Derde spoor Zevenaar - Duitse grens

Effectiviteit undersleeperpads (USP) tegen trillingen

Status	**definitief**
Versie	002
Rapport	V.2010.0966.R001
Datum	21 juni 2021

Adviseurs voor bouw, industrie, verkeer, milieu en software

Colofon

Opdrachtgever	ProRail Postbus 2212 3500 GE UTRECHT
Contactpersoon opdrachtgever	de heer N. Yntema
Project	ProRail/MER+OTB 3e spoor Zevenaar-Duitse grens
Betreft	Onderzoek USP
Uw kenmerk	-
Rapport	V.2010.0966.R001
Datum	21 juni 2021
Versie	002
Status	definitief
Uitgevoerd door	DGMR Industrie, Verkeer en Milieu B.V. Van Pallandtstraat 9-11 6814 GM Arnhem Postbus 153 6800 AD Arnhem
Contactpersoon	ing. R.G. (Reinoud) Fennema 088 346 76 33 rfe@dgmr.nl
Auteur	ing. R.G. (Reinoud) Fennema 088 346 76 33 rfe@dgmr.nl
Projectadviseur	ir. M.H.J. (Mark) Bakermans 088 346 78 50 bk@dgmr.nl
2e lezer/secr.	JBY|TMA

Inhoud

1. Inleiding 4

2. Onderzoek 5
2.1 Opzet van het onderzoek 5
2.2 Meetlocaties 6
2.3 Meetperiode en treinpassages 7
2.4 Dataverwerking 8

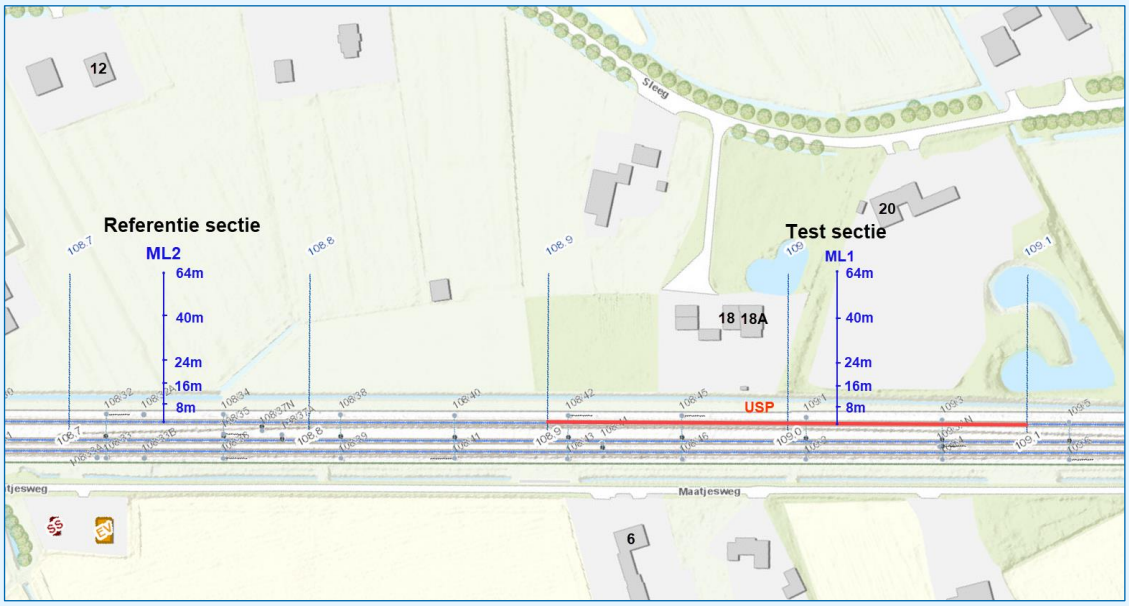
3. Resultaten 9
3.1 Overdrachtsverzwakking bodem (verticaal) 9
3.2 Verschillen in trillingsopwekking (meetverschillen) 10
3.3 Gemeten bronspectra treinen 11
3.4 Effect USP's op trillingssterkte goedrentreinen (spectraal) 13
3.5 Effect USP's op trillingssterkte $V_{max,Bts}$ 13

4. Conclusies 15

Bijlagen
Bijlage 1 Resultaten

1. Inleiding

In opdracht van ProRail heeft DGMR onderzoek gedaan naar de effectiviteit van undersleeperpads (USP) op het tracé “Zevenaar - Duitse grens”. Op twee plaatsen in het noordelijke (derde) spoor zijn USP’s aangebracht om de trillingsbelasting van dit spoor op aanliggende woningen te verminderen. Deze maatregel is onderdeel van het Tracébesluit “Derde spoor Zevenaar – Duitse grens”. Omdat het noordelijke derde spoor aan Duitse zijde nog niet is aangesloten, is het deel tussen km 109.72 en km 111.03 voorlopig (enkele jaren) nog niet berijdbaar. Op dit deel zijn over een lengte van ongeveer 500 m USP’s aangebracht. Het tweede stuk spoor waarop USP’s zijn aangebracht meet ongeveer 200 meter en is al wel in gebruik genomen. Dit spoordeel ligt tussen km 108.9 en km 109.1, ter hoogte van de Woningen Sleeg 18 en 18A. Op dit spoordeel is het trillingsonderzoek uitgevoerd. Figuur 1 geeft een overzicht van de situatie, het spoorstuk waarop USP’s zijn aangebracht en de onderzoekslocaties (meetlijnen).



figuur 1: Situatie onderzoekslocaties

Undersleeperpads

De toegepaste undersleeperpads zijn van het type Getzner SLN1010G en hebben een statische beddingsmodulus ($C_{sl,stat}$) van 0,1 N/mm² en een dynamische beddingsmodulus ($C_{sl,dyn}$) van ongeveer 0,3 N/mm².

k:\doc\v2010\096640\v20100966640r001v2.docx 21-06-2021

2. Onderzoek

2.1 Opzet van het onderzoek

Het onderzoek heeft tot doel om de effectiviteit van USP's als maatregel tegen trillingen te onderzoeken. Dit is gedaan door op dezelfde spoortak twee meetlocaties in te richten, één zonder USP's en één met. Op beide locaties worden de trillingen in de bodem gemeten op diverse afstanden van het hart van het dichtstbijzijnde noordelijke spoor. Dit is het spoor waarop ook de USP's zijn aangebracht, zie figuur 1.

Beide locaties liggen ongeveer 275 meter uit elkaar en verschillende bodemcondities kunnen leiden tot onderlinge verschillen in trillingsoverdracht (afstandsverzwakking) in de bodem. Ook spoorligging en spoorconditie kunnen op beide locaties anders zijn en verschillen geven in de trillingsopwekking. Voor een zuivere bepaling van de effectiviteit van USP's zal voor deze effecten moeten worden gecorrigeerd. Deze correcties zijn gedaan op basis van de meetdata van de treinpassages, zoals in tabel 1 aangegeven.

tabel 1 Toe te passen correcties op bepaling effectiviteit USP's

Input	Testlocatie (Sleeg 20)	Referentielocatie (Sleeg 12)	Correctie (verschil)
Noordelijke spoor	Trillingsoverdracht ML1	Trillingsoverdracht ML2	Correctie trillingsoverdracht
Zuidelijke spoor	Bronspectrum ML1	Bronspectrum ML2	Correctie trillingsopwekking

Met de in tabel 1 aangegeven correcties zullen de verschillen in trillingsopwekking en overdracht tussen de beide meetlijnen goeddeels worden geëlimineerd. Eventuele verschillen als gevolg van andere spoorligging en spoortoestand blijven echter in de beschouwing.

Frequentieanalyse

Het trillingssignaal dat door treinen wordt opgewekt en bestaat uit meerdere karakteristieke frequenties met verschillende onderliggende opwekkingsmechanismen. Sommige daarvan bewegen mee met de trein en hebben het karakter van een lijnbron en andere zijn locatiegebonden en hebben meer het karakter van een (verzameling van) puntbronnen. Dit betekent dat de overdracht of afstandsverzwakking in de bodem verschilt en frequentieafhankelijk is. De bodem is ook dispersief en hogere frequenties worden meer gedempt dan lagere frequenties, waarbij dit verschijnsel nog versterkt kan worden door de typische resonantiefrequenties van bodemlagen. USP's hebben bij verschillende frequenties een verschillende effectiviteit. Dit betekent dat de spectrale verdeling van het bronspectrum verandert en daarmee ook de overdracht naar meetpunten op grotere afstand tot het spoor. De consequentie hiervan is dat analyses over de effectiviteit van USP niet gebaseerd kunnen worden op eengetalswaarden (somwaarden), zoals de voor trillingshinder veelal gebruikte V_{max} of $V_{max,Bts}$, maar op basis van spectrale analyse moet worden gedaan. Per frequentie(band) zullen de verschillen in trillingsopwekking tussen het stuk met en zonder USP's moeten worden bepaald en zullen correcties tussen de beide meetlocaties moeten worden toegepast.

Trillingsoverdracht bodem per locatie

De trillingsoverdracht in de bodem kan per locatie verschillen, ook als deze (zoals hier) maar weinig uiteen liggen. Voor een geheel zuivere bepaling van de trillingsoverdracht en over een breed frequentiebereik zijn valproeven nodig of aanstoting van de bodem met een shaker. Om hierin de gehele overdrachtsketen vanaf het spoor te betrekken zou een buitendienststelling van het spoor nodig zijn. Deze exercitie kan als dat nodig blijkt alsnog in een later stadium plaatsvinden, maar omwille van de voortgang is besloten om de overdrachtsverzwakking in beginsel te bepalen op basis van de trillingsopwekking van de treinen zelf.

k:\doc\v2010\096640\v20100966640r001v2.docx 21-06-2021

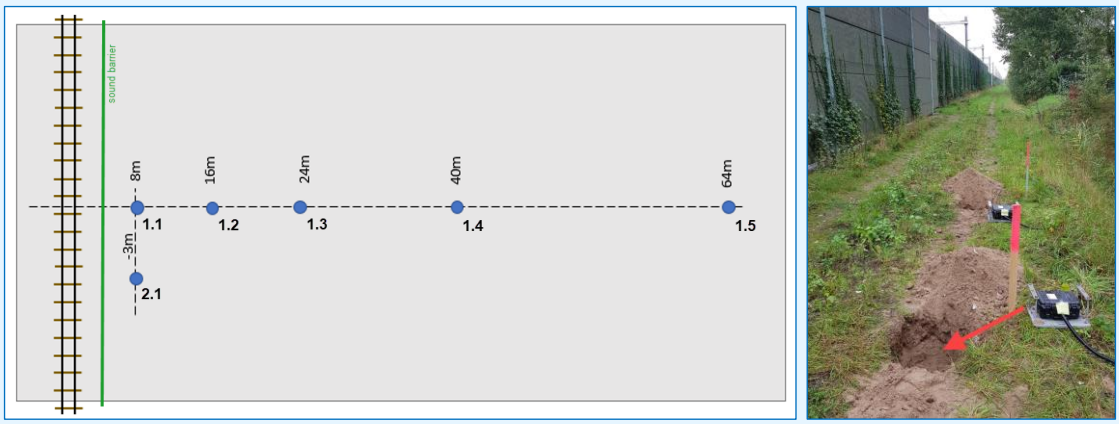
Omdat een trein niet bij alle frequenties evenveel trillingen opwekt, zal de hieruit bepaalde overdracht slechts over een beperkt frequentiebereik bruikbaar zijn, maar dat is geen bezwaar omdat dit uiteraard de relevante frequenties betreft. Wel bestaat het risico dat meer van het spoor verwijderde meetpunten beïnvloedt of zelfs gedomineerd worden door trillingsopwekking afkomstig van spoordelen op grotere afstand van de meetlijn. Voor zover de trillingsopwekking langs het spoor gelijkmatig is en het gaat om een lijnbronachtige opwekking is dit geen bezwaar, maar het zou ook kunnen gaan om een punt in het spoor met hogere trillingsopwekking dan ter plaatse van de meetlijn. In dat geval zal dit het trillingsverloop (afname) met toenemende afstand tot het spoor vertroebelen. Zonder nader onderzoek is dit niet uit de meetdata te elimineren.

2.2 Meetlocaties

Het berijdbare spoordeel met USP's ligt tussen spoorkilometer 108,9 en 109,1 en is slechts 200 meter lang. Op dit stuk spoor is een meetlijn uitgezet zo dicht mogelijk bij het midden van dit spoorstuk. De meetlijn (testlocatie) bevindt zich op spoorkilometer 109,02, ongeveer 80 meter van het begin en 120 meter van het eind van het deel met USP's. De tweede meetlijn op de referentielocatie bevindt zich 275 meter westelijker op kilometer 108,74. De treinen op het noordelijke spoor zijn dan ongeveer 160 meter voorbij het stuk met de USP's. Op beide meetlocaties is er sprake van regulier spoor zonder nabijheid van wissels of ES-lassen.

Meetlijn

Een meetlijn bestaat uit vijf meetpunten op toenemende afstand tot het spoor en één controlemeetpunt. Het controle meetpunt bevindt zich net als het eerste meetpunt in de meetlijn op 8m afstand van het hart spoor. De afstand tussen deze twee meetpunten op 8 meter van het spoor bedraagt 3 meter. De overige meetpunten in de meetlijn bevinden zich op 16 meter, 24 meter, 40 meter en 64 meter. De geleidelijke toename in tussenafstand houdt verband met de verwachte afstandsverzwakking in de bodem. De afstanden betreffen veelvouden van 8 meter en sluiten aan bij het RIVAS meetprotocol, Deliverable D1.2: "Protocol for free field measurements of mitigation effects".



figuur 2: Meetlijn met verdeling meetpunten

Meetpunten

Voor de metingen zijn meetsystemen van Sensornet ingezet. Deze bestaan uit een registratie-eenheid (datalogger) met daaraan gekoppeld drie trillingssensoren (accelerometers). Als sensoren

k:\doc\v2010\096640\v20100966640r001v2.docx 21-06-2021

zijn zeer gevoelige accelerometers gebruikt van het type Wilcoxon 731-207 (10 V/g). Alleen koffer 2.1 op de testlocatie (Sleeg 20) is uitgerust met Visong J17100 sensoren (1 V/g).
De meetsystemen meten standaard in drie richtingen X: haaks op het spoor, Y: evenwijdig aan het spoor en Z: verticaal. De analyse van de effectiviteit van de USP's is evenwel gebaseerd op de meetdata in de verticale richting.

De meetunits hebben de voor trillingshinder maatgevende grootheden V_{eff} en V_{rms} opgeslagen. De V_{rms} per 5 seconde interval ofwel de $V_{rms,5s}$ is gebruikt voor analyse van de effectiviteit van de USP's. Deze waarde is bepaald over de frequentiebanden van 1 tot 250 Hz.
Alle meetkoffers zijn ingegraven in de bodem en bedekt met uitkomende grond, opdat goed contact ontstaat met de bodem en veranderingen in de gesteldheid van het maaiveld zo min mogelijk invloed hebben. Alle koffers rusten op een harde kleilaag op ca. 50 à 60 cm diepte.

Meetsystemen
In tabel 2 worden de gebruikte meetsystemen weergegeven

tabel 2: gebruikte meetapparatuur (meetsystemen Sensornet)

Systeem / Sensor	p1.1 (8m)	p2.1 (8m)	p1.2 (16m)	p1.3 (24m)	p1.4 (40m)	p1.5 (64m)
Meetlijn 1 (Sleeg 20) - Testlocatie						
Systeem	**UV013**	UV023	UV006	**UV016**	**UV025**	**UV027**
X (⊥ spoor)	V105	V002	V118	V073	V076	V108
Y (// spoor)	V100	V065	V092	V077	V104	V107
Z (verticaal)	V099	V066	V094	V093	V106	V098
Meetlijn 2 (Sleeg 12) - Referentie locatie						
Systeem	UV029	UV0028	UV035	UV033	UV030	UV031
X (⊥ spoor)	V103	V110	V076	V096	V073	V023
Y (// spoor)	V097	V115	V104	V078	V077	V025
Z (verticaal)	V102	V084	V106	V083	V093	V021

2.3 Meetperiode en treinpassages

De metingen zijn uitgevoerd tussen 30 september en 3 oktober 2020. In deze periode zijn ongeveer 400 treinen gepasseerd, verdeeld over de drie sporen. Deze treinpassages zijn onderverdeeld naar rijrichting (spoorgebruik) en treintype: goederen- of reizigerstreinen.
Globaal de helft van de treinpassages bestaat uit reizigerstreinen, de stoptreinen van de Rhein - IJssel Express en de ICE. Deze reizigerstreinen zijn voor de hinderproblematiek nauwelijks interessant, daarvoor gaat het vooral om de goederentreinen. De oostwaartse goederentreinen komend vanaf de Betuweroute maken gebruik van het meest zuidelijke spoor. De westwaartse treinen maken gebruik van het meest noordelijke spoor, het spoor waarop de USP's zijn aangebracht. Het middenspoor is vooral in gebruik door reizigerstreinen, zie de foto's in figuur 3.

figuur 3: Impressie spoorgebruik: noordelijke spoor met westwaartse goederentrein (l) en middenspoor met ICE (r)

Om een oordeel te geven over het effect van de USP's zijn alleen treinpassages die op beide locaties zijn gemeten, tussentijds geen snelheidsverandering hebben ondergaan en niet zijn verstoord door enige andere oorzaak bruikbaar. Alleen die treinpassages zijn toegelaten tot de analyses. Dit betreft ongeveer 250 treinpassages.

2.4 Dataverwerking

In het beoordelen van de trillingseffecten van spoor op omliggende woningen is de $V_{max,Bts}$ de maatgevende grootheid. Deze grootheid steunt sinds 2018 op de onderliggende trillingssterkte $V_{rms,5s}$. Deze effectieve waarde wordt bepaald over de 5 seconden rondom het moment van de maximum trillingssterkte (piek) tijdens een passage. Een maatregel die de $V_{rms,5s}$ verlaagd heeft dus een evenredig effect op de maatgevende grootheid $V_{max,Bts}$. De bepaling van het effect van USP's is daarom gebaseerd op deze $V_{rms,5s}$ en niet op de in het RIVAS protocol[1] gehanteerde equivalente trillingssterkte over de passageduur. Dit zou geen direct toepasbare relatie opleveren tussen het effect van de maatregel en de in Nederland maatgevende grootheid.

Voor de bepaling van de effectiviteit is gebruik gemaakt van procedure 1 uit het RIVAS protocol, het vergelijk tussen een locatie met en één zonder de maatregel. De verschillen in trillingsoverdracht van de bodem tussen beide locaties zijn daarbij zoveel mogelijk geëlimineerd. Om deze verschillen te elimineren is een correctie gedaan op basis van het verschil in de trillingsopwekking op het eerste meetpunt per meetlijn (op 8 meter) als gevolg van goederentreinen op het zuidelijke spoor, zie tabel 1. Dit spoor bevat geen maatregelen en zou behalve onderlinge verschillen in spoorruwheid en spoorligging tot vergelijkbare trillingsopwekking moeten leiden. Dit verschil is gebruikt als correctieterm voor de goederentreinen op het noordelijke spoor, het spoor met USP's.

[1] RIVAS deliverable D1.2 - Protocol for free field measurements of mitigation effects, 13/10/2011

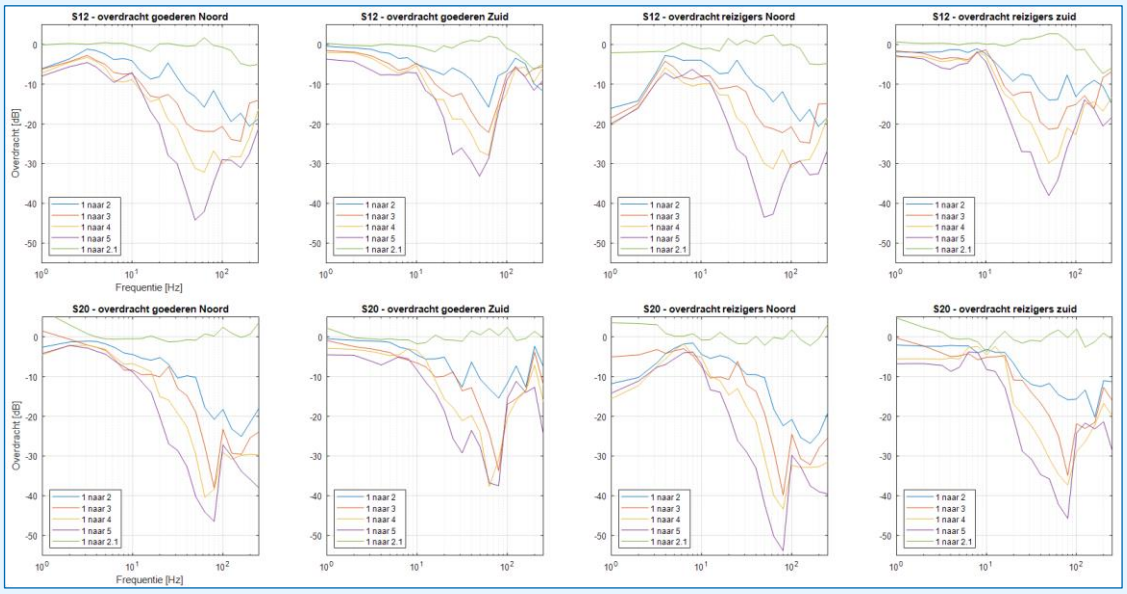
k:\doc\v2010\096640\v20100966640r001v2.docx 21-06-2021

3. Resultaten

In de bepaling van de effectiviteit van de USP's zijn er, zoals in tabel 1 aangegeven, twee factoren die het effect maskeren: verschillen in trillingsoverdracht van de bodem en verschillen in de gemeten trillingsopwekking. Deze factoren worden paragraaf 3.1 en 3.2 behandeld.

3.1 Overdrachtsverzwakking bodem (verticaal)

Voor beide meetlijnen is de spectrale overdrachtsverzwakking in de bodem vastgesteld van het eerste meetpunt op 8 meter vanaf het spoor (1.1) naar alle overige meetpunten. Dit is ook gedaan voor het controlepunt op eveneens 8 meter van het spoor maar 3 meter verderop langs het spoor (2.1). De overdrachten (verticaal) zijn bepaald voor zowel goederentreinen als reizigerstreinen en onderverdeeld naar rijrichting: oostwaarts over het zuidspoor en westwaarts over het noordspoor, zie figuur 4.



figuur 4: Overdrachtsverzwakking meetlijn 1 (Sleeg 20) en referentie meetlijn 2 (Sleeg12) - Verticaal

Voor het bepalen van de overdracht is het van belang dat, op beide ontvangstpunten waartussen deze bepaald wordt, de ontvangen trillingsenergie ruim hoger is dan het achtergrondniveau. Als op het verste meetpunt in de bepaling dit niet meer het geval is, zal de overdrachtsverzwakking ogenschijnlijk teruglopen. Dit is in alle figuren zichtbaar bij frequenties vanaf ongeveer 50 tot 80 Hz. Naarmate de afstand van het meetpunt groter wordt zet deze beperking bij steeds lagere frequentie in wegens gebrek aan voldoende trillingsenergie bij hogere frequenties. Globaal zijn de overdrachtskarakteristieken bruikbaar tot 50 à 63 Hz (tertsband). Daarboven is er te weinig trillingsopwekking door de treinen.

Voor de twee meetpunten op 8 meter van het spoor, de punten 1.1 en 2.1, geldt dat de overdracht idealiter 1 zou moeten zijn. Over het frequentiebereik waarover er voldoende trillingsopwekking is, van ca. 4 tot 63 Hz klopt dit redelijk. Op de meetlijn Sleeg 20 ontstaan er onder 4 Hz afwijkingen door inzet van een ander type sensor met een lagere trillingsgevoeligheid. Op Sleeg 12

ontstaan er vanaf 100 Hz grotere afwijkingen. Dit is vanwege de lage trillingsopwekking in dit frequentiegebied voor dit onderzoek niet van belang.

Hoewel de overdrachtsverzwakking op beide meetlijnen, in het frequentiebereik van 4 tot 63 Hz, een gelijkwaardig verloop heeft, zijn er toch verschillen van meerdere decibellen in de verzwakking per frequentieband waarneembaar. Omdat de figuren op een logaritmische schaal (dB's) zijn afgedrukt is dit visueel minder waarneembaar, maar voor het verschil is een correctie toegepast.

Correctie verschil in trillingsoverdracht (afstandsverzwakking)
Om het verschil in trillingsoverdracht tussen beide meetlijnen te bepalen, is gekeken naar de goederentreinen. De reizigerstreinen op deze lijn hebben bij lage frequenties (<10 Hz) een aanmerkelijk lagere trillingsopwekking opwekking, wat leidt tot minder betrouwbare resultaten bij deze frequenties. Van de goederentreinen zijn alleen de treinen op het noordelijke spoor gebruikt voor deze analyse. Voor het zuidelijke spoor geldt vanwege de grotere afstanden tot de meetpunten immers een andere afstandsverzwakking. In tabel 3 en tabel 4 worden de afstandsverzwakkingen per meetlijn weergegeven (in dB). De hieruit bepaalde correctietermen voor de afstandsverzwakking (afgerond op 1 dB) worden weergegeven in tabel 5.

tabel 3 Trillingsoverdracht referentielocatie (Sleeg 12) - goederentreinen noordspoor, in [dB]

Tertsband [Hz]	3,2	4	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	32	40	50	63	80
8 naar 16 m	-1	-1	-2	-4	-4	-4	-7	-9	-8	-5	-8	-12	-13	-16	-12
8 naar 24 m	-3	-4	-5	-7	-8	-8	-10	-13	-13	-13	-15	-20	-22	-22	-22
8 naar 40 m	-3	-4	-6	-9	-10	-9	-12	-14	-14	-19	-21	-27	-31	-32	-27
8 naar 64 m	-5	-6	-8	-10	-8	-7	-12	-17	-20	-28	-30	-37	-44	-42	-35

tabel 4 Trillingsoverdracht testlocatie (Sleeg 20) - goederentreinen noordspoor, in [dB]

Tertsband [Hz]	3,2	4	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	32	40	50	63	80
8 naar 16m	-1	-1	-2	-3	-4	-4	-5	-6	-5	-7	-10	-10	-10	-18	-21
8 naar 24m	-2	-3	-3	-6	-8	-8	-9	-9	-10	-7	-13	-15	-19	-28	-38
8 naar 40m	-2	-2	-3	-5	-7	-7	-8	-9	-15	-16	-19	-23	-30	-40	-38
8 naar 64m	-3	-4	-4	-6	-7	-9	-11	-14	-20	-27	-29	-33	-40	-44	-47

tabel 5 Correctie overdracht [dB] testlocatie - goederentreinen noordspoor (tabel 4 - tabel 3)

Tertsband [Hz]	3,2	4	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	32	40	50	63	80
8 naar 16m	0	0	1	1	0	0	2	3	3	-2	-2	2	3	-2	-9
8 naar 24m	1	1	1	2	0	-1	1	4	3	5	2	5	3	-6	-16
8 naar 40m	1	2	3	4	3	2	4	5	-1	3	2	4	2	-8	-11
8 naar 64m	2	2	3	4	1	-1	0	3	0	1	1	5	4	-2	-11

3.2 Verschillen in trillingsopwekking (meetverschillen)

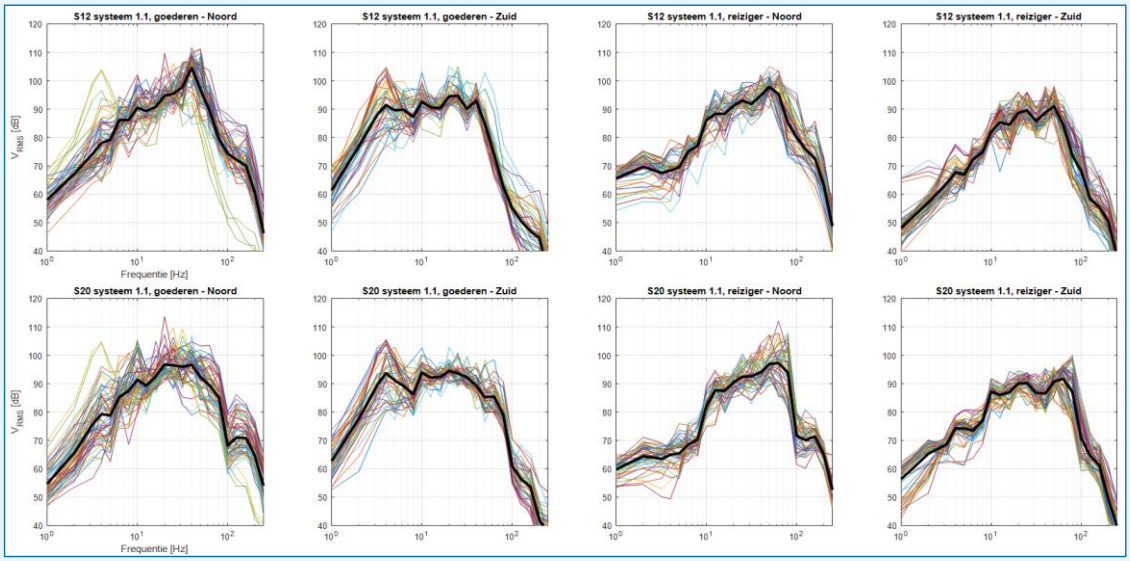
Afgezien van de invloed van de USP's bestaat er tussen beide meetlijnen sowieso een verschil in gemeten trillingsopwekking als gevolg van toleranties van de meetapparatuur en of verschillen in de bodemgesteldheid rondom de meetpunten. Deze verschillen zijn niet toe te schrijven aan de USP's en worden bij de bepaling van de effectiviteit van de USP's uit de meetdata geëlimineerd. In tabel 6 zijn deze verschillen ofwel correctiefactoren in trillingsopwekking tussen beide meetlijnen (meetlocaties) weergegeven. Voor de bepaling van deze correctietermen is gebruik gemaakt van de goederentreinen op het zuidelijke spoor, waarin geen USP's zijn opgenomen.

tabel 6 Verschil trillingsopwekking 8m punten - goederentreinen zuidspoor, in [dB]

Tertsband [Hz]	3,2	4	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	32	40	50	63	80
referentie 8m	88	91	90	90	87	92	90	89	94	94	90	94	85	75	63
testlocatie 8m	89	93	91	89	86	93	91	93	94	93	92	90	86	87	79
verschil (t-r)	1	2	1	-1	-1	1	1	3	0	-1	1	-3	0	11	16

3.3 Gemeten bronspectra treinen

In figuur 5 worden gemeten bronspectra ($V_{rms,5s}$ op het 8 meter punt) weergegeven per treintype en per spoor. Per groep is het gemiddelde spectrum over de populatie afgebeeld als vette zwarte curve. De numeriek waarden van deze spectra zijn weergegeven in tabel 7.



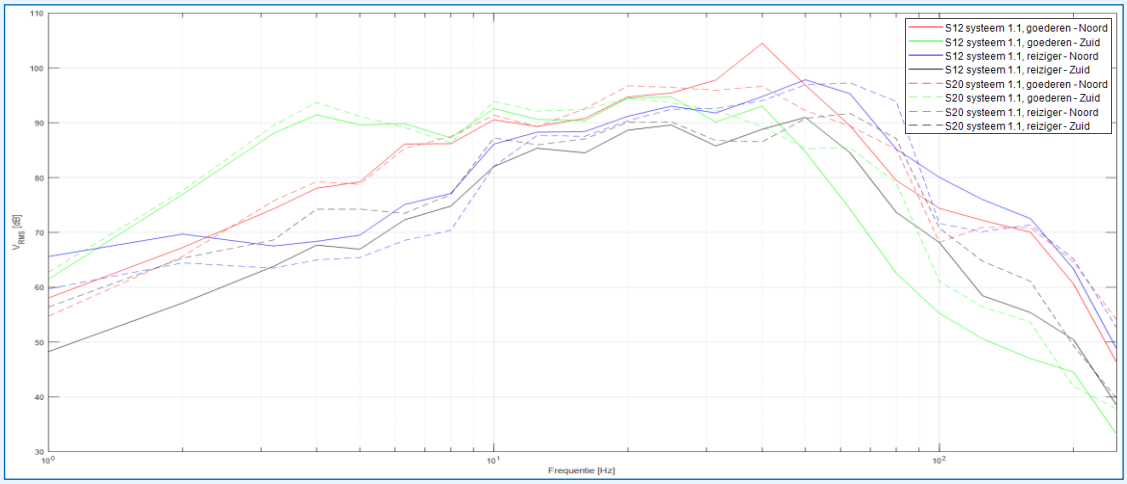
figuur 5: Bronspectra 8 meter punt meetlijn 1 (Sleeg 20) en meetlijn 2 (Sleeg 12)

tabel 7 Bronspectra V_{rms} in [dB] - 8m punten

Tertsband [Hz]	3,2	4	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	32	40	50	63
Testlocatie (meetlijn 1) - Sleeg 20														
Goederen - Noord	76	79	78	85	87	**91**	89	**92**	**97**	**96**	**96**	**97**	**92**	89
Goederen - Zuid	**90**	**94**	**91**	89	86	**94**	**92**	**92**	**94**	**94**	**92**	89	85	85
Reizigers - Noord	63	65	65	69	70	82	88	88	**90**	**92**	**93**	**94**	**97**	**97**
Reizigers - Zuid	69	74	74	74	77	87	86	87	**90**	**90**	87	87	**91**	**92**
Referentie locatie (meetlijn 2) - Sleeg 12														
Goederen - Noord	74	78	79	86	86	**91**	**90**	**91**	**95**	**95**	**98**	**105**	**97**	**90**
Goederen - Zuid	88	**91**	**90**	**90**	87	**93**	**91**	**90**	**95**	**95**	**90**	**93**	85	74
Reizigers - Noord	68	68	70	75	77	86	88	88	**91**	**93**	**92**	**95**	**98**	**95**
Reizigers - Zuid	64	68	67	72	75	82	85	85	89	**90**	86	89	**91**	84

Beschouwing

Figuur 5 toont dat er binnen de populatie goederentreinen sprake is van een subgroep met relatief sterke trillingsopwekking rond 4 Hz. Deze groep wordt gevormd door de kolentreinen. Omdat deze op het zuidelijke spoor (oostwaarts) beladen zijn en op het noordelijke spoor (westwaarts) leeg, is de gemiddelde trillingsopwekking van goederentreinen op het zuidspoor bij deze frequentie hoger dan op het noordspoor. Om de onderlinge verschillen in trillingsopwekking beter zichtbaar te maken, zijn de gemiddelde spectra uit figuur 5 verzameld in figuur 6.



figuur 6: Verzamelde bronspectra (gemiddeld) per meetlocatie, treintype en spoorgebruik

Figuur 6 toont duidelijk het verschil in trillingsopwekking rond 4 Hz tussen goederentreinen op het zuidspoor (groene curven) en het noordspoor (rode curven). Dit geldt voor beide meetlocaties (getrokken en gestreepte lijnen). Dit komt door de beladen kolentreinen op het zuidelijke spoor. Verder is te zien dat vanaf 25 Hz de trillingssterkten door treinen op het zuidspoor geleidelijk afnemen en dat dit op het noordspoor pas bij hogere frequentie inzet. Dit heeft voor een belangrijk deel te maken met het afstandsverschil tussen beide sporen. Gerekend vanaf het zuidelijke spoor ligt het 8 meter punt op 20 meter afstand en dus zullen hogere frequenties al meer zijn afgenomen.
Bij het reizigersmaterieel leidt het afstandseffect op Sleeg 12 (referentielocatie) vanaf 4 Hz tot lagere meetresultaten voor treinen op het zuidelijke spoor. Op Sleeg 20 (testlocatie) is dit pas vanaf 20 Hz zichtbaar, en daaronder worden zelfs hogere niveaus van het zuidspoor waargenomen. Een oorzaak hiervoor is niet gevonden, maar het speelt zich af bij relatief lage trillingsniveaus. Dit fenomeen zorgt er wel voor dat voor reizigerstreinen geen eenduidig effect van de USP's is vast te stellen. Het vervolg van dit onderzoek gaat daarom over het effect op de goedrentreinen.

Tussen 32 en 50 Hz (tertsband) is er een opvallend verschil te zien in de trillingsopwekking van (westgaande) goederentreinen op het noordelijke spoor (rode curven). Op de referentiemeetlijn ter hoogte van Sleeg 12 zijn de trillingsniveaus beduidend hoger dan op de testmeetlijn met de USP's ter hoogte van Sleeg 20. Het verschil loopt op tot 8 dB ofwel een factor 2,5 bij 40 Hz. Deze frequentie komt overeen met de passeerfrequentie van de dwarsliggers bij een rijsnelheid van ongeveer 90 km/u. Het stijfheidsverschil van de spoorstaaf tussen en op de dwarsliggers zal bij toepassing van USP's afnemen en verwacht wordt dat dit ook een afname van de trillingsopwekking bij deze frequentie tot gevolg heeft. Op het zuidelijke spoor (groene curven) is dit verschil niet waargenomen. Aannemelijk is dat dit verschil is toe te schrijven aan de werking van de USP's.

Voor het verdere verloop van de gemeten trillingsspectra als functie van de afstand tot het spoor wordt verwezen naar bijlage 1 waarin per treintype en meetlocatie een 3D-figuur is opgenomen van de trillingsspectra als functie van de afstand. In deze figuur is duidelijk zichtbaar hoe op grotere afstand het gemeten signaal steeds meer laagfrequent van karakter wordt en geleidelijk in niveau afneemt.

3.4 Effect USP's op trillingssterkte goedrentreinen (spectraal)

Om het effect van de USP's op de trillingsopwekking van goedrentreinen te bepalen, zijn de trillingsspectra voor het noordelijke spoor op de testlocatie, zie tabel 7, gecorrigeerd met de in tabel 6 aangegeven correctiewaarden. Vervolgens is het verschil bepaald met de trillingsspectra van het noordelijke spoor op de referentielocatie. Hieruit volgt het netto effect van de USP's op de 8 meter punten, zie tabel 8.

tabel 8 Effect (invoegverlies) USP's op goederentreinen, in [dB]

Tertsband [Hz]	3,2	4	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	32	40	50	63	80
invoegverlies	0	-1	-2	0	2	0	-2	-1	2	2	-3	-5	-5	-12	-10

Omdat het effect op de overige afstanden tot het spoor volledig is toegeschreven aan verschillen in trillingsoverdracht (afstandsverzwakking) tussen de twee meetlijnen, zal de effectiviteit ofwel het invoegverlies op alle afstanden gelijk zijn aan de in tabel 8 vermelde waarden.
Zou voor iedere meetafstand het spectrale verschil tussen de referentielocatie en de testlocatie zijn bepaald op basis van de goederentreinen op het zuidelijke spoor, dus op een onderling gelijk aanstootspectrum, dan komt de effectiviteit van de USP's eruit te zien als in tabel 9.

tabel 9 Effect USP's op verschillende afstanden tot het spoor, in [dB]

Tertsband [Hz]	3,2	4	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	32	40	50	63	80
8m	0	-1	-2	0	2	0	-2	-1	2	2	**-3**	**-5**	**-5**	**-12**	**-10**
16m	1	-1	-2	0	2	-1	0	1	2	**3**	-1	**-5**	**-5**	**-17**	**-13**
24m	0	-1	-2	0	1	0	0	**3**	**3**	**3**	-1	**-4**	**-5**	**-15**	**-8**
40m	1	-1	-1	1	2	0	-1	2	2	**4**	0	**-3**	**-6**	**-10**	**-7**
64m	2	0	0	1	2	-1	-1	**3**	2	1	0	**-5**	**-6**	**-5**	-2

Significante verschillen ≥ 3 dB vetgedrukt

Beschouwing

Uit tabel 8 en tabel 9 blijkt dat de aangebrachte USP's vooral effectief zijn in het frequentie gebied vanaf 32 Hz. Rond 20 tot 25 Hz is er een lichte verhoging van de trillingssterkte aan de orde. Onder 16 Hz is het beeld qua effectiviteit wisselend en zijn de effecten te beperkt om harde conclusies aan te verbinden. Rond 4 à 5 Hz lijkt er evenwel een lichte reductie van 1 à 2 dB op te treden, maar rond 8 Hz daarentegen juist weer een lichte toename.

Het effect van de USP's loopt bij hogere frequenties met toenemende afstand tot het spoor volgens tabel 9 geleidelijk aan terug. Dat heeft grotendeels te maken met het gedeeltelijk wegzakken van het trillingsniveau in het achtergrondniveau waardoor het werkelijke effect niet meer goed kan worden vastgesteld. Slechts de reductie van het niveau zonder maatregel tot aan het achtergrondniveau wordt dan gemeten.

3.5 Effect USP's op trillingssterkte $V_{max,Bts}$

De voor de toetsing van de trillingssterkte maatgevende $V_{max,Bts}$ is bepaald uit de $V_{rms,5s}$ over de 5 seconden rondom het moment waarin de maximale trillingssterkte tijdens de passage optreedt. De $V_{max,Bts}$ heeft een grootte van een constante factor 1,95 maal deze $V_{rms,5s}$. Het effect van de USP's op de $V_{max,Bts}$ is dan ook gelijk aan het verschil in somwaarden van de V_{rms} trillingsspectra met en zonder USP's. In tabel 10 is het effect met en zonder USP's berekend bij gelijke bodemcondities. Dit is gedaan voor de referentielocatie Sleeg 12, waar nu nog geen USP's liggen. De tabel geeft dus weer wat zou gebeuren als op deze locatie USP's zouden zijn toegepast.

tabel 10 Trillingsspectra en somwaarden zonder/met USP's - diverse afstanden, in [dB]

Tertsband [Hz]	3,2	4	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	32	40	50	63	80	SOM
Trillingsspectra referentie locatie (Sleeg 12) - zonder USP's (meetwaarden)																
8m	74	78	79	86	87	90	89	90	95	95	98	105	97	91	80	107
16m	73	76	76	82	83	87	83	82	87	91	90	94	85	74	69	98
24m	71	74	74	78	79	83	80	78	81	82	83	85	76	68	58	92
40m	71	74	73	77	77	82	78	76	81	77	77	78	66	58	53	88
64m	70	72	71	77	78	83	78	74	75	68	68	67	53	47	45	87
Trillingsspectra referentie locatie - met USP's (na aftrek van invoegverlies USP's)																
8m	75	77	77	86	88	90	88	89	97	97	94	100	91	79	70	104
16m	73	76	75	82	85	86	81	81	89	93	86	89	79	62	58	97
24m	72	74	73	79	81	83	78	76	83	85	80	80	70	56	48	91
40m	71	73	72	77	79	81	76	75	83	79	74	73	60	46	43	89
64m	70	71	70	77	80	83	77	73	77	70	64	63	47	36	35	87

Uit tabel 10 blijkt dat de USP's vooral effect hebben op de eerste 10 tot maximaal 20 meter vanaf het spoor. Op grotere afstand zijn in de Zevenaarse bodem (kleiachtig) de hogere frequenties al in belangrijke mate uitgedempt waarmee de USP's hun werking verliezen. In meer compacte zandige bodems zou dit effect tot op iets grotere afstand meetbaar kunnen zijn, maar verwacht wordt dat de effectiviteit ook dan beperkt zal zijn tot maximaal 50 meter.

4. Conclusies

In de periode 30 september tot en met 3 oktober 2020 is trillingsonderzoek gedaan naar het effect van undersleeperpads onder dwarsliggers als maatregel tegen trillingen. Het onderzoek is gedaan op twee locaties langs het noordelijke derde spoor op het traject Zevenaar – Duitse grens.

Het onderzoek heeft uitgewezen dat de aangebrachte USP's (type Getzner SLN1010G) vanaf ongeveer 32 Hz een verlaging geven op de trillingssterkte van goedrentreinen van 3 dB oplopend tot ongeveer 10 dB bij 80 Hz. Omdat hogere frequenties door de bodem met toenemende afstand tot het spoor worden verzwakt, is het effect van USP's op de totale trillingssterkte $V_{max,Bts}$ beperkt tot enkele tientallen meters van het spoor. In de kleiachtige bodem bij Zevenaar is op meer dan 20 meter nog maar weinig effect merkbaar. Op meer compacte zandachtige bodems zal dit invloedsgebied mogelijk wat groter zijn.

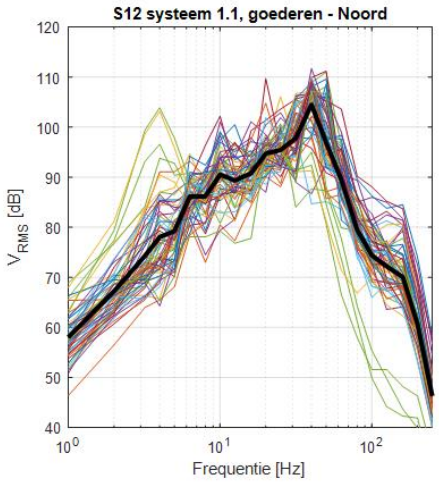
Voor reizigerstreinen is uit het onderzoek geen eenduidig beeld qua effectiviteit van USP's gebleken. De effectiviteit van de USP's in het noordelijke spoor wordt bepaald door vergelijk met de meetdata van het zuidelijke spoor. In dat zuidelijke spoor traden bij reizigerstreinen tussen de meetlocaties opmerkelijke verschillen op, die een zeer strijdig beeld opriepen qua effectiviteit van de USP's in vergelijk met de goederentreinen.

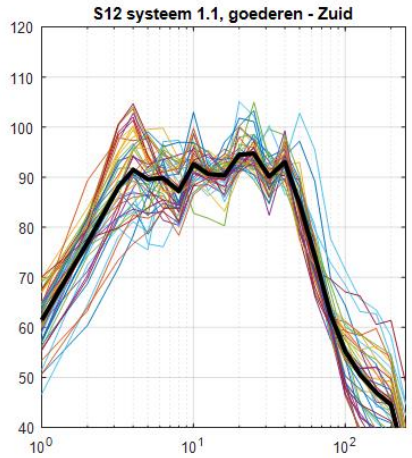
ir. M.H.J. (Mark) Bakermans
DGMR Industrie, Verkeer en Milieu B.V.

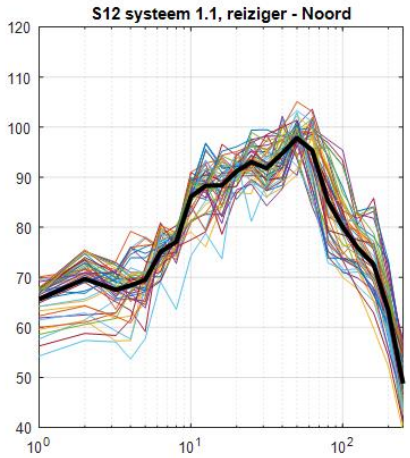
Bijlage 1

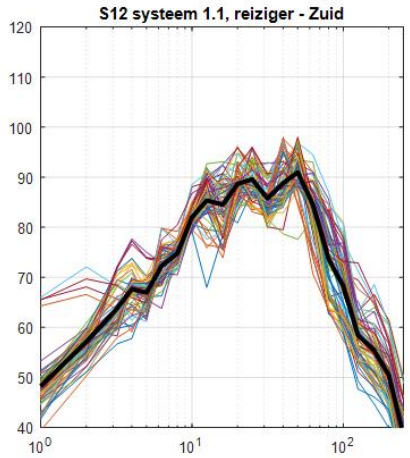
Titel	Resultaten
Omvang	5

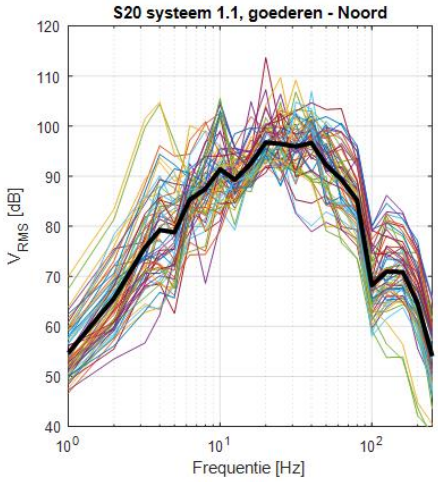
Bronspectra 8m – per groep

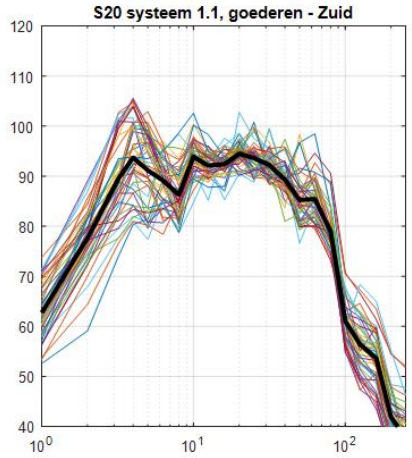


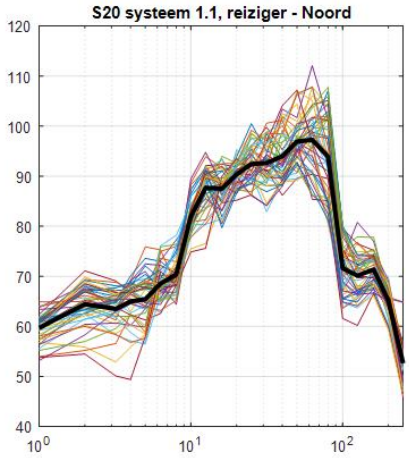


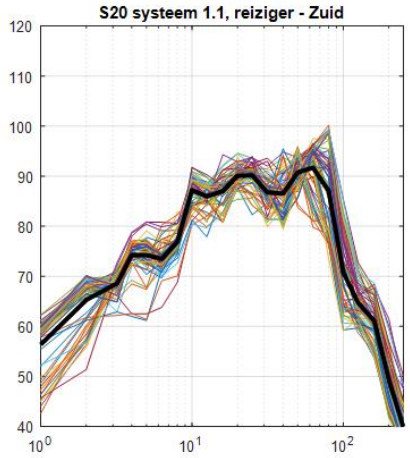




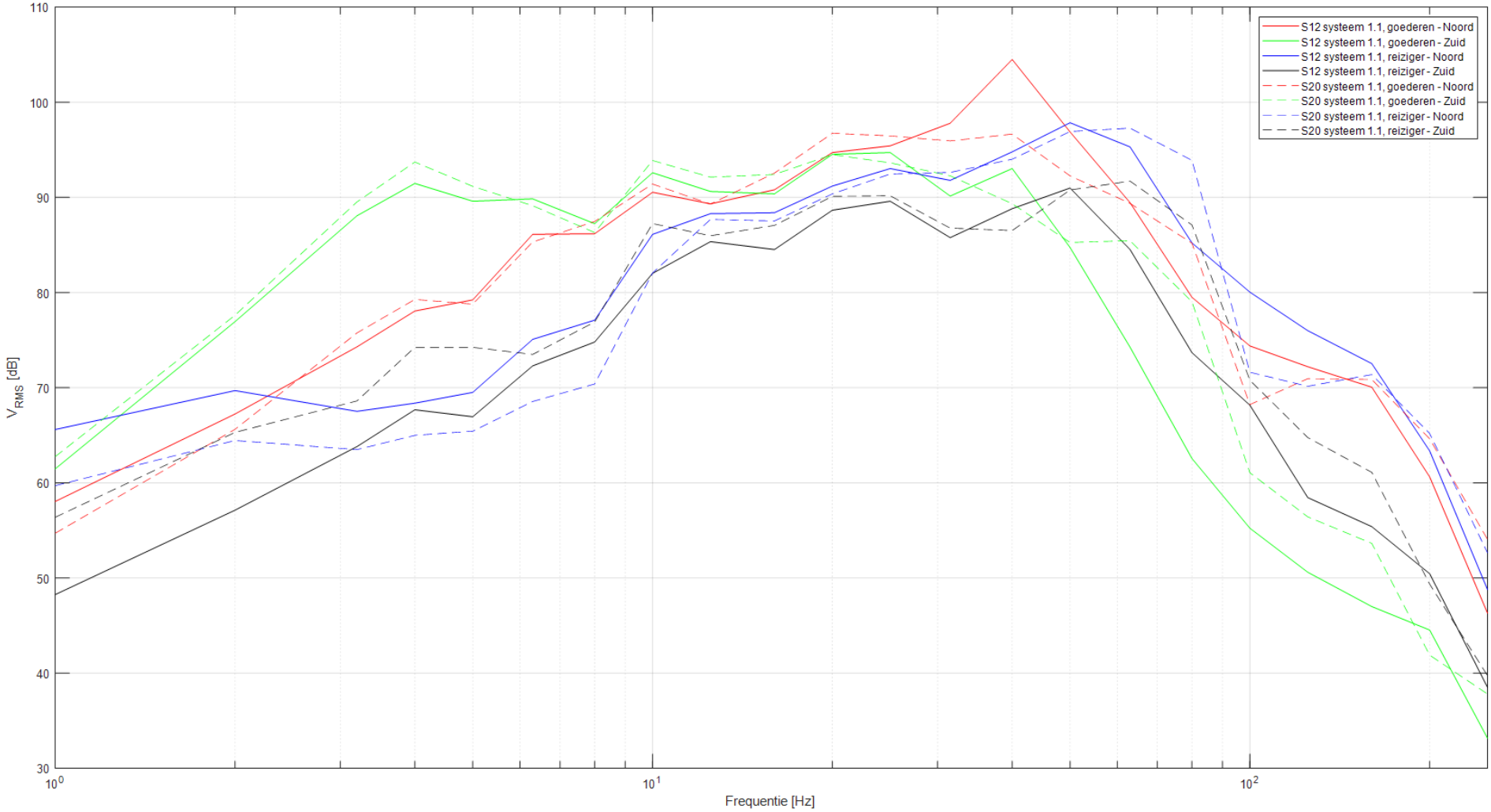




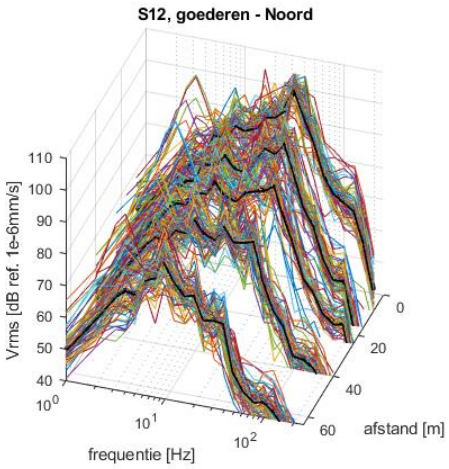


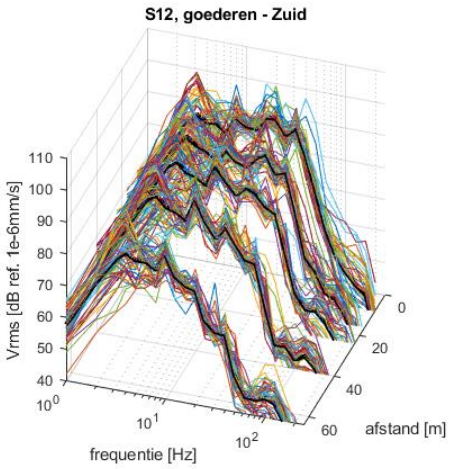


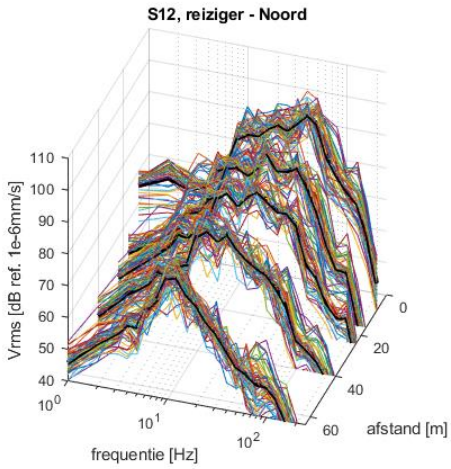
Bronspectra 8m – verzameld

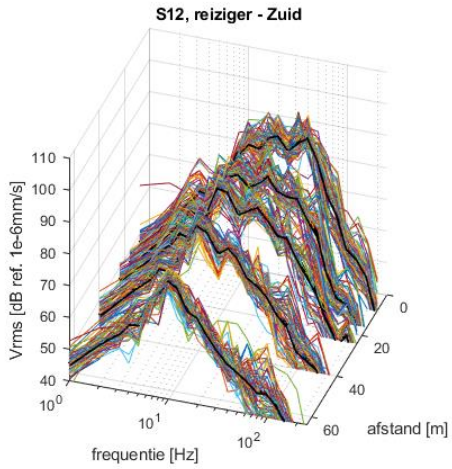


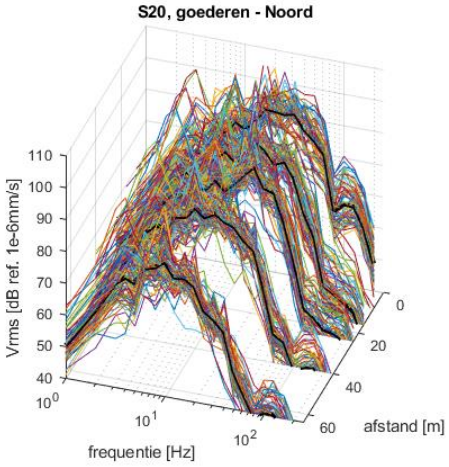
Trillingsspectra 3D – per groep

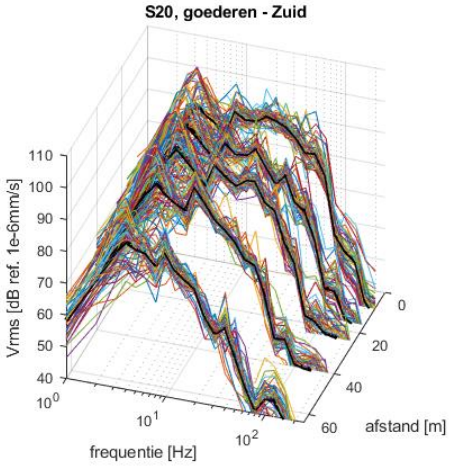


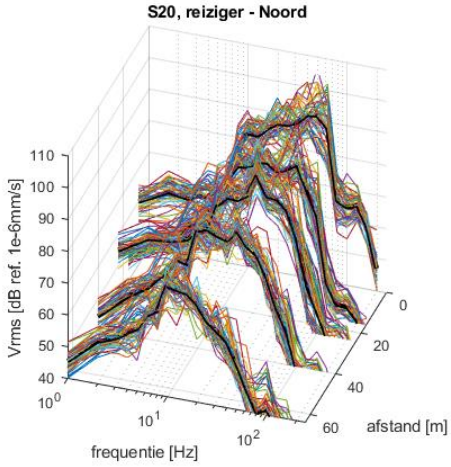


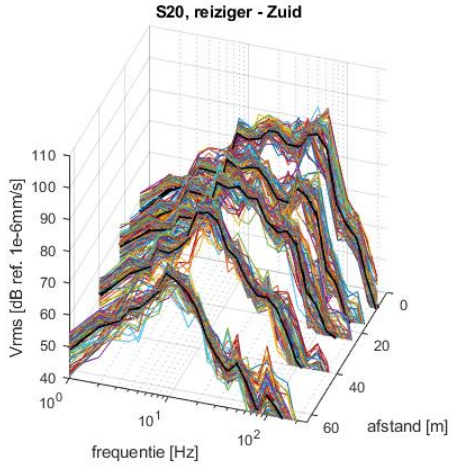




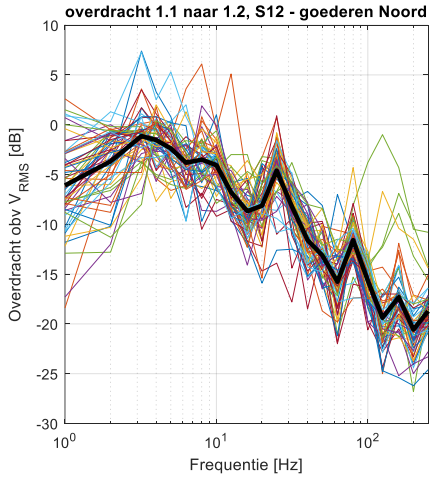


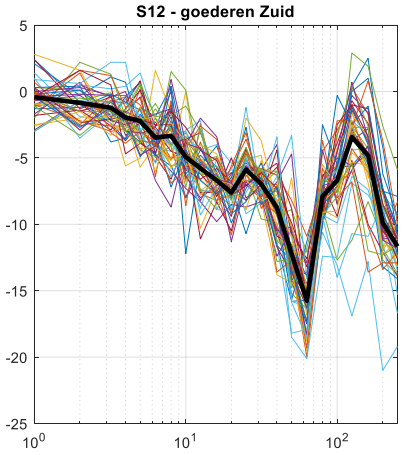


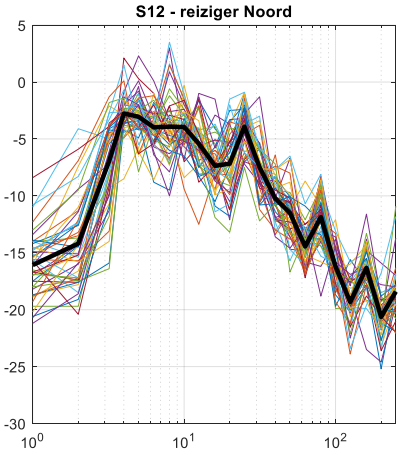


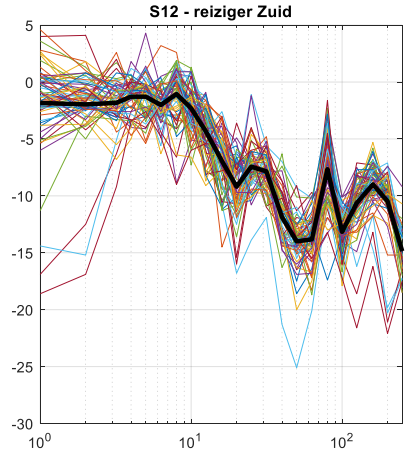


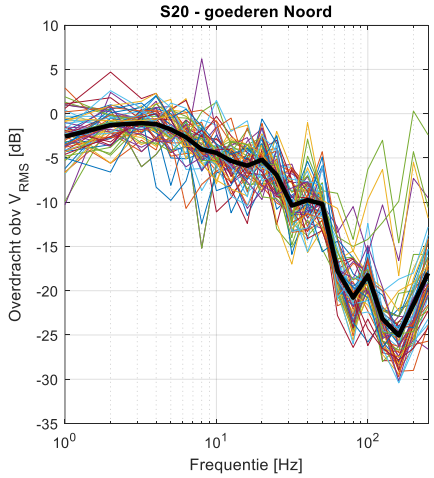
Overdrachten 8m naar 16m afstand – per groep

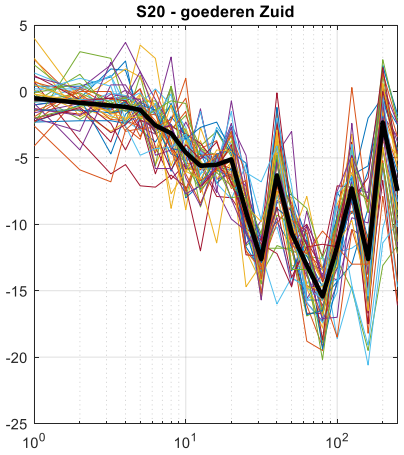


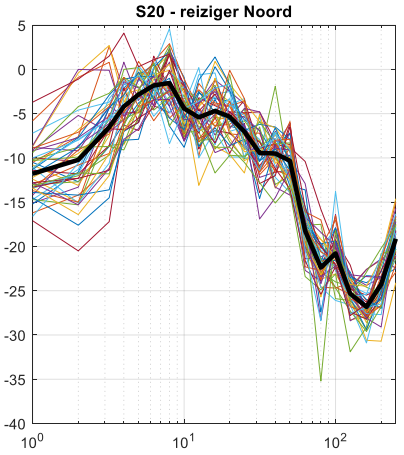


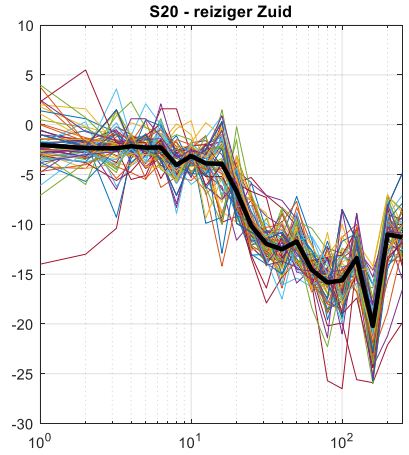
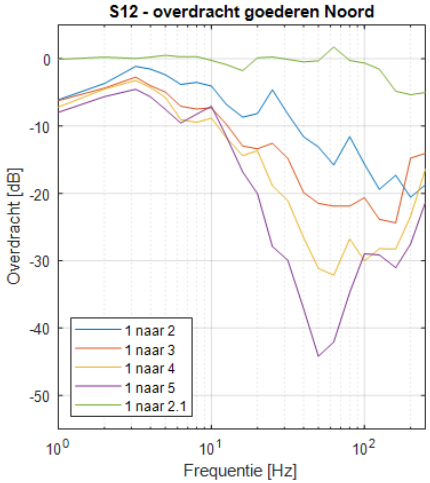
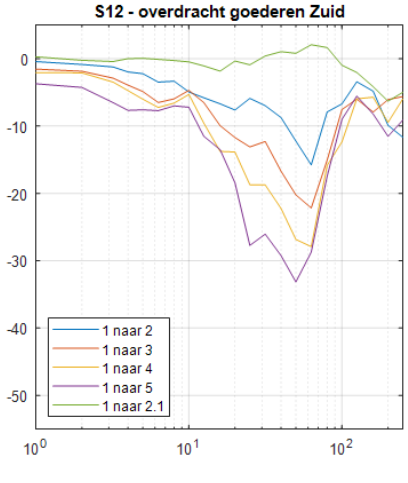
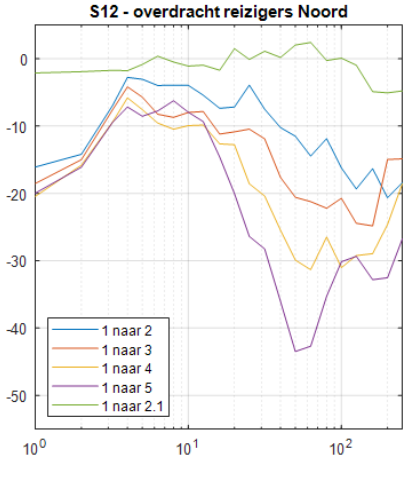
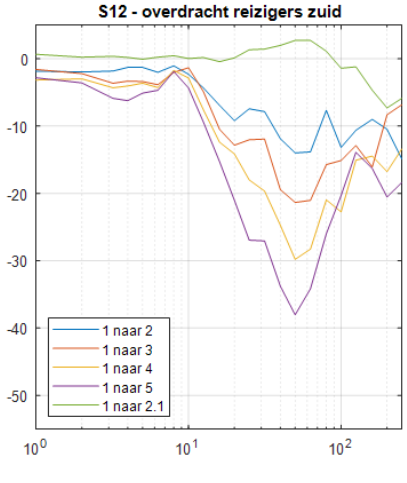
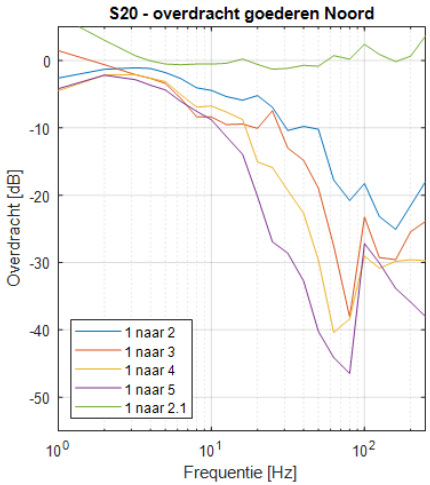
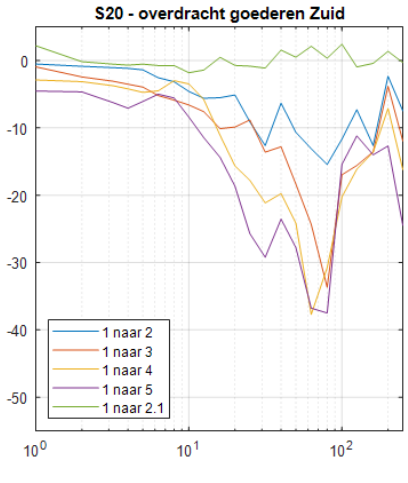
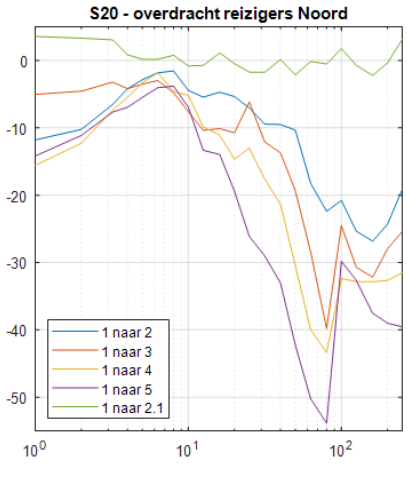
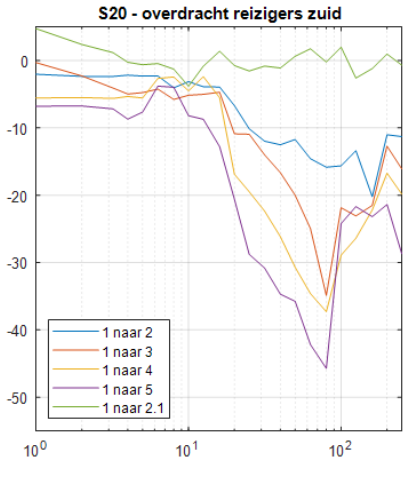












Gemiddelde overdrachten per groep, alle afstanden