onderling hebben een verschillende efficiëntie. Over algemeen zorgt steenkorf 3 voor de hoogste geluidsreductie gevolgd door steenkorf 2 en 1. Met het bronvermogenmodel werd een geluidsreductie tussen de 4,2 en de 4,5 dB(A) bekomen voor steenkorf 3. Steenkorf 2 behaalt een geluidreductie tussen de 4,1 en de 4,5 dB(A). Steenkorf 1 zorgt voor een geluidsreductie tussen de 1,1 en de 1,6 dB(A). Ontvangers voor de steenkorf zullen een stijging in geluidrukniveau waarnemen als gevolg van reflectie. Steenkorf 1 en 3 reflecteren het meeste geluid echter deze reflectie is niet aanzienlijk en zal het geluidrukniveau voor de steenkorf met maximum 0,5 dB(A) doen stijgen. Echter bij aanwezigheid van een absorberende bodem vindt er meer reflectie plaats voor steenkorf 1. Steenkorf 2 en 3 daarentegen vertonen nauwelijks reflectie bij een absorberende bodem. Dit duidt erop dat er belangrijke interacties optreden tussen reflecties op de korf en de bodem.

Er kan geconcludeerd worden dat steenkorf 3 het meest efficiënt is als gevolg van het soort steen en de dikte. Eerst en vooral zijn lavastenen poreuzer dan keien en zullen zij het geluid deels absorberen. De absorptie zorgt ervoor dat er minder ongewilde reflectie plaatsvindt naar de overkant. Van Renterghem et al. (2012) vond dat absorberende barrières essentieel zijn opdat geluidsreductie, in stedelijk gebieden, mogelijk is. Dit omdat geluid meerdere keren gereflecteerd wordt. Naast absorptie van geluid door de lavastenen heeft ook de steengrootte een invloed op de efficiëntie. Steenkorf 2 is bij midden en hoge frequentie efficiënter dan steenkorf 1. Dit kan verklaard worden doordat de steengrootte van de lavastenen groter zijn dan keien. Hierdoor is de verhouding van de golflengte ten opzichte van de steengrootte bij lavastenen kleiner dan bij keien waardoor deze minder zal afbuigen (Koussa et al., 2013). Tot slot draagt ook de dikte bij tot de reductie van geluid bij steenkorven. Steenkorf 3 is efficiënter als steenkorf 2, aangezien zij beide uit lavastenen zijn opgebouwd is de extra reductie toe te wijzen aan dikte van de steenkorf. Dit wordt bevestigd in de literatuur. Poreus materiaal absorbeert meer geluid naarmate de dikte ervan toeneemt. Naarmate de poreuze laag dikker wordt, kunnen grotere golflengtes worden geabsorbeerd (Hawkins, 2014).

Daarnaast wordt de efficiëntie van een steenkorf sterk beïnvloed door de bodem waarop het geplaatst is. De resultaten tonen aan dat een steenkorf op een harde bodem (opstelling 2) een hogere IL heeft dan een steenkorf op een zachte bodem (opstelling 3). Dit werd bevestigd in eerder onderzoek waar een hogere IL werd bekomen voor een barrière op een asfalt bedekte bodem in plaats van een gras bedekte bodem (Isei, Embleton & Piercy, 1998). Zowel Embleton (1996) als Isei et al. (1998) besluiten dat het plaatsen van een barrière het bodemeffect tenietdoet en dat er een afweging moet gemaakt worden tussen het bodemeffect en het barrière effect. Het plaatsen van een steenkorf, gevuld met keien, op een zachte bodem zorgde zelfs voor een negatieve IL bij bepaalde frequentie.

De lage en hoge ontvangers achter de steenkorf, respectievelijk microfoon 1, 2 en 3 vertonen allemaal hetzelfde patroon, namelijk de IL stijgt naarmate de frequenties toenemen. Eerder studies tonen aan dat lage frequenties makkelijker diffracteren dan hoge frequenties wat resulteert in een hogere IL voor hoge frequenties (Hendriks, 1998). Ook Koussa et al. (2013) vond dat steenkorven efficiënter zijn voor midden en hoge frequenties. De efficiëntie van een steenkorf is naast frequentie ook afhankelijk van de

positie van de bron en ontvanger ten opzichte van de barrière. Wanneer de afstand tussen bron en de steenkorf verkleint (opstelling 2) dan stijgt de IL van steenkorf 1 en 2 ten opzichte van opstelling 1. Echter de IL van steenkorf 3 is gelijkaardig aan de IL bij opstelling 1. Dit is lijn met de verwachtingen, namelijk naarmate de afstand tussen de bron en de barrière kleiner wordt, zal de barrière efficiënter zijn. Het omgekeerde wordt ook bevestigd, namelijk de IL daalt naarmate de bron verder van de steenkorf wordt verwijderd (opstelling 4).

Microfoon 1 en 2 zijn op dezelfde positie ten opzichte van elkaar en van de steenkorf geplaatst. Deze gelijkaardig positie zou zich dan ook moeten vertalen in dezelfde IL bij aanname van uniform gedrag. Echter de IL van microfoon 1 en 2 bij opstelling 2, 3 en 4 is verschillend van elkaar. Bij opstelling 2 en 4 is de IL van microfoon 2 hoger als deze van microfoon 1. Terwijl bij opstelling 3 de IL van microfoon 1 hoger is als de IL van microfoon 2. Een mogelijk oorzaak hiervoor is de positionering van de palen en de invloed hiervan op de verdeling van de stenen of een positioneringsfout.

De lengte van de steenkorf kan een mogelijk probleem vormen. De lengte moet voldoende lang zijn opdat de ontvangers afgeschermd zijn van het verkeerslawaaï. Volgens Hendriks (1998) moet de lengte van de steenkorf gelijk zijn aan vier keer de loodrechte afstand tussen de ontvanger en de barrière. Indien we microfoon 3 als ontvanger nemen dan zou de lengte van de steenkorf gelijk moeten zijn aan 12 m. Volgens Kotzen & English (1999) moet de lengte van een geluidsscherm een hoek van 160 graden bedekken vanuit het standpunt van de ontvanger, dit komt overeen met een lengte van 34,02 m. Boven genoemde lengtes zijn niet realistisch voor een particulier aangezien deze lengtes zeer groot zijn en dit de perceelgrenzen hoogstwaarschijnlijk overschrijdt. Er zal dus diffractie plaatsvinden langs de zijkanten van de steenkorf waardoor de efficiëntie wat zal dalen.

Dit onderzoek kende ook enige beperkingen. Eerst en vooral is er de invloed van de positionering van de microfoons. De resultaten van de positioneringsfout tonen een maximale uitwijking van 3 dB aan bij hoge frequenties. Het verplaatsen van de microfoons en luidspreker bij elke opstelling en steenkorf kunnen onderhevig zijn aan kleine afwijkingen. Daarnaast kon steenkorf 3 niet volledig gevuld worden, doordat niet genoeg stenen voorhanden waren. Met als gevolg dat het individueel geluidsreducerend potentieel van steenkorf 3 theoretisch niet volwaardig bestudeerd kon worden. Echter wanneer steenkorf 2 volledig werd gevuld en gedeeltelijk (stenkorf 2A) was er slechts een klein verschil in IL. Tot slot waren de stenen vochtig tijdens de metingen, aangezien deze buiten werden opgeslagen. Eerder onderzoek wees uit dat een verminderde absorptie kan waargenomen worden als gevolg van het vochtgehalte van het absorberend materiaal (Wassilieff, 1996). Met andere woorden er is dus een onderschatting van het absorberend vermogen van de steenkorven. Dit zal vooral voorkomen bij de poreuze lavastenen.

4.2 Steenkorf- haag- conventionele geluidsbarrière

Een klassieke geluidsbarrière naast de weg verhindert het directe pad van bron naar ontvanger. Een deel van het geluid ondervindt diffractie over de top of via de zijkanten van de geluidsbarrière. Naast diffractie kan er ook reflectie en absorptie plaatsvinden. Transmissie van geluid doorheen een geluidsbarrière is beperkt als gevolg van de dichtheid van de barrière. Er kan dus geconcludeerd worden dat diffractie zorgt voor de grootste bijdragen aan het geluid achter de geluidsbarrière. Er kan dan ook een IL tussen 5 en 12 dB(A) verwacht worden voor wegverkeer (Bossuyt, 2013). Er kan een bijkomende reductie van 5 dB(A) bereikt worden door een overkapping te plaatsen op de geluidsbarrière (Van Renterghem et al., 2015a).

Hagen worden vaak gebruikt als omheining. De bladeren en de takken/stam van de haag zorgen voor verstrooiing van het geluid. Daarnaast zorgen de bladeren er ook voor dat geluid wat geabsorbeerd wordt (Van Renterghem et al., 2015_c). De absorptie en verstrooiing is beperkt tot hoge frequenties. Naast de beperkte absorptie en verstrooiing, vindt er nauwelijks diffractie plaats bij hagen aangezien het grotendeel van het geluid door middel van transmissie de ontvanger bereikt (Van Renterghem et al., 2015_b). Geluidsreductie door de vegetatiestructuren, inclusief het bodemeffect, levert maximum 3 dB(A) voor wegverkeersgeluid (Van Renterghem et al., 2014), en dit in geval van zeer dikke en dichte hagen.

Bij steenkorven vindt zowel diffractie als reflectie, transmissie en absorptie plaats. In deze studie is duidelijk te zien dat er reflectie plaatsvindt en dit voornamelijk bij keien en bij de steenkorf met een breedte van 30 cm. Absorptie van geluid doet zich voornamelijk voor bij de lavastenen aangezien deze poreus zijn. Het geluid dringt binnen in de poreuze lavasteen en zal daar worden omgezet naar warmte. Daarnaast vindt er ook diffractie plaats langs de randen van de steenkorf en dit voornamelijk voor lage frequenties. Tot slot vindt er ook transmissie plaats als gevolg van de openingen tussen de stenen in de korf. Hierdoor verlaagt de efficiëntie van de barrière. Afhankelijk van de steenkorf wordt een geluidsreductie tussen de 1,1 dB(A) en de 4,5 dB(A) bereikt.

Er kan geconcludeerd worden dat een conventionele geluidsmuur het meest efficiënt is. Echter in stedelijke gebieden is een conventionele geluidsmuur niet geschikt wegens esthetische en praktische redenen. Wanneer particulieren de blootstelling aan geluid willen voorkomen is het plaatsen van een haag of een steenkorf een mogelijke individuele maatregel, echter op voorwaarde dat de muur voldoende lang kan gebouwd worden. Dit onderzoek toont aan dat met steenkorven een hogere geluidsreductie kan bereikt worden in vergelijking met hagen. De maximale reductie zoals hier gemeten, met het bronvermogenmodel, bedraagt 4,5 dB(A), dit benadert een verdubbeling van de afstand van de bron ten opzichte van de ontvanger bij een puntbron, of een verviervoudiging bij een lijnbron zoals wegverkeer. Een steenkorf lijkt een nuttige individuele maatregel. Bemerkt dat het halveren van het aantal voertuigen zou resulteren in een verschil van 3 dB terwijl met een steenkorf een sterker effect wordt bereikt.

5 Conclusie

In dit onderzoek werd getracht een antwoord te geven op de vraag 'Beïnvloedt een lage steenkorf de voortplanting van geluid, onder gecontroleerde labo-omstandigheden?'. Waarbij specifiek wordt gekeken naar de invloed van de dikte van de steenkorf en de soort steen. Aan de hand van metingen in een half-anechoïsche kamer werden drie verschillende steenkorven bestudeerd.

De resultaten van dit onderzoek wezen uit dat steenkorven de voortplanting van geluid beïnvloeden. Een steenkorf gevuld met lavastenen en een dikte van 30 cm (steenkorf 3) reduceert het meeste geluid. Een steenkorf gevuld met keien (steenkorf 1) zal meer geluid reflecteren en minder geluid absorberen waardoor zijn efficiëntie lager ligt. Een steenkorf gevuld met lavastenen en een dikte van 20 cm (steenkorf 2) heeft een efficiëntie tussenin. Er kan geconcludeerd worden dat lavastenen boven keien kunnen verkozen worden aangezien zij het geluid ook voor een stuk absorberen. Bovendien zal een dikkere steenkorf resulteren in een hogere geluidsreductie.

In dit onderzoek werd ook vastgesteld dat het type bodem waarop de steenkorf is gesitueerd van belang is. De IL van de steenkorf is hoger bij een harde bodem dan bij een zachte bodem. Wanneer een steenkorf wordt geplaatst op een zachte bodem is het van belang om een afweging te maken tussen het bodem- en het barrière effect. Daarnaast heeft ook de afstand van de bron ten opzichte van de steenkorf een invloed op de geluidsreductie. Wanneer de bron dichter naar de steenkorf werd geplaatst, werd er een stijging in IL waargenomen bij de steenkorf met keien en de steenkorf met lavastenen en een dikte van 20 cm. Het verder verwijderen van de bron zorgde voor een daling in de efficiëntie van de steenkorven. Tot slot werden voornamelijk hoge frequenties gereduceerd, in tegenstelling tot lage frequenties.

Er kan geconcludeerd worden dat steenkorven geschikt zijn als individuele maatregel om geluid te reduceren in stedelijke gebieden als deze voldoende lang kunnen uitgevoerd worden. Zij bieden een hogere geluidsreductie aan dan hagen en zijn onderhoudsvriendelijk. Deze lage geluidbarrière kan helpen bij het reduceren van wegverkeersgeluid in stedelijke gebieden waar de overheid geen acties onderneemt. Een steenkorf met absorberend materiaal zoals lavastenen en een dikte van 30 cm geeft de hoogste geluidsreductie, met een IL tot 4,5 dB(A) voor het wegverkeersscenario.

Dit onderzoek biedt verschillende mogelijkheden aan voor verder onderzoek. Toekomstig onderzoek zou zich kunnen toespitsen op het uitmeten van een in situ steenkorf en dus meer realistische bron-ontvanger positioneringen. Hierbij kunnen verscheidene aspecten in rekening gebracht worden, zoals de weersomstandigheden, bodemsamenstelling, vochtigheid en verschillende invalshoeken van wegverkeersgeluid op de steenkorf. Daarnaast zou het onderzoeken van een gelaagde structuur tot nieuwe inzichten kunnen leiden. In deze studie was het niet mogelijk om een gelaagde steenkorf te construeren. Echter eerder onderzoek wees uit dat een gelaagde steenkorf de geluidsreductie doet toenemen en dit vooral bij lage frequenties (Koussa et al., 2013). Dit zijn net die frequenties waar er in deze studie weinig geluidsreductie werd gemeten.

6 Referenties

- Attenborough, K., Benkreira, H., Botteldooren, D., Defrance, J., Forssén, J., Horoshenkov, K., (...) & Van Renterghem, T. (2010). Technical Report on state of the art of experience and models.
- Bockstaal, A., Botteldooren, D., De Coensel, B., Geentjens, G., Glorieux, C., & Kelders, L. (2012). *Impact van geluid op welzijn, leefmilieu en volksgezondheid in Vlaanderen* [rapport]. Opgehaald van http://ist.vito.be/nl/pdf/rapporten/rapport_geluidshinder.pdf
- Bossuyt, M. (2013). *Milieurapport Vlaanderen themabeschrijving Lawaai*. Opgehaald van http://www.milieurapport.be/upload/main/themabeschrijvingen/Themabeschrijving_Lawaai_TW.pdf
- Botteldooren, D., Dekoninck, L., Van Renterghem, T., Lauriks, W., Geentjens, G., & Bossuyt, M. (2007). *Milieurapport Vlaanderen achtergronddocument 2007, Hinder: Lawaai*. Opgehaald van http://www.milieurapport.be/Upload/main/AG2007_2.07a_8%20met%20voorblad.pdf
- Defrance J., Jean, P., Koussa, F., Van Renterghem, T., Kang, J., & Smyrnova Y. (2015). Innovative barriers. Nilsson E.M., Bengtsson, J., & Klæboe, R. (Eds.), *Environmental Methods for Transport Noise Reduction*. Florida: Taylor & Francis group.
- Defrance, J., Jean, P., Koussa, F., Horoshenkov, K., Khan, A., Benkreira, H., (...) & Forssén, J. (2013). Intermediate report of task 2.3. Innovative barriers exploiting natural materials.
- Departement leefmilieu, natuur en energie (2016). *Ontwerp actieplan wegverkeerslawaaï 2^{de} fase*. Opgehaald van: <https://www.lne.be/sites/default/files/atoms/files/ontwerp-actieplan-wegverkeer-fase2oo.pdf>.
- Departement leefmilieu, natuur en energie (s.d.). *Achtergrondinformatie over luchtverontreiniging en geluidshinder afkomstig van gemotoriseerd verkeer*. Opgehaald van <https://www.lne.be/sites/default/files/atoms/files/achtergrondinformatie.pdf>
- Embleton, T.F.W. (1996). Tutorial on sound propagation outdoors. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 100(1), 31-48.
- Federal Highway administration (2011). *Noise barrier design handbook*. Opgehaald van https://www.fhwa.dot.gov/environment/noise/noise_barriers/design_construction/design/design_03.cfm#sec3.5.4
- Hawkins, T.G. (2014). *Studies and research regarding sound reduction materials with the purpose of reducing sound pollution* [thesis]. Opgehaald van <http://digitalcommons.calpoly.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2263&context=theses>
- Hendriks, R. (1998). *Technical Noise Supplement - A Technical Supplement to the Traffic Noise*

- Analysis Protocol*. Opgehaald van <http://www.dot.ca.gov/hq/env/noise/pub/Technical%20Noise%20Supplement.pdf>
- Isei, T., Embleton, T.F.W., & Piercy, E.J. (1998). Noise reduction by barriers on finite impedance ground. *The journal of the Acoustical Society of America*, 67(1), 46-58.
- Kotzen, B. & English, C. (1999). *Environmental noise barriers : A guide to their acoustic and visual design*. London: E & FN spon.
- Koussa, F., Defrance, J., Jean, P., & Blanc-Benon P. (2013). Acoustics performance of gabions noise barriers: numerical and experimental approaches. *Applied Acoustics*, 74(1), 189-197.
- Morgan, P.A. (2010). *The acoustic durability of timber noise barriers on England's strategic road network*. Opgehaald van http://assets.highways.gov.uk/specialist-information/knowledge-compendium/2009-11-knowledge-programme/The_acoustic_durability_of_timber_noise_barriers_on_Englands_strategic_road_network.pdf
- Ohiduzzaman, M.D., Sirin, O., Kassem, E., & Rochat, J.L. (2016). State-of-the-Art Review on Sustainable Design and Construction of Quieter Pavements—Part 1: Traffic Noise Measurement and Abatement Techniques. *Sustainability*, 8(8), 1-28.
- Peeters, B., & Blokland, G.V. (2007). *The noise emission model for European road traffic*. Opgehaald van <https://www.mp.nl/sites/all/files/publicaties/IMA55TR-060821-MP10%20-%20IMAGINE%20Deliverable%20D11.pdf>
- Pigasse, G., & Kragh Jorgen (2011). *Optimised noise barriers: a state-of-the-art report*. Opgehaald van http://www.vejdirektoratet.dk/DA/viden_og_data/publikationer/Lists/Publikationer/Attachments/499/rapport%20194_web.pdf
- The Centre for Urban Design, Roads and Maritime Services (2006). *Noise wall design guideline*. Opgehaald van <http://www.rms.nsw.gov.au/documents/projects/planning-principles/urban-design/noise-wall-design-guideline.pdf>
- Totté, P., Nulens, E., & Dubois, D. (2010). *Geluidswerende maatregelen*. Opgehaald van https://wegenenverkeer.be/sites/awv/files/bestanden/Geluidswerende%20maatregelen_Voorbeeldenboek%20voor%20gewestwegen%20in%20Vlaanderen_def_0.pdf
- Vandevenne, F. (2015). *Totaal verloren gezonde levensjaren (DALY's) door milieuverstoringen*. Opgehaald van <http://www.milieuraapport.be/nl/feitencijfers/gevolgen-voor-mens-natuur-en-economie/milieu-mens-en-gezondheid/verloren-gezonde-levensjaren-evaluatie-van-de-volksgezondheid/totaal-verloren-gezonde-levensjaren-daly-rsquoos-door-milieuverstoringen/>
- Van Renterghem, T., Forssén, J., Attenborough, K., Jean, P., Defrance, J., Hornikx, M., & Kang, J. (2015a). Using natural means to reduce surface transport noise during propagation outdoors. *Applied Acoustics*, 92, 86-01.

- Van Renterghem, T., Botteldooren, D., Kang, J., Horoshenkov, K., & Yang, H.-S. (2015_b). Acoustical characteristics of trees, shrubs and hedges. Nilsson E.M., Bengtsson, J., & Klaeboe, R. (Eds.), *Environmental Methods for Transport Noise Reduction*. Florida: Taylor & Francis group.
- Van Renterghem, T., Attenborough, K., & Jean, P. (2015_c). Designing vegetation and tree belts along roads. Nilsson E.M., Bengtsson, J., & Klaeboe, R. (Eds.), *Environmental Methods for Transport Noise Reduction*. Florida: Taylor & Francis group.
- Van Renterghem, T., Attenborough, K., Maennel, M., Defrance, J., Kang, J., (...) & Yang, H.-S. (2014). Measured light vehicle noise reduction by hedges. *Applied Acoustics*, 78, 19-27.
- Van Renterghem, T., Botteldooren, D., Hornikx, M., Jean, P., Defrance, J., Smyrnova, Y., & Kang, J. (2012). Road traffic noise reduction by vegetated low noise barriers in urban streets. Proceedings of the 9th European Conference on Noise Control.
- Van Steertegem, M. (2014). *Percentage van de bevolking blootgesteld aan wegverkeergeluid*. Opgehaald van <http://www.milieurapport.be/nl/feitencijfers/milieuthemas/hinder-door-lawaaigeur-en-licht/lawaai-lawaa-in-de-omgeving/percentage-van-de-bevolking-blootgesteld-aan-wegverkeergeluid/>
- Viollon, S., Lavandier, C., & Drake, C. (2002). Influence of visual setting on sound ratings in an urban environment. *Applied Acoustics*, 63(5), 493-511.
- Wassilieff, C. (1996). Sound absorption of wood-based materials. *Applied Acoustics*, 48(4), 339-356.
- Watts, G., & Morgan, P. (2006). Measurement of airborne sound insulation of timber noise barriers: Comparison of in situ method CEN/TS 1793-5 with laboratory method EN 1793-2. *Applied acoustics*, 68(4), 421-436.
- Watts, G., Chinn, L. & Godfrey, N. (1999). The effects of vegetation on the perception of traffic noise. *Applied Acoustics*, 56(1), 39-56.
- Watts, G. (1996). Acoustic Performance of Parallel Traffic Noise Barriers. *Applied Acoustics*, 47(2), 95-119.
- Wauters, E., Janssens, S., Nagels, M., Schillemans, S., Vrankx, S., & Dhondt, A. (2015). *Analyse van omgevingslawaa en luchtverontreiniging in functie van het ruimtelijk beleid*. Opgehaald van www.2vlaanderen.be/ruimtelijk/onderzoek/studies/lucht_lawaai_2015DI.pdf.