

Landelijk onderzoek gedifferentieerd rijden (TN 105394)

Onderzoek effect rijsnelheid goederentreinen op trillingsopwekking in de bodem

Status

Versie 002 (definitief)
Rapport T.2016.0727.R003
Datum 15 december 2017



Colofon

Opdrachtgever	ProRail Postbus 2208 3500 GE UTRECHT
Contactpersoon	de heer H. Zandberg 088 231 58 43
Project Betreft Uw kenmerk	ProRail - Trillingsonderzoek gedifferentieerd rijden Vervolgonderzoek TN 105394
Rapport Datum Versie Status	T.2016.0727.00.R003 15 december 2017 002 (definitief)
Uitgevoerd door	DGMR Bouw B.V. Van Pallandtstraat 9-11 6814 GM Arnhem Postbus 153 6800 AD Arnhem
Informatie	ing. R.G. (Reinoud) Fennema 088 346 76 33 rfe@dgmr.nl
Auteur	ing. R.G. (Reinoud) Fennema 088 346 76 33 rfe@dgmr.nl
Verantwoordelijk	ing. J.J.A. (Hans) van Leeuwen 088 346 75 69 ln@dgmr.nl
Verwerkt door	JB/Y/MBR

Samenvatting

In opdracht van ProRail B.V. heeft DGMR onderzoek gedaan naar de relatie tussen de rijsnelheid van goederentreinen en de trillingsopwekking in de bodem. De reden hiervoor is dat langzamer rijden als middel tegen trillingen regelmatig naar voren komt in procedures ten behoeve van tracébesluiten. De huidige spoorwetgeving staat dit niet toe, maar zou men dit willen overwegen dan is meer inzicht in de relatie trillingssterkte - rijsnelheid vereist.

In dit rapport wordt ingegaan op deze relatie aan de hand van metingen in de bodem op 4 locaties langs het spoor. De meetpunten zijn gekozen op een afstand van ongeveer 25 meter tot het spoor, de afstand waarop in veel gevallen ongeveer de eerstelijnsbebouwing begint en waarin de trillingssterkten doorgaans ook het hoogst zijn. Gerealiseerd moet worden dat op grotere afstanden tot het spoor afwijkende relaties kunnen gelden doordat de bodem in toenemende mate hogere frequenties verzwakt en het trillingssignaal daarmee verandert. Het onderzoek richt zich primair echter op de effecten voor de eerstelijns bebouwing.

Naast de rijsnelheid is ook gekeken naar andere factoren die van invloed zijn op de trillingssterkte. In het onderzoek zijn betrokken de invloed van de wiellast en ook die van de wieltoestand of wielkwaliteit. Daarnaast is gekeken naar de invloed van de bodemsamenstelling.

Het onderzoek naar de relatie rijsnelheid - trillingsopwekking is uitgevoerd op vier meetlocaties: Esch, Dordrecht, Tilburg en Oldenzaal. Alle meetlocaties bevonden zich in de nabijheid van een Qua Vadis meetstation waarvan de data betreffende de wiellast en wielkwaliteit afkomstig is.

Op iedere locatie is gedurende drie maanden de trillingsopwekking van treinpassages gemeten. De metingen zijn uitgevoerd in de maanden september t/m november van het jaar 2016. In deze periode zijn in totaal zo'n 10.000 goederentreinen en ook nog eens ruim 60.000 reizigerstreinen gemeten.

Het onderzoek toont aan dat trillingssterkte behalve van de rijsnelheid van meerdere factoren afhankelijk is, met name van bodemsamenstelling, type materieel en onderhoudstoestand. De gevoeligheid van de bodem en de geometrie van het materieel bepalen welke onderliggende mechanismen in de trillingsopwekking dominant zijn. Binnen een snelheidsbereik van ongeveer 60 tot 110 km/u zijn dit de volgende mechanismen en bijbehorende frequenties:

- De belasting van de wielstellen op de bodem (het eigenveld), frequenties: 3.15 - 5 Hz.
- Vlakke plaatsen, onbalans of onrondheid van wielen, frequenties: 6.3 - 20 Hz.
- Hogere orde slijtagepatronen op de wielband, frequenties: vanaf 20 Hz.
- Stijfheidsverschil spoorstaaf op de dwarsliggers en daartussen, ofwel het 'aantikken' van de dwarsliggers door de wielen, frequenties: 31.5 - 50 Hz.

In het eerste en laatste mechanisme is de wiellast bepalend en in de twee tussenstaande mechanismen de wieltoestand (besloten in de door QV gemeten rms_laag).

Het onderzoek toont aan dat de trillingsopwekking op de vier locaties qua samenstelling uit bovengenoemde mechanismen verschilt. In Dordrecht is de bodem gevoelig voor frequenties vanaf 4 Hz terwijl de bodem in Tilburg en Esch zich stijver gedraagt en pas gevoelig lijkt voor frequenties vanaf 6 Hz. Dit maakt een groot verschil in de invloed van de voorbijtrekkende wielstellen (wiellast) op de trillingsopwekking. Deze wiellast speelt een dominante rol in Dordrecht en dan vooral bij de zware ertstreinen. Ertswagons zijn kort en de afstand tussen de wielstellen van een wagon en die tussen opvolgende wagons is nagenoeg hetzelfde. Dit regelmatige patroon resulteert in een relatief sterke drukpuls in de frequentieband van 3 tot 5 Hz waarvoor de slappe bodem in Dordrecht gevoelig is.

In Tilburg is de belasting van de wielstellen (wiellast) eveneens zichtbaar in de registraties, maar de trillingssterkten liggen over de hele linie ongeveer een factor 2 ofwel 6 dB lager dan in Dordrecht.

In Oldenzaal wordt een sterk afwijkend patroon waargenomen qua trillingsopwekking. Hier zijn frequenties hoger dan 30 Hz dominant, hetgeen is toe te schrijven aan het 'aantikken' van de dwarsliggers door de wielen óf hogere orde slijtagepatronen op de wielband. De bodem is hier zeer gevoelig voor frequenties rond 40 Hz waardoor een snelheidsverlaging hier ook een bovengemiddeld sterk effect heeft.

Uit het onderzoek blijken per locatie de volgende bepalende mechanismen en bijbehorende snelheidsbereik waarover de dominantie geldt:

- Esch: Wielkwaliteit (60 - 100 km/u) en aantikken dwarsliggers en/of hogere orde slijtage wielband (90 - 100 km/u).
- Dordrecht: Belasting wielstel (80 - 100 km/u) en wielkwaliteit (60 - 100 km/u).
- Tilburg: Belasting wielstel (90 - 100 km/u) en wielkwaliteit (60 - 100 km/u).
- Oldenzaal: Aantikken dwarsliggers en/of hogere orde slijtage wielband (80 - 90 km/u).

Door de verschillen in opbouw van de trillingssterkte heeft snelheidsverlaging een verschillende uitwerking op de onderzochte locaties. Gemiddeld zullen de trillingssterkten V_{\max} en V_{rms} met ongeveer 3 dB afnemen bij een snelheidsverlaging van 90 naar 60 km/u, maar de afname kan ook veel hoger of juist lager uitvallen. In Oldenzaal was de afname ongeveer 5 tot 7 dB terwijl er in Esch een uiteenlopend beeld was tussen beide sporen, met zelfs een toename van 0 tot 3 dB op spoor 1 en maar een bescheiden afname van 1 à 2 dB op spoor 2. Globaal zijn voor de beschouwde trillingsparameters V_{\max} en V_{rms} de volgende effecten en relaties vastgesteld:

Locatie	V_{MAX}		V_{RMS}	
	Effect snelheid 90 km/u → 60 km/u [dB]	Relatie V[mm/s]	Effect snelheid 90 km/u → 60 km/u [dB]	Relatie V[mm/s]
Esch	0 (-2 tot +4)	~ 1 (of v^0)	0 (-2 tot +4)	~ 1 (of v^0)
Dordrecht	-3 (-5 tot -2)	~ v^{-1} ($v^{0.6}$ tot 1.4)	-3 (-5 tot -2)	~ v^{-1} ($v^{0.6}$ tot 1.4)
Tilburg	-3 (-3 tot -2)	~ v^{-1} ($v^{0.5}$ tot 1)	-3 (-3 tot -1)	~ v^{-1} ($v^{0.3}$ tot 1)
Oldenzaal	-7 (-8 tot -5)	~ v^{-2} ($v^{1.5}$ tot 2.2)	-5 (-6 tot -3)	~ v^{-2} (v^1 tot 2)

Dit globale beeld laat zien dat er tussen 60 en 90 km/u verschillende relaties qua trillingsopwekking mogelijk zijn, variërend van nagenoeg verwaarloosbaar (Esch) tot een meer dan kwadratische toename (Oldenzaal). Gemiddeld neemt de trillingssterkte evenredig af met de rijnsnelheid (Dordrecht en Tilburg).

Hoewel snelheidsverlaging veelal tot lagere trillingssterkten zal leiden is hiervoor dus geen landelijk geldende trend te bepalen. Per situatie moet bepaald worden welke opwekkingsmechanismen dominant zijn én welk treinmaterieel tot hinderklachten leidt, alvorens een goede maatregelafweging mogelijk is. Verder is het een beleidsmatige afweging of de behaalde trillingsreducties opwegen tegen de nadelen in de doorstroming op het spoor en in welke mate deze maatregel inzetbaar is. Daarover wordt in dit onderzoek geen oordeel gegeven. Het onderzoek is bedoeld om deze discussie op inhoud te kunnen voeren.

Het onderzoek toont aan dat de trillingssterkte V_{\max} een sterke relatie heeft met de maximum wiellast in een treincombinatie. Uitschieters in de wiellast van afzonderlijke locs of wagons hebben dus effect op de trillingssterkte V_{\max} . De V_{rms} die een gemiddelde over een treinpassage voorstelt is hier nauwelijks gevoelig voor.

De trillingssterkte V_{rms} lijkt een sterke relatie te hebben met de wieltoestand, maar gebleken is dat de parameter rms_laag (wieltoestand) óók afhankelijk is van de wiellast en van de rijsnelheid. Consequentie hiervan is dat een deel van het snelheidseffect in de analyses wordt toegeschreven aan de variatie in deze parameter rms_laag, waarin ook een snelheidseffect ligt besloten. Alvorens vervoerders kunnen worden aangesproken op een slechte wieltoestand zou het snelheidseffect en de invloed van de wiellast hieruit geëlimineerd moeten worden, zodat een zuivere parameter betreffende de wieltoestand overblijft. Dit vergt nader onderzoek naar de bepalingswijze van de rms_laag en hoe dit te implementeren in de QV stations. Uit het onderzoek zijn nu de volgende afhankelijkheden van de wiellast en de wieltoestand gebleken:

- Toename V_{max} circa 1 tot 2 dB per ton wiellast.
- Toename V_{rms} circa 0.5 tot 12 dB per kN toename rms_laag (gemiddelde over een trein).

Inhoud

Samenvatting	3
1. Inleiding	7
2. Onderzoek	8
2.1 Opzet van het onderzoek	8
2.2 Selectie meetlocaties	8
2.3 Opzet metingen	14
2.4 Registraties en verwerking	15
2.5 Analyses	16
2.6 Definitie subgroepen	18
3. Beoordeling spoor kwaliteit	20
3.1 Scope van het onderzoek	20
3.2 Analyse spoorligging	20
3.3 Conclusies spoorligging	21
4. Resultaten trillingsonderzoek	22
4.1 Aantallen treinpassages	22
4.2 Verdeling rijnsnelheden	22
4.3 Trillingsoverdracht (bodemdemping) per locatie	24
4.4 Analyse wieltoestand per locatie	25
5. Analyse trillingsopwekking goederentreinen	27
5.1 Resultaten	27
5.2 Beschouwing algemeen	28
5.3 Correlatie parameters	29
5.4 Effect snelheidsverlaging	30
6. Analyse homogene subgroepen	31
6.1 Resultaten	31
6.2 Beschouwing	32
6.3 Analyse trillingssterkten V_{RMS} en V_{MAX} als functie van de rijnsnelheid	33
6.4 Effect gematigde rijnsnelheid	40
7. Conclusies	42
Bijlagen	
Bijlage 1	Trillingsregistraties meetlocaties - Afhankelijkheid van QV-parameters
Bijlage 2	Trillingsregistraties meetlocaties - Analyse subgroepen
Bijlage 3	Tabellen trendanalyse
Bijlage 4	Spectrale analyse spoorligging o.b.v meetdata Eurailscout
Bijlage 5	Beoordeling kwaliteit spoorligging meetlocaties

1. Inleiding

In opdracht van ProRail B.V. heeft DGMR onderzoek gedaan naar de relatie tussen de rijsnelheid van goederentreinen en de trillingsopwekking in de bodem. Aanleiding voor dit onderzoek is de suggestie in diverse onderzoeken en procedures ten behoeve van tracébesluiten om trillingshinder tegen te gaan door een verlaging van de rijsnelheid voor trillingveroorzakende vervoerders of op bepaalde tijden, ofwel het invoeren van “gedifferentieerd rijden”.

Het tracébesluit “Sporen in Den Bosch (SiB)” van 16 maart 2011 maakt hier melding van, maar de huidige spoorwetgeving staat dit nog niet toe. Zou men dit in de toekomst willen overwegen dan is het vereist om eerst duidelijk inzicht te krijgen in de relatie tussen de rijsnelheid en de trillingsmissie.

Vooralsnog is er maar beperkt onderzoek voorhanden over de relatie tussen de rijsnelheid en de trillingssterkte en het hieruit ontstane beeld is niet consistent en veelal ook vertroebeld door invloedsfactoren buiten waarneming van het betreffende onderzoek. Daarmee is het niet duidelijk op welke wijze “gedifferentieerd rijden” kan helpen in het beperken van trillingshinder en ook ingezet kan worden in het doen van trillingprognoses. Het doel van dit onderzoek is dan ook om meer inzicht te krijgen in de relatie tussen de rijsnelheid van goederentreinen en de trillingsopwekking in de bodem.

De onderzoeksvragen luiden:

1. Wat is de relatie tussen de rijsnelheid van goederentreinen en de daaruit volgende trillingsmissie in de bodem naast het spoor?
2. Welke rol spelen de bodemsamenstelling en spoorligging in deze relatie?
3. Welke invloed hebben de aslast en de wieltoestand op deze relatie?

Leeswijzer

In dit rapport wordt de invloed van de rijsnelheid op de trillingsopwekking in de bodem op twee manieren geanalyseerd, als multi-regressie analyse op alle goederentreinen en o.b.v. zo homogeen mogelijke selecties van materieel (subgroepen). Deze analyses vindt u in de hoofdstukken 5 en 6. De indeling van het rapport is verder als volgt:

Hoofdstuk 2 gaat over de opzet van het onderzoek, de meetlocaties en de wijze waarop data wordt geanalyseerd.

Hoofdstuk 3 behandelt de kwaliteit van de spoorligging. Wie minder geïnteresseerd is in de technische analyses kan doorgaan naar de conclusies aangaande de spoorligging in paragraaf 3.3 en laat de bijlagen 4 en 5 aan zich voorbijgaan.

Hoofdstuk 4 gaat in op de meetresultaten en de bodemdemping per locatie. Hierin wordt het aantal treinpassages en de snelheidsverdeling per locatie beschreven, alsmede de kenmerkende eigenschappen van deze treinen volgens de Qua Vadis meetstations.

Hoofdstuk 5 geeft een multi-regressie analyse voor de gehele populatie goederentreinen per locatie, waarin de voor de trillingen mede bepalende parameters wiellast en wieltoestand worden betrokken. Wie niet geïnteresseerd is in een nadere analyse van de correlatie met deze parameters slaat paragraaf 5.3 over en gaat verder met 5.4.

Hoofdstuk 6 geeft een analyse van de trillingssterkte als functie van de rijsnelheid voor zo homogeen mogelijke groepen qua materieel. Wie niet geïnteresseerd is in een technische analyse van de voor de trillingsopwekking verantwoordelijke mechanismen slaat paragraaf 6.3 over en gaat verder met 6.4.

Hoofdstuk 7 geeft de conclusies van het onderzoek. Hierin worden de analyses uit hoofdstukken 5 en 6 samengenomen tot een overkoepelend beeld van de relatie tussen rijsnelheid en trillingssterkte.

Voor een snelle toegang tot het onderzoek wordt verwezen naar de **samenvatting** voorin dit rapport.

2. Onderzoek

2.1 Opzet van het onderzoek

Het onderzoek is uitgevoerd op meetpunten in de bodem, op 25 meter afstand tot de hartlijn van het dichtstbijzijnde spoor. Veel woningen waarin hinder door railverkeer optreedt liggen op afstanden van 20 tot 30 meter tot het spoor, waarmee dit een logische afstand is voor onderzoek. Door 25 meter afstand aan te houden wordt er een volledige ontwikkeling van oppervlaktegolven (Raleighgolven) in de bodem verwacht en minder invloeden van het nabijheidsveld. Het laatste zou tot grotere spreiding in de meetresultaten tussen locaties onderling kunnen leiden. Op een veel grotere afstand, dan de gekozen 25 meter tot het spoor, zal mogelijk een andere snelheidsrelatie gelden doordat het trillingssignaal met toenemende afstand een steeds meer laagfrequent karakter krijgt. Het onderzoek richt zich echter op de woningen met de meeste hinder en die wordt verwacht in de eerstelijns bebouwing vanaf het spoor op de genoemde afstand van globaal 20 tot 30 meter.

Om meer inzicht te krijgen in de invloed van de bodem op de meetresultaten is op iedere meetlocatie gedurende 1 à 2 weken ook een bodemmeetpunt op ongeveer 5 meter afstand tot het spoor ingericht, zodat de bodemoverdracht over een groot aantal treinpassages kon worden gemeten.

De onderzoeklocaties zijn gekozen op trajecten waar ook een Quo Vadis (QV) meetstation aanwezig is. Deze stations leveren een grote hoeveelheid aan treingegevens, zoals de samenstelling, de as- en wiellasten en ook de rijnsnelheid. Om zeker te zijn van een juiste koppeling van deze treingegevens aan de meetwaarden en ook eventuele verschillen in rijnsnelheden te detecteren is iedere meetlocatie ook uitgerust met een radar meetpunt.

Om in de toekomst nadere analyse van specifieke treinpassages mogelijk te maken is iedere locatie ook voorzien van een webcam. Informatie van deze webcam wordt binnen dit onderzoek alleen gebruikt als controlemiddel op koppeling tussen meetdata en QV treingegevens.

2.2 Selectie meetlocaties

2.2.1 Randvoorwaarden

In de vraagspecificatie behorende bij dit onderzoek is een aantal trajecten benoemd waaruit een keuze gemaakt kan worden. Voorgeschreven is een meetpunt nabij 's-Hertogenbosch, verband houdende met het eerder genoemde Tracébesluit SiB, en drie aanvullende locaties te kiezen uit de volgende trajecten:

- Nabij Quo Vadis station Geldermalsen, voor het treinverkeer tussen Culemborg en de aansluiting op de Betuweroute.
- Nabij Quo Vadis station Vught of Boxtel voor het treinverkeer tussen 's-Hertogenbosch en Eindhoven.
- Ten noorden van het Hollandsch Diep, bij Tilburg of bij Boxtel voor het treinverkeer op de Brabantroute.

De locaties zijn zodanig te kiezen dat niet alle metingen op gelijke bodemsoort worden uitgevoerd.

Van belang voor het onderzoek is dat alle meetpunten worden ingericht nabij een Quo Vadis station, zodat de door deze stations uitgelezen of gemeten treinparameters beschikbaar zijn voor het onderzoek. Om de koppeling tussen deze gegevens en die gemeten op de vier meetlocaties zo goed mogelijk te krijgen (geen koppelingsfouten) is het van belang dat de afstand tussen de meetlocaties en de Quo Vadis stations zo klein mogelijk is. Verder zijn de meetomstandigheden ter plaatse en de aanwezigheid van spoorelementen met nadelige invloed op de trillingsniveaus tijdens metingen als: bochten, wissels, overwegen of spooronderbrekingen (ES-las) leidend in de locatiekeuze.

Het onderzoek baseert zich op meetpunten op 25 meter afstand tot het spoor. Idealiter bevinden zich in het spoor, binnen 200 meter voor en na een meetpunt geen elementen die de trillingsopwekking zouden kunnen verhogen en onderling vergelijk tussen de meetpunten zouden bemoeilijken. Aan deze voorwaarde kan echter nagenoeg nergens worden voldaan, indien ook de uitvoerbaarheid van een meetpunt wordt meegewogen. Getracht is meetpunten te vinden waarbij de afstand tot ES-lassen en wissels meer dan 100 meter bedraagt en die tot bochten en overwegen meer dan 200 meter.

Behalve de bodemsamenstelling en de terreintoestand zijn de aanwezigheid van watergangen of (diepe) sloten tussen spoor en meetpunt, een hoog spoortalud of verdiepte ligging van het land ook invloeden die de invloed hebben op de trillingsopwekking in de bodem ter plaatse van het meetpunt, ofschoon dit niet hoeft te betekenen dat dit de relatie tussen de rijnsnelheid en de trillingsopwekking significant beïnvloedt. De aanwezigheid van brede/diepe watergangen is bij de locatiekeuze vermeden, maar hoogteverschillen tussen spoor en terrein konden niet worden uitgesloten, daar dit vaak een gegeven is over grote spoorlengten en daarmee sommige trajecten al op voorhand zou diskwalificeren.

2.2.2 Locatiekeuze

Voor de locatiekeuze is een aantal tracés nabij een QV-station, door middel van luchtfoto's (RailMaps), verkend en daaropvolgend is op zes locaties een verkenning gedaan. Hieruit zijn vier locaties gekozen.

Nabij 's-Hertogenbosch bevinden zich twee QV-stations, het station Geffen op de lijn 's-Hertogenbosch - Nijmegen en station Esch op de lijn 's-Hertogenbosch-Eindhoven. Omdat nabij Rosmalen al eerder een trillingsonderzoek is uitgevoerd, waarbij een koppeling is gemaakt met QV-data van het station Geffen, is in dit onderzoek gekozen voor de lijn 's-Hertogenbosch-Eindhoven en het QV-station Esch. Dit meetpunt ligt ongeveer 10 km ten zuiden van 's-Hertogenbosch en net even ten noorden van Boxtel. Deze in overleg met ProRail gemaakte keuze houdt wel in dat daarmee de voorgeschreven locatie nabij 's-Hertogenbosch en de keuze voor de lijn 's-Hertogenbosch-Eindhoven zijn samengevoegd tot één locatie en dat er dus nog een alternatieve locatie moet worden toegevoegd.

Het QV-station op de lijn Culemborg - Geldermalsen (aansluiting Betuweroute) ligt bij Tricht. Om een 100% koppeling te houden tussen meetdata en treingegevens van het QV-station moet op hetzelfde traject worden gemeten en dit traject is slechts 1,8 km lang. Hierin liggen: een overweg, een emplacement, een honderden meters lange waterpartij naast het spoor en de spoorbrug over de Linge. Hierdoor kon geen geschikte meetlocatie worden gevonden. In overleg met ProRail zijn alternatieve locaties verkend nabij de QV-stations Zevenaar, Oldenzaal en Elst. Vanwege uitvoerbaarheid en het verwachte treinaanbod (werkzaamheden nabij Elst en Zevenaar) is voor de locatie Oldenzaal gekozen.

Op de Brabantroute konden wel geschikte locaties worden gevonden. Op deze route zijn twee locaties geselecteerd: nabij het QV-station Dordrecht-Lage Zwaluwe en nabij het QV-station Tilburg. Tabel 1 geeft een overzicht van de gekozen meetlocaties, het meest nabije QV-station en de afstanden tot mogelijk verstorende entiteiten in het spoor.

tabel 1: meetlocaties

Locatie	Spoorlijn	Geocode	KM meetpunt	QV-station	KM QV station	Afstand QV	Afstand tot spoorentiteit
1: Esch	's-Hertogenbosch - Eindhoven	053	57.41	Esch 273/274	56.70	710 m	ES-las: 70 m
2: Dordrecht	Dordrecht - Lage Zwaluwe	119	21.11	Dordrecht 81/82	21.03	80 m	wissel: 80 m bocht: 130 m
3: Tilburg	Tilburg - Breda	123	13.58	Tilburg 101/104	14.27	690 m	overweg: 140 m
4: Oldenzaal	Hengelo - Duitse grens	026	33.04	Oldenzaal 971/972	32.70	340 m	ES-las: 85 m

2.2.2.1 Esch

De meetlocatie Esch bevindt zich ten westen van de spoorlijn 's-Hertogenbosch - Eindhoven op het terrein van een boomkwekerij. Tussen het spoor en het 25 meter meetpunt bevindt zich een kleine spoorloot, maar door de sloot kan op deze locatie geen (tijdelijk) 5 meter punt ingericht worden. Op deze locatie is het 5 meter punt verplaatst naar 9 meter afstand tot het spoor. Het spoortalud inclusief ballastbed is hier ongeveer een halve meter hoog.

70 meter noordelijk van het meetpunt bevindt zich in het spoor een ES-las en 300 meter naar het zuiden een overweg. Er zijn geen mogelijk versturende wegen in de buurt. Het QV-station bevindt zich 700 meter zuidelijker.



figuur 1: meetlocatie Esch

Van de meetlocatie zijn geen sonderingsgegevens bekend. De dichtstbijzijnde sonderingen uit Esch en Boxel tonen verschillen in de vastheid van het bovenste bodempakket, dat uit zand- en kleilagen bestaat. Op meer dan 10 meter diepte bevindt zich een zeer draagkrachtige zandlaag. De sondering uit Esch toont een sterke gelaagdheid in de bovenste 10 meter met conusweerstand variërend (afwisselend) tussen 4 en 17 MPa.

2.2.2.2 Dordrecht

De meetlocatie Dordrecht bevindt zich ten zuiden van Dordrecht in de polder Oudendijk even ten noorden van de Moerdijkbrug over het Hollandsch Diep. De spoordijk ligt circa 3 meter boven het polderniveau en tussen spoordijk en het 25 meter punt ligt een sloot, die ter plaatse van het meetpunt ongeveer 2 meter breed is maar meer naar het noorden wijder wordt. Het meetpunt bevindt zich in de dierenweide ten westen van de boerderij.

Op 85 meter noordelijk van het meetpunt bevindt zich in het spoor een overloopwissel en 170 meter naar het zuiden een ES-las. Ongeveer ter hoogte van de ES-las begint ook de lange bocht richting de Moerdijkbrug. West van het spoor (bovenzijde figuur 2) ligt de snelweg A16. De afstand van de snelweg tot het 25 meter punt bedraagt ongeveer 50 meter.

Het QV-station bevindt zich vlak bij het meetpunt, ongeveer 30 meter naar het zuiden.



figuur 2: meetlocatie Dordrecht

Sonderingsgegevens 200 meter noordelijker, in dezelfde polder ten oosten van de spoordijk, laten in de toplaag van de bodem klei- en veenlagen zien tot op circa 10 meter diepte. Daaronder liggen matig vaste klei- en zandlagen, maar op 15 meter diepte wordt wederom een zeer slappe klei- of veenlaag waargenomen. Een vast zandpakket wordt pas aangetroffen op meer dan 20 meter diepte.

2.2.2.3 Tilburg

De meetlocatie ten westen van Tilburg bevindt zich in grasland aan de noordzijde van het spoor tussen Tilburg en Gilze-Rijen. Tussen spoor en 25 meter punt bevindt zich nog een fietspad, maar verder zijn er afgezien van mogelijk landbouwvoertuigen nauwelijks versturende invloeden. 140 meter ten oosten van het meetpunt bevindt zich een overweg en 300 meter ten westen in het spoor een ES-las.



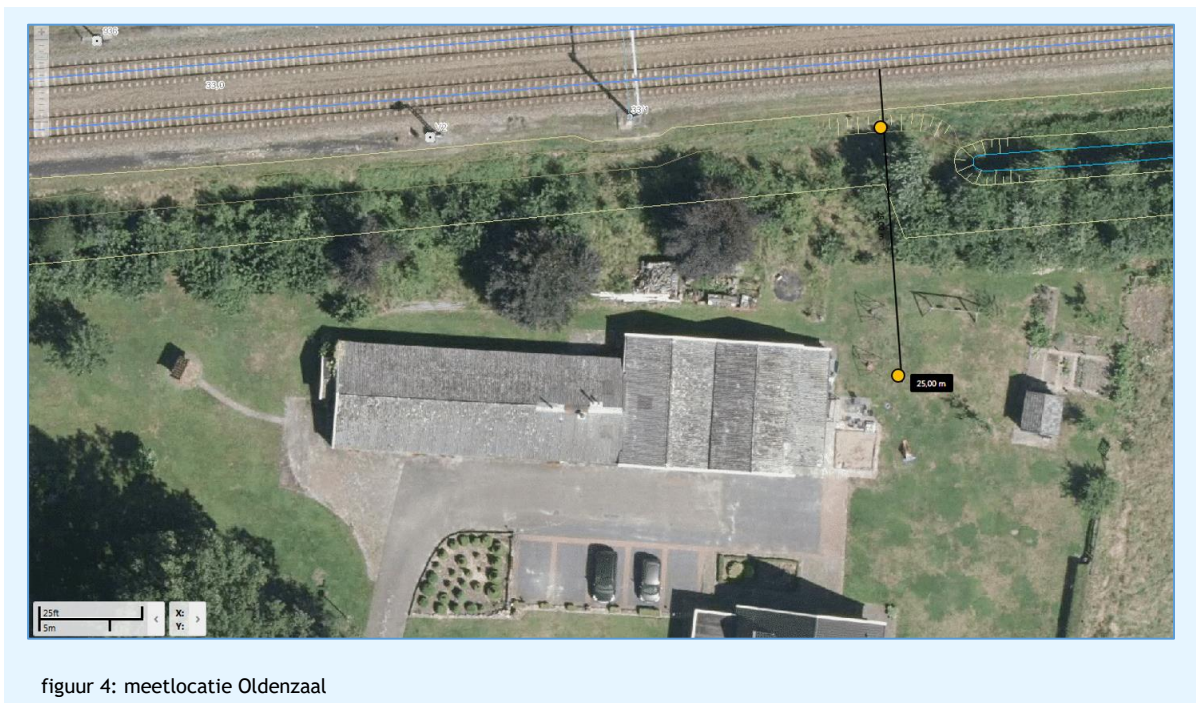
figuur 3: meetlocatie Tilburg

De bodemsamenstelling bestaat uit matig vaste zand- en/of kleilagen met conusweerstand variërend tussen 6 en 12 MPa. De gelaagdheid is niet erg sterk, het lijkt meer te gaan om dunne lagen die in elkaar overlopen.

2.2.2.4 Oldenzaal

De meetlocatie Oldenzaal bevindt zich ten oosten van De Lutte, tussen de overweg Bentheimerstraat en de Duitse Grens. Het 25 meter punt ligt op het gazon van boerderij Bentheimerstraat 99 en ter hoogte van het meetpunt bevindt zich geen spoorloot, deze begint 5 meter meer naar het oosten. Het spoor ligt op een klein talud. De hoogte van de spoorstaven bedraagt circa 1 meter boven maaiveld. 220 meter ten westen van het meetpunt ligt de overweg Bentheimerstraat, maar dichterbij in die richting, op circa 85 meter, is een ES-las aanwezig in het spoor.

Verstorende invloeden zijn er mogelijk van verkeer op de Bentheimerstraat en de ten noorden van het spoor liggende Zandhuizerweg. Beide wegen liggen op circa 80 meter tot het 25 meter meetpunt. Deze invloed wordt ten opzichte van de trillingsopwekking van treinen als verwaarloosbaar gezien.



Van de meetlocatie zijn geen sonderingsgegevens beschikbaar in het dinoloket. De dichtstbijzijnde beschikbare sondering ligt 2 km westelijker ter plaatse van het viaduct van de A1 over dezelfde spoorlijn. Deze sondering toont een slappe kleiachtige bodem (conusweerstand circa 2 tot 4 MPa) tot op grote diepte slechts doorsneden door een dunne zandlaag op circa 17 meter diepte.

2.3 Opzet metingen

Alle metingen in dit onderzoek zijn uitgevoerd door partner Sensornet B.V. Zij hebben de meetlocaties beinstrumenteerd, een webportal voor het online volgen van de metingen opgezet en een dashboard voor snel inzicht in de belangrijkste parameters gebouwd. Sensornet heeft ook de koppeling tot stand gebracht tussen de meetdata en de door Quo Vadis aangeleverde treingegevens.

2.3.1 Meetpunten

Ieder meetpunt bestaat uit een 3D trillingsmeetsysteem (drie meetrichtingen), een snelheidsradar en een webcam voor het maken van time-lapse video-opnamen. Voor het meten van de overdrachten is elk meetpunt tijdelijk voorzien van een 5 meter meetpunt. Alleen op de locatie Esch was het niet mogelijk om een 5 meter punt aan te brengen en is zo dicht mogelijk bij het spoor gemeten op 9 meter afstand.

De trillingsmeetsystemen bestaan uit een meetkoffer met data-acquisitie module en een geïntegreerde 3D meeteenheid bestaande uit drie gevoelige accelerometers. De meetkoffers zijn ter plekke ingegraven op circa 30 tot 40 cm diepte onder maaiveld en de teruggebrachte grond is zorgvuldig ingewaterd om volledige inbedding van de meeteenheid te garanderen, zie figuur 5.



figuur 5: meetopstelling: radar en webcam (l) en meetkoffer (r)

2.3.2 Meetapparatuur

De metingen zijn uitgevoerd door Sensornet met de in tabel opgenomen meetapparatuur. Alle gebruikte meetapparatuur beschikte ten tijde van de metingen over een geldige kalibratie.

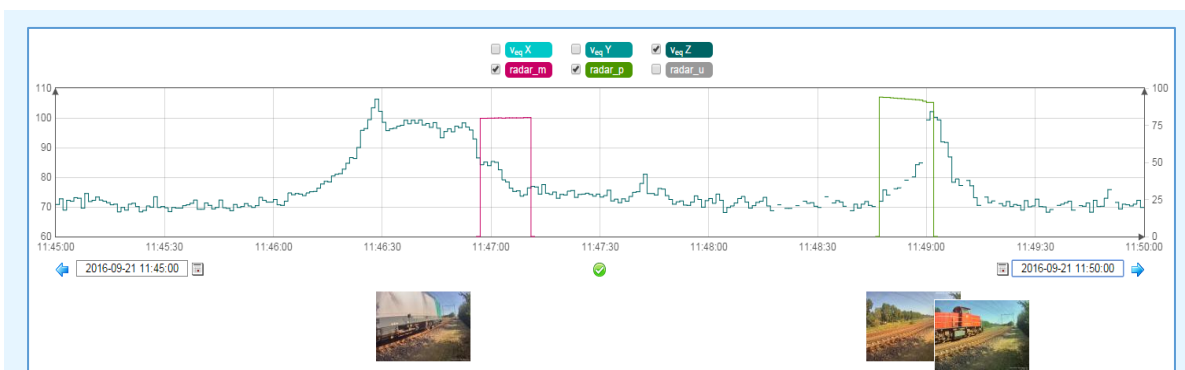
tabel 2: overzicht gebruikte meetapparatuur

Locatie	Meetpunt	Opnemer	Type	Serienummer	Sensornet-ID
Esch	5 m	Triaxial accelerometer	Visong 16500-T	00068	V014
	25 m-X	Uni-axial accelerometer	Visong 17200	J0442	V057
	25 m-Y			J0438	V062
	25 m-Z			J0443	V067
Dordrecht	5 m-X	Uni-axial accelerometer	Wilcoxon 731-207	3966	V074
	5 m-Y			3964	V080
	5 m-Z			3967	V082
	25 m-X	Uni-axial accelerometer	Visong 17200	J0440	V059
	25 m-Y			J0434	V060
	25 m-Z			J0444	V069
	5 m			Triaxial accelerometer	Visong 16500-T
Tilburg	25 m-X	Uni-axial accelerometer	Wilcoxon 731-207	3972	V076
	25 m-Y			3965	V078
	25 m-Z			3969	V083
	5 m-X	Uni-axial accelerometer	Visong 17200	J0391	V003
5 m-Y	J0341			V027	
5 m-Z	J0408			V084	
25 m-X	3968			V073	
25 m-Y	3974			V077	
Oldenzaal	25 m-Z	Uni-axial accelerometer	Wilcoxon 731-207	3963	V084

2.4 Registraties en verwerking

Gedurende de metingen is continu de effectieve trillingssterkte ($V_{eff,max}$) per seconde gemeten.

De meetdata van de trillingsopnemers, de radarmetingen en video-opnamen van de camera zijn via een internet verbinding verstuurd naar de server van Sensornet en waren via een website ook te volgen, zie figuur 6.



figuur 6: dashboard trillingsregistraties Sensornet

Van de binnenkomende trillingsdata is een database met events gevormd op basis van de volgende criteria:

- 1 Registratie begintijdstip als de equivalente trillingssterkte over 1 seconde in x-, y- of z-richting boven het triggerniveau van 80 dB komt.
- 2 Registratie eindtijdstip als de equivalente trillingssterkte over 1 seconde over alle drie de richtingen onder het grensniveau van 80 dB komen.
- 3 Als het verschil tussen de eindtijd en begintijd groter is dan 5 seconden is het een event. Is de duur korter dan is het geen event.

Het totale equivalente trillingsniveau ($L_{v,RMS}$) is bepaald als gemiddelde over alle equivalente trillingsniveaus binnen het tijdsinterval. Het moment van het maximale trillingsniveau ($L_{v,max}$) is vastgelegd als tijdstip van het event.

Dit tijdstip is gekoppeld aan het dichtstbijzijnde tijdstip van de QV-data met de treingegevens. Door dit te combineren met de radarwaarneming is bepaald of een event een treinpassage betreft.

De trillingsregistraties, radarmetingen en camerabeelden zijn samen met een lijst van events weergegeven op een web portal. Daarin zijn de snelheidsniveaus lineair, ongewogen, gepresenteerd. De snelheidsniveaus (V) worden uitgedrukt in dB ten opzichte van het referentieniveau van 10^{-9} m/s (1 nm/s) volgens onderstaande formule:

$$L_v = 10 * \log\left(\frac{V^2}{V_0^2}\right) \quad \text{waarin} \quad v = v_0 * 10^{\left(\frac{L_v}{20}\right)}$$

Hierin is:

- L_v snelheidsniveau in dB
- V gemeten snelheid in m/s
- V_0 referentiesnelheid: 1 nm/s

Ter verduidelijking van de omrekening van lineaire trilsnelheid [mm/s] naar trillingsniveau [dB] en een indicatie van de beleving van de trillingssterkte V_{eff} is tabel 3 toegevoegd. De voelbaarheidsgrens voor de gemiddelde mens bedraagt ongeveer 100 dB.

tabel 3: omrekening trilsnelheid in trillingsniveaus en kwalificatie voelbaarheid trillingen

Trilsnelheid in mm/s	Snelheidsniveaus in dB t.o.v. 1 nm/s	Kwalificatie trillingssterkte V_{eff}
0.01	80	Niet voelbaar
0.05	94	
0.1	100	Juist voelbaar
0.2	106	
0.4	112	Goed voelbaar
0.8	118	
1.6	124	Sterk voelbaar
3.2	130	

2.5 Analyses

2.5.1 Parameters trillingssterkte

De analyses van het effect van de rijsnelheid op de trillingssterkte wordt conform de vraagstelling gebaseerd op twee qua hinderbeleving gangbare trillingsparameters, de $V_{\text{eff,max}}$ en de V_{RMS} .

$V_{\text{eff,max}}$

De $V_{\text{eff,max}}$ trillingssterkte is bepaald conform de definities van de SBR-richtlijn trillingen, deel B - "Hinder voor personen in gebouwen", verder aangeduid als SBR-B. Ook het verwerkingsvoorschrift behorende bij de Bts, dat gebruikt wordt in het kader van tracébesluiten, kent dezelfde bepalingwijze van de $V_{\text{eff,max}}$, hoewel de verwerking tot maatgevende maximale trillingssterkte $V_{\text{max,BTS}}$ hierin op statistische wijze gebeurt in afwijking van de SBR-B waarin de maximaal opgetreden trillingssterkte V_{max} wordt genomen.

V_{RMS}

De vraagspecificatie vraagt ook om een analyse te maken tussen de RMS-waarde van de trillingssterkte (V_{RMS}) en de rijsnelheid. De RMS trillingssterkte geeft een gewogen trillingssterkte over de duur van een treinpassage en vertegenwoordigt dus een gemiddelde qua trillingsopwekking over alle wagons tezamen. De V_{max} daarentegen is meer volgend op uitschieters in de trillingsopwekking als gevolg van onderscheid op wagon-, as- of zelfs wielniveau.

In de RMS-trillingssterkte speelt de duur van een passage een grote rol en deze is enigszins arbitrair. Het begin en het eind van een treinpassage zijn niet scherp afgebakend. Een lichte verhoging in trillingssterkte is al waarneembaar bij treinen op grote afstand. Op het moment dat een trein begint te naderen treedt vanaf zeker moment een sterkere stijging op in de trillingssterkte, hetgeen zichtbaar is als knikpunt in de trillingsregistratie. Globaal zijn deze knikpunten beoogd als begin en einde van een treinpassage, maar uit praktische overwegingen vertaald in een vast triggerniveau per meetlocatie. Rond het knikpunt is het effect van een iets lager of hoger triggerniveau op de passageduur beperkt, vanwege de steilheid van de trillingstoename of -afname.

2.5.2 Parameters trillingsopwekking

Behalve de rijsnelheid heeft ook het treinmaterieel een grote invloed op de trillingsopwekking. Daarom zijn in de analyses ook de naar verwachting meest bepalende parameters van het spoomaterieel betrokken. In samenspraak met de klankbordgroep (TU-Delft/ProRail) is in beginsel gekozen voor de QV-parameters: aslast en de qwm_rms-laag. Deze laatste parameter betreft de dynamische kracht die een wiel op de spoorstaaf uitoefent, gemeten over het frequentiebereik van 20 tot 200 Hz. Hierin komt de onderhoudstoestand (ruwheid) van een spoorwiel tot uitdrukking maar ook de onafgeveerde massa van een wielstel. Feitelijk het product van de door de ruwheid opgedrongen verticale versnelling en de onafgeveerde massa van het wielstel ($F = m \times a$). Omdat de aslast geen rechtstreeks door QV gemeten parameter betreft, maar een van de wiellast afgeleide parameter, is ervoor gekozen om in plaats daarvan de wiellast te gebruiken in het onderzoek.

Omdat de V_{max} door de bepalingswijze meer gevoelig is voor kortstondige verschijnselen dan de V_{rms} , wordt de V_{max} in de analyses in verband gebracht met de maximum optredende wiellast (qwm_gem_last) en de maximum wielruwheid (qwm_rms_laag) in een treincombinatie. In tabel 4 wordt een overzicht gegeven van de uitgevoerde analyses.

tabel 4: uitgevoerde trendanalyses

Parameter	QV-aanduiding	V_{rms}	V_{max} (V_{eff})	
Wiellast	qwm_gemiddelde_last_kn	gemiddelde per combi	max per combi	max pieklast per combi
Wieltoestand	qwm_rms_laag_kn	gemiddelde per combi	max per combi	(wiellast + rms_laag)

2.5.3 Trendanalyse

In veel onderzoeken wordt voor de relatie tussen de rijsnelheid en de trillingssterkte uitgegaan van een machtsfunctie. Bekend is echter dat de trillingsoverdracht in de bodem niet bij alle frequenties gelijk is, waardoor er bij bepaalde rijsnelheden afwijkingen kunnen zijn in de trillingsmissie die niet goed met een machtsfunctie zijn te beschrijven. Een functie die het best aansluit bij een set meetdata waarin meerdere (onbekende) verschijnselen een rol spelen is een polynoomfunctie. In beginsel wordt gekozen voor een derde orde polynoom. Als een hogere orde polynoom significant beter aansluit bij de meetdata dan zal hiertoe worden overgeschakeld. Dit wordt dan duidelijk aangegeven. De polynoomfunctie wordt gefit op de logaritme uit de trillingssterkte uitgedrukt in decibellen, daar de logaritme uit de trillingssterkte het best aansluit bij de hinderbeleving. Voor de bepaling van het best bij de meetdata aansluitende trendvlak wordt gebruik gemaakt van de kleinste kwadratenmethode. Dit houdt in dat bij het best aansluitende trendvlak de som van de gekwadrateerde afstanden van alle datapunten tot het trendvlak zo klein mogelijk is.

In theorie is de trillingsopwekking van goederentreinen te beschrijven als functie van de bepalende onafhankelijke parameters. Binnen de kaders van dit onderzoek zijn hiervoor gedefinieerd de wiellast en de wieltoestand (rms_laag). In paragraaf 2.5.2 is beschreven op welke wijze deze parameters binnen een treincombinatie worden verwerkt in de analyses.

In de analyse wordt telkens één parameter naast de rijsnelheid geanalyseerd. Reden hiervoor is dat bij meerdere parameters in één analyse de hiervoor benodigde populatiegrootte meer dan proportioneel toeneemt. Door de verdeling van de datapunten over meerdere assen wordt deze steeds meer verdund, hetgeen een statistisch betrouwbare trendfit bemoeilijkt. Een praktisch bezwaar is verder dat visualisatie van de trend in relatie tot de puntenwolk met drie onafhankelijke parameters ook niet meer mogelijk is. De invloed van de wiellast en de wieltoestand worden daarom in separate analyses beschouwd, zoals in tabel 4 aangegeven. De resultaten daarvan zijn te vinden in hoofdstuk 5.

2.6 Definitie subgroepen

Op iedere locatie zijn treinpassages gemeten verdeeld over twee sporen. In de analyses zijn deze treinpassages gesplitst naar spoorgebruik. Het afstandsverschil van het meetpunt naar beide sporen en het feit dat beide sporen een verschillende trillingsopwekking kunnen geven maakt deze opsplitsing noodzakelijk.

In de analyses wordt de invloed van de wiellast en de wieltoestand beschouwd, maar er zijn meer kenmerken aan te wijzen die mogelijk invloed hebben op de trillingsopwekking in de bodem. Binnen een zeer homogene groep van materieel mag worden verwacht dat de trillingsopwekking alleen van de rijsnelheid afhangt en dat de spreiding hierop, bij gelijkblijvende omstandigheden, het laagst zal zijn. Gevraagd is dan ook om per locatie tenminste één zo homogeen mogelijk subgroep te definiëren en hiervan de trillingsopwekking te analyseren.

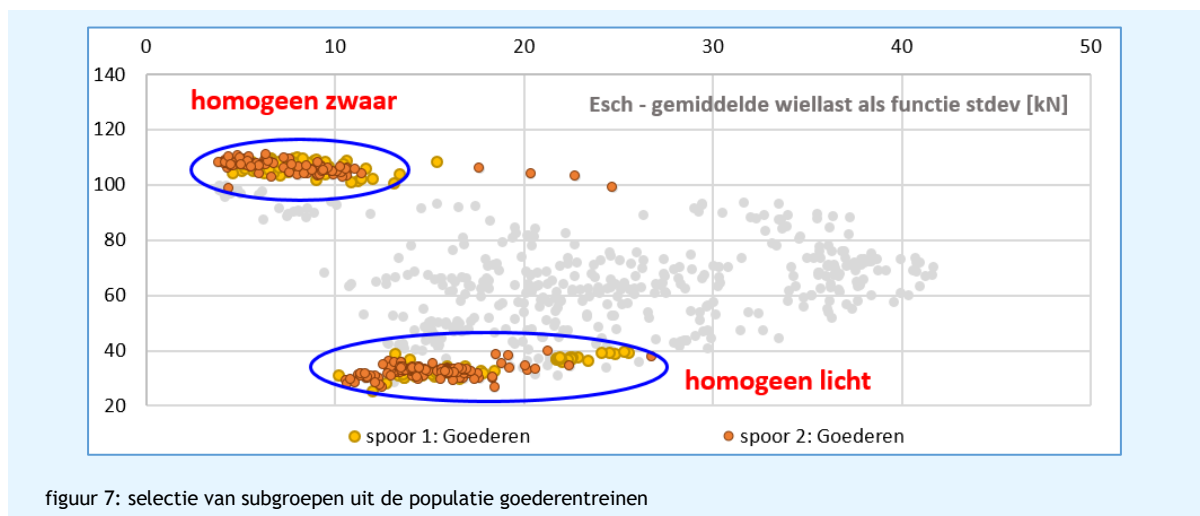
Het uiterlijk van een trein zegt niets over de onderhouds- en beladingstoestand, dus de homogeniteit van een treincombinatie kan het best worden beoordeeld aan de hand van de gemeten QV-parameters per trein. Een groep is homogeen als deze qua wiellast en/of wieltoestand binnen een kleine bandbreedte valt. Dit betekent wel dat het binnen een homogene subgroep weinig zin heeft om eerder genoemde relatie met wiellast of wieltoestand te analyseren.

In plaats van een driedimensionale (3D) analyse: rijsnelheid–QV parameter–trillingssterkte wordt binnen deze homogene groepen dan ook een tweedimensionale (2D) analyse: rijsnelheid–trillingssterkte uitgevoerd.

De homogene subgroepen zijn geselecteerd op basis van de gemiddelde wiellast en de standaard deviatie hierop binnen een treincombinatie. Eenvoudig af te zonderen en qua wiellast homogene subgroepen zijn:

- Beladen erts- en tanktreinen.
- Onbeladen treinen: de lege erts- en tanktreinen, lege autotreinen en platte wagens.

De zware erts- en tanktreinen laten zich herkennen aan de gemiddeld hoge wiellast en vanwege de uniforme belading lage standaard deviatie hierop. Lege treinen laten zich herkennen aan de gemiddeld lage wiellast en eveneens lage standaard deviatie, ofschoon het laatste gegeven vanwege de zware locomotief wat groter is dan bij de beladen erts- en tanktreinen. Als deze groepen uit de populatie worden gelaten ontstaat een restgroep van inhomogeen materieel. Hierin vallen de container- en stukgoedtreinen en bonte treinen met diverse wagontypen. Deze container- en stukgoedtreinen zijn qua wiellast, wagontype en wieltoestand zeer divers en geven in de analyse mogelijk een weinig onderscheidend beeld in vergelijking tot de gehele populatie. Figuur 7 geeft een voorbeeld van hoe de selectie van subgroepen tot stand is gekomen.



In tabel 5 wordt een overzicht gegeven van de gekozen subgroepen per locatie.

tabel 5: Samenstelling subgroepen

Locatie	Subgroep 1	Subgroep 2	Subgroep 3
Esch	Erts- en tanktreinen, aslast > 17 ton	Lege treinen, aslast < 8 ton	
Dordrecht	Erts- en tanktreinen, aslast > 17 ton	Lege treinen, aslast < 8 ton	
Tilburg	Erts- en tanktreinen, aslast > 17 ton	Lege treinen, aslast < 8 ton	Divers = alles minus zwaar
Oldenzaal	Erts + container, aslast > 17 ton	Autotreinen, aslast < 14 ton	Divers (container/stukgoed)

Reizigerstreinen

Onder de groep homogene treinen zijn ook te scharen de vele reizigerstreinen, die per locatie slechts uit enkele typen bestaan en waarbij veelal dezelfde combinatie gedurende de meetperiode veelvuldig voorbij is gekomen. Hoewel reizigerstreinen buiten het bestek van dit onderzoek vallen, zijn deze toch opgenomen in de bijlagen van dit rapport. Het snelheidsbereik waarover reizigerstreinen hebben gereden is aanmerkelijk groter dan voor de goederentreinen (grovweg een factor 2) en het verloop van de snelheidsrelatie voor dit materieel is ondersteunend in het begrip van de snelheidsrelatie voor de goederentreinen. Waar relevant zullen de resultaten van reizigerstreinen worden aangehaald.

3. Beoordeling spoor kwaliteit

3.1 Scope van het onderzoek

Van de vier meetlocaties en nog zeven andere locaties zijn de spoorliggingsgegevens opgevraagd bij ProRail. Van al deze locaties tezamen is de gemiddelde spoorligging bepaald die wordt gezien als het landelijk gemiddelde. In totaal gaat het om $11 \times 2 = 22$ spoortakken. Een spoortak is daarbij een aaneengesloten stuk spoor zonder wissels. De spoorligging op de vier meetlocaties, van 125 meter voor tot 125 meter na het meetpunt, is vergeleken met dit landelijk gemiddelde.

tabel 6: opgevraagde tracés spoorligging

Quo Vadis	Geocode	Km	Spoortak1	Spoortak2	Km_van	Km_tot	Meetlocatie
Elst 51/54	041	5.84	510_403L_9.7	510_401V_9.7	4,8	9,7	
Dordrecht-Lage Zwaluwe 81/84	119	21.03	119_123AL_21.3	119_123BV_21.2	19,0	21,2	J
Breda-Tilburg 101/104	123	14.27	123_29AL_11.6	123_29BV_11.6	11,8	14,0	J
Utrecht-Geldermalsen 111/114	513	24.801	513_47AR_24.6	513_47BV_24.7	24,7	25,0	
Deurne 263/264	055	26	055_399AR_19.6	055_399BV_19.7	19,7	23,0	
Esch 273/274	053	56.704	515_307AR_51.1	515_307BV_51.2	56,3	58,7	J
Geffen 283/284	047	37.149	047_3AV_40.9	047_3BL_41.0	35,9	37,8	
Dodewaard 511/512	155	73.855	155_4343V_73.1	155_4341R_72.9	72,9	74,2	
Zevenaar 961/962	039	109.99	779_50R_61.3	779_52R_61.4	109,6	111,0	
Oldenzaal 971/972	026	32.7	777_40V_14.5	777_39RV_14.4	30,2	33,5	J
--	026	--	543_221AR_16.0	543_221BV_16.0	17,4	20,2	

3.2 Analyse spoorligging

Uit de ontvangen spoorgegevens, omvattende de hoogte- en breedteligging van de spoorstaven, zijn vier parameters afgeleid die de spoorligging karakteriseren: de hoogteligging, de verkanting, de schift en de spoorwijdte. Doordat de spoorstaven door dwarsliggers zijn gekoppeld zal de spoorwijdte slechts een geringe variatie vertonen en ook minder van invloed zijn op de trillingsopwekking, maar alle parameters worden in de analyse betrokken. De analyse is op twee manieren gedaan, ten eerste door spectrale analyse van de golflengten en -amplituden in de spoorligging (fysische benadering) en ten tweede door een beoordeling volgens de onderhoudsnormen van de spoorbeheerder (technische benadering).

3.2.1 Spectrale analyse spoorligging

De ontvangen spoorgegevens hebben een meetinterval van 1 meter. Hieruit zijn globaal golven met een lengte van meer dan 5 meter te beschrijven. Bij een rijsnelheid van 25 m/s ofwel 90 km/u komt dit neer op frequenties tot circa 5 Hz.

In bijlage 4 zijn voor de vier meetlocaties de spectrale analyses van de spoorligging gegeven. Uit alle ontvangen gegevens (22 spoortakken) is een landelijk gemiddelde vastgesteld, een gemiddelde per spoortak en voor de vier meetlocaties een spectrum betreffende het spoorstuk van 125 meter voor het meetpunt tot 125 meter erna. Deze spectra zijn respectievelijk als rode, blauwe en groene lijn aangegeven in de diagrammen. Tevens is van de gehele spoortak waarin het meetpunt is opgenomen een 95% en 99% bovengrens opgenomen qua spoorligging (lichtblauw). Als het spectrum over de 250 m spoor ter plaatse van het meetpunt samenvalt met deze lichtblauwe curve dan bevindt het meetpunt zich voor de betreffende golflengte dus op het slechtste punt van de spoortak.

Esch

Uit de diagrammen van Esch blijkt dat de hoogteligging en schift van het eerste spoor (spoortak AR) beter is dan van het achterliggende spoor 2 (spoortak BV) en ook beter dan het gemiddelde. Dit kan leiden tot een lagere trillingsopwekking van spoor 1 ten opzichte van spoor 2 in het frequentiegebied tot circa 5 à 10 Hz. In de tijdsregistraties is de spooronderbreking (ES-las) op km 57.34 goed zichtbaar.

Dordrecht

In Dordrecht scoort spoor 2 (tak BV) iets slechter dan gemiddeld op schift en spoorwijdte, maar het tijdsignaal laat zien dat dit komt door de 80 meter noordelijker gelegen wissel die net in de analyse is betrokken. Verder zien de spectra eruit als gemiddeld. Op grond van deze spectra wordt geen afwijkende trillingsopwekking verwacht.

Tilburg

In Tilburg zijn, vermoedelijk vanwege de numerieke resolutie, enkel dippen waarneembaar in het spectrum waaraan geen conclusies zijn te verbinden. De spoorligging op het meetpunt is als gemiddeld te omschrijven. Wel laat de tijdregistratie 50 meter oostelijker dan het meetpunt een opvallende opslingering zien in zowel de schift als de spoorwijdte. Over een afstand van 80 meter vertoont het spoor hier horizontaal een golvend verloop met een top-top amplitude van circa 3 mm, een factor twee hoger dan normaal. Het effect hiervan op de trillingsopwekking is onbekend. De hoogteligging van het dichtstbijzijnde spoor 1 (tak AL) is ter plaatse van het meetpunt fractioneel beter dan van spoor 2 (tak BV). Spoor 1 kan dus iets gunstiger zijn qua trillingsopwekking.

Oldenzaal

In Oldenzaal scoort het achterliggende spoor 2 (tak R) op hoogteligging en schift slechter dan spoor 1 (tak V) maar juist bij de kortere golflengte van 4 meter lijkt het voor wat betreft de hoogteligging omgekeerd. Daarmee is niet zondermeer te zeggen of de trillingsopwekking van spoor 1 dan wel spoor 2 hoger zal zijn en ter plaatse van het 25 meter bodemmeetpunt zal het verschil ook afhangen van de gevoeligheid van de bodem voor bepaalde frequenties. Vergeleken met het landelijk gemiddelde ligt het merendeel van de spectra op het meetpunt daarboven. De trillingsopwekking zou in Oldenzaal dus hoger kunnen zijn dan het landelijk gemiddelde.

3.2.2 Beoordeling spoor kwaliteit (o.b.v. onderhoudsnormen)

MottMacDonald (MMD) heeft een nadere beoordeling van de spoorligging gedaan, deze beoordeling is als bijlage 5 opgenomen in dit rapport. In deze beoordeling is voor de vier meetlocaties (en één reserve locatie) een vergelijk gemaakt met de gemiddelde spoorligging bepaald uit alle in tabel 6 opgenomen locaties (11 stuks). Deze spoorligging is beoordeeld op basis van de instandhoudingspecificaties van ProRail, als opgenomen in ProRail document OHD00033 versie 4.

Bevindingen

De beoordeling van de spoor kwaliteit door MMD laat zien dat op alle meetlocaties het spoor in goede conditie is, ruim binnen de in de onderhoudscriteria opgenomen normen. Esch scoort qua hoogteligging en verkanting iets slechter dan gemiddeld. Oldenzaal scoort op alle spoorliggingsparameters iets beter dan het landelijk gemiddelde en qua spoorligging is dit de beste locatie. Tilburg en Dordrecht benaderen het landelijk gemiddelde, ofschoon in Tilburg de hoogteligging en verkanting beter is dan gemiddeld, maar de spoorbreedte net iets slechter. Verwacht wordt dat hoogteligging en verkanting meer invloed hebben op de trillingssterkte, waardoor Tilburg dan beter zou scoren dan Dordrecht.

3.3 Conclusies spoorligging

De beoordeling van het spoor naar de onderhoudsmaatstaven van ProRail (3.2.2) wijst uit dat het spoor op alle 4 meetlocaties hieraan voldoet, maar dat Esch qua hoogteligging iets slechter scoort en Oldenzaal juist iets beter. De spectrale analyse van de spoorligging (3.2.1) daarentegen geeft aan dat Esch er juist iets beter bijligt dan het landelijk gemiddelde, met name het eerste spoor en dat Oldenzaal juist iets slechter is dan gemiddeld, hetgeen vooral betrekking heeft op het achterliggende spoor. In Esch zou dit dan redenen kunnen zijn voor een lagere trillingsopwekking en in Oldenzaal wat hoger. Dordrecht en Tilburg scoren in de spectrale analyse redelijk gemiddeld.

4. Resultaten trillingsonderzoek

4.1 Aantallen treinpassages

In tabel 7 wordt een overzicht gegeven van de aantallen treinpassages per locatie en het aandeel van goederentreinpassages hierin. De aantallen goederentreinen betreffen valide passages op beide sporen gezamenlijk, zijnde passages met correcte snelheidsinformatie en een koppeling met Quo Vadis data. Alleen deze treinpassages kunnen in de trendanalyse worden verwerkt.

tabel 7: aantallen treinpassages

Locatie	Spoorlijn	Meetperiode	Goederentreinen (valide)	Reizigerstreinen	Totaal
1: Esch	's-Hertogenbosch - Eindhoven	26/8 - 1/12	871	17516	18387
2: Dordrecht	Dordrecht - Lage Zwaluwe	8/9 - 23/12	4141	26654	30795
3: Tilburg	Tilburg - Breda	8/9 - 22/12	3115	17706	20821
4: Oldenzaal	Hengelo - Duitse grens	2/9 - 7/12	1419	1044	2463

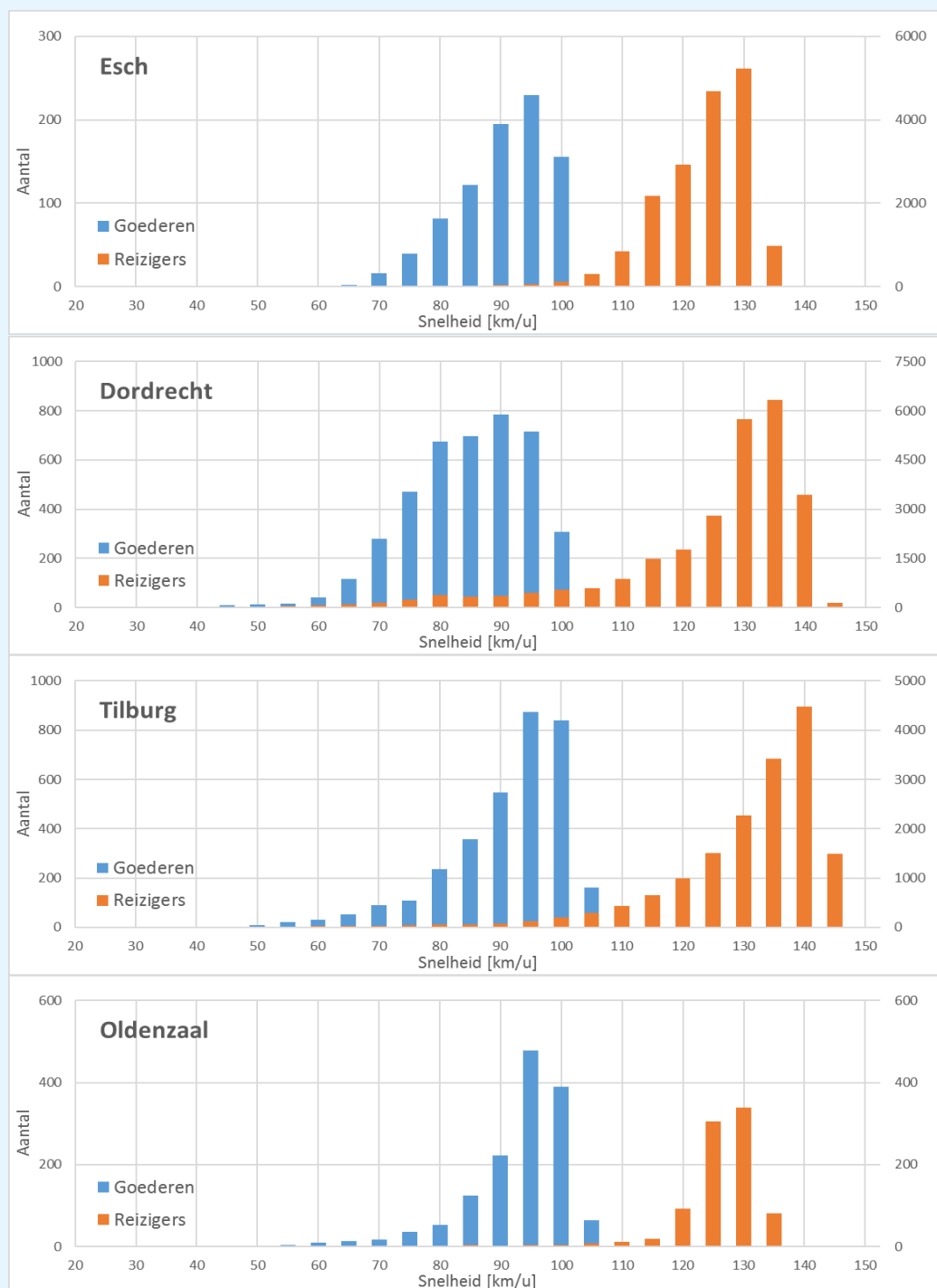
Het aantal goederentreinen op de locatie Esch is aanmerkelijk minder dan op de overige locaties. In Dordrecht en Tilburg, beiden op de Brabantroute, passeerde met afstand het meeste goederenverkeer.

Oldenzaal onderscheidt zich van de overige locaties in het geringe aantal (grensoverschrijdende) reizigerstreinen. Het aantal goederentreinen op dit traject lag wat hoger dan normaal vanwege stremmingen op de lijn Zevenaar - Duitse grens.

4.2 Verdeling rijksnelheden

In figuur 8 worden de snelheidsverdeling en aantallen goederentreinen per meetlocatie getoond. Op voorhand werd al verwacht dat er in de snelheidscategorie 40 - 70 km/u veel minder treinpassages zouden voorkomen dan in de categorie 70 - 100 km/u. Gedurende het onderzoek heeft ProRail vervoerders verzocht om treinen met lagere rijksnelheden te laten passeren, maar dit heeft niet geleid tot substantieel meer treinen met lage rijksnelheid. In Tilburg en Dordrecht zijn tientallen treinpassages tussen 40 en 70 km/u gemeten.

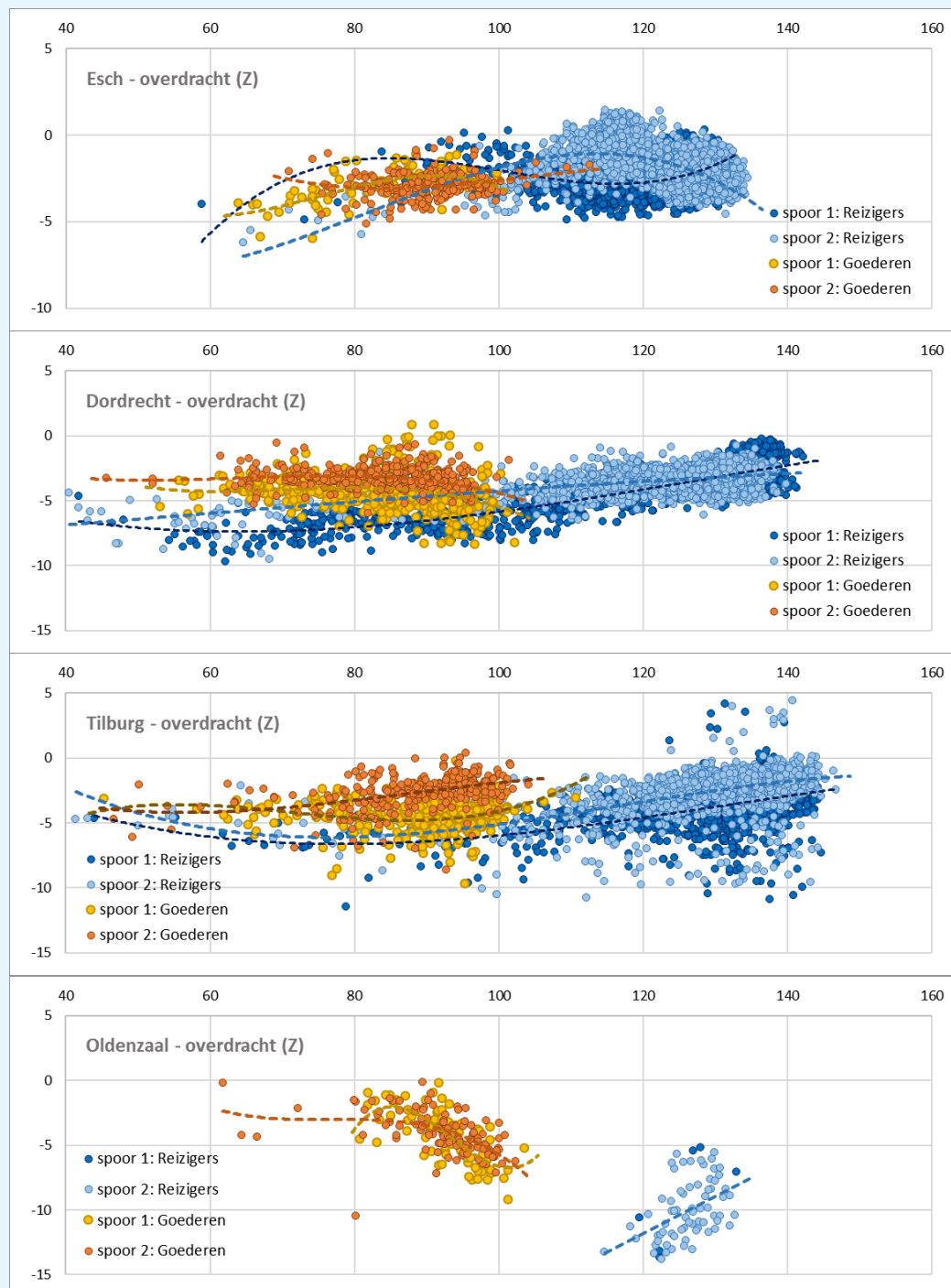
Behalve dat het aantal goederentreinen op de locatie Esch aanmerkelijk minder is dan op de overige locaties zijn er op deze locatie nauwelijks treinen gepasseerd met een rijksnelheid lager dan 70 km/u. In Oldenzaal zijn er nauwelijks goederentreinen gepasseerd met een snelheid lager dan 60 km/u.



figuur 8: snelheidsverdeling en aantallen goederen- en reizigerstreinen per locatie (beide sporen gezamenlijk)

4.3 Trillingsoverdracht (bodemdemping) per locatie

Per locatie is de trillingsoverdracht tussen de bodemmeetpunten op 5 meter (Esch: 9 meter) en 25 meter afstand tot het spoor bepaald voor alle treinpassages met een trillingssterkte ruim boven het achtergrondniveau. In figuur 9 zijn afgebeeld de gemeten overdrachten per spoor in verticale richting als functie van de rijsnelheid.



figuur 9: trillingsoverdracht bodem verticaal (Z) in [dB], tussen 5 m en 25 m meetpunt als functie rijsnelheid [km/u]

In figuur 9 is te zien dat de verzwakking in de bodem tussen het 5 en 25 meter punt, in Esch, Tilburg en Dordrecht, gemiddeld zo'n 3 tot 5 dB bedraagt voor snelheden tot 100 km/u. In Tilburg en Dordrecht loopt de verzwakking bij snelheden boven 100 km/u geleidelijk terug en ook in Esch is dit op het dichtstbijzijnde spoor 1 het geval. Op het achterliggende spoor 2 neemt de overdrachtsverzwakking eerst af en gaat daarna over in een toename (bij 115 km/u) om vervolgens weer over te gaan in een verzwakking. Deze verschillen in overdracht komen voort uit verschuivingen in het aanstootspectrum van treinen en de frequentieafhankelijke bodemoverdracht. Analyse van deze frequentieafhankelijkheid valt buiten de onderzoeksopdracht, maar is zeker interessant. Hiervoor zouden overdrachtsmetingen met behulp van een valproef moeten worden gedaan.

In Oldenzaal zijn in de twee weken van overdrachtsmetingen aanmerkelijk minder treinen gepasseerd dan op de overige locaties. Reden hiervan is dat er maar weinig (grensoverschrijdende) reizigerstreinen rijden. De overdrachtscurven splitsen zich dan ook in een cluster goederentreinen en een cluster reizigerstreinen, maar de trend is evident. Vanaf 80 km/u neemt de overdrachtsverzwakking toe tot ongeveer 8 dB bij 100 km/u. Bij een gelijkblijvende trillingsopwekking door de treinen nemen de trillingssterkten in de bodem, op 25 meter afstand tot het spoor, dan af. De reizigerstreinen tonen vanaf 120 km/u een afnemende overdrachtsverzwakking, van circa 10 à 12 dB bij 120 km/u tot circa 5 à 8 dB bij 130 km/u. De bodem in Oldenzaal is dus extra gevoelig voor treinen met een rijsnelheid van ongeveer 70 tot 90 km/u, maar juist minder voor treinen met een snelheid van 100 tot 120 km/u.

4.4 Analyse wieltoestand per locatie

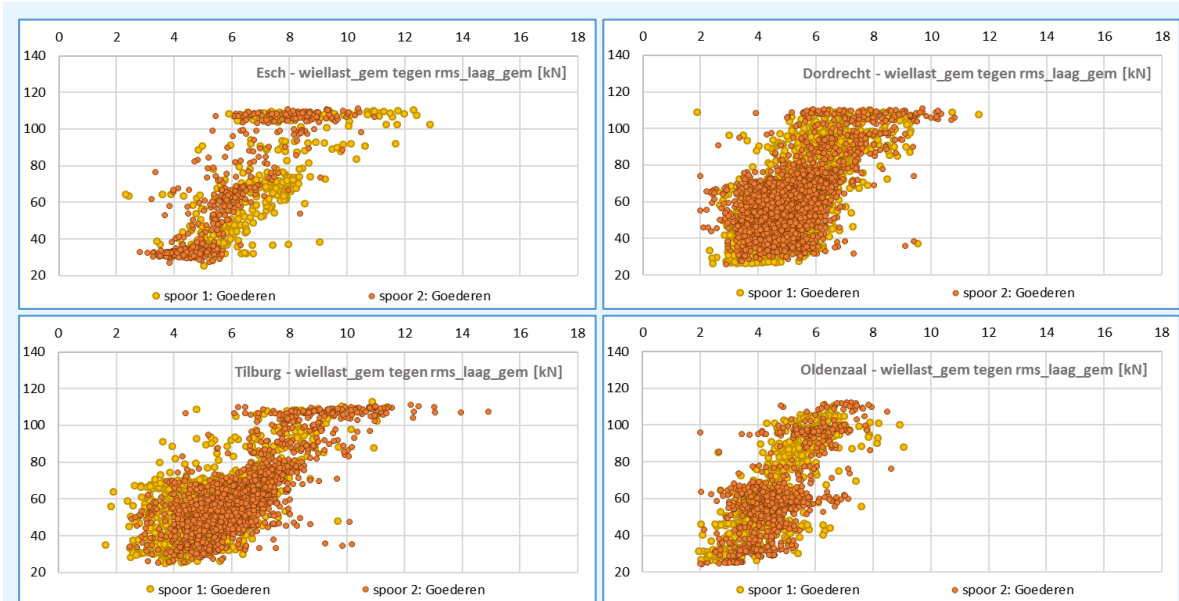
In dit onderzoek wordt de trillingsopwekking in verband gebracht met de wiellast en de wieltoestand of wielkwaliteit, gemeten door de Quo Vadis stations. Omdat iedere locatie en ieder spoor afzonderlijk wordt beschouwd zijn deze gegevens telkens afkomstig van één QV-station. Onderling vergelijk toont dat er aanmerkelijke verschillen kunnen zijn in de trillingsopwekking in de bodem tussen de verschillende locaties. Eén van de mogelijke oorzaken betreft het verschil in materieel dat gebruik maakt van het spoor en de onderhoudstoestand van dit materieel, met name de wieltoestand vertegenwoordigd door de rms_laag.

Om meer inzicht te krijgen in de wieltoestand op de verschillende locaties is de parameter rms_laag nader beschouwd. Omdat het onderzoek uitgaat van onafhankelijke parameters, is de gemiddelde rms_laag van een treincombinatie in figuur 10 uitgezet tegen de gemiddelde wiellast en in figuur 11 tegen de rijsnelheid. Bij onafhankelijke parameters zou dit geen zichtbare relatie moeten opleveren. Uit deze figuren (volgende bladzijde) is het volgende af te leiden:

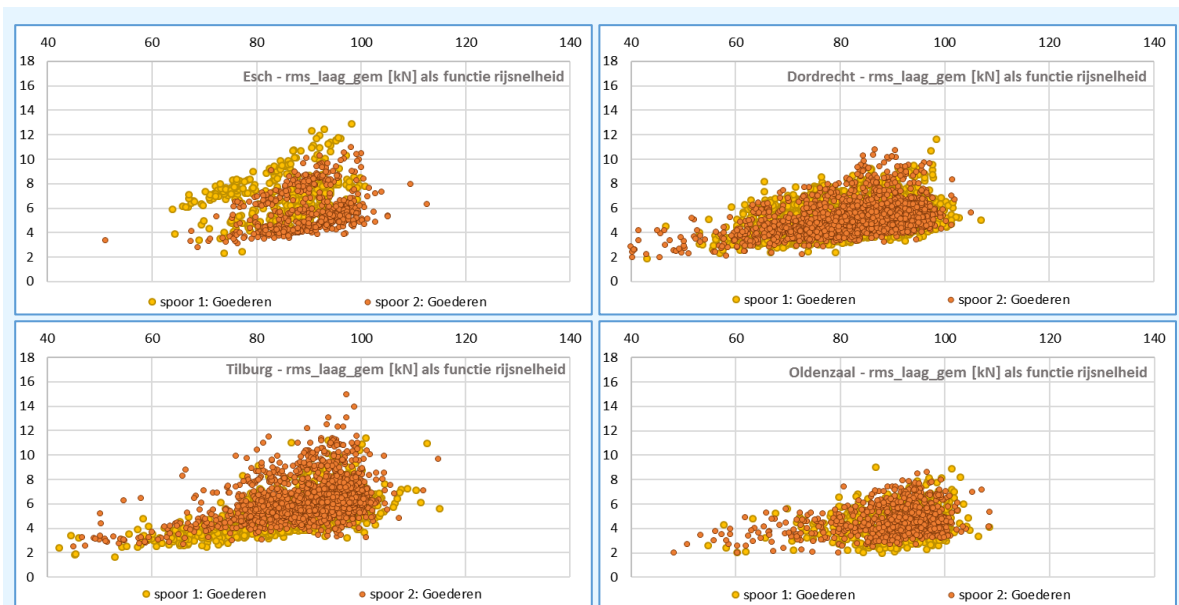
- De treinen met de gemiddeld hoogste rms_laag waarden bevinden zich in de groep zware treinen met wiellasten van 100 kN of meer, dit zijn voornamelijk de zware ertstreinen op spoor 1 in Esch en op spoor 2 in Dordrecht en Tilburg.
- In Oldenzaal rijden geen ertstreinen maar wel zware tank- en containertreinen. Hier liggen de maximale rms_laag waarden beduidend lager, tot globaal 8 kN.
- Naast een wellicht verklaarbare relatie tussen zware ertstreinen en een slechtere wieltoestand zien wij op alle locaties (figuur 10) ook een duidelijk en zeer opmerkelijk verband tussen de wiellast en de wieltoestand (rms_laag). Een verklaring zou kunnen zijn dat de meetwijze van de rms_laag door de QV-stations wordt beïnvloed door de wiellast.
- In figuur 11 is eveneens een verband tussen de rms_laag en de rijsnelheid te zien. De rms_laag betreft de dynamische kracht die door een wiel wordt uitgeoefend op de spoorstaaf en deze is behalve van de wieltoestand ook afhankelijk van de rijsnelheid.

In de analyses van de trillingsopwekking, waarin naast de rijsnelheid de rms_laag wordt betrokken, is er dus rekening te houden dat de rms_laag ook afhankelijk is van de rijsnelheid.

Een deel van het snelheidseffect zal dan toegeschreven worden aan de invloed van de rms_laag, waarin eveneens een snelheidscomponent aanwezig is. Om dit te vermijden zou in plaats van de rms_laag een parameter die slechts de onderhoudstoestand beschrijft moeten worden gehanteerd. Dit vergt nader onderzoek naar hoe de snelheidscomponent uit de bepalingswijze van de rms_laag kan worden geëlimineerd.



figuur 10: gemiddelde wiellast [kN] als functie van de gemiddelde wieltoestand (rms_laag) [kN] over alle treincombinaties



figuur 11: gemiddelde wieltoestand (rms_laag) [kN] als functie van de rijnsnelheid [km/u] over alle treincombinaties

5. Analyse trillingsopwekking goederentreinen

In dit hoofdstuk worden de resultaten van de multi-regressie analyse besproken waarin de trillingssterkte wordt uitgezet tegen de rijnsnelheid en de parameter die de wiellast of wieltoestand beschrijft. Voor de analyse op basis van subgroepen wordt verwezen naar hoofdstuk 6.

5.1 Resultaten

In bijlage 1 worden per locatie en per spoor de in tabel 4 aangegeven trendanalyses getoond voor de totale populatie goederentreinen. Afgebeeld wordt de puntenwolk met het daarop best aansluitende trendvlak. Voor de eenvoud is over het snelheidsbereik van 60 tot 90 km/u tevens een linearisatie gedaan van de trend. Dit is als rood vlak aangegeven in de figuren. De formules van de polynoom en het lineaire verband worden in de figuren weergegeven. De opbouw van de bladen in bijlage 2 is als volgt:

- Links boven V_{max} - max. wiellast per trein, MAX(qwm_gemiddelde_last_kn)
- Links midden V_{max} - max. rms_laag per trein, MAX(qwm_rms_laag_kn)
- Links onder V_{max} - piek wiellast per trein, MAX(qwm_gemiddelde_last_kn + qwm_rms_laag_kn)
- Rechts boven V_{rms} - gemiddelde wiellast per trein, GEM(qwm_gemiddelde_last_kn)
- Rechts midden V_{rms} - gemiddelde rms_laag per trein, GEM(qwm_rms_laag_kn)

De bladen zijn verder gerangschikt overeenkomstig de opbouw in tabel 8 (V_{max}) en tabel 9 (V_{rms}), waarin de resultaten zijn samengevat. Deze tabellen zijn ook te vinden in bijlage 3.

tabel 8: V_{MAX} als functie van de rijnsnelheid (v) en QV-parameter (Q)

Locatie	Spoor	Aantal	Analyse (QV-parameter)	Polynoomfunctie ¹⁾ $V = a_0 + a_1*v + a_2*v^2 + a_3*v^3 + b_1*Q$						significantie			Trend QV	Effect 60 km/u [dB]
				a_0	a_1	a_2	a_3	b_1	R^2	F	p	j/n		
Esch	1	374	--	122	1.05E-2	-8.58E-3	6.53E-5	--	0.065	26	15.6%	nee		5
			max wiellast	101	-6.10E-3	-6.35E-3	4.95E-5	0.134	0.327	181	5.9%	ja	++	3
			max rms_laag	123	2.04E-2	-9.70E-3	7.31E-5	0.067	0.111	46	11.7%	nee	0	6
			pieklast	108	1.72E-2	-7.87E-3	5.89E-5	0.093	0.291	153	6.4%	ja	+	5
	2	497	--	69	1.05E+0	-1.03E-2	3.24E-5	--	0.007	4	39.6%	nee		-2
			max wiellast	22	2.18E+0	-2.46E-2	9.12E-5	0.153	0.217	137	6.8%	ja	++	-2
			max rms_laag	97	1.15E-2	2.00E-3	-1.61E-5	0.018	0.011	5	33.0%	nee	0	-1
			pieklast	25	2.28E+0	-2.61E-2	9.69E-5	0.110	0.173	104	7.8%	ja	+	-1
Dordrecht	1	2257	--	103	4.05E-3	1.11E-3	-3.95E-6	--	0.088	218	5.4%	ja		-3
			max wiellast	80	-8.75E-3	1.56E-3	-7.21E-6	0.198	0.212	607	3.2%	ja	++	-3
			max rms_laag	104	-1.64E-2	1.32E-3	-4.50E-6	-0.016	0.090	223	5.3%	ja	0	-3
			pieklast	85	-8.84E-3	1.72E-3	-9.89E-6	0.144	0.197	552	3.4%	ja	++	-2
	2	1884	--	111	-4.61E-1	7.63E-3	-3.42E-5	--	0.095	197	5.7%	ja	0	-3
			max wiellast	79	3.47E-2	-1.76E-4	4.63E-6	0.205	0.308	837	2.8%	ja	++	-3
			max rms_laag	112	-5.12E-1	8.29E-3	-3.72E-5	0.020	0.098	205	5.6%	ja	0	-3
			pieklast	84	-6.26E-3	6.51E-4	-1.52E-6	0.155	0.286	754	2.9%	ja	++	-2
Tilburg	1	1670	--	75	6.27E-1	-4.96E-3	1.31E-5	--	0.099	184	5.9%	ja		-3
			max wiellast	55	9.41E-1	-8.97E-3	2.96E-5	0.109	0.165	329	4.4%	ja	+	-3
			max rms_laag	76	5.79E-1	-4.50E-3	1.15E-5	0.032	0.118	223	5.3%	ja	0	-3
			pieklast	56	1.03E+0	-1.02E-2	3.43E-5	0.084	0.179	365	4.2%	ja	+	-3
	2	1445	--	58	1.33E+0	-1.42E-2	5.25E-5	--	0.071	109	7.6%	ja		-3
			max wiellast	29	1.82E+0	-2.09E-2	8.13E-5	0.156	0.248	475	3.7%	ja	++	-2
			max rms_laag	60	1.25E+0	-1.34E-2	4.93E-5	0.019	0.077	120	7.3%	ja	0	-3
			pieklast	35	1.74E+0	-2.01E-2	7.78E-5	0.117	0.240	455	3.7%	ja	++	-2
Oldenzaal	1	648	--	174	-3.39E+0	5.12E-2	-2.39E-4	--	0.081	57	10.6%	nee		-6
			max wiellast	66	1.88E-3	1.08E-2	-8.10E-5	0.134	0.185	147	6.6%	ja	++	-7
			max rms_laag	82	-2.29E-2	1.06E-2	-7.79E-5	0.055	0.106	77	9.1%	ja	0	-7
			pieklast	114	-1.78E+0	3.24E-2	-1.67E-4	0.121	0.212	174	6.0%	ja	++	-7
	2	770	--	203	-4.63E+0	6.73E-2	-3.05E-4	--	0.233	233	5.2%	ja		-7
			max wiellast	178	-4.13E+0	6.02E-2	-2.73E-4	0.121	0.304	335	4.4%	ja	+	-7
			max rms_laag	202	-4.62E+0	6.71E-2	-3.04E-4	0.030	0.242	246	5.1%	ja	0	-7
			pieklast	71	-6.12E-3	8.76E-3	-6.34E-5	0.112	0.311	346	4.3%	ja	++	-7

1) voor Q is telkens te nemen de betreffende QV-parameter wiellast (L), wieltoestand (R) of pieklast (P)

tabel 9: V_{RMS} als functie van de rijsnelheid (v) en QV-parameter (Q)

Locatie	Spoor	Aantal	Analyse (QV-parameter)	Polynoomfunctie ¹⁾ $V = a_0 + a_1 \cdot v + a_2 \cdot v^2 + a_3 \cdot v^3 + b_1 \cdot Q$						significantie			Trend QV	Effect 60 km/u [dB]
				a_0	a_1	a_2	a_3	b_1	R^2	F	p	j/n		
Esch	1	374	--	109	-5.98E-3	-6.26E-3	4.81E-5	--	0.067	27	15.3%	nee		4
			gem wiellast	146	-1.65E+0	1.58E-2	-4.63E-5	0.035	0.257	128	7.0%	ja	0	2
			gem rms_laag	106	-1.01E-2	-5.99E-3	4.48E-5	0.498	0.254	126	7.1%	ja	0/+	4
	2	497	--	71	7.66E-1	-8.64E-3	3.46E-5	--	0.053	27	15.1%	nee		-2
			gem wiellast	91	3.24E-4	-1.04E-4	3.55E-6	0.025	0.225	144	6.6%	ja	0	-1
			gem rms_laag	61	1.15E+0	-1.44E-2	6.03E-5	0.446	0.210	131	6.9%	ja	0/+	-1
Dordrecht	1	2257	--	105	-4.35E-1	7.81E-3	-3.54E-5	--	0.167	453	3.7%	ja		-4
			gem wiellast	87	6.49E-3	2.29E-3	-1.00E-5	0.077	0.456	1890	1.8%	ja	0/+	-5
			gem rms_laag	89	7.60E-2	3.88E-4	-2.89E-6	1.244	0.387	1420	2.1%	ja	++	-3
	2	1884	--	96	-5.51E-3	7.61E-4	-9.72E-7	--	0.133	289	4.7%	ja		-3
			gem wiellast	96	-1.94E-1	2.91E-3	-8.14E-6	0.075	0.399	1250	2.3%	ja	0/+	-3
			gem rms_laag	99	-1.68E-1	1.55E-3	-1.94E-6	1.053	0.324	904	2.7%	ja	++	-1
Tilburg	1	1670	--	61	1.00E+0	-1.09E-2	4.17E-5	--	0.164	327	4.4%	ja		-2
			gem wiellast	58	1.08E+0	-1.18E-2	4.56E-5	0.015	0.187	384	4.1%	ja	0	-2
			gem rms_laag	58	1.10E+0	-1.26E-2	4.87E-5	0.435	0.231	502	3.6%	ja	0/+	-1
	2	1445	--	52	1.29E+0	-1.41E-2	5.40E-5	--	0.188	334	4.4%	ja		-3
			gem wiellast	51	1.22E+0	-1.39E-2	5.59E-5	0.051	0.494	1410	2.1%	ja	0/+	-3
			gem rms_laag	48	1.43E+0	-1.71E-2	6.87E-5	0.663	0.473	1294	2.2%	ja	+	-1
Oldenzaal	1	648	--	240	-5.93E+0	7.87E-2	-3.34E-4	--	0.151	114	7.4%	ja		-5
			gem wiellast	218	-5.29E+0	7.10E-2	-3.04E-4	0.067	0.569	855	2.7%	ja	0/+	-5
			gem rms_laag	234	-5.78E+0	7.61E-2	-3.23E-4	1.230	0.506	662	3.1%	ja	++	-3
	2	770	--	164	-3.11E+0	4.40E-2	-1.94E-4	--	0.291	315	4.5%	ja		-5
			gem wiellast	160	-3.06E+0	4.33E-2	-1.90E-4	0.032	0.399	510	3.5%	ja	0	-5
			gem rms_laag	161	-3.01E+0	4.20E-2	-1.84E-4	0.612	0.386	483	3.6%	ja	+	-4

1) voor Q is telkens te nemen de betreffende QV-parameter wiellast (L), wieltoestand (R) of pieklast (P)

Uitleg tabellen

In tabel 8 en tabel 9 zijn onder de kop "polynoomfunctie" de berekende coëfficiënten van deze functie weergegeven, zoals ook getoond in de figuren van bijlage X. In de daaropvolgende kolommen staan de correlatiecoëfficiënt R^2 , de F-toets, de kwalificatie van de trend van de beschouwde QV-parameter en het uiteindelijke effect van een snelheidsverlaging van 90 km/u naar 60 km/u op de trillingssterkte. De uitgevoerde analyses, volgens tabel 4, worden telkens voorafgegaan door een analyse van het snelheidseffect zonder QV-parameters hierin te betrekken. De coëfficiënt b_1 staat in deze analyses op nul en de polynoomfunctie betreft dan dus een curve en geen vlak.

Bepalend voor de significantie van een trend is de F-toets. De op basis van de F-waarde bepaalde overschrijdingskans p volgens de F-verdeling bepaald de mate waarin de trend de onderliggende meetdata verklaard. Als $p < 10\%$ (10% overschrijdingskans) dan is de kans dat de trend en de meetdata met elkaar correleren 90%. Voor de significantie toets is een overschrijdingskans van 10% aangehouden.

In de tabellen wordt naast de afhankelijkheid van de rijsnelheid ook een kwalificatie gegeven van de afhankelijkheid van de onderzochte QV-parameter: wiellast, wieltoestand of pieklast. Hieraan ten grondslag ligt de hellingshoek van het trendvlak beschreven door de coëfficiënt b_1 . De kwalificatie ++ is te interpreteren als een zeer sterke relatie, + als sterke relatie, 0/+ als matig en 0 als nihil.

5.2 Beschouwing algemeen

Uit tabel 8 en tabel 9 blijkt dat de correlatie van de trendfunctie (curve of vlak) met de datapunten verbetert als hierin de QV-parameters wiellast of wieltoestand wordt betrokken. De R^2 -waarde stijgt hierdoor in alle gevallen. R^2 -waarde hangt af van zowel de gemiddelde afwijking van de datapunten tot het trendvlak alsook de 'hellingshoek' van het vlak. Bij een horizontaal vlak is er geen correlatie tussen de trillingssterkte en de onderzochte parameters en is de R^2 -waarde per definitie nihil, ongeacht hoe goed de datapunten bij dit vlak aansluiten. Als R^2 groter is dan globaal 0.5 dan sluit de puntenwolk

meestal goed aan bij het trendvlak en is er ook een significante afhankelijkheid tussen de trillingssterkte en de rijsnelheid. Bij een R^2 lager dan 0.1 is de correlatie slecht te noemen. De vermelde waarden in tabel 8 en tabel 9 zitten meestal tussen deze grenzen. Bij R^2 waarden vanaf 0.1 begint zich in toenemende mate een duidelijke trend af te tekenen. De F-toets wijst dan ook op significantie van de trend.

Het betrekken van een tweede parameter, de wiellast of wieltoestand, in de analyses hoeft de relatie tussen rijsnelheid en trillingssterkte niet te beïnvloeden als de verdeling van deze parameters bij alle rijsnelheden ongeveer gelijk is. Vaak is dit niet het geval. Als bijvoorbeeld zware treinen gemiddeld langzamer rijden dan lichte (onbeladen) treinen dan ontstaat er een combinatie van hoge wiellasten met lager snelheden en lage wiellasten met hoge snelheden. Een deel van het snelheidseffect verschuift dan naar de invloed van de wiellast en de invloed van de rijsnelheid op de trillingssterkte neemt daardoor af. In Esch is dit zichtbaar, maar ook op andere locaties spelen dergelijke effecten in meer of mindere mate een rol.

5.3 Correlatie parameters

5.3.1 V_{\max}

Op alle locaties wordt een sterke tot zeer sterke relatie tussen de trillingssterkte V_{\max} en de maximum (statische) wiellast in de treincombinatie gevonden. Ook blijkt dat de V_{\max} nauwelijks afhangt van de gemiddelde wieltoestand (ruwheid, rondheid) van een combinatie. Omdat de pieklast (dynamische kracht van een wiel op de spoorstaaf) een optelsom is van voornoemde wiellast en de wieltoestand is de relatie tussen trillingssterkte V_{\max} en de pieklast ongeveer hetzelfde als die met de statische wiellast. De V_{\max} wordt, blijkens tabel 8, naast de rijsnelheid dus voornamelijk bepaald door de maximum wiellast in een combinatie. Afgaand op de coëfficiënten b_1 in tabel 8, die over de vier locaties variëren tussen 0.1 en 0.2, bedraagt de invloed van de statische wiellast op de V_{\max} ongeveer 1 tot 2 dB per ton wiellast.

5.3.2 V_{rms}

De trillingssterkte V_{rms} lijkt naast de rijsnelheid af te hangen van de gemiddelde wieltoestand (rms_laag) in een treincombinatie. De coëfficiënten b_1 in tabel 9 laten zien dat deze relatie in Esch zwak/matig is ($b_1 \approx 0.4$ à 0.5), maar in Dordrecht en op spoor 1 in Oldenzaal sterk tot zeer sterk ($b_1 \approx 1$ à 1.2). De relatie van de V_{rms} met de gemiddelde wiellast is daarentegen hooguit zwak/matig te noemen ($b_1 < 0,1$). Dit betekent niet dat de statische wiellast (of aslast) geen enkele invloed heeft op de trillingssterkte V_{rms} , maar slechts dat het geen invloed heeft op het verloop van de trillingssterkte als functie van de rijsnelheid. In hoofdstuk 6 wordt aan de hand van meer homogene subgroepen qua materieel ingegaan op de invloed van de aslast op de trillingssterkte en zal blijken dat deze er wel degelijk toe doet. Afgaand op de coëfficiënten b_1 in tabel 9, variërend tussen 0.5 en 1.2 over de vier locaties, bedraagt de invloed van de wieltoestand (rms_laag) op de V_{rms} ongeveer 0.5 tot 1.2 dB per kN toename.

Het betrekken van de rms_laag in de analyses leidde er op alle locaties, met uitzondering van spoor 1 in Esch, toe dat het snelheidseffect erdoor afnam. Daarbij moet opgemerkt worden dat, zoals in paragraaf 4.4 uiteengezet, de rms_laag een afhankelijkheid van de rijsnelheid lijkt te hebben, waardoor dit mogelijk slechts het onterecht toeschrijven van het snelheidseffect aan de rms_laag betreft. Nader onderzoek op de bepalingwijze van de rms_laag is gewenst.

5.4 Effect snelheidsverlaging

Om snelheidsverlaging als maatregel in te kunnen zetten is het van belang welk deel van de gemeten toename in trillingssterkte bij hogere snelheden daadwerkelijk is toe te schrijven aan de snelheidstoename en welk deel aan een eveneens toegenomen wiellast of slechtere wieltoestand. Het netto-effect van een snelheidsverlaging, verschoond van aan wiellast of wieltoestand toe te schrijven effecten, is in beginsel de laagste waarde uit de laatste kolom van tabel 8 en tabel 9, maar alleen wanneer deze trend ook significantie heeft. Op basis van de trends en significantie per spoor wordt hierover een gewogen oordeel gegeven. Dit oordeel staat voor alle vier meetlocaties opgesomd in tabel 10, tezamen met de gemeten trillingssterkten V_{\max} en V_{rms} per spoor. De hier vermelde trillingssterkten en snelheidsrelaties gelden voor de gehele populatie goederentreinen per locatie, dus zonder onderscheid naar materieel en beladingstoestand.

tabel 10: V_{\max} en V_{rms} bij 90 km/u (gemiddelde & bandbreedte) en effect snelheidsverlaging 30 km/u

Locatie	V_{\max} in [dB]				V_{rms} in [dB]			
	Spoor 1	-30 km/u	Spoor 2	-30 km/u	Spoor 1	-30 km/u	Spoor 2	-30 km/u
Esch	101 (97-107)	+3	103 (98-108)	-2	93 (90-97)	+4	95 (93-98)	-1
Dordrecht	109 (104-115)	-3	107 (102-113)	-3	103 (99-108)	-3	101 (96-107)	-1
Tilburg	101 (98-108)	-3	100 (97-107)	-2	93 (91-98)	-1	93 (90-98)	-1
Oldenzaal	110 (104-115)	-7	108 (104-114)	-7	100 (96-105)	-3	99 (95-103)	-4

In tabel 10 is te zien dat de trillingssterkten in Dordrecht en Oldenzaal fors hoger liggen dan in Esch en Tilburg. In Dordrecht en Tilburg is de relatie tussen de trillingssterkte en de rijnsnelheid vergelijkbaar, zowel voor de V_{\max} als voor de V_{rms} . Als we echter meer homogene (sub)groepen qua materieel beschouwen dan ontstaan hierin verschillen, zie hoofdstuk 6.

In Oldenzaal is er een zeer sterke snelheidsrelatie waarneembaar voor de V_{\max} . Bij 90 km/u is de trillingssterkte maximaal en deze neemt bij een snelheidsverlaging snel af. Het betrekken van de wiellast in de analyses brengt hierin geen verandering. Kennelijk zijn de verschillen hierin redelijk gelijkmatig verdeeld over het snelheidsbereik.

Voor de V_{rms} geldt een iets minder sterke relatie. Deze neemt met zo'n 4 dB af als de rijnsnelheid zou worden verlaagd van 90 naar 60 km/u. Het betrekken van de wieltoestand (rms_{laag}) in deze analyse had wél effect op de snelheidsrelatie. De sneller rijdende treinen oefenen hogere dynamische krachten uit op de spoorstaaf dan langzaam rijdende treinen. De afhankelijkheid van de wieltoestand 'snoept' daarmee zo'n 1 à 2 dB af van het snelheidseffect, dat nu gematigder voorkomt.

In Esch wijkt de snelheidsrelatie op spoor 1 sterk af van die op spoor 2. Hoewel de trillingssterkten laag zijn in vergelijking tot de andere locaties, worden de hoogste trillingssterkten veroorzaakt door zware ertstreinen. Er zijn hier twee vervoerders actief die met verschillend materieel rijden. De één rijdt met twee BR189 locs in hoofdzakelijk het snelheidsbereik 80-95 km/u en de ander komt met één Class 66 locomotief niet verder dan zo'n 60-80 km/u. Deze laatste vervoerder blijkt maatgevend voor de trillingssterkten bij 60-80 km/u en de negatieve snelheidsrelatie. Nog onduidelijk is of dit komt door specifieke kenmerken van dit materieel.

Het betrekken van de wiellast of wieltoestand in de analyses heeft echter geen invloed op de gevonden snelheidsrelatie waarmee verschillen in deze parameters dit verschijnsel niet verklaren. In Hoofdstuk 6 wordt aan de hand van de homogene subgroepen nader ingegaan op dit verschijnsel.

6. Analyse homogene subgroepen

In dit hoofdstuk worden de resultaten van de analyse o.b.v. homogene subgroepen van treinmaterieel besproken. Voor de multi-regressie analyse over de gehele treinpopulatie waarin de wiellast en wieltoestand als mede bepalende parameter worden betrokken wordt verwezen naar hoofdstuk 5.

6.1 Resultaten

In bijlage 2 worden de registraties per locatie en per gekozen subgroep (zie tabel 5) getoond met de daarop best aansluitende trendcurve. Tevens zijn opgenomen twee figuren waaruit de homogeniteit van de gekozen groep blijkt. Het kleurgebruik in de figuren is:

- Lichtgrijs Alle gemeten treinen op een locatie
- Donkerblauw Reizigerstreinen spoor 1 (voorste spoor)
- Lichtblauw Reizigerstreinen spoor 2 (achterste spoor)
- Geel Goederentreinen spoor 1
- Oranje Goederentreinen spoor 2

De resultaten uit bijlage 2 zijn samengevat in tabel 11 (V_{\max}) en tabel 12 (V_{rms}). Deze tabellen zijn ook te vinden in bijlage 3.

tabel 11: V_{\max} als functie van de rijnsnelheid (v) - subgroepen

Locatie	Spoor	Aantal	Groep	Snelheid [km/u]*	Polynoomfunctie $V = a_0 + a_1 * v + a_2 * v^2 + a_3 * v^3$					Effect 60 km/u [dB]*
					a_0	a_1	a_2	a_3	R^2	
Esch	1	374	totaal	65-100	122	1.05E-2	-8.58E-3	6.53E-5	0.065	5
		105	subgroep 1 (zwaar)	65-100	-182	1.14E+1	-1.49E-1	6.39E-4	0.010	1
		53	subgroep 2 (licht)	70-95	-771	3.12E+1	-3.70E-1	1.47E-3	0.189	--
		261	subgroep 3 (divers)	70-105	215	-4.07E+0	4.70E-2	-1.75E-4	0.077	0
	2	497	totaal	70-105	69	1.05E+0	-1.03E-2	3.24E-5	0.007	-2
		105	subgroep 1 (zwaar)	75-100	-315	1.49E+1	-1.75E-1	6.84E-4	0.006	--
		128	subgroep 2 (licht)	70-100	134	-1.53E+0	2.28E-2	-1.07E-4	0.005	-2
		374	subgroep 3 (divers)	70-105	59	1.59E+0	-1.92E-2	7.66E-5	0.005	-1
Dordrecht	1	2257	totaal	45-105	103	4.05E-3	1.11E-3	-3.95E-6	0.088	-3
		195	subgroep 1 (zwaar)	60-95	113	-1.99E-1	2.12E-3	2.28E-6	0.190	-5
		535	subgroep 2 (licht)	60-105	148	-2.05E+0	2.94E-2	-1.29E-4	0.220	-5
		1995	subgroep 3 (divers)	50-105	150	-2.07E+0	3.01E-2	-1.34E-4	0.155	-5
	2	1884	totaal	45-105	111	-4.61E-1	7.63E-3	-3.42E-5	0.095	-3
		131	subgroep 1 (zwaar)	60-100	-48	6.52E+0	-8.86E-2	3.96E-4	0.208	0
		183	subgroep 2 (licht)	70-100	142	-1.59E+0	2.04E-2	-8.12E-5	0.134	-2
		1673	subgroep 3 (divers)	45-105	134	-1.32E+0	1.82E-2	-7.61E-5	0.148	-3
Tilburg	1	1670	totaal	45-105	75	6.27E-1	-4.96E-3	1.31E-5	0.099	-3
		47	subgroep 1 (zwaar)	75-100	362	-1.05E+1	1.35E-1	-5.59E-4	0.357	--
		468	subgroep 2 (licht)	50-100	65	1.01E+0	-1.02E-2	3.72E-5	0.130	-3
		1570	subgroep 3 (divers)	45-105	68	8.95E-1	-8.29E-3	2.63E-5	0.105	-3
	2	1445	totaal	45-105	58	1.33E+0	-1.42E-2	5.25E-5	0.071	-3
		173	subgroep 1 (zwaar)	65-100	17	3.19E+0	-4.04E-2	1.73E-4	0.168	-3
		152	subgroep 2 (licht)	50-100	113	-9.71E-1	1.54E-2	-7.03E-5	0.300	-4
		1201	subgroep 3 (divers)	45-105	40	2.06E+0	-2.42E-2	9.61E-5	0.120	-2
Oldenzaal	1	649	totaal	55-105	137	-1.93E+0	3.25E-2	-1.61E-4	0.024	-6
		55	subgroep 1 (zwaar)	75-100	403	-1.21E+1	1.61E-1	-6.96E-4	0.232	--
		48	subgroep 2 (auto)	75-105	166	-3.03E+0	4.56E-2	-2.12E-4	0.008	--
		100	sub3 (container)	80-100	157	-2.54E+0	3.73E-2	-1.67E-4	0.007	--
	2	770	totaal	55-105	203	-4.63E+0	6.73E-2	-3.05E-4	0.233	-7
		132	subgroep 1 (zwaar)	65-100	126	-1.36E+0	2.31E-2	-1.13E-4	0.271	-5
		73	subgroep 2 (auto)	65-105	209	-4.59E+0	6.26E-2	-2.71E-4	0.153	-5
		105	sub3 (container)	70-100	210	-5.16E+0	7.64E-2	-3.52E-4	0.242	-8

* Als snelheidsbereik < 30 km/u of minimum snelheid > 70 km/u wordt geen effect snelheidsverlaging gegeven

tabel 12: V_{RMS} als functie van de rijnsnelheid (v) - subgroepen

Locatie	Spoor	Aantal	Groep	Snelheid [km/u]*	Polynoomfunctie $V = a_0 + a_1 \cdot v + a_2 \cdot v^2 + a_3 \cdot v^3$				Effect 60 km/u [dB]*	
					a_0	a_1	a_2	a_3		R^2
Esch	1	374	totaal	65-100	113	-1.53E-1	-4.48E-3	4.09E-5	0.067	4
		105	subgroep 1 (zwaar)	65-100	-102	7.97E+0	-1.05E-1	4.54E-4	0.137	1
		53	subgroep 2 (licht)	70-95	-683	2.81E+1	-3.37E-1	1.34E-3	0.164	--
		261	subgroep 3 (divers)	70-105	114	-8.99E-1	1.13E-2	-4.33E-5	0.085	-2
	2	497	totaal	70-105	71	7.66E-1	-8.64E-3	3.46E-5	0.053	-2
		105	subgroep 1 (zwaar)	75-100	-137	8.10E+0	-9.47E-2	3.71E-4	0.117	--
		128	subgroep 2 (licht)	70-100	142	-1.88E+0	2.28E-2	-8.66E-5	0.359	-2
		374	subgroep 3 (divers)	70-105	64	1.09E+0	-1.36E-2	5.86E-5	0.078	-2
Dordrecht	1	2257	totaal	45-105	117	-1.07E+0	1.82E-2	-8.78E-5	0.183	-5
		195	subgroep 1 (zwaar)	60-95	165	-2.81E+0	3.95E-2	-1.72E-4	0.263	-5
		535	subgroep 2 (licht)	60-105	154	-2.46E+0	3.41E-2	-1.46E-4	0.382	-5
		1995	subgroep 3 (divers)	50-105	130	-1.61E+0	2.52E-2	-1.17E-4	0.229	-5
	2	1884	totaal	45-105	99	-1.55E-1	2.76E-3	-9.83E-6	0.146	-3
		131	subgroep 1 (zwaar)	60-100	7	3.94E+0	-5.33E-2	2.38E-4	0.152	-1
		183	subgroep 2 (licht)	70-100	109	-4.97E-1	5.81E-3	-1.80E-5	0.180	-2
		1673	subgroep 3 (divers)	45-105	123	-1.07E+0	1.43E-2	-5.74E-5	0.222	-3
Tilburg	1	1670	totaal	45-105	61	1.00E+0	-1.09E-2	4.16E-5	0.164	-2
		47	subgroep 1 (zwaar)	75-100	336	-9.69E+0	1.23E-1	-5.07E-4	0.313	--
		468	subgroep 2 (licht)	50-100	46	1.51E+0	-1.66E-2	6.28E-5	0.128	-3
		1570	subgroep 3 (divers)	45-105	56	1.20E+0	-1.32E-2	5.06E-5	0.185	-2
	2	1445	totaal	45-105	52	1.29E+0	-1.41E-2	5.42E-5	0.188	-3
		173	subgroep 1 (zwaar)	65-100	51	1.52E+0	-1.85E-2	7.88E-5	0.215	-3
		152	subgroep 2 (licht)	50-100	73	3.40E-1	-1.39E-3	-3.79E-7	0.502	-4
		1201	subgroep 3 (divers)	45-105	39	1.77E+0	-2.06E-2	8.21E-5	0.310	-3
Oldenzaal	1	649	totaal	55-105	240	-5.93E+0	7.87E-2	-3.34E-4	0.151	-5
		55	subgroep 1 (zwaar)	75-100	411	-1.23E+1	1.58E-1	-6.56E-4	0.532	--
		48	subgroep 2 (auto)	75-105	292	-7.18E+0	8.62E-2	-3.38E-4	0.143	--
		100	sub3 (container)	80-100	211	-4.94E+0	6.77E-2	-2.94E-4	0.107	--
	2	770	totaal	55-105	164	-3.11E+0	4.40E-2	-1.94E-4	0.291	-5
		132	subgroep 1 (zwaar)	65-100	126	-1.37E+0	1.96E-2	-8.34E-5	0.444	-4
		73	subgroep 2 (auto)	65-105	162	-2.83E+0	3.69E-2	-1.50E-4	0.468	-4
		105	sub3 (container)	70-100	204	-4.66E+0	6.26E-2	-2.66E-4	0.457	-6

* Als snelheidsbereik < 30 km/u of minimum snelheid > 70 km/u wordt geen effect snelheidsverlaging gegeven

6.2 Beschouwing

Evenals bij een analyse van de rijnsnelheid als functie van de wiellast (zie H5) neemt de correlatie (R^2) van de trend met de meetdata ook toe als er meer homogene subgroepen uit de totale populatie worden geselecteerd. Dit hangt echter ook af van hoe groot die subgroep is, met welke snelheidsvariatie deze heeft gereden én of de afgeleide trend zeer vlak of juist steil is. In tabel 11 en tabel 12 is te zien dat het snelheidsbereik voor de meeste subgroepen kleiner is dan voor de totale populatie, wat de trendanalyse bemoeilijkt. De R^2 -waarden zijn daardoor niet altijd hoger dan die voor de gehele populatie goederentreinen.

De subgroepen zijn geselecteerd o.b.v. de gemiddelde wiellast van een treincombinatie, waardoor een uitbreiding van de analyse met deze parameter niet meer zinvol is. Uitbreiding met de wieltoestand zou in theorie kunnen, maar de omvang van de subgroepen is hiervoor te klein. Voor de subgroepen wordt dan ook alleen een trendanalyse van de V_{max} en V_{rms} als functie van de rijnsnelheid gegeven.

In Esch en Oldenzaal reden de geselecteerde subgroepen meestal sneller dan 70 à 75 km/u waarmee het snelheidsbereik vrij klein is. Bij een polynoombenadering van de trendcurve is extrapolatie buiten het gemeten snelheidsbereik niet mogelijk en bij een zeer klein snelheidsbereik kan de polynoom nabij de grenzen van het snelheidsbereik al sterk afbuigen. In die gevallen is dan ook geen effect van een verlaging van de rijnsnelheid van 90 naar 60 km/u weergegeven. Het effect is slechts weergegeven als de onderliggende trend voldoende betrouwbaar is. Het verloop van de polynoom en de R^2 -waarde zijn hierin doorslaggevend.

6.3 Analyse trillingssterkten V_{RMS} en V_{MAX} als functie van de rijsnelheid

De figuren van de V_{max} en V_{rms} in bijlage 2 laten zien dat de spreiding in trillingssterkte over het algemeen toeneemt bij hogere rijsnelheden. In Tilburg en Dordrecht is dit goed zichtbaar. Nu is het aantal passages met snelheden hoger dan 80 km/u ook veel groter dan met snelheden tot 80 km/u maar het verschil is opmerkelijk. Verder vertoont de trillingssterkte op deze locaties een redelijk gelijkmatig stijgend verloop met toenemende rijsnelheid.

In paragraaf 5.3.1 en 5.3.2 is aangegeven dat de V_{max} behalve met de rijsnelheid ook een correlatie heeft met de maximum wiellast en dat de V_{rms} juist een correlatie heeft met de gemiddelde wieltoestand (rms_laag_gem). Aan de hand van een frequentieanalyse wordt dit nader beschouwd. De onderste vier figuren op elk blad in bijlage 2 tonen de bijdragen per frequentieband (tertsbanden) in de totale V_{rms} per passage. Dit wordt getoond voor zowel goederentreinen alsook een selectie van reizigerstreinen. De bijdragen van individuele frequentiebanden in de totale trillingssterkte hebben een koppeling met de daarvoor verantwoordelijke opwekkingsmechanismen. Er zijn drie opwekkingsmechanismen die een grote rol spelen in de trillingsopwekking van treinen. Dit zijn:

- De drukpuls van de voorbijkomende wielstellen op de bodem (het eigen veld).
- De stijfheidsverschillen in de spoorstaaf, ter plaatse van de dwarsliggers en daartussen resulterend in het ‘aantikken’ van de dwarsliggers door de wielen.
- Vlakke plaatsen, onrondheid of ruwheid van treinwielen.

In de eerste twee mechanismen speelt de wiellast een bepalende rol en in de laatste de wieltoestand uitgedrukt in de rms_laag . De frequenties waarop deze opwekkingsmechanismen tot uitdrukking komen zijn onder meer afhankelijk van de rijsnelheid. Behalve de rijsnelheid hangen de opwekkingsfrequenties af van parameters als wieldiameter, wielbasis en dwarsliggerafstand. In tabel 13 worden de opwekkingsmechanismen en bijbehorende frequentiebereiken benoemd.

tabel 13: opwekkingsmechanismen en frequentiebereik voor goederentreinen 60 -110 km/u

Mechanisme	Frequentie afhankelijkheid	Frequentiebereik (tertsbanden)
Drukpuls wielstel (passeerfrequentie)	Erts: Wielbasis (6m) en wagonlengte (13m)	3.15 - 5 Hz
Wieldefecten	Defect; onbalans (1 ^{ste} orde)	6.3 - 10 Hz
	Ovaliteit (2 ^{de} orde)	12.5 - 20 Hz
	Ruwheid (hogere orde effecten)	≥ 20 Hz tot enkele kHz
Stijfheidsverschil spoorstaaf (dwarsliggers)	Dwarsliggerafstand (60 cm)	31.5 - 50 Hz

Uit tabel 13 kan worden opgemaakt dat de drie genoemde opwekkingsmechanismen zich afspelen in een uniek frequentiebereik, althans voor goederentreinen met een snelheid tussen 60 en 110 km/u en een wieldiameter van 90-93 cm. Dat maakt het mogelijk om op basis van een frequentieanalyse van de trillingssterkte de meest waarschijnlijke opwekkingsmechanismen te duiden.

Voor de passeerfrequentie van een wielstel is in tabel 13 uitgegaan van ertswagons met een lengte van bijna 13 meter en een wielbasis van circa 6 meter. Door de ongeveer gelijke afstand tussen wielstellen van een wagon en die van opvolgende wagons geeft dit type wagon een zeer regelmatige drukpuls op de bodem, die krachtiger is dan bij wagons met een sterk verschillende afstand, zoals bijvoorbeeld platte wagons (container) en tankwagons. Bij ongelijke wielafstanden wordt een patroon van meerdere frequenties opgewekt, die per stuk aanmerkelijk lager liggen dan bij het regelmatige patroon van de ertswagons.

In de (onderste vier) figuren van bijlage 2, waarin een frequentieanalyse wordt gepresenteerd, is het frequentiebereik van de opwekkingsmechanismen als balkweergave getoond. De kleuren komen overeen met de gemeten trillingssterkten per tertsbands.

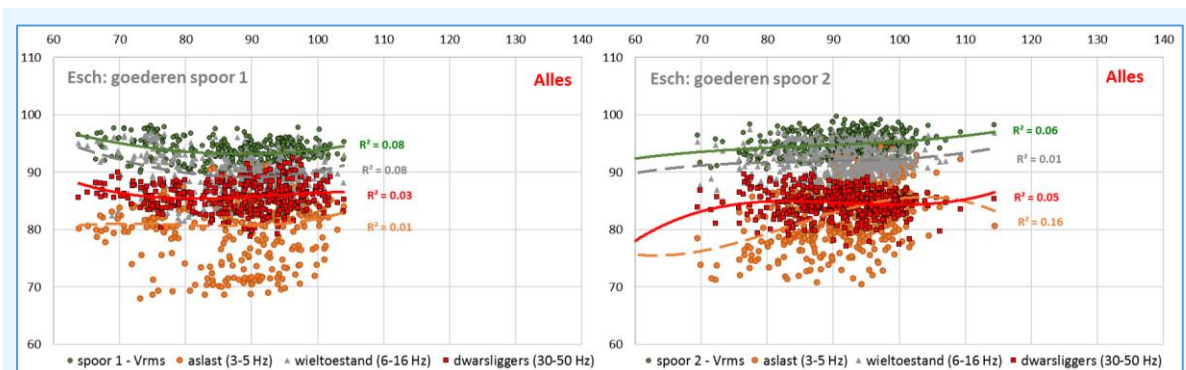
Hierdoor is eenvoudig af te lezen welke mechanismen op welke locatie dominant zijn en hoe de dominantie over het snelheidsbereik kan veranderen. Dit laatste kan dan resulteren in een zeer gematigd snelheidseffect (op de V_{rms}) hoewel de trends van de onderliggende mechanismen sterk kunnen zijn. Esch is hiervan een voorbeeld. Navolgend wordt per locatie ingegaan op de mechanismen voor de trillingsopwekking. Dit wordt, voor zover geen andere verwijzing in de tekst, gedaan aan de hand van tabel 11 en tabel 12 en de figuren in bijlage 2.

6.3.1 Esch

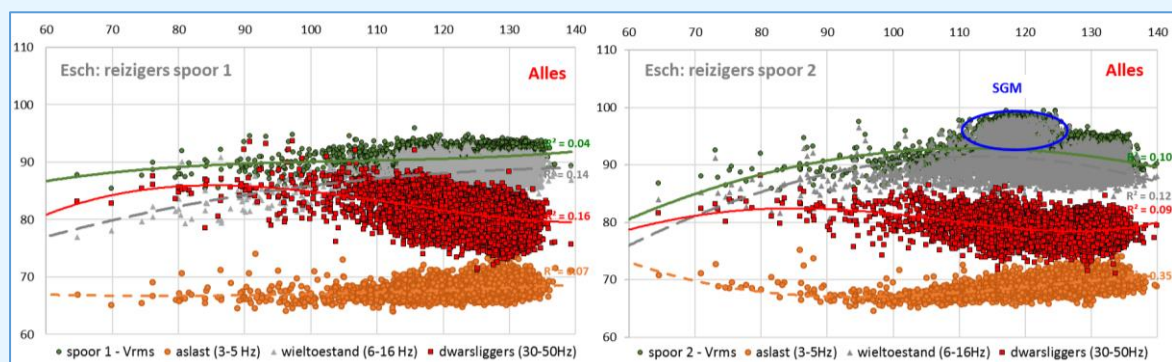
In Esch wordt een van de overige locaties sterk afwijkende trend gevonden qua relatie trillingssterkte - rijsnelheid, zowel voor de V_{max} als voor de V_{rms} . Op het voorste spoor 1 is zelfs sprake van een negatieve trend waarbij de trilsnelheid afneemt met de rijsnelheid. De frequentieanalyse van V_{rms} laat zien dat er over het snelheidsbereik twee opwekkingsmechanismen bepalend zijn voor de totale trillingssterkte. Bij snelheden van 60 tot 80 km/u is dit de wieltoestand, die hogere trillingssterkten opwekt in met name de 6.3 Hz en 8 Hz tertsbands. Vanaf 80 km/u zien wij op spoor 1 ofwel een sterk toenemende invloed van de stijfheidsverschillen van de spoorstaaf (aantikken dwarsliggers) of van de ruwheid (polygonisatie) van de wielband. Dit manifesteert zich vooral in de 40 Hz tertsbands en de piek ligt rond 90 km/u. Niet relevante tertsbands worden in de figuren verder niet getoond.

Op spoor 2 zien wij dat de invloed van de dwarsliggers piekt bij een iets lagere rijsnelheid, zo rond 85 km/u. Aangezien het onwaarschijnlijk is dat de dwarsliggers hier op een andere tussenafstand liggen bestaat hiervoor nog geen sluitende verklaring. Dat de invloed ook een stuk lager is dan die van spoor 1 heeft onder andere te maken met de grotere afstand van het meetpunt tot spoor 2, maar er is ook een afhankelijkheid van het type materieel waargenomen. Het effect is dus niet alleen aan de invloed van de dwarsliggers toe te schrijven. Wieltoestand en het dynamisch gedrag van een wielstel spelen vermoedelijk eveneens een rol. Nader onderzoek hiernaar valt buiten de kaders van dit onderzoek. Op spoor 2 blijft de wieltoestand ook dominant bij snelheden tussen 80 en 100 km/u, maar de invloed verschuift van 6.3 - 8 Hz bij 60 tot 80 km/u naar 10 Hz bij 80 tot 100 km/u. Dat er maar één dominant mechanisme is, is ook de reden waarom er op dit spoor sprake blijft van een zeer gematigde maar evenwel positieve trend. Dit is afwijking van spoor 1.

Omdat de opwekkingsmechanismen uit tabel 13 een uniek frequentiebereik hebben kunnen de trillingssterkten over dit bereik worden gesommeerd. Hierdoor ontstaat een totaalbeeld van de bijdrage van elk mechanisme over het gehele snelheidsbereik van de treinen. In figuur 12 en figuur 13 is dit voor respectievelijk de goederentreinen en reizigerstreinen gedaan. In figuur 12 is duidelijk zichtbaar dat voor het goederenmaterieel de invloed van de wieltoestand (grijs) tussen beide sporen verschilt, maar figuur 13 geldend voor het reizigersmaterieel toont dit in het geheel niet. Het verschil ligt dus niet aan een specifieke gevoeligheid van de bodem bij lagere snelheden maar aan het materieel.



figuur 12: trillingsopwekking goederentreinen Esch per spoor, onderverdeeld naar opwekkingsmechanisme

figuur 13: trillingsopwekking V_{rms} reizigerstreinen Esch per spoor, onderverdeeld naar opwekkingsmechanisme

Om de invloed van de hoge wiellast bij erts- en tanktreinen in beeld te krijgen moeten wij deze als groep afzonderen. In subgroep 1 zijn al deze treinen verzameld. Het blad voor deze subgroep in bijlage 2 laat zien dat de invloed van de wiellast, de 4 Hz en 5 Hz curven volgend, pas piekt bij snelheden boven 90 km/u en in Esch dus nog geen dominante invloed heeft. Tot 80 km/u zijn de tertsbanden 6.3 Hz en 8 Hz dominant, wat duidt op de omloofrequentie van de wielen ofwel wieldefecten als opwekkingsmechanisme. Op spoor 2 hebben nauwelijks treinen gereden met snelheden lager dan 80 km/u waardoor dit zich hier niet heeft geopenbaard, maar de trend lijkt erop dat het op dit spoor minder impact heeft. Tussen 90 en 100 km/u zien we op spoor 1 ook de 40 Hz tertsband aan invloed winnen, maar na 100 km/u weer wegzakken. Het aantikken van de dwarsliggers of hogere orde defecten op de wielband zijn de verantwoordelijke mechanismen. Op spoor 2 is deze invloed veel kleiner. Dit beeld is ook al herkenbaar in figuur 12 en figuur 13 geldend voor de hele populatie. Zo dit bij goederentreinen nog geweten kan worden aan verschillend materieel is dit bij reizigersmaterieel geen verklaring. Analyses met één materieeltype tonen eenzelfde beeld.

Verklaringen negatieve trend op spoor 1

Op spoor 1 zijn onder de ertstreinen twee vervoerders waargenomen. DB Schenker rijdt met twee BR189 locs gevolgd door FALS ertswagons. Daarnaast rijdt er een andere vervoerder met één Class 66 loc gevolgd door ertswagons van een iets afwijkend type. Deze laatste vervoerder komt niet tot hogere snelheden dan 80 km/u, waar DB Schenker juist rijdt met snelheden vanaf 80 km/u. Dit creëert onduidelijkheid of trends nu zijn op te dragen aan de rijnsnelheid of aan een ander type materieel. Kijken we naar subgroep 2 met de lege treinen dan zien we dat de 6.3 Hz en 8 Hz tertsband aan dominantie verliezen bij rijnsnelheden rond 70 à 80 km/u.

De negatieve snelheidstrend wordt hier dus mede veroorzaakt door het gegeven dat twee sterk bepalende vervoerders met verschillend materieel in een ander snelheidsbereik hebben gereden. Niettemin zijn er twee qua dominantie in elkaar overlopende mechanismen die in Esch zorgen voor een zeer gematigde of zelfs negatieve trend in de trillingssterkte als functie van de rijssnelheid.

Reizigerstreinen

Kijken wij ter vergelijking naar de reizigerstreinen, het VIRM, IC3/IC4 en SGM materieel dan zien wij dat er in alle gevallen sprake blijft van een positieve snelheidstrend qua trillingssterkte. Ook bij reizigersmaterieel zijn er opmerkelijke verschillen in de registraties tussen beide sporen, ofschoon het nu zeer homogene selecties van slechts één treintype betreft. Vanwege de lagere wiellasten spelen de frequenties tot globaal 5 Hz, hier geen rol van betekenis. Bepalend voor de trillingsopwekking van reizigersmaterieel is de wieltoestand, met name in de frequentiebanden van 10 tot 16 Hz die bij snelheden van 90 tot 140 km/u worden doorlopen.

6.3.2 Dordrecht

In Dordrecht wordt voor de V_{max} , zonder verder uitsplitsing naar homogene subgroepen, een redelijk gelijkmatige trend gevonden van ongeveer 3 dB bij een snelheidstoename van 60 tot 90 km/u. Deze trend geldt voor beide sporen. Voor de V_{rms} is de trend met circa 3 tot 5 dB op spoor 1 wat sterker en met circa 1 tot 3 dB op het achterliggende spoor 2 juist wat gematigder.

Bij opsplitsing in homogene subgroepen, subgroep 1 met de zware tank - en ertstreinen en subgroep 2 met de onbeladen treinen, worden de verschillen tussen beide sporen wat groter. De frequentieanalyse voor subgroep 1 laat zien dat de statische wiellast hier een dominante rol speelt, maar pas vanaf 80 km/u. Tussen 80 en 90 km/u geeft de hoge wiellast een extra verhoging van de trillingssterkte bij 4 tot 5 Hz wat het snelheidseffect vergroot.

Verbazingwekkend is het dat ook bij onbeladen treinen (subgroep 2) het snelheidseffect tussen 80 en 100 km/u versterkt wordt door de invloed van de wiellast, ofschoon de gemeten trillingssterkten over het hele snelheidsbereik globaal 6 dB lager liggen dan bij de zware treinen (subgroep 1). Zowel de invloed van de wiellast alsook die van de wieltoestand liggen dus lager.

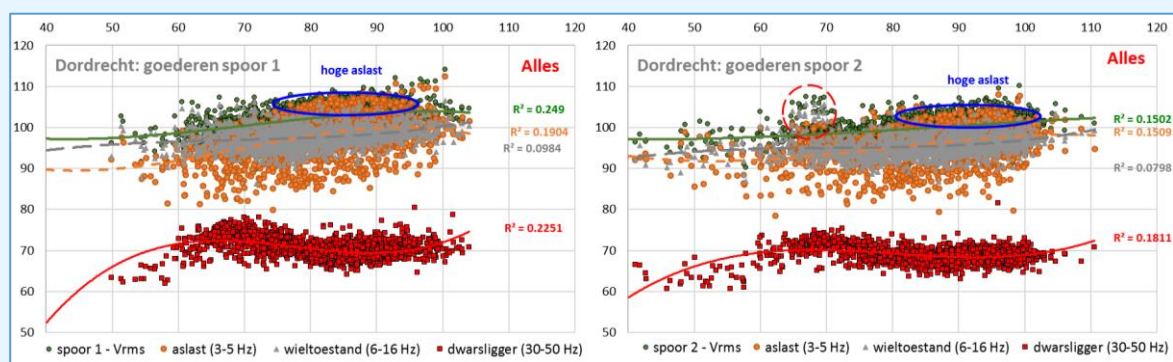
De figuren (rechtsboven) in bijlage 2, waarin de gemiddelde wiellast van de treincombinatie wordt uitgezet tegen de gemiddelde rms_laag, laten zien dat bij de onbeladen treinen niet alleen de wiellast zakt van globaal 90 tot 110 kN naar 20 tot 40 kN maar ook de gemiddelde rms_laag van 5 tot 10 kN naar 3 tot 6 kN. Dat verklaart waarom ook de bijdrage van de wieltoestand is afgenomen en de relatie tussen de trillingssterkte en de rijssnelheid vergelijkbaar is met die van beladen (zware) treinen.

Subgroep 3 omvat alle goederentreinen met uitzondering van de zware tank- en ertstreinen. In deze groep komen nog wel andere zware treinen voor. In deze groep is het effect van de (statische) wiellast nog steeds groot. Als alle treinen met een wiellast hoger dan 80 kN uit deze selectie worden geweerd, dan is er tussen 80 en 90 km/u nog een sterke invloed van de wiellast waarneembaar in de 4 Hz tertsband en bij snelheden van 90 tot 100 km/u in de 5 Hz tertsband. Onder 80 kN wiellast neemt deze invloed geleidelijk af en is bij een wiellast lager dan 50 kN met ongeveer 5 dB afgenomen ten opzichte van 80 kN of meer. De invloed van de wiellast is in Dordrecht dus niet voorbehouden aan zware erts- en tanktreinen, maar geldt voor veel beladen goederentreinen met een gemiddelde wiellast hoger dan 80 kN (8 ton).

Op spoor 2 is de wiellast minder dominant. Bij snelheden van 90 tot 100 km/u vertoont de bijdrage in de 5 Hz band gelijkens met die van spoor 1 maar de bijdrage in de 4 Hz tertsband is beduidend lager. Omdat bij 90 km/u de 4 Hz tertsband bepalend is voor de totale trillingssterkte is het berekende snelheidseffect van 90 naar 60 km/u op spoor 2 wat gematigder dan op spoor 1.

Tussen 60 en 70 km/u is, met name bij de zware erts- en tanktreinen (subgroep 1), nog een verhoging van de trillingssterkte waarneembaar in de 6.3 Hz tertsband. Hierdoor is de trillingssterkte V_{rms} bij 65 km/u vergelijkbaar met die bij 90 km/u. Een snelheidsverlaging van 90 tot 65 km/u zal dus weinig effect hebben op de trillingssterkte. De globale trend voor spoor 2, met een 1 tot 3 dB afname bij een snelheidsverlaging van 90 tot 60 km/u, wordt in het geval van de zware treinen dus onderbroken door een sterke toename rond 65 km/u. Rijdt men maar een fractie harder dan 60 km/u dan is het effect geheel weg. Op andere locaties of wellicht zelfs maar op enige kilometers van het meetpunt kan zo'n opslinging van de trillingssterkte qua frequentie verschuiven en optreden bij een andere rijsnelheid.

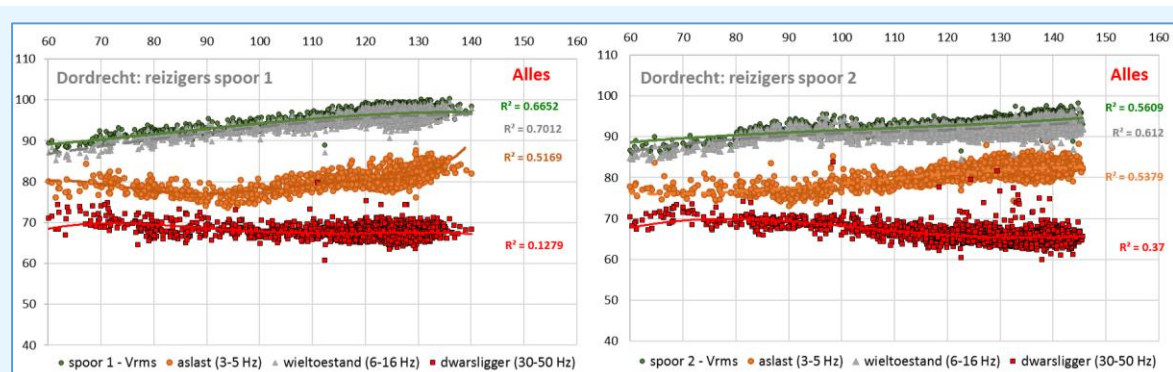
De verschillen tussen beide sporen duiden erop dat niet alleen de trillingsgevoeligheid van de bodem hier een rol speelt maar vermoedelijk de hele dynamica van spoorbovenbouw, dijklichaam en bodem en dat de voertuigdynamica mogelijk ook van invloed is. Dit maakt de trillingsopwekking complex.



figuur 14: trillingsopwekking V_{rms} goederentreinen Dordrecht per spoor, onderverdeeld naar opwekkingsmechanisme

Reizigerstreinen

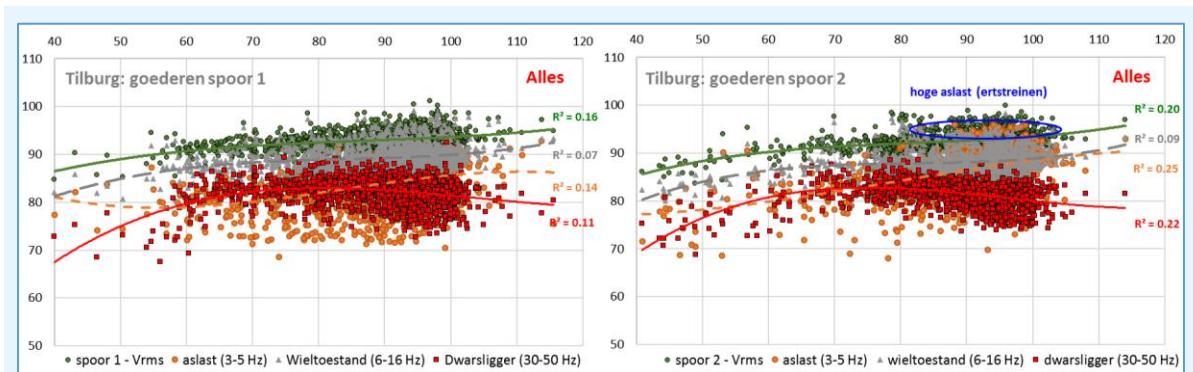
Kijken wij weer naar de reizigerstreinen, met wiellasten tussen ongeveer 60 en 80 kN, dan zien wij dat de trillingsopwekking hier geheel bepaald wordt door de wieltoestand, maar dat ook hier aanmerkelijke verschillen zijn in het spectrale verloop tussen beide sporen. Bij reizigerstreinen neemt de trillingssterkte af als de rijsnelheid wordt verlaagd, maar het verloop is hobbelig, waarbij de 'hobbel' per type materieel weer net bij een andere rijsnelheid ligt. Voor het VIRM materieel ligt dit (spoor 2) tussen 80 en 100 km/u, maar voor het IC3/IC4 intercitymaterieel en de locs met de ICR-rijtuigen tussen 100 en 110 km/u. Dit onderschrijft het beeld dat de voertuigdynamica in combinatie met de dynamica van de spooropbouw een belangrijke rol speelt in het effect van snelheidsverlagingen.



figuur 15: trillingsopwekking V_{rms} reizigerstreinen Dordrecht per spoor, onderverdeeld naar opwekkingsmechanisme

6.3.3 Tilburg

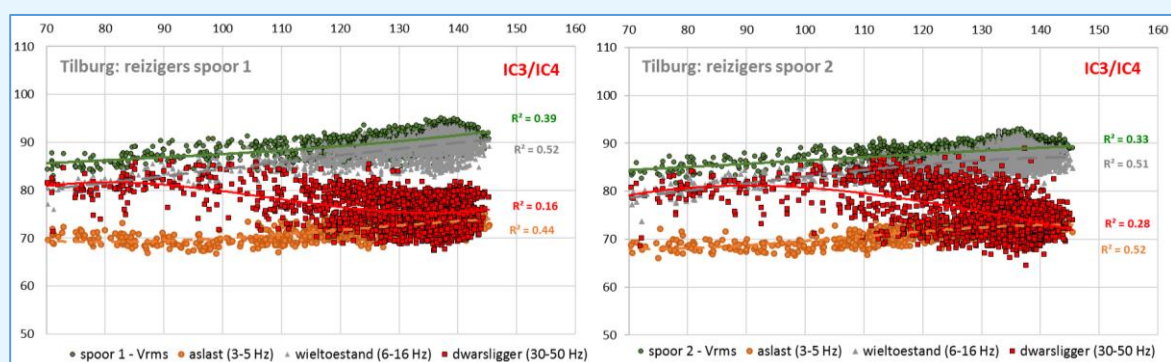
Van de onderzochte locaties is Tilburg de locatie met het kleinste verschil in trillingsopwekking tussen de beide sporen. De gemiddelde trillingsopwekking van spoor 1 ligt ongeveer 1 dB hoger dan die van spoor 2, hetgeen verklaard wordt door het afstandsverschil. Ook in de frequentieanalyse zien wij geen grote verschillen tussen de beide sporen. Het grootste verschil betreft de invloed van de wiellast van de zware ertstreinen die oostwaarts rijden over spoor 2, maar westwaarts leeg terugkomen over spoor 1. De trillingsbijdrage in de 4 Hz tertsband (wiellast) is voor de groep zware treinen op spoor 2 dan ook aanmerkelijk hoger dan op spoor 1. Subgroep 1 omvat ook zware treinen op spoor 1 met een wiellast groter dan 17 ton, maar dit zijn geen ertstreinen maar tank- of containertreinen. Voor deze treinen is de sterke 4 Hz component, die voortvloeit uit de regelmatige afstand tussen de wielstellen (zie paragraaf 6.3), minder aanwezig. In figuur 16, waarin per opwekkingsmechanisme de relevante tertsbanden zijn gesommeerd, is dit duidelijk te zien. Als de ertstreinen uitgezonderd worden dan is de wieltoestand verder maatgevend voor de trillingsopwekking van goederentreinen. De dominante frequenties liggen daarbij tussen 6.3 Hz bij 60 km/u en 10 Hz bij 100 km/u.



figuur 16: trillingsopwekking V_{rms} goederentreinen Tilburg per spoor, onderverdeeld naar opwekkingsmechanisme

Reizigerstreinen

Ook voor de reizigerstreinen is de wieltoestand maatgevend en liggen de dominante frequenties tussen 10 Hz en 12.5 Hz bij snelheden van 100 tot 150 km/u. Tussen 80 en 100 km/u is er nog een relatief hoge bijdrage in de 40 Hz tertsband als gevolg van het aantikken van de dwarsliggers of als gevolg van de wieltoestand (wielruwheid), zie figuur 17. Globaal ziet de opbouw van de trillingssterkte er dus vergelijkbaar uit met die van goederentreinen, maar met het verschil dat de component van de statische wiellast dus aanmerkelijk lager ligt.



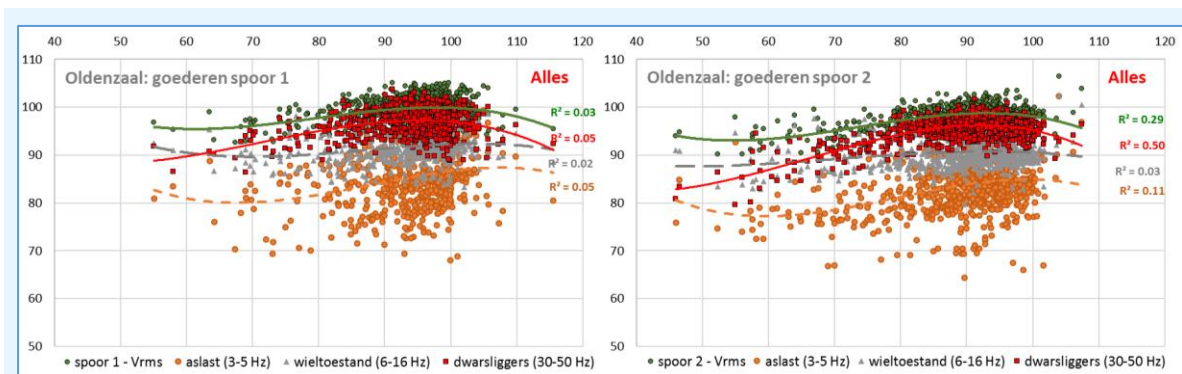
figuur 17: trillingsopwekking V_{rms} reizigerstreinen Tilburg per spoor, onderverdeeld naar opwekkingsmechanisme

Omdat er in Tilburg geen sterke resonanties worden waargenomen is de trend tussen trillingopwekking en rijnsnelheid redelijk gelijkmatig en het effect van een snelheidsafname van 90 naar 60 km/u bij goederentreinen bedraagt ongeveer -3 dB op de V_{\max} en de V_{rms} . Wanneer de populatie dus wordt onderverdeeld in homogene subgroepen, dan blijkt dit effect iets sterker dan voor de gehele populatie. Daarvoor werd in tabel 10 nog een effect van -2 dB opgegeven.

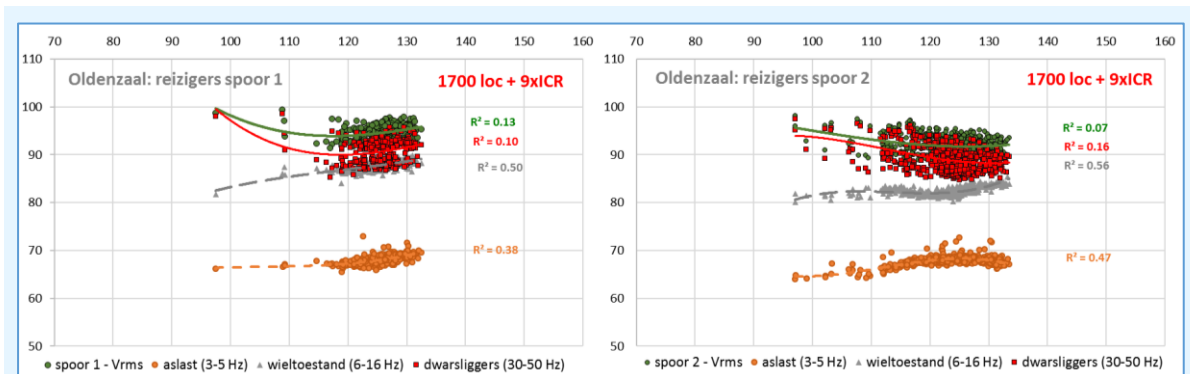
6.3.4 Oldenzaal

Oldenzaal is met Dordrecht de locatie met de hoogste trillingsopwekking in de bodem. Qua V_{\max} noteert Oldenzaal de hoogste waarden, maar qua V_{rms} noteert Dordrecht iets hogere waarden. In Oldenzaal is een meer directe invloed van individuele wagons of wielen te zien in de trillingsregistraties waarop de V_{\max} snel reageert en dus hogere waarden kan aannemen.

Uit de frequentieanalyses blijkt dat er een groot verschil is in de frequenties waarop trillingen worden overgedragen tussen beide locaties. In Oldenzaal ligt dit hoofdzakelijk tussen 30 en 50 Hz en in Dordrecht tussen 4 en 16 Hz. Het opwekkingsmechanisme in Oldenzaal is dus totaal anders dan in Dordrecht. In Oldenzaal zijn het aantikken van de dwarsliggers door de treinwielen of hogere orde slijtagepatronen op de wielband de bepalende mechanismen, terwijl in Dordrecht de wiellast en excentriciteit of onbalans van de wielen bepalend zijn. De specifieke gevoeligheid van de bodem voor bepaalde frequenties is hierin van cruciaal belang. De bodem in Oldenzaal is kennelijk gevoelig voor frequenties tussen 30 en 50 Hz en daarmee als stijf te beschouwen terwijl de bodem in Dordrecht juist heel slap is met een gevoeligheid rond 3 tot 5 Hz. In figuur 18 is de trillingsregistratie V_{rms} uitgesplitst naar de per opwekkingsmechanisme relevante frequentiebanden. Hierin is duidelijk te zien dat de trillingssterkte in Oldenzaal geheel bepaald wordt door frequenties rond 40 Hz. Merk ook op dat de wiellast, die zich openbaart tussen 3 Hz en 5 Hz, hier totaal ondergeschikt is en gemiddeld zo'n 10 dB lager ligt dan in Dordrecht. De in Oldenzaal relatief sterke afname van de trillingsterkte bij lagere rijnsnelheden komt doordat de bodem minder trillingsgevoelig is bij frequenties lager dan circa 30 Hz. Hierdoor neemt de trillingssterkte bij snelheden lager dan 90 km/u relatief snel af. De registraties van reizigerstreinen, zie figuur 19, laten zien dat ook bij snelheden hoger dan 90 km/u de trillingssterkte afneemt. De meest ongunstige rijnsnelheid ligt dus net rond 90 à 95 km/u.



figuur 18: trillingsopwekking V_{rms} goederentreinen Tilburg per spoor, onderverdeeld naar opwekkingsmechanisme



figuur 19: trillingsopwekking V_{rms} reizigerstreinen Tilburg per spoor, onderverdeeld naar opwekkingsmechanisme

6.4 Effect gematigde rijnsnelheid

Door homogene subgroepen uit de totale populatie goederentreinen af te zonderen ontstaan verschillen in trends ten opzichte van de gemiddelde trend van de gehele populatie (zie tabel 10), waarbij zowel sterkere als ook zwakkere trends ontstaan. Het meest interessant is wat de trend voor de qua trillingen maatgevende treinen zal zijn. Voor de in hinderkwesties en tracébesluiten maatgevende V_{max} of $V_{max,BTS}$ zijn dit veelal de zware ertstreinen, die in Dordrecht en Esch rijden op spoor 1 en in Tilburg op spoor 2. Voor deze treinen speelt naast de wieltoestand ook wiellast een rol. In Dordrecht is deze invloed bij snelheden van 80 tot 90 km/u zelfs dominant en versterkt deze het snelheidseffect. Door deze groep uit de selecties weg te laten ontstaat dan juist een meer gematigde trend.

In tabel 14 is het effect van een snelheidsverlaging van 90 naar 60 km/u op de vier meetlocaties weergegeven. Dit is gedaan voor subgroep 1 met de zware erts- en tanktreinen en subgroep 3 waarin de overige goederentreinen minus deze erts- en tanktreinen aanwezig zijn. De trends zijn afgezet tegen die van de totale populatie, zoals ook vermeld in tabel 10, waaruit de invloed van de wiellast in het geval van de V_{max} en de wieltoestand in het geval van de V_{rms} zijn geëlimineerd.

tabel 14: V_{max} en V_{rms} bij 90 km/u: gemiddelde, bandbreedte en effect snelheidsverlaging -30 km/u

Locatie	V_{max} in [dB]						V_{rms} in [dB]					
	Spoor 1			Spoor 2			Spoor 1			Spoor 2		
	Alle treinen	Sub1 (zwaar)	Sub3 (rest)	Alle treinen	Sub1 (zwaar)	Sub3 (rest)	Alle treinen	Sub1 (zwaar)	Sub3 (rest)	Alle treinen	Sub1 (zwaar)	Sub3 (rest)
Esch	+3	+1	0	-2	N/B	-1	+4	+1	-2	-1	N/B	-2
Dordrecht	-3	-5	-5	-3	0	-3	-3	-5	-5	-1	-1	-3
Tilburg	-3	N/B	-3	-2	-3	-2	-1	N/B	-2	-1	-3	-3
Oldenzaal	-7	N/B	N/B*	-7	-5	-8*	-3	N/B	N/B*	-4	-4	-6*

* containertreinen

In tabel 14 is te zien dat als de ertstreinen in Esch buiten beschouwing worden gelaten de afwijkende trend van een toenemende trillingssterkte bij lagere snelheden op spoor 1 verdwijnt. Dit komt door de in paragraaf 6.3.1 al benoemde situatie met twee vervoerders. Op spoor 2 is er sprake van een zeer gematigde afname van de trillingssterkte bij lagere snelheden, maar in elk geval een afname.

In Dordrecht zien wij op spoor 1, bij alle subgroepen waarin nog zware treinen zitten, een sterk snelheidseffect van ongeveer -5 dB doordat tussen 80 en 90 km/u de wiellast een dominante invloed heeft. Bij de minder zware treinen is de wieltoestand maatgevend en is dit effect beperkt tot zo'n -3 dB. De trend lijkt dan sterk op die van de locatie Tilburg.

In Tilburg is over het gehele snelheidsbereik de wieltoestand dominant en bedraagt de afname van de trillingssterkte 2 tot 3 dB bij een snelheidsverlaging van 90 naar 60 km/u. Dit lijkt dus sterk op de resultaten uit Dordrecht, behoudens de extra invloed van zware ertstreinen aldaar.

In Oldenzaal is er voor de onderscheiden subgroepen op spoor 1 geen betrouwbaar snelheidseffect te geven. De snelheidsvariatie per subgroep was hiervoor te beperkt, kleiner dan 25 km/u, of de rijnsnelheden lager hoger dan 75 km/u. Het snelheidseffect voor de totale populatie bedraagt ongeveer 6 à 7 dB voor de V_{\max} en 3 à 4 dB voor de V_{rms} .

Op spoor 2 zijn de correlatiewaarden (R^2) van de trend redelijk, maar ook hier zijn er relatief weinig treinpassages tussen 60 en 75 km/u waarmee het snelheidseffect juist in dit gebied onnauwkeuriger is. Afhankelijk van de beschouwde subgroep ligt het effect tussen 5 en 8 dB voor de V_{\max} en tussen 4 en 6 dB voor de V_{rms} . Ondanks genoemde onnauwkeurigheid bij lagere snelheden moet geconcludeerd worden dat het snelheidseffect in Oldenzaal het grootst is van alle onderzochte locaties.

7. Conclusies

Het onderzoek op vier meetlocaties: Esch, Dordrecht, Tilburg en Oldenzaal toont aan dat de trillingssterkte behalve van de rijsnelheid van meerdere factoren afhankelijk is, waarin bodemsamenstelling, type treinmaterieel en onderhoudstoestand een belangrijke rol spelen. De gevoeligheid van de bodem voor bepaalde frequenties en de geometrie van het materieel bepalen welke opwekkingsmechanismen dominant zijn. Ieder mechanisme heeft een karakteristiek frequentiebereik en bij een verandering van de rijsnelheid kan de dominantie van het ene mechanisme overgaan in het andere. Zo kunnen op één locatie meerdere mechanismen van invloed zijn. Bij in elkaar overlopende mechanismen zal het effect van de rijsnelheid op de trillingssterkte daardoor soms sterker maar soms ook veel gematigder zijn dan gemiddeld. Dordrecht is een voorbeeld van een sterker effect en Esch van een meer gematigd effect. Ook eigenfrequenties in de bodem of spoorbovenbouw hebben een sterk effect op de trillingssterkte. Als door verlaging van de rijsnelheid resonantie wordt vermeden dan zal dit de trillingssterkte meer dan gemiddeld verlagen. Dit is in Oldenzaal het geval.

Gemiddeld nemen de trillingsniveaus (zowel in V_{\max} als ook in V_{rms}) met ongeveer 3 dB af bij een snelheidsverlaging van 90 naar 60 km/u, maar de afname kan ook veel hoger uitvallen zoals de 6 à 7 dB in Oldenzaal toont. Of juist veel minder zoals is Esch, waar op spoor 1 zelfs een toename van de trillingsniveau (0 tot 3 dB) werd waargenomen en op spoor 2 slechts een magere afname (1 à 2 dB). Voor zover deze zeer uiteenlopende resultaten zich laten samenvatten is hiertoe tabel 15 opgesteld. Deze geeft een globaal (overkoepelend) beeld van het gehele onderzoek, waarin de resultaten van hoofdstukken 5 en 6 zijn samengenomen. Het vermelde snelheidseffect in dB's betreft een linearisatie van de afname over het bereik van 90 naar 60 km/u, maar is niet naar nog lagere snelheden door te trekken. Voor wie meer binding heeft met de lineaire trilsnelheden V_{\max} en V_{rms} in [mm/s] zijn de trends ook in formulevorm weergegeven, maar eveneens slechts geldend over het genoemde snelheidsbereik.

tabel 15: globaal beeld effect verlaging snelheid 90 naar 60 km/u [dB] en snelheidsrelatie

Locatie	V_{\max}		V_{RMS}	
	Effect [dB]	Relatie V[mm/s]	Effect [dB]	Relatie V[mm/s]
Esch	0 (-2 tot +4)	~ 1 (of v^0)	0 (-2 tot +4)	~ 1 (of v^0)
Dordrecht	-3 (-5 tot -2)	~ v^1 ($v^{0.6}$ tot 1.4)	-3 (-5 tot -2)	~ v^1 ($v^{0.6}$ tot 1.4)
Tilburg	-3 (-3 tot -2)	~ v^1 ($v^{0.5}$ tot 1)	-3 (-3 tot -1)	~ v^1 ($v^{0.3}$ tot 1)
Oldenzaal	-7 (-8 tot -5)	~ v^2 ($v^{1.5}$ tot 2.2)	-5 (-6 tot -3)	~ v^2 (v^1 tot 2)

Tabel 15 laat zien tussen 60 en 90 km/u uiteenlopende snelheidsrelaties mogelijk zijn, variërend van constant met de snelheid (Esch) tot een meer dan kwadratische toename (Oldenzaal), waarbij gemiddeld de trillingssterkte ongeveer evenredig afneemt met de snelheid. Hoewel snelheidsverlaging veelal lagere trillingssterkten geeft is hiervoor dus geen landelijk geldende trend te bepalen. Voor een goede maatregeloverweging zal per situatie onderzoek nodig zijn om te bepalen welke opwekkingsmechanismen dominant zijn, bij welke frequenties én welk treinmaterieel tot hinderklachten leidt.

Het onderzoek toont aan dat de trillingssterkte V_{\max} een sterke relatie heeft met de maximum wiellast in een treincombinatie. De trillingssterkte V_{rms} lijkt een sterke relatie te hebben met de wieltoestand, maar de parameter rms_laag, die de wieltoestand omvat, is op haar beurt ook afhankelijk van de rijsnelheid, waarmee het geen onafhankelijke parameter is. Een deel van het snelheidseffect wordt daardoor onterecht toegeschreven aan de rms_laag ofwel de onderhoudstoestand van het wiel.


De rms_laag heeft ook nog een relatie met de wiellast. Om slechts de zuivere wieltoestand in de analyses te betrekken is nader onderzoek naar de totstandkoming van de rms_laag in de QV-stations nodig en hoe daaruit de invloed van de rijsnelheid en de beladingstoestand zijn te elimineren.

Pas dan ontstaat een zuivere beschrijving van de wieltoestand waarop vervoerders eventueel en zo mogelijk aanspreekbaar kunnen zijn.

Uit het onderzoek blijken nu de volgende afhankelijkheden:

- Toename V_{\max} circa 1 tot 2 dB per ton wiellast.
- Toename V_{rms} circa 0.5 tot 1.2 dB per kN toename rms_laag ofwel de onderhoudstoestand van het wiel

Het monitoren en beheren van zowel de aslast als ook de onderhoudstoestand van het wiel biedt mogelijkheden om overmatige trillingsproductie te beheersen.



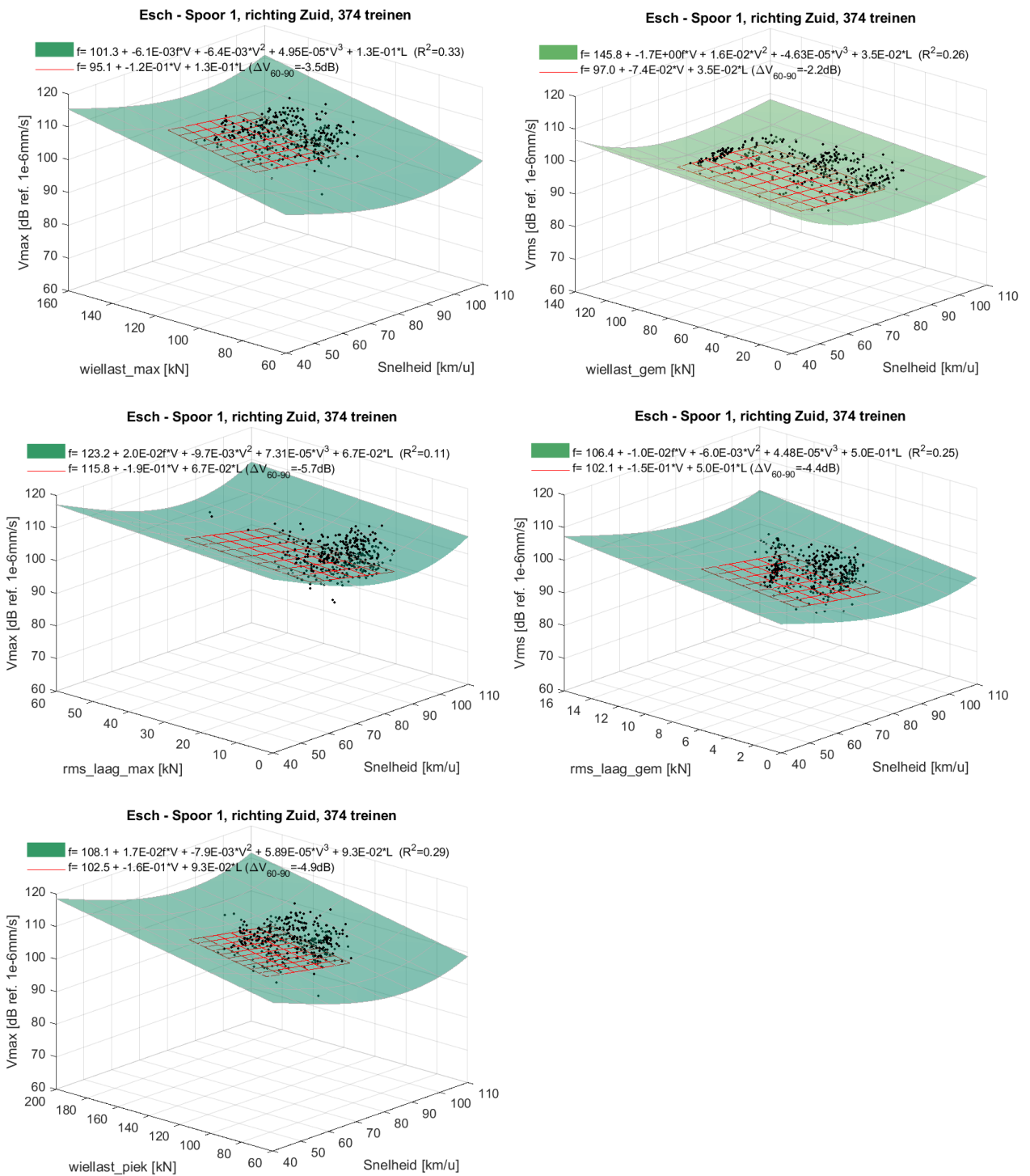
ing. J.J.A. (Hans) van Leeuwen
DGMR Bouw B.V.

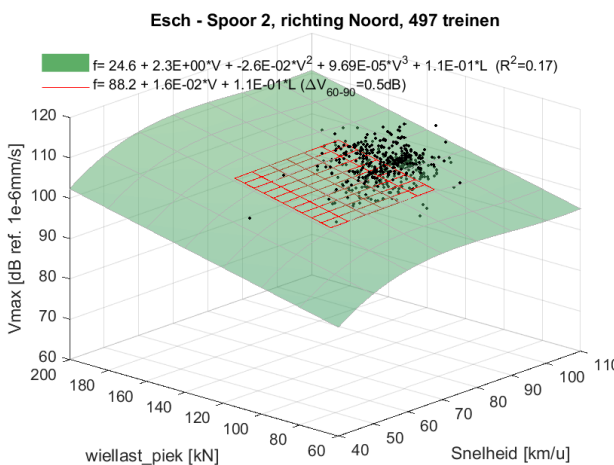
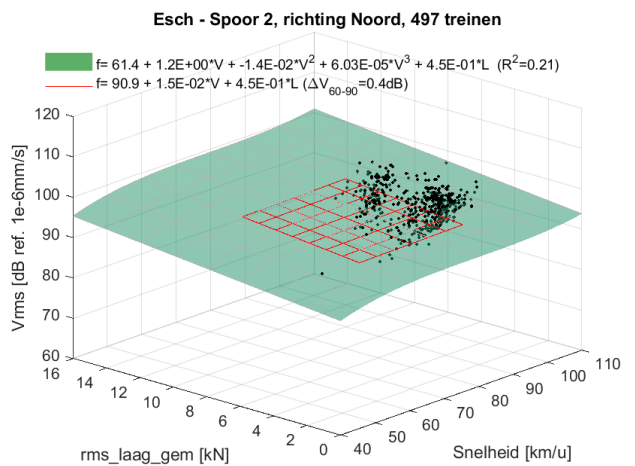
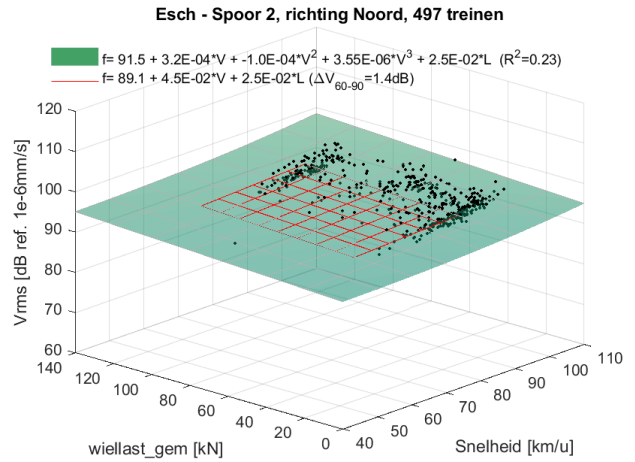
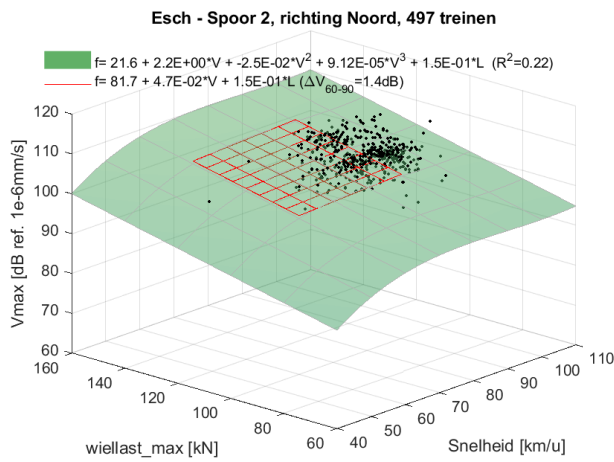
Referenties

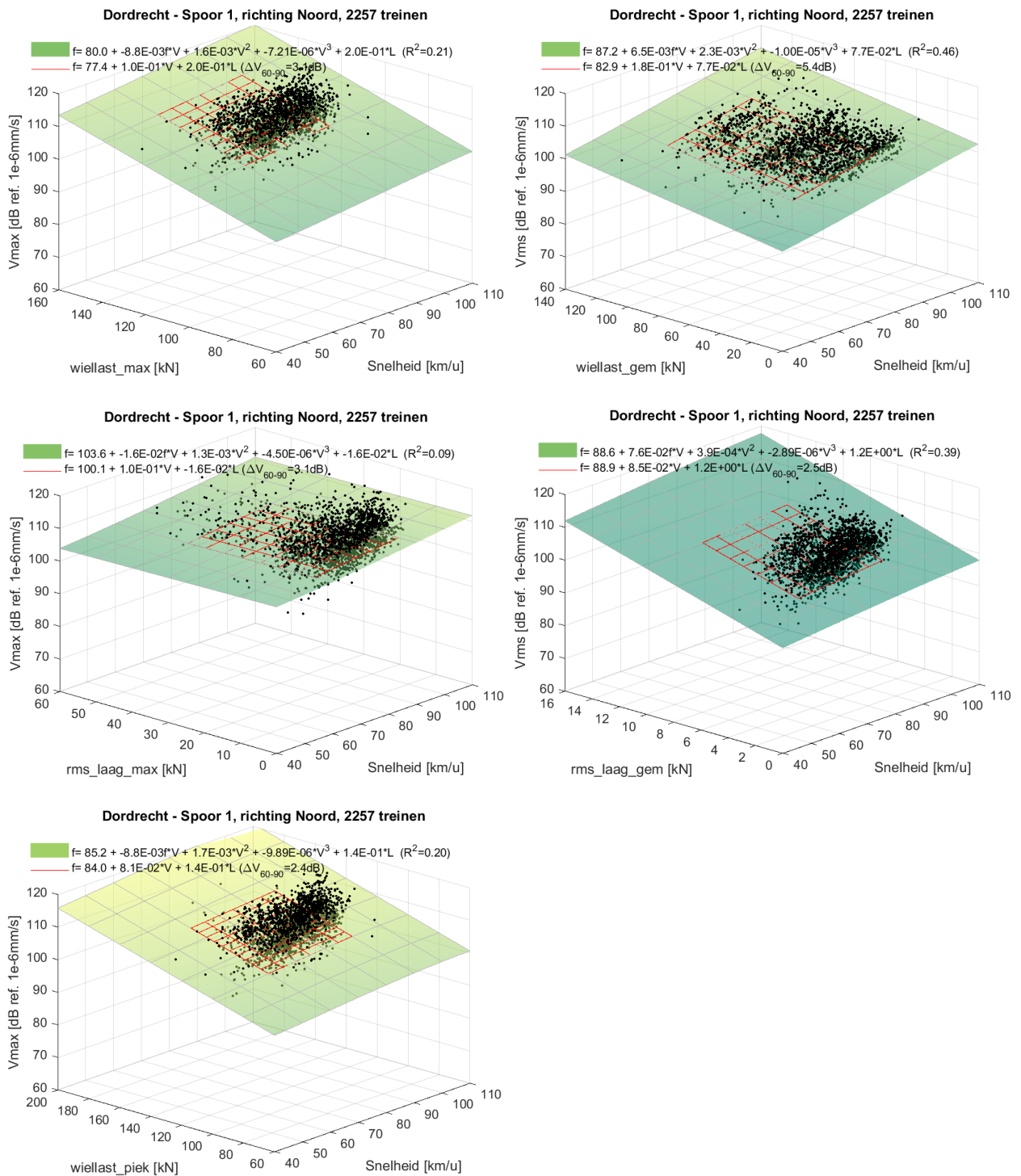
- /1/ Memo Level Acoustics met kenmerk LA.131001a.M04 “Meet- en verwerkingsvoorschrift trillingsmetingen Bts”, 26 februari 2014

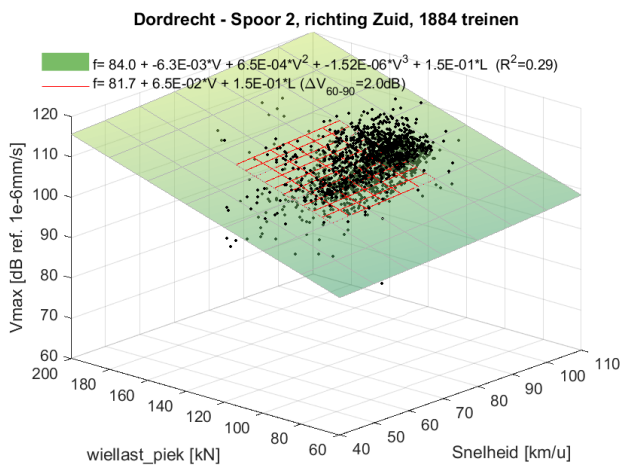
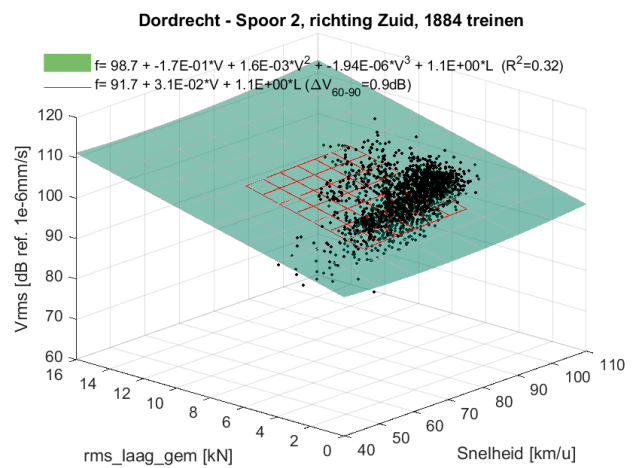
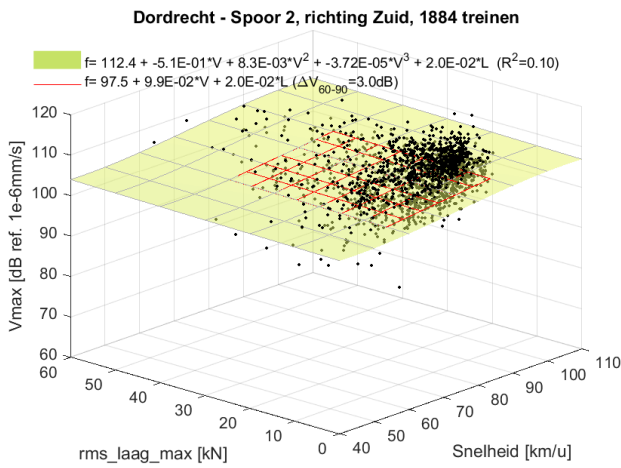
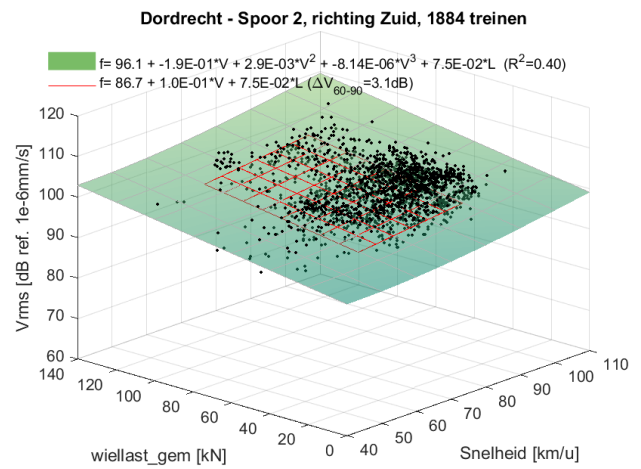
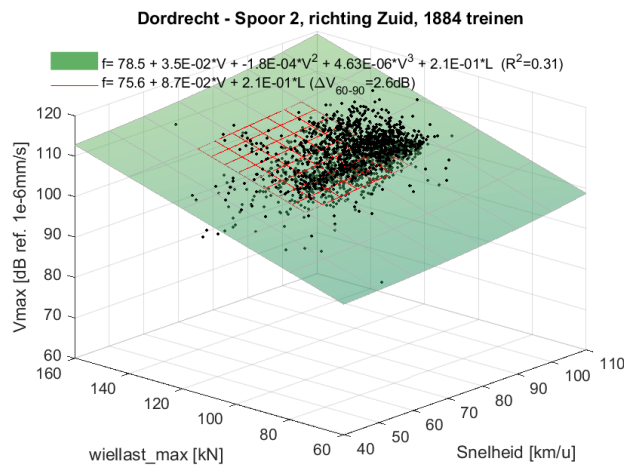
Bijlage 1

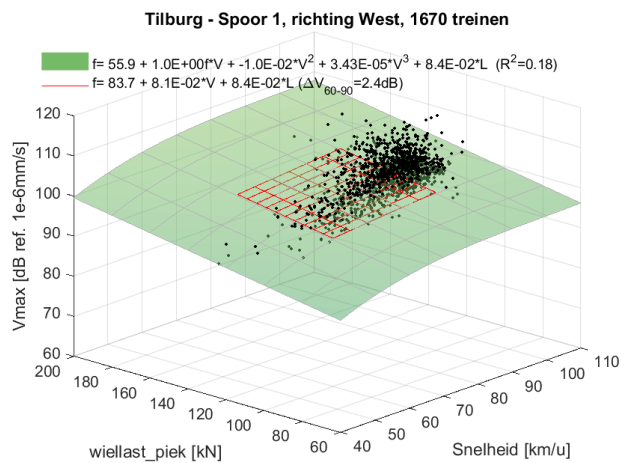
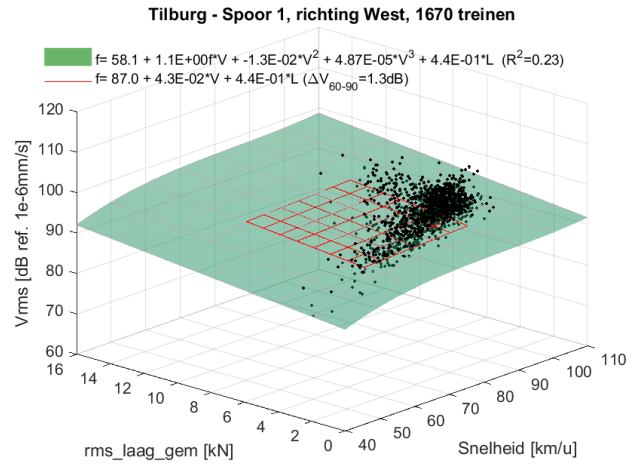
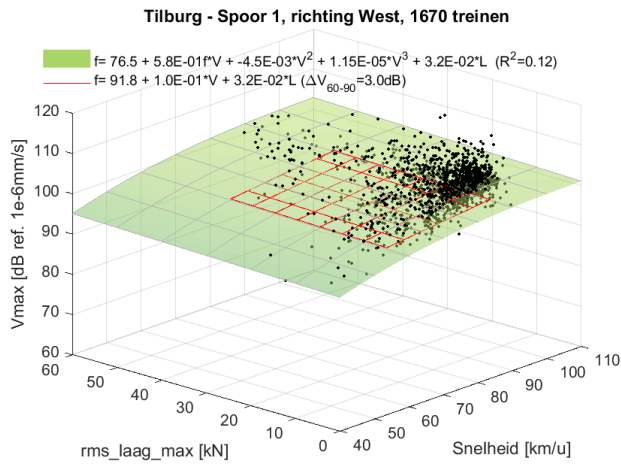
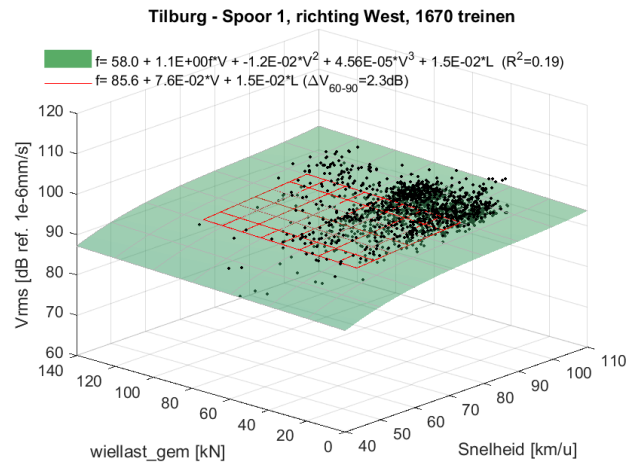
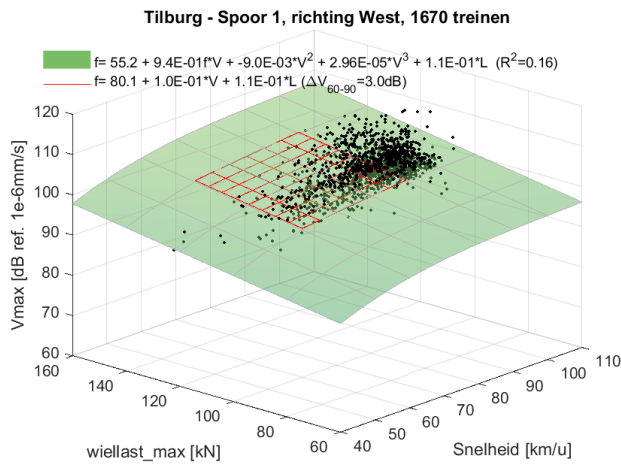
Titel	Trillingsregistraties meetlocaties - Afhankelijkheid van QV-parameters
Omvang	8
Toelichting	V_{RMS} en V_{MAX} als functie wiellast, rms_laag en dynamische pieklast

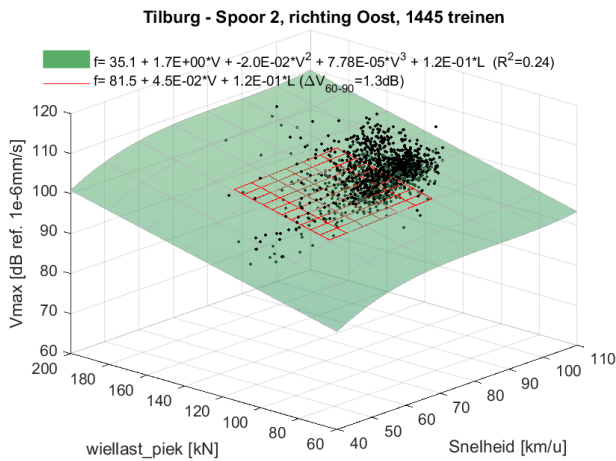
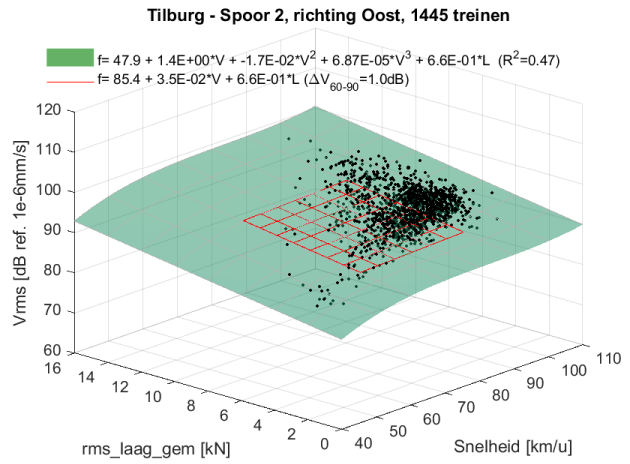
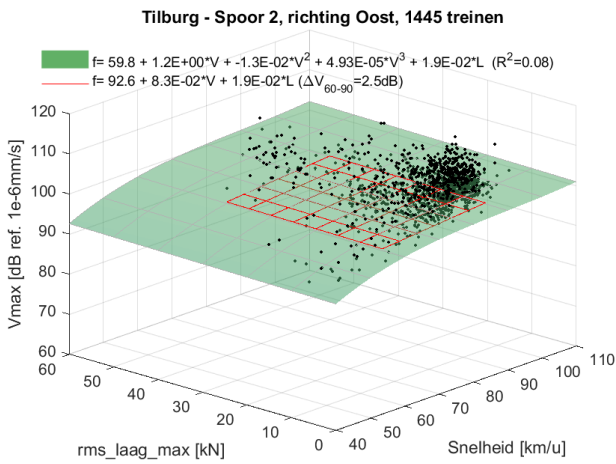
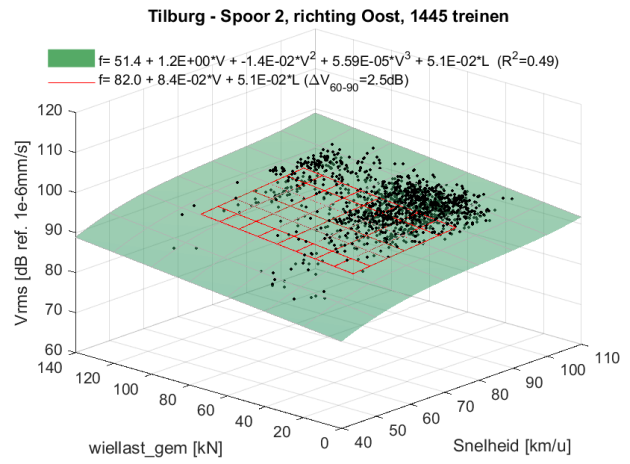
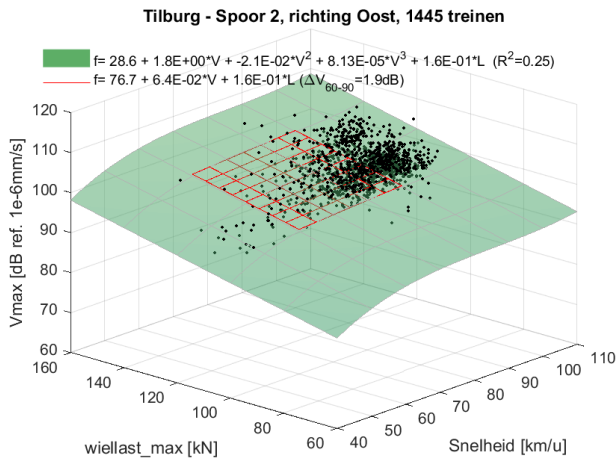


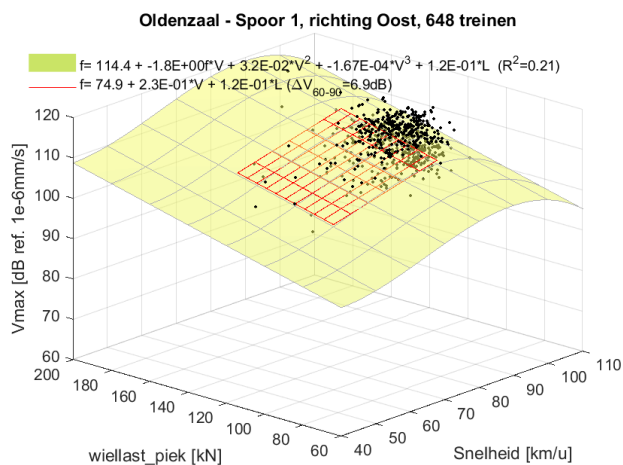
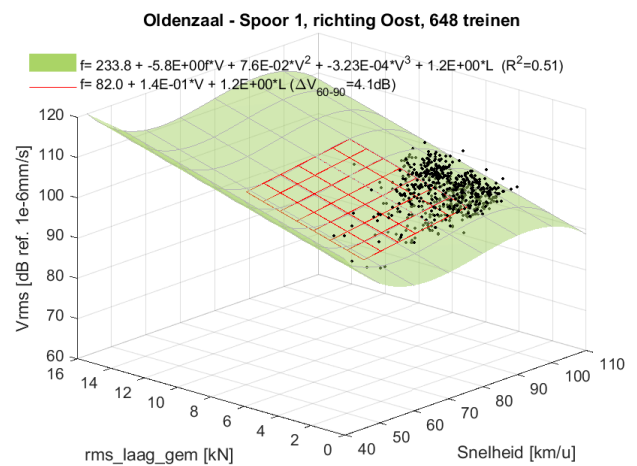
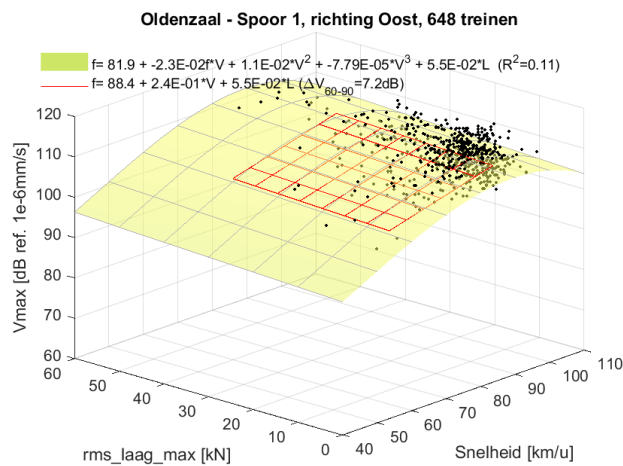
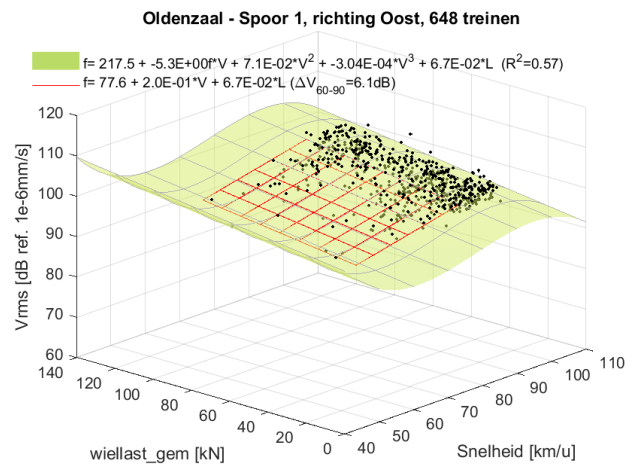
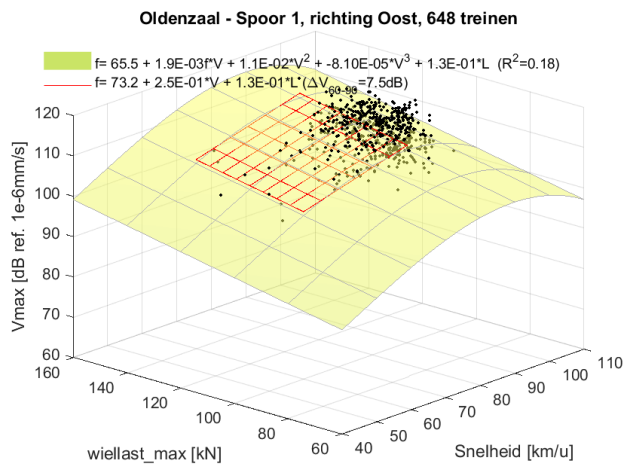


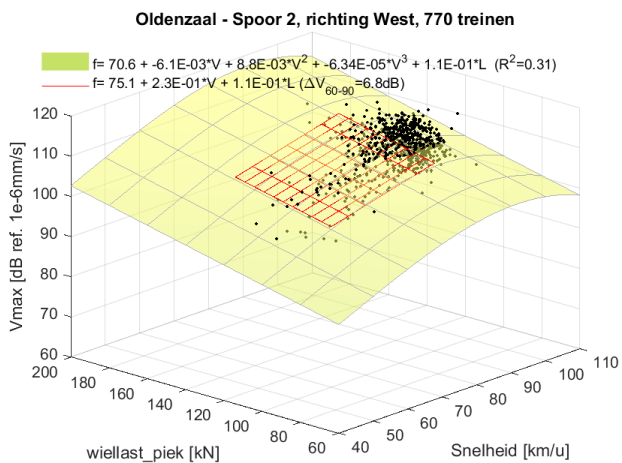
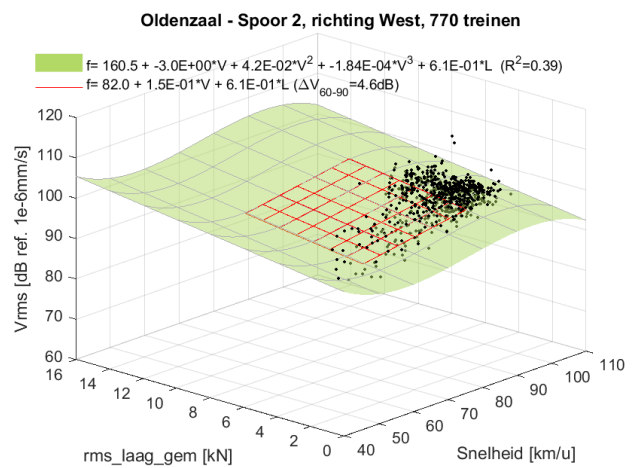
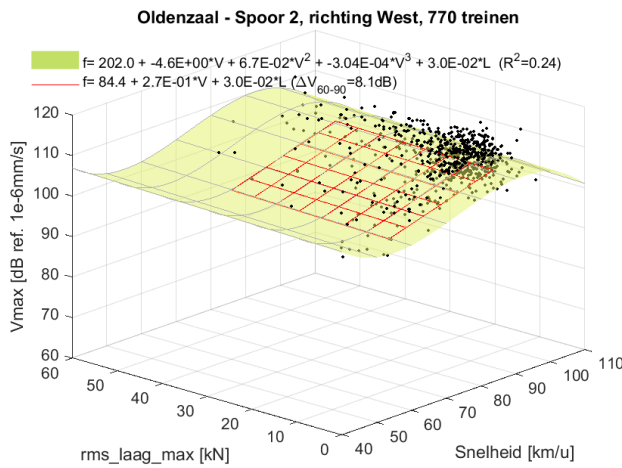
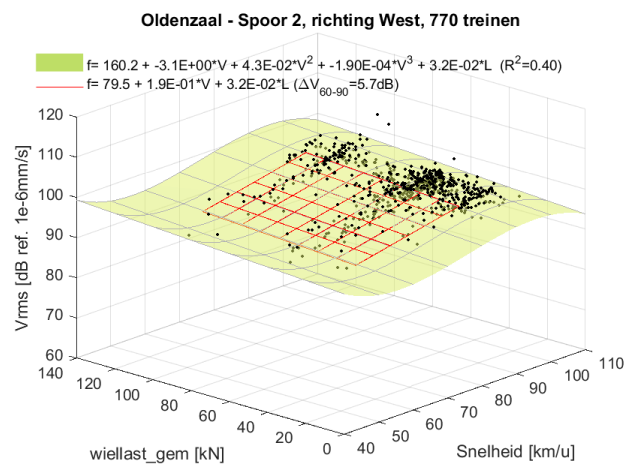
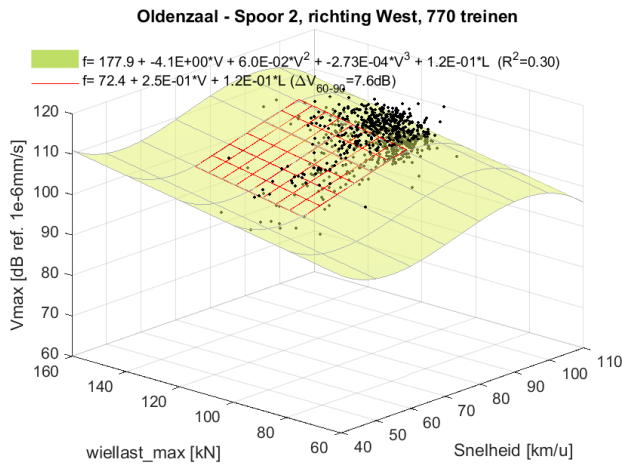








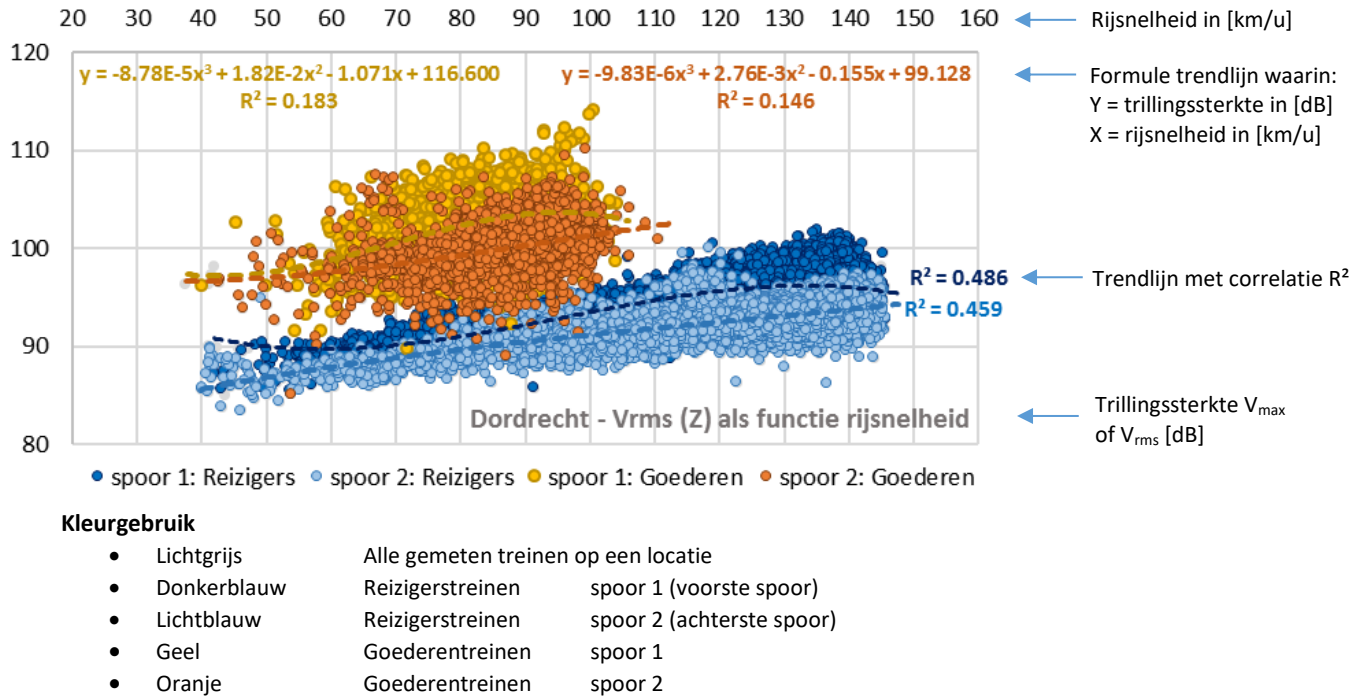




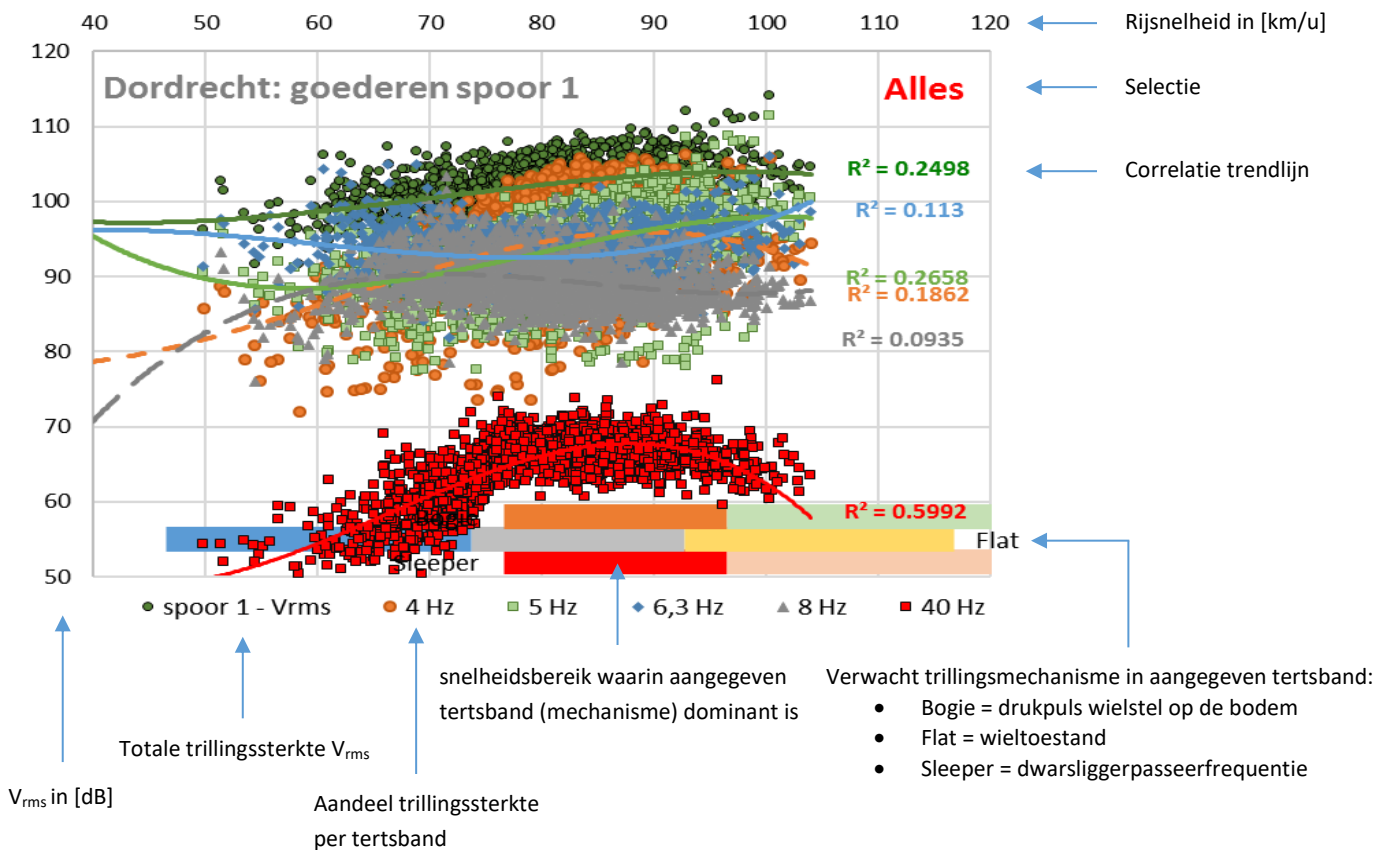
Bijlage 2

Titel	Trillingsregistraties meetlocaties - Analyse subgroepen
Omvang	4 x 4 bladen + uitleg
Toelichting	Samenstelling subgroepen, registratie V_{RMS} & V_{MAX} , en frequentieanalyse

Uitleg figuren bijlage 2

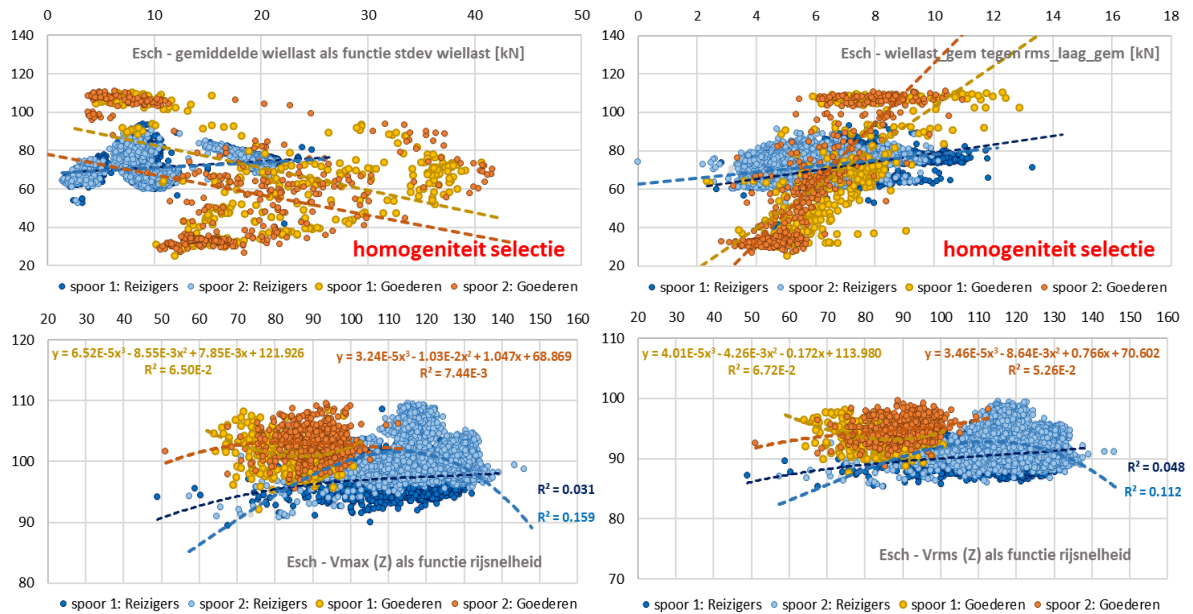


Uitleg figuren frequentieanalyse

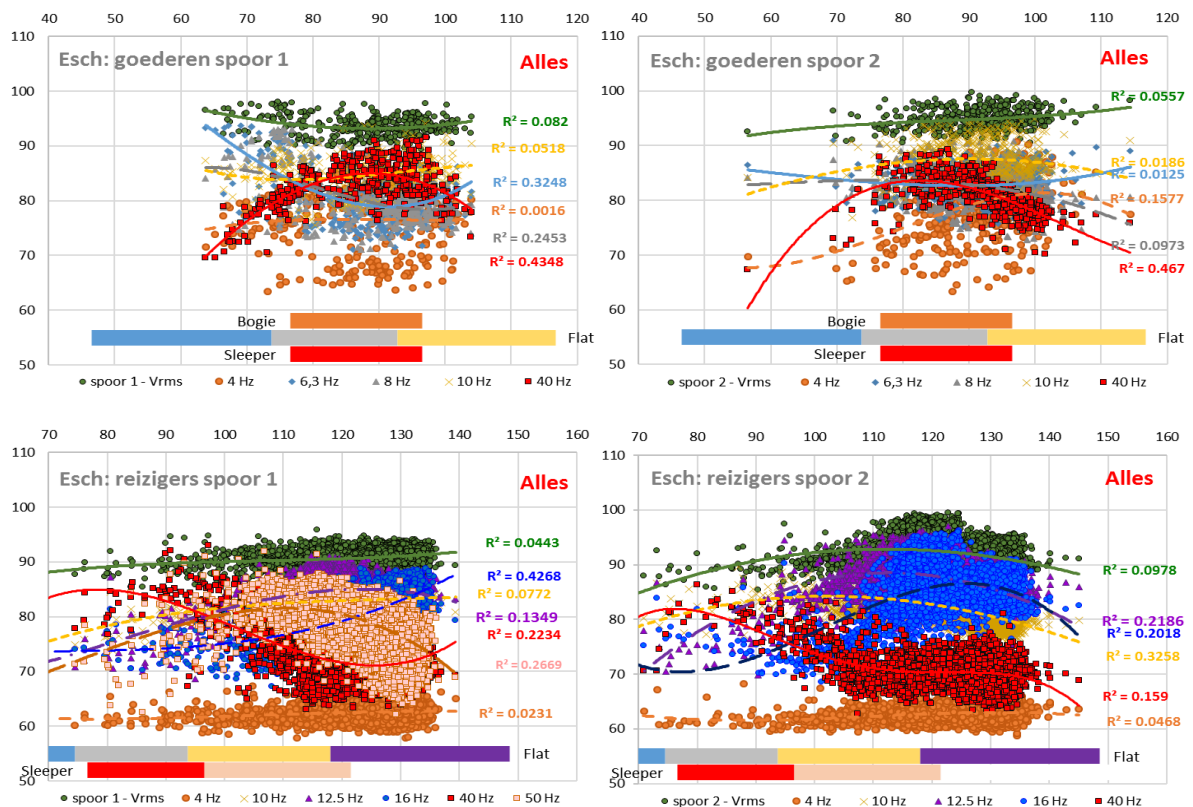


Esch - totaal

Materieel	Spoor 1	Spoor 2	Totaal
Goederen: totaal	377	501	878
Reizigers: totaal	8582	8816	17398

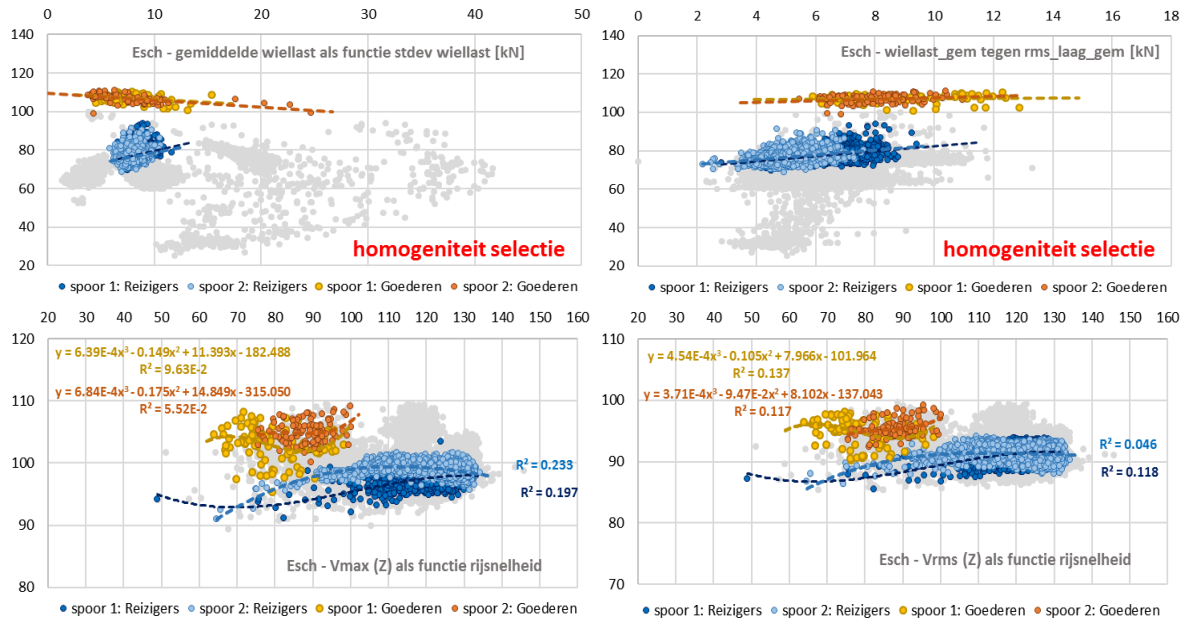


Frequentieanalyse (Vrms per tertsbands als functie rijsnelheid en verantwoordelijke opwekkingsmechanismen)

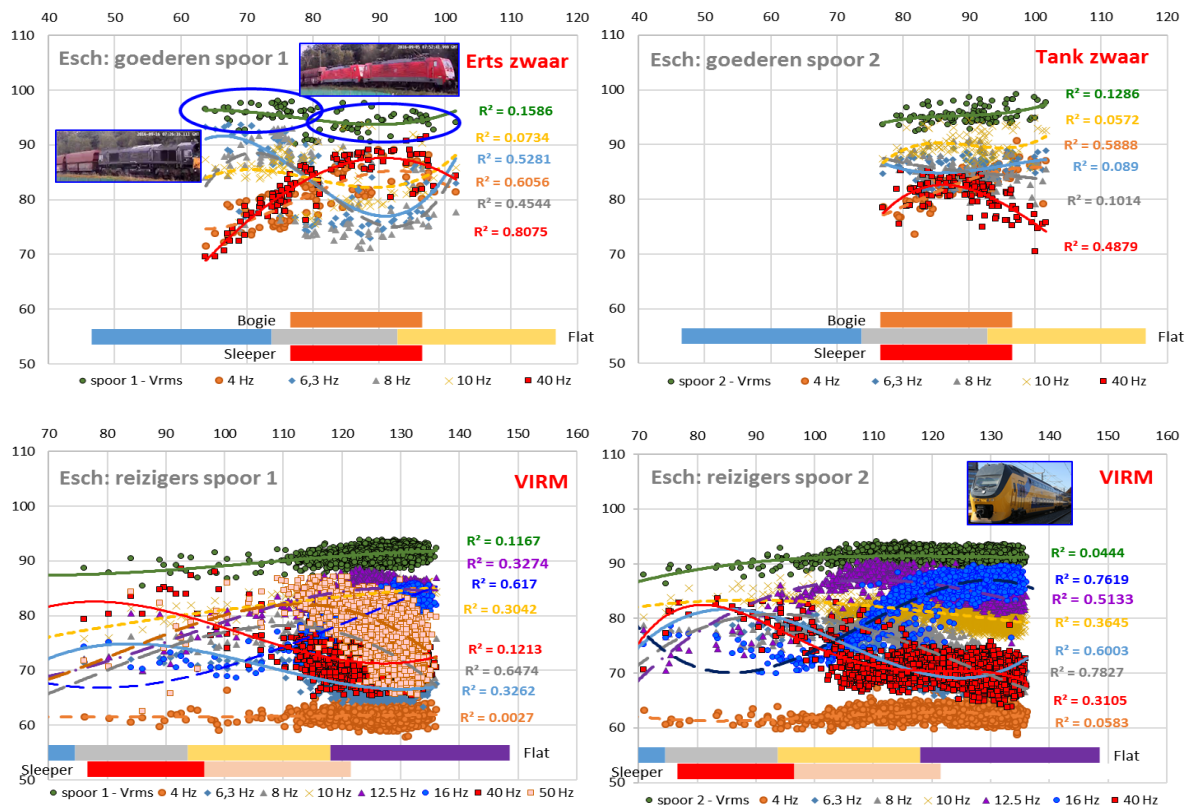


Esch - subgroep 1

Materieel	Spoor 1	Spoor 2	Totaal
Goederen: zwaar (erts + tank)	105	105	210
Reizigers: VIRM (dubbeldekker)	2644	2850	5494

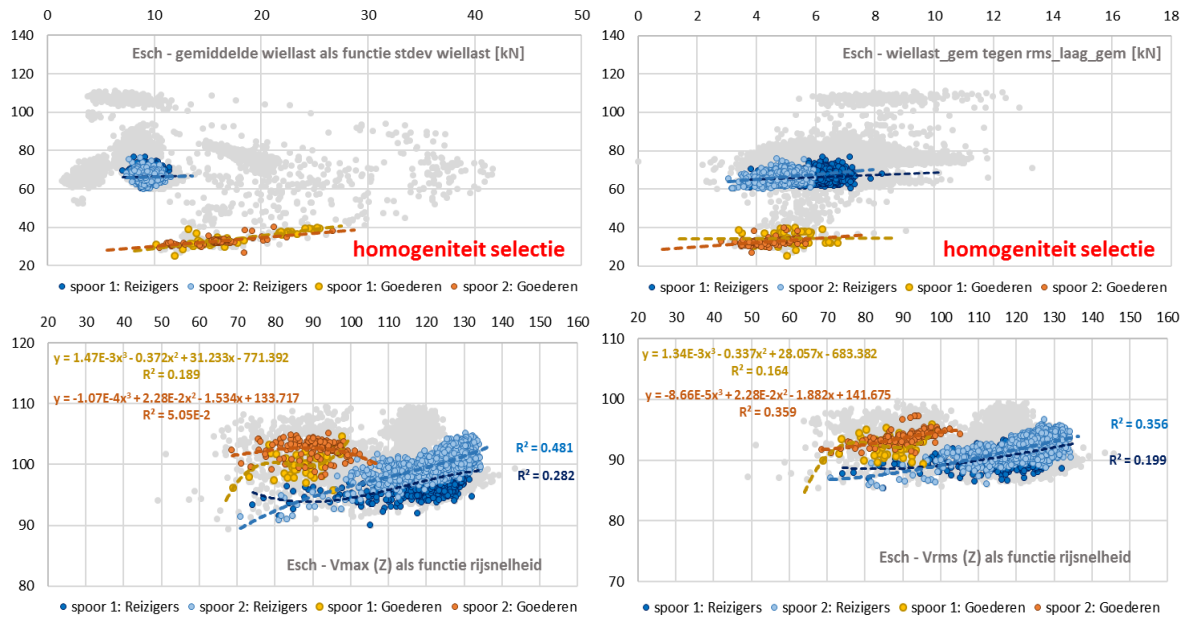


Frequentieanalyse (Vrms per tertsband als functie rijsnelheid en verantwoordelijke opwekkingsmechanismen)

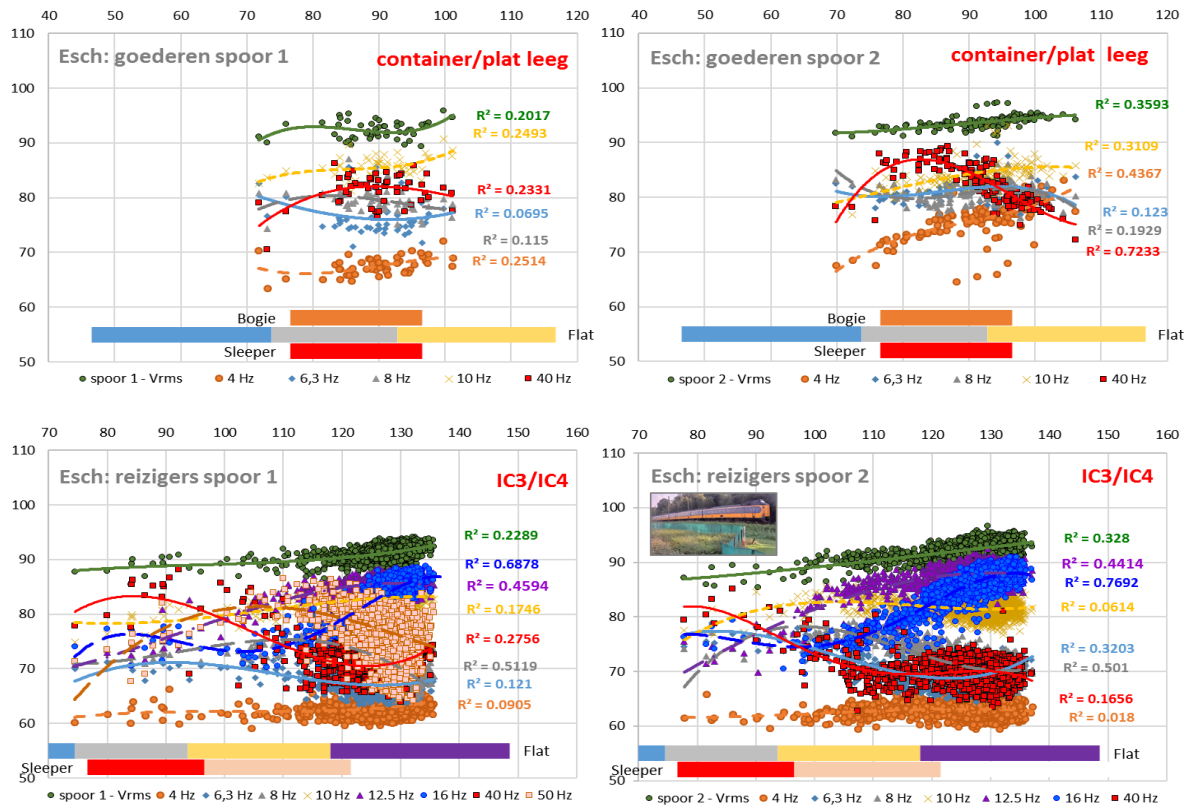


Esch - subgroep 2

Materieel	Spoor 1	Spoor 2	Totaal
Goederen: leeg/licht	53	128	181
Reizigers: IC3/IC4 (koploper)	2032	2060	4092

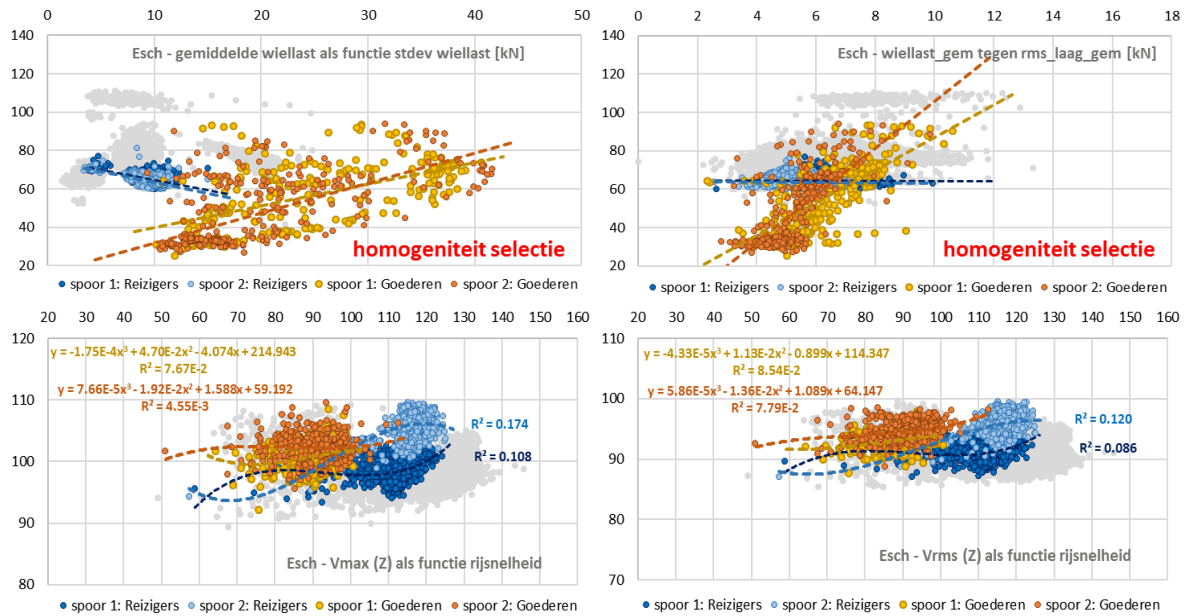


Frequentieanalyse (Vrms per tertsuband als functie rijnsnelheid en verantwoordelijke opwekkingsmechanismen)

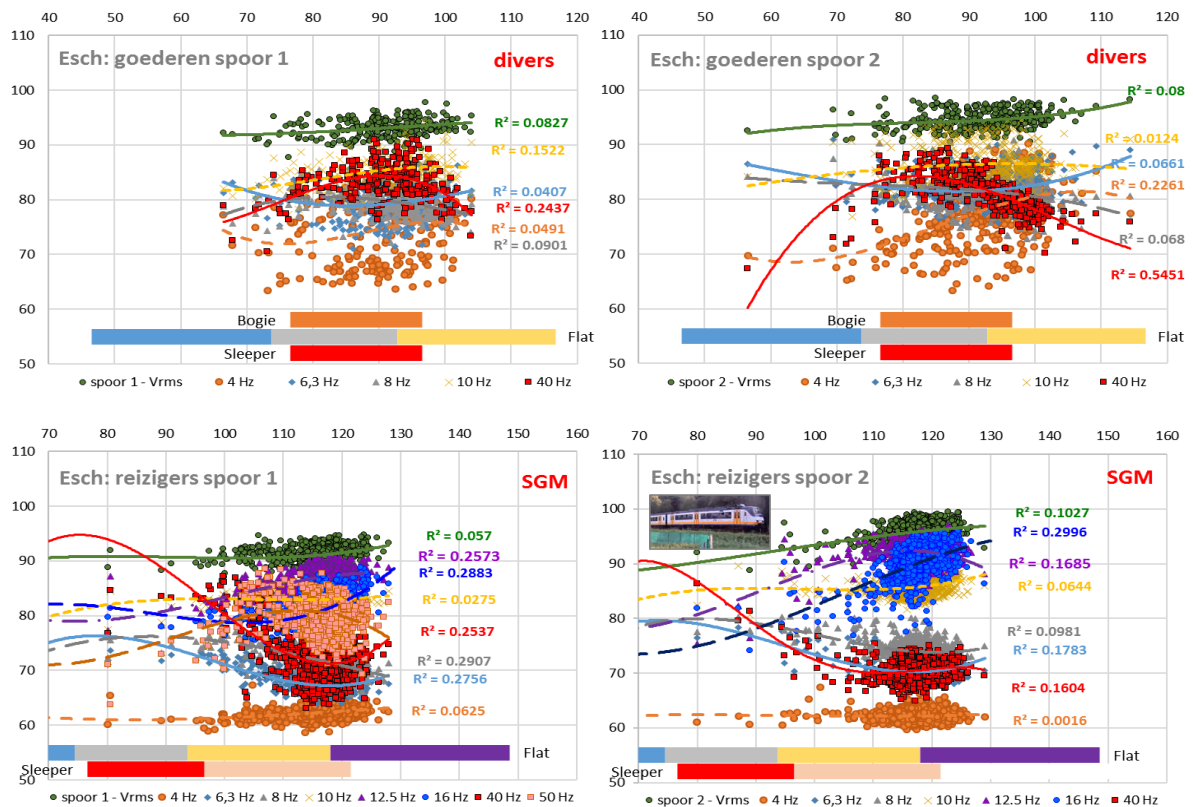


Esch - subgroep 3

Materieel	Spoor 1	Spoor 2	Totaal
Goederen: overig/divers	261	374	635
Reizigers: SGM (sprinter oud)	1368	1358	2726

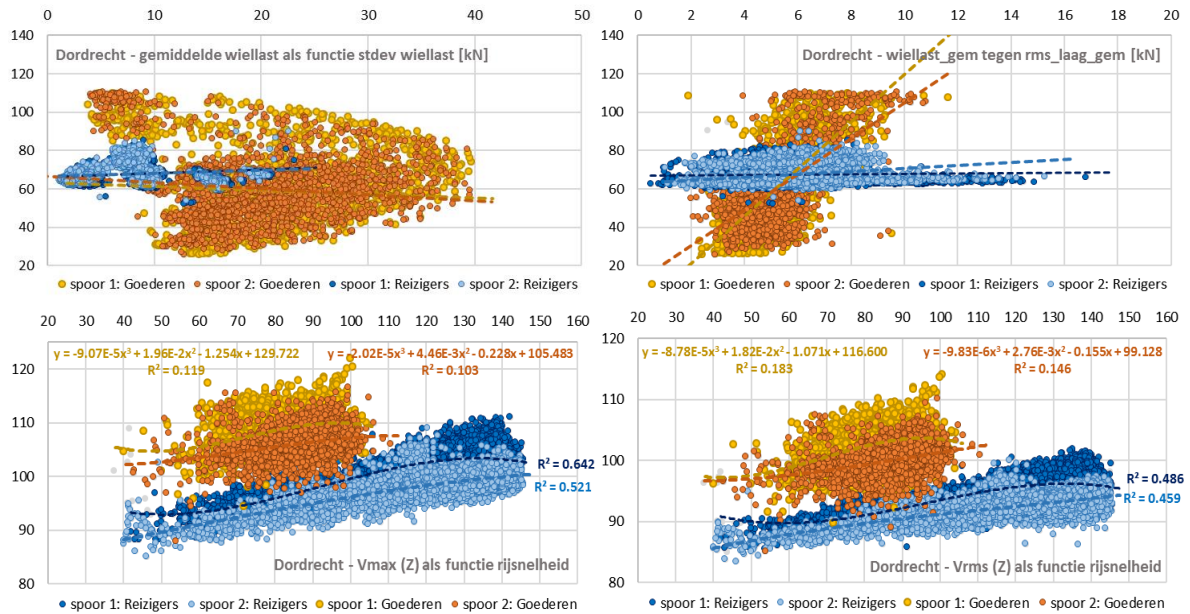


Frequentieanalyse (Vrms per tertsband als functie rijsnelheid en verantwoordelijke opwekkingsmechanismen)

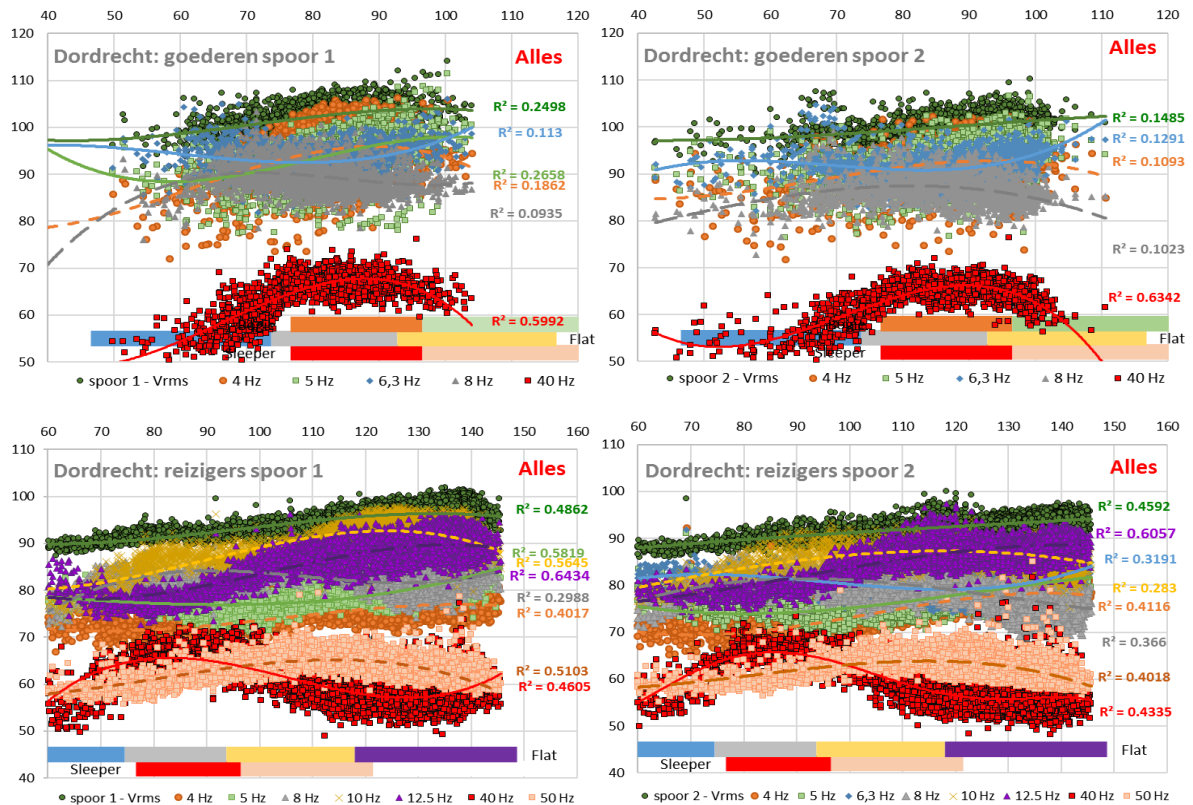


Dordrecht - totaal

Materieel	Spoor 1	Spoor 2	Totaal
Goederen: totaal	2257	1884	4141
Reizigers: totaal	12921	12914	25835

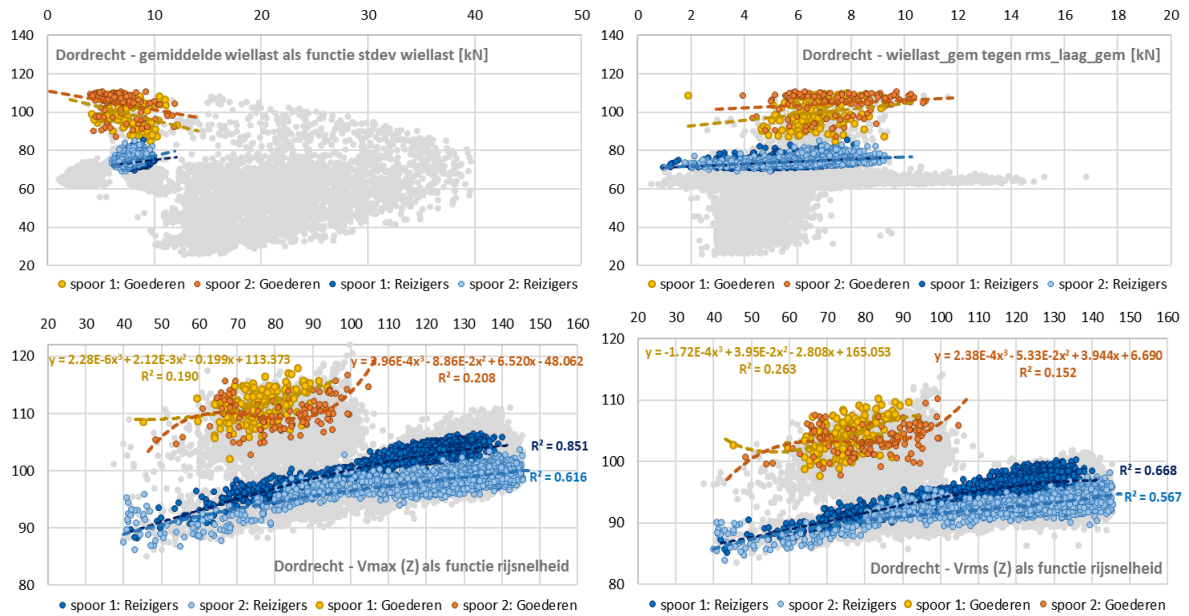


Frequentieanalyse (V_{rms} per tertsband als functie rijsnelheid en verantwoordelijke opwekkingsmechanismen)

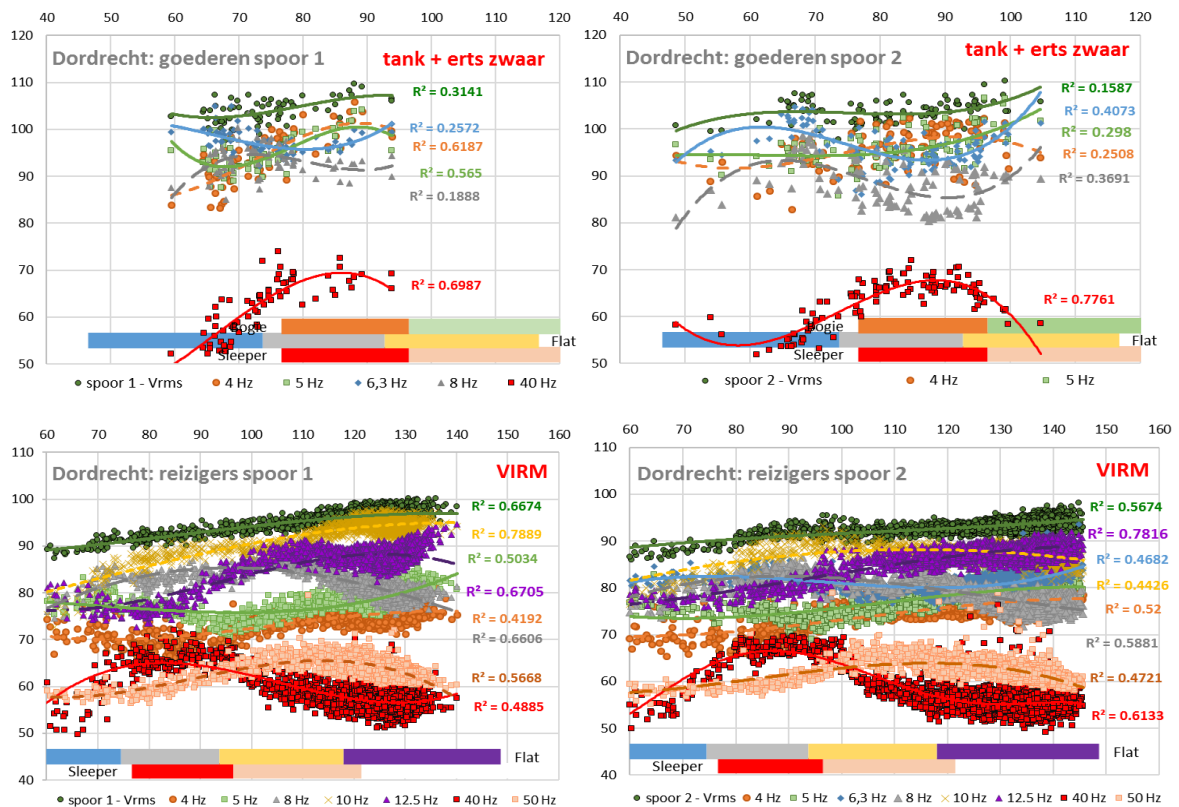


Dordrecht - subgroep 1

Materieel	Spoor 1	Spoor 2	Totaal
Goederen: zwaar (erts+tank)	195	131	326
Reizigers: VIRM (dubbeldekker)	3623	3661	7284

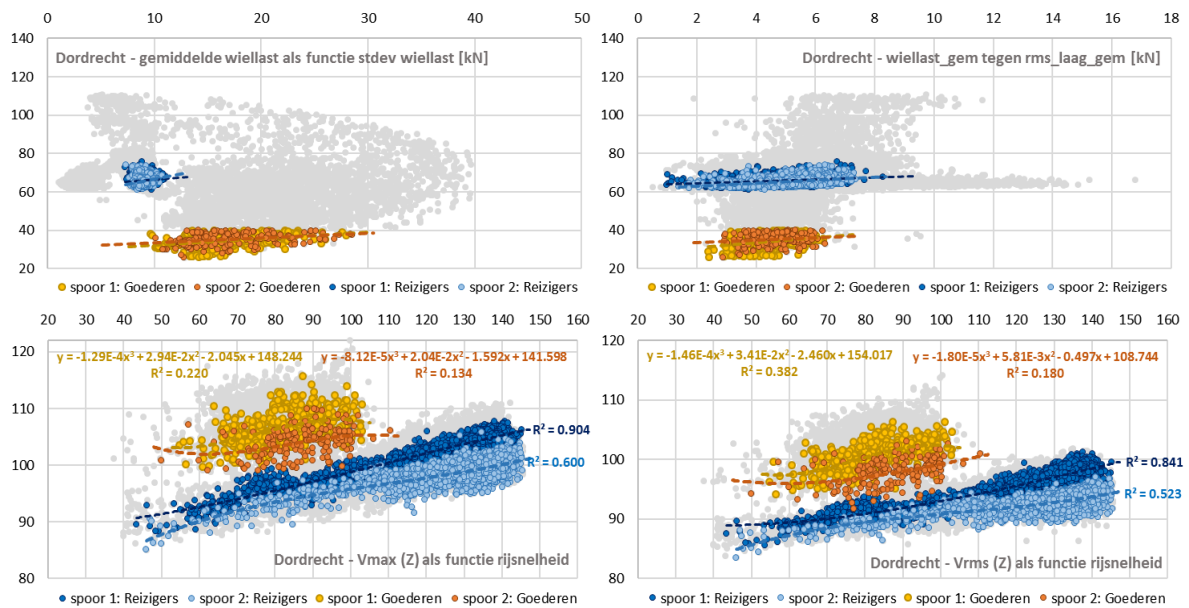


Frequentieanalyse (Vrms per tertsubband als functie rijsnelheid en verantwoordelijke opwekkingsmechanismen)

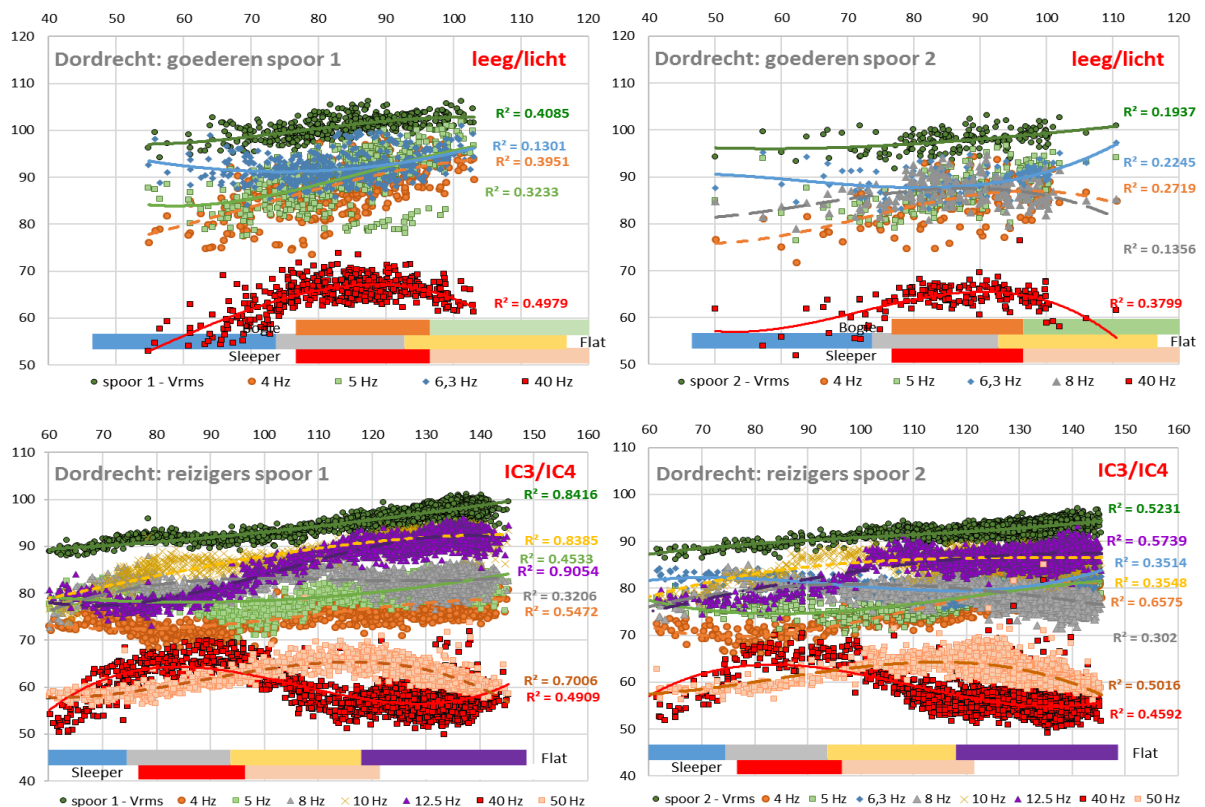


Dordrecht - subgroep 2

Materieel	Spoor 1	Spoor 2	Totaal
Goederen: leeg/licht	535	183	718
Reizigers: IC3/IC4 (koploper)	3023	2979	6002

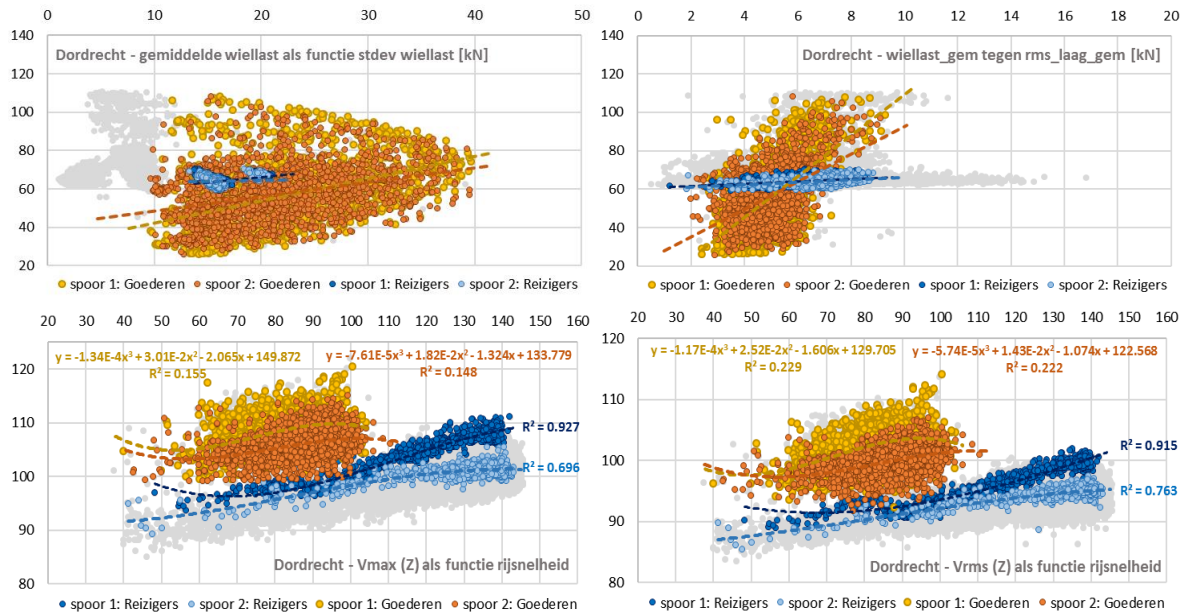


Frequentieanalyse (V_{rms} per tertsuband als functie rijsnelheid en verantwoordelijke opwekkingsmechanismen)

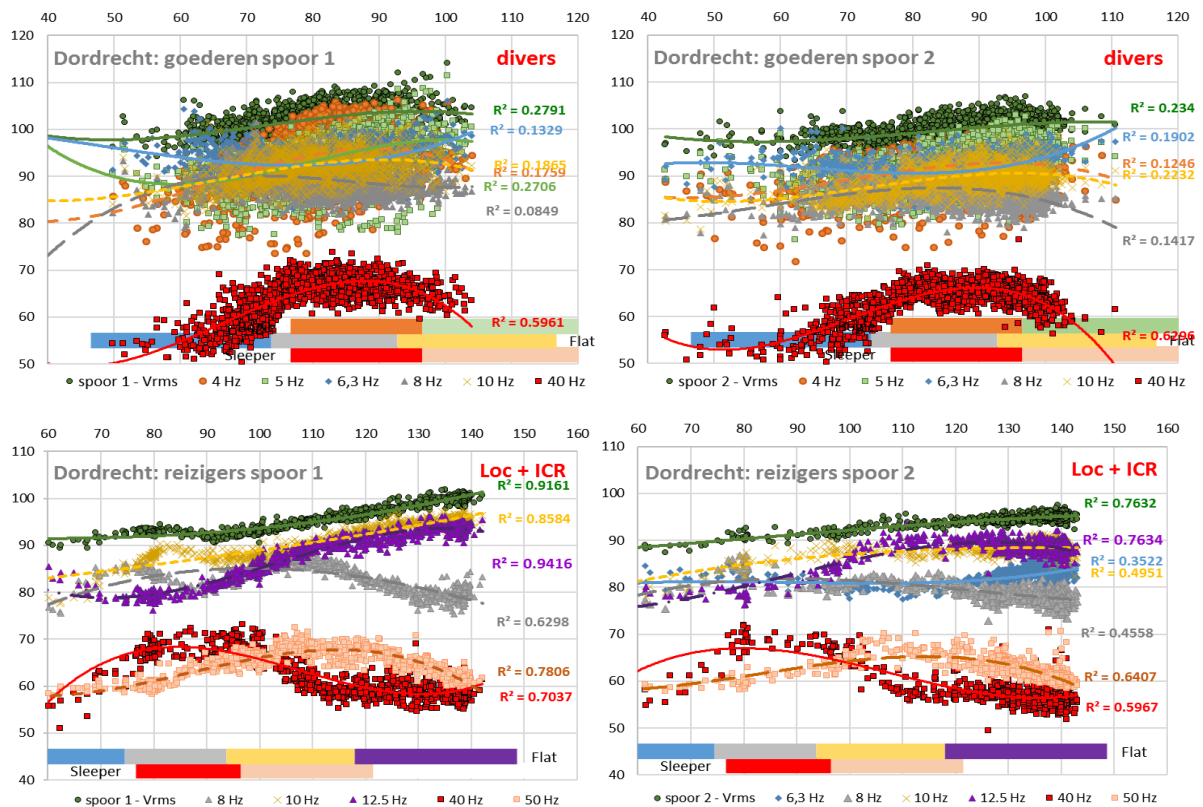


Dordrecht - subgroep 3

Materieel	Spoor 1	Spoor 2	Totaal
Goederen: overig/divers	1995	1673	3668
Reizigers: Loc + ICR	1186	1142	2328

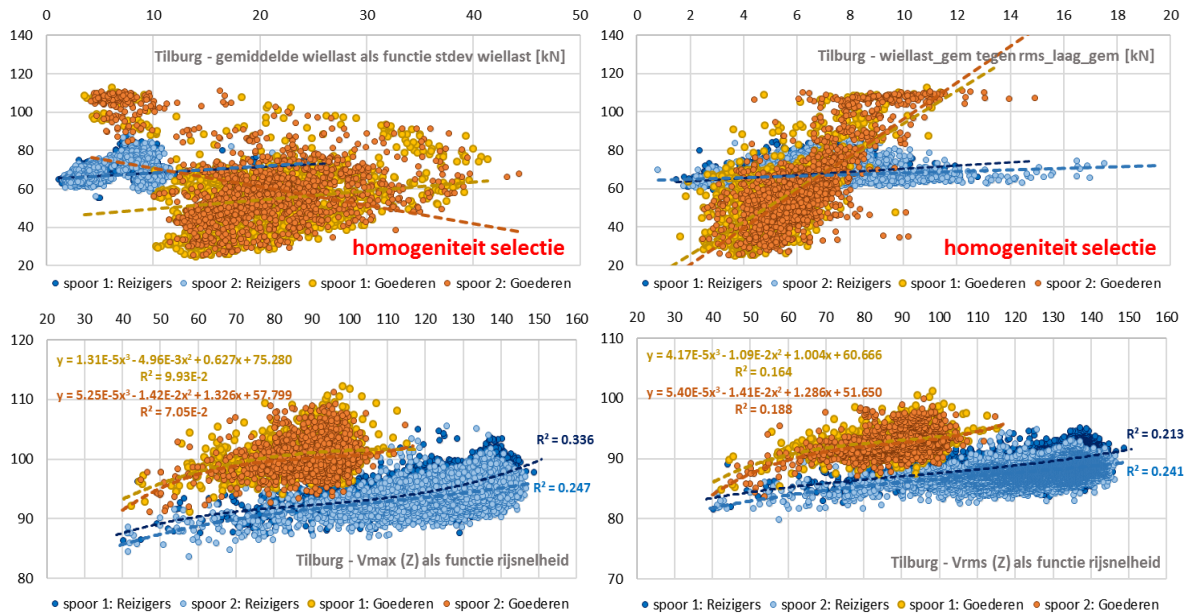


Frequentieanalyse (V_{rms} per tertsuband als functie rijsnelheid en verantwoordelijke opwekkingsmechanismen)

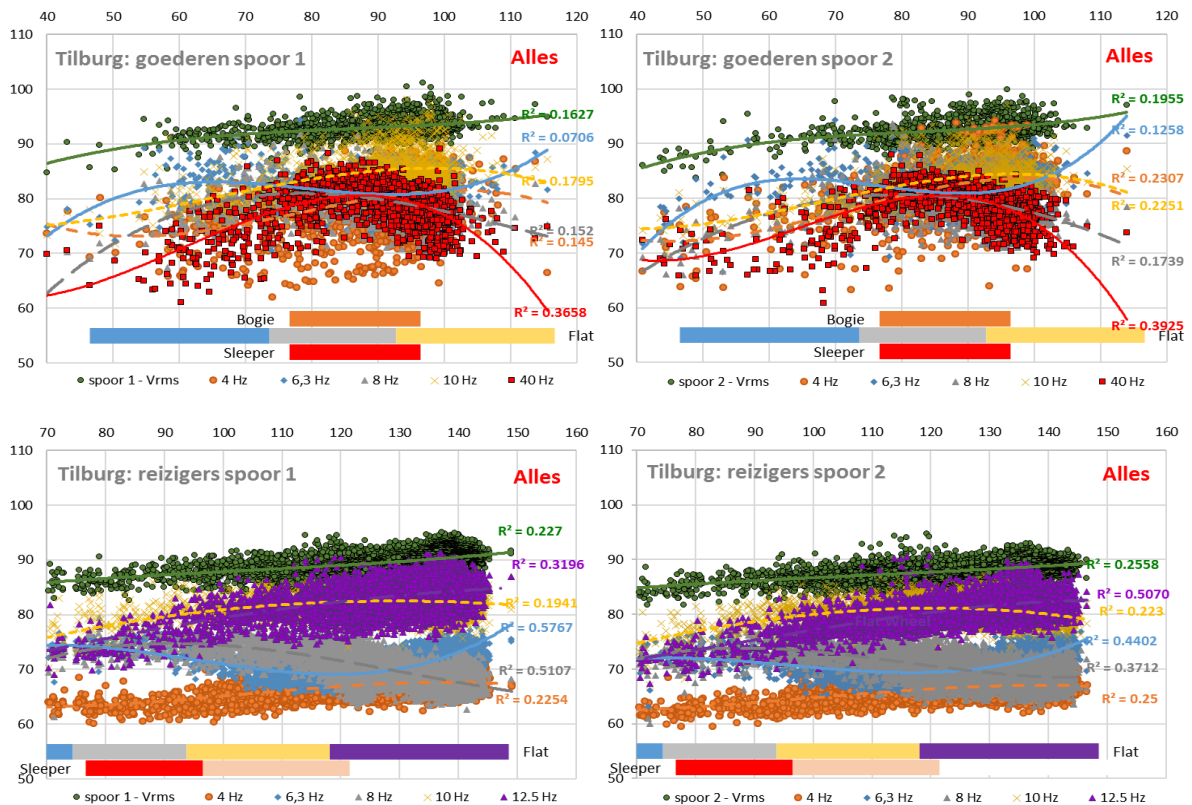


Tilburg - totaal

Materieel	Spoor 1	Spoor 2	Totaal
Goederen: totaal	535	183	718
Reizigers: totaal	3023	2979	6002

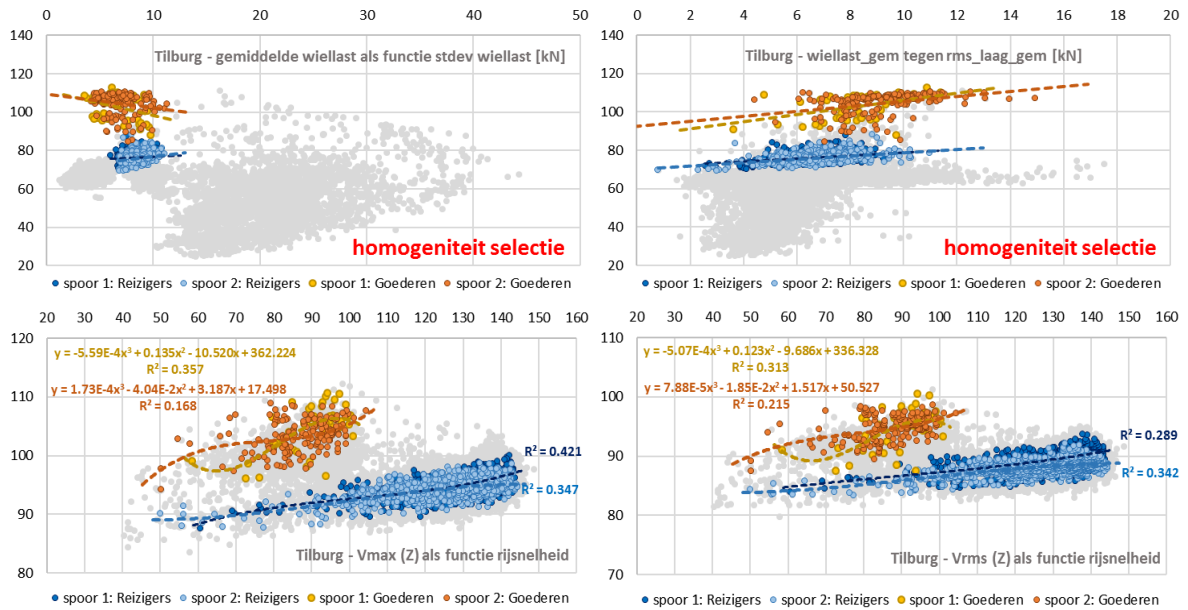


Frequentieanalyse (Vrms per tertsband als functie rijsnelheid en verantwoordelijke opwekkingsmechanismen)

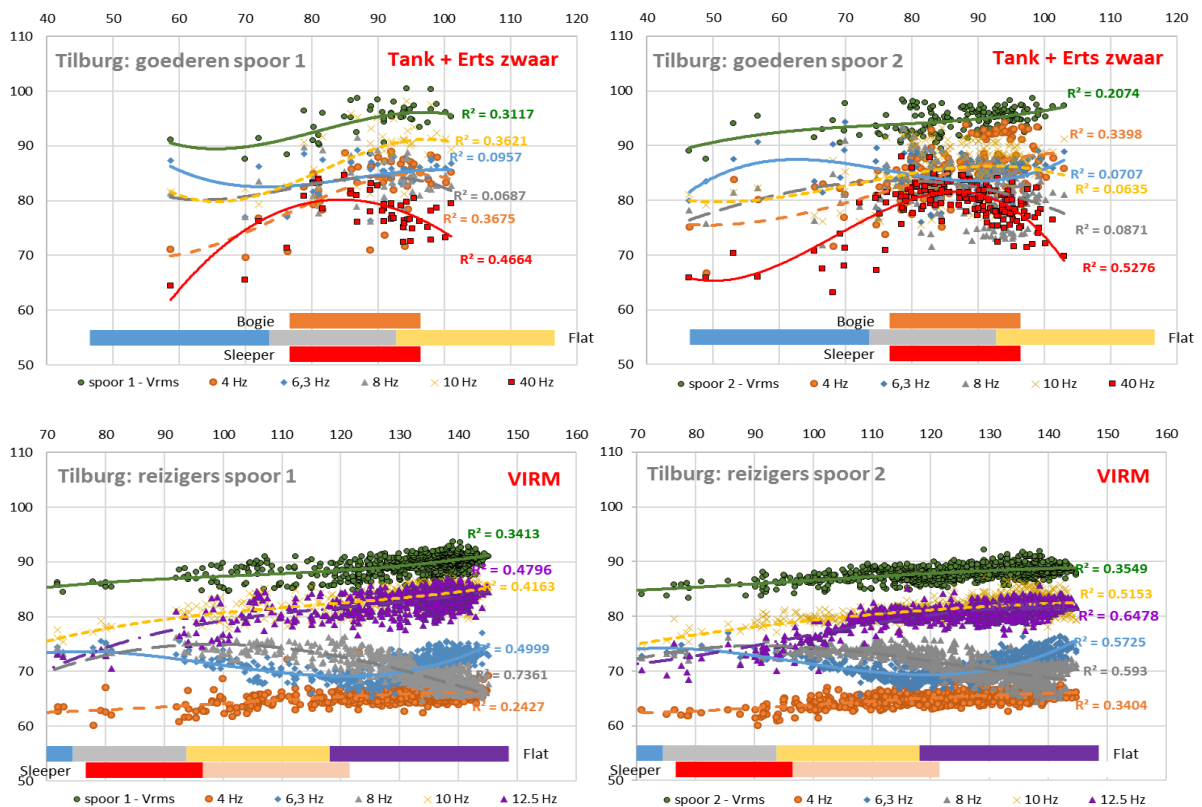


Tilburg - subgroep 1

Materieel	Spoor 1	Spoor 2	Totaal
Goederen: zwaar (erts+tank)	47	173	220
Reizigers: VIRM (dubbeldekker)	845	830	1675

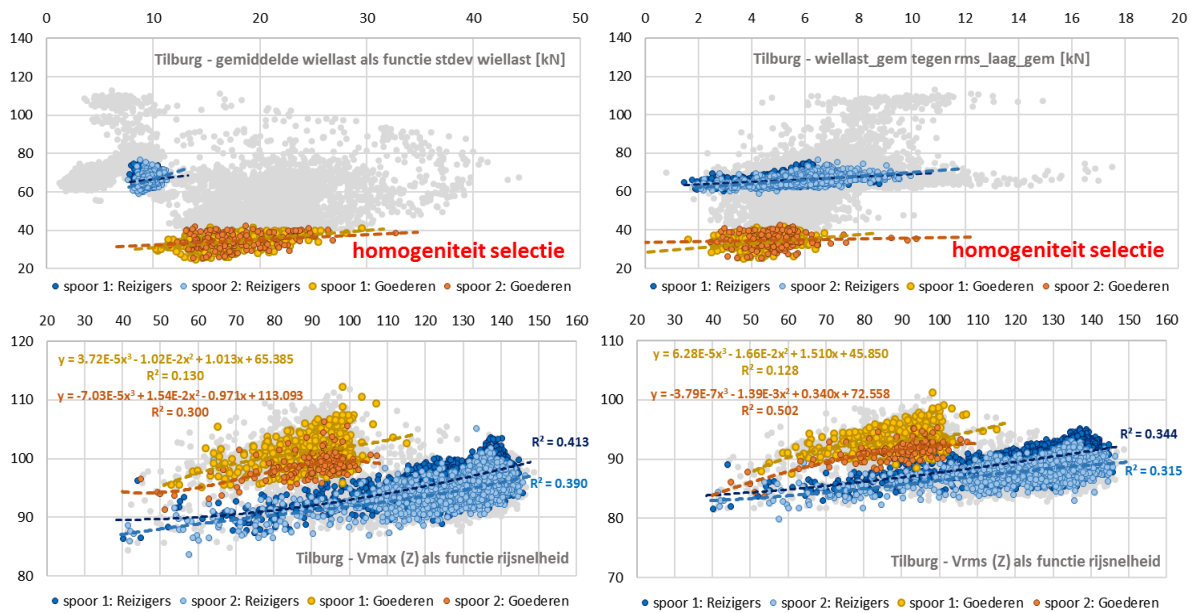


Frequentieanalyse (V_{rms} per tertsuband als functie rijsnelheid en verantwoordelijke opwekkingsmechanismen)



Tilburg - subgroep 2

Materieel	Spoor 1	Spoor 2	Totaal
Goederen: licht (leeg)	468	152	620
Reizigers: IC3/IC4 (koploper)	2634	2559	5193

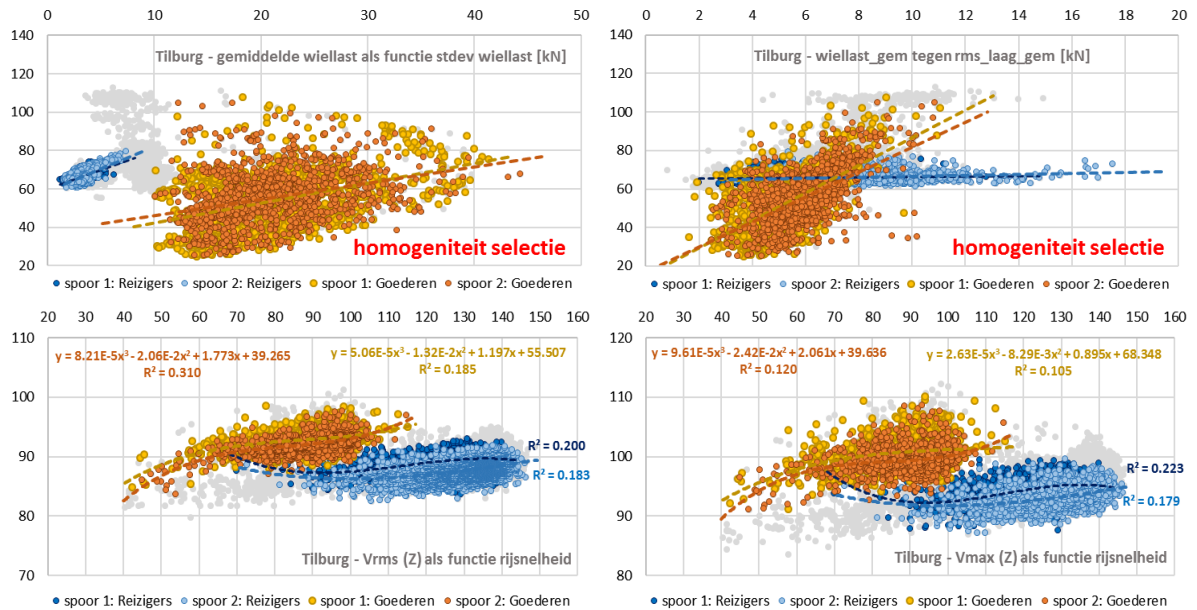


Frequentieanalyse (Vrms per tertsband als functie rijnsnelheid en verantwoordelijke opwekkingsmechanismen)

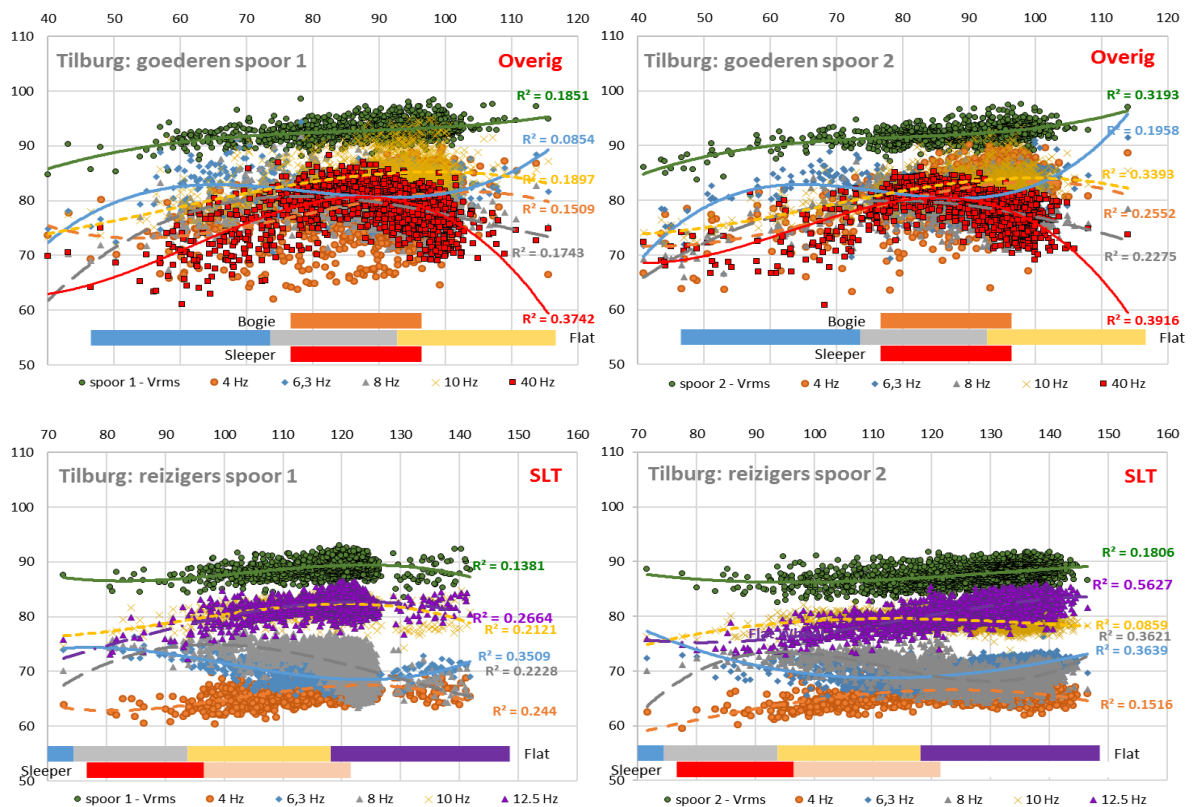


Tilburg - subgroep 3

Materieel	Spoor 1	Spoor 2	Totaal
Goederen: divers (plat/container)	1570	1201	2771
Reizigers: SLT (sprinter nieuw)	2671	2859	5530

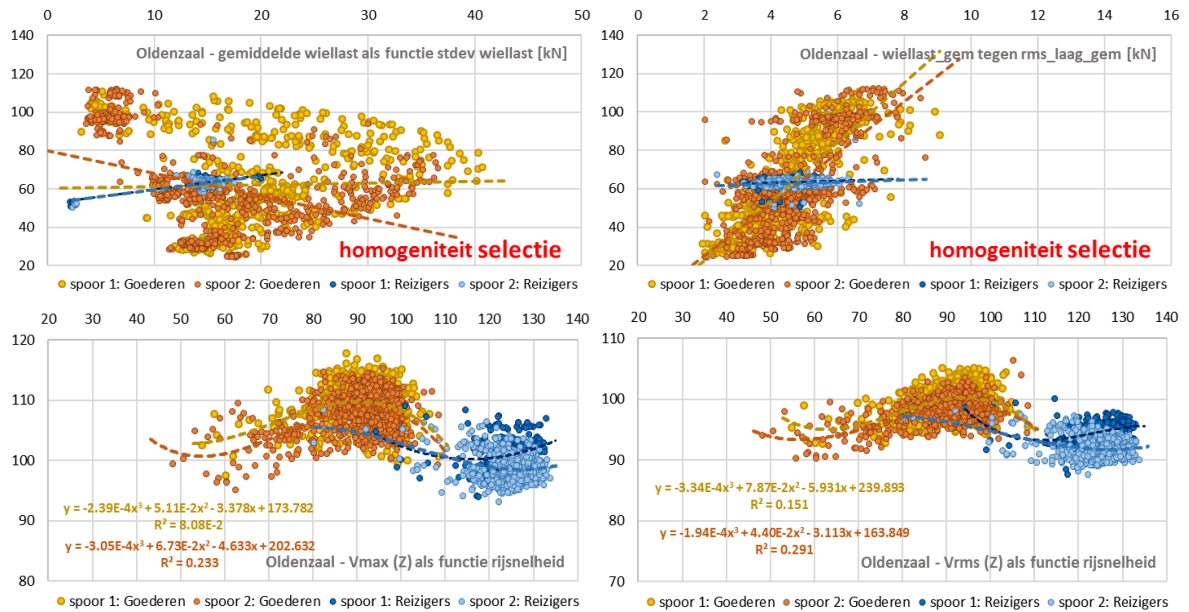


Frequentieanalyse (V_{rms} per tertsuband als functie rijsnelheid en verantwoordelijke opwekkingsmechanismen)

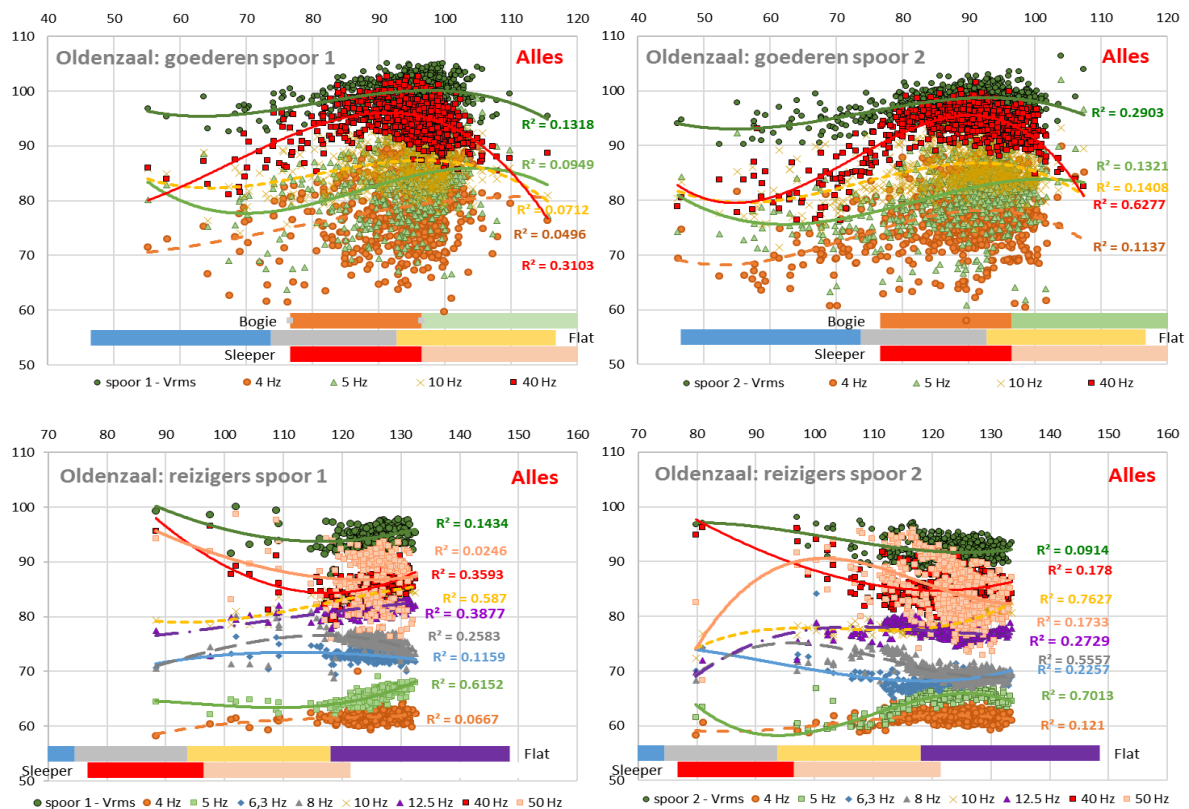


Oldenzaal - totaal

Materieel	Spoor 1	Spoor 2	Totaal
Goederen: totaal	649	770	1420
Reizigers: totaal	307	557	864

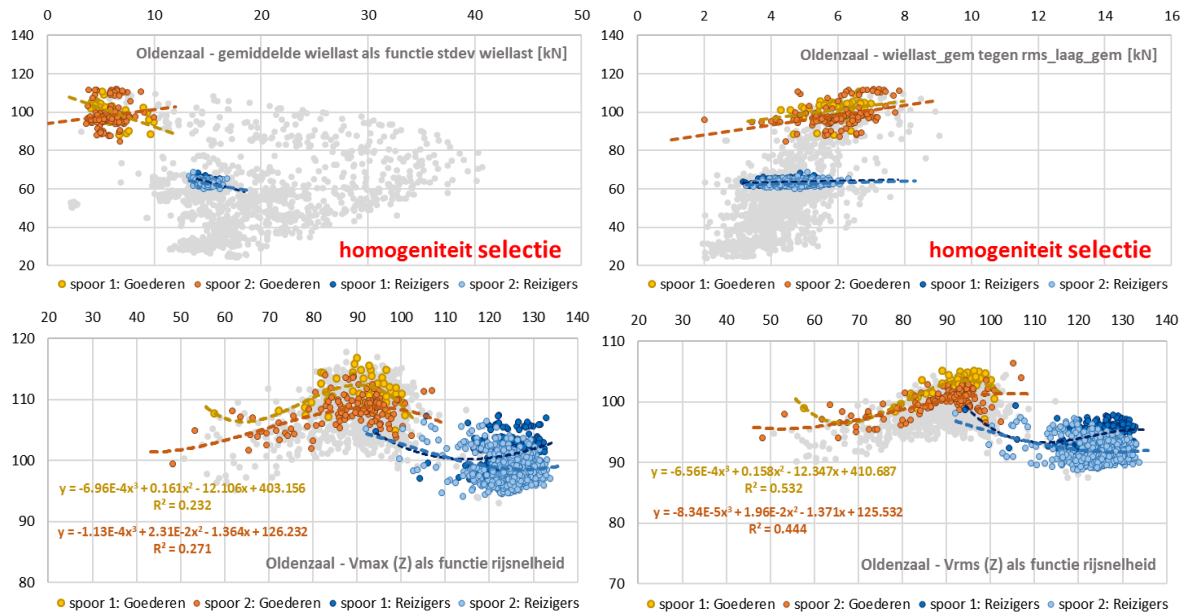


Frequentieanalyse (V_{rms} per tertsband als functie rijsnelheid en verantwoordelijke opwekkingsmechanismen)

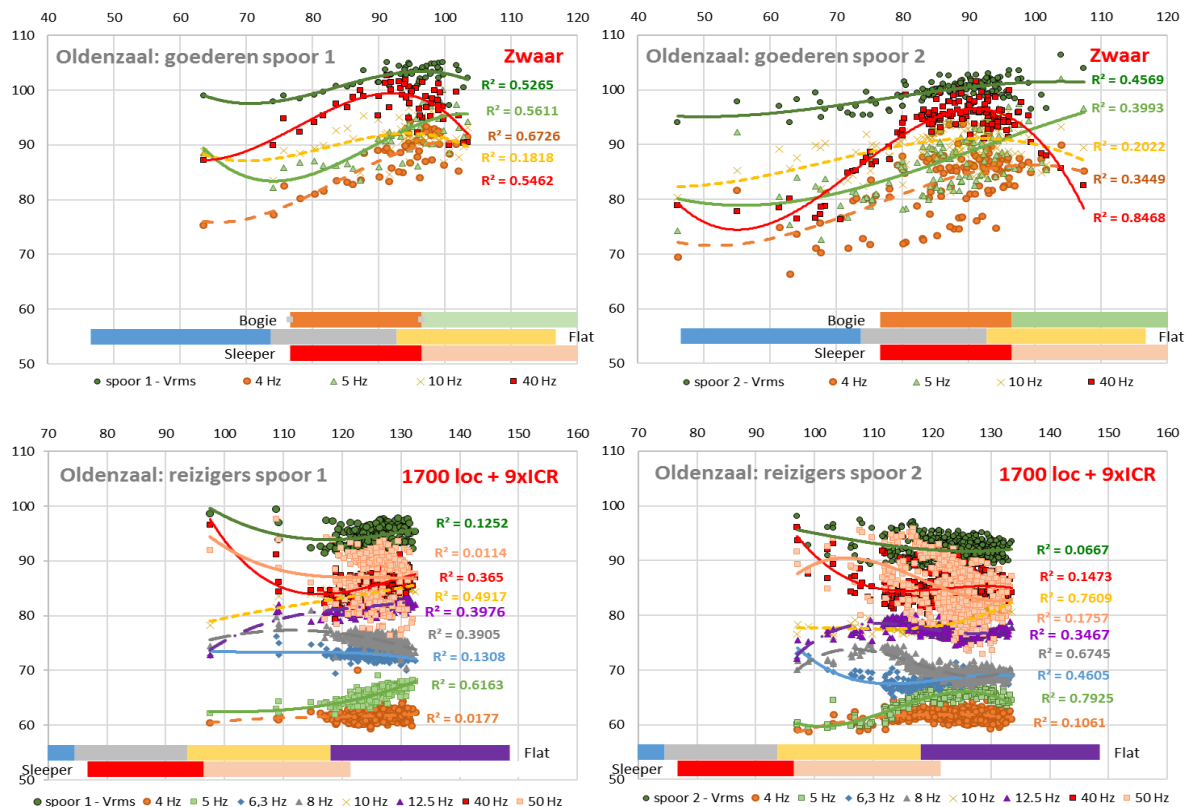


Oldenzaal - subgroep 1

Materieel	Spoor 1	Spoor 2	Totaal
Goederen: zwaar	55	132	187
Reizigers: Loc + ICR	295	545	840

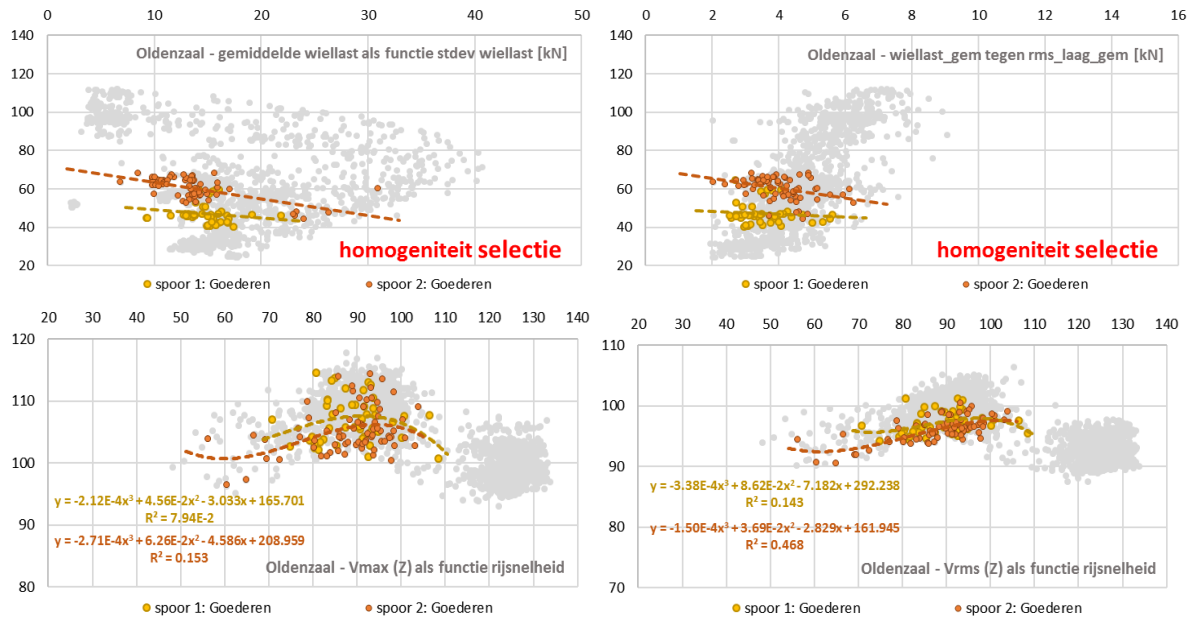


Frequentieanalyse (Vrms per tertsband als functie rijsnelheid en verantwoordelijke opwekkingsmechanismen)

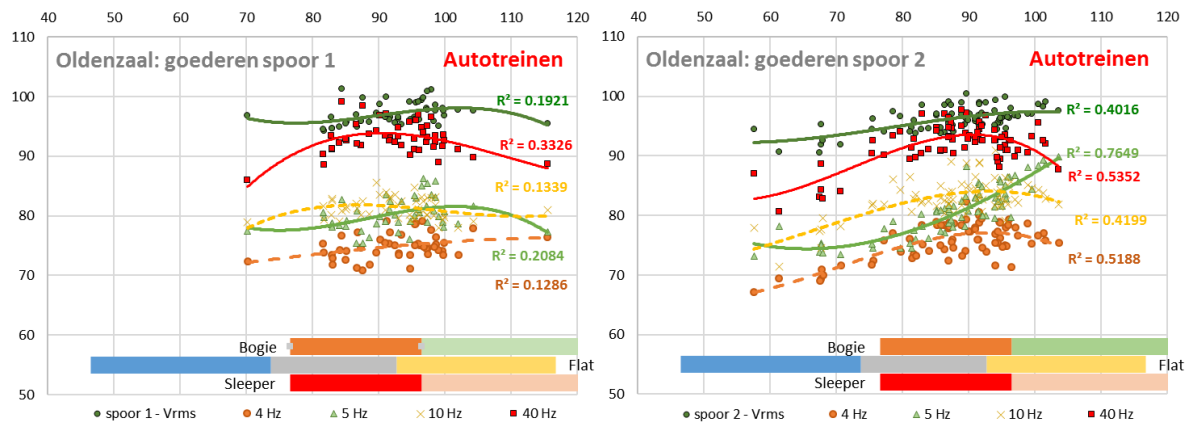


Oldenzaal - subgroep 2

Materieel	Spoor 1	Spoor 2	Totaal
Goederen: autotreinen	48	73	121

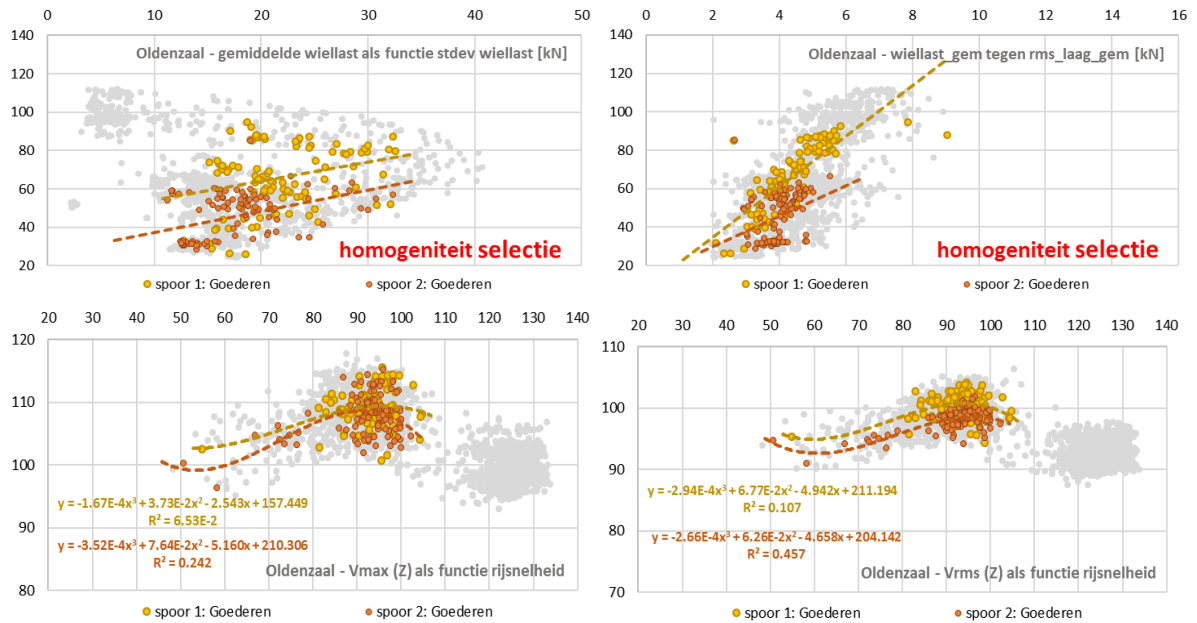


Frequentieanalyse (V_{rms} per tertsband als functie rijsnelheid en verantwoordelijke opwekkingsmechanismen)

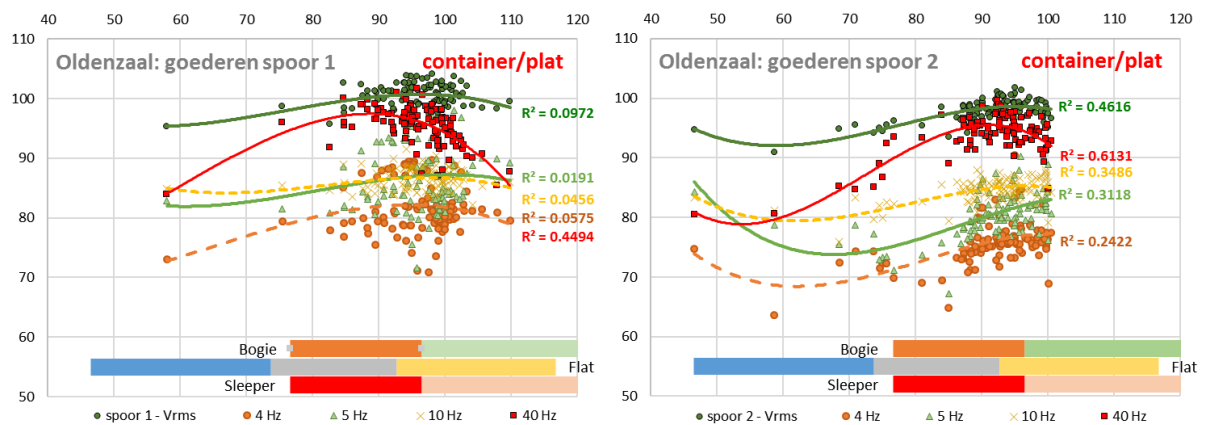


Oldenzaal - subgroep 3

Materieel	Spoor 1	Spoor 2	Totaal
Goederen: container	100	105	205



Frequentieanalyse (V_{rms} per tertsbands als functie rijsnelheid en verantwoordelijke opwekkingsmechanismen)



Bijlage 3

Titel	Tabellen trendanalyse
Omvang	2
Toelichting	Analyse totale populatie onderverdeeld naar wiellast, pieklast en rms_laag (boven) en snelheidseffect geselecteerde subgroepen (onder)

Landelijk onderzoek gedifferentieerd rijden (TN 105394)

Vmax

locatie	spoor	analyse	a0	a1	a2	a3	b0	R ²	F	DOF	p	sign	Qsterkte	dV
Esch	1	Vmax	122	1.05E-2	-8.58E-3	6.53E-5	--	0.065	26	373	15.6%	nee		5
		Vmax - Lmax	101	-6.10E-3	-6.35E-3	4.95E-5	0.134	0.327	181	373	5.9%	ja	++	3
		Vmax - Rmax	123	2.04E-2	-9.70E-3	7.31E-5	0.067	0.111	46	373	11.7%	nee	0	6
		Vmax - Lpiek	108	1.72E-2	-7.87E-3	5.89E-5	0.093	0.291	153	373	6.4%	ja	+	5
	2	Vmax	69	1.05E+0	-1.03E-2	3.24E-5	--	0.007	4	496	39.6%	nee		-2
		Vmax - Lmax	22	2.18E+0	-2.46E-2	9.12E-5	0.153	0.217	137	496	6.8%	ja	++	-2
		Vmax - Rmax	97	1.15E-2	2.00E-3	-1.61E-5	0.018	0.011	5	496	33.0%	nee	0	-1
		Vmax - Lpiek	25	2.28E+0	-2.61E-2	9.69E-5	0.110	0.173	104	496	7.8%	ja	+	-1
Dordrecht	1	Vmax	103	4.05E-3	1.11E-3	-3.95E-6	--	0.088	218	2256	5.4%	ja		-3
		Vmax - Lmax	80	-8.75E-3	1.56E-3	-7.21E-6	0.198	0.212	607	2256	3.2%	ja	++	-3
		Vmax - Rmax	104	-1.64E-2	1.32E-3	-4.50E-6	-0.016	0.090	223	2256	5.3%	ja	0	-3
		Vmax - Lpiek	85	-8.84E-3	1.72E-3	-9.89E-6	0.144	0.197	552	2256	3.4%	ja	++	-2
	2	Vmax	111	-4.61E-1	7.63E-3	-3.42E-5	--	0.095	197	1883	5.7%	ja	0	-3
		Vmax - Lmax	79	3.47E-2	-1.76E-4	4.63E-6	0.205	0.308	837	1883	2.8%	ja	++	-3
		Vmax - Rmax	112	-5.12E-1	8.29E-3	-3.72E-5	0.020	0.098	205	1883	5.6%	ja	0	-3
		Vmax - Lpiek	84	-6.26E-3	6.51E-4	-1.52E-6	0.155	0.286	754	1883	2.9%	ja	++	-2
Tilburg	1	Vmax	75	6.27E-1	-4.96E-3	1.31E-5	--	0.099	184	1669	5.9%	ja		-3
		Vmax - Lmax	55	9.41E-1	-8.97E-3	2.96E-5	0.109	0.165	329	1669	4.4%	ja	+	-3
		Vmax - Rmax	76	5.79E-1	-4.50E-3	1.15E-5	0.032	0.118	223	1669	5.3%	ja	0	-3
		Vmax - Lpiek	56	1.03E+0	-1.02E-2	3.43E-5	0.084	0.179	365	1669	4.2%	ja	+	-3
	2	Vmax	58	1.33E+0	-1.42E-2	5.25E-5	--	0.071	109	1444	7.6%	ja		-3
		Vmax - Lmax	29	1.82E+0	-2.09E-2	8.13E-5	0.156	0.248	475	1444	3.7%	ja	++	-2
		Vmax - Rmax	60	1.25E+0	-1.34E-2	4.93E-5	0.019	0.077	120	1444	7.3%	ja	0	-3
		Vmax - Lpiek	35	1.74E+0	-2.01E-2	7.78E-5	0.117	0.240	455	1444	3.7%	ja	++	-2
Oldenzaal	1	Vmax	174	-3.39E+0	5.12E-2	-2.39E-4	--	0.081	57	649	10.6%	nee		-6
		Vmax - Lmax	66	1.88E-3	1.08E-2	-8.10E-5	0.134	0.185	147	649	6.6%	ja	++	-7
		Vmax - Rmax	82	-2.29E-2	1.06E-2	-7.79E-5	0.055	0.106	77	649	9.1%	ja	0	-7
		Vmax - Lpiek	114	-1.78E+0	3.24E-2	-1.67E-4	0.121	0.212	174	649	6.0%	ja	++	-7
	2	Vmax	203	-4.63E+0	6.73E-2	-3.05E-4	--	0.233	233	769	5.2%	ja		-7
		Vmax - Lmax	178	-4.13E+0	6.02E-2	-2.73E-4	0.121	0.304	335	769	4.4%	ja	+	-7
		Vmax - Rmax	202	-4.62E+0	6.71E-2	-3.04E-4	0.030	0.242	246	769	5.1%	ja	0	-7
		Vmax - Lpiek	71	-6.12E-3	8.76E-3	-6.34E-5	0.112	0.311	346	769	4.3%	ja	++	-7

Vmax subgroepen

locatie	spoor	sneldheid	aantal	groep	a0	a1	a2	a3	R ²
Esch	1	65-100	374	totaal	122	1.05E-2	-8.58E-3	6.53E-5	0.065
		65-100	105	sub1 (zwaar)	-182	1.14E+1	-1.49E-1	6.39E-4	0.010
		70-95	53	sub2 (licht)	-771	3.12E+1	-3.70E-1	1.47E-3	0.189
		70-105	261	sub3 (divers)	215	-4.07E+0	4.70E-2	-1.75E-4	0.077
		70-105	497	totaal	69	1.05E+0	-1.03E-2	3.24E-5	0.007
		75-100	105	sub1 (zwaar)	-315	1.49E+1	-1.75E-1	6.84E-4	0.006
	2	70-100	128	sub2 (licht)	134	-1.53E+0	2.28E-2	-1.07E-4	0.005
		70-105	374	sub3	59	1.59E+0	-1.92E-2	7.66E-5	0.005
		45-105	2257	totaal	103	4.05E-3	1.11E-3	-3.95E-6	0.088
		60-95	195	sub1 (zwaar)	113	-1.99E-1	2.12E-3	2.28E-6	0.190
		60-105	535	sub2 (licht)	148	-2.05E+0	2.94E-2	-1.29E-4	0.220
		50-105	1995	sub3	150	-2.07E+0	3.01E-2	-1.34E-4	0.155
Dordrecht	1	45-105	1884	totaal	111	-4.61E-1	7.63E-3	-3.42E-5	0.095
		60-100	131	sub1 (zwaar)	-48	6.52E+0	-8.86E-2	3.96E-4	0.208
		70-100	183	sub2 (licht)	142	-1.59E+0	2.04E-2	-8.12E-5	0.134
		45-105	1673	sub3	134	-1.32E+0	1.82E-2	-7.61E-5	0.148
		45-105	1670	totaal	75	6.27E-1	-4.96E-3	1.31E-5	0.099
		75-100	47	sub1 (zwaar)	362	-1.05E+1	1.35E-1	-5.59E-4	0.357
Tilburg	1	50-100	468	sub2 (licht)	65	1.01E+0	-1.02E-2	3.72E-5	0.130
		45-105	1570	sub3 (divers)	68	8.95E-1	-8.29E-3	2.63E-5	0.105
		45-105	1445	totaal	58	1.33E+0	-1.42E-2	5.25E-5	0.071
		65-100	173	sub1 (zwaar)	17	3.19E+0	-4.04E-2	1.73E-4	0.168
		50-100	152	sub2 (licht)	113	-9.71E-1	1.54E-2	-7.03E-5	0.300
		45-105	1201	sub3 (divers)	40	2.06E+0	-2.42E-2	9.61E-5	0.120
Oldenzaal	1	55-105	649	totaal	137	-1.93E+0	3.25E-2	-1.61E-4	0.024
		70-100	55	sub1 (zwaar)	403	-1.21E+1	1.61E-1	-6.96E-4	0.232
		75-105	48	sub2 (auto)	166	-3.03E+0	4.56E-2	-2.12E-4	0.008
		80-100	100	sub3 (container)	157	-2.54E+0	3.73E-2	-1.67E-4	0.007
		55-105	770	totaal	203	-4.63E+0	6.73E-2	-3.05E-4	0.233
		65-100	132	sub1 (zwaar)	126	-1.36E+0	2.31E-2	-1.13E-4	0.271
	2	65-105	73	sub2 (auto)	209	-4.59E+0	6.26E-2	-2.71E-4	0.153
		70-100	105	sub3 (container)	210	-5.16E+0	7.64E-2	-3.52E-4	0.242

Snelheidseffect

40	50	60	70	80	90	100	110	dV
113	109	106	103	101	101	103	106	5
		104	103	104	103	107	107	1
		87	104	110	112	119		
		102	100	100	101	103	103	0
	100	102	103	104	104	103	103	-2
		97	105	107	107	109		
		101	102	103	103	102	102	-2
		102	103	103	102	103		
105	105	106	107	108	109	111	112	-3
		109	110	111	112	114	117	-5
	103	103	104	106	108	108	107	-5
		105	105	107	109	110	110	-5
	103	103	104	105	106	107	107	-3
		106	110	110	109	110	114	0
		103	103	104	105	106	106	-2
		104	103	104	105	107	107	-3
93	96	98	99	100	101	101	101	-3
		98	98	101	105	106		
		95	97	98	100	101		
		95	98	99	100	101	101	-3
		96	98	100	100	101	102	-3
		97	100	102	102	103	105	109
		94	95	96	98	99	100	99
		95	97	99	99	100	100	102
	102	103	106	108	109	108	104	-6
		106	106	109	111	107	94	-4
		103	105	107	108	107	102	
		103	104	107	109	109	106	
		102	104	107	109	108	102	-7
		103	105	107	108	108	106	-5
		100	101	104	105	105	101	-5
		99	102	106	108	106	98	-8

Landelijk onderzoek gedifferentieerd rijden (TN 105394)

Vrms

locatie	spoor	analyse	a0	a1	a2	a3	b0	R ²	F	DOF	p	sign	Qsterkte	dV
Esch	1	Vrms	109	-5.98E-3	-6.26E-3	4.81E-5	--	0.067	27	373	15.3%	nee		4
		Vrms - Lgem	146	-1.65E+0	1.58E-2	-4.63E-5	0.035	0.257	128	373	7.0%	ja	0	2
		Vrms - Rgem	106	-1.01E-2	-5.99E-3	4.48E-5	0.498	0.254	126	373	7.1%	ja	0/+	4
	2	Vrms	71	7.66E-1	-8.64E-3	3.46E-5	--	0.053	27	496	15.1%	nee		-2
		Vrms - Lgem	91	3.24E-4	-1.04E-4	3.55E-6	0.025	0.225	144	496	6.6%	ja	0	-1
		Vrms - Rgem	61	1.15E+0	-1.44E-2	6.03E-5	0.446	0.210	131	496	6.9%	ja	0/+	-1
Dordrecht	1	Vrms	105	-4.35E-1	7.81E-3	-3.54E-5	--	0.167	453	2256	3.7%	ja		-4
		Vrms - Lgem	87	6.49E-3	2.29E-3	-1.00E-5	0.077	0.456	1890	2256	1.8%	ja	0/+	-5
		Vrms - Rgem	89	7.60E-2	3.88E-4	-2.89E-6	1.244	0.387	1420	2256	2.1%	ja	++	-3
	2	Vrms	96	-5.51E-3	7.61E-4	-9.72E-7	--	0.133	289	1883	4.7%	ja		-3
		Vrms - Lgem	96	-1.94E-1	2.91E-3	-8.14E-6	0.075	0.399	1250	1883	2.3%	ja	0/+	-3
		Vrms - Rgem	99	-1.68E-1	1.55E-3	-1.94E-6	1.053	0.324	904	1883	2.7%	ja	++	-1
Tilburg	1	Vrms	61	1.00E+0	-1.09E-2	4.17E-5	--	0.164	327	1669	4.4%	ja		-2
		Vrms - Lgem	58	1.08E+0	-1.18E-2	4.56E-5	0.015	0.187	384	1669	4.1%	ja	0	-2
		Vrms - Rgem	58	1.10E+0	-1.26E-2	4.87E-5	0.435	0.231	502	1669	3.6%	ja	0/+	-1
	2	Vrms	52	1.29E+0	-1.41E-2	5.40E-5	--	0.188	334	1444	4.4%	ja		-3
		Vrms - Lgem	51	1.22E+0	-1.39E-2	5.59E-5	0.051	0.494	1410	1444	2.1%	ja	0/+	-3
		Vrms - Rgem	48	1.43E+0	-1.71E-2	6.87E-5	0.663	0.473	1294	1444	2.2%	ja	+	-1
Oldenzaal	1	Vrms	240	-5.93E+0	7.87E-2	-3.34E-4	--	0.151	114	647	7.4%	ja		-5
		Vrms - Lgem	218	-5.29E+0	7.10E-2	-3.04E-4	0.067	0.569	855	649	2.7%	ja	0/+	-5
		Vrms - Rgem	234	-5.78E+0	7.61E-2	-3.23E-4	1.230	0.506	662	649	3.1%	ja	++	-3
	2	Vrms	164	-3.11E+0	4.40E-2	-1.94E-4	--	0.291	315	769	4.5%	ja		-5
		Vrms - Lgem	160	-3.06E+0	4.33E-2	-1.90E-4	0.032	0.399	510	769	3.5%	ja	0	-5
		Vrms - Rgem	161	-3.01E+0	4.20E-2	-1.84E-4	0.612	0.386	483	769	3.6%	ja	+	-4

Vrms subgroepen

locatie	spoor	bereik	aantal	groep	a0	a1	a2	a3	R ²		
Esch	1	65-100	374	totaal	113	-1.53E-1	-4.48E-3	4.09E-5	0.067		
		65-100	105	sub1 (zwaar)	-102	7.97E+0	-1.05E-1	4.54E-4	0.137		
		70-95	53	sub2 (licht)	-683	2.81E+1	-3.37E-1	1.34E-3	0.164		
		70-105	261	sub3 (divers)	114	-8.99E-1	1.13E-2	-4.33E-5	0.085		
		70-105	497	totaal	71	7.66E-1	-8.64E-3	3.46E-5	0.053		
		70-100	105	sub1 (zwaar)	-137	8.10E+0	-9.47E-2	3.71E-4	0.117		
	2	70-100	128	sub2 (licht)	142	-1.88E+0	2.28E-2	-8.66E-5	0.359		
		70-105	374	sub3 (divers)	64	1.09E+0	-1.36E-2	5.86E-5	0.078		
		Dordrecht	1	45-105	2257	totaal	117	-1.07E+0	1.82E-2	-8.78E-5	0.183
				60-95	195	sub1 (zwaar)	165	-2.81E+0	3.95E-2	-1.72E-4	0.263
				60-105	535	sub2 (licht)	154	-2.46E+0	3.41E-2	-1.46E-4	0.382
				50-105	1995	sub3 (divers)	130	-1.61E+0	2.52E-2	-1.17E-4	0.229
2	45-105		1884	totaal	99	-1.55E-1	2.76E-3	-9.83E-6	0.146		
	60-100		131	sub1 (zwaar)	7	3.94E+0	-5.33E-2	2.38E-4	0.152		
Tilburg	1	70-100	183	sub2 (licht)	109	-4.97E-1	5.81E-3	-1.80E-5	0.180		
		40-105	1673	sub3 (divers)	123	-1.07E+0	1.43E-2	-5.74E-5	0.222		
		45-105	1670	totaal	61	1.00E+0	-1.09E-2	4.16E-5	0.164		
		75-100	47	sub1 (zwaar)	336	-9.69E+0	1.23E-1	-5.07E-4	0.313		
		50-100	468	sub2 (licht)	46	1.51E+0	-1.66E-2	6.28E-5	0.128		
		45-105	1570	sub3 (divers)	56	1.20E+0	-1.32E-2	5.06E-5	0.185		
	2	45-105	1445	totaal	52	1.29E+0	-1.41E-2	5.42E-5	0.188		
		65-100	173	sub1 (zwaar)	51	1.52E+0	-1.85E-2	7.88E-5	0.215		
		50-100	152	sub2 (licht)	73	3.40E-1	-1.39E-3	-3.79E-7	0.502		
		45-105	1201	sub3 (divers)	39	1.77E+0	-2.06E-2	8.21E-5	0.310		
		Oldenzaal	1	55-105	649	totaal	240	-5.93E+0	7.87E-2	-3.34E-4	0.151
				70-100	55	sub1 (zwaar)	411	-1.23E+1	1.58E-1	-6.56E-4	0.532
75-105	48			sub2 (auto)	292	-7.18E+0	8.62E-2	-3.38E-4	0.143		
80-100	100			sub3 (container)	211	-4.94E+0	6.77E-2	-2.94E-4	0.107		
2	55-105		770	totaal	164	-3.11E+0	4.40E-2	-1.94E-4	0.291		
	65-100		132	sub1 (zwaar)	126	-1.37E+0	1.96E-2	-8.34E-5	0.444		
Oldenzaal	2	65-105	73	sub2 (auto)	162	-2.83E+0	3.69E-2	-1.50E-4	0.468		
		70-100	105	sub3 (container)	204	-4.66E+0	6.26E-2	-2.66E-4	0.457		

Snelheidseffect

40	50	60	70	80	90	100	110	dV
103	100	97	95	93	93	94	97	4
		96	97	96	95	99		1
			89	90	89	92		
		92	92	93	93	94	95	-2
90	92	93	94	94	95	95	96	-2
			93	93	95	97		
		92	92	93	94	95		-2
		93	94	94	95	96	97	-2
97	98	99	101	102	104	104	102	-5
	102	102	103	105	107	107		-5
	98	98	99	101	102	103	102	-5
	98	99	101	103	104	104	102	-5
97	97	98	98	99	100	101	102	-3
	100	103	103	103	103	106		-1
	96	96	96	97	98	99	100	-2
	97	97	98	99	100	101	101	-3
86	89	91	92	92	93	94	94	-2
		90	89	92	95	95		
	88	90	92	93	93	94		-3
	89	91	92	93	93	94	95	-2
	88	90	91	92	93	94	95	-3
	90	92	93	94	95	96	98	-3
	86	88	89	91	92	92	93	-4
	87	89	91	91	92	93	94	-3
		95	96	98	100	100	95	-5
		97	96	98	101	100		-4
			96	96	98	98	95	
			96	99	100	100	95	
94	94	95	97	99	99	99	96	-5
	96	97	99	100	101	101	101	-4
	93	93	95	97	98	98	101	-4
	93	94	96	98	98	95	95	-6

Bijlage 4

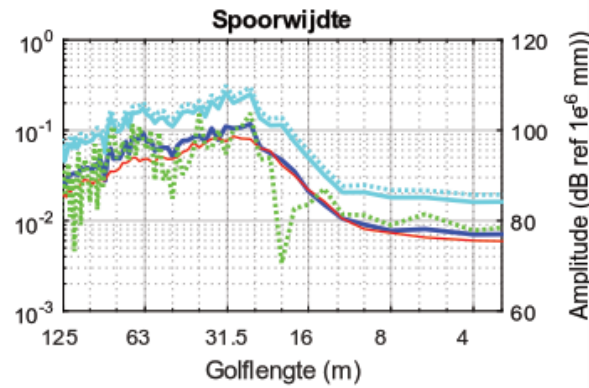
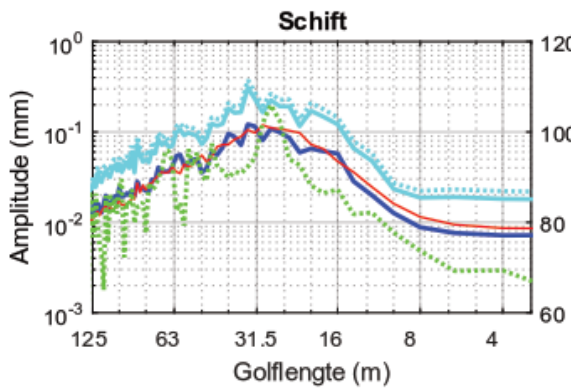
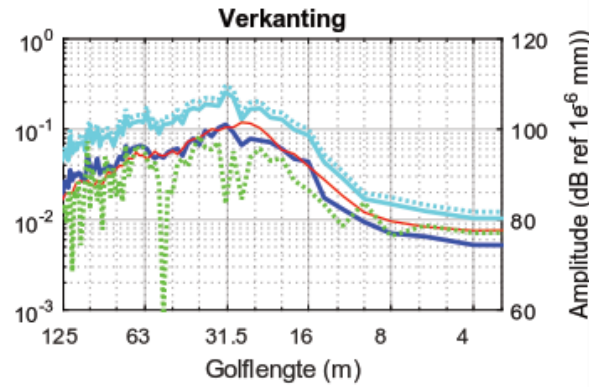
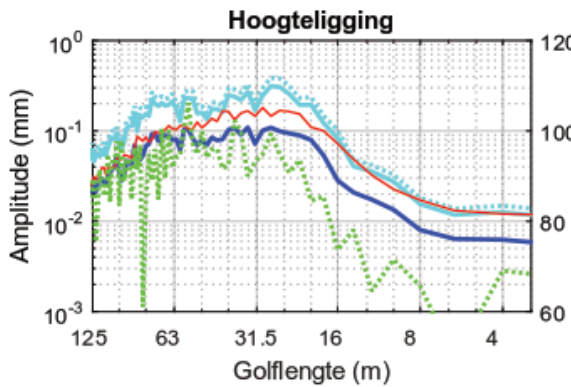
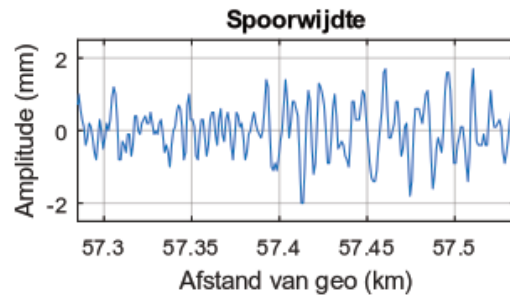
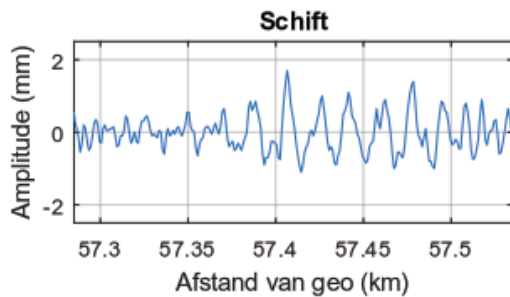
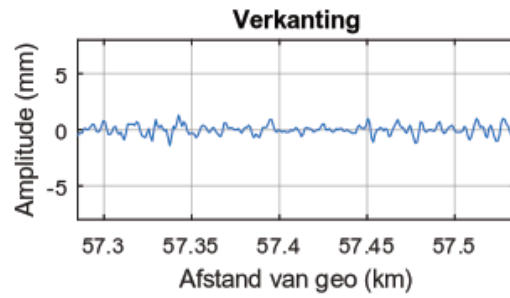
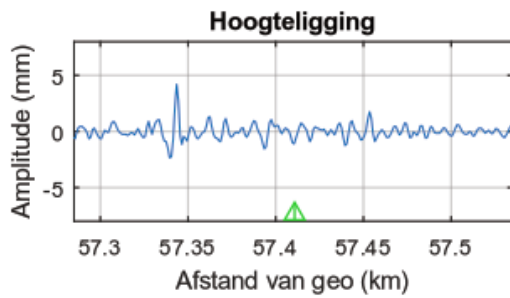
Titel Spectrale analyse spoorligging o.b.v meetdata Eurailscout
Omvang 4 x 2 bladen

Legenda

	gemiddelde
	P95
	P99
	landelijk gemiddelde
	rondom meetpunt

Spoortak: 515-307AR-51.1

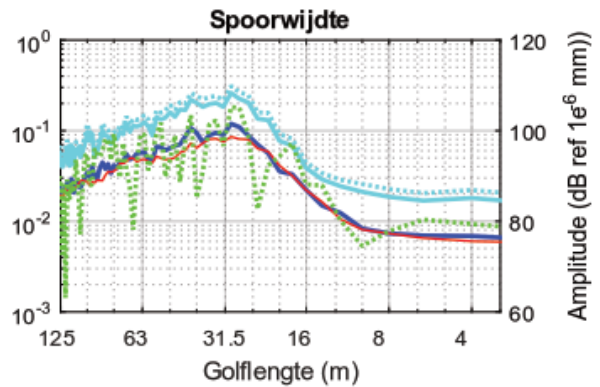
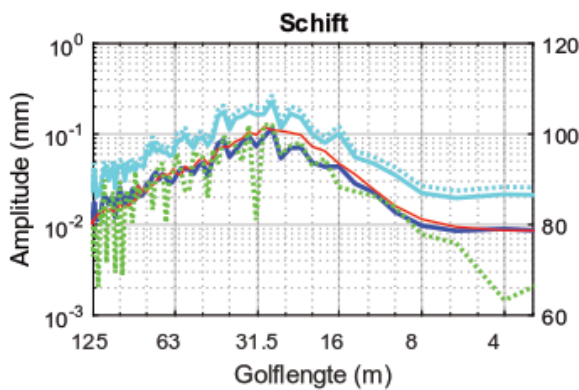
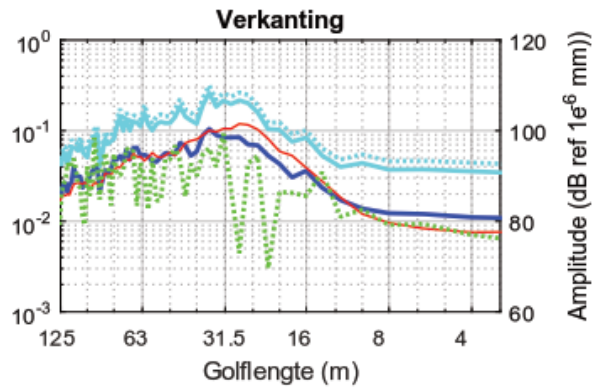
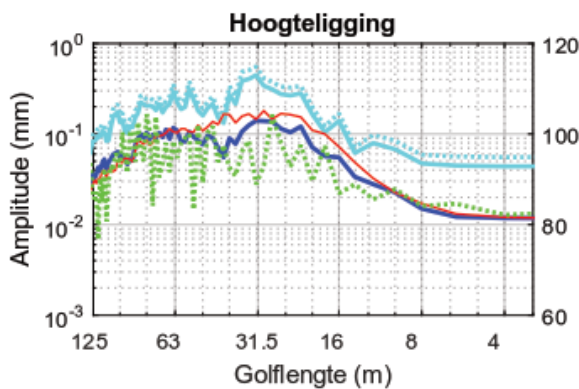
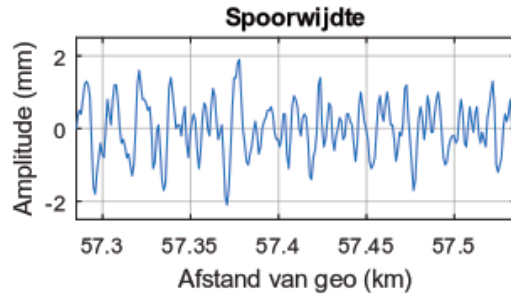
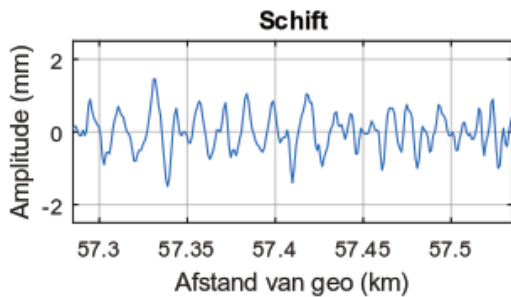
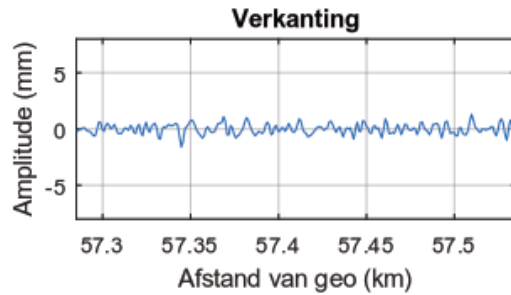
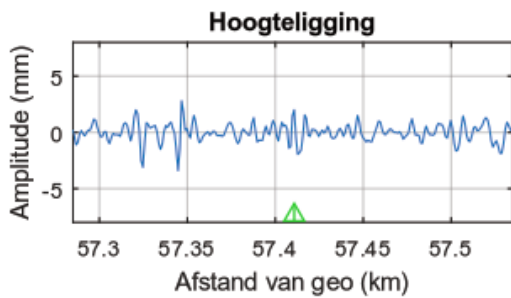
Geocode: 053 Locatie: Esch
 km van: 56,3 km tot: 58,7



Spoortak: 515-307BV-51.2

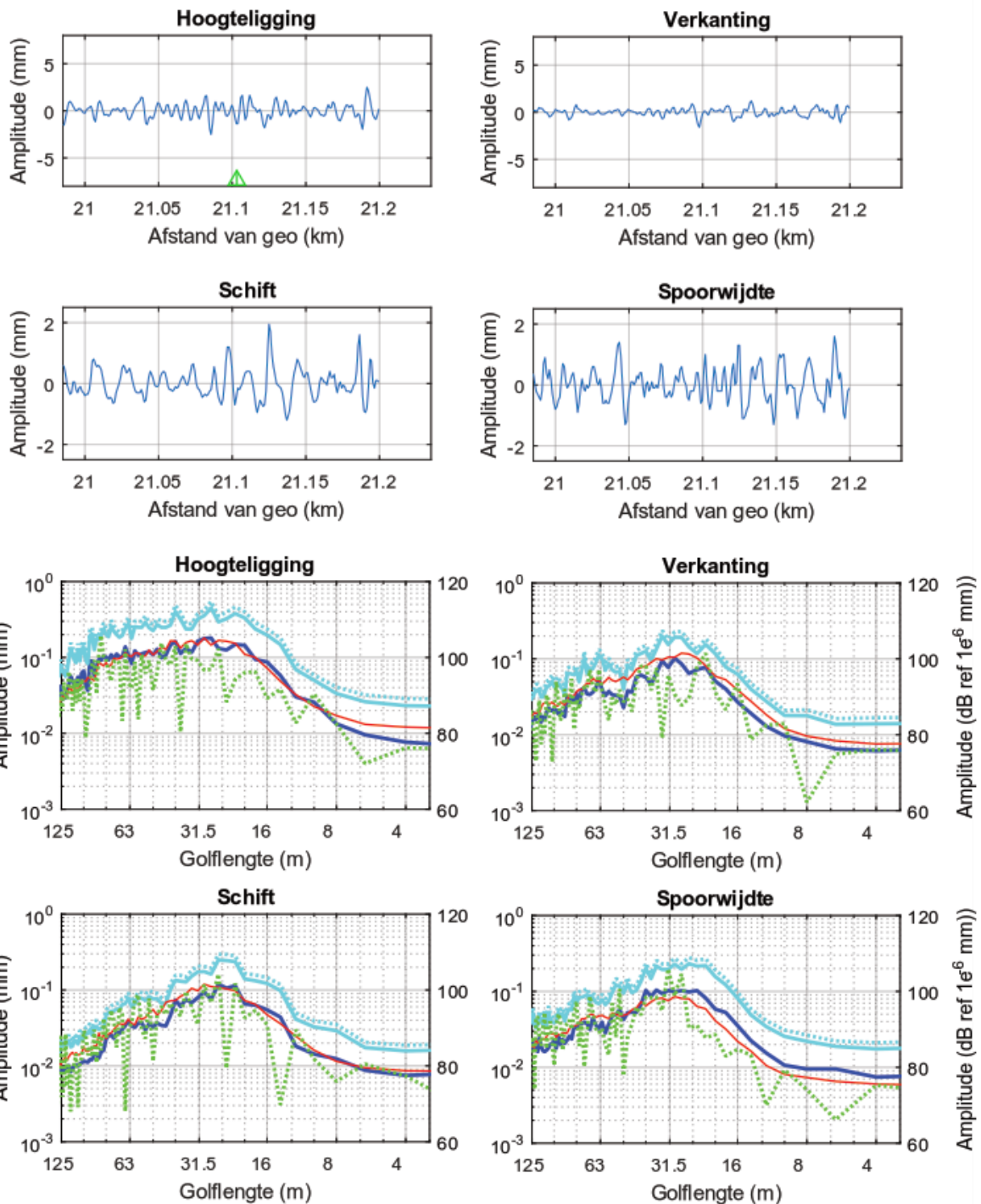
Geocode: 053 Locatie: Esch

km van: 56,3 km tot: 58,7



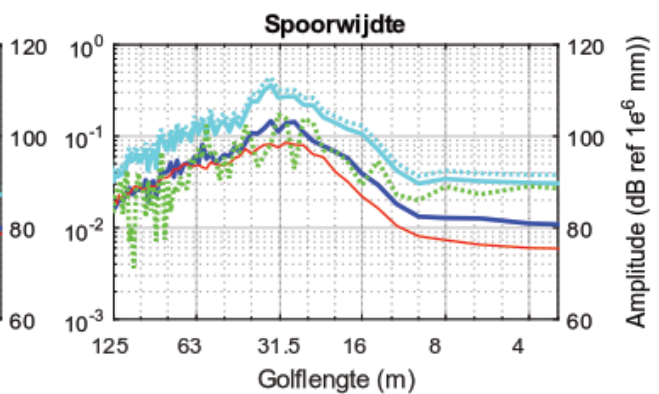
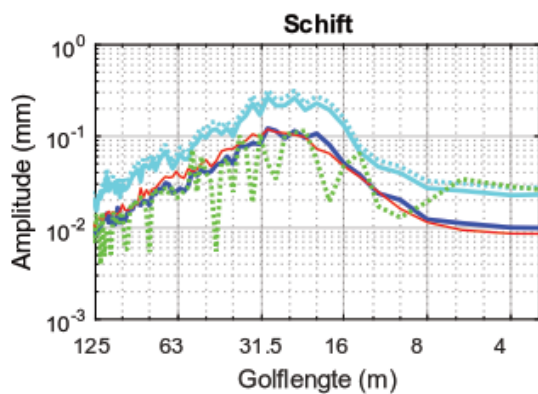
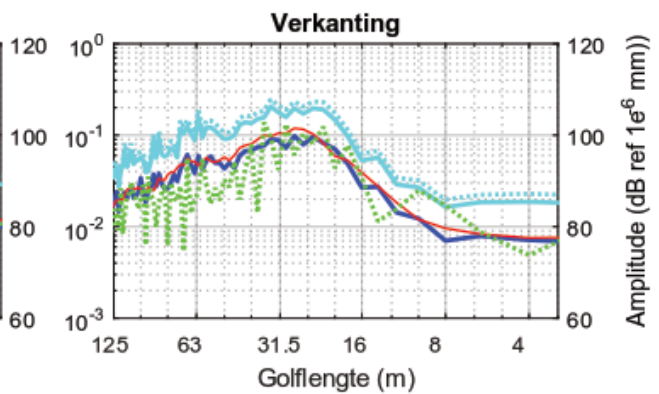
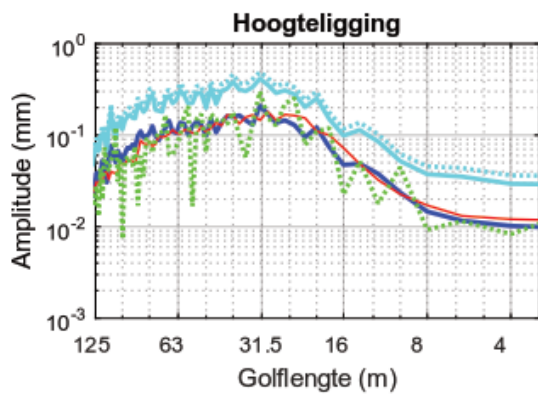
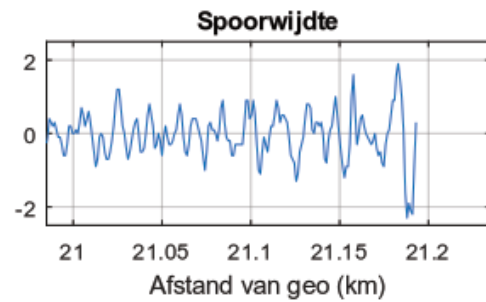
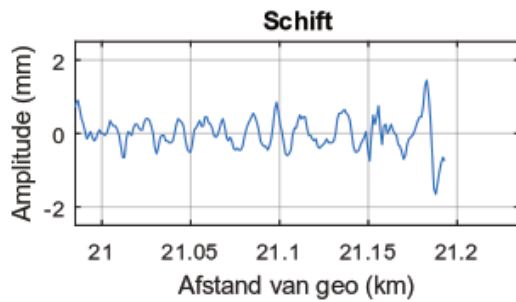
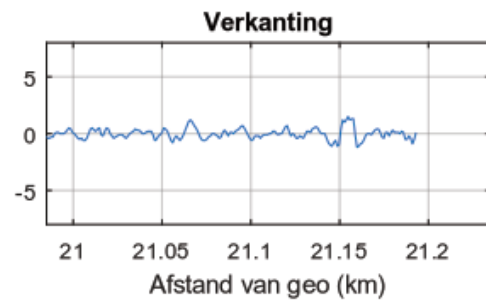
Spoortak: 119-123AL-21.3

Geocode: 119 Locatie: Dordrecht-Lage Zwaluwe
 km van: 19 km tot: 21,2



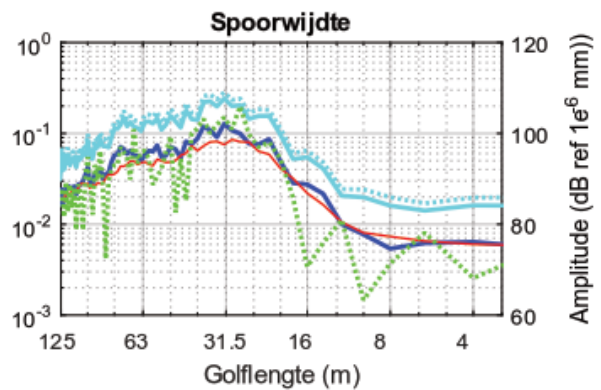
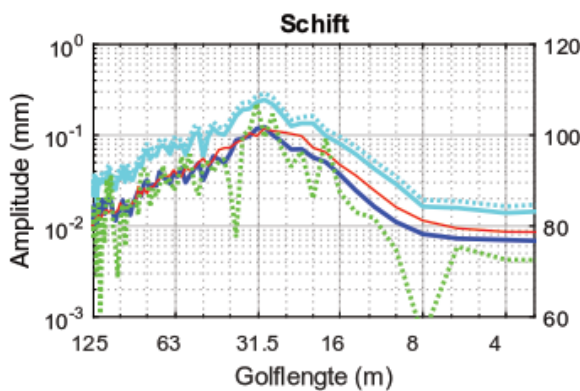
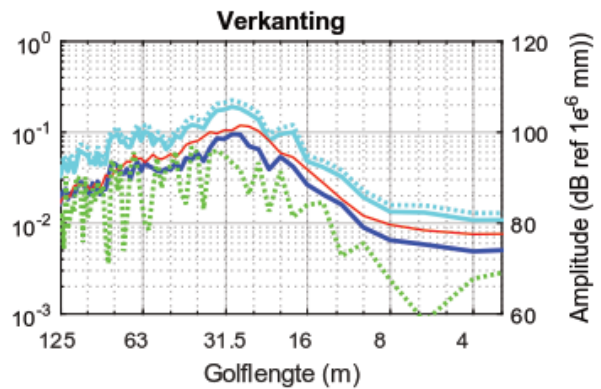
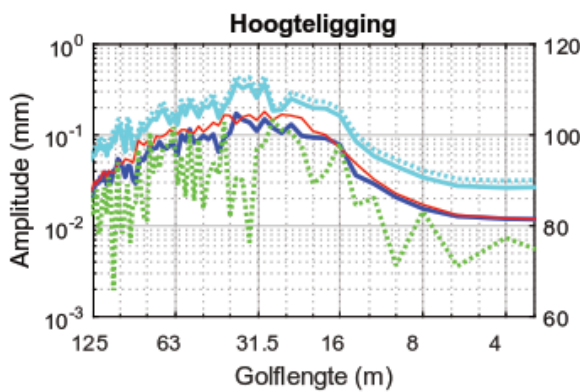
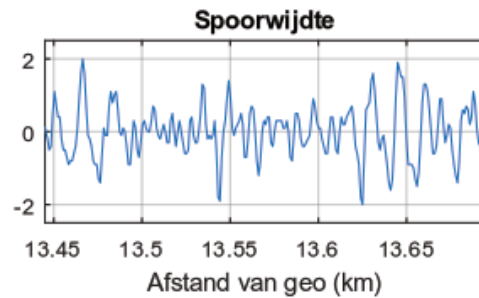
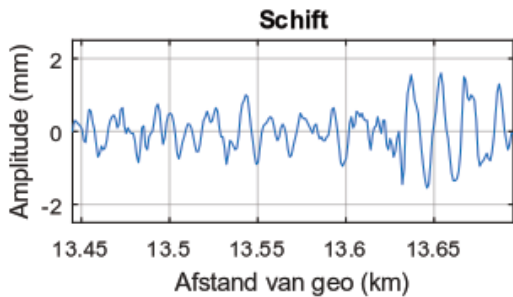
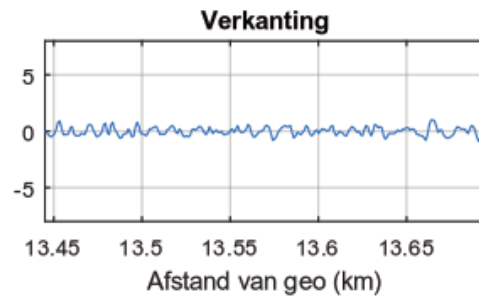
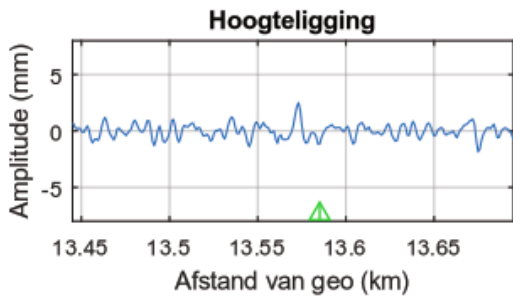
Spoortak: 119-123BV-21.2

Geocode: 119 Locatie: Dordrecht-Lage Zwaluwe
 km van: 19 km tot: 21,2



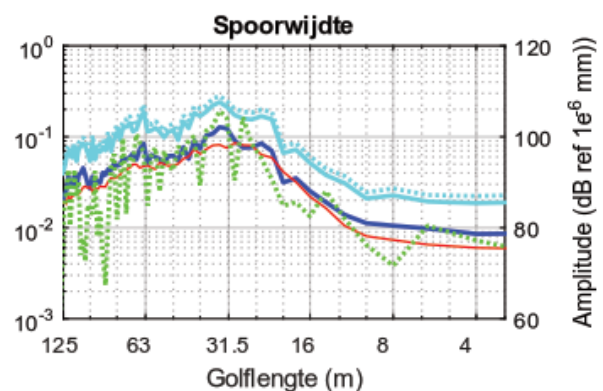
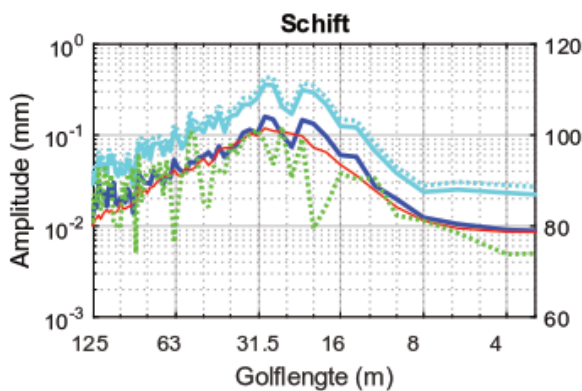
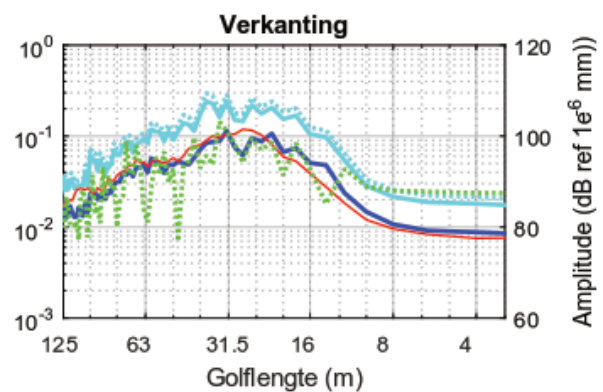
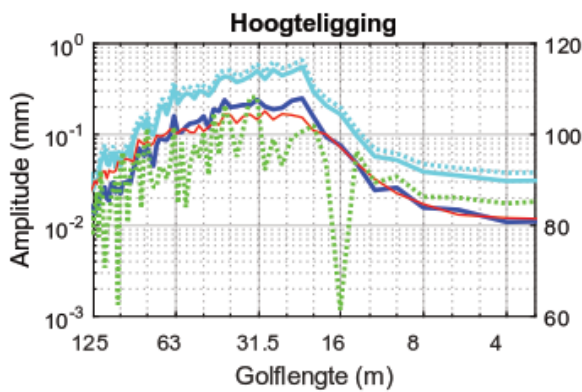
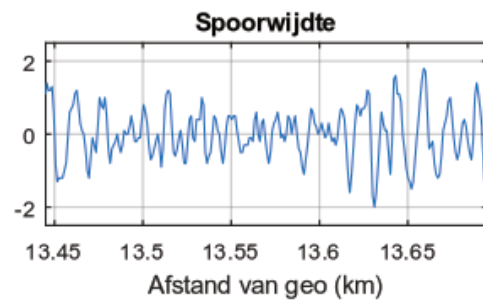
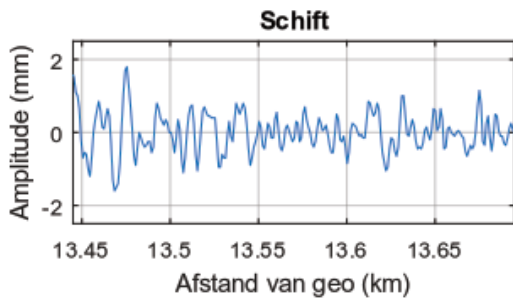
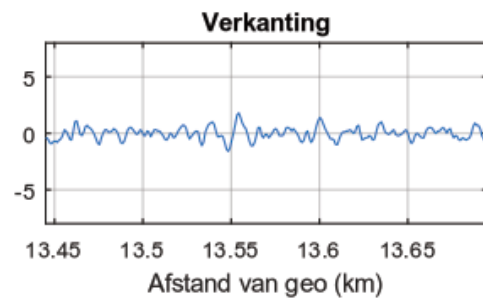
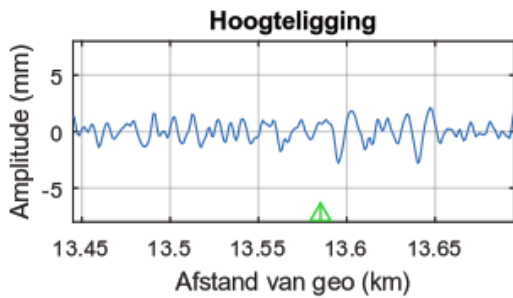
Spoortak: 123-29AL-11.6

Geocode: 123 Locatie: Breda-Tilburg
 km van: 11,8 km tot: 14



Spoortak: 123-29BV-11.6

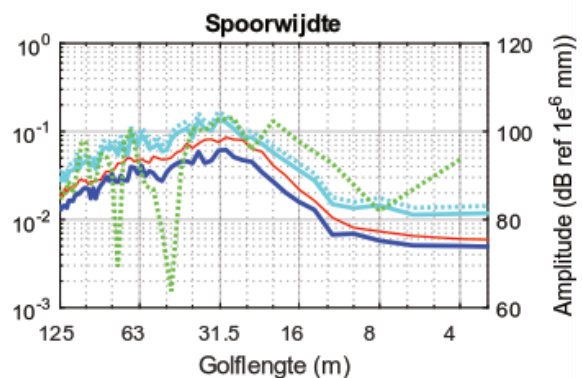
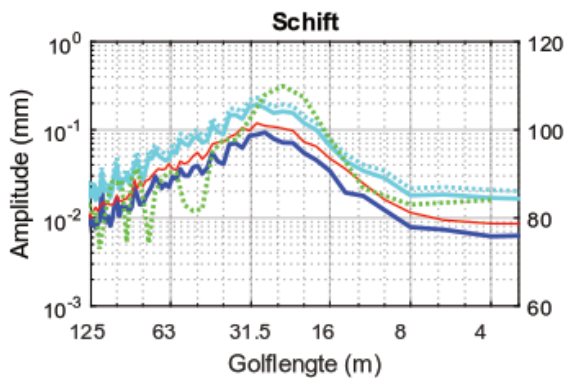
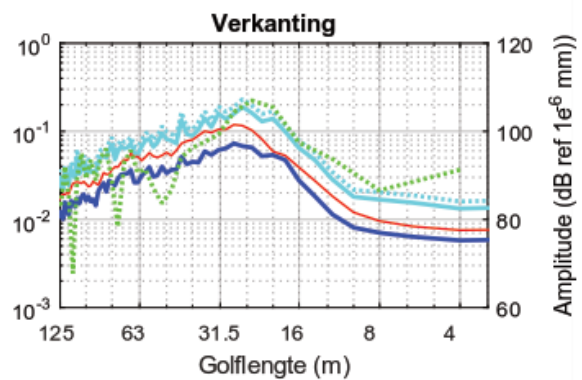
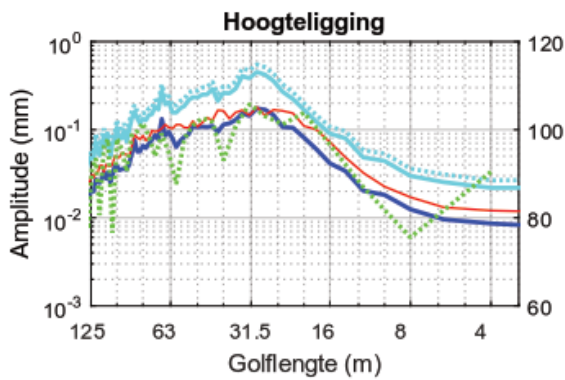
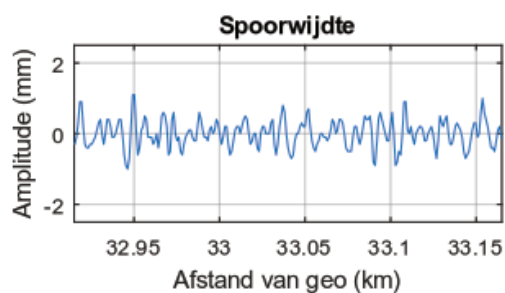
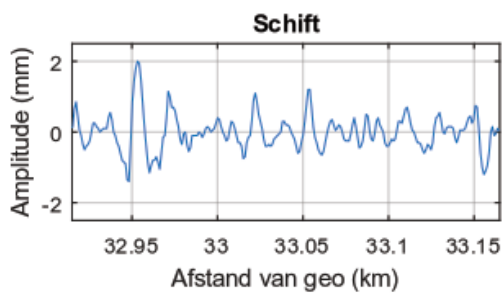
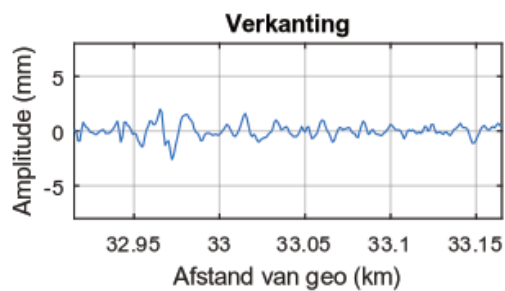
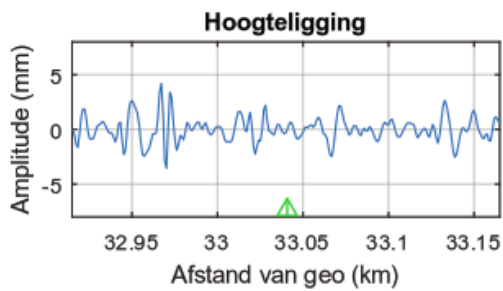
Geocode: 123 Locatie: Breda-Tilburg
 km van: 11,8 km tot: 14



Spoortak: 777-40V-14.5

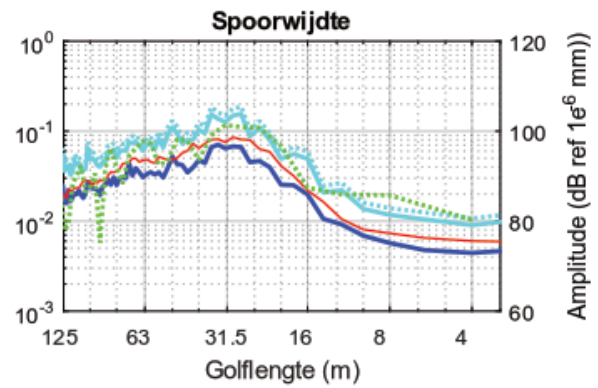
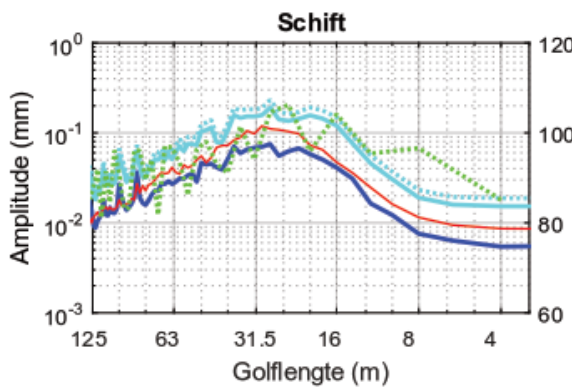
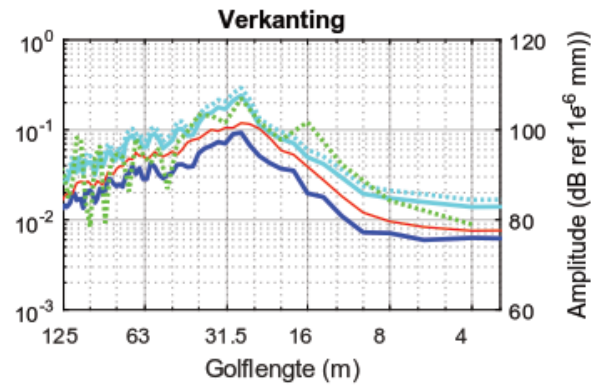
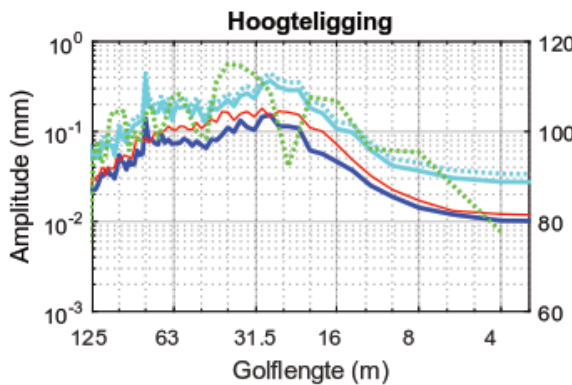
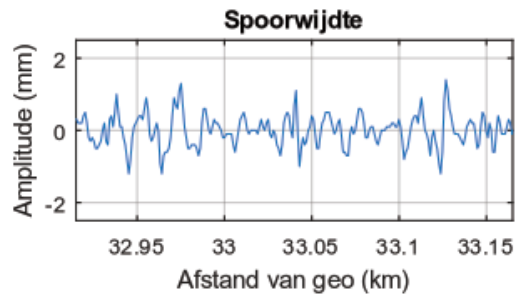
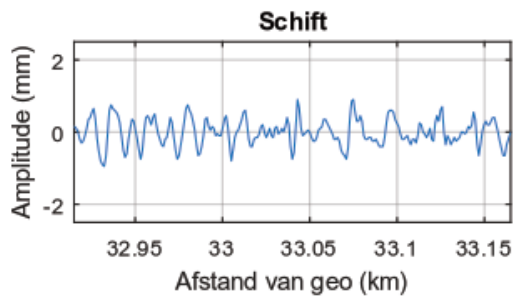
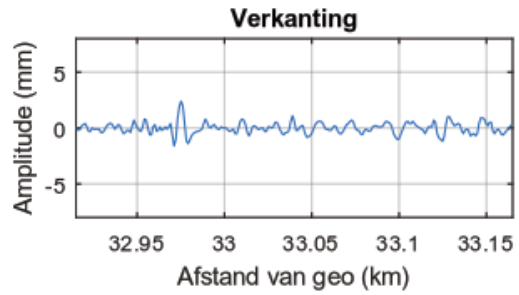
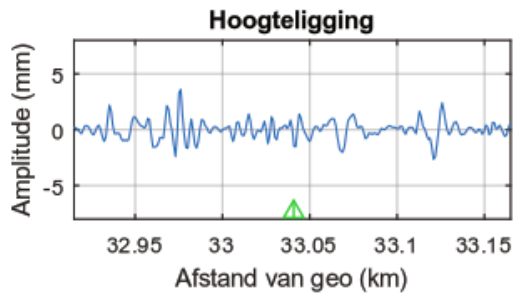
Geocode: 026 Locatie: Oldenzaal

km van: 30,2 km tot: 33,5



Spoortak: 777-39R-14.4

Geocode: 026 Locatie: Oldenzaal
 km van: 30,2 km tot: 33,5



Bijlage 5

Titel	Beoordeling kwaliteit spoorligging meetlocaties
Omvang	13 pagina's
Bron	MottMacDonald

Subject DGMR ProRail trillingsmetingen

To Reinoud Fennema DGMR

From Herman Boswijk
Ricks Schalk

Our reference 378868

Office Mott MacDonald Arnhem

Date 13-12-2016

Your reference T.2016.0727.00.

Technical notes Beoordeling spoorligging meetlocaties plus extra locaties

Inleiding

Vanuit DGMR is de vraag gekomen om de spoorligging in een aantal baanvakken te beoordelen. DGMR voert in opdracht van ProRail een onderzoek uit.. Er zijn op 4 verschillende locaties/baanvakken trillingsmetingen uitgevoerd door DGMR. Met de metingen en de spoorligging wordt een relatie onderzocht tussen de rijnsnelheid van (goederen)treinen en de opwekking van trillingen. Hierbij is Mott MacDonald door DGMR gevraagd om de beoordeling van de spoorligging te doen van deze meetlocaties. Tevens is expliciet gevraagd aan DGMR om de spoorligging van de 4 meetlocaties te vergelijken met de gemiddelde spoorligging in Nederland.

In het kader van deze opdracht zijn de BBMS data van 11 verschillende locaties ter beschikking gesteld door ProRail in een MS Excel document. De meetdata bestaat uit data van de hoogteligging, verkanting, spoorwijdte en schift. Van deze locaties is in alle gevallen de data beschikbaar gesteld van beide rijrichtingen, de gemeten lengtes van de locaties verschillen van 0.3 km tot 4,9 km. De metingen resulteren ongeveer elke meter in een set van nieuwe datasignalen, aan de hand hiervan kan op die locatie de kwaliteit van de spoorligging bepaald worden.

Mott MacDonald zal in het kader van deze opdracht de spoorligging beoordelen aan de hand van de beschikbaar gestelde meetdata. De kwaliteitsbeoordeling voor de 4 meetlocaties waar trillingsmetingen zijn gedaan zal aan de hand van de geldende onderhoudsspecificatie worden uitgevoerd De kwaliteit van de spoorligging zal beoordeeld worden aan de hand van de instandhoudingsspecificaties (OHD00033 versie 004) van ProRail. De beoordeling van de spoorligging zal aan de hand van de 4 parameters (spoorwijdte, verkanting, schift en hoogteligging) worden uitgevoerd

Daarnaast zal de vergelijking gemaakt worden met de gemiddelde spoorligging in Nederland> Dit zal gedaan worden aan de hand van de aangeleverde data van de overige locaties. De verdeling van de data per locatie zal



bestudeerd worden en aan de hand van een aantal criteria vergeleken worden met de andere meetlocaties en de rest van de data. Aan de hand van deze analyses zullen wij uiteindelijk een kwaliteitsbeoordeling voor de spoorligging geven van de meetlocaties en een vergelijking opstellen tussen de meetlocaties onderling en het landelijk gemiddelde.

Eisen spoorligging

De eisen voor de spoorligging zijn vastgesteld aan de hand van de geldende instandhoudingsspecificatie die ProRail hanteert in haar onderhoudsdocument 'Instandhoudingsspecificaties Spoorinfra – Baan en Overwegen'. (OHD00033 versie 004)

De spoorligging wordt beoordeeld aan de hand van een 4-tal parameters die zijn gemeten op 11 verschillende locaties in Nederland. De gemeten locaties zijn allemaal recht spoor (spoor op betonnen dwarsliggers in ballast) en liggen in principe vlak. De parameters die beoordeeld worden in deze analyse zijn:

- Hoogteligging;
- Verkantingsverschil (Scheluwte);
- Schiff;
- Spoorwijdte.

De geldende instandhoudingsspecificatie bestaat uit een bodemwaarde (BW) en een veiligheidswaarde (VW). De geldende eisen voor de te beoordelen parameterwaardes zijn opgenomen in onderstaande tabel:

Tabel 1: Instandhoudingsspecificaties ProRail

	≤ 40 km/h	≤ 80 km/h	≤ 100 km/h	≤ 120km/h	≤ 140 km/h	≤ 160 km/h
Hoogteligging BW [mm]	+60	18-22	18-20	18	16-18	14-15
Hoogteligging VW [mm]	80	24-30	24-27	24	21-24	18-21
Verkanting BW [mm]	13-30					
Verkanting VW [mm]	18-40					
Schift BW[mm]	22	13	7			
Schift VW [mm]	30	18	10			
Spoorwijdte BW [mm]	-6				-5	
	+26				+20	
Spoorwijdte VW [mm]	-9				-8	
	+35				+30	

Bron: Instandhoudingsspecificaties Spoorinfra – Baan en Overwegen, V004, ProRail, 2008

Voor de hoogteligging zijn alleen de hoogtekorden 2 en 3 opgenomen als bandbreedte voor de waardes in de tabel, de koordelengtes bedragen hier 10 en 15 meter. Voor de afwijking in de verkanting (scheluwte) zijn beide basislengtes als bandbreedte opgenomen de lengtes zijn 3 en 12 meter. De specificaties betreffende schift zijn alleen de specificaties voor schiftkooorde 2 opgenomen, welke een koordelengte van 9 meter heeft. Voor de spoorwijdte gelden er twee specificaties, om veiligheidsredenen is de toegestane negatieve afwijking is hier veel strenger dan de positieve afwijking. De eisen betreffende spoorwijdte verloop over langere lengtes zijn hier buiten beschouwing gelaten.

KPI

Voor de vergelijking zullen we coëfficiënten toevoegen ten aanzien van de verschillende parameters aan de hand van de snelheden tot 100km/h (snelheid goederenvervoer in Nederland). Dit om een numerieke KPI te kunnen vaststellen wat betreft de kwaliteit spoorligging. De coëfficiënten worden bepaald aan de hand van de laagste veiligheidswaarde voor de snelheid 80-100km/h, voor de schift zal dit de waarde groter dan 80km/h zijn en voor

de spoorwijdte de waarde groter dan 40 zijn. Voor de spoorwijdte zal daarnaast een gemiddelde genomen worden van twee coëfficiënten omdat er verschillende normen gelden voor negatieve- en positieve afwijkingen gelden. Alle parameters zullen voor 25% bijdragen aan de KPI. Naarmate de norm strenger wordt zal de coëfficiënt voor de KPI toenemen, een lichtere norm zorgt voor een kleinere coëfficiënt. Er wordt alleen met positieve waarden gerekend, omdat het afwijkingen vanaf de nulligging betreft.

	VW [mm]	Bijdrage [%]	Coëfficiënt
<i>Hoogteligging positief</i>	24	12.5	1.25
<i>Hoogteligging negatief</i>	24	12.5	1.25
<i>Verkanting positief</i>	18	12.5	1.67
<i>Verkanting negatief</i>	18	12.5	1.67
<i>Schift positief</i>	10	12.5	3
<i>Schift negatief</i>	10	12.5	3
<i>Spoorwijdte Negatief</i>	8	12.5	3.75
<i>Spoorwijdte Positief</i>	30	12.5	1
<i>Totale afwijking</i>	90	100	-

Nominale spoorligging

Om een waardeoordeel te kunnen geven over de kwaliteit van de spoorligging worden de gemeten waardes op de locaties van de trillingsmetingen vergeleken met de gemiddeldes van alle gemeten data (11 locaties).

De ideale spoorligging is gedefinieerd als de spoorligging 'als nieuw' waarbij er dus geen afwijking is, hierbij zouden alle gemeten parameterwaardes dus 0 zijn. De gemiddelde parameterwaardes van de metingen op de 11 locaties worden dus gezien als de nominale waarden.

Naast de gemiddeldes hebben we ook gekeken naar de standaardafwijking, mediaan en de gemiddelde positieve- en negatieve afwijking. Op deze manier komt een overzicht tot stand in de verdeling van de gemeten data en kunnen de waardes op de locaties van de trillingsmetingen voldoende beoordeeld worden. Dit staat weergegeven in onderstaande tabel 2.

Tabel 2: De nominale spoorligging aan de hand van de 11 meetlocaties

	Gemiddelde waarde	Standaardafwijking	Mediaan	Gemiddeld Positief	Gemiddeld Negatief
Hoogteligging [mm]	-0.0007	1.2533	0	0.8256	-0.8668
Verkanting [mm]	-0.0001	0.6913	0	0.5171	-0.5193
Schift [mm]	-0.0019	0.6578	0	0.4938	-0.4938
Spoorwijdte [mm]	0.0001	0.5899	0	0.4625	-0.4582

De waarden in Tabel 2 laten zien dat de gemiddelde spoorligging dicht rond nul ligt> Dit is niet vreemd aangezien de afwijking zowel positief als negatief kan zijn. De standaardafwijking is het grootst bij de hoogteligging wat betekent dat hier de grootste spreiding aan waarden zit ten opzichte van de andere parameters. De mediaan ligt zoals verwacht voor de vier parameters allemaal op 0. Een afwijking, positief dan wel negatief, staat gemiddeld ongeveer evenveel vanaf de ideale ligging voor alle parameters, dit is te zien in de laatste de kolom van de tabel. De bovenstaande waarden zullen worden gebruikt in de vergelijking met de gemeten waarden op de locaties waar de trillingsmetingen zijn uitgevoerd.

Gemeten waarden locaties trillingsmetingen

Door DGMR is op 4 locaties gemeten en er is 1 reservelocatie opgenomen in het programma. De meetlocaties zijn:

1. Esch, geocode 053 km 56.579 – 56.829
 2. Dordrecht/Lage Zwaluwe, geocode 119 km 20.905 – 21.155
 3. Tilburg, geocode 123 km 14.145 – 14.395
 4. Oldenzaal, geocode 026 km 32.575 - 32.825
- Elst (reserve), geocode 041 km 5.715 - 5.965

Van de meetlocaties zijn voor elke plek, t/m 125m voor- en na de meetlocatie de data verwerkt tav. de kwaliteitsbeoordeling spoorligging.

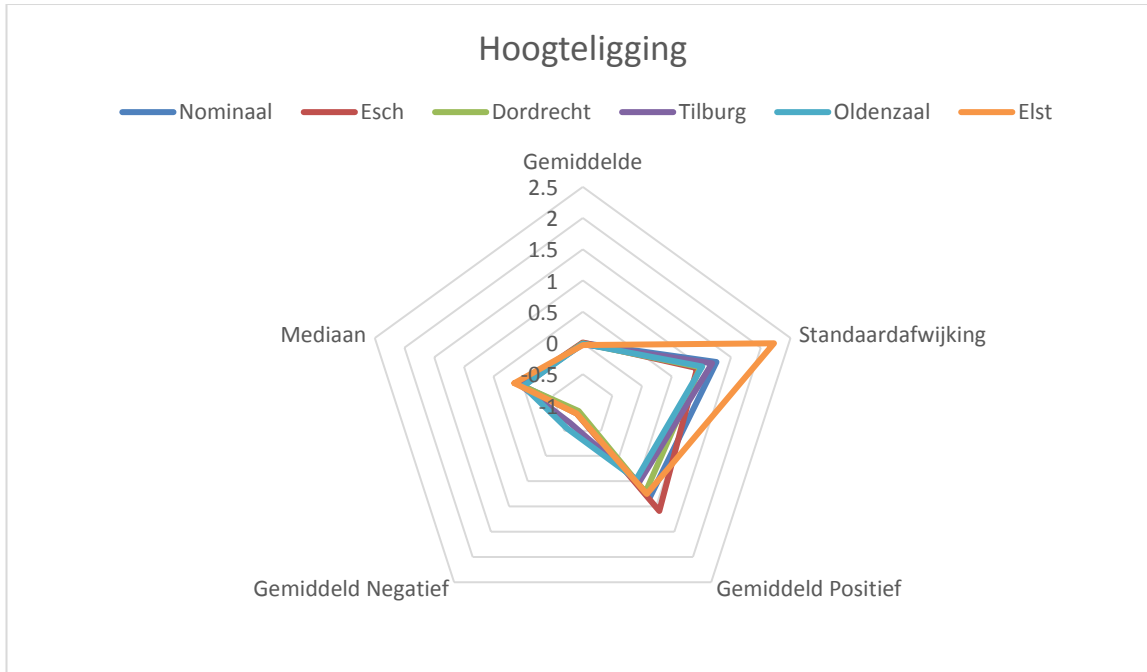
Een overzicht van de aangeleverde en verwerkte meetgegevens over de spoorligging is weergegeven in onderstaande tabel 3.

Tabel 3: Waarden spoorligging van de 4 meetlocaties

Esch, Geocode053 km 56.579 – km 56.829					
	Gemiddelde waarde	Standaardafwijking	Mediaan	Gemiddeld Positief	Gemiddeld Negatief
Hoogteligging [mm]	0.0080	0.9279	0	1.0890	-0.8410
Verkanting [mm]	0.0028	0.7136	0	0.7104	-0.7486
Schift [mm]	-0.0055	0.6005	0.05	0.4361	-0.4181
Spoorwijdte [mm]	-0.0050	0.7394	-0.05	0.5701	-0.5845
Dordrecht, Geocode119 km 20.905 – km 21.155					
Hoogteligging [mm]	-0.0060	0.9817	0.05	0.7174	-0.8902
Verkanting [mm]	0.0059	0.4470	0	0.3473	-0.3504
Schift [mm]	0.0158	0.4846	0	0.4060	-0.3795
Spoorwijdte [mm]	-0.0102	0.6595	0	0.5679	-0.6098
Tilburg, Geocode 123 km 14.145 – km 14.395					
Hoogteligging [mm]	-0.0196	1.1801	0.05	0.5292	-0.6581
Verkanting [mm]	-0.0014	0.7107	-0.1	0.4771	-0.4360
Schift [mm]	0.0137	0.6776	0.05	0.4617	-0.4364
Spoorwijdte [mm]	-0.0103	0.6528	0	0.6798	-0.7202
Oldenzaal, Geocode 026 km 32.575 – km 32.825					
Hoogteligging [mm]	-0.0123	1.0131	0	0.4621	-0.5568

Verkanting [mm]	-0.0210	0.5158	0	0.6071	-0.0944
Schift [mm]	0.0151	0.5142	0	0.3500	-0.3403
Spoorwijdte [mm]	-0.0028	0.4302	0	0.2293	-0.2401
Elst (reserve) , Geocode 041 km 5.715 – km 5.965					
Hoogteligging [mm]	-0.0335	2.2218	0.15	0.7516	-0.8415
Verkanting [mm]	-0.0092	1.3667	0	0.6806	-0.0321
Schift [mm]	-0.0010	0.8805	0	0.5223	-0.4700
Spoorwijdte [mm]	-0.0042	0.5930	0	0.5874	-0.3680

Beoordeling Hoogteligging



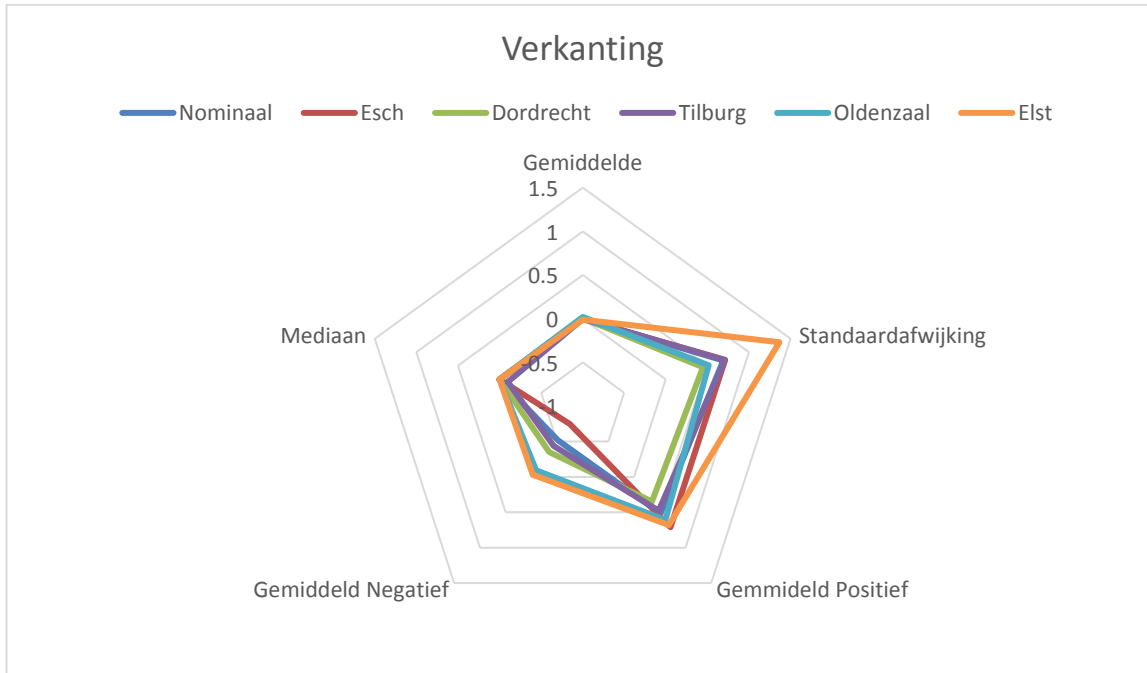
De gemiddelde hoogteligging ligt in alle gevallen onder de voorgeschreven onderhoudswaarden van ProRail (strengste waarden bij 160km/h 14-18mm). De vier meetlocaties en reserve locatie leveren allemaal vergelijkbare verdelingen op qua data als de nominale waarden. De gemiddeldes liggen allemaal zeer dicht bij nul met gemiddeld een paar (tien)duizendste mm afwijkend. De grootste afwijking ten opzichte van de nominale waarden is te zien bij de reserve locatie Elst, waar vooral de standaardafwijking een grote waarde heeft. Dit betekent dat er een grotere spreiding aan data is op deze meetlocatie, dit is ook terug te zien aan de relatief grote uitschieters op deze meetlocatie.

Omdat de gemiddelde waardes weinig afwijken van de nulligging, zijn ook de maximale positieve- en negatieve waardes voor de meetlocaties beschouwd. Dit is gedaan voor alle 4 de liggingsparameters een overzicht van de waardes voor de verschillende meetlocaties is weergegeven in Tabel 4. Ook de maximale waarden van alle meetlocaties liggen ook ruim onder de onderhoudsnormen.

Tabel 4: Overzicht van de hoogteligging waardes (mm) voor de verschillende meetlocaties en de nominale ligging.

	Nominaal	Esch	Dordrecht	Tilburg	Oldenzaal	Elst
<i>Gemiddelde</i>	-0.0007	0.0080	-0.0060	-0.0196	-0.0123	-0.0335
<i>Standaardafwijking</i>	1.2533	0.9279	0.9817	1.1801	1.0131	2.2218
<i>Gemiddeld Positief</i>	0.8256	1.0890	0.7174	0.5292	0.4621	0.7516
<i>Gemiddeld Negatief</i>	-0.8668	-0.8410	-0.8901	-0.6581	-0.5567	-0.8415
<i>Maximaal Positief</i>	-	2.55	4.9	3.6	5.2	7.15
<i>Maximaal Negatief</i>	-	-4.35	-3.35	-4.85	-4.25	-8.35

Beoordeling Verkanting



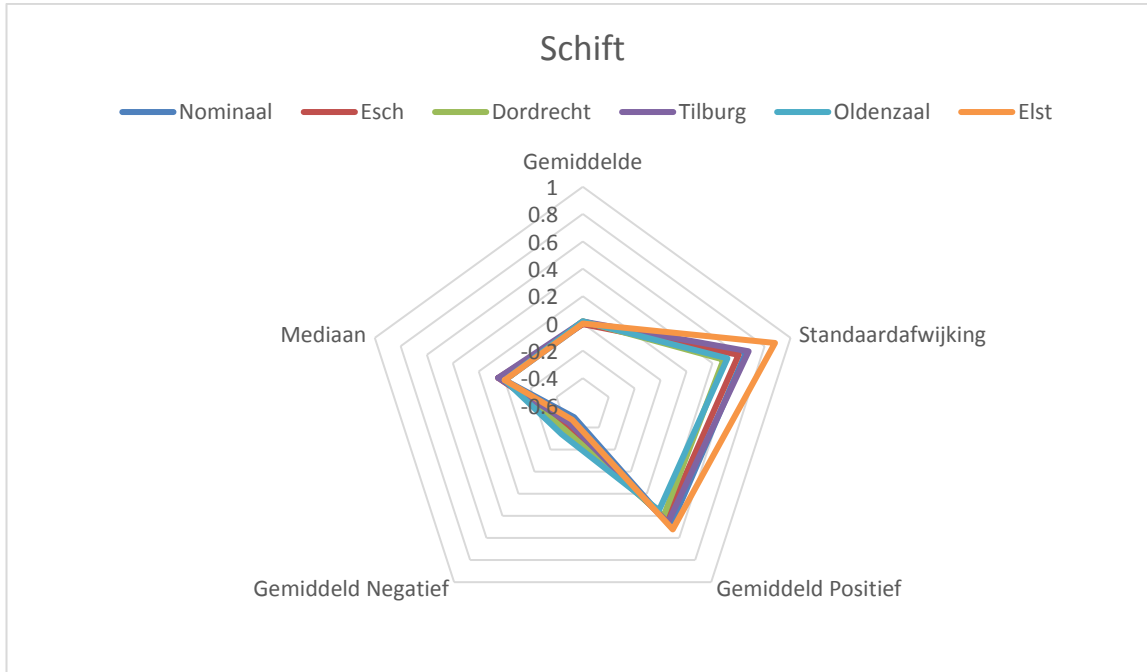
De gemiddelde afwijking van de verkanting op de meetlocaties is nauwelijks anders dan de gemiddelde nominale verkanting, allen liggen rond de nulligging. De grootste afwijkingen wat betreft de verdeling is de reserve locatie Elst met gemiddeld grotere uitslagen, zowel positief als negatief.

De gestelde bodemwaarde voor verkanting ligt op 13mm, zoals in Tabel 5 te zien is liggen de maximale waarden op de meetlocaties allen ruim onder deze waarde.

Tabel 5: Overzicht van de waardes (mm) van de verkanting voor de verschillende meetlocaties en de nominale ligging.

	Nominaal	Esch	Dordrecht	Tilburg	Oldenzaal	Elst
<i>Gemiddelde</i>	-0.0001	-0.0028	0.0059	-0.0014	0.0210	-0.0092
<i>Standaardafwijking</i>	0.6913	0.7136	0.4470	0.7107	0.5158	1.3667
<i>Gemiddeld Positief</i>	0.5171	0.7104	0.3473	0.4771	0.6071	0.6806
<i>Gemiddeld Negatief</i>	-0.5193	-0.7486	-0.3505	-0.4360	-0.0944	-0.0321
<i>Maximaal Positief</i>	-	3.5	1.3	3.1	2	3.9
<i>Maximaal Negatief</i>	-	-2.9	-1.6	-3.2	-2.5	-4.8

Beoordeling Schift



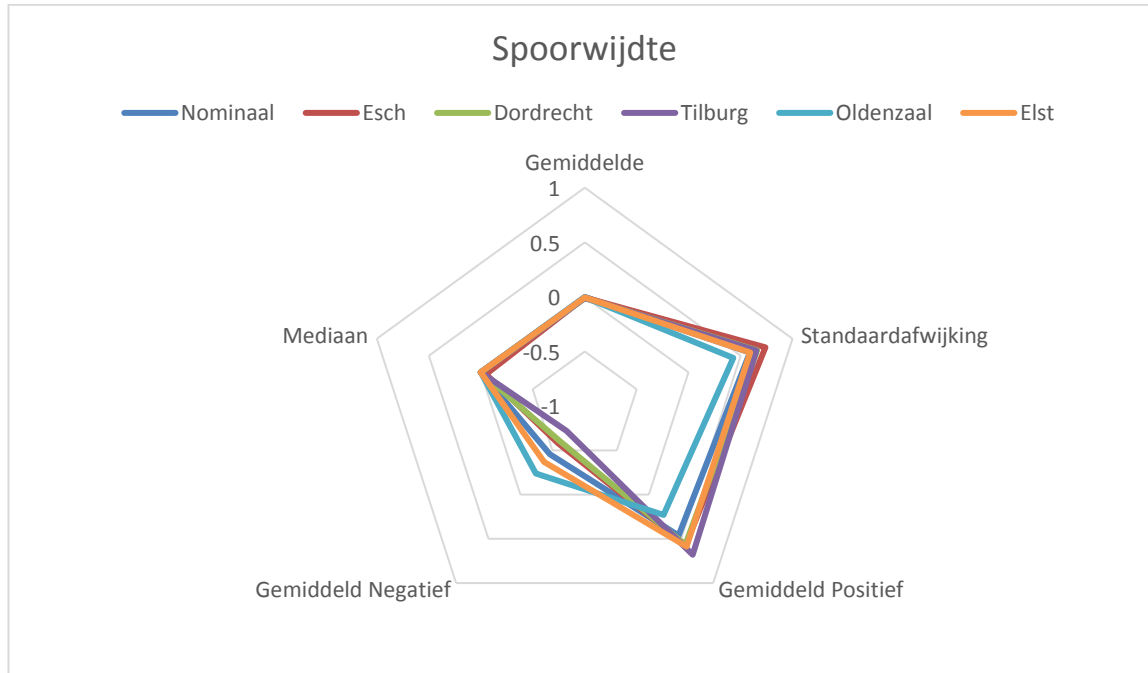
De gemiddeldes van alle meetlocaties liggen rond de nulligging, net zoals de nominale ligging. De locatie met de grootste afwijking is de reserve locatie Elst, met een grotere standaardafwijking en grotere gemiddelde positieve- en negatieve uitslagen.

De bodemwaarde voor schift ligt op 7mm voor snelheden vanaf 100km/h. Zoals in Tabel 6 te zien is liggen de meeste meetlocaties ruim binnen deze bodemwaarde (en dus ook de veiligheidswaarde). Alleen de meetlocatie op het spoor nabij Dordrecht komt met een maximale negatieve waarde van -5,5 enigszins in de buurt van de bodemwaarde.

Tabel 6: Overzicht van de schift waardes (mm) voor de verschillende meetlocaties en de nominale ligging.

	Nominaal	Esch	Dordrecht	Tilburg	Oldenzaal	Elst
<i>Gemiddelde</i>	-0.0019	-0.0055	0.0158	0.0137	0.0151	-0.0010
<i>Standaardafwijking</i>	0.6578	0.6005	0.4846	0.6776	0.5142	0.8805
<i>Gemiddeld Positief</i>	0.4938	0.4361	0.4060	0.4617	0.3500	0.5227
<i>Gemiddeld Negatief</i>	-0.4938	-0.4181	-0.3795	-0.4364	-0.3403	-0.4700
<i>Maximaal Positief</i>	-	1.9	1.95	1.85	2.15	2.4
<i>Maximaal Negatief</i>	-	-2.85	-1.7	-2.2	-1.9	-3.1

Beoordeling Spoorwijdte



De gemiddeldes van de meetlocaties liggen allen erg dicht bij de nominale waarden rond de nul. De grootste afwijking hier is de meetlocatie Esch, maar aangezien het hier om duizendsten gaat is dit verwaarloosbaar.

De bodemwaardes van de spoorwijdte voor verkeer sneller dan 80km/h zijn -5 en +20. De reservelocatie Elst komt hier nog het dichtste bij met een negatieve maximale waarde van -3.8. De rest van de meetlocaties heeft met elkaar vergelijkbare maximale waarden ruim binnen de normen.

Tabel 7: Overzicht van de waardes (mm) voor de spoorwijdte op de verschillende meetlocaties en de nominale ligging.

	Nominaal	Esch	Dordrecht	Tilburg	Oldenzaal	Elst
<i>Gemiddelde</i>	0.0001	-0.0055	-0.0102	-0.0103	-0.0028	-0.0042
<i>Standaardafwijking</i>	0.5899	0.7394	0.6595	0.6528	0.4302	0.5930
<i>Gemiddeld Positief</i>	0.4625	0.5701	0.5678	0.6798	0.2294	0.5874
<i>Gemiddeld Negatief</i>	-0.4582	-0.5845	-0.6098	-0.7202	-0.2401	-0.3680
<i>Maximaal Positief</i>	-	3.3	2	1.6	1.7	2.3
<i>Maximaal Negatief</i>	-	-2.6	-2.7	-2.1	-1.6	-2.8

Waardering locaties

Aan de hand van de gemiddelde afwijkingen van de metingen zal een waardering gedaan worden van de spoorligging aan de hand van de eerder voorgestelde KPI, de resultaten zijn weergegeven in de onderstaande tabel. Let op, de negatieve waarden worden als positief weergegeven omdat het om afwijkingen gaat.

	Coëfficiënt	Landelijk gemiddelde	Met coëfficiënt	Esch gemiddelde afwijking [mm]	Met coëfficiënt	Dordrecht gemiddelde afwijking [mm]	Met coëfficiënt	Tilburg gemiddelde afwijking	Met coëfficiënt	Oldenzaal gemiddelde afwijking [mm]	Met coëfficiënt	Elst [mm]	Met coëfficiënt
Hoogteligging positief	1.25	0.8256	1.032	1.089	1.36125	0.7174	0.89675	0.5292	0.6615	0.4621	0.577625	0.7516	0.9395
Hoogteligging negatief	1.25	0.8668	1.0835	0.841	1.05125	0.8901	1.112625	0.6581	0.822625	0.5567	0.695875	0.8415	1.051875
Verkanting positief	1.67	0.5171	0.863557	0.7104	1.186368	0.3473	0.579991	0.4771	0.796757	0.6071	1.013857	0.6806	1.136602
Verkanting negatief	1.67	0.5193	0.867231	0.7486	1.250162	0.3505	0.585335	0.436	0.72812	0.0944	0.157648	0.0321	0.053607
Schift positief	3	0.4938	1.4814	0.4361	1.3083	0.406	1.218	0.4617	1.3851	0.35	1.05	0.5227	1.5681
Schift negatief	3	0.4938	1.4814	0.4181	1.2543	0.3795	1.1385	0.4364	1.3092	0.3403	1.0209	0.47	1.41
Spoorwijdte negatief	3.75	0.4582	1.71825	0.5845	2.191875	0.6098	2.28675	0.7202	2.70075	0.2401	0.900375	0.368	1.38
Spoorwijdte positief	1	0.4625	0.4625	0.5701	0.5701	0.5678	0.5678	0.6798	0.6798	0.2294	0.2294	0.5874	0.5874
KPI waarde		8.989838		10.89		8.385751		9.083852		5.64568		8.127084	

Tabel 8: waardering spoorligging aan de hand van de coëfficiënten welke afgeleid zijn van de veiligheidswaarden

Aan de hand van tabel 8 kan bepaald worden dat de locatie Oldenzaal de beste spoorligging heeft. Daarnaast hebben zowel Dordrecht als Elst een betere ligging dan het landelijke gemiddelde. De slechtste ligging is de locatie Esch, wat vooral komt door de afwijkingen op de verkanting. De locatie Tilburg scoort een KPI waarde nagenoeg gelijk aan het landelijke gemiddelde.

Eindconclusie/Eindbevindingen over spoorligging

Op basis van de 4 parameters waarop de spoorligging beoordeeld wordt kan gesteld worden dat de spoorligging ruim binnen de gestelde normen van bodemwaardes en veiligheidswaardes valt. Geen enkele van alle geanalyseerde datapunten overschrijdt deze waarden.

De liggingsdata betreffende de meetlocaties zijn allen stukken recht spoor zonder bogen of gradiënten. Over de data van het 'landelijk gemiddelde' is niet bekend of dit ook alleen recht spoor betreft.

De nominale spoorligging, waarvan de parameterwaarden een tweede set aan waarden vormen om de meetlocaties aan te toetsen is ook beoordeeld. De nominale spoorligging is bepaald op basis van de beschikbare data van de meetlocaties plus de data van 6 andere locaties. De gemiddeldes van de meetlocaties lagen ten hoogste enkele duizendsten millimeters verwijderd van de nominale spoorligging.

Wanneer ook de standaardgemiddelden en gemiddelde positieve en negatieve waarden meegewogen worden, is duidelijk dat de meetlocaties vergelijkbare waarden hebben als de nominale spoorligging zij het bijna altijd iets slechter wanneer naar absolute scores gekeken wordt. Het gaat hier om zeer kleine verschillen van duizendsten van millimeters, welke normaal gesproken niet te meten zijn, maar in dit geval puur uit de bewerking van de data komen.

De toepassing van de KPI spoorligging geeft aan dat de locatie de beste spoorligging heeft, zelfs beter dan het landelijke gemiddelde. Daarnaast zou overwogen kunnen worden om in plaats van de locatie Esch de reservelocatie Elst te nemen voor verder onderzoek omdat deze een betere spoorligging heeft.