

Defence, Safety & Security

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 R11777****Metingen en berekeningen van het effect van
zonnevelden op weg- en railverkeersgeluid
Onderzoeksfases A, B en C**

Datum	December 2021
Auteur(s)	Dr. E.M. Salomons R. Kurylek MSc Dr. ir. F.J.M. van der Eerden Ir. A.R. Eisses Ir. A.W.P. van Heijningen
Aantal pagina's	47 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	3
Opdrachtgever	Rijkswaterstaat, ProRail
Projectnaam	Geluidseffecten zonnevelden
Projectnummer	060.44110 / 060.49188

Alle rechten voorbehouden.

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

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

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

© 2021 TNO

Colofon

Onderzoeksteam TNO

Rafal Kurylek, Frits van der Eerden, Erik Salomons, Arno Eisses, Ad van Heijningen

Begeleidingsteam

Rijkswaterstaat: Willem Jan van Vliet, Jan Timmerman, Ivo Booijsink

ProRail: Nils Yntema

RIVM: Arnaud Kok

Samenvatting

TNO heeft metingen en berekeningen uitgevoerd om te bepalen hoeveel de geluidniveaus bij woningen in de buurt van autowegen en spoorlijnen veranderen als er een zonneveld wordt geplaatst tussen de weg of spoorlijn en de woningen. De resultaten van de metingen en berekeningen worden in dit rapport beschreven.

De metingen zijn uitgevoerd rond zonnevelden bij Zwolle en Veldhoven. De meetresultaten zijn gebruikt om een rekenmodel, gebaseerd op de eindige-elementenmethode voor geluiduitbreiding, te valideren voor situaties met zonnevelden.

Na de validatie is het rekenmodel toegepast op 24 situaties ('varianten') met zonnevelden langs wegen en spoorlijnen, gedefinieerd in overleg met Rijkswaterstaat en ProRail. Geluidniveaus zijn berekend op posities tot circa 50 m achter het zonneveld. De breedte van het zonneveld is gevarieerd (breedtes van 9, 40 en 200 m).

De geluidniveaus zijn berekend voor frequenties van 125 tot 2000 Hz. De niveaus voor de verschillende frequenties zijn bij elkaar opgeteld om het geluidniveau in dB(A) te bepalen. Hierbij is rekening gehouden met typerende geluidspectra van wegverkeer en railverkeer.

Uit de resultaten van de berekeningen blijkt hoe groot de verandering is van het geluidniveau in dB(A) door het plaatsen van het zonneveld op een grasbodem. De verandering wordt in dit onderzoek aangeduid als 'het effect van het zonneveld'. Voor varianten met 1 m brede zonnepanelen, met de top op 0.75 m hoogte ten opzichte van het maaiveld, is het effect van het zonneveld beperkt tot waarden van -2 tot +1 dB(A). Voor dergelijke zonnevelden, waarbij het zicht vanaf weg of spoor op de waarnemerposities niet wordt onderbroken door de zonnepanelen, zijn de effecten op geluidniveaus bij woningen dus naar verwachting gering.

Dit is als volgt te verklaren. Aan de ene kant bedekken de harde panelen de absorberende grasbodem, waardoor een hoger geluidniveau kan worden verwacht. Aan de ander kant zijn de panelen een obstakel voor geluid, zodat er afscherming en verstrooiing van het geluid optreedt. De tegengestelde effecten van verminderde bodemabsorptie en afscherming en verstrooiing zijn in deze situatie ongeveer gelijk.

Voor bredere zonnepanelen, met de top van het zonneveld op 2.5 of 3 m hoogte, treden effecten op van -5 dB(A) tot 0 dB(A). De grotere geluidreductie voor deze zonnevelden is een gevolg van het feit dat hogere zonnepanelen het geluid beter afschermen dan lagere zonnepanelen. Het zonneveld werkt in deze situaties dus vooral als een geluidafschermend object.

Inhoudsopgave

	Samenvatting	3
1	Inleiding	5
2	Metingen en berekeningen voor zonnevelden bij Zwolle en Veldhoven	7
3	Berekeningen voor varianten	8
4	Conclusies.....	15
5	Referenties	16
6	Ondertekening	17

Bijlage(n)

A Fase A: metingen aan zonnevelden bij Zwolle en Veldhoven

B Fase B: Vergelijking meten-rekenen voor het zonneveld bij Veldhoven

C Fase C: Berekeningen voor varianten

1 Inleiding

In opdracht van Rijkswaterstaat en ProRail heeft TNO onderzoek gedaan naar de invloed van zonnevelden op de uitbreiding¹ van geluid van autowegen en spoorlijnen naar de nabijgelegen omgeving. In dit rapport worden de resultaten van het onderzoek beschreven. Het onderzoek bestaat uit drie fases:

- Fase A: geluidmetingen aan een zonneveld bij Veldhoven,
- Fase B: berekeningen voor de situatie bij Veldhoven,
- Fase C: berekeningen voor 24 varianten van zonnevelden langs weg en spoor.

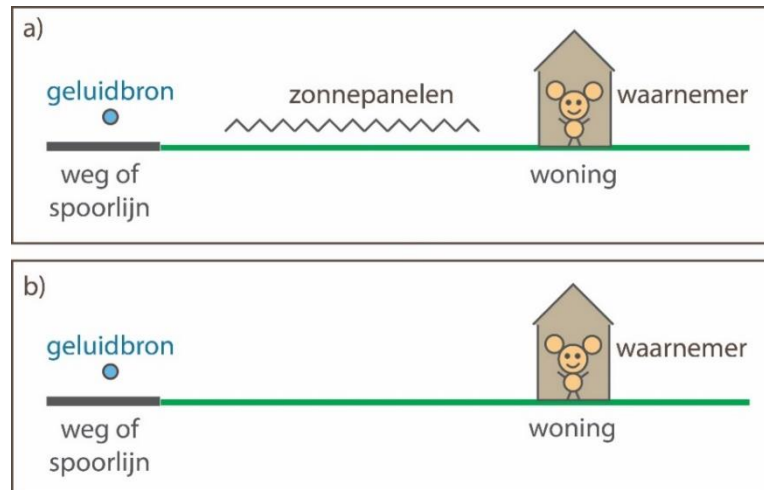
In fase A zijn meetresultaten verkregen voor verschillende posities van de bron en de waarnemer rond het zonneveld bij Veldhoven. In fase B zijn de meetresultaten gebruikt om een geavanceerd rekenmodel te valideren voor situaties met zonnevelden. In fase C is het rekenmodel toegepast op de 24 varianten.

Men zou kunnen verwachten dat het plaatsen van zonnevelden langs een weg of een spoorlijn leidt tot hogere geluidniveaus bij woningen. Zonnepanelen bestaan namelijk uit materiaal dat geluid sterker reflecteert dan bijvoorbeeld grasland dat doet. Aan de andere kant vormen zonnepanelen ook een obstakel voor het geluid (zie figuur 1), waardoor de geluidniveaus juist zouden kunnen afnemen. Het kan dus beide kanten opgaan. Het doel van dit onderzoek is om de veranderingen van het geluidniveau door zonnevelden te bepalen voor verschillende situaties bij wegen en spoorlijnen.

We hebben eerst geluidmetingen met luidsprekers gedaan rond een zonneveld bij Veldhoven. In een eerdere fase van het onderzoek hebben we metingen gedaan aan een zonneveld bij Zwolle [1]. Vervolgens hebben we berekeningen uitgevoerd met een geavanceerd numeriek rekenmodel (FEM²). Zowel de metingen (fase A) als de berekeningen (fases B en C) worden in dit rapport beschreven. In de bijlagen worden de metingen en berekeningen in meer detail beschreven.

¹ Het gaat hier om de *overdracht* van het geluid van de bron naar de waarnemer. Het geluid breidt zich uit in alle richtingen rond de bron en bereikt zo waarnemers in de omgeving.

² FEM = Finite Element Method, in het Nederlands aangeduid als 'eindige-elementenmethode'.



Figuur 1 Het geluidniveau bij een waarnemer is in het algemeen verschillend in de twee afgebeelde situaties: a) situatie met zonnepanelen, en b) situatie zonder zonnepanelen. Het verschil in geluidniveau wordt in dit onderzoek aangeduid als het 'effect van de zonnepanelen'.

2 Metingen en berekeningen voor zonnevelden bij Zwolle en Veldhoven

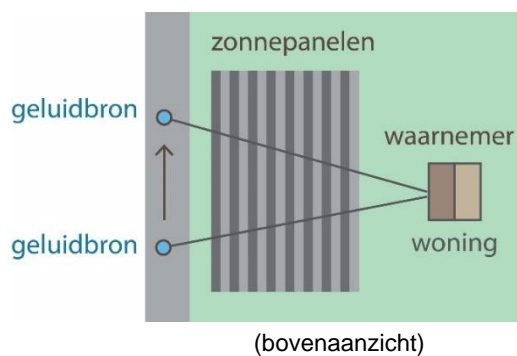
In 2019 hebben we geluidmetingen uitgevoerd aan een zonneveld bij Zwolle [1]. Hierbij is een luidspreker als geluidbron gebruikt. Er is gemeten voor verschillende richtingen van het geluidpad³ over de zonnepanelen. In de praktijk bij een weg of een spoorlijn treden ook verschillende richtingen van het geluidpad op, zoals weergegeven in figuur 2. Bovendien zijn de metingen uitgevoerd bij twee verschillende windrichtingen, vanwege de invloed van wind op geluiduitbreiding.

We hebben ook berekeningen met FEM gedaan voor het zonneveld bij Zwolle [1]. Er werden aanzienlijke verschillen gevonden tussen de meetresultaten en de rekenresultaten. Ook bleek de geluiduitbreiding sterk afhankelijk van de posities van de microfoon en de bron. Dit leidde tot de volgende aanbevelingen voor het meten van geluiduitbreiding over zonnevelden:

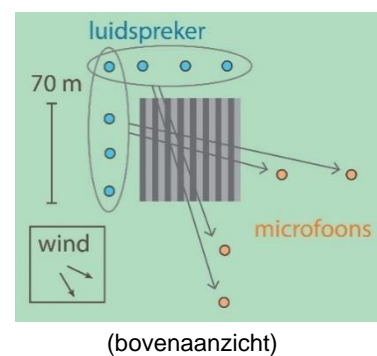
- middel geluidniveaus over verschillende bronposities langs een lijn,
- pas meer variatie toe in de posities van de microfoons,
- meet ook de akoestische bodemeigenschappen.

De reden voor de laatste aanbeveling is dat de akoestische bodemeigenschappen medebepalend zijn voor het effect van de zonnepanelen (zie ook figuur 1).

De aanbevelingen zijn opgevolgd bij de geluidmetingen die we in 2020 hebben gedaan aan een zonneveld bij Veldhoven. Hierbij is gemeten met meer bronposities langs twee lijnen naast het zonneveld en met meer microfoonposities (zie figuur 3). Bovendien zijn de akoestische bodemeigenschappen gemeten. Na middeling over bronposities langs een lijn werd nu een redelijke overeenstemming gevonden tussen meetresultaten en rekenresultaten. Globaal werd voor deze situatie bij Veldhoven gevonden dat de geluidniveaus enkele dB's afnemen of ongeveer gelijk blijven, afhankelijk van de situatie (bronhoogte, oriëntatie van de panelen).



Figuur 2 Als een geluidbron (auto, trein) langs een weg of spoorlijn beweegt, dan varieert de richting van het geluidpad over de zonnepanelen.



Figuur 3 Meetopstelling bij Veldhoven, met verschillende posities van de geluidbron (luidspreker) en microfoons. De windrichting was ongeveer noordwest.

³ Met het geluidpad wordt bedoeld: de lijn van de bron naar de waarnemer (of microfoon).

3 Berekeningen voor varianten

In hoofdstuk 2 is beschreven dat het FEM-rekenmodel resultaten geeft die redelijk overeenstemmen met de meetresultaten voor het zonneveld bij Veldhoven. Meer in het algemeen geldt dat FEM geschikt is voor berekening van geluiduitbreiding in situaties met een complexe geometrie (zoals een zonneveld). Het model is door TNO eerder in vergelijkbare situaties met complexe geometrieën toegepast [2,3]. We concluderen daarom dat het FEM-rekenmodel geschikt is voor berekeningen van het effect van zonnepanelen.

Het rekenmodel kan dus ook worden gebruikt om voorspellingen te doen voor nieuwe situaties. In overleg met Rijkswaterstaat en ProRail hebben we 24 nieuwe situaties met zonnevelden gedefinieerd. De 24 situaties worden in dit onderzoek aangeduid als 'varianten'. Het gaat om twee sets van 12 varianten:

- 12 varianten met een zonneveld langs een autoweg,
- 12 varianten met een zonneveld langs een spoorlijn.

We hebben het gevalideerde rekenmodel toegepast op de 24 varianten. Voor elke variant is gemiddeld over verschillende posities van de geluidbron langs de weg of spoorlijn. Voor de hoogte van de geluidbron zijn we uitgegaan van 0.1 m boven het wegdek en 0.5 m boven het spoor. Geluidniveaus zijn berekend op posities tot circa 50 m achter het zonneveld, op hoogtes van 5 en 10 m⁴.

Alle berekeningen zijn uitgevoerd voor een reeks puntbronnen, representatief voor het geluid van een enkele passerende auto of trein. Bij een auto gaat het om het geluid van de banden op het wegdek. Bij een trein gaat het om het geluid van de wielen op de rails. Een berekening van geluiduitbreiding van een puntbron naar een waarnemer is de basis voor de Nederlandse standaard rekenmethode voor weg- en railverkeersgeluid (SRM2). Het gemiddelde geluidniveau wordt berekend op basis van berekeningen voor puntbronnen op verschillende posities van passerende auto's of treinen.

Bij de 12 varianten voor wegverkeer zijn de volgende variaties toegepast:

- Breedte van het zonneveld: 9 en 40 m,
- Oriëntatie van de zonnepanelen: oost-west of zuid,
- Toevoegen van een vangrail langs de weg,
- Hoogte van de top van de zonnepanelen t.o.v. de weg: 0.75, -1.25, en 2 m,
- Afstand van de bron (rijlijn) tot het zonneveld: 14 en 34 m (representatief voor de 'tweede' en 'vijfde' rijbaan op een meerbaansweg).

Bij oriëntatie zuid zijn twee mogelijkheden onderscheiden: i) met de voorkant van het zonnepaneel naar de weg toe gericht (aangeduid als 'voor') en ii) met de voorkant van het zonnepaneel van de weg af gericht (aangeduid als 'achter'). De vangrail is in sommige situaties toegevoegd om de praktijksituatie beter te modelleren.

⁴ In bijlage C zijn ook resultaten gepresenteerd voor een waarnemerhoogte van 1.5 m. Deze zijn echter als minder representatief beoordeeld voor het gemiddelde effect van een zonneveld, vanwege sterke variaties van het geluidniveau dicht bij de bodem.

Bij de 12 varianten voor railverkeer zijn de volgende variaties toegepast:

- Breedte van het zonneveld: 40 en 200 m,
- Oriëntatie van de zonnepanelen: oost-west of zuid,
- Toevoegen van een sloot langs de spoorlijn,
- Hoogte van het spoor t.o.v. het maaiveld: 0.25, 1.5, en 4.5 m,
- Hoogte van de top van de zonnepanelen t.o.v. maaiveld: 0.75, 2.5, en 3 m,
- Afstand van de bron (rijlijn) tot het zonneveld: 16 en 34 m.

Bij de keuze van de getallen bij de verschillende varianten is rekening gehouden met de afmetingen en opstellingen van zonnepanelen in de praktijk. Het volgende tekstblok geeft een korte beschrijving hiervan.

Opstellingen van zonnepanelen in de praktijk

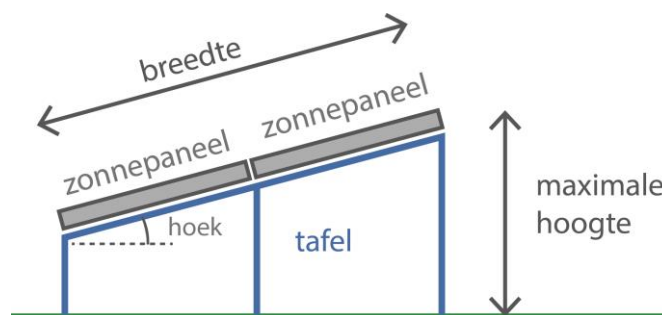
Afmetingen

De afmetingen van zonnepanelen zijn meestal 1 m bij 1.6 m (60 cellen) of 1 m bij 2.0 m (72 cellen).

Opstelling

In een veldopstelling worden zonnepanelen aan elkaar geschakeld en geplaatst op een stelling: de tafels. Deze tafels worden meestal op een minimale hoogte van 60 cm boven maaiveld geplaatst.

De zonnepanelen worden meestal in "landscape" (lange zijde horizontaal) geplaatst. Afhankelijk van de maximaal toegestane bouwhoogte worden een aantal zonnepanelen boven elkaar op een tafel gemonteerd.



Schematische illustratie (zijaanzicht) van een opstelling met twee zonnepanelen boven elkaar op een tafel. De (totale) breedte en de hoek bepalen de maximale hoogte.

Hoogte en onderlinge afstand

De hoek waaronder de panelen staan en het aantal rijen panelen bovenop elkaar bepalen de maximale hoogte van de tafel.

Tussen de tafels wordt ruimte vrijgehouden om schaduwwerking van de ene tafel op de andere tafel te voorkomen. Dit is met name het geval voor panelen die op het zuiden zijn georiënteerd. Een vuistregel is dat de tussenafstand 1.5 keer de hoogte van de panelen is.

Opstellingen zuid en oost-west

Panelen kunnen worden geplaatst in de opstelling 'zuid' (panelen gericht naar het zuiden) of in de opstelling oost-west (panelen gericht naar het oosten/westen).

bron: <https://www.zuid-holland.nl/onderwerpen/ruimte/ruimtelijke/handreiking/bouwstenen-zonneveld/>

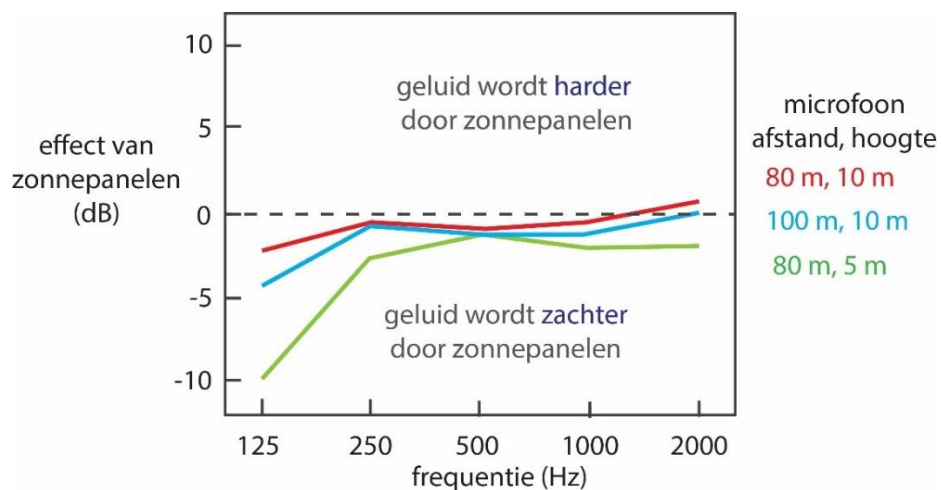
Voor de meeste varianten die in dit onderzoek zijn beschouwd zijn we uitgegaan van een breedte van 1 m voor de zonnepanelen (dus een enkele rij zonnepanelen). Voor sommige situaties zijn we uitgegaan van een grotere totale breedte, van 4 tot 6 m (dus vier tot zes rijen zonnepanelen boven elkaar). De zonnepanelen met grotere totale breedte reiken tot een grotere hoogte (afhankelijk van de elevatiehoek), en zorgen daardoor voor een grotere afscherming van geluid (meer geluidreductie), zoals uit de resultaten zal blijken.

Figuur 4 toont een voorbeeld van het resultaat van een berekening, in dit geval voor wegverkeer. De grafiek toont het effect van de zonnepanelen voor vijf frequenties (octaafbanden): 125, 250, 500, 1000 en 2000 Hz. Verkeersgeluid bestaat namelijk uit verschillende componenten, met een frequentie ('toonhoogte') die varieert van ongeveer 125 Hz tot 2000 Hz. Het effect van een obstakel zoals een geluidscherm of een zonneveld varieert met de frequentie van het geluid. Daarom worden berekeningen uitgevoerd voor verschillende frequenties. De spectra weergegeven in figuur 4 zijn bepaald uit telkens twee berekeningen:

- i) een berekening voor de situatie met zonneveld,
- ii) een berekening voor de situatie zonder zonneveld.

Deze verschilberekening is geïllustreerd in figuur 1 in hoofdstuk 1.

Voor de bodem onder de zonnepanelen zijn we uitgegaan van grasland, met een gemiddelde akoestische bodemhardheid. Dezelfde grasbodem is ook gebruikt voor de referentiesituatie zonder zonnepanelen (zie figuur 1). Zoals eerder aangegeven is de akoestische bodemhardheid medebepalend voor het effect van de zonnepanelen.



Figuur 4 Berekende spectra van het effect van zonnepanelen, voor drie posities van de microfoon (afstand 80 of 100 m tot de rijlijn). De berekening is uitgevoerd voor variant 7 voor wegverkeer, met een 40 m breed zonneveld met panelen in de oriëntatie zuid, en met een vangrail langs de weg.

De berekende waarden van het effect van zonnepanelen voor de verschillende frequenties zijn gecombineerd om het totale effect van de zonnepanelen voor wegverkeer of railverkeer te bepalen. Hierbij wordt ook de A-weging voor het menselijk gehoor toegepast, zoals gebruikelijk is voor omgevingsgeluid. Het

resultaat wordt aangeduid als het effect in dB(A). Verder is uitgegaan van representatieve spectra voor wegverkeer en railverkeer (zie bijlage C). De grootste bijdragen aan het effect in dB(A) zijn afkomstig van het frequentiegebied tussen 500 en 2000 Hz.

In tabel 1 zijn de berekende waarden van het effect van zonnepanelen in dB(A) gegeven voor de twaalf varianten voor wegverkeer, voor vier microfoonposities. In tabel 2 zijn de waarden voor railverkeer gegeven. De geometrieën zijn naast de twee tabellen weergegeven (ze zijn in meer detail weergegeven in bijlage C).

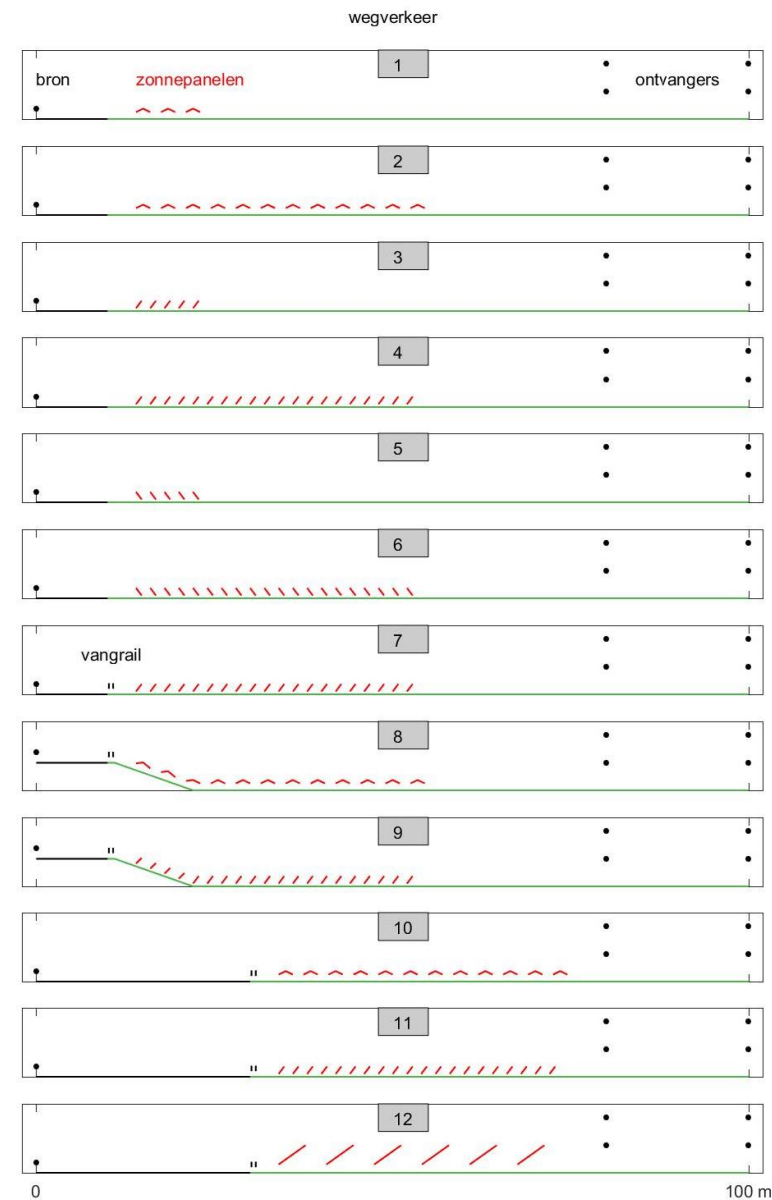
De waarden in de tabellen variëren van -2 dB(A) tot +1 dB(A) voor wegverkeer en van -5 dB(A) tot +1 dB(A) voor railverkeer. Een negatieve waarde geeft aan dat verkeersgeluid zachter wordt (d.w.z. een lager geluidniveau heeft bij de ontvangers) als gevolg van het plaatsen van zonnepanelen op de grasbodem.

Voor varianten met de top van het zonneveld op 0.75 m hoogte boven het maaiveld zijn de waarden voor railverkeer beperkt tot waarden van -1 dB(A) tot +1 dB(A), vergelijkbaar met de waarden voor wegverkeer. Voor dergelijke zonnenvelden zijn de effecten op geluidniveaus bij woningen dus naar verwachting gering.

Waarden van -5 dB(A) tot 0 dB(A) treden op voor varianten 7-12 voor railverkeer, met zonnepanelen die tot een hoogte van 2.5 of 3 m reiken (afhankelijk van de hoek en de breedte van de zonnepanelen). De grotere geluidreductie voor deze zonnenvelden wordt veroorzaakt doordat de zonnepanelen met grotere maximale hoogte het geluid beter afschermen dan zonnepanelen die tot lagere hoogte reiken. Met andere woorden, als de top van het zonneveld hoger ligt dan treedt meer afscherming van het geluid op.

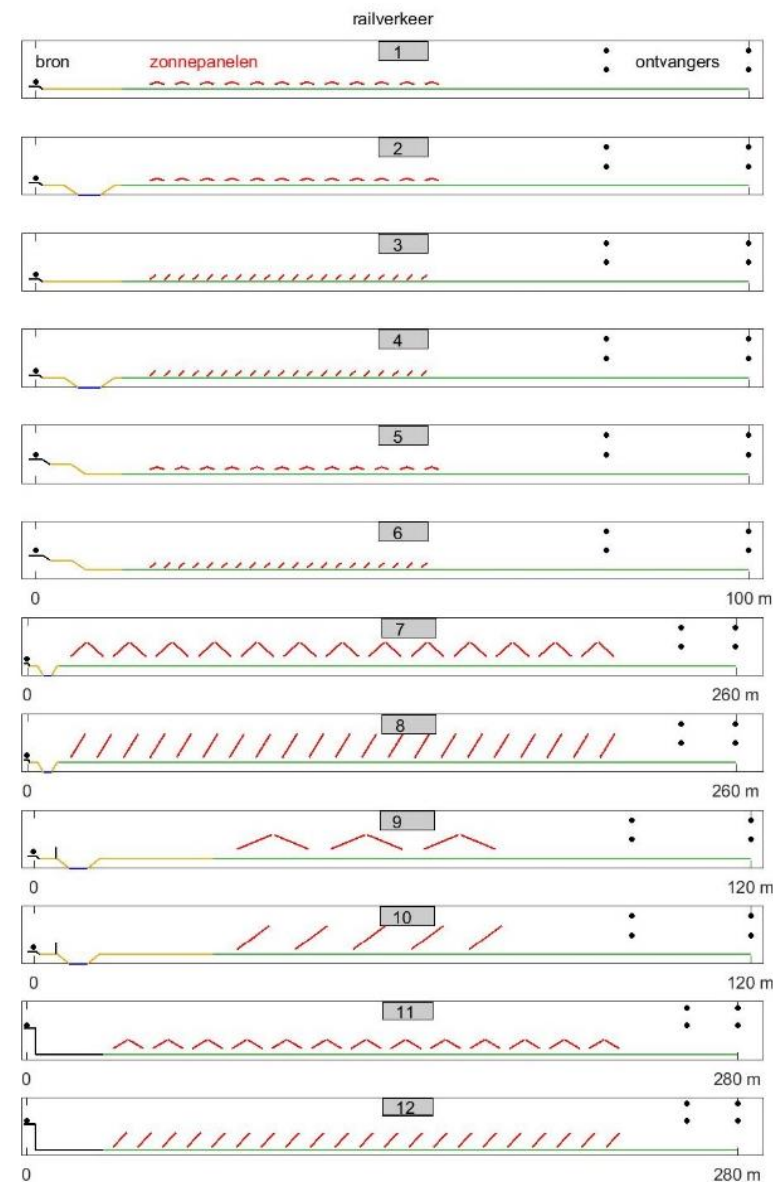
Tabel 1 Het effect van zonnepanelen in dB(A), voor twaalf varianten 1-12 met wegverkeer en voor vier microfoonposities. Waarden in groen zijn -1 dB(A) of lager, waarden in rood zijn 1 dB(A) of hoger. De geometrieën zijn rechts afgebeeld; voor meer detail, zie bijlage C. De microfoons zijn voor de duidelijkheid lager afgebeeld dan 5 en 10 m.

	zonneveld	rijlijn-veld (m)	vang-rail	microfoonpositie (afstand tot rijlijn, hoogte) (m)			
				(80, 5)	(100, 5)	(80, 10)	(100, 10)
1	9 m breed, oost-west	10	nee	-0.7	-0.7	0.3	0.2
2	40 m breed, oost-west	10	nee	0.2	0.3	0.2	0.2
3	9 m breed, zuid, voor	10	nee	-1.0	-1.1	0.6	0.5
4	40 m breed, zuid, voor	10	nee	0.0	0.1	0.5	0.5
5	9 m breed, zuid, achter	10	nee	-1.2	-1.4	0.5	0.4
6	40 m breed, zuid, achter	10	nee	-0.3	-0.2	0.5	0.4
7	als variant 4	10	ja	-1.9	-1.8	-0.8	-1.1
8	als variant 2, 2 m verdiept	10	ja	0.1	0.1	0.0	0.1
9	als variant 4, 2 m verdiept	10	ja	0.2	0.2	0.1	0.1
10	40 m breed, oost-west	30	ja	0.7	0.8	0.2	-0.1
11	40 m breed, zuid, voor	30	ja	1.0	1.2	0.1	0.0
12	als variant 4, 4 m panelen	30	ja	-0.2	-0.6	0.3	0.2



Tabel 2. Het effect van zonnepanelen in dB(A), voor twaalf varianten 1-12 met railverkeer en voor vier microfoonposities. Waarden in groen zijn -1 dB(A) of lager, waarden in rood zijn 1 dB(A) of hoger. De geometrieën zijn rechts afgebeeld; voor meer detail, zie bijlage C. De microfoons zijn voor de duidelijkheid lager afgebeeld dan 5 en 10 m.

	zonneveld	hoogte spoor (m)	terrein	microfoonpositie (afstand tot rijlijn, hoogte) (m)			
				(80, 5)	(100, 5)	(80, 10)	(100, 10)
1	40 m breed, oost-west	0.25	vlak	0.7	0.7	0.1	0.2
2	40 m breed, oost-west	0.25	sloot	0.2	0.3	0.0	0.2
3	40 m breed, zuid	0.25	vlak	1.1	1.2	0.1	0.3
4	40 m breed, zuid	0.25	sloot	0.8	0.9	0.1	0.3
5	40 m breed, oost-west	1.5	vlak	-0.6	-0.7	-0.2	-0.1
6	40 m breed, zuid	1.5	vlak	-0.1	-0.1	0.2	0.2
				(240, 5)	(260, 5)	(240, 10)	(260, 10)
7	200 m breed, oost-west	0.25	sloot	-3.2	-3.2	-2.5	-2.6
8	200 m breed, zuid	0.25	sloot	-4.9	-4.8	-4.5	-4.6
				(100, 5)	(120, 5)	(100, 10)	(120, 10)
9	40 m breed, oost-west	0.25	sloot	-1.3	-1.1	0.2	0.2
10	40 m breed, zuid	0.25	sloot	-3.4	-3.1	0.0	0.2
				(260, 5)	(280, 5)	(260, 10)	(280, 10)
11	200 m breed, oost-west	4.5	vlak	-4.3	-3.7	-0.4	-0.4
12	200 m breed, zuid	4.5	vlak	-2.3	-1.2	-0.3	-0.3



4 Conclusies

TNO heeft in dit onderzoek metingen uitgevoerd aan zonnevelden bij Veldhoven en Zwolle. Op basis van de meetresultaten is een rekenmodel voor geluiduitbreiding gevalideerd voor situaties met een zonneveld. Het rekenmodel is gebaseerd op de eindige-elementmethode (FEM).

Met het rekenmodel heeft TNO vervolgens berekeningen uitgevoerd voor verschillende varianten van zonnevelden langs autowegen en spoorlijnen. Geluidniveaus zijn berekend voor waarnemers tot circa 50 m achter het zonneveld. De breedte van het zonneveld is gevarieerd, met waardes van 9, 40 en 200 m.

Uit de resultaten van de berekeningen blijkt hoe groot de verandering is van het geluidniveau in dB(A) door het plaatsen van het zonneveld op een grasbodem. De verandering is in dit onderzoek aangeduid als 'het effect van het zonneveld'

Voor varianten met de top van de zonnepanelen op 0.75 m hoogte ten opzichte van het maaiveld is het effect voor wegverkeer en railverkeer beperkt tot waardes tussen -2 en +1 dB(A). Voor dergelijke zonnevelden zijn de effecten op geluidniveaus bij woningen dus naar verwachting gering.

Voor varianten met de top van de zonnepanelen op 2.5 of 3 m hoogte treden waardes op van -5 dB(A) tot 0 dB(A). De grotere geluidreductie voor deze zonnevelden is een gevolg van het feit dat hogere zonnevelden het geluid beter afschermen dan lagere zonnevelden. Het zonneveld werkt in deze situaties dus als een geluidafschermend object.

Ook voor verschillende frequentiebanden is het effect van het zonneveld op het geluidniveau onderzocht. Bij lage frequenties (met name 125 Hz) kunnen relatief grote effecten optreden van meer dan -5 dB. Dit betekent dat de geluidniveaus bij deze frequenties met meer dan 5 dB afnemen door het plaatsen van een zonneveld. Bij hogere frequenties (500 – 2000 Hz) zijn de gevonden effecten in het algemeen kleiner, tussen -2 en + 2 dB. Voor situaties met een hogere top van het zonneveld zijn de gevonden effecten bij hogere frequenties groter, als gevolg van de genoemde afscherming.

Het totale effect van een zonneveld, waarbij de bijdragen voor alle frequenties worden gecombineerd, wordt gedomineerd door het frequentiegebied 500 – 2000 Hz, vanwege de vorm van de spectra van wegverkeersgeluid en railverkeersgeluid. Dit is de reden waarom het effect in dB(A) beperkt is, in situaties met de top van het zonneveld op 0.75 m hoogte, tot waardes van -2 tot +1 dB(A).

5 Referenties

- [1] A.R. Eisses, E.M. Salomons, F.J.M. van der Eerden, “Invloed van zonnevelden langs wegen op verkeersgeluid Onderzoeksresultaten fase 1”, TNO-rapport 2020 R10408.
- [2] F.J.M. van der Eerden, R. Kurylek, T.P.R. van der Laan, “Vergelijking van meet- en rekenresultaten voor de Whiswall”, TNO-rapport 2020 R11645.
- [3] E. Salomons, S. Blaak, R. Kurylek, F. van der Eerden, T. van der Laan, “Effect van de Whiswall op grote afstand: situaties met FEM-PE en een rekenregel voor SRM2”, TNO-rapport 2021 R10471.

6 Ondertekening

Den Haag, december 2021

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'C.M. Ort', with a horizontal line underneath.

Drs. C.M. Ort
Research manager

TNO
Akoestiek & Sonar

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'E.M. Salomons', with a horizontal line underneath.

Dr. E.M. Salomons
Auteur

A Fase A: metingen aan zonnevelden bij Zwolle en Veldhoven

Inhoud

- A1. Inleiding
- A2. Beschrijving van de metingen
- A3. Meting van de akoestische bodemhardheid

A.1 Inleiding

In dit onderzoek zijn geluidmetingen uitgevoerd aan zonnevelden bij Veldhoven en Zwolle. De geluidmetingen aan het zonneveld bij Zwolle zijn uitgevoerd in 2019 en zijn beschreven in een rapport uit 2020 [1]. Hierbij bleek dat de meetresultaten niet goed overeenkwamen met resultaten van berekeningen. Bovendien bleek dat de geluidniveaus sterk varieerden met kleine veranderingen van de posities van de bron (luidspreker) en de microfoon. Dit leidde tot drie aanbevelingen voor nieuwe metingen:

- middel geluidniveaus over verschillende bronposities langs een lijn,
- pas meer variatie toe in de posities van de microfoons,
- meet ook de akoestische eigenschappen van de bodem.

De reden voor de laatste aanbeveling is dat de akoestische bodemeigenschappen medebepalend zijn voor het effect van de zonnepanelen

In 2020 zijn nieuwe metingen uitgevoerd aan een zonneveld bij Veldhoven, rekening houdend met bovenstaande aanbevelingen. Nu werd, na middeling over verschillende bronposities langs een lijn, een redelijke overeenstemming gevonden tussen meetresultaten en rekenresultaten (zie bijlage B). Uit de resultaten bleek verder dat men voor verkeersgeluid kan verwachten dat de geluidniveaus achter een zonneveld gemiddeld enkele dB's afnemen, of ongeveer gelijk blijven, vergeleken met de situatie met alleen grasland.

In deze bijlage worden verder alleen de metingen bij Veldhoven beschreven. Voor de metingen bij Zwolle wordt verwezen naar het rapport uit 2020 [1].

A.2 Beschrijving van de metingen

De metingen zijn uitgevoerd aan een zonneveld op het zonnepark "De Vooraard" in Veldhoven. Figuur A1 toont een satellietfoto van het zonneveld. De grootte van het veld is ongeveer 70 m bij 70 m. De zonnepanelen staan in de opstelling oost-west.



Figuur A.1 Satellietfoto uit Google van het zonneveld van circa 70 m bij 70 m op zonnepark "De Voorraad" in Veldhoven.

Figuur A.2 toont de opstelling van de geluidbron (luidspreker) en de microfoons bij de metingen. De geluidbron is geplaatst op vier posities langs twee lijnen:

- lijn A: posities 1A-4A.
- lijn B: posities 1B-4B.

Op elke positie is gemeten met twee bronhoogtes:

- hoogte 2.3 m (gelijk aan de hoogte van de toppen van de zonnepanelen),
- hoogte 3.8 m.

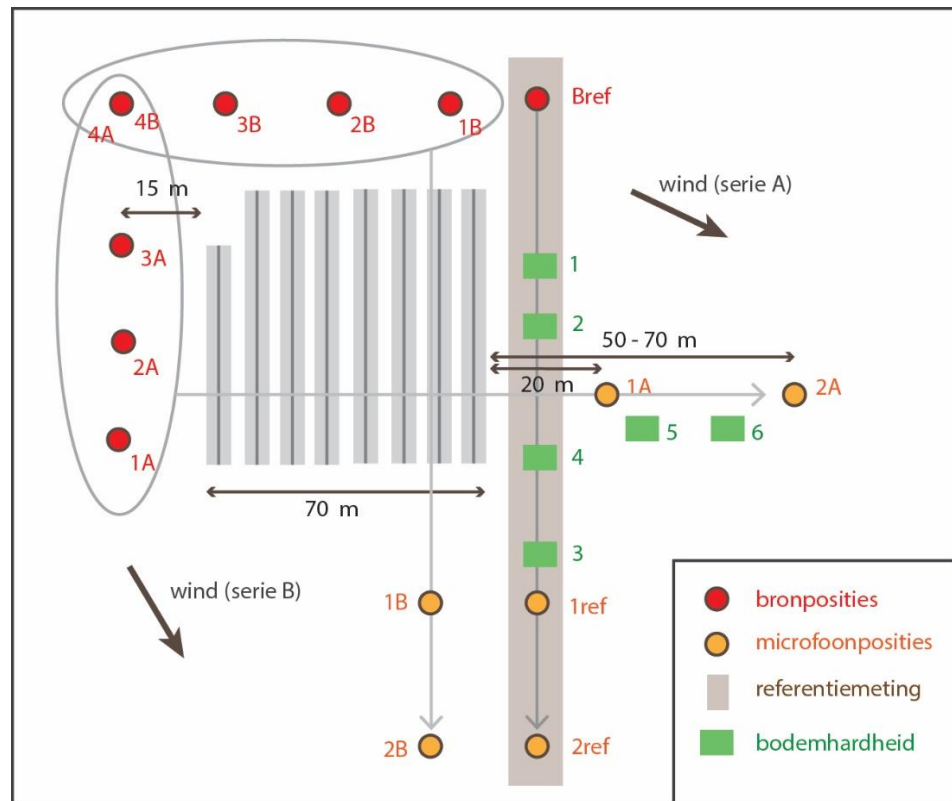
De microfoons zijn geplaatst op posities 1A en 2A voor bronnen op lijn A en op posities 1B en 2B voor bronnen op lijn B. Op deze wijze kon worden gemeten voor verschillende richtingen van het geluidpad over het zonneveld. De hoogtes van de microfoons op de verschillende posities zijn als volgt:

- posities 1A en 1B: hoogtes 1.5 m, 3 m, 5 m,
- posities 2A en 2B: hoogte 5 m.

Er zijn ook referentiemetingen uitgevoerd naast het zonneveld, met de bron op positie Bref en de microfoons op posities 1ref en 2ref.

De windrichting varieerde tussen W en NW, zoals aangegeven in de figuur. De wind was vrij zwak. De wind en de temperatuur zijn tijdens de metingen geregistreerd met behulp van een 10 m hoge meteorologische mast. Met de resultaten is het hoogteprofiel van de effectieve geluidssnelheid bepaald, dat gebruikt is bij de berekeningen beschreven in bijlage B.

Figuur A.3 toont vier foto's die een indruk geven van de metingen.



Figuur A.2 Opstelling van de geluidbron (luidspreker) en microfoons bij de metingen bij Veldhoven. De zes punten gemarkeerd met een groene rechthoek zijn locaties waar metingen zijn gedaan van de akoestische bodemhardheid (zie paragraaf A.3).

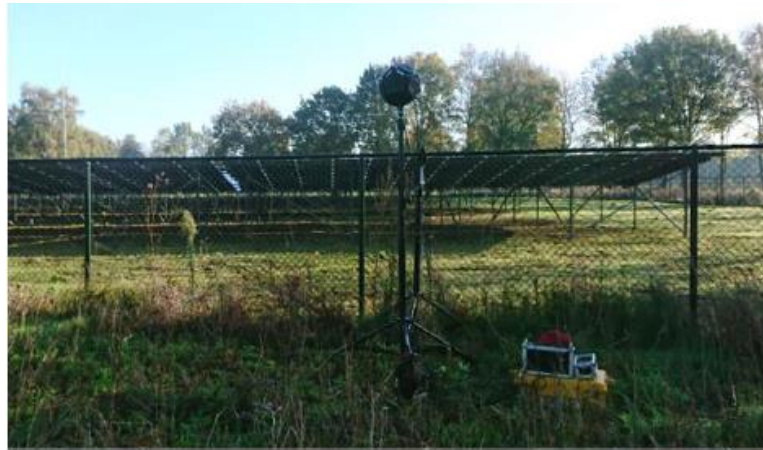


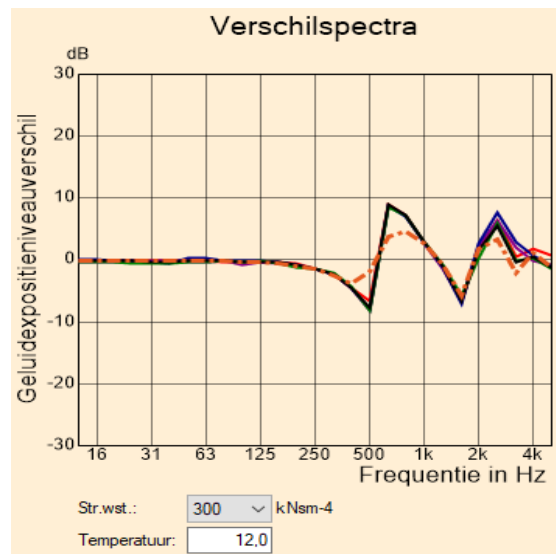
Figure A.3 Foto's van de geluidbron (boven), een microfoon (midden, links), de meteorologische mast (midden rechts), en de geluidbron met een referentiemicrofoon op 1 m afstand (onder).

A.3 Meting van de akoestische bodemhardheid

Op zes plaatsen zijn metingen gedaan van de akoestische bodemhardheid. Deze plaatsen zijn gemarkeerd met een groene rechthoek in figuur A.2.

De akoestische bodemhardheid wordt gerepresenteerd door de stromingsweerstand, uitgedrukt in kPa s m^{-2} . In combinatie met een empirisch rekenmodel van Delany en Bazley bepaalt de stromingsweerstand de akoestische impedantie van de bodem, als functie van de frequentie. De impedantie wordt gebruikt bij berekeningen van geluiduitbreiding.

Om de stromingsweerstand te bepalen is gebruik gemaakt van een bekende techniek met twee microfoons boven elkaar. Er wordt gewerkt met een kortdurende geluidspuls, die een breed geluidsspectrum genereert. Het verschil tussen de spectra op de twee microfoons wordt gefit aan een berekend verschilsspectrum, waarbij de stromingsweerstand als fitparameter wordt gebruikt. Figuur A.4 geeft een voorbeeld van de fitprocedure. In tabel A.1 zijn de resultaten van de metingen gegeven. Op grond van de resultaten hebben we voor de berekeningen (bijlage B) een waarde van 300 kPa s m^{-2} geselecteerd.



Figuur A.4 Voorbeeld van verschilsspectra ter bepaling van de stromingsweerstand van de bodem.

Tabel A.1 Waardes van de stromingsweerstand voor de zes plaatsen aangegeven in figuur A.2 met een groene rechthoek.

plaats	beschrijving	stromingsweerstand in kPa s m^{-2}
1	vrij hoge vegetatie	250-330
2	vrij hoge vegetatie	250-330
3	ongemaaid gras	500-600
4	overgang van vrij hoge vegetatie naar gras	400
5	gemaaid gras	300
6	gemaaid gras	300

B Fase B: Vergelijking meten-rekenen voor het zonneveld bij Veldhoven

In dit onderzoek zijn vergelijkingen uitgevoerd tussen meetresultaten en rekenresultaten voor de zonnevelden bij Zwolle en Veldhoven. De vergelijkingen voor het zonneveld bij Zwolle zijn beschreven in het rapport uit 2020 [1]. Voor de vergelijkingen voor het zonneveld bij Veldhoven is weer een numeriek rekenmodel gebaseerd op FEM⁵ opgesteld, op dezelfde wijze als voor het zonneveld bij Zwolle. Rekenresultaten worden in deze bijlage vergeleken met resultaten van de metingen beschreven in bijlage A.

In het onderzoek aan het zonneveld bij Zwolle is gebleken dat de resultaten sterk variëren met de posities van de bron en de microfoon. Daarom hebben we in het onderzoek aan het zonneveld bij Veldhoven gemiddeld over verschillende bronposities langs een lijn en over verschillende microfoonposities.

Bij de berekeningen zijn we uitgegaan van een bodem met een stromingsweerstand van 300 kPa s m⁻². Deze waarde representeert een gemiddelde van de resultaten van de metingen beschreven in bijlage A.3.

Figuur B.1 toont resultaten van de metingen en berekeningen, gemiddeld over bronposities langs een lijn en gemiddeld over microfoonposities. De grafieken tonen octaafbandspectra van het effect van de zonnepanelen. Het effect van de zonnepanelen is hierbij gedefinieerd als het verschil tussen het geluidniveau met panelen en het geluidniveau zonder panelen (zie hoofdstuk 1).

Er is op twee manieren gemiddeld over de microfoonposities (zie bijlage A.2):

- over alle vier microfoonposities (zwarte lijnen in figuur B.1),
- alleen over de drie microfoonposities op 5 en 10 m hoogte (blauwe lijnen).

In het tweede geval is dus de microfoonpositie op 1.5 m weggelaten. De reden hiervoor is dat er dicht bij de bodem sterke variaties in het geluidniveau optreden, die het bepalen van een gemiddeld effect van de panelen verstoren.

Bij de grafieken links in figuur B.1 is gemiddeld over de vier bronposities 1A-4A (lijn A), met de bron op 2.3 m hoogte (linksboven) en op 3.8 m hoogte (linksonder). De grafieken rechts in figuur B.1 zijn analoog voor lijn B, met bronposities 1B-4B.

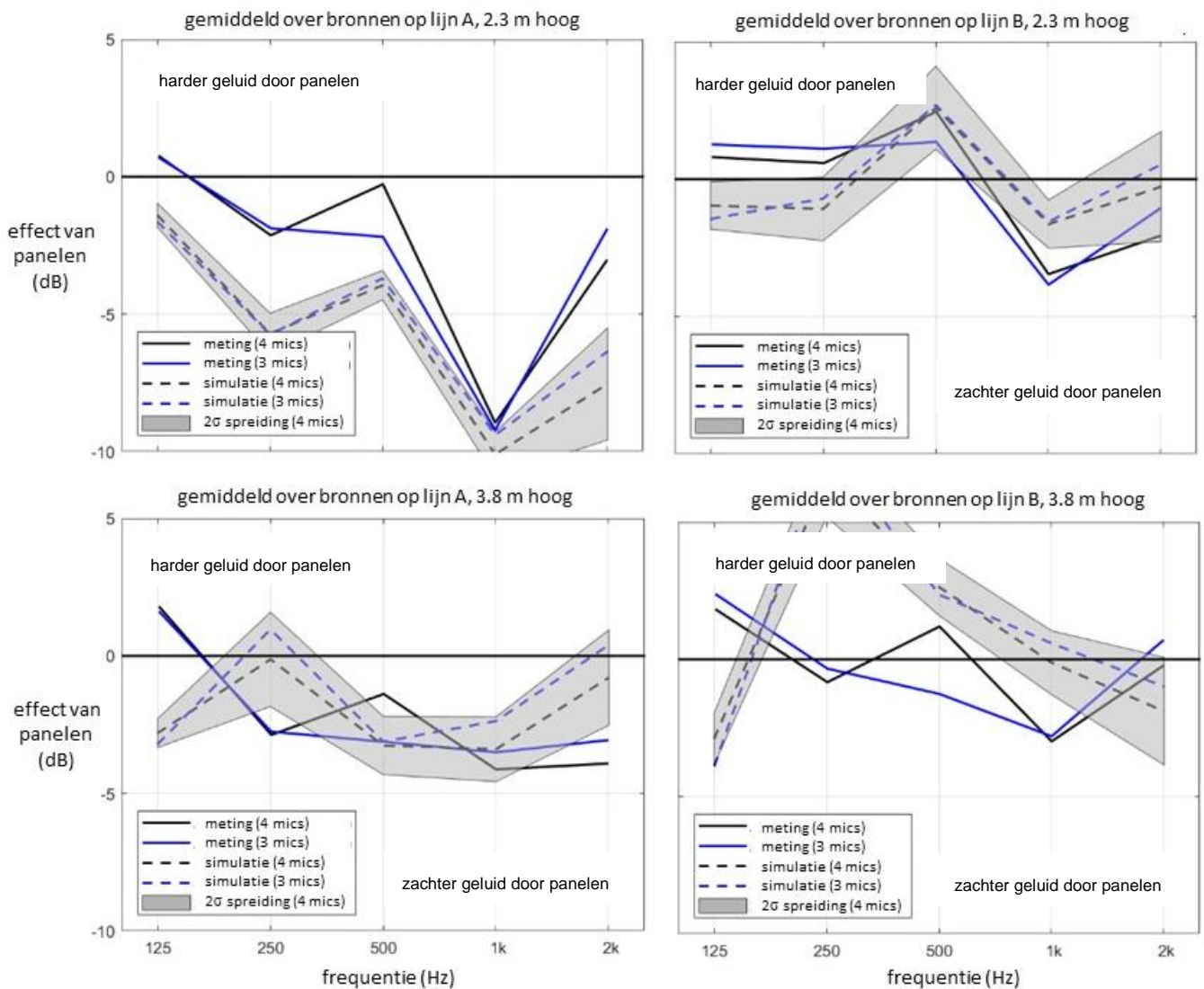
De grijze banden in de grafieken representeren de spreiding in de berekende spectra. De spreiding is bepaald als een 95% betrouwbaarheidsinterval, overeenkomend met plus of min twee standaarddeviaties (σ). Bij de berekeningen is de afstand r en de hoogte z van de microfoon gevarieerd rond de exacte positie (r_m, z_m) van de microfoon. Er is gerekend voor

- drie afstanden: $r = r_m - \delta r, r_m, r_m + \delta r$,
- drie hoogtes: $z = z_m - \delta z, z_m, z_m + \delta z$,

⁵ FEM = Finite Element Method (eindige-elementenmethode)

met $\delta r = 5$ m en $\delta z = 0.7$ m. Op deze wijze werden telkens negen rekenresultaten bepaald, voor negen microfoonposities rond de exacte positie. Op basis hiervan is de spreiding bepaald.

De grafieken in figuur B.1 laten zien dat het gemiddelde effect van de zonnepanelen het grootst is voor de bronnen op lijn A, met een hoogte van 2.3 m (grafiek linksboven). Voor de bronnen op lijn B schommelt het effect ongeveer rond de waarde nul, behalve bij 250 Hz. Globaal is er een redelijke overeenstemming tussen de meetresultaten en rekenresultaten.



Figuur B.1 Octaafbandspectra van het effect van de zonnepanelen, gemiddeld over bronnen op lijn A (links) en lijn B (rechts), voor bronhoogte 2.3 m (boven) en 3.8 m (onder). De zwarte lijnen zijn gemiddeld over de vier microfoonposities. Voor de blauwe lijnen is de microfoon op 1.5 m hoogte weggelaten. De grijze band representeert de spreiding in de rekenresultaten, met een breedte van twee standaarddeviaties (2σ).

C Fase C: Berekeningen voor varianten

Inhoud

- C.1 Wegverkeer
 - C.1.1 Definitie van de varianten
 - C.1.2 Opzet van de berekeningen
 - C.1.3 Resultaten
 - C.1.3.1. Varianten 1 en 2
 - C.1.3.2. Varianten 3 - 6
 - C.1.3.3. Varianten 7 - 12
- C.2 Railverkeer
 - C.2.1 Definitie van de varianten
 - C.2.2 Opzet van de berekeningen
 - C.2.3 Resultaten

C.1 Wegverkeer

C.1.1 Definitie van de varianten

In overleg met Rijkswaterstaat zijn twaalf varianten van zonnevelden langs wegen gedefinieerd. De twaalf varianten zijn gespecificeerd in tabel C.1.1.1. De betekenis van de parameters s , h en b is als volgt (zie figuur C.1.1.1):

- s is de horizontale afstand van de geluidbron tot de rand van de weg,
- h is de hoogte van de top van het zonneveld t.o.v. de weg,
- b is de breedte van het zonneveld.

De geluidbron representeert wegverkeersgeluid. Voor de hoogte van de bron t.o.v. het wegdek is een waarde van 0.1 m aangenomen [2,3]. Deze waarde is representatief voor het band-wegdekgeluid, de belangrijkste bijdrage aan het geluid bij snelheden groter dan ongeveer 50 km/h. Naast de weg ligt gras met het zonneveld, waarbij het eerste paneel op 4 m afstand van de weg ligt.

Bij de varianten 1 - 6 zijn de volgende variaties toegepast:

- breedte b : 9 en 40 m,
- oriëntatie van het zonneveld: oost-west, zuid voor, zuid achter.

Bij oriëntatie zuid zijn twee mogelijkheden onderscheiden: naar de weg toe gericht (aangeduid als 'voor') of van de weg af gericht (aangeduid als 'achter').

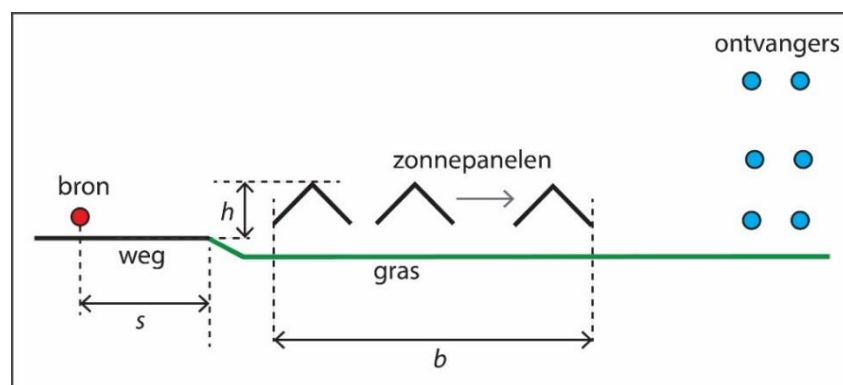
Voor variant 7 is uitgegaan van variant 4 en is een vangrail toegevoegd. De vangrail is ook aanwezig bij varianten 8 - 12. Bij de varianten 8 - 12 zijn de volgende variaties toegepast:

- hoogte h : 0.75, -1.25, en 2 m,
- afstand s : 10 en 30 m,
- afmetingen van de zonnepanelen.

Figuur C.1.1.3 toont de geometrie bij de weg en de zonnepanelen voor de twaalf varianten. Bij varianten 8 en 9, met een verdiept zonneveld, is een aflopend talud

naast de weg gekozen. Het zonneveld in variant 12, met de top op 2 m boven de weg, is hoger dan de zonnevelden in de andere varianten.

Bij oriëntatie oost-west van de zonnepanelen is een hellingshoek van 15° aangenomen. Bij oriëntaties 'zuid voor' (voorkant van de zonnepanelen naar de weg toe gericht) en 'zuid achter' (voorkant van de zonnepanelen van de weg af gericht) is een hellingshoek van 20° aangenomen bij variant 12 en 35° bij de andere varianten. De totale breedte van de panelen is 1 m bij varianten 1-11 (een enkele rij panelen) en 4 m bij variant 12 (vier rijen panelen van elk 1 m breed). De waarden van de hoogte van het zonneveld zijn gegeven in tabel C.1.1.1. De positionering van de panelen boven de grond is weergegeven in figuur C.1.1.2.

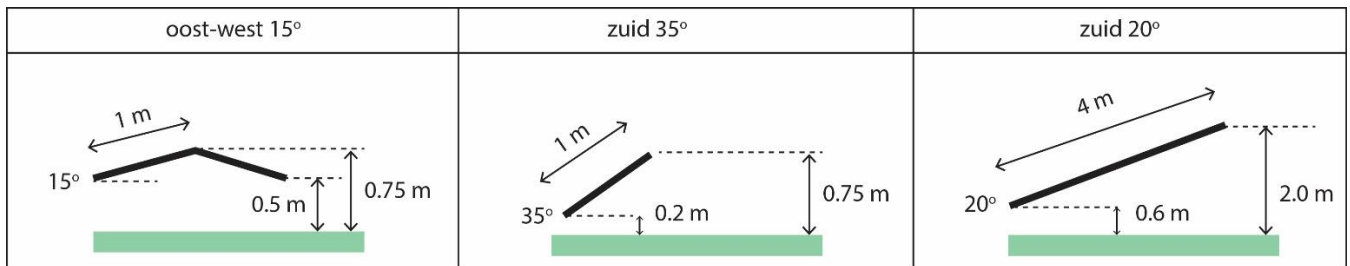


Figuur C.1.1.1 Schematische illustratie van de parameters s , h en b bij de varianten voor wegverkeer.

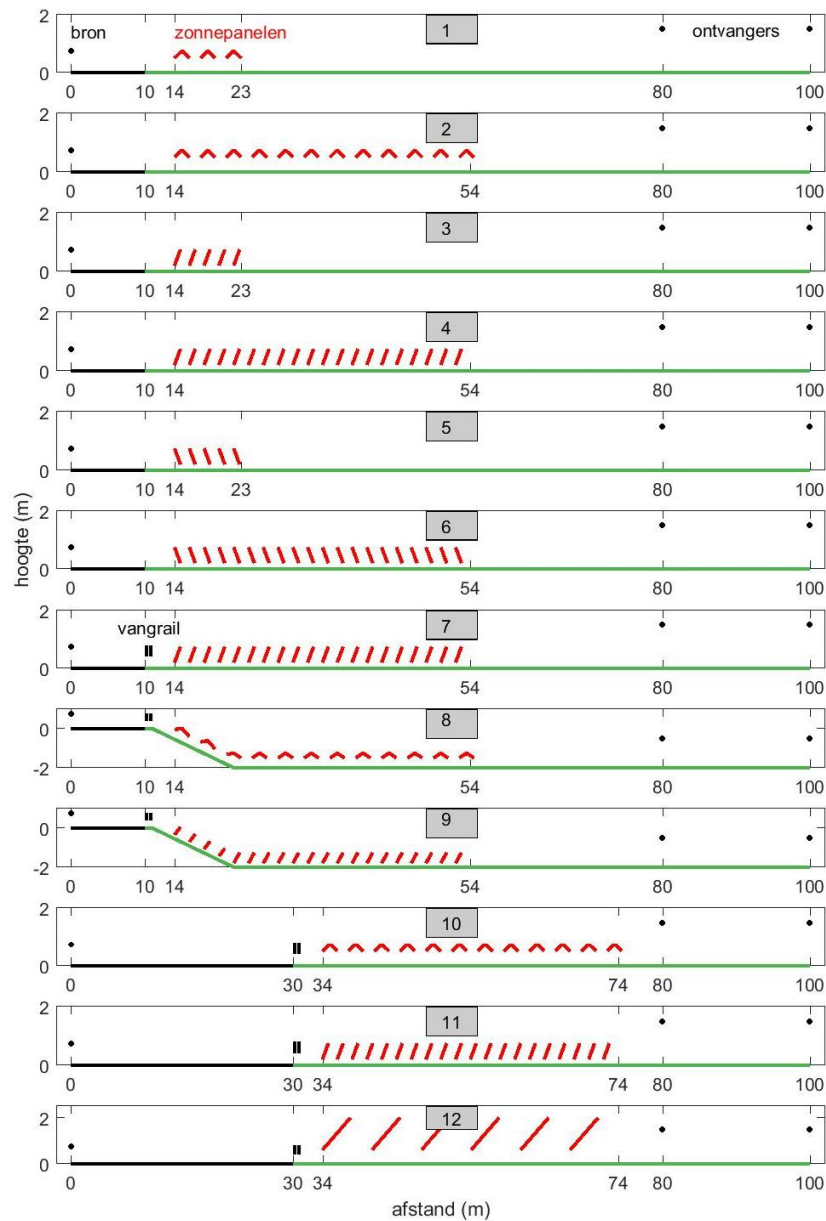
Tabel C.1.1.1 Specificatie van de twaalf varianten voor wegverkeer.

Variant	breedte b (m)	afstand s (m)	hoogte h (m)	vangrail	oriëntatie panelen*
1	9	10	0.75	nee	oost-west 15°
2	40	10	0.75	nee	oost-west 15°
3	9	10	0.75	nee	zuid 35° , voor*
4	40	10	0.75	nee	zuid 35° , voor
5	9	10	0.75	nee	zuid 35° , achter*
6	40	10	0.75	nee	zuid 35° , achter
7	40	10	0.75	ja	zuid 35° , voor
8	40	10	-1.25	ja	oost-west 15°
9	40	10	-1.25	ja	zuid 35° , voor
10	40	30	0.75	ja	oost-west 15°
11	40	30	0.75	ja	zuid 35° , voor
12	40	30	2	ja	zuid 20° , voor

* 'voor' = panelen naar de weg toe gericht, 'achter' = panelen van de weg af gericht.



Figuur C.1.1.2 Positionering van de zonnepanelen boven de grond, voor de drie oriëntaties. De afstanden tussen de toppen van naburige panelen zijn: 3.5 m (oost-west 15°), 2 m (zuid 35°), en 6.7 m (zuid 20°). De corresponderende ruimte tussen de naburige panelen is 1.5 m (oost-west 15°), 1.25 m (zuid 35°) en 2.9 m (zuid 20°).



Figuur C.1.1.3 Geometrie voor de twaalf varianten voor wegverkeer. Bodemtypes: hard (zwart) en gras (groen).

C.1.2 Opzet van de berekeningen

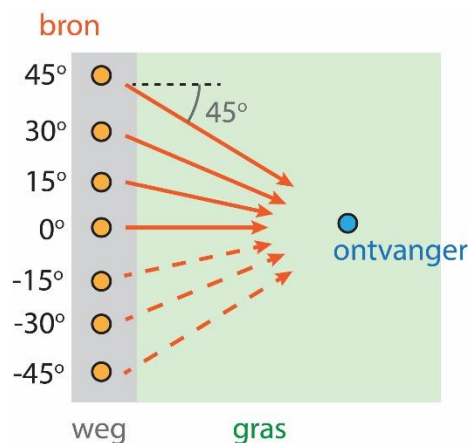
De berekeningen zijn uitgevoerd met de numerieke rekenmethode FEM, die ook gebruikt is voor de berekeningen voor het zonneveld bij Veldhoven. In bijlage B is beschreven dat er een redelijke overeenstemming is gevonden tussen resultaten van FEM en de meetresultaten voor het zonneveld bij Veldhoven.

Bij FEM wordt een rekenrooster van de situatie gemaakt, waarbij ook de akoestische eigenschappen van de objecten en randen worden gemodelleerd. De

bodemeigenschappen worden gerepresenteerd door de stromingsweerstand in combinatie met het impedantiemodel van Delany en Bazley. Bij de berekeningen voor de varianten is voor de grasbodem naast de weg, en onder de zonnepanelen, een gemiddelde waarde van 200 kPa s m^{-2} aangenomen voor de stromingsweerstand. Het wegdek en de zonnepanelen zijn als hard (reflecterend) gemodelleerd. Voor het windprofiel in de atmosfeer is een logaritmisch meewindprofiel aangenomen met een windsnelheid van 4.6 m/s op hoogte 10 m . Dit windprofiel is representatief voor een gemiddelde meewindsituatie, d.w.z. een situatie waarvoor berekeningen van verkeersgeluid gewoonlijk worden uitgevoerd⁶.

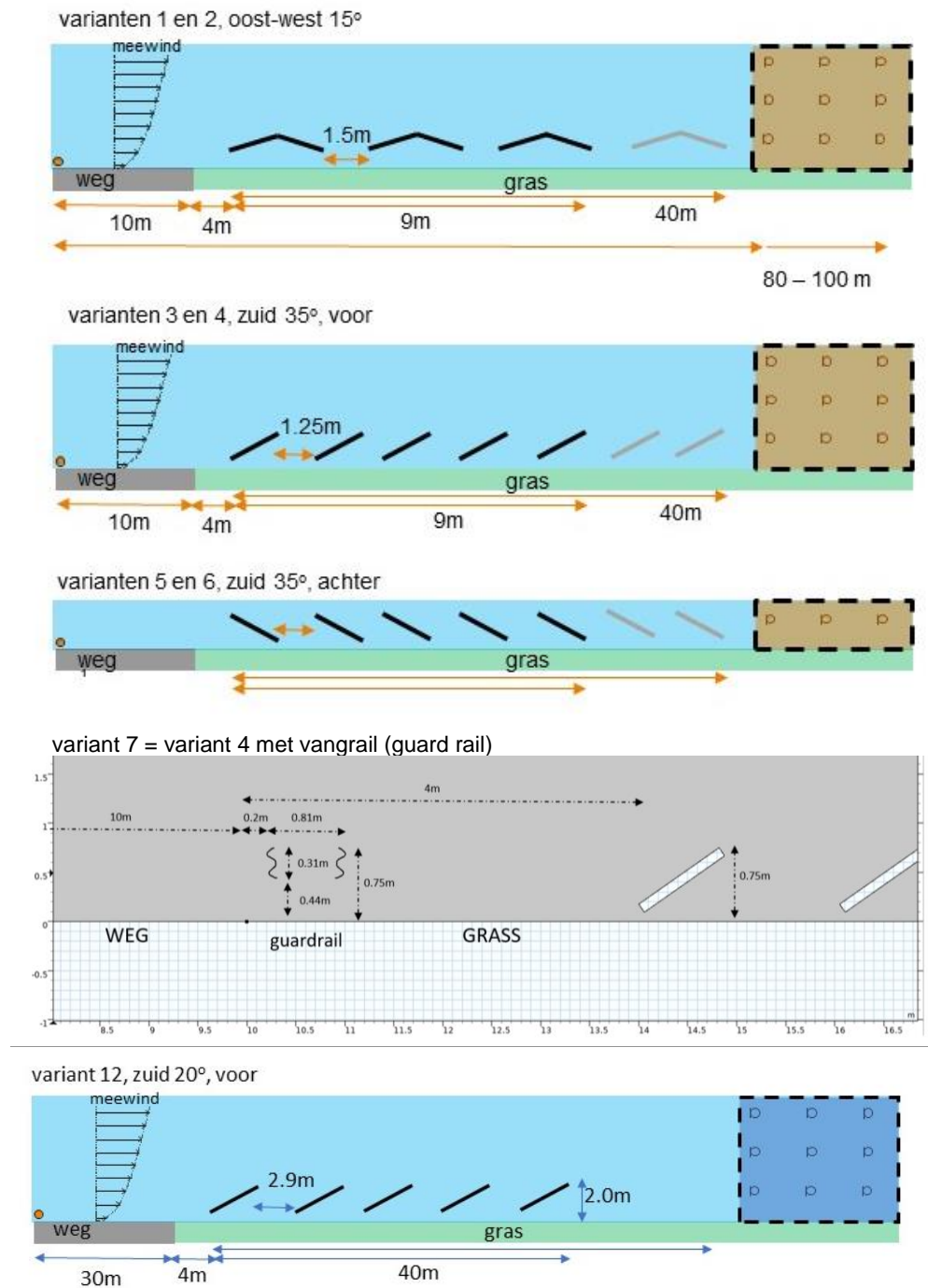
De berekeningen zijn uitgevoerd voor vier richtingen van de lijn van de puntbron naar de ontvanger (zie figuur C.1.2.1). De hoeken tussen de vier richtingen en de normaal op de weg zijn aangegeven: 0° , 15° , 30° , 45° . Vanwege de symmetrie resulteert dit in rekenresultaten voor zeven richtingen, met hoeken -45° , -30° , ..., 45° . Sommatie over de zeven richtingen geeft een resultaat voor een lijnbron langs de weg, met een openingshoek van $7 \times 15^\circ = 105^\circ$. De beperking tot deze openingshoek is een redelijke benadering en heeft als voordeel dat rekentijden niet te groot worden.

Figuur C.1.2.2 toont de geometrieën van de varianten 1-7 en 12 zoals gemodelleerd met FEM. Er is gerekend voor ontvangers op 80 en 100 m van de rijlijn, op hoogtes van 1.5 , 5 , en 10 m .



Figuur C.1.2.1 Bovenaanzicht met zeven richtingen van de lijn van puntbron naar ontvanger, onder hoeken van -45° , -30° , ..., $+45^\circ$ met de normaal op de weg. Vanwege de symmetrie hoeven alleen de hoeken 0° , 15° , 30° , en 45° te worden doorgerekend.

⁶ Om *gemiddelde* geluidniveaus uit te rekenen kan men een zogeheten (negatieve) meteocorrectieterm optellen bij de geluidniveaus die zijn berekend voor een meewindsituatie. Dit is beschreven in het Nederlandse reken- en meetvoorschrift voor weg- en railverkeersgeluid. De meteocorrectieterm heeft geen effect op niveauverschillen, zoals het 'effect van de zonnepanelen'.



Figuur C.1.2.2 Illustratie van de geometrieën van de varianten 1-7 en 12 zoals gemodelleerd met FEM. Bij oriëntatie zuid van de panelen zijn twee mogelijkheden onderscheiden: naar de weg toe gericht (aangeduid als 'voor') of van de weg af gericht (aangeduid als 'achter').

C.1.3 Resultaten

In deze paragraaf presenteren we resultaten voor het effect van de panelen in octaafbanden. In paragraaf 3 van dit rapport zijn de resultaten in dB(A) gepresenteerd. Deze zijn berekend door de octaafbandspectra te combineren met een representatief spectrum voor wegverkeer, dat gegeven is in tabel C.1.3.1. Dit spectrum is een emissiespectrum, berekend op basis van verkeersgegevens voor de rijksweg A6. De vorm van het spectrum verandert enigszins tijdens de propagatie naar een waarnemer op een afstand van 100 m van de weg. De verandering is echter klein en is hier verwaarloosd. In de praktijk zijn er ook variaties van de vorm van het spectrum door variaties van de verkeergegevens en het wegdek.

Tabel C.1.3.1 Representatief octaafbandspectrum van wegverkeersgeluid.

frequentie (Hz)	125	250	500	1000	2000
A-gewogen geluidniveau (dB)	97	103	109	113	107

Uit het spectrum in tabel C.1.3.1 blijkt dat het frequentiegebied 500 - 2000 Hz bepalend is voor breedbandige waarden in dB(A) van het effect van de zonnepanelen.

In de paragrafen C.1.3.1 - C.1.3.3 worden resultaten gepresenteerd voor de varianten 1 - 12. Hieruit blijkt dat voor ontvangerhoogtes 5 en 10 m en voor frequenties 500 - 2000 Hz het effect van de zonnepanelen varieert tussen -2 en +2 dB. De waarden in dB(A) in tabel 1 in paragraaf 3 van dit rapport variëren tussen -2 en +1 dB(A). Een negatieve waarde betekent dat het geluid zachter wordt door de zonnepanelen, en een positieve waarde dat het geluid harder wordt.

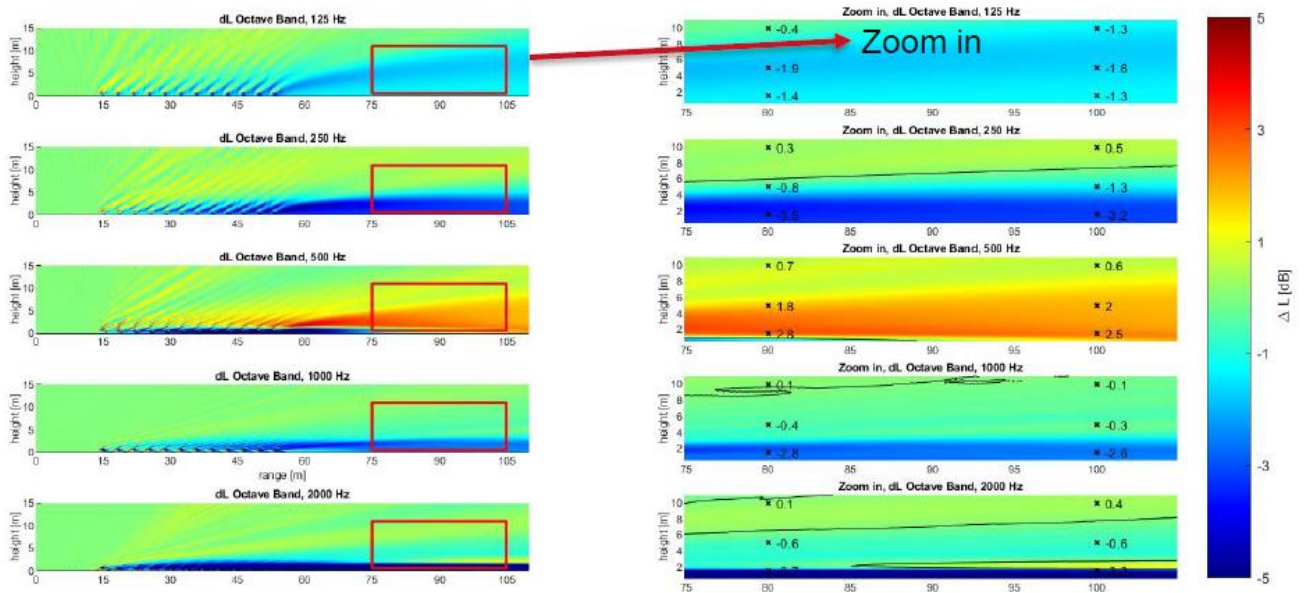
C.1.3.1 Varianten 1 en 2

Figuur C.1.3.1.1 toont het berekende effect van de zonnepanelen per octaafband voor variant 2 bij hoek 0 graden (doorsnede loodrecht op de weg). De grafieken links tonen de verdeling van het effect in het hele gebied. De grafieken rechts tonen de verdeling in een kleiner gebied rond de zes ontvangers op 80 en 100 m afstand van de bron. Figuur C.1.3.1.2 toont de octaafbandspectra op de zes ontvangerposities.

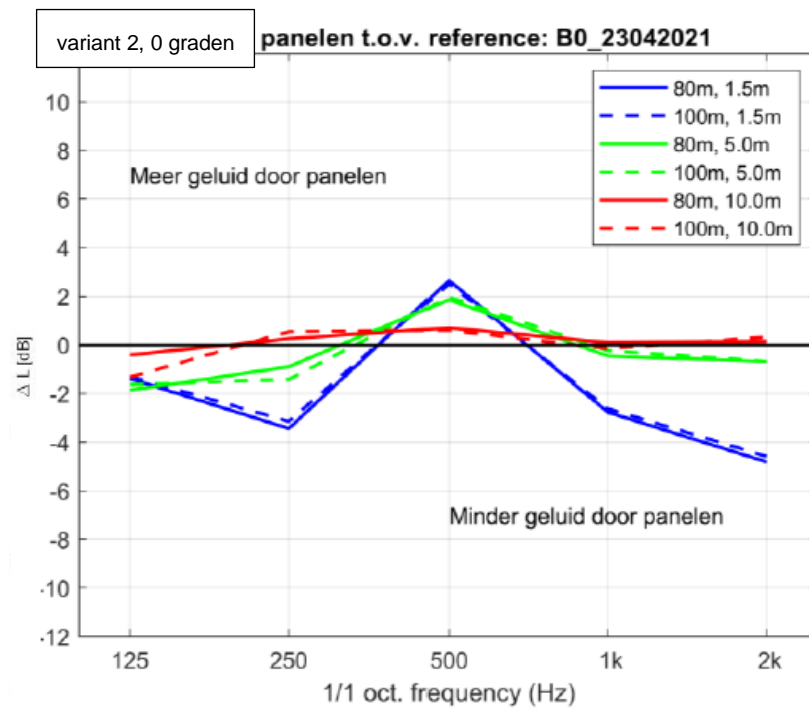
In figuur C.1.3.1.1 zien we bij 125 en 250 Hz een blauwe band boven de bodem achter het zonneveld. Dit betekent dat het effect van het zonneveld hier negatief is. Bij de zes ontvangers varieert het effect van 0 tot -3 dB.

Bij 500 Hz zien we een oranje band boven de bodem achter het zonneveld. Het effect is hier positief, en varieert bij de ontvangers tussen 0 en +3 dB.

Bij 1 en 2 Hz is het effect klein, gezien de overwegend groene kleuren. Alleen vlak bij de bodem zijn blauwe kleuren te zien, maar die zone is zo klein dat de resultaten niet representatief zijn.

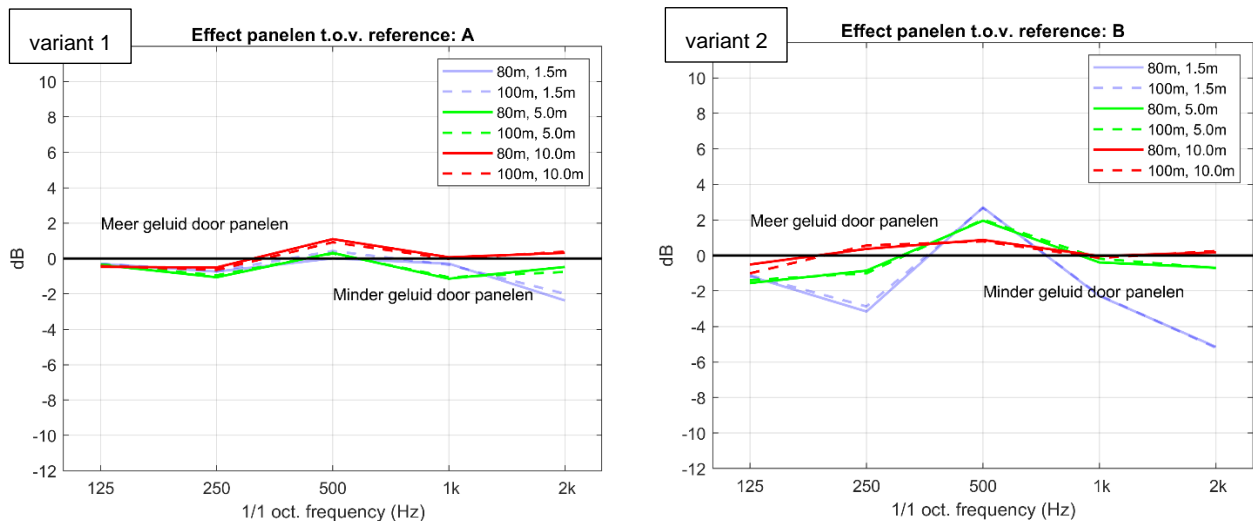


Figuur C.1.3.1.1 Effect van zonnepanelen per octaafband, voor variant 2 bij hoek 0 graden. Links het hele gebied, rechts het gebied rond de zes ontvangers op 80 en 100 m afstand.



Figuur C.1.3.1.2 Octaafbandspectra van het effect van zonnepanelen voor zes ontvangerposities, voor variant 2 bij hoek 0 graden.

Figuur C.1.3.1.3 toont het effect van het zonneveld voor de varianten 1 en 2, gemiddeld over de zeven hoeken tussen -45 en +45 graden. De effecten van het zonneveld zijn iets groter voor variant 2 dan voor variant 1 (40 meter breed veld t.o.v. 9 m). De spectra voor variant 2 verschillen weinig van de spectra in figuur C.1.3.1.2 voor hoek 0 graden.



Figuur C.1.3.1.3 Octaafbandspectra van het effect van zonnepanelen voor zes ontvangerposities, voor varianten 1 en 2, gemiddeld over de hoeken van -45 tot +45 graden.

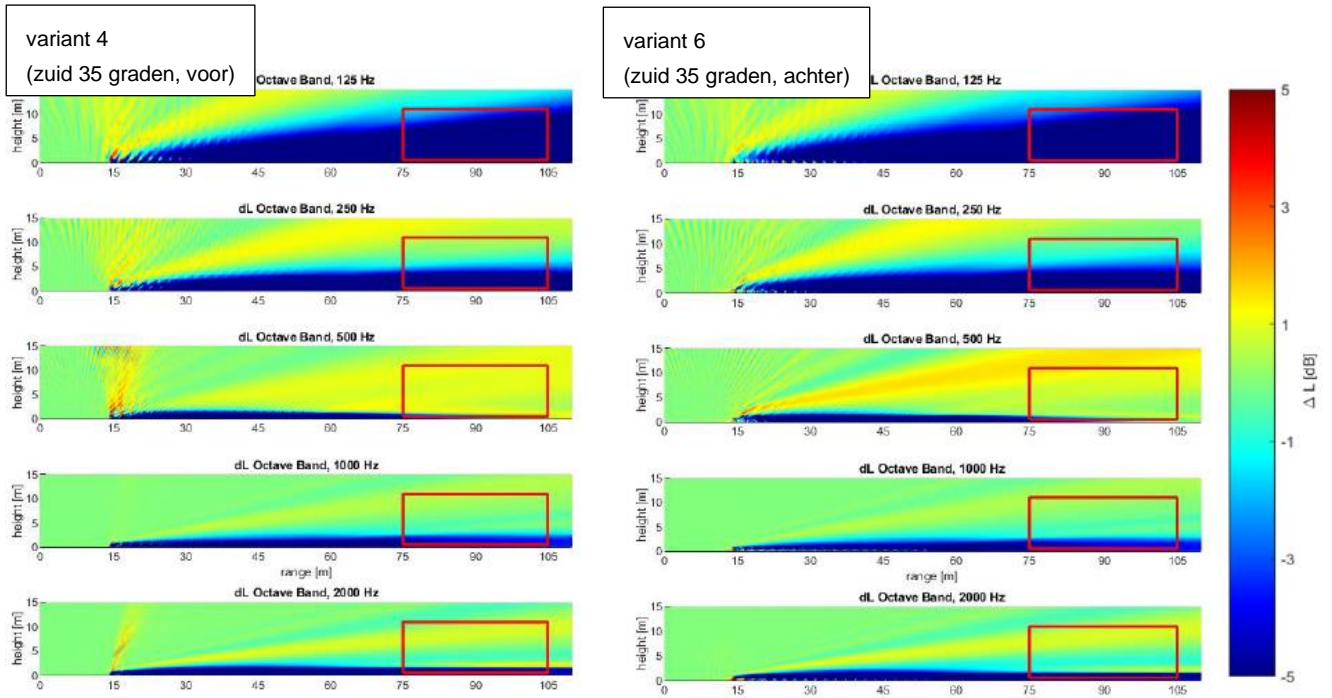
C.1.3.2 Varianten 3 - 6

Figuur C.1.3.2.1 toont het berekende effect van de zonnepanelen per octaafband voor variant 4 (links) en variant 6 (rechts) bij hoek 0 graden. Het enige verschil tussen de twee varianten is de richting van de panelen: naar de weg gericht ('voor') bij variant 4 en van de weg af gericht ('achter') bij variant 6. De resultaten laten zien dat het verschil in effect van de panelen tussen de twee varianten klein is. Met andere woorden, het maakt voor de geluiduitbreiding weinig uit of de panelen in de stand 'voor' of 'achter' worden geplaatst.

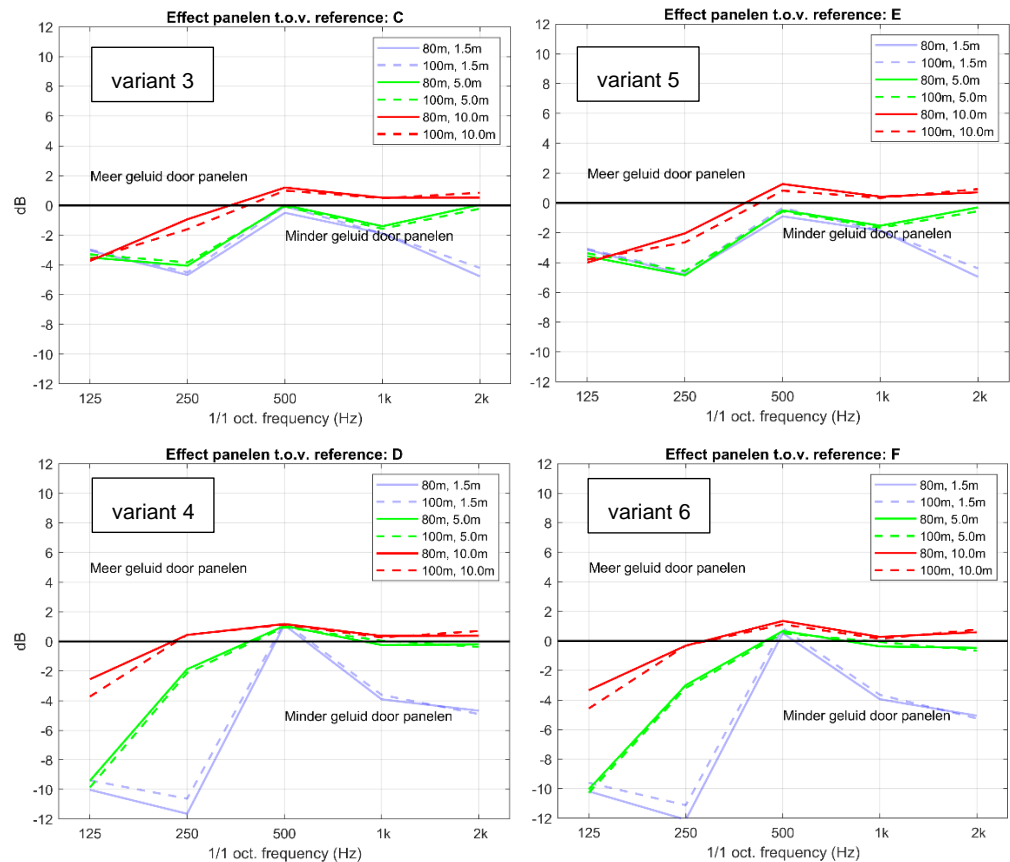
Figuur C.1.3.2.2 toont spectra voor de zes ontvangers, voor varianten 3-6. Opvallend zijn de sterk negatieve waarden voor 125 en 250 Hz. Deze negatieve waarden komen overeen met de donkerblauwe banden boven de bodem in figuur C.1.3.2.1. Het geluidniveau wordt bij deze frequenties dus sterk gereduceerd door de panelen. Kennelijk is hier het effect van afscherming/verstrooiing van geluid sterker dan het effect van de verminderde geluidabsorptie door de bodem (voor gras geldt dat de absorptie bij 125 en 250 Hz minder sterk is dan bij hogere frequenties).

Voor breedbandige effecten van de panelen zijn vooral de frequenties 500-2000 Hz relevant. De bijdragen van 125 en 250 Hz zijn klein. Daarnaast wordt de ontvangerhoogte van 1.5 m als minder representatief beschouwd voor het gemiddelde effect van de zonnepanelen. Voor de ontvangerhoogtes 5 en 10 m

varieert het effect bij 500-2000 Hz tussen -1 en +2 dB bij varianten 3 en 5, en tussen -4 en +2 dB bij varianten 4 en 6.



Figuur C.1.3.2.1 Effect van zonnepanelen per octaafband, voor varianten 4 en 6 bij hoek 0 graden.



Figuur C.1.3.2.2 Octaafbandspectra van het effect van de panelen voor varianten 3-6, gemiddeld over de hoeken van -45 tot +45 graden.

C.1.3.3 Varianten 7-12

Figuur C.1.3.3.1 toont het berekende effect van de zonnepanelen per octaafband voor de varianten 7-12. Zoals aangegeven in tabel C.1.1.1 is er in alle varianten 7-12 een vangrail naast de weg. De reden voor het meenemen van een vangrail is dat hierdoor een meer representatieve situatie optreedt; het geluid van de puntbron wordt wat verstrooid.

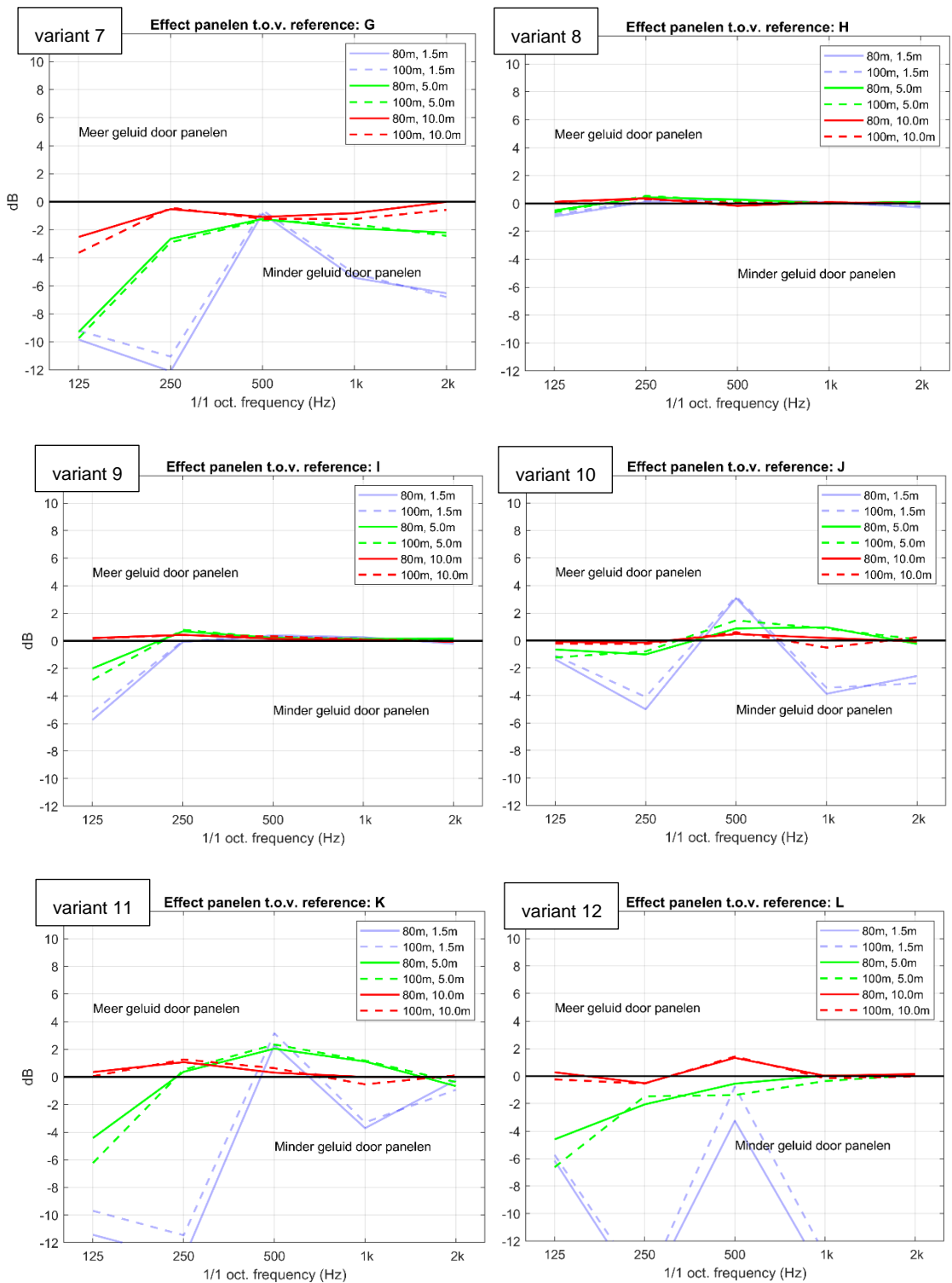
De resultaten voor variant 7 kunnen worden vergeleken worden met de resultaten voor variant 4 in figuur C.1.3.2.2. Het enige verschil tussen de varianten 7 en 4 is dat er een vangrail is toegevoegd bij variant 7. De invloed van de vangrail op de spectra is het duidelijkst bij frequentie 500 Hz⁷. Het effect van de zonnepanelen bedraagt ongeveer +1 dB bij variant 4 en -1 dB bij variant 7. De vangrail zorgt dus voor een afname van 2 dB bij 500 Hz.

⁷ Het spectrum van de geluidoverdracht voor een grasbodem zonder vangrail en zonder zonnepanelen toont een relatief laag niveau bij 500 Hz. Het spectrum van het effect van de zonnepanelen toont daardoor een relatief hoog niveau. Het plaatsen van een vangrail verstoort het optreden van een relatief laag niveau bij 500 Hz in de situatie zonder zonnepanelen (dit fenomeen wordt ook wel aangeduid als 'het opvullen van de bodemdip').

De resultaten voor variant 9 kunnen worden vergeleken worden met de resultaten voor variant 7. Het enige verschil tussen de varianten 7 en 9 is dat het zonneveld bij variant 9 2 m lager ligt dan bij variant 7. De invloed van de verdiepte ligging is aanzienlijk. Bij variant 9 is het effect van de zonnepanelen ongeveer nul voor alle frequenties vanaf 250 Hz. Dit is ook het geval bij variant 8, met panelen in oriëntatie oost-west in plaats van zuid.

De resultaten voor variant 11 kunnen ook worden vergeleken worden met de resultaten voor variant 7. Het enige verschil tussen de varianten 7 en 11 is dat de afstand van de bron tot het zonneveld bij variant 11 20 m groter is dan bij variant 7. De invloed hiervan is gemiddeld een verhoging van het effect van de zonnepanelen met enkele dB's. Bij variant 7 is er bij alle frequenties een negatief effect (reductie van het geluidniveau), terwijl bij variant 11 de waarden van het effect minder negatief of zelfs positief zijn. Een interpretatie hiervan is dat het 'afschermend effect' van de zonnepanelen bij variant 11 kleiner is dan bij variant 7 doordat de afstand van de bron tot het zonneveld groter is.

De resultaten voor variant 12 kunnen worden vergeleken worden met de resultaten voor variant 11. Het enige verschil tussen de varianten 11 en 12 is dat de zonnepanelen 4 m breed zijn bij variant 12 en 1 m breed bij variant 11. Hierdoor liggen de toppen van de zonnepanelen hoger bij variant 12 dan bij variant 11. Met name voor de 1.5 en 5 m hoge ontvangers is het effect van de zonnepanelen wat groter (minder sterk geluid) voor variant 12 dan voor variant 11. Dit is een gevolg van de afscherming van het geluid door de zonnepanelen, die groter is bij de hogere zonnepanelen in variant 12. Hogere zonnepanelen leiden dus tot lagere geluidniveaus doordat er meer afscherming optreedt.



Figuur C.1.3.3.1 Octaafbandspectra van het effect van de panelen voor varianten 3-6, gemiddeld over de hoeken van -45 tot +45 graden.

C.2 Railverkeer

C.2.1 Definitie van de varianten

In overleg met Prorail zijn twaalf varianten van zonnevelden langs spoorlijnen gedefinieerd. De twaalf varianten zijn gespecificeerd in tabel C.2.1.1. De betekenis van de parameters t , s , h en b is als volgt (zie figuur C.2.1.1):

- t is de hoogte van de geluidbron t.o.v. de bodem naast de spoorlijn,
- s is de horizontale afstand van de bron tot het zonneveld,
- h is de hoogte van de top van het zonneveld t.o.v. de bodem naast de spoorlijn,
- b is de breedte van het zonneveld.

De geluidbron representeert railverkeersgeluid. Voor de hoogte van de bron t.o.v. het spoor is een waarde van 0.5 m aangenomen, representatief voor het geluid van de wielen van een trein op de rails. Voor de bodem op de spoorlijn is ballastbed aangenomen. Naast de spoorlijn ligt zand, met in sommige varianten een sloot, en daarnaast gras met het zonneveld.

Bij de varianten 1-6 is de grootte s van het brongebied gelijk aan 16 m. Figuur C.2.1.2 toont de gedetailleerde geometrie in dit gebied voor varianten 2 en 4, dus met sloot en $t = 0.25$ m. Figuur C.2.1.4 toont een overzicht van de geometrieën van de varianten.

Bij de varianten 1 – 6 zijn de volgende keuzes gemaakt:

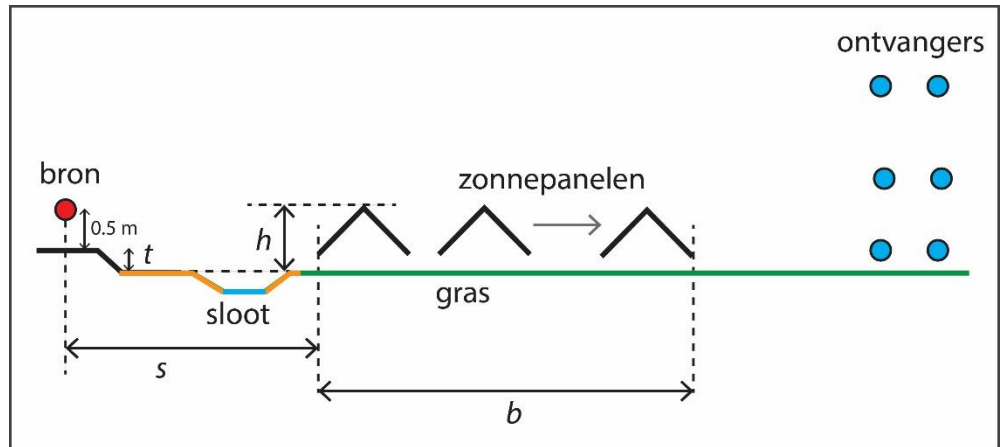
- spoorhoogte t : 0.25 en 1.5 m,
- afstand s : 16 m,
- veldhoogte h : 0.75 m,
- breedte b : 40 m,
- oriëntatie van het zonneveld: 'oost-west 15°' en 'zuid 35° voor'.

Bij de varianten 7-12 is uitgegaan van situaties waarvoor wat grotere effecten zijn te verwachten. Er is gerekend voor panelen met een totale breedte van 6 m in plaats van 1 m. De hoogtes van de toppen van het zonneveld zijn hoger dan bij varianten 1-6: 2.5 / 3.0 m in plaats van 0.75 m. Bij de varianten 7, 8, 11, en 12 is gerekend voor een zonneveld met een breedte van 200 m in plaats van 40 m. Bij de varianten 9 en 10 bevindt zich een laag scherm naast het spoor, met een hoogte van 1.25 meter.

Bij de varianten 7 – 12 zijn de volgende keuzes gemaakt:

- spoorhoogte t : 0.25 en 4.5 m,
- afstand s : 16 en 34 m,
- veldhoogte h : 2.5 en 3.0 m,
- breedte b : 40 en 200 m,
- oriëntatie van het zonneveld: 'oost-west 15°' en 'zuid 25° voor'.

De oriëntaties van de panelen en de positionering van de panelen boven de grond zijn weergegeven in figuur C.2.1.3.

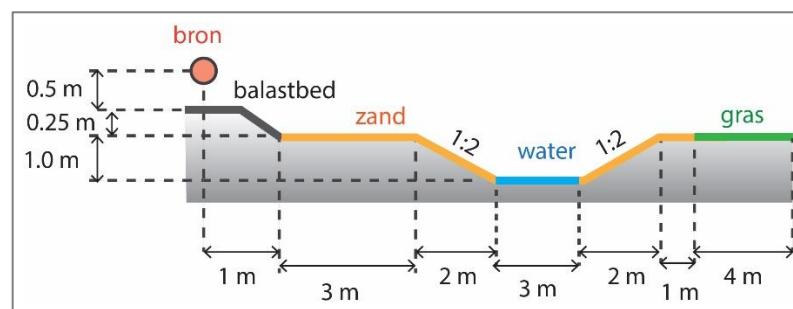


Figuur C.2.1.1 Schematische illustratie van de parameters t , s , h en b bij de varianten voor railverkeer.

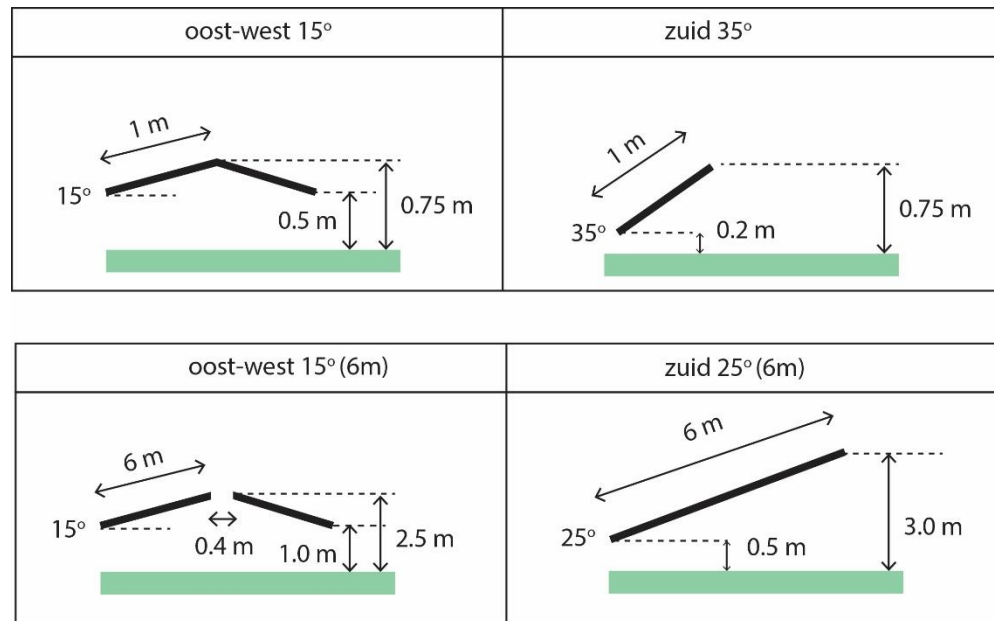
Tabel C.2.1.1 Specificatie van de twaalf varianten voor railverkeer.

variant	breedte b (m)	afstand s (m)	spoorhoogte t (m)	veldhoogte h (m)	sloot	oriëntatie panelen*
1	40	16	0.25	0.75	nee	oost-west 15°
2	40	16	0.25	0.75	ja	oost-west 15°
3	40	16	0.25	0.75	nee	zuid 35°, voor*
4	40	16	0.25	0.75	ja	zuid 35°, voor
5	40	16	1.5	0.75	nee	oost-west 15°
6	40	16	1.5	0.75	nee	zuid 35°, voor
7	200	16	0.25	2.5	ja	oost-west 15°
8	200	16	0.25	3.0	ja	zuid 25°, voor
9	40	34	0.25	2.5	ja	oost-west 15°
10	40	34	0.25	3.0	ja	zuid 25°, voor
11	200	34	4.5	2.5	nee	oost-west 15°
12	200	34	4.5	3.0	nee	zuid 25°, voor

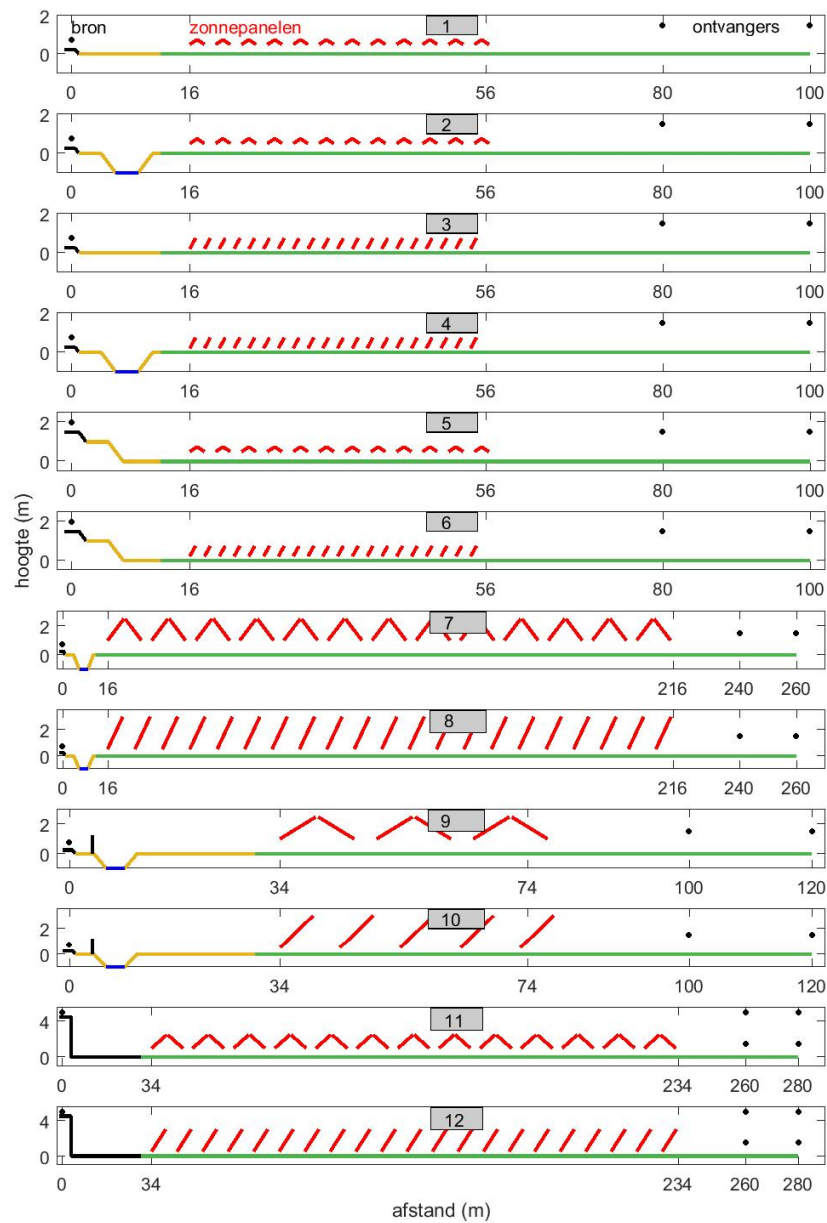
* 'voor' = panelen naar de spoorlijn toe gericht.



Figuur C.2.1.2 Gedetailleerde geometrie in het gebied bij de spoorlijn, voor varianten 2 en 4 (met sloot en bronhoogte $t = 0.5$ m).



Figuur C.2.1.3 Positionering van de zonnepanelen boven de grond, voor de vier oriëntaties. De afstanden tussen de toppen van naburige panelen zijn: 3.5 m (oost-west 15°), 2 m (zuid 35°), 15.6 m (oost-west 15°, 6m), en 9.7 m (zuid 25°, 6m). De corresponderende ruimte tussen de naburige panelen is 1.5 m (oost-west 15°), 1.25 m (zuid 35°), 3.6 m (oost-west 15°, 6m), en 4.3 m (zuid 25°, 6m).



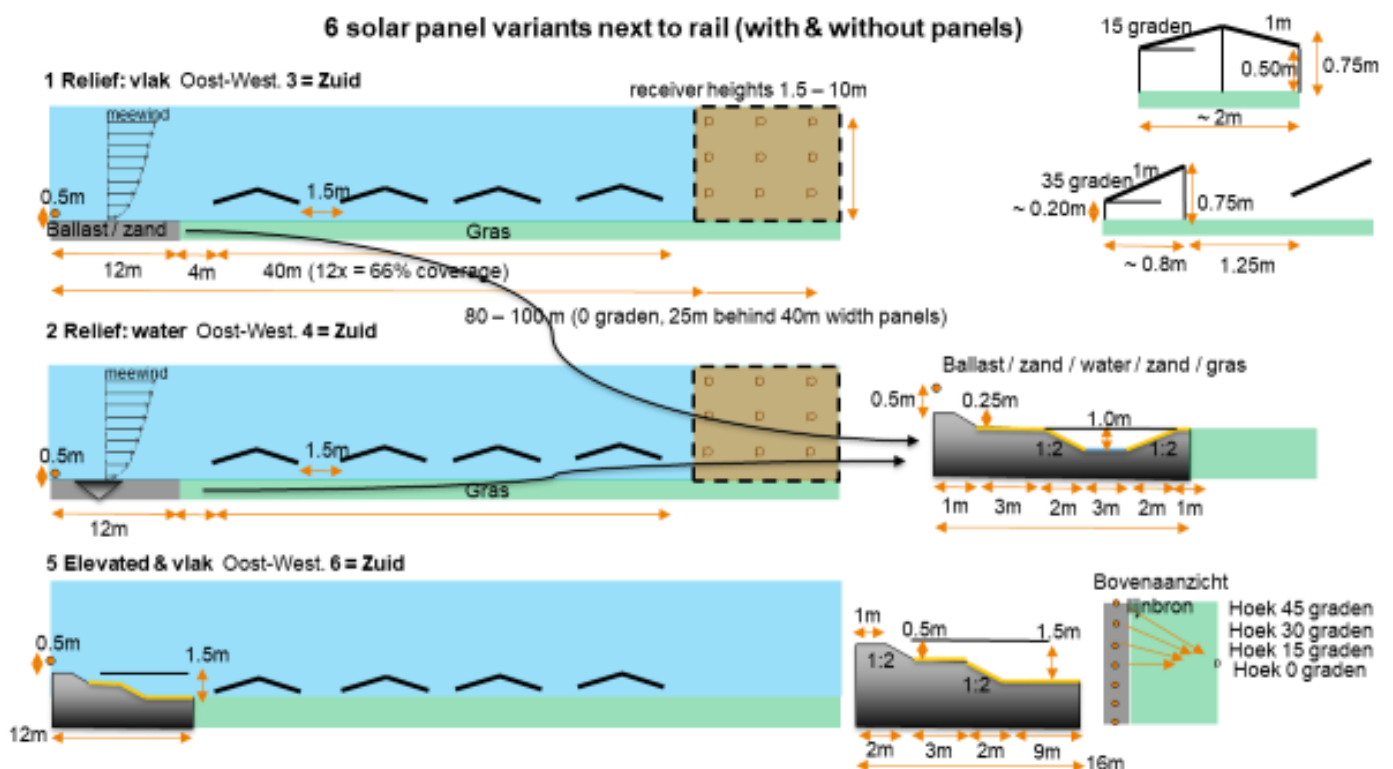
Figuur C.2.1.4 Geometrie voor de twaalf varianten voor railverkeer. Bodemtypes: ballastbed (zwart), zand (geel), water (blauw), en gras (groen).

C.2.2 Opzet van de berekeningen

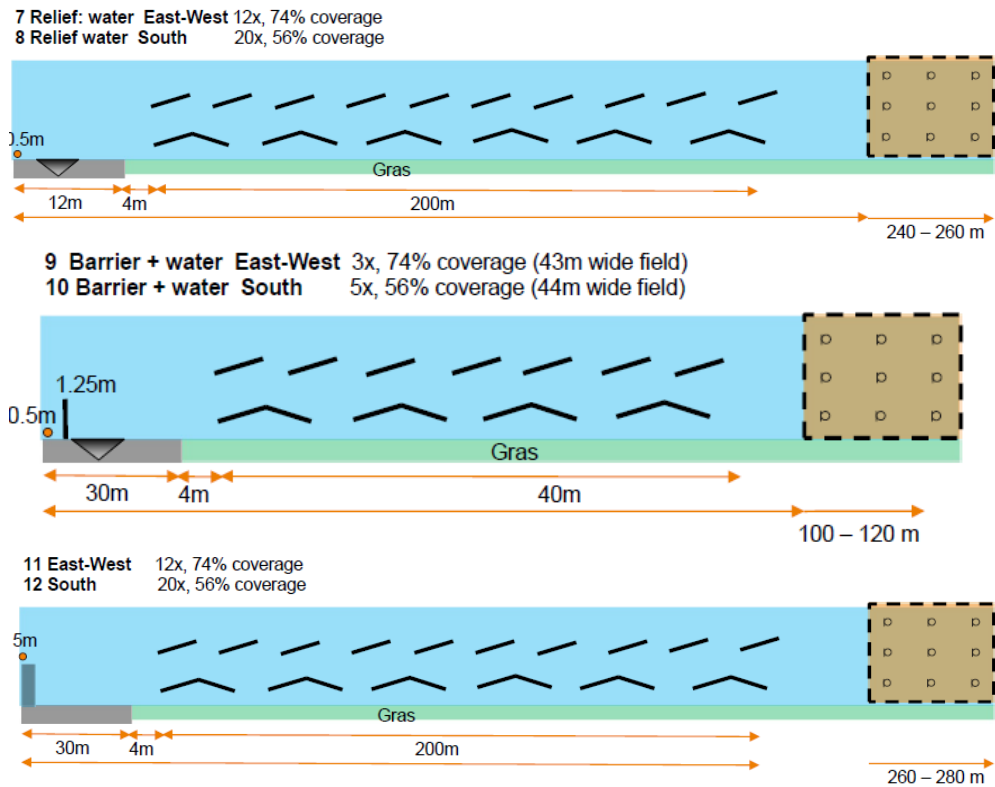
De berekeningen zijn uitgevoerd met FEM, net zoals voor wegverkeer. De opzet van de berekeningen is zoals beschreven in paragraaf C.1.2 voor wegverkeer. Er is weer gerekend voor vier hoeken (0°, 15°, 30° en 45°), om een resultaat voor een lijnbron met een openingshoek van 105° te bepalen. De bodem bij de spoorlijn bestaat uit ballastbed, dat is gemodelleerd met een hiervoor geschikt impedantiemodel. De zandbodem naast het spoor is gemodelleerd met een stromingsweerstand van 1000 kPa s m⁻². Water is gemodelleerd als aan hard oppervlak, en de grasbodem is gemodelleerd met een stromingsweerstand van 200 kPa s m⁻².

Figuur C.2.2.1 toont de geometrieën van de varianten 1-6 zoals gemodelleerd met FEM. Er is gerekend voor ontvangers op 80 en 100 m van de rijlijn, op hoogtes van 1.5, 5, en 10 m.

Figuur C.2.2.2 toont de geometrieën van de varianten 7-12 zoals gemodelleerd met FEM. De afstanden van de ontvangers tot de rijlijn zijn in de figuur aangegeven. Er is weer gerekend op hoogtes van 1.5, 5, en 10 m.



Figuur C.2.2.1 Illustratie van de geometrieën van de varianten 1-6 zoals gemodelleerd met FEM.



Figuur C.2.2.2 Illustratie van de geometrieën van de varianten 7-12 zoals gemodelleerd met FEM.

C.2.3 Resultaten

In deze paragraaf presenteren we resultaten voor het effect van de panelen in octaafbanden. In paragraaf 3 van dit rapport zijn de resultaten in dB(A) gepresenteerd. Deze zijn berekend door de octaafbandspectra te combineren met een representatief spectrum voor railverkeer, dat gegeven is in tabel C.2.3.1. Dit spectrum is een immisssiespectrum berekend op 7.5 m afstand van treinen van categorie 8 uit het Nederlandse reken- en meetvoorschrift. De vorm van het spectrum verandert enigszins tijdens de propagatie naar een waarnemer op een afstand van 100-280 m van het spoor. De verandering is echter klein en is hier verwaarloosd. In de praktijk zijn er ook variaties van de vorm van het spectrum door variaties van treintypes.

Tabel C.2.3.1 Representatief octaafbandspectrum van railverkeersgeluid, berekend met het Nederlandse reken- en meetvoorschrift, voor treinen van categorie 8 met 140 km/h.

frequentie (Hz)	125	250	500	1000	2000
A-gewogen geluidniveau (dB)	62	73.7	79.9	84.1	84.4

Figuur C.2.3.1 toont het berekende effect van de zonnepanelen per octaafband voor variant 1 bij hoek 0 graden (doorsnede loodrecht op de weg). De grafieken links tonen de verdeling van het effect in het hele gebied. De grafieken rechts zijn ingezoomd op het gebied rond de zes ontvangers op 80 en 100 m afstand van de bron. Net als bij wegverkeer zien we ook hier bij 125 en 250 Hz een vrij brede

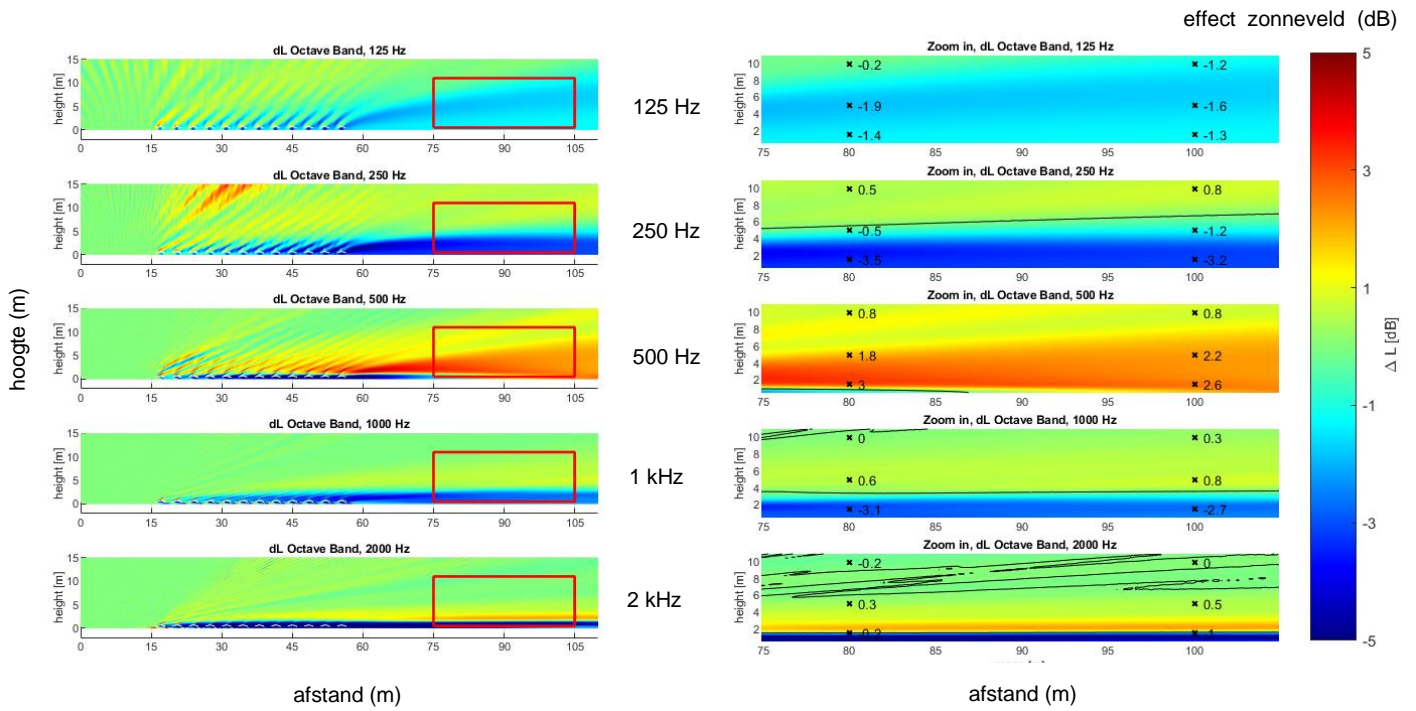
blauwe band boven de bodem achter het zonneveld. Het effect van het zonneveld is hier negatief. Bij 500 Hz is er een oranje band boven de bodem achter het zonneveld. Het effect van het zonneveld is hier positief.

Figuur C.2.3.2 toont het berekende effect van het zonneveld voor de varianten 1-6 bij de zes ontvangerposities, gemiddeld over de zeven hoeken tussen -45 en +45 graden. De hierboven beschreven negatieve waardes bij 125 en 250 Hz, en de positieve waardes bij 500 Hz⁸, zijn zichtbaar in de grafieken. Bijvoorbeeld, bij variant 1 bedraagt het effect van de zonnepanelen ongeveer +2 dB bij 500 Hz, op ontvangerhoogte 5 m.

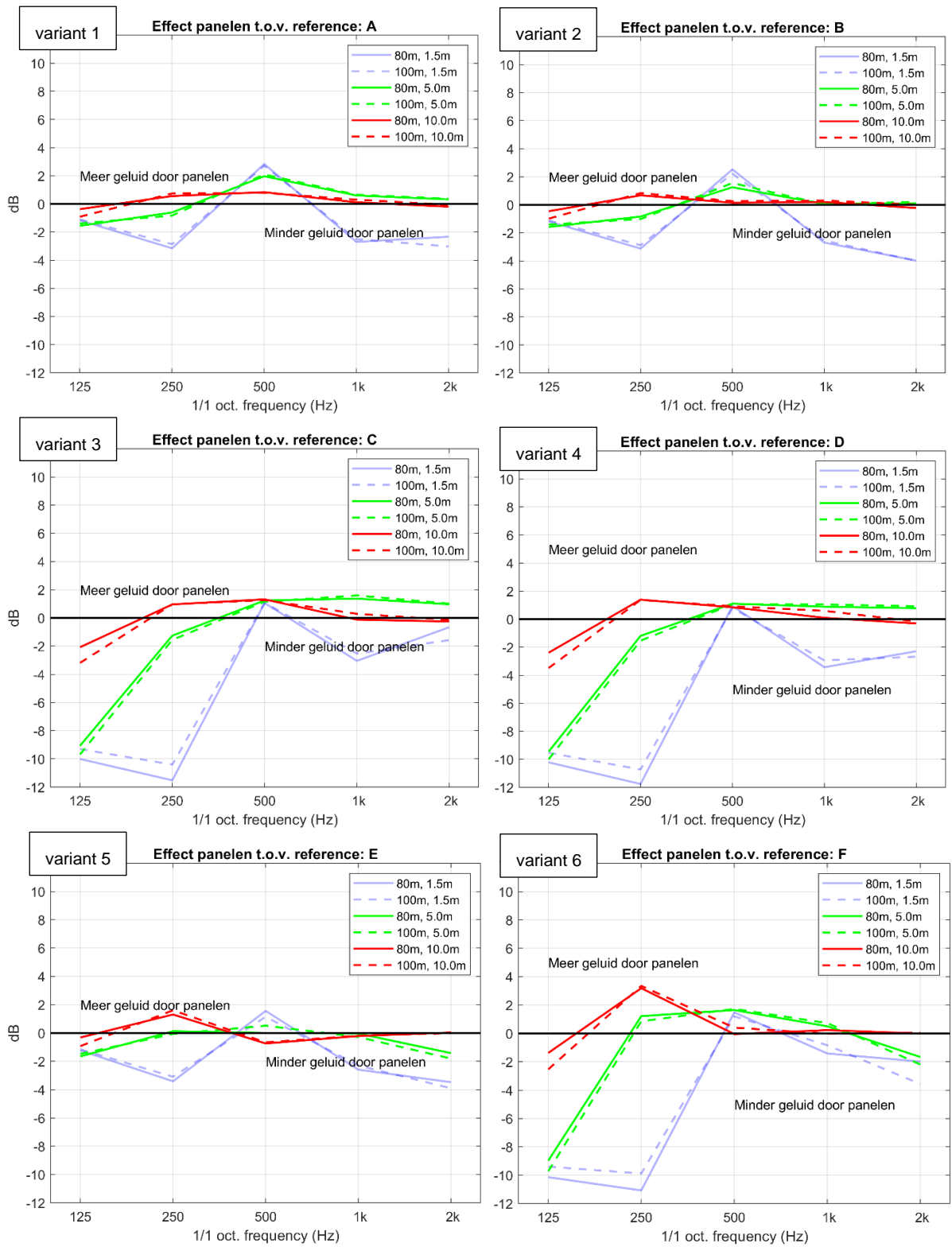
Net als bij wegverkeer is het deel van het spectrum bij 500 – 2000 Hz bepalend voor breedbandige waardes in dB(A) van het effect van de zonnepanelen. Dit blijkt uit het representatieve spectrum van railverkeersgeluid in tabel C.2.3.1. Voor ontvangerhoogtes 5 en 10 m en voor frequenties 500 - 2000 Hz varieert het effect van de zonnepanelen tussen -2 en +2 dB. De waardes in dB(A) in tabel 2 in paragraaf 3 van dit rapport variëren tussen -1 en +1 dB(A).

Figuur C.2.3.3 toont het berekende effect van het zonneveld voor de varianten 7-12 bij de zes ontvangerposities, gemiddeld over de zeven hoeken tussen -45 en +45 graden. De waardes van het effect bij 500 – 2000 Hz zijn negatiever dan bij de varianten 1-6. Dit is een gevolg van sterkere afscherming door de hogere zonnepanelen en is het duidelijkst zichtbaar voor een lage bron (varianten 7 en 8)

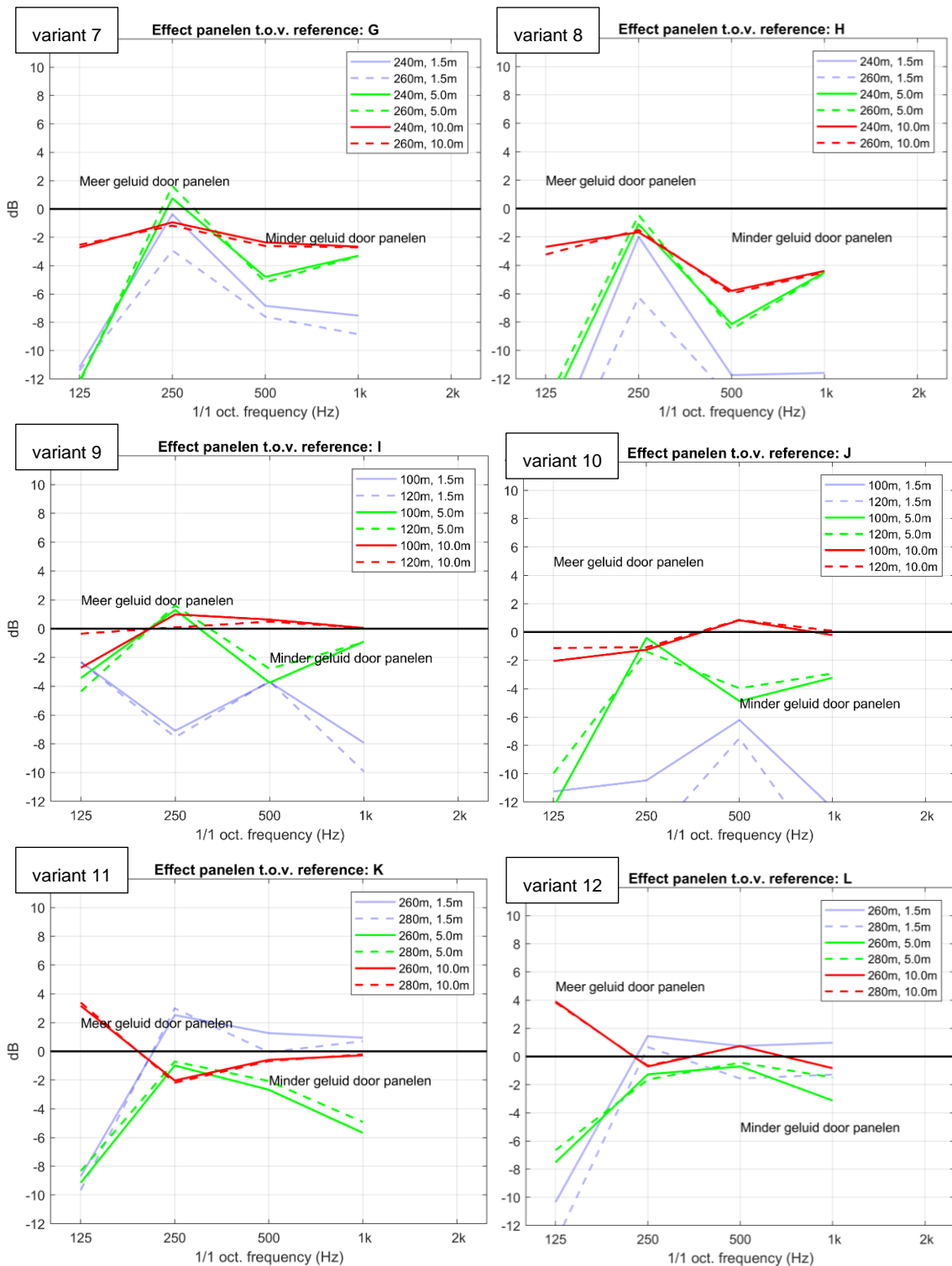
⁸ Uit de grafieken blijkt dat er versterking van geluid optreedt bij 500 Hz, met name bij varianten 1 en 2. Bij de varianten 3 en 4 zorgt het verstrooiende effect van de nabijgelegen sloot ervoor dat de "bodemdip" voor de situatie met alleen gras minder diep wordt; dit is vergelijkbaar met het effect van de vangrail in de situaties voor wegverkeer .



Figuur C.2.3.1 Effect van zonnepanelen per octaafband, voor variant 1 bij hoek 0 graden. Links het hele gebied, rechts het gebied rond de zes ontvangers op 80 en 100 m afstand.



Figuur C.2.3.2 Octaafbandspectra van het effect van de panelen voor varianten 1-6, gemiddeld over de hoeken van -45 tot +45 graden.



Figuur C.2.3.3 Octaafbandspectra van het effect van de panelen voor varianten 7-12, gemiddeld over de hoeken van -45 tot +45 graden.