

TNO PUBLIEK

Defensie & Veiligheid

Oude Waalsdorperweg 63
2597 AK Den Haag
Postbus 96864
2509 JG Den Haag

www.tno.nl

T +31 88 866 10 00

TNO-rapport**TNO 2021 R10471****Effect van de Whiswall op grote afstand:
simulaties met FEM-PE en een rekenregel
voor SRM2**

Datum	Mei 2022
Auteur(s)	Erik Salomons Sandra Blaak Rafal Kurylek Frits van der Eerden Tessel van der Laan Ad van Heijningen
Aantal pagina's	100 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	6
Opdrachtgevers	Rijkswaterstaat, ProRail, RIVM
Projectnaam	Whiswall fases 4-6
Projectnummers	060.46488, 060.46489, 060.46491, 060.49105

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.

© 2022 TNO

TNO PUBLIEK

Samenvatting

Dit rapport beschrijft berekeningen van de geluidreductie door een Whiswall langs een verkeersweg of een spoorlijn. Een Whiswall bestaat uit een diffractor op een geluidscherm, waarmee in principe een grotere geluidreductie kan worden bereikt dan met een even hoog geluidscherm zonder diffractor. Het gaat in dit onderzoek om de extra geluidreductie door de diffractor, in aanvulling op de 'gewone' schermwerking door het geluidscherm.

Voor de berekeningen is gebruik gemaakt van de numerieke simulatiemethode FEM-PE. Dit is een hybride rekenmethode, waarbij FEM wordt gebruikt voor het geluidveld in de buurt van de Whiswall en PE voor de geluiduitbreiding naar grote afstanden, tot maximaal 600 m in dit geval. Het FEM-model is gevalideerd in eerdere onderzoeken op basis van metingen in situaties met een Whiswall langs een verkeersweg en een spoorlijn. Berekeningen met FEM-PE zijn in dit onderzoek uitgevoerd voor 42 verschillende situaties, waarin onder meer bronpositie, schermhoogte, en bodemtype zijn gevarieerd.

Op basis van de resultaten van de berekeningen met FEM-PE is een rekenregel ontwikkeld waarmee de geluidreductie door de diffractor kan worden bepaald. De rekenregel is geschikt voor toevoeging aan rekenmethode SRM2 uit het Nederlandse reken- en meetvoorschrift voor geluid van wegverkeer en railverkeer. De rekenregel is gebaseerd op de resultaten van FEM-PE en ook op gemeten 'producteigenschappen' van de Whiswall.

Voor 8 van de 42 situaties zijn de berekeningen herhaald met een alternatieve diffractor, die zorgt voor een betere geluidreductie van laagfrequente componenten van verkeersgeluid. De ontwikkelde rekenregel is getoetst aan de hand van deze nieuwe resultaten. Hierbij is ook onderzocht of de rekenregel nog iets geoptimaliseerd kan worden.

Inhoudsopgave

	Samenvatting	2
1	Inleiding	4
2	Simulaties met FEM-PE.....	7
2.1	Het effect van de diffractor op de Whiswall	7
2.2	Opzet van de berekeningen met FEM-PE.....	7
2.3	Scenario's	10
2.4	Resultaten van FEM-PE	11
3	Rekenregel voor SRM2	15
3.1	Schermerwerking volgens SRM2	15
3.2	Opzet van de rekenregel	17
3.3	Producteigenschappen van de Whiswall.....	18
3.4	Effect van een scherm op grote afstand	21
3.5	Effect van de Whiswall op grote afstand	22
3.6	Rekenregel, versie 1	28
3.7	Diffractietest: lineair middelen	34
3.8	Rekenregel, versie 2	36
3.9	Berekeningen met FEM voor de diffractietest	37
3.10	Rekenregel, versie 3	41
3.11	Rekenregel, versie 4	44
3.12	Conclusies van hoofdstuk 3.....	45
4	LF-diffractor; nadere analyse en optimalisatie.....	47
4.1	Afmetingen van de LF-diffractor	47
4.2	Berekeningen met FEM voor de diffractietest van de LF-diffractor	47
4.3	Berekeningen met FEM-PE voor 8 scenario's met de LF-diffractor	50
4.4	Analyse en optimalisatie van de rekenregel	51
4.5	Conclusies van hoofdstuk 4.....	53
5	Conclusies.....	55
	Bijlage(n)	
	A Breedbandige geluidreductie door de diffractor	
	B Spectrum van wegverkeersgeluid	
	C Breedbandige resultaten van FEM-PE	
	D Aanvullende grafieken voor versie 3 van de rekenregel	
	E Grafieken voor de analyse in hoofdstuk 4: schermwerking	
	F Grafieken voor de analyse in hoofdstuk 4: effect van de diffractor	

1 Inleiding

Een diffractor is een geluidreducerend object dat gebruikt kan worden om geluid van weg- en railverkeer te reduceren. De geluidreductie ontstaat door de resonerende werking van sleuven met verschillende dieptes in de diffractor. In recente onderzoeken zijn metingen en berekeningen uitgevoerd aan een diffractor in de berm van een weg (zie Figuur 1.1)¹. Op basis van de resultaten heeft TNO een rekenregel ontwikkeld² die inmiddels is toegevoegd aan het Reken- en Meetvoorschrift Geluid (RMG)³. De diffractor in de berm wordt aangeduid met de commerciële naam Whisstone⁴.



Figuur 1.1 Illustratie van een diffractor in de berm van een weg (Whisstone).

Een diffractor kan ook worden geplaatst bovenop een geluidscherm langs een weg of een spoorlijn (zie Figuur 1.2). De diffractor zorgt naar verwachting voor een vergroting van de schermwerking. De combinatie van diffractor en geluidscherm wordt aangeduid met de commerciële naam Whiswall⁵.



Figuur 1.2 Illustratie van een diffractor op een scherm langs een weg (Whiswall).

In opdracht van Rijkswaterstaat, ProRail en RIVM, wordt voor het effect van de diffractor van de Whiswall ook een rekenregel ontwikkeld, die kan worden toegevoegd aan het RMG. Hiervoor is een onderzoek opgezet, dat bestaat uit de volgende zes fasen.

Fase 1. Het uitvoeren van geluidmetingen aan de Whiswall, met twee meetopstellingen:

- een opstelling om de 'producteigenschappen'⁶ te bepalen (diffractietest),
- een opstelling langs een verkeersweg.

¹ F. van der Eerden, E. Brouns, B. Binnerts, A. Eisses, A. Kruyen, "Ontwikkeling rekenregel diffractor fase 1", TNO-rapport R10198, maart 2018.

² F. van der Eerden, E. Brouns, A. Eisses, "Ontwikkeling rekenregel diffractor fase 2", TNO-rapport R11565, maart 2019.

³ Reken- en meetvoorschrift geluid 2012 (RMG2012), Staatscourant Nr. 11810, 27 juni 2012.

⁴ De Whisstone is ontwikkeld door het bedrijf 4Silence, in samenwerking met de Universiteit Twente. Zie www.4silence.com/whisstone/.

⁵ De Whiswall is ontwikkeld door het bedrijf 4Silence, in samenwerking met de Universiteit Twente. Zie www.4silence.com/whiswall/.

⁶ Met producteigenschappen wordt hier bedoeld: een representatief spectrum van de geluidreductie door 'het product' (de diffractor in dit geval), waarbij gemiddeld is over verschillende posities van de geluidbron en de waarnemer ten opzichte van het 'het product'.

Fase 2. Een vergelijking van de meetresultaten uit fase 1 met resultaten van berekeningen met een numeriek model.

Fase 3. Een vergelijking van resultaten van metingen langs een spoorlijn met resultaten van berekeningen met een numeriek model.

Fase 4. Het berekenen van het effect van de Whiswall voor weg- en railverkeersgeluid met een numeriek model, voor verschillende geometrieën met afstanden tot 600 m.

Fase 5. De ontwikkeling van een rekenregel voor het effect van de diffractor van de Whiswall, die geschikt is voor het RMG voor weg- en railverkeersgeluid.

Fase 6. Nadere analyse van de rekenregel, inclusief toetsing aan resultaten voor een alternatieve diffractor die meer is afgestemd op lage frequenties ('LF-diffractor').

In dit rapport worden de resultaten van de fases 4, 5 en 6 beschreven. De resultaten van fase 2 (wegverkeer) en fase 3 (railverkeer) zijn in eerdere rapporten beschreven^{7,8}.

De berekeningen in fasen 2 en 3 zijn uitgevoerd met een FEM-model⁹. Het ging hierbij om het effect van de diffractor van de Whiswall op kleine afstanden, tot maximaal 25 m. Voor wegverkeer werd een goede overeenstemming gevonden tussen meet- en rekenresultaten. Voor railverkeer was de overeenstemming goed voor 7.5 m afstand en minder goed voor 15 en 25 m. Dit laatste werd toegeschreven aan een onderschatting van het effect van de diffractor bij de metingen.

In het hier beschreven onderzoek zijn berekeningen uitgevoerd van het effect van de Whiswall op grotere afstand, tot maximaal 600 m achter het scherm. De berekeningen zijn uitgevoerd met het hybride rekenmodel FEM-PE, waarbij FEM wordt gebruikt tot 15 m achter de Whiswall en PE voor de geluiduitbreiding naar grotere afstanden¹⁰. De berekeningen met FEM-PE zijn beschreven in hoofdstuk 2.

In hoofdstuk 3 wordt de ontwikkeling van de rekenregel voor het effect van de diffractor van de Whiswall beschreven. De ontwikkeling is gebaseerd op twee elementen.

1 De resultaten van de metingen uit fase 1 (diffractietest).

2 De resultaten van de berekeningen uit hoofdstuk 2.

De rekenregel kan worden toegevoegd aan het RMG. De rekenregel levert een correctieterm op de schermwerking, zoals berekend met de Standaard Rekenmethode 2 (SRM2) van het RMG. De correctieterm is vergelijkbaar met de correctieterm voor een schermtop, of T-top, die al in het RMG is opgenomen.

⁷ F. van der Eerden, R. Kurylek, T. van der Laan, "Vergelijking van meet- en rekenresultaten voor de Whiswall", TNO-rapport R11645, januari 2021.

⁸ R. Kurylek, F. van der Eerden, E. Salomons, A. Eisses, T. van der Laan, "Vergelijking van meet- en rekenresultaten voor de Whiswall langs het spoor bij Susteren", TNO-rapport 2021 R10470, maart 2021.

⁹ FEM = Finite Element Method, de Engelse naam voor de eindige-elementenmethode voor het numeriek oplossen van differentiaalvergelijkingen, in dit geval de golfvergelijking voor geluid in de atmosfeer.

¹⁰ PE = Parabolic Equation, de Engels naam voor een benadering van de golfvergelijking waarmee geluiduitbreiding in de atmosfeer over grote afstanden kan worden berekend.

De rekenregel beschreven in hoofdstuk 3 is ontwikkeld op basis van de resultaten voor de diffractor van de Whiswall. De 'producteigenschappen' van de diffractor, zoals verkregen uit een zogeheten diffractietest, worden gebruikt als invoerparameters van de rekenregel. Een vraag is of de rekenregel ook goed werkt voor een vergelijkbare diffractor met iets andere producteigenschappen. Om deze vraag te beantwoorden is een analyse uitgevoerd voor alternatieve diffractor, die meer is afgestemd op lage frequenties dan de originele diffractor¹¹. De alternatieve diffractor wordt in dit rapport aangeduid als 'LF-diffractor'¹². De analyse is beschreven in hoofdstuk 4. Hierbij is ook onderzocht of de rekenregel nog iets geoptimaliseerd kan worden.

¹¹ De dimensies van de LF-diffractor zijn gedefinieerd door het bedrijf 4Silence⁵.

¹² Een potentieel voordeel van de LF-diffractor t.o.v. de originele diffractor is dat de breedbandige geluidreductie van de LF-diffractor groter kan zijn. Dit geldt met name voor situaties met een hoog geluidscherm (d.w.z. een hoge Whiswall), waarin laagfrequente componenten van verkeersgeluid sterker zijn dan in situaties zonder afscherming.

2 Simulaties met FEM-PE

Het effect van de Whiswall op afstanden tot 600 m is berekend met het hybride rekenmodel FEM-PE, voor 42 verschillende scenario's (situaties). Hierbij is rekening gehouden met de invloeden van de atmosfeer en de bodem op geluiduitbreiding. De berekeningen kunnen worden beschouwd als simulaties van geluiduitbreiding in de praktijk.

De resultaten van de berekeningen worden in hoofdstuk 3 gebruikt voor de ontwikkeling van de rekenregel.

2.1 Het effect van de diffractor op de Whiswall

Een Whiswall tussen een bron en een waarnemer reduceert het geluidniveau bij de waarnemer door twee effecten:

- afscherming van het geluid (schermwerking),
- geluidreductie door de resonerende werking van de diffractor.

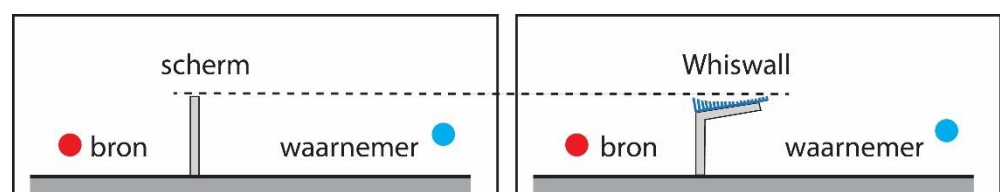
We zijn hier vooral geïnteresseerd in het tweede effect.

De geluidreductie door de diffractor wordt gedefinieerd als (minus) het verschil in geluidniveau tussen twee situaties (zie Figuur 2.1):

- de situatie met de Whiswall,
- de situatie met een even hoog scherm zonder diffractor.

Vanwege de hoogte van de diffractor is het scherm in de tweede situatie iets hoger dan het (geknikte) scherm van de Whiswall. De hoogte van de diffractor is ongeveer 20 cm.

Daarom worden voor alle scenario's twee berekeningen met FEM-PE uitgevoerd, voor de twee genoemde situaties. Om voor enkele scenario's ook een indruk te krijgen van de afscherming van het geluid, wordt nog een derde berekening uitgevoerd, voor de situatie zonder scherm of Whiswall (vlakke bodem).

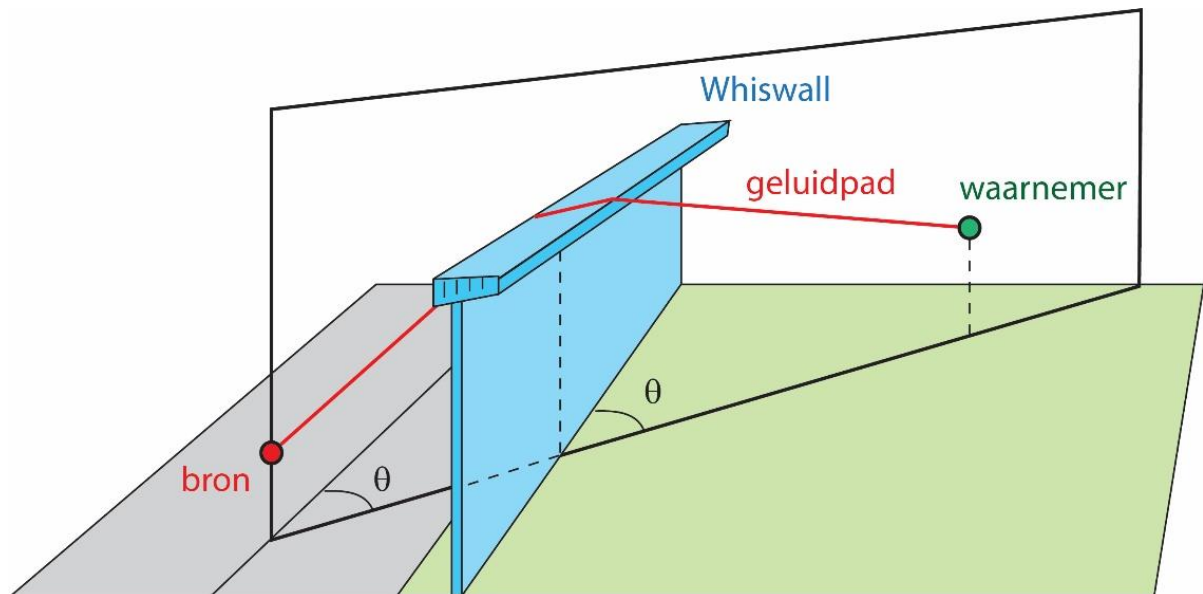


Figuur 2.1 De geluidreductie door de diffractor (het blauwe gedeelte aan de bovenkant van de Whiswall) wordt gedefinieerd als (minus) het verschil in geluidniveau tussen de situatie met de Whiswall (rechts) en de situatie met een even hoog scherm zonder diffractor (links).

2.2 Opzet van de berekeningen met FEM-PE

In dit onderzoek wordt een FEM-PE-model gebruikt dat ook gebruikt is in eerdere onderzoeken. Het FEM-model is ontwikkeld in de onderzoeken aan de Whiswall^{7,8}. De koppeling met het PE-model is uitgevoerd op dezelfde wijze als in de onderzoeken aan de Whisstone^{1,2}.

Het FEM-PE-model is een tweedimensionaal model, dat wordt toegepast in een verticaal vlak door een puntbron (boven een rijlijn van een weg, of een spoorlijn) en een waarnemer. Dit vlak wordt bij SRM2 aangeduid als een sectorvlak. Figuur 2.2 toont een sectorvlak voor een situatie met de Whiswall. De hoek θ tussen de rijlijn en het sectorvlak varieert tussen 0° en 180° . Bij 90° staat het sectorvlak loodrecht op de rijlijn en het scherm. Bij andere hoeken worden afstanden vergroot met een factor $1/\sin\theta$. Dit geldt ook voor de breedte van de diffractor en de breedte van de sleuven in de diffractor.



Figuur 2.2 Illustratie van het verticale vlak (dikke zwarte lijn) door een puntbron boven een rijlijn en een waarnemer. De rode lijn is het geluidpad over de Whiswall. Hoek θ tussen het verticale vlak en het scherm (of de rijlijn) is aangegeven.

Figuur 2.3 toont de geometrie van de berekeningen met FEM-PE in een sectorvlak. In een gebied rond de bron en de Whiswall wordt FEM toegepast. De geluiddruk op de verticale rechter rand van het FEM-domein, 15 m achter de Whiswall, wordt gebruikt als startvector voor de berekening met PE. Met PE wordt gerekend over een afstand van 600 m, waarbij rekening wordt gehouden met meewind, d.w.z. wind van de bron naar de waarnemer¹³.

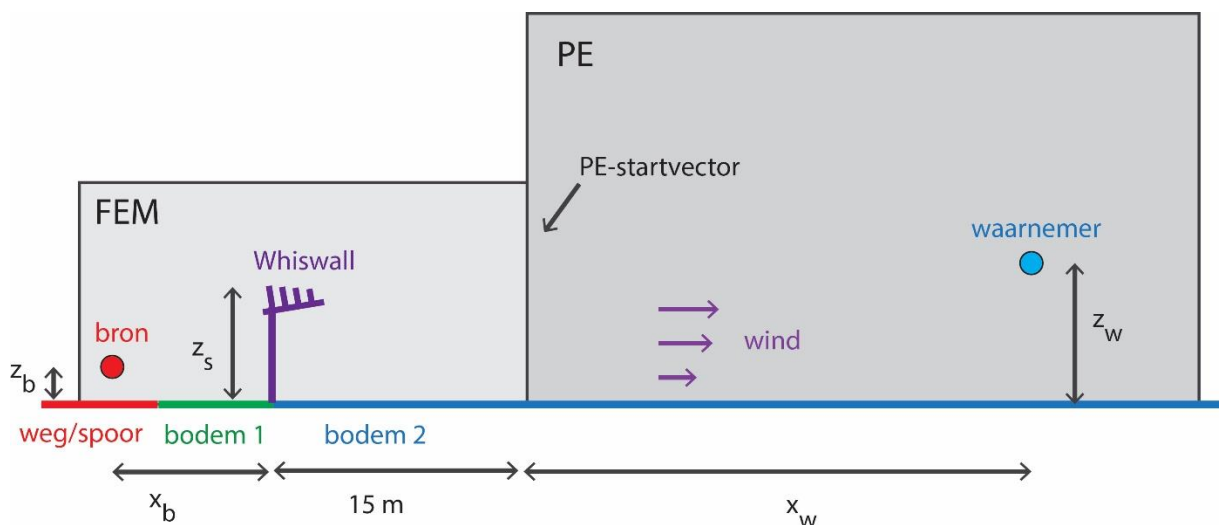
De bodem is verdeeld in drie gebieden (zie Figuur 2.3):

- **weg/spoor:** wegdek of ballastbed,
- **bodem 1:** de bodem voor de Whiswall,
- **bodem 2:** de bodem achter de Whiswall.

In dit onderzoek is uitgegaan van een harde bodem voor het eerste bodemgebied (tenzij anders vermeld), en een harde bodem of grasbodem¹⁴ voor de andere twee gebieden. Voor 'bodem 1' is uitgegaan van een strook met een breedte van 2 m. Met andere woorden, de Whiswall wordt op 2 m afstand van de rand van de weg of het ballastbed geplaatst.

¹³ Met PE wordt gerekend met een logaritmisches windprofiel, met 4.6 m/s meewind op 10 m hoogte (tenzij anders vermeld). Bij SRM2 wordt ook uitgegaan van een situatie met meewind.

¹⁴ Bij de bodem wordt een randvoorwaarde in FEM en PE opgelegd. Voor een grasbodem wordt uitgegaan van het impedantiemodel van Delany & Bazley (Applied Acoustics **3** (1970) 105-116), met een stromingsweerstand van 200 kN s m^{-4} .



Figuur 2.3 Illustratie (niet op schaal) van de geometrie voor berekeningen met FEM-PE. Met FEM wordt het geluid in het linker domein (lichtgrijs) berekend. De geluidsdruk op de verticale rechter rand, 15 m achter de Whiswall, wordt gebruikt als startvector voor een berekening met PE van het geluid in het rechter domein (donkergrijs), over een afstand van 600 m.

De berekeningen met FEM worden uitgevoerd met behulp van het softwarepakket Comsol¹⁵. In de buurt van de diffractor wordt gewerkt met een sterk verfijnd FEM-rooster, zodat de complexe vorm van de diffractor goed wordt gerepresenteerd. Het totale FEM-domein is typerend 32 m breed en 13 m hoog. Voor de bron wordt uitgegaan van een puntbron met een emissie die voor alle richtingen en frequenties gelijk is. Bij de bodem wordt een randvoorwaarde opgelegd voor een grasbodem of een harde bodem (zoals hiervoor beschreven). Aan de andere randen van het domein wordt een absorberend laag¹⁶ gebruikt om reflecties te vermijden. In eerdere onderzoeken^{7,8} is het FEM-model geoptimaliseerd door middel van vergelijking met meetresultaten¹⁷.

De berekeningen met PE worden uitgevoerd met behulp van een computerprogramma ontwikkeld door TNO, gebaseerd op de GFPE-methode¹⁸. Het PE-domein is 620 m breed en 62 m hoog. Bij de bodem wordt een randvoorwaarde opgelegd voor een grasbodem of een harde bodem. Aan de bovenzijde van het domein wordt een absorberende laag gebruikt om reflecties te vermijden. De berekening met PE gaat uit van een PE-startvector uit de FEM-berekening¹⁹ en verloopt in stappen naar de waarnemers tot 620 m. Figuur 2.3 toont slechts een enkele waarnemer, maar in feite wordt het hele PE-domein gevuld met rekenresultaten, voor de volgende afstanden en hoogtes:

- $x_w = 1, 2, \dots, 620$ m,
- $z_w = 0.5, 1, \dots, 62$ m.

¹⁵ Comsol Multiphysics ®. See www.comsol.com.

¹⁶ PML = Perfectly Matched Layer.

¹⁷ Hierbij is de diepte en de bedekking van de voorste sleuf in de diffractor aangepast. Bovendien werd gevonden dat een empirische correctie van 2.5 dB nodig is voor de 400 Hz tertsband. Deze correctie is in dit onderzoek achteraf toegepast op de resultaten van FEM-PE.

¹⁸ GFPE = Green's Function Parabolic Equation. Zie: E.M. Salomons, "Improved Green's function parabolic equation method for atmospheric sound propagation" J. Acoust. Soc. Am. 104, 100-111 (1998). Zie ook: E.M. Salomons, "Computational atmospheric acoustics" (Kluwer, Dordrecht, 2001).

¹⁹ Omdat het PE-domein hoger is dan het FEM-domein wordt de PE-startvector uit FEM geëxtrapoleerd tot de hoogte van het PE-domein.

Er wordt gerekend voor 72 frequenties, waarmee resultaten worden verkregen voor tertsbanden 50-2500 Hz en octaafbanden 63-2000 Hz. Hierbij worden vier frequenties per tertsband gebruikt.

De diffractor is ontwikkeld voor geluidreductie bij frequenties van circa 400 Hz en hoger. Bij de rekenregel in hoofdstuk 3 worden de vijf octaafbanden 125-2000 Hz beschouwd. Het effect van de diffractor wordt gelijk aan nul verondersteld buiten dit frequentiegebied.

2.3 Scenario's

Berekeningen met FEM-PE zijn uitgevoerd voor 42 verschillende scenario's, met parameters gegeven in Tabel 2.1. Parameter θ is de hoek van het sectorvlak, aangegeven in Figuur 2.2. De andere parameters zijn aangegeven in Figuur 2.3.

In eerste instantie is gerekend voor 24 scenario's (bovenste gedeelte van Tabel 2.1):

- 10 scenario's met $\theta=0^\circ$ (A-J),
- 14 scenario's met $\theta=45^\circ$ (C45-U45).

Voor $\theta=0^\circ$ wordt gerekend voor afstanden x_b van 3.5, 7, en 15 m. Afstand 3.5 m representeert de rijlijn op een weg die het dichtst bij het scherm ligt. Afstanden 7 en 15 m representeren verder verwijderde rijlijnen. Voor $\theta=45^\circ$ wordt gerekend voor afstanden x_b van 5 en 10 m. Deze (schuine) afstanden komen overeen met de loodrechte afstanden van 3.5 en 7 m (aangezien $3.5/\sin 45^\circ = 5$ en $7/\sin 45^\circ = 10$). Er is gerekend voor twee schermhoogtes, 1.1 m en 5 m, en vier bronhoogtes, 0.1, 0.5, 2 en 4 m. Bronhoogte 0.1 m is relevant voor wegverkeersgeluid, met name het deel van het geluid dat ontstaat door de interactie van de banden en het wegdek. Voor railverkeersgeluid zijn alle vier bronhoogtes relevant.

Op basis van de resultaten voor de eerste 24 scenario's zijn vervolgens 18 scenario's toegevoegd (onderste gedeelte van Tabel 2.1). Hierbij zijn de volgende elementen toegevoegd:

- bronhoogte van 1.1 m,
- ballastbed voor het bodemgebied weg/spoor,
- schermhoogte 3 m,
- zwakkere wind, 2.3 m/s in plaats van 4.6 m/s,
- geen wind, 0 m/s (neutrale atmosfeer).

Het ballastbed is gemodelleerd met een hiervoor geschikt impedantiemodel²⁰. De scenario's met zwakkere wind en geen wind zijn toegevoegd in het licht van het nieuwe Europese rekenmodel Cnossos-EU, waarbij gemiddeld wordt over twee windsituaties (meewind en geen wind).

²⁰ Hiervoor is een impedantiemodel van Zwikker en Kosten gebruikt (star-skeletmodel), met stromingsweerstand 30 kN s m^{-4} , porositeit 0.08, structuurfactor 1, en laagdikte 330 mm.

Tabel 2.1 Parameters van FEM-PE-scenario's.

hoogte bron z_b (m)	hoogte scherm z_s (m)	bodem weg/spoor	bodem 1	bodem 2	afstand van bron naar scherm x_b (m)						hoek θ (gr)	wind (m/s)	aantal
					3.5	5	7	10	15	25			
0.1	1.1	hard	gras	gras	C		F		I		0	4.6	3
0.5					H		G		J				3
2													
4													
0.1	1.1	hard	gras	gras		C45		F45			45	4.6	2
0.5						H45		G45					2
2						K45							1
4						L45							1
0.1	5	hard	gras	gras		M45		R45			45	4.6	2
0.5						N45		S45					2
2						P45		T45					2
4						Q45		U45					2
0.1	1.1	hard	hard	gras	B		E				0	4.6	2
				hard	A		D						2
													24
1.1	1.1	hard	gras	gras	V		W		Y		0	4.6	3
						V45		W45			45		2
0.1	1.1	ballastbed	gras	gras	CB						0	4.6	1
1.1		ballastbed			VB								1
0.1	3	hard	gras	gras		MM45			XX45		45	4.6	2
				hard		MMH45			XXH45				2
0.1	5	hard	gras	gras					X45		45	4.6	1
				hard		MH45			XH45				2
0.5	1.1	hard	gras	gras	HW		GW				0	2.3	2
					HZ		GZ				0		2
													42

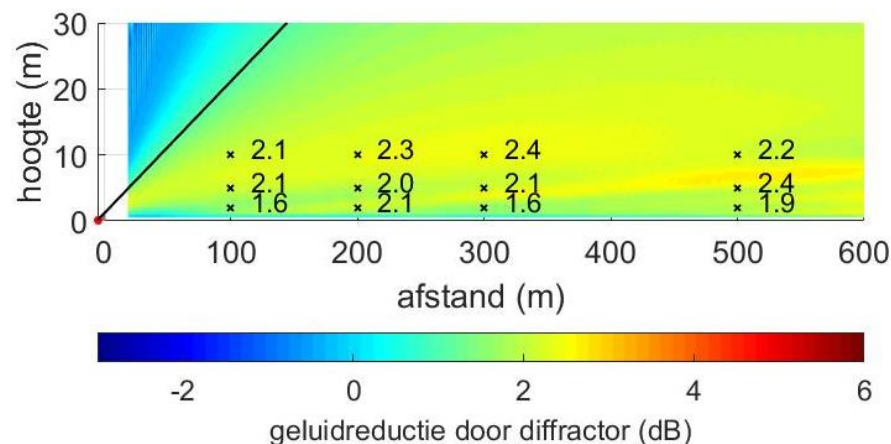
2.4 Resultaten van FEM-PE

In het volgende hoofdstuk worden resultaten van FEM-PE in octaafbanden gebruikt om een rekenregel te ontwikkelen. In deze paragraaf worden enkele resultaten van FEM-PE gepresenteerd als (A-gewogen) breedbandige geluidreducties door de diffractor. In bijlage C worden breedbandige resultaten van alle berekeningen gepresenteerd.

Voor de berekening van de breedbandige geluidreducties wordt uitgegaan van een spectrum van wegverkeersgeluid volgens de Europese standaard EN 1793-3²¹ (zie annex A en B). Dit spectrum is bedoeld om de breedbandige geluidreductie door een object, zoals een geluidscherm langs een weg, te bepalen.

²¹ European standard prEN 1793-3, "Road traffic noise reducing devices – Test method for determining the acoustic performance – Part 3 : Normalized traffic noise spectrum".

Figuur 2.4 toont een voorbeeld van de breedbandige geluidreductie door de diffractor, voor scenario C45 ($z_b = 0.1$ m, $z_s = 1.1$ m, $x_b = 5$ m). De geluidreductie onder de zichtlijn bedraagt circa 2 dB. Numerieke waarden op twaalf posities zijn in de grafiek weergegeven.



Figuur 2.4 Voorbeeld van het resultaat van een berekening met FEM-PE, voor scenario C45 ($z_b = 0.1$ m, $z_s = 1.1$ m, $x_b = 5$ m). De kleur representeert de A-gewogen breedbandige geluidreductie door de diffractor van de Whiswall. De zwarte lijn is de zichtlijn door de bron (rode punt) en de schermtop.

De FEM-PE-resultaten voor het scherm en de Whiswall bevatten niet alleen het effect van de diffractor, maar ook het effect van afscherming door het scherm of de Whiswall. Door de afscherming worden hoge frequenties uit het verkeerspectrum meer onderdrukt dan lage frequenties. Dit wordt geïllustreerd door het volgende voorbeeld.

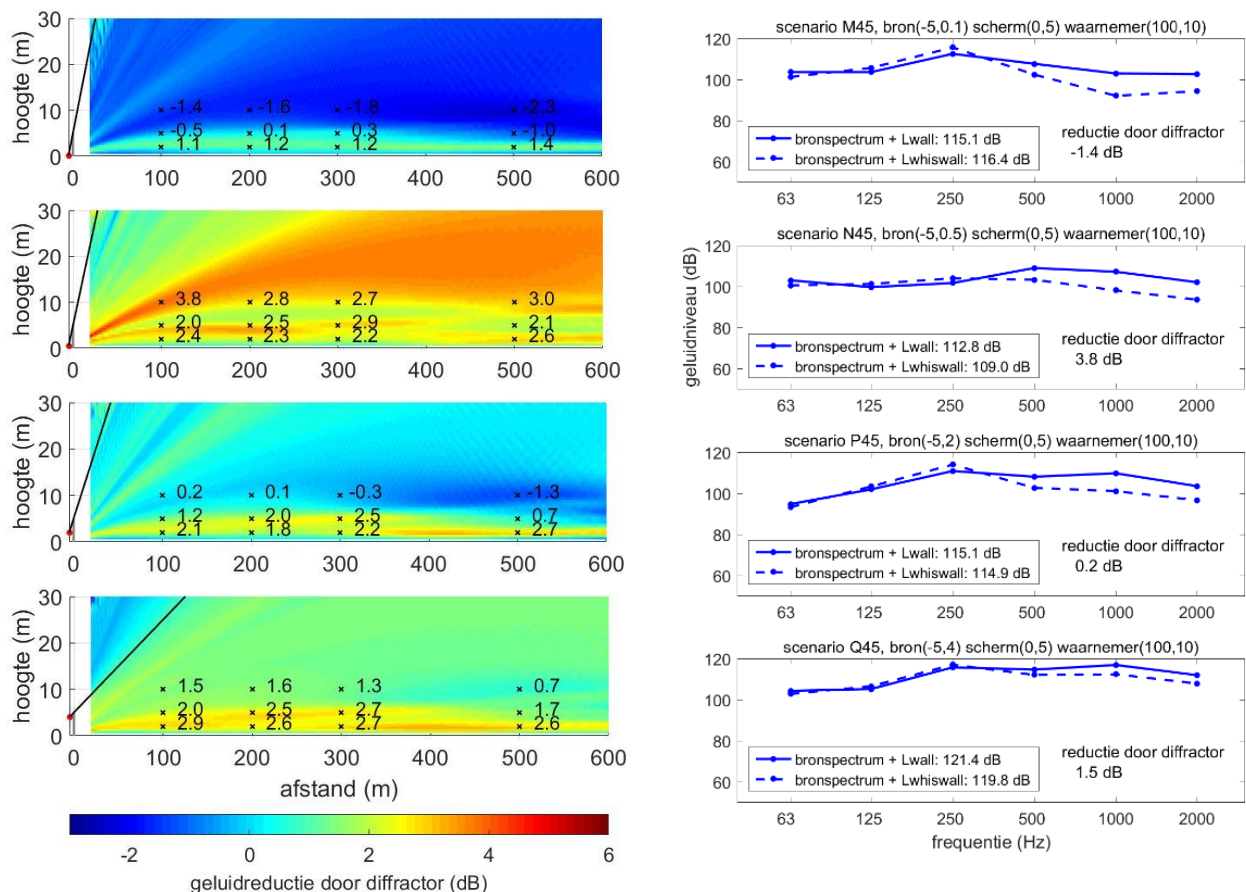
Figuur 2.5 toont grafieken van de geluidreductie door de diffractor berekend met FEM-PE voor scenario's M45, N45, P45, en Q45, met respectievelijk bronhoogte 0.1, 0.5, 2 en 4 m, en schermhoogte 5 m. De waarde van de geluidreductie varieert sterk met de bronhoogte. Bijvoorbeeld, voor de waarnemer op afstand 100 m en hoogte 10 m geldt:

- geluidreductie -1.4 dB voor bronhoogte 0.1 m,
- geluidreductie 3.8 dB voor bronhoogte 0.5 m,
- geluidreductie 0.2 dB voor bronhoogte 2 m,
- geluidreductie 1.5 dB voor bronhoogte 4 m.

De berekening van deze vier getallen via het A-gewogen verkeerspectrum wordt ook geïllustreerd in de figuur. Hieruit blijkt dat voor bronhoogte 0.1 m de geluidreductie wordt bepaald door de octaafband 250 Hz, terwijl voor bronhoogte 0.5 m de octaafbanden 500 en 1000 Hz de grootste bijdragen leveren.

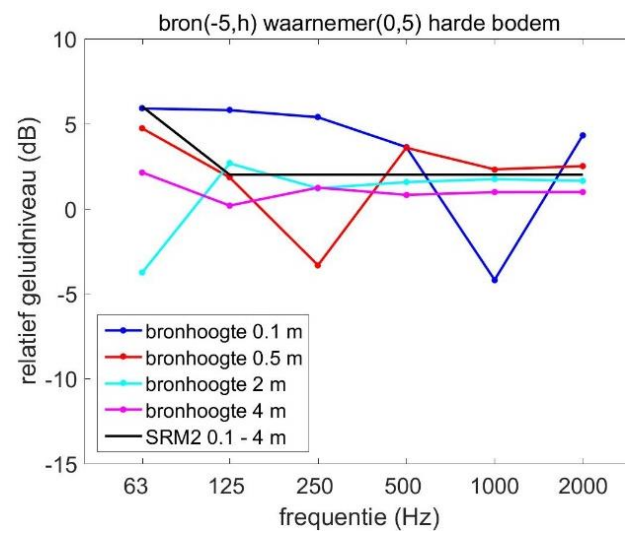
Deze verschuiving van het spectrum is een gevolg van interferentie aan de bronzijde van het scherm of de Whiswall. Het gaat hierbij om het weglengteverschil tussen direct geluid en geluid via de bodem, van de bron naar de top van het scherm. Dit weglengteverschil is precies een halve golflengte bij 250 Hz voor bronhoogte 0.5 m, waardoor bij die frequentie een minimum in de geluidoverdracht optreedt. Figuur 2.6 toont overdrachtspectra voor de vier bronhoogtes. Het minimum bij 250 Hz voor bronhoogte 0.5 m is duidelijk zichtbaar. Ter vergelijking is ook het overdrachtspectrum volgens SRM weergegeven, dat gelijk is voor de vier bronhoogtes.

De interferentie voor bronhoogte 0.5 m zorgt dus voor een spectrale verschuiving naar hogere frequenties dan 250 Hz. Voor andere bronhoogtes en andere afstanden tussen bron en scherm treedt deze interferentie in het algemeen niet op. Voor deze situaties is de bijdrage bij 250 Hz groter dan, of ongeveer even groot als, de bijdragen bij 500 en 1000 Hz. Hierdoor wordt de breedbandige geluidreductie door de diffractor beperkt. De grote geluidreducties bij 500 en 1000 Hz komen niet tot uiting in de breedbandige geluidreductie²².



Figuur 2.5 De grafieken links tonen de breedbandige geluidreductie door de diffractor berekend met FEM-PE voor scenario's M45, N45, P45, Q45 (van boven naar beneden). De breedbandige geluidreductie is bepaald op basis van octaafbandniveaus uit FEM-PE (Lwall, Lwhiswall) en een typerend A-gewogen octaafbandspectrum van wegverkeersgeluid (zie annex A en B). De grafieken rechts tonen de octaafbandniveaus en illustreren de berekening van de breedbandige geluidreductie, voor waarnemerpositie (100,10).

²² Het geluidreducerende effect van de diffractor is beperkt tot het frequentiegebied 400-2500 Hz. Dit blijkt bijvoorbeeld uit spectra die worden gepresenteerd in hoofdstuk 3.



Figuur 2.6 Analytisch berekende overdrachtspectra van de bron naar een waarnemer op de schermtop (5 m afstand van de bron, hoogte 5 m), voor vier bronhoogtes. Ook weergegeven zijn de overdrachtspectra volgens SRM2.

3 Rekenregel voor SRM2

Zoals beschreven in hoofdstuk 1 is een doel van dit onderzoek om een rekenregel te ontwikkelen voor de diffractor van de Whiswall. De rekenregel moet geschikt zijn voor rekenmethode SRM2 van het RMG, zowel voor wegverkeer als voor railverkeer.

De ontwikkeling is gebaseerd op de volgende twee elementen.

- Gemeten producteigenschappen van de diffractor van de Whiswall, zoals bepaald in een diffractietest⁷.
- De resultaten van de berekeningen met FEM-PE, beschreven in hoofdstuk 2. In dit hoofdstuk wordt de ontwikkeling van de rekenregel stapsgewijs beschreven.

3.1 Schermwerking volgens SRM2

De schermwerking ΔL_{SWN} bij SRM2 wordt berekend met de volgende formule^{3,23}:

$$\Delta L_{SWN} = HF(N_f) + C_T - C_p \quad (3.1)$$

met

- H : de effectiviteit van het scherm,
- $F(N_f)$: een functie van het Fresnelgetal N_f ,
- C_T : een correctieterm voor een schermtop (T-top),
- C_p : een correctieterm voor het profiel van het scherm.

Voor een dun verticaal scherm zonder schermtop geldt $C_T = 0$ en $C_p = 0$. Voor railverkeer wordt C_T niet toegepast.

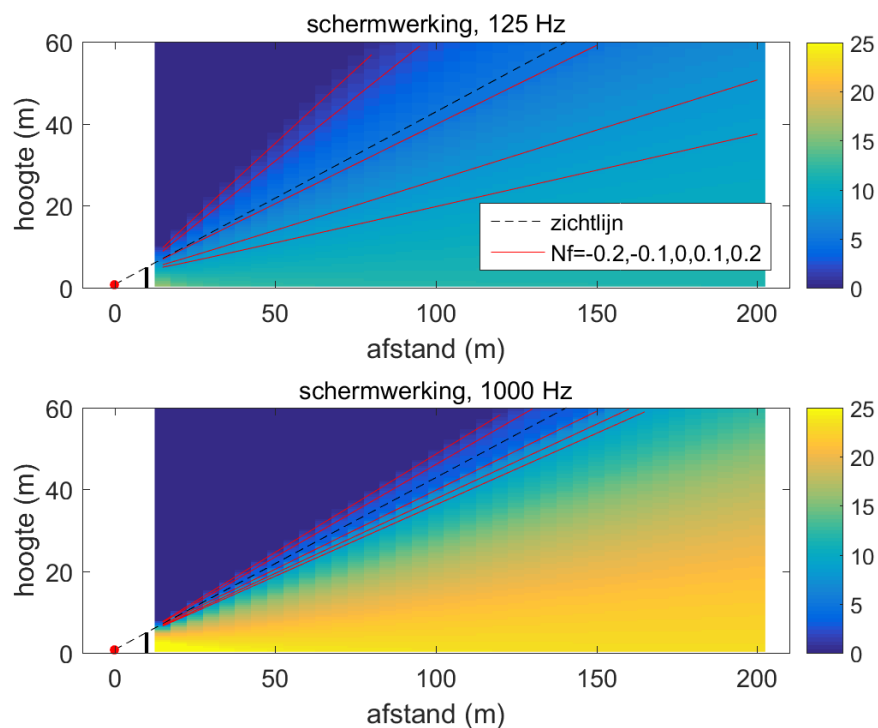
De schermwerking is afhankelijk van de frequentie via de grootheden H en N_f . Er wordt gerekend voor acht octaafbanden, van 63 Hz tot 8 kHz.

Figuur 3.1 toont een voorbeeld van de schermwerking bij 125 Hz en 1000 Hz, voor een situatie met een bron op hoogte 0.75 m en een 5 m hoog scherm op 10 m afstand. Ook weergegeven zijn de zichtlijn en vijf lijnen met constant Fresnelgetal ($N_f = -0.2, -0.1, 0, 0.1, 0.2$). Het Fresnelgetal neemt toe als de waarnemer van boven naar beneden de geluidschaduw in beweegt. De schermwerking neemt ook toe, van nul ver boven de zichtlijn tot een waarde van 10-25 dB diep in de schaduw. De overgang is geleidelijker bij lage frequentie dan bij hoge frequentie.

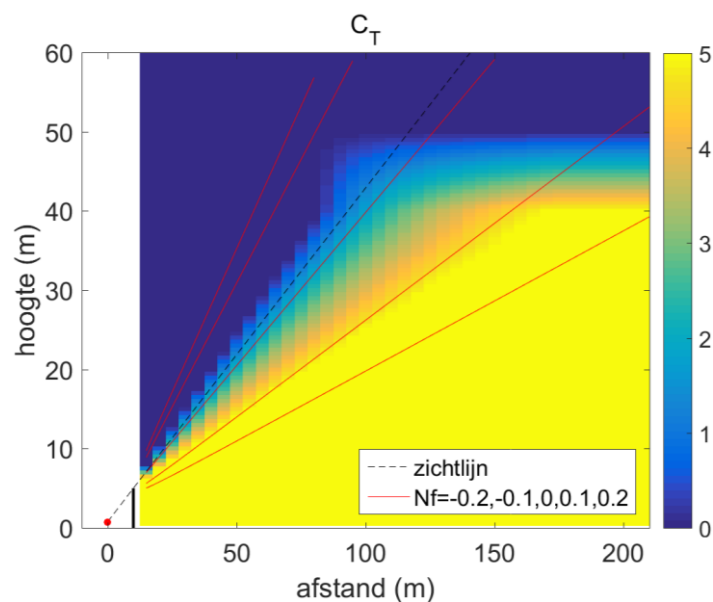
Figuur 3.2 toont voor deze situatie de waarde van de correctieterm C_T voor T-toppen. De correctieterm C_T is nul ver boven de zichtlijn en loopt op tot 5 dB diep in de schaduw.

²³ Indien er een middenbermscherm aanwezig is dan wordt hiervoor een correctie C_{mbs} berekend, en wordt de totale schermwerking als volgt berekend: $\Delta L_{SW} = \Delta L_{SWN} + C_{mbs}$. De schermwerking ΔL_{SWN} wordt berekend uit het Fresnelgetal, wat aangegeven wordt door subscript 'SWN' (SW = schermwerking). Het Fresnelgetal wordt ook gebruikt bij de berekening van de correctieterm voor de Whiswall, zoals gedefinieerd in paragraaf 3.2.

Onlangs is ook een correctie C_{diff} voor de Whisstone toegevoegd: $\Delta L_{SW} = \Delta L_{SWN} + C_{mbs} + C_{diff}$.



Figuur 3.1 Schermwerking bij 125 Hz (boven) en 1000 Hz (onder), voor een situatie met een bron op hoogte 0.75 m (rode stip) en een 5 m hoog scherm op 10 m afstand. Ook weergegeven zijn de zichtlijn en de lijnen met $N_f = -0.2, -0.1, 0, 0.1, 0.2$.



Figuur 3.2 Waarde van correctieterm C_T voor T-toppen, in de situatie van Figuur 3.1.

3.2 Opzet van de rekenregel

Voor het effect van de diffractor van de Whiswall voegen we een correctieterm C_W toe aan de formule van SRM2:

$$\Delta L_{SWN} = HF(N_f) + C_T - C_W - C_p \quad (3.2)$$

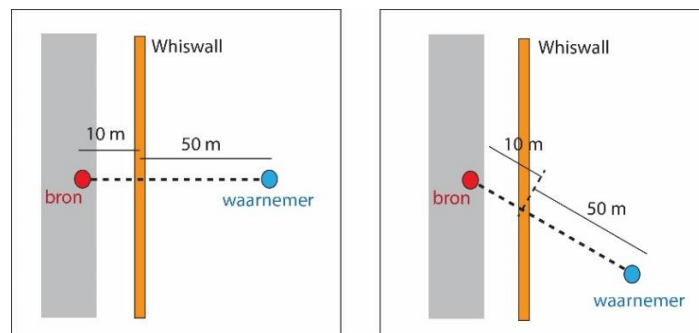
De correctieterm C_W is een functie van:

- de frequentie,
- geometrische parameters van bron²⁴, scherm, en waarnemer,
- 'producteigenschappen' van de diffractor van de Whiswall.

In principe is C_W ook afhankelijk van de eigenschappen van de bodem. Deze afhankelijkheid is verwaarloosbaar klein, zoals zal blijken in de volgende paragrafen. Ook zal blijken dat de afhankelijkheid van de geometrische parameters kan worden geformuleerd via het Fresnelgetal. Hiermee voldoet de correctieterm aan het akoestische principe van reciprociteit²⁵.

De rekenregel geldt voor de geluiduitbreiding in het verticale vlak door de bron (puntbron boven rijlijn/spoorlijn) en de waarnemer. Dit vlak is ook beschouwd bij de simulaties met FEM-PE beschreven in hoofdstuk 2 (zie Figuur 2.2). Het vlak wordt het sectorvlak genoemd bij SRM2.

Er wordt geen onderscheid gemaakt tussen de twee situaties weergegeven in Figuur 3.3, waarin het sectorvlak verschillende hoeken maakt met de Whiswall (hoek θ in Figuur 2.2). Dit is een benadering. De rekenregel representeert in principe een gemiddelde over verschillende richtingen van de sectorvlakken. Hetzelfde geldt voor de rekenregel voor een T-top.



Figuur 3.3 Boven-aanzicht van twee situaties waarin het sectorvlak (gebroken lijn) loodrecht staat op de Whiswall (links) en onder 60 graden (rechts). Bij de rekenregel wordt geen onderscheid tussen de twee situaties.

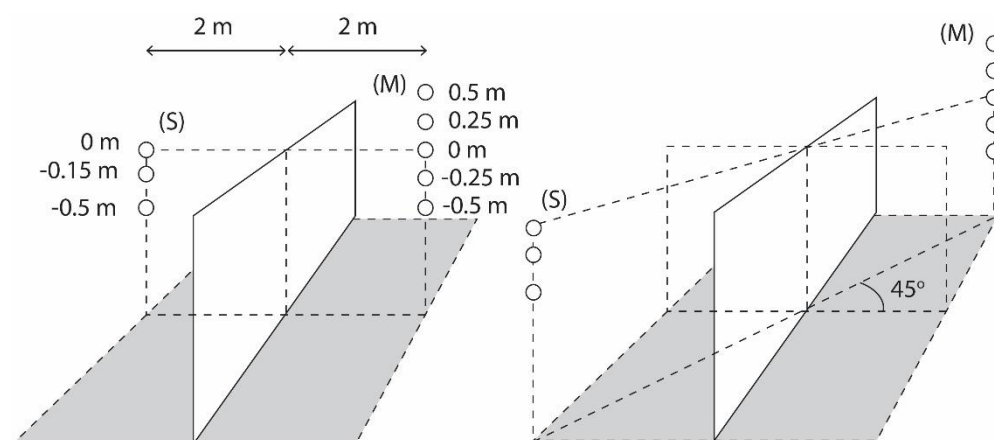
²⁴ Bij SRM2 voor wegverkeersgeluid wordt een voertuig gemodelleerd door een puntbron op hoogte 0.75 m boven het wegdek. Vanuit fysisch oogpunt is een bronhoogte van ongeveer 0.1 m realistischer, met name voor personenauto's. Voor de rekenregel voor de diffractor heeft het de voorkeur om de bronhoogte zo realistisch mogelijk te kiezen, dus bijvoorbeeld 0.1 m.

²⁵ Reciprociteit in de akoestiek betekent dat geluidoverdracht van een bron naar een waarnemer gelijk blijft als bron en waarnemer van positie verwisseld worden. Dit principe geldt in het algemeen voor systemen zonder voorkeursrichting. Het geldt ook voor een systeem met wind in een bepaalde richting, indien de invloed van wind wordt gerepresenteerd door een profiel van de effectieve geluidssnelheid.

3.3 Producteigenschappen van de Whiswall

Voor de producteigenschappen gaan we uit van het resultaat van de zogeheten diffractietest. Het idee is dat de rekenregel voor de Whiswall ook geldig moet zijn voor een vergelijkbaar soort diffractor op een scherm, met (enigszins) andere producteigenschappen. De producteigenschappen zijn dus parameters van de rekenregel.

Metingen en berekeningen van de diffractietest van de Whiswall zijn beschreven in een eerder rapport uit 2021⁷. De meetprocedure bij de diffractietest is beschreven in NEN-EN norm 1793-4²⁶. De meetopstelling is weergegeven in Figuur 3.4, met drie bronhoogtes, vijf microfoonhoogtes, en twee hoeken (0° en 45°). De bronhoogte 0 m (d.w.z. de hoogte van de schermtop) is hier toegevoegd; in de NEN-EN-norm staan alleen de bronhoogtes -0.15 m en -0.5 m.



Figuur 3.4 Geometrie van de diffractietest, met drie bronposities (S), vijf microfoonposities (M), en twee hoeken: 0 graden (links) en 45 graden (rechts). Bronnen en microfoons bevinden zich op 2 m afstand van het scherm (wit vlak). Metingen worden uitgevoerd met en zonder diffractor op de top van het scherm (hier is de situatie zonder diffractor weergegeven). Hoogtes worden gemeten ten opzichte van respectievelijk het hoogste punt van de diffractor en de top van het scherm.

De metingen worden uitgevoerd voor twee situaties:

- de situatie met de diffractor op het scherm (Whiswall),
- de situatie met alleen het scherm (referentie).

Voor beide situaties wordt een geluidsspectrum in tertsbanden bepaald (genormaliseerd ten opzichte van het vrije veld). Dit spectrum wordt aangeduid als:

- diffractie-index DI .

Hierbij worden de genormaliseerde niveaus (energetisch) gemiddeld over de 10 microfoonposities voor de twee hoeken. Het verschil tussen de spectra van DI voor de twee situaties wordt aangeduid als:

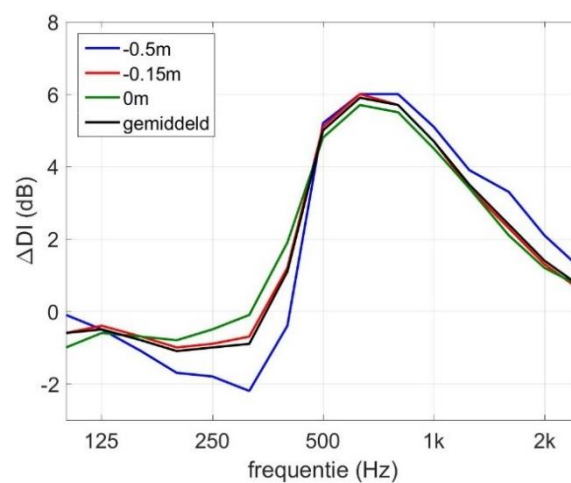
- diffractie-index-verschil ΔDI .

Deze grootheid is een maat voor het effect van de diffractor. Het spectrum van ΔDI kan worden omgerekend naar een breedbandige waarde van ΔDI , waarbij gewogen wordt met het verkeersgeluidsspectrum volgens norm EN-1793-3 (zie annex B).

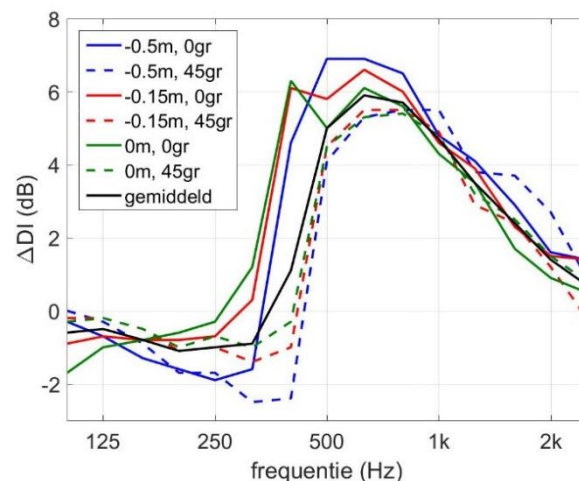
²⁶ NEN-EN 1793-4:2015 "Verkeersgeluidbeperkende constructies – Beproevingsmethoden voor de bepaling van de akoestische prestatie – Deel 4: Intrinsieke karakteristieken – In situ waarden van de geluiddiffractie."

Figuur 3.5 toont het gemeten tertsbandspectrum van ΔDI , voor de drie bronhoogtes, en ook het energetisch gemiddelde spectrum over de drie bronhoogtes (energetisch of lineair middelen maakt in dit geval geen significant verschil). De invloed van de bronhoogte is beperkt. Rond 800 Hz, waar het effect van de diffractor het grootst is, neemt de waarde van ΔDI in geringe mate toe met afnemende bronhoogte. Een grotere waarde van ΔDI komt overeen met een grotere geluidreductie door de diffractor. Aan de andere kant, de waarde van ΔDI rond 250 Hz is negatiever bij lagere bronhoogte; d.w.z. er is meer versterking van het geluid door de diffractor rond deze frequentie.

Figuur 3.6 toont de afzonderlijke bijdragen van de twee hoeken voor de drie bronhoogtes. Met name rond 400 Hz is het verschil tussen de spectra voor de twee hoeken aanzienlijk.



Figuur 3.5 Tertsbandspectrum van het diffractie-index-verschil ΔDI , voor de drie bronhoogtes, en ook het gemiddelde spectrum over de drie bronhoogtes.



Figuur 3.6 Als Figuur 3.5, maar nu zijn de spectra voor de drie bronhoogtes bij de twee hoeken 0° en 45° apart weergegeven. De zwarte lijn (gemiddeld) is dezelfde als in Figuur 3.5.

Figuur 3.7 toont octaafbandspectra van ΔDI , berekend op twee manieren uit het gemiddelde tertsbandspectrum uit Figuur 3.5:

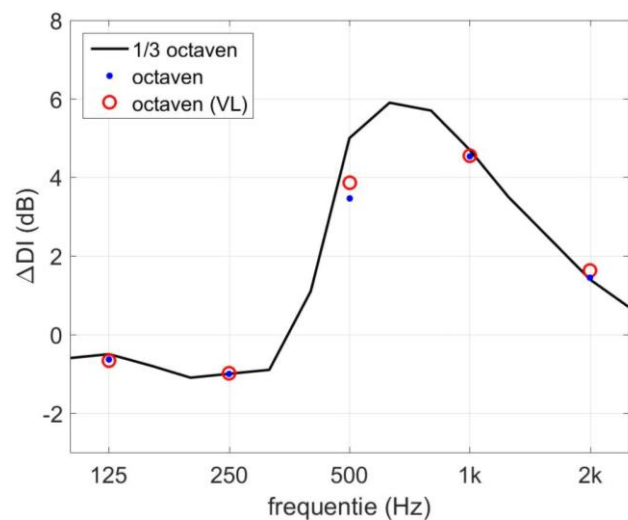
- door energetische middeling,
- door gewogen energetische middeling met het verkeersgeluidsspectrum uit norm EN 1793-3.

De waarden voor de octaafbanden 125-2000 Hz zijn respectievelijk:

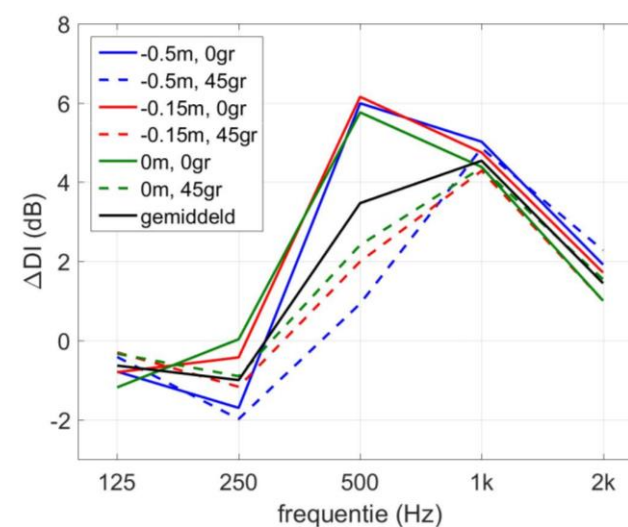
- -0.6, -1.0, 3.4, 4.5, 1.4 dB,
- -0.7, -1.0, 3.9, 4.6, 1.6 dB.

Het verschil is maximaal 0.5 dB. Voor de hier beschreven verdere analyse gaan we van het octaafbandspectrum zonder weging (zie paragrafen 3.6-3.10).

Figuur 3.8 is als Figuur 3.6, maar nu in octaven. Met name bij 500 Hz is het verschil in ΔDI tussen de twee hoeken 0° en 45° aanzienlijk.



Figuur 3.7 Tertsbandspectrum uit Figuur 3.5 (gemiddeld), en bijbehorende octaafbandspectra, berekend door energetische middeling (blauw) en gewogen energetische middeling met het verkeerslawaaispectrum uit EN 1793-3 (rood).



Figuur 3.8 Als Figuur 3.6, maar nu in octaven.

3.4 Effect van een scherm op grote afstand

Figuur 3.9 toont resultaten van FEM-PE en SRM2 voor het effect van een scherm (zonder diffractor) bij 1000 Hz, voor scenario B, met bronhoogte 0.1 m, schermhoogte 1.1 m, afstand bron-scherm 3.5 m, 'bodem 1' = hard en 'bodem 2' = gras (zie hoofdstuk 2).

De grafieken links tonen drie FEM-PE-resultaten:

- i) situatie zonder scherm,
- ii) situatie met scherm,
- iii) het verschil tussen i) en ii): de geluidreductie door het scherm.

De niveaus in de bovenste twee grafieken zijn directe uitkomsten van FEM-PE.

Voor de PE-berekening is uitgegaan van een startvector berekend met FEM (op afstand $x_w = 0$ in de grafieken). De niveaus zijn afhankelijk van de in FEM gekozen bronsterkte. Het niveauverschil weergegeven in de onderste grafiek is onafhankelijk van de gekozen bronsterkte.

De niveaus lager dan -20 dB linksboven in de bovenste twee grafieken moeten genegeerd worden. PE is namelijk niet geldig voor elevatiehoeken groter dan typerend 45 graden.

De onderste grafiek laat zien dat de schermwerking vooral optreedt onder de zichtlijn (gebroken lijn). Dit is volgens verwachting.

De grafieken rechts tonen vier SRM2 resultaten:

- i) situatie zonder scherm,
- ii) situatie met scherm,
- iii) het verschil tussen i) en ii): de geluidreductie door het scherm,
- iv) de schermwerking (zonder het effect van de bodem).

Het verschil tussen i) en ii) wordt soms aangeduid als 'invoegverlies' of 'tussenschakelverzwakking'. Hierbij spelen twee effecten een rol:

- schermwerking,
- verandering van de bodemdemping.

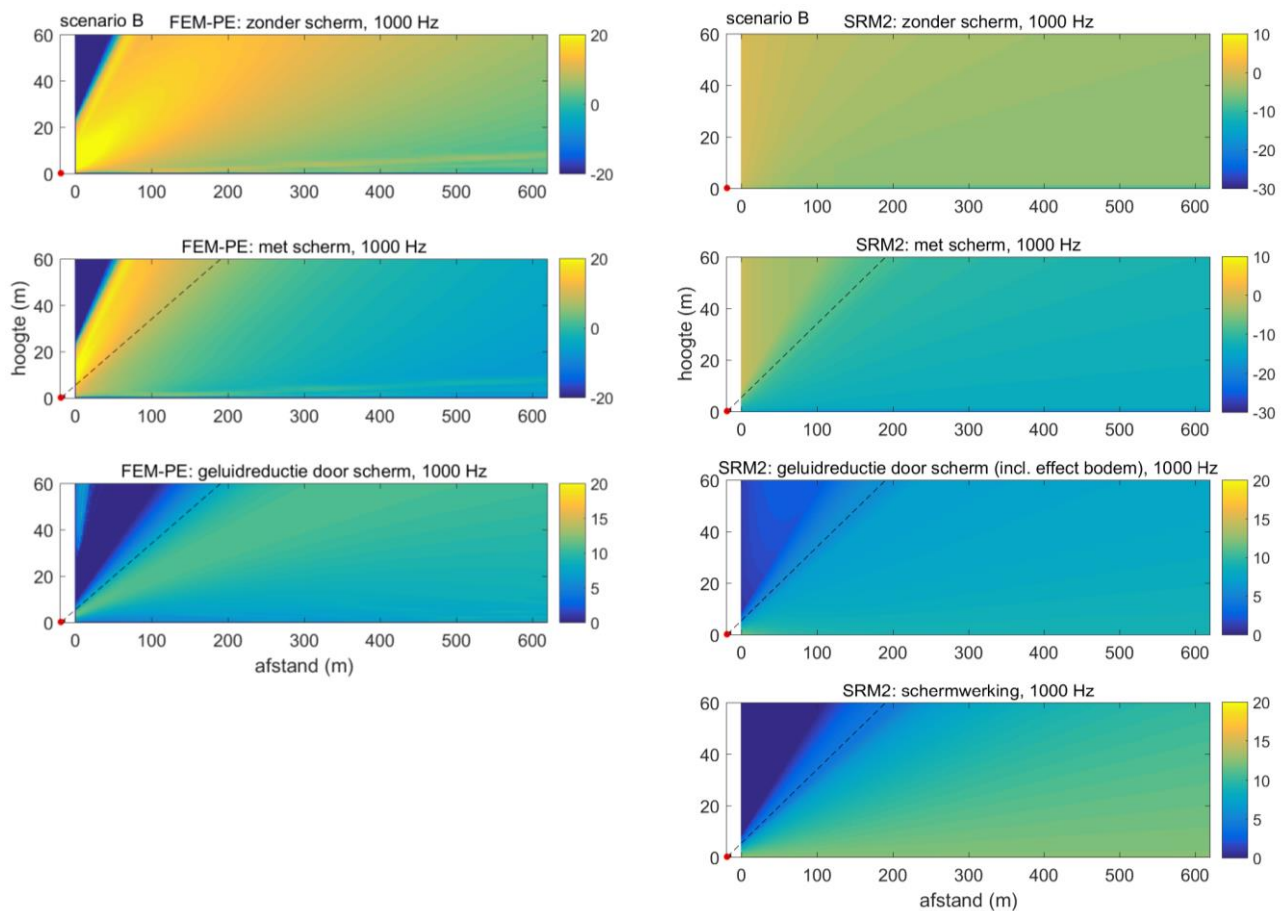
De verandering van de bodemdemping is een gevolg van het feit dat er een secundaire bron op de schermtop ontstaat, die hoger ligt dan de echte bron. Met name in de buurt van de bodem is de schermwerking (iv) groter dan de geluidreductie door het scherm (iii). Kennelijk wordt de geluidreductie door het scherm hier enigszins gereduceerd door de invloed van de bodem.

FEM-PE en SRM2 geven enigszins verschillende resultaten voor de geluidreductie door het scherm (derde grafiek van boven). Bij FEM-PE is de geluidreductie op sommige plaatsen hoger en op andere plaatsen lager dan bij SRM2.

De rekenregel voor de diffractor (zie volgende paragrafen) is gebaseerd op het verschil in FEM-PE-resultaten tussen twee situaties:

- i) situatie met scherm,
- ii) situatie met scherm met diffractor (Whiswall).

De benadering hierbij is dat dit verschil kan worden opgeteld bij de schermwerking volgens SRM2 (zie formule 3.2), hoewel SRM2 en FEM-PE niet precies dezelfde resultaten geven voor de geluidreductie door het scherm zonder diffractor.



Figuur 3.9 Resultaten van FEM-PE (links) en SRM2 (rechts) voor relatieve geluidniveaus bij 1000 Hz zonder scherm en met scherm, voor scenario B. Bij SRM2 is ook de schermwerking apart weergegeven. De gebroken lijn is de zichtlijn door de bron (rode stip) en de schermtop.

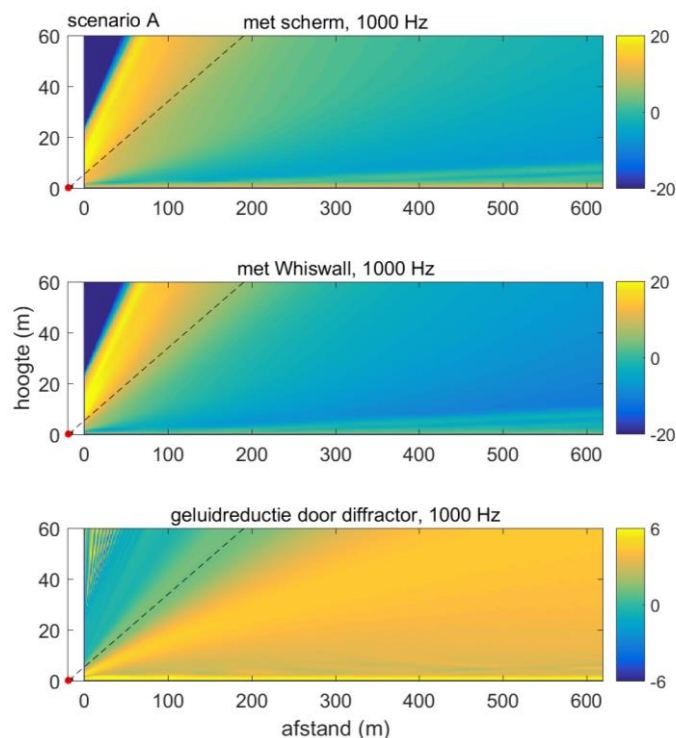
3.5 Effect van de Whiswall op grote afstand

Figuur 3.10 toont resultaten van FEM-PE voor het effect van de diffractor bij 1000 Hz voor scenario A ($z_b = 0.1$ m, $z_s = 1.1$ m, $x_b = 3.5$ m; zie hoofdstuk 2).

De grafieken tonen drie FEM-PE-resultaten:

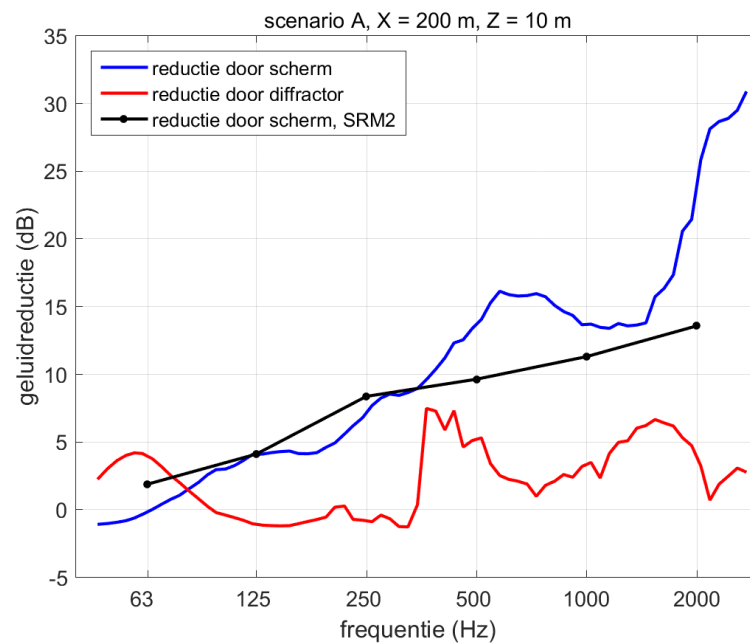
- i) resultaat voor de situatie met scherm,
- ii) resultaat voor de situatie met Whiswall (scherm met diffractor),
- iii) het verschil tussen i) en ii): de geluidreductie door de diffractor.

Het gebied linksboven moet weer buiten beschouwing gelaten worden, omdat PE alleen geldig is voor elevatiehoeken tot typerend 45 graden. De geluidreductie door de diffractor is ongeveer nul boven de zichtlijn en loopt op tot ongeveer 5 dB onder de zichtlijn.



Figuur 3.10 Resultaten van FEM-PE voor het relatieve geluidniveau bij 1000 Hz voor scenario A ($z_b = 0.1$ m, $z_s = 1.1$ m, $x_b = 3.5$ m), zonder diffractor (boven) en met diffractor (midden), en het verschil, d.w.z. de geluidreductie door de diffractor (onder).

Figuur 3.11 toont het verloop van de reducties door scherm en door diffractor als functie van de frequentie, voor een vaste positie van de waarnemer (afstand 200 m, hoogte 10 m). Voor de duidelijkheid zijn hier de smalle-bandresultaten van FEM-PE weergegeven, voor de 72 frequenties beschreven in paragraaf 2.2. Het effect van de diffractor is klein tussen 100 en 350 Hz, en neemt bij 350 Hz sterk toe. Ook weergegeven is de schermwerking volgens SRM2 voor deze waarnemer. In deze situatie (harde bodem) is bij SRM2 de reductie door het scherm gelijk aan de schermwerking.



Figuur 3.11 Resultaten van FEM-PE voor de reducties door scherm en diffractor, voor scenario A, bij een waarnemer op afstand 200 m en hoogte 10 m. Ook weergegeven is de schermwerking volgens SRM2.

Figuur 3.12 toont resultaten van FEM-PE voor de geluidreductie door de diffractor bij 1000 Hz voor scenario's A-J.

Het verschil tussen scenario's A en B is de bodem achter het scherm. Bij scenario A is de bodem hard en bij scenario B bestaat de bodem uit gras. De grafieken laten zien dat het effect van de diffractor slechts in beperkte mate beïnvloed wordt door de bodem achter het scherm.

De invloed van de bodemhardheid van de 2 m brede strook voor het scherm is ook klein. Dit blijkt uit een vergelijking van de grafieken voor scenario's B en C, en scenario's E en F.

De afstand van de bron tot het scherm is een belangrijke parameter. Deze afstand bedraagt 3.5 m (links), 7 m (midden), en 15 m (rechts) voor de grafieken in de figuur. De geluidreductie door de diffractor is groter voor afstand 3.5 m dan voor de afstanden 7 en 15 m. Bij de rekenregel moet dus de afstand van de bron naar het scherm als parameter worden meegenomen. Dit kan worden gedaan via de zichtlijn, of via het Fresnelgetal (dat altijd wordt uitgerekend bij schermwerking; zie paragrafen 3.1 end 3.2).

Het effect van de diffractor is ongeveer beperkt tot het gebied onder de zichtlijn. De zichtlijn is afhankelijk van de positie van de bron ten opzichte van de schermtop. Dit is zichtbaar in de figuur: de zichtlijn is minder steil omhoog voor grotere afstand tussen bron en scherm en voor grotere bronhoogte.

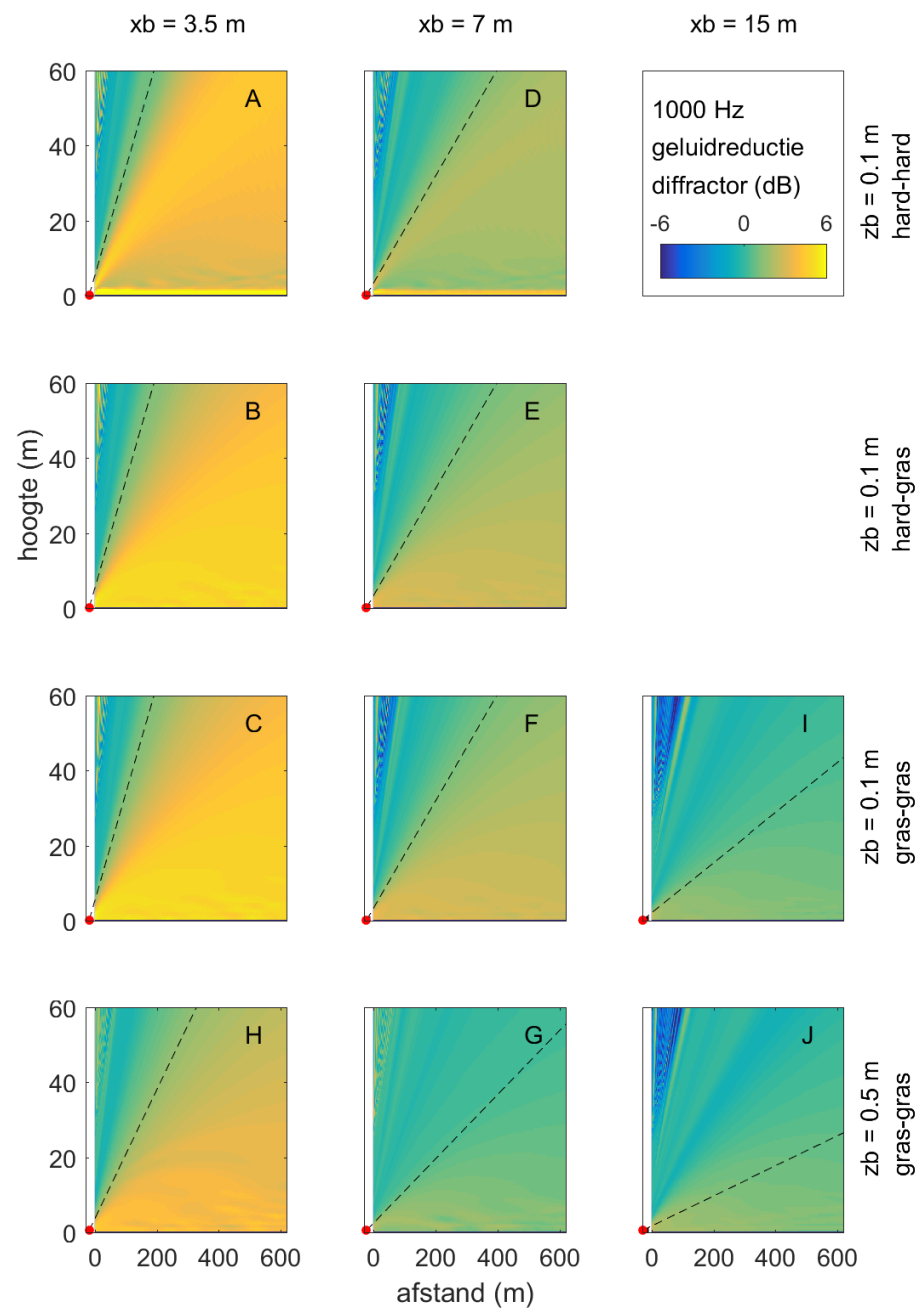
Figuur 3.13 toont resultaten van FEM-PE voor de geluidreductie door de diffractor bij 1000 Hz voor scenario's C45-U45. Het opvallendst in deze grafieken is de invloed van de schermhoogte. Voor het 5 m hoge scherm is de geluidreductie door de diffractor groter dan voor het 1.1 m hoge scherm.

Figuur 3.14 toont resultaten van FEM-PE voor geluidreductie door de diffractor bij 1000 Hz, voor scenario's V-HZ. Dit zijn de 18 scenario's in het onderste gedeelte van Tabel 2.1. Met deze grafieken is de invloed van de akoestische bodemhardheid bij de bron (rood in Figuur 2.3) en de windsnelheid in de atmosfeer onderzocht.

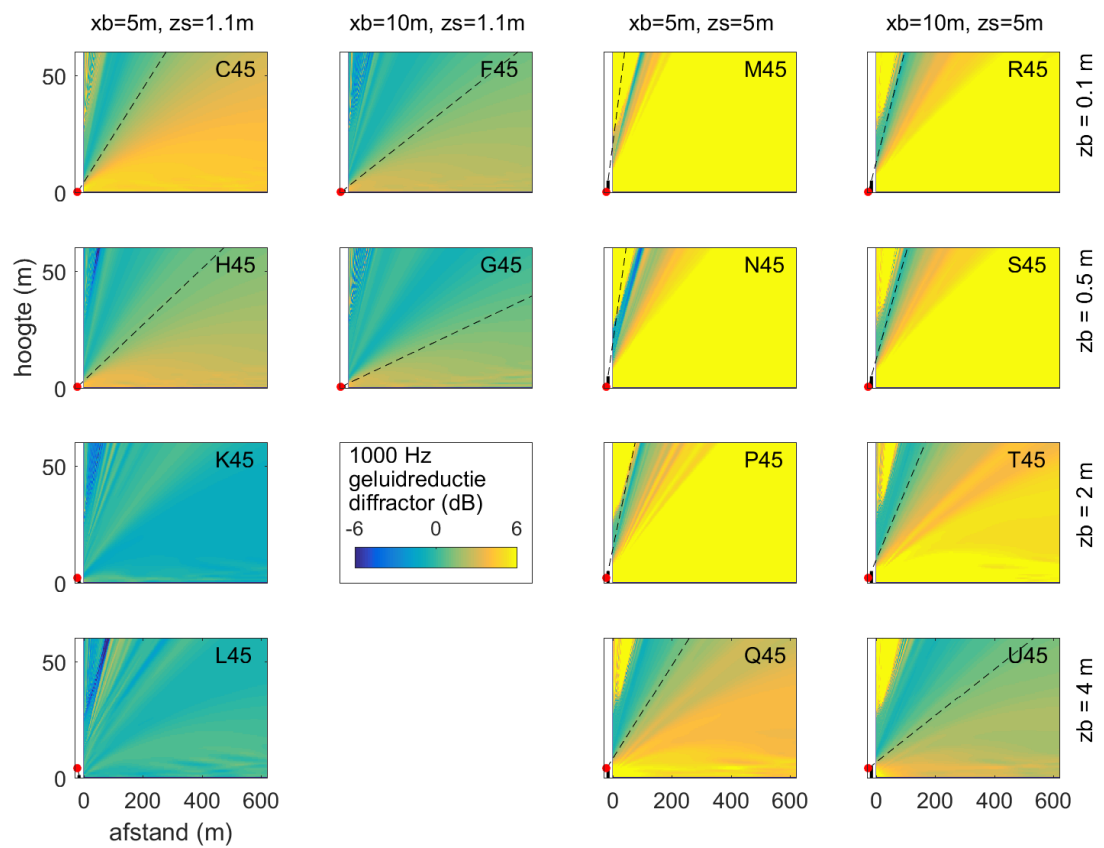
De invloed van de bodemhardheid bij de bron is klein. Dit wordt geïllustreerd door het feit dat de verschillen klein zijn tussen de grafieken voor scenario's CB en VB (ballastbed) en scenario's C en V (harde bodem).

De invloed van de windsnelheid in de atmosfeer is ook klein. Dit blijkt uit een vergelijking van de resultaten voor scenario's H en G (windsnelheid 4.6 m/s), HW en GW (windsnelheid 2.3 m/s), en HZ en GZ (windsnelheid 0 m/s). De refractie door de windgradiënten bij meewind is wel zichtbaar in de grafieken in Figuur 3.12 en Figuur 3.14.

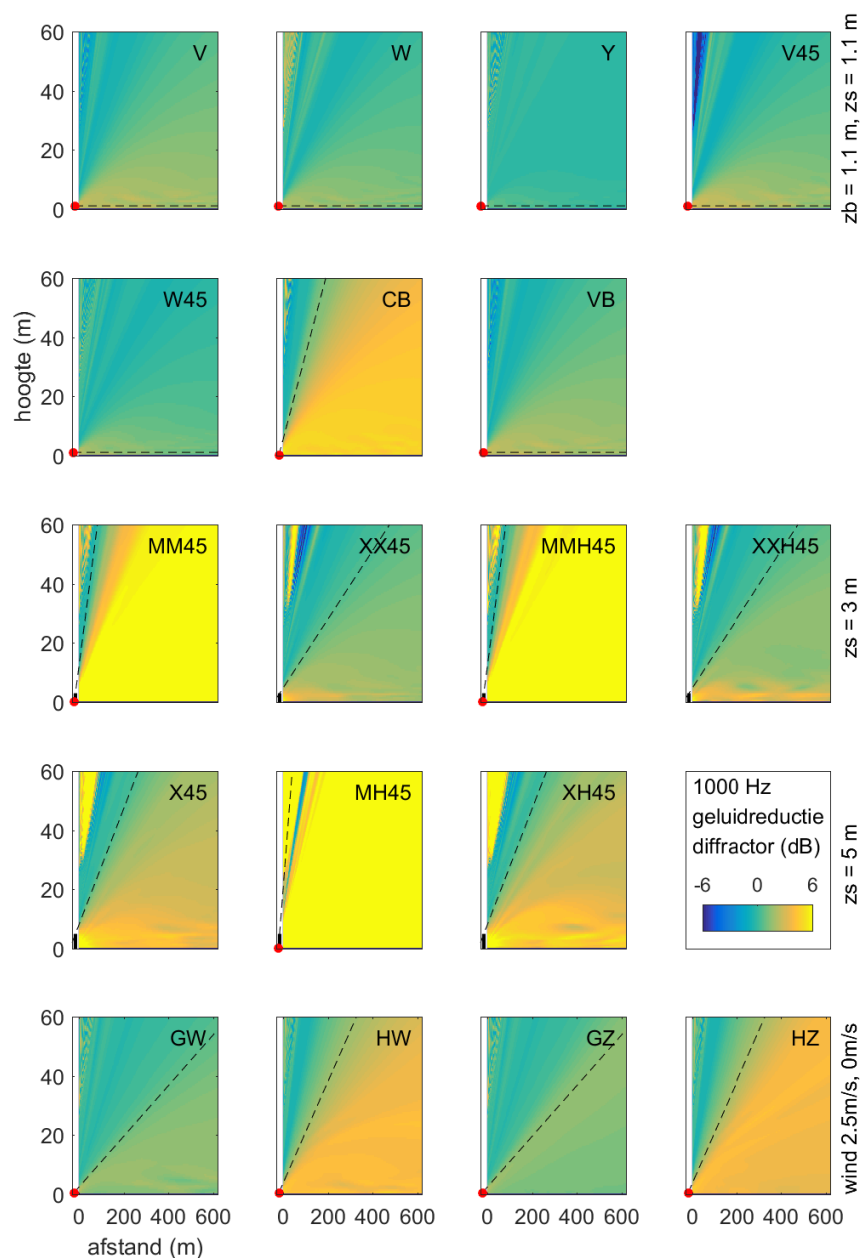
Voor de onderlinge vergelijkbaarheid is de kleurenschaal voor alle grafieken gelijk gekozen, namelijk lopend van -6 tot + 6 dB. Hierdoor worden de grootste geluidreducties begrensd. In de volgende paragrafen zal blijken dat de geluidreducties oplopen tot maximaal ongeveer 10 dB bij 1000 Hz.



Figuur 3.12 Resultaten van FEM-PE voor geluidreductie door de diffractor bij 1000 Hz, voor scenario's A-J.



Figuur 3.13 Resultaten van FEM-PE voor geluidreductie door de diffractor bij 1000 Hz, voor scenario's C45-U45. Opmerking: voor M45-P45 treden schijnbaar grote reducties op nabij de zichtlijn, tot 20 dB, als gevolg van de hoekbeperking van het PE-model.



Figuur 3.14 Resultaten van FEM-PE voor geluidreductie door de diffractor bij 1000 Hz, voor scenario's V-HZ (18 scenario's in het onderste gedeelte van Tabel 2.1).

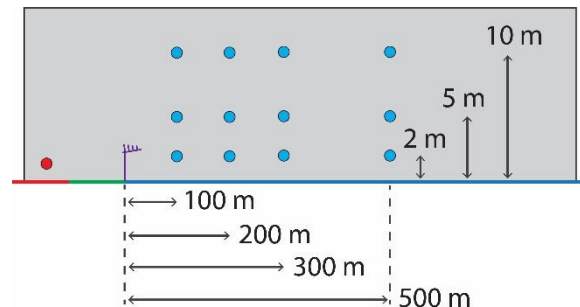
3.6 Rekenregel, versie 1

Figuur 3.16 toont FEM-PE-resultaten voor de geluidreductie door het scherm, de Whiswall, en de diffractor bij 1000 Hz, voor scenario's A en M45. Ook weergegeven zijn SRM2-resultaten voor de schermwerking en het bijbehorende Fresnelgetal dat wordt gebruikt om de schermwerking uit te rekenen. Het doel is om een rekenregel te ontwikkelen waarmee de FEM-PE-resultaten voor de geluidreductie door de diffractor goed worden benaderd. Hierbij is het Fresnelgetal een bruikbare parameter.

Voor de ontwikkeling van de rekenregel beschouwen we FEM-PE-resultaten op een rooster van twaalf waarnemerposities (zie Figuur 3.15), met:

- vier afstanden tot het scherm: 100, 200, 300, en 500 m,
- drie hoogtes: 2, 5, en 10 m.

De vier afstanden komen overeen met $x_w = 85, 185, 285, \text{ en } 485 \text{ m}$ in Figuur 2.3.



Figuur 3.15 Rooster van twaalf waarnemerposities.

In Figuur 3.17 zijn FEM-PE-resultaten op dit rooster weergegeven als functie van het Fresnelgetal. De grafieken tonen

- de geluidreductie door het scherm (donkere rondjes),
- de geluidreductie door de Whiswall (lichte rondjes).

De groene lijnen in de grafieken representeren de schermwerking volgens de formule van Maekawa voor de schermwerking²⁷:

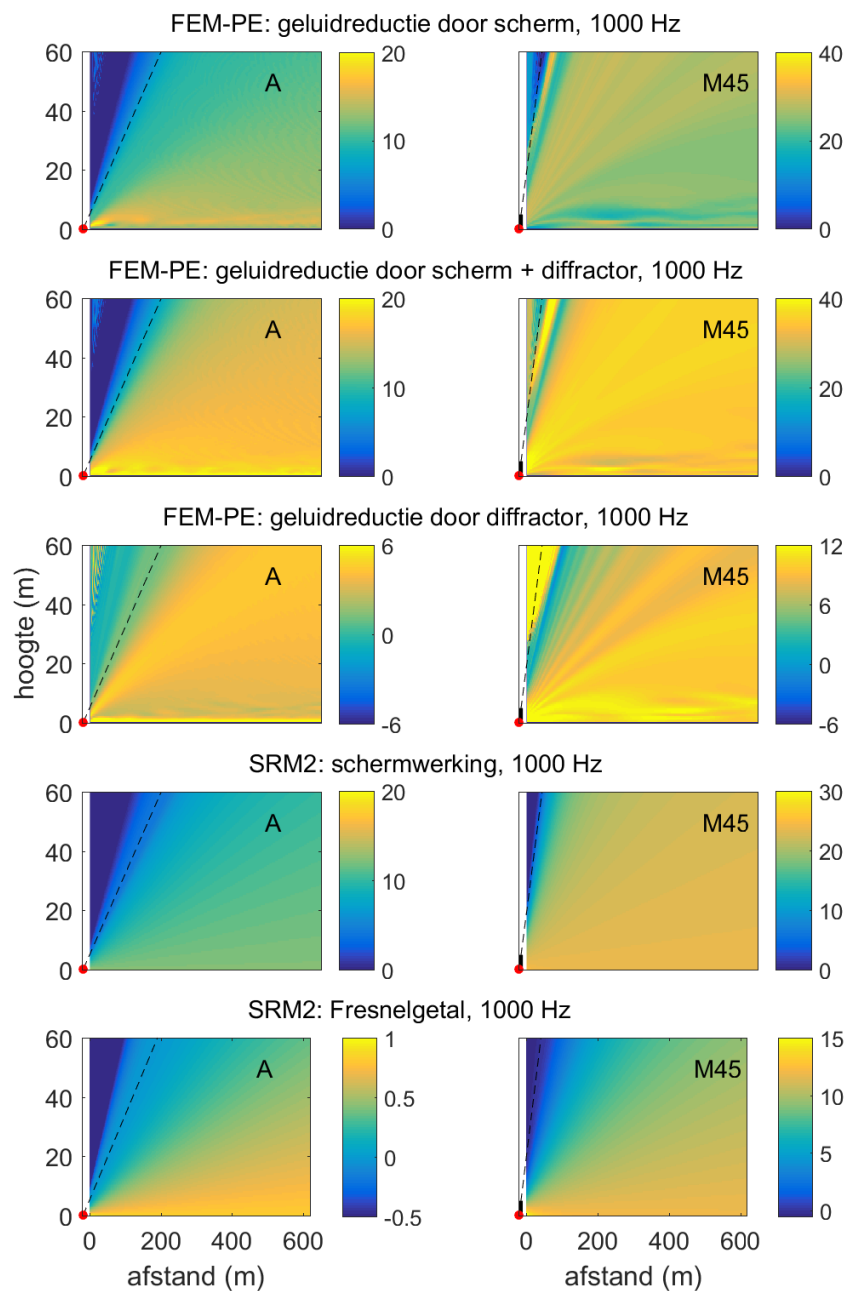
$$D_{\text{scherm}} = 10 \log_{10} [\max (1, 20 N_F + 3)], \quad (3.3)$$

waarin N_F het Fresnelgetal is. Voor $N_F < -0.1$ is de schermwerking nul. De schermwerking bij SRM2 wordt berekend met een formule die in goede benadering gelijke waarden geeft als de formule van Maekawa, tot een maximum van 25 dB schermwerking (zie Figuur 3.18). Bij SRM2 wordt de schermwerking niet groter dan 25 dB.

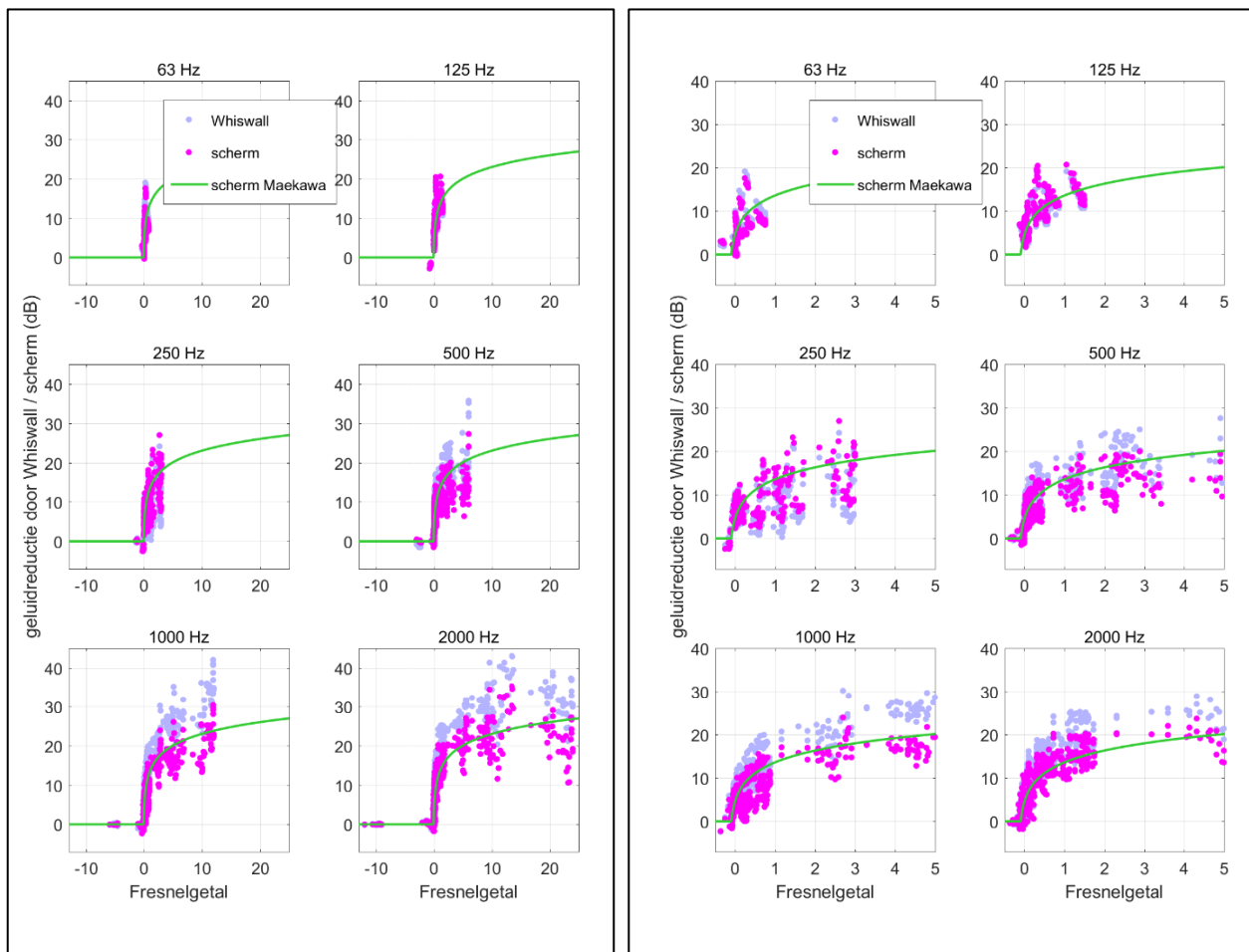
De FEM-PE-resultaten voor de geluidreductie door het scherm vertonen een aanzienlijke spreiding, maar tonen een gemiddelde trend die overeenkomt met de formule van Maekawa. Sommige FEM-PE-resultaten zijn aanzienlijk groter dan 25 dB.

Met name bij 1000 en 2000 Hz liggen de FEM-PE-resultaten voor de Whiswall gemiddeld hoger dan voor het scherm. Dit betekent dat met de diffractor een hogere geluidreductie wordt bereikt dan met het scherm zonder diffractor. Met andere woorden, de geluidreductie door de diffractor is hier gemiddeld positief.

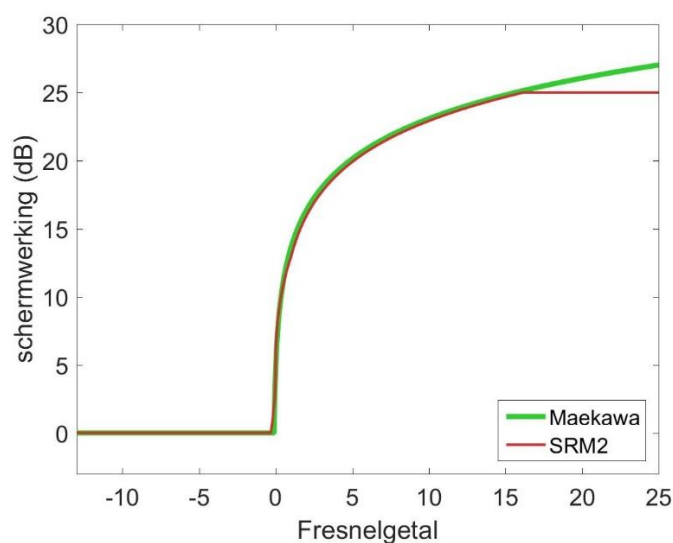
²⁷ De formule is gebaseerd op schaalmodelmetingen uitgevoerd door Maekawa in 1968 (Applied Acoustics 1, 157-173).



Figuur 3.16 Resultaten van FEM-PE voor de geluidreductie door het scherm, de Whiswall (scherm en diffractor), en de diffractor bij 1000 Hz voor scenario's A en M45, en resultaten van SRM2 voor de schermwerking en het Fresnelgetal.



Figuur 3.17 Resultaten van FEM-PE voor de geluidreductie door Whiswall / scherm als functie van het Fresnelgetal, voor de 42 scenario's, met waarnemers op afstanden van 100, 200, 300 en 500 m en hoogtes van 2, 5 en 10 m. Links: alle resultaten. Rechts: ingezoomd op Fresnelgetallen tussen -0.5 en 5. Ook weergegeven is de schermwerking volgens de formule van Maekawa.



Figuur 3.18 Schermwerking als functie van het Fresnelgetal volgens SRM2 en de formule van Maekawa.

Figuur 3.19 toont resultaten van FEM-PE voor de geluidreductie door de diffractor als functie van het Fresnelgetal, voor de 42 scenario's. Resultaten waarvoor de geluidreductie door het scherm of de Whiswall groter zijn dan 25 dB zijn als open cirkels weergegeven. Ook weergegeven zijn de waarden van A_{dif} uit de diffractietest.

Figuur 3.20 is als Figuur 3.19, maar nu met versie 1 van de rekenregel (groene lijn):

$$C_W = 0.1 A_{\text{dif}} D_{\text{scherm}}(N_F), \quad (3.4)$$

met

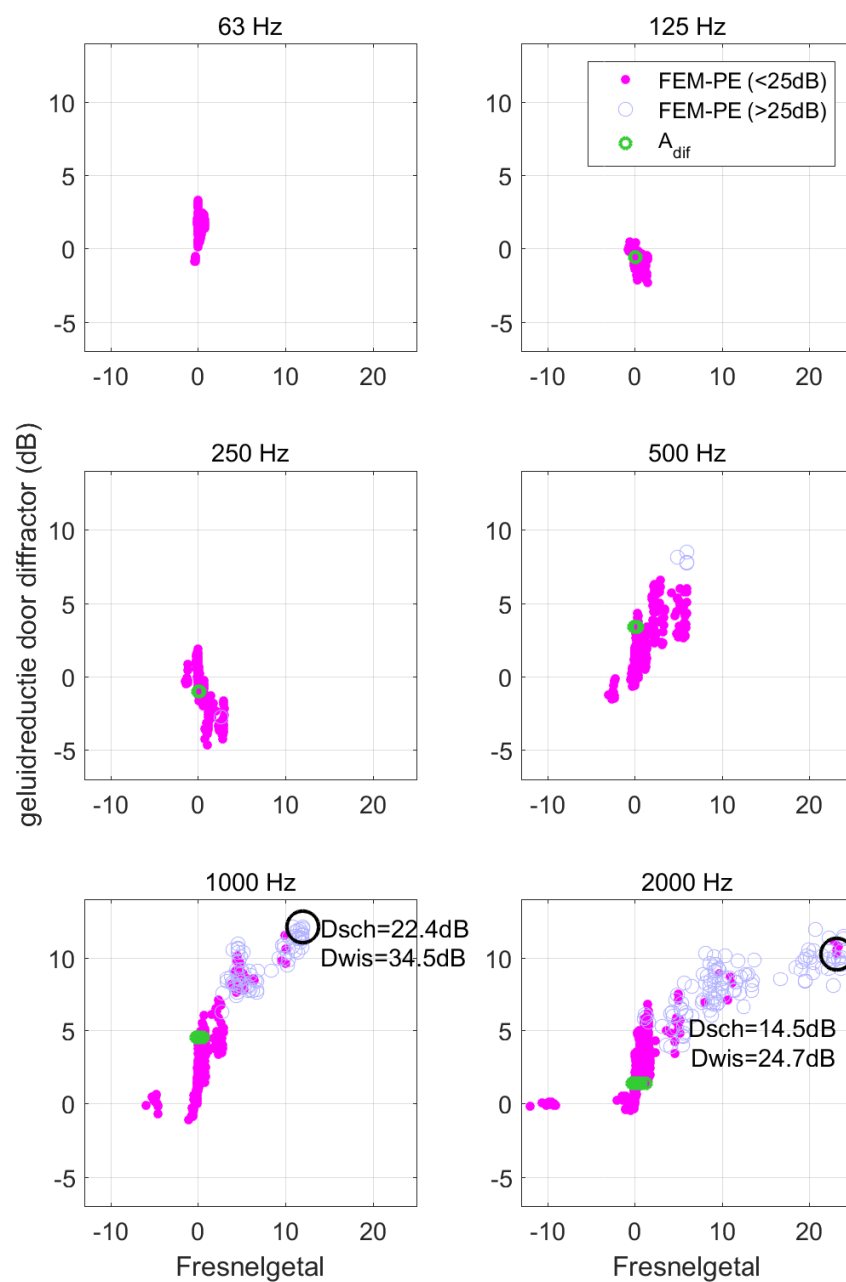
- C_W de geluidreductie door de diffractor (zie paragraaf 3.2),
 - $D_{\text{scherm}}(N_F)$ de schermwerking volgens formule (3.3) van Maekawa,
 - A_{dif} de waarde van het 'diffractie-index-verschil' ΔDI ²⁸.
- Dit betekent dat C_W wordt berekend door de schermwerking volgens de formule van Maekawa te schalen met de waarde van A_{dif} uit de diffractietest, en een factor 0.1 toe te voegen. De waarden van A_{dif} zijn weergegeven in Figuur 3.7 (blauwe cirkels).

Zoals eerder aangegeven is de diffractor ontwikkeld voor geluidreductie bij frequenties van circa 400 Hz en hoger. In dit onderzoek is de rekenregel beperkt tot de vijf octaafbanden 125 – 2000 Hz. De resultaten van de diffractietest zijn beperkt tot hetzelfde frequentiegebied. Voor 63, 4000, en 8000 Hz geldt dus $C_W = 0$.

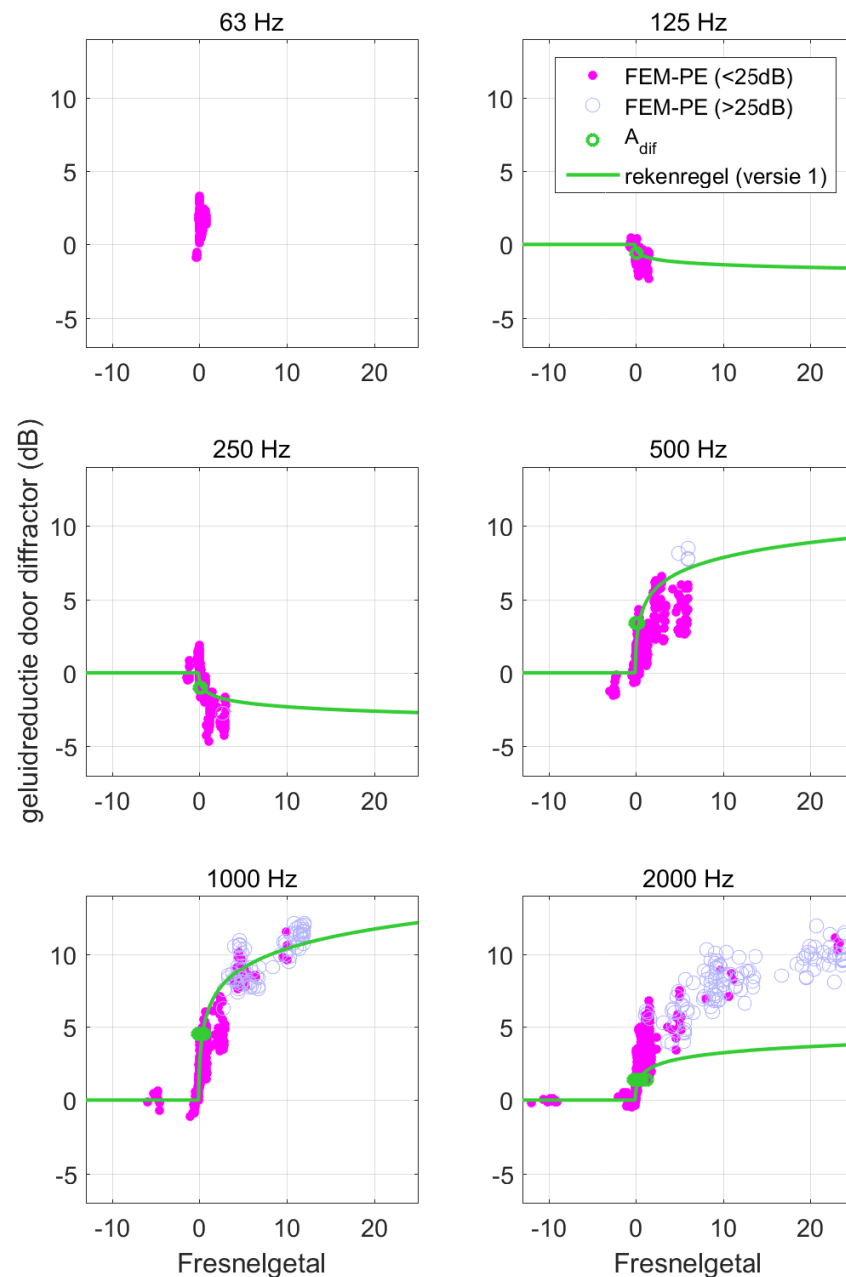
De rekenregel beschrijft de FEM-PE-resultaten redelijk goed tot 1000 Hz, maar bij 2000 Hz geeft de rekenregel lagere waarden dan berekend met FEM-PE. Opvallend is dat de geluidreductie berekend met FEM-PE toeneemt met het Fresnelgetal tot waarden die veel groter zijn dan A_{dif} , bij 1000 en 2000 Hz.

In de volgende paragraaf wordt een verbetering (versie 2) van de rekenregel beschreven.

²⁸ De notatie A_{dif} wordt hier gebruikt omdat de notatie ΔDI in wiskundige formules verwarrend is. In de wetenschappelijke literatuur wordt het gebruik van samengestelde symbolen als ΔDI voor fysische grootheden afgeraden, om verwarring met vermenigvuldiging te vermijden.



Figuur 3.19 Resultaten van FEM-PE voor de geluidreductie door de diffractor als functie van het Fresnelgetal, voor de 42 scenario's. Resultaten waarvoor de geluidreductie door het scherm (D_{sch}) of de Whiswall (D_{wis}) groter zijn dan 25 dB zijn als open paarse cirkels weergegeven. Bij de zwarte cirkels zijn waarden van reducties door scherm (D_{sch}) en Whiswall (D_{wis}) gegeven voor scenario M45 (schermhoogte 5 m), op afstand 100 m en hoogte 2 m. Ook weergegeven zijn de waarden van A_{dif} uit de diffractietest.

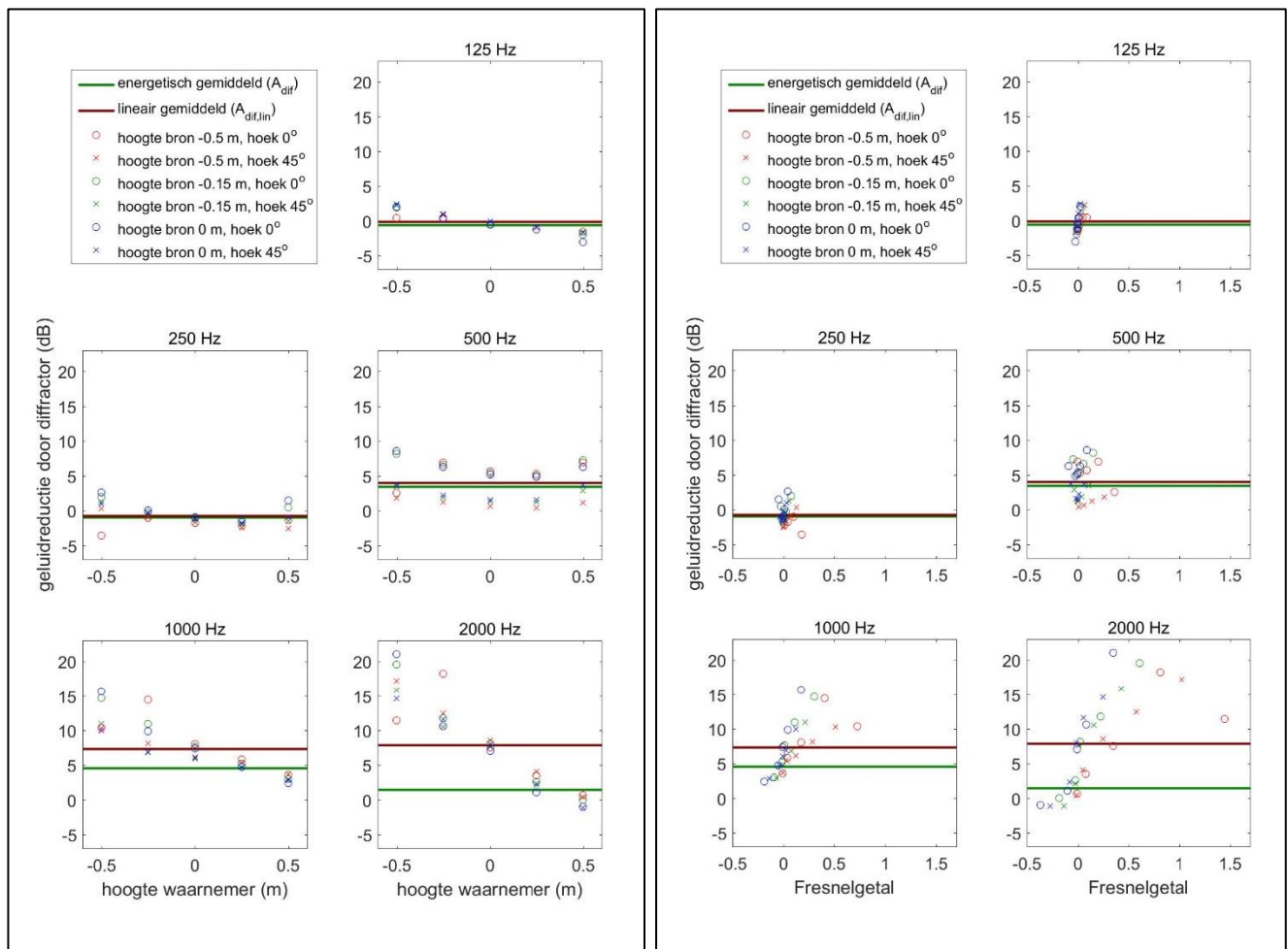


Figuur 3.20 Als Figuur 3.19, maar nu met versie 1 van de rekenregel (groene lijn).

3.7 Diffractietest: lineair middelen

Om te komen tot een verbetering van de rekenregel uit de vorige paragraaf beschouwen we nogmaals de diffractietest. In plaats van de *energetisch* gemiddelde waarde A_{dif} leiden we nu een *lineair* gemiddelde waarde $A_{dif,lin}$ af uit de meetresultaten. De waarde van $A_{dif,lin}$ wordt gebruikt in paragraaf 3.8 voor versie 2 van de rekenregel.

Figuur 3.21 toont resultaten van de metingen volgens de diffractietest, zoals beschreven in paragraaf 3.3. Hierbij is *niet* gemiddeld over de drie bronhoogtes, vijf waarnemerhoogtes, en twee hoeken. Alle resultaten voor de verschillende combinaties van de bron en de waarnemer zijn afzonderlijk weergegeven.



Figuur 3.21 Meetresultaten voor de geluidreductie door de diffractor in de diffractietest, als functie van de hoogte van de waarnemer (links) en het Fresnelgetal (rechts). Ook weergegeven zijn de energetisch gemiddelde waarden (A_{dif}) en lineair gemiddelde waarden ($A_{dif,lin}$).

De grafieken links tonen de geluidreductie door de diffractor als functie van de waarnemerhoogte, voor de drie bronhoogtes en twee hoeken. In de grafieken rechts is de geluidreductie door de diffractor weergegeven als functie van het Fresnelgetal.

Hieruit blijkt dat ook in de diffractietest waarden van de geluidreductie door de diffractor optreden die aanzienlijk groter zijn dan de energetisch gemiddelde waarde A_{dif} , gerepresenteerd door horizontale groene lijnen in de grafieken. Dit geldt met name voor de frequenties 1000 en 2000 Hz.

De rode horizontale lijnen in de grafieken representeren *lineair* gemiddelde waarden van de geluidreductie door de diffractor, aangegeven als $A_{dif,lin}$. Deze grootte berekenen we door de geluidreducties voor alle $3 \times 5 \times 2 = 30$ combinaties van bron- en waarnemerposities lineair te middelen.

Voor de frequenties 1000 en 2000 Hz is de waarde van $A_{\text{dif,lin}}$ aanzienlijk groter dan de waarde van A_{dif} . In Tabel 3.1 zijn de waardes gegeven, en ook waardes berekend met FEM die in paragraaf 3.9 beschreven worden.

Tabel 3.1 Waardes van A_{dif} en $A_{\text{dif,lin}}$, op basis van de resultaten van metingen en berekeningen volgens de diffractietest.

frequentie (Hz)	125	250	500	1000	2000
meting					
energetisch gemiddeld, A_{dif} (dB)	-0.6	-1.0	3.4	4.5	1.4
lineair gemiddeld, $A_{\text{dif,lin}}$ (dB)	-0.2	-0.8	4.0	7.3	7.8
berekening					
energetisch gemiddeld, A_{dif} (dB)	-0.9	-1.0	3.3	4.3	1.5
lineair gemiddeld, $A_{\text{dif,lin}}$ (dB)	-0.6	-0.7	3.6	7.6	7.8

3.8 Rekenregel, versie 2

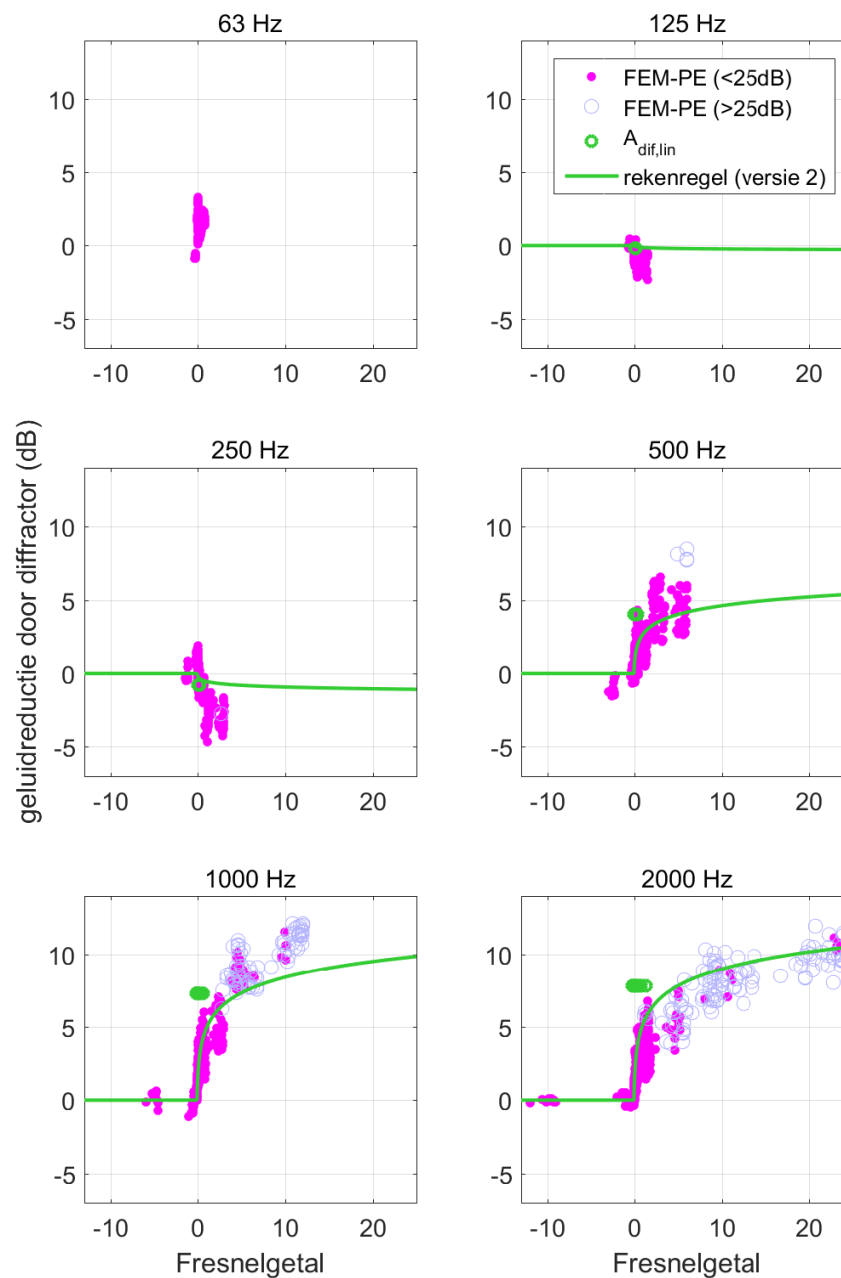
In paragraaf 3.6 hebben we versie 1 van de rekenregel gepresenteerd. De grafieken in Figuur 3.20 lieten zien dat versie 1, op basis van A_{dif} , een redelijke overeenstemming oplevert met de FEM-PE-resultaten. In deze paragraaf presenteren we versie 2 van de rekenregel, op basis van $A_{\text{dif,lin}}$ beschreven in paragraaf 3.7.

Figuur 3.22 is als Figuur 3.20, maar nu is versie 2 van de rekenregel gebruikt (groene lijn):

$$C_W = 0.05 A_{\text{dif,lin}} D_{\text{scherm}}(N_F). \quad (3.5)$$

We hebben dus A_{dif} vervangen door $A_{\text{dif,lin}}$ en de coëfficiënt 0.1 vervangen door 0.05.

Versie 2 van de rekenregel geeft een goede representatie van de resultaten van FEM-PE voor de frequenties 500, 1000, en 2000 Hz. Bij 125 en 250 Hz worden de negatieve waardes volgens FEM-PE iets minder goed gerepresenteerd dan met versie 1 van de rekenregel.



Figuur 3.22 Als Figuur 3.20 maar nu met versie 2 van de rekenregel.

3.9 Berekeningen met FEM voor de diffractietest

In de vorige twee paragrafen is gebleken dat gebruik van de lineair gemiddelde grootheid $A_{dif,lin}$ leidt tot een verbeterde rekenregel. Om meer inzicht te krijgen in de diffractietest van de Whiswall, beschouwen we hier resultaten van berekeningen met FEM voor de diffractietest, en vergelijken deze met de meetresultaten.

Zoals reeds aangegeven in paragraaf 3.3, hebben we in een eerder onderzoek⁷ metingen en berekeningen van de diffractietest van de Whiswall geanalyseerd. Hierbij werd een goede overeenstemming gevonden tussen de energetisch gemiddelde meet- en rekenresultaten.

Figuur 3.23 toont de resultaten van FEM uit dit eerdere onderzoek, nu weergegeven als functie van het Fresnelgetal, op dezelfde wijze als in Figuur 3.21 met meetresultaten. De rekenresultaten vertonen ongeveer hetzelfde verloop met frequentie en Fresnelgetal als de meetresultaten. De energetisch en lineair gemiddelde waarden zijn gegeven in Tabel 3.1. De waarden wijken maximaal 0.4 dB af van de waarden volgens de metingen.

Figuur 3.24 toont de meetresultaten versus de rekenresultaten voor de $3 \times 5 \times 2 = 30$ combinaties van bron- en waarnemerposities. Ook weergegeven zijn de energetisch en lineair gemiddelde waarden. Uit de grafieken blijkt dat de punten rond de diagonaal liggen, wat betekent dat er goede overeenstemming is tussen de meetresultaten en de rekenresultaten. Voor octaafband 500 Hz zijn de afwijkingen van de diagonaal het grootst.

In het rechterdeel van Figuur 3.23 zijn resultaten van FEM weergegeven voor een uitgebreidere verzameling van microfoonhoogtes bij de diffractietest:

-3.5, -3.25, -3.0, ..., 2.75, 3.0 m

in plaats van

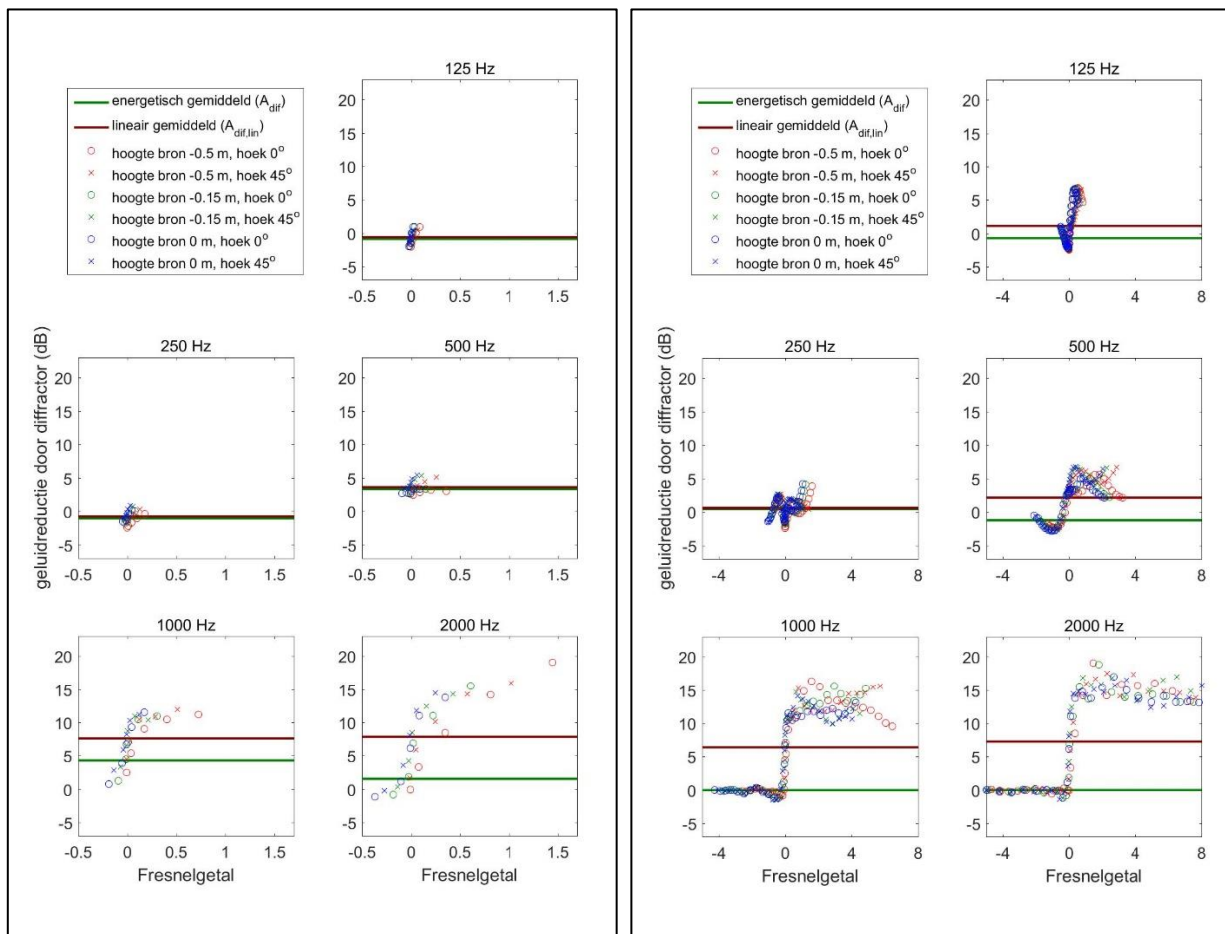
-0.5, -0.25, 0.0, 0.25, en 0.5 m.

Op deze wijze krijgen we een betere indruk van het verloop met Fresnelgetal bij 250 en 125 Hz. Bij 250 Hz varieert de geluidreductie door de diffractor tussen -3 en +5 dB. Bij 125 Hz varieert de geluidreductie tussen -2 en +7 dB.

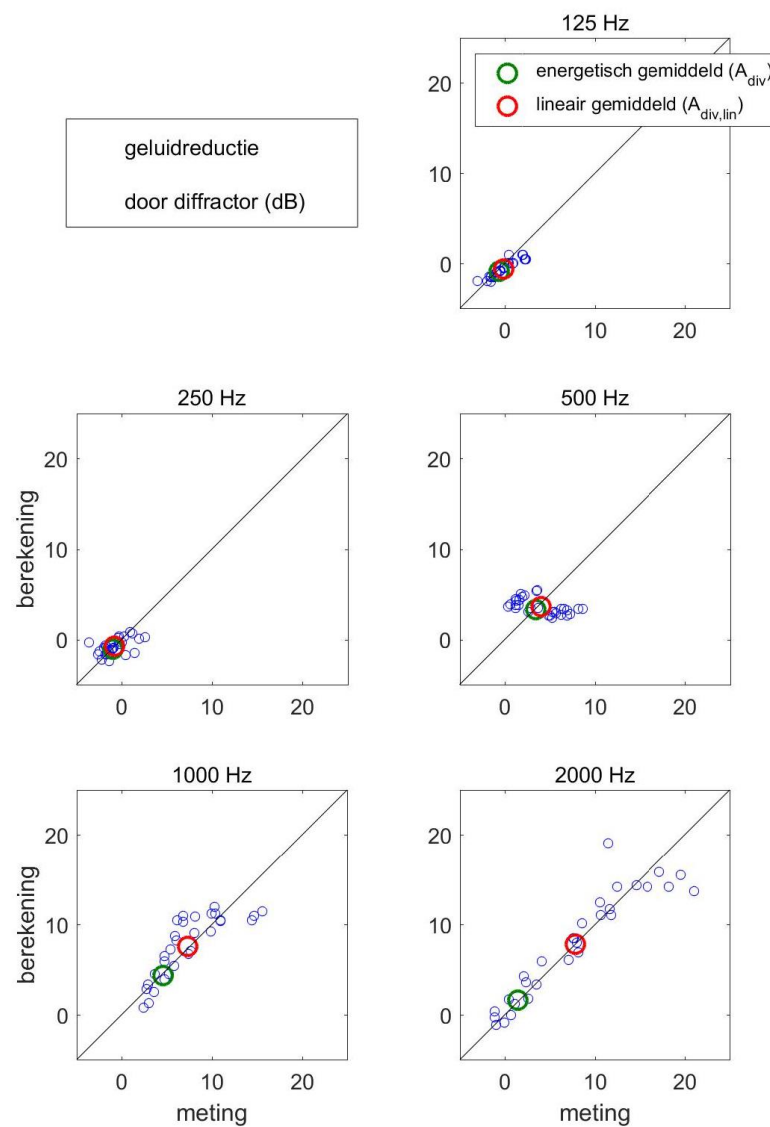
De resultaten van FEM-PE op grote afstand (zie Figuur 3.22) laten vooral negatieve geluidreducties zien voor 125 en 250 Hz. Bij 250 Hz varieert de geluidreductie tussen -4 en +1 dB, en bij 125 Hz tussen -2 en 0 dB.

Een relevante vraag hierbij is welke waarden van het Fresnelgetal in de praktijk voorkomen. Het antwoord op deze vraag blijkt uit Figuur 3.22, die laat zien welke Fresnelgetallen voorkomen voor de verschillende scenario's, met de beperking tot het rooster van twaalf waarnemerposities weergegeven in Figuur 3.15.

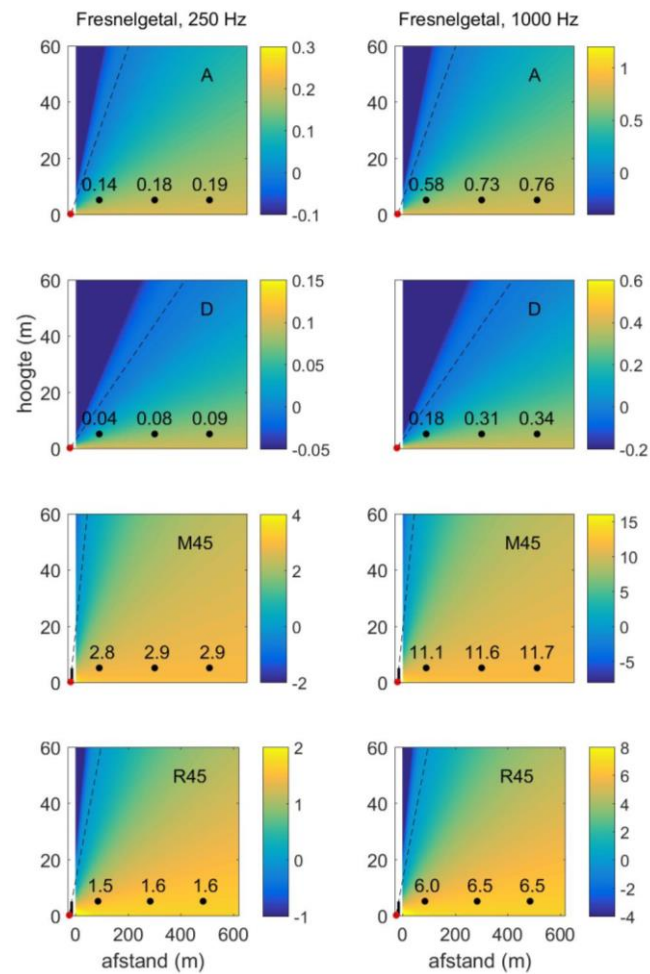
Voor de duidelijkheid toont Figuur 3.25 de waarden van het Fresnelgetal bij 250 en 1000 Hz, voor vier scenario's. Het Fresnelgetal schaalt lineair met de frequentie, dus waarden bij andere frequenties kunnen makkelijk worden afgeleid uit de grafieken.



Figuur 3.23 Links: als Figuur 3.21 maar nu op basis van de resultaten van de berekeningen met FEM voor de diffractietest. Rechts: idem, maar nu met microfoonhoogtes van -3.5, -3.25, ..., 3.5 m in plaats van -0.5, -0.25, ..., 0.5 m.



Figuur 3.24 Meetresultaten versus rekenresultaten voor de geluidreductie door de diffractor in de diffractietest, voor de $3 \times 5 \times 2 = 30$ combinaties van bron- en waarnemerposities (blauwe rondjes). Ook weergegeven zijn de energetisch gemiddelde waarden (A_{div}) en lineair gemiddelde waarden ($A_{div,lin}$).



Figuur 3.25 Waarden van het Fresnelgetal bij 250 Hz (links) en 1000 Hz (rechts), voor scenario's A, D, M45, en R45. De numerieke waarden op 5 m hoogte en afstanden 100, 300 en 500 m zijn weergegeven.

3.10 Rekenregel, versie 3

Versie 2 van de rekenregel geeft een onderschatting van de *versterking* door de diffractor bij 250 Hz, en in mindere mate bij 125 Hz (zie Figuur 3.22). Dit is onwenselijk, vooral omdat het geluid bij 250 Hz vaak bepalend is voor breedbandige niveaus achter geluidschermen (zie paragraaf 2.4). Het probleem bij 250 Hz treedt niet op bij versie 3 van de rekenregel:

$$C_W = \begin{cases} 0.2A_{dif,lin}D_{scherm}(N_f) & \text{voor 125 en 250 Hz} \\ 0.05A_{dif,lin}D_{scherm}(N_f) & \text{voor 500, 1000, 2000 Hz} \end{cases} \quad (3.6)$$

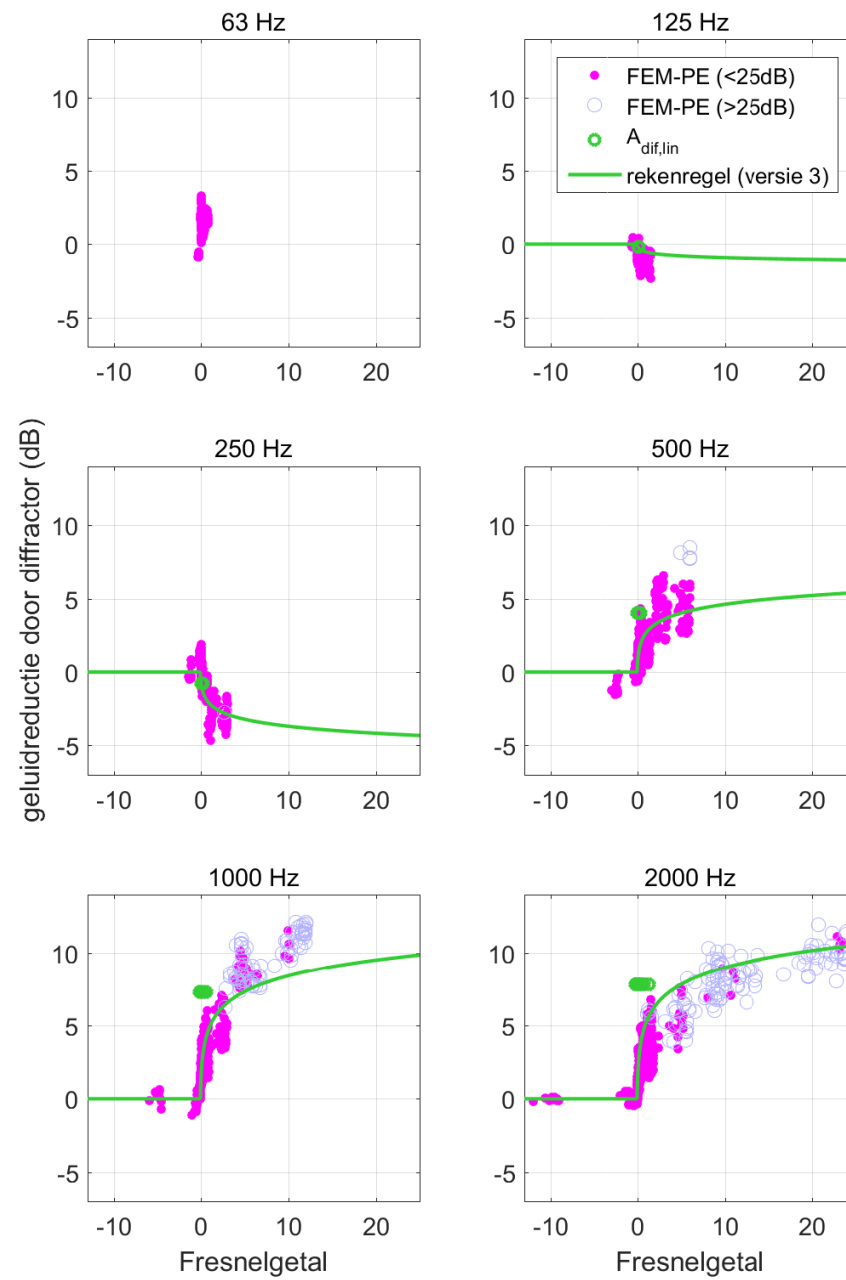
Hierbij wordt dus een andere coëfficiënt gebruikt voor 125 en 250 Hz dan voor 500-2000 Hz. Figuur 3.26 is als Figuur 3.22, maar nu met versie 3 van de rekenregel (groene lijn). De overeenstemming met de resultaten van FEM-PE is nu beter voor 250 Hz.

Versie 3 van de rekenregel kan ook op een andere manier worden geformuleerd:

$$C_W = \begin{cases} 0.2A_{dif,lin}D_{scherm}(N_f) & \text{als } A_{dif,lin} < 0 \\ 0.05A_{dif,lin}D_{scherm}(N_f) & \text{als } A_{dif,lin} \geq 0 \end{cases} \quad (3.6a)$$

Deze formulering heeft als voordeel dat hij in principe ook werkt voor een diffractor met meer en/of diepere resonerende sleuven, waardoor het geluidreducerende effect van de diffractor niet beperkt is tot 500-2000 Hz maar ook optreedt bij 250 Hz (dus als $A_{dif} > 0$ bij 250 Hz). In hoofdstuk 4 beschrijven we de analyse van een dergelijke laagfrequente diffractor. Resultaten van de rekenregel worden vergeleken met resultaten van berekeningen met FEM-PE voor de laagfrequente diffractor.

Bijlage D presenteert enkele aanvullende grafieken waarin resultaten van FEM-PE worden vergeleken met resultaten van versie 3 van de rekenregel. Hieruit blijkt ook dat er een goede overeenstemming is tussen FEM-PE en versie 3 van de rekenregel.



Figuur 3.26 Als Figuur 3.22, maar nu met versie 3 van de rekenregel.

3.11 Rekenregel, versie 4

Voor een nog betere overeenstemming met de resultaten van FEM-PE kan men de coëfficiënten van de rekenregel nog verder aanpassen. Dit is gedaan in versie 4 van de rekenregel:

$$C_W = K A_{dif,lin} D_{scherm}(N_f) \quad (3.7)$$

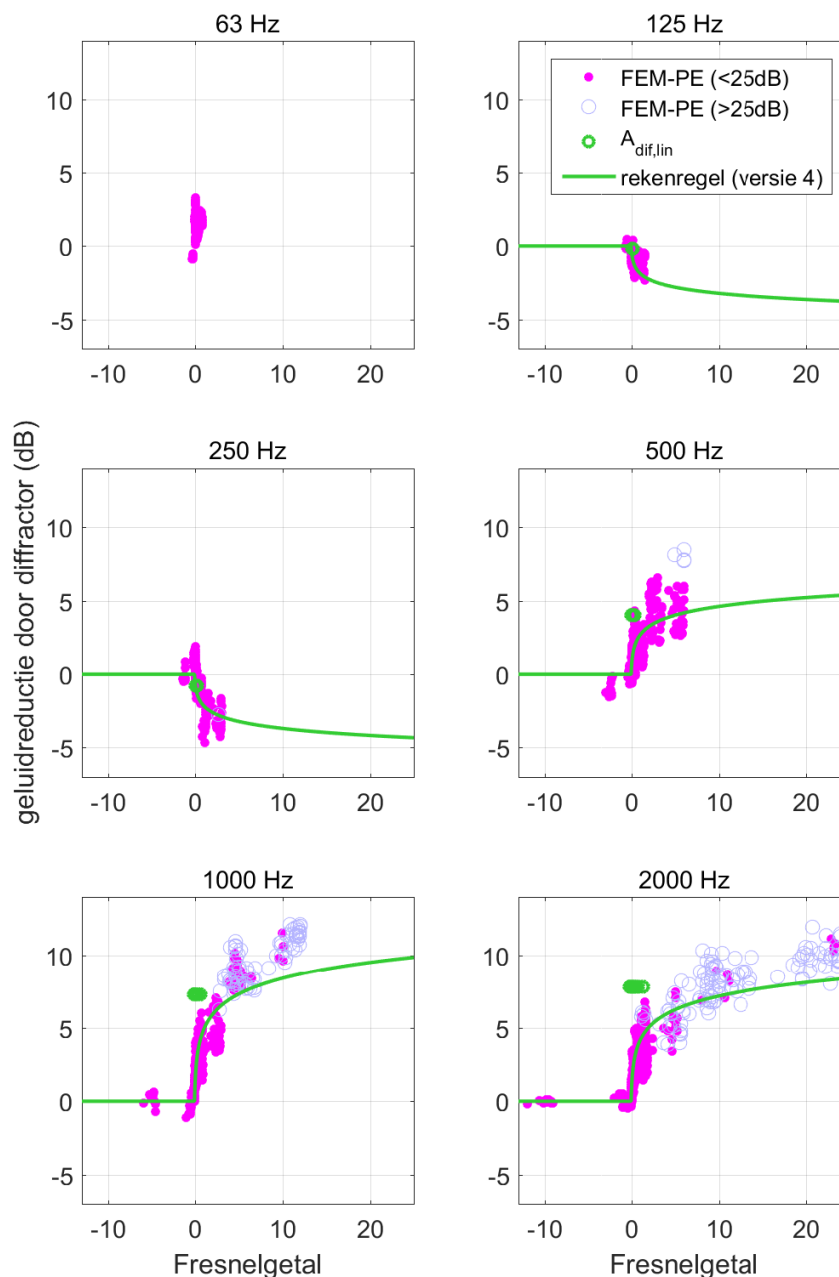
met coëfficiënt K die als volgt varieert met de frequentie:

- $K = 0.7$ voor 125 Hz,
- $K = 0.2$ voor 250 Hz,
- $K = 0.05$ voor 500 en 1000 Hz,
- $K = 0.04$ voor 2000 Hz.

Figuur 3.27 is als Figuur 3.22, maar nu met versie 4 van de rekenregel (groene lijn). De overeenstemming met de resultaten van FEM-PE is goed voor alle octaafbanden.

De waarden van K zijn bepaald door de rekenregel per octaafband ‘op het oog’ te fitten aan de FEM-PE-resultaten. In Hoofdstuk 4 worden de waarden bepaald via een numerieke minimalisatie van het verschil tussen FEM-PE-resultaten en de rekenregel. De gevonden waarden worden ook vergeleken met bovenstaande waarden.

Versie 4 heeft als nadeel dat hij in principe alleen geldig is voor de diffractor waarvoor de rekenregel ontwikkeld is. Voor een alternatieve diffractor, met andere waarden van $A_{dif,lin}$, zijn andere waarden van coëfficiënt K nodig. Dit aspect wordt nader beschouwd in hoofdstuk 4.



Figuur 3.27 Als Figuur 3.22, maar nu met versie 4 van de rekenregel.

3.12 Conclusies van hoofdstuk 3

Op basis van resultaten van numerieke berekeningen met FEM-PE voor een groot aantal scenario's hebben we een rekenregel ontwikkeld waarmee de geluidreductie door de diffractor van de Whiswall berekend kan worden. De rekenregel is geschikt voor methode SRM2 van het Reken- en Meetvoorschrift Geluid. Bij de berekeningen met FEM-PE zijn waarnemersafstanden tot 600 m achter de Whiswall beschouwd.

We hebben vier versies van de rekenregel ontwikkeld, versie 1-4, met toenemende nauwkeurigheid. Versie 3 heeft als voordeel dat hij zodanig geformuleerd is dat hij in principe ook geldig is voor diffractoren met andere producteigenschappen. Versie 4 is iets nauwkeuriger voor de diffractor van de Whiswall.

De rekenregel is geformuleerd als een product van twee grootheden:

- een grootheid die de producteigenschappen van de diffractor representeert,
- de schermwerking volgens de formule van Maekawa.

De formule van Maekawa geeft de schermwerking als functie van het Fresnelgetal, dat bepaald wordt door de posities en hoogtes van de bron, de diffractor, en de waarnemer. Hierdoor voldoet de rekenregel aan het akoestische principe van reciprociteit.

De producteigenschappen van de diffractor worden in de vier verschillende versies van de rekenregel gerepresenteerd door twee grootheden, A_{dif} en $A_{dif,lin}$. Deze grootheden worden bepaald op basis van metingen volgens de diffractietest. Grootheid A_{dif} is hierbij bepaald volgens de gebruikelijke manier van energetisch middelen, terwijl voor grootheid $A_{dif,lin}$ lineair wordt gemiddeld over de verschillende posities van bron en microfoon bij de diffractietest.

De rekenregel werkt in octaafbanden, aangezien rekenmethode SRM2 werkt in octaafbanden. We hebben de resultaten van de berekeningen met FEM-PE ook omgerekend naar breedbandige geluidreducties, gewogen met een typerend A-gewogen verkeerslawaaïspectrum. Hierbij bleek dat de breedbandige geluidreductie vaak beperkt is, als gevolg van een spectrale verschuiving die wordt veroorzaakt door de schermwerking. Terwijl het A-gewogen verkeerslawaaïspectrum een maximum heeft rond 1000 Hz, ligt dat maximum achter een geluidscherm vaak lager, typerend bij 250 Hz. Bij 250 Hz is het geluidreducerend effect van de diffractor bij de meeste onderzochte scenario's echter negatief.

Het zou daarom goed zijn om een Whiswall te ontwikkelen met een diffractor die ook bij 250 Hz een geluidreducerend effect heeft. In de loop van dit onderzoek heeft bedrijf 4Silence een ontwerp gemaakt van een dergelijke laagfrequente diffractor (LF-diffractor). De sleuven in de diffractor zijn zodanig aangepast dat men een grotere geluidreductie bij 250 Hz kan verwachten.

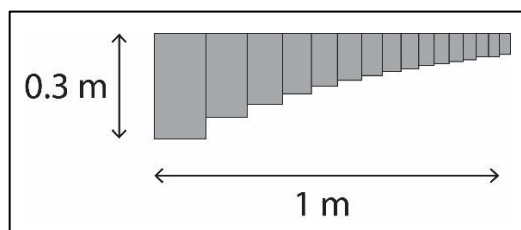
In hoofdstuk 4 beschrijven we een analyse van deze LF-diffractor. Resultaten van FEM-PE worden gebruikt om te onderzoeken of de rekenregel (versie 3 of 4) ook werkt voor de LF-diffractor.

4 LF-diffractor; nadere analyse en optimalisatie

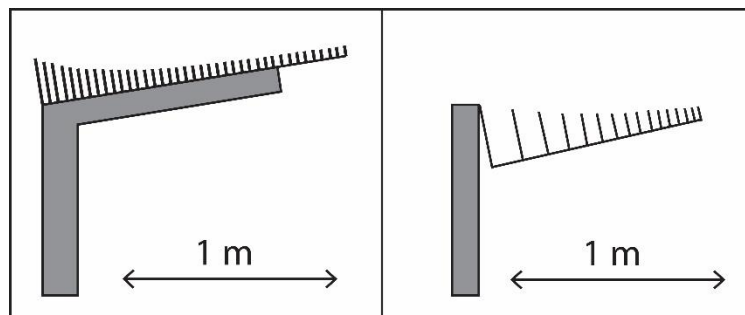
In dit hoofdstuk beschrijven we resultaten van berekeningen met FEM en FEM-PE voor een laagfrequente diffractor (LF-diffractor). De resultaten worden gebruikt voor een nadere analyse en optimalisatie van de rekenregel (versie 3 en 4) uit hoofdstuk 3.

4.1 Afmetingen van de LF-diffractor

De LF-diffractor is ontworpen door bedrijf 4Silence²⁹. Hij bestaat uit 15 sleuven met verschillende dieptes en breedtes, zoals weergegeven in Figuur 4.1. Figuur 4.2 toont schematisch hoe de LF-diffractor is geplaatst onder een hoek van 13° op een scherm, met daarbij ter vergelijking ook de originele diffractor op het scherm (Whiswall). De originele diffractor bestaat uit 38 sleuven.



Figuur 4.1 Afmetingen van de 15 sleuven van de LF-diffractor.

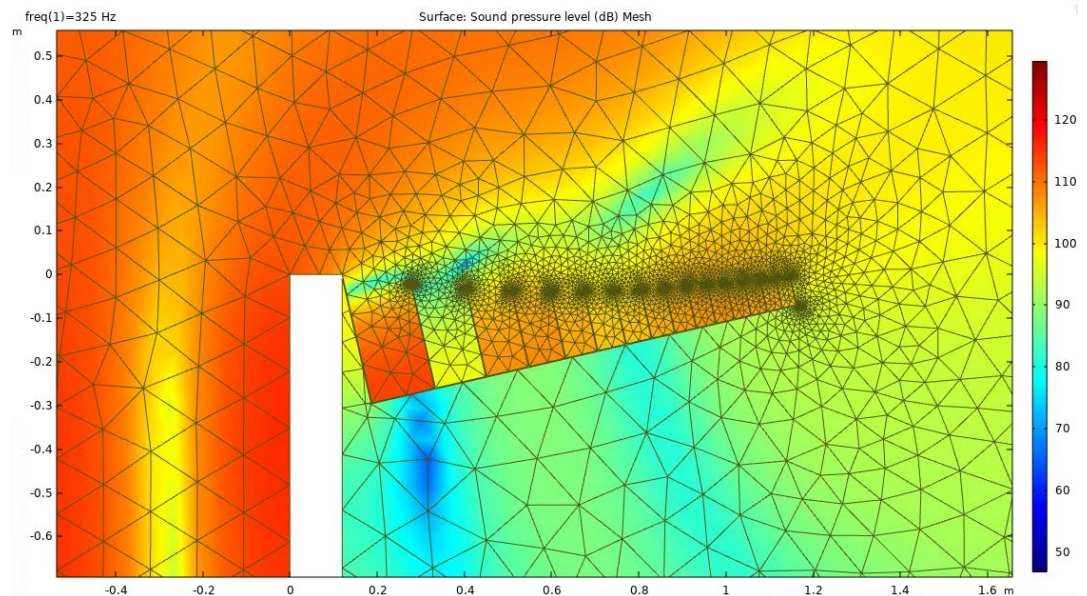


Figuur 4.2 Schematische weergave van de Whiswall met de diffractor met 38 sleuven (links), en de LF-diffractor met 15 sleuven op een verticaal scherm (rechts).

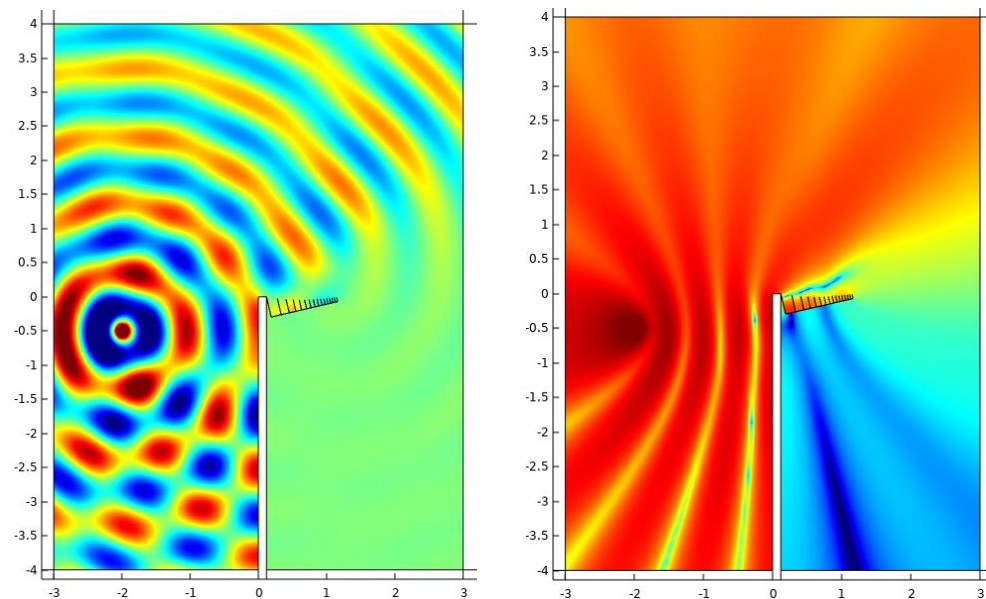
4.2 Berekeningen met FEM voor de diffractietest van de LF-diffractor

Met FEM zijn berekeningen voor de LF-diffractor uitgevoerd om de diffractietest te simuleren. Figuur 4.3 toont als voorbeeld het geluidveld rond de LF-diffractor zoals berekend met FEM bij 325 Hz. Het rekenrooster met de eindige elementen van het FEM-model is ook weergegeven. Figuur 4.4 toont het berekende geluidveld bij 345 Hz, op twee manieren gerepresenteerd: door de geluiddruk in Pascal en door het geluiddrukniveau in dB. De afscherming door het scherm en de diffractor is zichtbaar.

²⁹ Tot nu toe is er nog geen fysiek ontwerp gemaakt. Het ontwerp is nog slechts een specificatie van de dimensies.



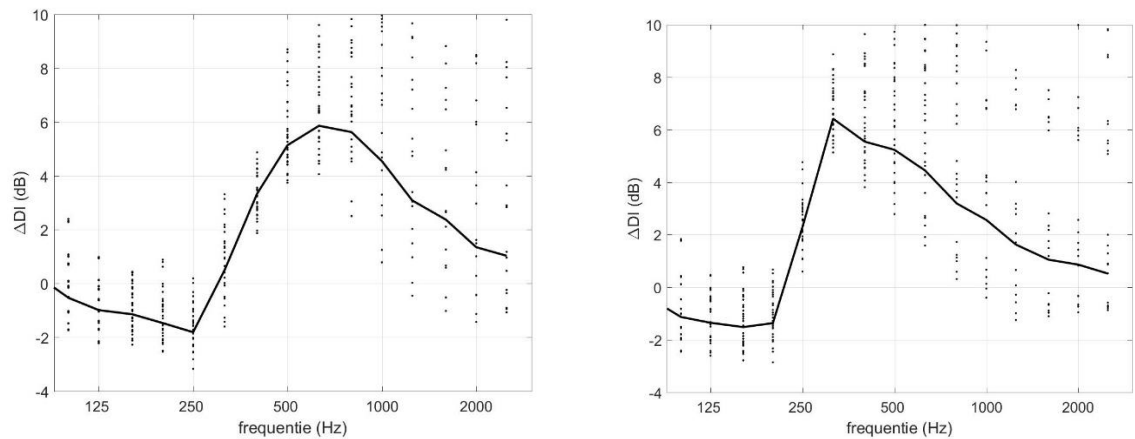
Figuur 4.3 Geluidniveau bij 325 Hz berekend met FEM voor de LF-diffractor. Het FEM-rekenrooster is ook weergegeven.



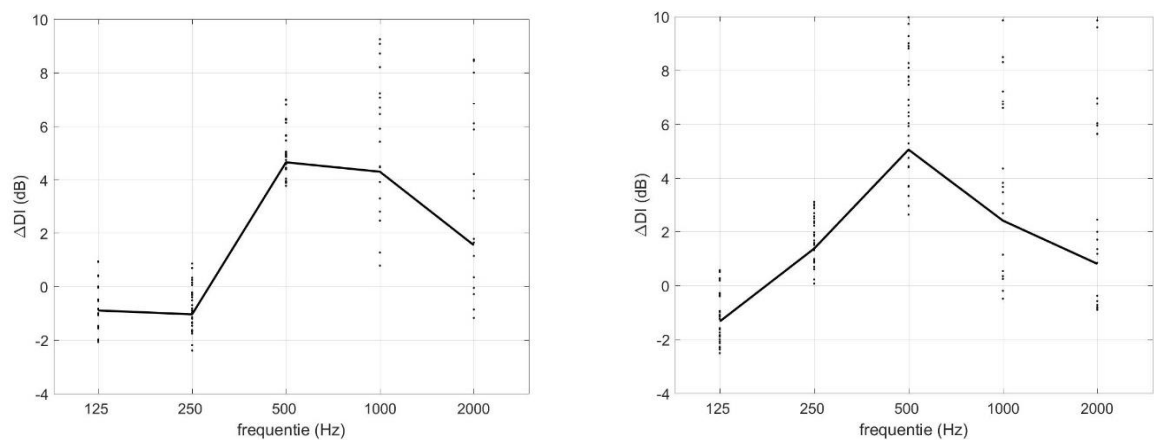
Figuur 4.4 Resultaat van berekening met FEM voor de LF-diffractor, bij 345 Hz. Links de geluiddruk in Pascal, rechts het geluidsdrukkniveau in dB. De bron bevindt zich 2 m links van de diffractor.

Figuur 4.5 toont het resultaat van de FEM-berekening van de diffractietest, zowel voor de originele diffractor van de Whiswall als de LF-diffractor. Weergegeven zijn tertsbandspectra van het diffractie-index-verschil ΔDI (ten opzichte van een recht scherm). De punten in de grafieken representeren de resultaten voor de $3 \times 2 \times 5 = 30$ combinaties van bron- en ontvangerposities. De lijnen representeren de gemiddelde waarden A_{dif} , energetisch gemiddeld op de wijze volgens de NEN-EN norm 1793-4 en zoals beschreven in paragraaf 3.3. Uit de grafieken blijkt dat A_{dif} bij de tertsband 250 Hz negatief is voor de originele diffractor en positief voor de LF-diffractor.

Figuur 4.6 toont de octaafbandspectra van het diffractie-index-verschil ΔDI . De waarde van A_{dif} bij de octaafband 250 Hz is negatief voor de originele diffractor en positief voor de LF-diffractor. De waarden voor de originele diffractor komen overeen met de waarden in Tabel 3.1 (“Berekening, energetisch gemiddeld”).



Figuur 4.5 Resultaten van berekeningen met FEM voor de diffractietest, voor de originele diffractor van de Whiswall (links) en de LF-diffractor (rechts). Weergegeven zijn tertsbandspectra van het diffractie-index-verschil ΔDI . De lijnen representeren de energetisch gemiddelde waarden A_{dif} .



Figuur 4.6 Octaafbandspectra overeenkomend met de tertsbandspectra in Figuur 4.5.

Voor de analyse en optimalisatie van de rekenregel, die later in dit hoofdstuk worden beschreven, hebben we waarden van $A_{dif,lin}$ nodig. De waarden van $A_{dif,lin}$ worden berekend door lineair te middelen over de 30 combinaties van bron- en ontvangerposities (zie paragraaf 3.7). De resulterende waarden zijn gegeven in Tabel 4.1, in tertsen en in octaven, zowel voor de originele diffractor als voor de LF-diffractor.

Tabel 4.1 Waardes van $A_{\text{dif,lin}}$, berekend met FEM voor de originele diffractor en de LF-diffractor. De waardes zijn gebaseerd op resultaten voor drie bronhoogtes (-0.5, -0.15, en 0 m), twee hoeken (0° en 45°), en vijf ontvangerhoogtes (-0.5 -0.25, 0, 0.25, 0.5 m). Negatieve waardes zijn in blauw weergegeven, positieve waardes in rood.

frequentie (Hz)	125	250	500	1000	2000
originele diffractor					
$A_{\text{dif,lin}}$ (dB), octaven	-0.6	-0.7	3.6	7.6	7.8
$A_{\text{dif,lin}}$ (dB), tertsen	-0.2/-0.7/-0.9	-1.1/-1.5/0.9	0.9/5.8/6.9	7.3/8.2/7.9	8.1/7.7/7.9
LF-diffractor					
$A_{\text{dif,lin}}$ (dB), octaven	-1.0	1.7	6.5	6.8	6.2
$A_{\text{dif,lin}}$ (dB), tertsen	-0.8/-1.1/-1.2	-1.0/2.5/6.8	6.4/6.6/6.6	6.6/7.0/7.1	6.7/6.3/5.7

Zoals aangegeven in paragraaf 3.3 hebben de bij de diffractietest bronhoogte 0 m toegevoegd, naast de bronhoogtes -0.5 en -0.15 m volgens de norm. Om de invloed hiervan op $A_{\text{dif,lin}}$ te laten zien geven we in tabel 4.2 de waardes van $A_{\text{dif,lin}}$ berekend op basis van de twee bronhoogtes -0.5 en -0.15 m. De verschillen met de waardes in tabel 4.1 zijn klein (typerend 0 tot 0.3 dB). Voor de verdere analyse zijn we uitgegaan van de waardes in tabel 4.1.

Tabel 4.2 Als tabel 4.1, maar nu met waardes van $A_{\text{dif,lin}}$ berekend op basis van resultaten voor twee bronhoogtes (-0.5 en -0.15 m), twee hoeken (0° en 45°), en vijf ontvangerhoogtes (-0.5 -0.25, 0, 0.25, 0.5 m).

frequentie (Hz)	125	250	500	1000	2000
originele diffractor					
$A_{\text{dif,lin}}$ (dB), octaven	-0.6	-0.9	3.6	7.9	8.3
$A_{\text{dif,lin}}$ (dB), tertsen	-0.2/-0.7/-0.9	-1.2/-1.7/0.7	0.7/6.0/7.2	7.6/8.5/8.2	8.6/8.1/8.6
LF-diffractor					
$A_{\text{dif,lin}}$ (dB), octaven	-1.0	1.5	6.7	7.0	6.4
$A_{\text{dif,lin}}$ (dB), tertsen	-0.8/-1.1/-1.2	-1.2/2.3/7.0	6.6/6.9/6.9	6.6/7.2/7.3	7.0/6.6/5.8

4.3 Berekeningen met FEM-PE voor 8 scenario's met de LF-diffractor

In paragraaf 2.3 hebben we 42 scenario's beschreven voor berekeningen met FEM-PE tot 600 m afstand. Voor 8 van de 42 scenario's hebben we de berekeningen herhaald voor de LF-diffractor. Het gaat om de volgende 8 scenario's uit Tabel 2.1:

C, F, M45, R45, V, W, MM45, en XX45.

Deze scenario's zijn aangegeven in Tabel 4.3. De 8 scenario's hebben verschillen in de volgende parameters: bronhoogte, schermhoogte, bron-schermafstand, en de hoek θ (0 of 45°).

Tabel 4.3 Kopie van tabel 2.1, met daarin aangegeven de 8 scenario's waarvoor berekeningen met FEM-PE voor de LF-diffractor zijn uitgevoerd.

hoogte bron z_b (m)	hoogte scherm z_s (m)	bodem weg/spoor	bodem 1	bodem 2	afstand van bron naar scherm x_b (m)						hoek θ (gr)	wind (m/s)	aantal
					3.5	5	7	10	15	25			
0.1	1.1	hard	gras	gras	C	F			I		0	4.6	3
0.5					H	G			J				3
2													
4													
0.1	1.1	hard	gras	gras	C45			F45			45	4.6	2
0.5					H45			G45					2
2					K45								1
4					L45								1
0.1	5	hard	gras	gras	M45			R45			45	4.6	2
0.5					N45			S45					2
2					P45			T45					2
4					Q45			U45					2
0.1	1.1	hard	hard	gras	B			E			0	4.6	2
			hard		A			D					2
													24
1.1	1.1	hard	gras	gras	V			W		Y	0	4.6	3
					V45			W45			45		2
0.1	1.1	ballastbed	gras	gras	CB						0	4.6	1
1.1		ballastbed			VB								1
0.1	3	hard	gras	gras	MM45				XX45		45	4.6	2
				hard	MMH45				XXH45				2
0.1	5	hard	gras	gras					X45		45	4.6	1
				hard	MH45				XH45				2
0.5	1.1	hard	gras	gras	HW			GW			0	2.3	2
					HZ			GZ			0		2
													42

4.4 Analyse en optimalisatie van de rekenregel

Op basis van de resultaten van de berekeningen voor de originele diffractor en de LF-diffractor hebben we een nadere analyse en optimalisatie uitgevoerd van versie 3 van de rekenregel zoals beschreven in hoofdstuk 3. We hebben hierbij een groot aantal grafieken gemaakt, die zijn opgenomen in bijlagen E en F. Hieronder geven we een korte samenvatting van de resultaten en conclusies.

In bijlage E staan grafieken voor een analyse van de geluidreductie door het *scherm* (zonder diffractor). Deze grafieken geven een indruk van de spreiding van resultaten van FEM-PE rond de voorspelling volgens Maekawa en SRM2. We gebruiken hier weer de resultaten van FEM-PE voor 12 ontvangers, op afstanden 100, 200, 300, 500 m, en hoogtes 2, 5, 10 m. We vinden een aanzienlijke spreiding van FEM-PE rond Maekawa en SRM2.

We hebben ook gekeken of de spreiding kleiner wordt als we uitgaan van ontvangerhoogtes 5, 10, en 15 m in plaats van 2, 5, en 10 m. Het idee was dat de bodem dan een minder verstorende invloed zou hebben. Dit blijkt niet significant het geval: de spreiding blijft ongeveer even groot. De spreiding wordt hierbij gerepresenteerd door de afwijking van Maekawa en SRM2, op twee manieren:

- δ_{rms} = de rms-waarde van het verschil in geluidreductie tussen FEM-PE en Maekawa of SRM2,
- δ = de geluidreductie volgens Maekawa of SRM2 minus de geluidreductie volgens FEM-PE.

De waarden van δ_{rms} en δ zijn in de grafieken gegeven.

In bijlage F staan grafieken voor een analyse van de geluidreductie door de diffractor, voor zowel de originele diffractor als de LF-diffractor. We zijn hierbij ook

uitgegaan van de twee keuzes voor de ontvangerhoogtes: i) 2, 5, 10 m, en ii) 5, 10, 15 m. In de grafieken is ook telkens de voorspelling van de rekenregel weergegeven (groene lijnen). We zijn in eerste instantie uitgegaan van versie 3 van de rekenregel, met vaste waarden van 0.2 en 0.05 voor de coëfficiënt; zie formule (3.6a). De coëfficiënt (of factor) wordt met symbool F aangeduid. Voor versie 3 geldt:

- $F = 0.2$ voor $A_{\text{dif,lin}} < 0$,
- $F = 0.05$ voor $A_{\text{dif,lin}} \geq 0$.

We hebben de FEM-PE resultaten vergeleken met de rekenregel zowel voor tertsbanden als voor octaafbanden. De afwijking van de rekenregel hebben we weer gerepresenteerd op twee manieren:

- δ_{rms} = de rms-waarde van het verschil in diffractor-effect tussen FEM-PE en de rekenregel,
- δ = het diffractor-effect volgens de rekenregel minus het diffractor-effect volgens FEM-PE.

De waarden van δ_{rms} en δ zijn in de grafieken gegeven.

Vervolgens hebben we ook vergelijkingen uitgevoerd waarbij we de coëfficiënten F van de rekenregel per tertsband hebben geoptimaliseerd, zodanig dat de waarde van δ_{rms} minimaal is. De geoptimaliseerde waarden van F zijn weergegeven in Figuren 4.7 en 4.8. De waarden van F , δ_{rms} en δ staan ook in tabellen in de bijlage.

Uit de figuren 4.7 en 4.8 blijkt dat men de rekenregel (versie 3) uit hoofdstuk 3 iets zou kunnen aanpassen, door de coëfficiënt voor $A_{\text{dif,lin}} < 0$ iets kleiner te kiezen, bijvoorbeeld:

- $F = 0.15$ voor $A_{\text{dif,lin}} < 0$,
- $F = 0.05$ voor $A_{\text{dif,lin}} \geq 0$.

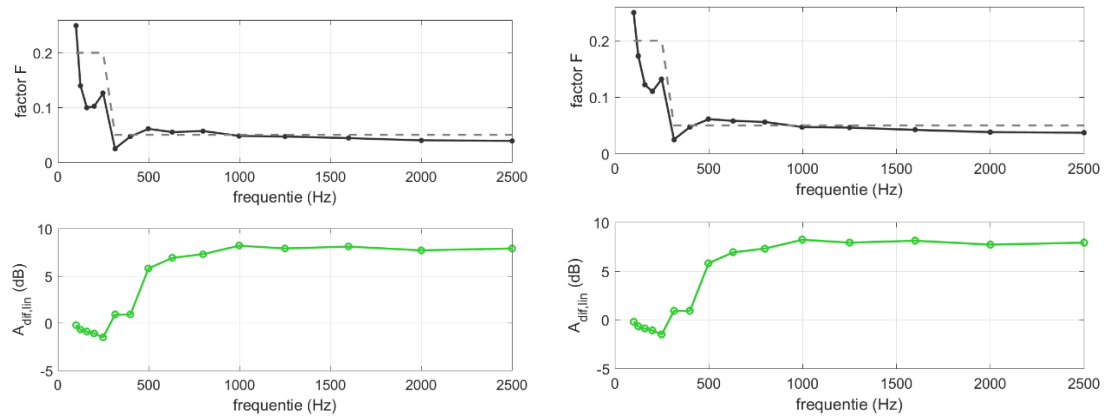
Op deze wijze blijft de rekenregel 'algemeen' geldig, dat wil zeggen zowel voor de originele diffractor als voor de LF-diffractor, met waarden van F die alleen afhankelijk zijn van het teken van $A_{\text{dif,lin}}$.

Als men de voorkeur geeft aan een rekenregel met waarden van F die variëren met de octaafband (zoals bij versie 4 in hoofdstuk 3), dan zou men voor de octaafbanden 1000 en 2000 Hz een lagere waarde dan 0.05 kunnen kiezen, bijvoorbeeld 0.04 voor 1000 Hz en 0.03 voor 2000 Hz³⁰.

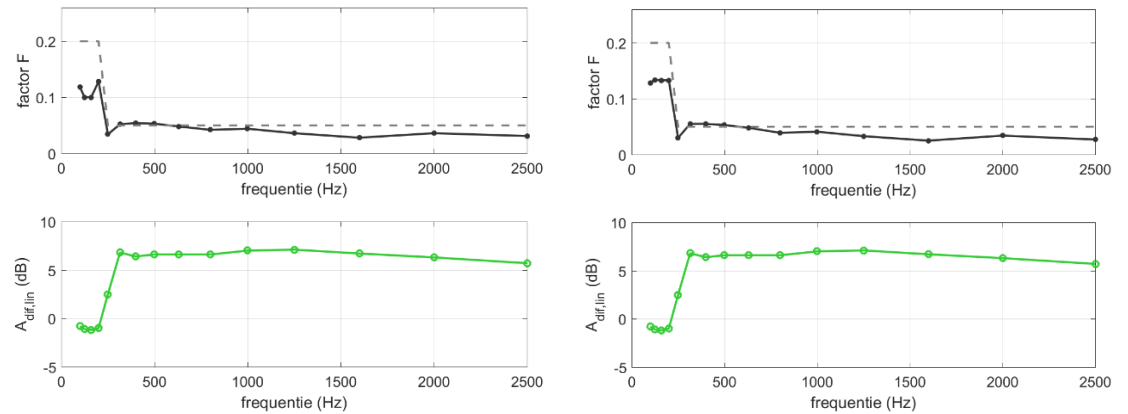
In bijlage F staan ook grafieken die illustreren dat voor afstanden van 30-50 m in plaats van 100-500 m de overeenstemming tussen FEM-PE en de rekenregel vergelijkbaar is. Voor de rekenregel met optimalisatie van F is hierbij voor de optimalisatie uitgegaan van het interval 100-500 m.

We concluderen ook dat de keuze tussen ontvangerhoogtes 2, 5, 10 m en 5, 10, 15 m geen significant verschil oplevert. Verder blijkt het voordeel van rekenen via de tertsen nihil.

³⁰ De waarden van 0.04 en 0.03 zijn respectievelijk 20% en 40% kleiner dan 0.05. Deze verschillen zijn aanzienlijk groter dan de verschillen in $A_{\text{dif,lin}}$ die optreden als men in plaats van drie bronhoogtes slechts twee bronhoogtes gebruikt bij de diffractietest (zie paragraaf 4.2).



Figuur 4.7 Waardes van de coëfficiënten F bepaald via optimalisatie (zie Figuur F.2 in bijlage F), voor de originele diffractor. De gebroken lijnen representeren de waardes 0.2 en 0.05 uit hoofdstuk 3. Ook weergegeven (groene lijn) zijn de bijbehorende waardes van $A_{dif,lin}$.



Figuur 4.8 Als Figuur 4.7, voor de LF-diffractor.

4.5 Conclusies van hoofdstuk 4

Op basis van de analyse in dit hoofdstuk concluderen we dat de rekenregel (versie 3) ontwikkeld voor de originele diffractor ook goed werkt voor de LF-diffractor. Op basis van een optimalisatie vonden we dat de coëfficiënt voor $A_{dif,lin} < 0$ iets kleiner gekozen zou kunnen worden: 0.15 in plaats van 0.2. Hiermee wordt de rekenregel als volgt:

$$C_W = \begin{cases} 0.15 A_{dif,lin} D_{scherm}(N_f) & \text{als } A_{dif,lin} < 0 \\ 0.05 A_{dif,lin} D_{scherm}(N_f) & \text{als } A_{dif,lin} \geq 0 \end{cases} \quad (4.1)$$

Als men de voorkeur geeft aan een rekenregel met waardes van F die variëren met de octaafband (versie 4), dan zou men voor de octaafbanden 1000 en 2000 Hz een lagere waarde dan 0.05 kunnen kiezen, bijvoorbeeld 0.04 voor 1000 Hz en 0.03 voor 2000 Hz.

De rekenregel werkt goed voor de originele diffractor en voor de LF-diffractor. De rekenregel is geformuleerd voor octaafbanden. Een berekening via tertsbanden levert geen significante verbetering van de nauwkeurigheid. De rekenregel blijkt ook

goed te werken voor kleinere afstanden, 30 tot 50 m, in plaats van de afstanden 100-500 m waarop de ontwikkeling van de rekenregel is gebaseerd.

5 Conclusies

We hebben in dit onderzoek een rekenregel ontwikkeld waarmee de geluidreductie door de diffractor van de Whiswall berekend kan worden. De rekenregel werkt ook goed voor een alternatieve diffractor, die een grotere geluidreductie bij de lage frequentie 250 Hz levert (LF-diffractor). De wiskundige vorm van de rekenregel staat in paragraaf 4.5 van dit rapport.

De ontwikkeling is gebaseerd op resultaten van berekeningen met het numerieke rekenmodel FEM-PE. Bij de berekeningen met FEM-PE zijn waarnemersafstanden van 30 tot 600 m achter de Whiswall beschouwd.

De rekenregel is geformuleerd als een product van twee grootheden:

- een grootheid die de producteigenschappen van de diffractor representeert,
- de schermwerking volgens de formule van Maekawa.

De formule van Maekawa geeft de schermwerking als functie van het Fresnelgetal, dat bepaald wordt door de posities en hoogtes van: i) de bron, ii) de diffractor, en iii) de waarnemer. De producteigenschappen van de diffractor worden gerepresenteerd door grootheid $A_{\text{dif,lin}}$. Deze grootheid wordt bepaald op basis van metingen volgens de diffractietest. Hierbij wordt lineair gemiddeld over de verschillende posities van bron en microfoon. In dit onderzoek is uitgegaan van drie bronhoogtes, terwijl in de geluidnorm voor de diffractietest wordt uitgegaan van twee bronhoogtes. Het effect van dit verschil is gering.

De rekenregel is geschikt voor de standaard rekenmethode SRM2 van het Reken- en Meetvoorschrift Geluid. De rekenregel werkt in octaafbanden, aangezien SRM2 is geformuleerd in octaafbanden. We hebben onderzocht of een berekening via tertsbanden een nauwkeuriger rekenregel oplevert, aangezien het effect van de diffractor sterk varieert met de frequentie. Dit bleek het geval; de rekenregel werd niet significant nauwkeuriger door een berekening via tertsbanden.

A Breedbandige geluidreductie door de diffractor

Voor de berekening van de A-gewogen breedbandige geluidreducties wordt uitgegaan van een spectrum van wegverkeersgeluid dat beschreven is in annex B. We gebruiken hier het spectrum uitgedrukt in octaafbanden, voor 63-2000 Hz. Dit spectrum is bedoeld om de breedbandige geluidreductie door een object (zoals een geluidscherm langs een weg) te bepalen.

De breedbandige geluidreductie door de diffractor, aangeduid als $D_{\text{diffractor}}$, wordt als volgt berekend:

$$D_{\text{diffractor}} = L_{\text{scherm}} - L_{\text{Whiswall}}$$

met

$$L_{\text{scherm}} = 10 \log_{10} \left(\sum_{i=1}^6 10^{(\Delta L_{\text{scherm},i} + L_{\text{verkeer},i})/10} \right)$$

$$L_{\text{Whiswall}} = 10 \log_{10} \left(\sum_{i=1}^6 10^{(\Delta L_{\text{Whiswall},i} + L_{\text{verkeer},i})/10} \right)$$

Hierin is

- $L_{\text{verkeer},i}$ het octaafbandspectrum voor verkeersgeluid,
- $\Delta L_{\text{scherm},i}$ het geluidniveau berekend met FEM-PE voor de situatie met het scherm,
- $\Delta L_{\text{Whiswall},i}$ het geluidniveau berekend met FEM-PE voor de situatie met de Whiswall.

Er wordt gesommeerd over de zes octaafbanden van 63 Hz ($i = 1$) tot 2000 Hz ($i = 6$).

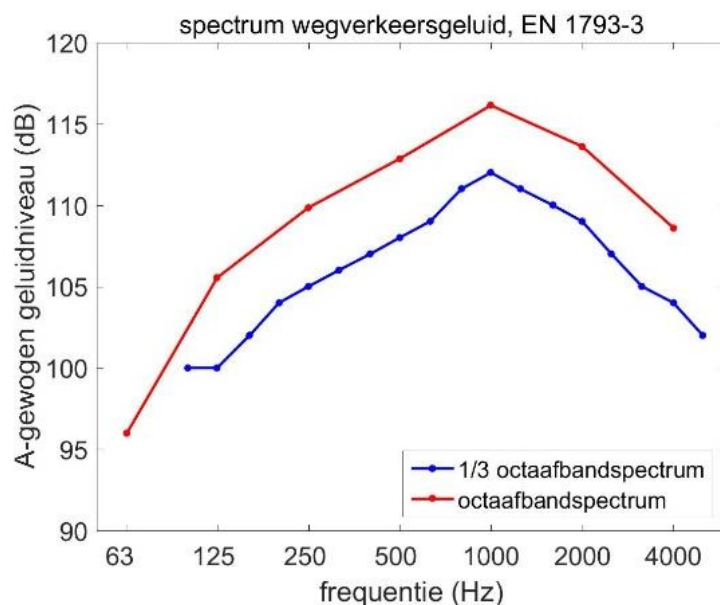
De geluidniveaus $\Delta L_{\text{scherm},i}$ en $\Delta L_{\text{Whiswall},i}$ berekend met FEM-PE representeren alle invloeden van propagatie op het verkeerslawaaïspectrum: schermwerking, bodemdemping, en refractie. In de situatie met de Whiswall wordt ook het effect van de diffractor gerepresenteerd. Bij de berekeningen met FEM-PE wordt uitgegaan van een omni-directionele bron met een vlak spectrum.

B Spectrum van wegverkeersgeluid

Bij de berekening van de A-gewogen breedbandige geluidreducties (zie annex A) wordt gebruik gemaakt van een representatief spectrum van wegverkeersgeluid.

Er wordt hiervoor uitgegaan van een tertsbandbandspectrum van wegverkeersgeluid volgens de Europese standaard EN 1793-3³¹. Dit is weergegeven in Figuur B.1 (blauwe lijn), waarbij alle niveaus zijn verhoogd met 120 dB.

Uit dit spectrum hebben we een octaafbandspectrum bepaald, dat ook is weergegeven in de grafiek (rode lijn). Hierbij is de waarde voor 63 Hz bepaald door extrapolatie. Het octaafbandspectrum is ook gegeven in Tabel B.1.



Figuur B.1 Spectrum van wegverkeersgeluid, gebaseerd op EN 1793-3.

Tabel B.1 Octaafbandspectrum van wegverkeersgeluid, gebaseerd op EN 1793-3.

Frequentie (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000
A-gewogen geluidniveau (dB)	96.0	105.5	110.0	112.8	116.0	113.6	108.6

³¹ European standard prEN 1793-3, "Road traffic noise reducing devices – Test method for determining the acoustic performance – Part 3 : Normalized traffic noise spectrum".

C Breedbandige resultaten van FEM-PE

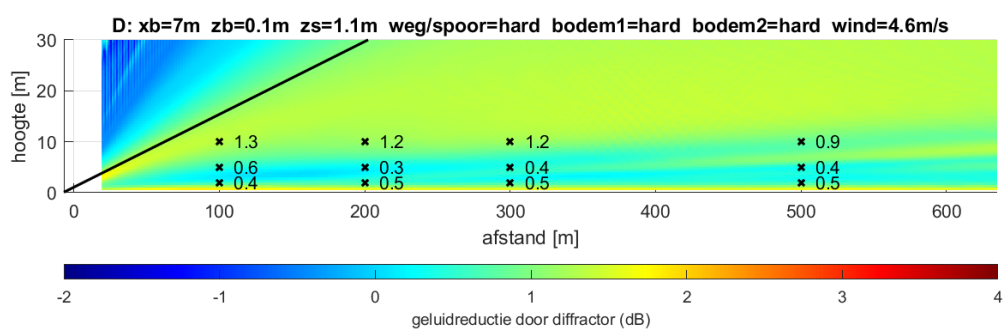
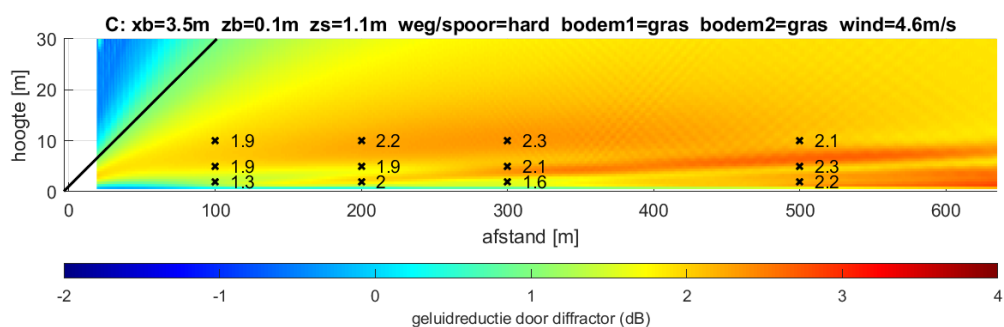
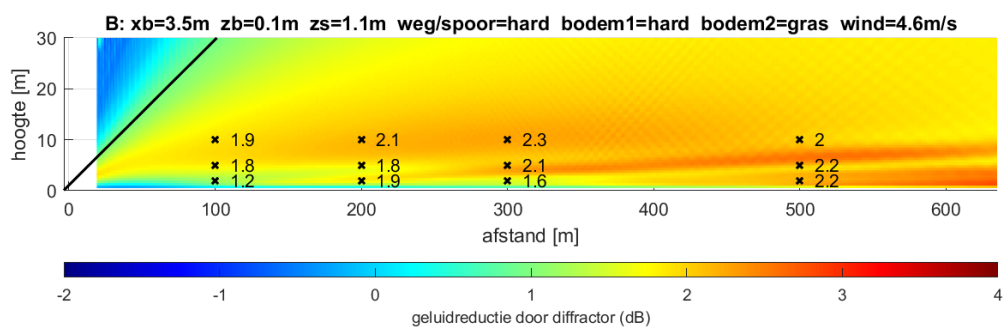
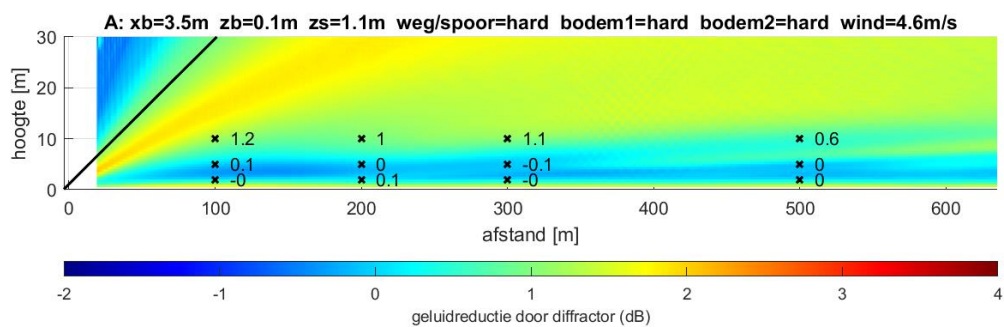
In deze bijlage worden breedbandige FEM-PE-resultaten gepresenteerd voor alle 42 scenario's.

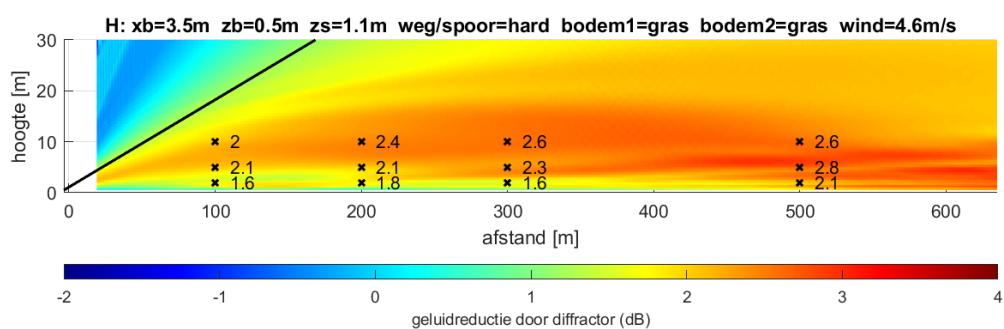
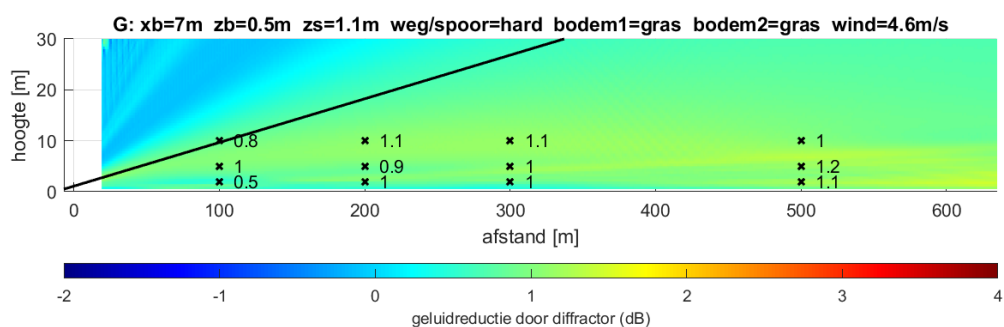
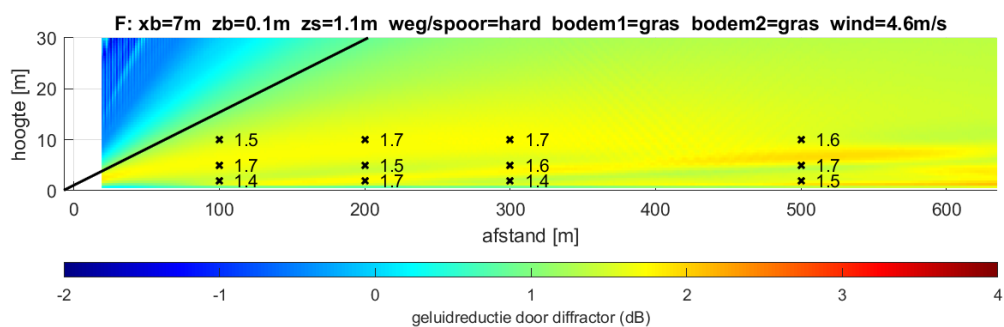
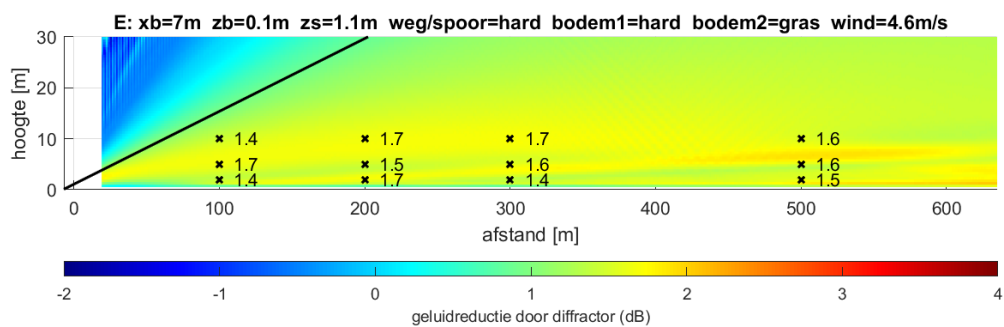
De grafieken tonen de breedbandige A-gewogen geluidreductie door de diffractor. Hierbij is het A-gewogen spectrum van verkeersgeluid uit bijlage B gebruikt. De berekening is beschreven in paragraaf 2.4 en annex A.

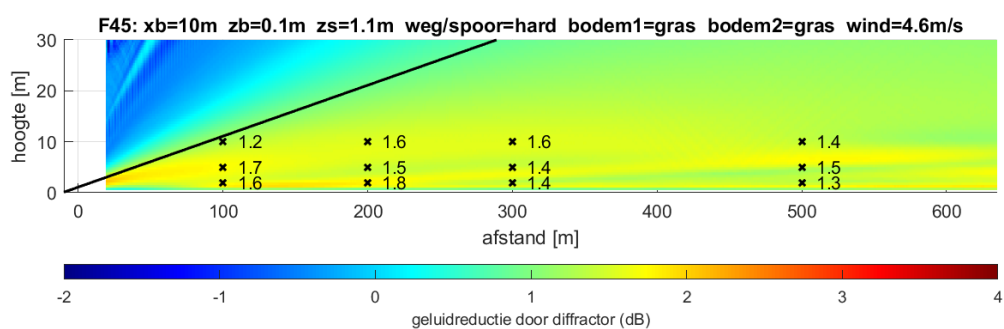
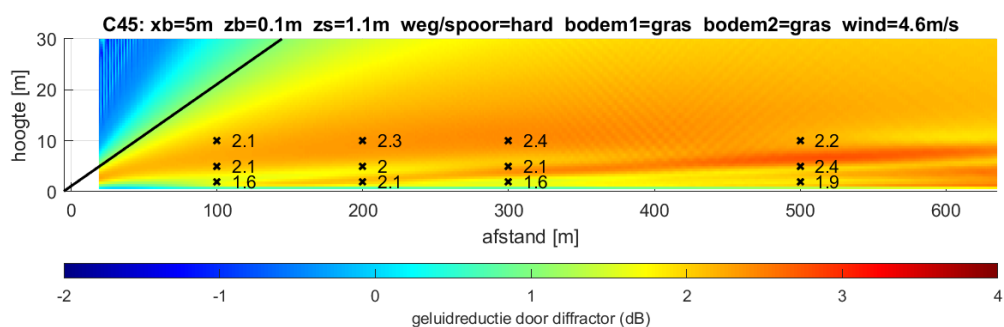
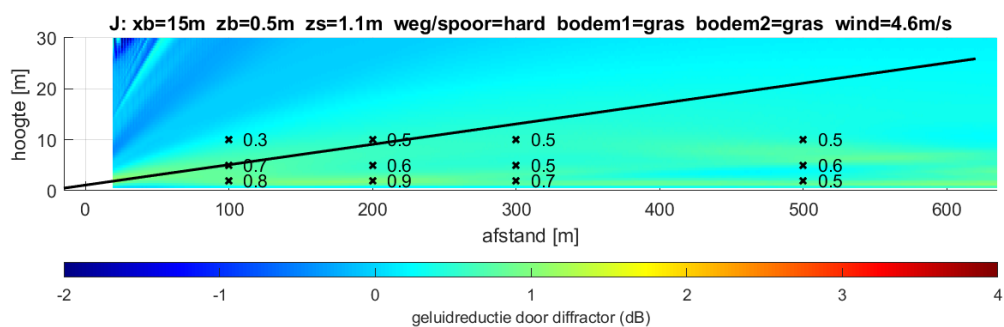
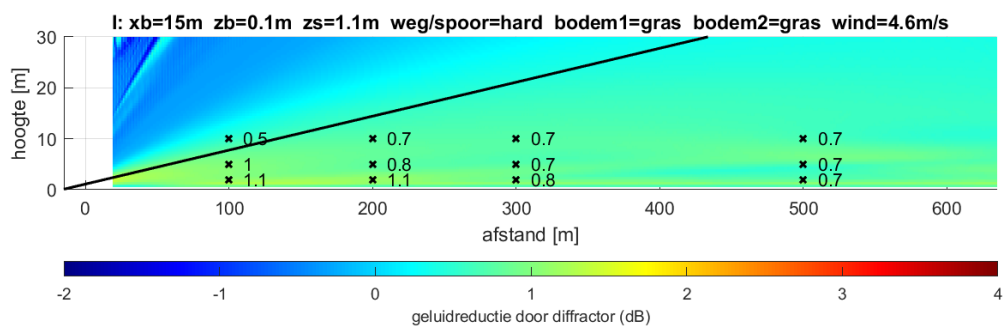
De 42 grafieken staan in de volgorde beschreven in paragraaf 2.4:

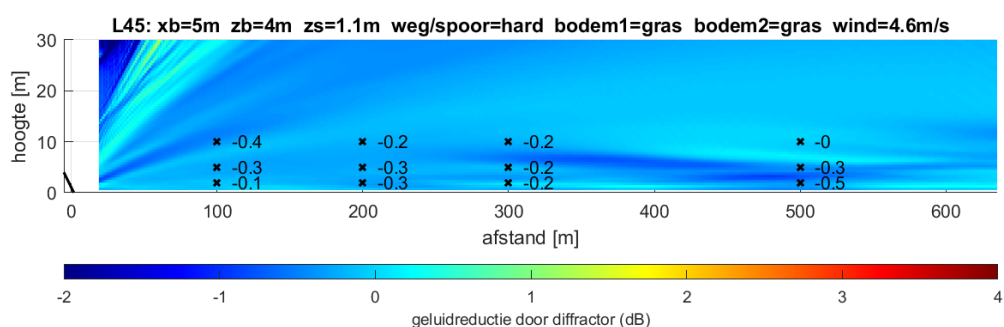
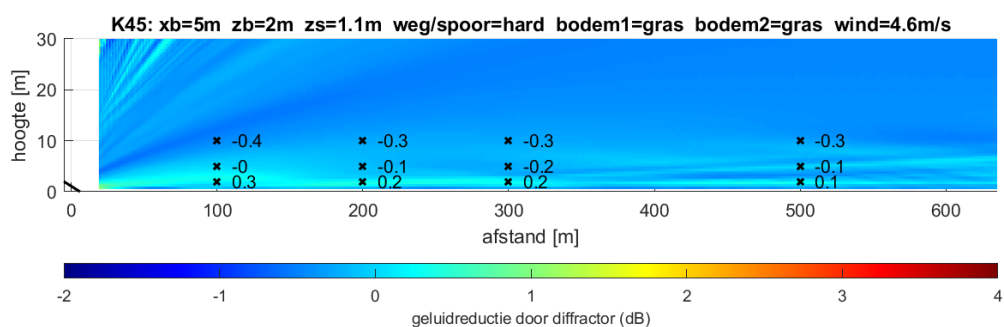
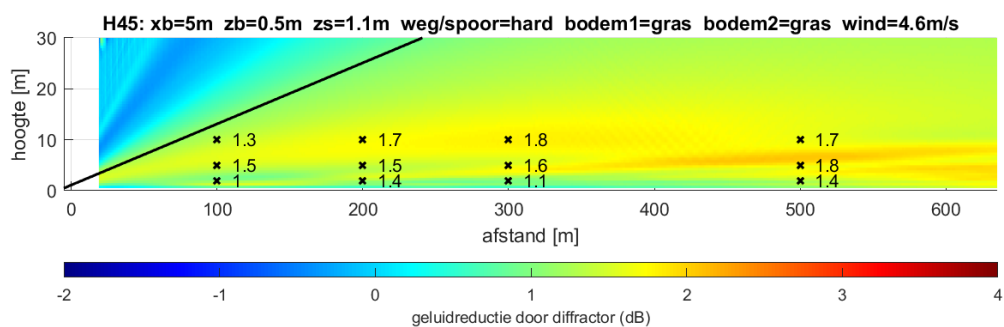
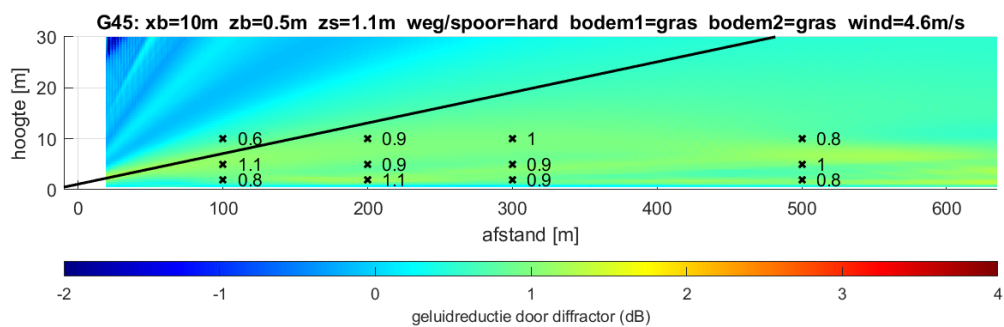
- 10 scenario's A-J,
- 14 scenario's C45-U45,
- 18 scenario's V-GZ.

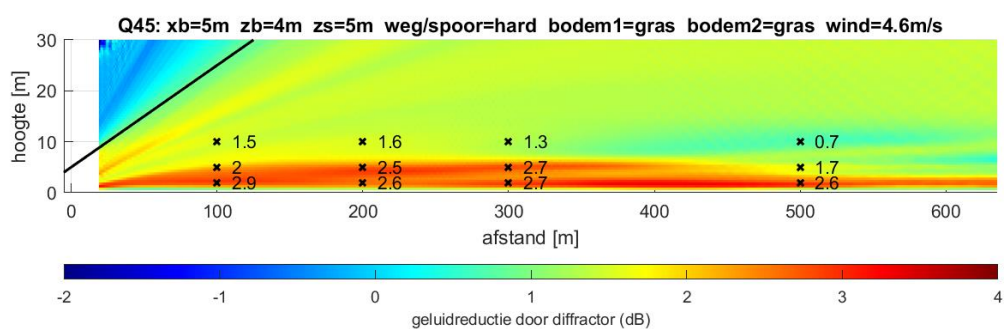
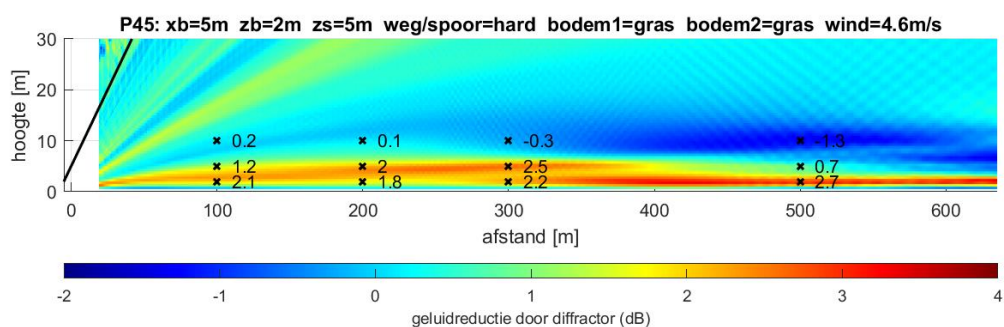
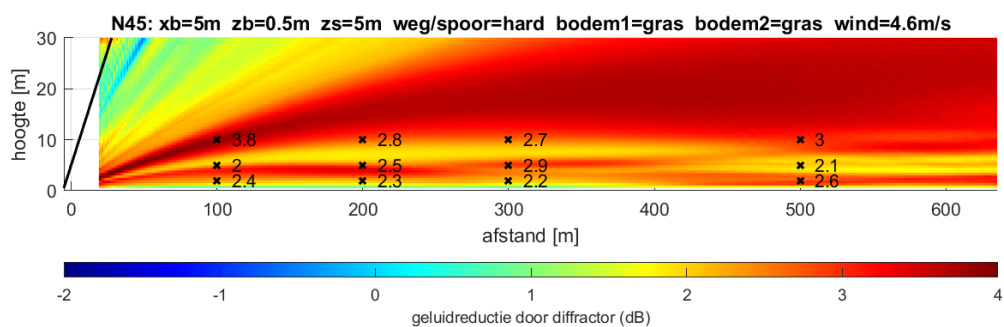
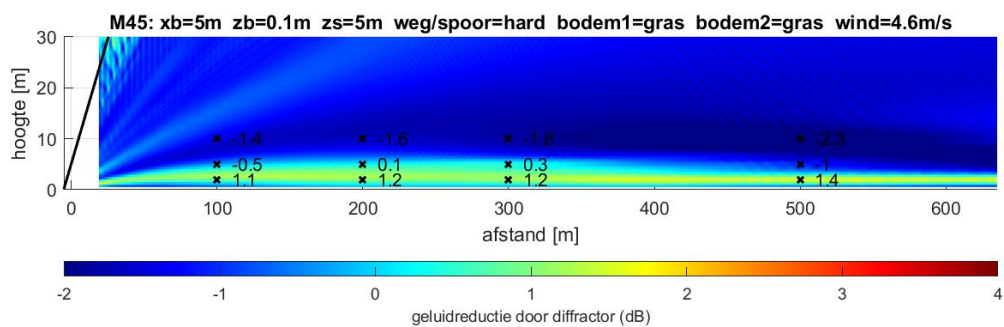
In de grafieken is de zichtlijn weergegeven als een zwarte lijn. Boven elke grafiek zijn de parameters uit Tabel 2.1 gegeven (met afstand x_b tussen bron en scherm, bronhoogte z_b , en schermhoogte z_s).

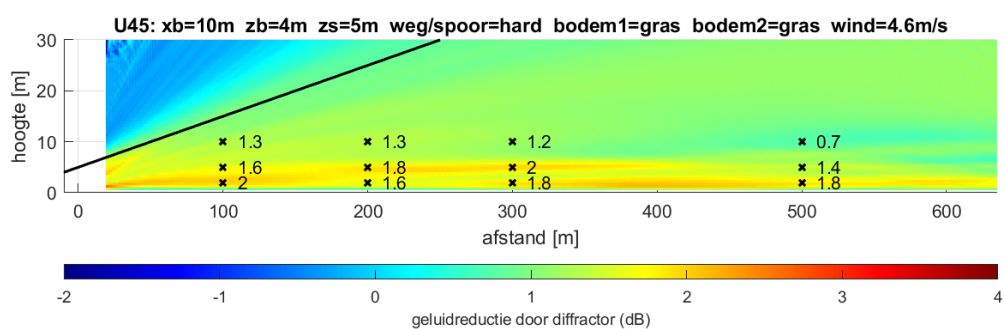
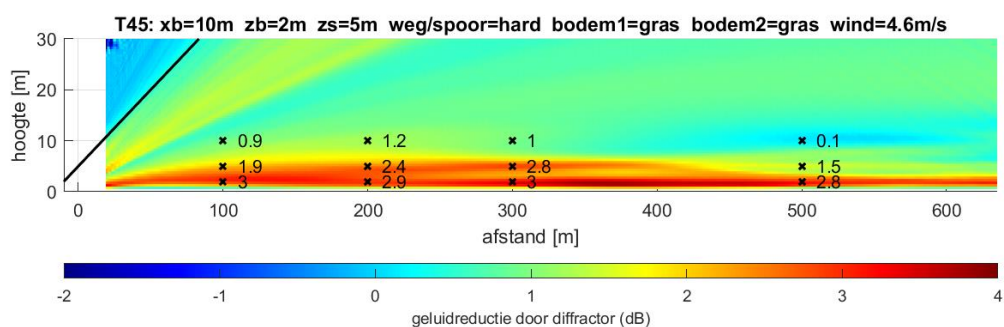
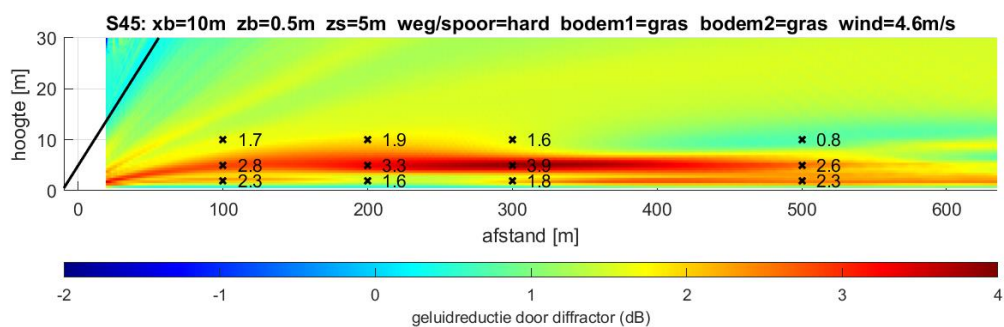
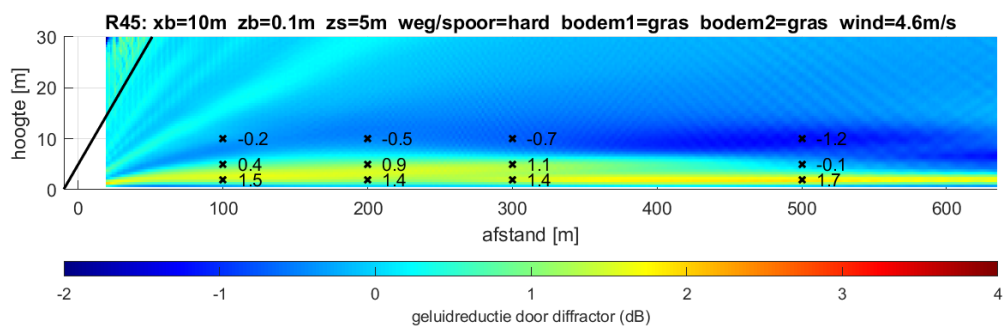


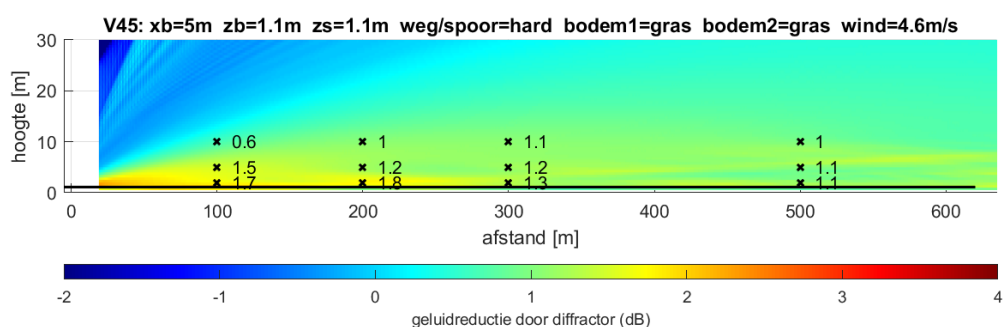
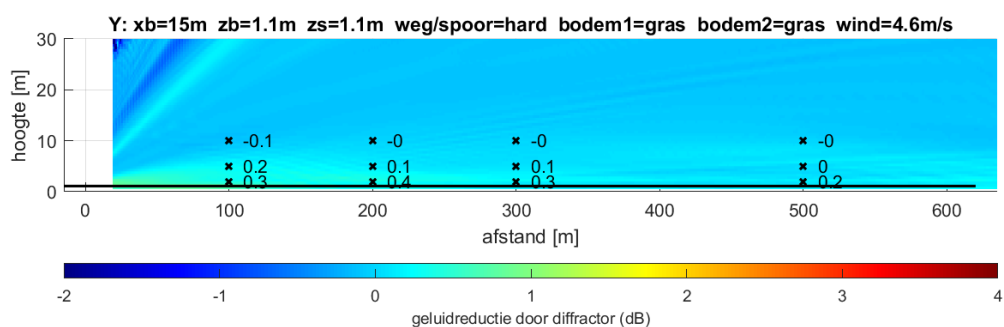
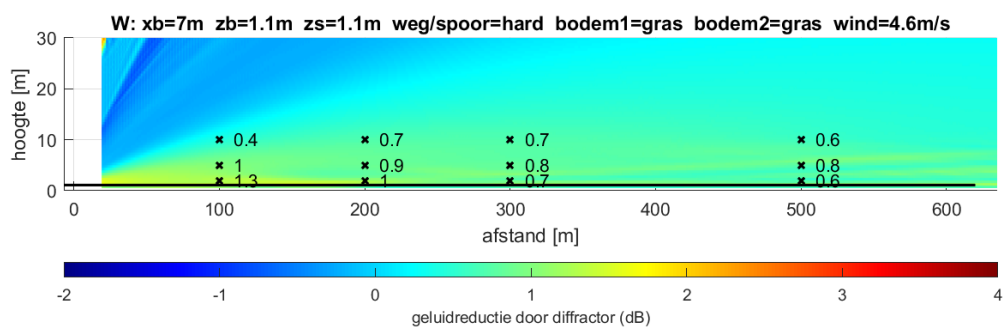
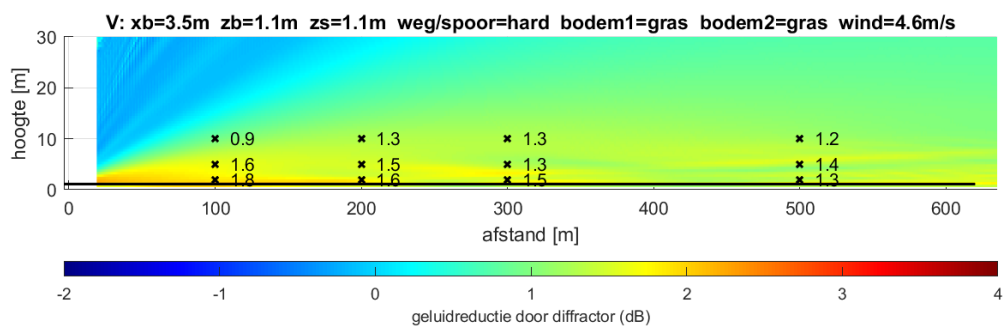


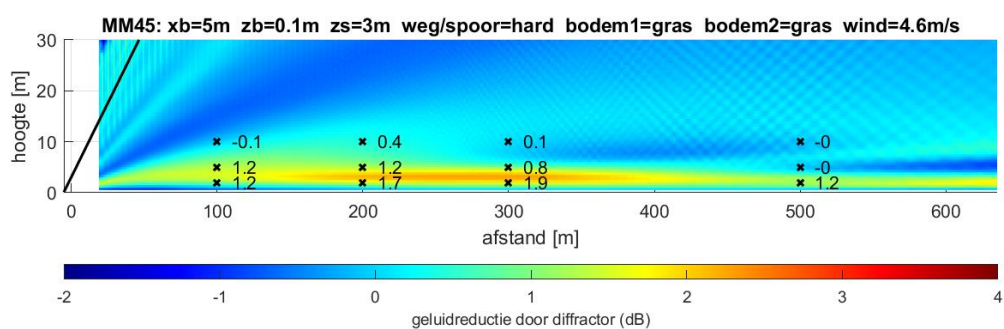
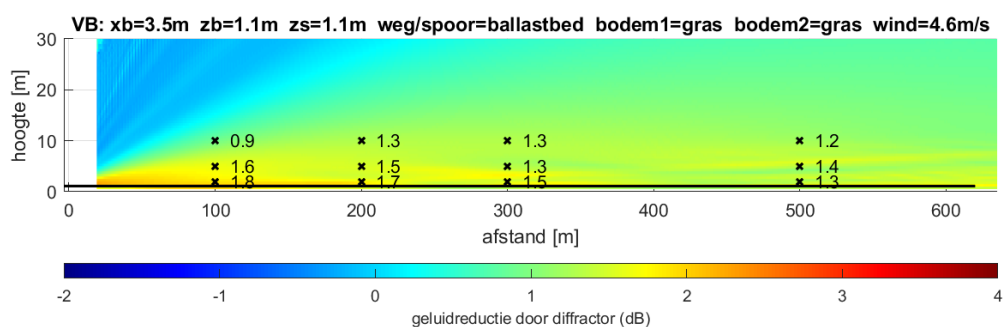
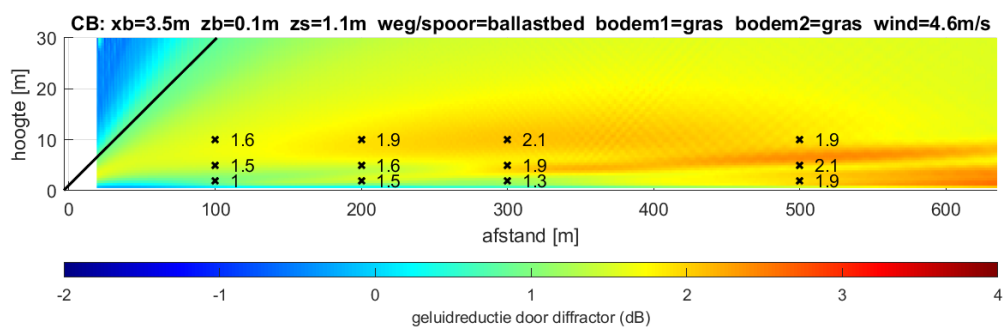
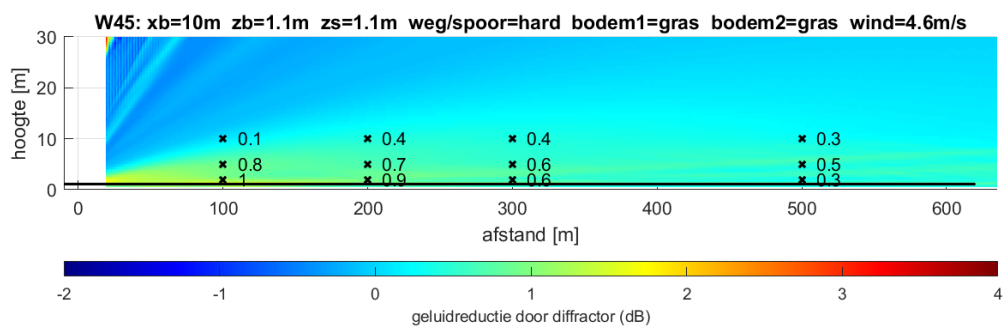


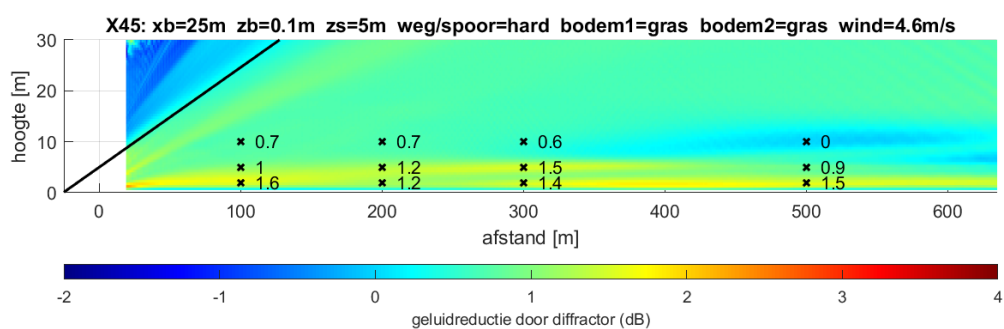
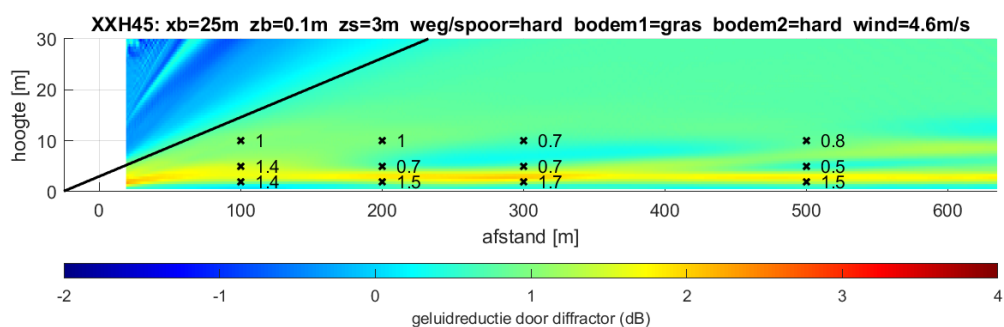
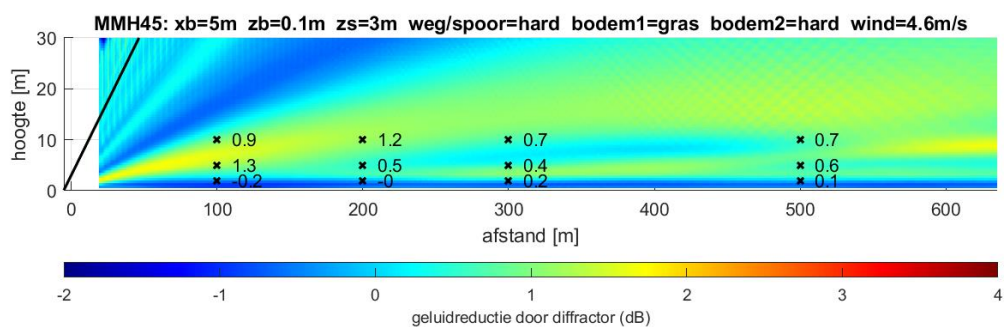
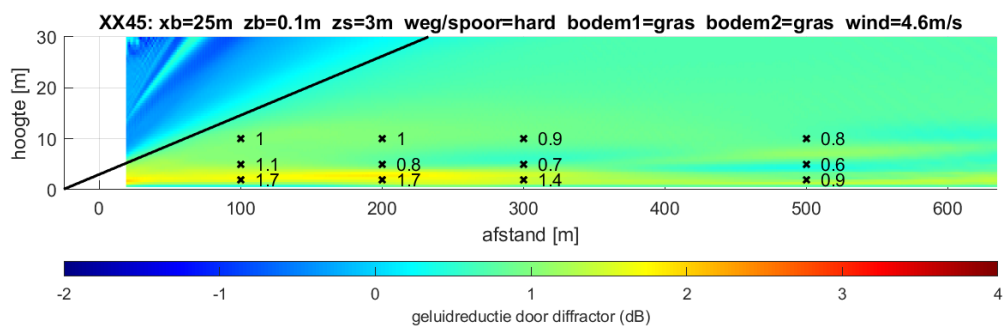


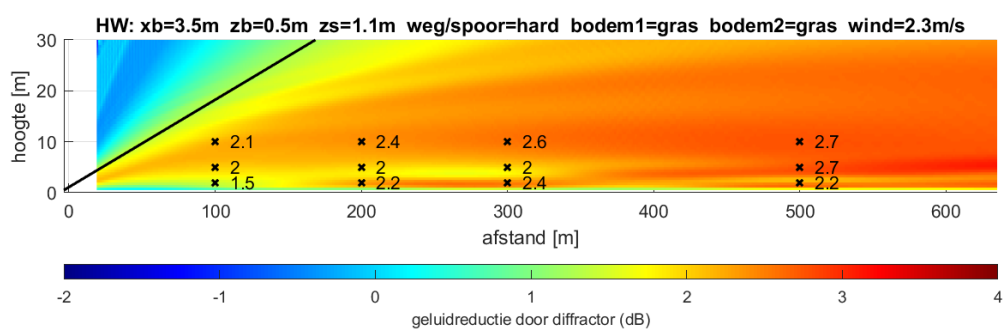
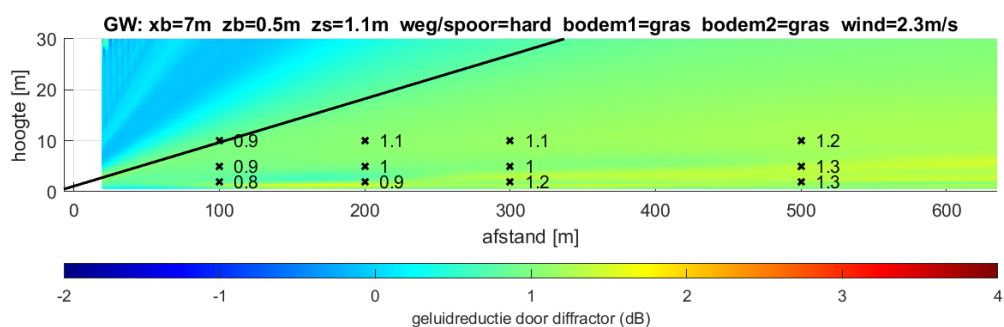
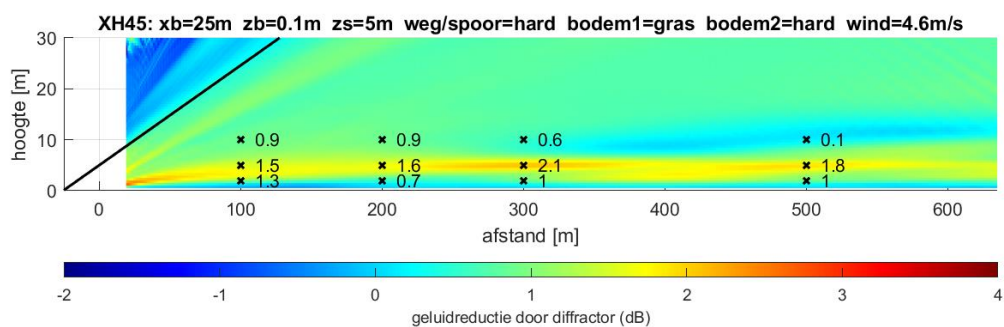
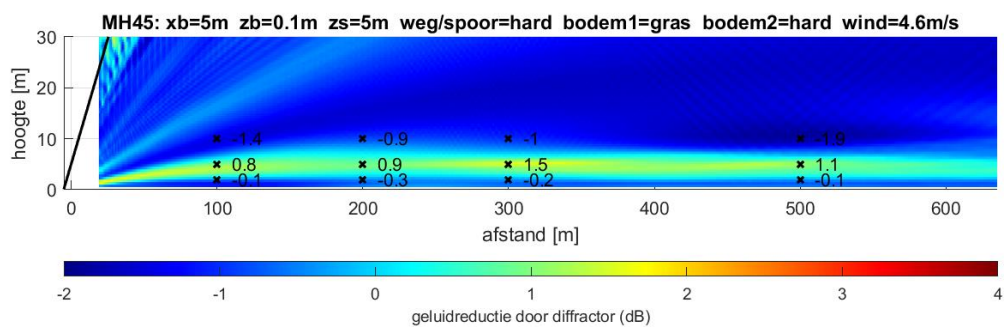


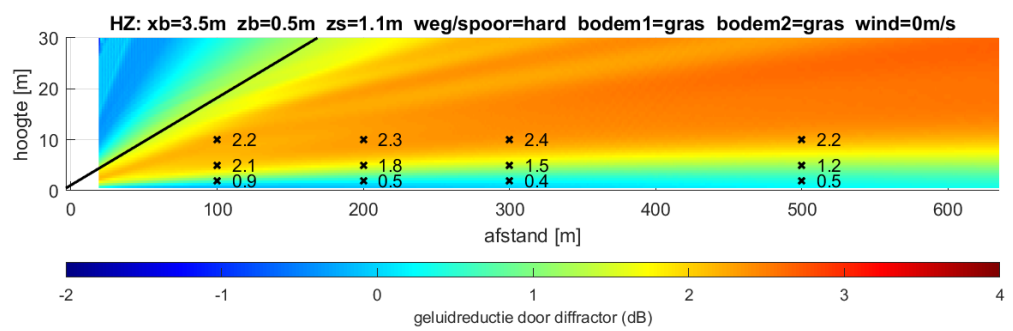
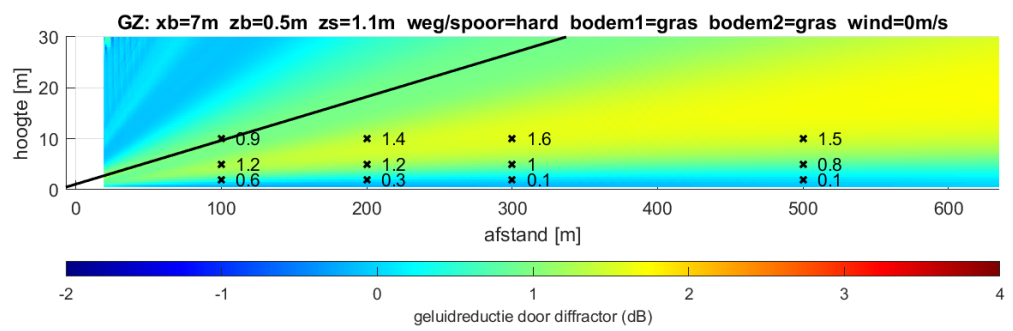












D Aanvullende grafieken voor versie 3 van de rekenregel

Deze bijlage presenteert grafieken waarin resultaten van FEM-PE worden vergeleken met resultaten van versie 3 van de rekenregel.

De grafieken in Figuur D.1 tonen de puntenwolken uit Figuur 3.26 op een alternatieve manier. De geluidreductie door de diffractor is nu niet uitgezet tegen het Fresnelgetal, maar het resultaat van FEM-PE is uitgezet tegen het resultaat van versie 3 van de rekenregel. De punten voor de 42 scenario's en 12 waarnemerposities liggen rond de diagonaal (voor 125-2000 Hz). Dit betekent dat er een goede overeenstemming is tussen FEM-PE en de rekenregel.

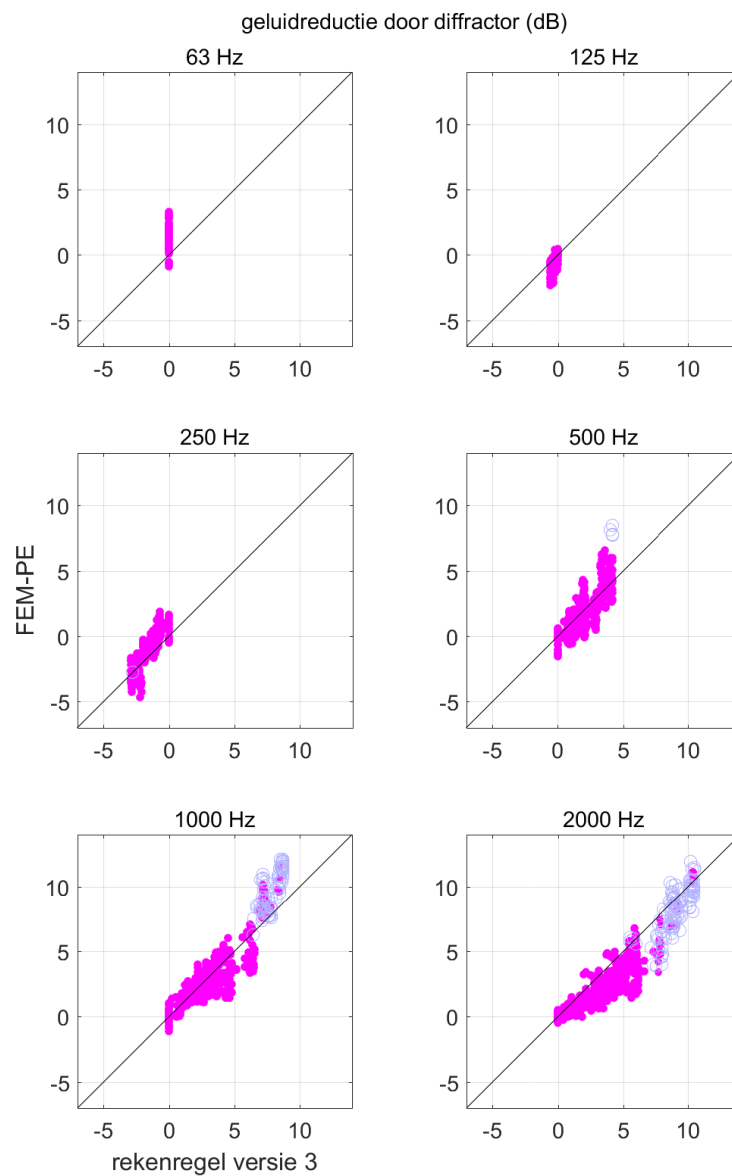
De figuren D.2-D.4 zijn ook vergelijkbaar met Figuur 3.26, alleen zijn nu niet de resultaten weergegeven voor de 12 waarnemerposities uit Figuur 3.15:

- $R_w = 100, 200, 300, 500\text{m}$ (afstand Whiswall-waarnemer; $R_w = x_w + 15$),
- $z_w = 2, 5, 10\text{ m}$ (hoogte waarnemer),

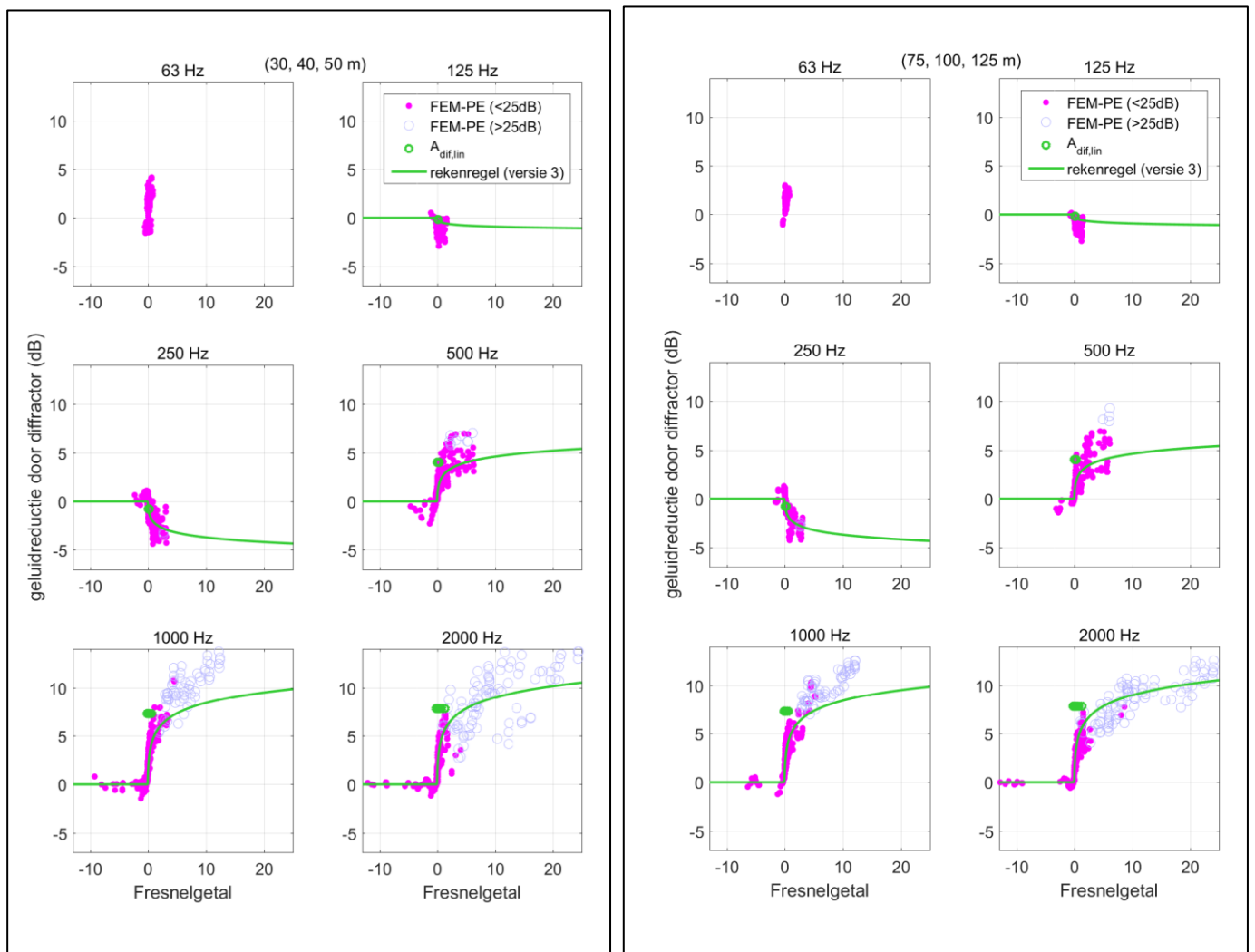
maar zijn vijf andere groepen van waarnemerposities gekozen:

- a) $R_w = 30, 40, 50\text{ m}$, $z_w = 2, 5, 10\text{ m}$ (Figuur D.2),
- b) $R_w = 75, 100, 125\text{ m}$, $z_w = 2, 5, 10\text{ m}$ (Figuur D.2),
- c) $R_w = 175, 200, 225\text{ m}$, $z_w = 2, 5, 10\text{ m}$ (Figuur D.3),
- d) $R_w = 275, 300, 325\text{ m}$, $z_w = 2, 5, 10\text{ m}$ (Figuur D.3),
- e) $R_w = 475, 500, 525\text{ m}$, $z_w = 2, 5, 10\text{ m}$ (Figuur D.4).

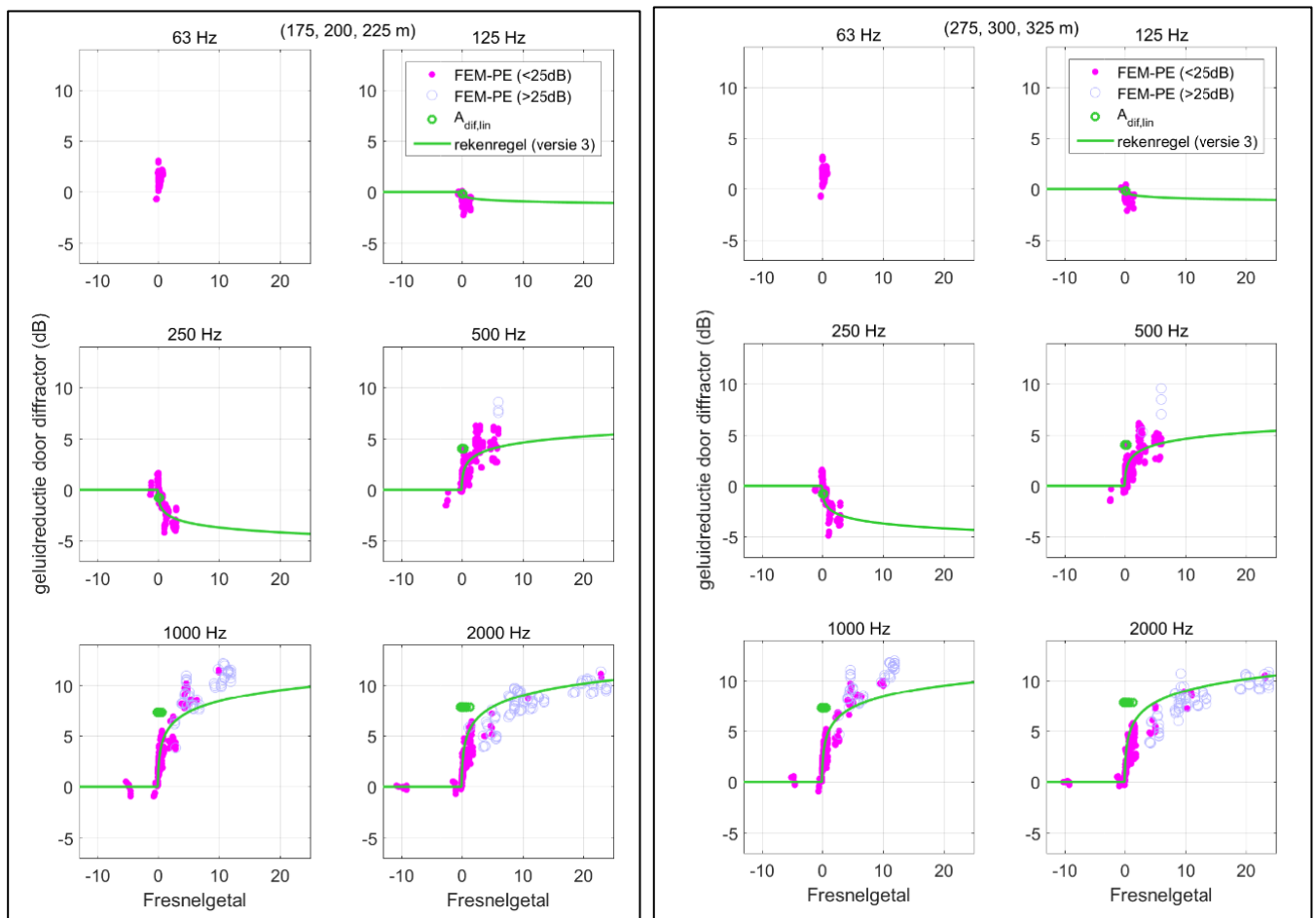
Het idee hierbij is om op deze manier te bepalen of toevoeging van een afstandsafhankelijke correctieterm aan de rekenregel leidt tot een betere overeenstemming met FEM-PE. Dit blijkt niet het geval. De overeenstemming tussen FEM-PE en de rekenregel zonder zo'n correctieterm is goed voor alle vijf de groepen van waarnemerafstanden.



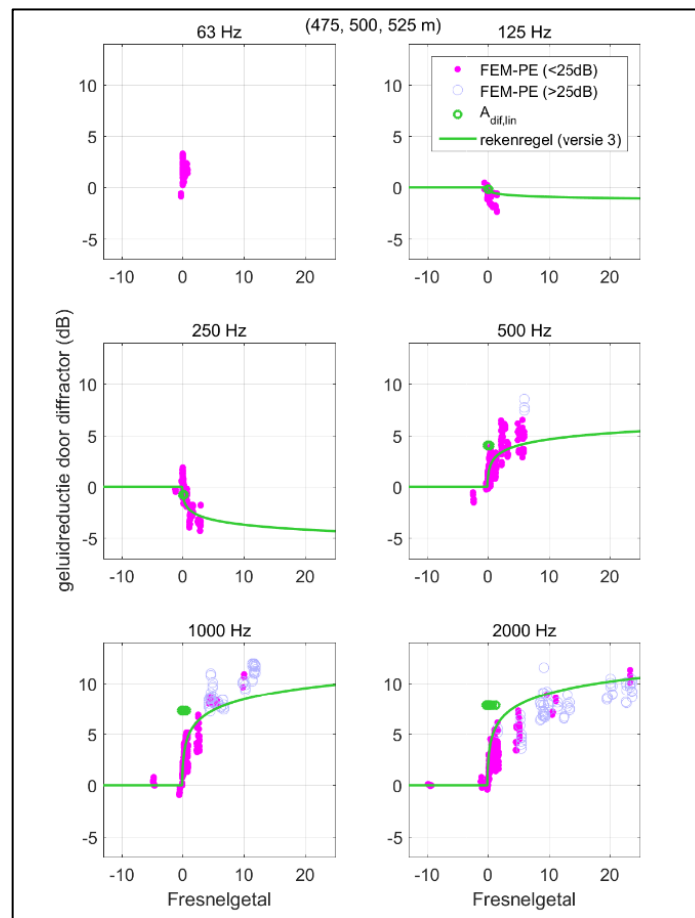
Figuur D.1 Resultaten van FEM-PE versus resultaten van versie 3 van de rekenregel, voor de 42 scenario's en 12 waarnemerposities. De symbolen zijn zoals in Figuur 3.26.



Figuur D.2 Als Figuur 3.26, maar nu voor 9 waarnemerposities met $R_w=30\text{-}50\text{ m}$ (links) en $R_w=75\text{-}125\text{ m}$ (rechts).



Figuur D.3 Als Figuur 3.26, maar nu voor 9 waarnemerposities met $R_w=175\text{-}225\text{ m}$ (links) en $R_w=275\text{-}325\text{ m}$ (rechts).



Figuur D.4 Als Figuur 3.26, maar nu voor 9 waarnemerposities met $R_w=475-525$ m.

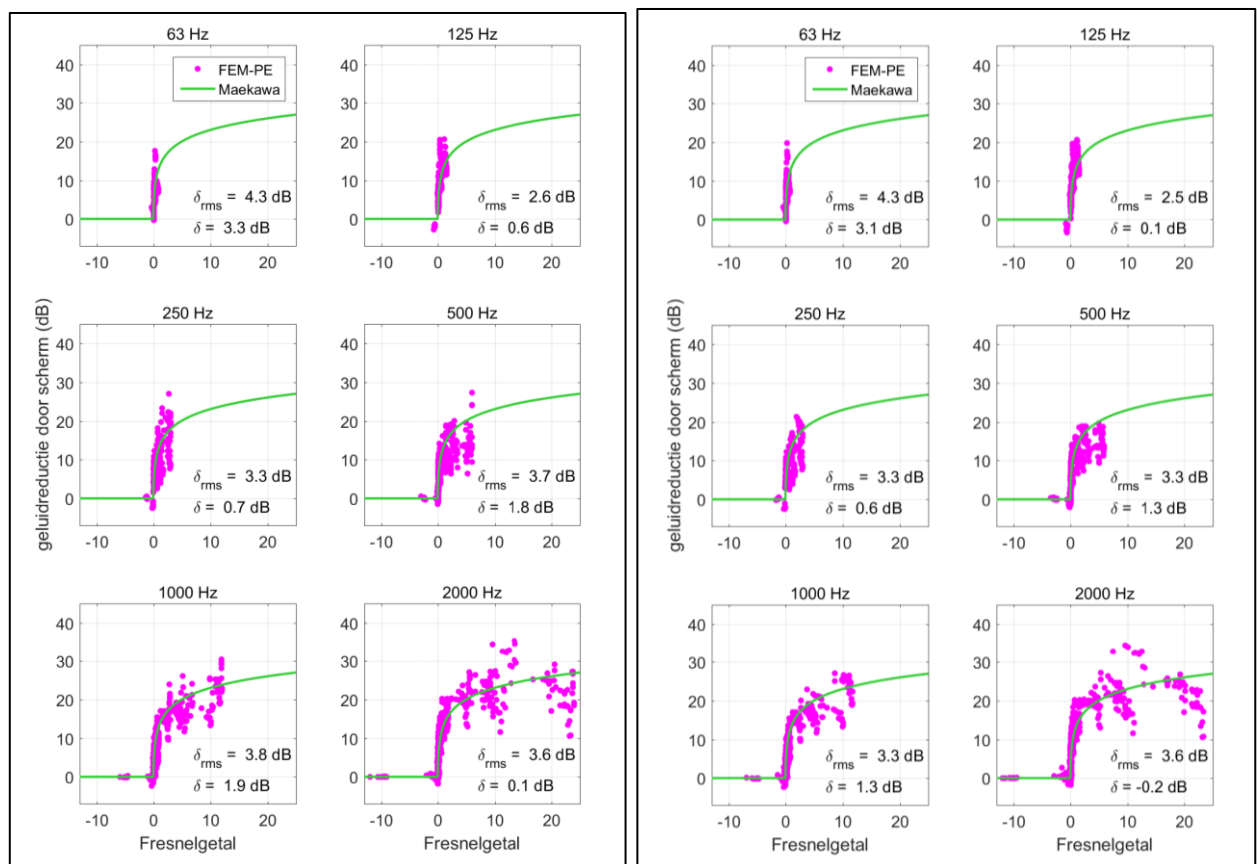
E Grafieken voor de analyse in hoofdstuk 4: schermwerking

In deze bijlage staan grafieken voor een analyse van de geluidreductie door het scherm (zonder diffractor). Deze grafieken geven een indruk van de spreiding van resultaten van FEM-PE rond de voorspelling volgens Maekawa en SRM2. Met Maekawa wordt alleen de schermwerking bepaald. Met SRM2 wordt de tussenschakelverzwakking bepaald, inclusief de invloed van de bodem.

Figuur E.1 toont de schermwerking volgens Maekawa en volgens FEM-PE voor de 42 scenario's, met 12 ontvangers op afstanden 100, 200, 300, 500 m, en twee keuzes voor de drie hoogtes: i) 2, 5, 10 m, en ii) 5, 10, 15 m. Het idee was dat met de tweede keuze de spreiding misschien kleiner is dan met de eerste keuze. Dit blijkt niet het geval. De spreiding wordt gerepresenteerd door de afwijking van Maekawa, op twee manieren:

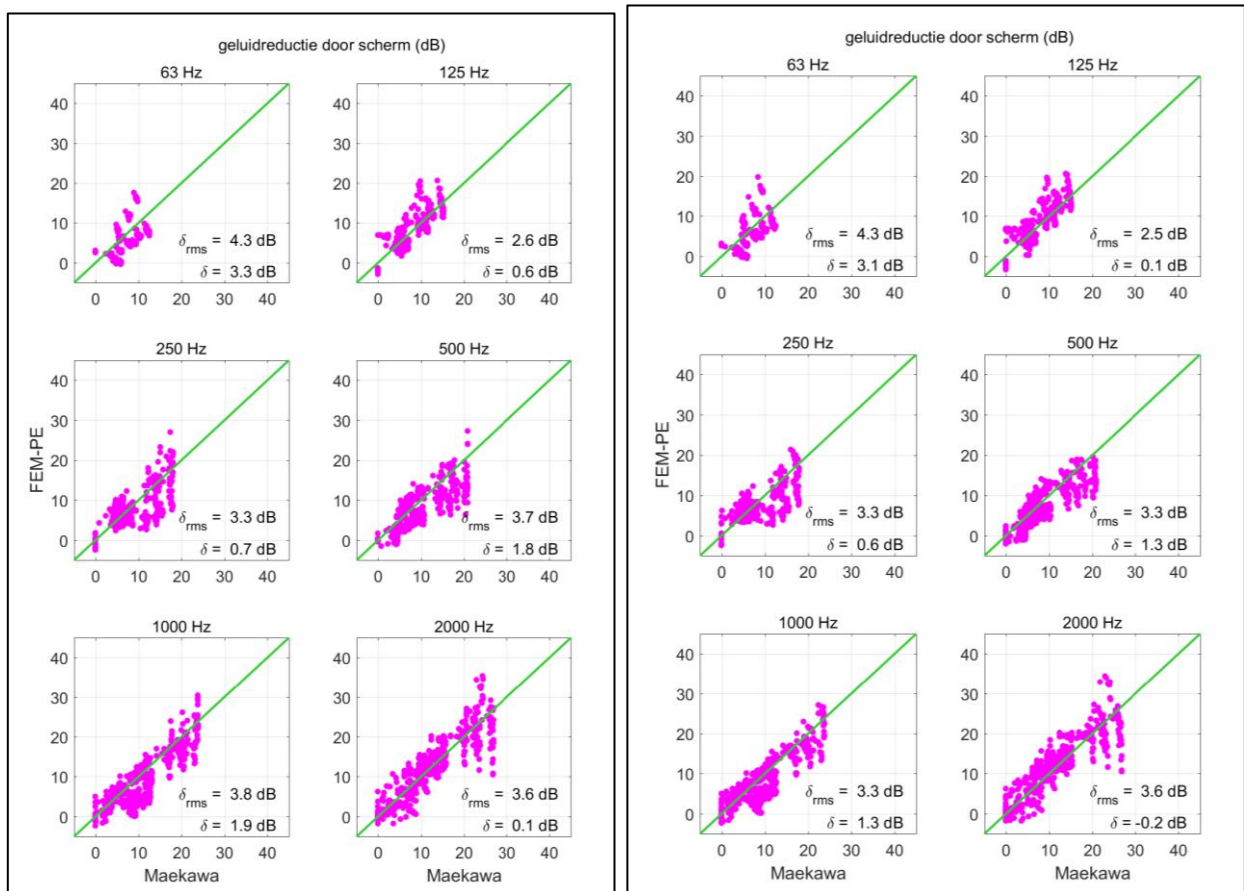
- δ_{rms} = de rms-waarde van het verschil in geluidreductie tussen FEM-PE en Maekawa,
- δ = de geluidreductie volgens Maekawa minus de geluidreductie volgens FEM-PE.

De waarden van δ_{rms} en δ zijn in de grafieken gegeven.



Figuur E.1 Schermwerking volgens Maekawa en volgens FEM-PE voor de 42 scenario's, met 12 ontvangers op afstanden 100, 200, 300, 500 m, en hoogtes 2, 5, 10 m (links) of 5, 10, 15 m (rechts).

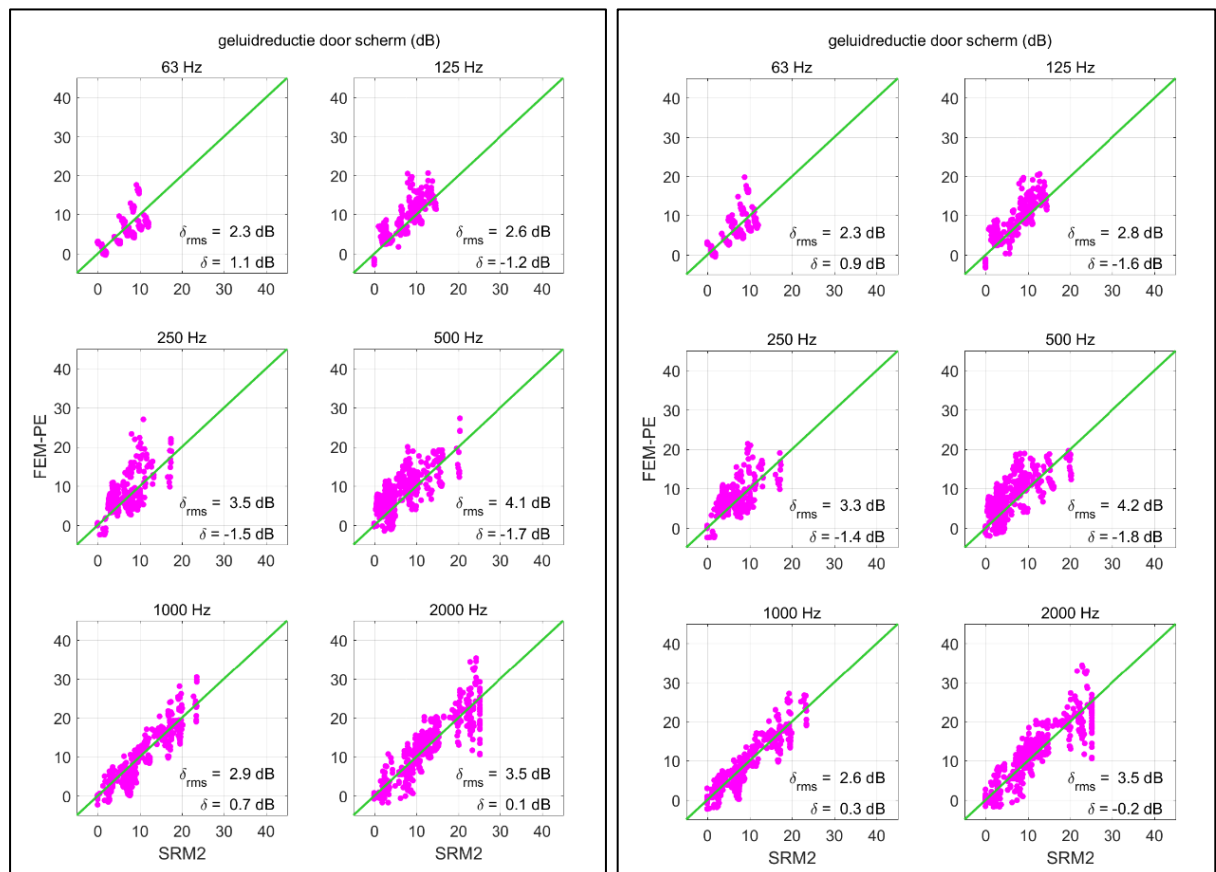
Figuur E.2 toont de resultaten uit Figuur E1 op een andere manier, met horizontaal de waarde volgens Maekawa en verticaal de waarde volgens FEM-PE.



Figuur E.2 Alternatieve representatie van de resultaten uit Figuur E1, met horizontaal de waarde volgens Maekawa en verticaal de waarde volgens FEM-PE. Links voor ontvangerhoogtes 2, 5, 10 m. Rechts voor ontvangerhoogtes 5, 10, 15 m.

Tenslotte hebben de vergelijking in Figuur E.2 herhaald waarbij de schermwerking volgens Maekawa is vervangen door de waarde van de geluidreductie volgens SRM2. De geluidreductie volgens SRM2 bestaat uit twee bijdragen: i) de schermwerking volgens een formule die een benadering is van de formule van Maekawa, en ii) een verandering van de invloed van de bodem op de geluiduitbreiding. De waarde volgens SRM2 is dus een tussenschakelverzwakking.

Het resultaat is weergegeven in Figuur E.3. De spreiding is niet echt kleiner dan in Figuur E.2. Kennelijk geeft SRM2 geen significante verbetering door rekening te houden met de verandering van het bodemeffect.



Figuur E.3 Als Figuur E.2 maar nu met horizontaal de tussenschakelverzwakking volgens SRM2. Links voor ontvangerhoogtes 2, 5, 10 m. Rechts voor ontvangerhoogtes 5, 10, 15 m.

F Grafieken voor de analyse in hoofdstuk 4: effect van de diffractor

In deze bijlage presenteren we grafieken voor een analyse van de geluidreductie door de diffractor, zowel de originele diffractor als de LF-diffractor. Net als in bijlage E zijn we uitgegaan van de twee keuzes voor de ontvangerhoogtes: i) 2, 5, 10 m, en ii) 5, 10, 15 m. In de grafieken is ook telkens de voorspelling van de rekenregel voor het diffractor-effect weergegeven, als groene lijnen (het 'diffractor-effect' is de geluidreductie door de diffractor).

We zijn in eerste instantie uitgegaan van versie 3 van de rekenregel, met vaste waarden van 0.2 en 0.05 voor de coëfficiënt. De coëfficiënt wordt met symbool F aangeduid. Dus voor versie 3 geldt:

- $F = 0.2$ voor $A_{\text{dif,lin}} < 0$
- $F = 0.05$ voor $A_{\text{dif,lin}} \geq 0$

We hebben de FEM-PE resultaten vergeleken met de rekenregel zowel voor tertsbanden als voor octaafbanden. De afwijking van de rekenregel hebben we gerepresenteerd op twee manieren:

- δ_{rms} = de rms-waarde van het verschil in diffractor-effect tussen FEM-PE en de rekenregel,
- δ = het diffractor-effect volgens de rekenregel minus het diffractor-effect volgens FEM-PE.

De waarden van δ_{rms} en δ zijn in de grafieken gegeven.

Figuur F.1 toont de vergelijking tussen FEM-PE en de rekenregel in tertsbanden. Hierbij zijn we voor de rekenregel dus uitgegaan van vaste waarden van 0.2 en 0.05 voor de coëfficiënt F .

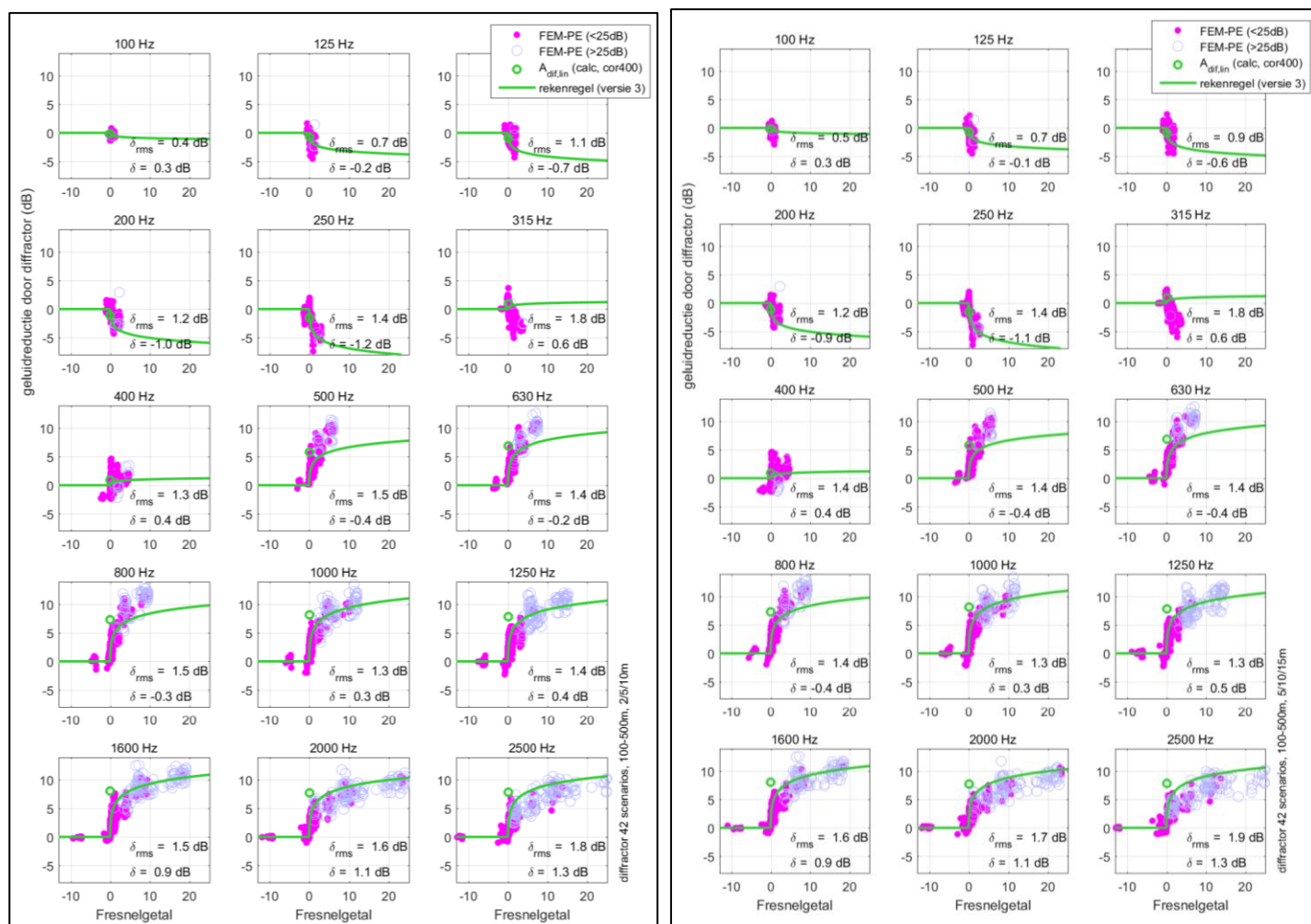
Figuur F.2 is als Figuur F.1, maar nu hebben we de coëfficiënten F van de rekenregel per tertsband geoptimaliseerd, zodanig dat de waarde van δ_{rms} minimaal is. De geoptimaliseerde waarden van F staan in de grafieken, en zijn ook apart weergegeven in Tabel F.1.

Figuren F4-F6 zijn als figuren F.1-F.3, maar nu voor de LF-diffractor. De waarden van F , δ_{rms} en δ uit de figuren F.3 en F.6 zijn ook gegeven in de tabellen F.1-F.4.

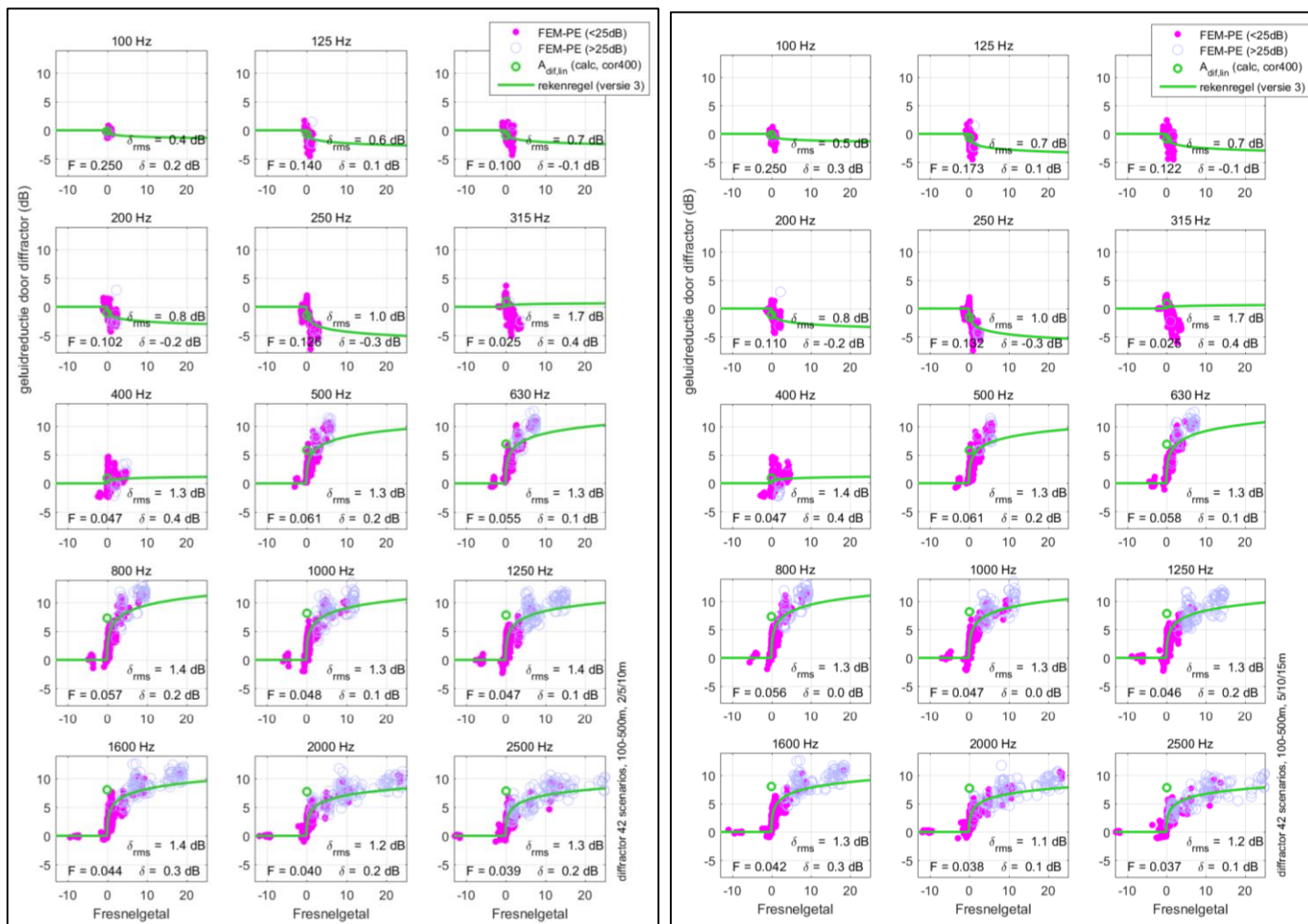
Figuren F7-F10 tonen de vergelijking tussen FEM-PE en de rekenregel in octaven in plaats van tertsen, voor de originele diffractor. Figuren F.11-F.14 tonen dezelfde vergelijking voor de LF-diffractor.

We concluderen dat de keuze tussen ontvangerhoogtes 2, 5, 10 m en 5, 10, 15 m geen significant verschil geeft voor de nauwkeurigheid. Verder blijkt het voordeel van rekenen via de tertsen nihil. De toename in nauwkeurigheid door optimalisatie van F is ook vrij beperkt.

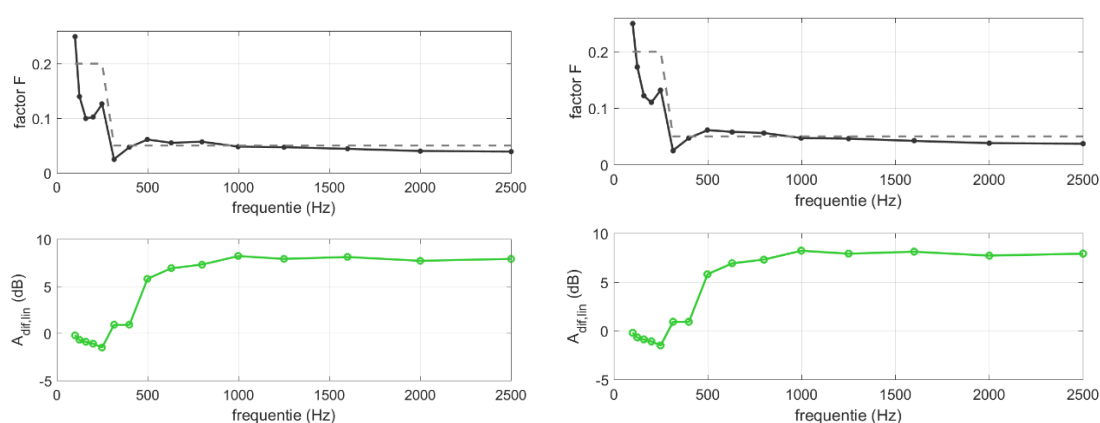
Figuren F.15-F.22 zijn analoog aan de figuren F7-F14, maar nu voor ontvangers op afstanden 30, 40, 50 in plaats van 100, 200, 300, 500 m (net als in bijlage D). Ook voor 30-50 m vinden we een goede overeenstemming tussen FEM-PE en de rekenregel. Voor de rekenregel met optimalisatie van F is hierbij voor de optimalisatie uitgegaan van het interval 100-500 m.



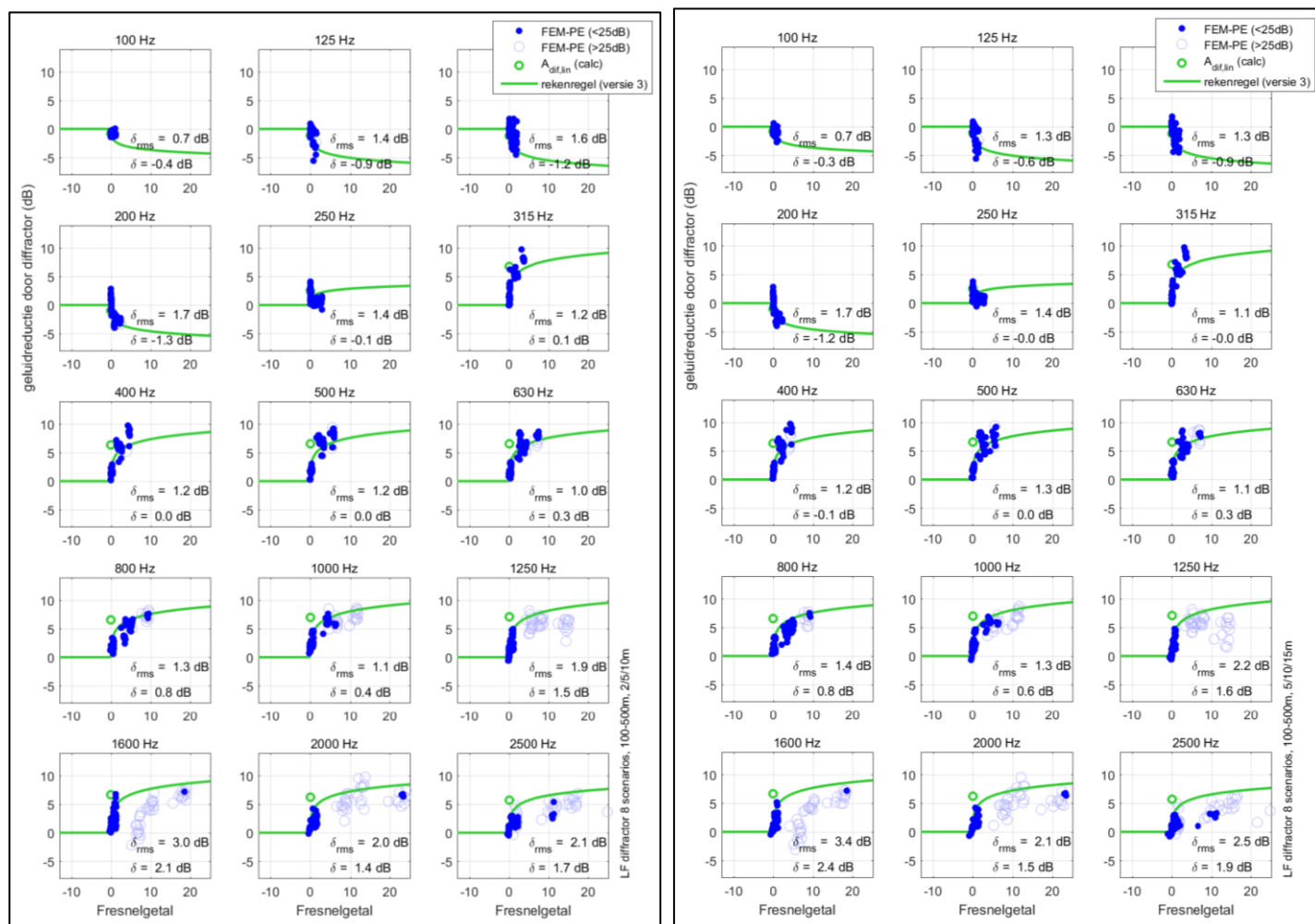
Figuur F.1 Vergelijking van FEM-PE resultaten in tertsen met de rekenregel (versie 3) voor het diffractor-effect. De FEM-PE resultaten zijn bepaald voor 42 scenario's, met 12 ontvangerposities, op afstanden 100, 200, 300, en 500 m, en drie hoogtes: 2, 5, 10 m (links) of 5, 10, 15 m (rechts).



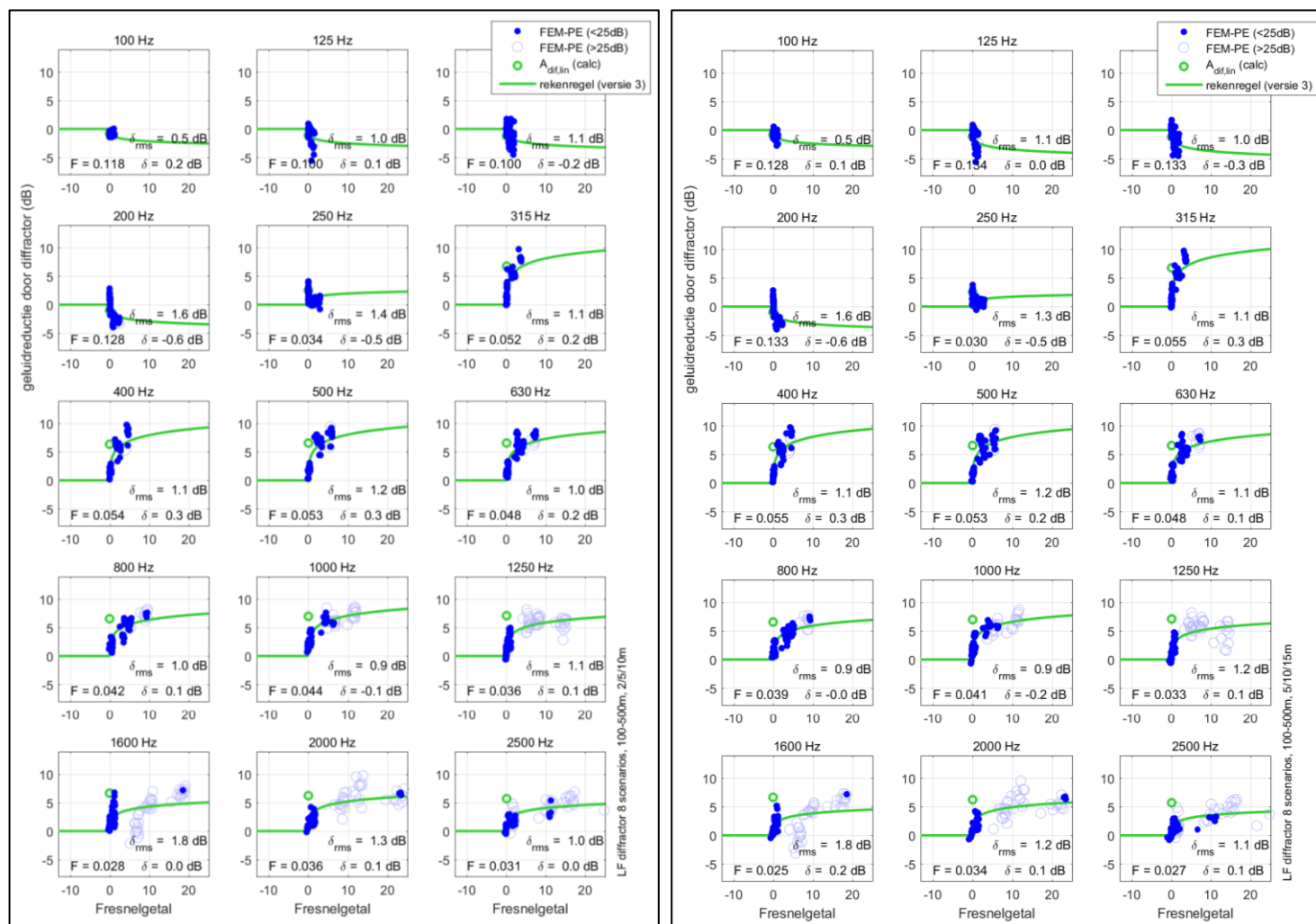
Figuur F.2 Als Figuur F.1, maar nu met optimalisatie van de coëfficiënten F van de rekenregel. De waarden van F staan in de grafieken.



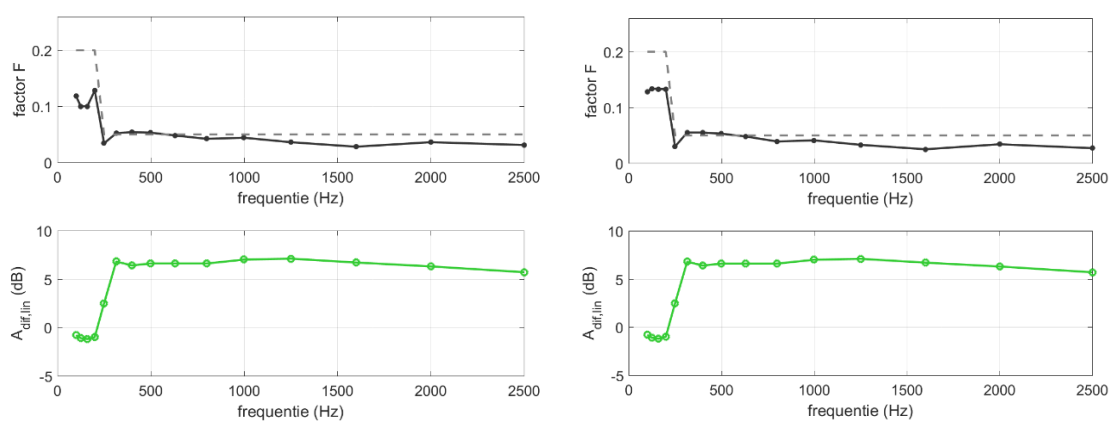
Figuur F.3 Waarden van de coëfficiënten F uit Figuur F.2, met hoogtes 2, 5, 10 m (links) en 5, 10, 15 m (rechts). De gebroken lijnen representeren de waarden 0.2 en 0.05 uit hoofdstuk 3. Ook weergegeven, met de groene lijn, zijn de bijbehorende waarden van A_{diff,lin}.



Figuur F.4 Als Figuur F.1 (met vaste coëfficiënten F), voor de LF-diffractor.



Figuur F.5 Als Figuur F.2 (met optimalisatie van de coëfficiënten F), voor de LF-diffractor.



Figuur F.6 Als Figuur F.3, voor de LF-diffractor.

Tabel F.1 Waardes van coëfficiënt F en δ_{rms} en δ , voor de originele diffractor (ontvangerhoogtes 2, 5, 10 m).

f (Hz)	A_{diffin} (dB)	F	d_{rms} (dB)	d (dB)	F	d_{rms} (dB)	d (dB)
100	-0.2	0.20	0.4	0.3	0.250	0.4	0.2
125	-0.7	0.20	0.7	-0.2	0.140	0.6	0.1
160	-0.9	0.20	1.1	-0.7	0.100	0.7	-0.1
200	-1.1	0.20	1.2	-1.0	0.102	0.8	-0.2
250	-1.5	0.20	1.4	-1.2	0.126	1.0	-0.3
315	0.9	0.05	1.8	0.6	0.025	1.7	0.4
400	0.9	0.05	1.3	0.4	0.047	1.3	0.4
500	5.8	0.05	1.5	-0.4	0.061	1.3	0.2
630	6.9	0.05	1.4	-0.2	0.055	1.3	0.1
800	7.3	0.05	1.5	-0.3	0.057	1.4	0.2
1000	8.2	0.05	1.3	0.3	0.048	1.3	0.1
1250	7.9	0.05	1.4	0.4	0.047	1.4	0.1
1600	8.1	0.05	1.5	0.9	0.044	1.4	0.3
2000	7.7	0.05	1.6	1.1	0.040	1.2	0.2
2500	7.9	0.05	1.8	1.3	0.039	1.3	0.2

Tabel F.2 Waardes van coëfficiënt F en δ_{rms} en δ , voor de originele diffractor (ontvangerhoogtes 5, 10, 15 m).

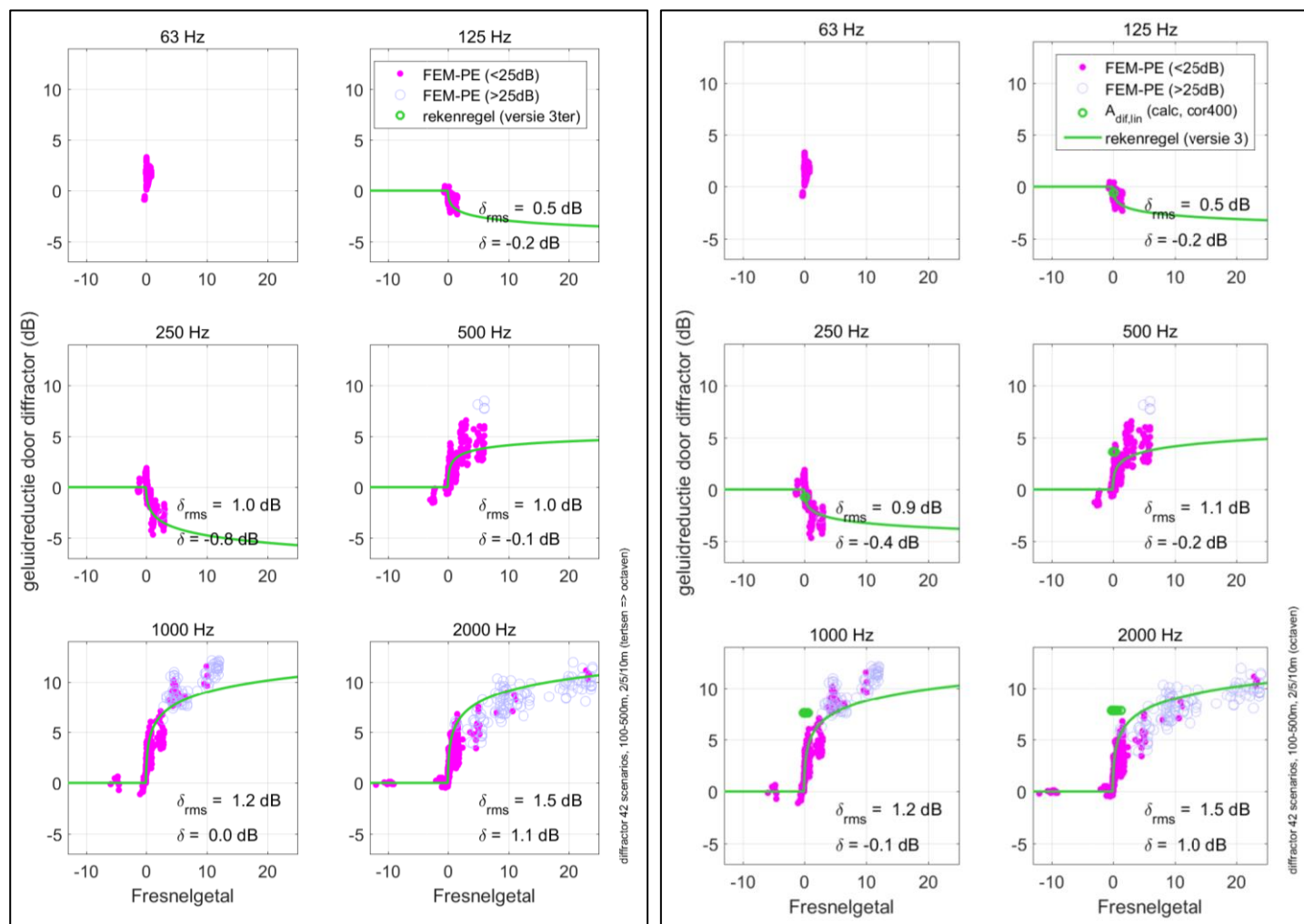
f (Hz)	A_{diffin} (dB)	F	d_{rms} (dB)	d (dB)	F	d_{rms} (dB)	d (dB)
100	-0.2	0.20	0.5	0.3	0.250	0.5	0.3
125	-0.7	0.20	0.7	-0.1	0.173	0.7	0.1
160	-0.9	0.20	0.9	-0.6	0.122	0.7	-0.1
200	-1.1	0.20	1.2	-0.9	0.110	0.8	-0.2
250	-1.5	0.20	1.4	-1.1	0.132	1.0	-0.3
315	0.9	0.05	1.8	0.6	0.025	1.7	0.4
400	0.9	0.05	1.4	0.4	0.047	1.4	0.4
500	5.8	0.05	1.4	-0.4	0.061	1.3	0.2
630	6.9	0.05	1.4	-0.4	0.058	1.3	0.1
800	7.3	0.05	1.4	-0.4	0.056	1.3	0.0
1000	8.2	0.05	1.3	0.3	0.047	1.3	0.0
1250	7.9	0.05	1.3	0.5	0.046	1.3	0.2
1600	8.1	0.05	1.6	0.9	0.042	1.3	0.3
2000	7.7	0.05	1.7	1.1	0.038	1.1	0.1
2500	7.9	0.05	1.9	1.3	0.037	1.2	0.1

Tabel F.3 Waardes van coëfficiënt F en δ_{rms} en δ , voor de LF-diffractor (ontvangerhoogtes 2, 5, 10 m).

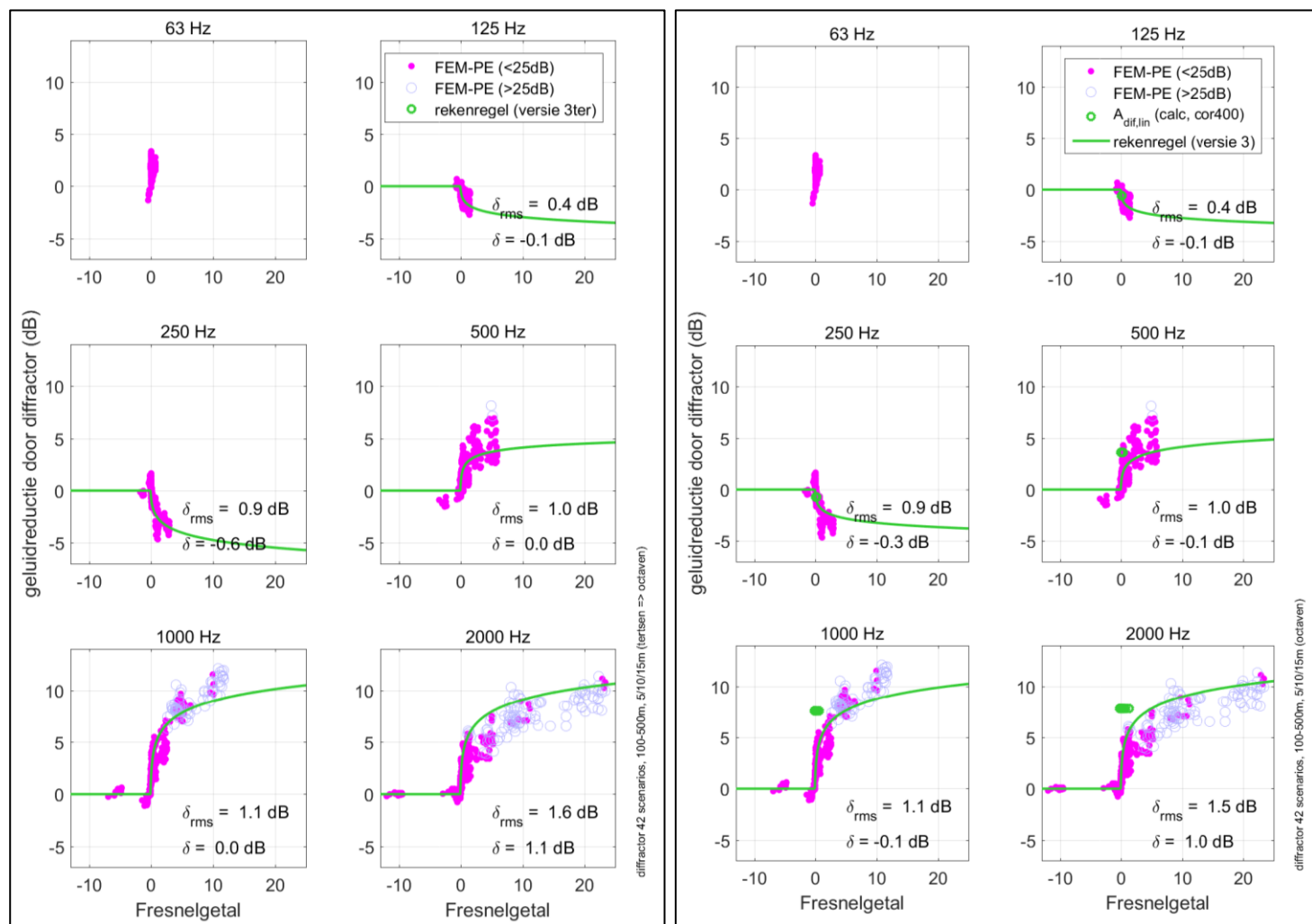
f (Hz)	A_{diffin} (dB)	F	d_{rms} (dB)	d (dB)	F	d_{rms} (dB)	d (dB)
100	-0.8	0.20	0.7	-0.4	0.118	0.5	0.2
125	-1.1	0.20	1.4	-0.9	0.100	1.0	0.1
160	-1.2	0.20	1.6	-1.2	0.100	1.1	-0.2
200	-1.0	0.20	1.7	-1.3	0.128	1.6	-0.6
250	2.5	0.05	1.4	-0.1	0.034	1.4	-0.5
315	6.8	0.05	1.2	0.1	0.052	1.1	0.2
400	6.4	0.05	1.2	0.0	0.054	1.1	0.3
500	6.6	0.05	1.2	0.0	0.053	1.2	0.3
630	6.6	0.05	1.0	0.3	0.048	1.0	0.2
800	6.6	0.05	1.3	0.8	0.042	1.0	0.1
1000	7.0	0.05	1.1	0.4	0.044	0.9	-0.1
1250	7.1	0.05	1.9	1.5	0.036	1.1	0.1
1600	6.7	0.05	3.0	2.1	0.028	1.8	0.0
2000	6.3	0.05	2.0	1.4	0.036	1.3	0.1
2500	5.7	0.05	2.1	1.7	0.031	1.0	0.0

Tabel F.4 Waardes van coëfficiënt F en δ_{rms} en δ , voor de LF- diffractor (ontvangerhoogtes 5, 10, 15 m).

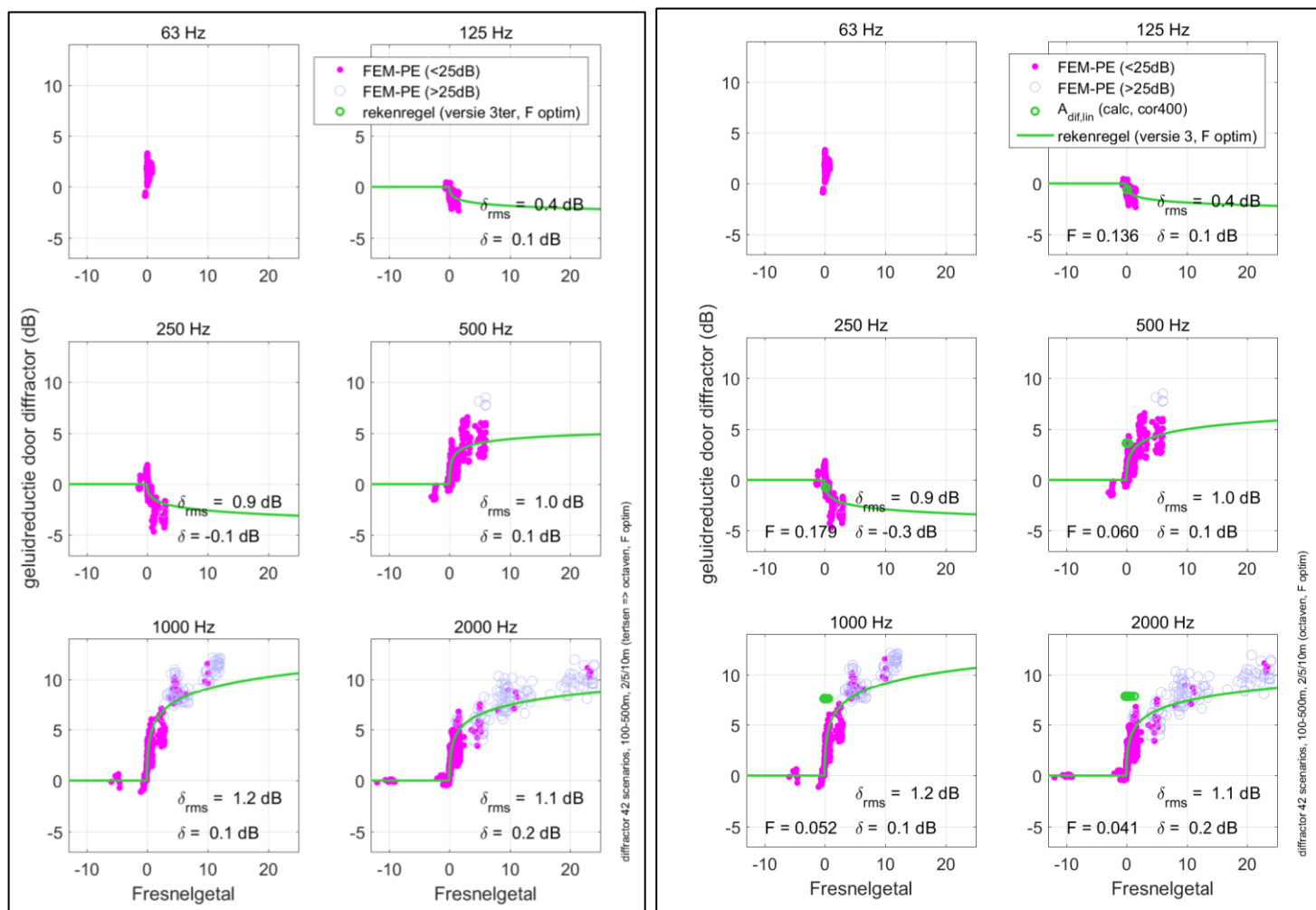
f (Hz)	A_{diffin} (dB)	F	d_{rms} (dB)	d (dB)	F	d_{rms} (dB)	d (dB)
100	-0.8	0.20	0.7	-0.3	0.128	0.5	0.1
125	-1.1	0.20	1.3	-0.6	0.134	1.1	0.0
160	-1.2	0.20	1.3	-0.9	0.133	1.0	-0.3
200	-1.0	0.20	1.7	-1.2	0.133	1.6	-0.6
250	2.5	0.05	1.4	-0.0	0.030	1.3	-0.5
315	6.8	0.05	1.1	-0.0	0.055	1.1	0.3
400	6.4	0.05	1.2	-0.1	0.055	1.1	0.3
500	6.6	0.05	1.3	0.0	0.053	1.2	0.2
630	6.6	0.05	1.1	0.3	0.048	1.1	0.1
800	6.6	0.05	1.4	0.8	0.039	0.9	-0.0
1000	7.0	0.05	1.3	0.6	0.041	0.9	-0.2
1250	7.1	0.05	2.2	1.6	0.033	1.2	0.1
1600	6.7	0.05	3.4	2.4	0.025	1.8	0.2
2000	6.3	0.05	2.1	1.5	0.034	1.2	0.1
2500	5.7	0.05	2.5	1.9	0.027	1.1	0.1



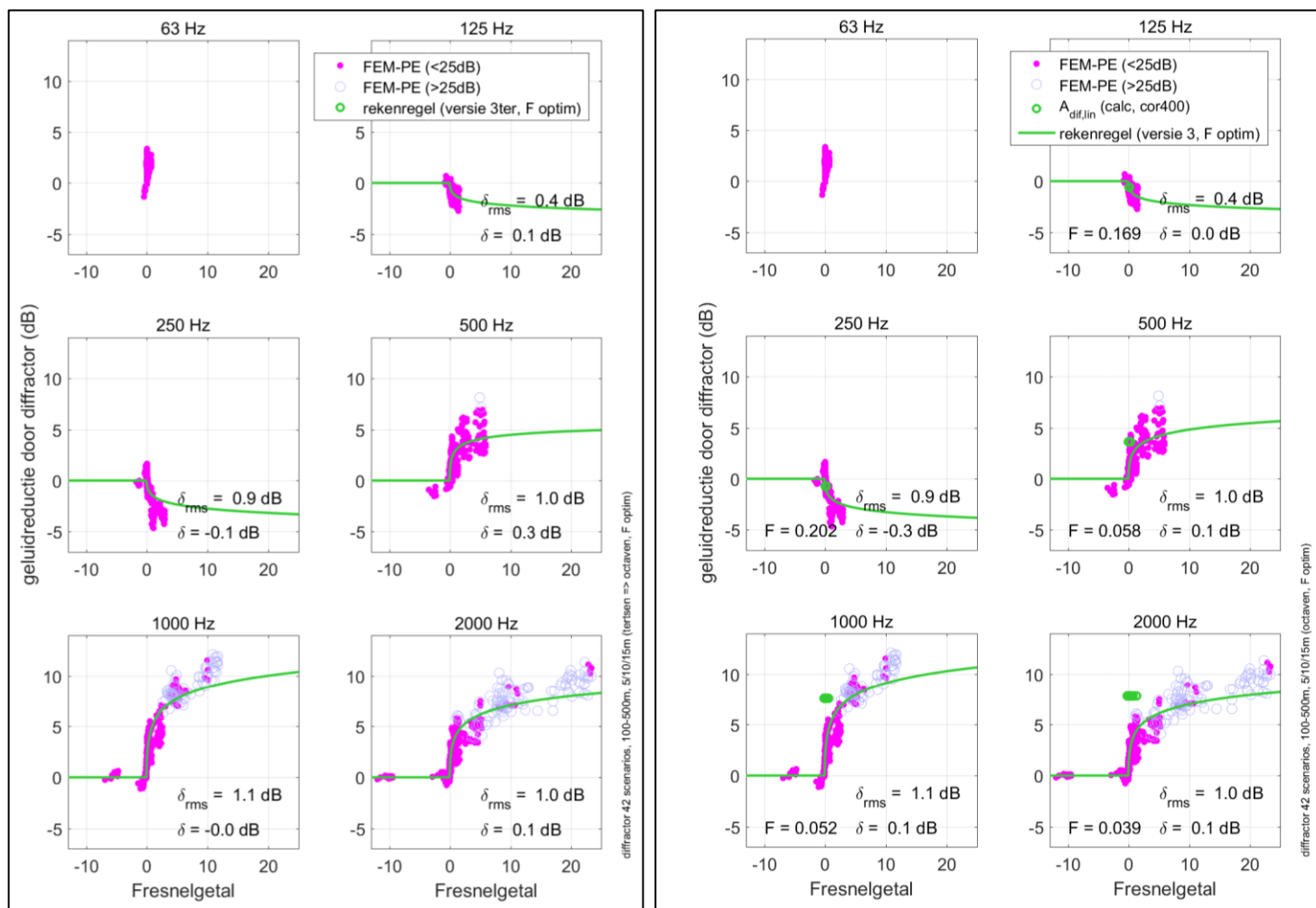
Figuur F.7 FEM-PE versus rekenregel voor de originele diffractor, in octaven, met ontvangerhoogtes 2, 5, 10 m, en vaste coëfficiënten F van 0.2 en 0.05. Links: rekenregel toegepast op tertsbandniveau en daarna geconverteerd naar octaven. Rechts: direct in octaven.



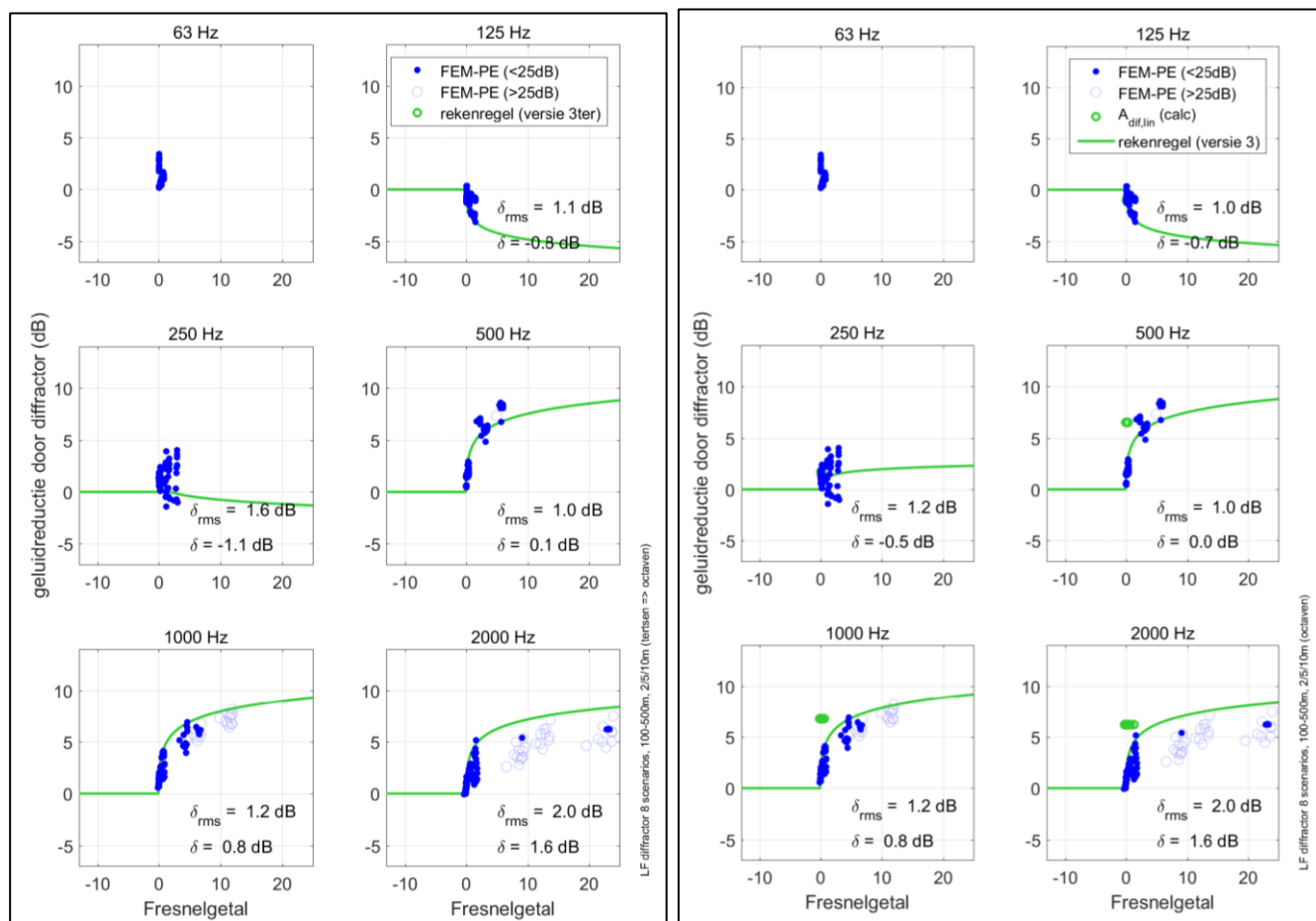
Figuur F.8 Als Figuur F.7, voor ontvangerhoogtes 5, 10, 15 m.



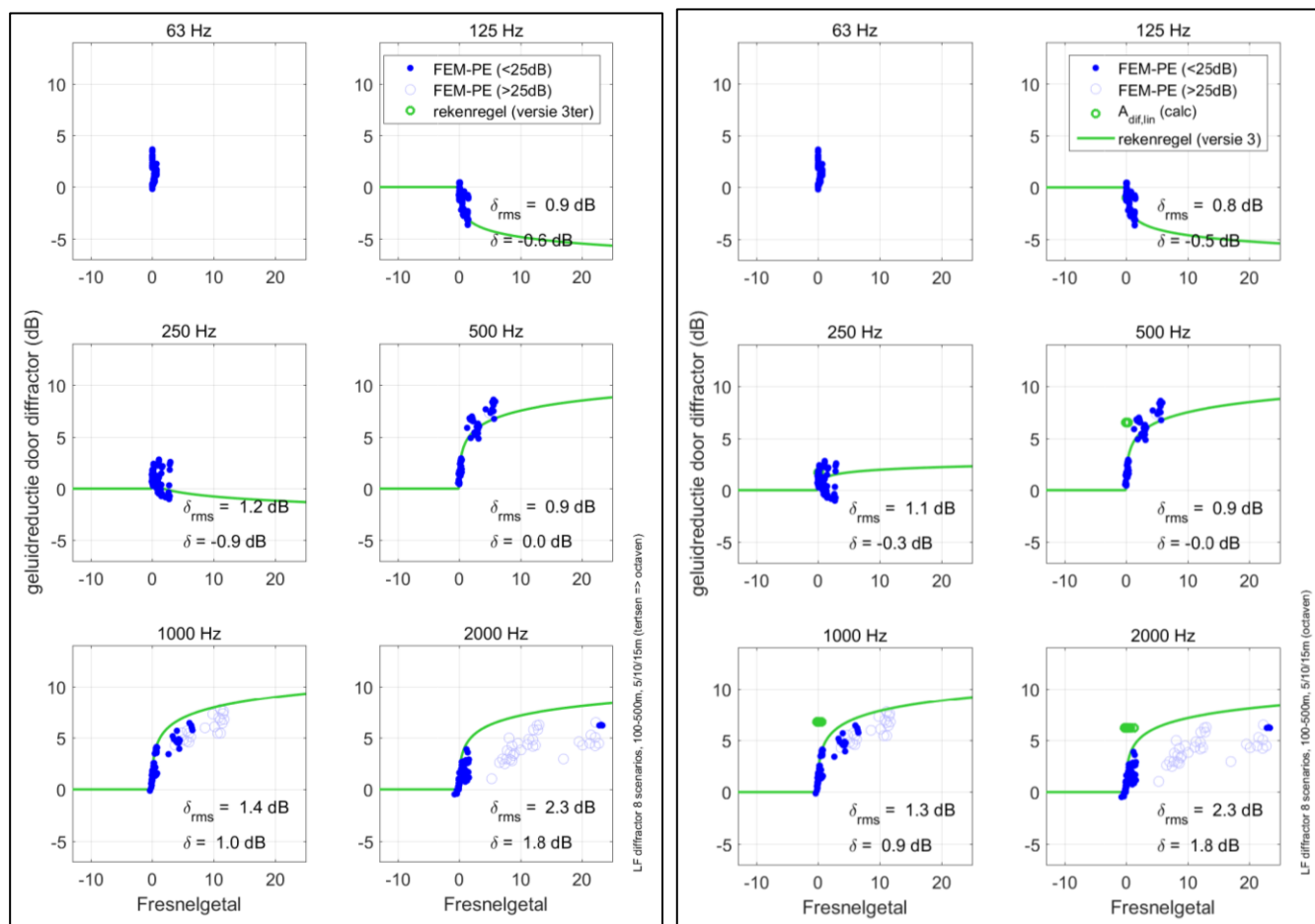
Figuur F.9 Als Figuur F.7, met optimalisatie van F.



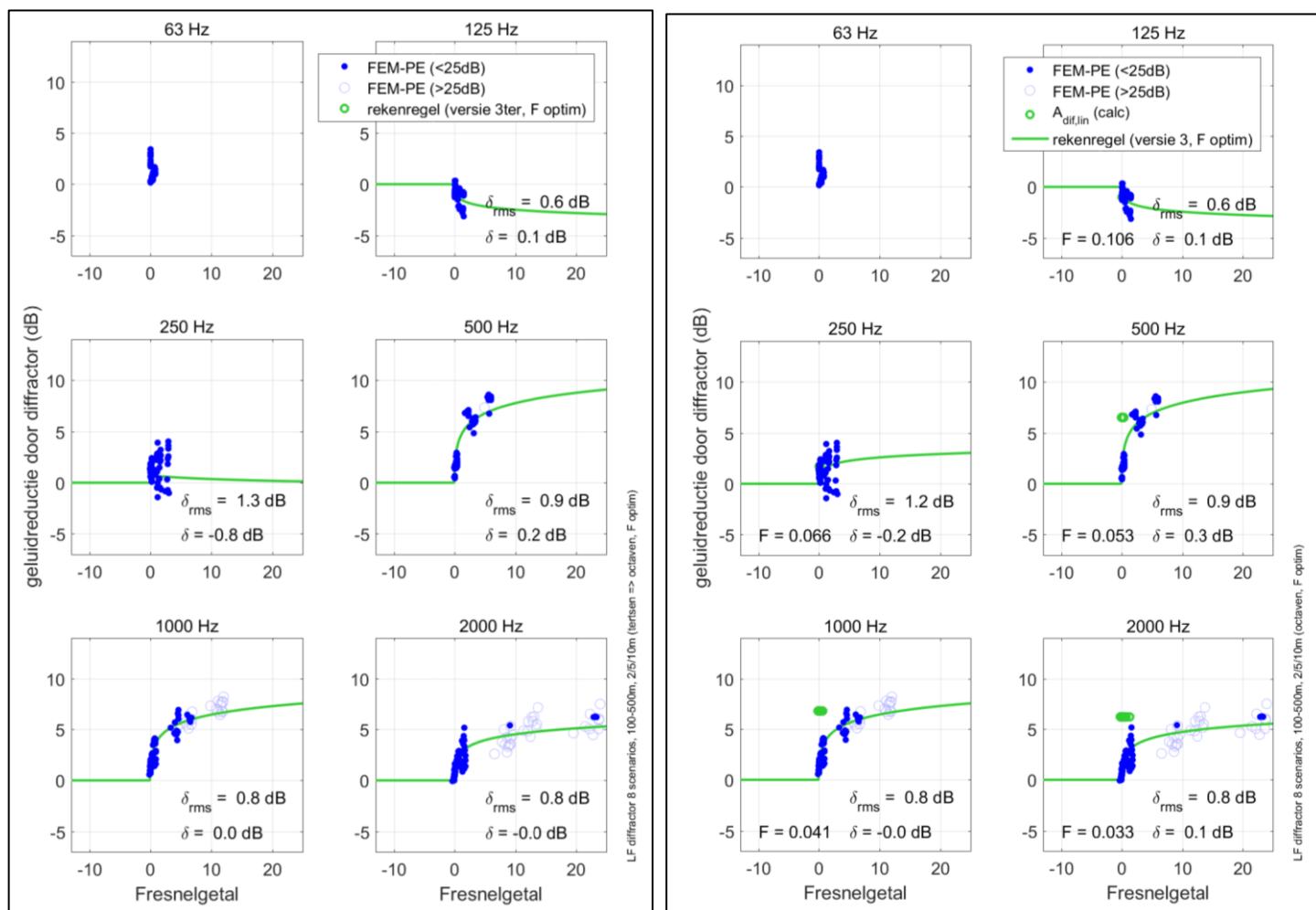
Figuur F.10 Als Figuur F.8, met optimalisatie van F.



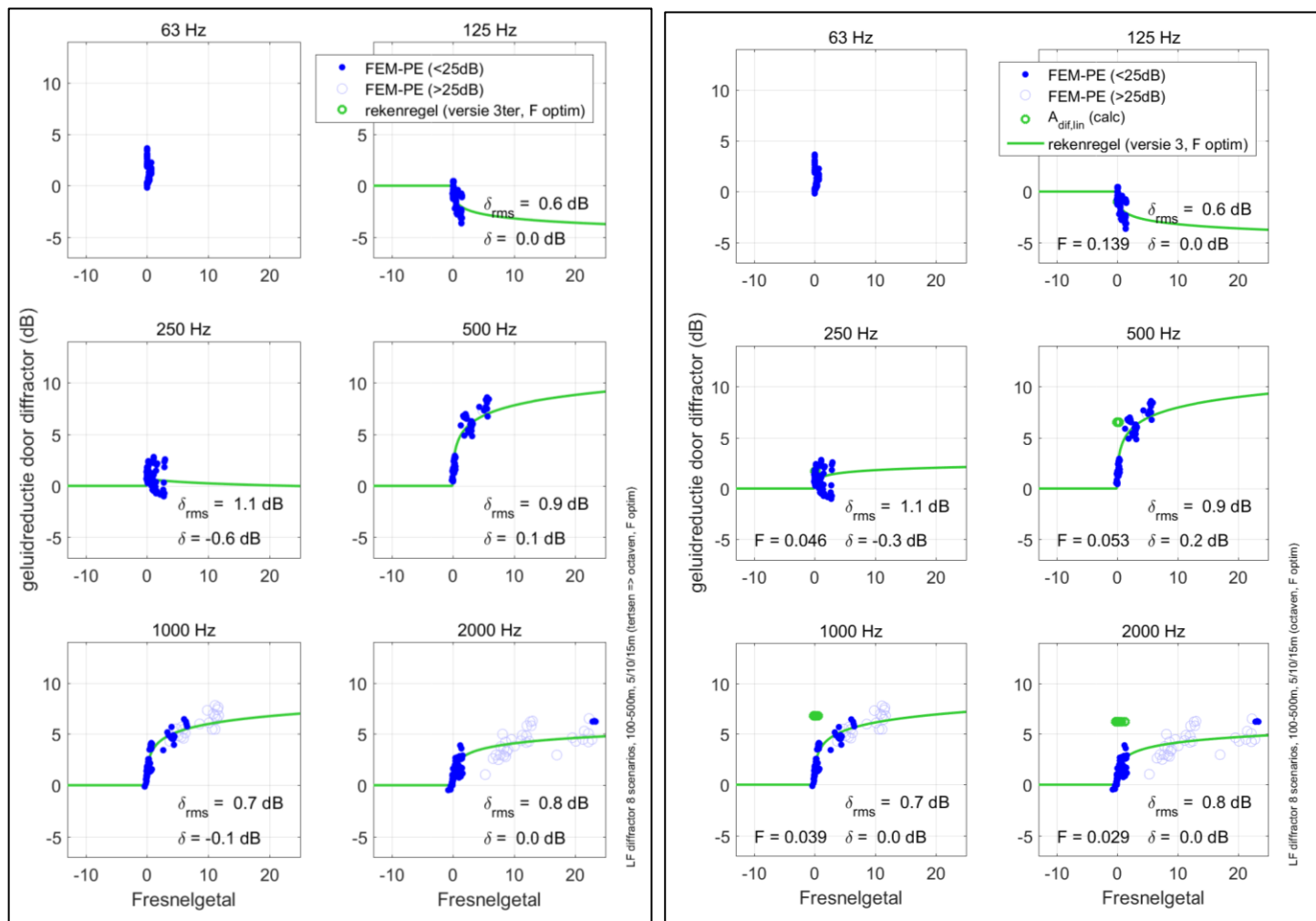
Figuur F.11 FEM-PE versus rekenregel voor de LF-diffractor, in octaven, met ontvangerhoogtes 2, 5, 10 m, en vaste coëfficiënten F van 0.2 en 0.05. Links: rekenregel toegepast op tertsbandniveau en daarna geconverteerd naar octaven. Rechts: direct in octaven.



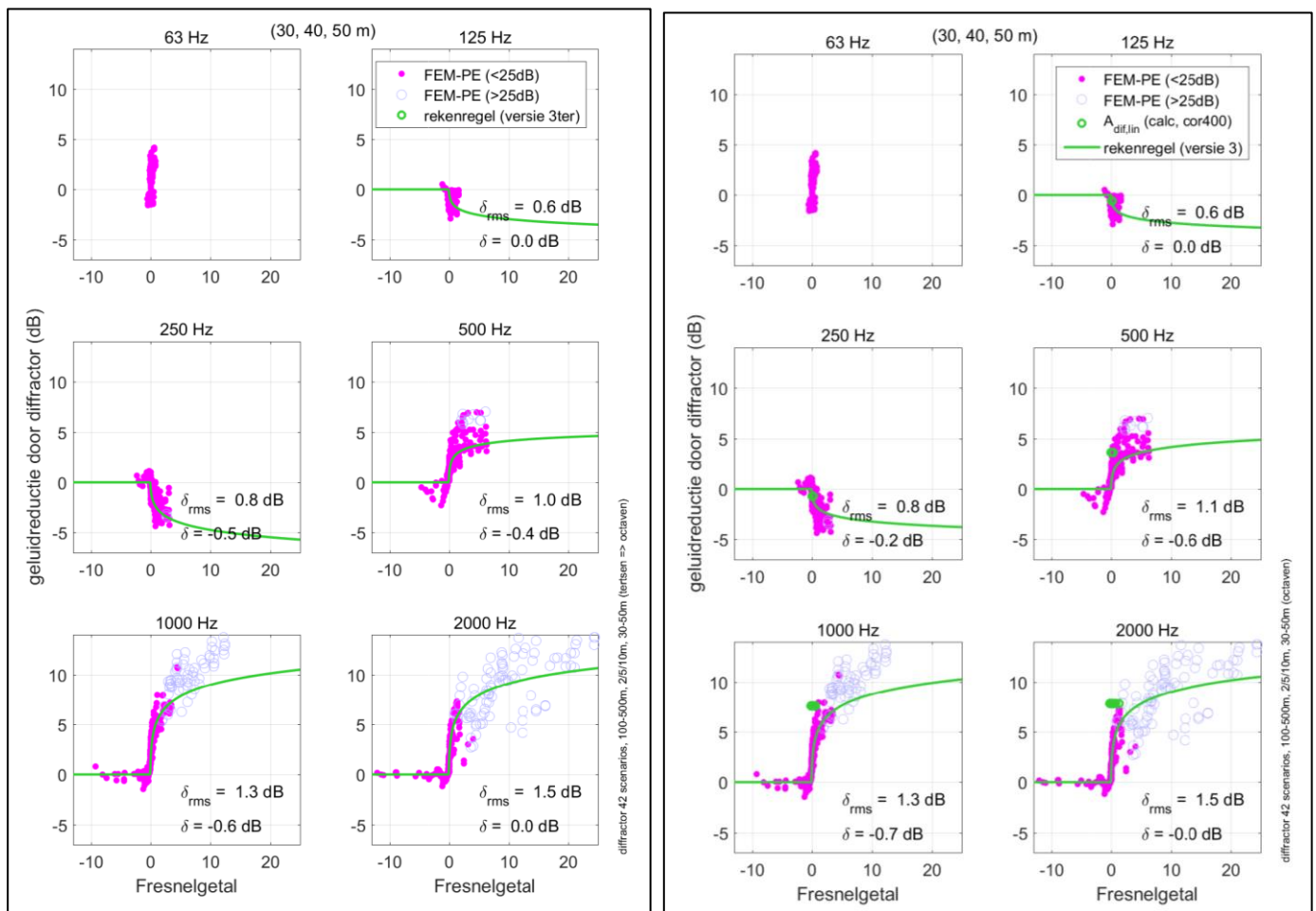
Figuur F.12 Als Figuur F.11, voor ontvangerhoogtes 5, 10, 15 m.



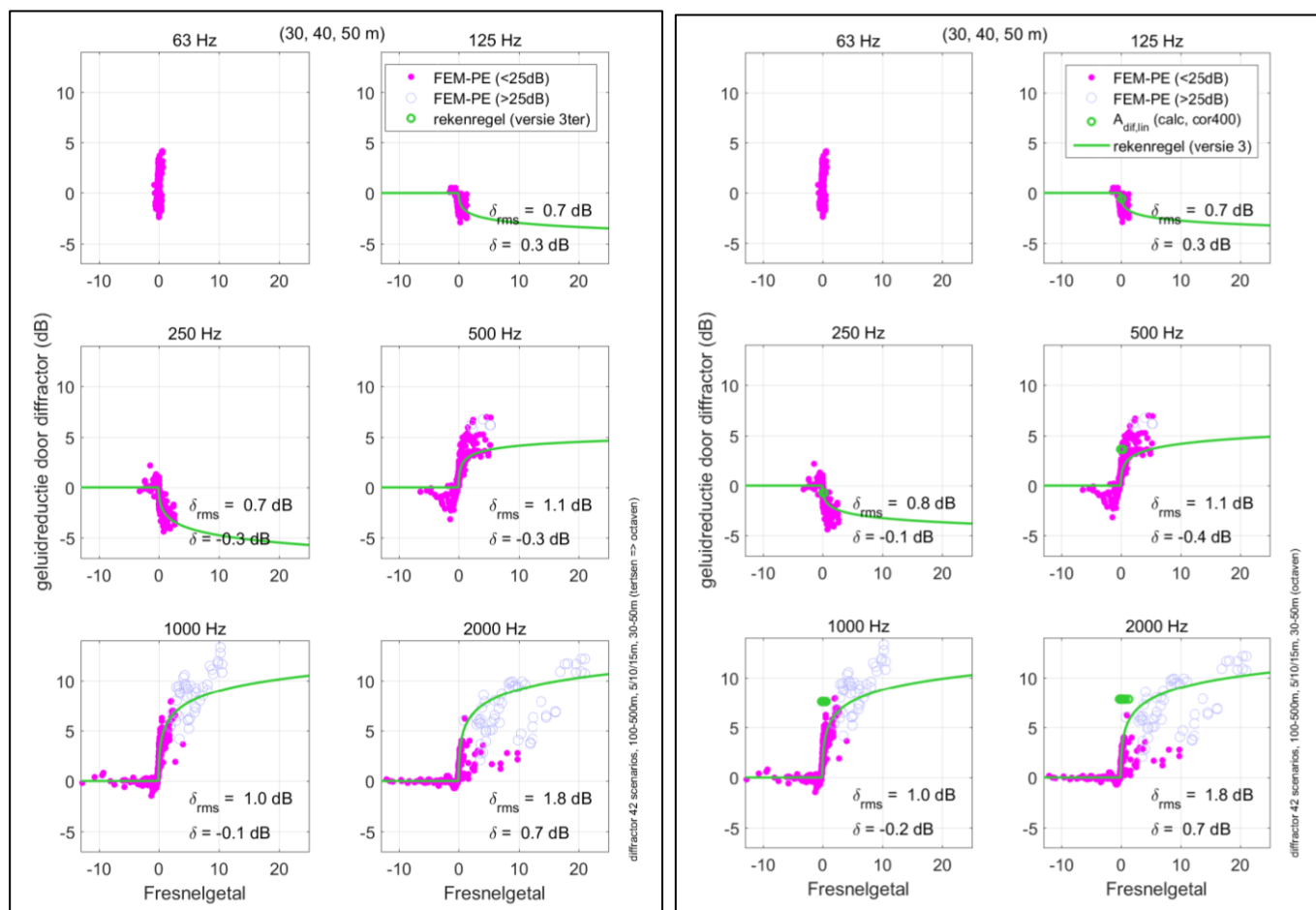
Figuur F.13 Als Figuur F.11, met optimalisatie van F.



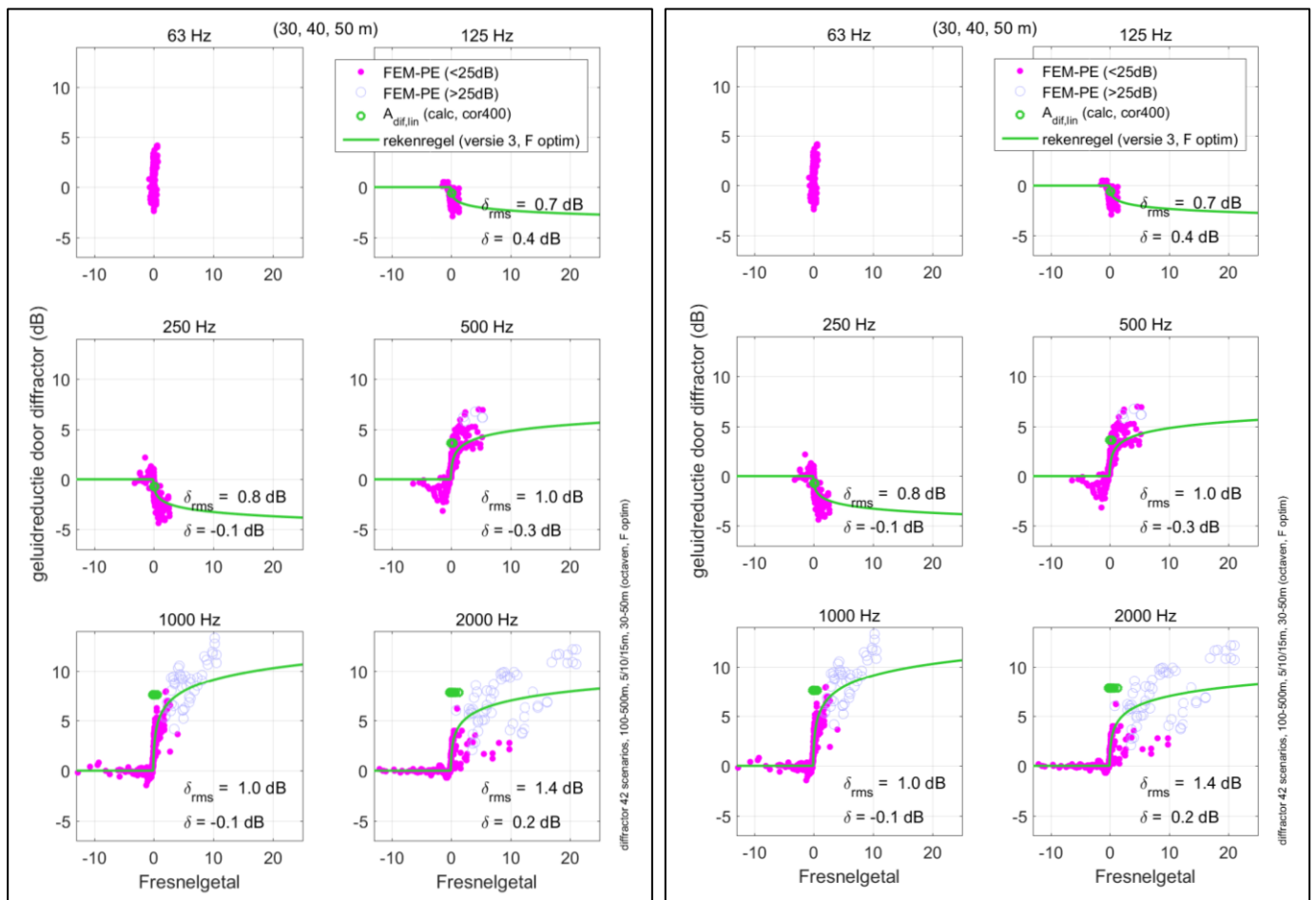
Figuur F.14 Als Figuur F.12, met optimalisatie van F.



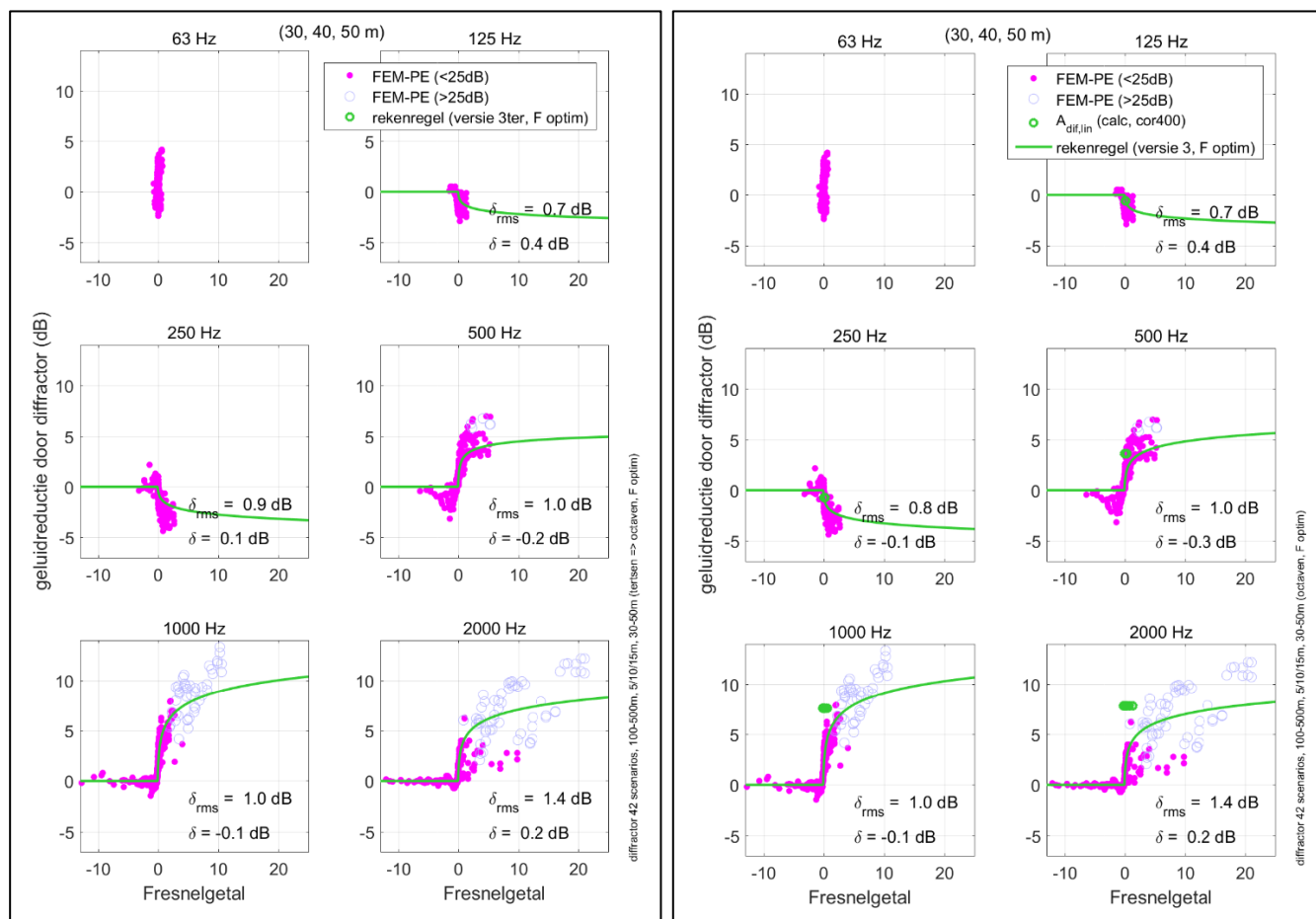
Figuur F.15 Als Figuur F.7, voor ontvangers op afstanden 30-50 m in plaats van 100-500 m.



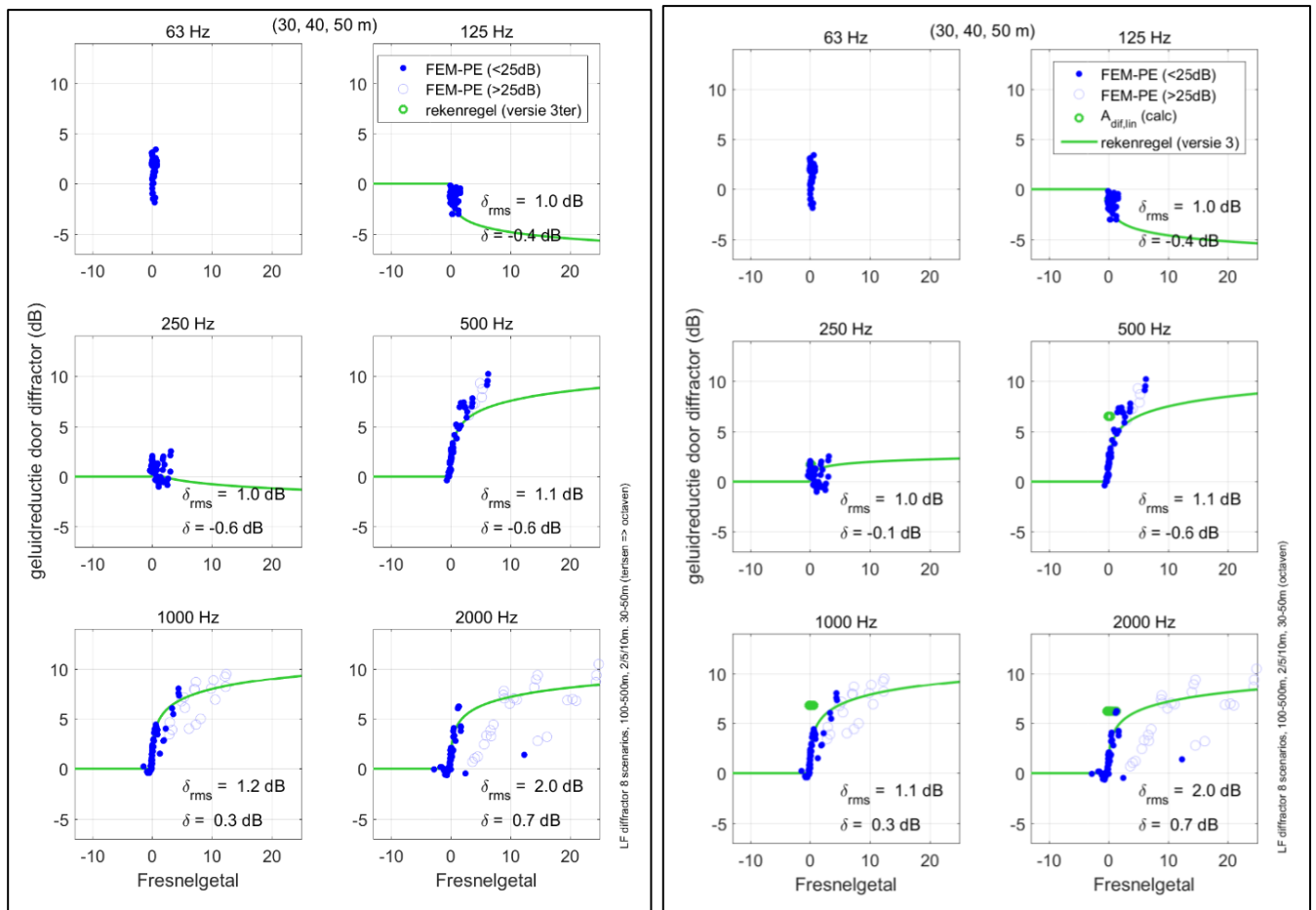
Figuur F.16 Als Figuur F.8, voor ontvangers op afstanden 30-50 m in plaats van 100-500 m.



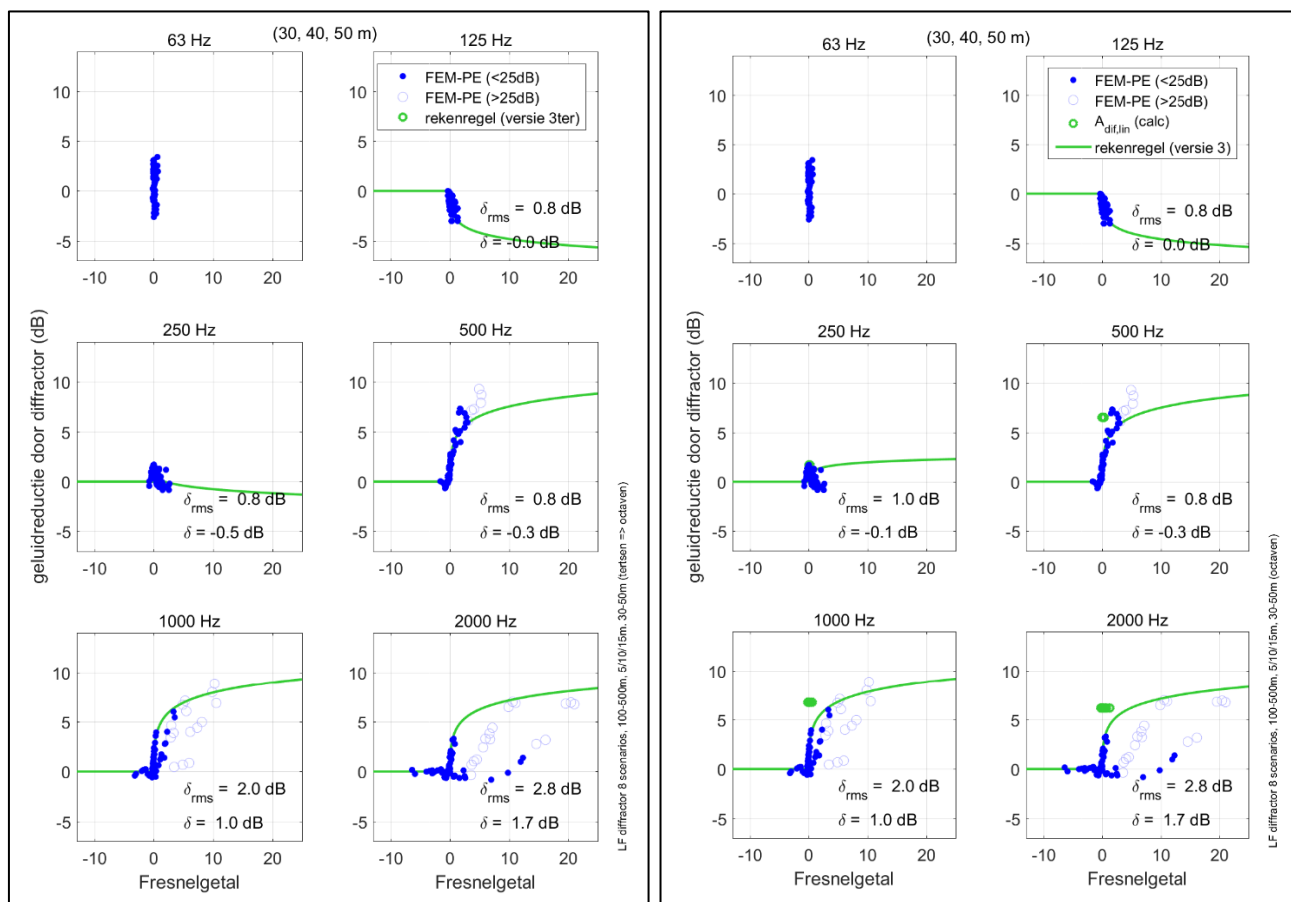
Figuur F.17 Als Figuur F.9, voor ontvangers op afstanden 30-50 m in plaats van 100-500 m.



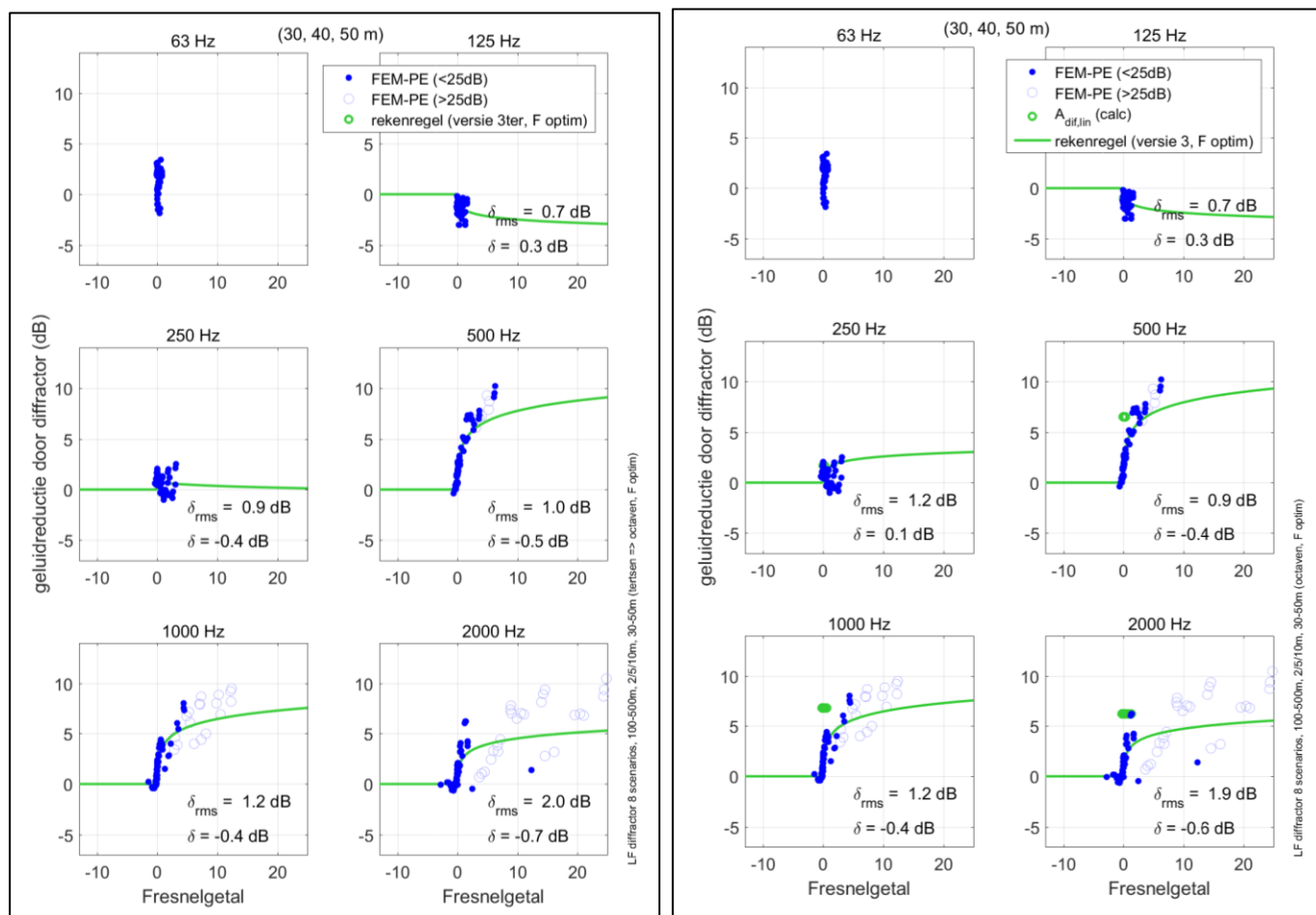
Figuur F.18 Als Figuur F.10, voor ontvangers op afstanden 30-50 m in plaats van 100-500 m.



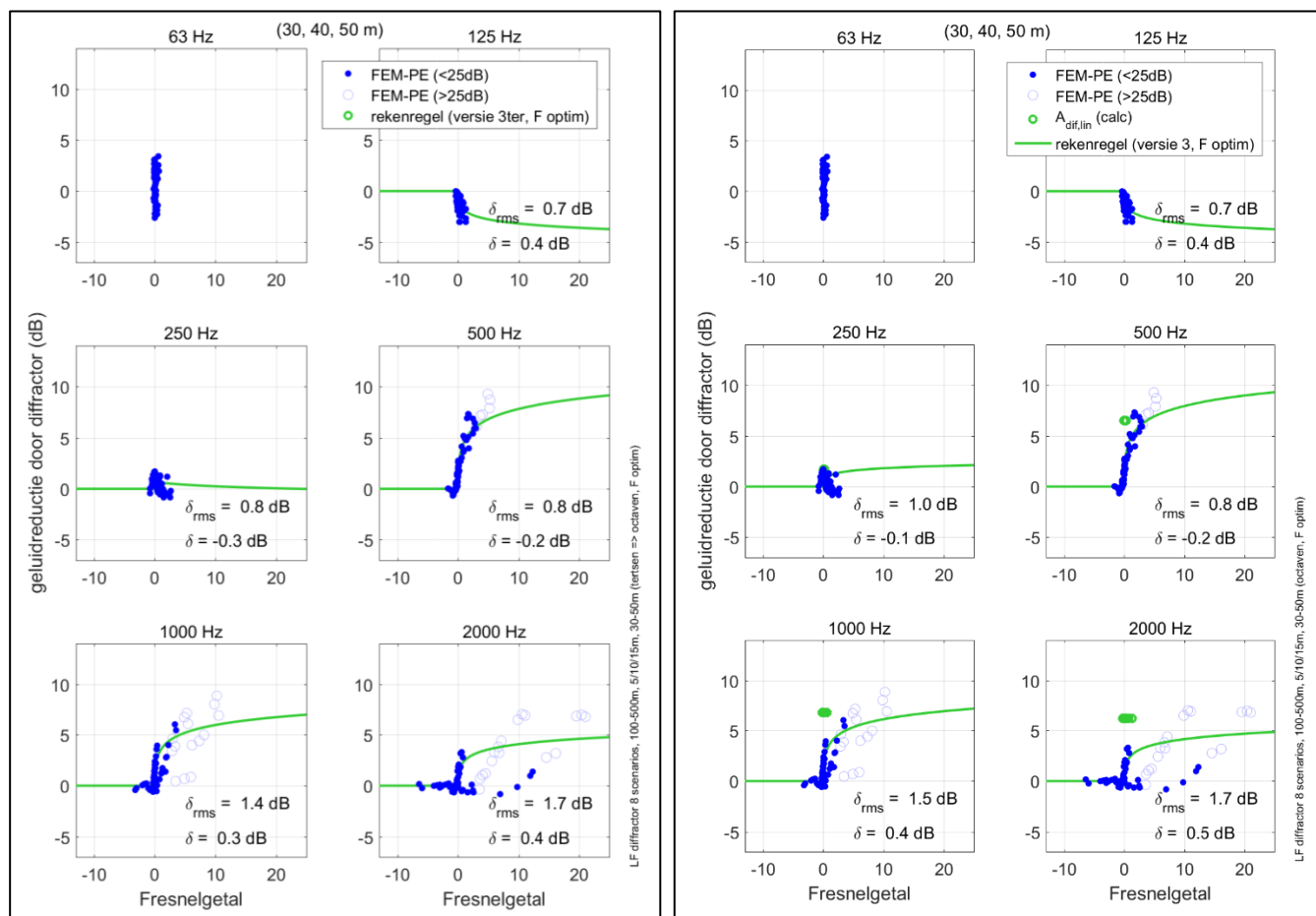
Figuur F.19 Als Figuur F.11, voor ontvangers op afstanden 30-50 m in plaats van 100-500 m.



Figuur F.20 Als Figuur F.12, voor ontvangers op afstanden 30-50 m in plaats van 100-500 m.



Figuur F.21 Als Figuur F.13, voor ontvangers op afstanden 30-50 m in plaats van 100-500 m.



Figuur F.22 Als Figuur F.14, voor ontvangers op afstanden 30-50 m in plaats van 100-500 m.