

**TNO-rapport****TNO 2020 R11645****Vergelijking van meet- en rekenresultaten  
voor de Whiswall****Defensie & Veiligheid**  
Oude Waalsdorperweg 63  
2597 AK Den Haag  
Postbus 96864  
2509 JG Den Haag[www.tno.nl](http://www.tno.nl)T +31 88 866 10 00  
F +31 70 328 09 61

Datum	Januari 2021
Auteur(s)	Dr. ir. F.J.M. van der Eerden R. Kurylek MSc Dr. T.P.R. van der Laan
Aantal pagina's	32 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	3
Opdrachtgever	Rijkswaterstaat
Projectnummer	060.45041

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van TNO.

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

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 2021 TNO

## Samenvatting

Voor de ontwikkeling van een rekenregel met een diffractor op een scherm, in het Reken- en Meetvoorschrift Geluid, zijn de volgende 5 fasen gedefinieerd:

- 1 Het uitvoeren van gecontroleerde metingen aan de Whiswall, met een meetopstelling op een 4 meter hoog scherm om de producteigenschappen te bepalen en meetopstellingen langs een weg met een 1,1 meter hoge afscherming, met en zonder diffractor, en zonder scherm als referentie.
- 2 Een vergelijking van de meetresultaten met rekenresultaten uit een numeriek model, voor de situaties uit fase 1.
- 3 Een vergelijking van meetresultaten met rekenresultaten langs het spoor.
- 4 Het berekenen van het effect van de Whiswall voor weg en spoor op grotere afstanden en verschillende geometrieën (bron – scherm – bodemhardheid – ontvanger). De database met rekenresultaten wordt gebruikt om de rekenregel te ontwikkelen, met de producteigenschappen van de diffractor als input.
- 5 De ontwikkeling, implementatie en toetsing van de rekenregel voor een diffractor op een scherm.

In dit rapport (fase 2) worden de resultaten van metingen die M+P heeft uitgevoerd op Technology Base (fase 1), de voormalige vliegbasis Twente, vergeleken met de resultaten zoals berekend met een numeriek eindige elementen model. Het doel van dit onderzoek is om het numerieke model te valideren met de metingen, waarna het model voor wegverkeer in fase 4 kan worden ingezet.

Aangetoond is dat het numeriek model het gemeten spectrale effect van de Whiswall goed reproduceert. Er is voor de frequenties tussen 100 en 2500 Hz een goede overeenkomst. Alleen in de tertsband van 400 Hz, waar de langste resonator van de Whiswall actief is, dient een empirische correctie te worden toegepast van 2 tot 3 dB voor een betere overeenstemming met metingen. De berekenen de resultaten geven voldoende vertrouwen om het model toe te passen voor berekeningen van het effect van de Whiswall in andere situaties en voor grotere afstanden, waarbij de invloed van meewind in de berekeningen wordt meegenomen.

# Inhoudsopgave

	<b>Samenvatting</b> .....	<b>2</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding</b> .....	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Metingen</b> .....	<b>5</b>
2.1	Bepaling van de diffractie karakteristieken (diffractietest) .....	5
2.2	Geluidoverdracht metingen met kunstbron .....	6
2.3	CPB-metingen .....	8
<b>3</b>	<b>Numerieke berekeningen</b> .....	<b>10</b>
3.1	Modelomschrijving .....	10
3.2	Vergelijking meten – rekenen: diffractietest .....	14
3.3	Vergelijking meten – rekenen: kunstbron .....	16
3.4	Vergelijking meten – rekenen: CPB.....	19
<b>4</b>	<b>Conclusies</b> .....	<b>23</b>
<b>5</b>	<b>Ondertekening</b> .....	<b>24</b>
	<b>Bijlage(n)</b>	
	A Model definities	
	B Figuren met meet- en rekenresultaten	
	C Bodem-impedantie metingen	

# 1 Inleiding

Een diffractor op een (laag) scherm, in deze de Whiswall van het bedrijf 4Silence, zorgt in vergelijking met een scherm voor een aanvullende geluidafscherming achter het scherm. De rij met resonatoren van verschillende lengtes creëert daartoe een schaduwzone, zoals dat ook is aangetoond voor de diffractor zonder scherm in de wegberm (met de resonatoren op gelijke hoogte met het wegdek).

Voor de diffractor in de wegberm is op basis van meet- en rekenresultaten een “rekenregel voor diffractoren” ontwikkeld die recentelijk is opgenomen in het Reken- en Meetvoorschrift Geluid. Hiermee kan het geluid reducerende effect worden bepaald voor wegverkeersgeluid volgens de Standaard Rekenmethode 2 (SRM2).

Een vergelijkbare aanpak is voorzien voor de ontwikkeling van een rekenregel met een diffractor op een scherm. Hiervoor zijn de volgende 5 fasen gedefinieerd:

- 1 Het uitvoeren van gecontroleerde metingen aan de Whiswall  
Meetopstelling 1: Op een 4 meter hoog scherm om de producteigenschappen te bepalen.  
Meetopstelling 2 & 3: Langs een weg en met een 1,1 meter hoge afscherming, met en zonder Whiswall, en zonder scherm als referentie. Met als geluidbron een luidspreker (meetopstelling 2) en passages van lichte en zware voertuigen (meetopstelling 3).
- 2 Een vergelijking van de meetresultaten met rekenresultaten uit een numeriek model, voor de situaties uit fase 1.
- 3 Een vergelijking van meetresultaten met rekenresultaten langs het spoor.
- 4 Het berekenen van het effect van de Whiswall voor weg en spoor op grotere afstanden en verschillende geometrieën (bron – scherm – bodemhardheid – ontvanger).  
De database met rekenresultaten wordt gebruikt om de rekenregel te ontwikkelen, met de producteigenschappen van de diffractor als input.
- 5 De ontwikkeling, implementatie en toetsing van de rekenregel voor een diffractor op een scherm.

In dit rapport (fase 2) worden de resultaten van metingen die M+P heeft uitgevoerd op Technology Base (fase 1), de voormalige vliegbasis Twente, vergeleken met de resultaten zoals berekend met een numeriek eindige elementen model. Het doel van dit onderzoek is om het numerieke model te valideren met de metingen, waarna het model voor wegverkeer in fase 4 kan worden ingezet.

Dit rapport is als volgt opgebouwd. In hoofdstuk 2 wordt de geometrie van de drie meetopstellingen kort beschreven, alsmede een aantal meetresultaten, voor: 1) de diffractietest op een hoog scherm, 2) de resultaten met een kunstbron/luidspreker en 3) de resultaten voor passages met lichte voertuigen en een vrachtwagen. Hoofdstuk 3 beschrijft de opzet van het numerieke model en toont de vergelijkingen tussen meet- en rekenresultaten. In hoofdstuk 4 worden de conclusies gepresenteerd t.a.v. de validatie van het numerieke model.

## 2 Metingen

### 2.1 Bepaling van de diffractie karakteristieken (diffractietest)

In figuur 1 is de opstelling getoond van een 4 meter hoog scherm met daarop het metalen gedeelte van de Whiswall. De metingen zijn uitgevoerd volgens de norm NEN-EN 1793-4:2015 “Verkeersgeluidbeperkende constructies – Beproevingmethoden voor de bepaling van de akoestische prestatie – Deel 4: Intrinsieke karakteristieken – In situ waarden van de geluiddiffractie.”

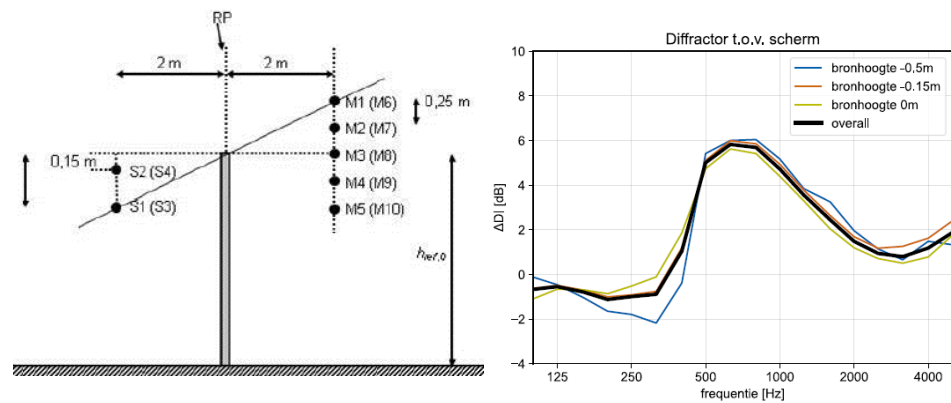
Het doel van deze metingen is:

- het bepalen van de producteigenschappen van de diffractor conform de NEN-EN norm 1793-4;
- de validatie van het numerieke model.



Figuur 1 Impressie van de diffractietest metingen op een 4 meter hoge wand, met een luidspreker op 2 meter afstand en 5 microfoons op 2 meter achter de voorzijde van de Whiswall.

Links in figuur 2 is de opstelling van de diffractietest schematisch weergegeven. De tekening is overgenomen uit de norm NEN-EN 1793-4 en toont de bronposities S1 en S2 en de microfoonposities M1 t/m M5. In de diffractietest worden de gemeten geluidniveaus op de posities M1 t/m M5 in de situatie met Whiswall op het 4 meter hoge scherm vergeleken met de metingen in de situatie zonder de Whiswall. Bij die hoogte en een lengte van de afscherming van 10 meter, kunnen bij de impulsresponsie de bodemreflecties en de diffracties aan de randen buiten de analyse worden gehouden. Er is één bronhoogte toegevoegd, met de luidspreker op dezelfde hoogte als het hoogste punt (van de Whiswall of het scherm). De metingen zijn uitgevoerd met de lijn tussen bron en microfoon loodrecht op de lijn van de top van de afscherming en onder een hoek van 45 graden.



Figuur 2 Links: Schematische weergave van de diffractietest (NEN-EN 1793-4:2015) met 2 bronlocaties S1 en S2. Voor de metingen is een extra bronpositie toegevoegd, met de hoogte gelijk aan het scherm en de Whiswall. Rechts: Meetresultaten voor de diffractietest, gemiddeld over de 5 microfoonposities en 2 hoeken (M+P rapport RGPO.20.04.3, 20 augustus 2020). "Overall" is het gemiddelde van de 3 bronhoogtes.

Het verschil van beide resultaten, het diffractie index verschil  $\Delta DI$ , is gemiddeld over de vijf microfoonposities en over de twee dwarsdoorsneden (loodrecht over de afscherming en onder 45 graden). Dit is weergegeven in het rechter deel van figuur 2, in tertsbanden tussen 100 en 5000 Hz, zoals bepaald door M+P. Een positieve waarde van  $\Delta DI$  betekent dat een scherm met een Whiswall top betere diffractie-eigenschappen heeft dan een standaard geluidscherm, met als resultaat dat de schermwerking groter is (en het geluidniveau achter het scherm met de Whiswall lager is). Tussen 400 en 2000 Hz is het diffractie-verschil  $\Delta DI$  van de Whiswall 1 tot 6 dB, voor elk van de 3 bronhoogtes.

De relatief geringe variatie van de bronhoogte heeft een klein effect op de resultaten, waarbij de trend wordt gevolgd dat een lagere bronhoogte een iets grotere diffractie oplevert tussen 400 en 2000 Hz. En een wat kleinere diffractie tussen 200 en 315 Hz.

## 2.2 Geluidoverdracht metingen met kunstbron

In figuur 3 is een impressie weergegeven van de metingen aan de Whiswall, met een totale hoogte van 1,1 meter. De luidspreker is op de weg geplaatst op 3,5 meter afstand vanaf de voorzijde van het scherm. Er staan microfoons op 5 en 10 meter achter het scherm, op hoogtes van 1,2 / 2,0 / 3,0 en 5,0 meter.

Het doel van deze metingen is:

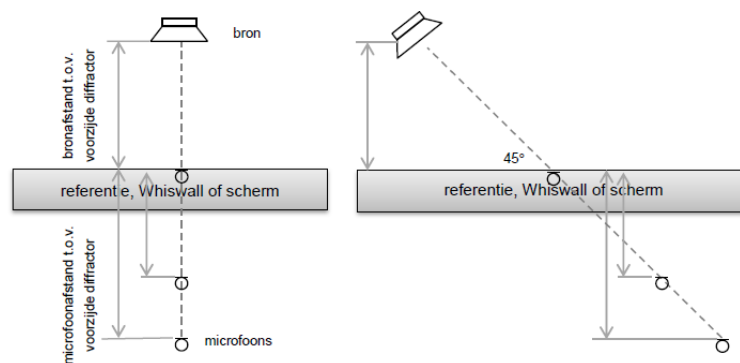
- de validatie van het numerieke model (bron + maatregel) met geconditioneerde metingen met een kunstbron(1) en met gecontroleerde passages van voertuigen(2).

Het gevalideerde model en de producteigenschappen worden in een volgende fase van dit project gebruikt om het effect van de maatregel op grotere afstand van de weg te bepalen (met PE- model berekeningen).



Figuur 3 Impressie van de metingen met een kunstbron (luidspreker) voor de Whiswall en microfoons op 5 en 10 meter achter de Whiswall, op 1,2 / 2,0 / 3,0 en 5,0 meter hoogte.

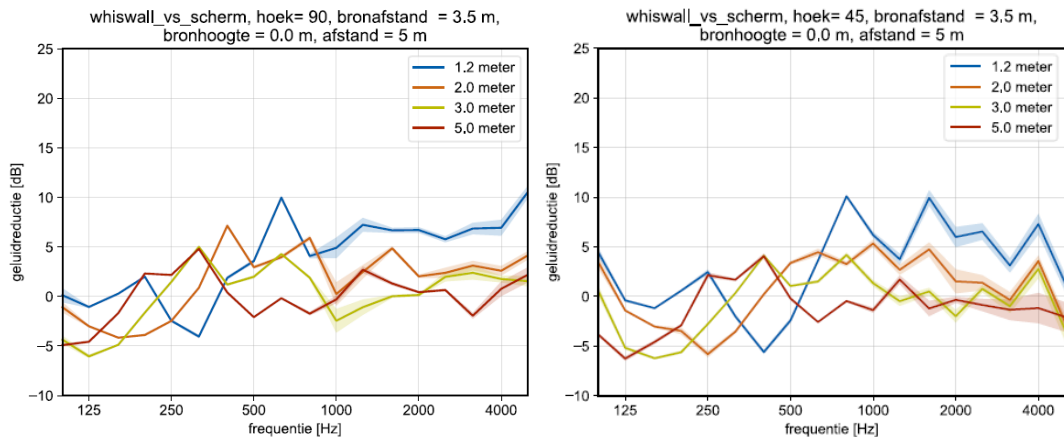
Voor de meer realistische situatie voor wegverkeer zijn punt-naar-punt-metingen uitgevoerd door gebruik te maken van een kunstbron (luidspreker), zie figuur 4. De luidspreker is op 3 hoogtes op de weg geplaatst: 1) met het hart van de luidspreker op 14 cm hoogte, 2) met het hart op 30 cm hoogte, en 3) met het hart op 75 cm hoogte. Er zijn metingen uitgevoerd voor twee dwarsdoorsneden: loodrecht op het scherm en onder een hoek van 45 graden.



Figuur 4 Schematische weergave voor de kunstbron en CPB metingen, zie ook figuur 6. (M+P rapport RGPO.20.04.3, 20 augustus 2020)

Ter illustratie zijn in figuur 5 de meetresultaten uit het rapport van M+P weergegeven voor twee dwarsdoorsneden, waarvoor de luidspreker op de weg was geplaatst. In navolging van de diffractietest wordt het verschil tussen de Whiswall en het scherm getoond, aangeduid als de aanvullende schermwerking. Waarbij een positieve waarde een hogere afscherming voor de Whiswall aanduidt ten opzichte van een scherm zonder diffractor met dezelfde hoogte. Er is op 4 hoogtes gemeten, waarbij met name de microfoons op 1,2 en 2,0 meter hoogte zich in de schaduwzone van de Whiswall bevinden. Het wat "grillige" resultaat is het gevolg van interferenties met de bodem. Deze interferentie met de bodem is verschillend voor de Whiswall en het referentie scherm (zonder diffractor).

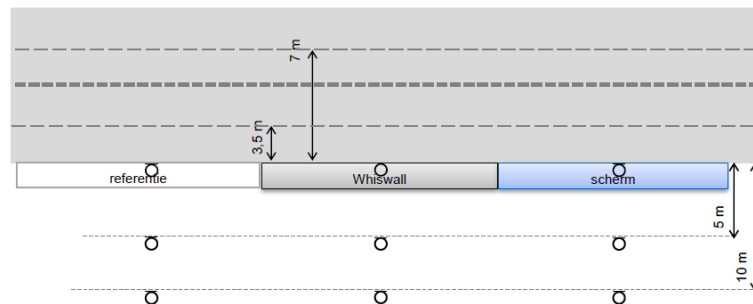
Een vergelijking tussen de resultaten van de diffractietest en de metingen met de luidspreker is niet een-op-een te maken vanwege het grote verschil tussen de meetopstellingen, waaronder het wel of niet aanwezig zijn van de interferentie met de bodem in de meetresultaten.



Figuur 5 Voorbeeld van de meetresultaten met de kunstbron voor 4 microfoonhoogtes; het verschil tussen de geluidsniveaus achter de Whiswall en achter het scherm. De aanvullende schermwerking (geluidreductie) is positief als de Whiswall een grotere afscherming geeft dan het rechte scherm. Bron op wegde hoogte (0,14 m) en 3,5 meter vanaf het scherm. Links: Loodrecht voor het scherm. Rechts: onder een hoek van 45 graden. (M+P rapport RGPO.20.04.3, 20 augustus 2020)

## 2.3 CPB-metingen

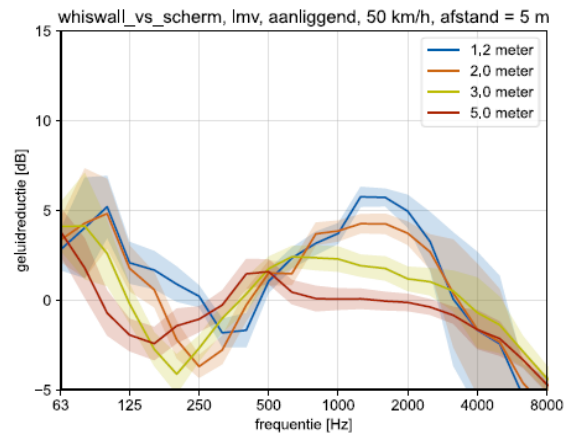
Passagemetingen met een constante snelheid, volgens de CPB-methode (controlled pass-by), zijn uitgevoerd met een drietal personervoertuigen en een vrachtwagen. Over een lengte van ongeveer 150 meter passeerden deze voertuigen achtereenvolgens drie secties. Zie figuur 6 met daarin de drie naast elkaar gelegen secties voor de referentie, Whiswall en het scherm. Het scherm heeft dezelfde hoogte als de totale hoogte van de Whiswall (1,1 meter). Er zijn twee rijbanen gebruikt, een aanliggende (rijbaan 1) en een verderaf gelegen baan (rijbaan 2). De positie van de microfoons is op 5 en 10 meter achter de voorzijde van het scherm.



Figuur 6 Schematische weergave van de drie doorsneden voor de kunstbron en CPB metingen. (M+P rapport RGPO.20.04.3, 20 augustus 2020)

De gemeten aanvullende schermwerking van de Whiswal is weergegeven in figuur 7, voor de lichte voertuigen en de aanliggende rijbaan. De resultaten van de passagemetingen laten zien dat de diffractor een positief effect heeft op de schermwerking. In de figuur is dit zichtbaar in het frequentiegebied tussen 500 en 2500 Hz. De aanvullende afscherming is sterk afhankelijk van de ontvanger hoogte, en is met name groter voor de lagere ontvangersposities (1,2 en 2m) die zich dieper in geluidschaduw bevinden.





Figuur 7 Voorbeeld van de gemeten CPB resultaten met passages van personen auto's op de nabij gelegen rijbaan. Verschil tussen de geluidniveaus achter de Whiswall en achter het scherm in dB (een positieve waarde geeft een hogere schermwerking voor de Whiswall). Spreiding rondom de lijnen is de standaarddeviatie. (M+P rapport RGPO.20.04.3, 20 augustus 2020)

Merk op dat de passagemetingen een minder grillig patroon vertonen dan de metingen met de luidspreker. Een lijnbron is minder gevoelig voor interferenties met de bodem dan een punt-naar-punt meting.

Figuur 7 laat ook zien dat de aanvullende schermwerking zich met name bevindt in het frequentiegebied tussen 800 en 2000 Hz, voor de microfoonhoogten van respectievelijk 1,2 en 2,0 m. Bij de diffractietest ligt het maximum van de aanvullende schermwerking bij lagere frequenties, tussen 500 en 1000 Hz.

## 3 Numerieke berekeningen

In dit hoofdstuk worden de metingen vergeleken met de resultaten van een numeriek model. Zoals beschreven in hoofdstuk 1 is er gekozen voor een gefaseerde aanpak. Die bestaat o.a. uit:

- een validatie van het numerieke eindige elementenmodel (FEM) voor de bepaling van de schermwerking op kleine afstand;
- de combinatie van het FEM model met een PE model<sup>1</sup> voor de berekening van de schermwerking op grotere afstand, tot enkele honderden meters.

Het uitvoeren van metingen op grotere afstand is complex, met name vanwege de grote variaties die optreden door de invloed van de meteorologie en de interactie met de bodem. Vandaar dat de inzet van gevalideerde numerieke modellen hier een uitkomst biedt.

Het eindige elementenmodel is opgebouwd in Comsol Multiphysics®. Hoofdstuk 3.1 geeft een korte beschrijving van de modellering van de gemeten situaties. In de navolgende drie hoofdstukken worden de metingen vergeleken voor achtereenvolgens: de diffractietest, de kunstbronmetingen en de passagemetingen.

### 3.1 Modelomschrijving

Met het eindige elementenmodel wordt een twee-dimensionaal domein opgebouwd, zoals weergegeven in figuur 8 voor de situatie met een Whiswall naast de weg. Een punt boven de weg dient als geluidbron. Het model rekent voor een reeks van 88 frequenties, om de resultaten in tertsbanden tussen 50 en 5000 Hz te bepalen, alsmede in octaafbanden tussen 63 en 4000 Hz. Er worden 4 frequenties per tertsband gebruikt.

Aan de randen van het model wordt een volledig geluidabsorberende laag met elementen toegepast zodat er aan de randen van het model geen geluid reflecteert (PML = perfectly matched layer).

Met een twee-dimensionaal domein is de geluiduitbreiding cilindrisch in plaats van sferisch. Echter, omdat er in deze methode steeds twee situaties met elkaar worden vergeleken kan het verschil in dB rechtstreeks worden vergeleken met de meetresultaten.

Bij situaties met een geluidbron onder een hoek, zoals 45 graden, is de geometrie van het model vergroot met een bijbehorende factor.

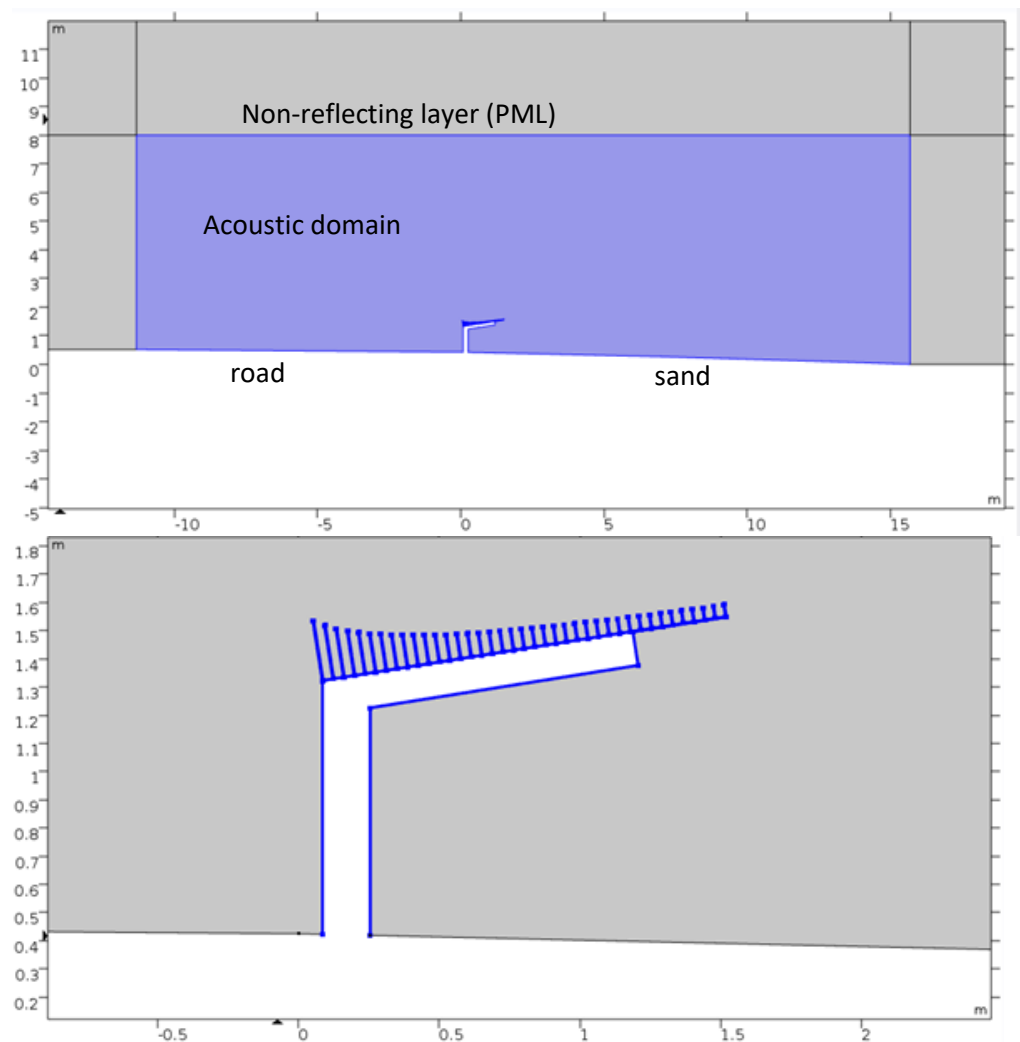
---

<sup>1</sup> E.M Salomons, *Improved Green's function parabolic equation method for atmospheric sound propagation*, The Journal of the Acoustical Society of America 104, 100 (1998).

Voor de situaties naast de weg, met 1) een referentiedoorsnede, 2) een doorsnede met scherm en 3) met Whiswall, is een lichte neerwaartse helling van de bodem achter het scherm toegepast zoals geconstateerd en opgemeten tijdens de metingen. De resulterende hoogten van de bodem t.o.v. het bronpunt (= 0 meter hoogte, op 3,5 meter van het scherm) zijn:

- Referentie: -9 cm voor de rand van de weg op 3,5 meter van de bron, -25 cm op de microfoonposities op 5 m afstand, -46 cm op de posities op 10 m.
- Scherm, respectievelijk: -9 cm, -11 cm, -15 cm.
- Whiswall, respectievelijk: -8 cm, -12 cm, -15 cm.

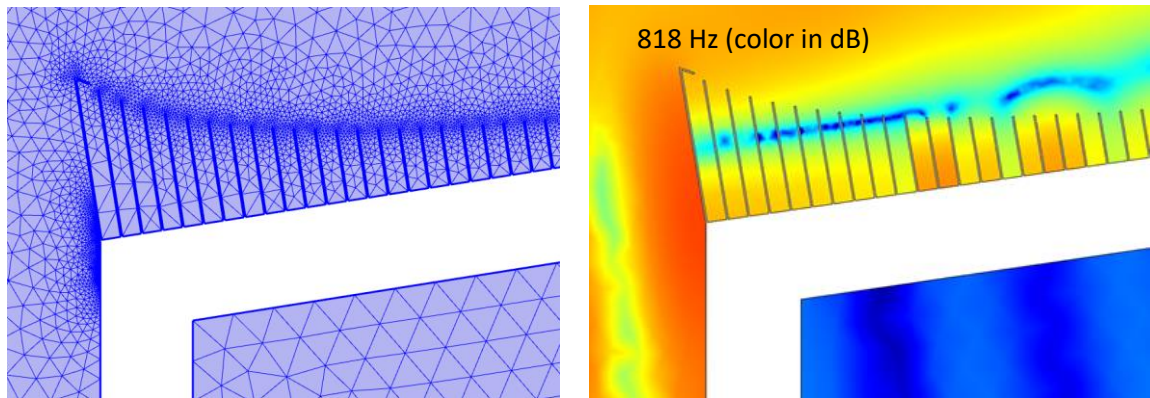
Op de dag van de passagemetingen is ook de akoestische bodemhardheid gemeten (zie bijlage C). In het numerieke model wordt een frequentie-afhankelijke impedantie gebruikt voor de bodem, gebaseerd op het model van Delany en Bazley. De metingen geven een waarde voor de te gebruiken stromingsweerstand. Voor de weg is dat  $20.000 \text{ kNsm}^{-4}$  en voor de bodem achter het scherm (zand/aarde) is  $1.000 \text{ kNsm}^{-4}$  ingevoerd. Een representatieve waarde voor gras ligt lager, tussen 100 en  $300 \text{ kNsm}^{-4}$ .



Figuur 8 Geometrie voor het numerieke model met de Whiswall op een scherm zoals gemeten op het terrein van Technology Base in 2020. Akoestisch domein (boven), Whiswall zoom-in (onder).

In figuur 9 is ingezoomd op de Whiswall. De hoogte van de combinatie van het betonnen scherm met daarop de metalen Whiswall is 111 cm. De diepte van de 38 resonatoren varieert tussen 43 en 213 mm, volgens de tekeningen van 4Silence. Daarmee kan een effect worden verwacht tussen 400 en 2000 Hz, op basis van resonantie bij een kwart van de golflengte. De hoogte van het rechte scherm dat als referentie wordt gebruikt is 110 cm en heeft een dikte van 10 cm, met de voet van het scherm op dezelfde afstand vanaf de bron als de Whiswall.

De grootte van de eindige elementen in het model is afhankelijk van de frequentie en de mate van geometrische details. Er worden minimaal 8 elementen per golflengte gebruikt. Figuur 9 geeft als voorbeeld de verdeling van de eindige elementen rond de Whiswall voor de frequentie van 818 Hz (links) en de berekende geluidsdruk in dB (rechts). Het effect van resonantie is zichtbaar door een verhoogde druk (oranje-rood) in de resonatoren. Er ontstaat dan een minimale druk aan het begin van de resonator.



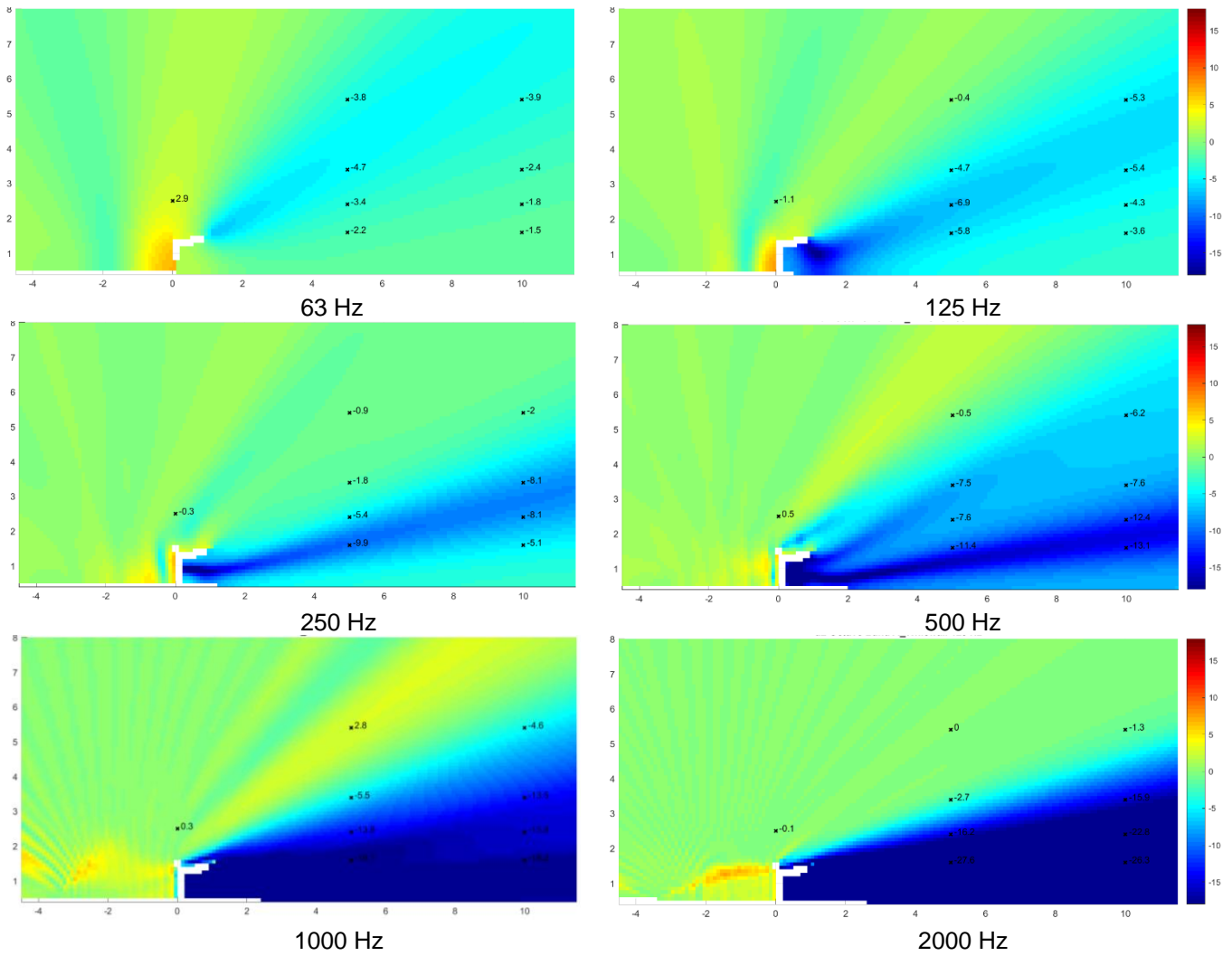
Figuur 9 Links: verdeling van de eindige elementen rond de Whiswall voor 818 Hz. Rechts: berekend resultaat in dB voor de frequentie van 818 Hz.

Ter illustratie zijn in figuur 10 berekeningsresultaten weergegeven voor 6 octaafbanden. Dit is het verschil in dB tussen de Whiswall en de referentie (zonder scherm). De geluidschaduw achter het scherm wordt groter en sterker naarmate de frequentie toeneemt. De kleurenschaal is tussen +17 (rood) en -17 dB (blauw, de verzwakking t.g.v. Whiswall).

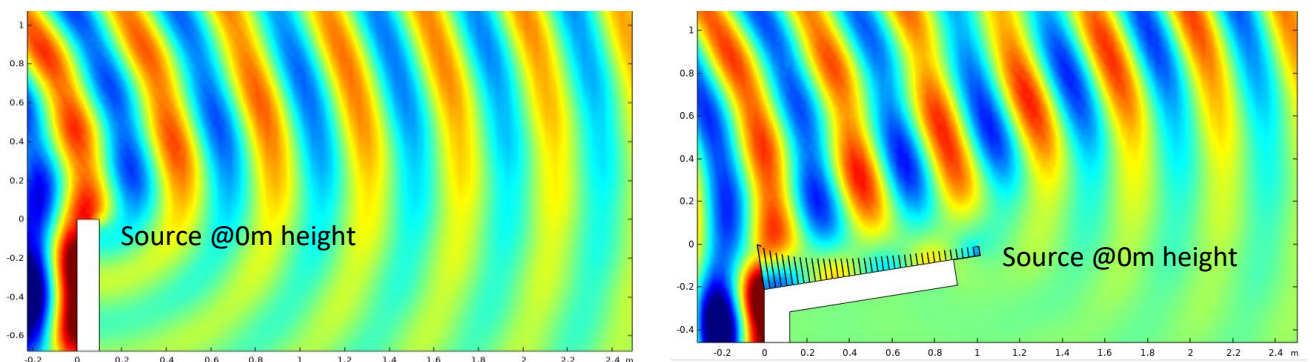
In het model voor de diffractietest is een 4 meter hoog scherm en een 4 meter hoge Whiswall toegepast, in navolging van de metingen (waarbij de invloed van de bodem via de signaal-analyse van de impulsresponsie is uit te sluiten). In het numerieke model is er automatisch geen effect van de bodem door toepassing van de niet-reflecterende rand (PML) ter hoogte van de bodem. Figuur 11 toont de berekende geluidsdruk in Pascal voor het rechte scherm en de Whiswall, met positieve (rood) en negatieve (blauw) waarden. De bron is hier op gelijke hoogte met het scherm geplaatst.

De getoonde frequentie is 818 Hz. Rond deze frequentie is het resultaat van de metingen maximaal, met een effect van 6 dB. In figuur 11 is de sterkere schaduwwerking zichtbaar voor de Whiswall t.o.v. het rechte scherm.

Aanvullende details en parameters van het Comsol model zijn opgenomen in bijlage A.



Figuur 10 Berekende schermwerking in dB door toepassing van de Whiswall op een scherm, vergeleken met de situatie zonder scherm, als functie van de afstand (tot 12 meter) en hoogte (tot 8 m), in 6 octaafbanden. Bronpositie: -3,5 meter en 0,10 meter hoog.



Figuur 11 Berekende geluiddruk in Pascal rond de top van het rechte scherm voor de diffractiest, voor de frequentie van 818 Hz. Hoogte van de bron: op gelijke hoogte als het scherm (0 m). Links voor de situatie met scherm en rechts voor de Whiswall.

### 3.2 Vergelijking meten – rekenen: diffractietest

De beide rekenuitkomsten voor het scherm en de Whiswall kunnen rechtstreeks met elkaar worden vergeleken, omdat er geen sprake is van een bodemreflectie en diffractie aan de zijranden. Het rechter deel van figuur 12 toont het verschil van beide rekenresultaten, voor drie bronhoogtes t.o.v. de hoogte van het scherm, op dezelfde manier als die in paragraaf 2.1 voor de metingen zijn gepresenteerd. De zwarte lijn geeft het gemiddelde weer.

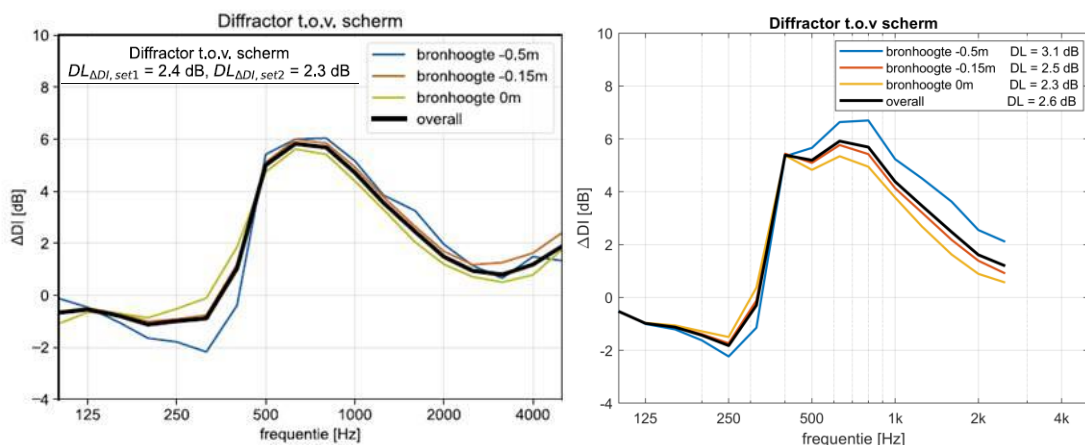
In het tweede deel van dit hoofdstuk worden rekenresultaten met een kleine aanpassing van het rekenmodel besproken. Daar worden ook resultaten en de vergelijking getoond voor de twee hoeken van 0 en 45 graden apart.

De rekenresultaten uit figuur 12 zijn in goede overeenstemming met de meetresultaten in het linker deel van de figuur. Het verschil per tertsband is gering, 1 dB of minder. Dit geldt zowel voor de lagere frequenties (waar de Whiswall een lagere schermwerking geeft dan het scherm), als voor de frequenties vanaf 500 Hz (waar de Whiswall een tot 6 dB hogere schermwerking geeft).

In beide figuren zijn ook de ééngetalswaarden  $DL$  weergegeven (notatie  $DL_{\Delta DI}$  in de NEN-EN 1793-4 norm), op basis van weging met het standaard verkeerspectrum uit NEN-EN 1793-3. Er zijn twee series metingen uitgevoerd met  $DL$  resultaten van 2,4 en 2,3 dB. Het gemiddelde voor de berekeningen is 2,6 dB, dat iets hoger ligt vanwege het resultaat met een lager gelegen bron (en het grotere berekende effect bij 400 Hz).

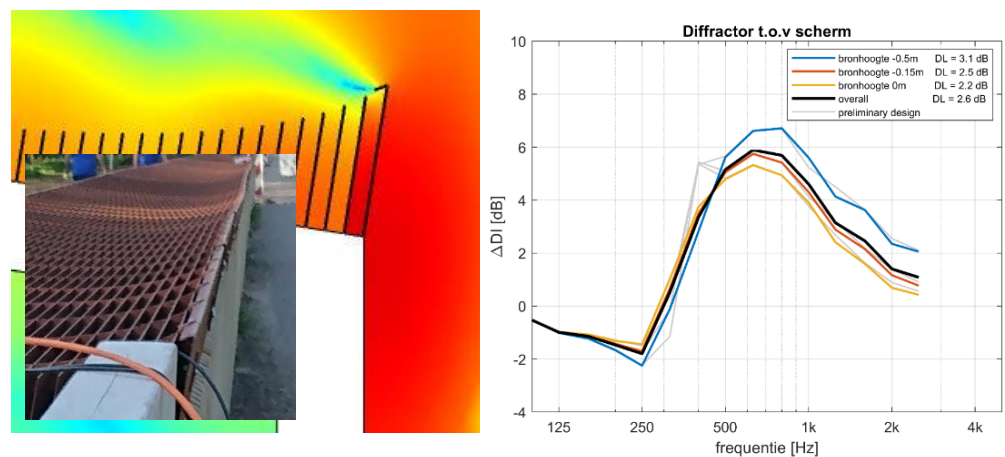
Het effect van de bronhoogte is in de rekenresultaten wat sterker dan bij de metingen. De trend is hetzelfde: een grotere schermwerking van de Whiswall ten opzichte van het rechte scherm als de bron lager ligt.

Opvallend in figuur 12 is het rekenresultaat van 400 Hz, met 1 dB voor de metingen en ruim 5 dB voor de berekeningen. Merk op dat in de rechter figuur ook de gridlijnen zijn weergegeven voor de tertsbanden rond 250 en 500 Hz.



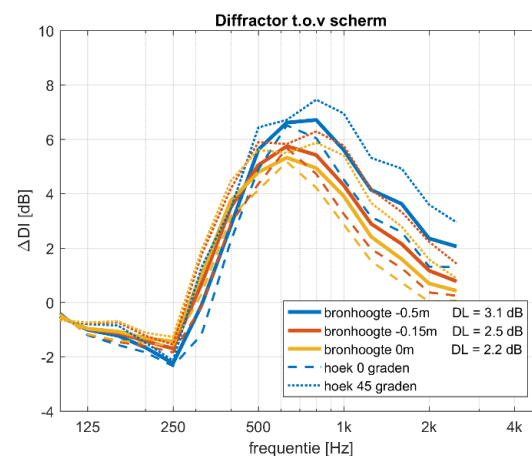
Figuur 12 Links: meetresultaat van de diffractietest volgens NEN-EN 1793-4:2015, uit M+P rapport RGPO.20.04.3, 20 augustus 2020. Rechts: rekenresultaat uit het numerieke model. De ééngetalswaarden  $DL$  zijn bepaald met het standaard verkeerspectrum.

Om het effect rond 400 Hz te duiden zijn in het laatste stadium van dit project aanvullende berekeningen uitgevoerd, waarbij boven de langste resonator een deel van de geknikte metalen plaat langer is uitgevoerd (van 20 naar 28 mm) alsmede het staande deel iets korter (van 213 naar 208 mm). In het linker deel van figuur 13 is de geluiddruk getoond rond 400 Hz voor de oorspronkelijke uitvoering. Het rechter deel laat de aanvullend berekende resultaten zien. De oorspronkelijke resultaten zijn weergegeven in grijs. Deze aanpassing zorgt voor een 2 dB lagere afscherming in de tertsband van 400 Hz. Dat is nog niet in overeenstemming met de metingen; er is nog een verschil van 2 tot 3 dB. Kennelijk heeft de langste resonator daarnaast een verminderde werking door een andere oorzaak, wellicht door “lekkage” in het drie-dimensionele vlak.



Figuur 13 Links: Detail van de Whiswall geometrie, met geknikte plaat voor de langste resonator. Rechts: rekenresultaat zoals in figuur 12, met langere geknikte plaat boven de langste diffractor (resultaat van figuur 12 in grijs).

De meet- en rekenresultaten zijn een gemiddelde van 5 microfoon-posities en 2 hoeken. In figuur 14 zijn de rekenresultaten ook apart weergegeven voor de 2 hoeken. Met daarin de gestreepte lijnen voor de situatie met de luidspreker recht voor het scherm (hoek 0 graden) en de gestippelde lijnen voor een hoek van 45 graden. Het verschil tussen beide hoeken is ongeveer 2 dB, met hogere waarden voor 45 graden.



Figuur 14 Rekenresultaten voor de aanvullende schermwerking van de Whiswall. Gemiddeld resultaat voor 5 microfoons en 2 hoek, apart voor 3 bronhoogtes. Gestreepte lijnen: bron recht voor scherm (0 graden). Stippel lijnen: 45 graden.

Het verschil in dB tussen de meet- en rekenresultaten is per tertsbands opgenomen in onderstaande tabel 1. Onder de 400 Hz is de aanvullende afscherming van de Whiswall negatief, vandaar de rode markering voor de frequenties. Boven de 400 Hz is de grotere aanvullende afscherming met groen gemarkeerd.

Het bovenste resultaat geeft het verschil voor het gemiddelde weer, met een maximaal verschil van 2,3 dB voor de grijs gemarkeerde 400 Hz band. De volgende drie resultaten zijn voor de bronhoogtes apart en gemiddeld over de twee hoeken. In het algemeen zijn de verschillen tussen meten en rekenen kleiner dan 1 dB, behalve voor de 315 en 400 Hz banden.

Het verschil tussen meten en rekenen voor de hoeken apart is wat groter. Dit is in het algemeen kleiner dan 2 dB, de 315 en 400 Hz band uitgezonderd. De rekenmethode geeft een grotere afscherming vergeleken met de metingen voor de hoek van 45 graden (positieve waarden) en een kleinere afscherming bij 0 graden (negatieve waarden). Door de middeling over de hoeken is het verschil met de metingen kleiner dan 1 dB.

Tabel 1 Verschil in dB tussen meet- en rekenresultaten van de aanvullende afscherming van de Whiswall (diffractietest). Gemiddelde (all): gemiddelde over de 3 bronhoogtes, 2 hoeken en 5 microfoons. Bronhoogte -0,5m: gemiddelde over 2 hoeken en 5 microfoons.

	Verschil in dB tussen meten en rekenen (>0 = berekening>meting)														
Frequentie (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500
Gemiddelde (all)	0,1	-0,5	-0,4	-0,4	-0,8	1,4	2,3	0,2	0,0	0,0	-0,1	-0,3	0,1	0,0	0,4
Bronhoogte -0,5m	-0,4	-0,5	-0,2	0,0	-0,4	2,0	3,2	0,5	0,6	0,7	0,5	0,2	0,3	0,2	0,9
Bronhoogte -0,15m	0,0	-0,5	-0,5	-0,5	-0,8	1,4	2,3	0,0	-0,3	-0,3	-0,4	-0,6	-0,2	-0,1	0,2
Bronhoogte 0m	0,5	-0,3	-0,4	-0,5	-0,9	1,1	1,9	0,0	-0,4	-0,6	-0,6	-1,0	-0,5	-0,5	-0,3
Bron -0,5m 0 gr.	-0,1	-0,5	-0,3	-0,2	-0,4	0,5	-2,3	-2,0	-0,4	-0,5	-0,2	-0,9	-0,3	-0,2	-0,1
Bron -0,5m 45 gr.	-0,7	-0,5	0,0	0,2	-0,5	3,8	5,9	2,4	1,4	1,9	1,5	1,6	1,2	0,9	2,0
Bron -0,15m 0 gr.	0,5	-0,5	-0,7	-0,9	-1,1	-0,5	-3,2	-1,5	-1,0	-1,3	-1,3	-2,0	-1,0	-1,1	-1,2
Bron -0,15m 45 gr.	-0,4	-0,6	-0,2	-0,1	-0,6	3,2	5,2	1,4	0,3	0,8	0,9	1,2	0,9	1,1	1,6
Bron 0m 0 gr.	1,3	-0,1	-0,6	-0,9	-1,3	-0,9	-3,1	-0,9	-0,9	-1,4	-1,4	-2,0	-1,0	-0,9	-0,5
Bron 0m 45 gr.	-0,4	-0,5	-0,2	-0,1	-0,6	3,0	4,8	1,1	0,2	0,5	0,6	0,4	0,3	0,1	0,1

Geconcludeerd wordt dat het numerieke model de metingen voldoende goed reproduceert, met uitzondering van de tertsbands van 400 Hz. In die band kan een empirische correctie worden toegepast van 2,5 dB. Bij de resultaten voor de Whisstone is destijds ook een empirische correctie toegepast, die kon worden verklaard door een verminderde werking van de langste resonatoren t.g.v. de afwateringsopeningen.

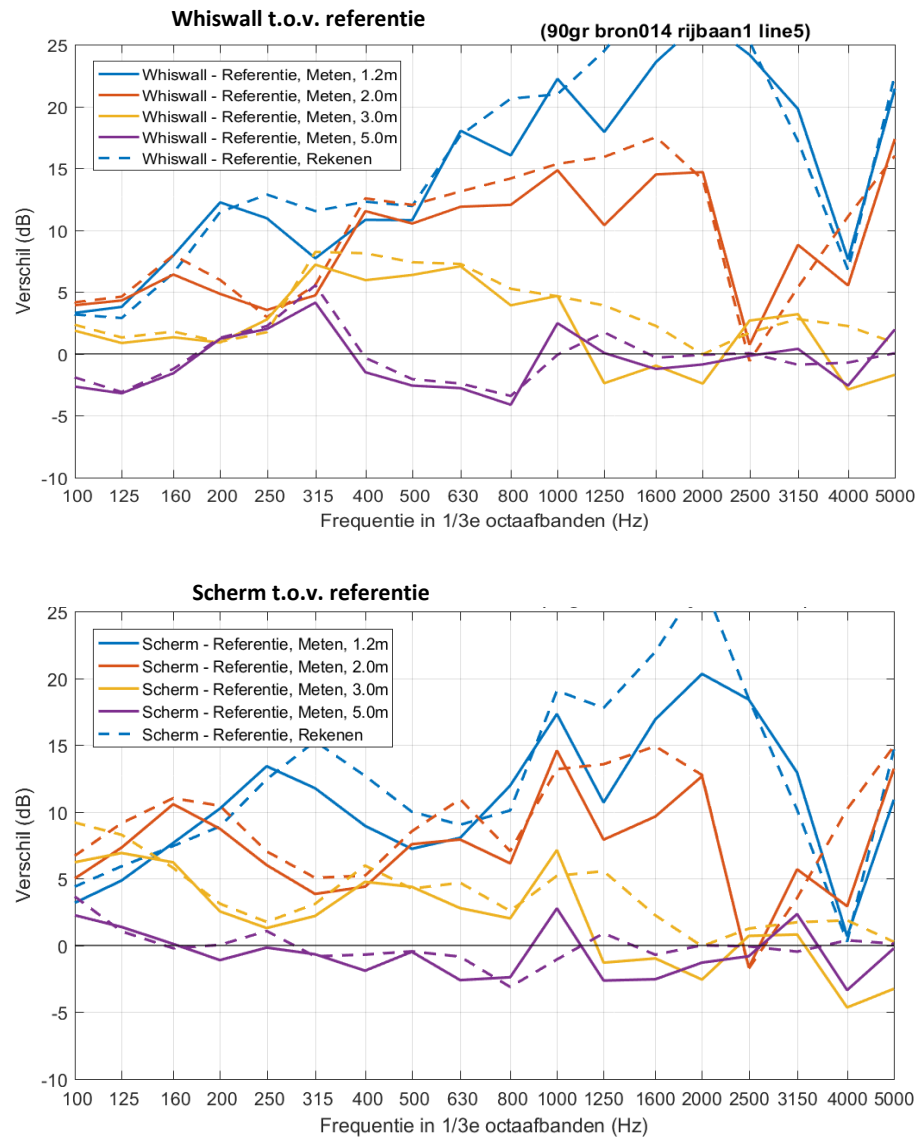
### 3.3 Vergelijking meten – rekenen: kunstbron

Bij de metingen uitgevoerd met een kunstbron zijn een aantal configuraties gemeten, waarbij de hoogte van de bron is gevarieerd alsmede de afstand van de bron tot het scherm en de hoek over het scherm.

Er is een vergelijking gemaakt tussen de schermwerking van de Whiswall en de referentiedoorsnede (zonder scherm) en tussen de schermwerking van het rechte scherm en de referentie-doorsnede, zie figuur 15. De gestreepte lijnen geven de rekenresultaten weer, de doorgetrokken lijnen de metingen. Voor deze situaties is er een goede overeenkomst tussen de meet- en rekenresultaten, waarbij het grillige



spectrum wordt veroorzaakt door de schaduwwerking en de interferentie met de bodem.



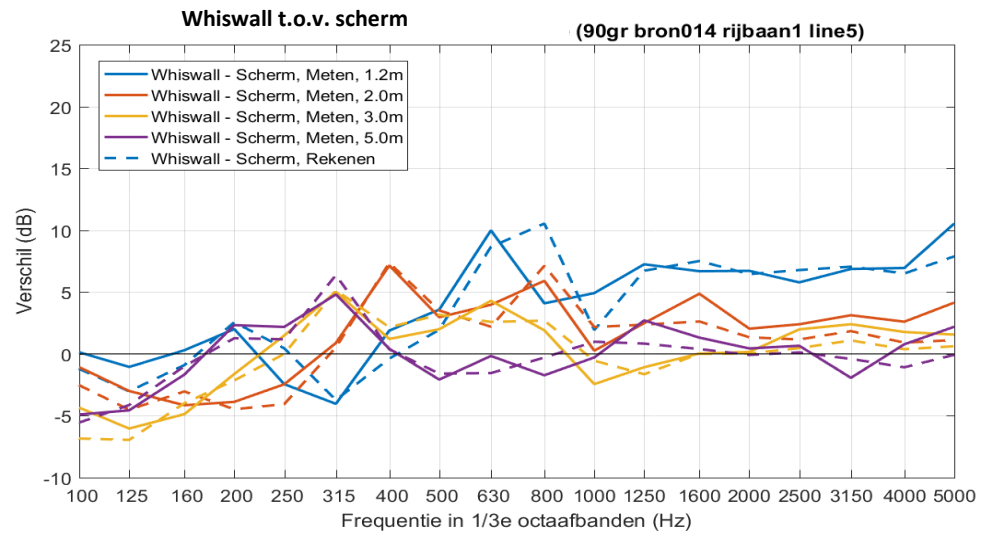
Figuur 15 Vergelijking van meet- en rekenresultaten bij het gebruik van een luidspreker/puntbron op 14 cm hoogte op een afstand van 3,5 meter van het scherm. Schermwerking t.o.v. de referentiedoorsnede. Boven: voor de Whiswall. Onder: voor een recht scherm.

De schermwerking voor de twee lager geplaatste microfoons, in de schaduwzone, is 10 tot 25 dB. De microfoon op 5 meter hoogte bevindt zich niet in de schaduwzone.

Figuur 16 geeft de aanvullende afscherming weer en een vergelijking van de meet- en rekenresultaten, waarbij de luidspreker op de weg is geplaatst (een puntbron op 14 cm hoogte), op een afstand van 3,5 meter vanaf het scherm, voor 4 microfoonhoogtes op een afstand van 5 meter achter het scherm.

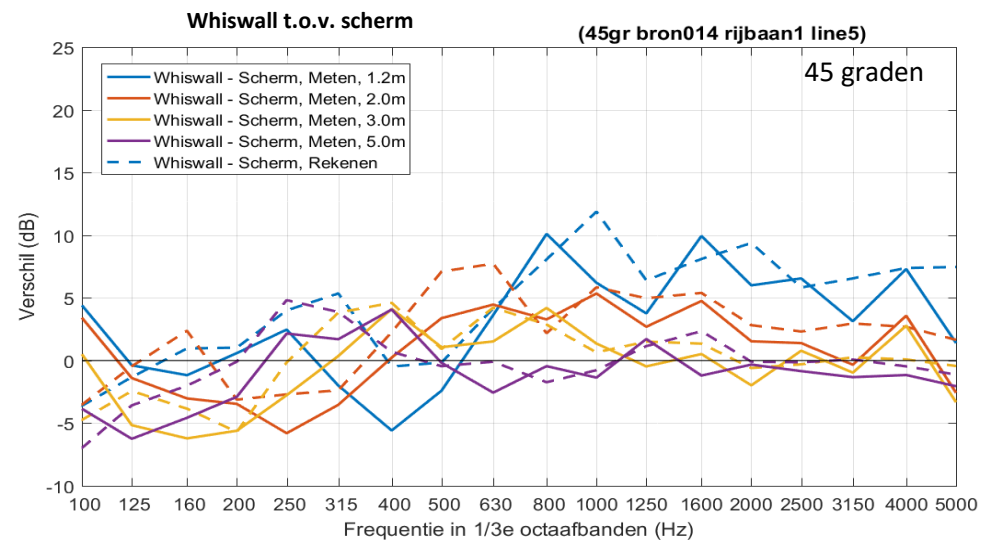
In het algemeen is er een goede overeenkomst te zien tussen de beide resultaten. Slechts voor 2 of 3 tertsbanden is er een verschil van een paar dB. Het al eerder

genoemde grillige verloop van het spectrum t.g.v. de bodemreflecties is ook in de berekeningen te zien.



Figuur 16 Vergelijking van meet- en rekenresultaten bij het gebruik van een luidspreker/puntbron op 14 cm hoogte op een afstand van 3,5 meter van het scherm. Verschil tussen de resultaten met recht scherm en de Whiswall.

De vergelijking voor de situatie onder een hoek van 45 graden is getoond in figuur 17. Het berekende spectrum voor de 4 microfoons volgt ook voor deze situatie in grote lijnen de metingen. Voor enkele derde-octaaftanden is de afwijking een paar dB.



Figuur 17 Vergelijking van meet- en rekenresultaten bij het gebruik van een luidspreker/puntbron op 14 cm hoogte op een afstand van 3,5 meter van het scherm, onder een hoek van 45 graden. Verschil tussen de resultaten met recht scherm en de Whiswall.

De resultaten voor een aantal andere situaties zijn opgenomen in bijlage B. Het blijkt dat het effect van de Whiswall geringer is als de geluidbron op een grotere

afstand wordt geplaatst. Dit geldt ook voor een hogere bronhoogte van 75 cm i.p.v. 14 cm.

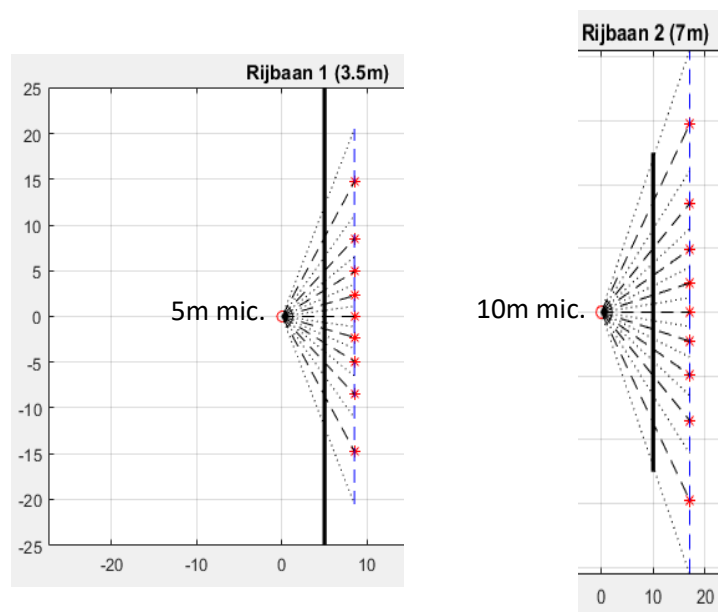
De constatering voor de berekeningen met een puntbron zijn:

- 1 De overeenkomst met de metingen voor het berekende spectrum, voor de 4 microfoonhoogtes, met interferentiepatronen van meer dan 10 dB, is goed.
- 2 In een enkele tertsband kan er een verschil optreden met de metingen van maximaal 5 dB.

Dit geeft voldoende vertrouwen om het model te gebruiken voor berekeningen van het effect van de Whiswall in andere situaties.

### 3.4 Vergelijking meten – rekenen: CPB

De geluidbijdrage van een passage met een constante snelheid kan worden berekend door de (niet-gecorrleerde) sommatie van een aantal puntbronnen langs een lijn. Aangetoond kan worden dat de geluidbijdrage van een lijnbron, voor de gemeten situaties zoals schematisch weergegeven in figuur 18, in benadering overeenkomt met de bijdrage van, in dit geval, 9 puntbronnen. De hoeken die hiervoor zijn gebruikt zijn: 60, 45, 30, 15, 0, -15, -30, -45 en -60 graden. Vanwege de symmetrie worden voor de berekeningen alleen de positieve hoeken gebruikt.



Figuur 18 Sommatie van de bijdragen van 9 puntbronnen om een lijnbron te simuleren; voor de hoeken 60, 45, 30, 15, 0, -15, -30, -45, -60 graden. Links: nabijgelegen rijbaan. Rechts; veraf gelegen rijbaan en microfoons op 10 meter afstand van de voorzijde van het scherm.

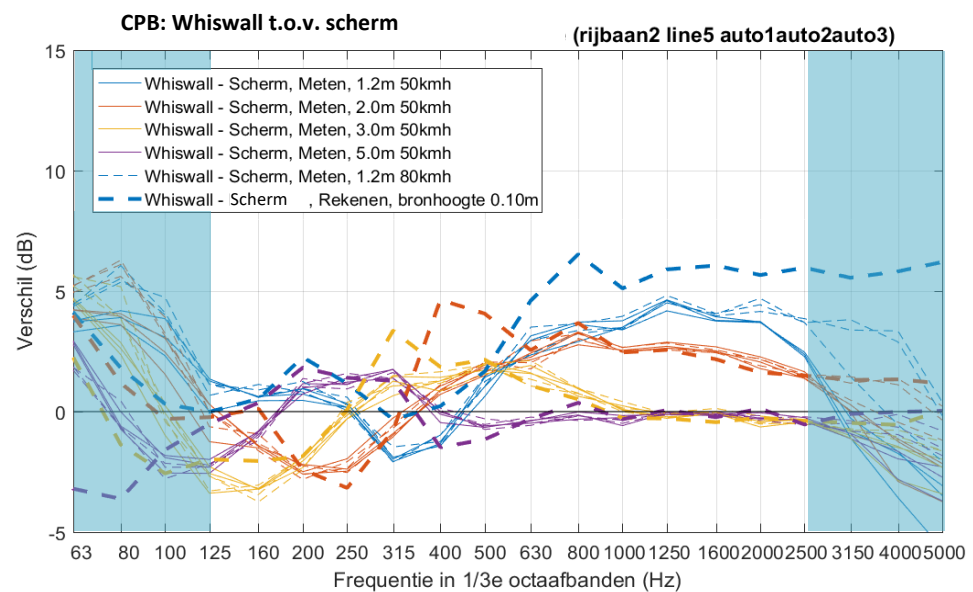
Een vergelijking tussen de meet- en rekenresultaten is weergegeven in figuur 19, voor de rijbaan op 7 meter afstand van het scherm (rijbaan 2).

De dunne doorgetrokken lijnen geven metingen aan van de drie personenauto's bij een snelheid van 50 km/uur. De dunnen gestreepte lijnen zijn voor een snelheid van 80 km/uur. Deze resultaten en komen in grote mate overeen met de lagere

snellheid, behalve voor tussen 2000 en 2500 Hz voor de microfoon op 1,2 meter hoogte.

De blauwe rechthoeken aan de linker en rechter zijde zijn geplaatst om aan te geven dat de meetresultaten voor die frequenties minder betrouwbaar zijn.

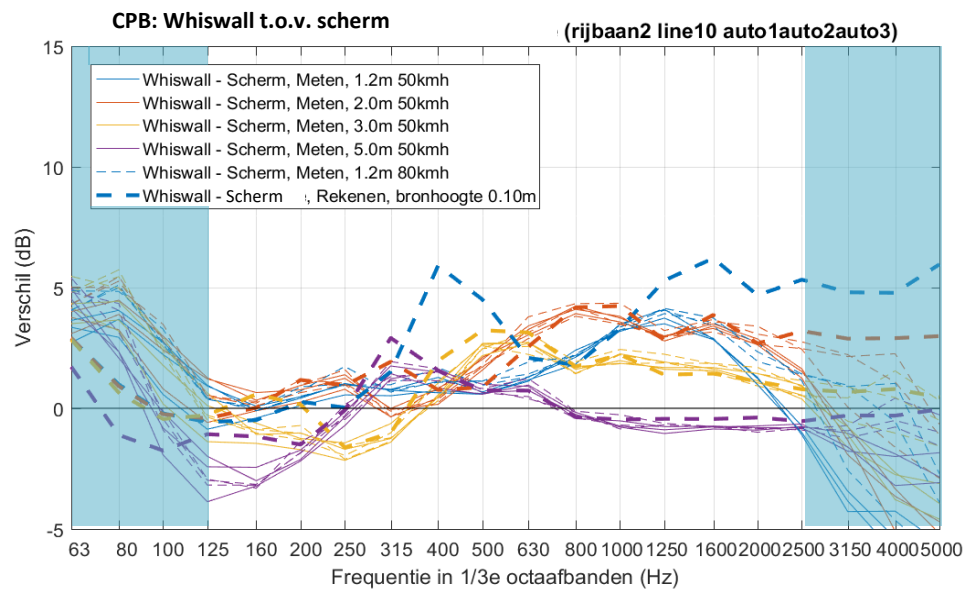
De dikkere gestreepte lijnen zijn de rekenresultaten met een bronhoogte van 10 cm. Dit is een sommatie van 9 puntbronnen, waarna het verschil tussen de Whiswall en het scherm is bepaald. Vooral voor de drie microfoonhoogtes van 2, 3 en 5 meter is de spectrale overeenkomst goed, op enkele tertsbanden na. Het opvallendste verschil is zo'n 4 dB in de 400 Hz band voor de microfoon op 2 meter hoogte, zoals ook gezien voor de diffractietest.



Figuur 19 Vergelijking tussen de meet- en rekenresultaten voor de passages van lichte voertuigen. Aanvullende schermwerking van de Whiswall t.o.v. een recht scherm. Voor de veraf gelegen rijbaan.

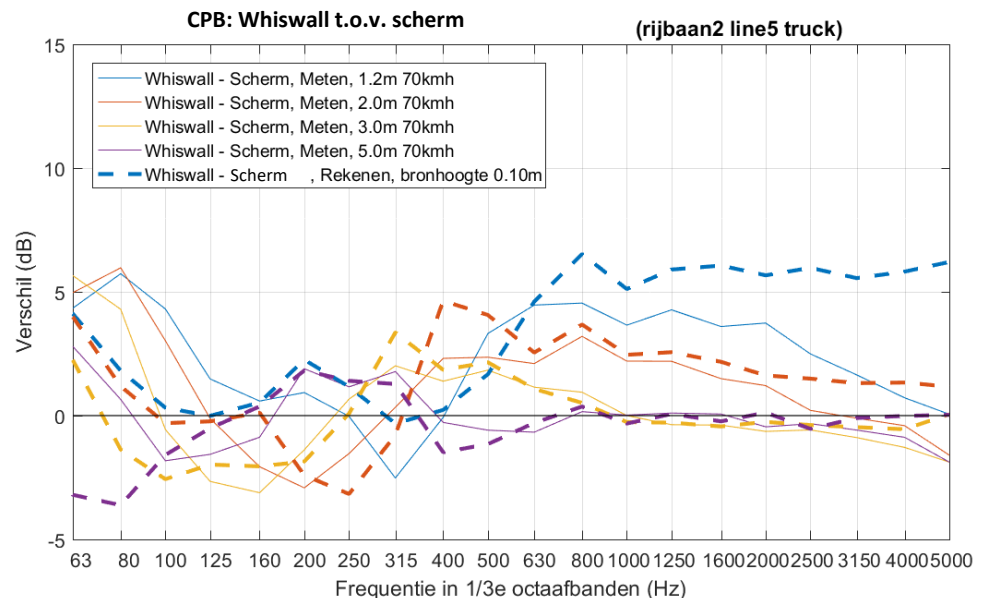
In figuur 20 is de vergelijking getoond voor de microfoons op 10 meter afstand van het scherm / de Whiswall. De spectrale resultaten verschillen van de resultaten op 5 meter afstand. De overeenkomst tussen meten en rekenen is ook hier goed. Wel is op 1,2 meter hoogte rond 400 Hz en boven 1250 Hz een hogere aanvullende schermwerking van de Whiswall berekend dan gemeten .

De berekeningen zijn ook uitgevoerd voor bronhoogtes van 30 en 75 cm, maar daarvoor is de overeenkomst (veel) minder goed; waarmee is aangetoond dat een bronhoogte van 10 cm representatief is voor passages van lichte voertuigen.



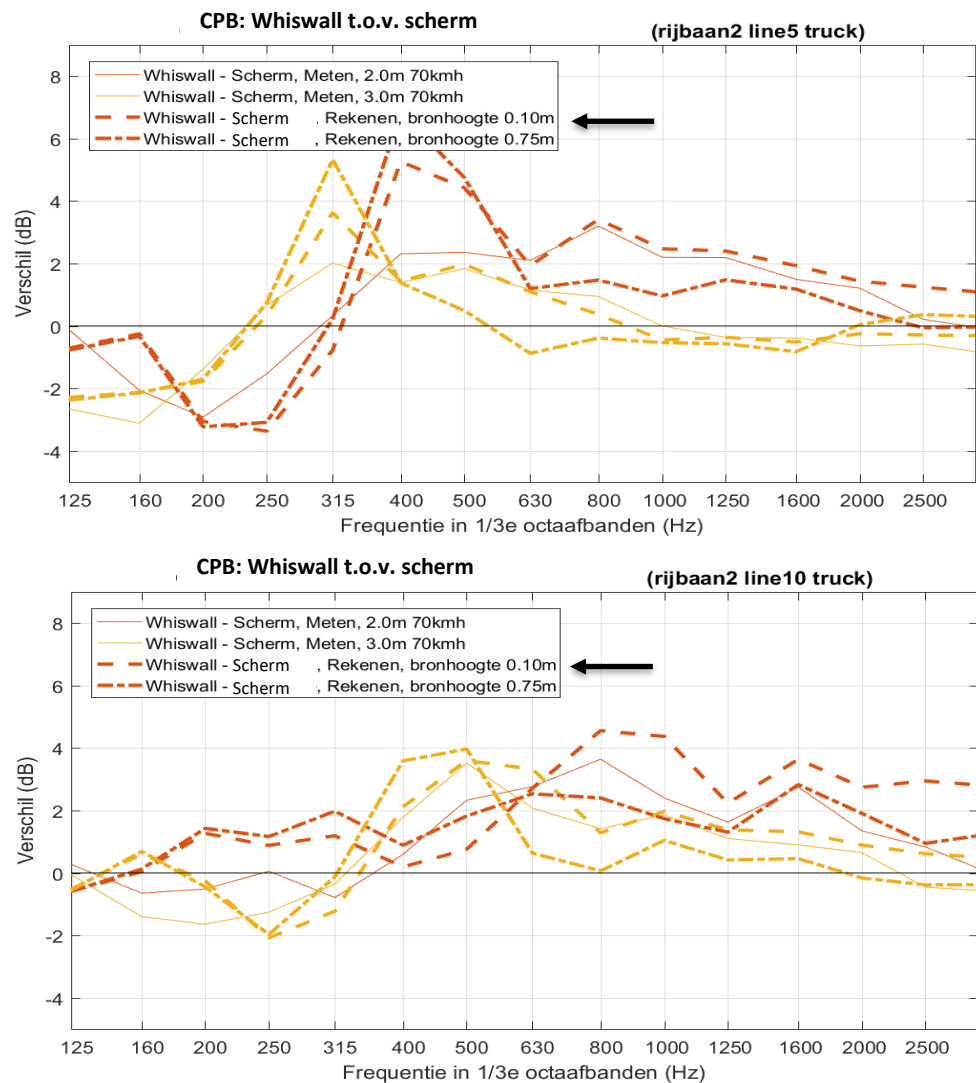
Figuur 20 Vergelijking tussen de meet- en rekenresultaten voor de passages van lichte voertuigen. Aanvullende schermwerking van de Whiswall t.o.v. een recht scherm. Voor de veraf gelegen rijbaan. Microfoons op 10 meter afstand van het scherm.

Vervolgens zijn de metingen met de vrachtwagen vergeleken met de berekeningen, zie figuur 21. De dunne lijnen geven de resultaten weer voor de gemeten snelheid van 70 km/uur. De gestreepte lijnen zijn de resultaten van de berekeningen met een bronhoogte van 0,10 meter, voor de 4 microfoons. De overeenkomst is vergelijkbaar met die van de lichte voertuigen: rond 400 Hz is er een overschatting van de berekeningen en de microfoon op 1,2 meter geeft een relatief grotere afwijking.



Figuur 21 Vergelijking tussen de meet- en rekenresultaten voor de passages van de vrachtwagen. Aanvullende schermwerking van de Whiswall t.o.v. een recht scherm. Voor de veraf gelegen rijbaan. Microfoons op 5 meter afstand van het scherm.

Tot slot is gekeken of het gebruik van een bronhoogte van 75 cm overeenkomt met de metingen voor de vrachtwagen. Figuur 22 toont de vergelijking voor de microfoonhoogtes van 2 en 3 meter, achtereenvolgens voor de microfoons op 5 en 10 meter afstand van het scherm. De verticale schaal is daarbij groter dan in de voorgaande figuren. De dikke gestreepte lijn is de berekening met 10 cm bronhoogte, de dikke streep-punt lijn is voor een bronhoogte van 75 cm. De dunne lijnen geven de meetresultaten weer. De bronhoogte van 10 cm geeft een betere overeenkomst met de metingen, voor vrijwel alle tertsbandent. Alleen de microfoon op 3 meter hoogte en 10 meter afstand geeft voor de 75 cm bronhoogte een wat betere overeenkomst, in de onderste figuur.



Figuur 22 Vergelijking tussen de meet- en rekenresultaten voor de passages van de vrachtwagen. Aanvullende schermwerking van de Whiswall t.o.v. een recht scherm, voor de veraf gelegen rijbaan. Boven: Microfoons op 5 meter afstand van het scherm. Onder: Op 10 meter afstand.

## 4 Conclusies

Numerieke berekeningen zijn uitgevoerd om de aanvullende afscherming van de Whiswall t.o.v. een recht scherm te vergelijken met meetresultaten, met als doel het numeriek model te valideren en verder in te zetten voor berekeningen van het effect op groter afstand.

Er zijn drie verschillende opstellingen vergeleken. De meetresultaten van de diffractietest kunnen worden gereproduceerd met het numerieke model. Er is voor de frequenties tussen 100 en 2500 Hz een goede overeenkomst. Alleen voor de tertsband van 400 Hz is er een hoger berekend effect van ongeveer 4 dB. Op basis van aanvullende berekeningen, waarbij de langste resonator minder open is, kan dit verschil worden gereduceerd tot 2 á 3 dB. Dit resterende verschil wordt toegeschreven aan verminderde werking van deze resonator door een andere oorzaak, wellicht "lekkage" in het drie-dimensionele vlak.

De metingen met een kunstbron (luidspreker) kunnen eveneens worden gereproduceerd. De interactie van een puntbron met de bodem zorgt hierbij voor een sterke interferentie, met spectrale verschillen van meer 10 dB tussen opvolgende tertsbanden. Deze interferentiepatronen worden door de berekeningen goed weergegeven, voor alle 4 de microfoonhoogtes. Voor enkele frequentiebanden loopt het verschil tussen metingen en berekeningen op tot 5 dB.

De metingen met passages van lichte voertuigen en een vrachtwagen worden met het numerieke model benaderd door sommatie over 9 doorsneden met een puntbron. De meetresultaten voor de microfoonhoogtes op 2, 3 en 5 meter hoogtes kunnen worden gereproduceerd worden met het model. Daarbij wordt gebruik gemaakt van een puntbron op 10 cm hoogte. Een hoogte van 30 en 75 cm geeft een minder goede overeenkomst. Het model berekent een grotere aanvullende afscherming van de Whiswall voor de microfoon op 1,2 meter hoogte. Daarnaast is in het algemeen een grotere berekende afscherming te zien in de tertsband van 400 Hz, in navolging van de diffractietest.

Geconcludeerd wordt dat het numeriek model de gemeten aanvullende afscherming van de Whiswall goed reproduceert tussen 100 en 2500 Hz. Alleen in de tertsband van 400 Hz, waar de langste resonator actief is, dient een empirische correctie te worden toegepast van 2 tot 3 dB voor een betere overeenstemming met metingen. Dit geeft voldoende vertrouwen om het model toe te passen voor berekeningen van het effect van de Whiswall in andere situaties en voor grotere afstanden, waarbij de invloed van meewind in de berekeningen wordt meegenomen.

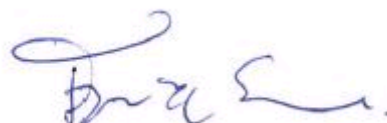
## 5 Ondertekening

Den Haag, januari 2021

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'C.M. Ort', written over a horizontal line.

Drs. C.M. Ort  
Research manager

TNO  
Acoustics & Sonar

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'F.J.M. van der Eerden', written over a horizontal line.

Dr. ir. F.J.M. van der Eerden  
Auteurs



## A Model definitives

### A.1 Global definitions

Table A.1 Used software.

Global settings		
Name	D2 h0 f1540	
COMSOL version	COMSOL 5.3b (Build:244)	COMSOL Multiphysics Acoustic Module

Table A.2 Entered parameters

Name	Expression	Value
f	1539.9265 [Hz]	1539.9 Hz
c	346 [m / s]	346 m / s
lambda	c / f	0.22079 m
rho	1.2 [kg / m ^ 3]	1.2 kg / m <sup>3</sup>
impedance_gras	1204.2445 - 1106.7068i	1204.2-1106.7i
impedance_asphalt	408	408
pml	5 * lambda	1.1039 m
angle_deg	0 [deg]	0 rad
angle	cos (angle_deg)	1
dx_domain	a_m2 + 1	16
a_diff	1.7 / angle	1.7
dx_diff	2 / corner	2
a_mid_berm	a_diff + dx_diff	3.7
dx_mid_berm	(6 - dx_diff) / angle	4
a_vent	a_mid_berm + dx_mid_berm	7.7
dx_vent	4.7 / angle	4.7
a_berm	a_vent + dx_vent	12.4
a_m1	a_diff + (5.8 / angle)	7.5
a_m2	a_diff + (13.3 / angle)	15
d_end	0.06 / angle	0.06
d_diff	0.03 / angle	0.03
d_between	0.02 / angle	0.02
l_diff	2 * d_end + d_diff * 18 +d_between * 17	1
r_deg	5 [deg]	0.087266 rad

Table A.3 Properties Perfectly Matched Layer.

Global settings	
Geometric entity level	Domain
Selection	Domains 1-2,4,41-42
PML factor	8

## A.2 Pressure Acoustics

Table A.4 Initial values.

Initial Values	
Pressure	0
Pressure, first time derivative	0

Table A.5 Point source properties.

Point Source	
Description	Value
Phase	0
Free space reference power (RMS) per unit length	1
Type	Power

Name	Expression	Unit	Description	Selection
acpr.mls1.S	$\exp(i \cdot \text{acpr.mls1.phi}) \cdot \sqrt{2 \cdot \text{acpr.rho\_c} \cdot \text{acpr.omega} \cdot \text{acpr.mls1.P\_rms} / (2 \cdot \pi)^2}$	N / m <sup>2</sup>	Source amplitude	Point 7
acpr.mls1.phi	0	rad	Phase	Point 7
acpr.mls1.P_rms	1	W / m	Free space reference power (RMS) per unit length	Point 7

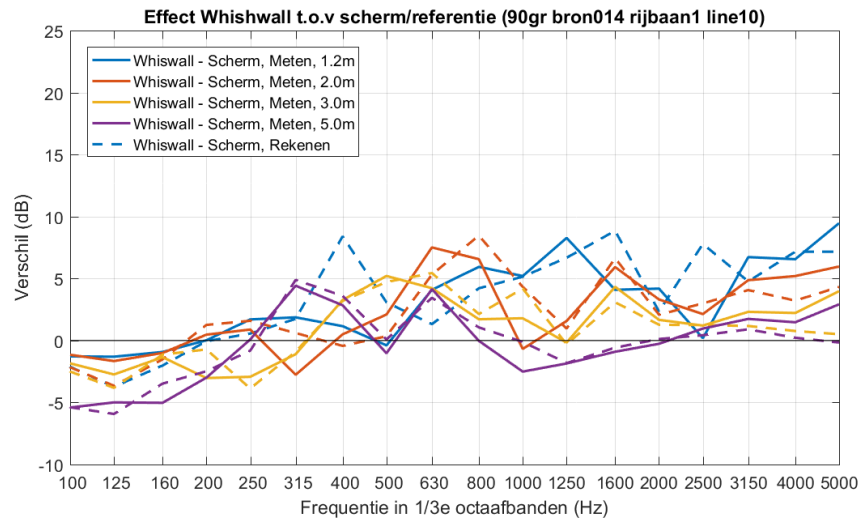
Table A.6 Properties of the central reservation impedance.

Impedance	
Description	Value
Impedance	Impedance_gras
Impedance model	User defined

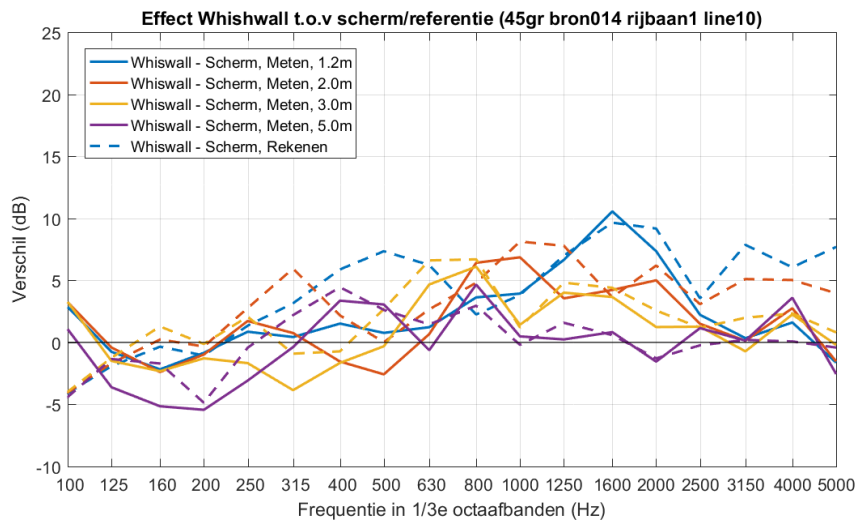
Name	Expression	Unit	Description	Selection
acpr.Zi	mpedance_gras	Pa*s/m	Specific impedance	Boundaries 192, 194

## B Figuren met meet- en rekenresultaten

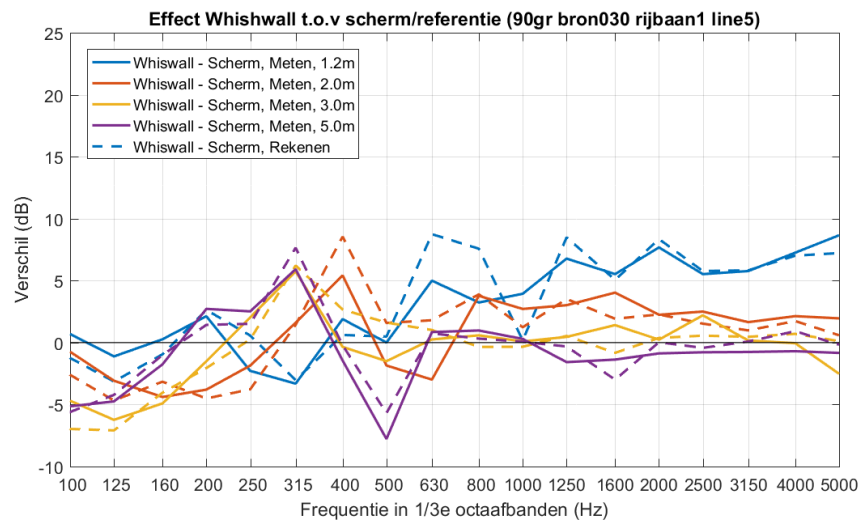
Kunstbron resultaten: rijbaan 1 (op 3,5 meter afstand), voor een hoek van 90 of 45 graden, bronhoogte 14, 30 of 75 cm, microfoons op 5 of 10 m afstand achter het scherm (line5 of line10).



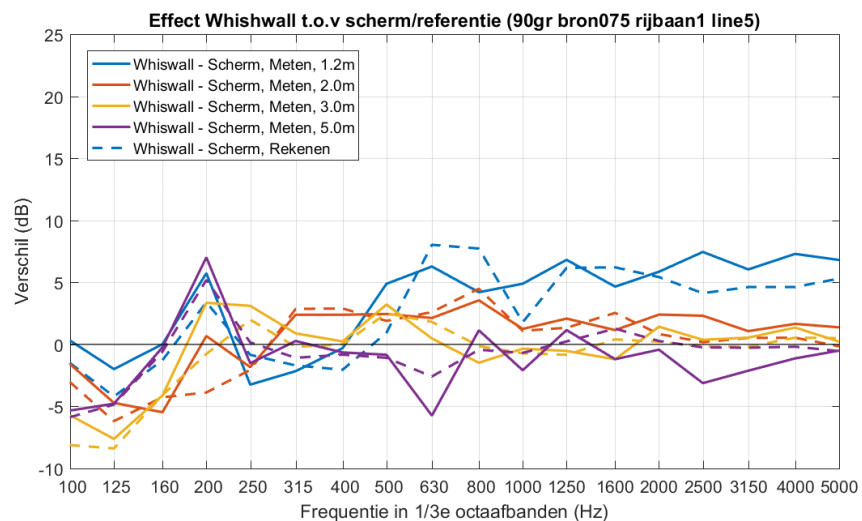
Figuur 23 Vergelijking van meet- en rekenresultaten bij het gebruik van een luidspreker/puntbron.



Figuur 24 Vergelijking van meet- en rekenresultaten bij het gebruik van een luidspreker/puntbron.

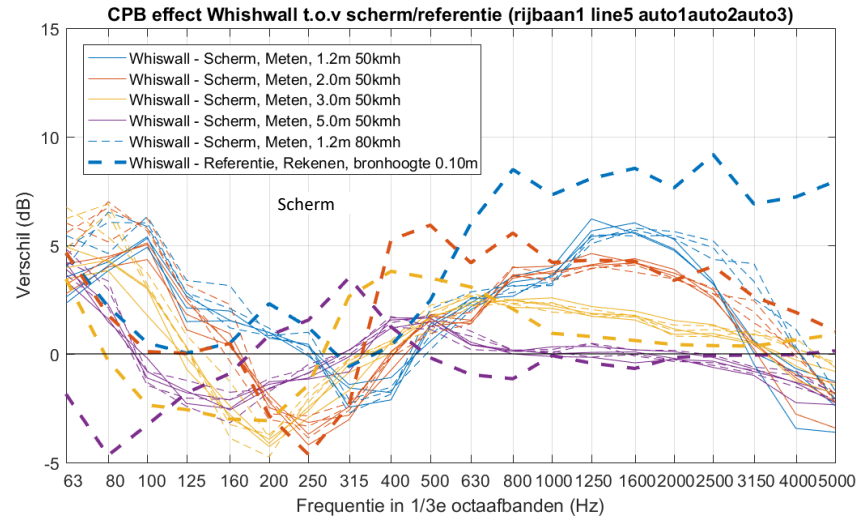


Figuur 25 Vergelijking van meet- en rekenresultaten bij het gebruik van een luidspreker/puntbron.

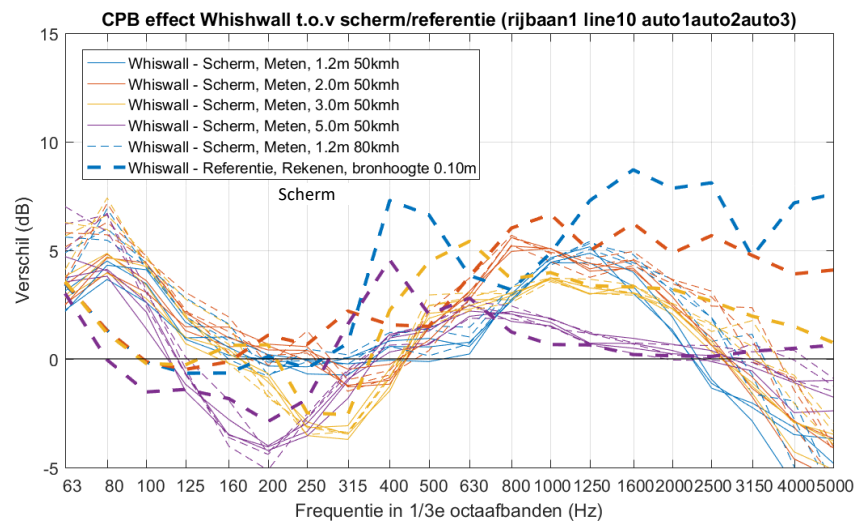


Figuur 26 Vergelijking van meet- en rekenresultaten bij het gebruik van een luidspreker/puntbron.

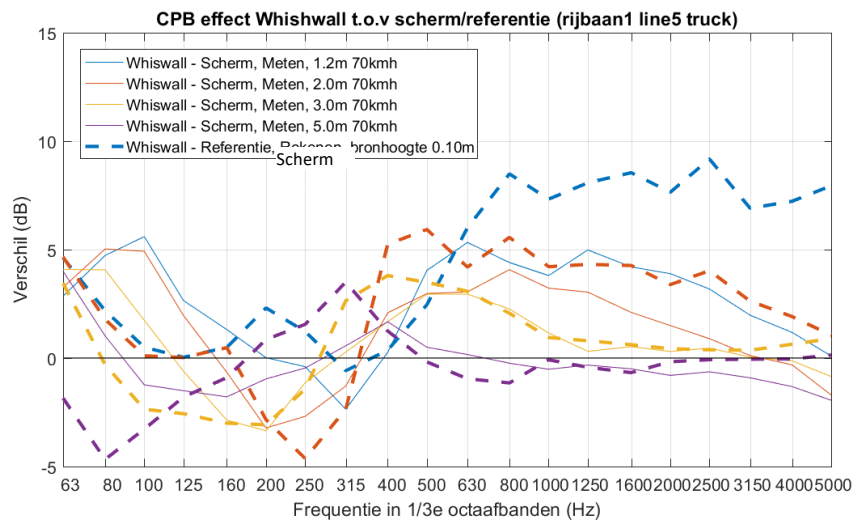
Passage resultaten: rijbaan 1 (op 3,5 meter van het scherm), licht of zwaar verkeer, microfoons op 5 of 10 m afstand achter het scherm (line5 of line10).



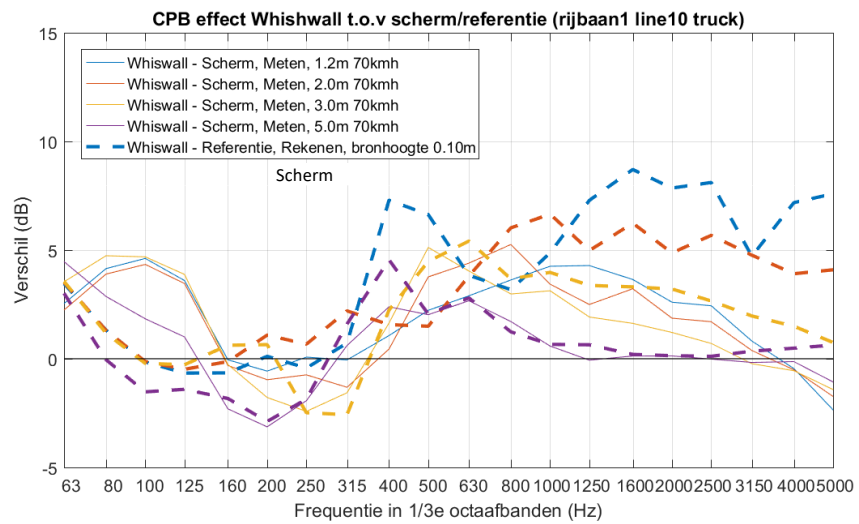
Figuur 27 Vergelijking van meet- en rekenresultaten bij het gebruik van een verkeerspassage.



Figuur 28 Vergelijking van meet- en rekenresultaten bij het gebruik van een verkeerspassages.



Figuur 29 Vergelijking van meet- en rekenresultaten bij het gebruik van een verkeerspassages.



Figuur 30 Vergelijking van meet- en rekenresultaten bij het gebruik van een verkeerspassages.

## C Bodem-impedantie metingen

De interferentie van direct & bodem-gereflecteerd geluid wordt gemeten met 2 microfoons boven elkaar, op 50 en 75 cm. Als bron is een startpistool gebruikt, op 10 meter afstand en 1,75 meter hoogte.

Bij de metingen achter het scherm op de aarde kan de reflectie van het scherm uit het signaal worden geknipt, door een latere aankomsttijd.

Het verschil spectrum van beide microfoons wordt vergeleken met een bodemmodel, zodat de stromingsweerstand kan worden bepaald. Hoe lager de stromingsweerstand hoe sterker de bodem absorbeert. Typische waarde voor een zandbodem is  $1000 \text{ kNsm}^{-4}$  en voor gras  $200 \text{ kNsm}^{-4}$ . De absorptie loopt altijd op met de frequentie.

Er is op 5 locaties gemeten, telkens op 2 plekken:

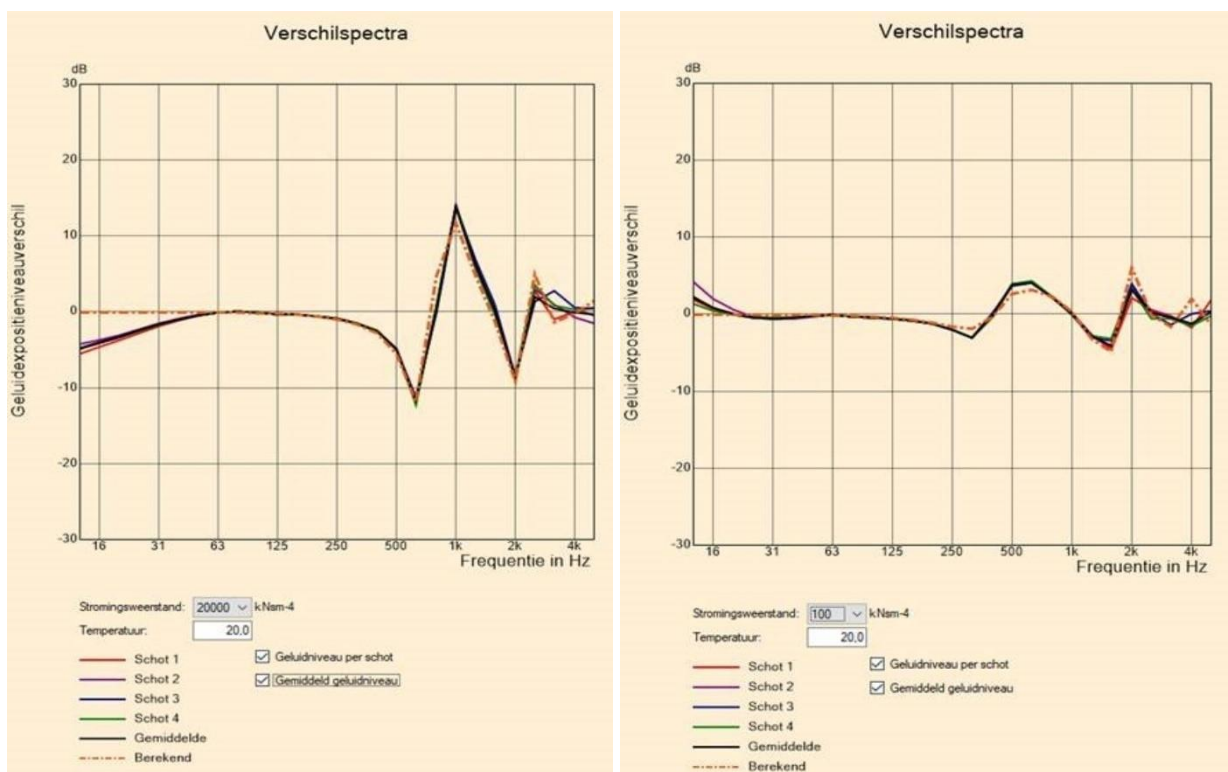
- 1 Aarde achter het referentiescherm:  $4000 - 8000 \text{ kNsm}^{-4}$
- 2 Aarde achter de Whiswall:  $2000 - 3000 \text{ kNsm}^{-4}$
- 3 Aarde op referentiedoorsnede:  $1250 - 4000 \text{ kNsm}^{-4}$
- 4 Asfalt:  $20.000 \text{ kNsm}^{-4}$  (zie figuur hieronder)
- 5 Gras aan overzijde van scherm:  $100 - 120 \text{ kNsm}^{-4}$  (zie figuur hieronder).

Hieruit blijkt: de aarde achter de schermen akoestisch wat harder is dan een typische zandbodem. Overigens, een verschil van 1000k of 2000k geeft voor de geluidoverdracht weinig verschil. Het gras is relatief akoestisch zacht (niet gebruikt in het numerieke model) en het asfalt is akoestisch hard.

Het startpistool geeft een piek-niveau op 10 meter afstand van rond de 140 dB, in zijwaartse richting.



Figuur 31 Meetopstelling met 2 microfoons en een startpistool voor de bodem-impedantie metingen. Locatie: gras aan overzijde van de weg en scherm/Whiswall.



Figuur 32 Verschilspectra van de 2 microfoons (meting = zwarte lijn) en fit met model om de stromingsweerstand te bepalen (rode lijn). Links: asfalt. Rechts: gras.