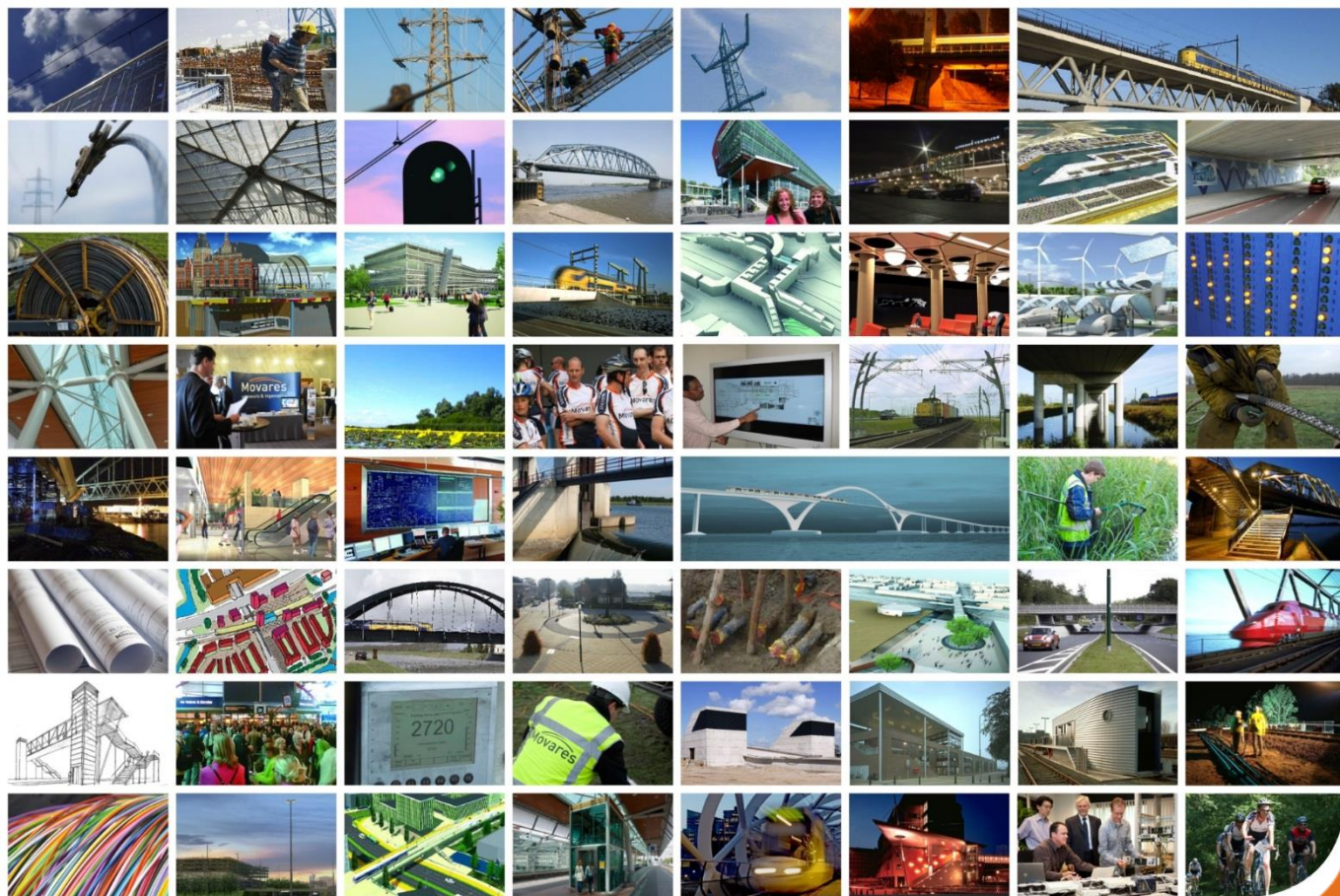


Trillingsonderzoek Brabantroute

Onderzoek naar oorzaken trillingsklachten



D79-PBO-KA-1800189

30 november 2018 - Versie 1.0

Autorisatieblad

Trillingsonderzoek Brabantroute

Onderzoek naar oorzaken trillingsklachten

	Naam	Akkoord	Datum
Opgesteld door	ir. C.J.F.N. Paiman	✓	30-11-2018
Gecontroleerd door	ir. P.M. Boon	✓	30-11-2018
Vrijgegeven door	dr. ir. H.G. Stuit	✓	30-11-2018

Op dit autorisatieblad ontbreken de handtekeningen wegens de digitale verwerking van ons vrijgaveproces. Dit rapport is aantoonbaar vrijgegeven.

Versie historie

Versie	Naam	Datum	Korte toelichting
0.1	C.J.F.N. Paiman	10-10-2018	Eerste conceptversie
0.2	P.M. Boon	02-11-2018	Concept aangepast n.a.v. commentaar NS
0.3	P.M. Boon	06-11-2018	Treinparameters toegevoegd
0.4	P.M. Boon	23-11-2018	Vergelijking met meting 2016 toegevoegd
0.5	P.M. Boon	29-11-2018	Commentaar NS en ProRail verwerkt

Samenvatting

Het aantal klachten van bewoners op diverse locaties langs het spoor van de Brabanthoute in Dorst, Rijen en Oisterwijk is de afgelopen twee jaar toegenomen. ProRail wil graag weten wat de oorzaak is van deze toename. Vanaf eind 2016 is de nieuwe Intercity Den Haag – Eindhoven op dit traject geïntroduceerd. Daarnaast is mogelijk sprake van veranderingen in de spoorligging. Bewoners relateren de klachten aan verschillende mogelijke oorzaken, zoals de inzet van nieuwe treintypes, goederentreinen, realisatie van nieuwe kunstwerken of spoorvernieuwing.

Dit onderzoek richt zich dan ook op de vraag: *kunnen veranderingen in treinverkeer of spoor kwaliteit de recente trillingsklachten verklaren?*

Om deze vraag te beantwoorden is met behulp van metingen langs de Brabanthoute onderzoek gedaan naar de toename van klachten van omwonenden over trillingshinder in de periode 2016 tot 2018.

Uit het onderzoek volgt dat de maximaal gemeten trillingen tussen 2016 en 2018 op de locatie in Hulten niet zijn toegenomen, wel zijn de trillingen van reizigerstreinen bij de meting in 2018 hoger dan in 2016. In 2016 traden hoge trillingen incidenteel op door de passage van goederentreinen met hoge trillingen, in 2018 treden deze hoge trillingen aanzienlijk vaker op doordat ook een deel van de reizigerstreinen hoge trillingen produceert. Dit verschil tussen de metingen is deels verklaarbaar door weersinvloeden (in 2016 is in een koude, natte periode gemeten, in 2018 in een warme, droge periode, waardoor de bodem hard is en met name hoger frequente trillingen minder goed uitdempt). Deze verschillen treden met name op bij frequenties boven de 20 Hz, deze hoger frequente trillingen worden in woningen sterk uitgedempt door de constructie.

Verder kan uit het onderzoek het volgende worden geconcludeerd:

1. Er zijn veranderingen geweest in type materieel, zo is de FLIRT-trein geïntroduceerd, evenals de TRAXX-locomotief in de TRAXX + ICRmh-combinatie. Met name de TRAXX-locomotief in de TRAXX + ICRmh-combinatie heeft in frequentiegebieden waar woningen gevoelig voor zijn vaak hogere trillingen dan andere treinen. Dit treintype reed in 2016 slechts incidenteel, maar in 2018 veelvuldig. De introductie van deze treintypes kan daarom niet worden uitgesloten als oorzaak van de toegenomen klachten, met name doordat hoge trillingen door de introductie van de TRAXX + ICRmh-combinatie vaker optreden dan voorheen.
2. De onderhoudsstatus en aslast van het materieel is niet significant gewijzigd tussen 2016 en 2018. Verder geldt dat de aslast geen significante invloed heeft op de trillingen, de onderhoudsstatus (wielonrondheid bijvoorbeeld) heeft in het gebied tussen 10 en 20 Hz een beperkte invloed op de trillingen. Omdat er geen veranderingen zijn geweest in onderhoudsstatus van de treinen, kan dit de toegenomen klachten dus niet verklaren.
3. De rijsnelheid van de treinen is niet gewijzigd tussen 2016 en 2018, alhoewel een verandering in rijsnelheid wel leidt tot een verandering van de trillingen. Een toename in rijsnelheid kan de toegenomen klachten dus niet verklaren.

4. De spoorconstructie is niet gewijzigd tussen 2016 en 2018, alleen in Oisterwijk zijn beperkte veranderingen. Het verwijderen van wissels daar heeft een positief effect, het verwijderen van het derde spoor heeft geen merkbaar effect, en alleen het toevoegen van de onderdoorgang kan hebben geleid tot lokaal (binnen een straal van 100 meter) hogere trillingen. Veranderingen in spoorligging kunnen dus, afgezien van woningen binnen 100 meter van de onderdoorgang in Oisterwijk, de toegenomen klachten niet verklaren.
5. De spoorligging is niet significant gewijzigd tussen 2016 en 2018. Een verandering in de spoorligging kan de toegenomen klachten dus niet verklaren.
6. De trillingen zijn significant hoger in Dorst en in Rijen dan in Tilburg en Oisterwijk. Dit komt vooral door verschillen in de bodem en verschillen in bronsterkte van de trillingen (waarschijnlijk veroorzaakt door een combinatie van spoorligging, onafgeveerde massa, primair afgeveerde massa en effecten zoals vlakke plaatsen, onrondheid en onbalans in de wielen).
7. De trillingen zijn significant hoger bij spoorwegovergangen dan bij doorgaand spoor. Dit komt vooral door verschillen in stijfheid van de ondergrond tussen de spoorwegovergang en het doorgaande spoor, waardoor een extra oneffenheid ontstaat waardoor meer trillingen optreden. effect is te zien bij alle treintypes, maar sterker aanwezig bij treinen met een hogere onafgeveerde massa zoals TRAXX-locomotieven in de TRAXX + ICRmh-combinatie.

De enige verandering die niet als oorzaak van de toegenomen klachten is uit te sluiten, is de introductie van nieuwe treintypes, en dan met name de TRAXX-locomotief in de TRAXX + ICRmh-combinatie. In de metingen is zichtbaar dat er een duidelijk verschil zichtbaar is in trillingen tussen verschillende treintypes. Zo zorgen goederentreinen bij frequenties onder de 10 Hz voor voelbaar hogere trillingen dan reizigerstreinen (dit is vooral voelbaar in woningen met bijvoorbeeld slappe vloeren), terwijl bij frequenties boven de 10 Hz vooral doorgaande interciti's op veel locaties voor voelbaar hogere trillingen zorgen dan sprinters en goederentreinen (dit is vooral voelbaar in woningen met bijvoorbeeld wat steviger houten vloeren of betonnen vloeren).

Op basis van de frequentieafhankelijke trillingsspectra kan worden geconcludeerd dat op de meeste locaties (maar met name bij spoorwegovergangen) bij sommige frequenties de trillingen van de TRAXX + ICRmh-combinatie meer dan 30% hoger zijn dan van andere treintypes. In woningen die gevoelig zijn voor die frequenties, kunnen de trillingen dus voelbaar (met meer dan 30%) zijn toegenomen tussen 2016 en 2018.

Inhoudsopgave

Samenvatting	2
1 Inleiding	5
Aanleiding	5
Doel van het onderzoek	5
Opzet van het onderzoek	5
Leeswijzer	5
2 Situatiebeschrijving	6
2.1 Inleiding	6
2.2 Selectie van meetlocaties	6
2.3 Meetopstelling	8
3 Onderzoeksmethodiek	10
3.1 Inleiding	10
3.2 Trillingen van treinen – bron, bodem en gebouw	10
3.3 Beoordeelde trillingsgrootheden	11
4 Resultaten	13
4.1 Inleiding	13
4.2 Trillingen	13
4.2.1. <i>Resultaten metingen 2018</i>	13
4.2.2. <i>Vergelijking 2016 en 2018</i>	14
4.2.3. <i>Invloed van de bodem</i>	18
4.3 Spoorligging en spoorconstructie	20
4.3.1. <i>Wijzigingen in spoorconstructie</i>	20
4.3.2. <i>Wijzigingen in onderhoudsstatus spoor</i>	21
4.4 Rijsnelheid en treinen	23
4.4.1. <i>Wijzigingen in rijsnelheid</i>	23
4.4.2. <i>Type trein</i>	24
4.4.3. <i>Onderhoudsstatus</i>	30
5 Conclusies	33
Colofon	35
Bijlage I – Keuze meetlocaties	i
Bijlage II – Trillingen van treinverkeer	xxii
Bijlage III – Bronspectrum van treinen	liv
Bijlage IV – Spoorligging	lx
Bijlage V – Materieelgegevens	lxxi
Bijlage VI – Vergelijking met DGMR-data	lxxii

1 Inleiding

Aanleiding

Het aantal klachten van bewoners op diverse locaties langs het spoor van de Brabanthoute in Dorst, Rijen en Oisterwijk is de afgelopen twee jaar toegenomen. ProRail wil graag weten wat de oorzaak is van deze toename. Vanaf eind 2016 is de nieuwe Intercity Den Haag – Eindhoven op dit traject geïntroduceerd. Daarnaast is mogelijk sprake van veranderingen in de spoorligging. Bewoners relateren de klachten aan verschillende mogelijke oorzaken, zoals de inzet van nieuwe treintypes, goederentreinen, realisatie van nieuwe kunstwerken of spoorvernieuwing.

Doel van het onderzoek

Dit onderzoek richt zich dan ook op de vraag: *kunnen veranderingen in treinverkeer of spoor kwaliteit de recente trillingsklachten verklaren?*

Deze vraag valt uiteen in drie delen:

1. Zijn de trillingen daadwerkelijk voelbaar toegenomen?
2. Hebben er aanzienlijke veranderingen plaatsgevonden in treinverkeer en/of spoor kwaliteit?
3. Bestaat er een significante relatie tussen de verandering in treinverkeer en/of spoor kwaliteit en trillingen?

Opzet van het onderzoek

Om een antwoord te geven op bovenstaande vragen, is een meetonderzoek uitgevoerd, waarbij gelijktijdig op meerdere locaties metingen op maaiveld (om metingen onderling goed te kunnen vergelijken) zijn uitgevoerd. In het onderzoek is gebruik gemaakt van de volgende informatie:

- Trillingsmetingen
- Rijsnelheid van de treinen
- Bodemeigenschappen (te bepalen met valproeven)
- Treineigenschappen (uit QuoVadis-meetstation langs de baan, gelegen in Tilburg)
- Spoorligging (meettrein)

Hierbij is steeds gekeken of er sprake is van een verandering in deze parameters tussen 2016 en 2018, en zo ja, of deze verandering een oorzaak kan zijn van de toegenomen klachten. Dit rapport beschrijft de resultaten van het onderzoek.

Leeswijzer

Hoofdstuk 2 geeft een beschrijving van de situatie, hoofdstuk 3 gaat nader in op de onderzoeksmethodiek, hoofdstuk 4 beschrijft de resultaten en geeft een analyse waarbij oorzaken wel of niet worden uitgesloten op basis van de meetdata, hoofdstuk 5 geeft conclusies en aanbevelingen. In de bijlagen is achtergrondinformatie opgenomen.

2 Situatiebeschrijving

2.1 Inleiding

Het aantal klachten van bewoners op diverse locaties langs het spoor van de Brabanthroute in Dorst, Rijen en Oisterwijk is de afgelopen twee jaar toegenomen, zie Tabel 2-1.

Tabel 2-1 Aantal trillingsklachten per jaar per plaats

Plaats	Jaartal				
	2014	2015	2016	2017	2018
Boxtel	1	3	2	3	1
Dorst		4	2	16	23
Oisterwijk		3	3	17	57
Rijen	2	3	12	5	5
Tilburg	6	8	8	10	9
Totaal	9	21	27	51	95

Bewoners noemen de volgende mogelijke oorzaken van de klachten:

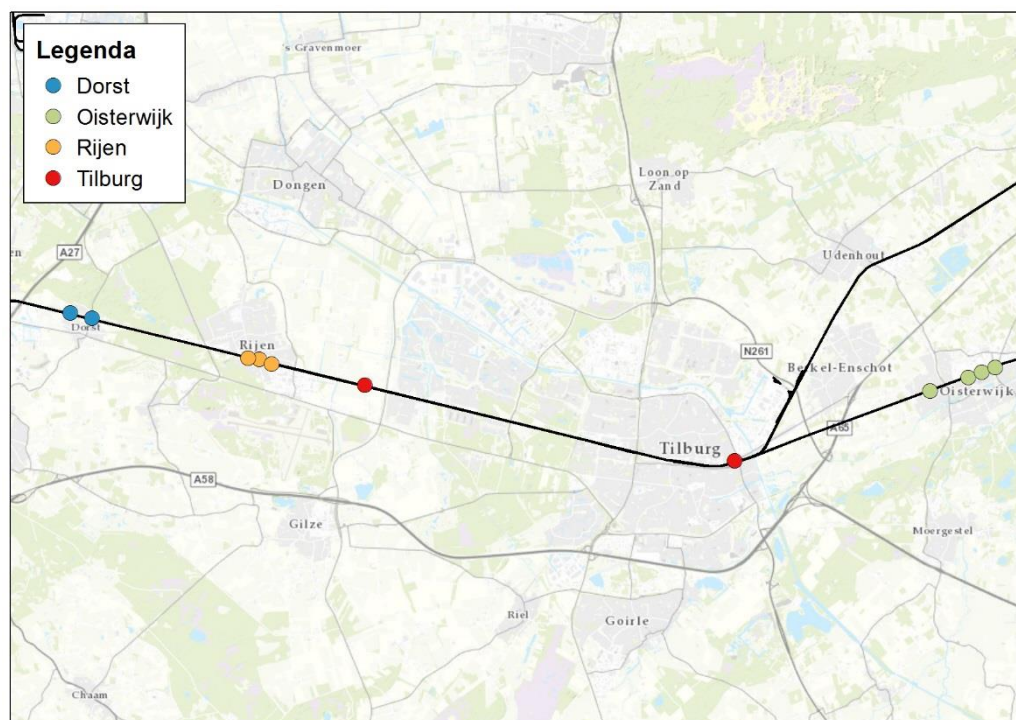
- Generiek: verschijnen van de nieuwe intercity (TRAXX + ICRmh-combinatie) Den Haag-Eindhoven.
- Dorst: passage van treinen over de spoorwegovergang Wethouder van Dijklaan/Spoorstraat. Hiervan zijn de rubber stroken van de ingegoten sporen ter hoogte van de spoorwegovergang inmiddels vernieuwd, maar de klachten blijven bestaan. Er zijn hier overigens ook klachten vanuit woningen langs doorgaand spoor.
- Oisterwijk: passage van treinen over de spoorwegovergang Heusdensebaan en aanleg van voetgangerstunnel tussen Schijfstraat en Stationsplein, waardoor derde spoor is verwijderd. Er zijn hier overigens ook klachten vanuit woningen langs doorgaand spoor.

2.2 Selectie van meetlocaties

Op basis van de (globale) locaties van de klachten zijn meetlocaties geplaatst langs het spoor. Verder is bij de selectie van meetlocaties rekening gehouden met de volgende aspecten:

- Bodemopbouw (op basis van boringen en sonderingen), zodat de invloed van de variatie in bodemopbouw op de trillingen kan worden vastgesteld.
- Bovenbouwconstructie van het spoor (doorgaand spoor of een spoorwegovergang). Door bij verschillende types constructies te meten, kan de invloed hiervan worden vastgesteld. De invloed van wissels is in dit onderzoek niet vastgesteld. Uit eerdere onderzoeken blijkt dat wissels vooral lokaal (binnen een straal van 50 tot 100 meter) voor hogere trillingen kunnen zorgen dan doorgaand spoor.

Op basis daarvan zijn in totaal 11 meetlocaties gekozen, zie Figuur 2-1.



Figuur 2-1 Meetlocaties op traject Dorst-Oisterwijk in Dorst, Rijen, Tilburg en Oisterwijk

Een toelichting op de keuze van de meetlocaties is opgenomen in Bijlage I. De metingen zijn uitgevoerd op de in Tabel 2-2 weergegeven locaties. Hart spoor is hier het hart van de twee meest nabijgelegen (in gebruik zijnde) sporen van de route Breda – Boxtel.

Tabel 2-2 Meetlocaties

Locatie		Km	Afstand hart spoor	Bijzonderheden
Dorst	Parallelweg	5.73	20.1 m	
Dorst	Wethouder van Dijklaan	6.32	24.9 m	Spoorwegovergang
Rijen	Generaal van Geenstraat	10.50	25.0 m	
Rijen	Stationsplein	10.78	25.1 m	Spoorwegovergang
Rijen	Parallelweg	11.11	25.0 m	
Hulten/Tilburg	Lage Madepad	13.59	25.0 m	
Tilburg	Insulindeplein	23.43	25.0 m	
Oisterwijk	Pastoor van Heesbeenstraat	28.82	25.6 m	
Oisterwijk	Blokshekken	29.87	25.1 m	
Oisterwijk	Stationsplein	30.24	28.1 m	Onderdoorgang
Oisterwijk	Heusdensebaan	30.61	25.0 m	Spoorwegovergang

2.3 Meetopstelling

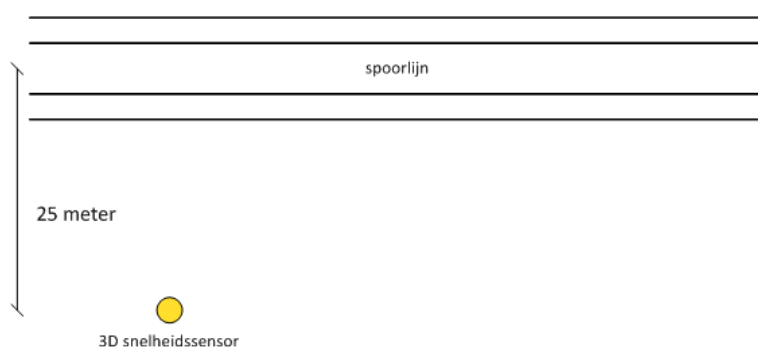
Om de metingen onderling goed te kunnen vergelijken, is gekozen voor een vaste, identieke meetopstelling voor alle locaties. Deze vaste meetopstelling bestaat uit drie onderdelen:

- Een meetcomputer op accuvoeding, met een meetfrequentie van 1000 Hz. De meetcomputer meet volcontinu de trillingen.
- Een tot drie 3D-snelheidssensoren, geplaatst op een zware voetplaat, ingegraven op een stoeptegels op ca. 25 cm. diepte, en rondom ingeklemd.
- Videocamera op een paal voor beeldvastlegging en snelheidsbepaling.

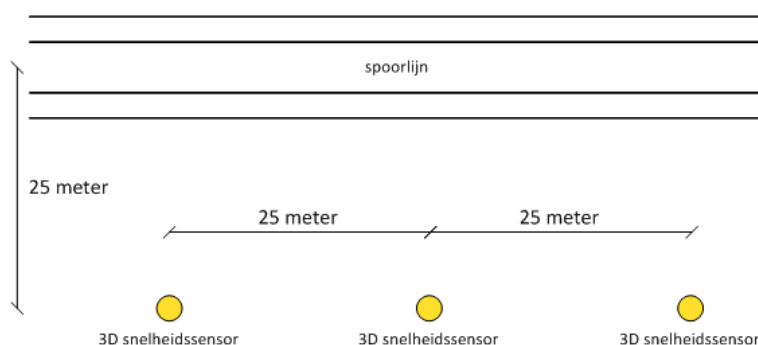


Figuur 2-2 Meetopstelling

Een schematische weergave van de standaard meetopstelling is weergegeven in Figuur 2-3. De meetopstelling met 3 sensoren (Parallelweg in Dorst) is weergegeven in Figuur 2-4. De exacte afstand tot het hart van de beide sporen is weergegeven in Tabel 2-2.



Figuur 2-3 Standaardopstelling



Figuur 2-4 Opstelling met 3 parallelle sensoren

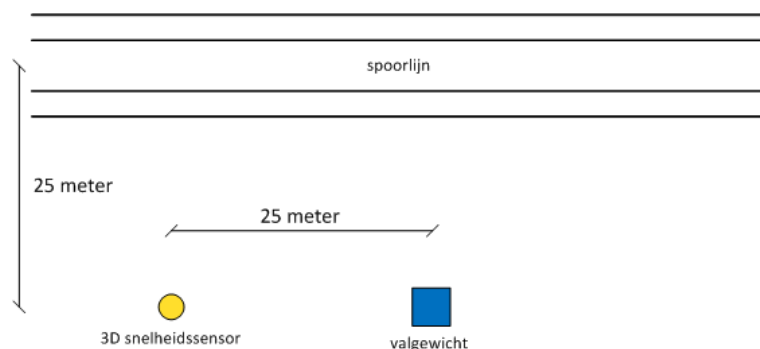
Om de bodemeigenschappen te bepalen is gebruik gemaakt van een valproefstelsel, zie Figuur 2-5, bestaande uit de volgende componenten:

- Valgewicht met maximale valhoogte van 2.0 m en gewicht tot 80 kg met een maximale impuls van ca. 500 Ns. Impuls is instelbaar door valhoogte en/of gewicht aan te passen.
- Staalplaat van 0.5 m² om de kracht beter de bodem in te leiden.
- Accelerometer op gewicht om de impuls op de bodem vast te stellen.



Figuur 2-5 Valgewicht

De valproeven zijn uitgevoerd op 25 meter afstand van de trillingsensoren, waarbij voor de keuze van de valproeflocatie is gezocht naar een locatie zodanig dat de bodem tussen het valgewicht en de trillingsmetingen vergelijkbaar is met de bodem tussen het spoor en de trillingsmetingen. Door gelijktijdig het trillingssignaal op 25 meter afstand en het versnellingssignaal op het valgewicht te registreren, kan de overdracht tussen kracht en trillingen op 25 meter afstand van de trillingsbron worden vastgesteld.



Figuur 2-6 Opstelling met valgewicht

3 Onderzoeksmethodiek

3.1 Inleiding

Dit hoofdstuk beschrijft de onderzoeksmethodiek, waarmee een antwoord wordt gegeven op de gestelde vragen. Doel is om te achterhalen wat er is veranderd tussen 2016 en 2018, en dus een mogelijke oorzaak kan zijn van de toegenomen klachten langs de Brabantroute.

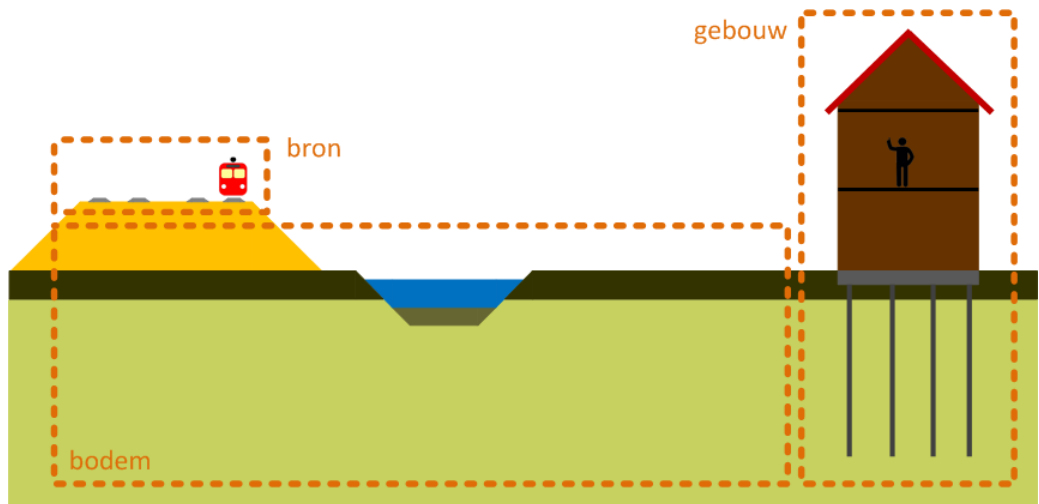
3.2 Trillingen van treinen – bron, bodem en gebouw

Om op een gestructureerde manier vast te stellen wat wel en niet mogelijke oorzaken zijn van de toegenomen trillingen tussen 2016 en 2018, is de volgende aanpak gehanteerd:

1. Vaststellen wat parameters zijn die voor trillingen kunnen zorgen, op basis van literatuuronderzoek en expert judgment.
2. Per parameter vaststellen of deze tussen 2016 en 2018 (significant) is gewijzigd.
3. Per (significant) gewijzigde parameter vaststellen of er een relatie is met de trillingen.

Op deze manier worden geen (bekende) oorzaken over het hoofd gezien.

De trillingen van treinverkeer ontstaan doordat de trein (de trillingsbron) over het spoor rijdt. Zowel de wielen van de trein als het spoor zijn niet perfect vlak, en kunnen daarmee voor trillingen in de omgeving zorgen. Deze trillingen gaan via de bodem naar gebouwen, waar deze, afhankelijk van de eigenschappen van het gebouw, worden versterkt of verzwakt. Zie voor een schematische weergave van dit systeem Figuur 3-1. In het voorliggende onderzoek is vooral gefocust op de bron en (in mindere mate) de bodem, de metingen zijn namelijk buiten gebouwen uitgevoerd om de metingen onderling beter met elkaar te kunnen vergelijken. Gebouwen zijn namelijk sterk verschillend en reageren daarmee ook sterk verschillend op trillingen.



Figuur 3-1 Principe van bron, bodem en gebouw

De parameters die de trillingen kunnen beïnvloeden, zijn weergegeven in Tabel 3-1. Per parameter is weergegeven of deze is veranderd tussen 2016 en 2018. Wanneer deze parameter (mogelijk) is veranderd, is aangegeven hoe de invloed van deze verandering wordt vastgesteld in dit onderzoek.

Tabel 3-1 *Mechanismes achter ontstaan spoortrillingen*

Type	Mechanisme	Veranderd?	Hoe te meten?
Bron	Type materieel	Ja, TRAXX + ICRmh-combinatie erbij	Treintype uit QuoVadis
	Onderhoudsstatus materieel	Onbekend	Aslast en dynamische pieklast uit QuoVadis
	Rijsnelheid	Onbekend	Rijsnelheid uit QuoVadis en videobeelden
	Type spoorconstructie	Ja, in Oisterwijk	Technische tekeningen
	Onderhoudsstatus spoor	Onbekend	Hoogteligging en schift uit spoorliggingsgegevens
Bodem	Type bodem	Nee	
	Obstakels (sloot/trillingsscherp)	Nee	
Gebouw	Type fundering	Onbekend	Valt buiten scope onderzoek
	Type constructie	Onbekend	Valt buiten scope onderzoek
	Afmetingen	Onbekend	Valt buiten scope onderzoek

In het volgende hoofdstuk wordt voor elk van de (mogelijk) veranderde parameters tussen 2016 en 2018 onderzocht of deze zijn veranderd, en zo ja, of dit invloed heeft op de trillingen en dus de toename van de klachten kan verklaren.

Hiervoor worden, in onderstaande volgorde, de volgende vragen beantwoord:

1. Zijn de trillingen tussen 2016 en 2018 toegenomen? Hiervoor zal een vergelijking worden gemaakt tussen de metingen in 2016 en 2018 op de meetlocatie Lage Madepad in Tilburg/Hulten. Hoewel de trillingen sterk afhankelijk zijn van een combinatie van trein, spoor en bodem, kan op basis van de frequentieafhankelijke verschillen in het trillingsspectrum van de treinen op deze locatie wel een globale doorkijk worden gegeven naar andere locaties.
2. Is de spoorligging tussen 2016 en 2018 veranderd? En zo ja, heeft een verandering in spoorligging invloed op de trillingen? Hiervoor wordt de spoorligging tussen 2016 en 2018 op de meetlocaties met elkaar vergeleken, en daarnaast worden de trillingen op locaties met een slechtere spoorligging vergeleken met locaties met een betere spoorligging.
3. Zijn de eigenschappen van de treinen (rijsnelheid, onderhoudsstatus, type trein) veranderd tussen 2016 en 2018? En zo ja, hebben deze veranderingen invloed op de trillingen? Hiervoor wordt een analyse gemaakt naar het verband tussen rijsnelheid en trillingen, onderhoudsstatus en trillingen en treintype en trillingen.

De beantwoording van deze vragen wordt in het volgende hoofdstuk uitgevoerd, op basis van de resultaten van het meetonderzoek.

3.3 Beoordeelde trillingsgrootheden

In dit onderzoek wordt gekeken naar een aantal verschillende parameters om de trillingen te beschrijven. Hierbij wordt aangesloten op zowel de Bts (in Nederland in gebruik om trillingshinder langs het spoor te beoordelen) als de SBR B-richtlijn (in Nederland doorgaans gebruikt om trillingshinder voor personen in gebouwen te beschrijven) gebruikt. We hanteren daarbij de volgende grootheden, die in genoemde richtlijnen worden gebruikt om trillingen te beoordelen:

- $V_{max,gemeten}$, de maximaal gemeten trillingssterkte gedurende de meetperiode. Deze waarde wordt bepaald door de trein met de hoogste trillingen.

- $V_{max,Bts}$, de maximale trillingssterkte gedurende de meetperiode, verwerkt conform de Bts. Hierbij wordt een statistische correctie gedaan waarmee een stabielere trillingssterkte wordt verkregen, zodat verschillende situaties beter met elkaar vergelijkbaar zijn en de beoordeling minder sterk van extreme uitschieters afhankelijk is. De bijbehorende R -waarde is een indicatie van de betrouwbaarheid van de meting, een R -waarde kleiner dan 10% duidt op een goed reproduceerbare meting (onzekerheid in $V_{max,Bts}$ is dan kleiner dan 10%).
- V_{per} , een indicatie van het tijdsgemiddelde van de trillingen. Deze waarde wordt zowel groter naarmate er meer treinen passeren, als wanneer de treinen hogere trillingen hebben.

Naast deze grootheden wordt in dit onderzoek frequentieafhankelijk naar het trillingsspectrum van de treinen gekeken, zodat bepaalde fenomenen beter geduid kunnen worden.

Tenslotte, op basis van diverse hinderbelevingsonderzoeken wordt een verandering in trillingssterkte van minder dan 30% als niet voelbaar gedefinieerd.

4 Resultaten

4.1 Inleiding

Dit hoofdstuk bevat de resultaten van het onderzoek. Hierbij worden de in het voorgaande hoofdstuk benoemde vragen beantwoord:

1. Zijn de trillingen tussen 2016 en 2018 toegenomen?
2. Is de spoorligging tussen 2016 en 2018 veranderd?
3. Zijn de eigenschappen van de treinen (rijksnelheid, onderhoudsstatus, type trein) veranderd tussen 2016 en 2018?

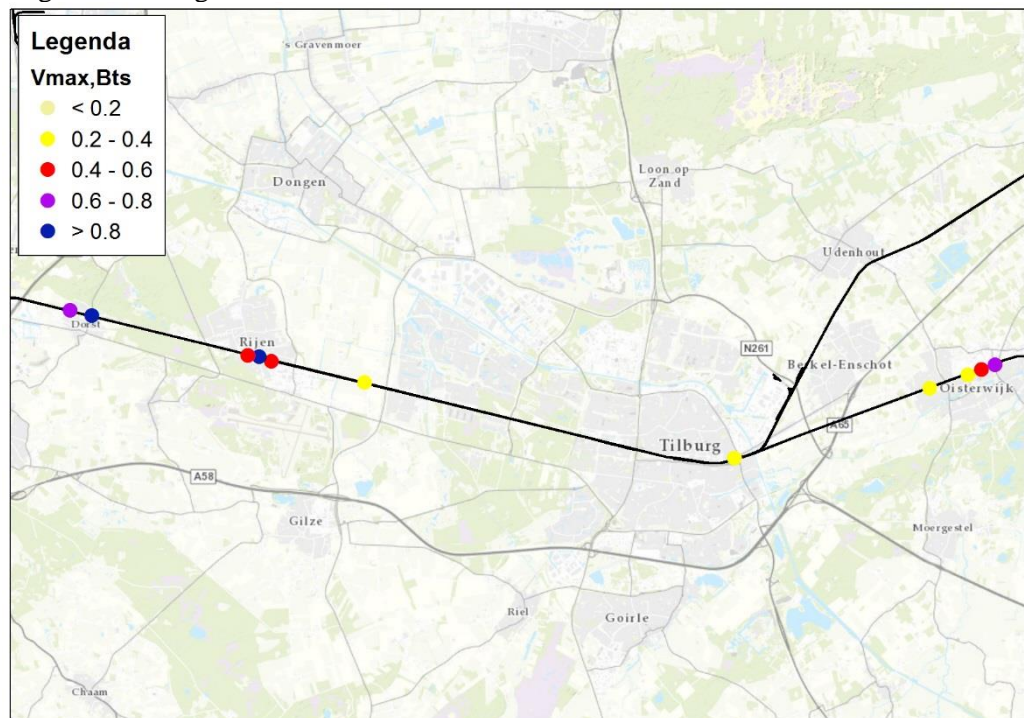
In de volgende paragrafen worden, in bovenstaande volgorde, deze vragen behandeld.

4.2 Trillingen

In deze paragraaf wordt nader ingegaan op de gemeten trillingen in 2018, en wordt een vergelijking gemaakt tussen de huidige meetresultaten en die uit 2016.

4.2.1 Resultaten metingen 2018

De in 2018 gemeten trillingen (uitgedrukt als $V_{max,Bts}$) zijn weergegeven in Tabel 4-1, en grafisch in Figuur 4-1.



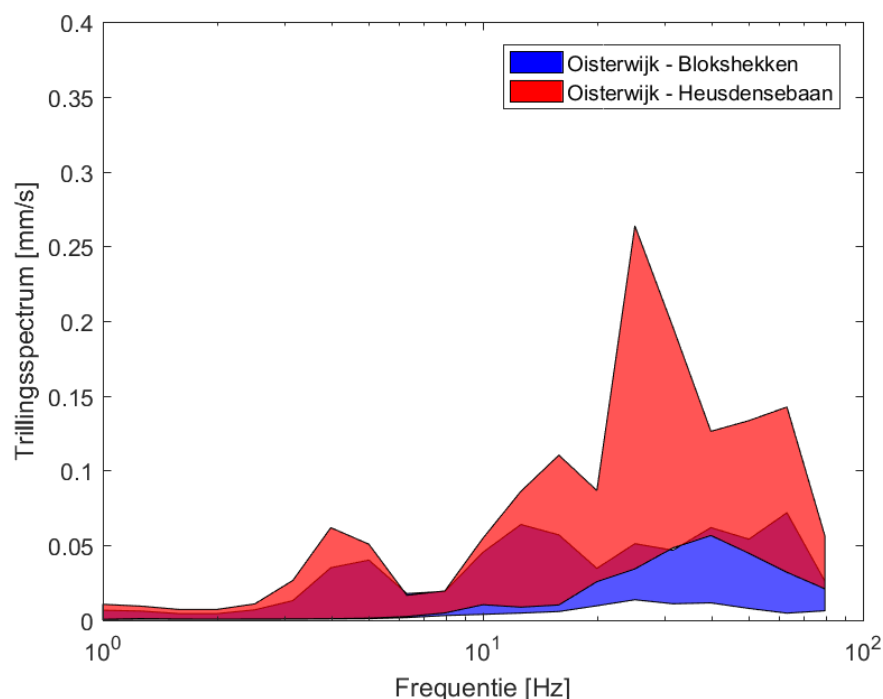
Figuur 4-1 Trillingssterkte (V_{max}) op de Brabantroute, traject Dorst-Oisterwijk

Tabel 4-1 Trillingssterkte per locatie en aanwezigheid van overweg

Locatie		$V_{max,gemeten}$	$V_{max,Bts}$	R	Overweg
Dorst	Parallelweg	0.78	0.68	4	
Dorst	Wethouder van Dijklaan	1.14	0.99	2	✓
Rijen	Generaal van Geenstraat	0.76	0.59	4	
Rijen	Stationsplein	0.82	0.96	2	✓
Rijen	Parallelweg	0.57	0.55	2	
Hulten	Lage Madepad	0.34	0.29	2	

Locatie		$V_{\max, \text{gemeten}}$	$V_{\max, \text{Bts}}$	R	Overweg
Tilburg	Insulindeplein	0.48	0.29	2	
Oisterwijk	Pastoor van Heesbeenstraat	0.48	0.27	2	
Oisterwijk	Blokshekken	0.31	0.23	2	
Oisterwijk	Stationsplein	0.62	0.47	3	
Oisterwijk	Heusdensebaan	0.75	0.80	2	✓

Opvallend is hierbij dat met name bij de overwegen hogere trillingen optreden dan bij doorgaand spoor. Ter indicatie is de bandbreedte van het trillingspectrum (90% betrouwbaarheidsinterval) van alle treinen voor een locatie met en zonder spoorwegovergang weergegeven in Figuur 4-2. Het betreft twee locaties met een vergelijkbare (variatie in) rijsnelheid van de treinen. Met name bij frequenties vanaf 10 Hz zijn de trillingen bij een spoorwegovergang significant hoger dan bij doorgaand spoor. Zie de spectra voor overige locaties in Bijlage II.



Figuur 4-2 Karakteristieke 90% bandbreedte van de trillingen van alle treinen bij een locatie met (Heusdensebaan) en zonder (Blokshekken) spoorwegovergang

4.2.2. Vergelijking 2016 en 2018

Op de locatie Lage Madepad in Tilburg (Hulten) is zowel in 2016 als in 2018 een meting uitgevoerd. Voor informatie over de meetopstelling in 2016 verwijzen wij naar het rapport van DGMR¹. Relevant is in dit verband vooral dat DGMR gebruik maakt van andere meetapparatuur (in de bodem ingegraven koffer met accelerometers, Movares gebruikt half ingegraven systeem met geofoons), dat de meting in een andere periode is uitgevoerd (DGMR heeft in de herfst en winter gemeten (oktober tot december 2016, Movares heeft in de zomer gemeten (augustus 2018) en dat de meting

¹ Fennema, ing. R.G., *Landelijk onderzoek gedifferentieerd rijden (TN 105394), Onderzoek effect rijsnelheid goederentreinen op trillingsopwekking in de bodem*, DGMR, 15 december 2017, T.2016.0727.R003, versie 002 (definitief)

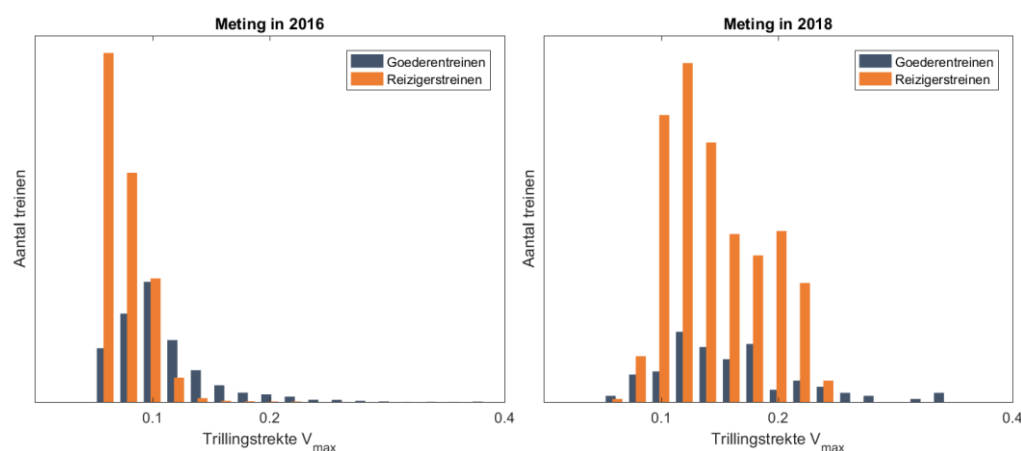
van DGMR een langere looptijd heeft (ca. 3 maanden, Movares heeft enkele weken gemeten).

De resultaten van beide metingen zijn op twee manieren vergeleken, hierbij is zowel gekeken naar de trillingssterkte op maaiveld (V_{max}) als naar het trillingsspectrum op maaiveld. Vooral de laatste zegt meer over of de trillingen daadwerkelijk kunnen zijn toegenomen in de woningen. De maximaal gemeten trillingssterkte en de trillingssterkte bepaald conform de Bts zijn weergegeven in Tabel 4-2. Hierbij valt op dat de maximaal gemeten trillingssterkte in 2018 lager is, dit komt vooral door de kortere meetperiode waardoor er minder uitschieters zijn gemeten dan in 2016. De (stabielere) $V_{max,Bts}$ wijkt slechts beperkt af (iets meer dan 10 procent).

Tabel 4-2 Trillingssterkte in 2016 en 2018

Jaar	$V_{max,gemeten}$	$V_{max,Bts}$	R
2016	0.91	0.34	3
2018	0.34	0.29	2

Een verdeling van de trillingssterkte op maaiveld is weergegeven in Figuur 4-3. Hier is eveneens te zien dat de maximaal gemeten trillingen niet significant zijn gewijzigd (goederentreinen zijn nog steeds maatgevend, de verdeling van de trillingssterkte voor de goederentreinen is niet significant gewijzigd), maar wel dat met name de trillingen van reizigerstreinen fors zijn toegenomen.

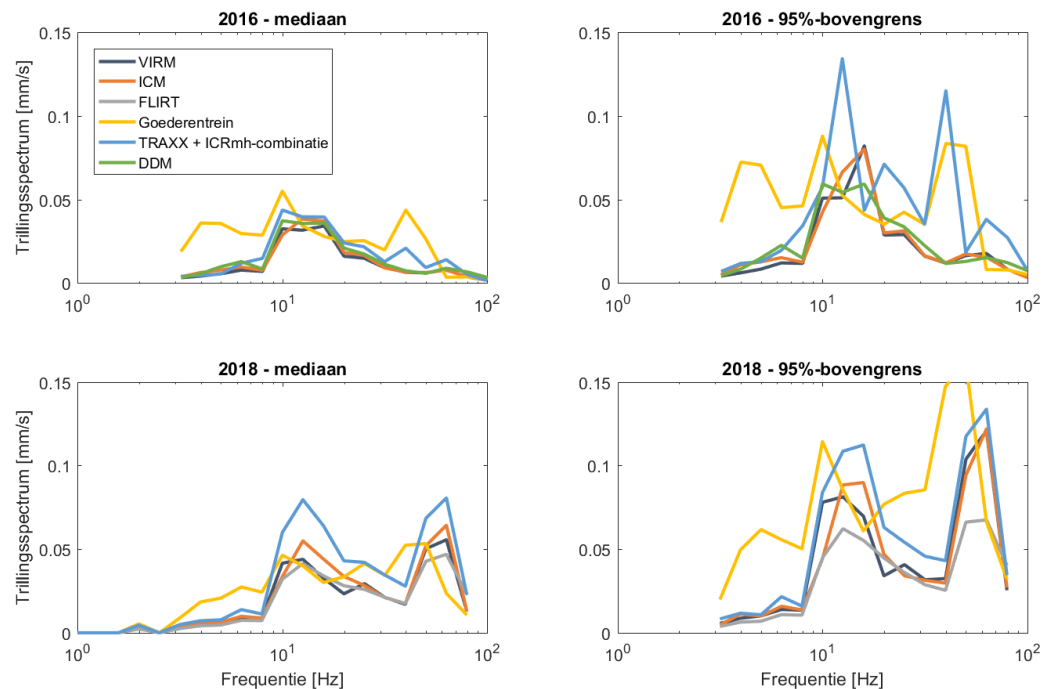


Figuur 4-3 Histogrammen van de trillingssterkte V_{max} op maaiveld, links in 2016, rechts in 2018

Vervolgens is ook een vergelijking gemaakt op spectraal (frequentieafhankelijk) niveau. De gemiddelde en maximale spectra van de meest voorkomende treintypes in 2016 en 2018 zijn weergegeven in Figuur 4-4. In deze figuur valt het volgende op:

1. In 2016 geven goederentreinen voor bijna alle frequenties de hoogste gemiddelde trillingen, uitgezonderd het frequentiegebied rond 20 Hz, daar hebben reizigerstreinen de hoogste trillingen. In 2018 zijn de gemiddelde trillingen van de TRAXX + ICRmh-combinatie het hoogst voor de meeste frequenties boven de 8 Hz. Overigens reed de TRAXX + ICRmh-combinatie in 2016 slechts incidenteel (ca. 20 passages, allen testritten), zodat de trillingsspectra voor dit treintype in de meting uit 2016 iets minder betrouwbaar zijn dan die voor de overige treintypes.

- In 2018 zijn de trillingen bij hogere frequenties (met name boven de 40 Hz) aanzienlijk toegenomen (zie Bijlage VI). Deze hoogfrequente trillingen zijn vooral op korte afstand van het spoor voelbaar, want deze dempen snel uit met de afstand. In woningen zijn deze trillingen doorgaans niet of veel minder goed voelbaar, omdat deze sterk worden uitgedempt door de fundering.



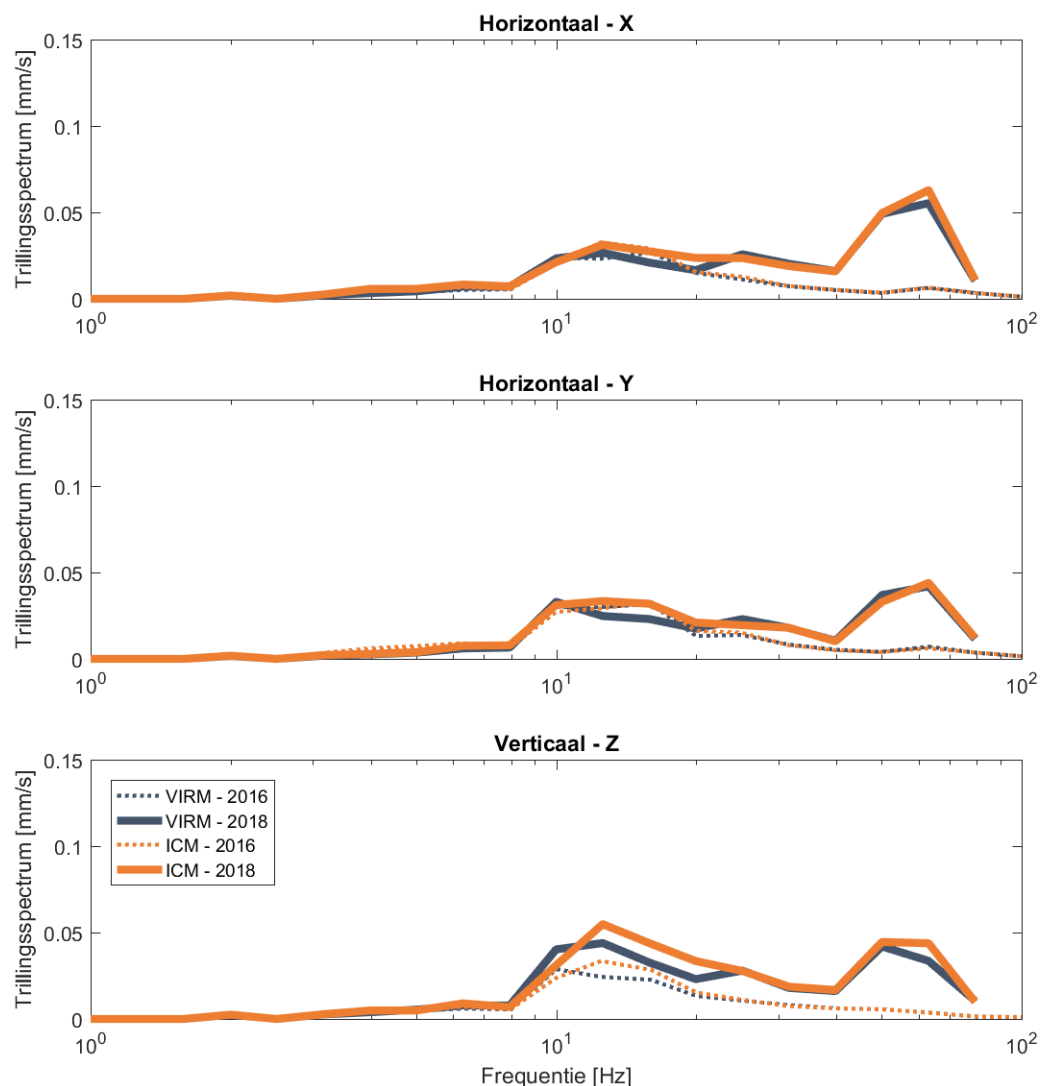
Figuur 4-4 Gemiddelde en 95% trillingsspectra van veel voorkomende treintypes in 2016 (boven) en 2018 (onder)

Vervolgens is ingezoomd op de verschillende meetrichtingen (horizontaal en verticaal). Voor twee treintypes die in beide metingen zijn gemeten, zijn de gemiddelde trillingsspectra weergegeven in Figuur 4-5, zie ook Bijlage VI voor meer figuren en treintypes. In Figuur 4-5 valt het volgende op:

- In beide horizontale richtingen zijn de metingen tot 20 Hz identiek, vanaf ca. 20 Hz beginnen de metingen steeds meer uiteen te lopen. De meest voor de hand liggende verklaring hiervoor is een verschil in demping van de bodem, omdat dit verschil groter wordt bij hogere frequenties. In 2018 is gemeten in een extreem droge periode, waarin de bodem (met zand- en kleilagen) hard en uitgedroogd was, en dus een lage demping had, zie ook Bijlage VI. Hierdoor worden met name de hoogfrequente trillingen goed doorgegeven. In 2016 is in het najaar, in een natte periode gemeten, waardoor de bodemdemping aanzienlijk hoger was.
- In de verticale richting is al vanaf 10 Hz een verschil te zien (trillingen zijn in 2018 hoger dan in 2016, verschil is meer dan 30% en dus voelbaar). De oorzaak van dit verschil is niet duidelijk, meestal speelt de bodemdemping bij frequenties rond de 10 Hz nog niet zo'n grote rol. Er zijn geen veranderingen in onderhoudsstatus, rijnsnelheid en spoorligging geweest tussen 2016 en 2018, dus die kunnen dit verschil niet verklaren. Naast bodemdemping kan het verschil in meetopstelling in theorie een rol spelen, maar de echte oorzaak van dit verschil is niet met zekerheid vast te stellen.

Samengevat kan het volgende worden geconcludeerd:

1. De maximale trillingssterkte lijkt niet significant te zijn gewijzigd tussen 2016 en 2018 op deze locatie ($V_{max,Bts}$ is vergelijkbaar).
2. Bij de metingen in 2018 zijn aanzienlijk hogere trillingen gemeten bij frequenties boven de 20 Hz, en in verticale richting al vanaf ca. 10 Hz. Dit verschil wordt hoogstwaarschijnlijk vooral veroorzaakt door verschillen in bodemdemping als gevolg van de extreme droogte in 2018, mogelijk speelt ook de temperatuur nog een rol in het verschil. Dit is ook een verklaring voor de toename van de trillingssterkte van met name de reizigerstreinen.
3. De TRAXX + ICRmh-combinatie geeft hogere trillingen dan andere treinen in het frequentiegebied waar woningen gevoelig voor zijn (tussen de 8 en 20 Hz). Dit treintype reed in 2016 slechts incidenteel, maar in 2018 veelvuldig.



Figuur 4-5 Gemiddeld trillingsspectrum in 2016 en 2018 voor VIRM en ICM

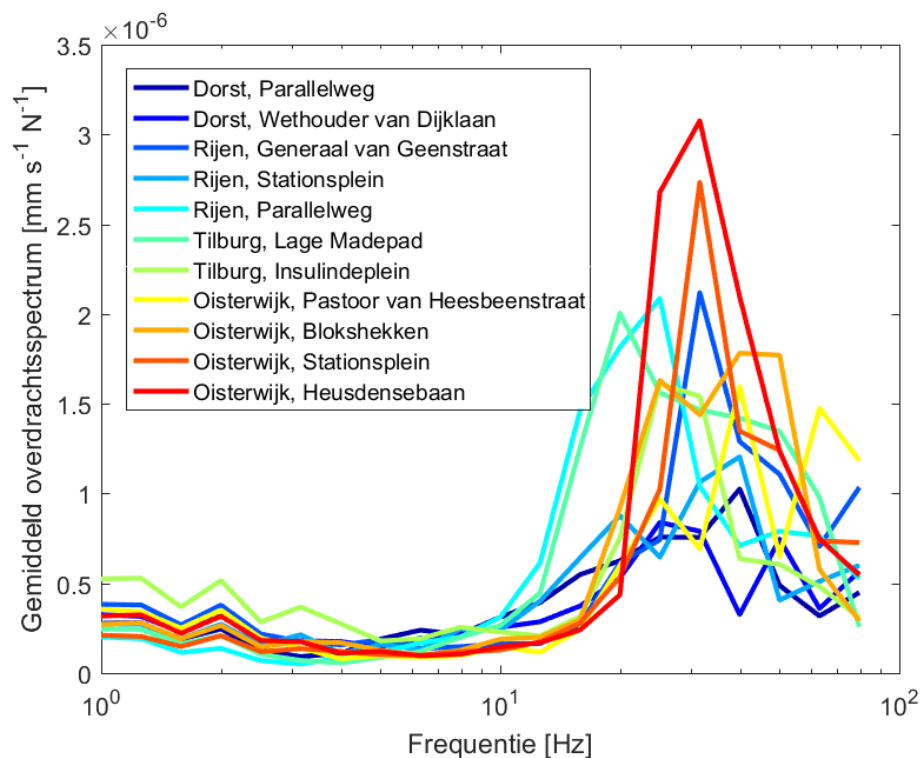
De analyse in deze vergelijking tussen 2016 en 2018 is niet een-op-een vertaalbaar naar andere locaties. Wel volgt uit de metingen dat de TRAXX + ICRmh-combinatie bij bepaalde frequenties (met name rond 15 Hz) op alle locaties hogere trillingen geeft

dan veel andere treinen. Verder is bekend dat dit treintype in 2016 niet of slechts incidenteel (testritten) reed. Op basis daarvan kan worden geconcludeerd dat in woningen die gevoelig zijn voor trillingen rond 15 Hz, de trillingen naar verwachting zijn toegenomen tussen 2016 en 2018.

Als vervolgens per locatie naar de trillingsspectra wordt gekeken, dan is op de meeste locaties (maar met name bij spoorwegovergangen) zichtbaar dat bij sommige frequenties (15 Hz, soms ook bij hogere frequenties maar deze worden in woningen sterk uitgedempt door de constructie en zijn daarom minder relevant) de trillingen van de TRAXX + ICRmh-combinatie meer dan 30% hoger zijn dan van andere treintypes. In woningen die gevoelig zijn voor die frequenties, kunnen de trillingen dus voelbaar (met meer dan 30%) zijn toegenomen tussen 2016 en 2018.

4.2.3. Invloed van de bodem

Met behulp van valproeven is de overdracht van de trillingsbron (valgewicht) naar een sensor op 25 meter afstand vastgesteld. Deze overdracht, per locatie, is weergegeven in Figuur 4-6. Een hogere waarde in dit frequentieafhankelijke overdrachtsspectrum duidt op het feit dat een kracht bij die frequentie tot hogere trillingen leidt.



Figuur 4-6 Gemiddeld overdrachtsspectrum per locatie

In Figuur 4-6 valt het volgende op:

1. Er zijn twee locaties waarbij de valproeven niet op verhard oppervlak konden worden uitgevoerd (Rijen, Parallelweg en Tilburg, Lage Madepad). Duidelijk zichtbaar is hier dat de piek in het overdrachtsspectrum bij lagere frequenties ligt. Door het inveren van de toplaag van de bodem ontstaan lagere frequenties.
2. De meer oostelijk gelegen locaties (Oisterwijk) kennen een hoger overdrachtsspectrum bij frequenties boven de 20 Hz. Dat betekent dat dezelfde kracht op deze locatie tot hogere trillingen leidt dan op locaties in Rijen en Dorst (met een veel lager overdrachtsspectrum). Globaal gezien betekent dit dat de

bodem in Oisterwijk eenzelfde trilling minder goed uitdempt dan de bodem in Dorst en in Rijen, bijvoorbeeld doordat de zandlagen in de bodem steviger opeen zijn gepakt, zie ook Bijlage I voor gegevens van de bodem.

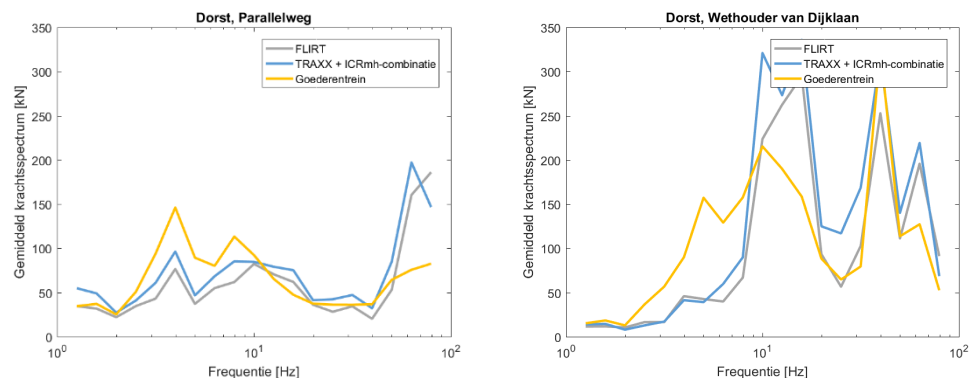
Voor drie treintypes die langs het gehele traject rijden is vervolgens het gemiddelde krachtsspectrum bepaald. Voor een locatie met doorgaand spoor en een locatie met een spoorwegovergang zijn deze resultaten weergegeven in Figuur 4-7, zie Bijlage III voor de resultaten op alle locaties. Hier is het volgende zichtbaar:

1. Bij lage frequenties (onder de 10 Hz) oefenen goederentreinen een hogere kracht uit op de bodem dan reizigerstreinen (door de hogere massa), bij hogere frequenties zijn dat reizigerstreinen.
2. Bij spoorwegovergangen is de kracht die wordt uitgeoefend op de ondergrond fors hoger dan bij doorgaand spoor, vooral voor reizigerstreinen.

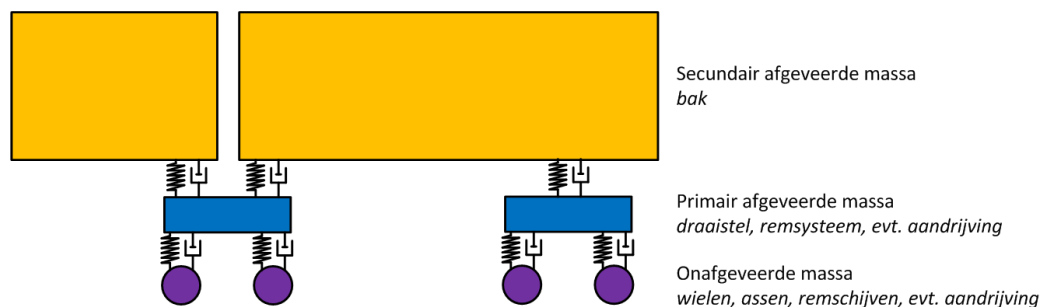
Het mechanisme dat de bronkracht veroorzaakt, verschil per frequentie:

1. Frequenties tussen de 3 en 5 Hz: belasting van de wielen op de bodem, vooral zichtbaar bij treinen met een hoge aslast (vooral goederentreinen en locomotieven).
2. Frequenties tussen de 5 en 20 Hz: vlakke plaatsen, onbalans en onrondheid van de wielen, is onder meer afhankelijk van het type wiel, het type afvering van de trein en het type rem (vooral zichtbaar bij reizigerstreinen).
3. Frequenties boven de 20 Hz: hogere orde slijtagepatronen op het wiel, dit mechanisme is onder meer afhankelijk van het type wiel en het type rem (vooral zichtbaar bij reizigerstreinen).
4. Frequenties tussen de 30 en 70 Hz: stijfheidsverschillen tussen ballast en dwarsligger, waardoor het passeren van de assen kan worden gezien. Dit mechanisme is vooral zichtbaar bij treinen met een hoge aslast (vooral goederentreinen en locomotieven).

Voor laagfrequente trillingen (tot 8 a 10 Hz) speelt ook de primair afgeveerde massa van de draaistellen een belangrijke rol, en worden bovenstaande mechanismes versterkt bij een grote primair afgeveerde massa, zie ook Figuur 4-8. Over het hele frequentiebereik geldt dat de onafgeveerde massa (massa van het voertuig onder de veren, zoals wielen, assen, remschijven, eventuele aandrijving e.d.) een belangrijke rol speelt. Hoe groter de onafgeveerde massa, hoe meer energie er ontstaat en hoe meer bovenstaande mechanismes worden versterkt.



Figuur 4-7 Krachtsspectrum bij Dorst, Parallelweg (links) en Wethouder van Dijklaan (rechts)



Figuur 4-8 Onafgeveerde massa, primair en secundair afgeveerde massa

In Tabel 4-3 is per locatie en per mogelijk bronmechanisme aangegeven hoe sterk (globale kwalificatie) dit mechanisme op die locatie aanwezig is (over alle passerende treintypes). Hierbij valt het volgende op:

1. Bij spoorwegovergangen zijn alle effecten sterker aanwezig, maar met name de trillingen tussen 6 en 50 Hz zijn hier hoger. Dit is een combinatie van afvering (onafgeveerde massa en primair afgeveerde massa van de voertuigen), wieldefecten en wielslijtage. Deze effecten zijn prominenter aanwezig bij spoorwegovergangen dan op locaties met doorgaand spoor.
2. Het effect van aslast (vaak een indicatie van een wat slappere bodem) is ook sterker aanwezig bij spoorwegovergangen dan bij doorgaand spoor. Dit is bijvoorbeeld te zien in Rijen en Oisterwijk.

Tabel 4-3 Globale classificatie bronmechanismes per locatie

		Onafgeveerde massa			
		Primair afgeveerde massa			
		Aslast	Wieldefecten	Wielslijtage	Baanstijfheid
Locatie		3 tot 5 Hz	6 tot 20 Hz	20 tot 50 Hz	30 tot 70 Hz
Dorst	Parallelweg	matig	matig	zwak	matig
Dorst	Wethouder van Dijklaan	matig	zeer sterk	matig	zeer sterk
Rijen	Generaal van Geenstraat	zwak	matig	zwak	matig
Rijen	Stationsplein	sterk	zeer sterk	matig	matig
Rijen	Parallelweg	zwak	zwak	zwak	zwak
Hulten	Lage Madepad	matig	zwak	zwak	zwak
Tilburg	Insulindeplein	zwak	zwak	zwak	zwak
Oisterwijk	Pastoor van Heesbeenstraat	zwak	sterk	zwak	zwak
Oisterwijk	Blokshekken	matig	matig	zwak	zwak
Oisterwijk	Stationsplein	matig	sterk	zwak	matig
Oisterwijk	Heusdensebaan	sterk	zeer sterk	matig	matig

4.3 Spoorligging en spoorconstructie

Vervolgens is onderzocht of veranderingen in spoorconstructie of spoorligging de toename van de klachten kunnen verklaren.

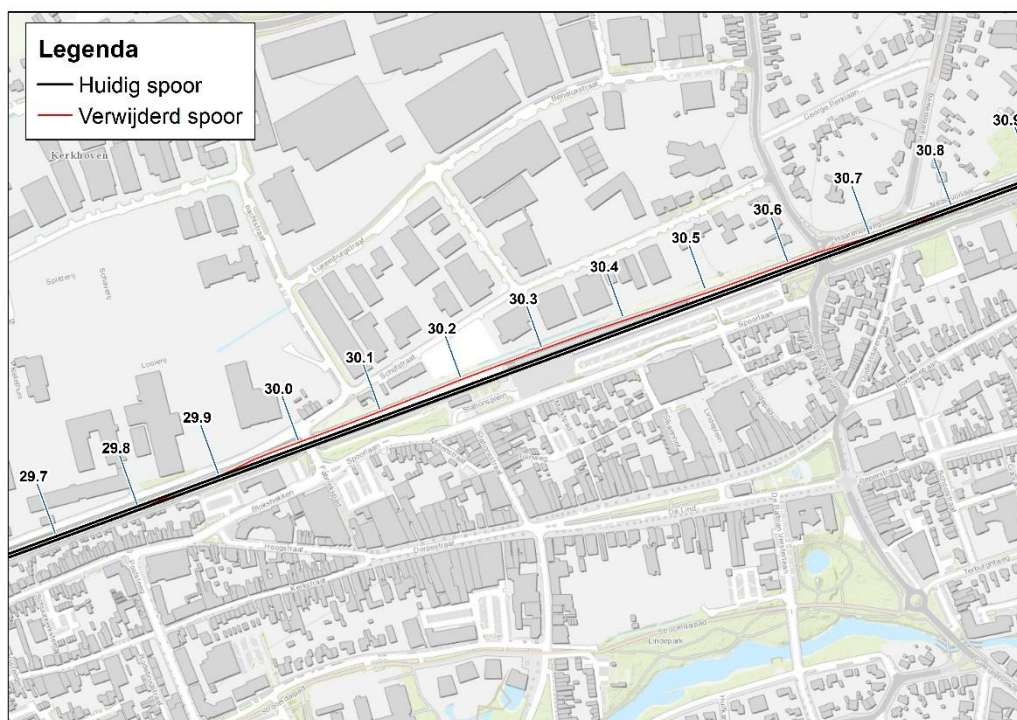
4.3.1. Wijzigingen in spoorconstructie

Ten aanzien van de spoorconstructie geldt het volgende: deze is niet gewijzigd op het grootste deel van het traject. Alleen bij Oisterwijk zijn fysieke wijzigingen doorgevoerd. Hier is een onderdoorgang gerealiseerd bij het station, is het derde spoor verwijderd, zie Figuur 4-9, en zijn een aantal wissels verwijderd.

Het effect van deze wijziging kan niet met metingen worden vastgesteld, omdat er geen meetgegevens van 2016 of daarvoor zijn. Wel kan ten aanzien van deze wijzigingen het volgende worden gesteld:

- Wissels zorgen voor een toename van de trillingen tot op een afstand van 50 tot 100 meter vanaf een wissel. Het verwijderen van wissels zorgt daarom doorgaans voor een afname van de trillingen. De verwachting is dan ook dat met name rond de wissels de trillingen zullen zijn afgenomen, zeker op korte afstand van het spoor.
- Het derde spoor was slechts incidenteel in gebruik, en kon alleen met beperkte snelheid worden bereden. De verwachting is dat de trillingen van treinen op dit spoor niet voor de hoogste trillingen zorgden in het verleden. Het buiten gebruik nemen van dit spoor zal daarom naar verwachting geen significant effect hebben gehad op de trillingen.
- Het realiseren van de onderdoorgang kan rond de onderdoorgang leiden tot hogere trillingen, met name als de aansluiting tussen het kunstwerk en de aardebaan in de loop van de tijd verslechtert, zoals ook het geval is bij spoorwegovergangen.

Op basis van bovenstaande analyse is de verwachting dat de trillingen alleen lokaal rond de nieuwe onderdoorgang bij het station kunnen zijn toegenomen tussen 2016 en 2018.

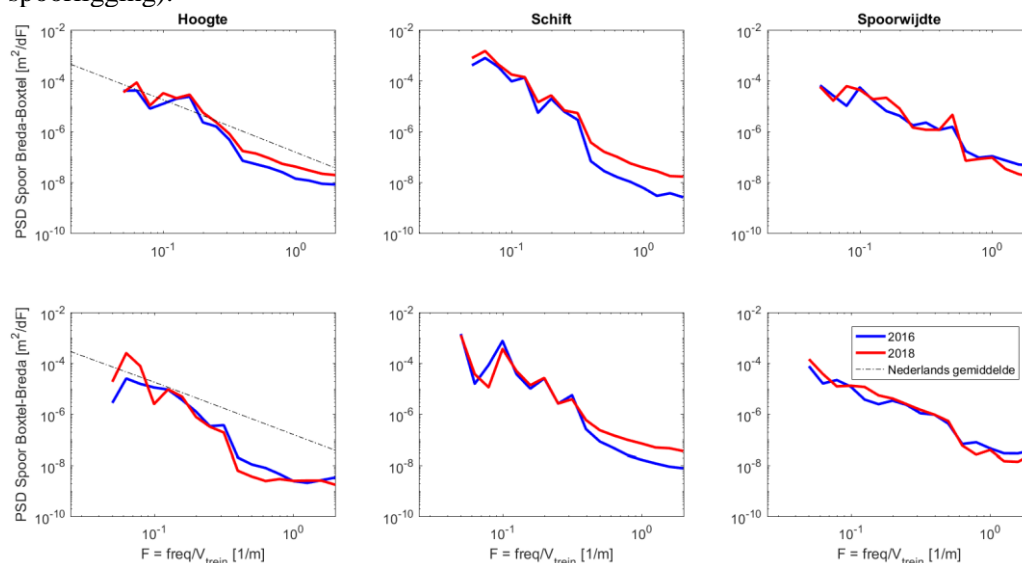


Figuur 4-9 Wijzigingen in sporenlay-out in Oisterwijk tussen 2016 en 2018

4.3.2. Wijzigingen in onderhoudsstatus spoor

Om vast te stellen of de onderhoudsstatus van het spoor is gewijzigd, is de spoorligging tussen 2016 en 2018 met elkaar vergeleken. Een voorbeeld van de spoorligging (uitgedrukt als *power spectral density*, PSD) voor de locatie Wethouder van Dijklaan in Dorst is weergegeven in Figuur 4-10, zie Bijlage IV voor de overige locaties. Hier is zichtbaar dat de spoorligging tussen 2016 en 2018 niet significant is

veranderd (een hogere waarde betekent een grotere afwijking van de beoogde spoorligging).



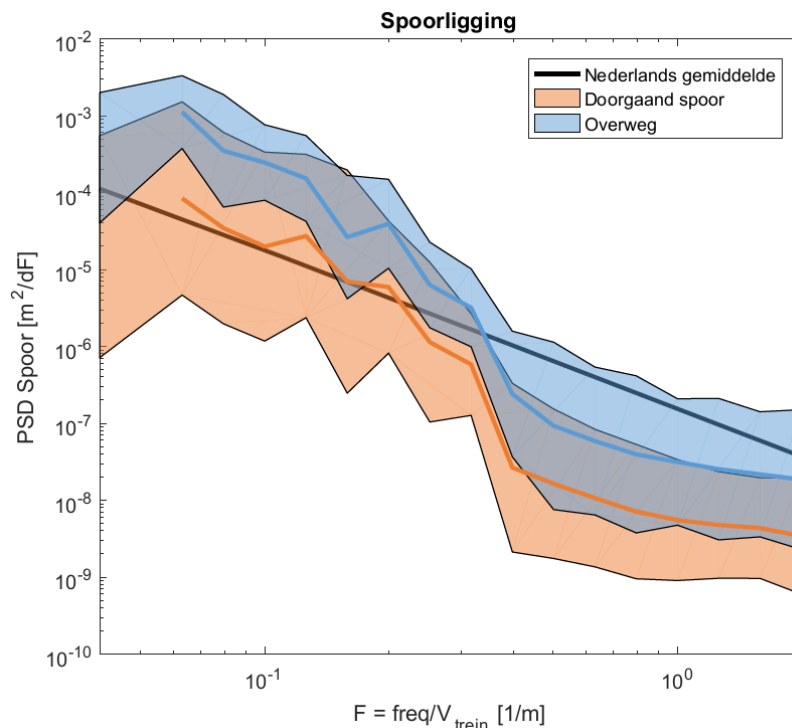
Figuur 4-10 Hoogte (links), schift (midden) en spoorwijdte (rechts) bij Dorst, Wethouder van Dijklaan

Een vergelijkbaar beeld is zichtbaar bij de overige locaties: er is geen sprake van een significante verslechtering in spoorligging. Voor Oisterwijk kan dit niet worden vastgesteld, omdat hier geen gegevens van beide momenten of van beide sporen zijn. Normaal gesproken zorgt een vernieuwing van het spoor echter voor een significante verbetering van de spoorligging.

Verder is gekeken naar het verschil in spoorligging tussen doorgaand spoor en overwegen. Het verschil in hoogte-afwijking is weergegeven in Figuur 4-11. Duidelijk zichtbaar is dat de hoogte-afwijking groter is bij overwegen, maar het verschil is niet significant.

Op basis van eerdere onderzoeken is er met name voor laagfrequente trillingen (onder de 10 Hz) een relatie tussen de trillingen en de spoorligging zoals uitgedrukt in de in dit onderzoek geanalyseerde parameters. Zoals zichtbaar is in Figuur 4-2, zijn deze laagfrequente trillingen echter laag in het onderzoeksgebied.

Op basis van het gegeven dat de spoorligging niet significant is gewijzigd tussen 2016 en 2018, kan een verandering in spoorligging (in ieder geval voor de locaties Dorst, Rijen en Tilburg) als oorzaak worden uitgesloten. De spoorligging in Oisterwijk is door de vernieuwing van het spoor daar niet te vergelijken tussen 2016 en 2018, omdat gegevens ontbreken.



Figuur 4-11 PSD van de spoorligging (hoogte) bij doorgaand spoor en bij overwegen

4.4 Rijsnelheid en treinen

De laatste vraag die dient te worden beantwoord, is of de eigenschappen van de treinen (rijsnelheid, onderhoudsstatus, type trein) zijn veranderd tussen 2016 en 2018. Hiervoor wordt gekeken naar een aantal parameters: rijsnelheid, aslast, onderhoudsstatus en treintype.

4.4.1. Wijzigingen in rijsnelheid

Voor de rijsnelheid geldt het volgende: de toegestane baanvaksnelheid is niet gewijzigd, er hebben geen wijzigingen in seinplaatsing plaatsgevonden (uitgezonderd beperkte² wijzigingen bij Oisterwijk door de aanpassingen van het spoor). Ook QuoVadis-gegevens laten geen wijzigingen in de snelheid zien, zie Tabel 4-7.

Tabel 4-4 Gemiddelde rijsnelheid op QuoVadis punt bij Hulten tussen 2016 en 2018, per treintype

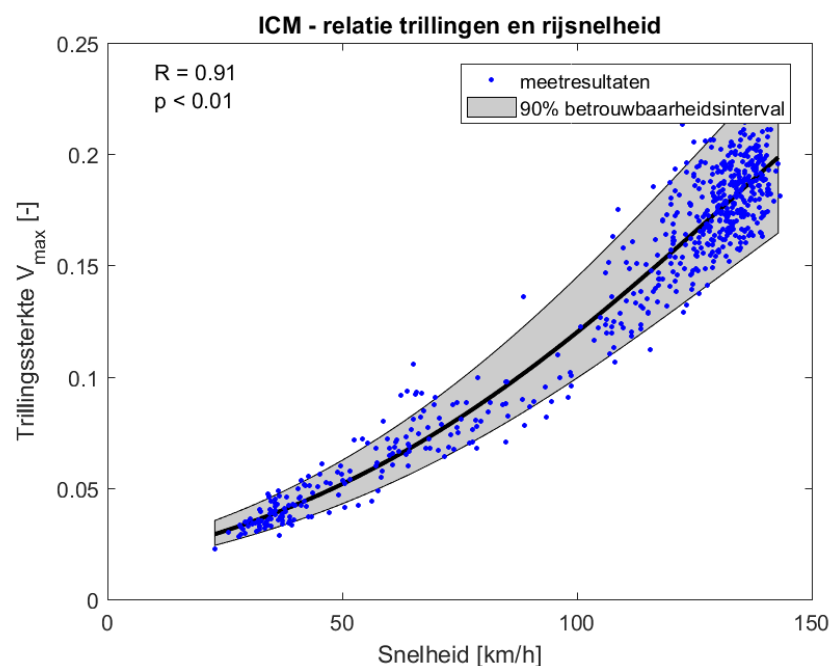
Treintype	Snelheid (km/h)	
	2016	2018
FLIRT		131
ICM	127	127
ICRmh-combinatie		132
VIRM	125	125
Goederen	90	90

Verder, als gekeken wordt naar de relatie tussen rijsnelheid en trillingssterkte, dan is zichtbaar bij de locaties met voldoende variatie in rijsnelheid, dat de trillingen significant toenemen met de rijsnelheid. Alleen voor goederentreinen is, door de

² Seinen zijn maximaal enkele meters verplaatst, dit heeft geen significante invloed op de rijsnelheid.

relatief beperkte variatie, geen statistisch betrouwbare uitspraak te doen. De relatie tussen rijsnelheid en trillingen voor reizigerstreinen is vooral te zien bij de meetlocaties in Rijen rond het station, hier remmen de doorgaande treinen relatief vaak af waardoor er vrij veel variatie is in rijsnelheid. De relatie tussen rijsnelheid en trillingen, inclusief betrouwbaarheidsinterval, is weergegeven in Figuur 4-12 voor treinen van het type ICM op het noordelijke spoor (Boxtel – Breda). Gezien de R -waarde en de significantie (overschrijdskans p op basis van de F-toets) is hier sprake van een statistisch relevante correlatie tussen rijsnelheid en trillingssterkte.

Hoewel er (in ieder geval voor reizigerstreinen) een relatie is tussen rijsnelheid en trillingssterkte, kan op basis van het gegeven dat de rijsnelheid niet significant is gewijzigd tussen 2016 en 2018, een verandering in rijsnelheid als oorzaak van de toegenomen klachten worden uitgesloten.



Figuur 4-12 Relatie tussen rijsnelheid en trillingssterkte voor ICM's in Rijen, Parallelweg, op het noordelijke spoor

4.4.2. Type trein

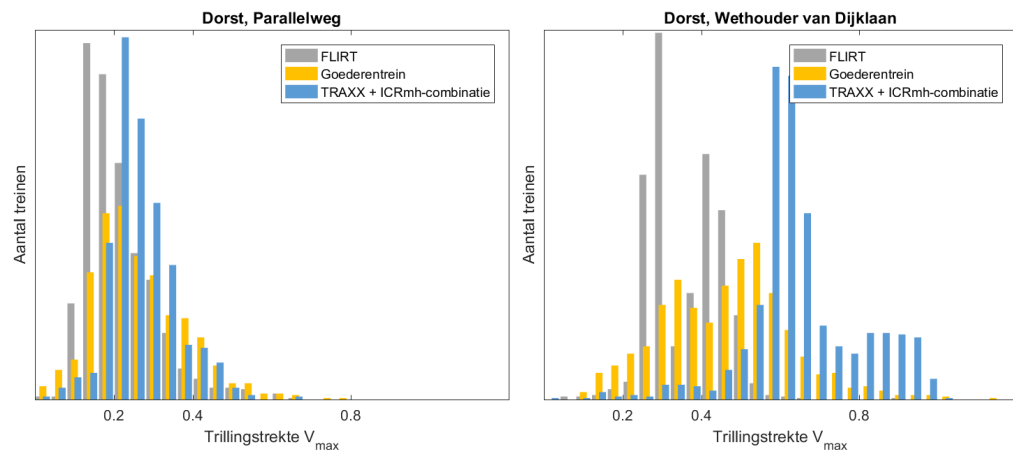
Tussen 2016 en 2018 zijn er enkele veranderingen geweest in treintype. Zo is de FLIRT geïntroduceerd (nieuw type sprinter), evenals de intercity Den Haag – Eindhoven. Deze laatste is van het type TRAXX + ICRmh-combinatie wagons. In het verleden reed hier de intercity Den Haag – Venlo, waarbij de ICRmh-serie wagons werden getrokken door een loc1700. Om vast te stellen of de introductie van andere treintypes tot hogere trillingen leidt, is gekeken naar de verschillen in trillingen tussen de treintypes. Hierbij is eerst gekeken op V_{max} -niveau, en vervolgens ook op spectraal niveau.

Op V_{max} -niveau valt het volgende op, zie ook Figuur 4-13 en de figuren in Bijlage II:

1. Bij doorgaand spoor, en bij gelijke snelheid, zorgen goederentreinen voor de hoogste trillingen.
2. Bij spoorwegovergangen is vrij consequent te zien dat de trillingen van de intercity Den Haag – Eindhoven fors hoger zijn dan bij doorgaand spoor, en op sommige

locaties gelijk aan die van de goederentreinen met de meeste trillingen. Bij spoorwegovergangen is ook een duidelijk verschil zichtbaar tussen de twee sporen (twee pieken in het histogram per treintype, waarbij het meest nabijgelegen spoor voor de hoogste trillingen zorgt).

Bovenstaand verschil wordt duidelijk zichtbaar als de bijdrage aan de trillingsintensiteit V_{per} , een maat voor de gemiddelde trillingen, per categorie (sprinters, intercity's en goederentreinen) inzichtelijk wordt gemaakt, zie Tabel 4-5. De intercity's, die overigens ook het meest frequent passeren, dragen het meeste bij aan de V_{per} . Bij spoorwegovergangen is de bijdrage van de intercity's aan het totaal meestal groter dan bij doorgaand spoor.



Figuur 4-13 Histogram van de trillingssterkte per treintype, locatie Dorst, Parallelweg (links) en Dorst, Wethouder van Dijklaan (rechts)

Tabel 4-5 Bijdrage aan V_{per} per categorie (IC = intercity, SPR = sprinter, GO = goederentrein)

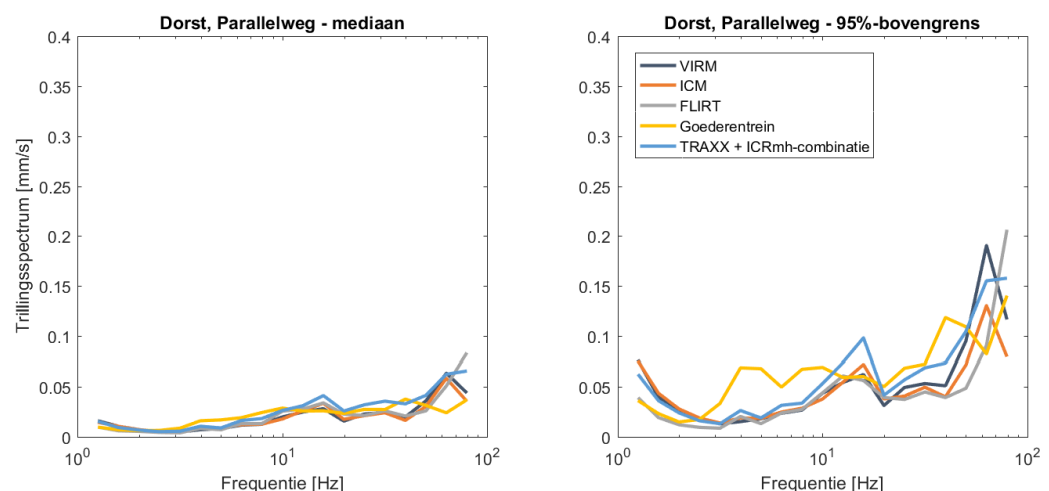
Locatie		Bijdrage IC aan V_{per}	Bijdrage SPR aan V_{per}	Bijdrage GO aan V_{per}
Dorst	Parallelweg	49%	22%	28%
Dorst	Wethouder van Dijklaan	65%	15%	20%
Rijen	Generaal van Geenstraat	57%	7%	35%
Rijen	Stationsplein	79%	4%	17%
Rijen	Parallelweg	68%	9%	23%
Hulten	Lage Madepad	59%	15%	26%
Tilburg	Insulindeplein	64%	15%	21%
Oisterwijk	Pastoor van Heesbeenstraat	54%	20%	26%
Oisterwijk	Blokshekken	48%	18%	34%
Oisterwijk	Stationsplein	61%	8%	30%
Oisterwijk	Heusdensebaan	70%	9%	21%

Bekend is dat de trillingsgevoeligheid van woningen sterk frequentieafhankelijk is, d.w.z. dat elk type woning voor een andere trillingsfrequentie gevoelig is. Daarom is in dit onderzoek ook gekeken naar de frequentie-inhoud van de trillingssignalen. Het gemiddelde en 95%-bovengrens spectrum voor de locaties Dorst, Parallelweg en Dorst,

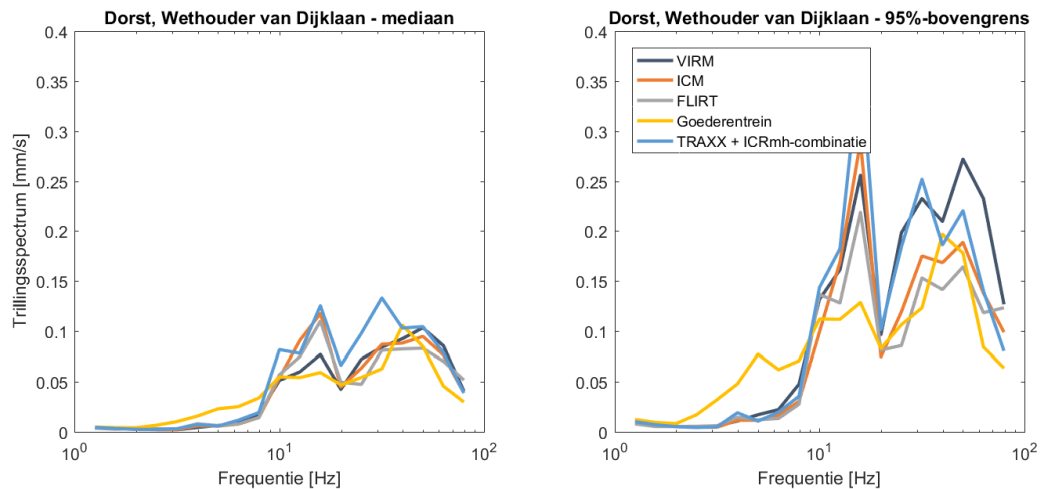
Wethouder van Dijklaan zijn gegeven in Figuur 4-14 resp. Figuur 4-15 (overige locaties in Bijlage II).

Hier valt het volgende op:

1. Bij doorgaand spoor (Parallelweg) is er relatief weinig verschil tussen de treintypes. Wel is zichtbaar dat bij frequenties onder de 10 Hz goederentreinen dominant zijn, bij frequenties tussen de 10 en 20 Hz is dat de TRAXX + ICRmh-combinatie, en bij nog hogere frequenties wisselt dit sterk.
2. Bij de spoorwegovergang (Wethouder van Dijklaan) zijn met name de trillingen boven de 10 Hz hoger dan bij doorgaand spoor. Dit komt door verschillende mechanismes, onder meer door verschillen in stijfheid in de spoorbaan bij een overweg, waardoor een brede trillingspuls ontstaat met vooral hoogfrequent veel trillingsenergie. Bij spoorwegovergangen is te zien dat vooral reizigerstreinen bij frequenties boven de 10 Hz hogere trillingen geven dan goederentreinen.
3. Bij bepaalde frequenties is zichtbaar dat bepaalde treintypes meer dan 30% hogere trillingen geven dan andere treintypes. Wanneer woningen gevoelig zijn voor die specifieke trillingsfrequenties, dan kan er een voelbaar verschil in trillingen zijn tussen die treintypes. Bij de Wethouder van Dijklaan in Dorst bijvoorbeeld zal iemand in een woning die gevoelig is voor trillingen rond 5 Hz (bijvoorbeeld een woning met slappe houten vloeren) de trillingen van goederentreinen aanzienlijk beter voelen dan de trillingen van reizigerstreinen (de trillingen van goederentreinen zijn bij 5 Hz namelijk een factor 3 a 4 hoger dan die van reizigerstreinen, zie Figuur 4-15). Bij woningen die gevoelig zijn voor trillingen rond 15 Hz (bijvoorbeeld woningen met wat stijvere houten vloeren of betonnen vloeren) zullen de trillingen van doorgaande intercity's (types VIRM, ICM en de TRAXX + ICRmh-combinatie) voor voelbaar hogere trillingen zorgen (de trillingen van deze treinen zijn bij 15 Hz namelijk een factor 2 a 3 hoger dan van goederentreinen).

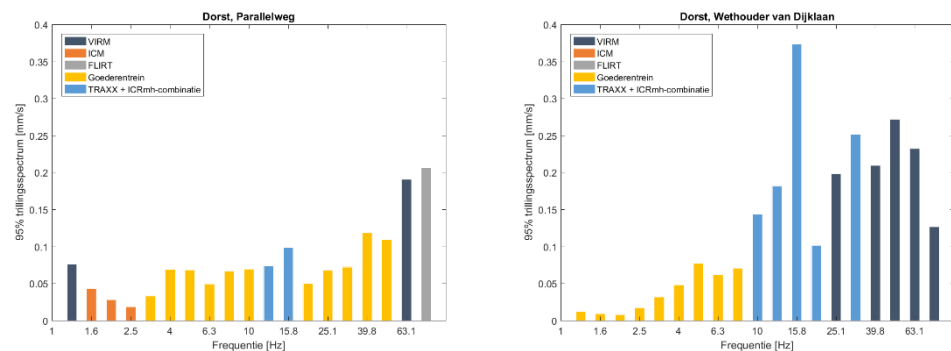


Figuur 4-14 Mediaan (links) en 95%-bovengrens van het trillingsspectrum per treintype bij Dorst, Parallelweg



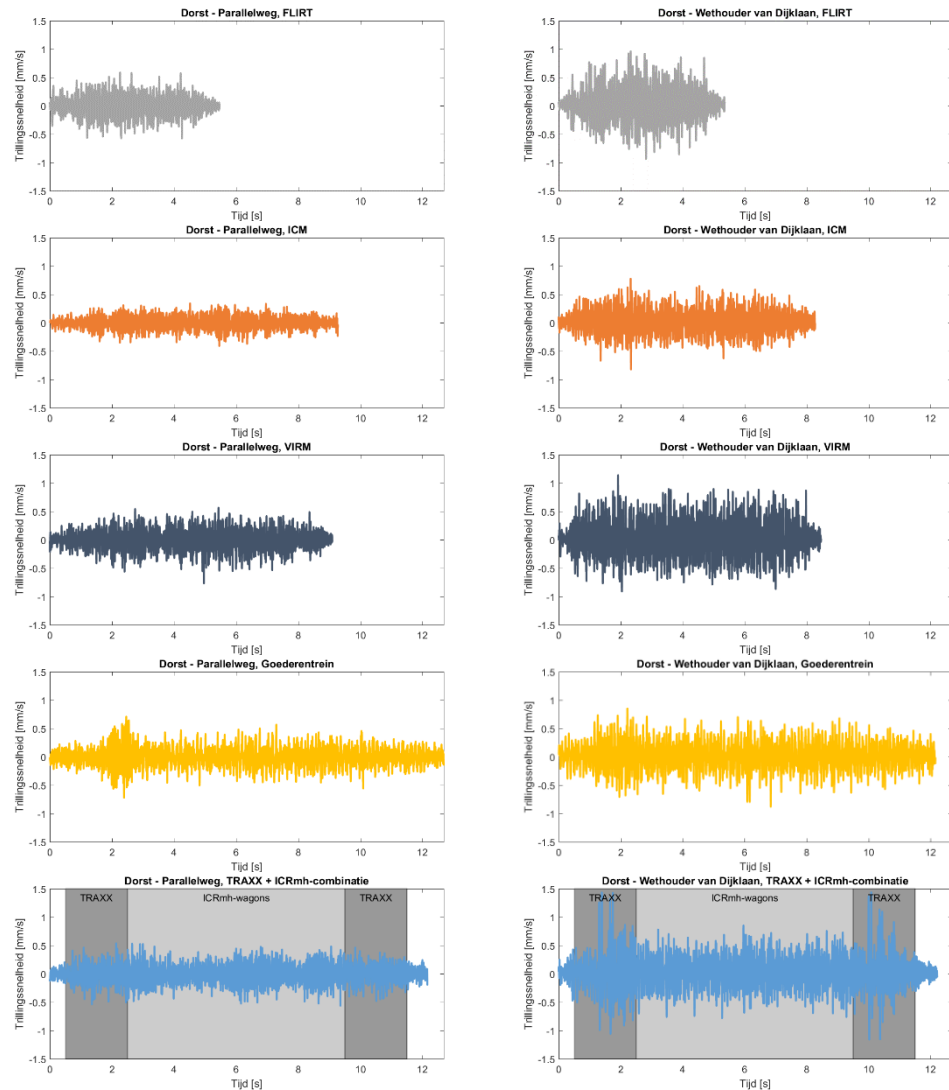
Figuur 4-15 Mediaan (links) en 95%-bovengrens van het trillingsspectrum per treintype bij Dorst, Wethouder van Dijklaan

Op basis van de voorgaande figuren is per frequentie gekeken wat het maatgevende treintype is voor de trillingssterkte V_{max} . Een voorbeeld daarvan voor de twee genoemde locaties is weergegeven in Figuur 4-16 (overige locaties in Bijlage II). In deze figuur is bovengenoemde stelling dat het dominante treintype sterk verschilt per frequentie, duidelijk zichtbaar. Concreet betekent dit dat in de ene woning een ander treintype voor de hoogste trillingen kan zorgen dan in een andere woning, omdat de ene woning gevoeliger is voor een ander type (andere frequentie) trillingen.



Figuur 4-16 95%-bovengrens van het trillingsspectrum, met per frequentie de maatgevende trein aangegeven, locatie Dorst, Parallelweg (links) en Dorst, Wethouder van Dijklaan (rechts)

Ter illustratie van deze verschillen tussen treintypes zijn in Figuur 4-17 karakteristieke tijdsignalen voor de genoemde treintypes getoond. Hier is goed zichtbaar dat de trillingssignalen bij overwegen hoger zijn, en dat met name de TRAXX-locomotieven in de TRAXX + ICRmh-combinatie daar hogere trillingen geven dan de rijtuigen (TRAXX rijdt zowel voor als achteraan deze combinatie, daar zijn hogere trillingen zichtbaar). Bij doorgaand spoor is dit effect niet of veel minder goed zichtbaar.



Figuur 4-17 Tijdssignalen voor karakteristieke passage van (van boven naar beneden) type FLIRT, type ICM, type VIRM, goederentrein en TRAXX + ICRmh-combinatie (waarbij locomotief en wagons afzonderlijk zijn gemarkeerd). Links voor locatie met doorgaand spoor (Parallelweg in Dorst) en rechts voor situatie met spoorwegovergang (Wethouder van Dijklaan in Dorst)

Zoals eerder gemeld is de trillingsgevoeligheid sterk verschillend tussen woningen. Algemeen geldt dat oudere woningen met houten vloeren gevoeliger zijn voor trillingen dan nieuwere woningen met betonnen vloeren, en dat gebouwen met paalfunderingen (m.n. stalen of betonnen palen) minder gevoelig zijn voor trillingen dan gebouwen die op staal zijn gefundeerd (met name bij trillingsfrequenties tussen de 10 en 50 Hz, deze worden bij een paalfundering sterker gereduceerd dan bij een fundering op staal). Trillingsfrequenties boven de 20 tot 30 Hz dempen ook veel sneller uit met de afstand tot het spoor, zodat deze trillingen in woningen op grotere afstand van het spoor vaak niet meer waarneembaar zijn.

Oudere woningen zijn vaak vooral gevoelig voor trillingen tussen de 6 en 15 Hz, nieuwere woningen voor trillingen tussen de 8 en 20 Hz. In dit frequentiegebied zien

we dat voor vrijwel alle locaties goederentreinen (met name bij de lagere frequenties) en de TRAXX + ICRmh-combinatie (met name bij de hogere frequenties) maatgevend zijn voor de trillingen. Goederentreinen reden altijd al op het traject, deze trillingen zijn naar verwachting niet veranderd tussen 2016 en 2018. Wel nieuw is de introductie van de TRAXX + ICRmh-combinatie als intercity Den Haag – Eindhoven. Deze intercity reed eerst als een loc1700 + ICRmh-combinatie. Als de toegenomen klachten dus gerelateerd zijn aan deze treinserie, dan komt dit mogelijk door de TRAXX-locomotief³. Dit locomotief-type kent een ander type afvering dan de loc1700-serie (o.a. terug te zien in de 50% hogere onafgeveerde massa), en introduceert dus andere trillingen, hoewel de via QuoVadis gemeten eigenschappen niet sterk verschillen, zie ook Tabel 4-6.

Tabel 4-6 Eigenschappen van TRAXX en loc1700 tijdens meetcampagne 2018 (deels o.b.v. QuoVadis-gegevens), zie ook Bijlage V voor overige treintypes

Parameter	TRAXX	Loc1700
		
Aslast	21.0 ton	21.5 ton
Wielonrondheid	72 kN	44 kN
Snelheid (tijdens metingen)	40 – 145 km/h	40 – 130 km/h
Onafgeveerde massa	4.5 ton	3.0 ton
Wieldiameter	1.20 m	1.21 m

Om vast te stellen of er sprake is van een toename van de trillingen door de introductie van de TRAXX + ICRmh-combinatie is een meting uitgevoerd aan een loc1700 + DDM-combinatie. De locomotief van deze combinatie is vergeleken met de TRAXX-locomotief uit de TRAXX + ICRmh-combinatie, zie Figuur 4-18 (overige locaties in Bijlage II).

Hierbij valt op dat met name tussen de 10 en 20 Hz de TRAXX uit de TRAXX + ICRmh-combinatie hogere trillingen geeft dan de loc1700. Merk echter op dat de gegeven spectra van de TRAXX het gemiddelde van een groot aantal verschillende locomotieven betreft, terwijl de data van de loc1700 op basis van een enkele locomotief (weliswaar over meerdere passages) is vastgesteld. Of dit toevallig een locomotief met hoge of lage trillingen was, is niet vast te stellen op basis van één meting. Als gekeken wordt naar de vergelijking van de metingen uit 2016 en 2018 (zie paragraaf 4.2.2), dan kan wel het volgende worden geconcludeerd:

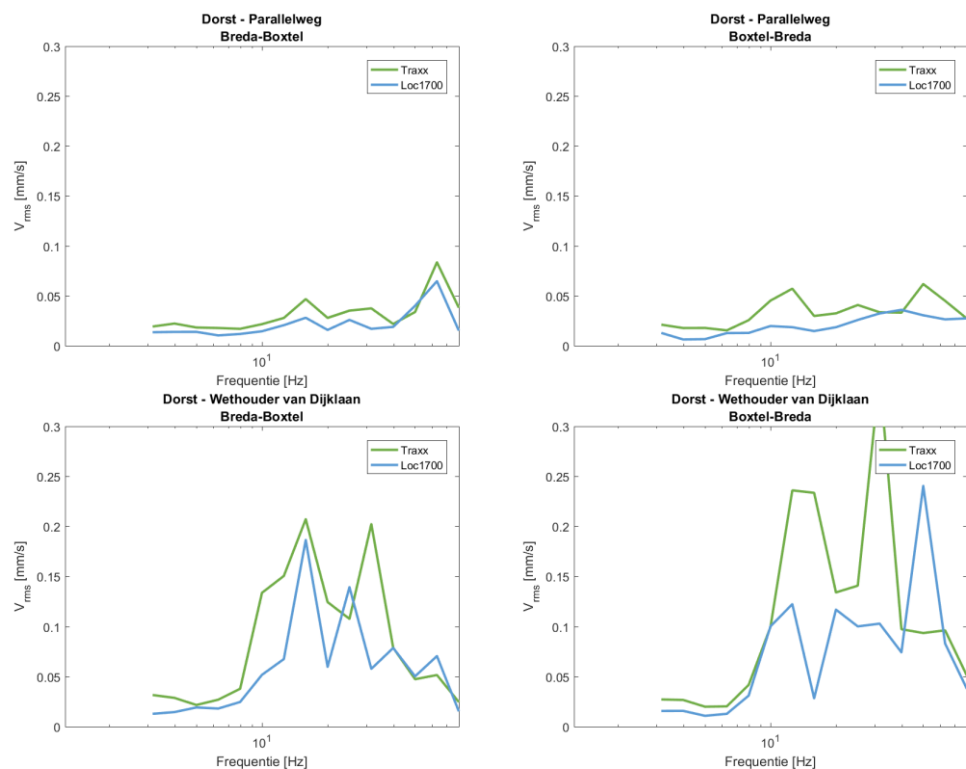
1. In 2016 reed de loc1700 als een combinatie met DDM-materieel. De trillingen van dit type zijn vergelijkbaar met die van de VIRM en ICM. Een vergelijking met de TRAXX + ICRmh-combinatie kan minder goed worden gemaakt, omdat er slechts ca. 10 treinen van dit type reden in 2016. Voor zover die vergelijking kan worden gemaakt, is wel te zien dat de trillingen van de TRAXX + ICRmh-combinatie boven de 10 Hz hoger zijn dan die van de loc1700 + DDM-combinatie.

³ De TRAXX-locomotief rijdt al een aantal jaar op dit traject in goederentreincombinaties. De snelheid is dan echter significant lager (90 km/h) dan bij de TRAXX + ICRmh-combinatie (140 km/h).

- In 2018 is te zien dat zowel de gemiddelde als de maximale trillingen van de TRAXX + ICRmh-combinatie significant hoger zijn dan die van de VIRM en ICM (waarmee de loc1700 + DDM-combinatie in 2016 vergelijkbaar was).

Verder valt in de metingen van 2018 op dat als ook naar de overige locaties wordt gekeken, dat met name tussen de 10 en 20 Hz de trillingen van de TRAXX hoger zijn dan die van deze loc1700.

Op basis van bovenstaande overwegingen kan worden geconcludeerd dat bij de meetlocatie in Tilburg de TRAXX + ICRmh-combinatie boven de 10 Hz voor hogere trillingen zorgt dan de loc1700 + DDM-combinatie. Gezien de resultaten uit Figuur 4-17 is dit verschil vooral toe te wijzen aan de TRAXX-locomotief, deze geeft namelijk binnen de TRAXX + ICRmh-combinatie de hoogste trillingen. De vergelijking tussen de TRAXX uit de TRAXX + ICRmh-combinatie en de loc1700 op de overige locaties suggereert dat de TRAXX-locomotief (in ieder geval bij een snelheid van 140 km/h, want bij TRAXX in de goederentreincombinaties, die met lagere snelheid rijden, is dit verschil minder goed zichtbaar) ook op andere locaties hogere trillingen geeft dan de loc1700, met name in het gebied tussen de 10 en 20 Hz. Dit kan komen door de hogere onafgeveerde massa van de TRAXX vergeleken met de ICRmh-rijtuigen en een loc1700.



Figuur 4-18 Trillingsspectrum van een TRAXX en een Loc1700 op locatie Dorst, Parallelweg (boven) en Dorst, Wethouder van Dijklaan (onder), richting Breda-Boxtel (links) en Boxtel-Breda (rechts)

4.4.3. Onderhoudsstatus

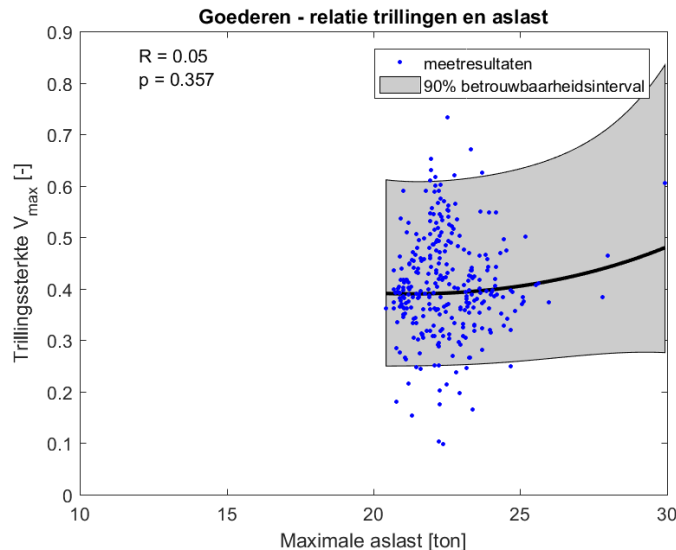
De onderhoudsstatus van treinen is in dit onderzoek gerelateerd aan de onrondheid van de wielen. De QuoVadis-stations geven maar beperkt informatie die te relateren is aan onderhoudsstatus, en deze parameter heeft de sterkste relatie met de status van het onderhoud.

Voor de wielonrondheid van de treinen geldt dat deze niet significant is veranderd tussen 2016 en 2018. Er zijn kleine (max. 15%) toenames in de dynamische pieklast te zien (een indicatie van de wielonrondheid), voor goederentreinen is de toename wat groter, zie Tabel 4-7.

Tabel 4-7 Verandering treineigenschappen, onderhoudsstaat en rijnsnelheid op QuoVadis punt bij Hulten tussen 2016 en 2018, per treintype, gemiddeld over alle treinen

Treintype	Maximale aslast (ton)		Wiel niet rond (kN)	
	2016	2018	2016	2018
FLIRT		17		49
ICM	17	16	23	26
ICRmh-combinatie		21		72
VIRM	18	18	33	34
Goederen	22	23	68	76

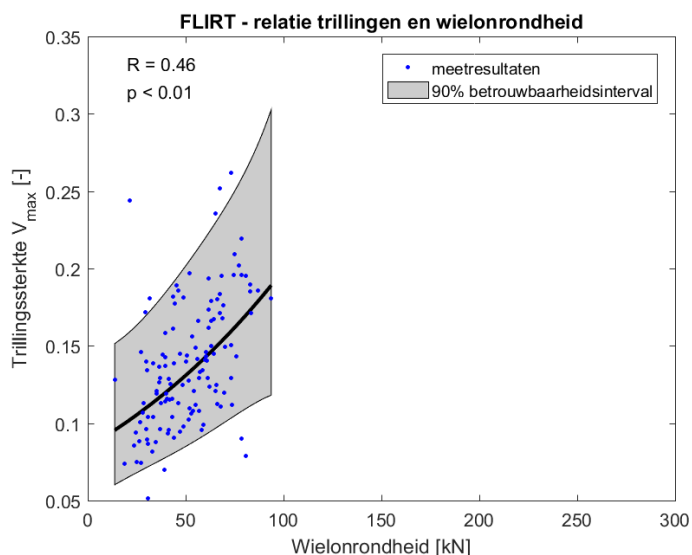
Om vast te stellen of er een relatie is tussen de maximale aslast of de wielonrondheid en de optredende trillingen, is een analyse uitgevoerd. Er is geen relatie zichtbaar tussen de trillingssterkte en de aslast, zie bijvoorbeeld Figuur 4-19. Voor reizigerstreinen, met een doorgaans nog lagere variatie in maximale aslast, is de statistische significantie nog veel lager dan voor goederentreinen, waar ook al geen verband is te vinden tussen trillingen en aslast.



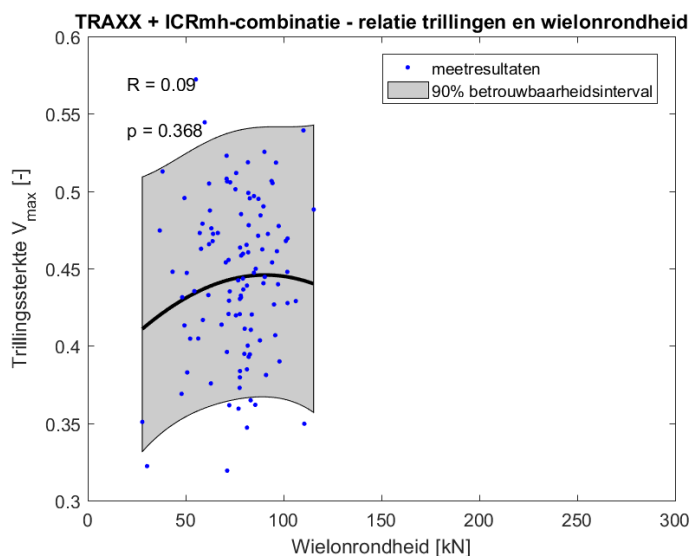
Figuur 4-19 Relatie tussen aslast en trillingssterkte voor goederentreinen in Rijen, Stationsweg, op het noordelijke spoor

Ten aanzien van wielonrondheid (maximale wielonrondheid per trein) geldt hetzelfde. Op sommige locaties lijkt een zwakke relatie zichtbaar, zie Figuur 4-20. Doorgaans is er echter geen statistische significante relatie te zien, zie Figuur 4-21. Uit een analyse van het DGMR-onderzoek uit 2016 valt wel af te leiden dat met name bij frequenties tussen de onderzoeken (zie DGMR-onderzoek uit 2016) is te zien dat met er name bij

frequenties tussen de 10 en 20 Hz wel een relatie zichtbaar is tussen de trillingen en de wielonrondheid.



Figuur 4-20 Relatie tussen wielonrondheid en trillingssterkte voor FLIRTs in Rijen, Generaal van Geenstraat, op het zuidelijke spoor



Figuur 4-21 Relatie tussen wielonrondheid en trillingssterkte voor TRAXX + ICRmh-combinatie in Rijen, Generaal van Geenstraat, op het zuidelijke spoor

Omdat de onderhoudsstatus en de maximale aslast niet significant zijn gewijzigd tussen 2016 en 2018, en er bovendien geen significante relatie is te vinden tussen de trillingssterkte en deze parameters, kan een verandering in aslast of onderhoudsstatus dus als oorzaak van de toegenomen klachten worden uitgesloten.

5 Conclusies

In dit onderzoek is met behulp van metingen langs de Brabantroute onderzoek gedaan naar de toename van klachten over trillingshinder in de periode 2016 tot 2018.

Uit het onderzoek volgt dat de maximaal gemeten trillingen tussen 2016 en 2018 op de locatie in Hulten niet zijn toegenomen, wel zijn de trillingen van reizigerstreinen bij de meting in 2018 hoger dan in 2016. In 2016 traden hoge trillingen incidenteel op door de passage van goederentreinen met hoge trillingen, in 2018 treden deze hoge trillingen aanzienlijk vaker op doordat ook een deel van de reizigerstreinen hoge trillingen produceert. Dit verschil tussen de metingen is deels verklaarbaar door weersinvloeden (in 2016 is in een koude, natte periode gemeten, in 2018 in een warme, droge periode, waardoor de bodem hard is en met name hoger frequente trillingen minder goed uitdempt). Deze verschillen treden met name op bij frequenties boven de 20 Hz, deze hoger frequente trillingen worden in woningen sterk uitgedempt door de constructie.

Verder kan uit het onderzoek het volgende worden geconcludeerd:

1. Er zijn veranderingen geweest in type materieel, zo is de FLIRT-trein geïntroduceerd, evenals de TRAXX-locomotief in de TRAXX + ICRmh-combinatie. Met name de TRAXX-locomotief in de TRAXX + ICRmh-combinatie heeft in frequentiegebieden waar woningen gevoelig voor zijn vaak hogere trillingen dan andere treinen. Dit treintype reed in 2016 slechts incidenteel, maar in 2018 veelvuldig. De introductie van deze treintypes kan daarom niet worden uitgesloten als oorzaak van de toegenomen klachten, met name doordat hoge trillingen door de introductie van de TRAXX + ICRmh-combinatie vaker optreden dan voorheen.
2. De onderhoudsstatus en aslast van het materieel is niet significant gewijzigd tussen 2016 en 2018. Verder geldt dat de aslast geen significante invloed heeft op de trillingen, de onderhoudsstatus (wielonrondheid bijvoorbeeld) heeft in het gebied tussen 10 en 20 Hz een beperkte invloed op de trillingen. Omdat er geen veranderingen zijn geweest in onderhoudsstatus van de treinen, kan dit de toegenomen klachten dus niet verklaren.
3. De rijsnelheid van de treinen is niet gewijzigd tussen 2016 en 2018, alhoewel een verandering in rijsnelheid wel leidt tot een verandering van de trillingen. Een toename in rijsnelheid kan de toegenomen klachten dus niet verklaren.
4. De spoorconstructie is niet gewijzigd tussen 2016 en 2018, alleen in Oisterwijk zijn beperkte veranderingen. Het verwijderen van wissels daar heeft een positief effect, het verwijderen van het derde spoor heeft geen merkbaar effect, en alleen het toevoegen van de onderdoorgang kan hebben geleid tot lokaal (binnen een straal van 100 meter) hogere trillingen. Veranderingen in spoorligging kunnen dus, afgezien van woningen binnen 100 meter van de onderdoorgang in Oisterwijk, de toegenomen klachten niet verklaren.
5. De spoorligging is niet significant gewijzigd tussen 2016 en 2018. Een verandering in de spoorligging kan de toegenomen klachten dus niet verklaren.
6. De trillingen zijn significant hoger in Dorst en in Rijen dan in Tilburg en Oisterwijk. Dit komt vooral door verschillen in de bodem en verschillen in bronsterkte van de trillingen (waarschijnlijk veroorzaakt door een combinatie van

spoorligging, onafgeveerde massa, primair afgeveerde massa en effecten zoals vlakke plaatsen, onrondheid en onbalans in de wielen).

7. De trillingen zijn significant hoger bij spoorwegovergangen dan bij doorgaand spoor. Dit komt vooral door verschillen in stijfheid van de ondergrond tussen de spoorwegovergang en het doorgaande spoor, waardoor een extra oneffenheid ontstaat waardoor meer trillingen optreden. effect is te zien bij alle treintypes, maar sterker aanwezig bij treinen met een hogere onafgeveerde massa zoals TRAXX-locomotieven in de TRAXX + ICRmh-combinatie.

De enige verandering die niet als oorzaak van de toegenomen klachten is uit te sluiten, is de introductie van nieuwe treintypes, en dan met name de TRAXX-locomotief in de TRAXX + ICRmh-combinatie. In de metingen is zichtbaar dat er een duidelijk verschil zichtbaar is in trillingen tussen verschillende treintypes. Zo zorgen goederentreinen bij frequenties onder de 10 Hz voor voelbaar hogere trillingen dan reizigerstreinen (dit is vooral voelbaar in woningen met bijvoorbeeld slappe vloeren), terwijl bij frequenties boven de 10 Hz vooral doorgaande intercity's op veel locaties voor voelbaar hogere trillingen zorgen dan sprinters en goederentreinen (dit is vooral voelbaar in woningen met bijvoorbeeld wat steviger houten vloeren of betonnen vloeren).

Op basis van de frequentieafhankelijke trillingsspectra kan worden geconcludeerd dat op de meeste locaties (maar met name bij spoorwegovergangen) bij sommige frequenties de trillingen van de TRAXX + ICRmh-combinatie meer dan 30% hoger zijn dan van andere treintypes. In woningen die gevoelig zijn voor die frequenties, kunnen de trillingen dus voelbaar (met meer dan 30%) zijn toegenomen tussen 2016 en 2018.

Colofon

Opdrachtgever ProRail B.V.

Uitgave Movares Nederland B.V.

Divisie Ruimte, Mobiliteit en Infra
Afdeling Infrastructuur: Waterbouw, Geotechniek en Dynamica

Utrecht

Telefoon 0630908524

Ondertekenaar CJFN Paiman
Ontwerper

Projectnummer RM006082

Kenmerk D79-PBO-KA-1800189

© 2018, Movares Nederland B.V.

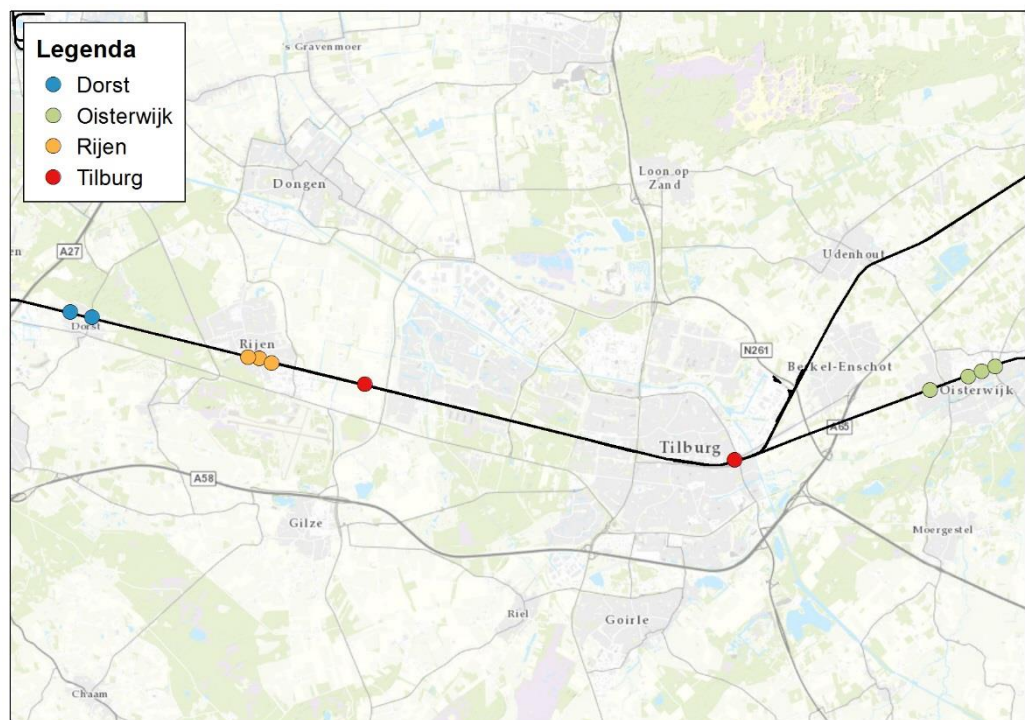
Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand of openbaar gemaakt in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Movares Nederland B.V.

Bijlage I – Keuze meetlocaties

De meetlocaties voor dit onderzoek zijn gekozen op basis van een aantal parameters en uitgangspunten:

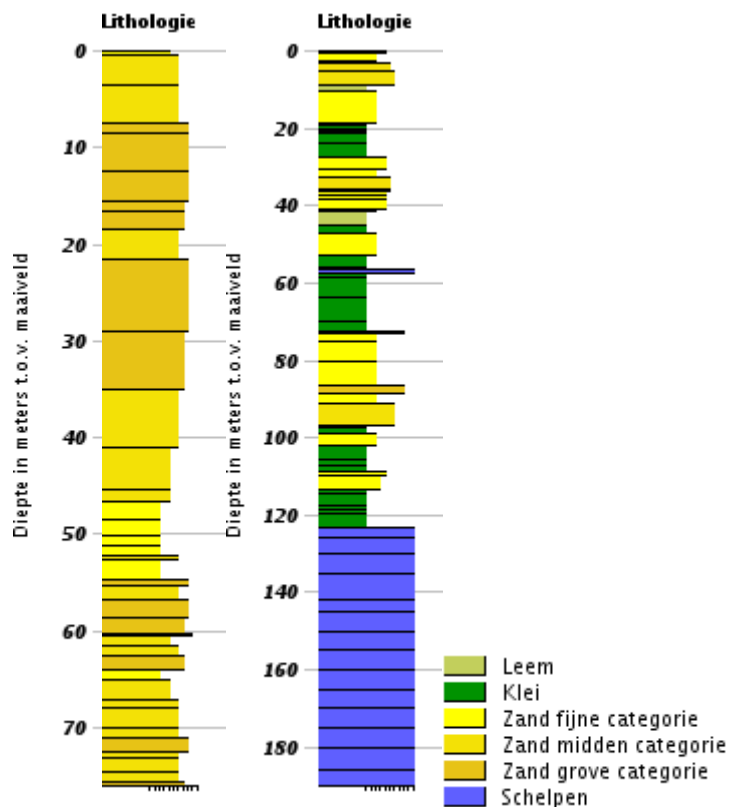
1. Metingen worden uitgevoerd op een afstand van 25 meter tot het hart van beide sporen (midden tussen twee sporen, bij meer dan twee sporen het midden tussen de twee meest nabij gelegen sporen). Als dit niet mogelijk is, dan een afstand hier zo dicht mogelijk bij.
2. Metingen worden zo dicht als mogelijk bij klachten uitgevoerd.
3. Meetlocaties worden als volgt gekozen, op basis van het type klachten:
 - a. Als klachten zijn gerelateerd aan bijvoorbeeld een wissel of spoorwegovergang, wordt ook een meting uitgevoerd op een nabijgelegen locatie (zodat het verschil in bodem beperkt is) met doorgaand spoor.
 - b. Als klachten zijn gerelateerd aan doorgaand spoor en er is sprake van klachten over een lang stuk spoor, met variatie in de bodemopbouw, dan worden er meerdere locaties gekozen om de verschillen in bodemopbouw mee te nemen.

Uiteindelijk heeft dit geleid tot 11 meetlocaties, waaronder de referentielocatie in Tilburg (Hulten) waar ook in 2016 al gemeten is. De meetlocaties zijn weergegeven in Figuur I - 1.

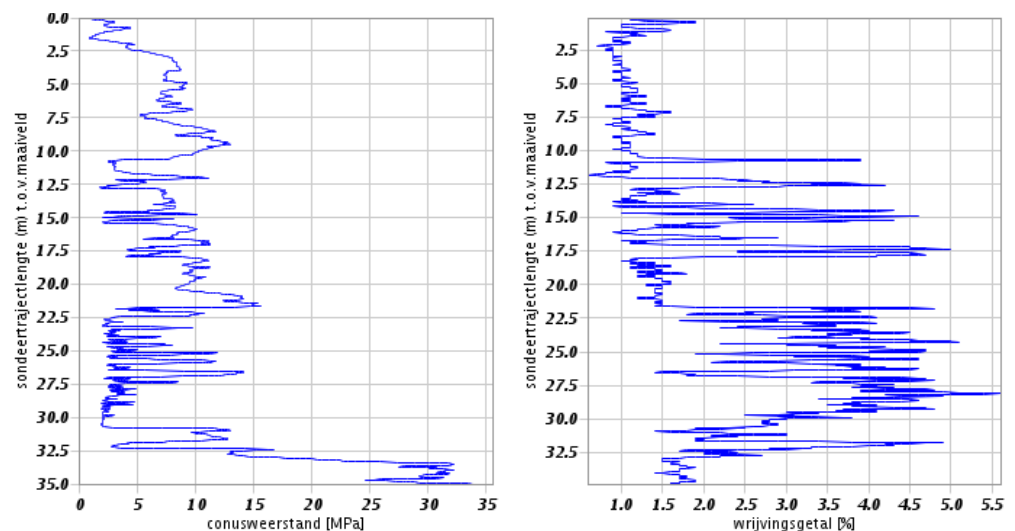


Figuur I - 1 Locaties meetpunten

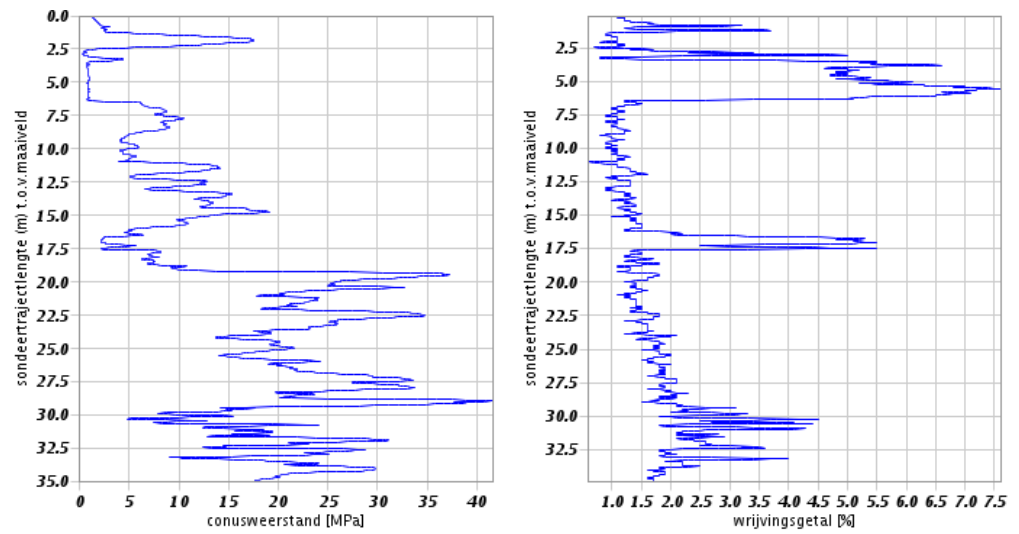
In de volgende subparagrafen wordt per plaats de locatie van de meetpunten nader toegelicht.



Figuur I - 3 Karakteristieke bodemopbouw in Dorst, links bij meetpunt Parallelweg, rechts bij meetpunt Wethouder van Dijklaan



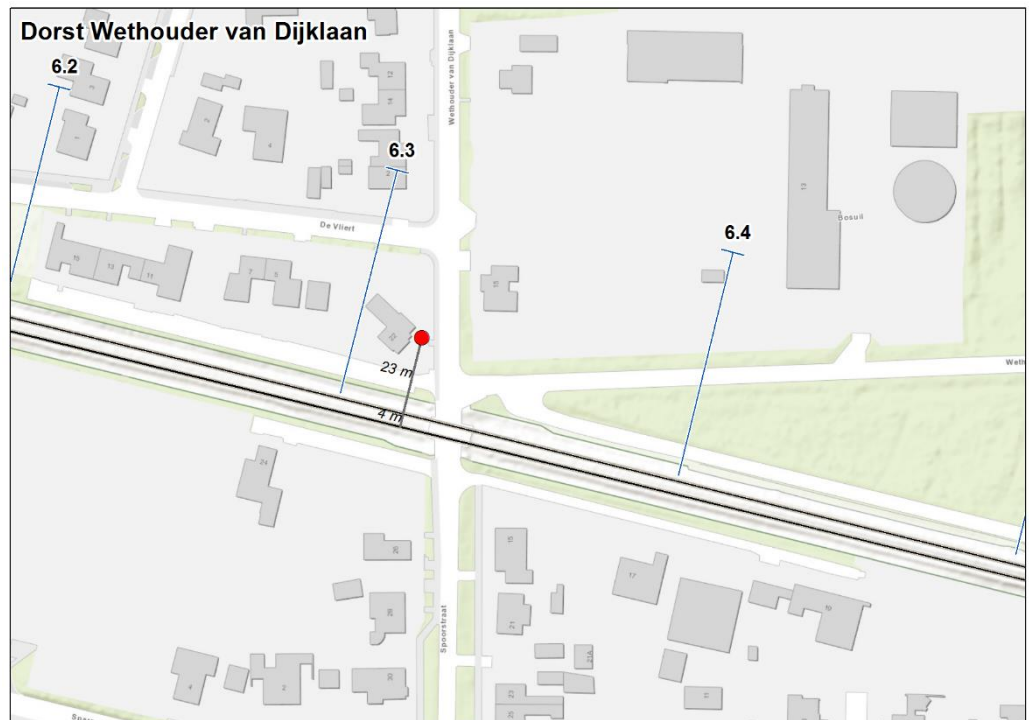
Figuur I - 4 Conusweerstand (links) en wrijvingsgetal (rechts) voor sondering CPT000000003376



Figuur I - 5 Conusweerstand (links) en wrijvingsgetal (rechts) voor sondering CPT000000003373



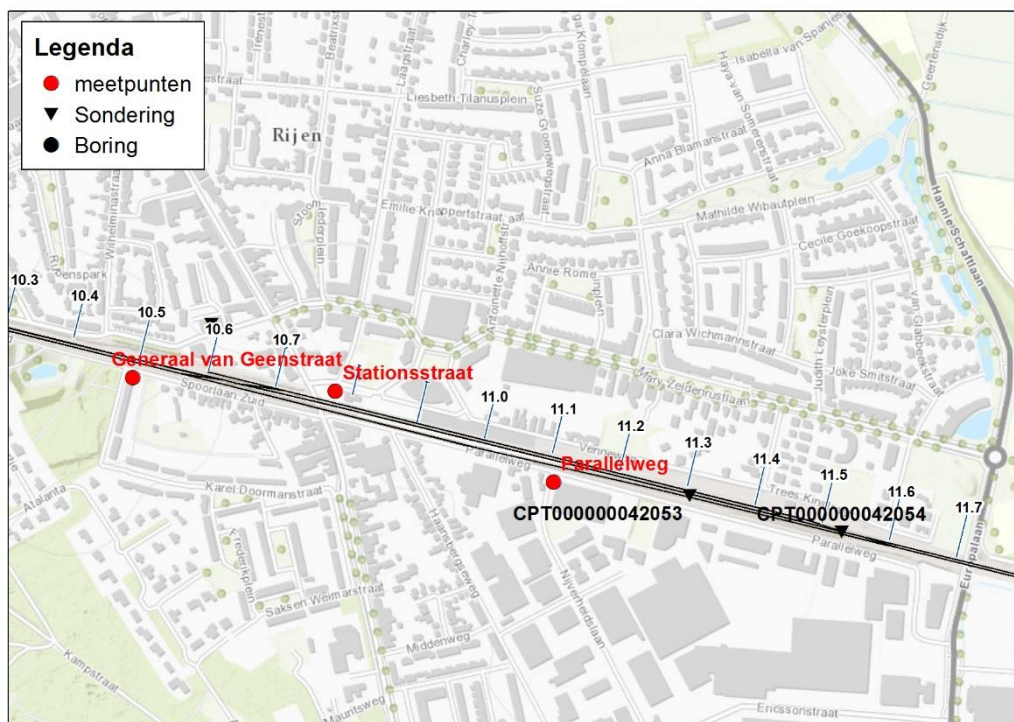
Figuur I - 6 Dorst, Parallelweg



Figuur I - 7 Dorst, Wethouder van Dijklaan

I.2 Rijen

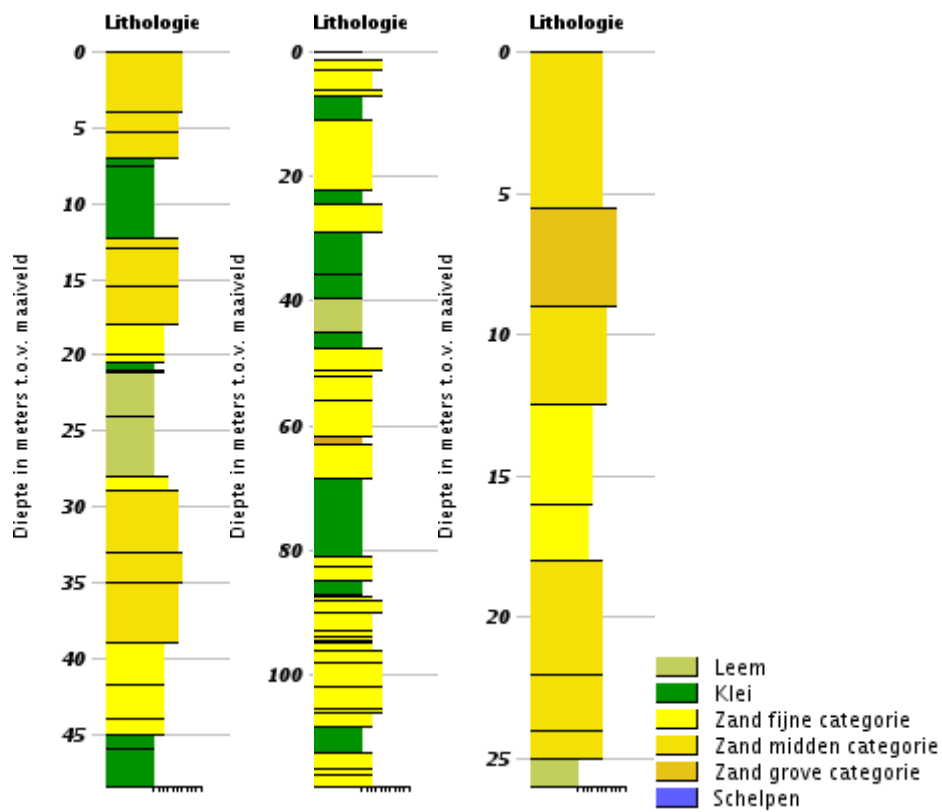
Beschikbare sonderingen en boringen in Rijen zijn weergegeven in Figuur I - 8. Klachten zijn in Rijen zowel afkomstig van doorgaand spoor als van de spoorwegovergang bij het Stationsplein. Omdat de lengte van het stuk doorgaand spoor in de bebouwde kom vrij groot is, is bij Rijen gemeten op twee locaties met doorgaand spoor en een locatie met een spoorwegovergang, zie Figuur I - 8.



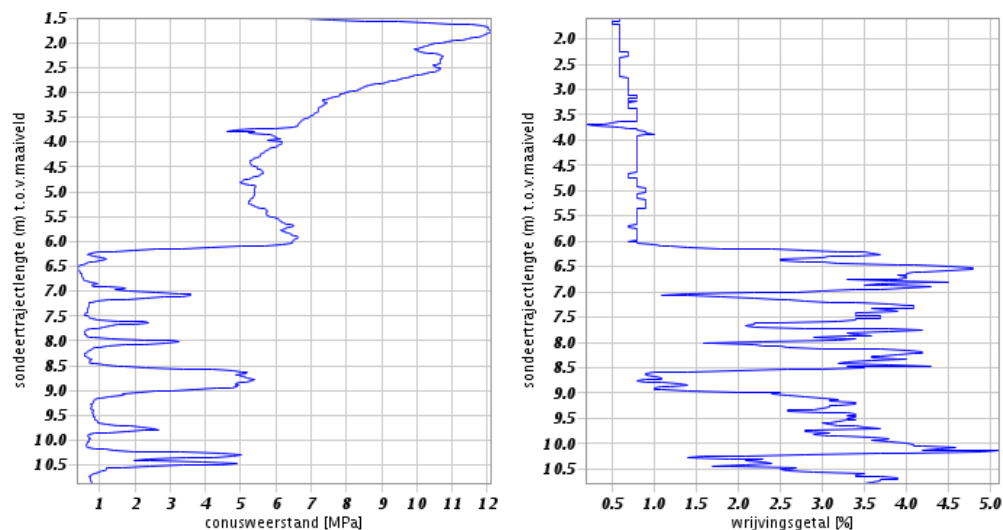
Figuur I - 8 Meetlocaties Rijen

De bodemopbouw in het westen van Rijen (Generaal van Geenstraat) bestaat uit fijn tot middelgrof zand, afgewisseld met klei- en leemlagen, terwijl meer in het oosten (Parallelweg) een meer zandige structuur bestaat met wat grover zand, zie Figuur I - 9. Gezien de beperkte conusweerstand gaat het om vrij los gepakt zand, zie Figuur I - 10 tot en met Figuur I - 12.

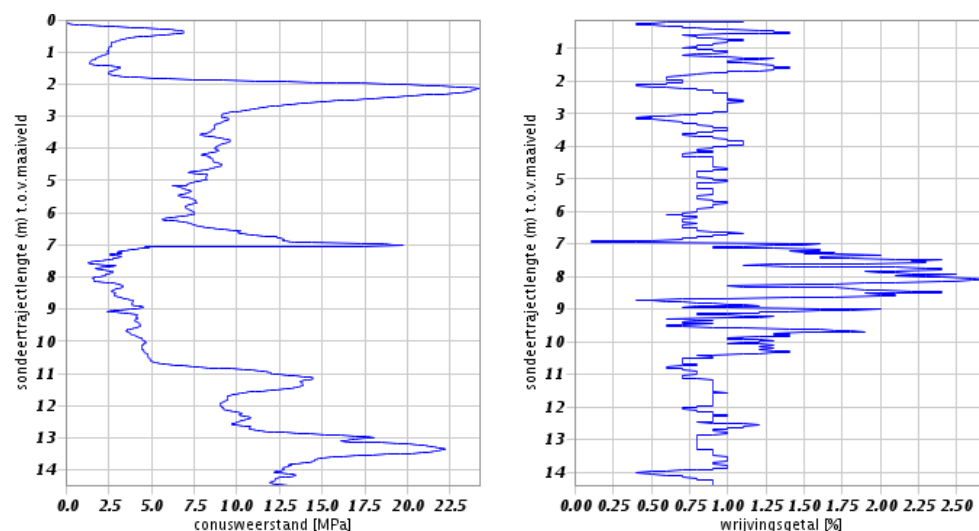
De uiteindelijke meetlocaties met de afstand tot de in gebruik zijnde sporen zijn weergegeven in Figuur I - 13 tot en met Figuur I - 15.



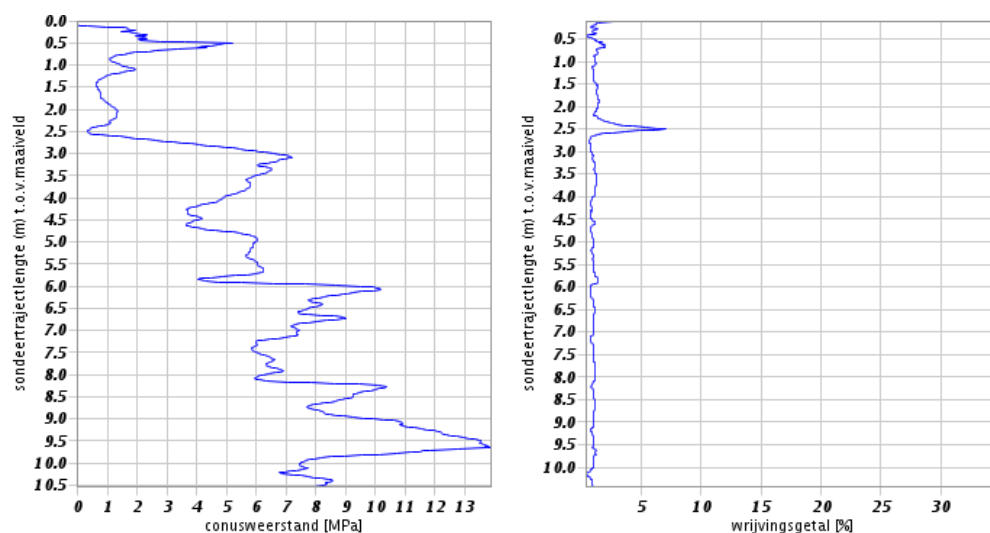
Figuur I - 9 Karakteristieke bodemopbouw in Rijen, links bij meetpunt Generaal van Geenstraat, midden bij Stationsstraat en rechts bij Parallelweg



Figuur I - 10 Conusweerstand (links) en wrijvingsgetal (rechts) voor sondering CPT000000035425



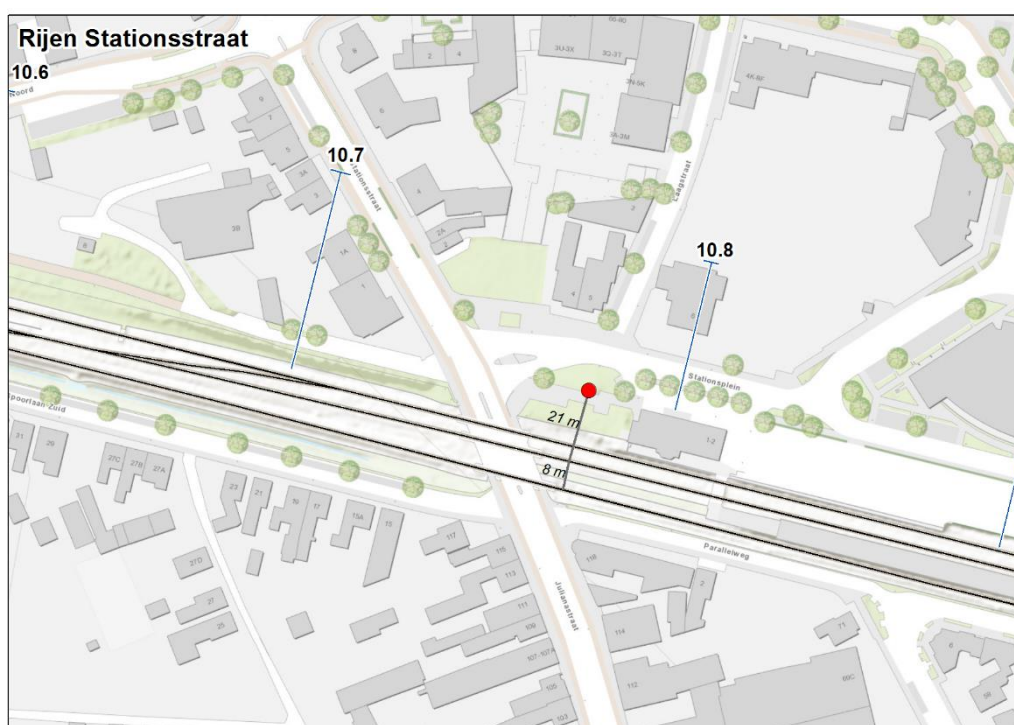
Figuur I - 11 Conusweerstand (links) en wrijvingsgetal (rechts) voor sondering CPT000000042053



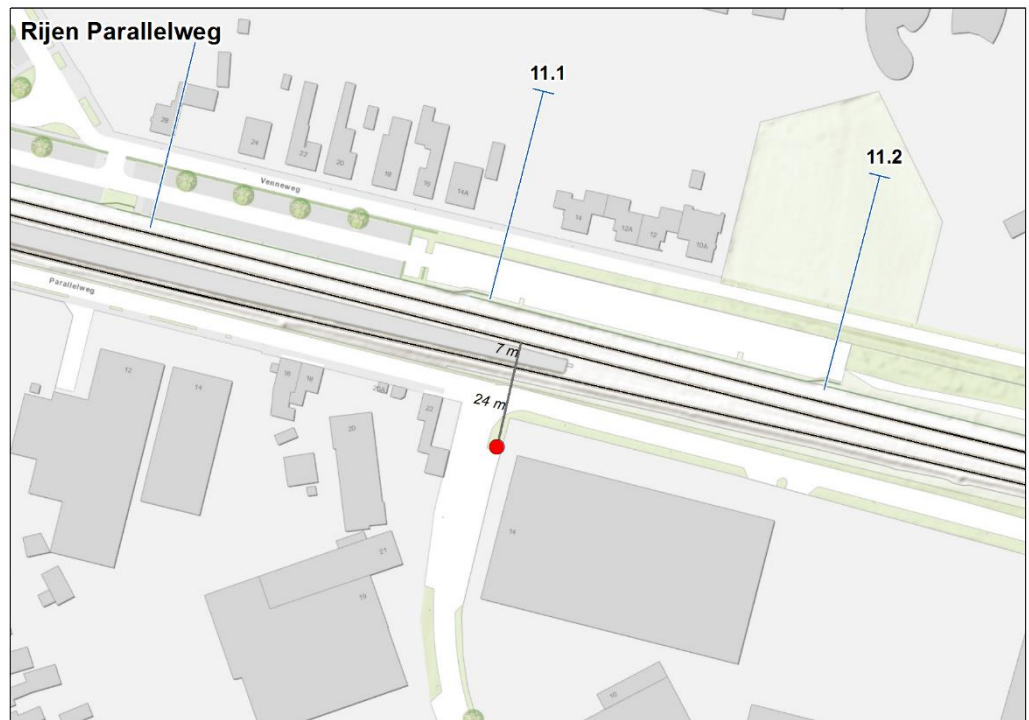
Figuur I - 12 Conusweerstand (links) en wrijvingsgetal (rechts) voor sondering CPT000000042054



Figuur I - 13 Rijen, Generaal van Geenstraat



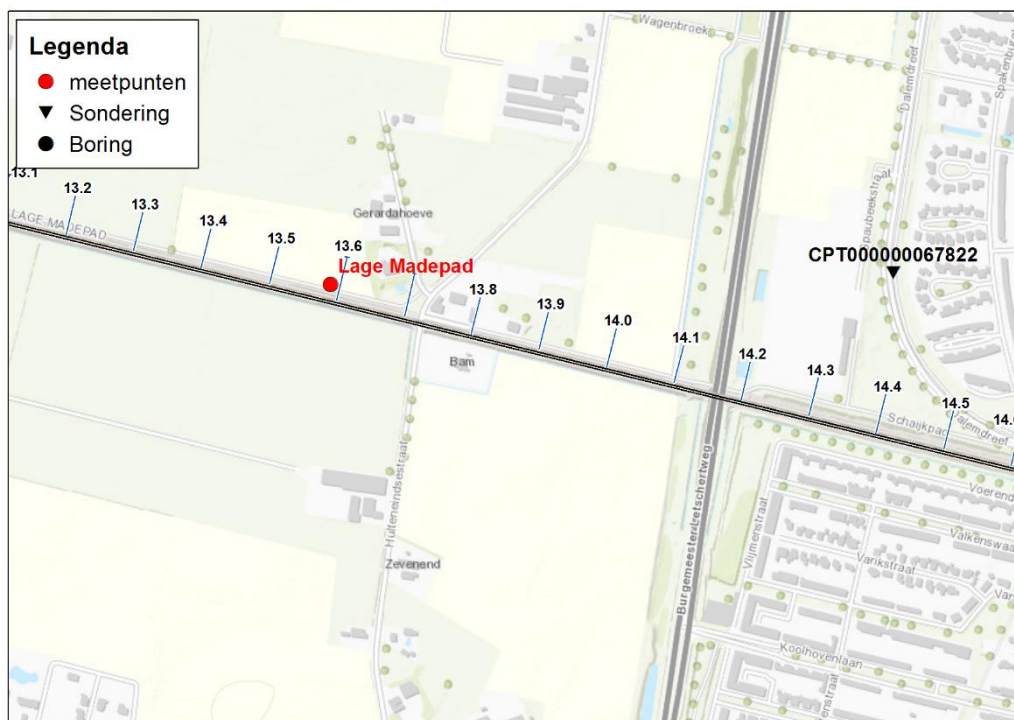
Figuur I - 14 Rijen, Stationsstraat



Figuur I - 15 Rijen, Parallelweg

I.3 Hulten

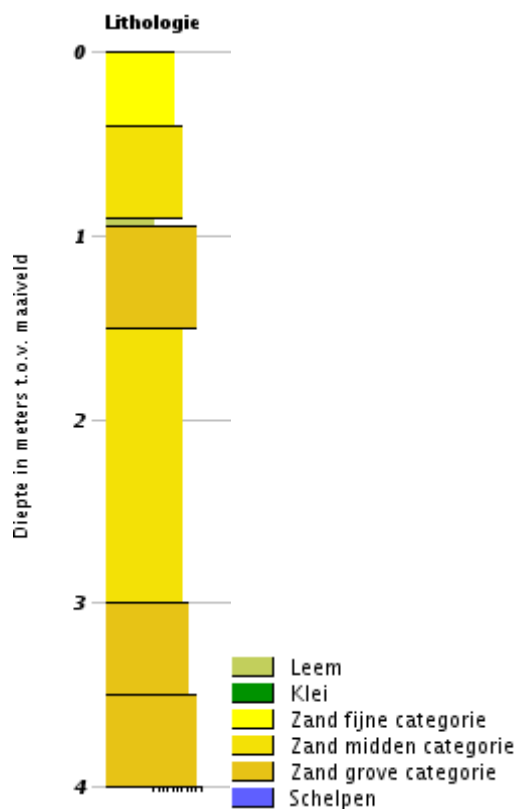
De beschikbare sondering in Hulten is weergegeven in Figuur I - 16, evenals de meetlocatie. Deze meetlocatie is de referentielocatie waar ook in 2016 is gemeten. Het betreft een locatie met doorgaand spoor.



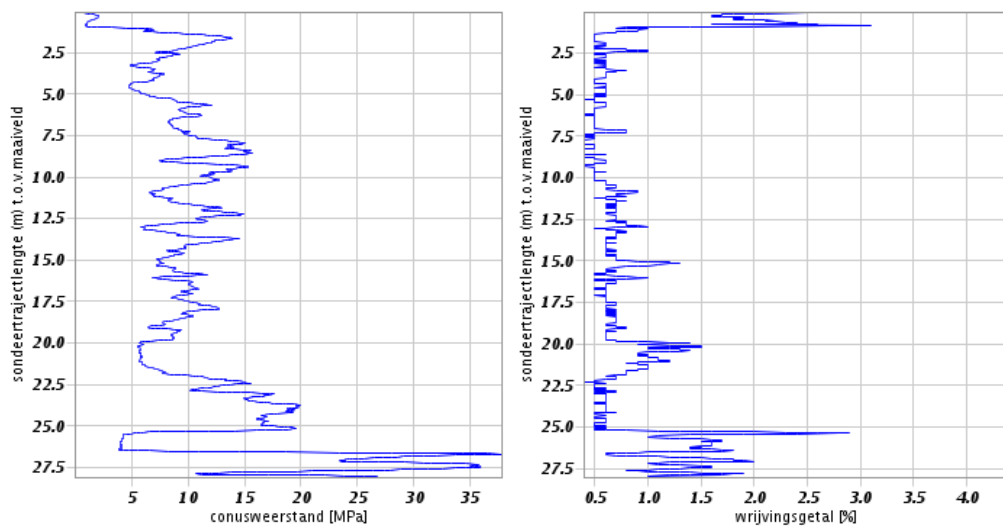
Figuur I - 16 Meetlocatie Hulten

De bodemopbouw bij deze meetlocatie bestaat uit fijn tot grof zand, zie Figuur I - 17. Gezien de beperkte conusweerstand gaat het om vrij los gepakt zand, zie Figuur I - 18.

De uiteindelijke meetlocatie met de afstand tot de beide sporen is weergegeven in Figuur I - 19.



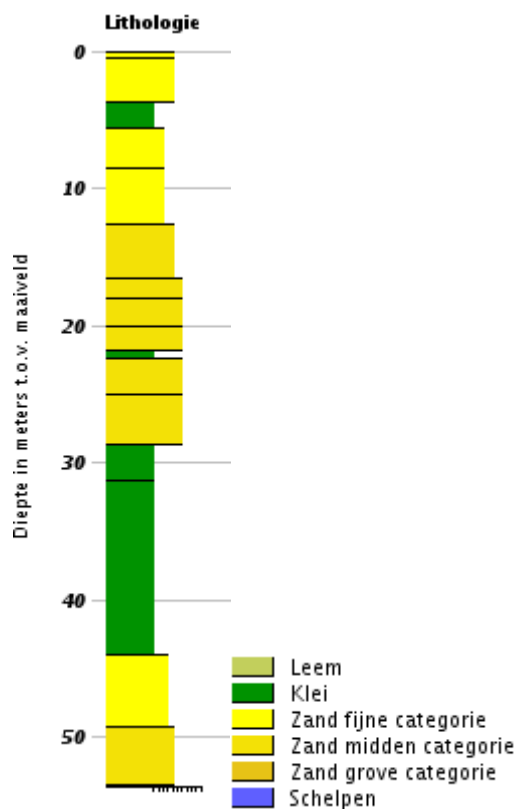
Figuur I - 17 Karakteristieke bodemopbouw in Hulten



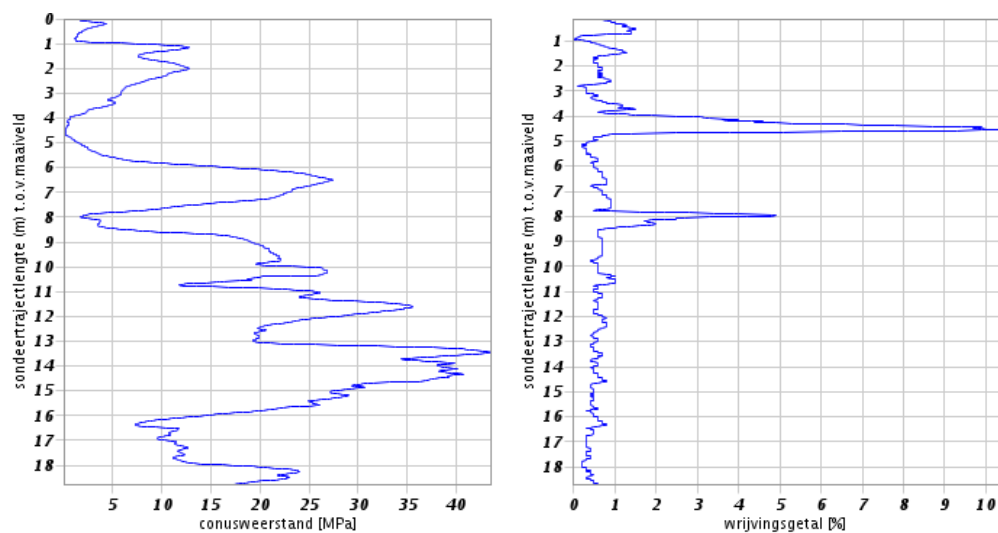
Figuur I - 18 Conusweerstand (links) en wrijvingsgetal (rechts) voor sondering CPT000000067822



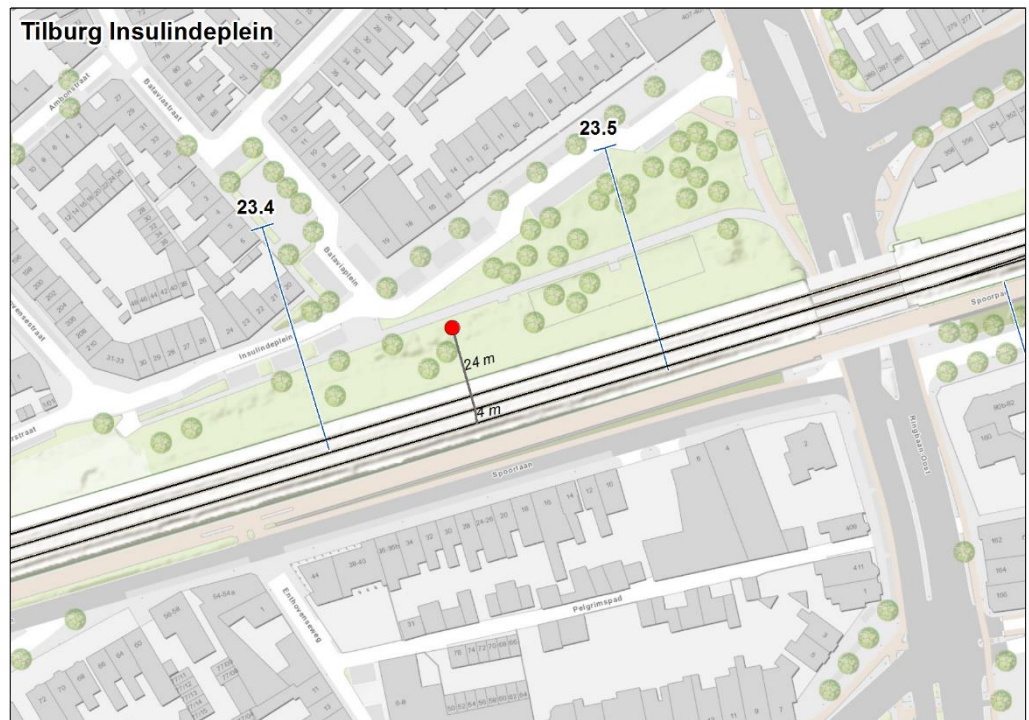
Figuur I - 19 *Tilburg (Hulten), Lage Madepad*



Figuur I - 21 Karakteristieke bodemopbouw in Tilburg



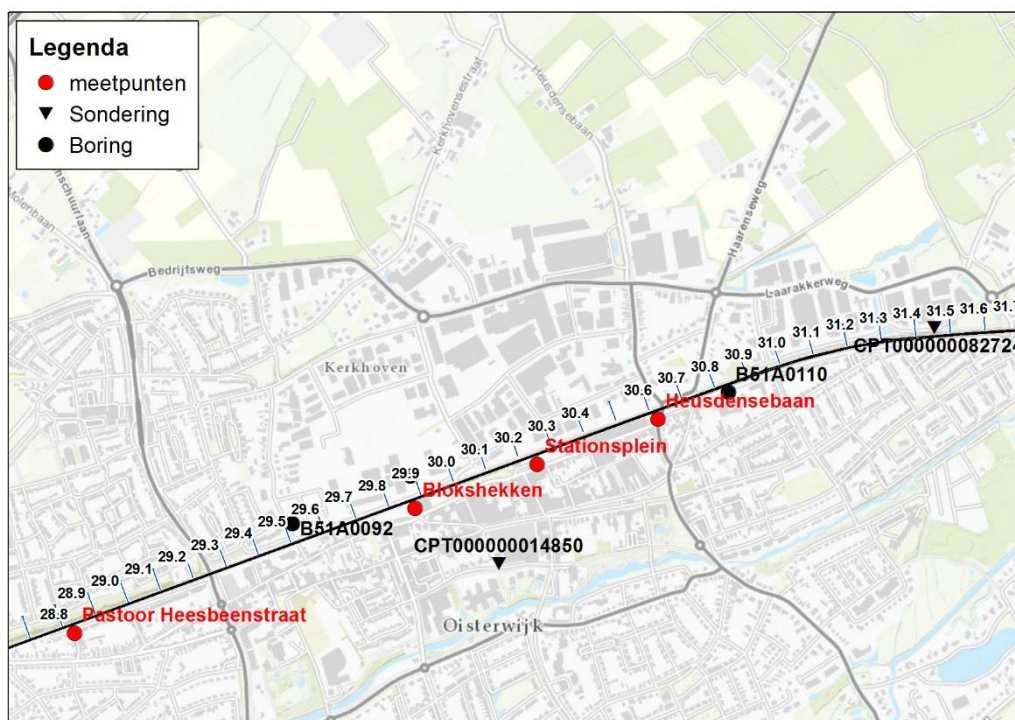
Figuur I - 22 Conusweerstand (links) en wrijvingsgetal (rechts) voor sondering CPT000000016025



Figuur I - 23 *Tilburg, Insulindeplein*

I.5 Oisterwijk

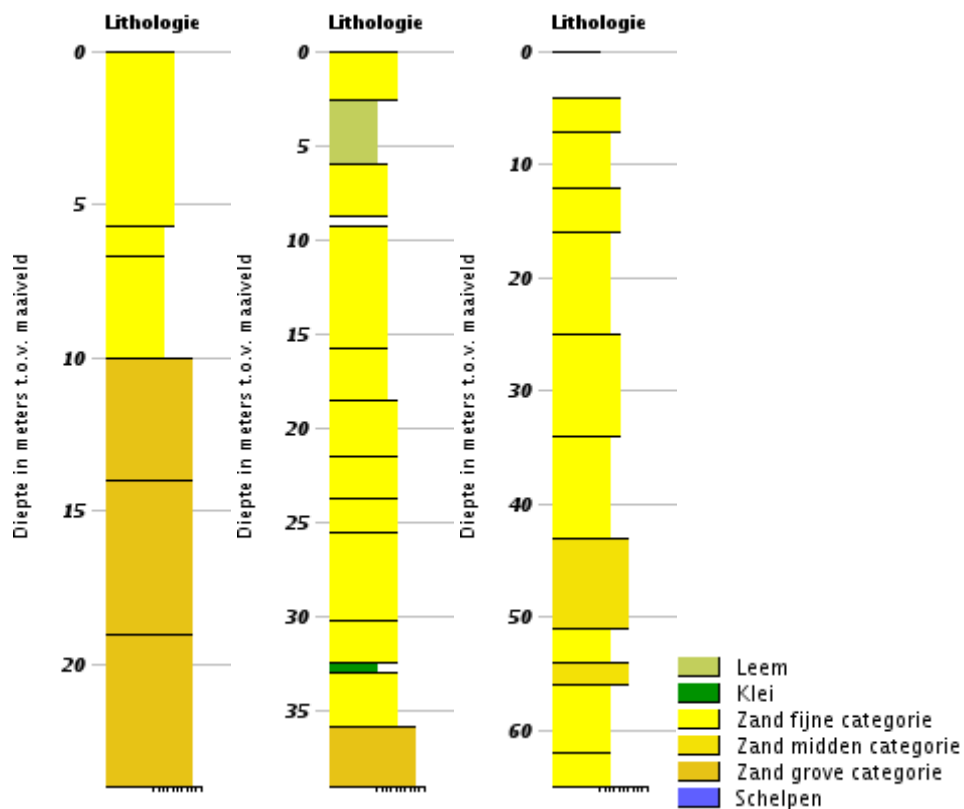
Beschikbare sonderingen en boringen in Oisterwijk zijn weergegeven in Figuur I - 24. Klachten zijn in Oisterwijk afkomstig van doorgaand spoor, de spoorweginval Heusdensedijk en de nieuwe onderdoorgang bij het station. Omdat de lengte van het stuk doorgaand spoor in de bebouwde kom vrij groot is, is bij Oisterwijk gemeten op twee locaties met doorgaand spoor, een locatie bij de onderdoorgang en een locatie met een spoorweginval, zie Figuur I - 24.



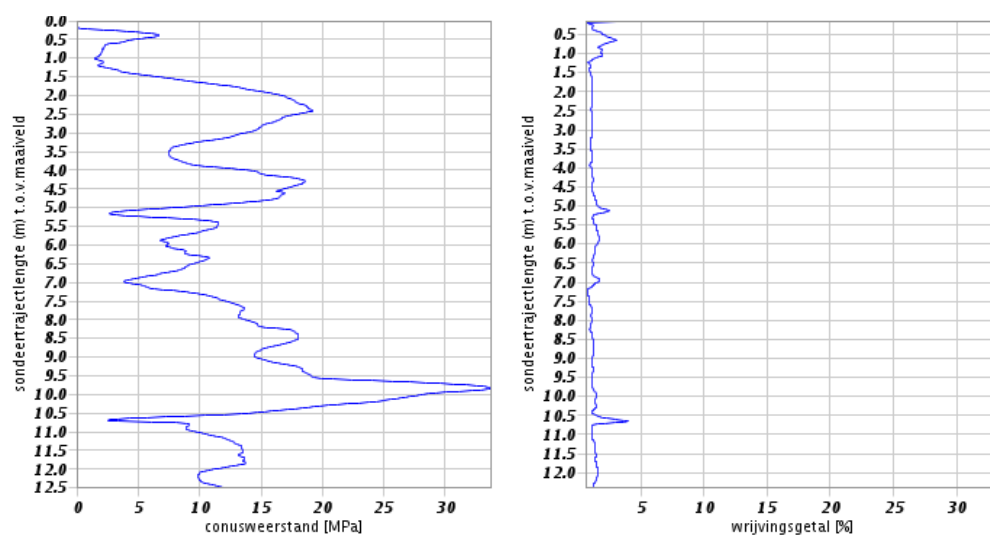
Figuur I - 24 Meetlocaties Oisterwijk

De bodemopbouw in Oisterwijk bestaat vooral uit fijne zandlagen, op grotere diepte komen ook middelgrove en grove zandlagen voor. Op sommige locaties zijn (dunne) leemlagen aanwezig, zie Figuur I - 25. Gezien de conusweerstand gaat het om los tot matig gepakt zand, zie Figuur I - 26 en Figuur I - 27.

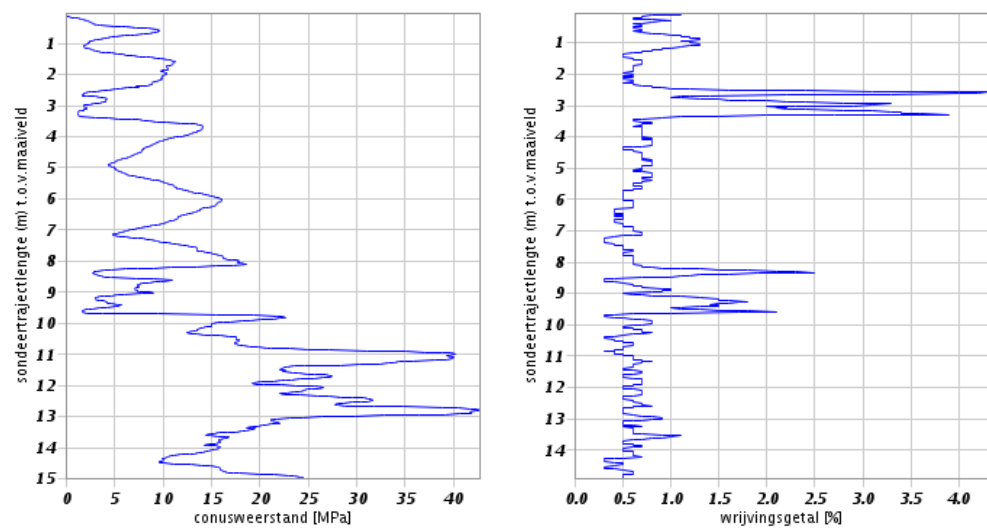
De uiteindelijke meetlocaties met de afstand tot de in gebruik zijnde sporen zijn weergegeven in Figuur I - 28 tot en met Figuur I - 31.



Figuur I - 25 Karakteristieke bodemopbouw in Oisterwijk, links bij meetpunt Pastoor van Heesbeenstraat, midden bij Blokshekken en Stationsplein, rechts bij Heusdensebaan



Figuur I - 26 Conusweerstand (links) en wrijvingsgetal (rechts) voor sondering CPT000000014850



Figuur I - 27 Conusweerstand (links) en wrijvingsgetal (rechts) voor sondering CPT000000082724



Figuur I - 28 Oisterwijk, Pastoor van Heesbeenstraat



Figuur I - 29 Oisterwijk, Blokshekken



Figuur I - 30 Oisterwijk, Stationsplein



Figuur I - 31 *Oisterwijk, Heusdensebaan*

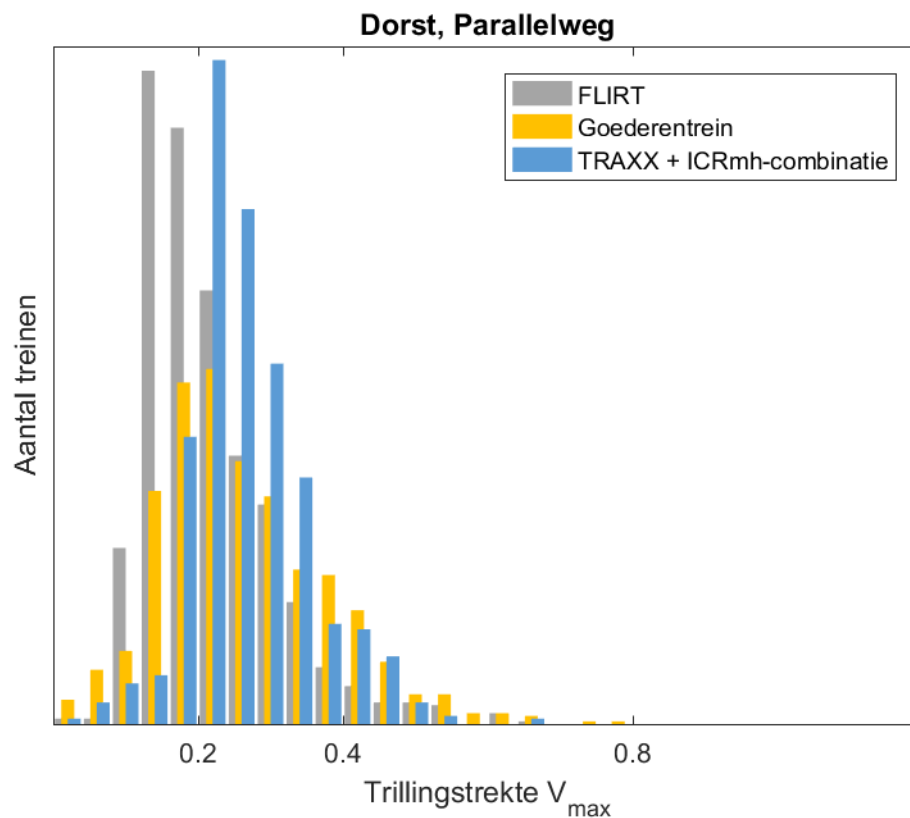
Bijlage II – Trillingen van treinverkeer

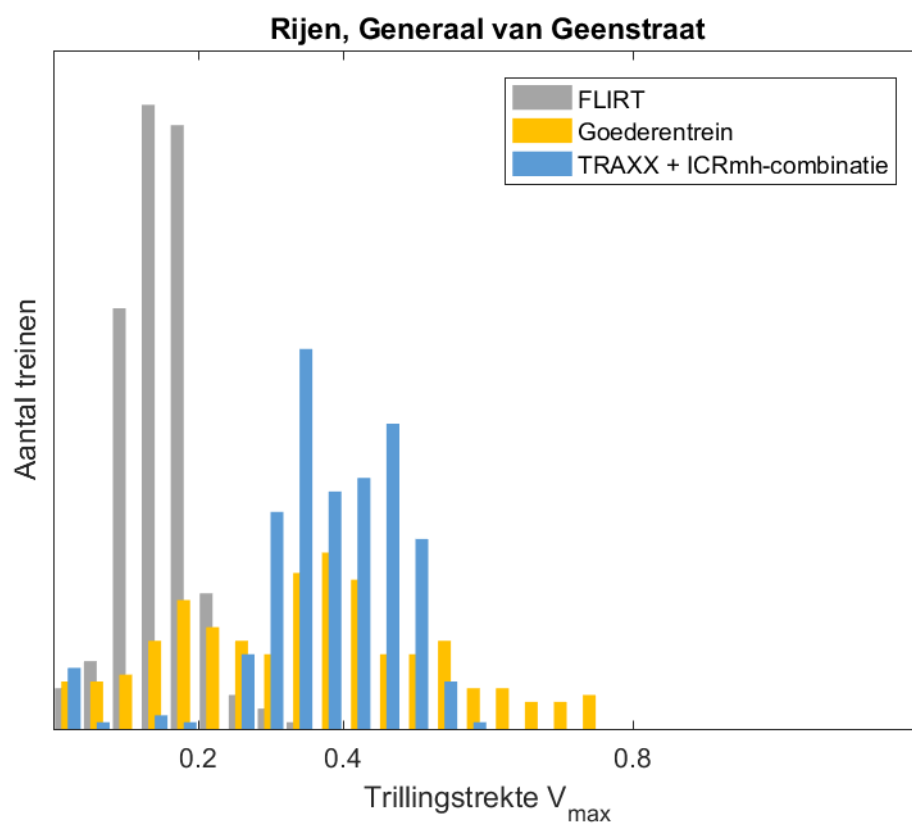
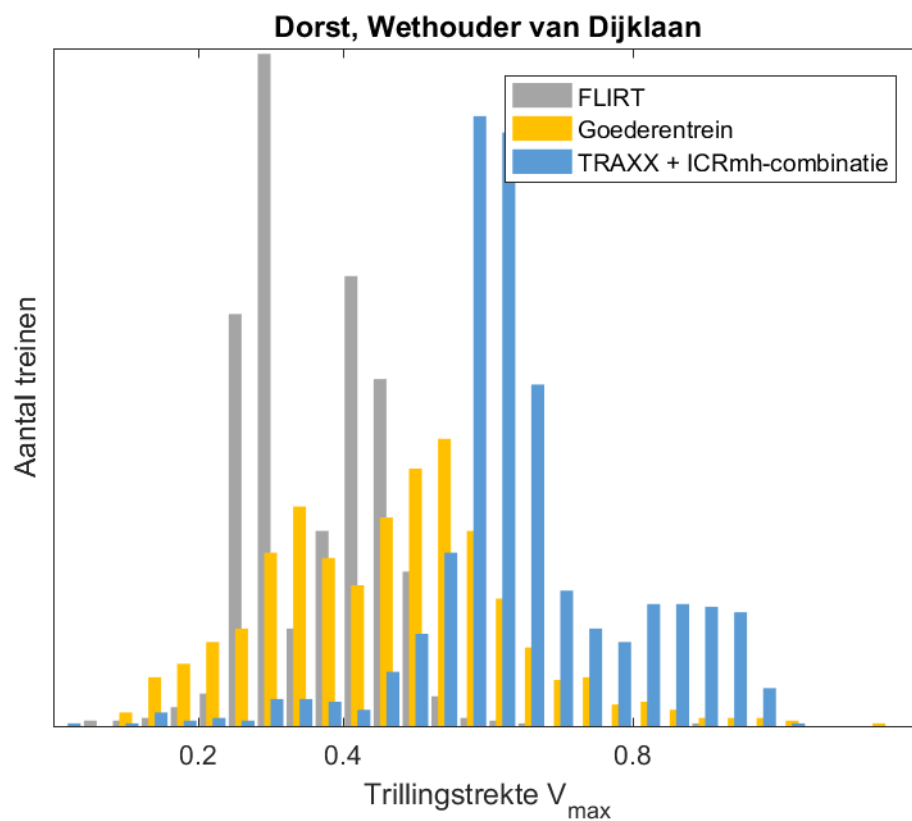
Deze bijlage bevat in grafische vorm de resultaten van de trillingsmetingen uit 2018. Achtereenvolgens worden de volgende figuren getoond:

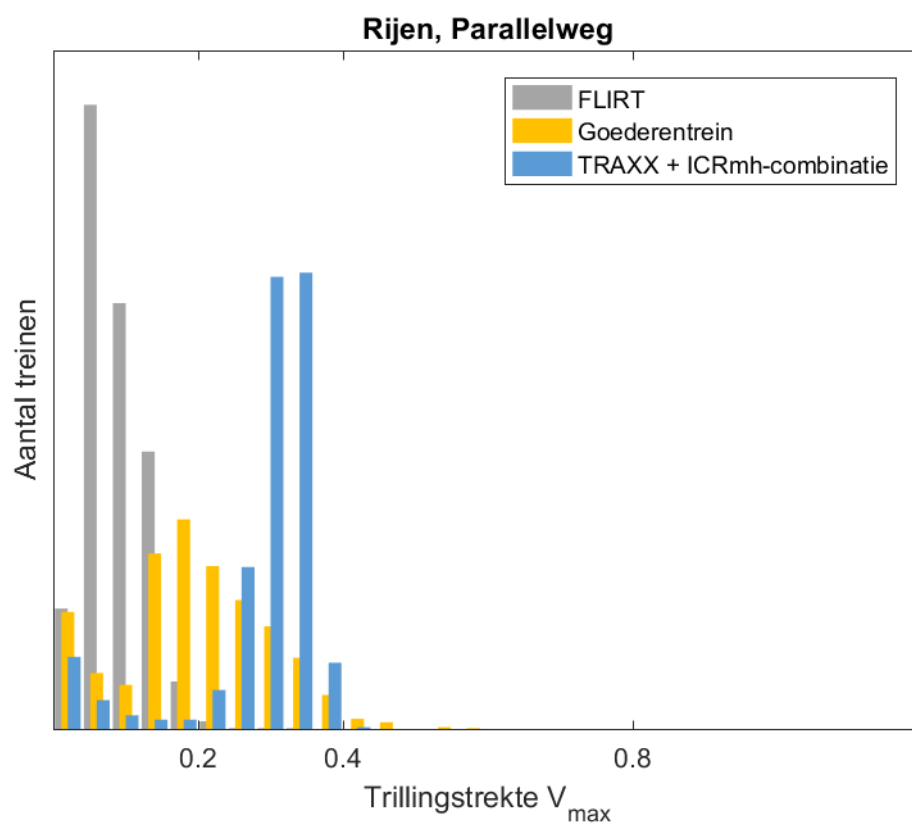
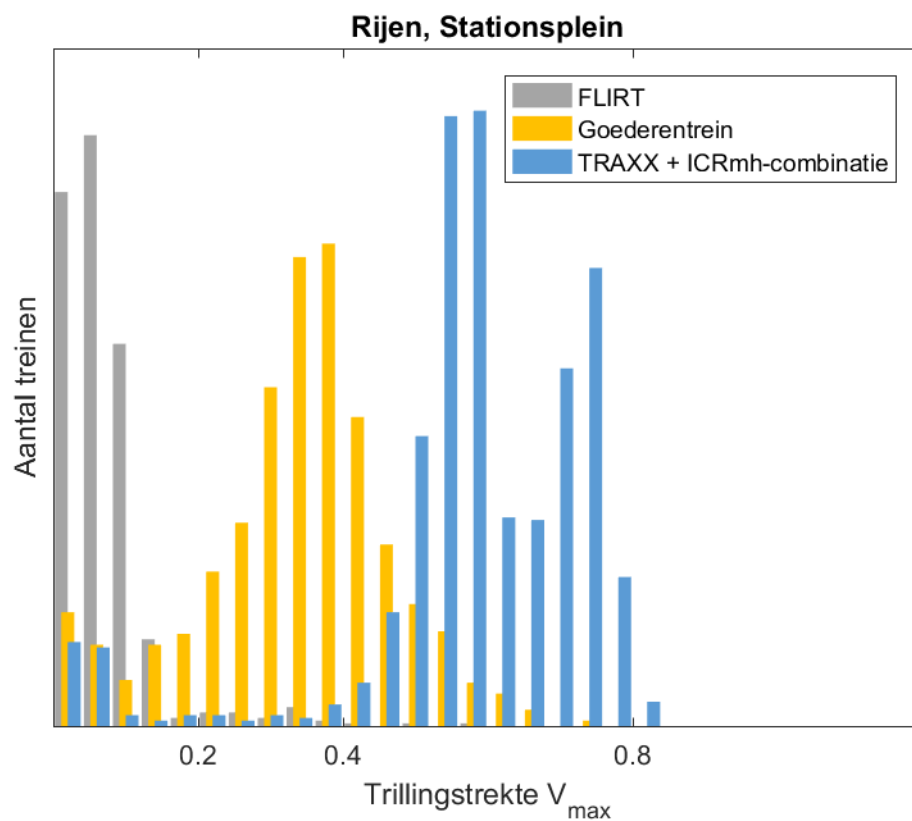
1. Histogrammen van V_{max} op maaiveld van de drie treintypes die op alle locaties zijn gemeten
2. Histogrammen van de rijsnelheid van de drie treintypes die op alle locaties zijn gemeten
3. 90% betrouwbaarheidsinterval van trillingsspectrum van alle treinen
4. Mediaan (verwachtingswaarde) en 95%-bovengrens van het trillingsspectrum per treintype, van alle treintypes met voldoende treinpassages om dit betrouwbaar te kunnen vaststellen.
5. Maatgevend treintype per frequentie
6. Trillingsspectrum van TRAXX-locomotief en loc1700

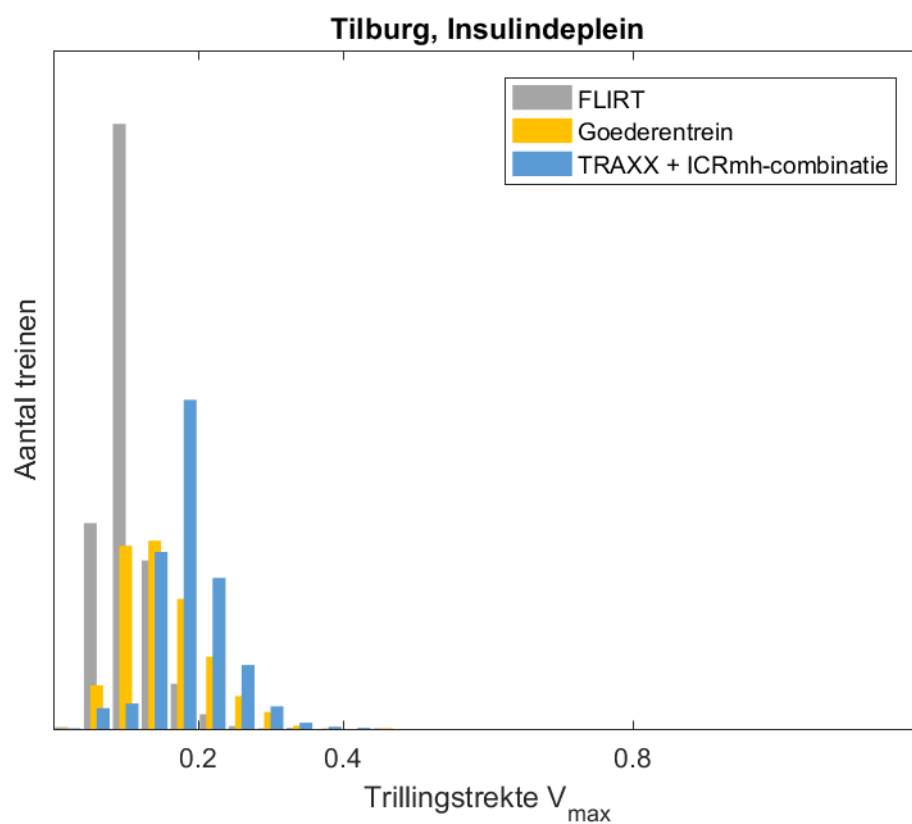
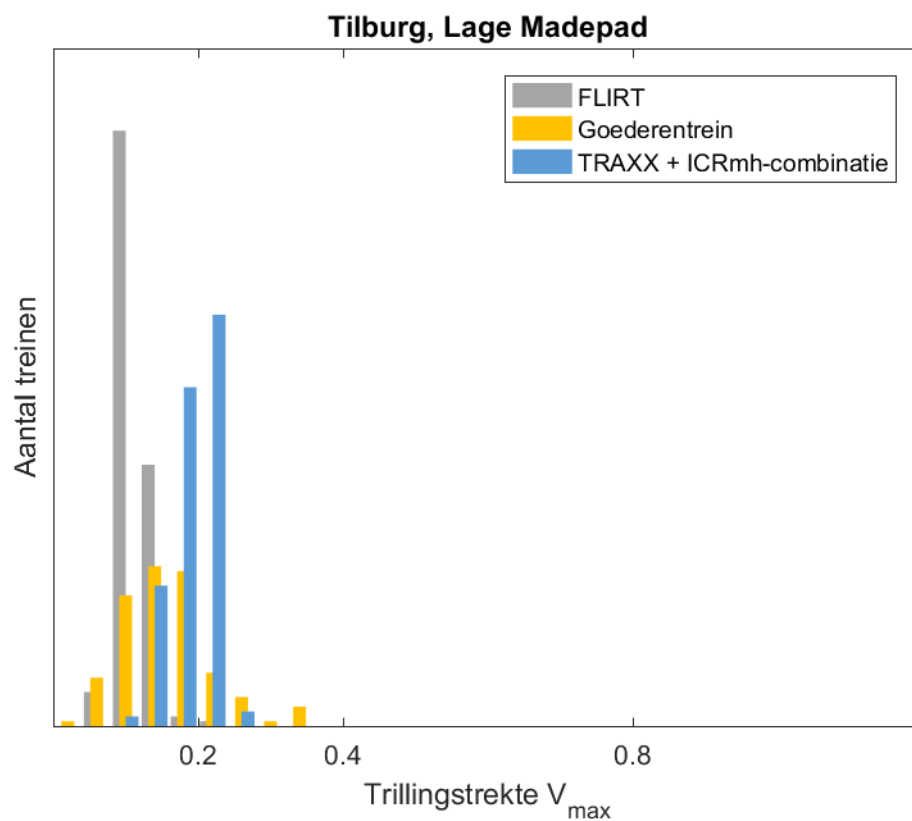
II.1 Histogrammen van V_{\max} op maaiveld

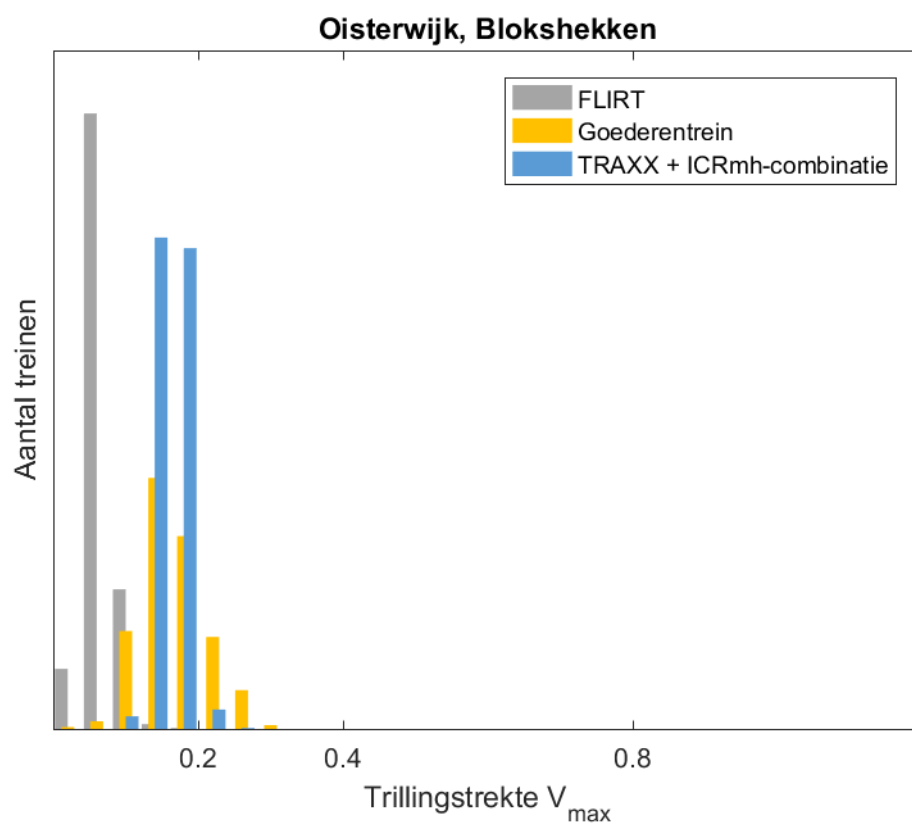
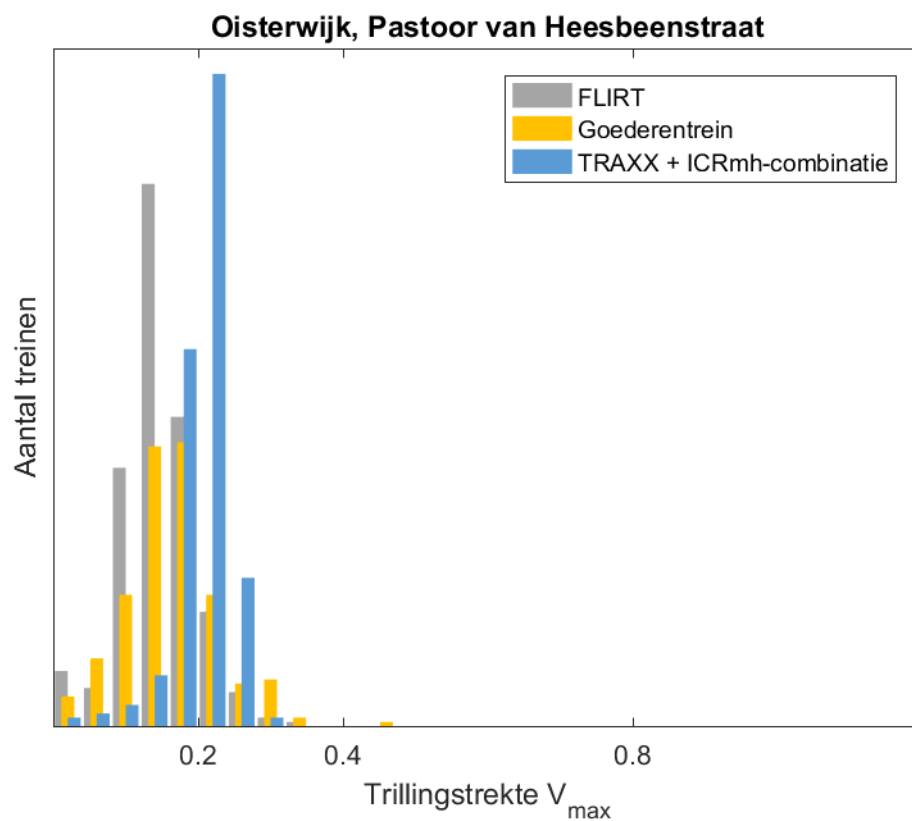
In deze paragraaf is voor de drie treintypes die op alle locaties reden een histogram opgenomen van de verdeling van de trillingssterkte op maaiveld.

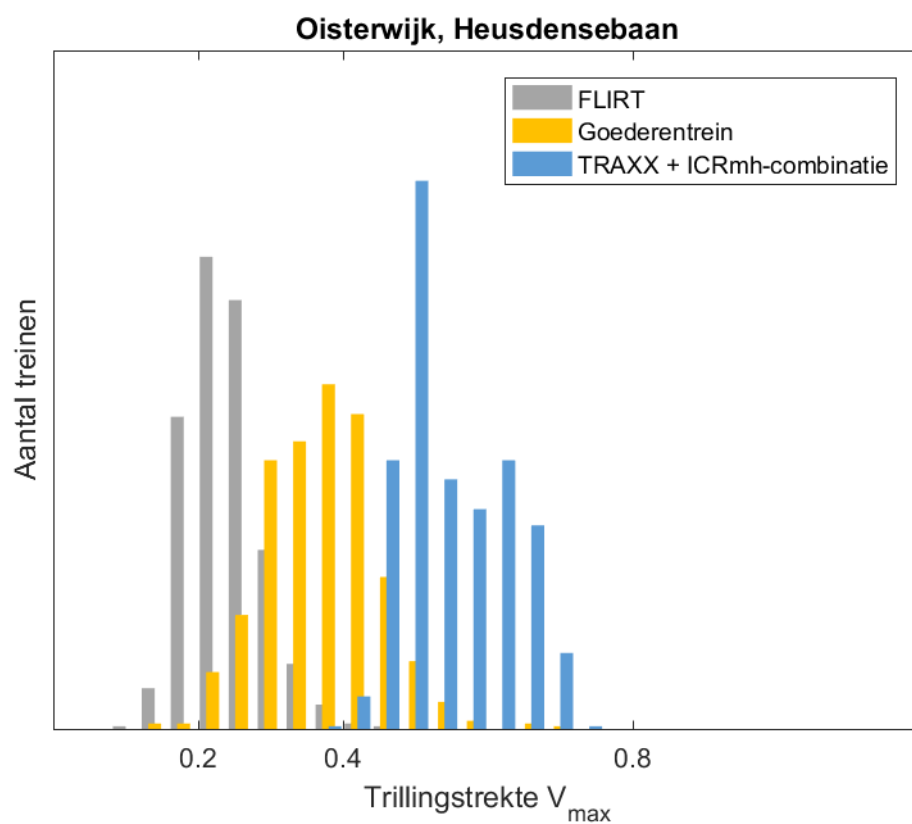
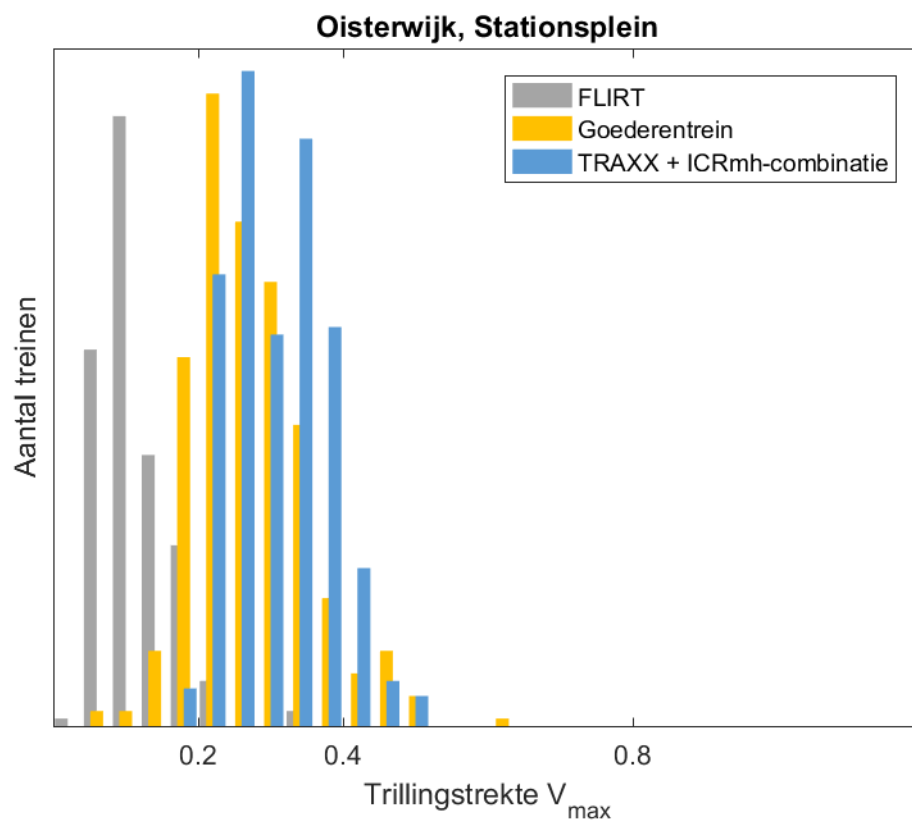






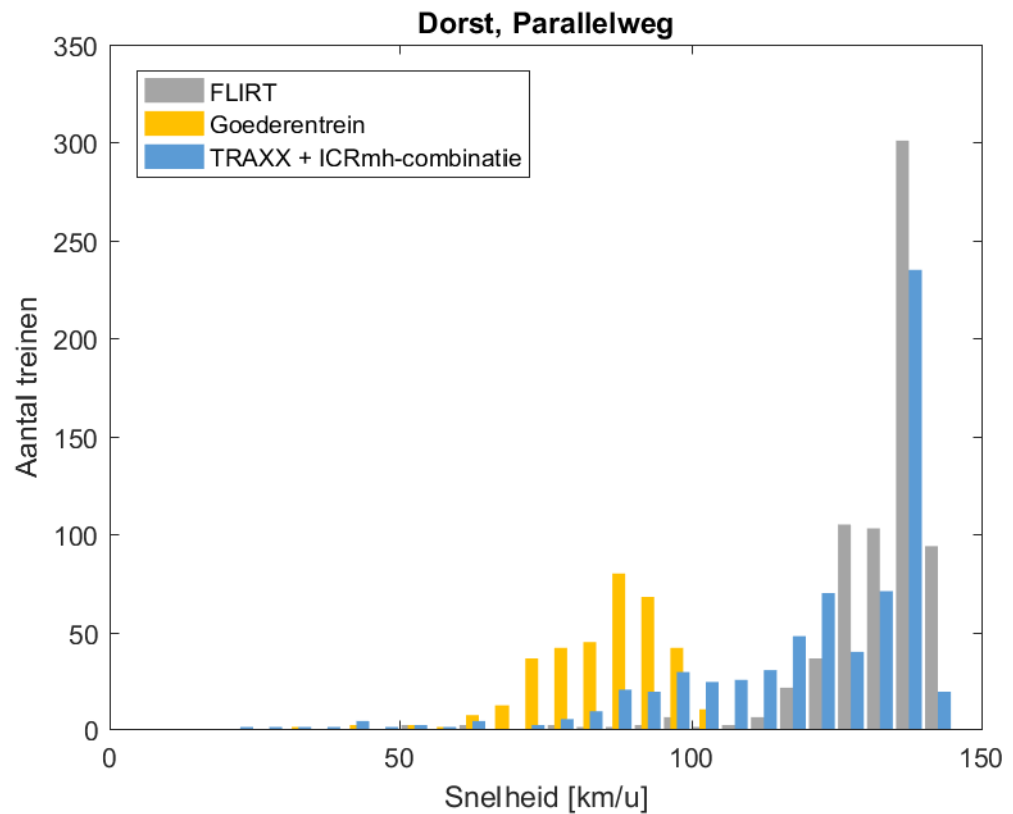


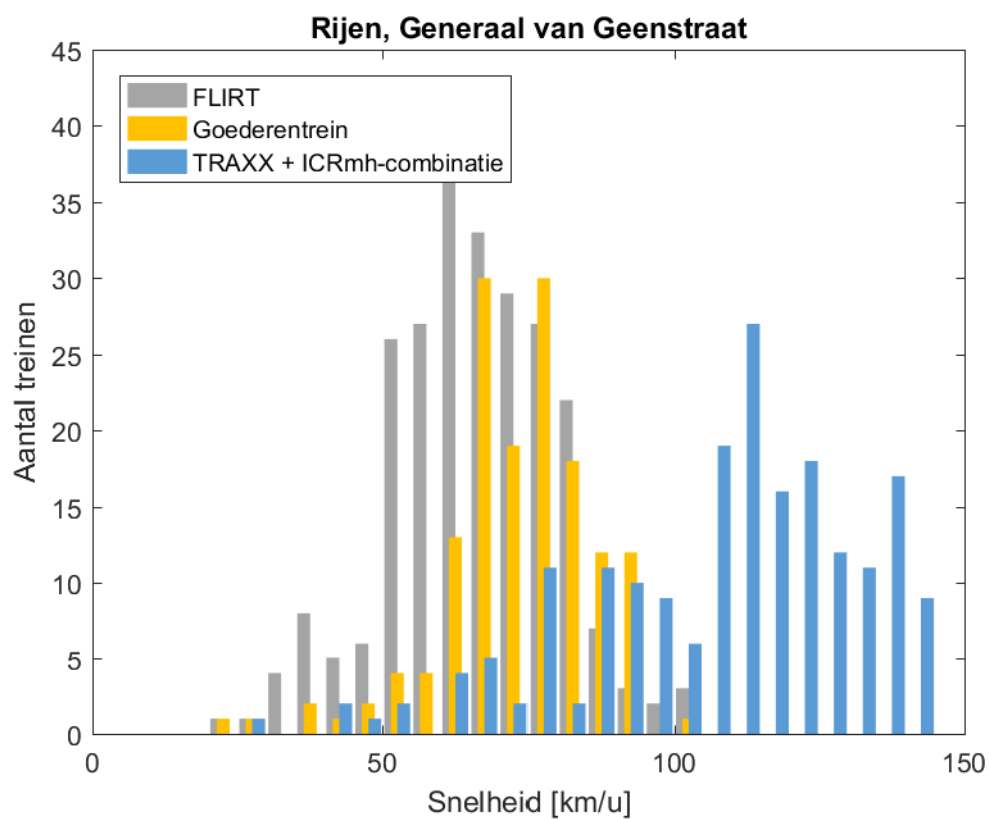
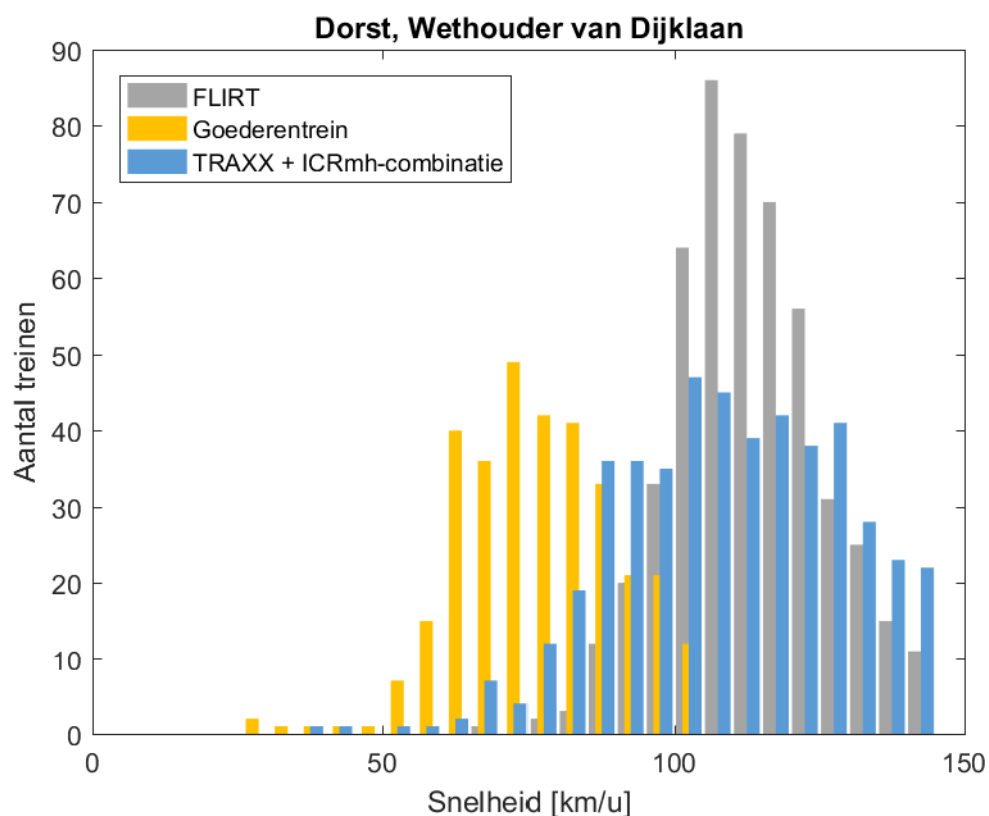


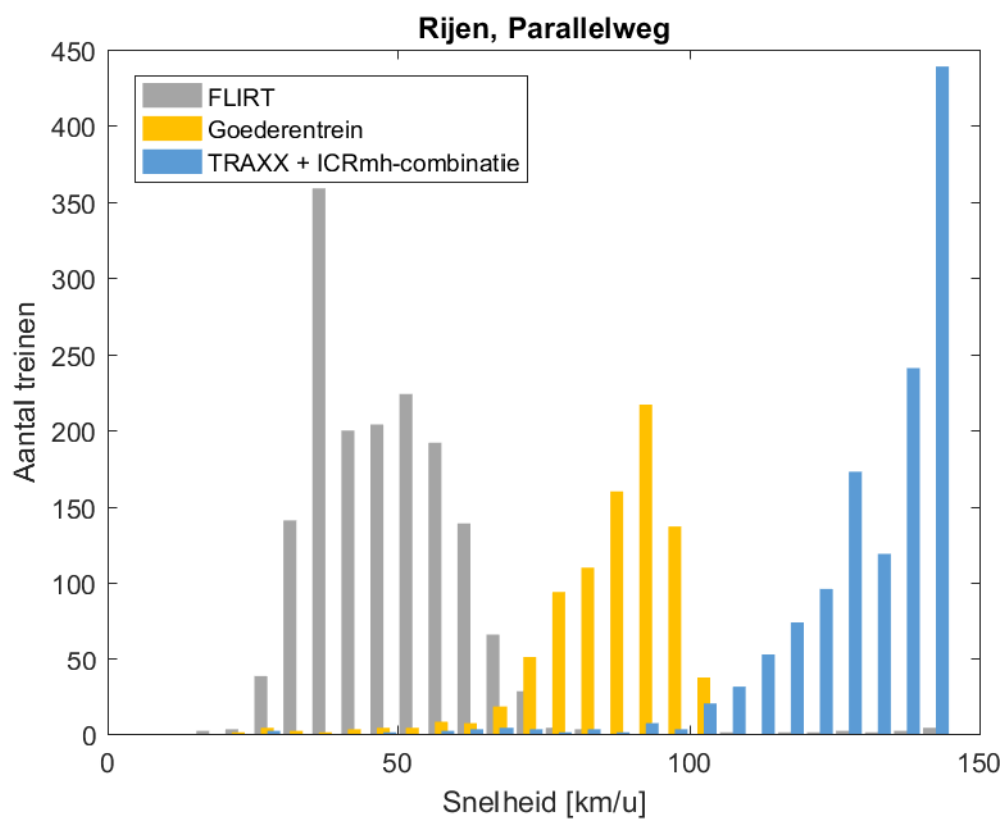
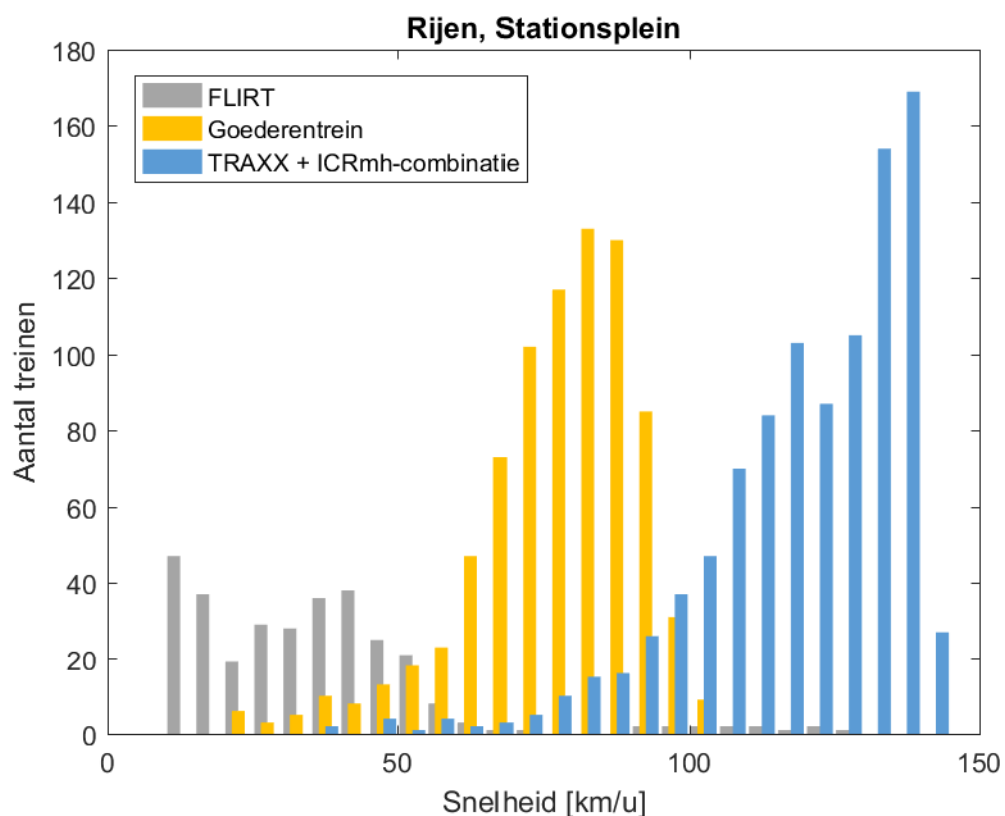


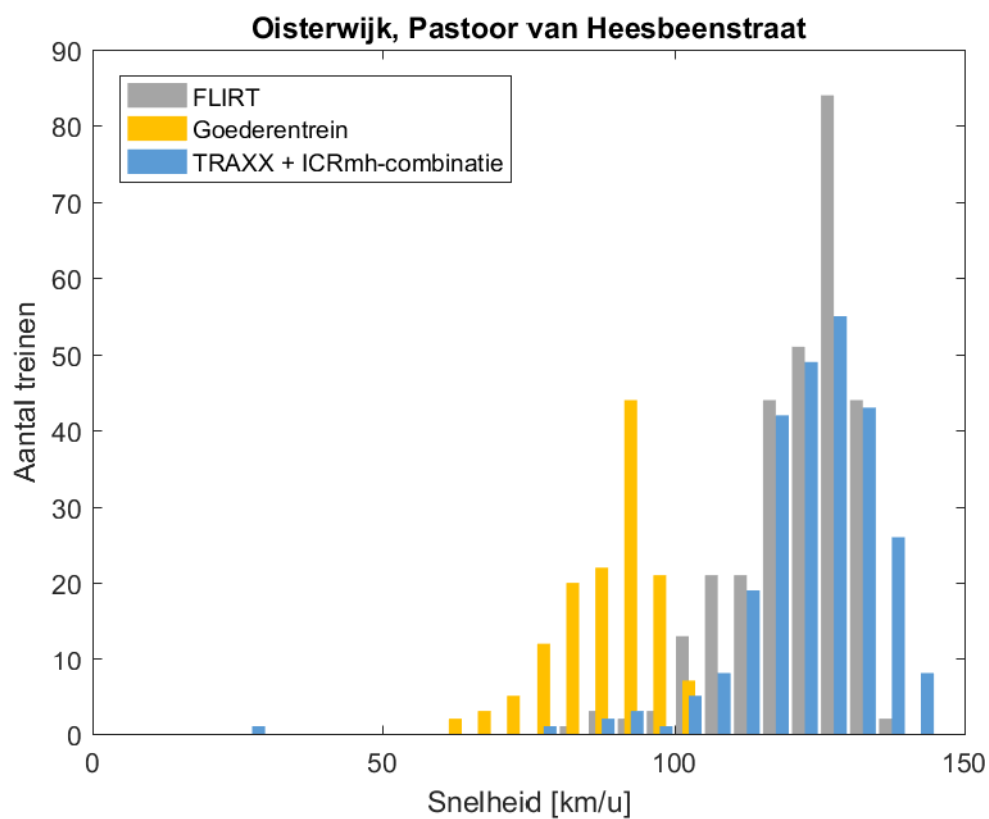
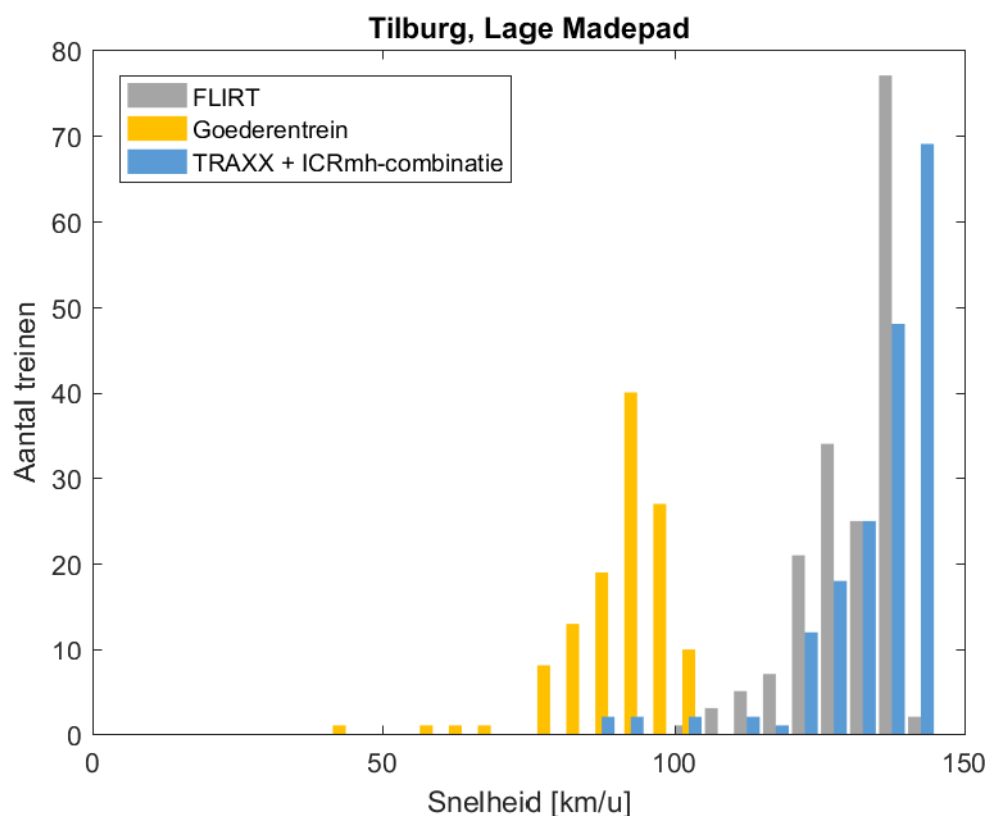
II.2 Histogrammen van rijksnelheid

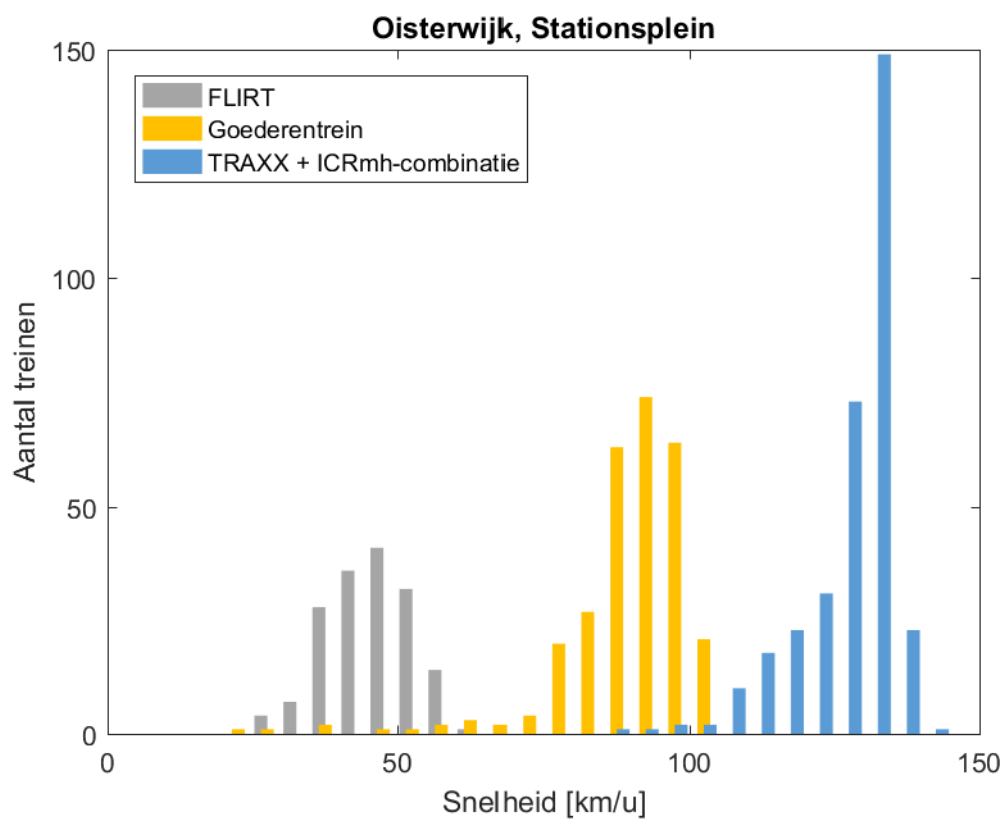
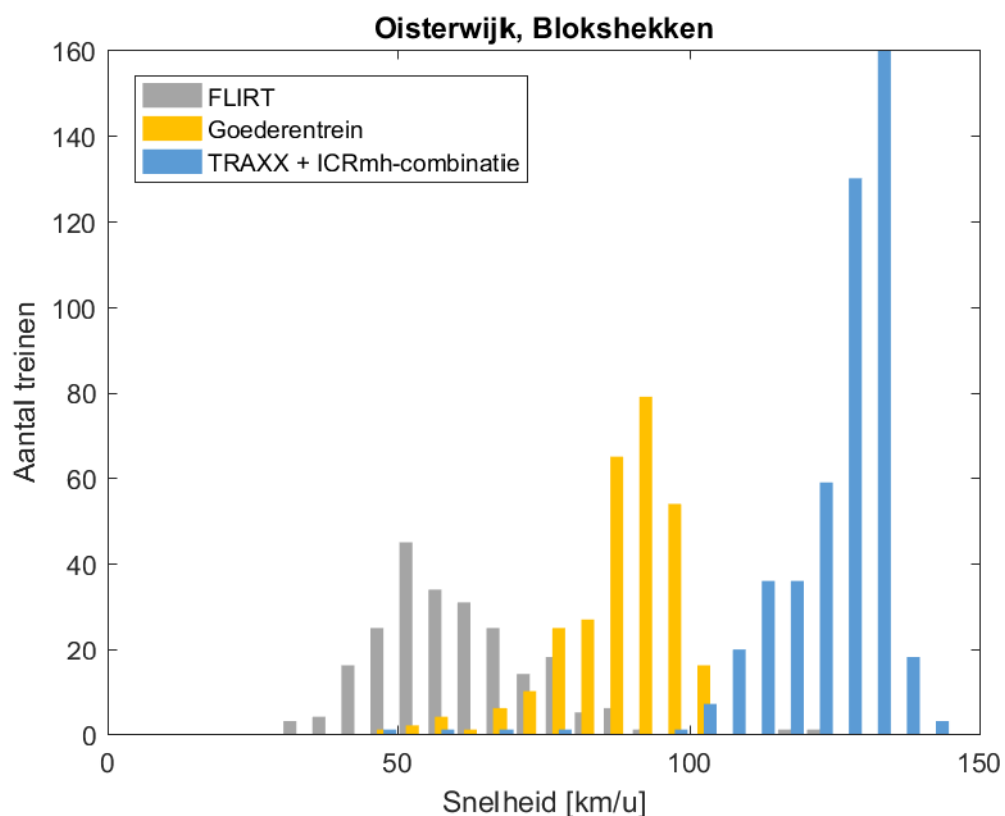
In deze paragraaf is voor de drie treintypes die op alle locaties reden een histogram opgenomen van de verdeling van de rijksnelheid. Alleen voor de locatie Tilburg, Insulindeplein zijn de snelheden niet getoond. Doordat treinen hier op een verhoogd talud reden, is de snelheidsbepaling hier minder betrouwbaar.

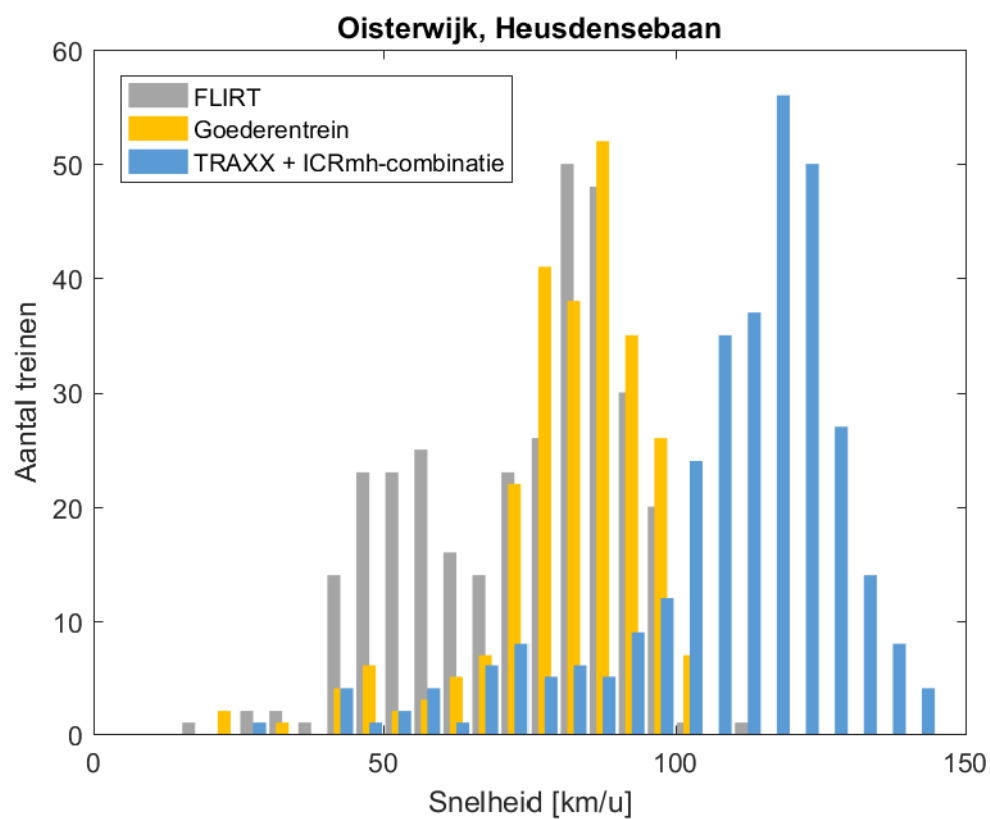






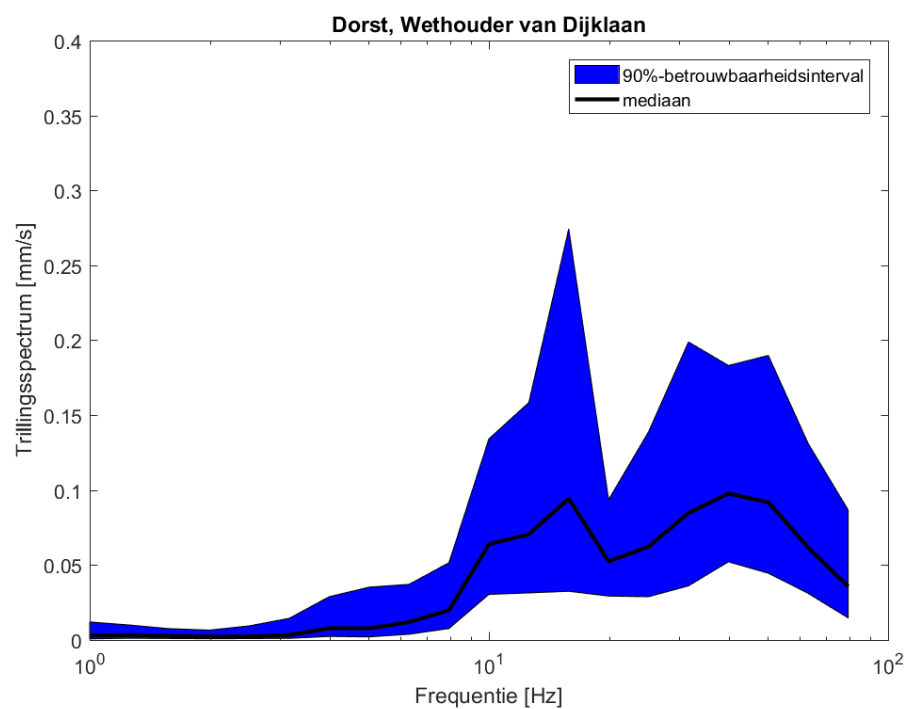
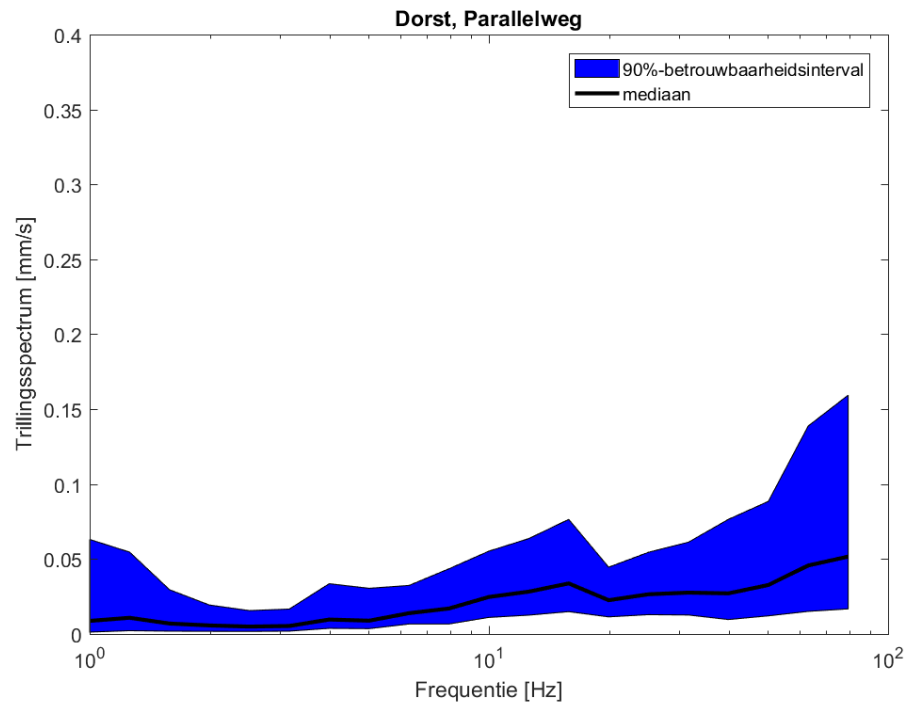


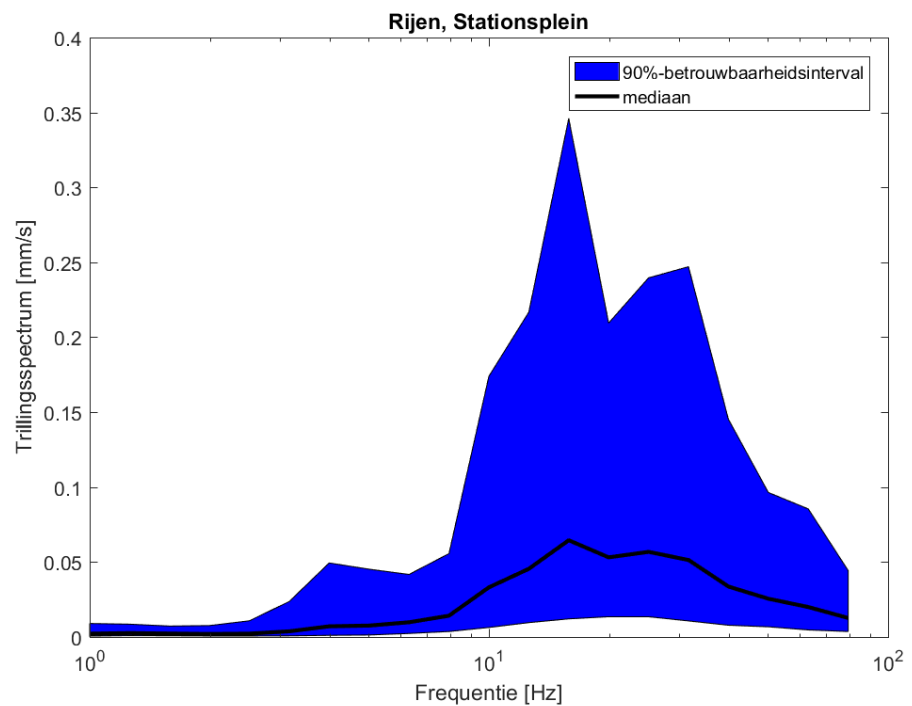
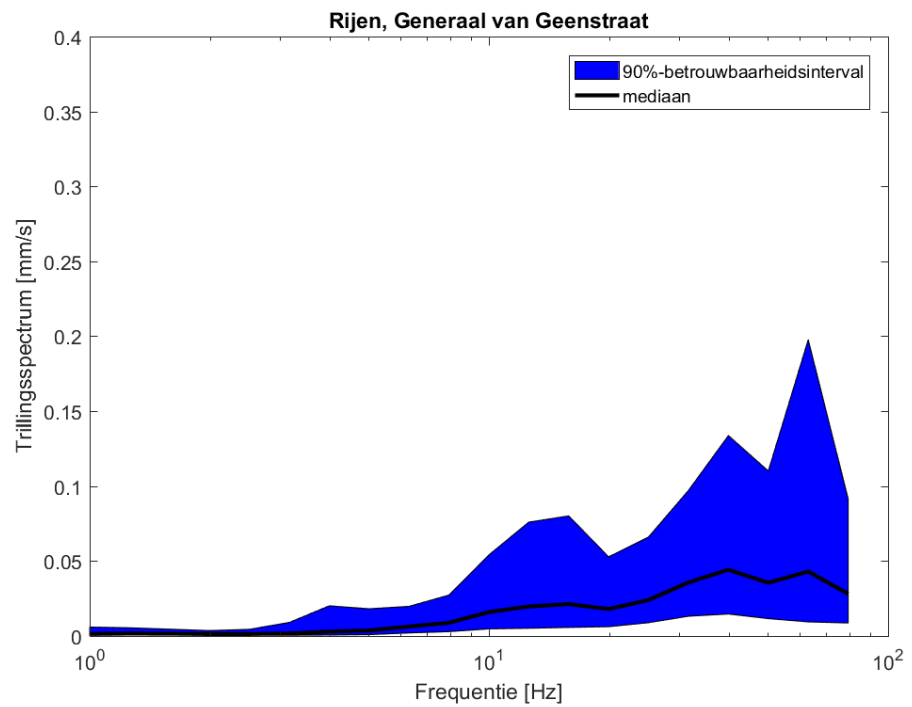


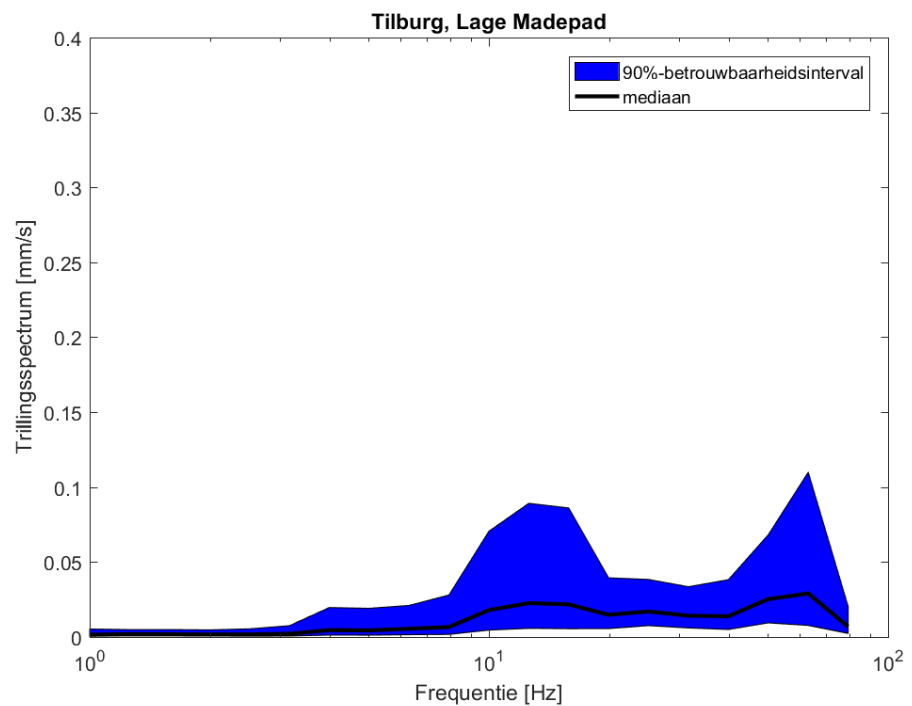
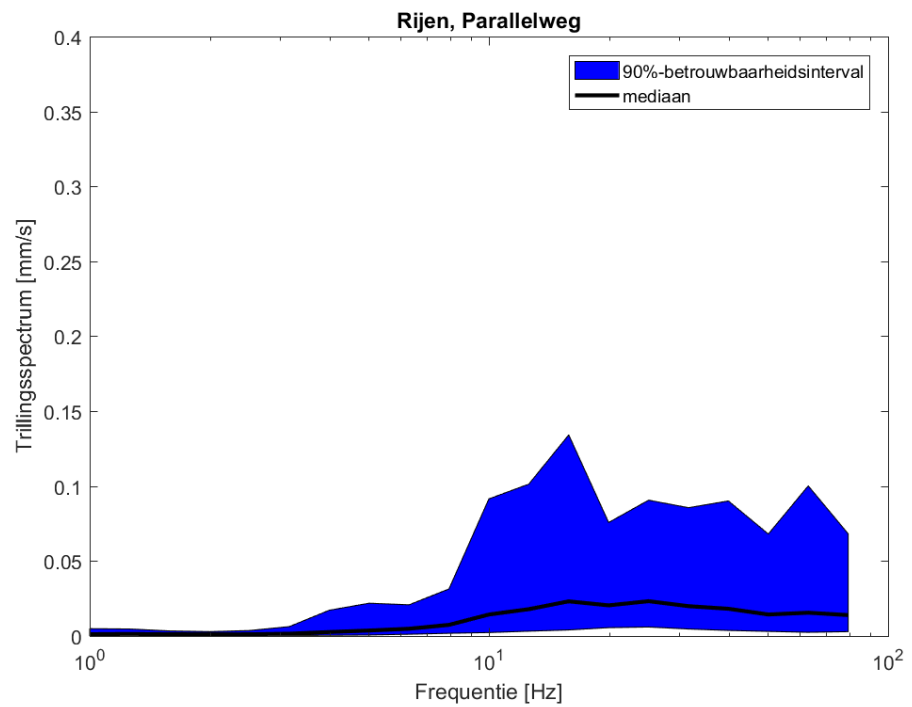


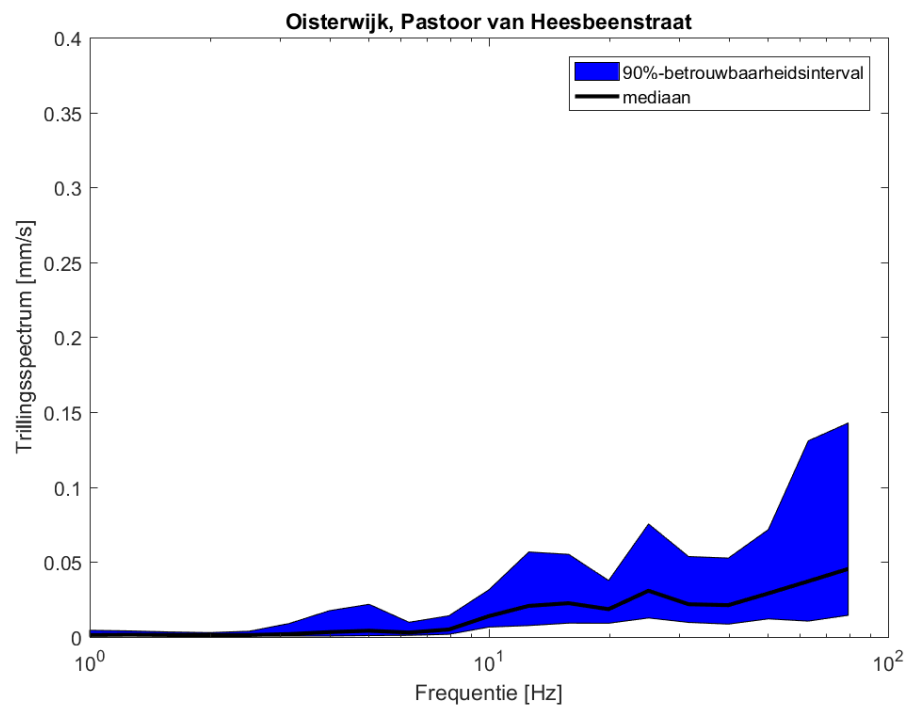
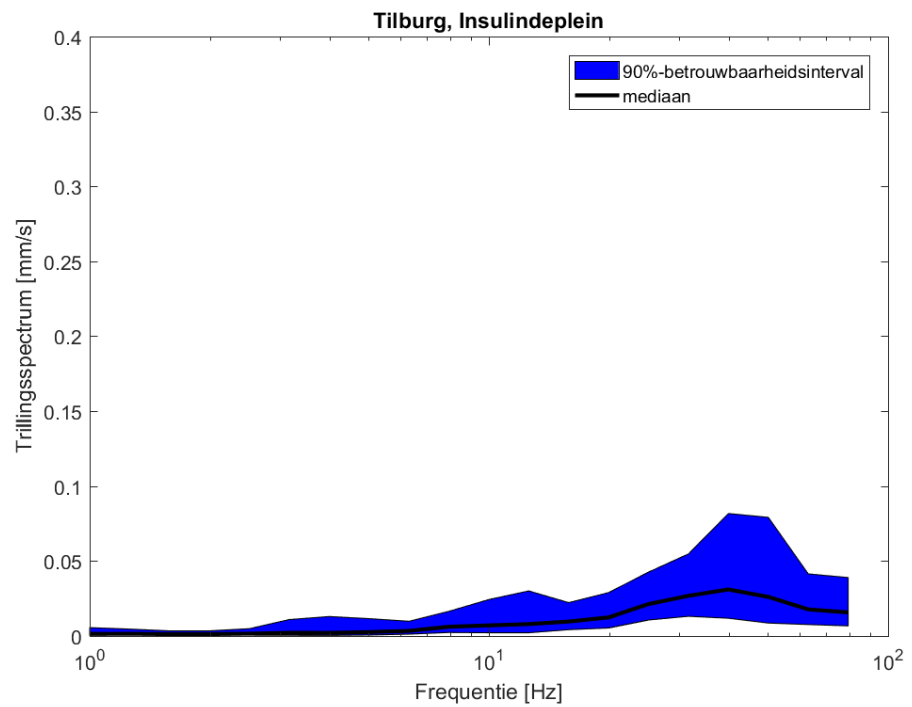
II.3 90% betrouwbaarheidsinterval van trillingsspectrum

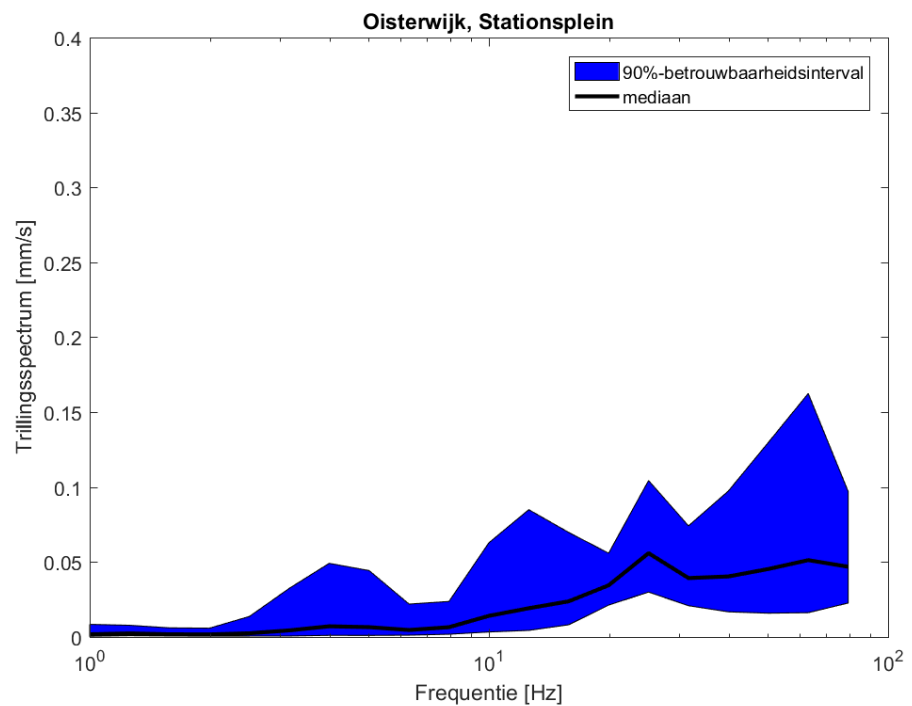
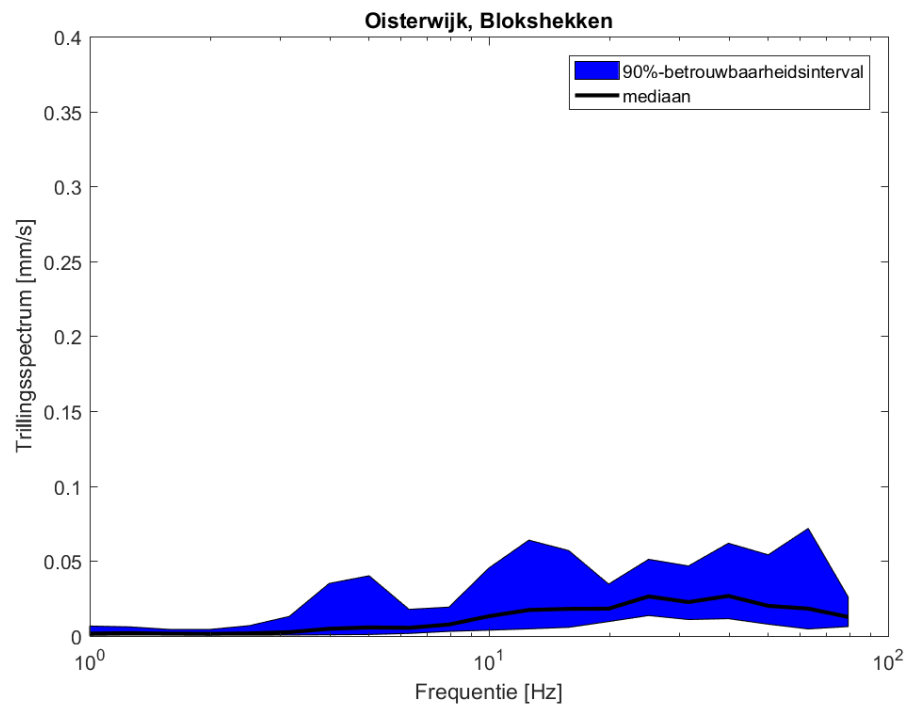
In deze paragraaf is van alle gemeten treinen het trillingsspectrum weergegeven, als 90% betrouwbaarheidsinterval.

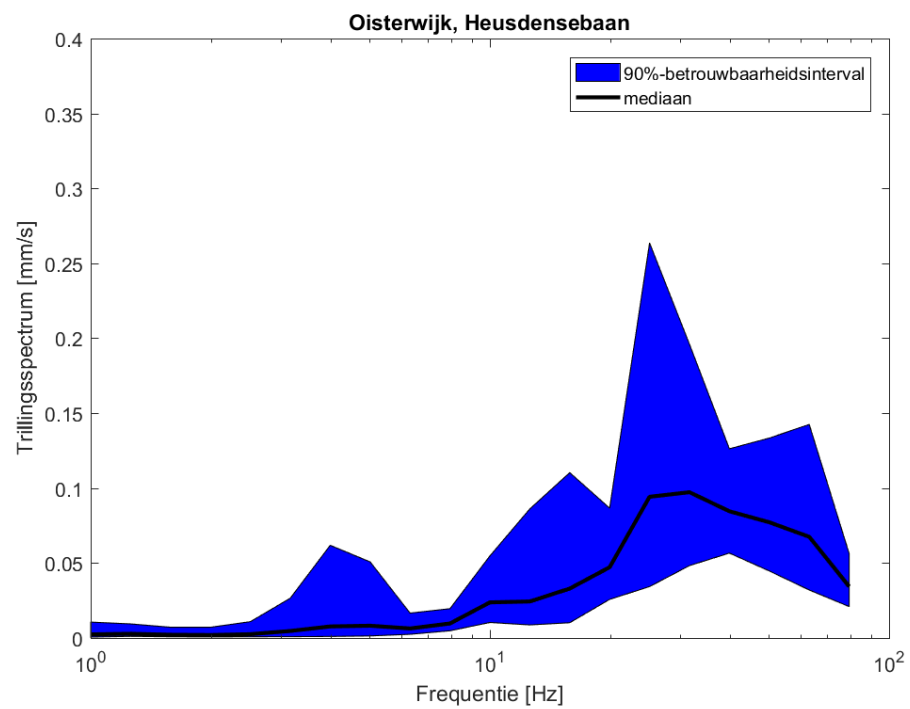






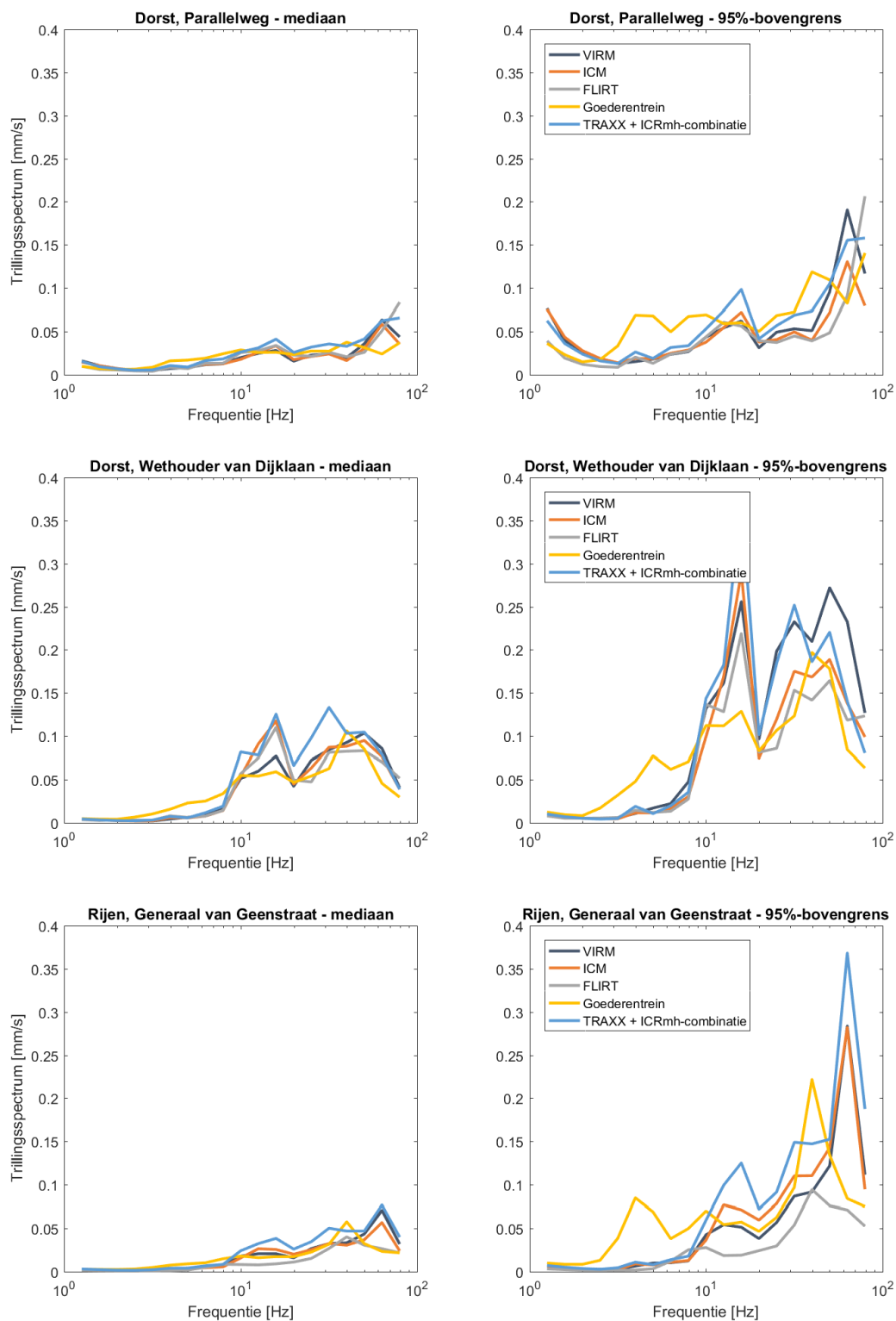


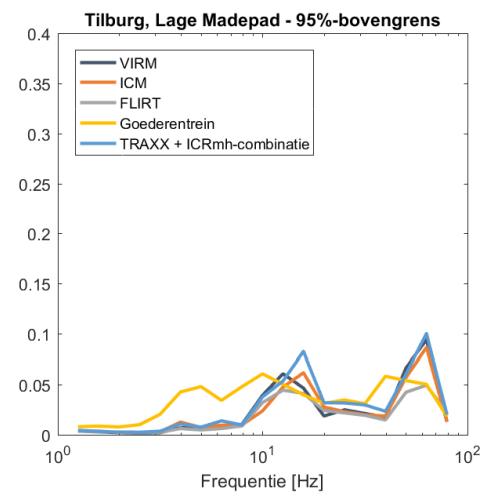
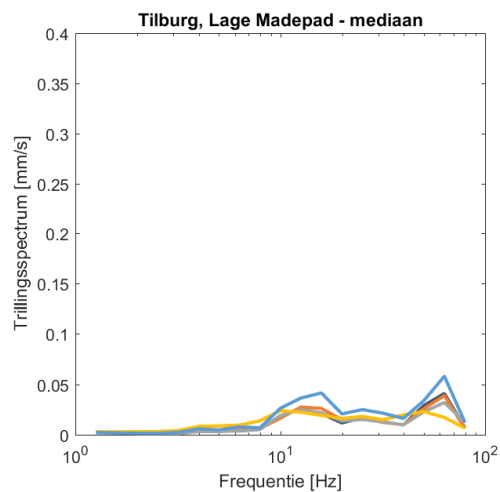
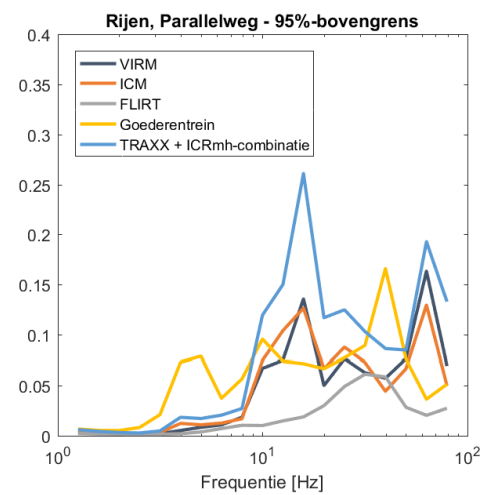
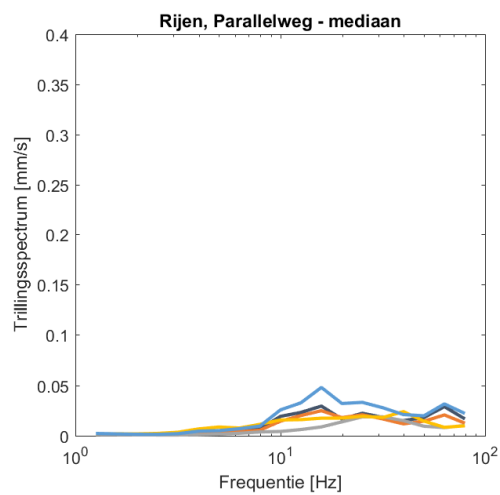
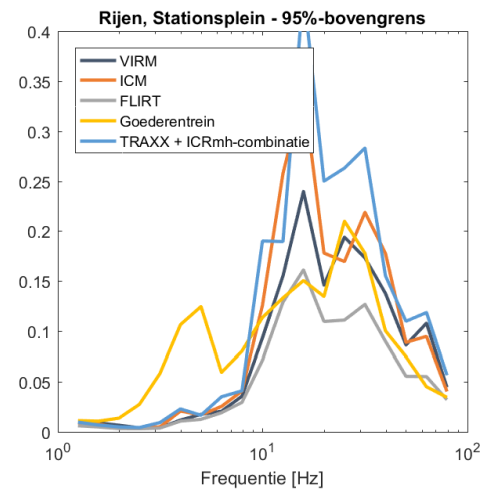
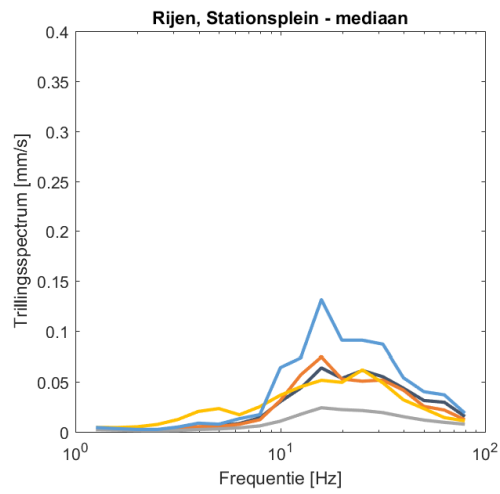


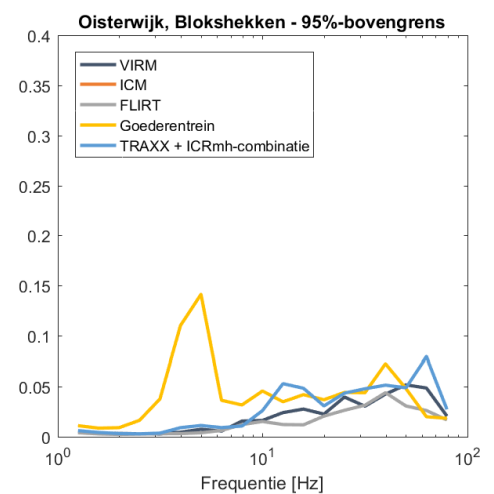
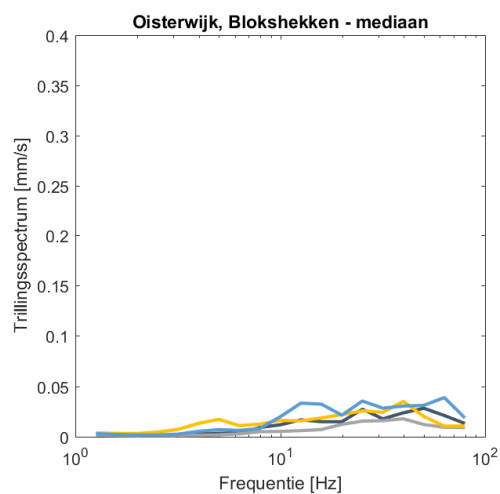
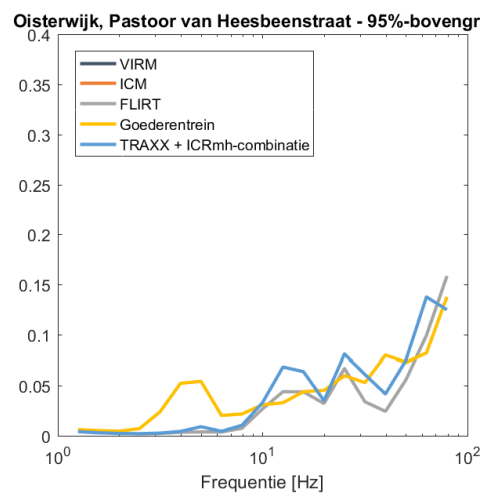
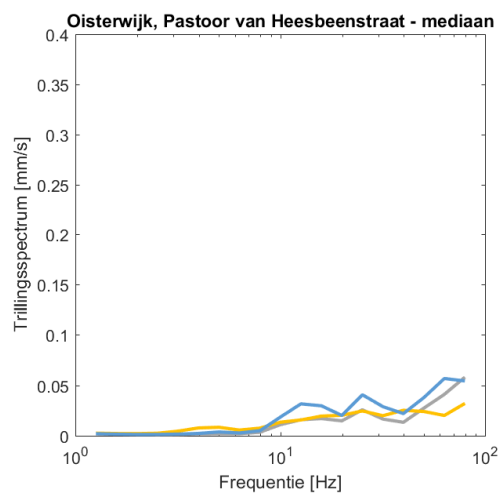
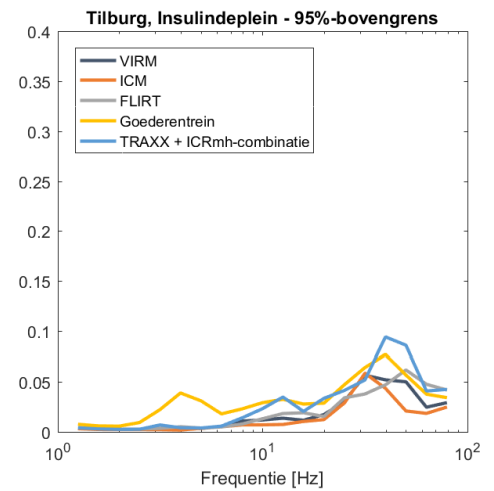
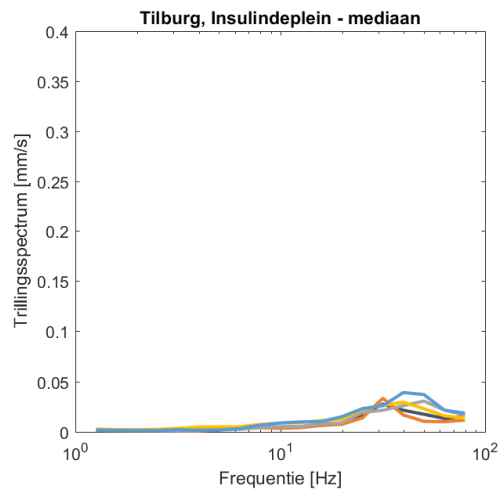


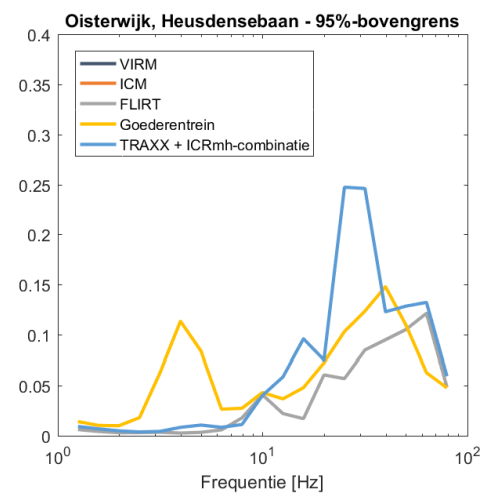
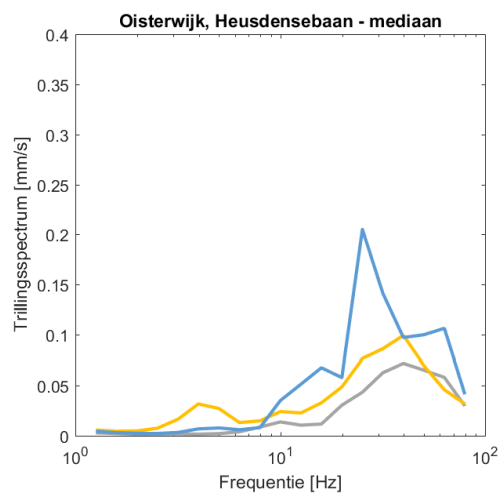
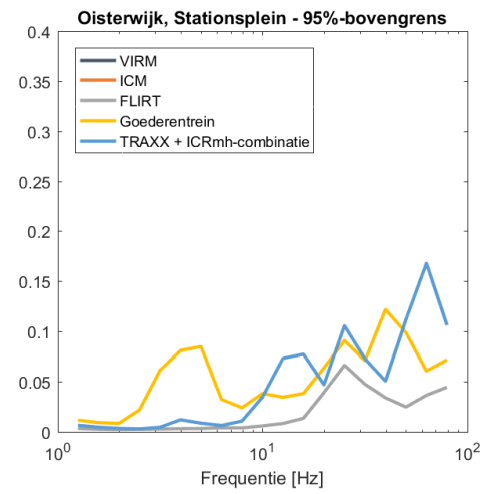
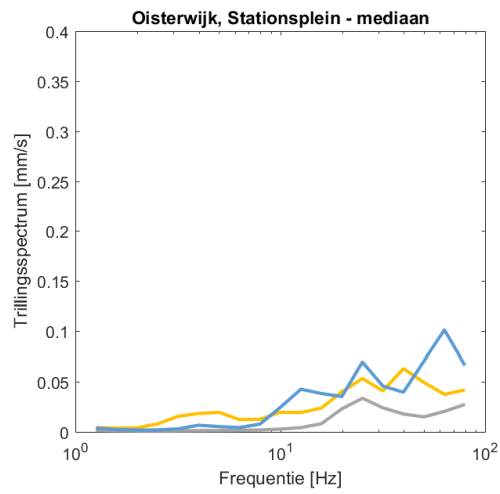
II.4 Trillingsspectrum per treintype

In deze paragraaf is van alle gemeten treintypes het gemiddelde (mediaan) en de 95%-bovengrens van het trillingsspectrum weergegeven.



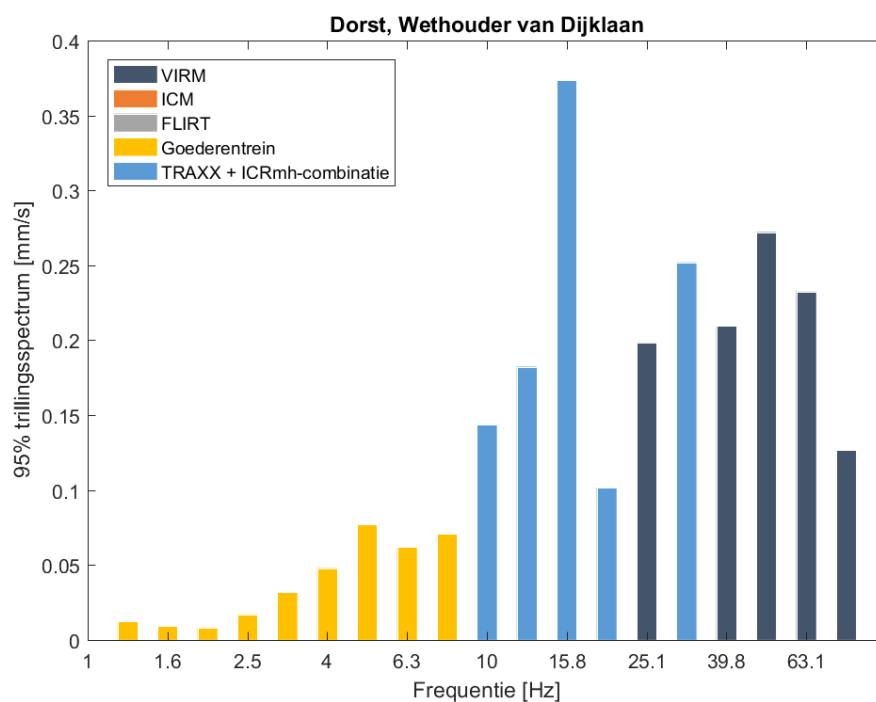
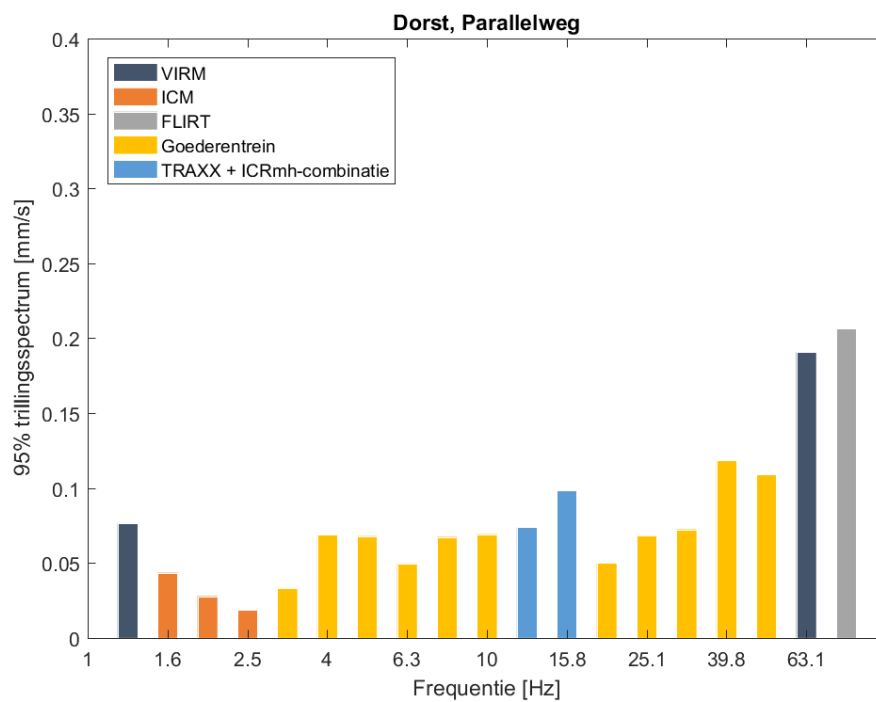


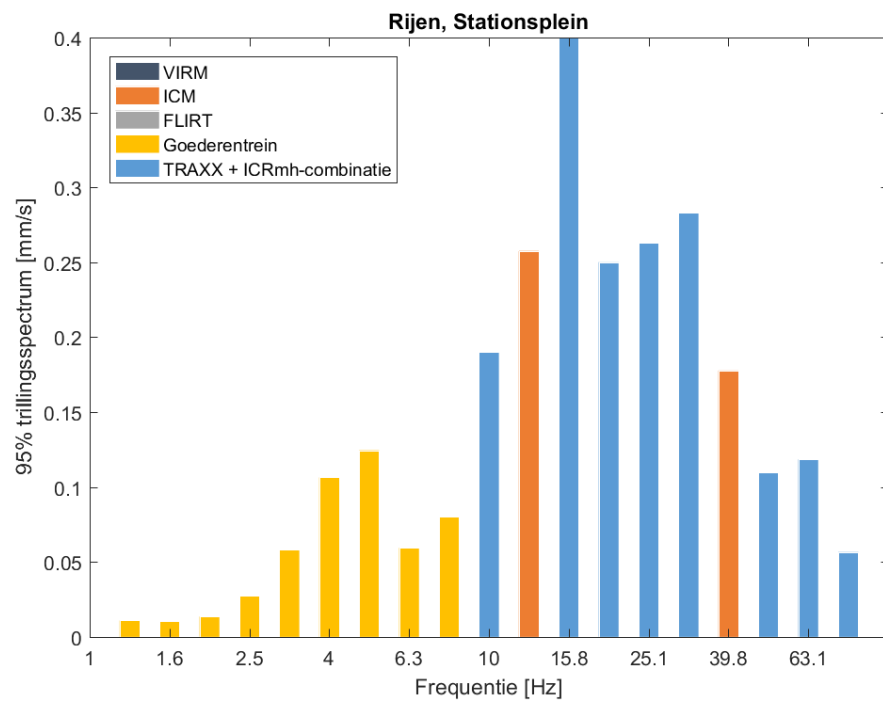
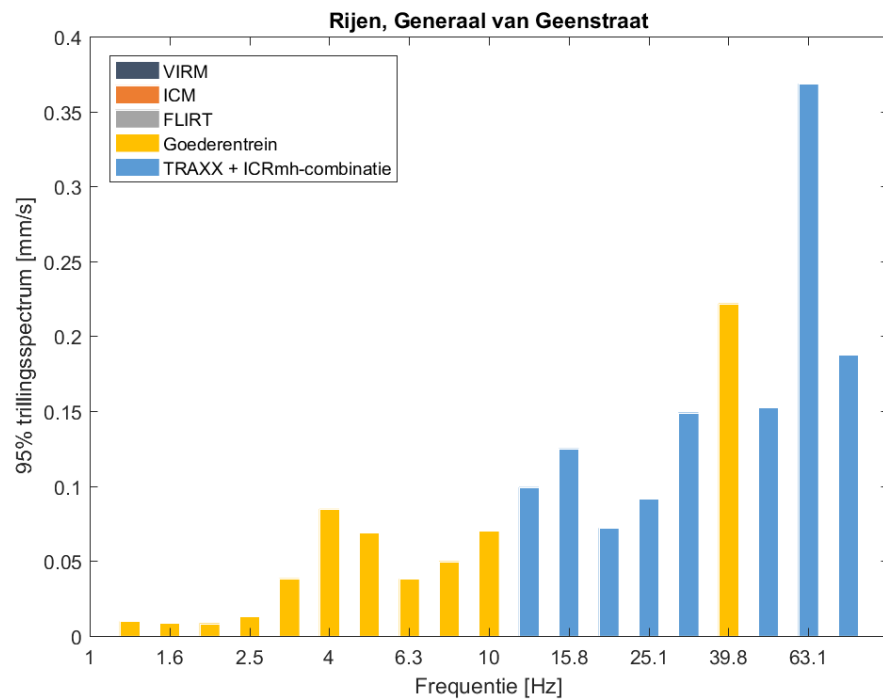


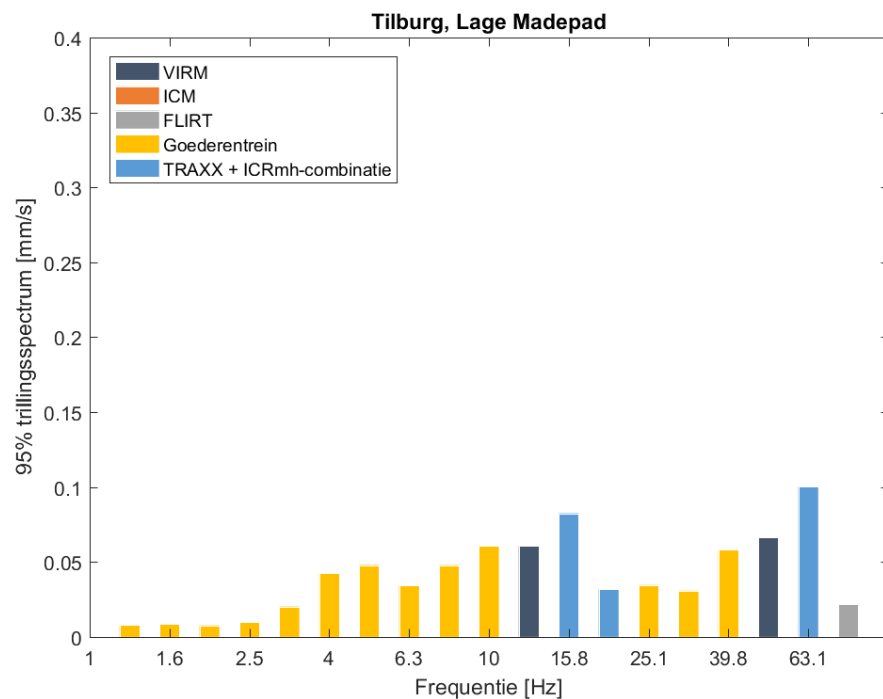
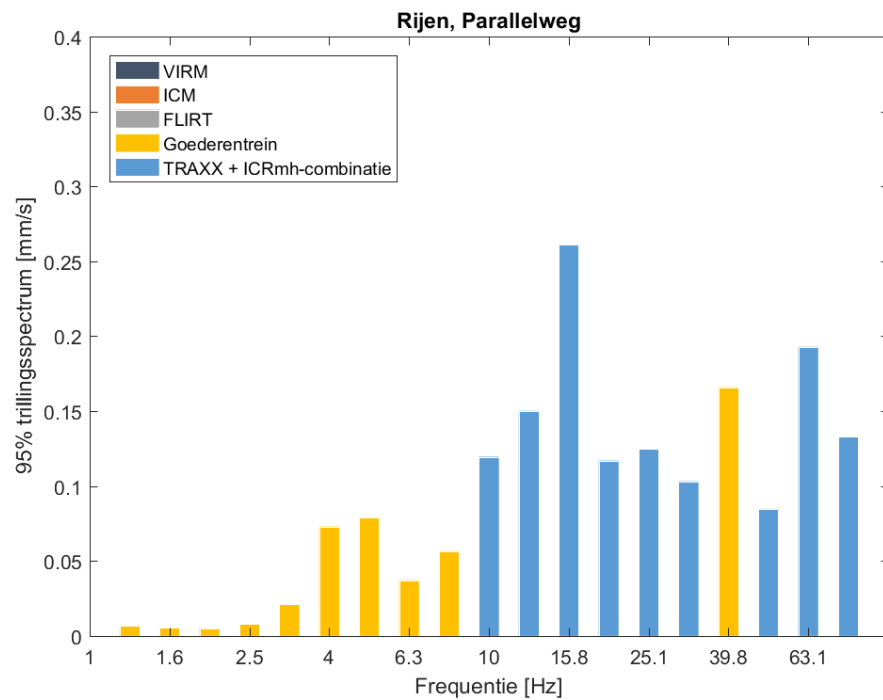


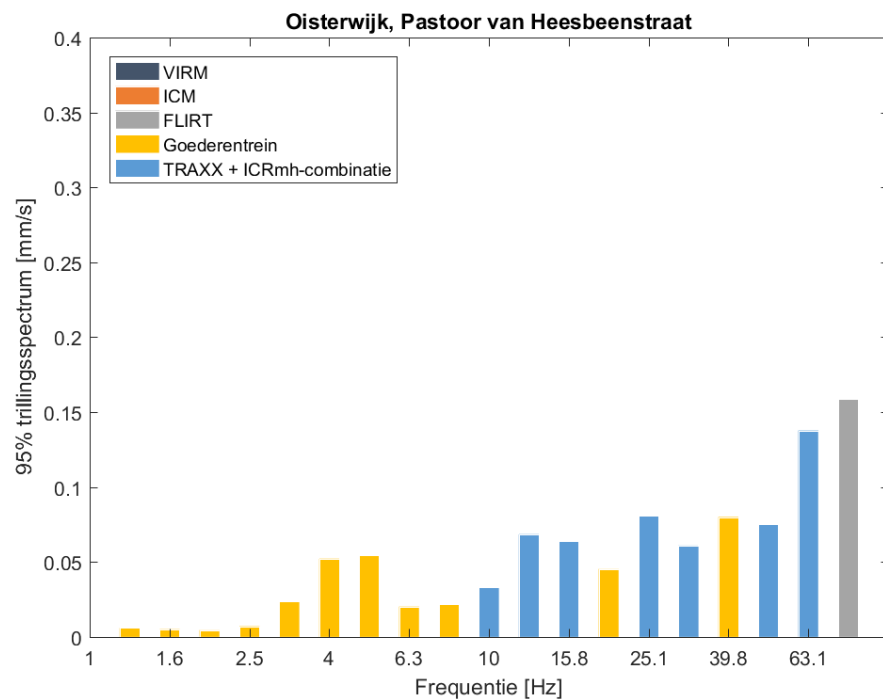
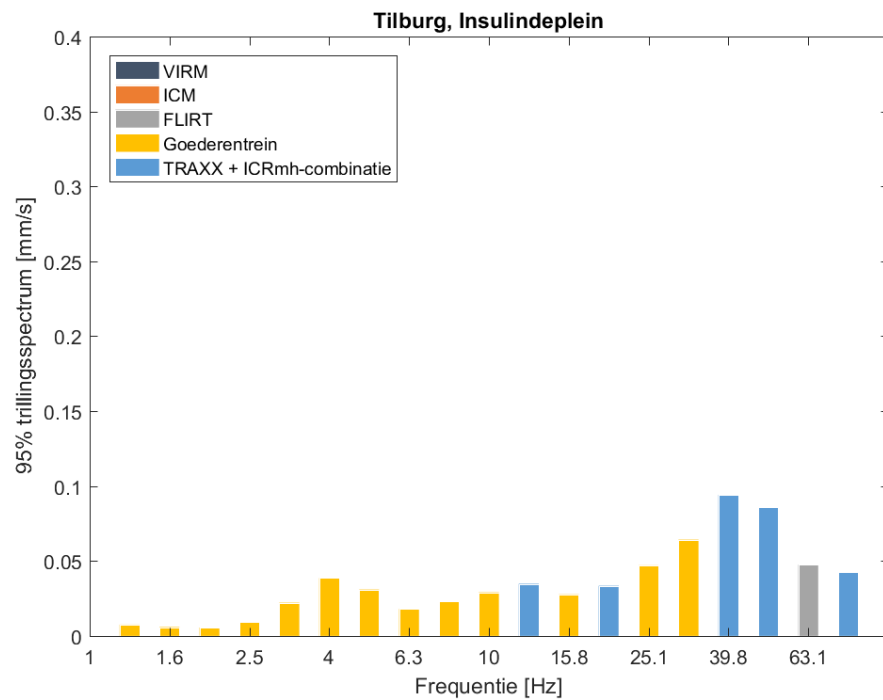
II.5 Maatgevend treintype per frequentie

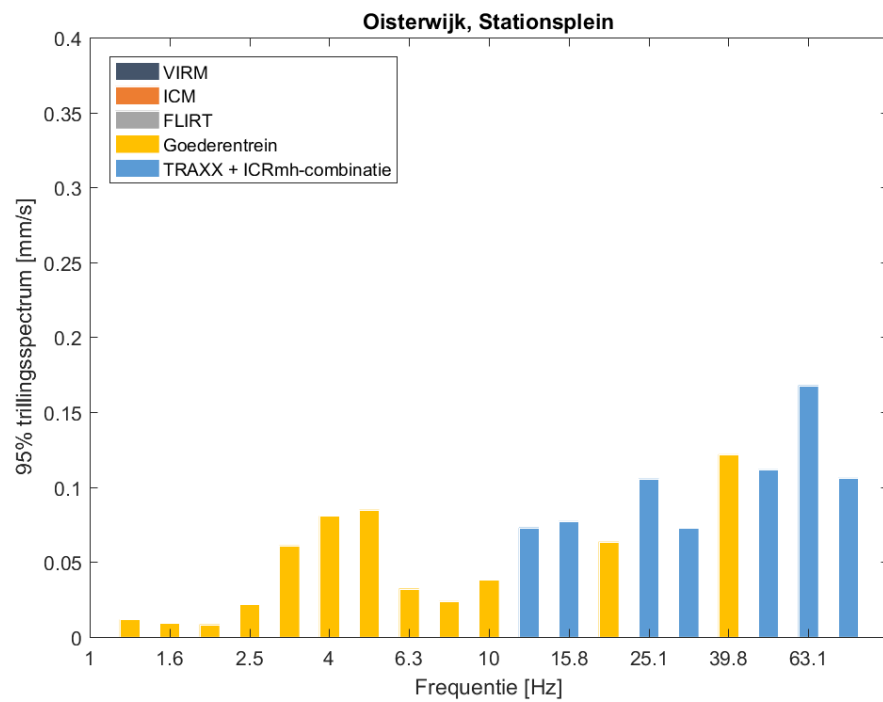
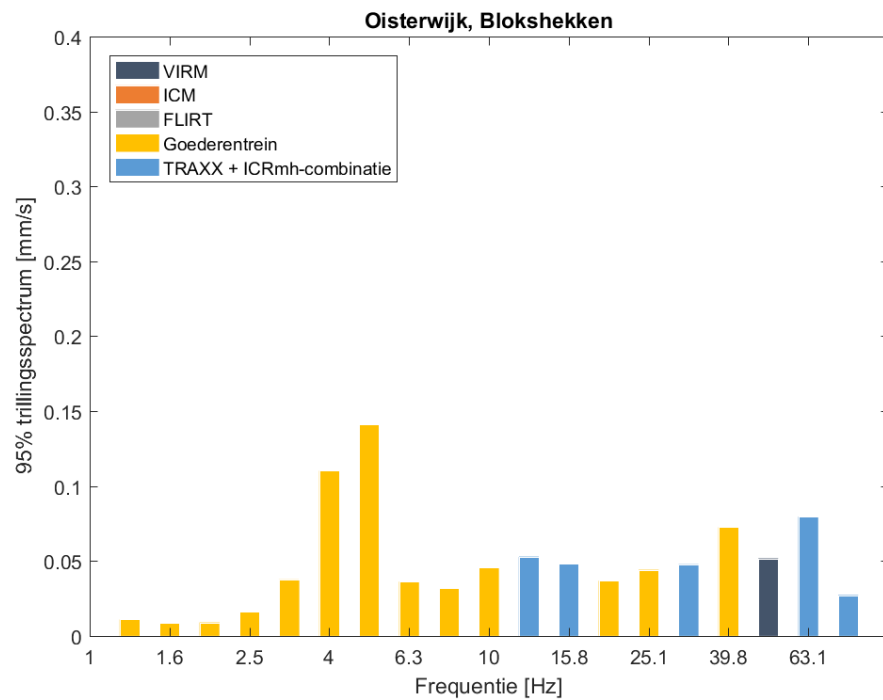
In deze paragraaf is het maatgevende treintype per trillingsfrequentie weergegeven, de hoogte van de staafjes correspondeert met de 95%-bovengrens van de trillingsspectra.

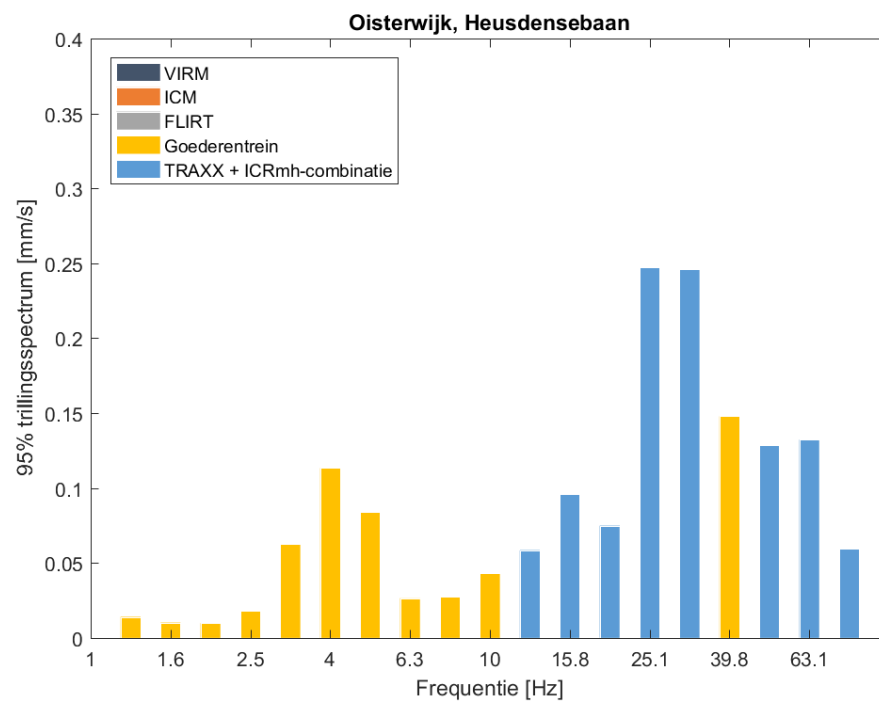






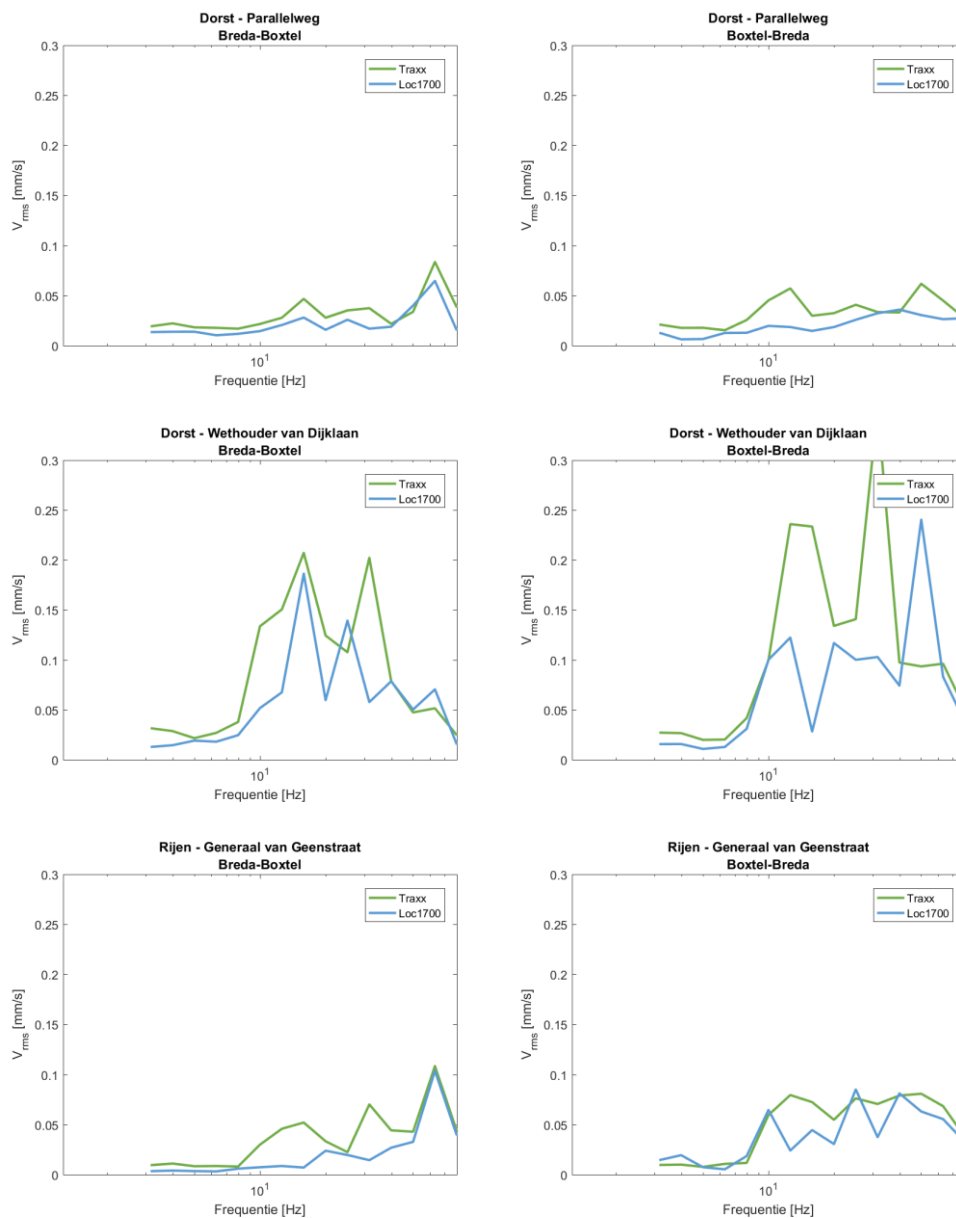


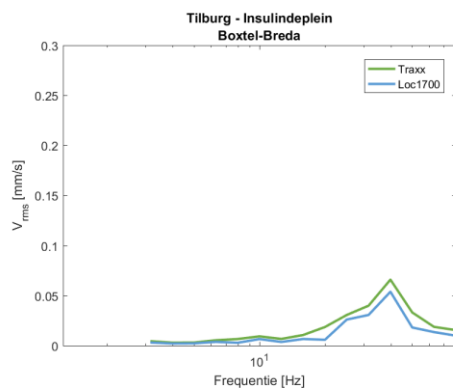
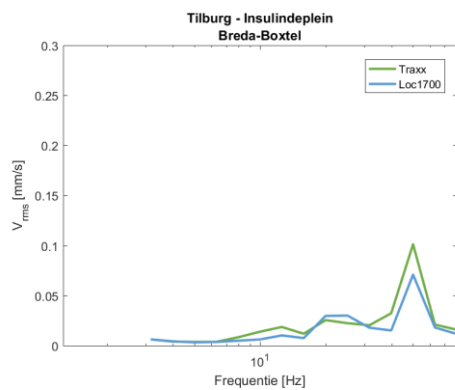
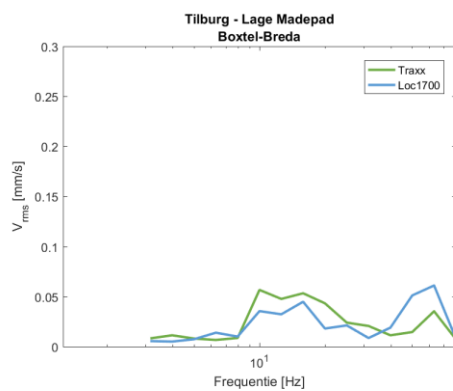
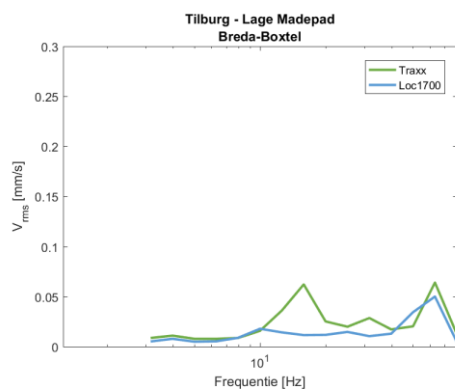
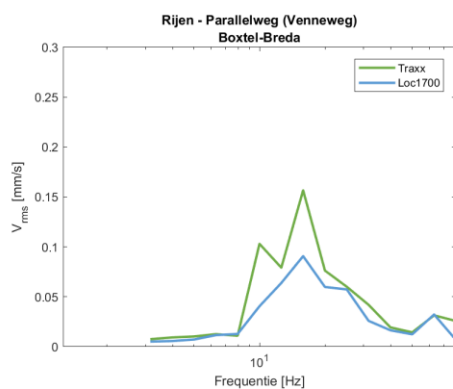
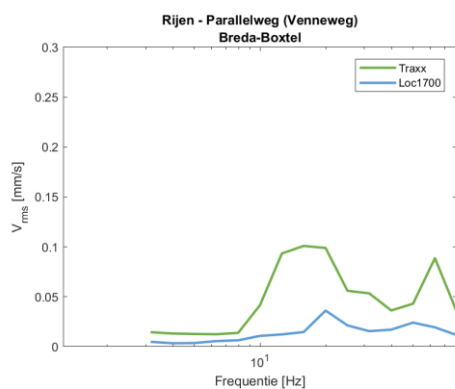
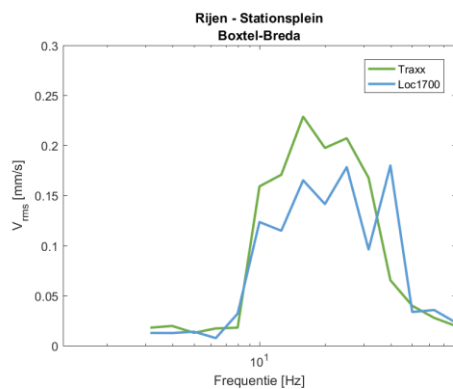
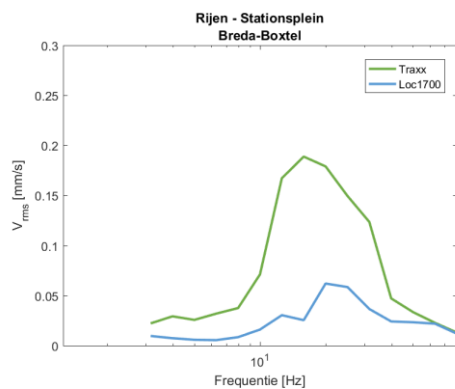


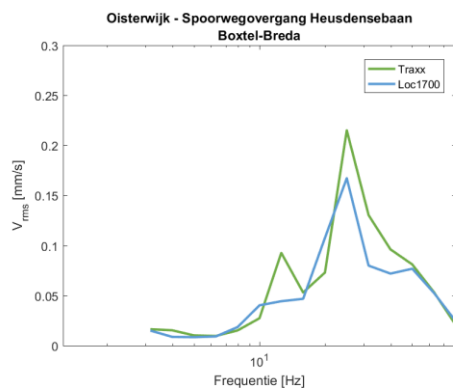
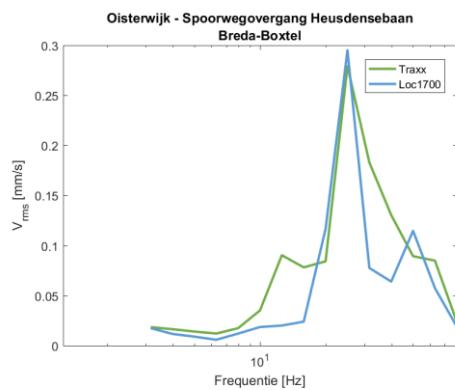
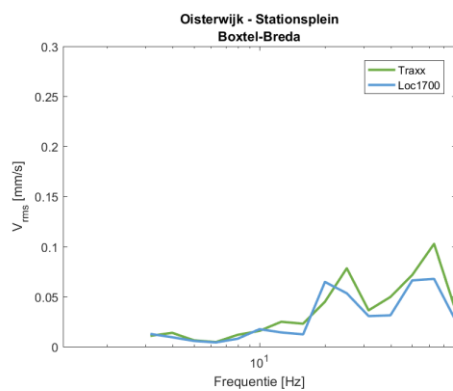
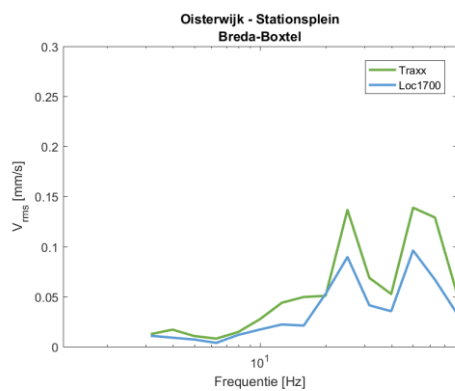
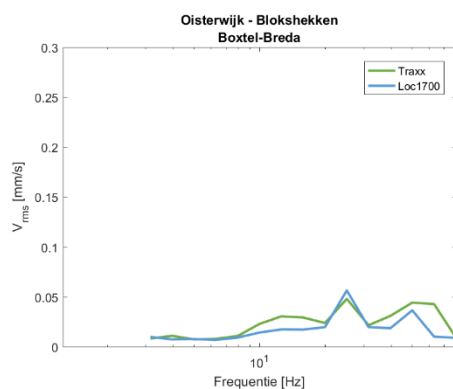
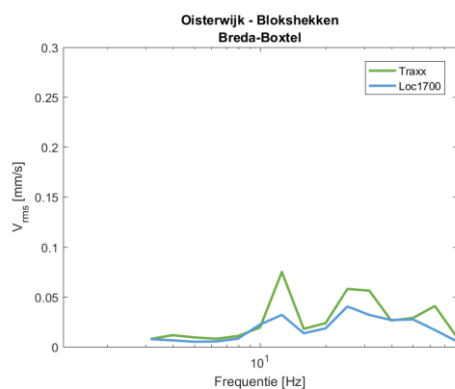
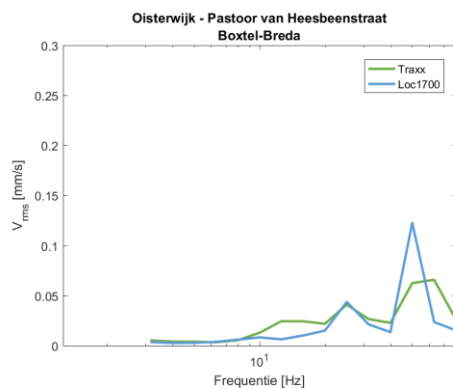
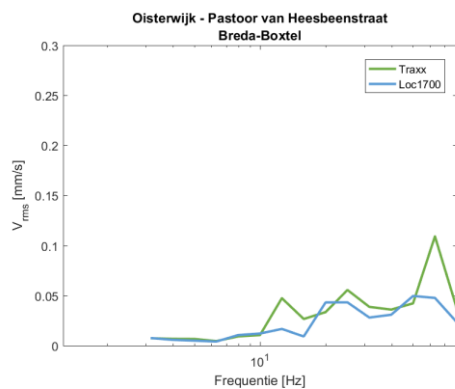


II.6 Trillingsspectrum van TRAXX-locomotief en loc1700

In deze paragraaf is het gemiddelde spectra van alle gepasseerde TRAXX-locomotieven vergeleken met dat van een gemeten loc1700. Merk op dat de loc1700 slechts een voertuig betreft tijdens meerdere passages, waarbij onbekend is of dit juist een t.a.v. trillingen ‘goed’ of ‘slecht’ voertuig was.

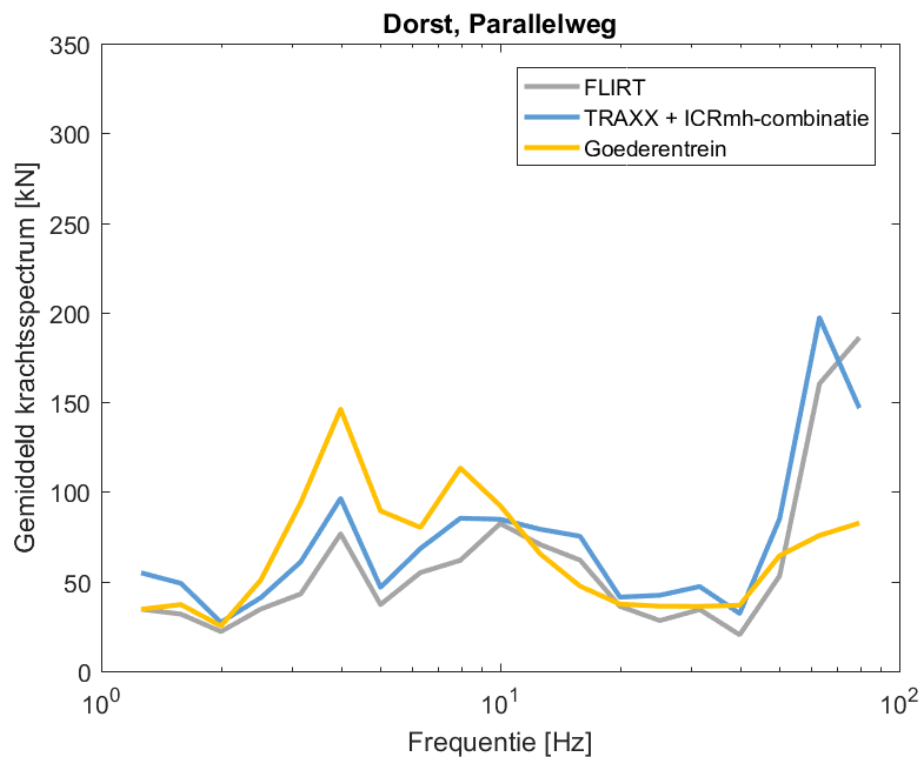


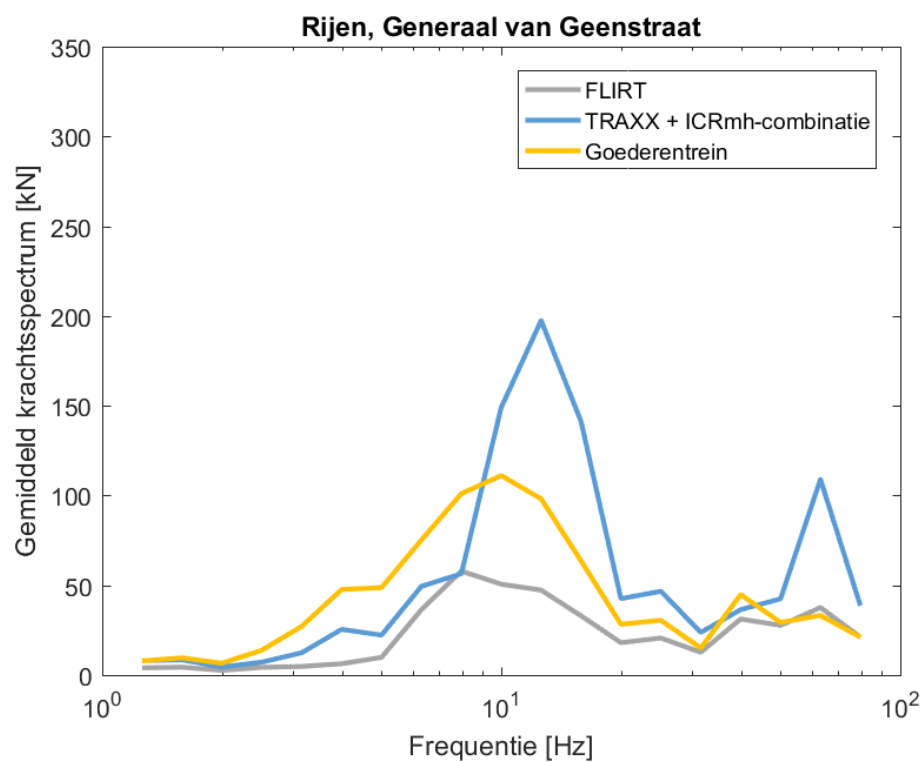
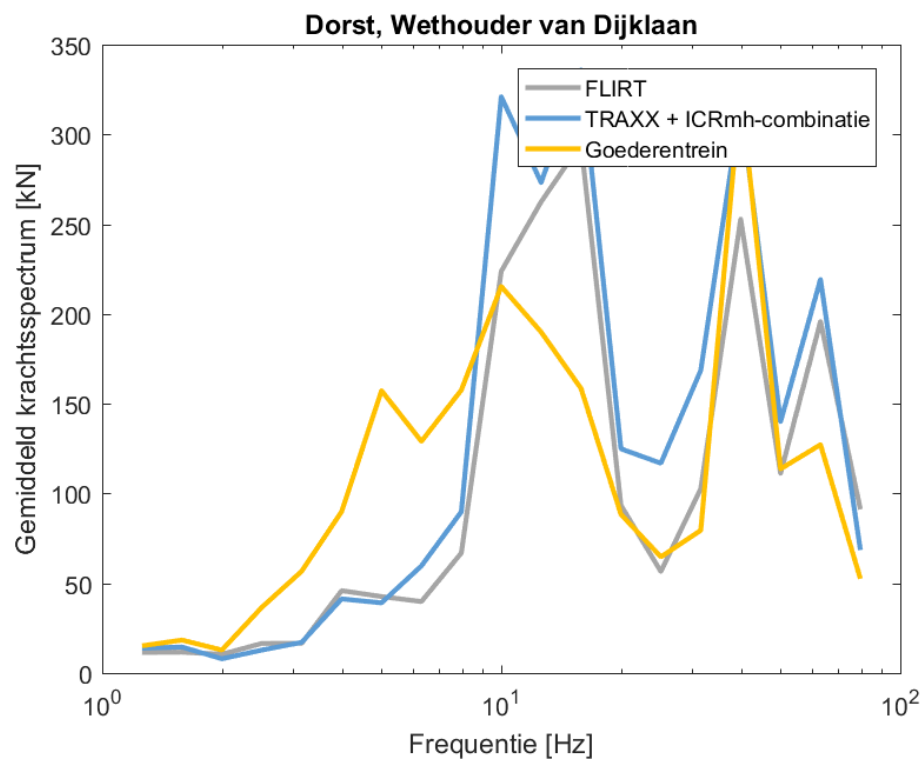


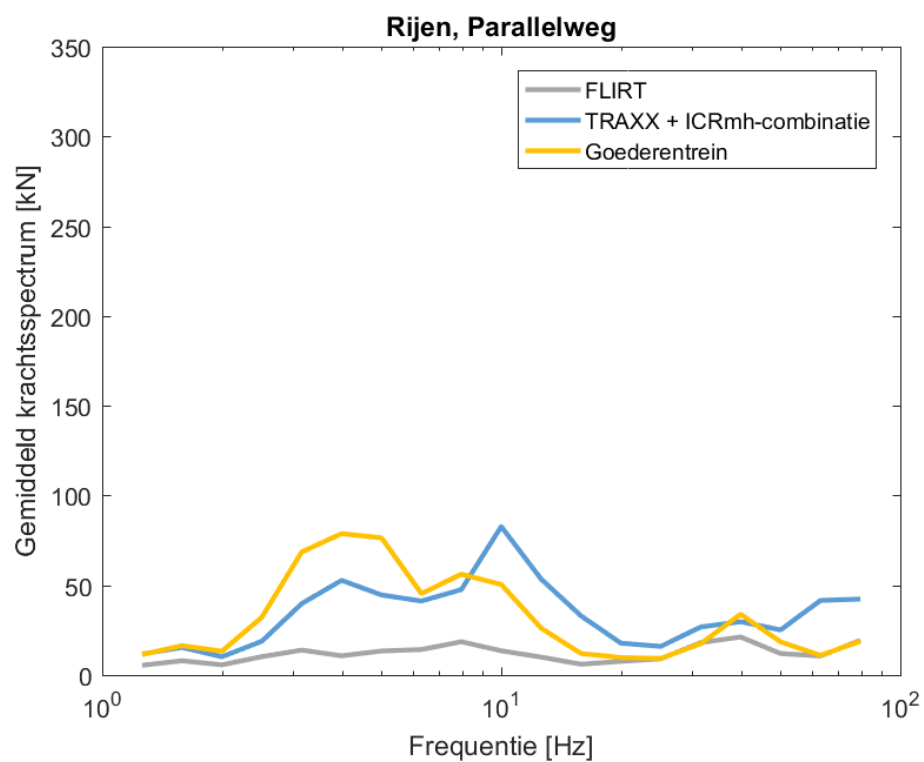
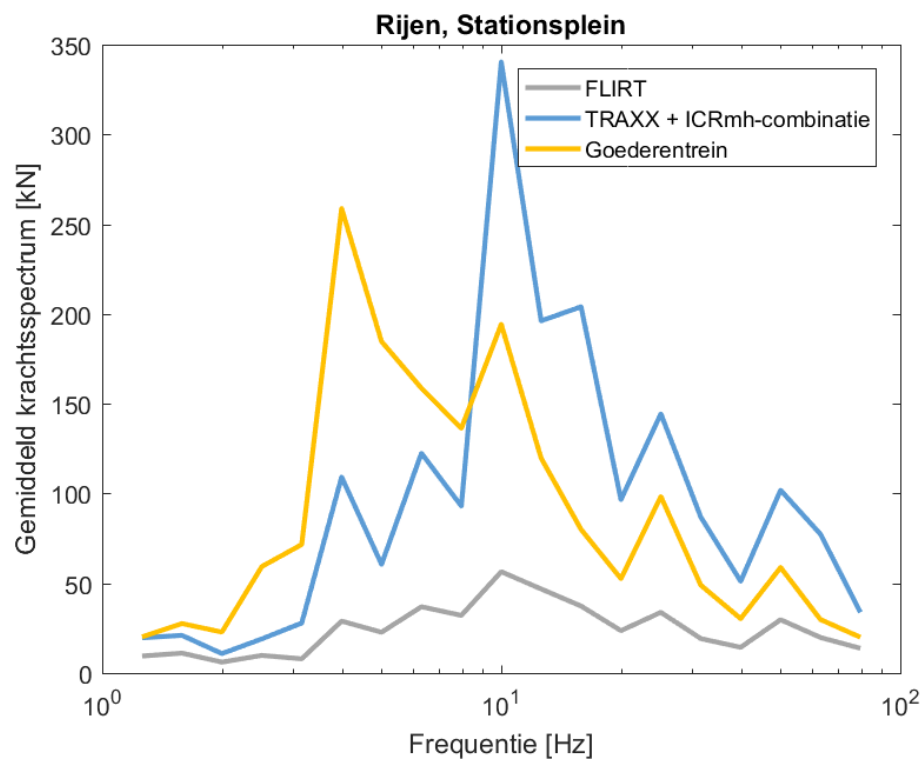


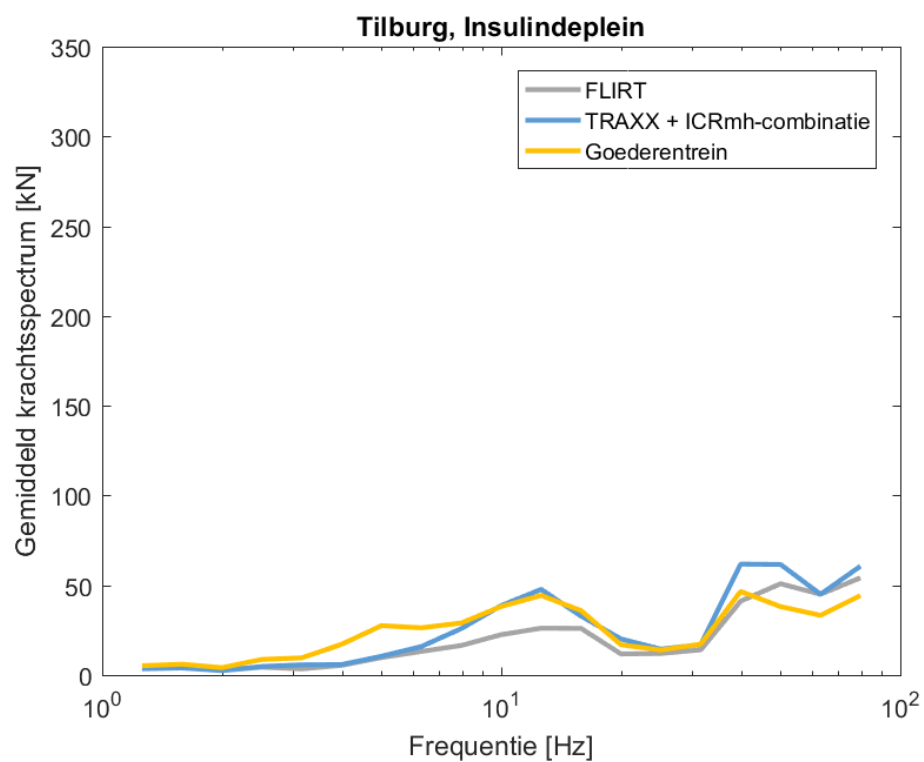
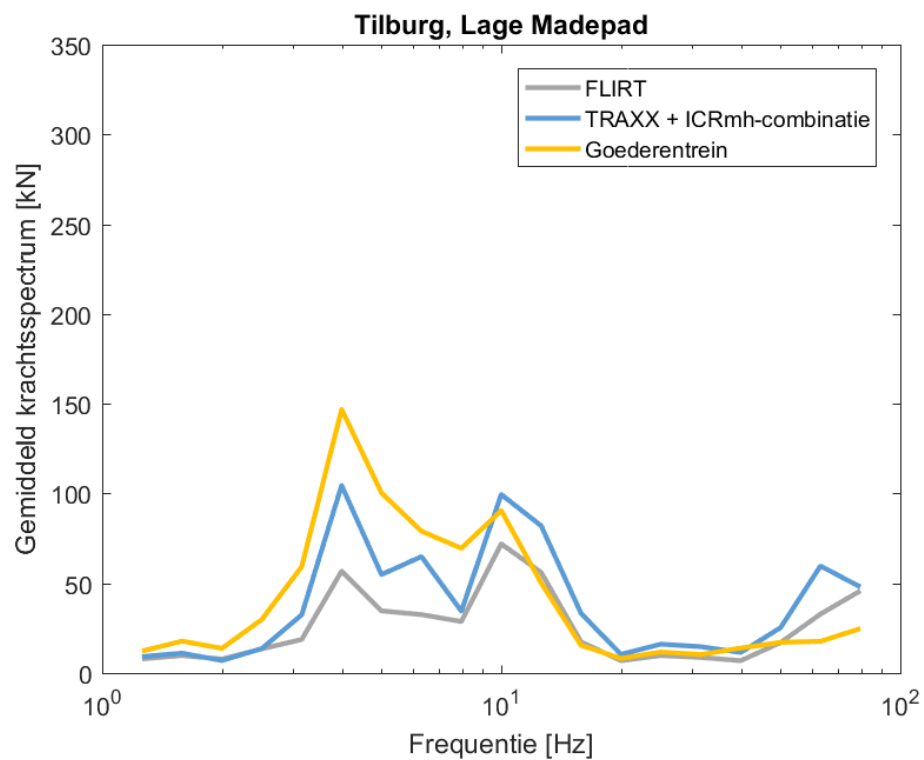
Bijlage III – Bronspectrum van treinen

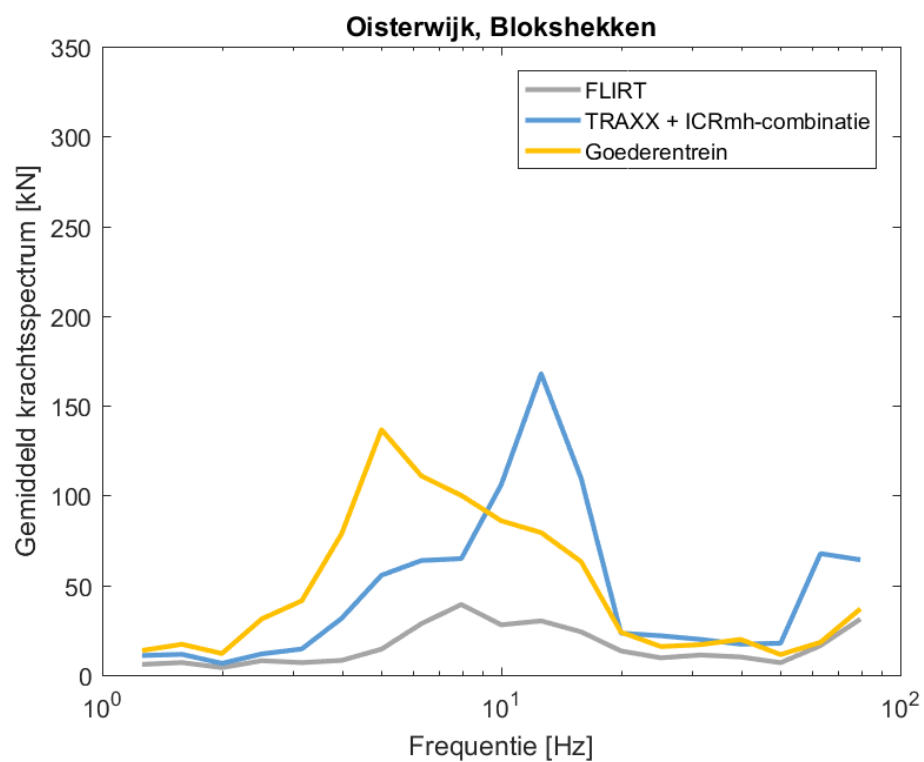
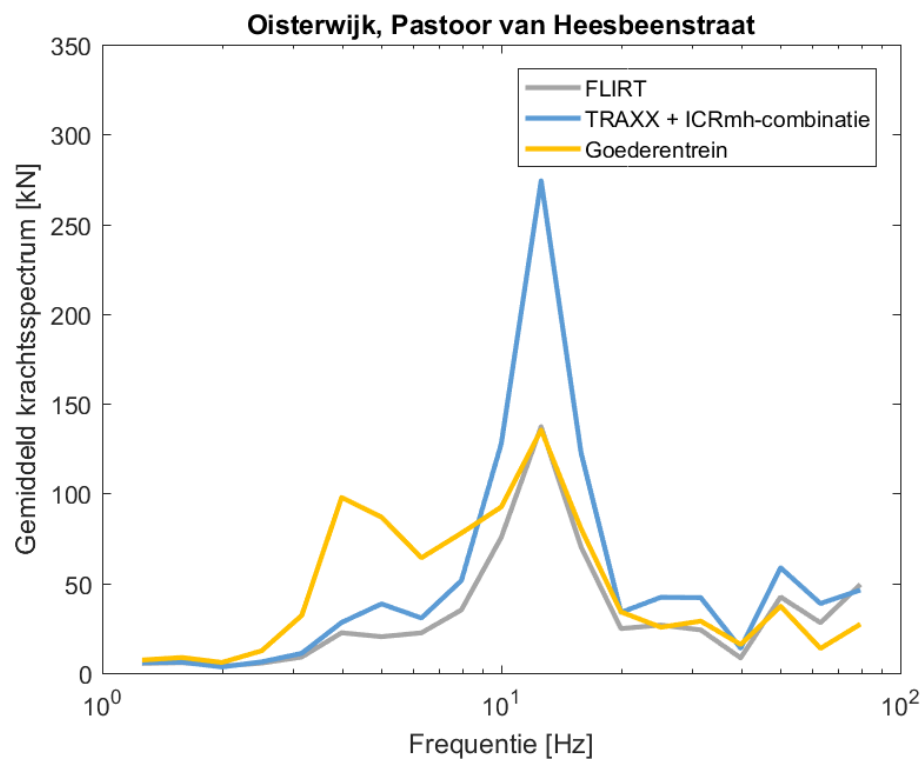
In deze bijlage is het krachtsspectrum van de drie treintypes die op alle locaties reden, weergegeven. Dit krachtsspectrum is bepaald uit een combinatie van de valproeven en de trillingsmetingen (gemiddeld trillingsspectrum per treintype gedeeld door overdrachtsspectrum van kracht naar trillingen uit valproeven).

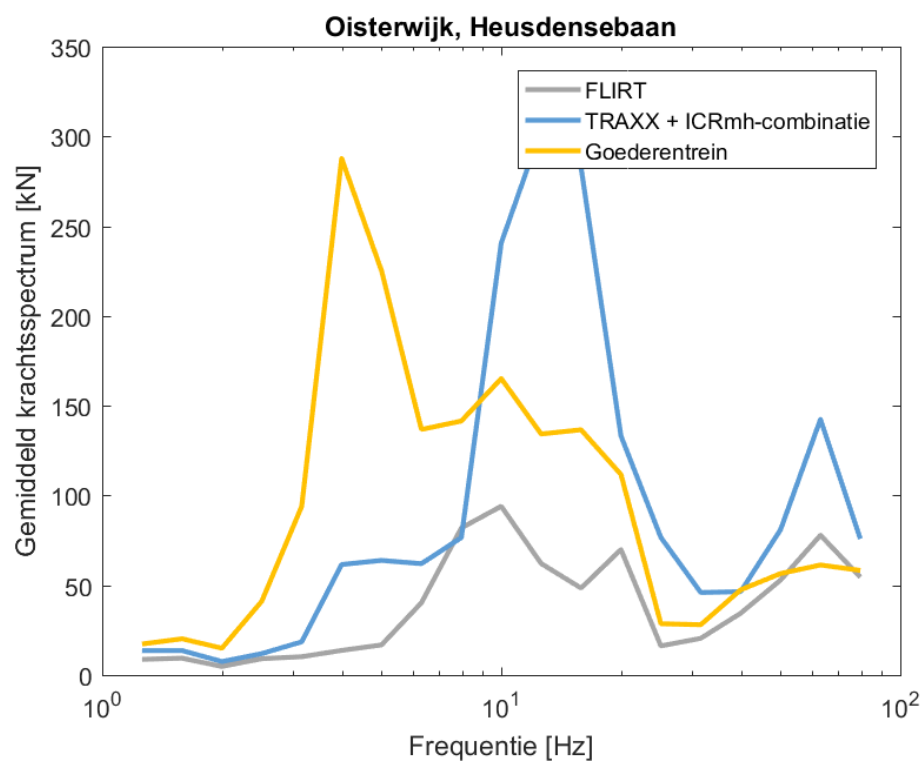
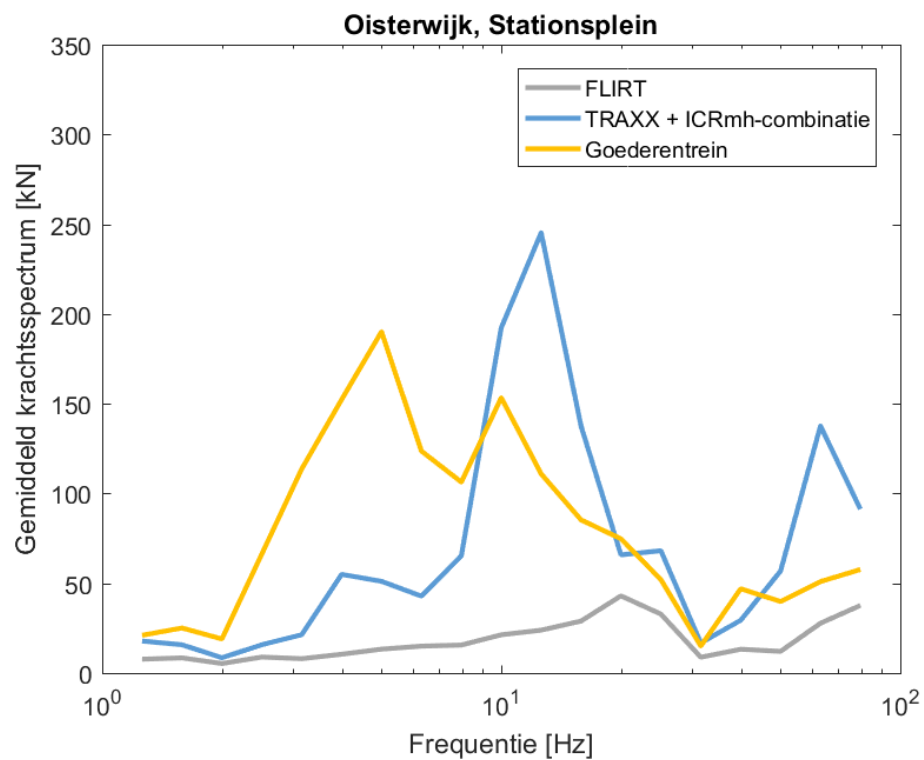






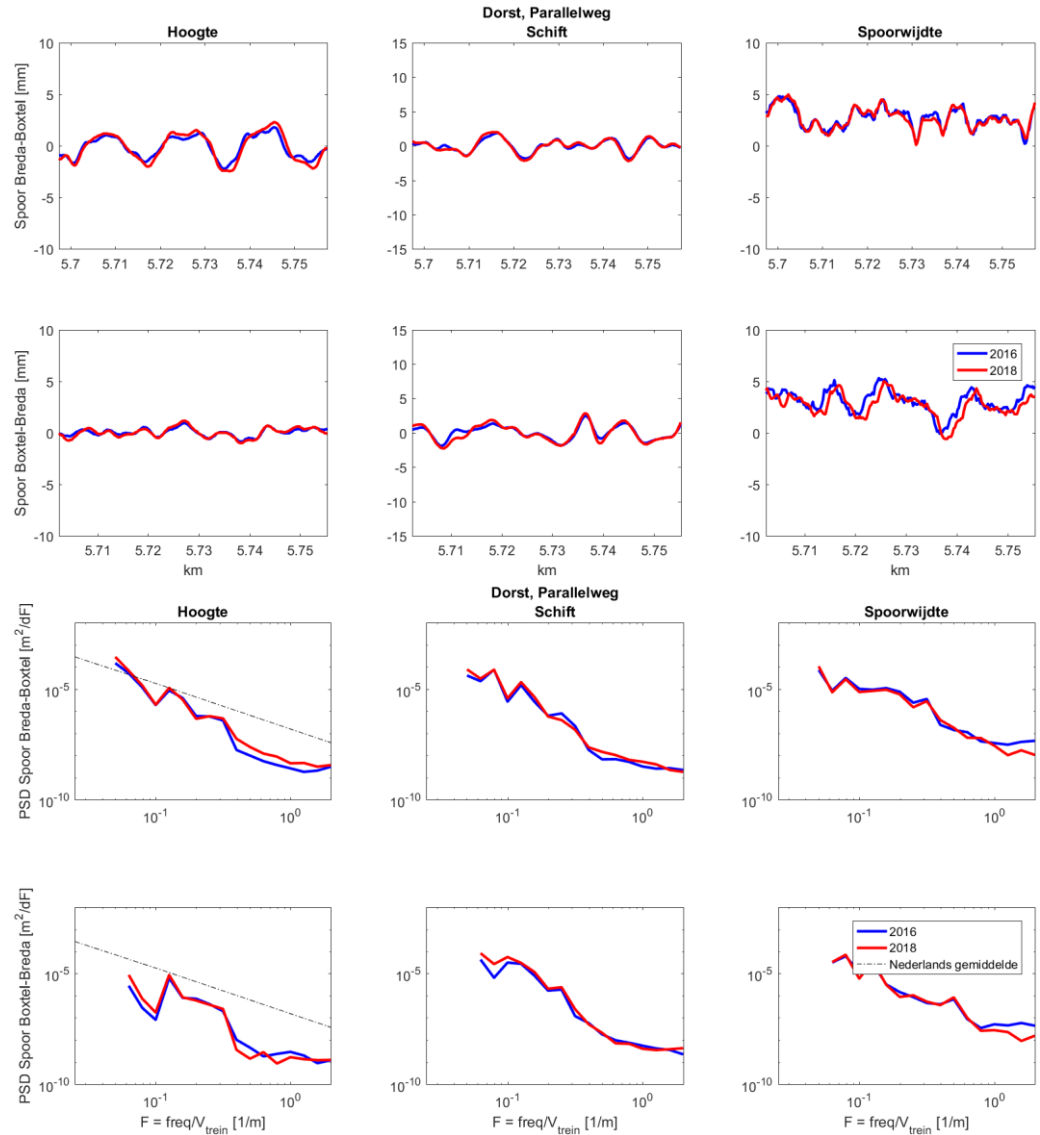


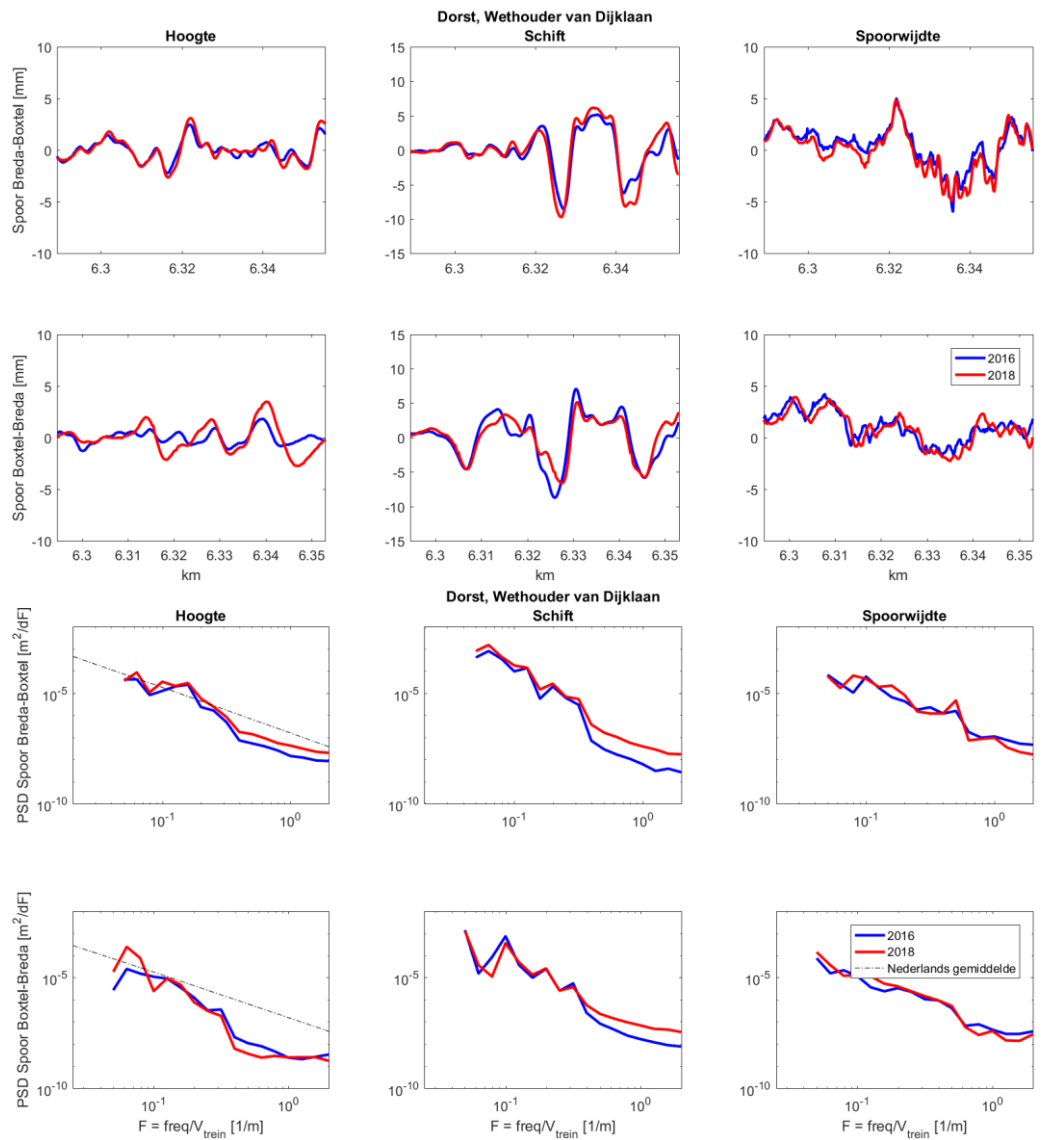


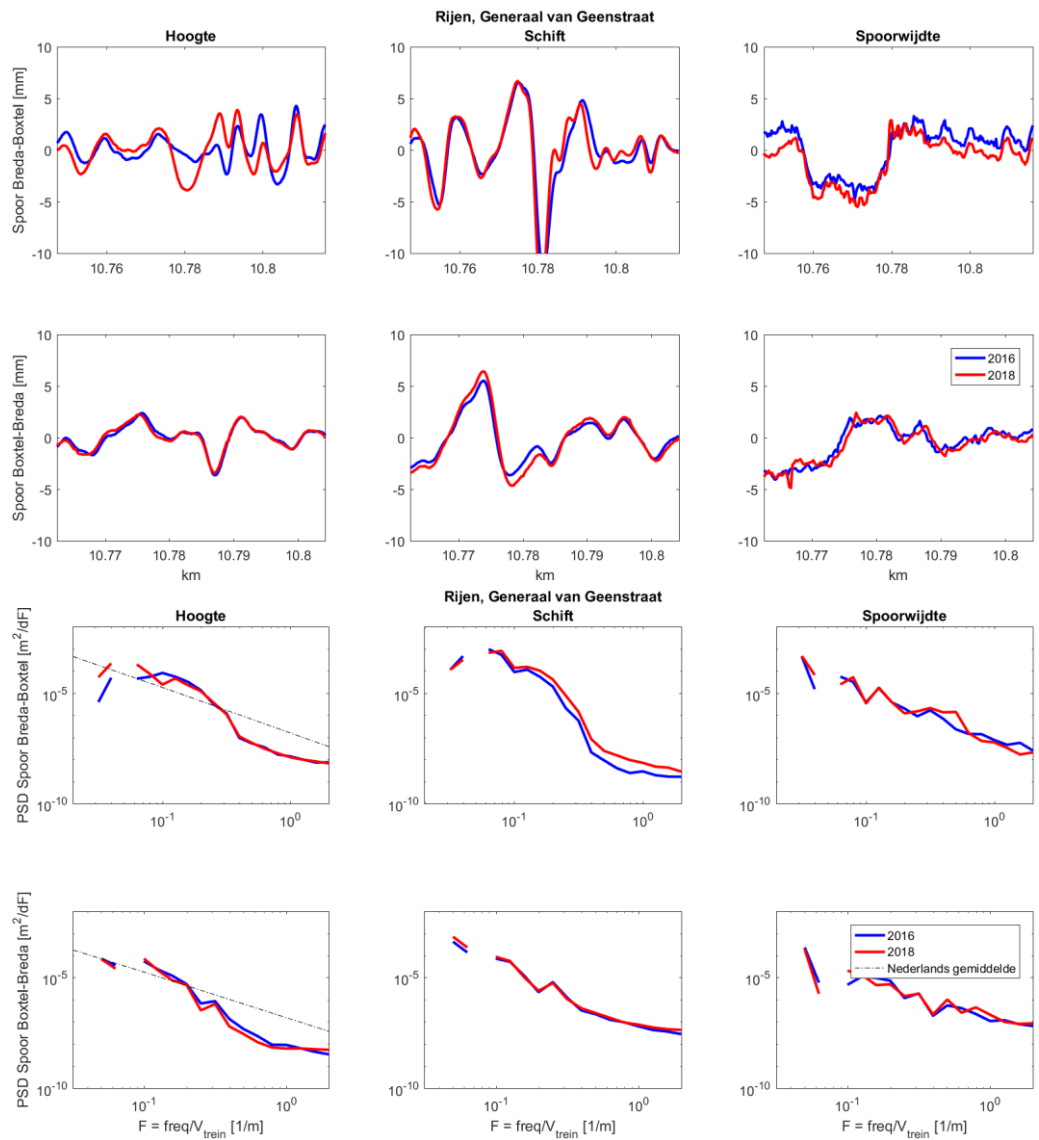


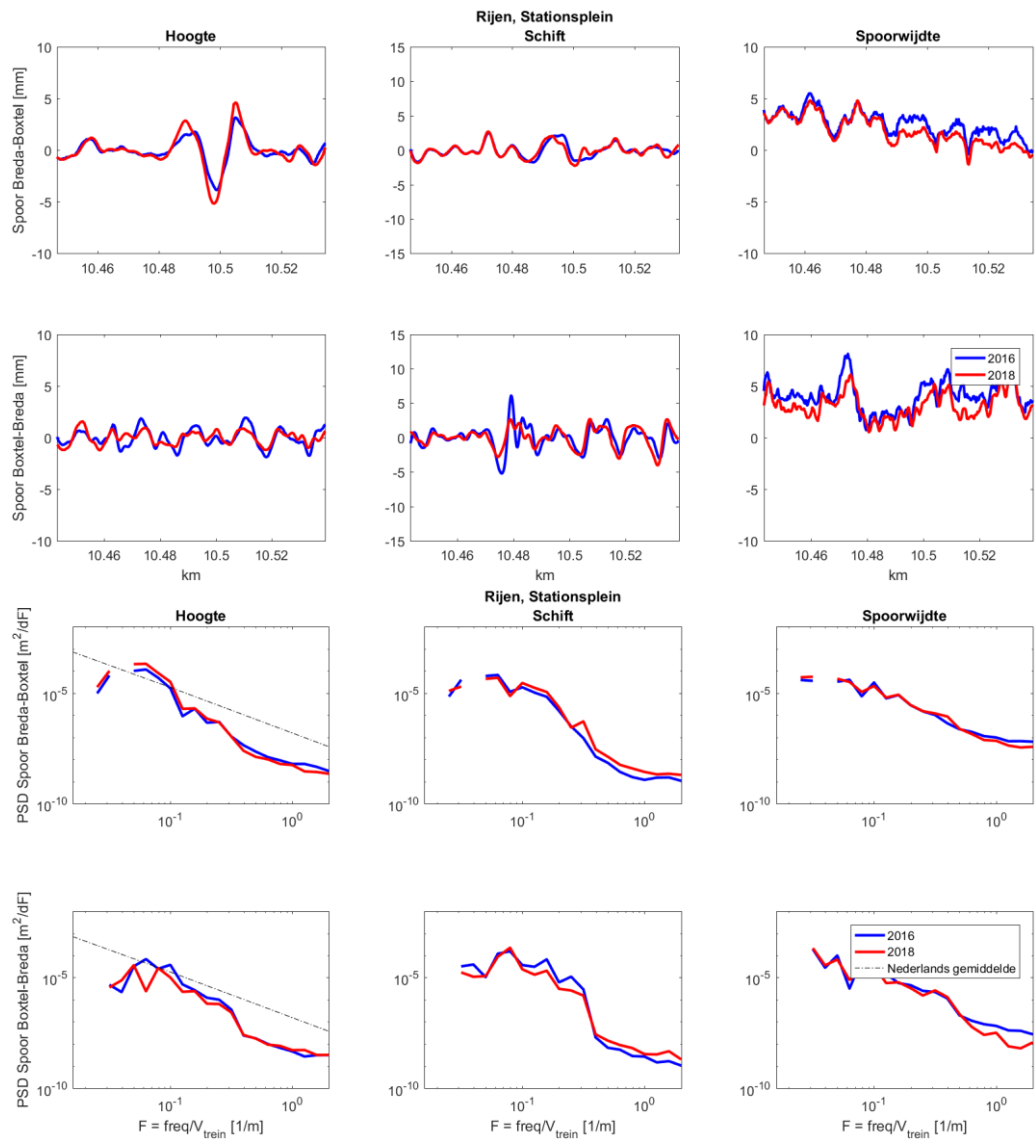
Bijlage IV – Spoorligging

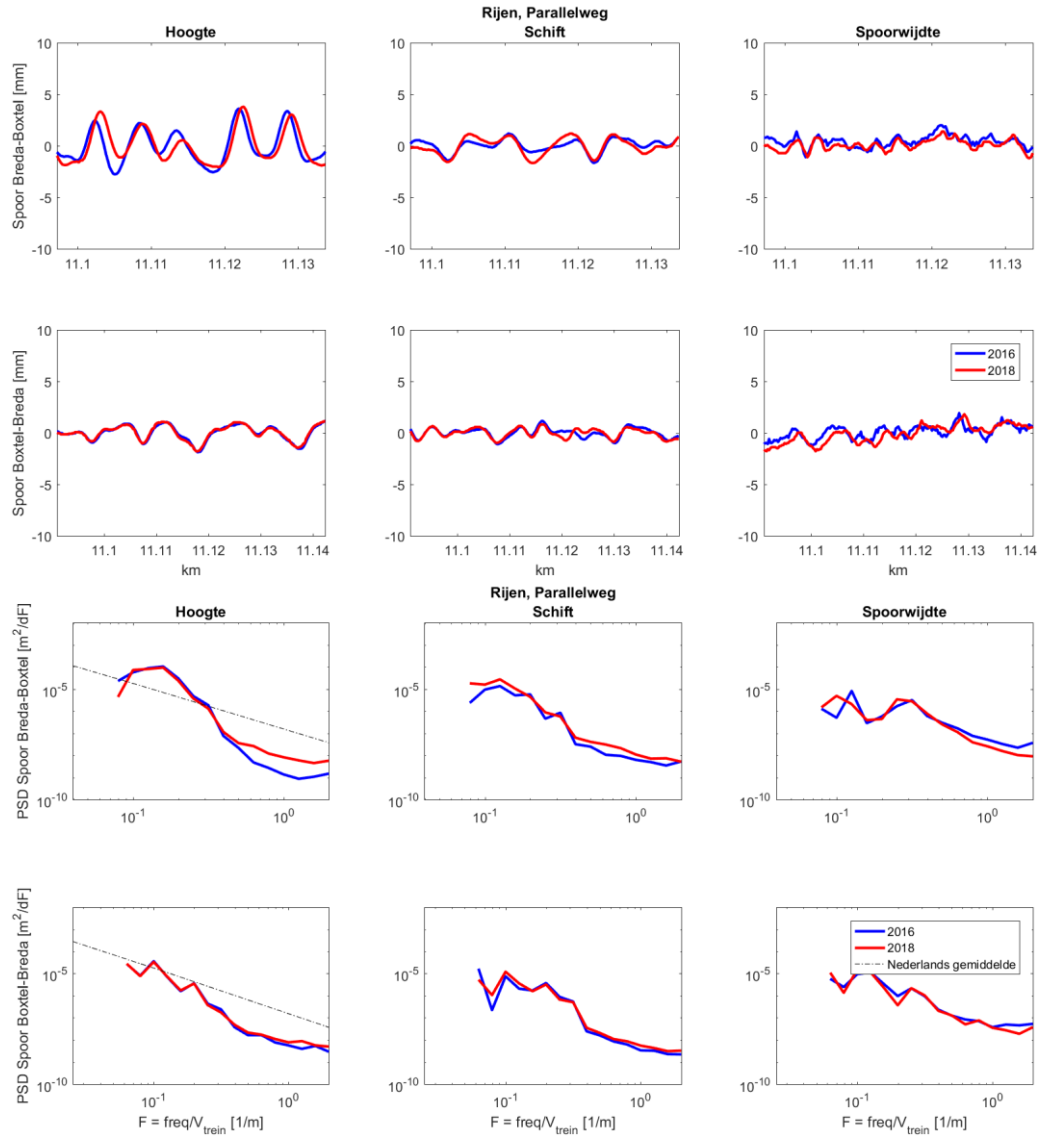
In deze bijlage zijn per locatie de signalen van de spoorligging (afwijking in hoogte, schift en afwijking in spoorwijdte) en de *power spectral density* (PSD) daarvan weergegeven, per spoor. Niet van alle locaties is de spoorligging in 2016 en 2018 gemeten.

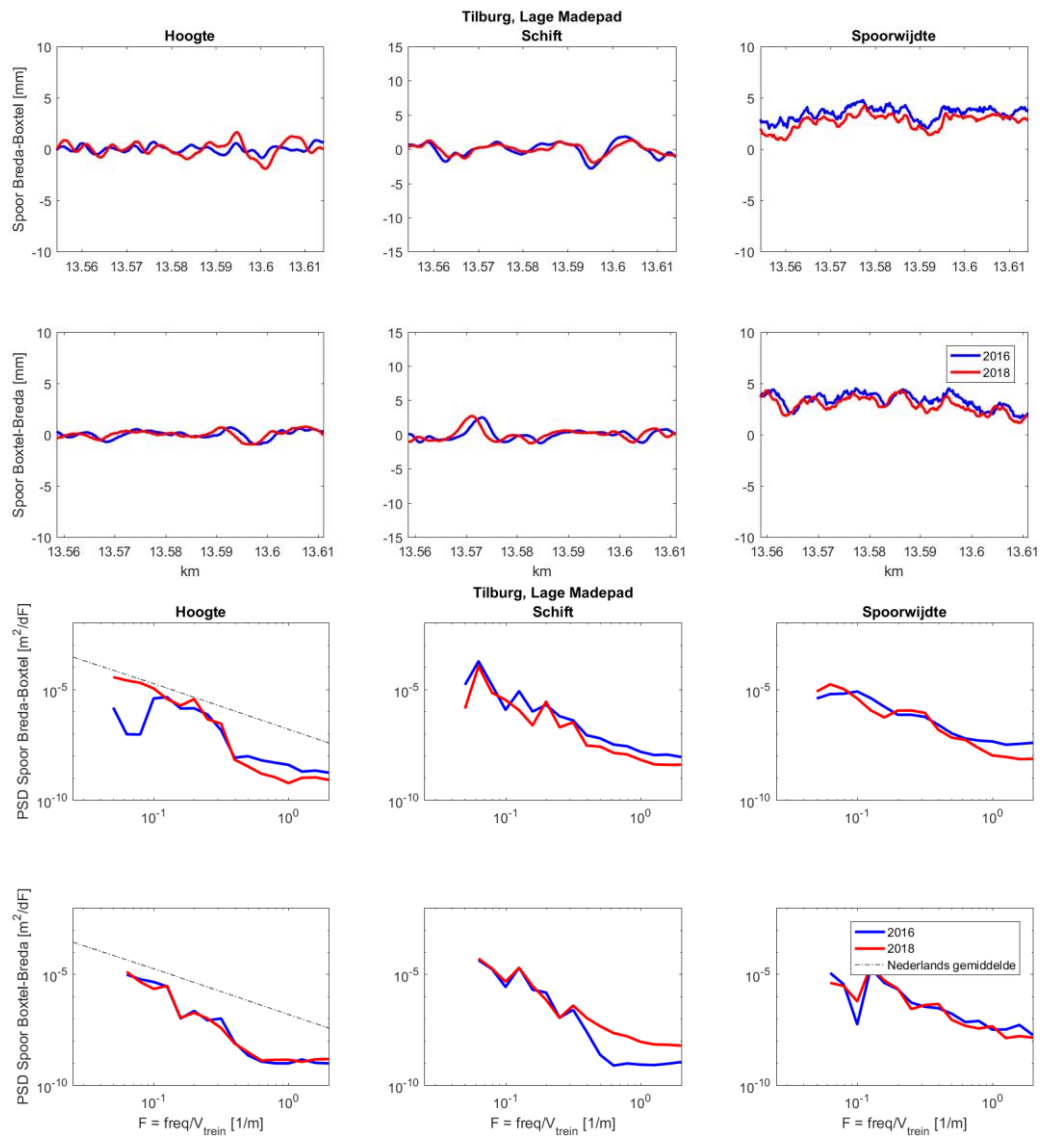


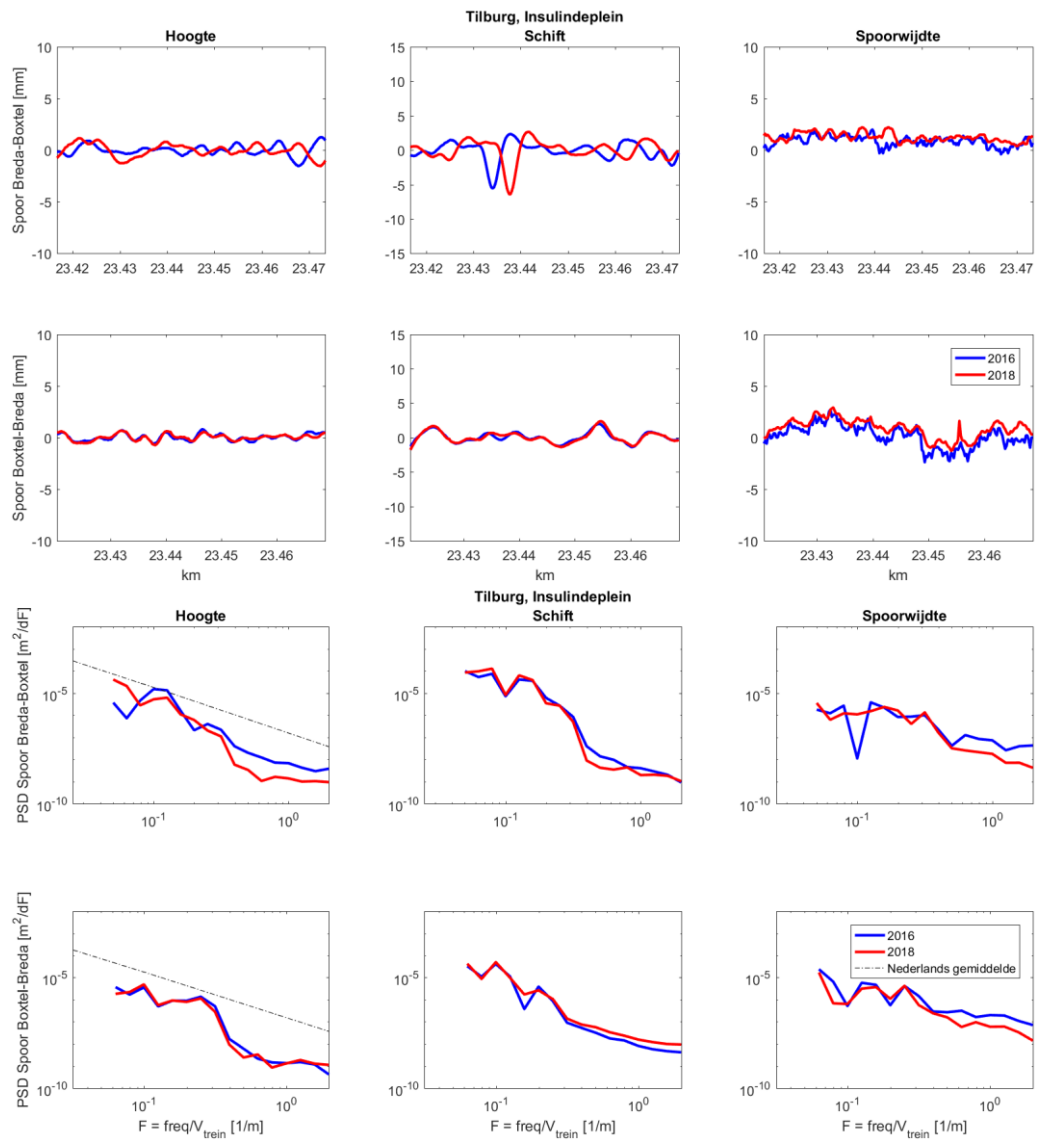


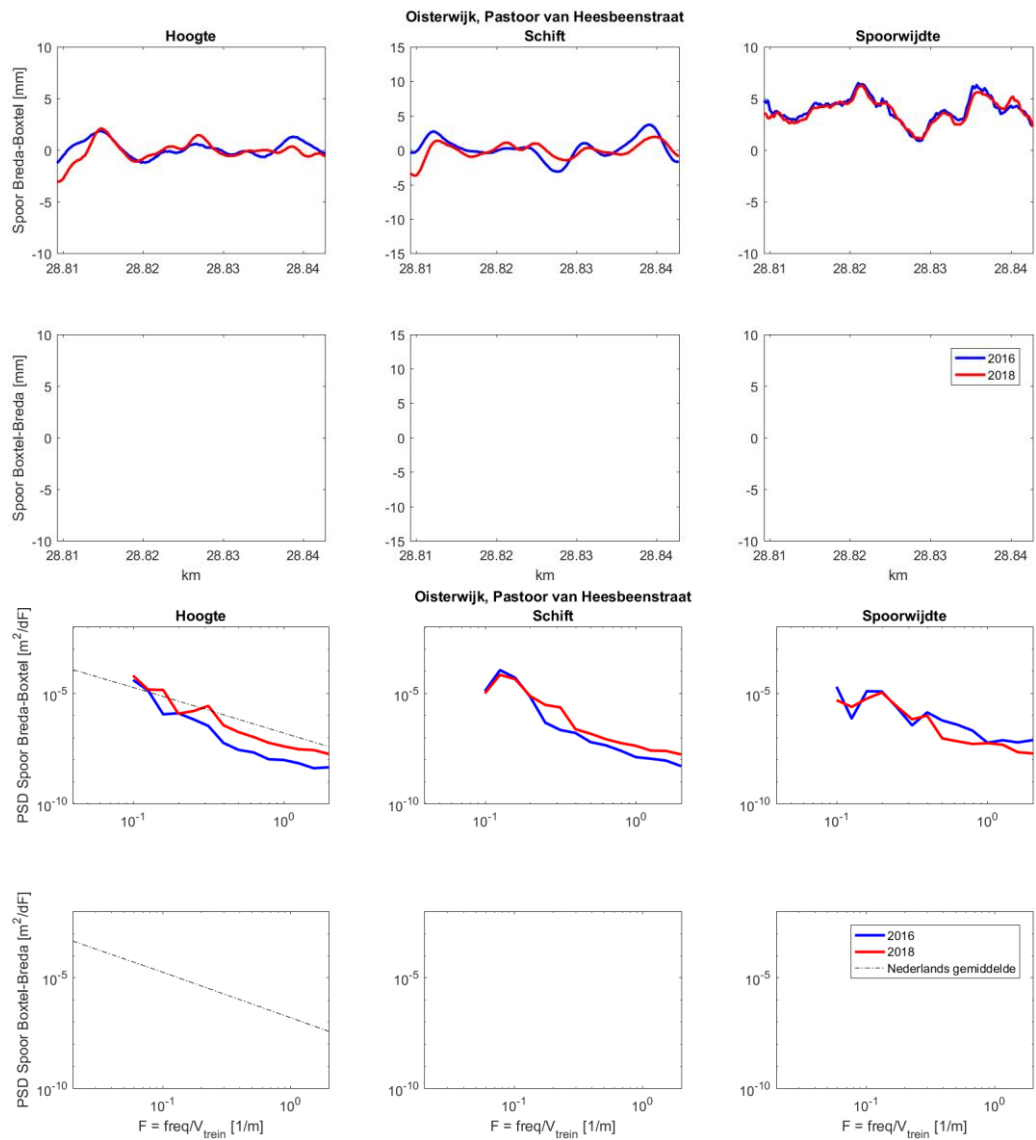


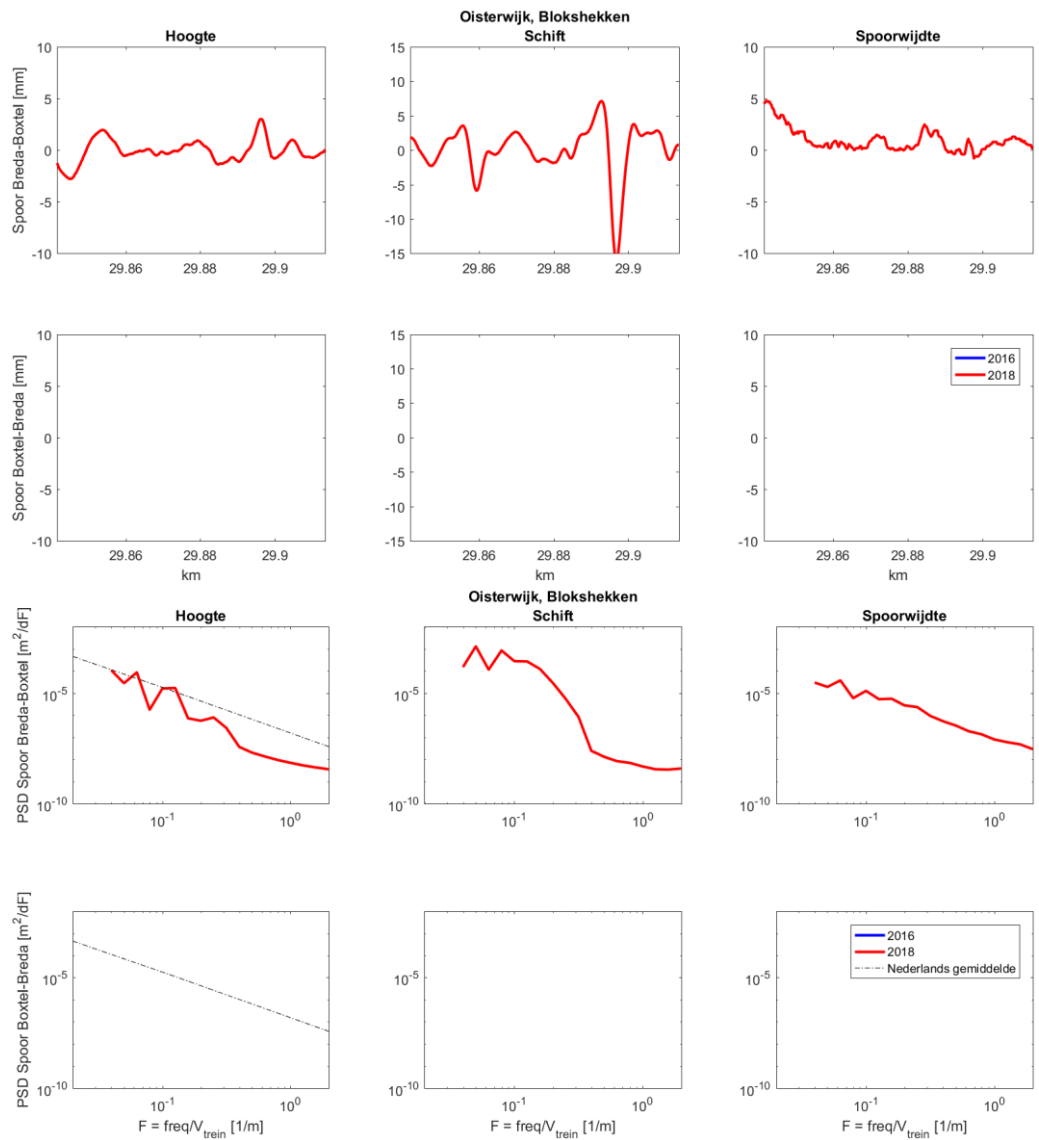


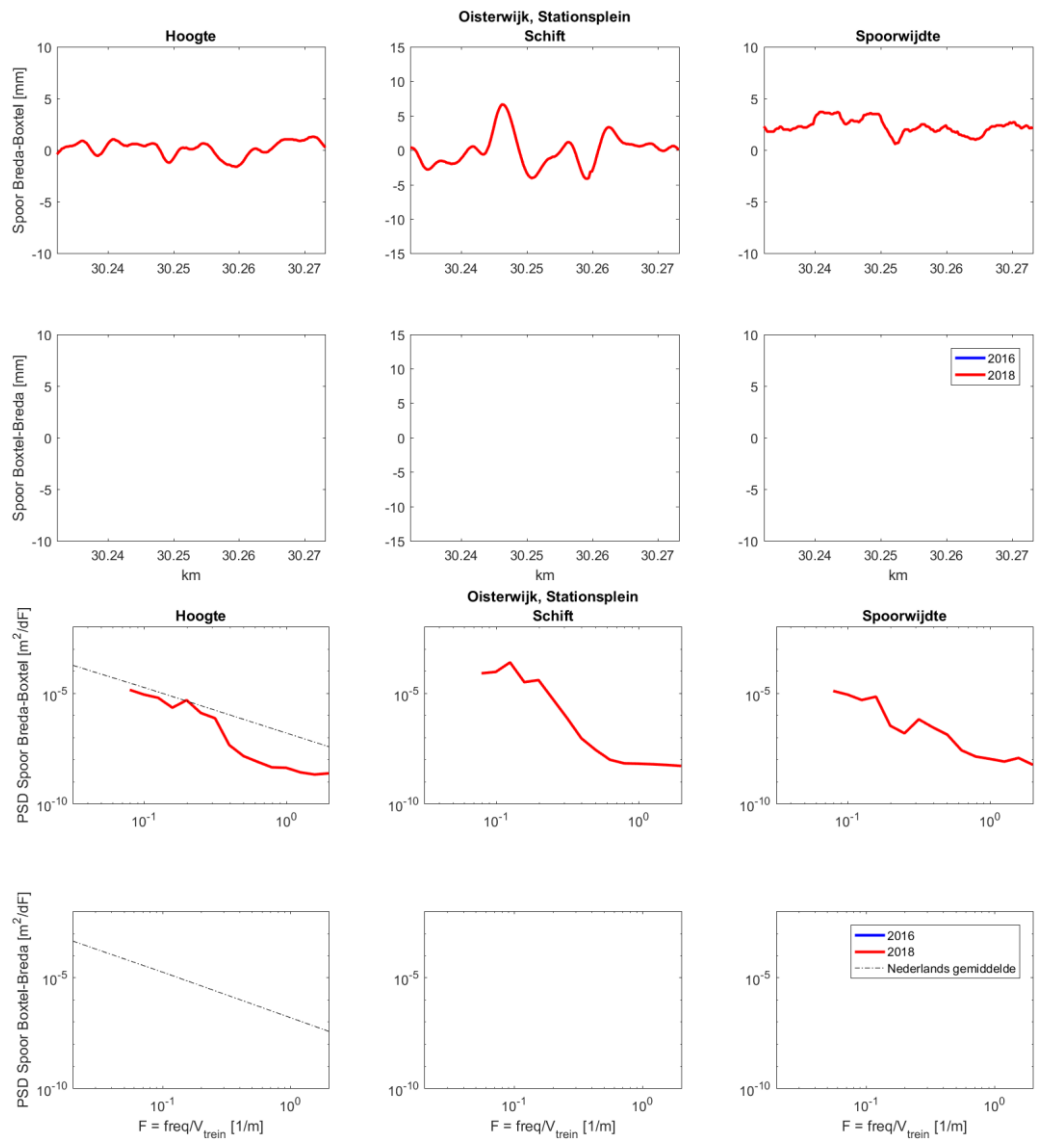


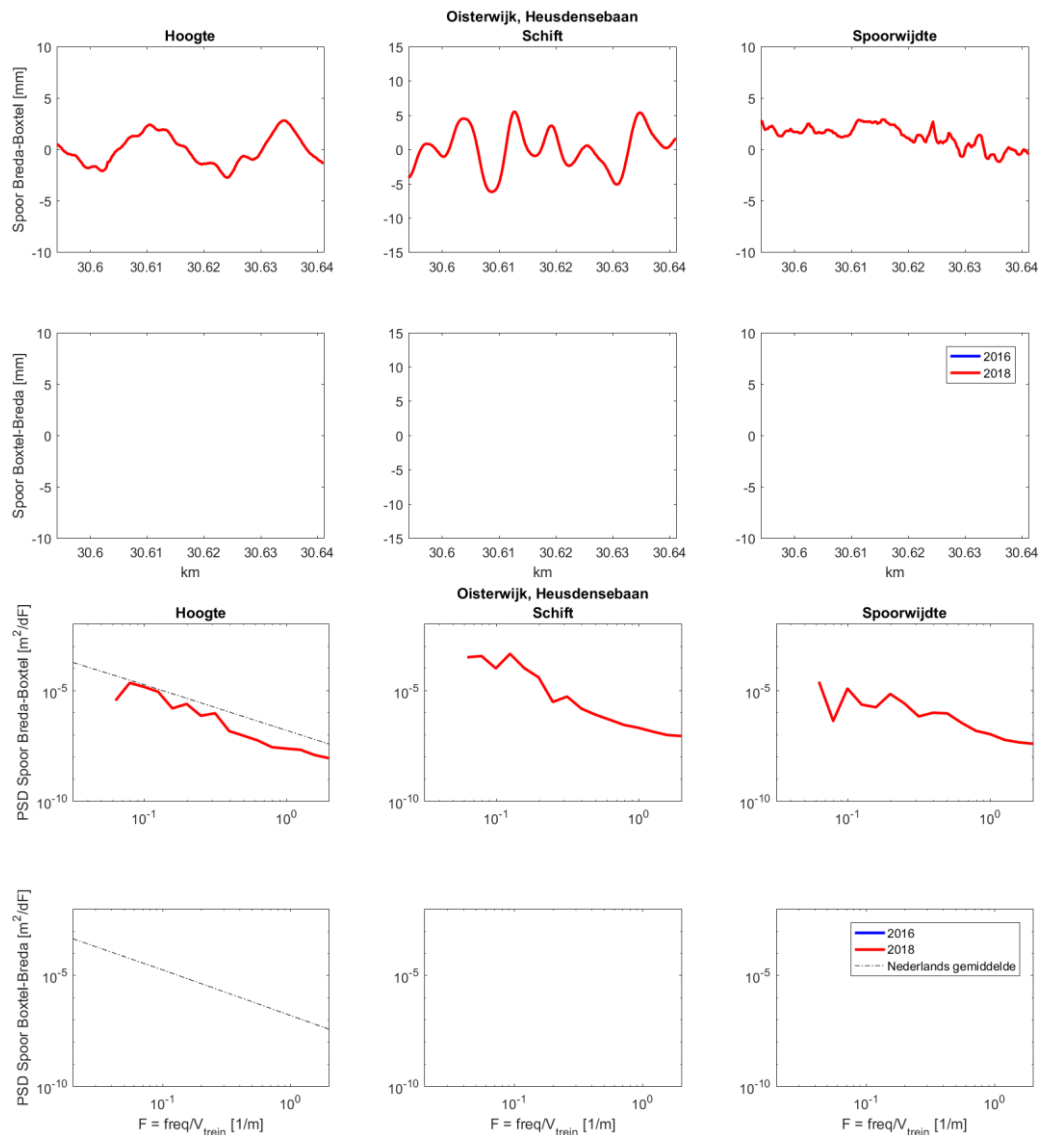










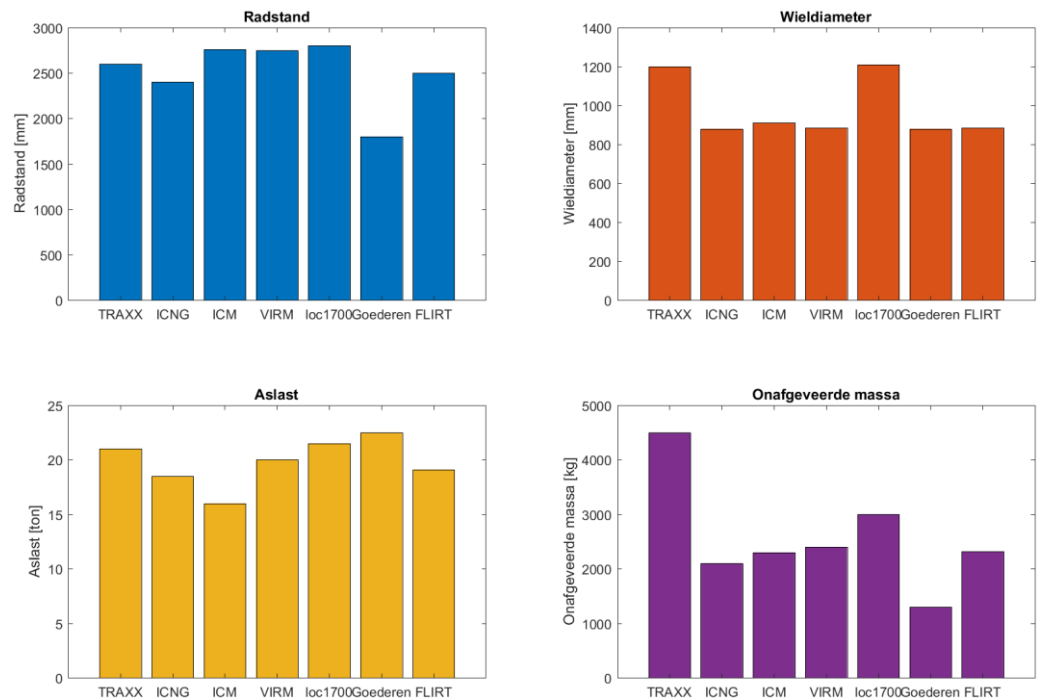


Bijlage V – Materieelgegevens

In deze bijlage zijn materieelgegevens weergegeven van een aantal treintypes uit het meetonderzoek. Hierbij zijn de radstand (afstand tussen assen in een draaistel), de wieldiameter, de aslast en de onafgeveerde massa (zie Figuur 4-8) weergegeven.

Hierbij valt het volgende op:

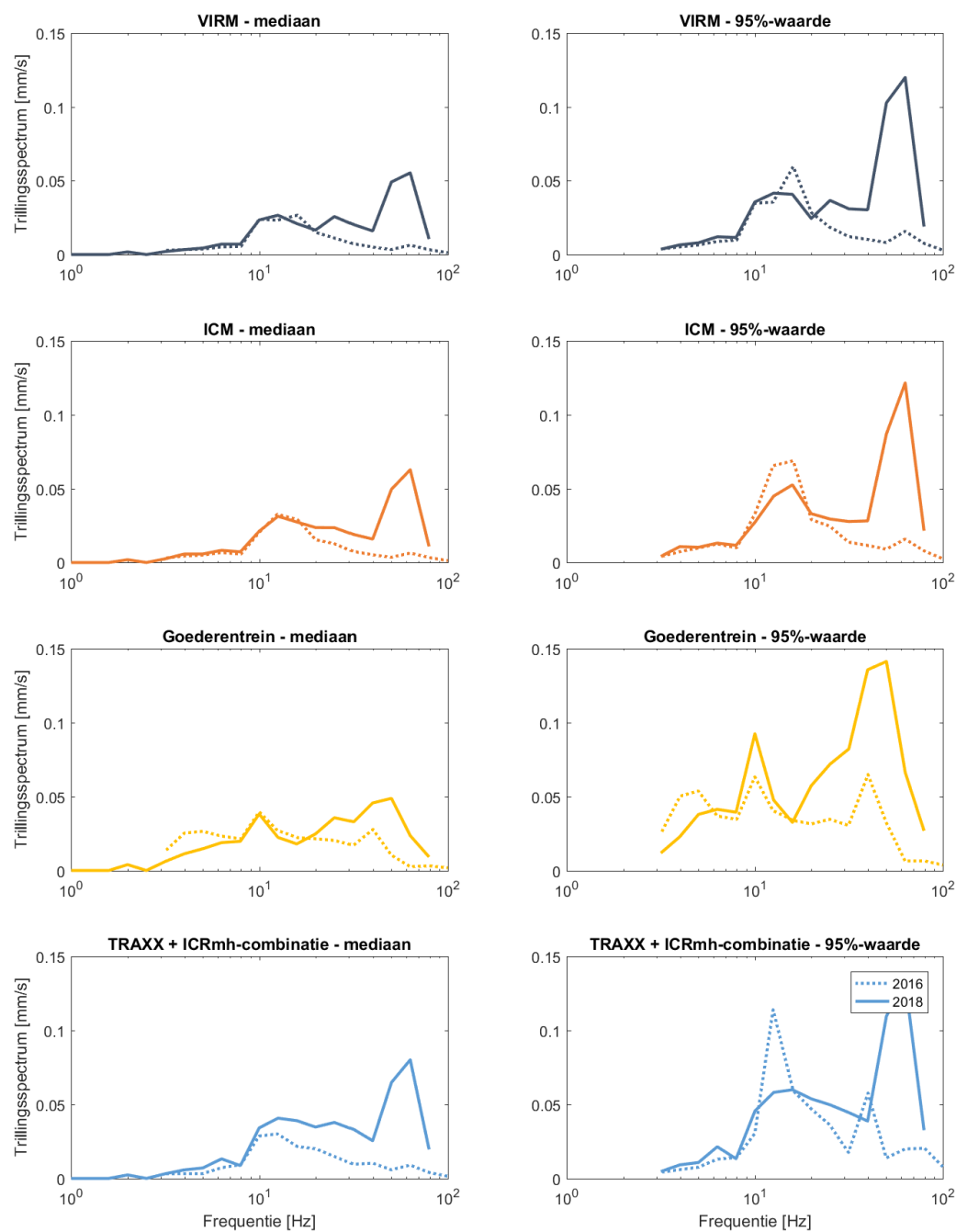
- Goederenwagons (hier type Y25) hebben een relatief lage radstand, tussen overige types is weinig verschil.
- De wieldiameter is fors groter voor de locomotieven dan voor de overige types.
- De aslast van de ICM is significant lager dan van de overige types.
- De onafgeveerde massa van de TRAXX locomotief is fors hoger dan van andere types.



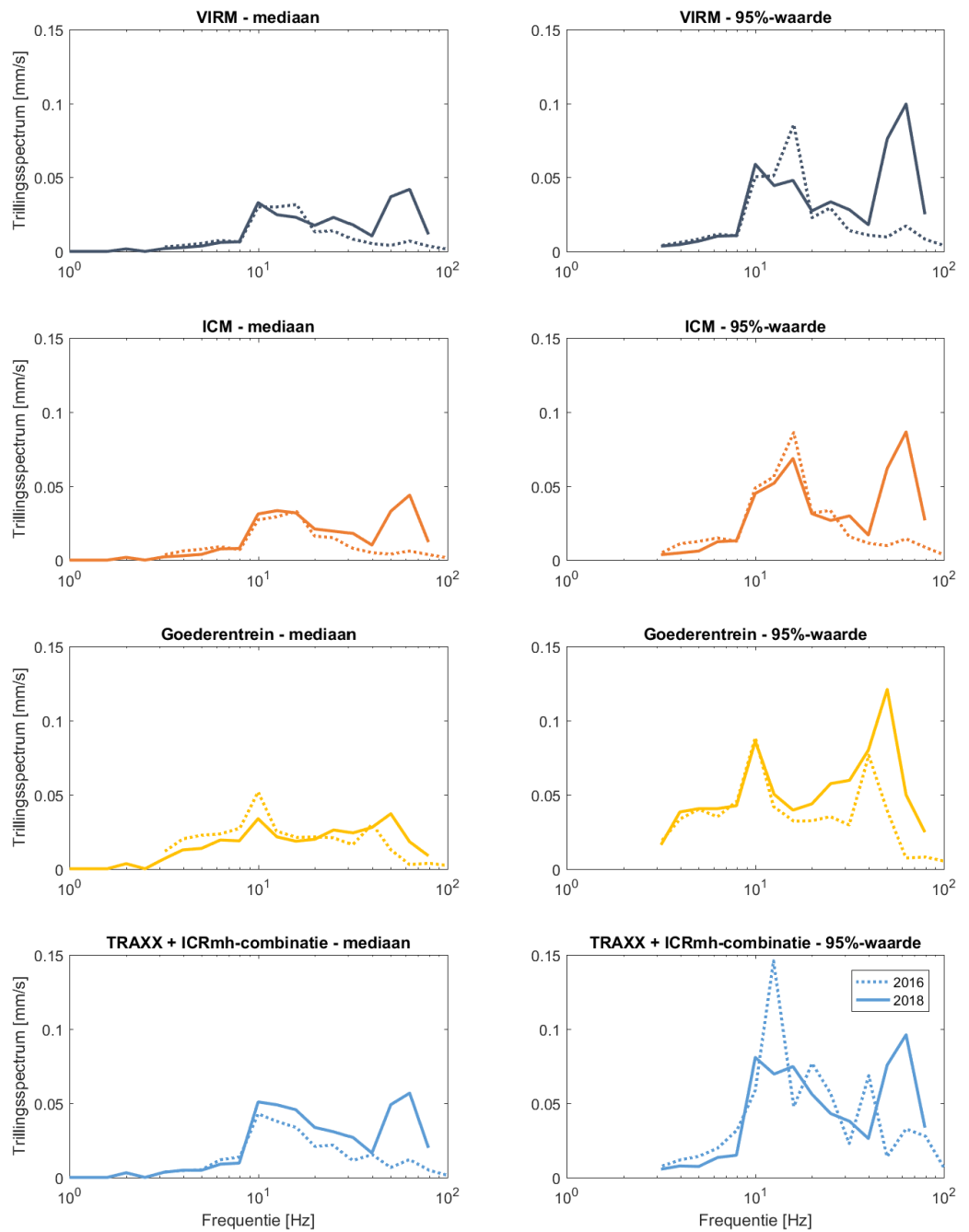
Bijlage VI – Vergelijking met DGMR-data

Deze bijlage bevat aanvullende informatie over de vergelijking tussen de metingen uit 2016 (DGMR) en 2018 (Movares)

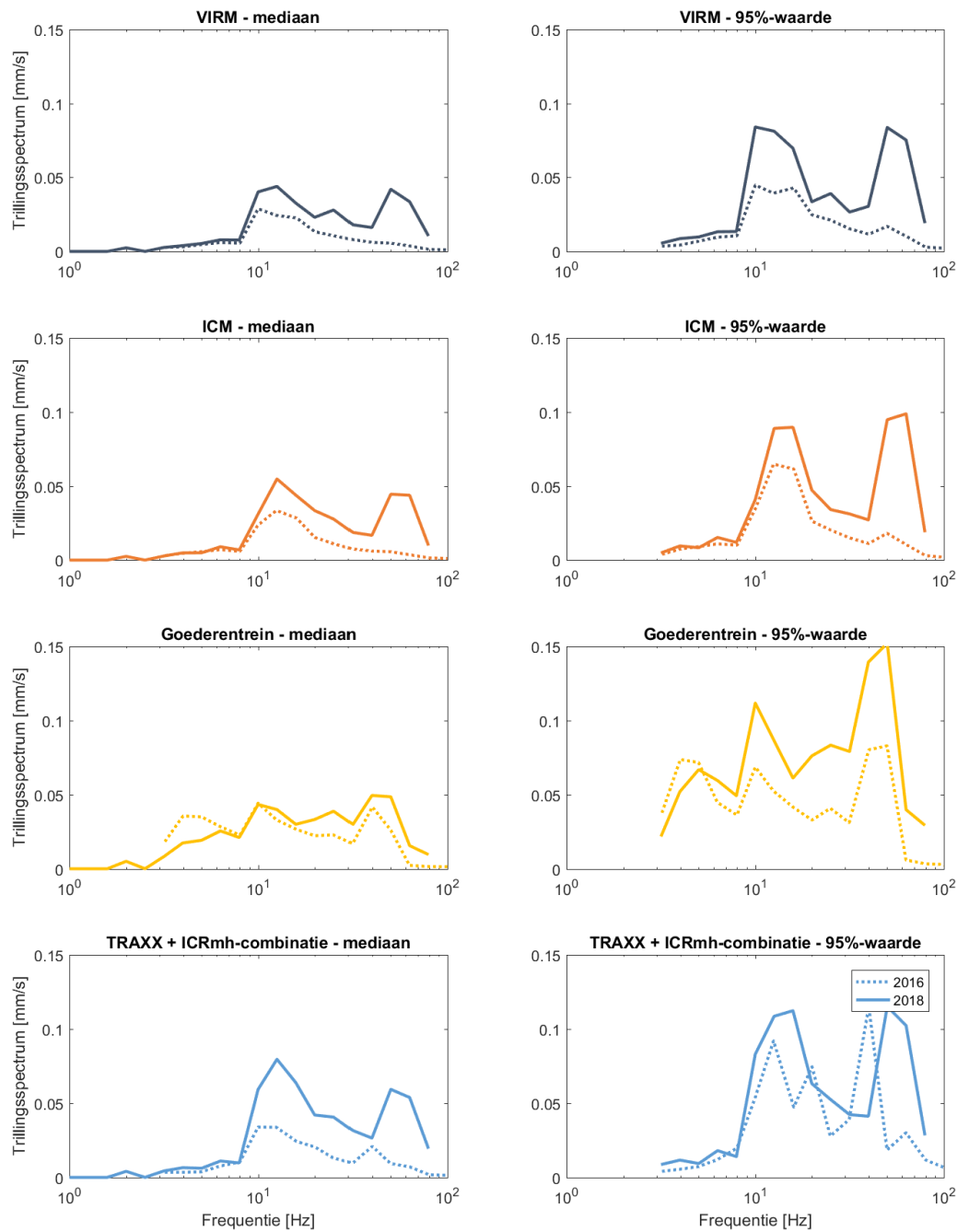
VI.1 Vergelijking voor 4 treintypes op het spoor Boxtel-Breda



Figuur VI - 1 Vergelijking 2016 – 2018 in X-richting



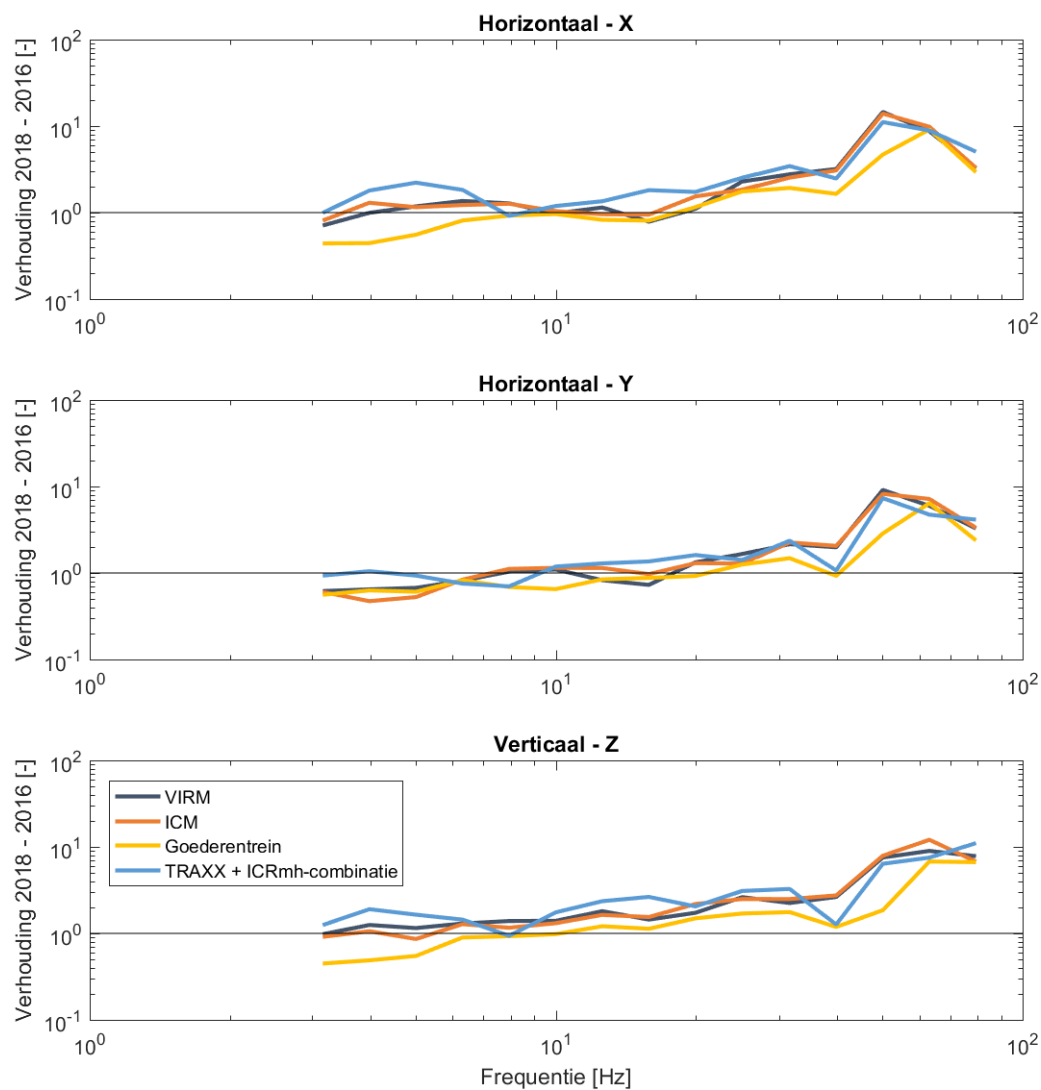
Figuur VI - 2 *Vergelijking 2016 – 2018 in Y-richting*



Figuur VI - 3 *Vergelijking 2016 – 2018 in Z-richting*

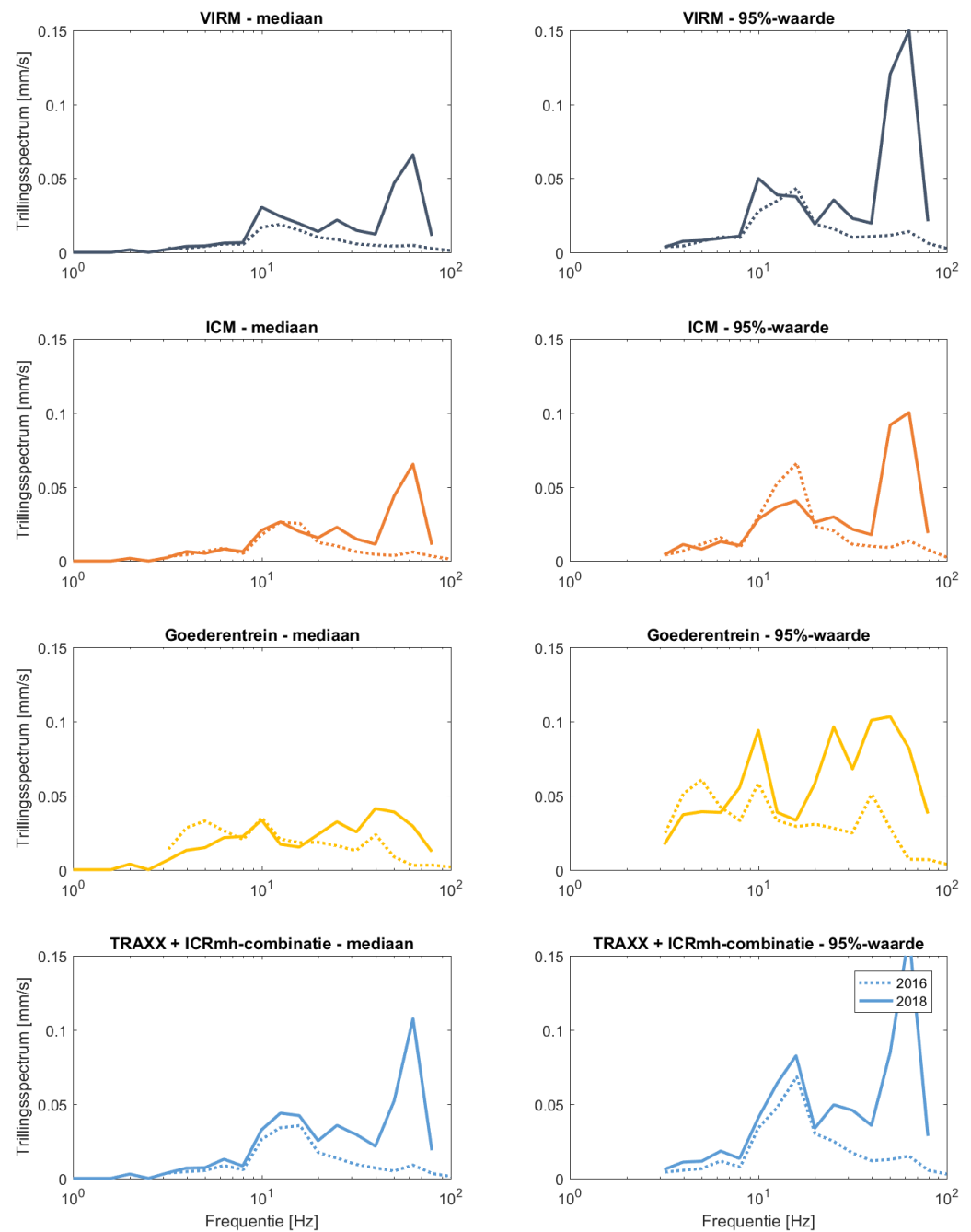
In Figuur VI - 4 is de verhouding tussen beide metingen weergegeven voor deze 4 treintypes, per meetrichting. Een verhouding kleiner dan 1 betekent dat de trillingen in 2016 hoger waren, een verhouding groter dan 1 dat de trillingen in 2018 hoger waren. In deze figuur is het volgende zichtbaar:

1. Onder de 8 Hz is er wat variatie in de verhouding, de trillingen zijn hier echter laag. Wel is te zien dat de laagfrequente trillingen van de goederentreinen lijken te zijn afgenomen. Bij deze lage frequenties zijn met name de aslast en de baanstijfheid belangrijke parameters. De aslast is niet significant gewijzigd tussen 2016 en 2018, de meest voor de hand liggende oorzaak is dat door de droogte in 2018 de bodem harder is geworden, waardoor de baanstijfheid wat hoger is en deze laagfrequente trillingen lager zijn geworden.
2. Tussen de 8 en 20 Hz zijn de trillingen (met name in horizontale richting) vergelijkbaar. In verticale richting zijn de trillingen van vooral de reizigerstreinen wat hoger, mogelijk komt dit door verschillen in meetopstelling (DGMR had ingegraven meetopstelling met grond erbovenop, Movares een meetopstelling die half was ingegraven, zonder grond er bovenop) of door verschillen in bodemdemping (deze is vaak anders in horizontale dan in verticale richting, hoewel (verschillen in) bodemdemping rond 10 Hz doorgaans geen significante rol speelt).
3. Bij hogere frequenties is te zien dat de meetresultaten meer uit elkaar beginnen te lopen. Dat is een duidelijke aanwijzing dat de bodemdemping in 2018 minder was dan in 2016. Dit is verklaarbaar vanuit verschillen in het weer (2016 was een natte en koude meetperiode, 2018 een droge en warme meetperiode), zie ook paragraaf VI.3.

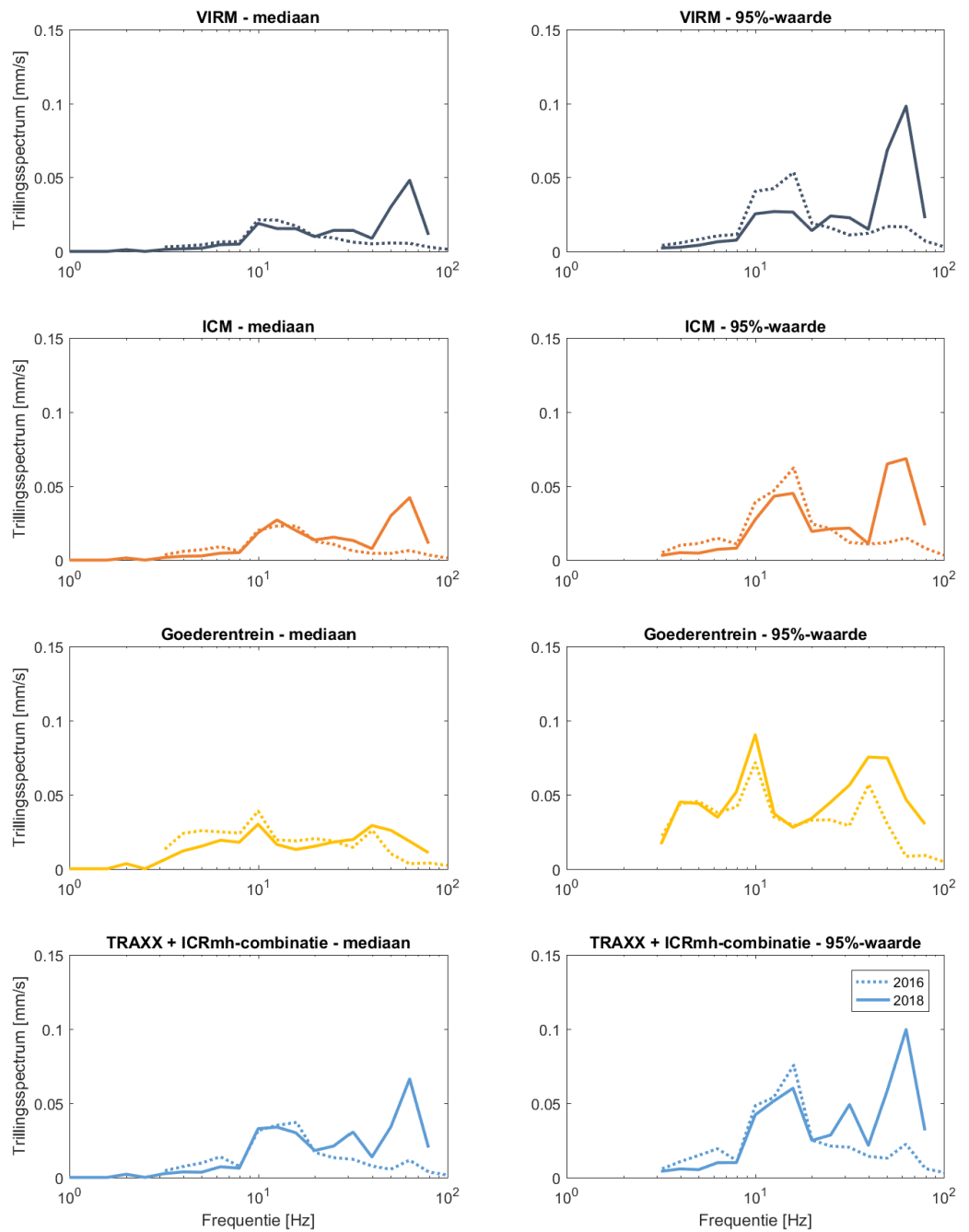


Figuur VI - 4 Verhouding tussen de metingen in 2018 en 2016 voor 4 treintypes

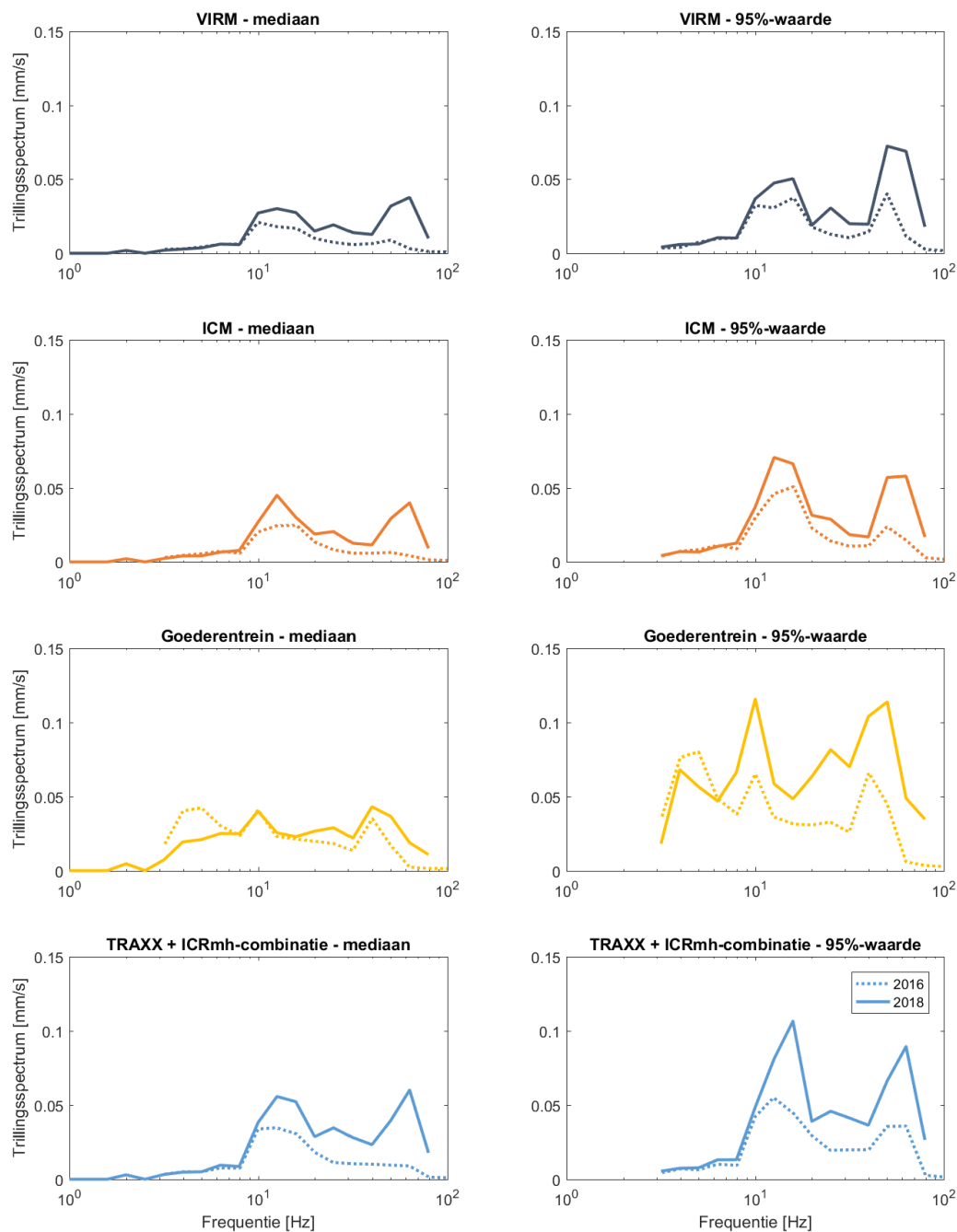
VI.2 Vergelijking voor 4 treintypes op het spoor Breda-Boxtel



Figuur VI - 5 *Vergelijking 2016 – 2018 in X-richting*

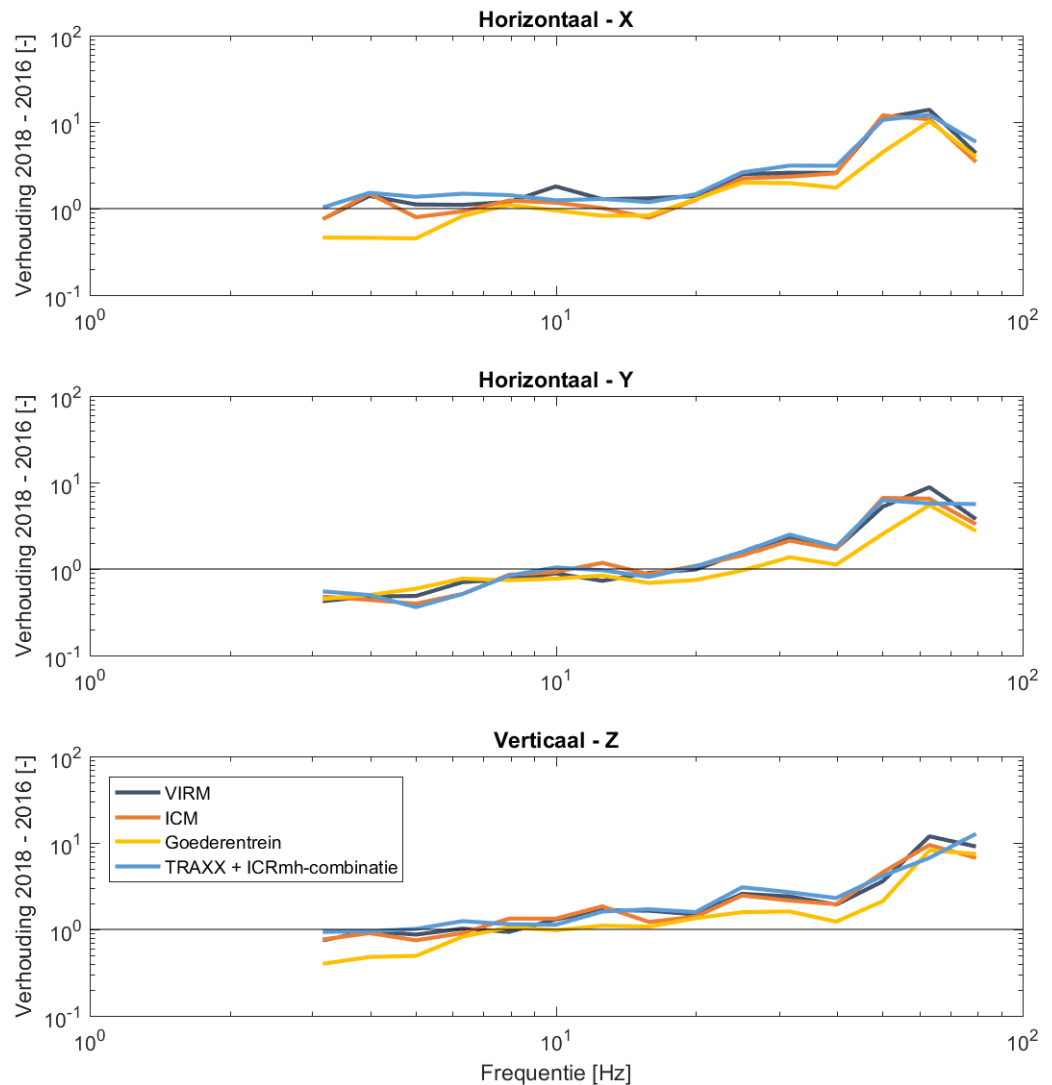


Figuur VI - 6 *Vergelijking 2016 – 2018 in Y-richting*



Figuur VI - 7 *Vergelijking 2016 – 2018 in Z-richting*

In Figuur VI - 8 is de verhouding tussen beide metingen weergegeven voor deze 4 treintypes, per meetrichting. Deze figuur laat vergelijkbare dingen zien als Figuur VI - 4.

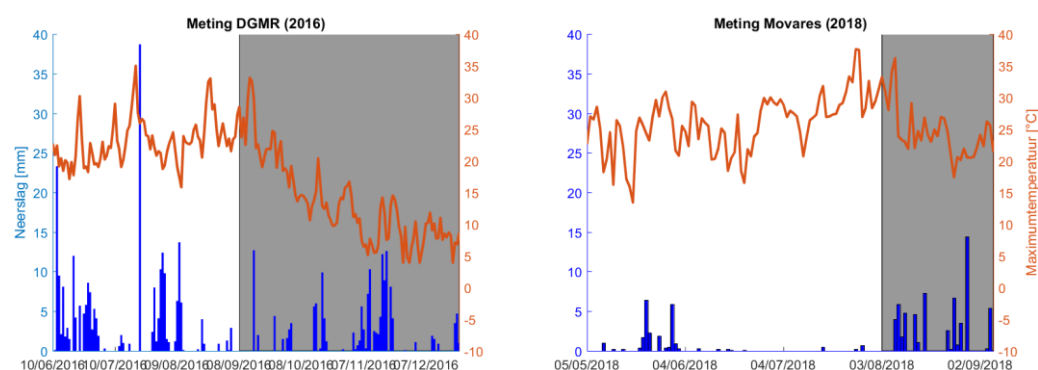


Figuur VI - 8 Verhouding tussen de metingen in 2018 en 2016 voor 4 treintypes

VI.3 Vergelijking klimaat 2016 en 2018

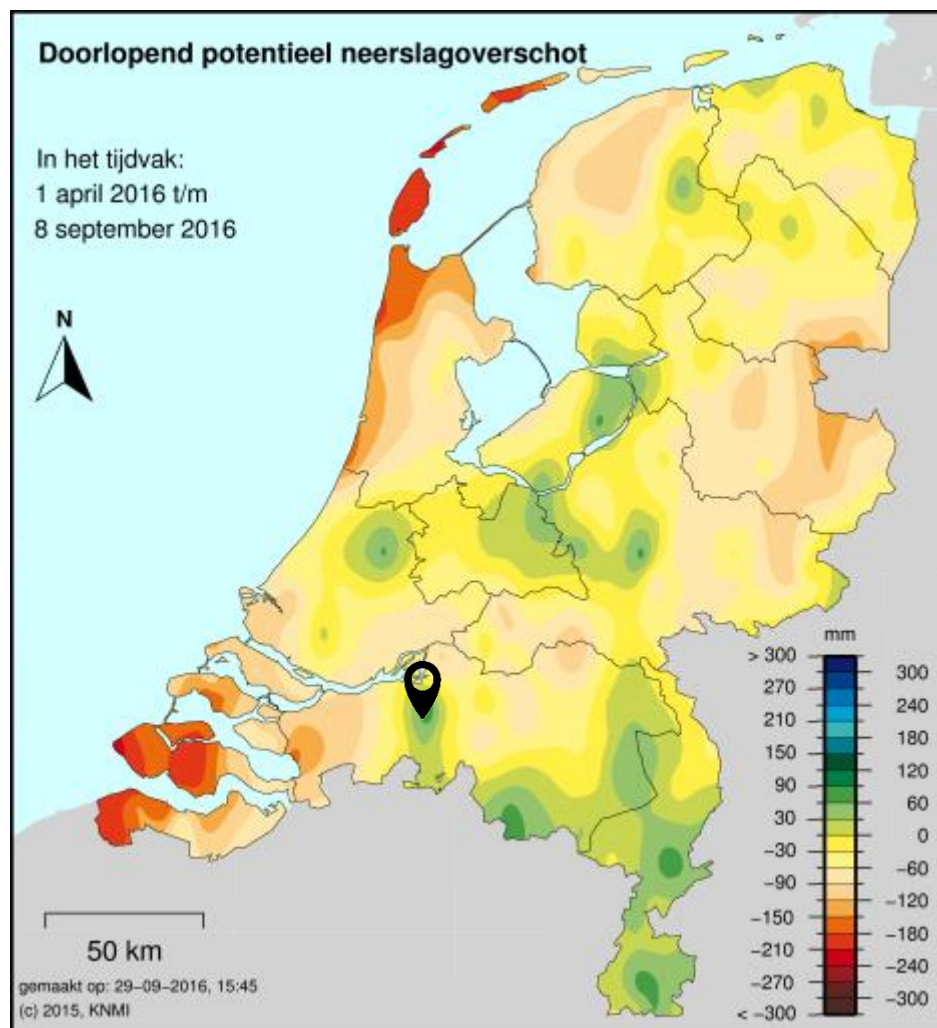
In deze paragraaf wordt het klimaat tussen 2016 en 2018 vergeleken. De maximumtemperatuur en de neerslag per dag over de meetperiode en de periode van 3 maanden daarvoor is weergegeven in Figuur VI - 9. Verschillen tussen beide metingen zijn vooral:

1. De temperatuur tijdens de DGMR-meting was gemiddeld 10 tot 15 graden lager. Er zijn onderzoeken bekend waaruit volgt dat de trillingen in de wintermaanden lager zijn dan in de zomermaanden, waarbij dit mogelijk is gecorreleerd met de temperatuur (uitzetting spoorstaven).
2. De gemiddelde neerslag tijdens de meetperiode was tijdens de DGMR-meting vergelijkbaar als die tijdens de Movares-meting (ca. 1.5 mm gemiddeld per dag), maar de periode voorafgaand aan de Movares-metingen was significant droger.

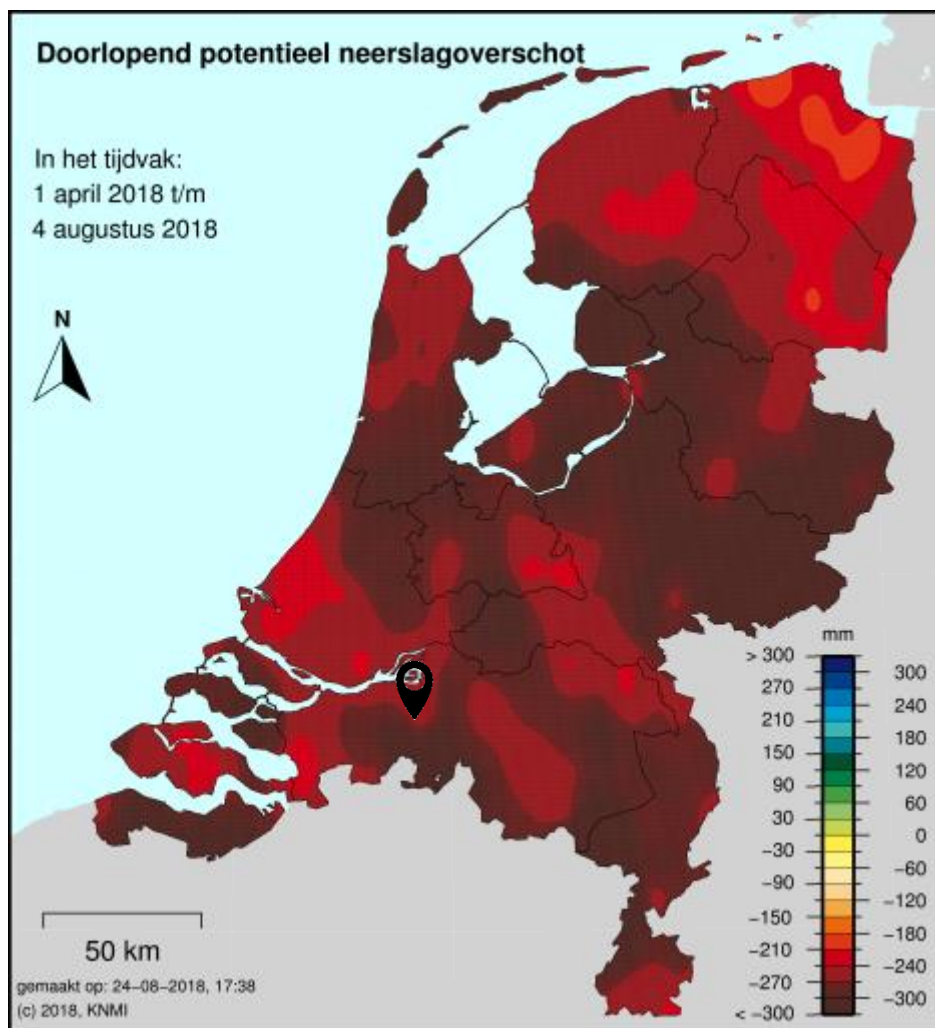


Figuur VI - 9 *Temperatuur en neerslag voor en tijdens meetperiode*

Als vervolgens het doorlopend potentieel neerslagoverschot wordt vergeleken (gemeten bij start meting), dan is duidelijk te zien dat dit neerslagtekort rond de 0 mm was in het onderzoeksgebied in 2016 (zie Figuur VI - 10), en rond de 250 mm in 2018 (zie Figuur VI - 11). Dat betekent dat de bovenste grondlagen in 2018 sterk uitgedroogd waren, waardoor de grondlagen harder waren en de demping minder.



Figuur VI - 10 Doorlopend potentieel neerslagoverschot in 2016, vlag geeft locatie Gilze-Rijen weer



Figuur VI - 11 Doorlopend potentieel neerslagoverschot in 2018, vlag geeft locatie Gilze-Rijen weer