



Divisie Geluid
Stieltjesweg 1
Postbus 155
2600 AD DELFT

www.tno.nl

T 015 269 2000
F 015 269 2111

TNO-rapport

DGT-RPT-020044

ONDERZOEK EFFECTIVITEIT SCHERMTOPPEN

DEEL 3

Modelberekeningen

Datum	12 oktober 2002
Auteur(s)	Erik Salomons
Exemplaarnummer	
Oplage	
Aantal pagina's	67
Aantal bijlagen	2
Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Dienst Weg- en Waterbouwkunde
Projectnaam	
Projectnummer	008.03318/01.01

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, foto-kopie, 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 onderzoeksopdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

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

© 2002 TNO

Inhoudsopgave

1	Inleiding — 3
2	Onderzochte schermtoppen — 4
3	Modellering van diffractietest — 9
3.1	Opstelling van bron en microfoons — 9
3.2	Absorptiemateriaal — 9
3.3	Rekenmethode — 10
3.4	Berekende en gemeten spectra — 12
4	Modellering van praktijksituatie 1 — 16
4.1	Posities van bronnen en microfoons — 16
4.2	Rekenmethode — 16
4.3	Berekende reducties — 19
5	Modellering van praktijksituatie 2 — 23
5.1	Posities van bronnen en microfoons — 23
5.2	Rekenmethode — 23
5.3	Berekende reducties — 23
6	Conclusies — 25
7	Referenties — 26
	Bijlage(n)
	A Impedantiemodellen
	B Berekende en gemeten spectra van diffractietest

1 Inleiding

In opdracht van de Dienst Weg- en Waterbouwkunde van Rijkswaterstaat voert TNO TPD een onderzoek uit naar de mogelijkheden om het effect van geluidschermen langs snelwegen te verbeteren door middel van de vormgeving van de bovenkant van de schermen. Het gaat hierbij om opzetstukken die de hoogte van het scherm in principe niet veranderen. De opzetstukken worden aangeduid als *schermtoppen* in dit onderzoek.

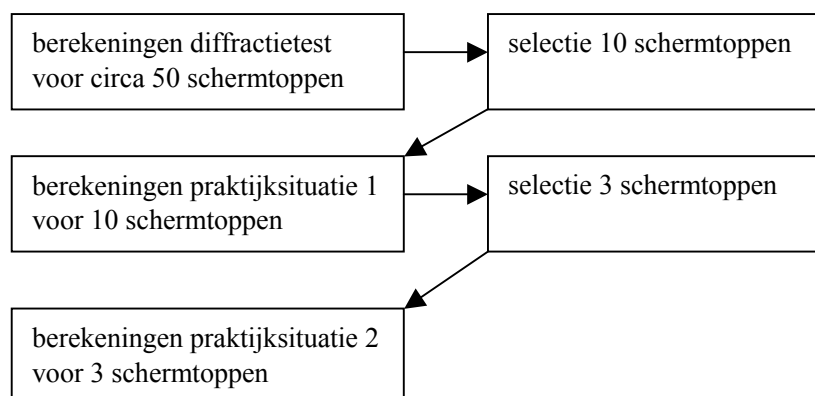
In de eerste fase van het onderzoek zijn metingen gedaan van de effecten van circa 50 verschillende schermtoppen [1]. Als bron werd hierbij een luidspreker gebruikt. Bron en microfoons bevonden zich op korte afstand (circa 2 m) van het scherm, om invloeden van de omgeving te kunnen uitsluiten. Op deze wijze kon ‘zuiver’ de *diffractie* van geluid door een schermtop gemeten worden. De metingen worden aangeduid als ‘diffractietest’.

Dit rapport doet verslag van de tweede fase van het onderzoek, waarin modelberekeningen aan de schermtoppen zijn uitgevoerd. Er is gerekend voor drie situaties: de situatie van de diffractietest en twee praktijksituaties. De opzet van de modelberekeningen is aangegeven in onderstaand schema. De berekeningen aan de diffractietest dienen om de nauwkeurigheid van de modellering te controleren. De berekeningen aan de praktijksituaties dienen om te bepalen welke schermtoppen het meest geschikt zijn voor toepassing in de praktijk. Bij de berekeningen voor de praktijksituaties is gekeken naar het gemiddelde geluid van passages van voertuigen op een snelweg. Hierbij is rekening gehouden met de invloed van wind op geluidgolven.

Een doel van berekeningen is ook om te kijken of uit de diffractietest een goede voorspelling voor het effect van een schermtop in de praktijk kan worden afgeleid. Dit zou handig zijn, omdat de diffractietest aanzienlijk eenvoudiger is uit te voeren dan een meting in de praktijk.

In een volgende fase van het onderzoek zullen geluidmetingen bij een verkeersweg worden gedaan, om de nauwkeurigheid van de rekenresultaten te controleren.

Opzet van de modelberekeningen.



2 Onderzochte schermtoppen

Er zijn vier soorten schermtoppen onderzocht (zie figuur 2.1):

- T-toppen
- L-toppen
- III-toppen
- O-toppen.

Hierbij zijn verschillende soorten absorptiemateriaal toegepast (mineraalwol, Durisol, Porocom [1]). In figuur 2.2 zijn de afmetingen van de T-, L- en III-toppen aangegeven. De O-toppen zijn geprefabriceerde toppen met uiteenlopende constructies.

De toppen zijn onderzocht in combinatie met zowel een reflecterend basisscherf als een absorberend basisscherf. Het absorberende basisscherf bevat alleen absorptiemateriaal aan de zijde van de geluidbron.

Als maat voor de effectiviteit van een schermtop hanteren we het verschil in schermwerking¹ tussen:

- een basisscherf met de schermtop
- en een *even hoog* reflecterend basisscherf zonder schermtop.

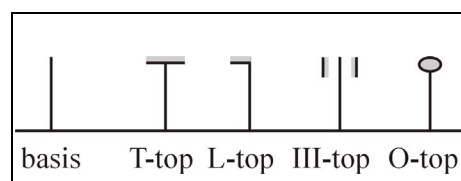
Hierbij wordt gemiddeld over een aantal ontvangerposities achter het scherm. Voor de geluidbronnen wordt uitgegaan van puntbronnen waarvan het bronnspectrum gelijk is aan een gemiddeld spectrum van verkeerslawaai.

Er zijn drie situaties onderzocht:

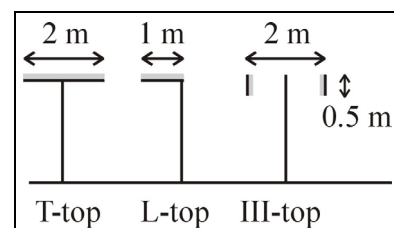
- situatie van de diffractietest (hoofdstuk 3)
- praktijksituatie 1 (hoofdstuk 4)
- praktijksituatie 2 (hoofdstuk 5).

Bij de berekeningen aan de situatie van de diffractietest zijn reflecties van geluid door de bodem niet meegenomen, om te kunnen vergelijken met de meetresultaten van de diffractietest [1]. Bij de praktijksituaties 1 en 2 is de invloed van de bodem wel meegenomen. Praktijksituatie 1 bevat één rijlijn en een 5 m hoog scherm. Praktijksituatie 2 bevat vier rijlijnen en een 2 m hoog scherm. Praktijksituatie 2 komt overeen met een situatie bij verkeersweg N11, waar ook metingen aan een schermtop zijn voorzien.

In de tabellen 2.1a-e zijn resultaten van de metingen en berekeningen verzameld.



Figuur 2.1. Vier soorten schermtoppen. Absorptiemateriaal is grijs weergegeven.



Figuur 2.2. Afmetingen van de T-, L- en III-toppen.

¹ Schermwerking = geluidsreductie door het scherm

Legendum bij Tabellen 2.1a-e

RW = Rockwool
Dur = Durisol

ZOABx / DABx = ZOAB / DAB met spectrum t/m 5 kHz (bij Model: begrensde extrapolatie voor 1.25 – 5 kHz)
ZOAB / DAB = ZOAB / DAB met spectrum t/m 1 kHz.

maat voor effectiviteit van schermtop:

DL_{ADI} = Diffactie-indexverschil in dB(A). Gemiddelde over acht posities. (zie hoofdstuk 3)
 D = Gemiddelde schermtop-reductie in dB(A). Gemiddelde over negen posities. (zie hoofdstuk 4)

Diffraactietest = geometrie zonder bodem.

Praktijk 1 = geometrie met 1 rijlijn en een scherm van 5 m hoogte.
Praktijk 2 = geometrie met 4 rijlijnen en een scherm van 2 m hoogte.

Tabel 2.1a. Basis scherm

Variant = Serie	Omschrijving	Opmerkingen	Diffraactietest, DL_{ADI} in dB(A)		Praktijk 1, D in dB(A)	Praktijk 2, D in dB(A)
			Experiment DABx	Model DABx / DAB	Model ZOABx / ZOAB / DABx / DAB	Model ZOABx / ZOAB
4	reflecterend	series 4, 10, 13, 42	-0.2, 0, 0.3, 0.6	0 / 0	0 / 0 / 0 / 0	0 / 0
3	absorberend	series 3, 11, 14=43	-0.1, 0, 0.1	0.2 / 0.3		

Tabel 2.1b. T-toppen

Variant = Serie	Absorptie top	Absorptie basisscherm	Opmerkingen	Diffraactietest, DL_{ADI}		Praktijk 1, D Model ZOABx / ZOAB / DABx / DAB	Praktijk 2, D Model ZOABx / ZOAB
				Exp. DABx	Model DABx / DAB		
58	-	-	-	1.9	0.7 / 0.2		
19	RW 100 mm	-	-	6.7	6.5 / 5.0	1.9 / 1.5 / 2.4 / 1.8	
20	RW 100 mm	-	met randen	6.7	6.2 / 4.7		
21	RW 100 mm	-	met randen, open onderkant	6.4	-		
22	RW 100 mm	-	nat	3.3	-		
23	RW 100 mm	RW 50 mm	-	6.0	6.5 / 5.0		
24	RW 200 mm	RW 50 mm	-	7.6	6.4 / 4.9		
25	RW 200 mm	-	-	6.0	6.5 / 5.0	1.9 / 1.5 / 2.4 / 1.8	
26	RW 50 mm	-	-	5.5	6.1 / 4.7		
27	RW 50 mm	-	met randen, open onderkant	4.6	-		
28	RW 50 mm	RW 50 mm	-	4.9	6.0 / 4.7		
29	Cassette	RW 50 mm	-	6.0	6.1 / 4.6		
30	Cassette	-	-	6.0	6.2 / 4.6	1.8 / 1.4 / 2.3 / 1.7	1.3 / 1.4 ^{**)}
31	Cassette	-	nat	3.6	-		
32	Dur 70 mm	-	-	3.3	2.1 ^{*)} / 2.4		
33	Dur 70 mm	RW 50 mm	-	3.7	2.0 ^{*)} / 2.4		
34	Dur 160 mm	RW 50 mm	-	3.8	4.7 / 3.1		
35	Dur 160 mm	-	open onderkant	3.6	-		
36	Dur 160 mm	-	-	4.5	4.8 / 3.1	1.4 / 1.0 / 1.9 / 1.2	
37	Dur 160 mm	-	nat	4.8	-		
56	Dur 160 mm	-	met randen	4.9	4.6 / 3.0		
38	Dur profiel	-	-	5.3	4.5 / 2.8	1.1 / 0.8 / 1.4 / 1.1	
39	Dur profiel	RW 50 mm	-	5.5	4.4 / 2.8		
40	Porocom vlak	-	= 41 profiel andersom	6.0	-		
41	Porocom profiel	-	-	5.9	7.3 / 6.0	2.0 / 1.6 / 2.5 / 2.0	1.5 / 1.6 ^{**)}

^{*)} bij varianten 32 en 33 geeft extrapolatie t/m 1600 Hz tertsband nog 2.7 dB(A).

^{**)} bij middeling over de laagste zes i.p.v. negen microfoons zijn de getallen 0.4 dB(A) hoger.

Tabel 2.1c. L-toppen

Variant = Serie	Absorptie top	Absorptie basisscherm	Opmerkingen	Diffraactietest, DL_{ADI}		Praktijk 1, D		Praktijk 2, D	
				Exp. DABx	Model DABx / DAB	Model ZOABx / ZOAB	Model DABx / DAB	Model ZOABx / ZOAB	Model ZOABx / ZOAB
59	-	-	-	2.7	2.1 / 1.7				
44	Dur 160 mm	-	-	4.8	5.0 / 3.5	1.2 / 0.9 / 1.6 / 1.1			
44a	Dur 160 mm	-	= 44 reciproom	0.5	-				
45	Dur 160 mm	-	met randen	5.0	4.7 / 3.2				
46	Dur 160 mm	-	open onderkant	2.8	-				
46a	Dur 160 mm	-	= 46 reciproom	-2.0	-				
47	Dur 160 mm	RW 50 mm	-	4.8	4.9 / 3.4				
48	Dur 70 mm	-	= 49	3.1	3.1 / 3.3				
50	Dur 70 mm	RW 50 mm	-	3.2	3.1 / 3.2				
51	Dur profiel	RW 50 mm	-	4.7	4.3 / 3.2				
52	Dur profiel	-	open onderkant	2.7	-				
53	Dur profiel	-	-	4.8	4.3 / 3.2	0.9 / 0.7 / 1.2 / 1.0			

Tabel 2.1d. III-toppen

Variant = Serie	Absorptie top	Absorptie basisscherm	Opmerkingen	Diffraactietest, DL_{ADI}		Praktijk 1, D		Praktijk 2, D	
				Exp. DABx	Model DABx / DAB	Model ZOABx / ZOAB	Model DABx / DAB	Model ZOABx / ZOAB	Model ZOABx / ZOAB
15	RW 50 mm binnen	-	-	4.5	4.0 / 3.9				
16	RW 50 mm binnen	RW 50 mm	-	4.7	4.4 / 4.2	1.0 / 0.7 / 1.3 / 0.8			
17	RW 50 mm buiten	RW 50 mm	-	4.8	4.4 / 4.2				
18	RW 50 mm buiten	-	-	4.7	3.4 / 3.7^{*)}	0.7 / 0.4 / 1.0 / 0.6^{*)}			0.6 / 0.8^{*)} ***)

^{*)} zonder absorptie op de top zijn de getallen 2.5 / 3.1 dB(A)

^{**)} zonder absorptie op de top

^{***)} bij middeling over de laagste zes i.p.v. negen microfoons zijn de getallen 0.8 / 0.9 dB(A).

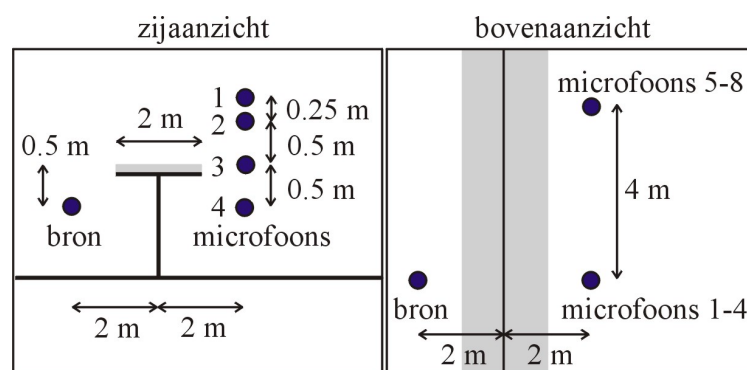
Tabel 2.1e. O-toppen

Variant = Serie	Naam top	Absorptie basisscherm	Opm.	Diffractietest, DL_{ADI} Experiment DABx	Model DABx / DAB	Praktijk 1, D Model ZOABx / ZOAB / DABx / DAB	Praktijk 2, D Model ZOABx / ZOAB
1	Mitac	-	-	0.9	-0.3 / -0.5		
2	Mitac	RW 50 mm	-	-	-0.3 / -0.5		
5	Dur Cil	-	-	-0.5	-0.1 / -0.2		
54	Dur Cil	RW 50 mm	-	-0.5	-0.1 / -0.2		
6	Klöck X	-	-	-1.4	-		
7	Klöck X	RW 50 mm	-	-1.0	-		
8	Klöck	RW 50 mm	-	-1.1	-		
9	Klöck	-	-	-1.3	-		
12	Porocom Tremolo	-	-	0.8	-		
55	Ten Berge Korf	-	-	-0.7	-0.1 / -0.2		
57	HBG	-	-	-0.6	-1.0 / -1.6		

3 Modelleren van diffractietest

3.1 Opstelling van bron en microfoons

Figuur 3.1 toont de meetopstelling bij de diffractietest. De bron bevindt zich 2 m voor het scherm. De microfoons bevinden zich 2 m achter het scherm. Er zijn twee groepen van vier microfoons. Met de eerste groep microfoons (1 – 4) wordt geluid gemeten in het vlak loodrecht op het scherm. Met de tweede groep microfoons (5 – 8) wordt geluid gemeten in een vlak dat een hoek van 45° maakt met het scherm.



Figuur 3.1. Meetopstelling bij de diffractietest (met T-top als voorbeeld).

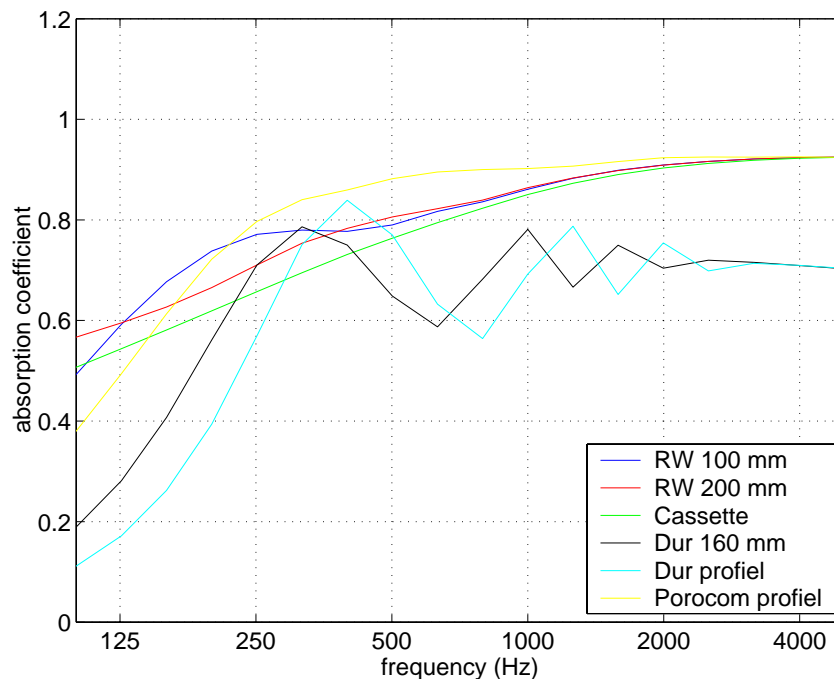
3.2 Absorptiemateriaal

Er zijn verschillende soorten absorptiemateriaal gebruikt bij de schermtoppen. Bij geluidberekeningen wordt absorptiemateriaal gekarakteriseerd door de akoestische impedantie. Er bestaan verschillende modellen om de impedantie te berekenen uit parameters die de structuur van het absorptiemateriaal karakteriseren. In bijlage A beschrijven we de modellen die we in dit onderzoek hebben gebruikt.

Uit de impedantie van een materiaal kan de absorptie² worden berekend. Figuur 3.2 toont de berekende absorptie van verschillende materialen uit dit onderzoek als functie van de frequentie.

De O-toppen zijn gemodelleerd als absorberende cilinders aan de bovenkant van het scherm. De modellen die we hebben gebruikt voor de impedantie van de absorberende cilinders zijn ook beschreven in bijlage A.

² De absorptie is gedefinieerd als de fractie akoestische energie die een materiaal absorbeert van een invallende (vlakke) geluidsgolf. Hierbij wordt gemiddeld over alle invalshoeken.



Figuur 3.2. Berekende absorptiespectra van verschillende materialen uit dit onderzoek.

3.3 Rekenmethode

De basismaat voor het effect van een schermtop is het verschil in geluidreductie tussen basisscherm + schermtop en basisscherm. Bij de diffractietest wordt deze basismaat op een bepaalde manier gemiddeld over de microfoonposities en over het frequentiespectrum van verkeerslawaai. De resulterende grootheid wordt *diffractie-indexverschil* genoemd. We gebruiken voor deze grootheid het symbool $DL_{\Delta DI}$, net als in referentie [2]. De grootheid $DL_{\Delta DI}$ is ook bepaald bij de metingen aan de schermtoppen [1].

De berekening van $DL_{\Delta DI}$ bestaat uit de volgende vier stappen.

1. We berekenen tertsbandspectra $L_m(f)$ van het geluidrukniveau op de acht microfoons ($m = 1, \dots, 8$). We gaan hierbij uit van een bron met een willekeurig bronspectrum. We rekenen de tertsbandspectra om tot relatieve tertsbandspectra $\delta L_m(f) = L_m(f) - L_{m,vrij}(f)$, waarin $L_{m,vrij}(f)$ het vrije-veld spectrum is van de bron, d.w.z. het spectrum in de situatie zonder scherm. De relatieve tertsbandspectra zijn onafhankelijk van het bronspectrum.
2. We middelen de relatieve tertsbandspectra (energetisch) over de acht microfoons. Het gemiddelde relatieve spectrum geven we aan als $\delta L(f)$.
3. We berekenen het verschilspectrum $\Delta L(f) = \delta L(f) - \delta L_{basis}(f)$, waarin $\delta L_{basis}(f)$ het gemiddelde relatieve spectrum is voor het basisscherm.
4. We berekenen het diffractie-indexverschil $DL_{\Delta DI}$ met de formule $DL_{\Delta DI} = \Sigma(L_A) - \Sigma(L_A + \Delta L)$, waarin L_A het genormeerde³ A-gewogen bronspectrum voor verkeerslawaai is en Σ staat voor energetische sommatie over de tertsbandfrequenties f .

³ Van belang is alleen de variatie van het bronniveau met de frequentie. Daarom werken we met een bronspectrum dat genormeerd is zodanig dat de energetische som van de niveaus nul is.

Voor het relatieve A-gewogen bronspectrum $L_A(f)$ gebruiken we het ‘standaard’ verkeerslawaaisspectrum uit referentie [3]. Dit spectrum is gegeven in tabel 3.1.

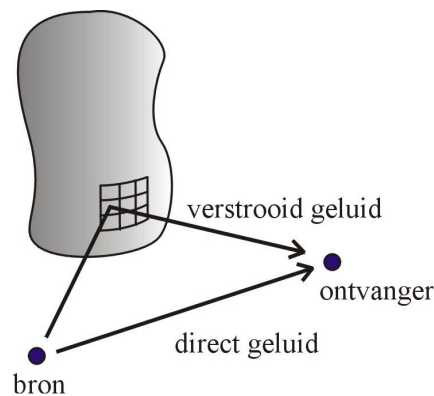
De ingewikkeldste stap van de berekening is stap 1, de berekening van relatieve spectra $\delta L_m(f)$. De rest is ‘boekhouden’.

Voor de berekening van de relatieve spectra gebruiken we de rand-elementenmethode. Deze methode wordt meestal BEM genoemd, een afkorting van de Engelse naam Boundary Element Method. Het principe van BEM is geïllustreerd in figuur 3.3.

Voor de berekeningen met BEM aan schermtoppen gebruiken we een 3.44 m hoog basisscherm op een harde bodem (net als bij de metingen). Om de reflectie door de bodem te onderdrukken (met meer dan 20 dB) gebruiken we een gerichte geluidbron (dipoolbron), gericht op de schermtop.

De berekeningen zijn beperkt tot het frequentie-interval van 100 Hz tot 1 kHz. Voor hogere frequenties zijn de BEM berekeningen te ‘zwaar’ voor de computer. Om toch een indruk te krijgen van de invloed van de hogere frequenties, is het BEM spectrum boven 1 kHz lineair geëxtrapoleerd tot 5 kHz. Hierbij is een bovengrens van 0 dB opgelegd omdat de extrapolatie soms duidelijk foute resultaten geeft (kennelijk is het spectrum dan niet lineair). In tabel 2.1 zijn voor elke serie twee waarden van het diffractie-indexverschil $DL_{\Delta DI}$ gegeven, aangegeven met DAB⁴ en DABx. De waarde aangegeven met DAB is berekend uit de BEM spectra tot 1 kHz. De waarde aangegeven met DABx is berekend met het BEM spectrum tot 5 kHz.

Figuur 3.4 toont ter illustratie geluidvelden berekend met BEM voor vier schermtoppen. De kleur representeert het relatieve geluidrukniveau bij een frequentie van 500 Hz.



Figuur 3.3. Illustratie van BEM voor een willekeurig verstrooiend object. Geluid bij een ontvanger bestaat uit direct geluid en verstrooid geluid. Het verstrooide geluid wordt berekend via een integraal over het oppervlak van het verstrooiende object. De methode werkt ook als de ontvanger zich achter het object bevindt.

Tabel 3.1. Genormeerd A-gewogen bronspectrum van verkeerslawaaai uit referentie [3].

frequentie (Hz)	100	200	400	800	1600	3150
	125	250	500	1000	2000	4000
	160	315	630	1250	2500	5000
A-gewogen bronniveau (dB)	-20	-16	-13	-9	-10	-15
	-20	-15	-12	-8	-11	-16
	-18	-14	-11	-9	-13	-18

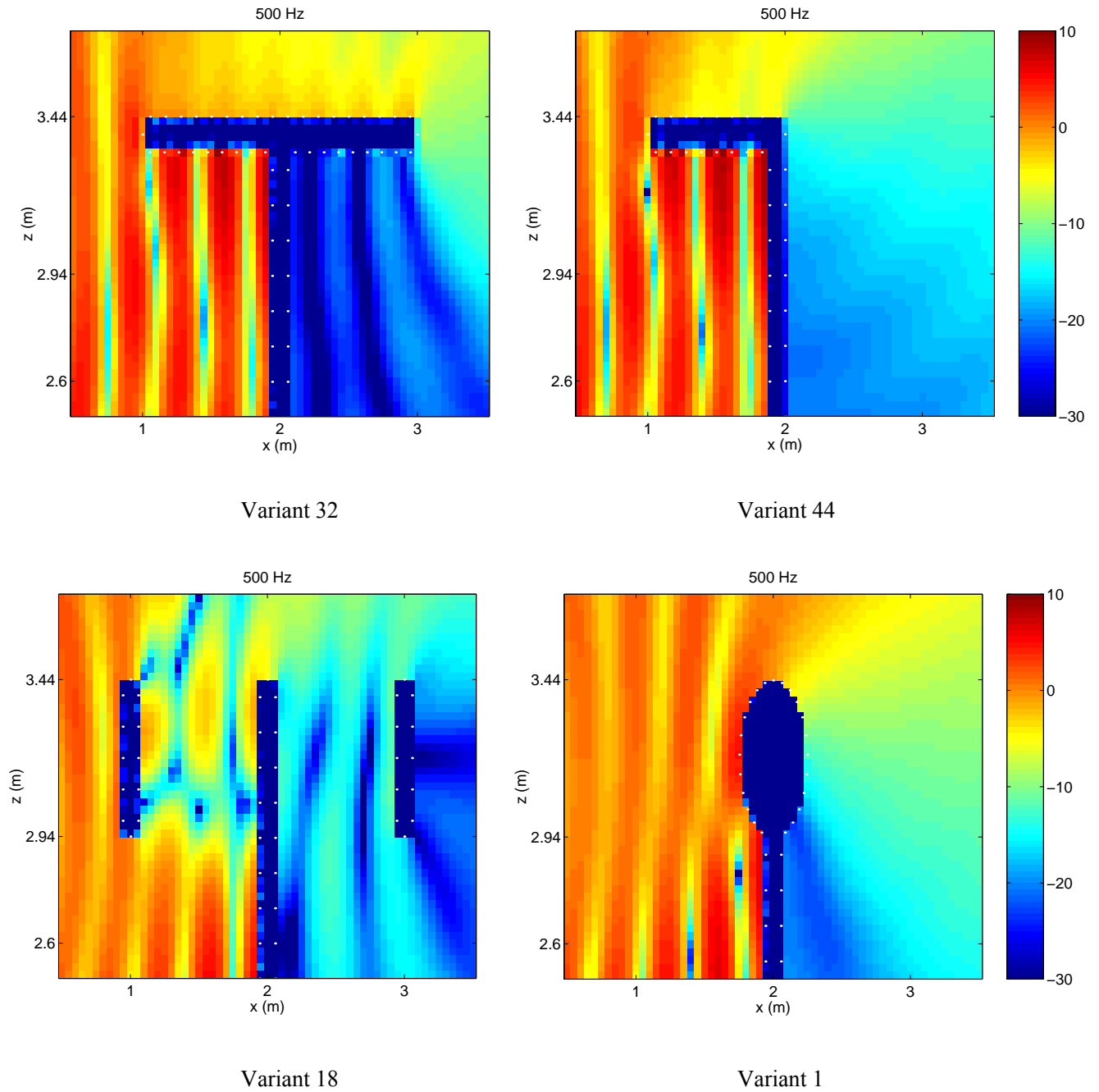
⁴ DAB staat voor Dicht Asfalt Beton, en wordt hier aangegeven ter onderscheid van ZOAB wegdek bij de praktijksituaties.

3.4 Berekende en gemeten spectra

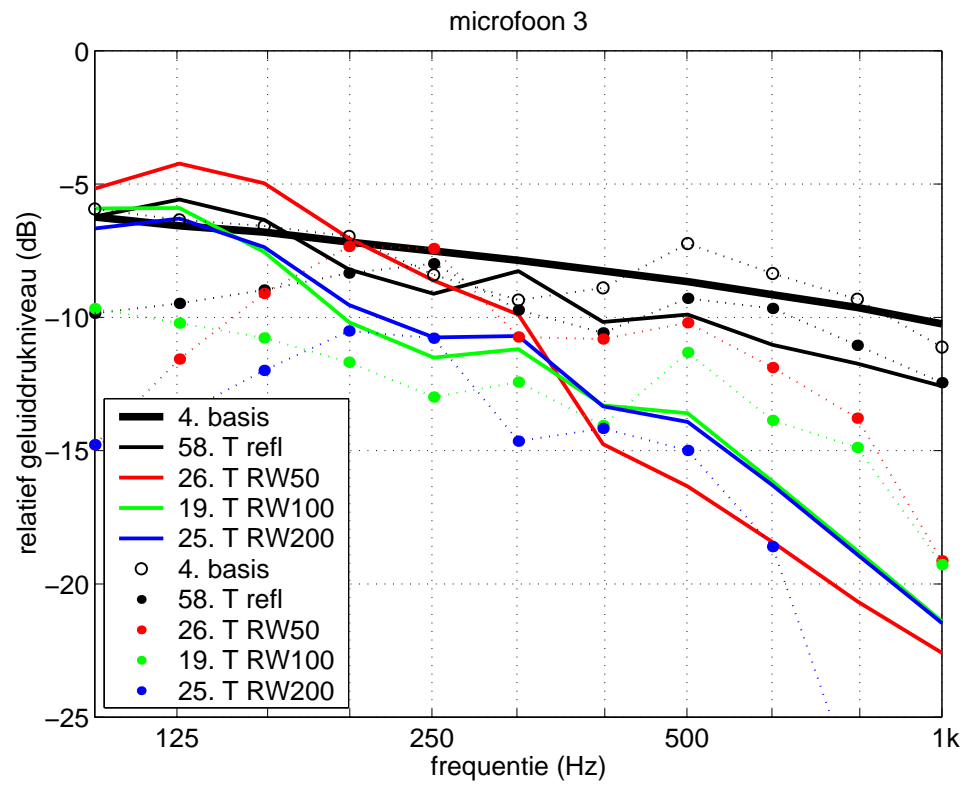
Figuur 3.5 toont berekende en gemeten tertsbandspectra op microfoon 3 voor het basisscherm en vier T-toppen. Er zijn aanzienlijke verschillen tussen meting en berekening. Het gaat uiteindelijk echter om de niveaus ten opzicht van het basisscherm, en dan zijn de verschillen kleiner. De verschillen kunnen een gevolg zijn van benaderingen bij de akoestische modellering. Voor de meetresultaten geldt echter ook een aanzienlijke onzekerheidsmarge, vooral bij lage frequenties. Dit blijkt uit onderlinge vergelijkingen van meetresultaten (bijvoorbeeld voor series 3, 11 en 14, of series 19, 20, 23, 24 en 25).

Figuur 3.6 toont berekende tertsbandspectra voor een aantal schermtoppen. In de meeste gevallen ligt het spectrum onder het spectrum voor het basisscherm. Dit betekent dat het effect van de schermtoppen meestal positief ('geluidreducerend') is.

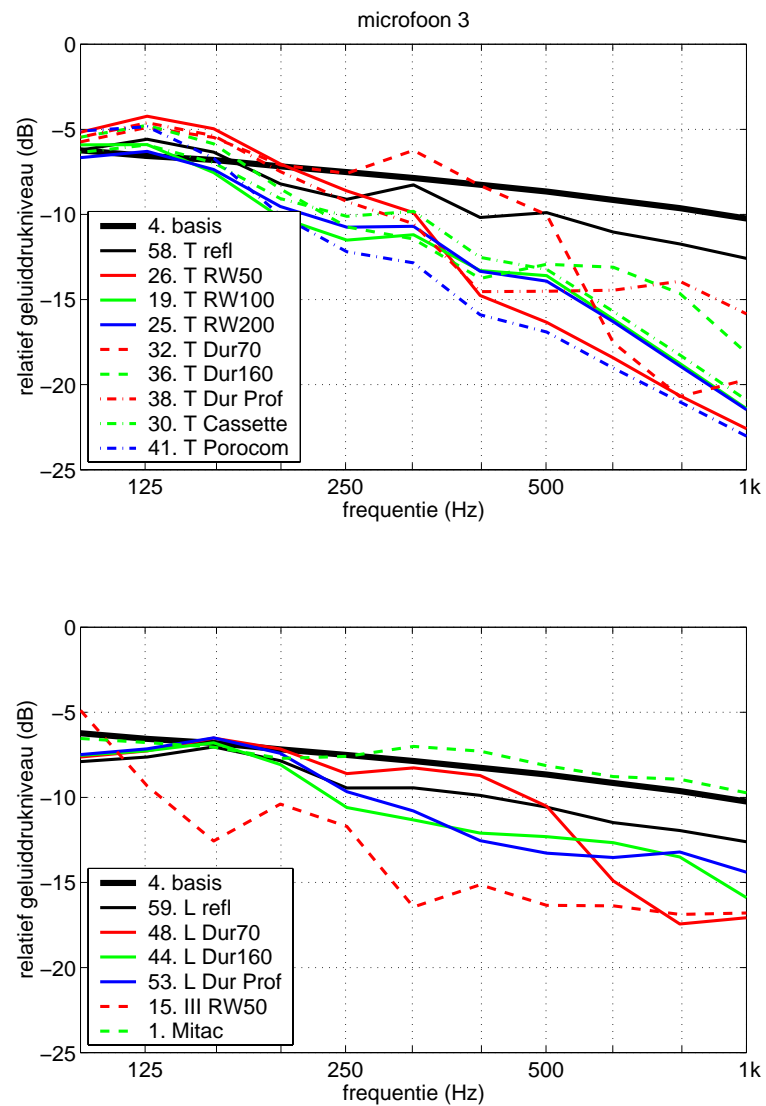
In bijlage B zijn de berekende en gemeten spectra voor alle series en alle microfoons weergegeven. De lijn representeert telkens het BEM resultaat. De symbolen representeren de meetresultaten.



Figuur 3.4. Velden van het relatieve geluidrukniveau in dB bij 500 Hz. De bron bevindt zich op positie $x = 0$ en hoogte $z = 3.44 - 0.5 = 2.94$ m. De witte punten zijn BEM roosterpunten.



Figuur 3.5. Berekende spectra (lijnen) en gemeten spectra (symbolen), voor reflecterend basisscherm (serie 4) en vier T-toppen (series 58, 16, 19 en 25), op microfoon 3.



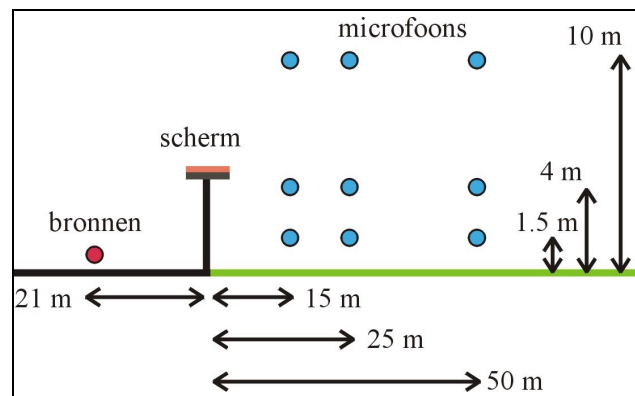
Figuur 3.6. Berekende spectra voor verschillende series, op microfoon 3.

4 Modelleren van praktijksituatie 1

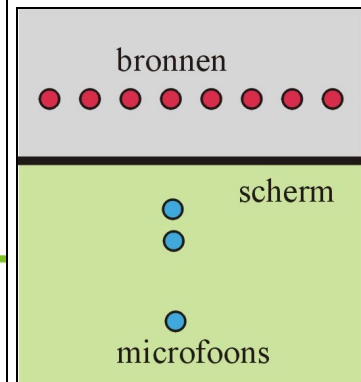
Op grond van de berekeningen en metingen van de diffractietest zijn de tien meest belovende varianten van schermtoppen geselecteerd voor berekeningen aan praktijksituatie 1. De tien varianten zijn (zie tabel 2.1): 19, 25, 30, 36, 38, 41, 44, 53, 16 en 18. Bij de selectie hebben ook praktische overwegingen meegespeeld, zoals bestendigheid tegen regen en eenvoud van constructie.

4.1 Posities van bronnen en microfoons

Voor de geluidbronnen gaan we uit van een verkeersstroom langs een rijlijn. De verkeersstroom wordt gerepresenteerd door een rij incoherente puntbronnen op een lijn op 0.75 m boven het wegdek. Figuur 4.1 toont een doorsnede van de geometrie. Figuur 4.2 toont een bovenaanzicht. Er zijn negen microfoons in een vlak loodrecht op het scherm.



Figuur 4.1. Doorsnede van de geometrie van praktijksituatie 1. De bronnen bevinden zich op een lijn loodrecht op de doorsnede. De hoogte van de bronnen is 0.75 m. De hoogte van het scherm is 5 m.



Figuur 4.2. Boven-aanzicht van de geometrie van praktijksituatie 1.

4.2 Rekenmethode

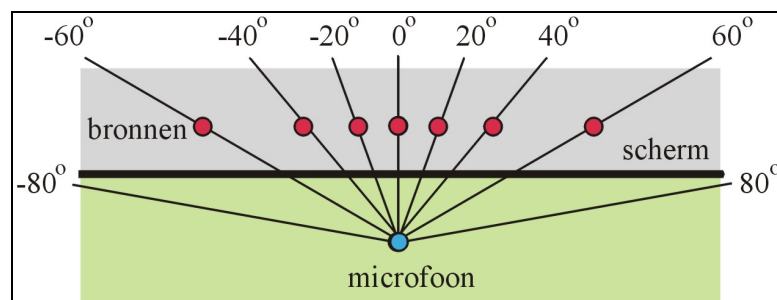
De basismaat voor het effect van een schermtop is het verschil in geluidreductie tussen basisscherm + schermtop en basisscherm. Deze basismaat wordt op een bepaalde manier gemiddeld over de bronnen, de microfoons en het frequentiespectrum van verkeerslawaai. De resulterende grootheid hebben we *gemiddelde schermtop-reductie* genoemd, en aangeduid met het symbool D (zie tabel 2.1).

De berekening van D bestaat uit de volgende vier stappen.

1. Net als bij de diffractietest berekenen we relatieve tertsbandspectra $\delta L_{jm}(f)$ van het geluid op de negen microfoons ($m = 1, 2, \dots, 9$), voor negen bronnen ($j = 1, 2, \dots, 9$). De bronnen zijn zodanig verdeeld over de rijlijn dat ze vanuit een microfoonpositie onder gelijke hoeken met de normaal op de rijlijn worden waargenomen, namelijk hoeken van $-80^\circ, -60^\circ, \dots, +80^\circ$ (zie figuur 4.3). De bronposities zijn dus per microfoon anders. Bij de relatieve niveaus houden we ook rekening met luchtdemping van geluid.

2. We middelen de relatieve tertsbandspectra (energetisch) over de 9 bronnen en over een genormeerd A-gewogen bronspectrum voor verkeerslawaaai. Het resulterende relatieve niveau geven we aan als δL_m .
3. We berekenen de schermtop-reducties $D_m = \delta L_{m,basis} - \delta L_m$, waarin $\delta L_{m,basis}$ het relatieve niveau is voor het basisscherm.
4. We berekenen de gemiddelde schermtop-reductie door (lineaire) middeling van de schermtop-reducties D_m over de negen microfoons.

Voor het genormeerde A-gewogen bronspectrum van verkeerslawaaai zijn dezelfde niveaus gebruikt als bij de diffractietest. Deze niveaus zijn gegeven in tabel 3.1. Het gebruikte bronspectrum is ontleend aan NEN-EN 1793-3 [3] en geldt in principe voor een DAB wegdek. De geluidemissie van voertuigen op een ZOAB⁵ wegdek is lager dan op DAB. We hebben ook waarden van D berekend voor ZOAB, gebruik makend van het bronspectrum dat in tabel 4.1 is gegeven. De niveaus zijn gelijk aan de niveaus voor DAB minus een correctie voor ZOAB berekend volgens de Nederlandse standaard rekenmethode voor wegverkeerslawaaai. Voor de percentages voertuigen in de categorieën licht, middelzwaar en zwaar zijn we hierbij uitgegaan van respectievelijk 80%, 6.4% en 13.6%. Voor de rijsnelheden zijn we uitgegaan van respectievelijk 110, 85 en 85 km/h.



Figuur 4.3. Verdeling van negen bronnen over de rijlijn.

Tabel 4.1. Genormeerd A-gewogen bronspectrum van verkeerslawaaai, inclusief spectrale correctie voor ZOAB wegdek. De ZOAB correctie is berekend volgens de Nederlandse standaard rekenmethode voor wegverkeerslawaaai.

frequentie (Hz)	100 125 160	200 250 315	400 500 630	800 1000 1250	1600 2000 2500	3150 4000 5000
A-gewogen bronniveau (dB)	-17 -17 -15	-13 -12 -12	-13 -13 -12	-9 -8 -10	-12 -13 -15	-17 -18 -19

⁵ ZOAB = Zeer Open Asfalt Beton

Net als bij de diffractietest is de berekening van de relatieve tertsbandspectra $\delta L_{jm}(f)$ in stap 1 het ingewikkeldst. We gebruiken hiervoor een combinatie van twee rekenmodellen, BEM en PE.

BEM is al in paragraaf 3.3 beschreven. We gebruiken nu echter geen gerichte dipoolbron, maar een monopoolbron. Verder verwaarlozen we bij de berekening van de relatieve tertsbandspectra $\delta L_{jm}(f)$ de invloed van ZOAB op de reflectie van geluid (we rekenen met een harde bodem). Aangezien het om een verschil tussen twee spectra voor sterk vergelijkbare situaties gaat, is deze verwaarlozing een goede benadering. We houden wel rekening met de invloed van ZOAB op het bronspectrum van verkeerslawaaai, zoals reeds beschreven.

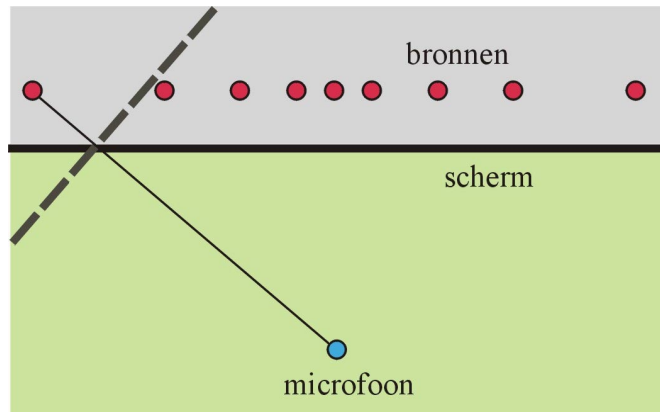
PE staat voor ‘parabolic equation’, een vereenvoudigde versie van de golfvergelijking voor geluid. Met het PE model houden we rekening met de invloed van wind op geluidgolven. We nemen aan dat de wind loodrecht over het scherm waait, met een snelheid van 4 m/s op 10 m hoogte. Voor geluiduitbreiding is de windcomponent in de richting van bron naar ontvanger van belang. Deze component is in dit geval het grootst voor de bron bij 0° in figuur 4.3. We houden ook rekening met de verstorende invloed van het scherm op de wind, volgens de methode beschreven in referentie [4]. Voor de bodem achter het scherm nemen we grasland aan (zie bijlage A).

BEM is geschikt voor de berekening van geluiduitbreiding over schermen met complexe vormen. PE is geschikt voor geluiduitbreiding over grotere afstanden door een atmosfeer met wind. We rekenen daarom eerst met BEM vanaf de bron tot vlak achter het scherm, en vervolgens met PE tot bij de microfoons⁶. We houden dus alleen rekening met wind tussen het scherm en de microfoons. Dit is waarschijnlijk een goede benadering, want de wind blijkt slechts een klein effect te hebben op de schermtop-reductie (zie paragraaf 4.3).

Net als bij de diffractietest beperken we de berekeningen tot het frequentie-interval van 100 Hz tot 1 kHz. Voor hogere frequenties, tot 5 kHz, passen we dezelfde extrapolatie toe als bij de diffractietest. Waarden aangegeven met ZOAB en DAB in tabel 2.1 zijn berekend met het spectrum tot 1 kHz. Waarden aangegeven met ZOABx en DABx zijn berekend met het spectrum tot 5 kHz.

Er is nog een punt dat moet worden toegelicht. De berekening van geluiduitbreiding wordt uitgevoerd in het verticale vlak door bron en microfoon. BEM gaat er vanuit dat dit vlak loodrecht op het scherm staat, wat alleen het geval is voor de bron bij 0° in figuur 4.3. Voor de andere bronnen passen we daarom stilzwijgend een benadering toe. Deze benadering komt neer op het draaien van het scherm, zoals geïllustreerd in figuur 4.4. Intuïtief verwacht men dat dit een goede benadering is. Berekeningen met een driedimensionaal stralenmodel bevestigen dit.

⁶ We gebruiken een twee-dimensionaal BEM model, zodat we rekenen met cilindergolven in plaats van bolgolven. Bij de overgang van BEM naar PE passen we daarom een ‘sferische correctie’ toe, die gelijk is aan de verhouding van het vrije veld van een bolgolf en het vrije veld van een cilindergolf (Hankelfunctie).

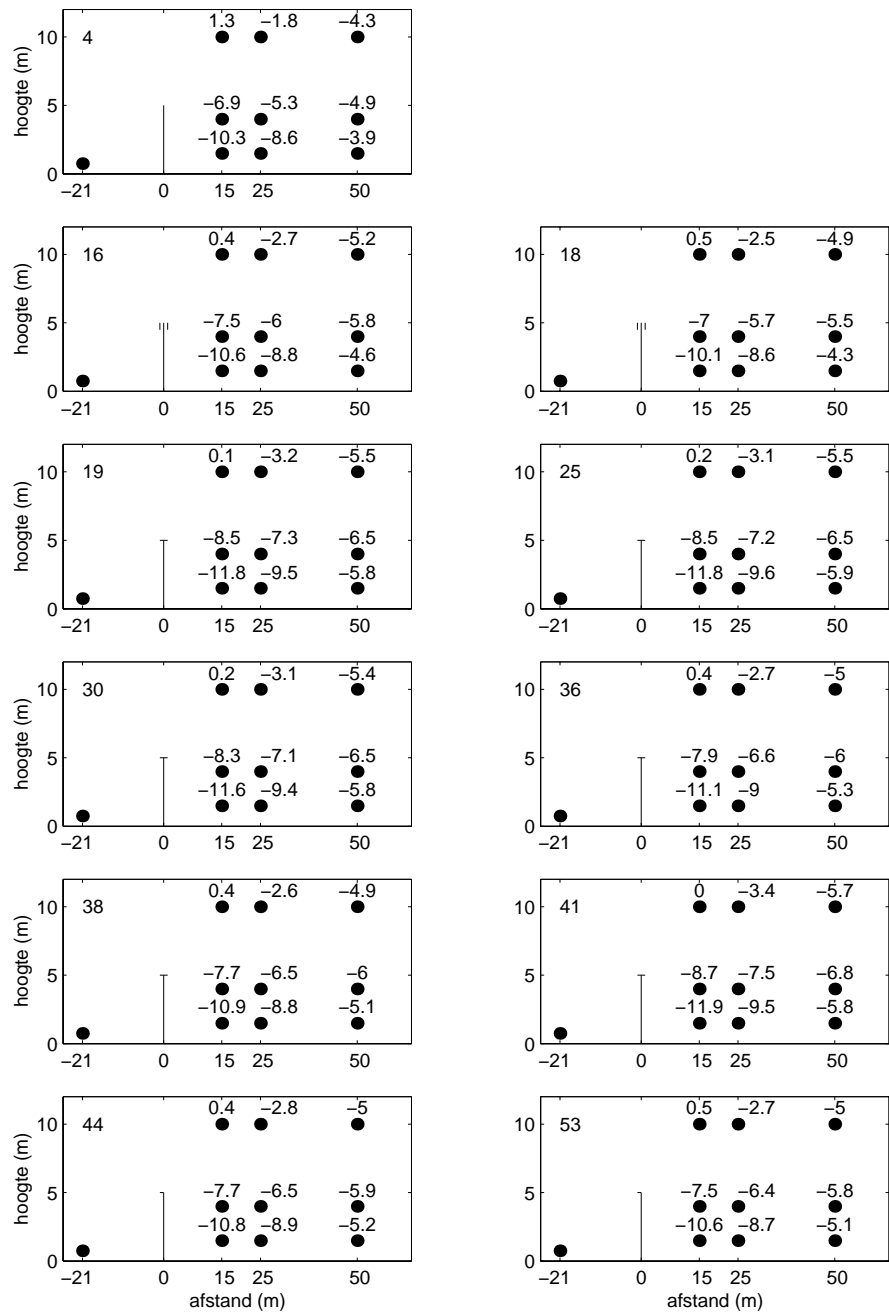


Figuur 4.4. Bij de berekening van geluiduitbreiding passen we de benadering toe dat het scherm loodrecht staat op het verticale vlak door bron en microfoon.

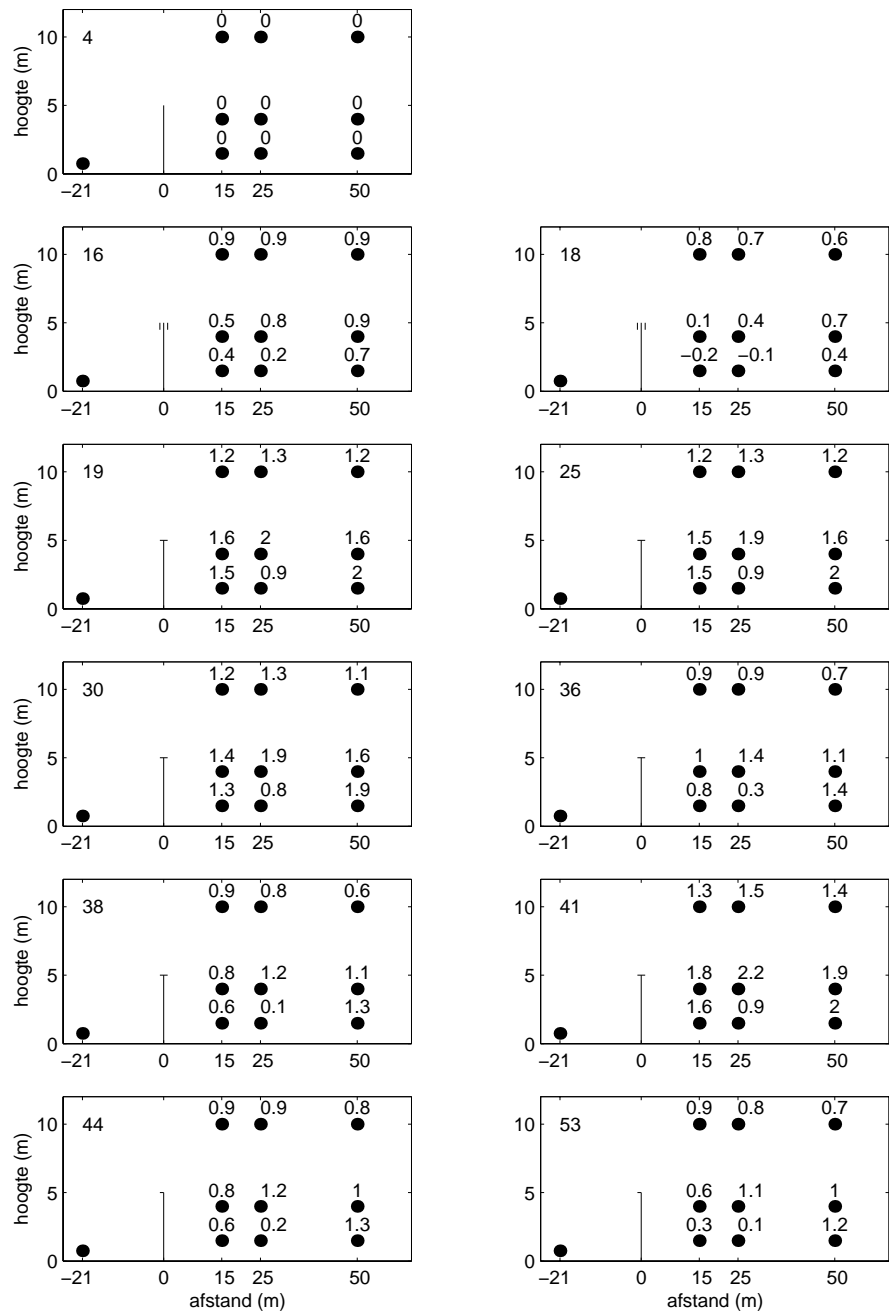
4.3 Berekende reducties

De berekende gemiddelde schermtop-reducties D zijn voor de tien geselecteerde varianten gegeven in tabel 2.1. De figuren 4.5 en 4.6 geven inzicht in de variatie van de niveaus en reducties over de negen microfoons. Figuur 4.5 laat zien dat de relatieve niveaus δL_m aanzienlijk variëren over de microfoons. Figuur 4.6 laat zien dat de variatie van de schermtop-reducties D_m veel kleiner is.

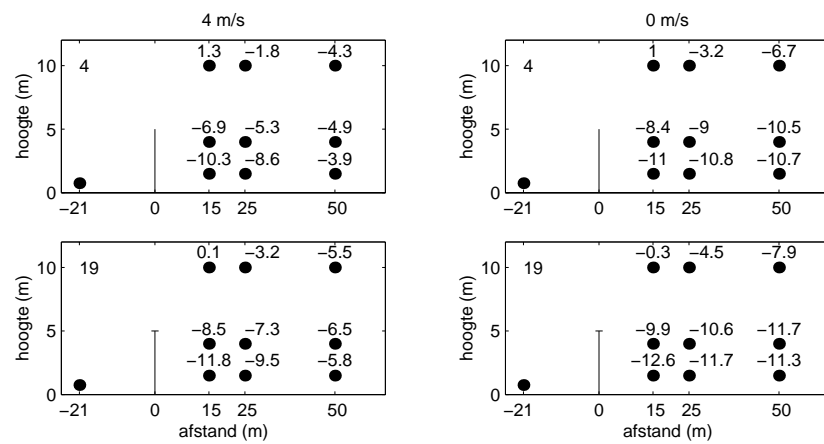
Voor de varianten 4 en 19 is onderzocht hoe groot de invloed van de wind is op het schermtop-reductie. Figuur 4.7 toont de relatieve niveaus bij windsnelheden van 0 m/s (geen wind) en 4 m/s, en figuur 4.8 toont de hiermee corresponderende schermtop-reducties D_m . Uit figuur 4.8 blijkt dat de invloed van wind op de schermtop-reducties zeer klein is. De schermtop-reducties bij 4 m/s wind zijn nauwelijks anders dan zonder wind, hoewel de relatieve geluidniveaus aanzienlijk variëren onder invloed van wind (zie figuur 4.7).



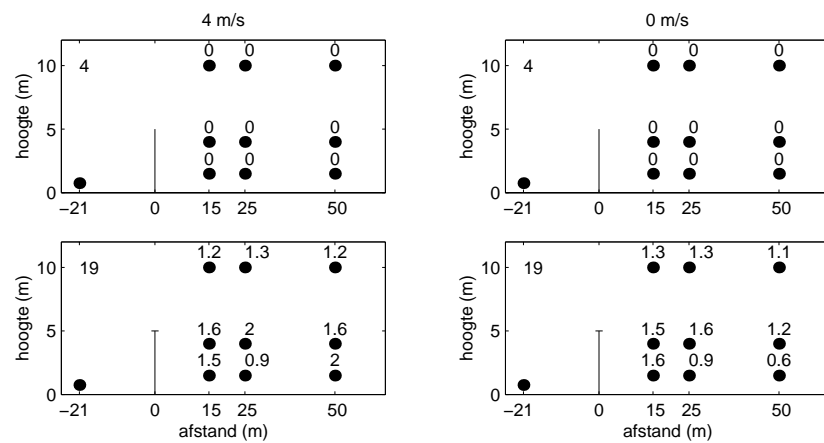
Figuur 4.5. Relatieve geluidniveaus δL_m op de negen microfoons, berekend met een A-gewogen verkeerslawaispectrum voor ZOAB. Het nummer van de schermtopvariant is in elke grafiek linksboven gegeven.



Figuur 4.6. Schermtop-reducties D_m op de negen microfoons, berekend met een A-gewogen verkeerslawaaisspectrum voor ZOAB.



Figuur 4.7. Als figuur 4.5, maar nu zowel met wind (linker kolom) als zonder wind (rechter kolom).



Figuur 4.8. Als figuur 4.6, maar nu zowel met wind (linker kolom) als zonder wind (rechter kolom).

5 Modelleren van praktijksituatie 2

Na de berekeningen aan praktijksituatie 1 zijn drie varianten van schermtoppen geselecteerd voor berekeningen aan praktijksituatie 2. De drie varianten zijn (zie tabel 2.1): 18, 30 en 41. Praktijksituatie 2 is een model van een echte situatie langs verkeersweg N11, waar geluidmetingen aan een schermtop zijn voorzien.

5.1 Posities van bronnen en microfoons

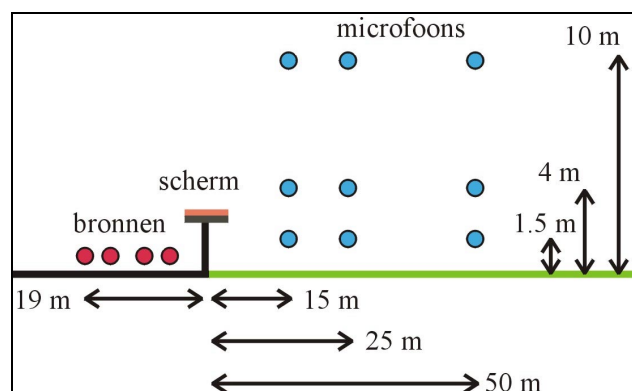
Praktijksituatie 2 verschilt van praktijksituatie 1 door de schermhoogte en het aantal rijlijnen. Het scherm is 2 m hoog in plaats van 5 m, en er zijn vier rijlijnen in plaats van één rijlijn. Figuur 5.1 toont een doorsnede van de geometrie. Er zijn weer negen microfoons.

5.2 Rekenmethode

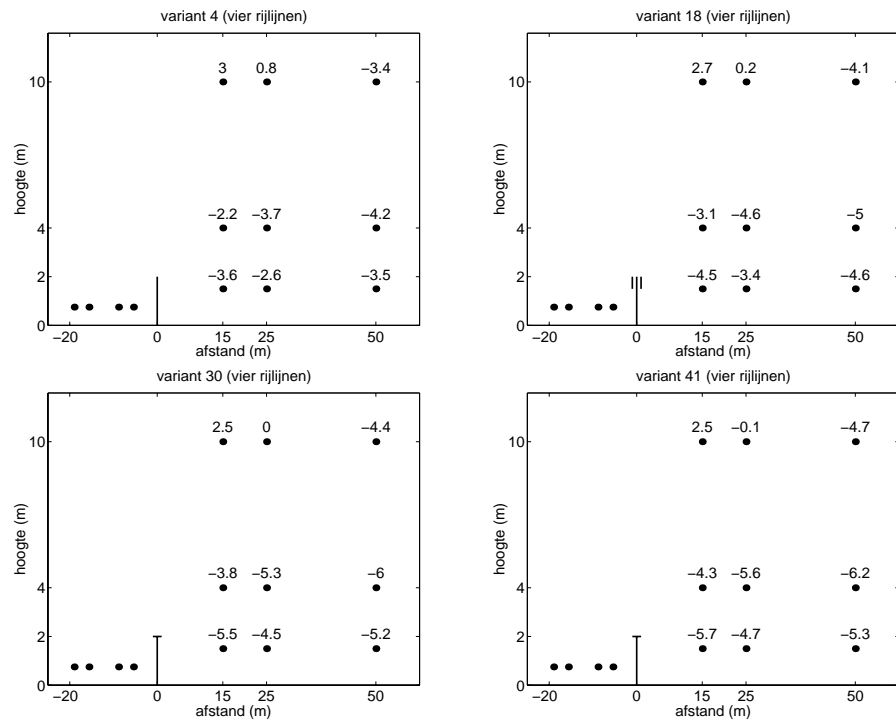
De rekenmethode is identiek aan de rekenmethode beschreven in paragraaf 4.2. Bij stap 2 wordt nu gemiddeld over $4 \times 9 = 36$ bronnen verdeeld over de vier rijlijnen.

5.3 Berekende reducties

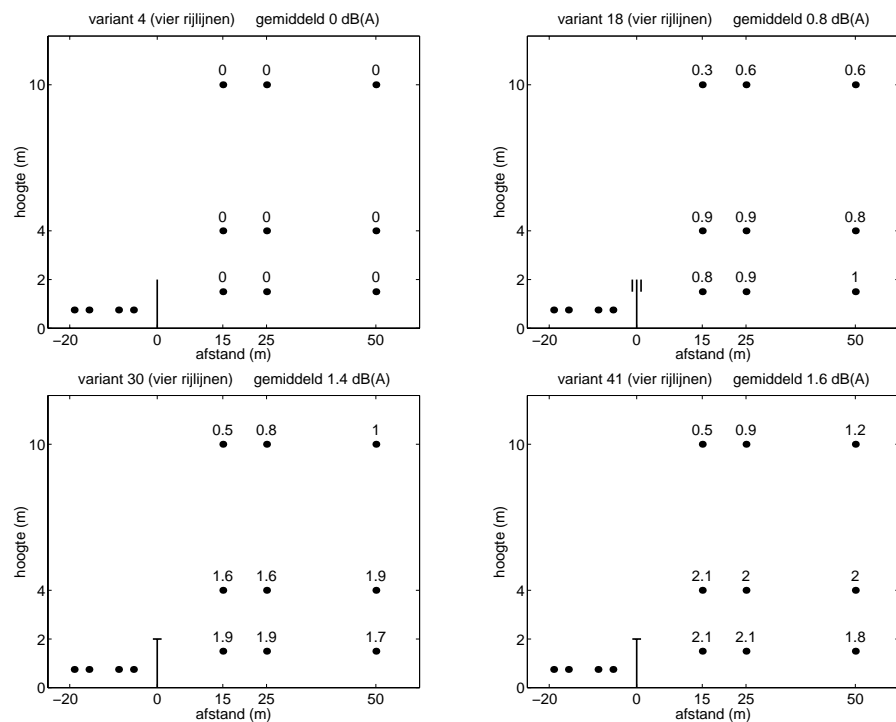
De berekende gemiddelde schermtop-reducties D voor de drie geselecteerde varianten zijn gegeven in tabel 2.1. De figuren 5.2 en 5.3 geven inzicht in de variatie van de niveaus en reducties over de negen microfoons. Figuur 5.2 laat zien dat de relatieve niveaus δL_m aanzienlijk variëren over de microfoons. Figuur 5.3 laat zien dat de variatie van de schermtop-reducties D_m veel kleiner is. Opvallend is dat de schermtopreductie kleiner is op de microfoons op 10 m hoogte dan op de microfoons op 1.5 en 4 m hoogte. De schermtoppen werken dus beter in de schaduw dan buiten de schaduw.



Figuur 5.1. Doorsnede van de geometrie van praktijksituatie 2. De bronnen bevinden zich op vier rijlijnen loodrecht op de doorsnede. De hoogte van de bronnen is 0.75 m. De hoogte van het scherm is 2 m. De afstanden tussen het scherm en de vier rijlijnen zijn: 18.99 m, 15.62 m, 8.84 m en 5.44 m (bepaald aan de hand van een doorsnede van verkeersweg N11).



Figuur 5.2. Relatieve geluidniveaus δL_m op de negen microfoons, berekend met een A-gewogen verkeerslawaispectrum voor ZOAB.



Figuur 5.3. Schermtop-reducties D_m op de negen microfoons, berekend met een A-gewogen verkeerslawaispectrum voor ZOAB.

6 Conclusies

In dit rapport zijn resultaten gepresenteerd van modelberekeningen aan schermtoppen. Er is gerekend voor drie situaties: de situatie van de diffractietest en twee praktijksituaties.

De resultaten voor de diffractietest komen goed overeen met meetresultaten. Dit betekent dat de modellering van de schermtoppen voldoende nauwkeurig is.

Bij de diffractietest blijken T-toppen met een absorberende bovenkant het beste te werken, met effecten van maximaal ongeveer 7 dB(A). L-toppen en III-toppen werken minder goed. O-toppen werken nog slechter. Het effect van O-toppen bij de diffractietest is vaak zelfs negatief: het geluid lijkt dus versterkt te worden door de top⁷.

Volgens de modelberekeningen zijn de effecten van de schermtoppen in de praktijksituaties aanzienlijk kleiner zijn dan bij de diffractietest. Voor schermtoppen met een effect van 6 dB(A) bij de diffractietest, bijvoorbeeld, vinden we bij de modelberekeningen van de praktijksituaties slechts een effect tussen 1 en 2 dB(A). De diffractietest levert dus geen *directe* voorspelling van het effect van een schermtop in de praktijk. Mogelijk bestaat er wel een indirecte 'rekenregel' om uit resultaten van de diffractietest het effect in de praktijk te bepalen. Na de geluidmetingen bij een verkeersweg ter controle van de berekeningen zal onderzocht worden of een dergelijke rekenregel kan worden opgesteld.

Er zijn drie schermtoppen geselecteerd die volgens de modelberekeningen het beste werken. Dit zijn twee T-toppen met absorptiemateriaal en een III-top zonder absorptiemateriaal. Bij de selectie van de III-top hebben ook praktische overwegingen meegespeeld, zoals bestendigheid tegen regen, eenvoud van constructie en esthetica. De berekeningen voor praktijksituatie 2 geven voor de twee T-toppen een effect tussen 1 en 2 dB(A) en voor de III-top een effect tussen 0 en 1 dB(A).

⁷ Het geluid wordt natuurlijk niet echt versterkt door de top. De berekening geeft een negatief effect omdat het geluid gedeeltelijk *door* de O-top heengaat, waardoor het scherm effectief lager is dan het basisscherm.

7 Referenties

- [1] J. van 't Hof, F. de Roo en F.G.P. van der Knaap, "Onderzoek effectiviteit schermtoppen," TNO-rapport HAG-RPT-010159.
- [2] Pr ENV 1793-4 *Road traffic noise reducing devices – Test method for determining the acoustic performance – Part 4: Intrinsic characteristics – In situ values of sound diffraction*, Draft European Standard, CEN TC 226 / WG 6
 - version 2.3, dd. 18-09-2001
 - version 3.0, dd. 11-02-2002
 - version 4.0, dd. 11-04-2002
 - version 5.0, dd. 11-09-2002.
- [3] NEN-EN 1793-3, *Geluidbeperkende constructies langs wegen - Beproevingmethode voor de bepaling van de akoestische eigenschappen - Deel 3: Standaard-geluidspectrum voor wegverkeer*, Nederlands Normalisatie Instituut, Delft, 1^e druk, september 1997.
- [4] E.M. Salomons and K.B. Rasmussen, "Numerical computation of sound propagation over a noise screen based on an analytic approximation of the wind speed field," *Applied Acoustics* **60**, 327-341 (2000).
- [5] J.F. Hamet and M. Bérengier, "Acoustical characteristics of porous pavements: a new phenomenological model," *Proc. Internoise 93* (Leuven, Belgium) 641-646 (1993).
- [6] M.C. Bérengier, M.R. Stinson, G.A. Daigle, and J.F. Hamet, "Porous road pavements: Acoustical characterization and propagation effects," *J. Acoust. Soc. Am.* **101**, 155-162 (1997).
- [7] M. Delany and E.M. Bazley, "Acoustic properties of fibrous absorbent materials," *Applied Acoustics* **3**, 105-116 (1970).

A Impedantiemodellen

Met een impedantiemodel wordt de impedantie van een oppervlak (bijvoorbeeld asfalt of absorptiemateriaal op een scherm) berekend uit parameters die de structuur van het materiaal karakteriseren. Soms hebben we te maken met een laag absorptiemateriaal op een harde ondergrond. De impedantie van een dergelijke laag kan berekend worden uit de impedantie van het materiaal en het complexe golfgetal van geluidgolven in het materiaal.

Hamet en medewerkers [5,6] hebben een impedantiemodel ontwikkeld voor poreuze materialen zoals poreus beton (Durisol) en ZOAB. Hierbij wordt aangenomen dat het 'skelet' van het materiaal star is voor geluidgolven. Parameters van dit model zijn de stromingsweerstand, porositeit en structuurfactor van het materiaal.

Delany en Bazley [7] hebben een empirisch impedantiemodel ontwikkeld voor absorberende materialen zoals mineraalwol. De enige parameter van het model is de stromingsweerstand van het materiaal. Voor grasland gebruiken we dit model met een stromingsweerstand van 200 kPa s m^{-2} .

Bij lage frequenties is het model van Delany en Bazley niet geldig. Bij lage frequenties kunnen we daarom voor materialen zoals mineraalwol beter het model van Hamet gebruiken. Met de volgende formule krijgen we een vloeiende overgang tussen Hamet bij lage frequenties en Delany en Bazley bij hoge frequenties:

$$\begin{cases} Z = Z_H & \text{voor } f < f_1 \\ Z = \frac{f - f_1}{f_2 - f_1} Z_H + \frac{f_2 - f}{f_2 - f_1} Z_{DB} & \text{voor } f_1 \leq f \leq f_2 \\ Z = Z_{DB} & \text{voor } f > f_2 \end{cases}$$

Hierin is

Z de impedantie

Z_H de impedantie volgens Hamet

Z_{DB} de impedantie volgens Delany en Bazley

f de frequentie

f_1 een parameter gegeven door $f_1 = 0.012\sigma / \rho$

f_2 een parameter gegeven door $f_2 = 0.024\sigma / \rho$

(σ is de stromingsweerstand en ρ is de dichtheid van lucht).

We duiden bovenstaande formule aan als *hybride* impedantiemodel. Voor het complexe golfgetal gebruiken we een analoge formule.

Tabel A.1 geeft de waarden van de parameters die we gebruikt hebben voor de berekeningen in dit onderzoek. De waarden zijn zo gekozen dat berekende absorptiespectra van een materiaal zo dicht mogelijk liggen bij gemeten absorptiespectra van het materiaal.

Tabel A.2 geeft de waarden van de parameters die we gebruikt hebben voor de berekeningen aan O-toppen in dit onderzoek. De O-toppen zijn gemodelleerd als absorberende cilinders. De parameters zijn bepaald op basis van ons bekende gegevens over de structuur van de schermtoppen.

Tabel A.1. Impedantiemodellen en –parameters voor de verschillende absorptiematerialen die gebruikt zijn in dit onderzoek.

	model	stromings- weerstand (kPa s m ⁻²)	porositeit	structuur- factor	laagdikte (m)
RW ^{*)} 50 / 100 / 200 mm	hybride	35	0.9	8	0.05 / 0.1 / 0.2
Cassette	hybride	40	0.9	2.7	0.8
Durisol 160 mm	Hamet	20	0.25	2	0.16
Durisol profiel	Hamet	20	0.25	2	0.13
Porocom profiel	hybride	20	0.9	4	0.1

^{*)} RW = Rockwool (mineraalwol).

Tabel A.2. Impedantiemodellen en –parameters gebruikt voor de verschillende geprefabriceerde schermtoppen (O-toppen) in dit onderzoek. De schermtoppen zijn gemodelleerd als cilinders op het scherm. De diameters van de cilinders zijn aangegeven.

Variant	diameter cilinder (m)	model	stromings- weerstand (kPa s m ⁻²)	porositeit	structuur- factor	laagdikte (m)
1, 2 Mitac	0.5	Hamet	10	0.25	4	0.5
5, 54 Dur Cil	0.3	Hamet	20	0.25	2	0.3
55 TB Korf	0.35	Hamet	4	0.27	2.5	0.4
57 HBG	0.2	hybride	20	0.9	4	0.2

B Berekende en gemeten spectra van diffractietest

Deze bijlage bevat berekende en gemeten tertsbandspectra voor alle series van de diffractietest. Elke grafiek bevat een lijn die het BEM resultaat representeert en symbolen die de meetresultaten representeren.

Opmerkingen

In het algemeen zijn de meetresultaten het meest betrouwbaar bij frequenties boven 200 Hz, doordat bij de signaalverwerking een window van 10 ms is gebruikt [1,2].

Meetresultaten op microfoons 4 en 8 zijn minder betrouwbaar dan meetresultaten op de andere microfoons. Niveaus op microfoons 4 en 8 waren namelijk lager dan op de andere microfoons, waardoor de invloed van stoorgeluid (inclusief transmissie door het scherm) groter was.

