



# ONDERZOEK TRILLINGSNIVEAUS EN ASPOTVERSNELLINGEN VIRM

A2 CORRIDOR

ProRail

|                    |                                                                                                                   |
|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Project            | Onderzoek trillingsniveaus en aspotversnellingen VIRM                                                             |
| Titel rapport      | Onderzoek trillingsniveaus en aspotversnellingen VIRM                                                             |
| Referentie         | CC-REP20211104                                                                                                    |
| Opdrachtgever      | ProRail                                                                                                           |
| Status             | Definitief                                                                                                        |
| Versie             | 1.0                                                                                                               |
| Datum              | 23 november 2021                                                                                                  |
| Opgemaakt door     | ir. T. Roeleveld (Ricardo) / ir. E.J. Vlijm (Cohere Consultants)                                                  |
| Gecontroleerd door | ir. J. Peen (Ricardo)                                                                                             |
| Bestandsnaam       | cc-rep20211104 onderzoek gecombineerde data trillingsniveaus op maaiveld en aspotversnellingsdata virm definitief |
| Paraaf             |                                |

Copyright © 2021 Cohere Consultants. Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd, in geautomatiseerde bestanden opgeslagen en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm, geluidsband of op welke andere wijze ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Cohere Consultants. In overeenstemming met artikel 15a van het Nederlandse auteursrecht is het toegestaan delen van deze publicatie te citeren, daarbij gebruik makend van een duidelijke referentie naar deze publicatie.



# INHOUD

|                                                                          |                                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1                                                                        | Inleiding .....                                                                    | 1  |
| 1.1                                                                      | Aanleiding.....                                                                    | 1  |
| 1.2                                                                      | Doelstelling.....                                                                  | 1  |
| 1.3                                                                      | Structuurbeschrijving .....                                                        | 2  |
| 2                                                                        | Beschikbare datasets .....                                                         | 3  |
| 2.1                                                                      | Selectie 3 meetlocaties .....                                                      | 3  |
| 2.2                                                                      | Beschikbare datasets bodemtrillingen .....                                         | 3  |
| 2.3                                                                      | Beschikbare dataset aspotversnellingen.....                                        | 8  |
| 3                                                                        | Selectie InfraMon trein passages en signalen.....                                  | 10 |
| 3.1                                                                      | Selectie aspotversnellingssignalen .....                                           | 10 |
| 3.2                                                                      | Selectie signalen bodemtrillingen .....                                            | 11 |
| 3.3                                                                      | Te hanteren tijdsvenster in signalen .....                                         | 14 |
| 4                                                                        | Resultaten onderzoek .....                                                         | 18 |
| 4.1                                                                      | Inventarisatie van verschillende bronmechanismen .....                             | 18 |
| 4.2                                                                      | Gemeten niveaus aspotversnelling en bijbehorende bodemtrilling .....               | 21 |
| 4.3                                                                      | Aspotversnellingsdata en bodemtrilling uitgezet tegen rijsnelheid.....             | 23 |
| 4.4                                                                      | Overdrachten per locatie .....                                                     | 25 |
| 5                                                                        | Voertuigkarakteristieken .....                                                     | 30 |
| 5.1                                                                      | Trillingsbelasting door een rijdende trein .....                                   | 30 |
| 5.2                                                                      | Eigenschappen goederentreinen .....                                                | 32 |
| 5.3                                                                      | Kwalitatieve beschouwing ten behoeve van pilot wielkwaliteit goederentreinen ..... | 33 |
| 6                                                                        | Conclusies en aanbevelingen .....                                                  | 35 |
| 6.1                                                                      | Conclusies.....                                                                    | 35 |
| 6.2                                                                      | Aanbevelingen.....                                                                 | 36 |
| Referenties                                                              |                                                                                    | 38 |
| Bijlage I. Trillingssignalen op Maaiveld Schalkwijk .....                |                                                                                    | 39 |
| Bijlage II. Trillingssignalen op Maaiveld Orthen.....                    |                                                                                    | 43 |
| Bijlage III. Trillingssignalen op Maaiveld Den Bosch Zuid .....          |                                                                                    | 47 |
| Bijlage III. Overdrachten 2 sec intervallen .....                        |                                                                                    | 51 |
| Bijlage III. Overdrachten 1 sec intervallen .....                        |                                                                                    | 54 |
| Bijlage III. VRMS uitgezet tegen rijsnelheid 2seconde -intervallen ..... |                                                                                    | 57 |
| Bijlage III. VRMS uitgezet tegen rijsnelheid 1seconde -intervallen ..... |                                                                                    | 76 |

# 1

## INLEIDING

### 1.1 Aanleiding

In het meerjarenplan duurzaamheid heeft ProRail voor 2020 de ambitie neergelegd om naast het voldoen aan wettelijke normen (compliance) te streven naar een optimale kwaliteit van het spoor daar waar de omgeving hinder kan ondervinden<sup>1</sup>. Daarnaast zijn in de Innovatieagenda Bronaanpak Spoortrillingen monitoringsprojecten voor spoorinfra en trillingshinder opgenomen. Eén van de monitoringsprojecten is een pilot in samenwerking met goederenvervoerders/wagoneigenaren, waarin met een praktijkproef het effect van wielonrondheid op trillingen en trillingshinder zal worden gemonitord. Een andere pilot is gericht op het beter en gericht onderhouden van de spoorbaan met hetzelfde doel om trillingen en daaruit voorkomende trillingshinder te reduceren.

Door Ricardo en Cohere Consultants is aan ProRail voorgesteld te onderzoeken of een combinatie van trillingsmetingen aan het voertuig (de as) en trillingsmetingen in de bodem tot meer inzicht kan leiden en eventueel kan worden ingezet in de praktijkproef waar het effect van wielonrondheid wordt onderzocht. Aan het voertuig bestaat de mogelijkheid om aspotversnellingsmeters te plaatsen die ter plaatse van de as de versnellingen meten. Om inzicht te krijgen in wat een combinatie van aspotversnellingen en bodemtrillingen voor inzicht geeft is in dit onderzoek reeds bestaande data onderzocht.

De reeds bestaande data betreft data niet afkomstig van goederentreinen maar van reizigersmaterieel. Op de A2 corridor zijn namelijk bodemtrillingen gemeten en heeft de InfraMon trein van Ricardo Rail gelijktijdig aspotversnellingen gemeten. De InfraMon trein betreft een intercity van het type VIRM. Daarmee konden op korte termijn, zonder het uitvoeren van metingen, inzichten verkregen worden die binnen verschillende onderdelen van de Innovatieagenda Bronaanpak Spoortrillingen kunnen worden toegepast.

### 1.2 Doelstelling

Het doel van het onderzoek wordt in onderstaand kader verwoord.

Het doel van het onderzoek is om met al beschikbare data te onderzoeken of het combineren van aspotversnellingsmetingen en bodemtrillingsmetingen kan leiden tot meerwaarde en nieuwe inzichten in het ontstaan van trillingen met specifieke aandacht voor wielonrondheid. Daarnaast wordt onderzocht of aspotversnellingsmetingen gebruikt kunnen worden om trillingsgevoelige locaties in het spoor te identificeren. Als laatste levert dit onderzoek input voor de pilot Wielonderhoud binnen de Innovatieagenda.

---

<sup>1</sup> Meerjarenprogramma duurzaamheid, par. 3.2.5 Doel 2020.

### 1.3 Structuurbeschrijving

Hoofdstuk 2 beschrijft de beschikbare meetdatasets. In hoofdstuk 3 wordt vervolgens ingegaan op hoe de meetlocaties en de InfraMon treinpassages zijn geselecteerd. Speciale aandacht wordt gegeven aan het bepalen van het juiste tijdsinterval. Hoofdstuk 4 beschrijft de resultaten van het onderzoek. Vervolgens gaat hoofdstuk 5 in op de verwachte verschillen tussen VIRM voertuigen en goederentreinen en wat voor mogelijke consequenties dit heeft met het oog op een pilot met goederenvervoer en de in deze studie gevonden resultaten. Het rapport sluit af met conclusies en aanbevelingen in hoofdstuk 6.

# 2

## BESCHIKBARE DATASETS

### 2.1 Selectie 3 meetlocaties

Door ProRail zijn meetdatasets beschikbaar gesteld van trillingsmetingen langs de A2-corridor op meer dan 10 verschillende locaties. De meetdatasets zijn afkomstig van verschillende meetcampagnes waarbij voor alle meetsets geldt dat er 2-3 maanden lang is gemeten. Van de beschikbare locaties zijn er drie geselecteerd om in het onderzoek mee te nemen. Bij de selectie van meetlocaties is een aantal selectiecriteria toegepast:

- Verscheidenheid in type grondopbouw, ten minste 1 locatie zandgrond en 1 locatie klei/veen grond;
- Zoveel mogelijk tweesporige situatie zodat het selecteren van passages over het dichtstbijzijnde spoor eenduidig is op basis van rijrichting;
- Zoveel mogelijk variatie in rijsnelheid;
- Zo ver mogelijk weg van andere bronnen zoals wegverkeer;
- Minimaal 20 passages van de InfraMon trein met aspotversnellingsmeters ten tijde van de meetperiode.

Door voor een aantal locaties de bodemopbouw, het aantal passages van de InfraMon trein tijdens de meetperiode en de variatie in rijsnelheid te bepalen in combinatie met de lokale situatie te bepalen volgde de volgende drie locaties:

- Locatie Schalkwijk;
- Locatie Orthen;
- Locatie Den Bosch Zuid;

Op de drie locaties wordt afzonderlijk ingegaan in de volgende paragraaf.

### 2.2 Beschikbare datasets bodemtrillingen

#### Meetlocatie Schalkwijk

In 2018 is op een locatie langs het spoor ten zuiden van Schalkwijk gemeten over een periode van 3 maanden. Van de meetdata zijn naast trillingsmetingen ook videobeelden beschikbaar. In Tabellen 1 en 2 wordt de exacte meetlocatie en de meetperiodes gegeven.

Tabel 1. Eigenschappen meetlocatie Schalkwijk

| Meetlocatie             | Kilometrering | Afstand trillingsmeter tot aan buitenste spoorstaaf [m.] |
|-------------------------|---------------|----------------------------------------------------------|
| Onderstation Schalkwijk | 14.4          | 18                                                       |

Tabel 2. Begin- en einddata trillingsmetingen 2018 Schalkwijk

|            | Schalkwijk |
|------------|------------|
| Begindatum | 13-03-2018 |
| Einddatum  | 12-06-2018 |

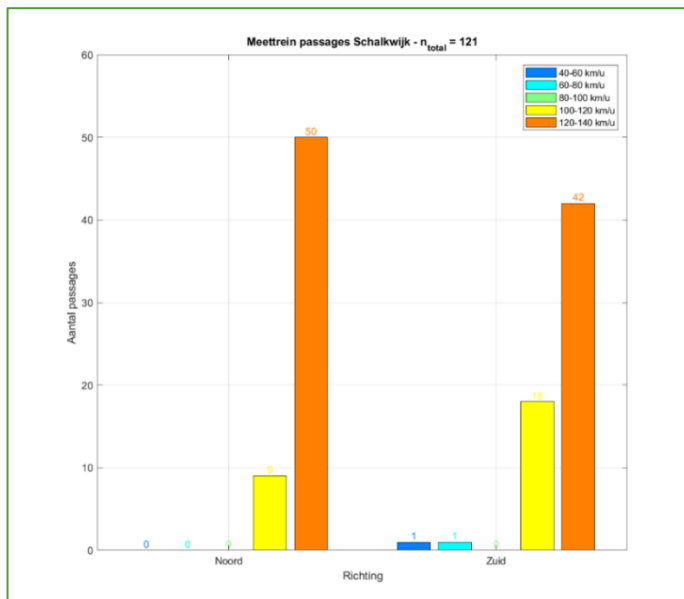
In Figuur 2.1 wordt de meetlocatie op een kaart weergegeven. De meetlocatie is nabij een onderstation waar sprake is van een tweesporige situatie. Ten zuiden van het meetpunt is een overweg aanwezig. De rijksnelheid van de InfraMon trein ter plaatse van de meetlocatie lag meestal tussen de 120 en 140 km/h zoals weergegeven in Figuur 2.2. In Figuur 2.2 wordt de rijksnelheid van alle passages van de InfraMon trein gedurende de meetperiode weergegeven. Van deze passages zijn er een aantal geselecteerd waar in het volgende hoofdstuk op wordt ingegaan. De bodemopbouw ter plaatse van Schalkwijk kenmerkt zich door de bovenste 7-8 meter klei en veenlagen. Door de aanwezige klei- en veenlagen wordt verwacht dat de bodem zich relatief slap gedraagt.

Figuur 2.1 Meetlocatie Schalkwijk (kaartbron: ProRail BBK)





Figuur 2.2 Verdeling rijksnelheid van alle passages InfraMon trein t.p.v. meetlocatie Schalkwijk tijdens meetperiode



### Meetlocatie Orthen

Van eind 2019 tot begin 2020 is op een locatie langs het spoor nabij Orthen gemeten over een periode van 2 maanden. Ook van deze meetdata zijn naast trillingsmetingen ook videobeelden beschikbaar. In Tabellen 3 en 4 wordt de exacte meetlocatie en de meetperiodes gegeven. Op te merken valt dat de meetlocatie aan de andere zijde van het spoor is gelegen dan de meetlocatie Schalkwijk. Ter plaatse van Orthen lag de meetlocatie aan de oostzijde, terwijl in Schalkwijk de locatie aan de westzijde lag.

Tabel 3. Eigenschappen meetlocatie Orthen

| Meetlocatie         | Kilometrerig | Afstand trillingsmeter tot aan buitenste spoorstaaf [m.] |
|---------------------|--------------|----------------------------------------------------------|
| Onderstation Orthen | 45.735       | 25                                                       |

Tabel 4. Begin- en einddata trillingsmetingen 2019 Orthen

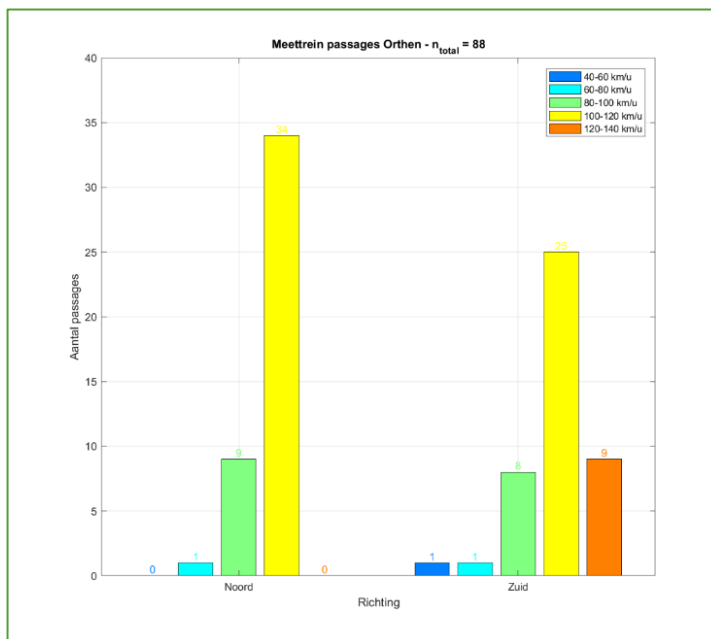
|           | Orthen     |
|-----------|------------|
| Binddatum | 18-12-2019 |
| Einddatum | 12-02-2020 |

In Figuur 2.3 wordt de meetlocatie op een kaart weergegeven. De meetlocatie is nabij een onderstation waar sprake is van een tweesporige situatie. Ten zuiden van het meetpunt is een overweg aanwezig. De rijksnelheid de InfraMon trein ter plaatse van de meetlocatie lag meestal tussen de 100 en 120 km/h zoals weergegeven in Figuur 2.4. De bodemopbouw ter plaatse van de meetlocatie in Orthen kenmerkt zich door de bovenste 3 meter klei waaronder fijn zand wordt aangetroffen. Door de relatief dunne kleilaag en daaronder fijn stijf zand wordt verwacht dat de bodem zich stijf gedraagt.

Figuur 2.3 Meetlocatie Orthen (kaartbron: ProRail BBK)



Figuur 2.4 Verdeling rijnsnelheid van alle passages InfraMon trein t.p.v. meetlocatie Orthen tijdens meetperiode



### Meetlocatie Den Bosch Zuid

In dezelfde periode als de meetlocatie Orthen, namelijk van eind 2019 tot begin 2020, is op een locatie langs het spoor nabij de Willem van Oranjelaan in Den Bosch gemeten. Ook van deze meetdata zijn naast trillingsmetingen ook videobeelden beschikbaar. In Tabellen 5 en 6 wordt de exacte meetlocatie en de meetperiodes gegeven.

Tabel 5. Eigenschappen meetlocatie Den Bosch Zuid

| Meetlocatie              | Kilometrerings | Afstand trillingsmeter tot aan buitenste spoorstaaf [m.] |
|--------------------------|----------------|----------------------------------------------------------|
| Willem van Oranjelaan 33 | 49,045         | 26                                                       |

Tabel 6. Begin- en einddata trillingsmetingen 2018 Schalkwijk

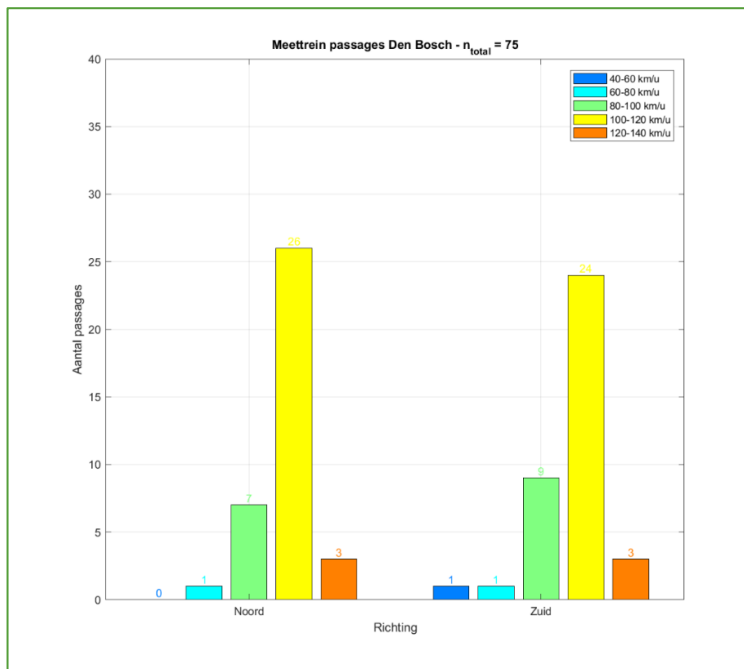
|            | Schalkwijk |
|------------|------------|
| Begindatum | 18-12-2019 |
| Einddatum  | 12-02-2020 |

De meetlocatie ligt ten zuiden van station Den Bosch op een verhoogde spoordijk. Er is op deze locatie sprake van een driesporige situatie. De meetlocatie ligt ten oosten van de sporen. Dit wordt weergegeven in Figuur 2.5. De bodemopbouw kenmerkt zich door de bovenste 2-3 meter klei, waaronder fijn zand wordt aangetroffen. Door de relatief dunne kleilaag en daaronder fijn stijf zand wordt verwacht dat de bodem zich stijf gedraagt.

Figuur 2.5 Meetlocatie Den Bosch Zuid (kaartbron: ProRail BBK)



Figuur 2.6 Verdeling rijnsnelheid van alle passages InfraMon trein t.p.v. meetlocatie Den Bosch Zuid tijdens meetperiode



### 2.3 Beschikbare dataset aspotversnellingen

Ricardo heeft het product InfraMon ontwikkeld waarmee de conditie van de infrastructuur vanuit reizigerstreinen gemeten wordt. In Nederland maakt Ricardo hiervoor gebruik van een VIRM trein die is voorzien van een permanent meetsysteem dat aspotversnellingen meet en opslaat. Data vanaf 2015 t/m begin 2021 is beschikbaar. Op dit moment is het meetsysteem niet meer actief, vanwege de modernisering van de VIRM trein serie waartoe de meettrein behoort.

Figuur 2.7 Foto van aspotversnellingsmeter



Op basis van gemeten aspotversnellingen worden spoorstaafkopafwijkingen (puntstukken, ES lassen, squats, golfslijtage) en geometrische ligging (hoogte, verkanting, schift, blinde vering) van het spoor bepaald. Daarnaast worden ook alle ruwe gemeten versnellingen bewaard voor doorontwikkeling van het product en onderzoek. Deze dataset met ruwe meetdata is gebruikt voor deze analyse.

De data bestaat uit:

- Verticale aspotversnellingen op alle vier aspotten van een draaistel;
- GPS positie en snelheid.

De specificatie staan in onderstaande tabel.

Tabel 7: Specificaties aspotversnellingsmeting

| Spec             | GPS                               | Aspotversnellingen                                   |
|------------------|-----------------------------------|------------------------------------------------------|
| Meetgrootheden   | Latitude<br>Longitude<br>Snelheid | Verticale versnellingen<br>(1 draaistel, 4 aspotten) |
| Samplefrequentie | 4Hz                               | 10kHz                                                |
| Bandbreedte      | nvt                               | 1.5Hz – 1.5kHz                                       |

# 3

## SELECTIE INFRAMON TREIN PASSAGES EN SIGNALEN

### 3.1 Selectie aspotversnellingsignalen

De VIRM met het meetsysteem is gewoon ingezet als reizigerstrein. Dit betekent dat de trajecten worden gemeten die tijdens de reguliere dienst worden bereden. In Figuur 3.1 is te zien wat dit betekent voor de dekking van trajecten in Nederland. Juist de A2 corridor, waar de trillingsmetingen zijn uitgevoerd, is een traject dat de VIRM veelvuldig rijdt en meet. Er zijn dan ook veel passages beschikbaar.

Figuur 3.1 Dekking van de aspotversnellingsmetingen



De selectie van de meetdata gebeurt in twee stappen:

- 1) Bepalen passagetijden  
Van alle ritten met de meettrein is met een tijdsinterval van 5 seconden bekend waar de metingen hebben plaatsgevonden. Zowel op basis van GPS als op basis van Geocode, km positie en spoornummer. Op basis van deze inventarisatie kan snel worden bepaald op welke tijdstippen de meettrein de meetlocaties is gepasseerd.
- 2) Uitlijnen van ruwe meetdata op het meetpunt.  
Voor elke passage is de ruwe meetdata ingelezen waarin de passage van het meetpunt zich bevindt. Op basis van de GPS data is bepaald op welk tijdstip de assen het meetpunt loodrecht passeren.

Data rondom het meetpunt is gebruikt voor de analyse. Het tijdsvenster is daarbij nog nader te kiezen. De verwachte nauwkeurigheid van de data-uitlijning is ca  $\pm 2$ m.

Voor de drie meetpunten zijn er in de meetperiode veel passages geweest. Deze aantallen staan in onderstaande tabel.

Tabel 8: Aantal treinpassages van de meettrein in de meetperiode

| Meetpunt   | Aantal passages (2 richtingen) |
|------------|--------------------------------|
| Schalkwijk | 119                            |
| Orthen     | 88                             |
| Den Bosch  | 82                             |

Er zijn versnellingen beschikbaar van vier aspoten. Voor de analyse zijn de versnellingen gebruikt van de aspoten van één as die daarbij zijn gemiddeld. De ervaring is dat de beide assen van een draaistel zeer vergelijkbare versnellingen opleveren. Zeker in het relatief lage frequentiegebied waarin we bodemtrillingen beoordelen.

## 3.2 Selectie signalen bodemtrillingen

Van alle drie de meetlocaties is van de InfaMon trein de passagetijd van alle passages bepaald. De InfaMon trein betreft een VIRM met treinnummer 9512. De passagetijd ter plaatse van de drie meetlocaties is in UTC-tijd beschikbaar en is om te kunnen koppelen aan de trillingsmeetdata omgezet naar lokale tijd. Vervolgens is gezocht of van de passages in de beschikbare meetdatasets van de bodemtrillingssignalen een bijbehorend trillingssignaal beschikbaar is. Hieruit bleek dat niet voor alle passagetijden van de InfaMon trein tijdens de meetperiode een duidelijk trillingssignaal beschikbaar is in de meetdataset. Ook bleek uit videobeelden dat in sommige gevallen er sprake was van een dubbelpassage. Uiteindelijk is een selectie gemaakt van trillingssignalen op basis van een aantal selectiecriteria:

- De InfaMon trein passeerde op het dichtst bijgelegen spoor;
- Er was geen sprake van een dubbelpassage;
- Van de passage was videobeeld beschikbaar.

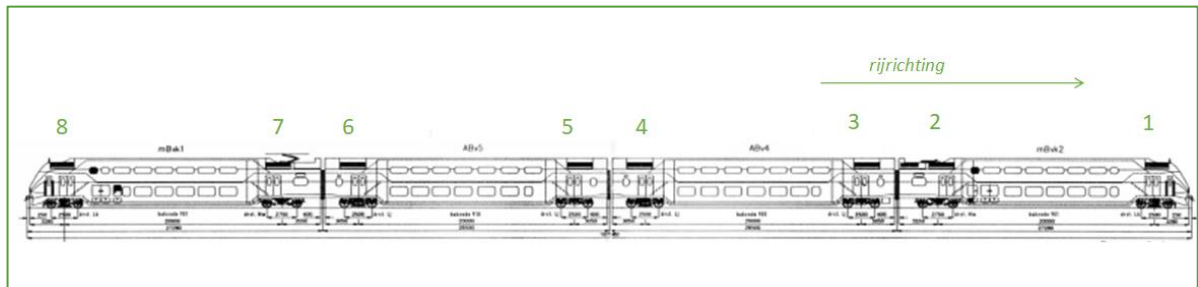
De bovenstaande criteria leidt per meetlocatie tot een set van gemeten trillingssignalen behorende bij de InfaMon VIRM passages. De lengtes van deze trillingssignalen variëren afhankelijk van de rijsnelheid, maar ook of er sprake is van een enkel treinstel of meerdere treinstellen. Voor de meeste passages bleek er sprake te zijn van één of twee treinstellen. Het tijdstip van de InfaMon trein (dat is het tijdstip dat de geïnstrumenteerde as de meetlocatie passeerde) bleek voor sommige signalen met één of twee minuten af te wijken van de lokale tijd die door de trillingsmeters is geregistreerd. Voor alle uiteindelijk geselecteerde passages zijn de passages gecheckt met videobeelden waarvan de tijd goed overeenkwam met de trillingsmeetdata.

### *Bepaling locatie as binnenin trillingssignaal*

Het vergelijken van een aspottrillingssignaal met het trillingssignaal in de bodem van de totale treinpassage geeft informatie over alle assen van de trein en de lokale toestand van het spoor. In dit onderzoek is echter de doelstelling om naar de invloed van de specifieke geïnstrumenteerde as te kijken. Daarom wordt gezocht naar een mogelijkheid om dit specifieke signaal zo veel als mogelijk te isoleren in de bodemtrillingssignalen.

Op basis van de gegevens van InfraMon is voor elke passage bekend welke as (en draaistel) met aspotversnellingsmeter is uitgerust. In Figuur 3.2 is een weergave gegeven van draaistelnummers. Per passage per meetlocatie is bekend of draaistel 7 of draaistel 2 was uitgerust met de aspotversnellingsmeters. Dit afhankelijk van de oriëntatie van het treinstel. Uit de data is echter niet bekend of de passage uit enkel treinstel 9512 bestaat of dat er sprake was van gecombineerde treinstellen. Ingeval van het tweede is ook niet bekend waar het treinstel 9512 zich bevond (eerste, tweede of derde treinstel). Dit maakte dat aanvullend gekeken moest worden naar videobeelden om te bepalen wanneer gedurende de passage het wielstel uitgerust met aspotversnellingsmeters passeerde.

Figuur 3.2 Definities draaistelnummer VIRM



Om het juiste tijdsvenster van het trillingsignaal te bepalen is per passages gekeken naar de videobeelden en is bepaald of op basis van het videobeeld achterhaald kon worden waar het treinstel 9512 zich in de combinatie bevond. Van alle passages waar dit voor geldt is het trillingssignaal meegenomen in het onderzoek en is op basis van het aantal treinstellen, de locatie van het treinstel 9512, de locatie van het wielstel uitgerust met de aspotversnellingsmeters en de totale tijdslenkte van het trillingssignaal bepaald op welk moment het draaistel met uitgerust met aspotversnellingsmeters moet zijn gepasseerd. Uiteindelijk is dit voor de meetlocaties Schalkwijk en Orthen voor 20 passages bepaald, maar voor Den Bosch Zuid voor 18 passages<sup>2</sup>. In Tabellen 9 t/m 11 worden voor de drie meetlocaties de passagetijden en bijbehorende rijsnelheden en oriëntatie gegevens weergegeven.

In de bepaling van het tijdstip van passeren is geen rekening gehouden met een tijdsverschil tussen spoor en bodemtrilling doordat de trilling zich over een afstand moet voortplanten. Dit tijdsverschil is verwaarloosbaar klein in verhouding tot de verschillen in tijdssynchronisatie (minder dan een halve seconde).

<sup>2</sup> Voor de meetlocatie Den Bosch Zuid bleek het relatief lastig het treinstel 9512 te herkennen uit de videobeelden waardoor voor een behoorlijk aantal passages niet kon worden bepaald welk van de twee treinstellen uitgerust was met aspotversnellingsmeters. Voor passages in de schemer- en nachtperiode was dit voor alle meetlocaties het geval.



Tabel 9. Schalkwijk

| Passagetijd (UTC)      | rijksnelheid | Aantal treinstellen<br>passage (o.b.v.<br>signaallengte en/of<br>video) | Treinstel<br>9512 (met<br>aspot) | Locatie aspot<br>in treinstel<br>9512** |
|------------------------|--------------|-------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------------|
| 2018-04-01 17:22:16.45 | 121          | 1                                                                       | 1                                | 7                                       |
| 2018-04-03 12:52:08.60 | 123          | 1                                                                       | 1                                | 7                                       |
| 2018-04-03 20:17:15.94 | 126          | 1                                                                       | 1                                | 7                                       |
| 2018-04-04 16:41:30.25 | 122          | 2                                                                       | 2                                | 7                                       |
| 2018-04-05 16:41:03.80 | 124          | 2                                                                       | 2                                | 7                                       |
| 2018-04-16 15:31:38.86 | 127          | 2                                                                       | 2                                | 7                                       |
| 2018-04-16 20:31:57.32 | 125          | 1                                                                       | 1                                | 7                                       |
| 2018-04-20 07:40:46.13 | 134          | 2                                                                       | 1                                | 7                                       |
| 2018-04-21 10:17:34.36 | 121          | 2                                                                       | 1                                | 7                                       |
| 2018-04-23 20:20:15.42 | 105          | 1                                                                       | 1                                | 7                                       |
| 2018-04-24 09:41:10.47 | 116          | 2                                                                       | 1                                | 7                                       |
| 2018-04-26 06:52:16.33 | 127          | 1                                                                       | 1                                | 7                                       |
| 2018-04-26 17:52:00.81 | 118          | 2                                                                       | 1                                | 7                                       |
| 2018-04-27 10:52:32.50 | 119          | 2                                                                       | 2                                | 7                                       |
| 2018-04-27 18:17:07.93 | 125          | 2                                                                       | 2                                | 7                                       |
| 2018-05-04 07:41:12.49 | 117          | 2                                                                       | 2                                | 7                                       |
| 2018-05-04 17:17:06.51 | 131          | 2                                                                       | 2                                | 7                                       |
| 2018-05-30 09:40:58.21 | 128          | 2                                                                       | 1                                | 7                                       |
| 2018-06-04 07:20:02.86 | 106          | 2                                                                       | 2                                | 7                                       |
| 2018-06-05 10:11:01.70 | 110          | 1                                                                       | 1                                | 7                                       |

\* Er is 2 uur tijdsverschil tussen lokale tijd trillingsmetingen en UTC tijd voor de locatie Schalkwijk. \*\* 7 betekent dat het 7<sup>e</sup> passerende draaistel het beïnsturmenteerde draaistel was.

Tabel 10. Orthen

| Passagetijd (UTC)      | rijksnelheid | Aantal treinstellen<br>passage (o.b.v.<br>signaallengte en/of<br>video) | Treinstel<br>9512 (met<br>aspot) | Locatie aspot<br>in treinstel<br>9512 |
|------------------------|--------------|-------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|
| 2019-12-21 07:50:14.45 | 105          | 1                                                                       | 1                                | 7                                     |
| 2019-12-22 08:26:04.10 | 113          | 1                                                                       | 1                                | 7                                     |
| 2019-12-22 15:50:33.19 | 101          | 1                                                                       | 1                                | 7                                     |
| 2019-12-24 07:10:22.52 | 110          | 2                                                                       | 2                                | 7                                     |
| 2019-12-24 13:40:40.96 | 101          | 2                                                                       | 2                                | 7                                     |
| 2019-12-27 11:50:00.38 | 111          | 1                                                                       | 1                                | 7                                     |
| 2019-12-28 10:04:37.52 | 113          | 2                                                                       | 2                                | 7                                     |
| 2019-12-28 17:00:16.56 | 109          | 1                                                                       | 1                                | 7                                     |
| 2020-01-03 07:20:16.58 | 97           | 2                                                                       | 2                                | 7                                     |
| 2020-01-04 09:50:03.69 | 111          | 1                                                                       | 1                                | 7                                     |
| 2020-01-04 17:20:12.44 | 103          | 1                                                                       | 1                                | 7                                     |
| 2020-01-06 19:26:57.47 | 111          | 1                                                                       | 1                                | 7                                     |
| 2020-01-07 05:25:53.64 | 108          | 1                                                                       | 1                                | 7                                     |
| 2020-01-07 12:50:23.60 | 94           | 1                                                                       | 1                                | 7                                     |
| 2020-01-10 08:30:46.05 | 80           | 1                                                                       | 1                                | 7                                     |
| 2020-01-10 15:30:09.96 | 105          | 2                                                                       | 2                                | 7                                     |
| 2020-01-21 07:50:16.24 | 107          | 2                                                                       | 2                                | 2                                     |
| 2020-01-23 14:00:06.45 | 110          | 2                                                                       | 2                                | 2                                     |
| 2020-01-26 10:01:11.78 | 111          | 2                                                                       | 2                                | 2                                     |
| 2020-01-26 13:56:57.83 | 111          | 2                                                                       | 2                                | 2                                     |

\* Er is 1 uur tijdsverschil tussen lokale tijd trillingsmetingen en UTC tijd voor de locatie Orthen

Tabel 11. Den Bosch Zuid

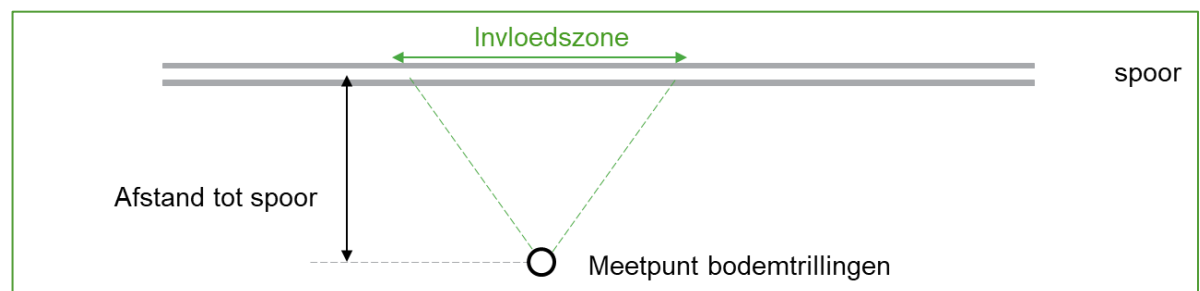
| Passagetijd (UTC)*     | rijksnelheid | Aantal treinstellen passage (o.b.v. signaallengte en/of video) | Treinstel 9512 (met aspot) | Locatie aspot in treinstel 9512 |
|------------------------|--------------|----------------------------------------------------------------|----------------------------|---------------------------------|
| 2019-12-21 07:44:10.05 | 69           | 1                                                              | 1                          | 7                               |
| 2019-12-21 15:13:55.14 | 85           | 1                                                              | 1                          | 7                               |
| 2019-12-22 08:20:30.77 | 71           | 1                                                              | 1                          | 7                               |
| 2019-12-24 13:34:04.02 | 70           | 2                                                              | 2                          | 7                               |
| 2019-12-27 11:43:40.29 | 81           | 1                                                              | 1                          | 7                               |
| 2019-12-28 09:59:43.67 | 84           | 2                                                              | 2                          | 7                               |
| 2019-12-28 16:52:43.96 | 73           | 1                                                              | 1                          | 7                               |
| 2020-01-04 09:43:34.00 | 78           | 1                                                              | 1                          | 7                               |
| 2020-01-04 17:14:02.73 | 78           | 1                                                              | 1                          | 7                               |
| 2020-01-06 19:21:35.44 | 95           | 1                                                              | 1                          | 7                               |
| 2020-01-07 05:21:21.90 | 79           | 1                                                              | 1                          | 7                               |
| 2020-01-07 12:44:29.60 | 87           | 1                                                              | 1                          | 7                               |
| 2020-01-10 08:23:10.99 | 84           | 1                                                              | 1                          | 7                               |
| 2020-01-21 07:43:11.80 | 80           | 2                                                              | 2                          | 2                               |
| 2020-01-23 21:20:17.71 | 77           | 1                                                              | 1                          | 2                               |
| 2020-02-05 15:04:08.29 | 74           | 3                                                              | 2                          | 2                               |
| 2020-02-09 10:22:02.29 | 83           | 1                                                              | 1                          | 7                               |
| 2020-02-10 05:46:36.68 | 70           | 1                                                              | 1                          | 7                               |

\* Er is 1 uur tijdsverschil tussen lokale tijd trillingsmetingen en UTC tijd voor de locatie Den Bosch Zuid

### 3.3 Te hanteren tijdsvenster in signalen

In de vorige paragrafen hebben we toegelicht voor welke treinpassages we aspotversnellingen en bodemtrillingen met elkaar gaan vergelijken. Voor deze vergelijking is het van belang om het juiste tijdsvenster te hanteren. Bij een te groot tijdsvenster zijn de gemeten bodemtrillingen het resultaat van een groot aantal passerende assen, niet alleen de as met de sensor. Bij een te klein tijdsvenster worden niet de alle aspotbewegingen meegenomen die tot uitdrukking komen in de bodemtrillingen. De vraag is dan ook: bij welk tijdsvenster verwachten we de beste relatie tussen de gemeten aspotversnellingen en bodemtrillingen?

Figuur 3.3 Schematische weergave invloedszone van een passerende aslast

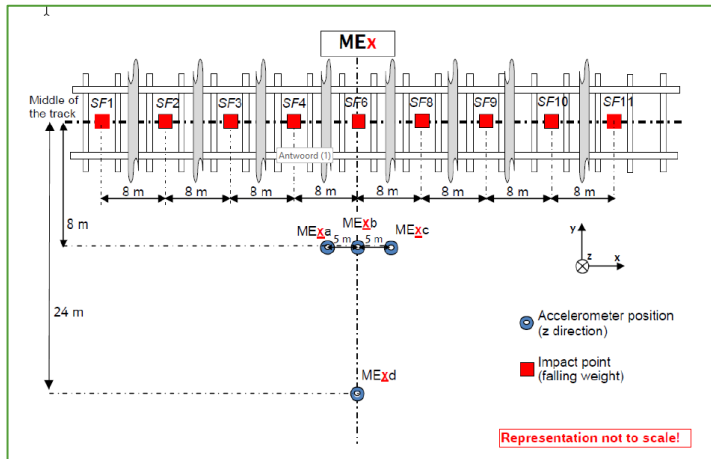


Om deze vraag te beantwoorden is gekeken naar onderzoek dat is gedaan door H. Brick [ref.9]. Daarbij is gekeken in hoeverre een trillingen vanaf verschillende locaties op het spoor bijdragen aan de gemeten bodemtrillingen op een locatie. Dit is de zogenaamde *Line Source Transfer Mobility*.

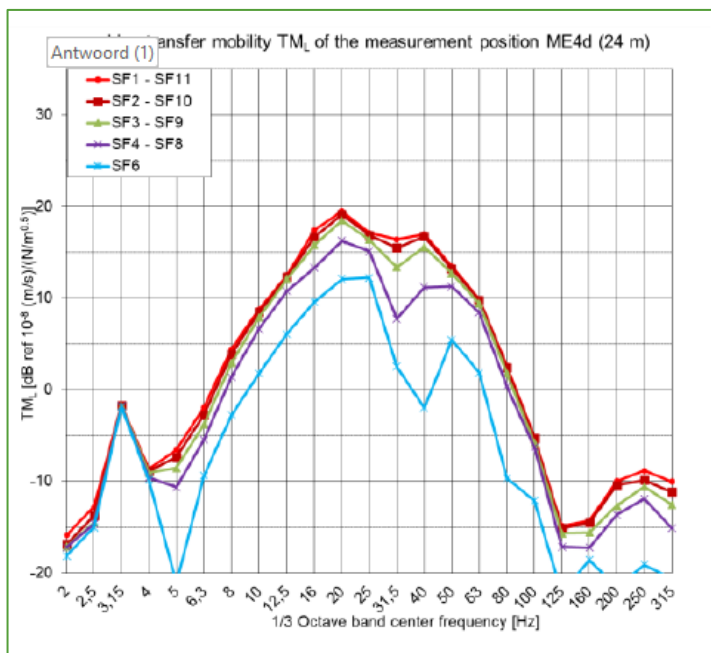
Ter verduidelijking staat in Figuur 3.4 de testopstelling van een van de twee testlocaties. Op de locaties SF1 t/m SF 11 is het spoor geëxciteerd met een valgewicht. Vervolgens is voor elk van die excitaties de response

gemeten op de locaties Mexb en Mexd. Met behulp van de individuele responses van SF1 t/m SF11 is de line transfer mobility bepaald.

Figuur 3.4 Testopstelling voor het bepalen van de Line Transfer Mobility (Locatie A) (bron: [ref.9])

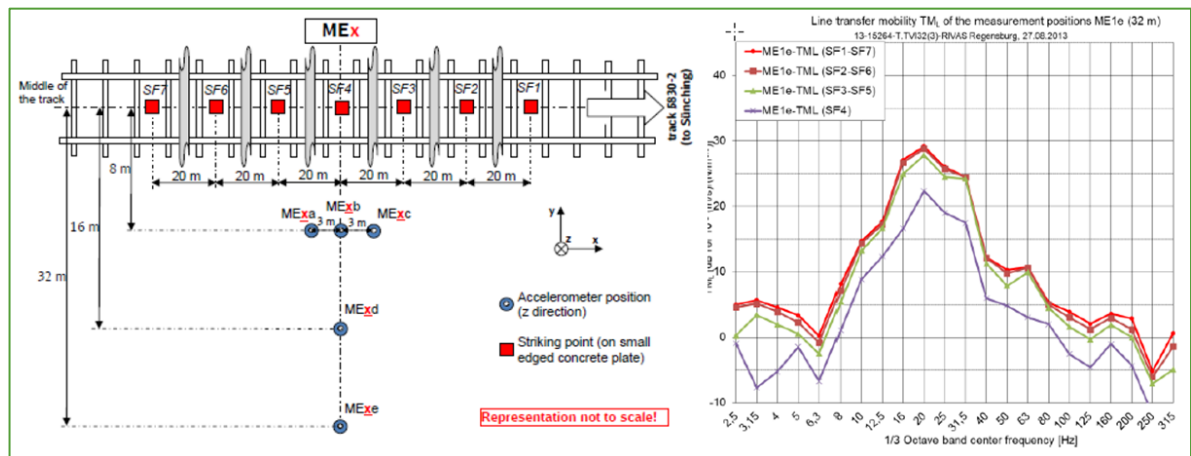


Figuur 3.5 Line Transfer Mobility voor locatie A (bron: [ref.9])



De transfer mobility in Figuur 3.5 laat zien wat de resulterende trillingen zijn bij sommatie van de verschillende responsies. De resultaten laten zien dat excitatie van de punten SF3 t/m SF9 nog bijdraagt aan het totale trillingsniveau. Excitatie op een grotere afstand voegen niks meer toe aan het totale trillingsniveau. De conclusie uit deze opstelling is dat bij een meetafstand van 24m tot het spoor de invloedszone ca 32m is. Dit een verhouding 1/1.5;

Figuur 3.6 Testopstelling en line transfer mobility van locatie B



Uit vergelijkbare metingen op een andere testlocatie (Figuur 3.6) volgt een vergelijkbare conclusie. Namelijk dat dat bij een meetafstand van 32m tot het spoor de invloedzone ca 40m is. Dit is een verhouding 1/1.25. Deze verhouding is iets groter, maar zeer vergelijkbaar.

Wanneer we er van uitgaand dat de invloedzone circa 1.5 keer de afstand tot het spoor is, kunnen we voor de drie meetlocaties die lengte van de invloedzone bepalen. Op basis van de gemiddelde rijnsnelheid kan vervolgens worden bepaald met welk tijdsvenster dit overeen komt. De resultaten daarvan staan in Tabel 12.

Tabel 12: Invloedzone en tijdsvenster voor de drie meetlocaties

| Locatie    | Afstand tot spoor | Invloedzone | Tijdsvenster    |
|------------|-------------------|-------------|-----------------|
| Schalkwijk | 18.7m             | 28m         | 0.8s (120 km/u) |
| Orthen     | 25m               | 37.5m       | 1.3s (105 km/u) |
| Den Bosch  | 26m               | 39m         | 1.8s (80 km/u)  |

We zien hier dat de tijdsvensters variëren van 0.8s voor Schalkwijk tot 1.8s voor Den Bosch. Met deze tijdsventers zouden we in theorie de beste correlatie moeten krijgen tussen de trillingsmetingen en de aspotversnellingen.

In praktijk spelen ook nog andere aspecten een rol bij de keuze van het tijdsvenster. Ten eerste hebben we te maken met enige mate van onzekerheid in de synchronisatie tussen de trillingsmeting en de aspotversnellingsmetingen. Deze onzekerheid is ontstaan doordat de interne klokken van de trillingsmeetopstelling en de aspotversnellingsmeetopstelling niet gesynchroniseerd zijn geweest. Hierdoor kan niet precies hetzelfde tijdsvenster worden geselecteerd in de aspotversnellingen als in de trillingsmeting.

Tegelijkertijd is de verwachting dat elke as van een VIRM het spoor op gelijke wijze exciteert. Gezien de lengte van de invloedzone en de onderlinge afstand van de assen, zijn de gemeten trillingen dan sowieso het resultaat van de excitatie van tenminste vier assen. Om die reden is het vooral van belang dat de aspotversnellingen goed zijn gepositioneerd ten opzichte van het meetpunt zodat de juiste spoorexcitatie wordt meegenomen. Het is minder van belang dat de synchronisatie van de trillingsmeting correct is omdat handmatig het begin en het einde van het signaal en de locatie van de gemeten as zijn bepaald

Uiteindelijk is er gekozen om een twee tijdsvensters te hanteren. In eerste instantie is uitgegaan van een 2seconden-interval. Vervolgens zijn de resultaten ook een voor 1seconde-interval bepaald en vergeleken met een 2seconden-interval. Deze aanpak is gekozen omdat de rijnsnelheid op de drie meetlocaties varieerde. Door de twee intervallen te vergelijken wordt een beeld verkregen in hoeverre het verschil in grootte invloed heeft

op de resultaten. Omdat de InfraMon trein goed onderhouden wordt is er naar verwachting weinig variatie in de verschillende wielen en aslasten te verwachten waardoor mogelijk de invloed beperkt is.

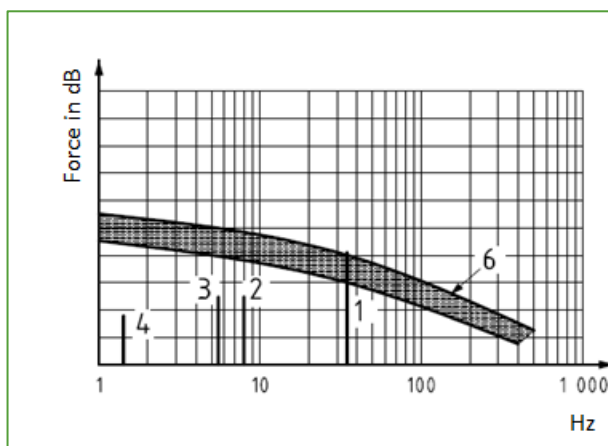
# 4

## RESULTATEN ONDERZOEK

### 4.1 Inventarisatie van verschillende bronmechanismen

In de bespreking van de resultaten van het onderzoek worden een aantal verschillende bronmechanismen aangehaald. In deze paragraaf worden daarom de verschillende bronmechanismen besproken. Bij een treinpassage is er een aantal verschillende mechanismen aan te wijzen die tot dynamische belasting en uiteindelijk trillingen in de bodem leiden. Deze verschillende mechanismen kennen vaak een specifiek frequentiegebied wat mede afhangt van de rijsnelheid van de trein. In de ISO-norm ISO14837-1 (2005) wordt een grafische weergave en uitleg gegeven van verschillende mechanismen en het bijbehorende verwachte frequentiegebied voor twee verschillende rijsnelheden. Figuur 4.1 geeft dit weer voor 80 km/h. De uitleg behorende bij de nummers in Figuur 4.1 wordt gegeven in Tabel 13. De in Tabel 13 genoemde mechanismen is geen volledige lijst en de dynamische eigenschappen van voertuig in combinatie met de spoorbaan zijn van belang. In hoofdstuk 5 wordt hier nader op ingegaan.

Figuur 4.1 Verschillende bronmechanismes en verwachte bijbehorende frequenties (ISO14837-1) bij rijsnelheid 80 km/u.



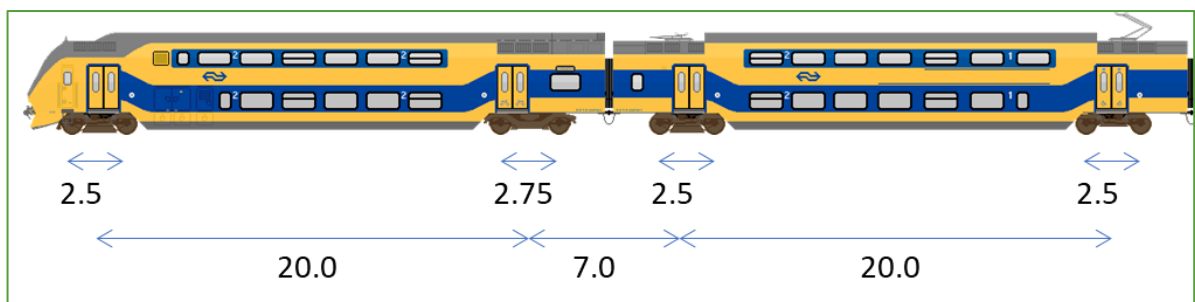
Tabel 13. Beschrijving bronmechanismen behorende bij Figuur 4.1

| nummer | Beschrijving mechanisme                                        |
|--------|----------------------------------------------------------------|
| 1      | passeren over dwarsliggers                                     |
| 2      | passeren verschillende aslasten van zelfde draaistel           |
| 3      | passeren verschillende aslasten van verschillende draaistellen |
| 4      | passeren verschillende aslasten van zelfde voertuig            |
| 6      | wiel- en railruwheid                                           |

#### 4.1.1 Passages aslasten

De passage van aslasten resulteert in trillingen in de bodem op verschillende wijzen. Enerzijds resulteren de passerende statische vervormingsvelden van de aslasten tot een trillingssignaal (de zogenaamde quasi-statische component) en anderzijds resulteert het passeren van aslasten bij een onregelmatigheid in het spoor zoals een wissel of ES-las maar ook het passeren over de dwarsliggers tot een dynamische belasting (de dynamische component). De afstand van de verschillende aslasten tot elkaar en de rijsnelheid hebben voor beide componenten invloed op de frequentie-inhoud. In Figuur 4.2 worden de afstanden van de draaistellen tot elkaar weergegeven.

Figuur 4.2 Afstanden draaistellen VIRM



In Tabel 14 is voor de verschillende afstanden tussen de assen op basis van de rijsnelheid geschat welke frequentie-inhoud in het trillingssignaal verwacht kan worden. Hierbij is ook de verwachte frequentie-inhoud gegeven van het passeren over de dwarsliggers en onregelmatigheden van de wielonrondheid (enkel de eerste orde).

Tabel 14. Verwachte frequentie trillingssignaal in Hz als gevolg van asafstanden bij verschillende rijsnelheden

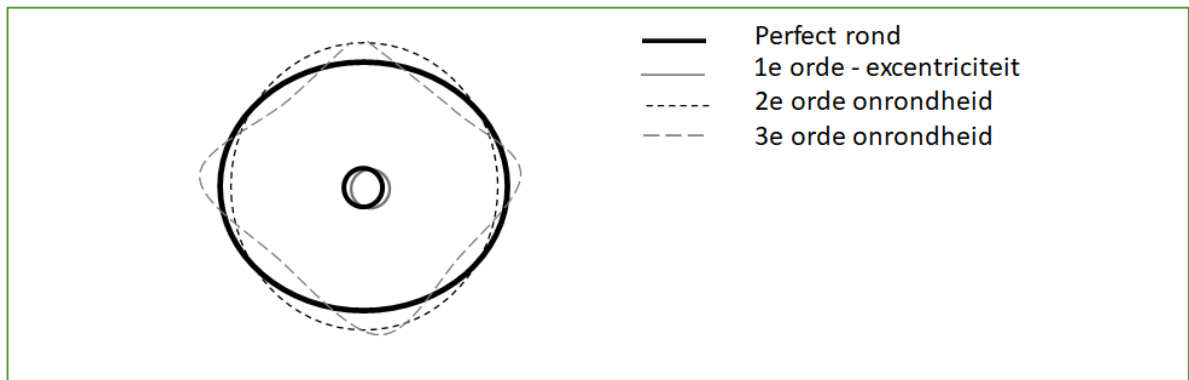
| rijsnelheid | Astand tussen assen binnen draaistel (2.5m) | Afstand tussen draaistellen kort (7.0m) | Afstand tussen draaistellen lang (20m) | Afstand tussen dwarsligger (0,6m) | Wielomtrek (2,82m) |
|-------------|---------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| 50          | 5.56                                        | 1.98                                    | 0.69                                   | 23.14                             | 4.91               |
| 60          | 6.67                                        | 2.38                                    | 0.83                                   | 27.77                             | 5.89               |
| 70          | 7.78                                        | 2.78                                    | 0.97                                   | 32.40                             | 6.87               |
| 80          | 8.89                                        | 3.17                                    | 1.11                                   | 37.03                             | 7.85               |
| 90          | 10.00                                       | 3.57                                    | 1.25                                   | 41.66                             | 8.84               |
| 100         | 11.11                                       | 3.97                                    | 1.39                                   | 46.2                              | 9.82               |
| 110         | 12.22                                       | 4.37                                    | 1.53                                   | 50.92                             | 10.81              |
| 120         | 13.33                                       | 4.76                                    | 1.67                                   | 55.55                             | 11.78              |
| 130         | 14.44                                       | 5.16                                    | 1.81                                   | 60.18                             | 12.77              |
| 140         | 15.56                                       | 5.56                                    | 1.94                                   | 64.81                             | 13.75              |

Voor de optredende trillingsignalen in de bodem geldt dat voor de in Tabel 14 getoonde frequenties een zekere bandbreedte te verwachten is in verband met het Dopplereffect. Daarnaast geldt ook dat wanneer naar het passeren van het quasi-statische vervormingsveld gekeken wordt dit naar verwachting wel in de bodemtrillingen wordt teruggevonden, maar dit zou niet in de aspotversnellingsmetingen teruggevonden moeten worden. Bij enkel een quasi-statisch vervormingsveld bewegen de assen immers niet in verticale richting.

#### 4.1.2 Wielonrondheid

Wordt naar wielonrondheid gekeken (en niet zozeer ruwheid), dan kan op basis van de omtrek en de orde van de onrondheid een schatting van frequentie worden gekregen afhankelijk van de rij snelheid. In Figuur 4.3 wordt schetsmatig twee ordes van onrondheid weergegeven.

Figuur 4.3 Verschillende ordes wielonrondheid (in Engels wordt gesproken van out-of-roundness (OOR))



Wordt uitgegaan van een rij snelheid van 90 km/h dan volgen voor de verschillende ordes onrondheid de frequenties zoals gegeven in Tabel 15.

Tabel 15. Frequenties optredend trillingssignaal bij orde onrondheid uitgaande van snelheid 90 km/h (=25 m/s) en wieldiameter 840 mm en 920 mm (zonder Dopplereffect)

| Orde wielonrondheid | Wieldiameter 840 mm | Wieldiameter 920 mm* |
|---------------------|---------------------|----------------------|
| 1 <sup>e</sup> orde | 9,5 Hz              | 8,6 Hz               |
| 2 <sup>e</sup> orde | 18,9 Hz             | 17,3 Hz              |
| 3 <sup>e</sup> orde | 28,4 Hz             | 26,0 Hz              |

\*De wielomtrek van de VRIM bedraagt 920 mm

#### 4.1.3 Baanonregelmatigheden

Hoogteafwijkingen van het spoor resulteren in een dynamische belasting van de baan. De resulterende wiel-rail krachten leiden tot trillingen van de bodem.

De hoogteafwijkingen zoals de trein die ziet tijdens de passage komen tot uitdrukking in de gemeten aspotversnellingen. Het wiel, met aspot, volgt namelijk deze verticale afwijking van het spoor. Vanuit de



aspotversnellingen kan de verticale ligging ook worden berekend, door de versnellingen te integreren naar verplaatsingen.

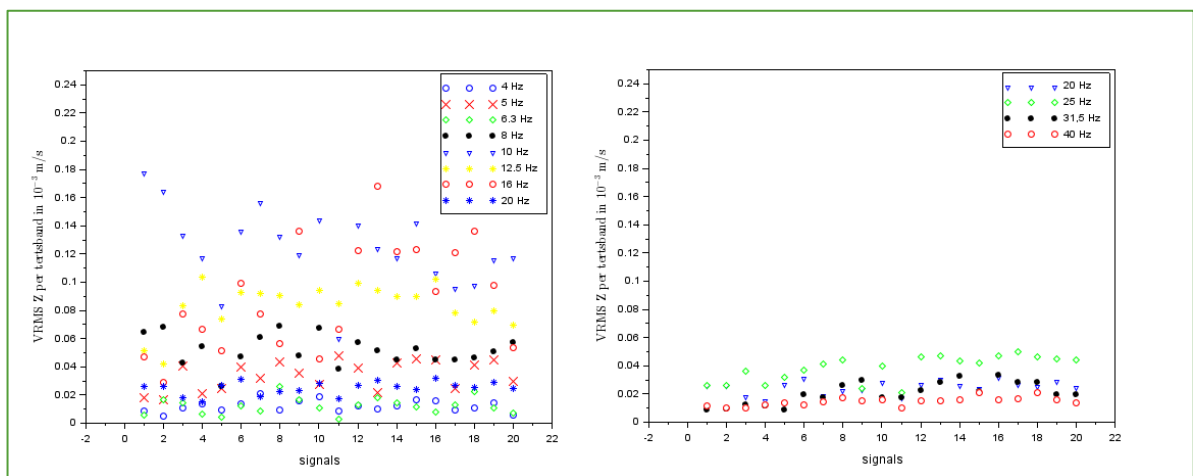
In dit onderzoek hebben we gekeken naar trillingen met een frequentie tussen de 4Hz en 40Hz. Wanneer we uitgaan van een rijsnelheid van ca. 100 km/u voor VIRM, komt die overeen met een golflengtebereik van 0.7m tot 7m. In vergelijking tot de golflengtes waarop het spoor wordt onderhouden (3m tot 70m) zijn deze golflengtes relatief kort.

Een bijzondere in deze is de dwarsliggerafstand van 0.6m. Deze valt niet onder de baanonegelmaticheden. De stijfheidsvariates die deze oplegging veroorzaakt zijn echter wel degelijk zichtbaar in de aspotversnellingen. In die zin kan de dwarsliggerafstand ook worden gezien als een baanonegelmaticheid (zie Tabel 14 voor verwachte frequenties).<sup>3</sup>

## 4.2 Gemeten niveaus aspotversnelling en bijbehorende bodemtrilling

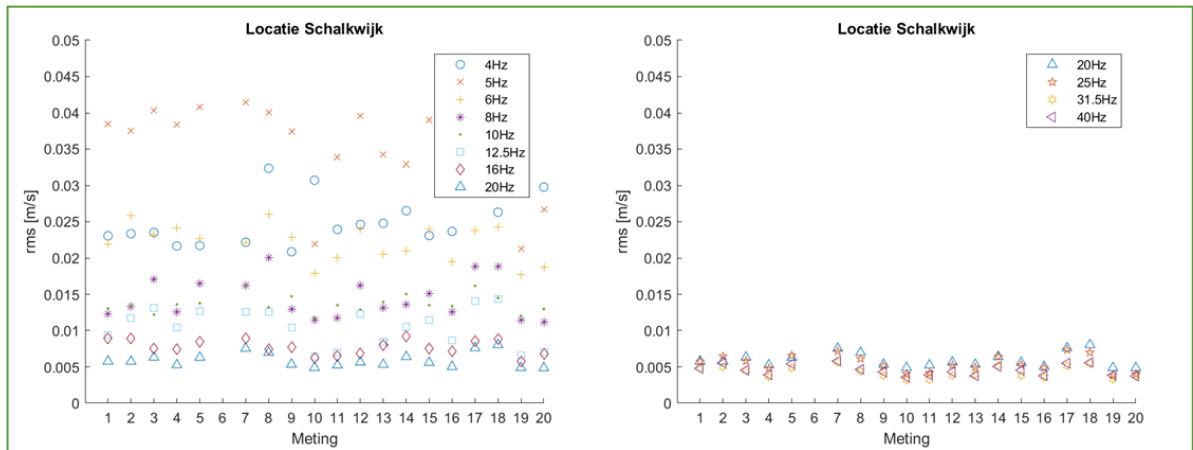
Als eerste stap is in het onderzoek gekeken naar de trillingsinhoud van de verschillende frequentiebanden van zowel de bodemtrillingen als aspotversnellingen afzonderlijk. De aspotversnellingen zijn daarbij omgezet naar snelheden. Hierbij is gekeken naar de tertsbanden 4,5,6,8,10,12.5, 15, 20, 25, en 31.5 Hz. Per passage wordt het trillingsniveau  $V_{rms}$  in de bodem en aan de as weergegeven. Figuur 4.4 en Figuur 4.5 geeft de resultaten voor meetlocatie Schalkwijk. Figuur 4.6 en 4.7 geeft de resultaten voor de meetlocatie Orthen en Figuur 4.8 en 4.9 geeft de resultaten voor de meetlocatie Den Bosch Zuid.

Figuur 4.4  $V_{rms}$  in bodem per tertsband per passage (2seconde-interval), meetlocatie Schalkwijk, verticale meetrichting Z

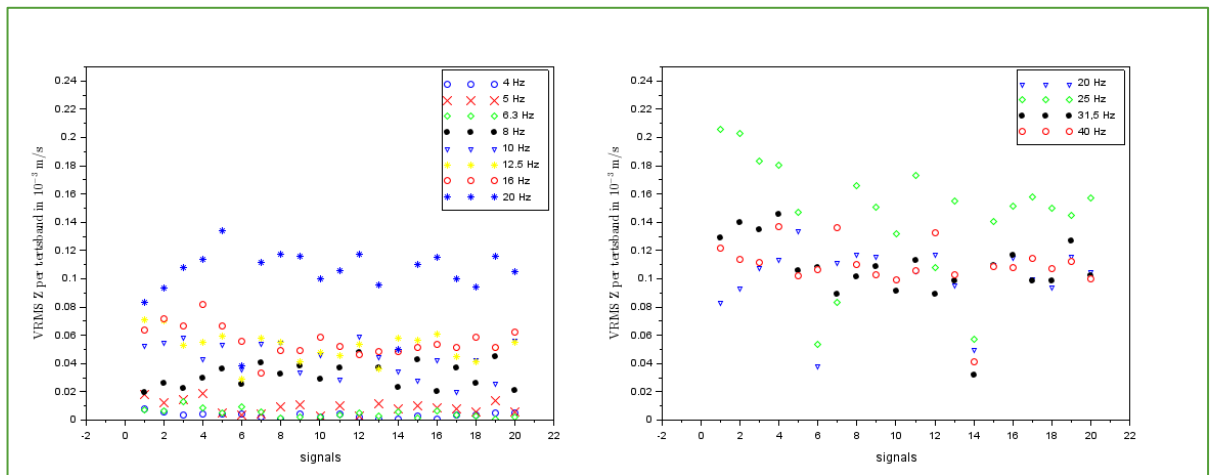


<sup>3</sup> De aspotversnellingsopnemers registreren de variates als gevolg van dwarsliggers dan ook als een baanonegelmaticheid.

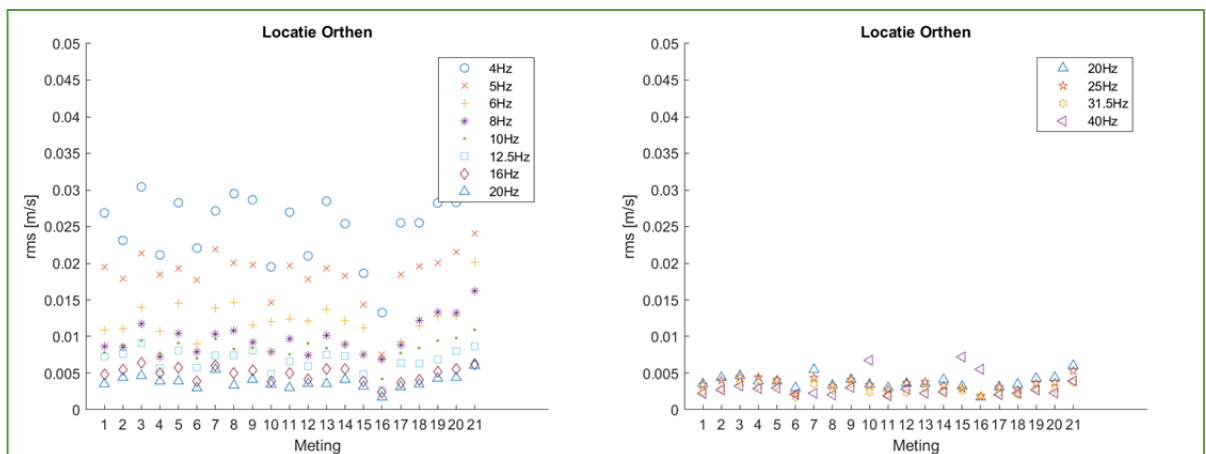
Figuur 4.5 Vrms aspot per tertsuband per passage (2seconde-interval), meetlocatie Schalkwijk



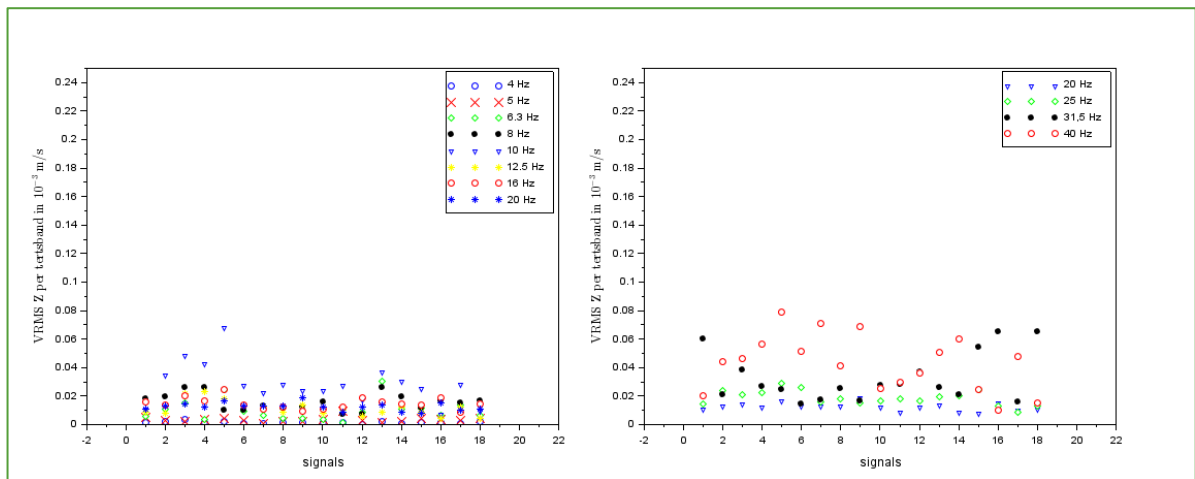
Figuur 4.6 Vrms per tertsuband per passage (2seconde-interval), meetlocatie Orthen, verticale meetrichting Z



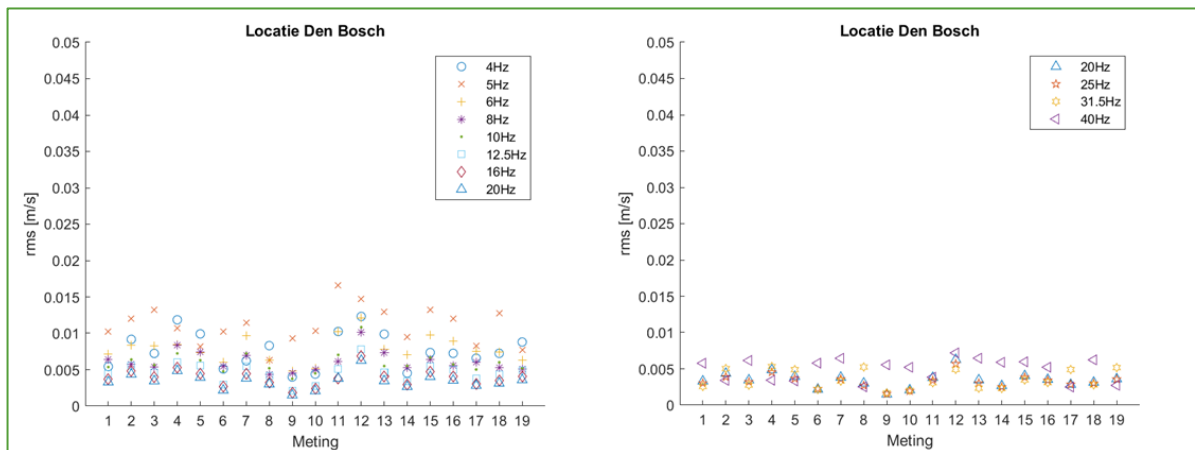
Figuur 4.7 Vrms aspot per tertsuband per passage (2seconde-interval), meetlocatie Orthen



Figuur 4.8 Vrms per tertsband per passage (2seconde-interval), meetlocatie Den Bosch Zuid, verticale meetrichting Z



Figuur 4.9 Vrms aspot per tertsband per passage (2seconde-interval), meetlocatie Den Bosch Zuid



Uit de Figuren 4.2 t/m 4.6 blijkt dat de frequentie-inhoud van de trillingen gemeten in de bodem een andere verdeling kent dan gemeten aan de assen van de trein. Zo blijkt bijvoorbeeld dat de bodemtrillingen in Schalkwijk maatgevende frequenties rond de 10 Hz, 12,5 en 15 Hz tonen, terwijl aan de as ronde de 4,5 en 6 Hz de hoogste niveaus zijn gemeten. Voor de locatie Orthen wordt in de bodemtrillingen hogere frequentie-inhoud gevonden, namelijk 20, 25 en 31,5 Hz. Voor de meetlocatie Den Bosch Zuid liggen de gemeten trillingsniveaus laag ten op zichte van de andere twee locaties. Dit geldt voor zowel de niveaus gemeten aan de bodem als aan de as van de trein. Dit heeft naar verwachting mede als oorzaak de lage rijsnelheid ter plaatse van Den Bosch Zuid waar in de volgende paragraaf op wordt ingegaan.

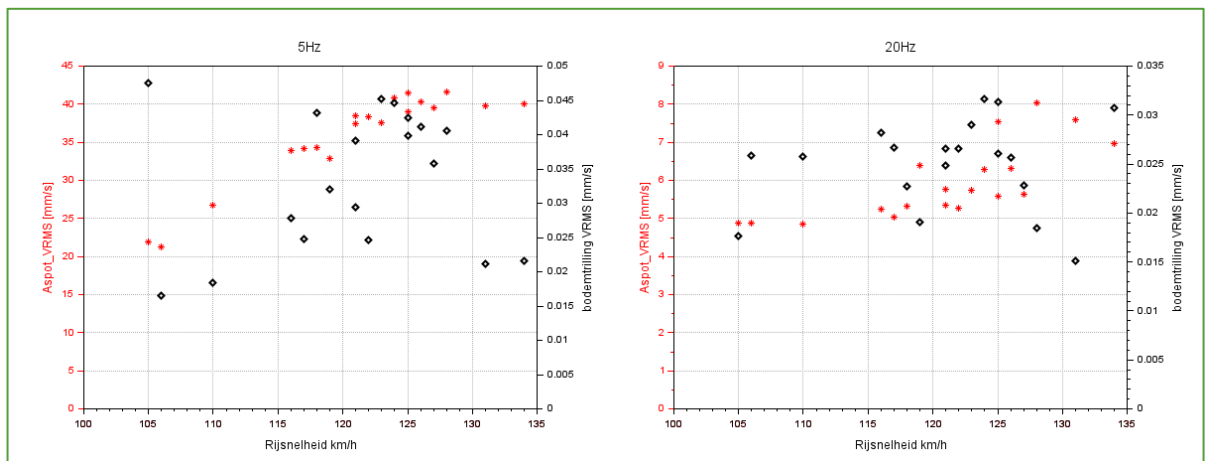
### 4.3 Aspotversnellingsdata en bodemtrilling uitgezet tegen rijsnelheid

Van verschillende trillingsmechanismen in de bodem alsook aan de as is de verwachting dat er een relatie met de rijsnelheid is. Per frequentieband per treinpassages is daarom het gemeten trillingsniveau in de bodem (Vrms) en de aspotversnelling omgezet naar snelheid (Vrms) uitgezet tegen de rijsnelheid van alle passages. In bijlage III worden de resultaten voor alle frequentiebanden gegeven voor de drie meetlocaties. De resultaten worden weergegeven voor zowel een 2seconden-interval (bijlage III) als voor een 1seconde-interval (bijlage

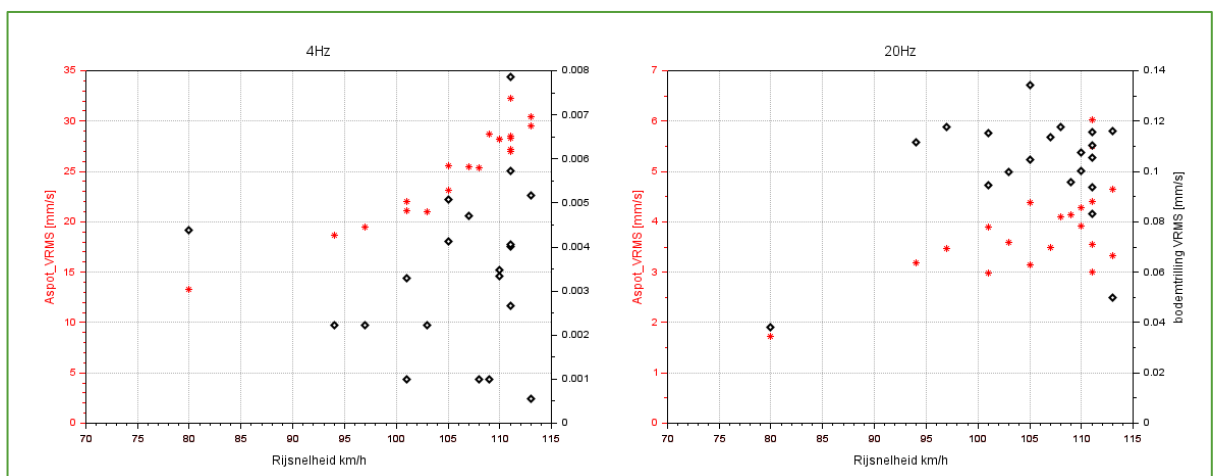
IV). De verschillen blijken klein. In deze paragraaf worden de resultaten van het 2seconden-interval gepresenteerd.

Uit de resultaten blijkt voor sommige frequentiebanden een duidelijkere relatie met rijsnelheid dan voor andere banden. Voor welke frequentiebanden dit is blijkt ook te verschillen tussen meetlocaties. Daarbij lijkt de relatie tussen aspotversnelling (of snelheid) en rijsnelheid sterker aanwezig dan voor de bodemtrillingen. Voor de frequentieband 5 Hz worden de resultaten in Figuur 4.10 weergegeven voor de locatie Schalkwijk. Er is voor 5 Hz gekozen omdat deze frequentie wordt verwacht in het bodemtrillingssignaal als gevolg van de afstand van passerende draaistellen voor de rijsnelheden in Schalkwijk (zie ook paragraaf 4.1). Voor de tweede orde wielonrondheid (golflengte is halve wielomtrek) wordt inhoud in de 20 Hz band verwacht welke eveneens wordt weergegeven in Figuur 4.10.<sup>4</sup> Voor Orthen en Den Bosch zijn lagere rijsnelheden gemeten en wordt de 4 Hz band gepresenteerd in Figuur 4.11. en 4.12. Daarnaast wordt de 20 Hz band voor de locatie Orthen en de 15 Hz band voor de locatie Den Bosch Zuid gepresenteerd omdat voor deze banden inhoud als gevolg van tweede orde wielonrondheid wordt verwacht. Daarbij wordt opgemerkt dat er naar verwachting van beperkte wielonrondheid sprake zal zijn omdat de InfaMon trein goed wordt onderhouden.

Figuur 4.10 Vrms aspot (rood) en bodemtrilling (zwart) tegen rijsnelheid Schalkwijk (5 Hz links, 20 Hz rechts)

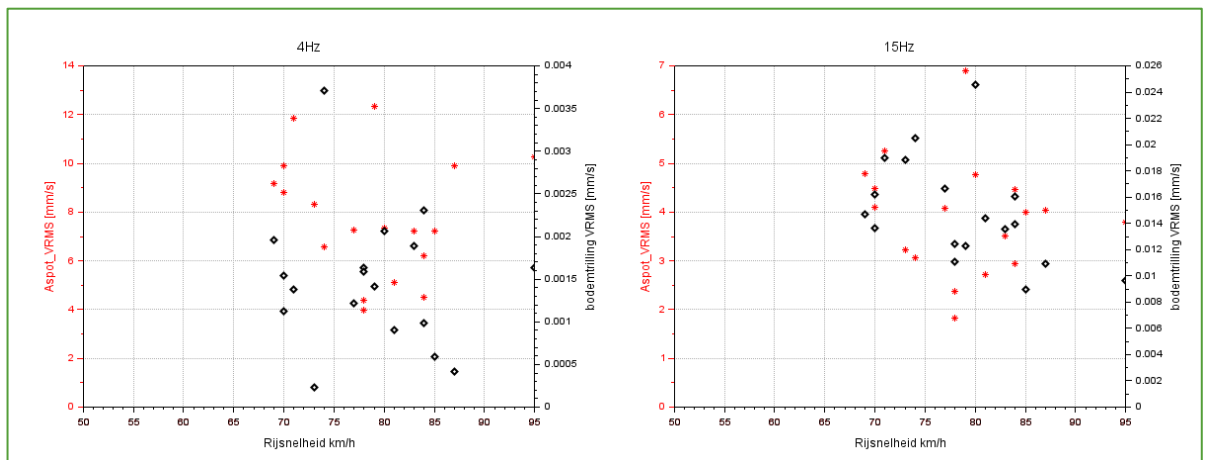


Figuur 4.11 Vrms aspot (rood) en bodemtrilling (zwart) tegen rijsnelheid Orthen (4 Hz links, 20 Hz rechts)



<sup>4</sup> Er is sprake van een spreiding in rijsnelheid en dus ook in verwachte frequentie. De meeste passages vallen naar verwachting in de 20 Hz band.

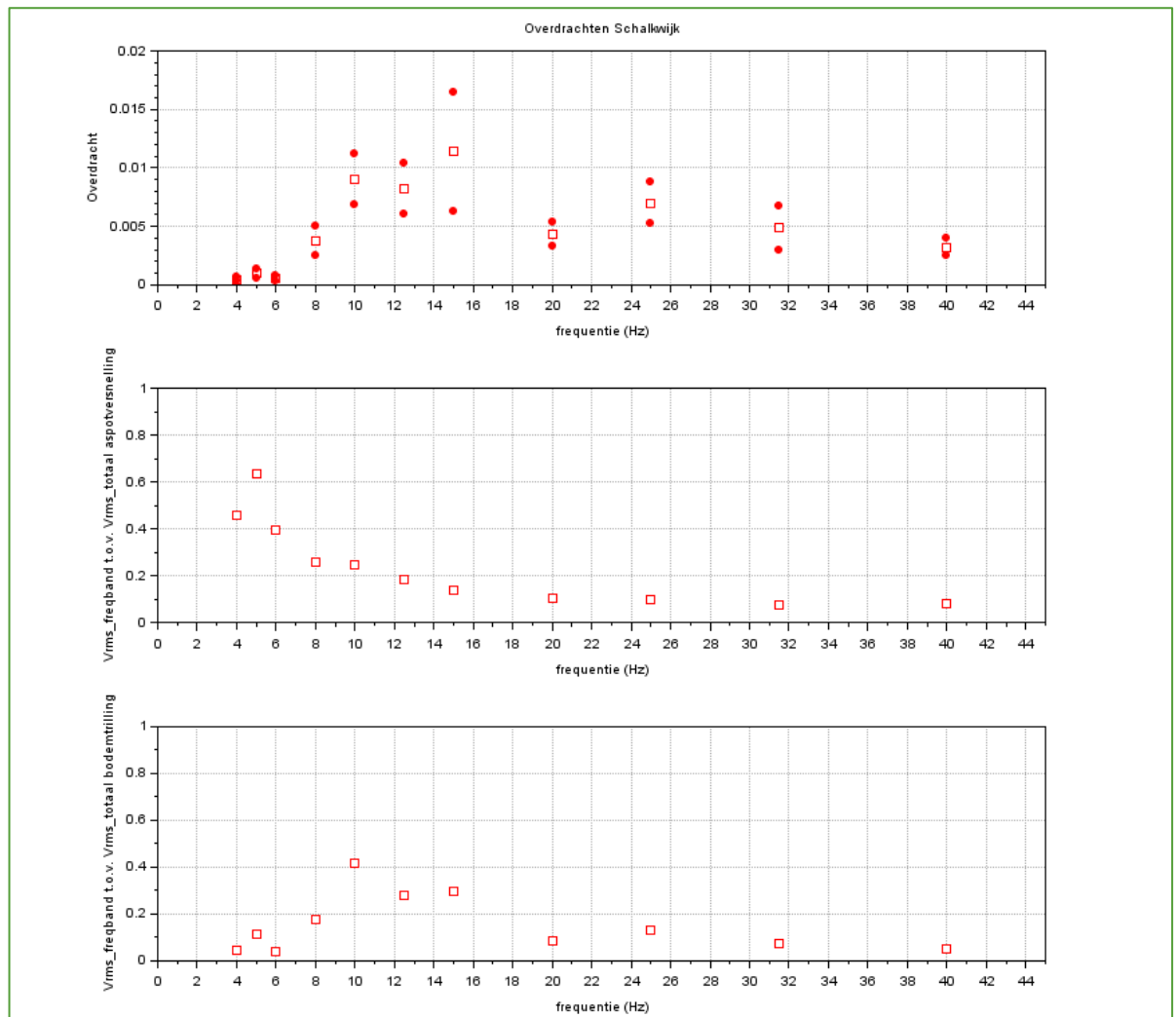
Figuur 4.12 Vrms aspot (rood) en bodemtrilling (zwart) tegen rijsnelheid Den Bosch Zuid (4 Hz links, 15 Hz rechts)



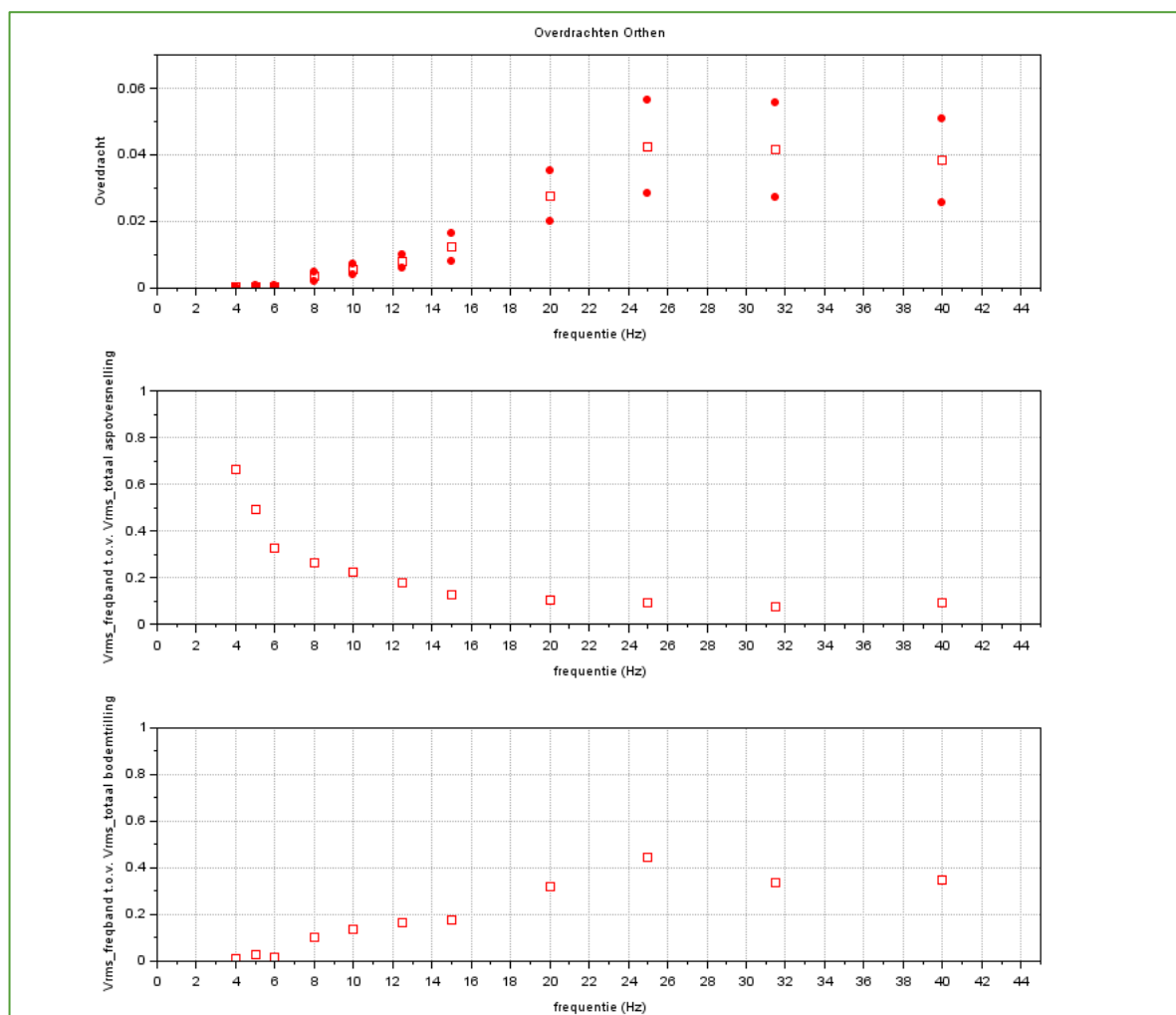
#### 4.4 Overdrachten per locatie

Uit de geselecteerde 2seconden-signalen is vervolgens gekeken naar wat de gemiddelde verhouding is tussen het gemeten trillingsniveau ter plaatse van de as t.o.v. ter plaatse van de bodem. Door het Vrms niveau per frequentieband in de bodem te delen door het Vrms niveau ter plaatse van de as, volgt een soort overdracht. Van elke passage is deze overdracht bepaald en vervolgens is een gemiddelde en standaarddeviatie over de passages bepaald. De resultaten per frequentieband worden weergegeven in Figuren 4.13, 4.14 en 4.15 voor de locaties Schalkwijk, Orthen en Den Bosch Zuid respectievelijk.

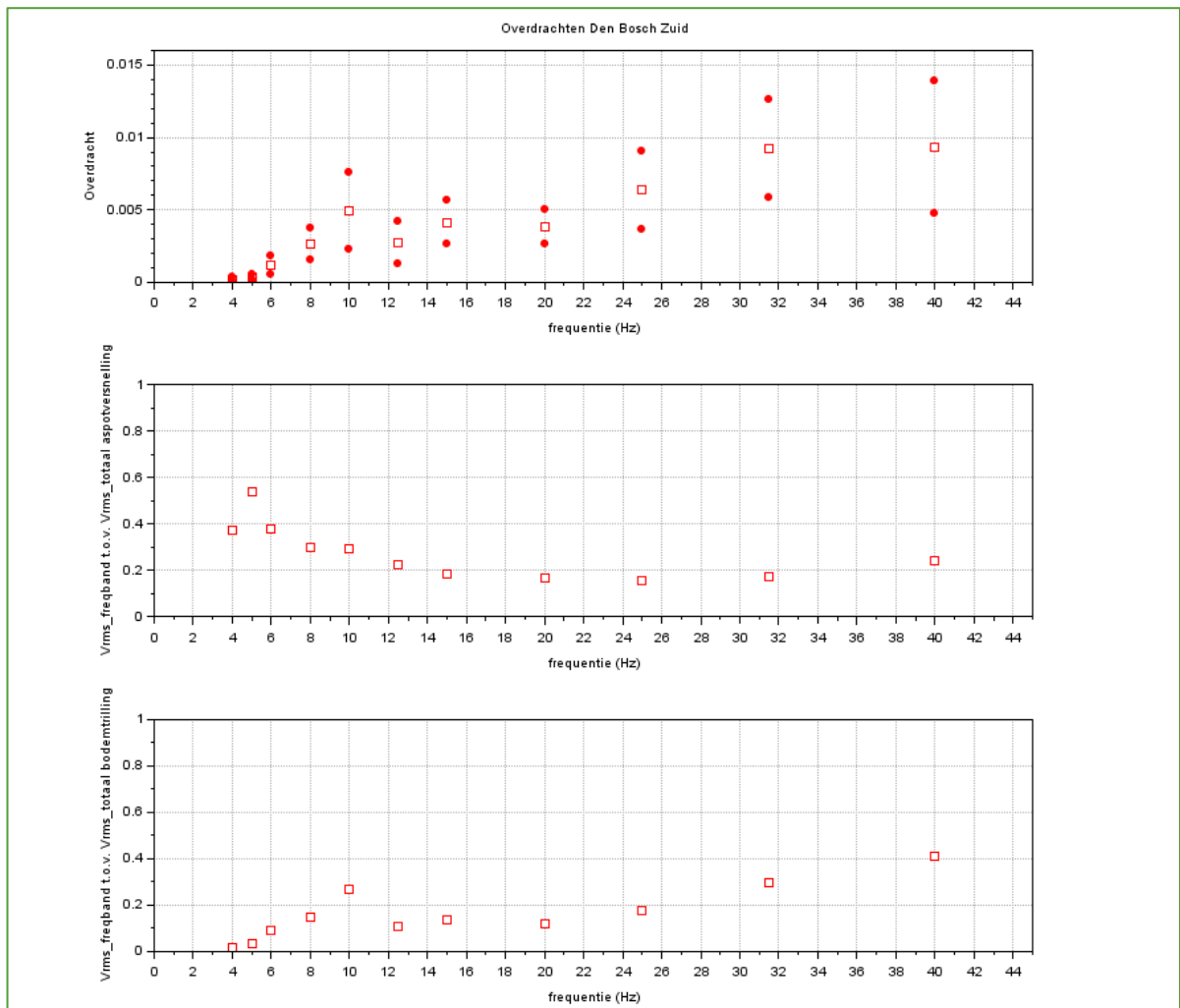
Figuur 4.13 Overdrachten Schalkwijk per frequentieband (2seconden-interval). Gemiddelde over passages aangegeven met  $\square$  en gemiddelde plus/min 1 standaarddeviatie met  $\cdot$ .



Figuur 4.14 Overdrachten Orthen per frequentieband (2seconden-interval). Gemiddelde over passages aangegeven met  $\square$  en gemiddelde plus/min 1 standaarddeviatie met  $\cdot$ .



Figuur 4.15 Overdrachten Den Bosch Zuid per frequentieband (2seconden-interval). Gemiddelde over passages aangegeven met □ en gemiddelde plus/min 1 standaarddeviatie met •.



Uit de overdrachten op de drie verschillende locaties volgen duidelijke verschillen. De locatie Schalkwijk laat de hoogste overdrachten voor de frequentiebanden 10, 12,5 en 15 Hz zien, terwijl de locaties Orthen en Den Bosch Zuid de hoogste overdrachten in de hogere frequentiebanden 25, 31,5 en 40 Hz laten zien. Daarbij laat de locatie Den Bosch Zuid rond de 10 Hz een verhoging in overdracht zien terwijl de locatie Orthen dit niet laat zien. In de Figuren 4.13 t/m 4.15 worden de overdrachten en bodem- en aspotmeetdata relatief weergegeven. De absolute niveaus (zie Figuren 4.4 t/m 4.9) tonen dat zowel de aspotniveaus als de bodemtrillingsniveaus in Den Bosch Zuid aanmerkelijk lager liggen dan op de andere twee locaties. Een mogelijke verklaring hiervoor kan gevonden worden in de lokale situatie. Het spoor op de locatie Den Bosch Zuid ligt namelijk op een talud wat naar verwachting tot lagere niveaus leidt en de rijsnelheid ligt ook relatief laag.

De resultaten lijken in lijn der verwachting met de bodemopbouw op de drie verschillende locaties. Zoals in paragraaf 2.2 is besproken bestaat de grondopbouw ter plaatse van Schalkwijk uit slappere klei/veenlagen de bovenste meters, terwijl Orthen en Den Bosch stijve zandgrond laten zien. De ervaring leert dat de frequentie-inhoud van signalen bij een stijve ondergrond omhooggaan ten opzichte van slappere ondergrond. Opmerkelijk is wel dat de aspotversnellingen op alle drie de locaties relatief veel inhoud in de 4, 5 en 6 Hz band tonen. Ter plaatse van de as lijkt de stijfheid van de bodem minder mee te spelen, waarbij wel rekening gehouden moet worden met o.a. verschillen in rijsnelheid.



Van belang bij het interpreteren van de overdrachten is dat deze zijn gedefinieerd als bodemtrilling/aspottrilling. Hierbij wordt een directe relatie verondersteld tussen het trillingsniveau in de bodem en die aan de as. Dit is niet voor alle mechanismen het geval (de quasi-statische aslast bijvoorbeeld resulteert wel in trillingen in de bodem, maar niet aan de as waar in de volgende paragraaf op wordt ingegaan). In de Figuren 4.13, 4.14 en 4.15 worden daarom onder de overdrachten ook de gemiddelde bijdrage van een bepaalde frequentieband aan het total Vrms getoond voor zowel de aspotsignalen als de bodemsignalen. Zo wordt een indruk verkregen van welke frequentie-inhoud ter plaatse van de as en welke inhoud ter plaatse van de bodem sprake is.

Ten aanzien van bronmechanismen zijn er een aantal opvallende dingen te zien in de overdrachten:

- Voor alle drie de locaties valt op dat de overdracht in het frequentiegebied t/m 6 Hz erg laag is. Tegelijkertijd is er wel degelijk input vanuit de aspotversnellingen. Dit betekent dat voor de VIRM spooronregelmaticgheden die leiden tot dynamische krachten t/m 6 Hz niet relevant lijken te zijn voor het ontstaan van bodemtrillingen<sup>5</sup>. Dit betekent overigens niet dat trillingen t/m 6 Hz niet relevant zijn voor bodemtrillingen. Bij goederenmaterieel zijn trillingen met die frequentie niet zelden dominant. Dat betekent dat deze veroorzaakt worden door het quasi-statische verplaatsingsveld van de passerende aslasten.
- Voor de locatie Schalkwijk zijn frequenties van 10, 12 en 14 Hz dominant in de overdracht. In de aspotversnellingen zijn deze echter niet aanwezig. Een plausibele bron voor deze trillingen is de asafstand binnen het draaistel van de VIRM en bijbehorende quasi-statisch vervormingsveld. De frequentie hiervan ligt bij de rijsnelheid bij Schalkwijk (120 km/u) namelijk precies in dit frequentiegebied (zie Tabel 14). Merk op dat deze trillingen niet tot uitdrukking komen in de gemeten aspotversnellingen. Er is daarom naar verwachting geen sprake van overdracht voor deze frequenties omdat de trillingen in de bodem niet te relateren zijn aan trillingen aan de as veroorzaakt door bijvoorbeeld baan- of wielonregelmaticgheden.

---

<sup>5</sup> Deze conclusie geldt voor de VIRM maar voor een ander type trein met bijvoorbeeld een grotere onafgeveerde massa kan dit anders zijn.

# 5

## VOERTUIGKARAKTERISTIEKEN

Bij dit onderzoek is de relatie tussen aspotversnellingen en bodemtrillingen onderzocht. De trillings- en versnellingsmetingen die daarvoor zijn gebruikt, zijn afkomstig van passages van VIRM treinen. VIRM is echter een van de vele typen treinen die over het Nederlandse spoor rijden. Een logische vraag is dan ook, in hoeverre zijn de voertuigeigenschappen bepalend voor de resultaten en wat mogen we verwachten van andere materieeltypen en goederentreinen in het bijzonder.

### 5.1 Trillingsbelasting door een rijdende trein

Om deze vragen te beantwoorden grijpen we terug op de bronmechanismen uit het vorige hoofdstuk. Voor twee daarvan is er een relatie tussen de voertuigeigenschappen en de trillingsenergie die het spoor in gaat. Namelijk de passages van aslasten en de baanonregelmatigheden.

- a) Passages van aslasten. De verplaatsing van assen in lengterichting van het spoor resulteren in een quasi-statische trillingsbelasting. Bij de bodemtrillingen die dit veroorzaakt, speelt de onderlinge afstand van de assen een belangrijke rol. Deze verschillen uiteraard per materieelsoort, waarbij er met name veel verschil is tussen goederen- en reizigersmaterieel. Dit deel van de trillingsbelasting komt niet tot uitdrukking in de gemeten aspotversnellingen.
- b) Baanonregelmatigheden. De verticale spoorligging zorgt voor verticale aanstoting van een trein. De resulterende wiel-rail krachten resulteren in een dynamische (trillings)belasting van het spoor. Deze component wordt gemeten met de aspotversnellingen. De reactiekracht van hangt daarbij sterk af van de dynamische eigenschappen van een trein.

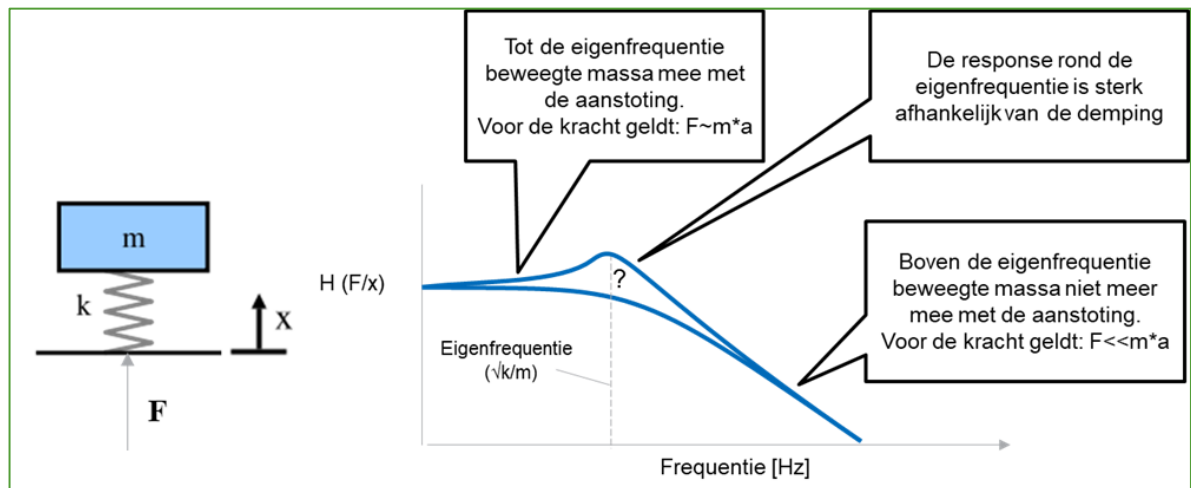
Voor deze beide componenten bepalen we in een kwalitatieve analyse wat de invloed is de trillingen die de trein veroorzaakt ter plekke van het spoor. Eerst kijken we echter nader naar invloed van voertuigdynamica op bodemtrillingen door baanonregelmatigheden.

#### 5.1.1 Baanonregelmatigheden.

De verticale beweging van het wiel ten gevolge van de baanonregelmatigheden meten we met aspotversnellingen. De wiel-rail krachten die dit veroorzaakt zijn afhankelijk door de massa die daarbij in beweging wordt gebracht. Hiervan kan een inschatting worden gemaakt aan de hand van de dynamische eigenschappen van een trein.

Om dit toe te lichten, laten we die eerste zien voor een simpel dynamische systeem met een massa en een veer.

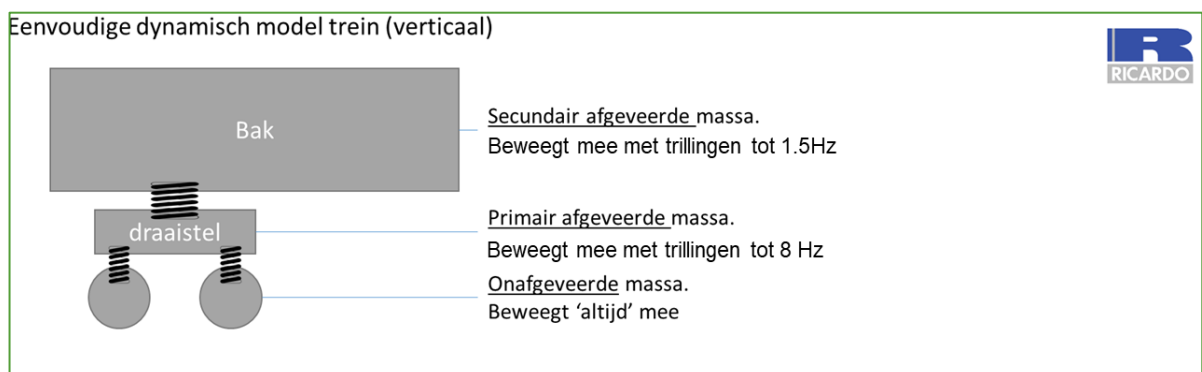
Figuur 5.1 Toelichting dynamisch systeem



In Figuur 5.1 is een enkelvoudig massaveersysteem weergegeven. Wanneer de onderzijde van de veer beweegt met amplitude  $X$ , zal de massa  $m$  gaan bewegen en als reactie een kracht  $F$  uitoefenen op het spoor. De kracht  $F$  is daarbij afhankelijk van de massa en de frequentie van de beweging. Dit is weergegeven aan de rechterzijde van de figuur. Bewegingen met een frequentie kleiner de eigenfrequentie, kunnen worden gevolgd door de massa. De resulterende kracht is ongeveer gelijk aan de massa keer de versnelling. Bewegingen met een frequentie groter dan de eigenfrequentie kunnen niet worden gevolgd en resulteren ook amper in reactiekrachten op het spoor.

Deze redeneerlijn kunnen we ook toepassen op het meervoudig massa veersysteem van een trein. In onderstaande figuur is daarvan een eenvoudig dynamisch model weergegeven. Daarin is te zien dat we bij een reizigerstrein zoals VIRM twee veerniveaus onderscheiden. Een primaire vering tussen wielstellen en het draaistel en een secundaire vering tussen het draaistel en de bak. De eerste met een eigenfrequentie van ca 8Hz en de tweede met een eigenfrequentie van ca 1.5Hz<sup>6</sup>.

Figuur 5.2 Schematische weergave van een trein met massaveersystemen



In relatie tot de bodemtrillingen zijn met name de onafgeveerde massa en de primair afgeveerde massa interessant. De bak zelf heeft een eigenfrequentie van 1.5Hz en kan de laagste beschouwde frequenties van 4Hz niet volgen/beïnvloeden.

<sup>6</sup> Deze frequenties zijn onafhankelijk van rijnsnelheid uiteraard.

Kortom: Bij spoortrillingen door de baanligging of wieldefecten, zijn massa's van belang die bewegingen vanaf 4Hz kunnen volgen. Voor VIRM zijn dat de onafgeveerde massa van het wielstel en de massa van het draaistel (tot ca 8Hz). De bakmassa, en dus ook de belading, zijn niet relevant voor de trillingsbelasting ten gevolge van de baanligging of wieldefecten.

Tabel 16 Eigenschappen VIRM

| Element   | Veerniveau          | Massa                     | Eigenfrequentie |
|-----------|---------------------|---------------------------|-----------------|
| Bak       | Secundair afgeveerd | 55 ton (operational mass) | 1.5Hz           |
| Draaistel | Primair afgeveerd   | 9 ton                     | 8Hz             |
| Wielstel  | Onafgeveerd         | 1.3 ton                   | nvt             |

Bij deze beschouwing gaan we er vanuit dat het massaveersysteem voldoende demping heeft en niet opslingert bij aanstoting rondom de eigenfrequentie. Opslingering kan juist tot sterke (bodem)trillingen leiden bij aanstoting rondom de eigenfrequentie.

## 5.2 Eigenschappen goederentreinen

We willen een inschatting maken in hoeverre de trillingsbelasting ten gevolge van de baanligging verandert bij ander materieel. Vanwege de geplande pilot met goederenwagens, zijn we met name geïnteresseerd in goederenmaterieel. Er zijn veel verschillende typen locomotieven en goederenwagens. In deze beschouwing gaan we uit van veel voorkomende locomotief TRAXX en een goederenwagen op basis van een Y25 draaistel. Dit draaisteltype is de basis van het merendeel van de goederenwagens.

Analoog aan de VIRM is voor de TRAXX en de Y25 de goederenwagen de bepalende dynamische eigenschappen bepaald. Deze staan in Tabellen 17 en 18. Merk hierbij op dat een goederenwagen geen secundaire vering heeft, de bak wordt direct afgesteund op het draaistelframe. Er is daarom alleen sprake van een primaire afgeveerde massa die wordt bepaald door het draaistelframe en bak (+belading) samen.

Tabel 17: Dynamische eigenschappen Y25 goederenwagen

| Element         | Veerniveau        | Massa       | Eigenfrequentie |
|-----------------|-------------------|-------------|-----------------|
| Draaistel + Bak | Primair afgeveerd | 17 – 83 ton | 4Hz (leeg)      |
| Wielstel        | Onafgeveerd       | 1.3 ton     | Nvt             |

Tabel 18: Dynamische eigenschappen TRAXX

| Element   | Veerniveau          | Massa    | Eigenfrequentie |
|-----------|---------------------|----------|-----------------|
| Bak       | Secundair afgeveerd | 57.2 ton | 1Hz             |
| Draaistel | Primair afgeveerd   | 6.4 ton  | 7Hz             |
| Wielstel  | Onafgeveerd         | 4.5 ton  | nvt             |

Ten opzichte van de VIRM valt op dat de massa van het draaistel laag is voor de Y25 goederenwagen. Daarbij is de verticale eigenfrequentie van het draaistel hoog in verhouding tot een VIRM en ook de TRAXX loc.

Tabel 19 Afstandskennmerken verschillende wagontypes

| Afstand                | TRAXX         | Y25 (FALNSS_1) | Y25 (TANOOS)   | (SHIMMNS)     |
|------------------------|---------------|----------------|----------------|---------------|
| Asafstand in draaistel | 2.6m (8-11Hz) | 1.8m (12-15Hz) | 1.8m(12-15Hz)  | 1.8m(12-15Hz) |
| Wielbasis              | 10.4m (2-3)   | 7.5m (3-4 Hz)  | 10.8m (2-3 Hz) | 7.0m (3-4 Hz) |
| Bakovergang            | 8.5m (3)      | 5.0m (4-5 Hz)  | 5.0m (4-5 Hz)  | 3.8m (6-7 Hz) |

### 5.3 Kwalitatieve beschouwing ten behoeve van pilot wielkwaliteit goederentreinen

Wanneer we kijken naar de eigenschappen van een TRAXX goederentrein ten opzichte van de VIRM kunnen we een aantal dingen verwachten.

#### 5.3.1 Baanonregelmaticheden

Een algemeen verschil tussen VIRM en goederenwagens is de rijsnelheid. Voor VIRM zal deze doorgaans hoger liggen dan bij een goederenwagen. Dit heeft twee gevolgen bij trillingen die worden veroorzaakt door baanongelmatigheden:

- 1) De verticale versnellingen omgerekend naar snelheden die een wielstel ondergaat zijn lager. Een halvering van de rijsnelheid betekent een halvering van de snelheden bij een gegeven hoogteafwijking van het spoor;
- 2) De frequentie waarmee het wielstel beweegt wordt lager. Een halvering van de rijsnelheid resulteert in een halvering van de frequentie van de beweging bij een gegeven hoogteafwijking.

Wanneer je met dezelfde trein, langzamer gaat rijden, kun je hiermee redelijk inschatten op welke manier de trillingen gaan veranderen.

Naast de rijsnelheid zal ook het verschil in voertuigeigenschappen zorgen voor een andere excitatie van het spoor. Hierin kunnen we een aantal veranderingen verwachten bij goederenmaterieel ten opzichte van VIRM.

De onafgeveerde massa is bij VIRM en het Y25 draaistel gelijk. Dit betekent dat bij frequenties van 8Hz en hoger dezelfde masse meebeweegt en dat trillingen ten gevolge van spoorongelmatigheden vergelijkbaar zijn. Onder de 8Hz beweegt het draaistelframe van VIRM ook mee waarmee de wiel-rail krachten ten gevolge van spoorongelmatigheden voor VIRM hoger zullen zijn. Voor trillingen tussen 4Hz en 8Hz is VIRM dus ongunstiger ten aanzien van trillingen door spoorongelmatigheden. We hebben echter ook gezien dat dergelijke spoorongelmatigheden nauwelijks bijdragen aan het daadwerkelijke trillingsniveau in de bodem, dit verschil is dus voor het totale trillingsniveau niet heel relevant.

Voor beide voertuigtypen geldt dat de bakmassa/belading weinig relevant is in relatie tot trillingen door baanongelmatigheden. De eigenfrequentie van deze massa ligt namelijk op of onder de laagste frequentie die we beschouwen. Voor VIRM in alle gevallen en bij de Y25 wagen in ieder geval in beladen toestand.

De onafgeveerde massa van de TRAXX is aanzienlijk hoger dan die van VIRM (4.5 ton vs 1.3 ton). Dat betekent dat boven de 7 a 8 Hz de trillingen ten gevolge van spoorongelmatigheden of wielronrondheden ook flink hoger zullen zijn. Onder de 7 a 8 Hz is de massa die bij TRAXX meebeweegt ook iets groter. Het verschil echter veel minder groot, namelijk 7.7 ton voor TRAXX en 5.8 ton voor VIRM<sup>7</sup>.

#### 5.3.2 Asafstanden

De invloed van asafstanden moeten we tegelijk beschouwen met de invloed van snelheid. Tezamen bepalen ze namelijk in welke richting de frequentie verschuift bij goederenmaterieel.

De afstand tussen assen binnen een draaistel is 1.8m voor een Y24 wagen en 2.5m (of 2.75m) voor een VIRM. Tegelijkertijd is de rijsnelheid voor een VIRM hoger. Per saldo betekent dit frequentie waarmee de assen van

<sup>7</sup> 7.7 ton volgt door de helft van de massa van het draaistel bij de massa van een wielstel op te tellen.

een draaistel passeren niet heel sterk verschillen voor VIRM en het Y25 draaistel. Bij een rijsnelheid van 120 km/u is dit 13Hz voor VIRM en bij 80 km/u is dit 12Hz voor goederenmaterieel.

Qua afstanden tussen de draaistellen bij de bakovergang is de situatie enigszins vergelijkbaar. De bakovergang bij VIRM is doorgaans langer dan bij goederenmaterieel. Daardoor temperen deze de mate waarin deze frequentie verschuift door de lagere rijsnelheid van goederenmaterieel.

Volle goederentreinen hebben rijsnelheid van 80 km/u. Bij deze snelheid is frequentie waarmee de dwarsliggers worden aangestoten gelijk aan 37Hz en ligt deze binnen het frequentiegebied dat we beschouwen. Bij snelheden van 100 km/u of hoger zijn de dwarsliggers daarin niet meer zichtbaar.

# 6

## CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

Bij dit onderzoek hebben we gemeten aspotversnellingen en bodemtrillingen gecombineerd. Het doel was ten eerste om te kijken of dit kan leiden tot meerwaarde en/of nieuwe inzichten om bodemtrillingen te reduceren door gericht onderhoud aan spoorbaan en/of wielstellen. Ten tweede levert dit onderzoek input voor de pilot Wielonderhoud binnen de Innovatieagenda.

### 6.1 Conclusies

Het combineren van gemeten aspotversnellingen en bodemtrillingen levert de volgende conclusies:

- Voor de drie meetlocaties is per frequentieband de verhouding bepaald tussen  $V_{rms}$  bodem en  $V_{rms}$  as, aangeduid als overdrachten. Dit levert meerdere inzichten op:
  - o Voor de locaties Orthen en Den Bosch Zuid worden de hoogste overdrachten gevonden voor de frequentiebanden 25, 31,5 en 40 Hz terwijl voor Schalkwijk de lagere banden 10, 12,5 en 15 Hz de hoogste overdrachten laten zien. Dit resultaat is consistent met de bodemopbouw: de stijvere zandbodem te Orthen en Den Bosch Zuid leidt tot hogere overdracht van de hogere frequentiebanden dan de slappe klei/veen bodem bij Schalkwijk.
  - o Voor alle locaties geldt een lage overdracht in de onderste drie frequentiebanden van 4 Hz, 5 Hz en 6 Hz. Tegelijkertijd zijn er wel degelijk dynamische krachten aanwezig in dit frequentiebereik. Dit laat zien dat op de drie gemeten locaties voor de VIRM geldt dat spooronregelmaticheden die leiden tot dynamische krachten met dergelijke frequenties niet resulteren in bodemtrillingen.
  - o Voor de locatie Schalkwijk zijn frequenties van 10, 12,5 en 15 Hz dominant in de overdracht bepaald door  $V_{rms}$  bodem te vergelijken met  $V_{rms}$  as. In de aspotversnellingen zijn deze echter niet aanwezig. Een plausible bron voor deze trillingen is de asafstand binnen het draaistel van de VIRM en de bijbehorende passages van statische vervormingsvelden (quasi-statische vervormingsveld). De frequentie hiervan ligt bij de rijsnelheid bij Schalkwijk (120 km/u) namelijk precies in dit frequentiegebied (zie Tabel 14)<sup>8</sup>.
  - o Wordt naar het bronmechanisme wielonrondheid gekeken dan wordt frequentie-inhoud verwacht in hogere frequentiebanden. Geconcludeerd wordt dat de invloed van wielonrondheid op het optredende trillingsniveau het beste wordt gevonden bij stijvere bodemtypen<sup>9</sup>;
  - o Wordt naar baanonregelmaticheid en onderhoud hieraan om bodemtrillingen te verminderen gekeken dan is van belang dat de focus van het onderhoud moet liggen op golflengtes die resulteren in frequenties die worden overgedragen naar de bodem. Voor Schalkwijk resulteert 10 -15 Hz overdracht bij een rijsnelheid van 120 km/u tot golflengtes van 2 - 3 meter. Voor Orthen en Den Bosch Zuid resulteert 25 - 40 Hz overdracht tot golflengtes van 0,8 - 1,3 meter (wat dicht tegen de dwarsliggerafstand aan ligt).

<sup>8</sup> Het gaat in dit geval dus niet om een causale overdracht maar om de verhouding tussen beide grootheden.

<sup>9</sup> Deze conclusie volgt op basis van de berekende overdracht voor die frequentiebanden. Dat wil niet zeggen dat de gemeten trillingsniveaus in die banden per definitie de oorzaak waren van wielonrondheid. Het zou namelijk ook het gevolg kunnen zijn van bijvoorbeeld baanonregelmaticheid.

- Wordt gekeken naar relaties tussen optredende trillingsniveaus  $V_{rms}$  ter plaatse van de as en de rijsnelheid alsook relaties tussen  $V_{rms}$  ter plaatse van de bodem en rijsnelheid, dan blijkt er voor sommige frequentiebanden een duidelijke relatie voor met name de  $V_{rms}$  waarden ter plaatse van de as. Voor andere frequentiebanden blijkt dit minder of niet. Welke frequentiebanden dit zijn varieert per locatie.
- Er is in eerste instantie gewerkt met een 2seconden-tijdsinterval. Uit een studie van literatuur waarin zogenaamde line en point source mobilities zijn onderzocht volgde voor de verschillende locaties kortere tijdsintervallen (Schalkwijk 0,8 seconde, Orthen 1,3 seconde en Den Bosch Zuid 1,8 seconde). Er is daarom naast een 2seconden-interval ook naar een 1seconde-interval gekeken. De verschillen in resultaten blijken beperkt. Hieruit wordt geconcludeerd dat er weinig verschil in de aanstoting van het spoor zit tussen de verschillende assen/wielen van de InfraMon trein.

## 6.2 Aanbevelingen

Uit het onderzoek volgen aanbevelingen specifiek gericht op de toekomstige pilot met goederenmaterieel en wielonrondheid:

- Uit de resultaten blijkt dat de frequentie-inhoud gemeten aan de as niet altijd teruggevonden wordt in de bodem. Stijve bodemtypen laten relatief hoge overdrachten zien in de frequentiebanden die voor wiel onrondheid van belang zijn. Voor de pilot met wielonrondheid wordt daarom aanbevolen meetlocaties met meerdere bodemtypen te kiezen maar de nadruk te leggen op stijve bodemtypen;
- Dat de frequentie-inhoud in de bodem kan verschillen van de inhoud ter plaatse van de as heeft niet alleen met de overdacht te maken maar ook met het feit dat er mechanismen zijn die wel in de bodem worden gemeten en niet aan de as. Het quasi-statische vervormingsveld resulteert bijvoorbeeld niet in aspotversnellingen maar wel in een trillingssignaal dicht op het spoor. Het is dan ook aan te bevelen op meerdere afstanden van het spoor te meten zodat onderscheid tussen de dynamische en de quasi-statische component gemaakt kan worden;
- De koppeling tussen trillingsignalen in de bodem en aspotversnellingsignalen van de InfraMon trein bleek arbeidsintensief omdat de exacte locatie van de geïnstrumenteerde aspassage in het trillingssignaal afhangt van de oriëntatie van het treinstel, het aantal treinstellen van de passage en de locatie van treinstel 9512 bij een gecombineerd treinstel en de rijsnelheid van de trein. Deze gegevens moesten van videobeelden in combinatie met InfraMon data worden verkregen. Om verschillen in wielonrondheid te kunnen monitoren aan zowel de trein met aspotversnellingsmeters als in de bodem is het van belang een opstelling te maken waarbij de trillingsmeters in de bodem worden getriggerd om te gaan registreren op het moment dat de as passeert. Daarnaast wordt aanbevolen om de trillingmetingen te voorzien van een goede tijdsynchronisatie. Daarmee wordt het koppelen van andere gegevensbronnen zoals aspotversnellingen aanzienlijk makkelijker.

Ook geeft het onderzoek aanleiding voor enkele vervolgvragen/onderzoeksstappen:

- De  $V_{rms}$  niveaus per tertsband van de bodemtrillingen en aspottrillingen zijn met elkaar vergeleken door de verhouding tussen beide grootheden te bepalen. In de resulterende overdrachten die in Figuren 4.13 t/m 4.15 worden getoond wordt een lineaire relatie verondersteld waarvan in het rapport meermaals wordt aangegeven dat dit niet zeker is. Deze lineaire relatie kan alsnog worden bepaald door middel van een regressieanalyse. Daarbij kan per tertsband worden bepaald hoe sterk de overdracht is en of deze statistisch significant is. Omdat de beschikbare datasets aanwezig zijn, is dit een relatief beperkte aanvullende onderzoekslast;
- Uit de vergelijking tussen de 1- en 2secondenintervallen blijkt weinig verschil. Verwacht wordt dat de verschillende aspassages van de VIRM weinig verschil leveren doordat er sprake is van een goede kwaliteit wielen en de dynamische eigenschappen van de draaistellen vergelijkbaar zijn. Wanneer er sprake is van een goede kwaliteit wielen, dan geven de aspotversnellingsmeters een soort scan van de kwaliteit van het spoor. Door de aspotversnellingsmeetdata van de drie locaties in het golfengtedomein te vergelijken,



wordt mogelijk inzicht verkregen of er sprake is van verschillen tussen de drie locaties in baankwaliteit en bijbehorende golflengte. Daarbij geven de aspotversnellingen inzicht in golflengtes ook kleiner dan 3 meter wat een aanvulling is op de BBMS gegevens.

- Aanbevolen wordt te onderzoeken of er data beschikbaar is van andere meetcampagnes waarbij op verschillende afstanden van het spoor is gemeten én er op de meetlocatie sprake is geweest van zowel passages van de uitgeruste VIRM (9512) als passages van goederentreinen. Gedacht wordt bijvoorbeeld aan de metingen behorende bij het OURS model. Wanneer deze data beschikbaar is, wordt aanbevolen een vergelijkbare analyse uit te voeren als in voorliggend onderzoek. Hierbij kan geput worden uit het resultaat van het huidige onderzoek dat er weinig verschil tussen assen van de VIRM wordt gevonden en dat daarom het tijdsvenster van passeren van de geïnstrumenteerde as niet van groot belang is. Dit scheelt namelijk veel werk. Daarbij is vooral een locatie met zandgrond interessant om nader te onderzoeken en te bekijken of lage frequentie-inhoud opnieuw in de aspotsignalen wordt gevonden en niet in de bodemtrillingen voor de passage van de VRIM. Vervolgens kan bekeken worden of voor goederentreinen wel of geen lage frequentie-inhoud wordt gevonden. De verwachting bestaat namelijk dat dit voor goederentreinen mogelijk wel het geval is en dat dit mogelijk te correleren valt aan baanonegelmaticheden<sup>10</sup>.

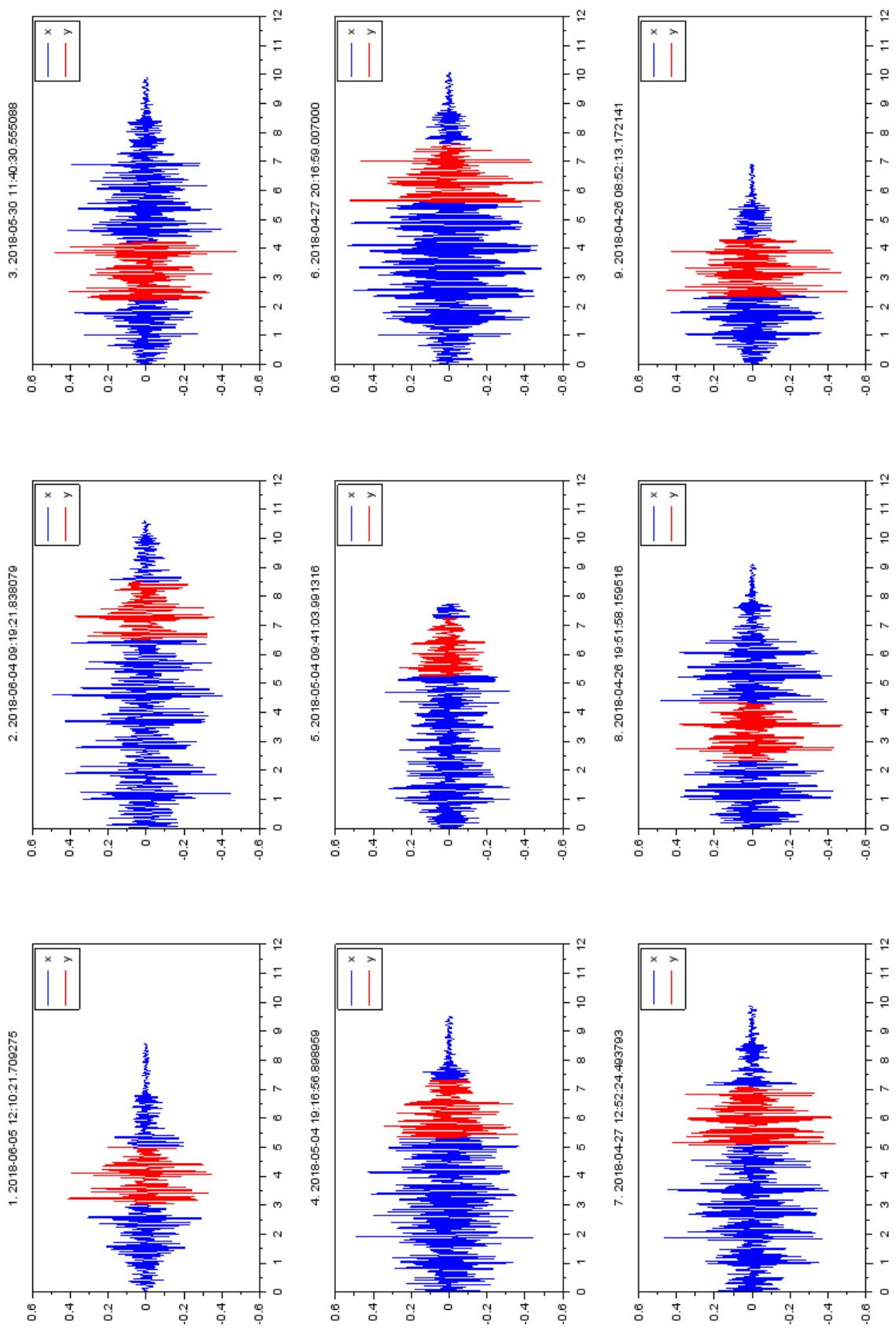
---

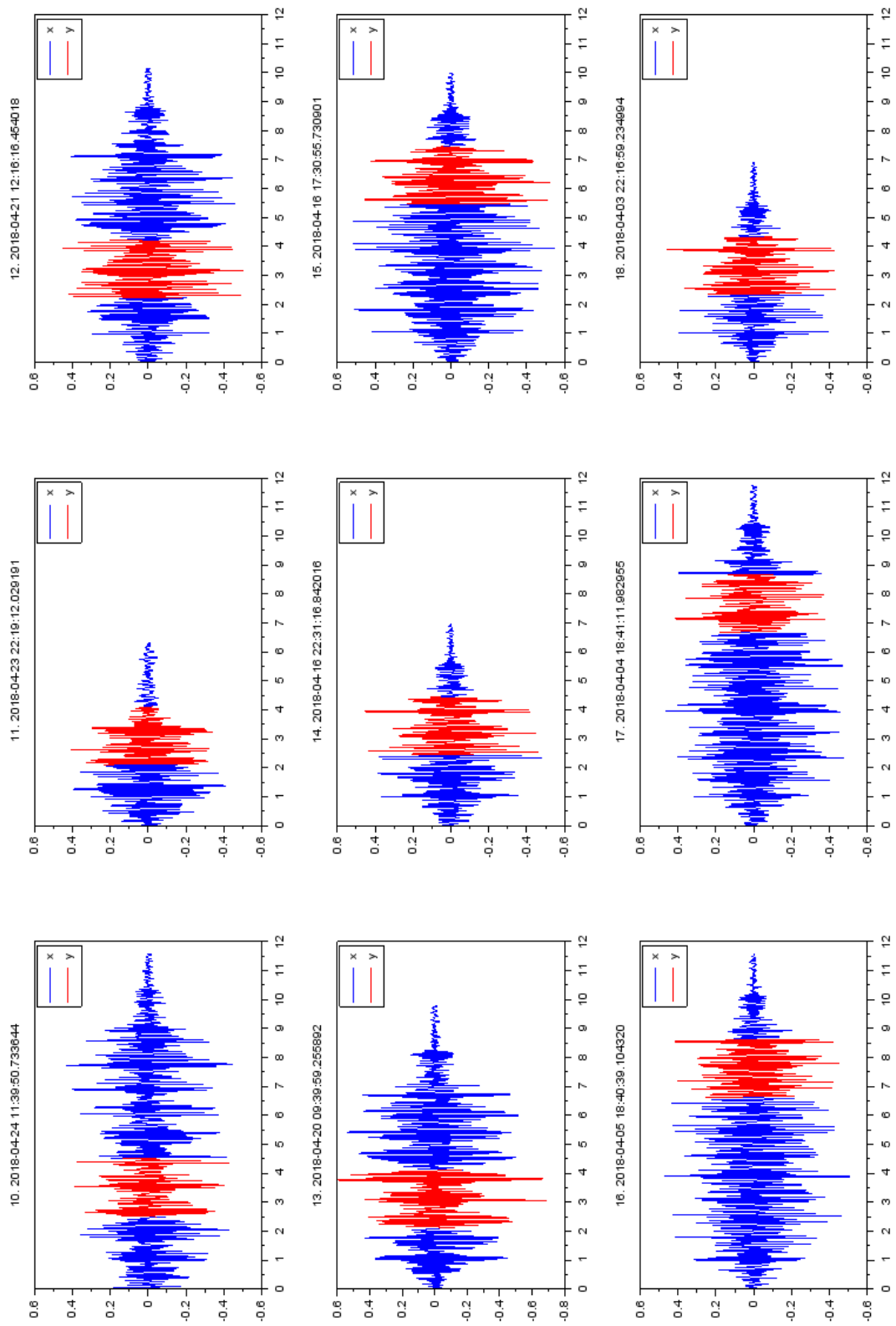
<sup>10</sup> Onze ervaring is dat trillingsmetingen in de bodem op plekken met zandgrond in Nederland bij goederentreinen wel vaak inhoud laten zien bij lage frequenties.

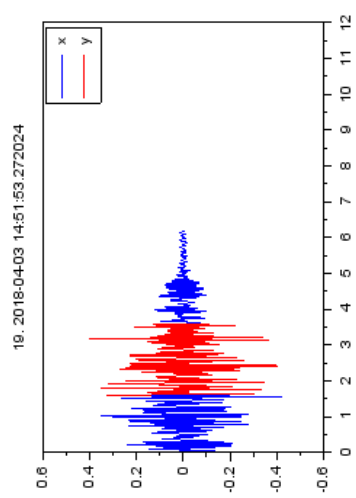
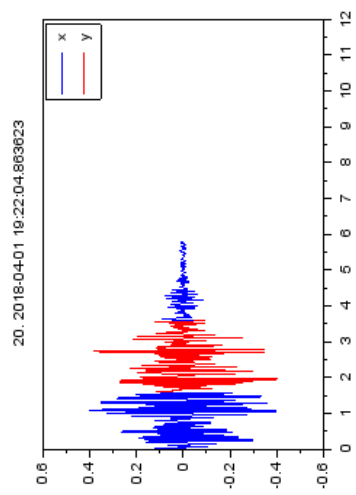
## REFERENTIES

1. Stichting Bouw Research (2006). SBR-richtlijn deel B: Hinder voor personen in gebouwen.
2. Federal Transit Administration (2006). Transit Noise and Vibration impact assessment.
3. ISO14837-1 (2005). Mechanical vibration- Ground borne noise and vibration arising from rail systems part 1: General guidance.
4. ProRail (2016). Productbeschrijving Quo Vadis.
5. RIVAS (2011). Deliverable 1.4. Review of existing standards, regulations and guidelines, as well as laboratory and field studies concerning human exposure to vibrations.
6. Stichting Bouw Research (2006). SBR-richtlijn deel B: Hinder voor personen in gebouwen.
7. Witteveen+Bos (2018). Trillingsmetingen A2-corridor. Referentie: 105793/18-015.040.
8. Cohere Consultants (2019). Analyse meetdata trillingsmetingen A2-corridor. Referentie: CC-REP20190702
9. Brick, H. (2021). Line source transfer mobility. Fine2 European Research Project. Deliverable 8.2.

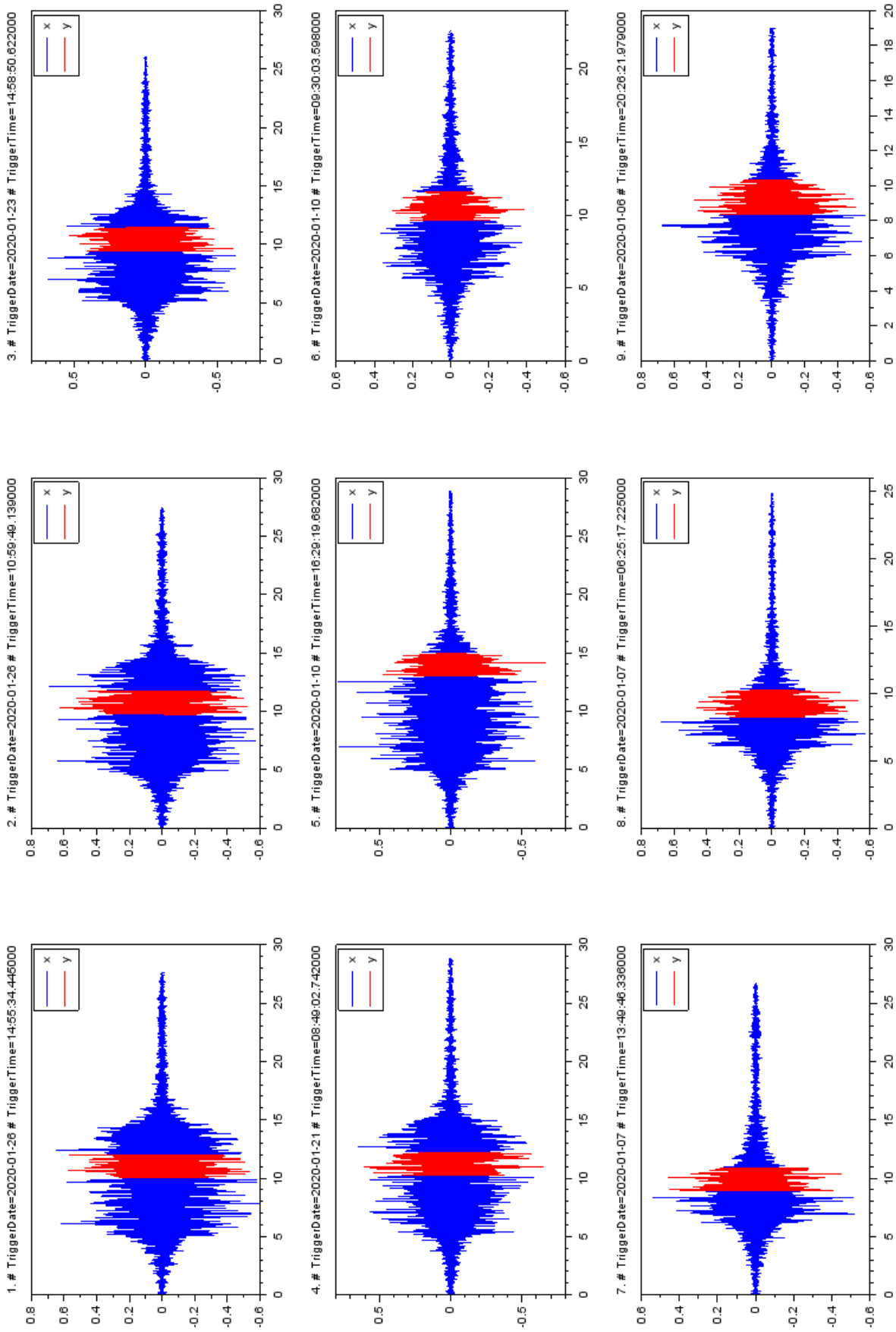
## **BIJLAGE I. TRILLINGSSIGNALLEN OP MAAIVELD SCHALKWIJK**



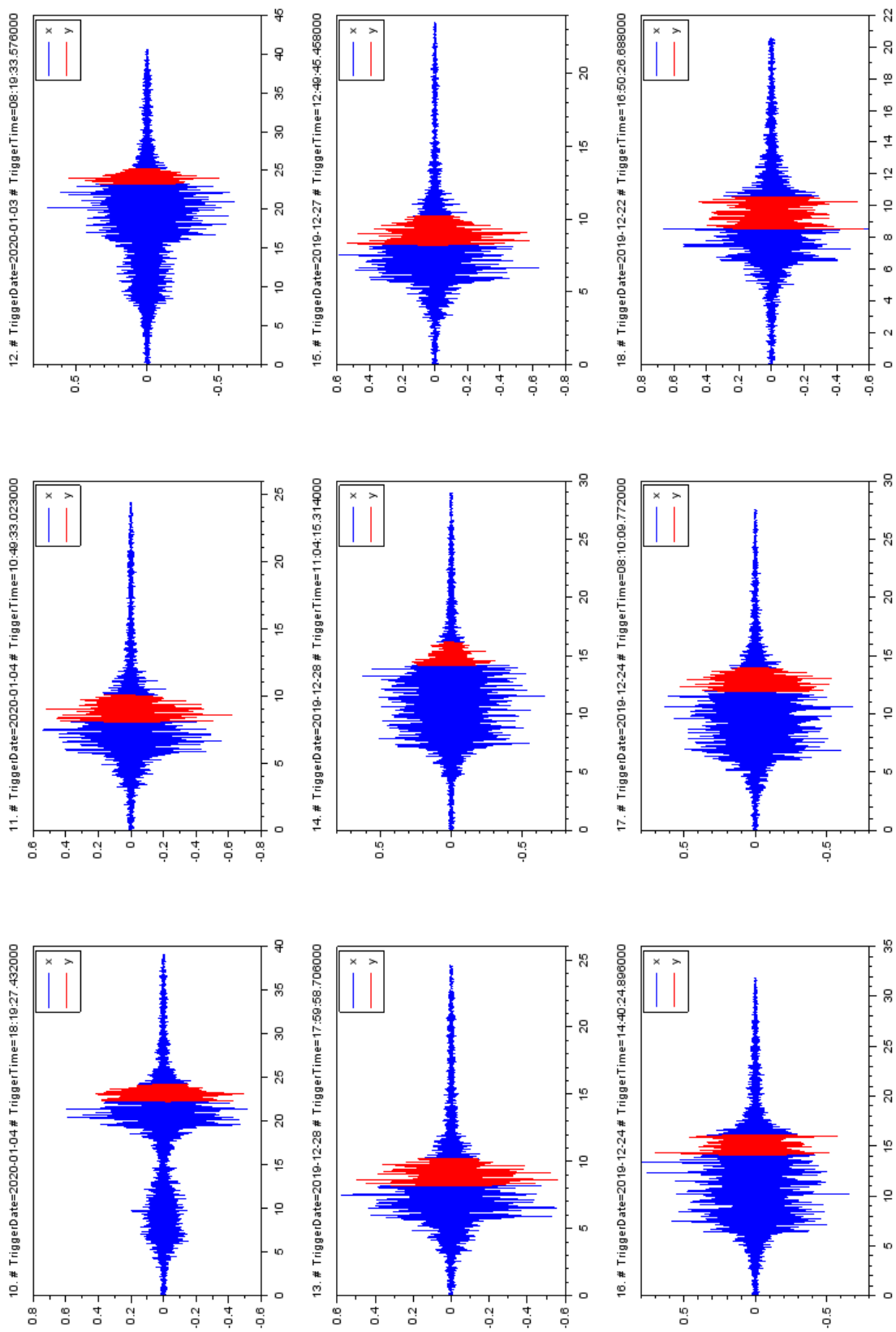


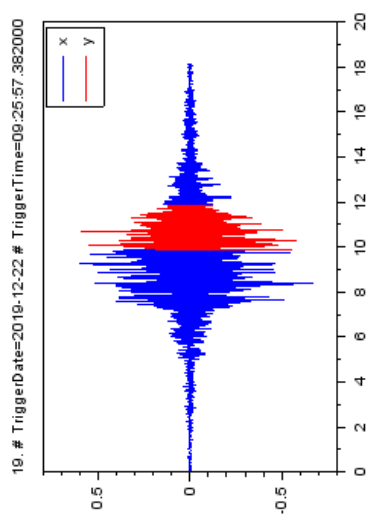
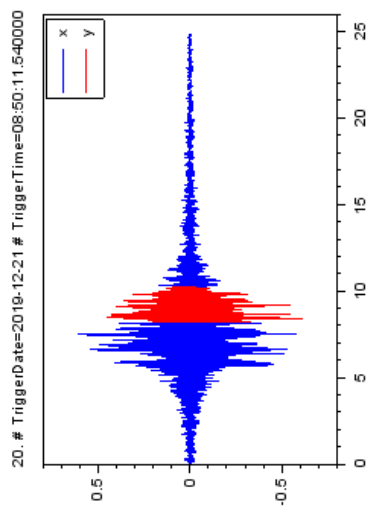


## **BIJLAGE II. TRILLINGSSIGNALLEN OP MAAIVELD ORTHEN**

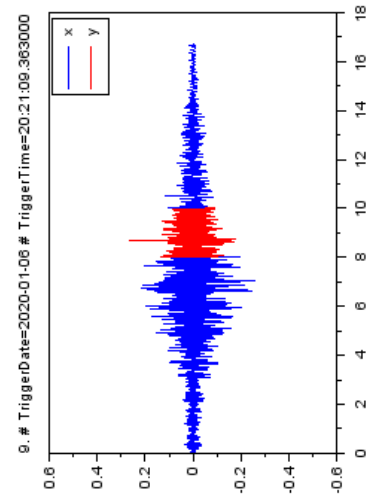
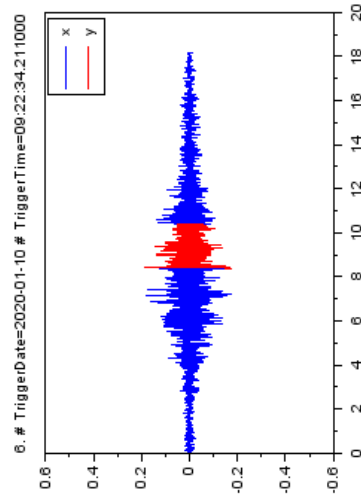
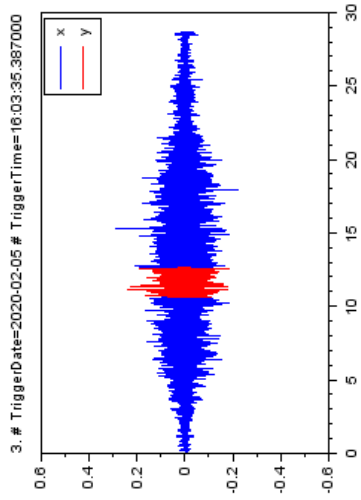
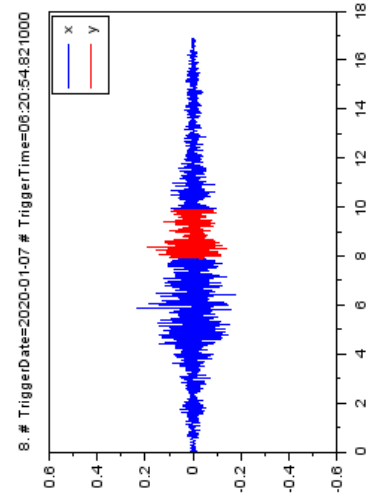
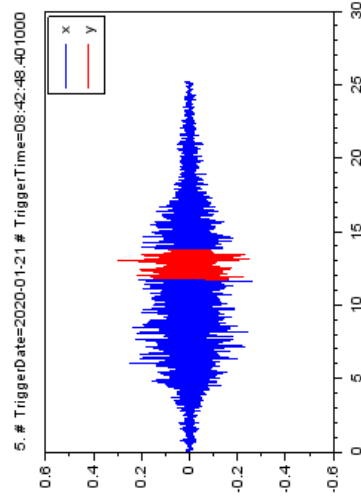
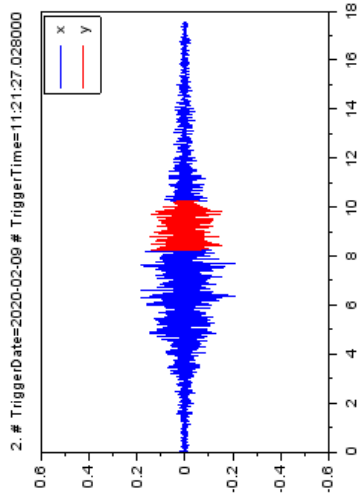
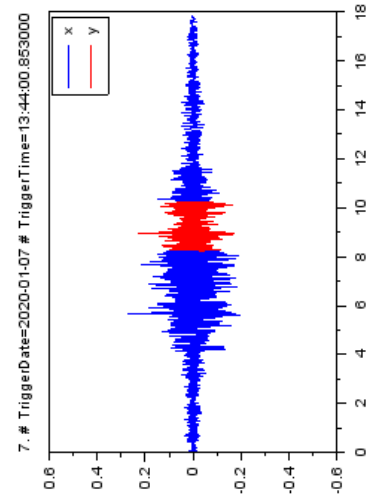
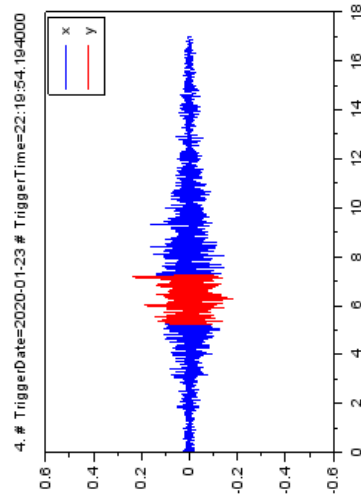
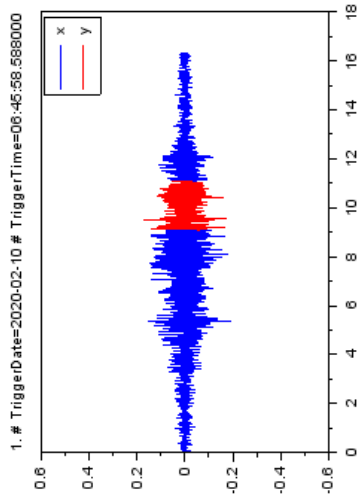


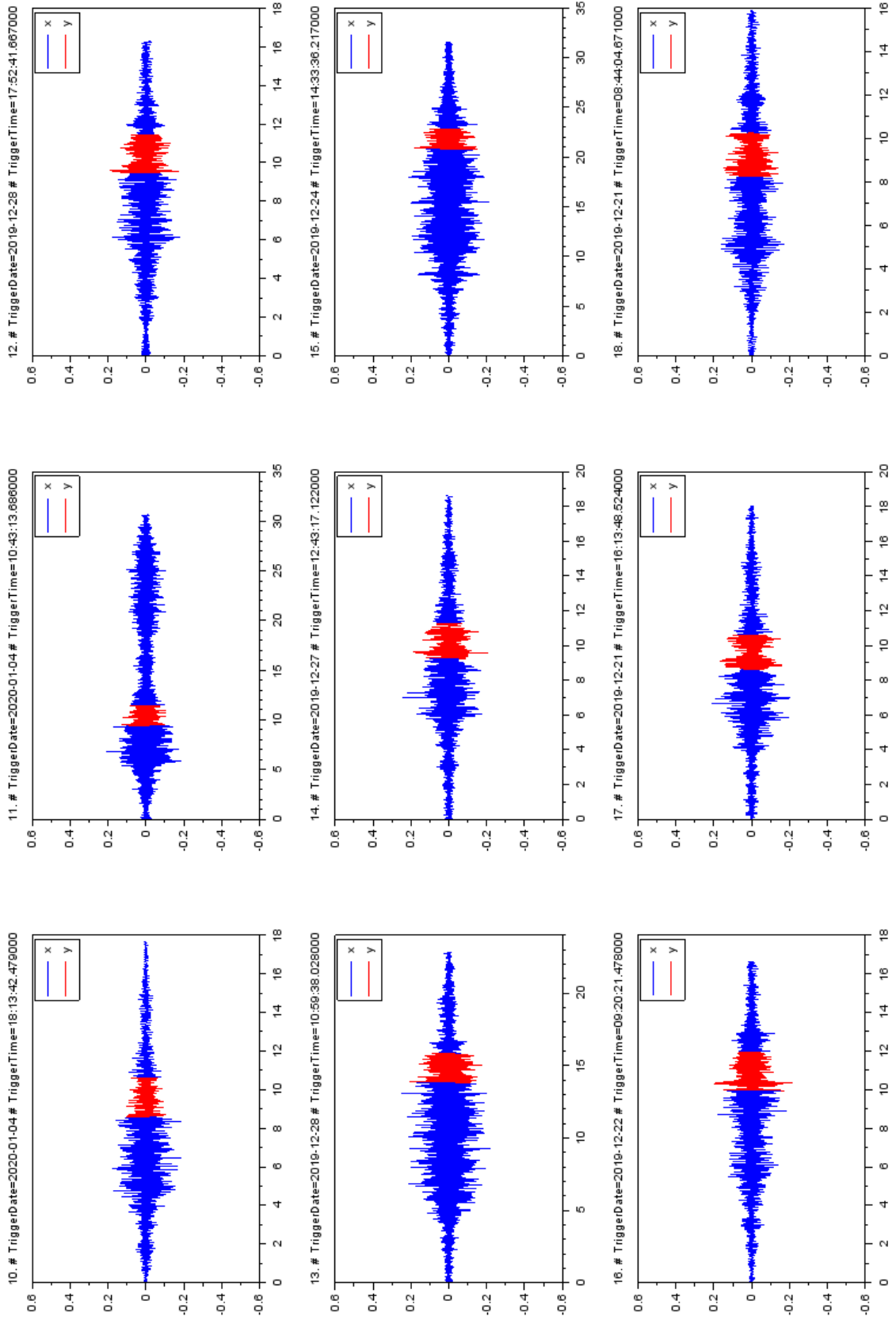






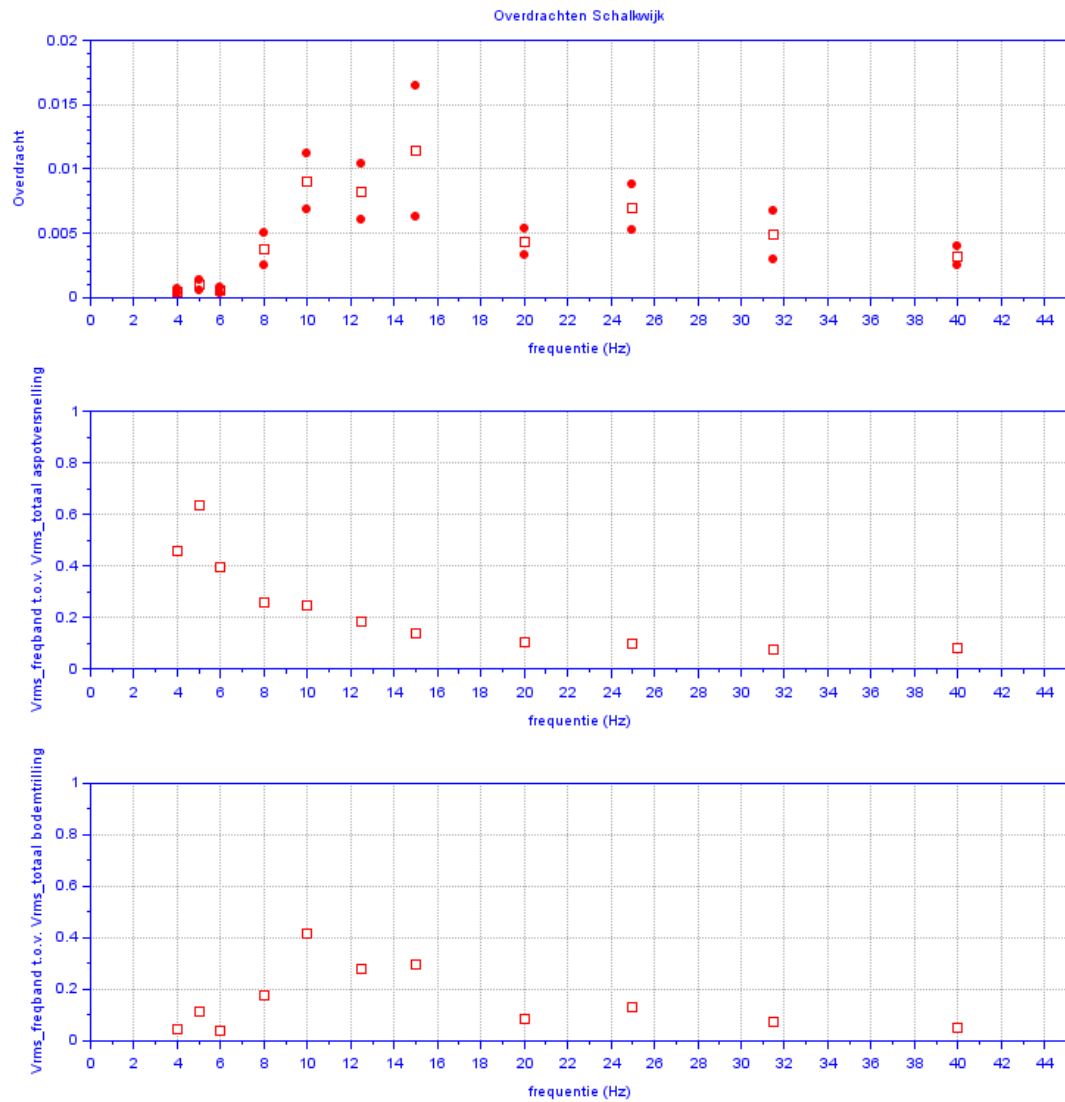
## **BIJLAGE III. TRILLINGSSIGNALLEN OP MAAIVELD DEN BOSCH ZUID**

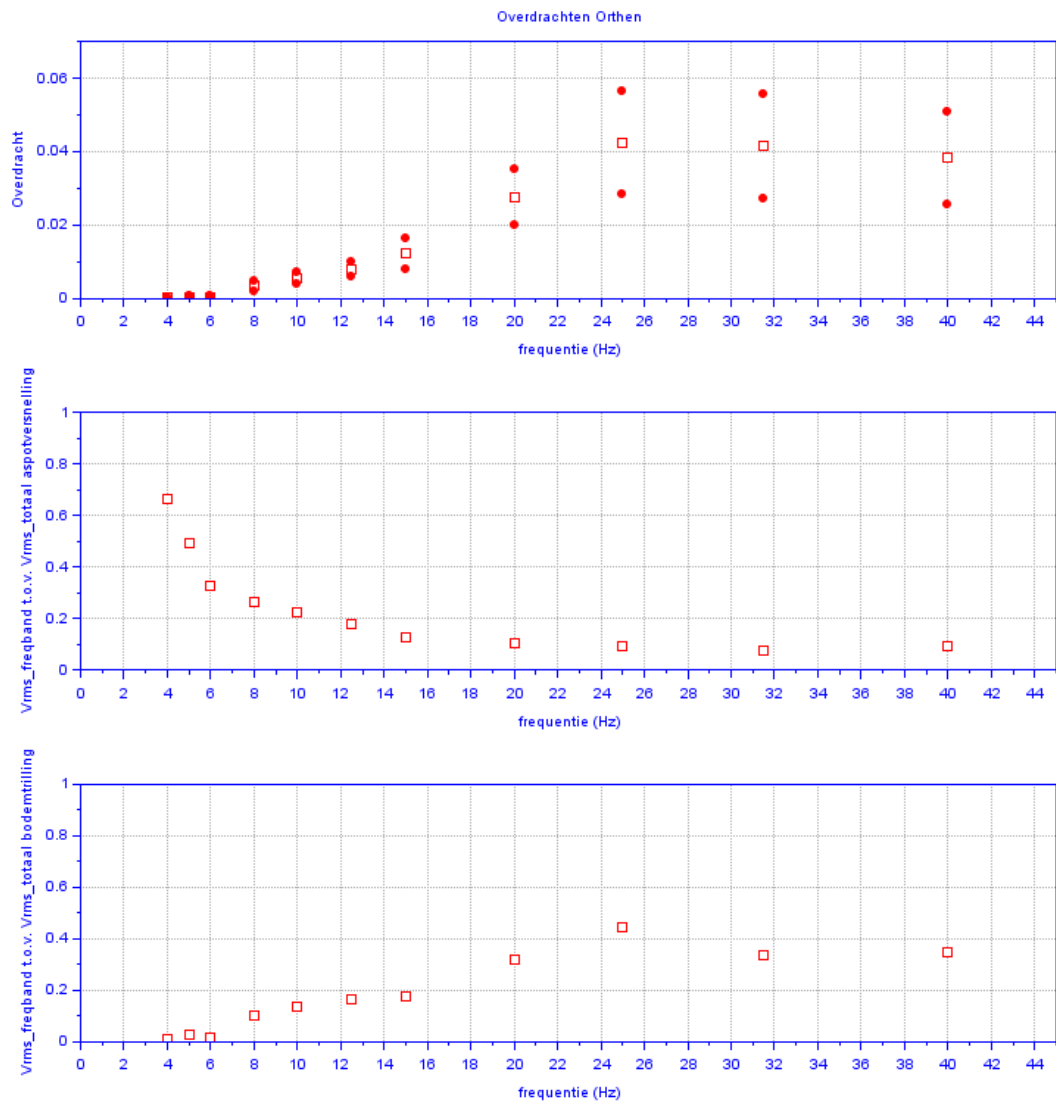




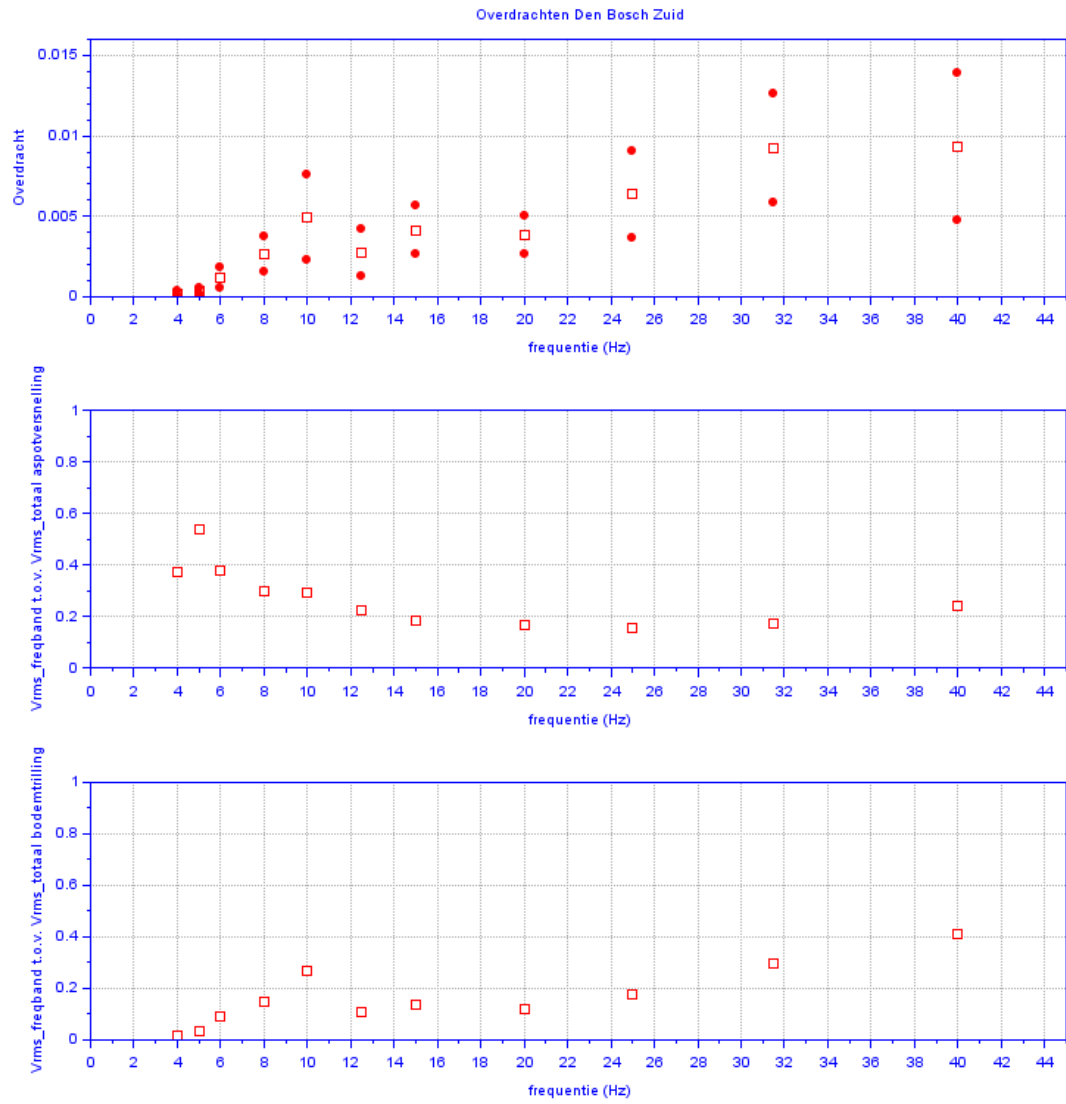


## BIJLAGE III. OVERDRACHTEN 2 SEC INTERVALLEN

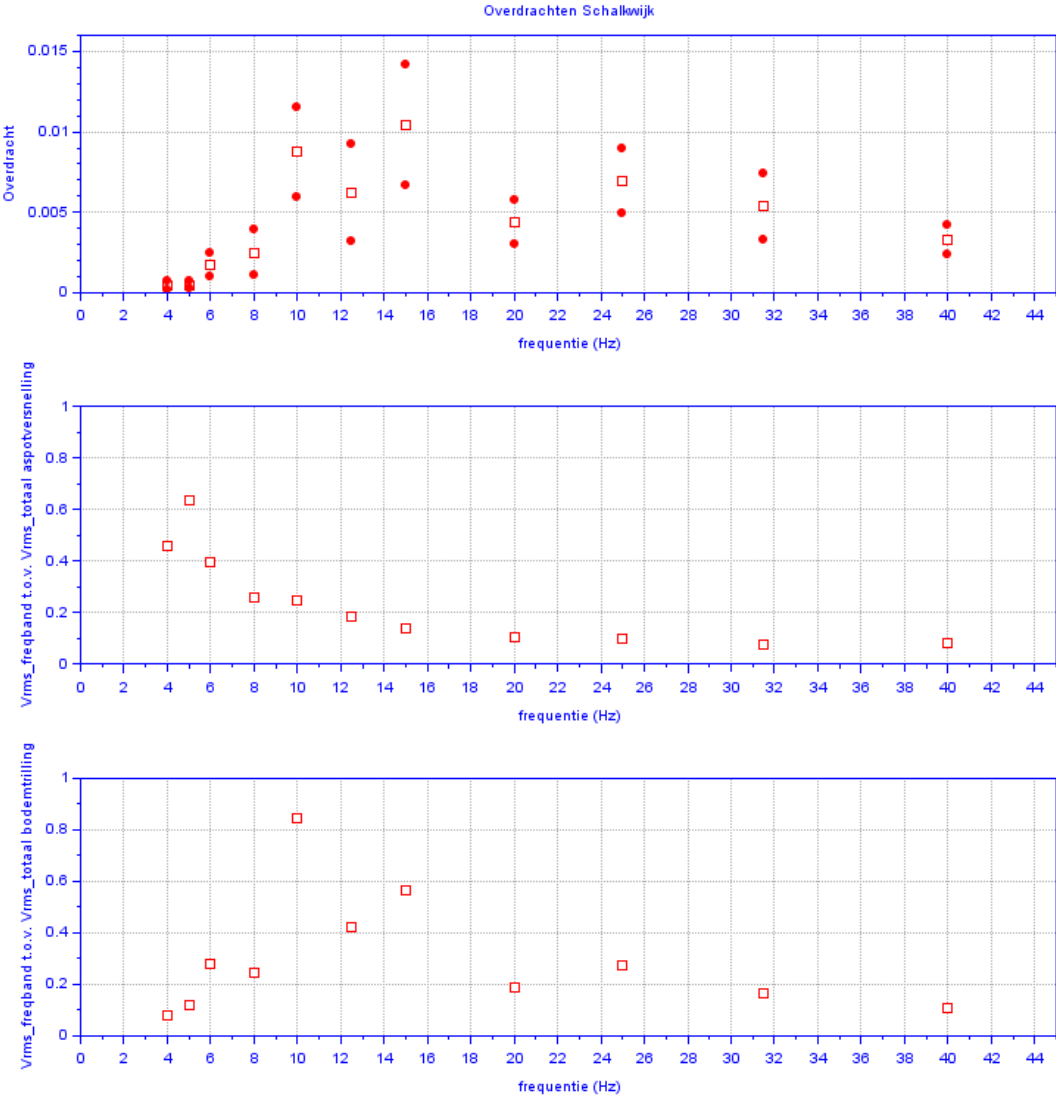


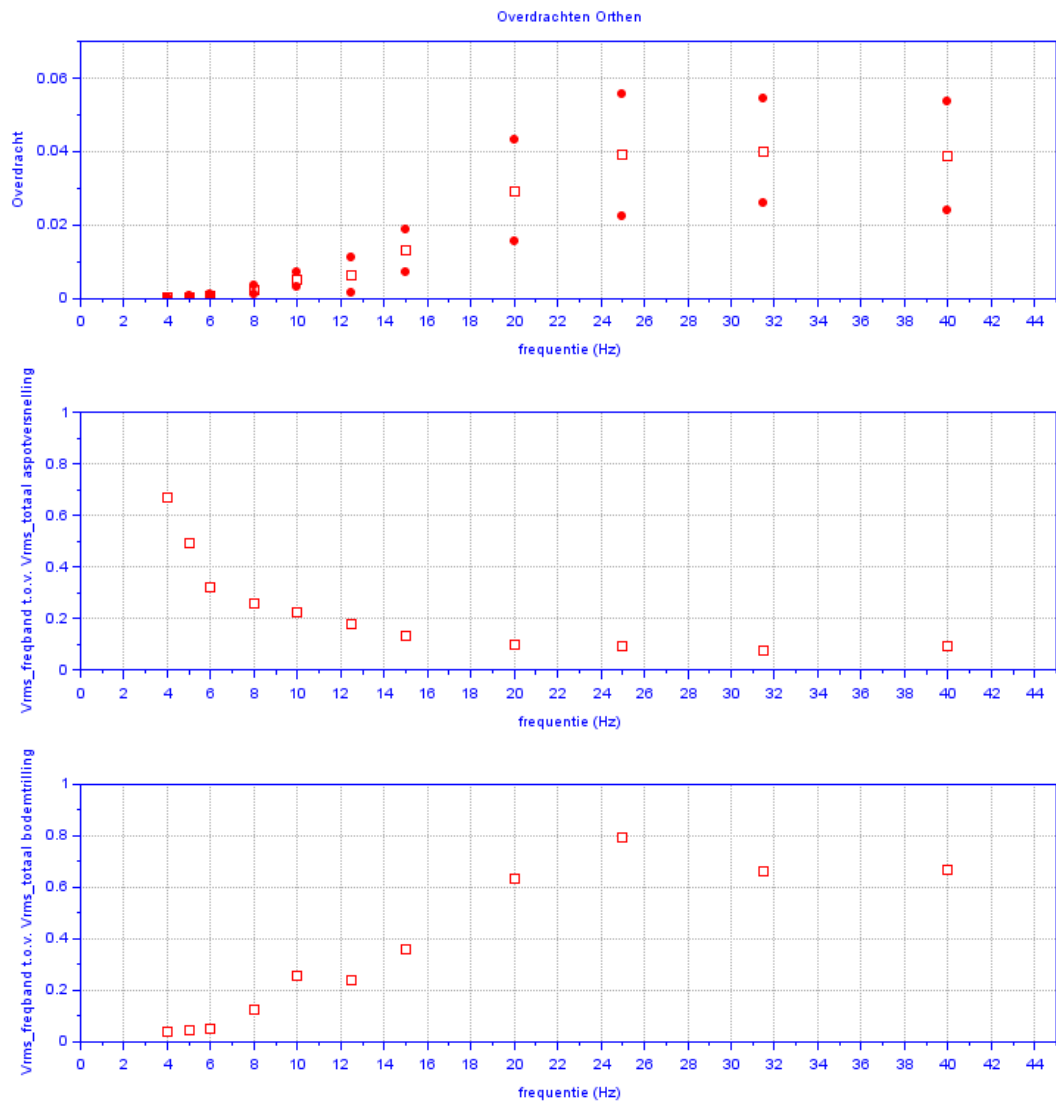


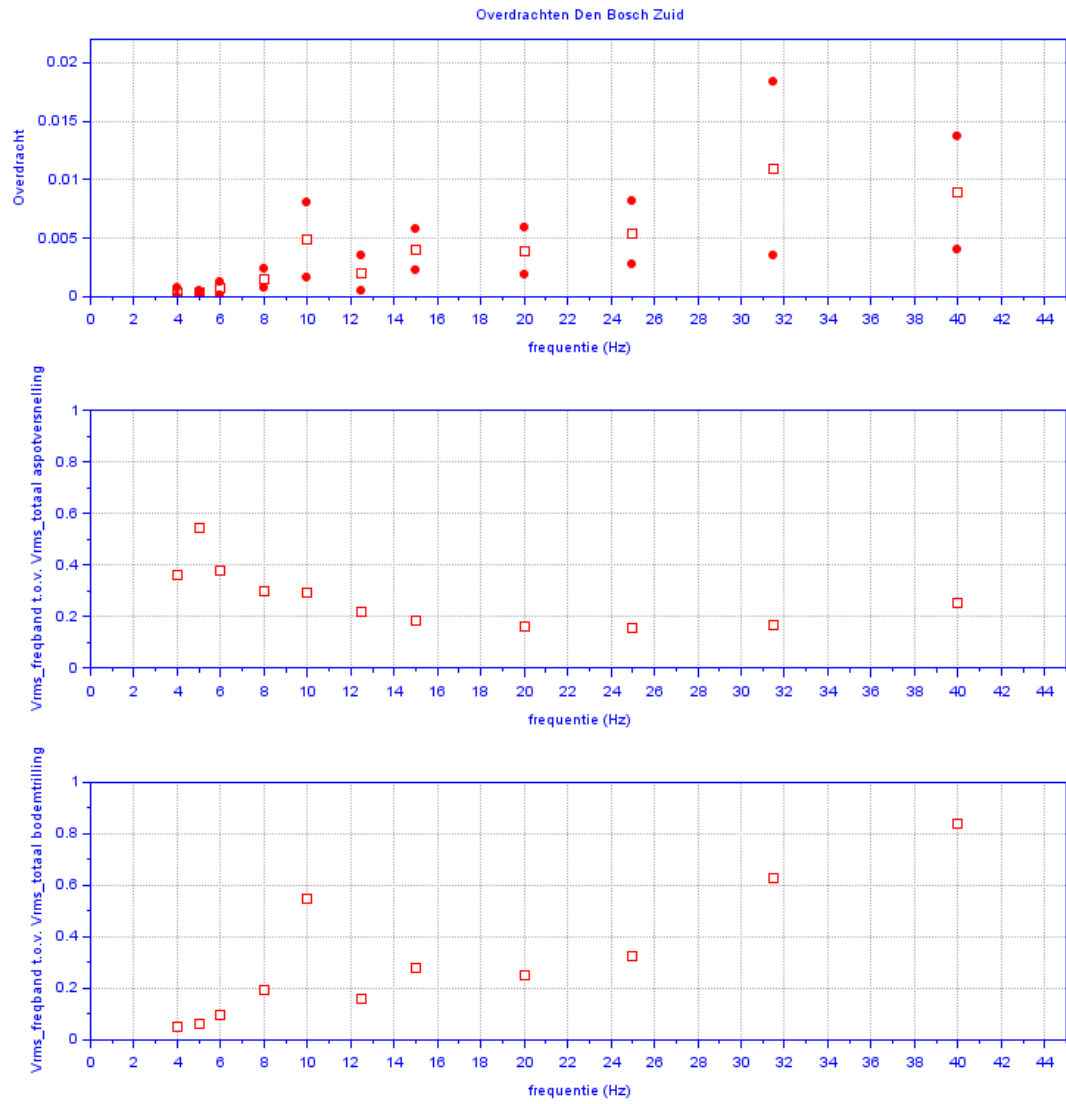




# BIJLAGE III. OVERDRACHTEN 1 SEC INTERVALLEN

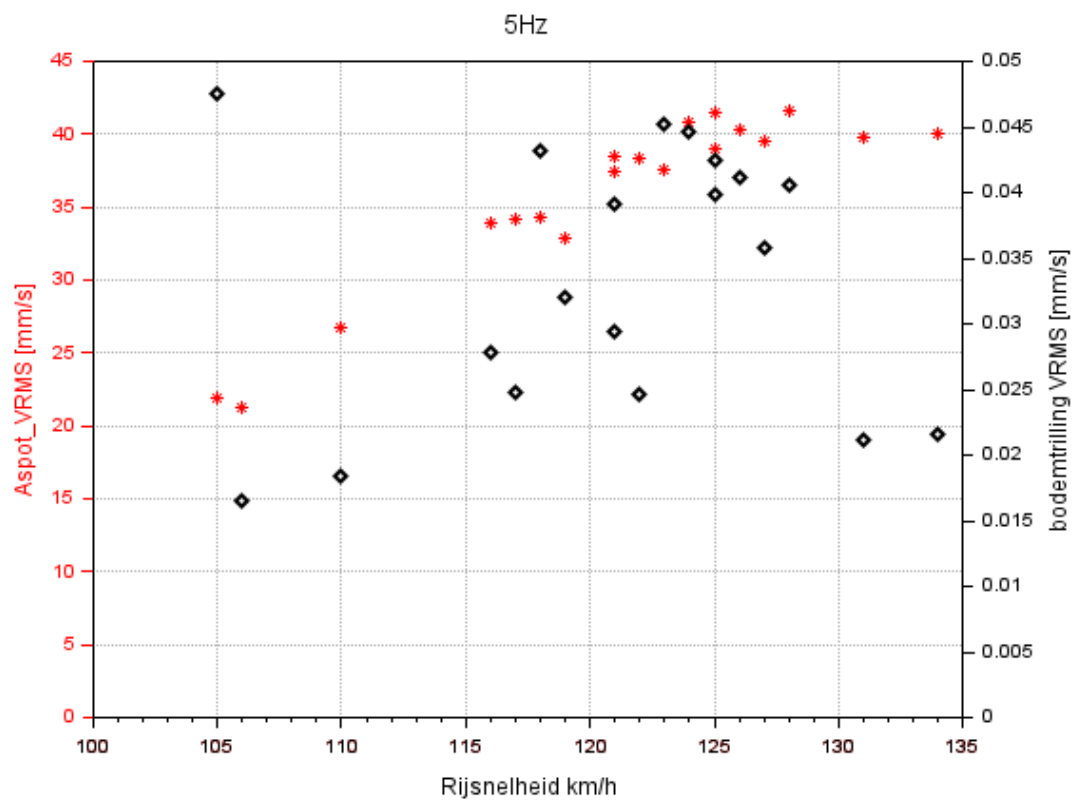
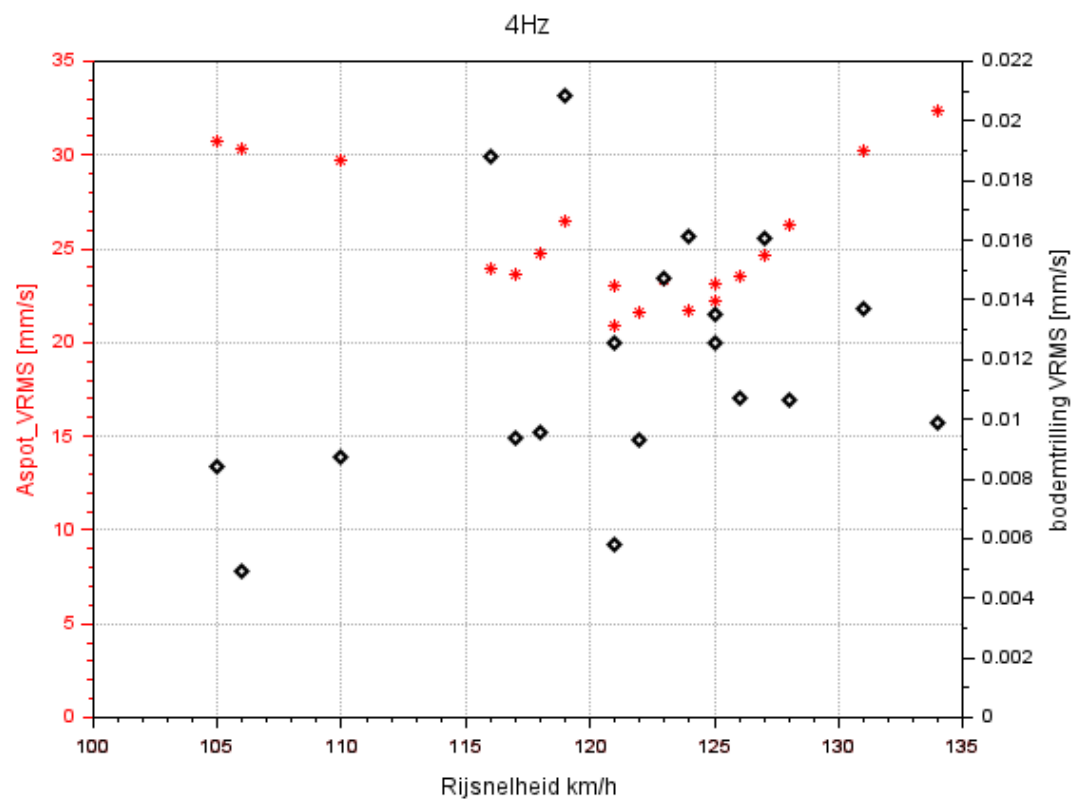


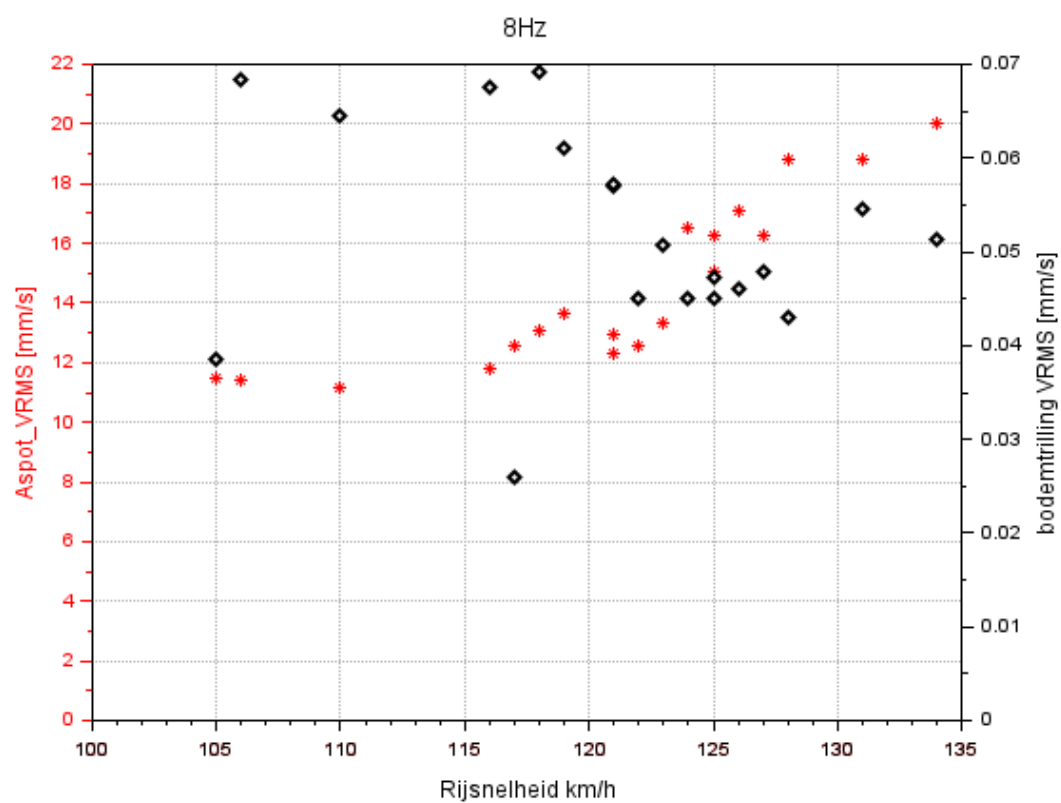
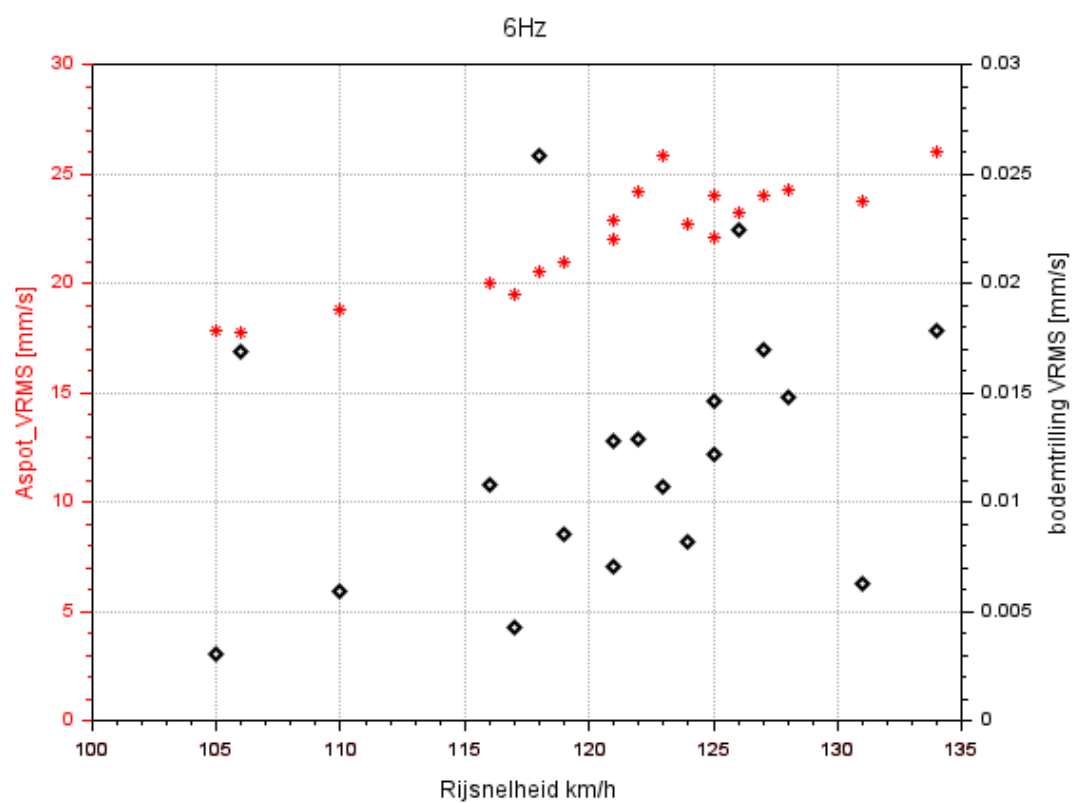


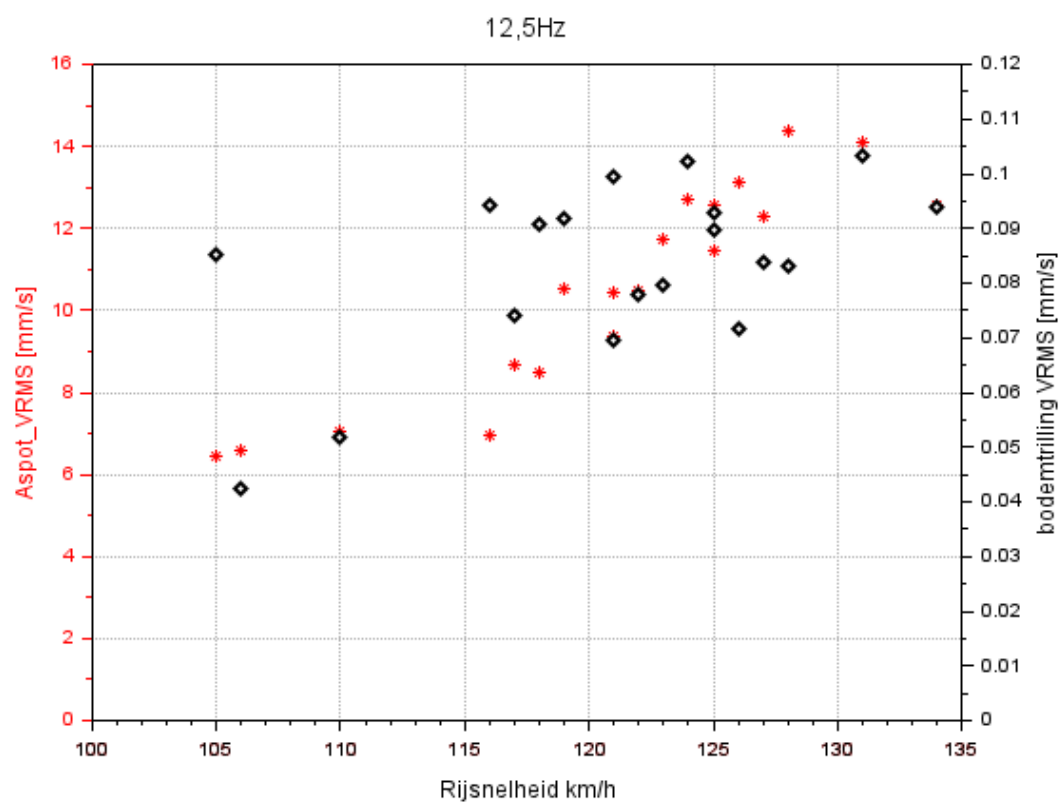
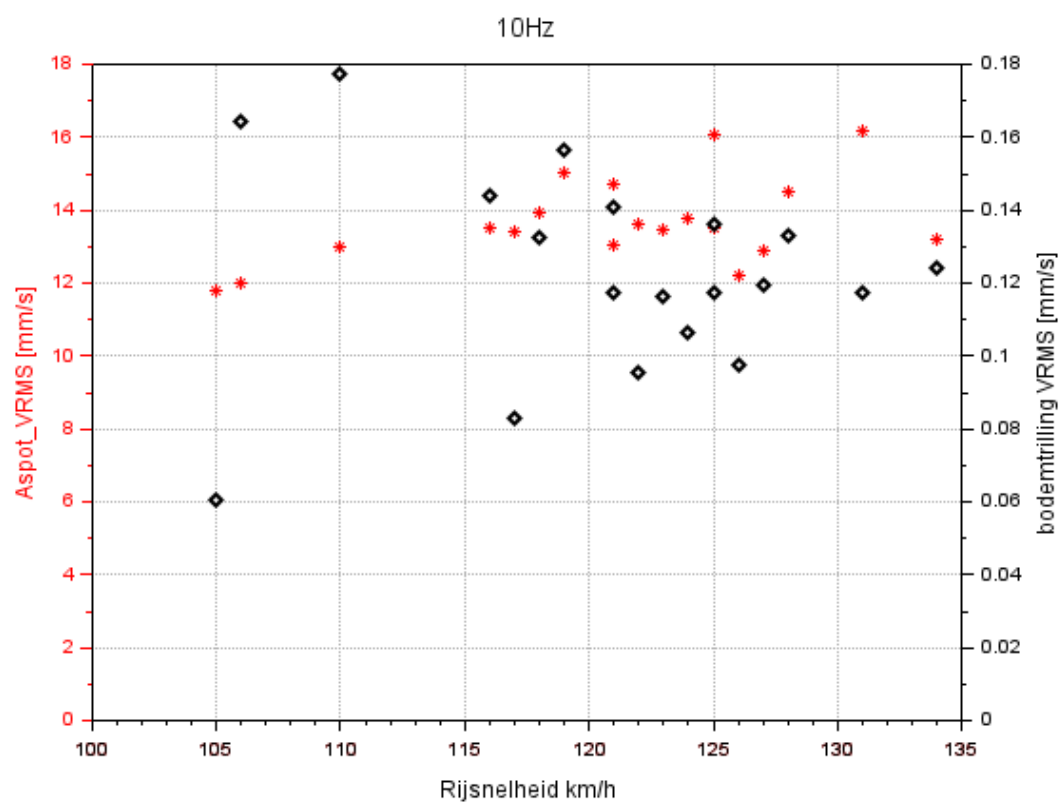


## **BIJLAGE III. VRMS UITGEZET TEGEN RIJSNELHEID 2SECONDE-INTERVALLEN**

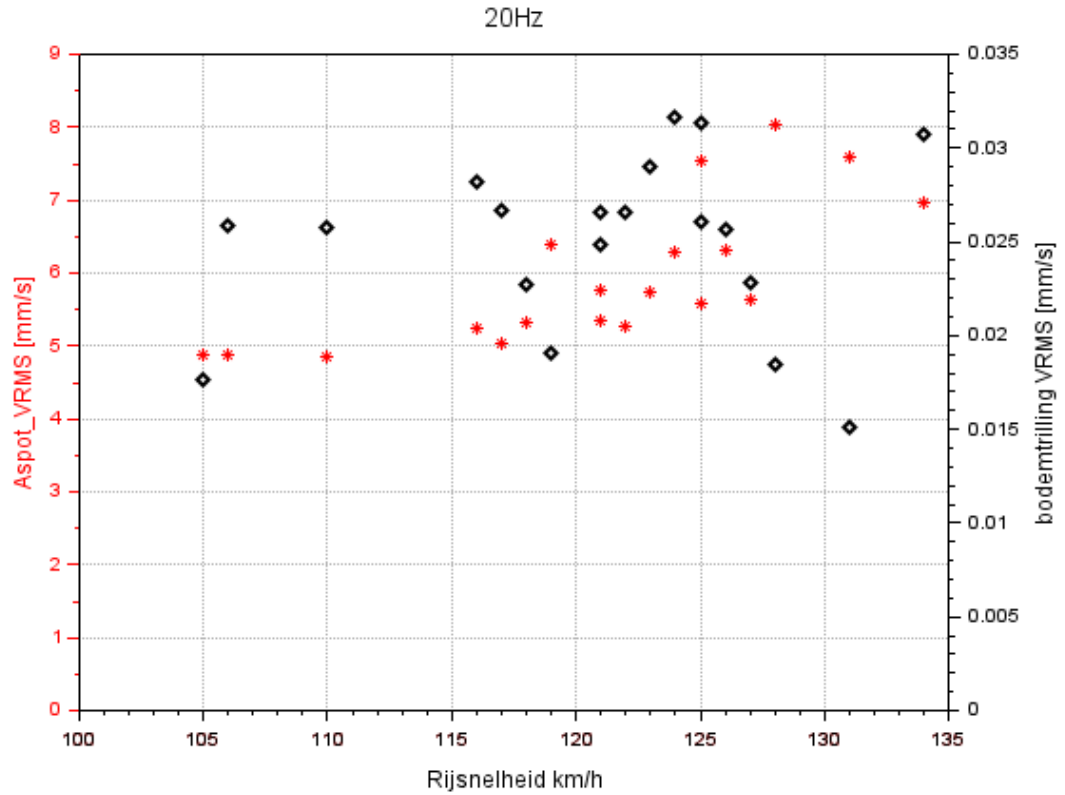
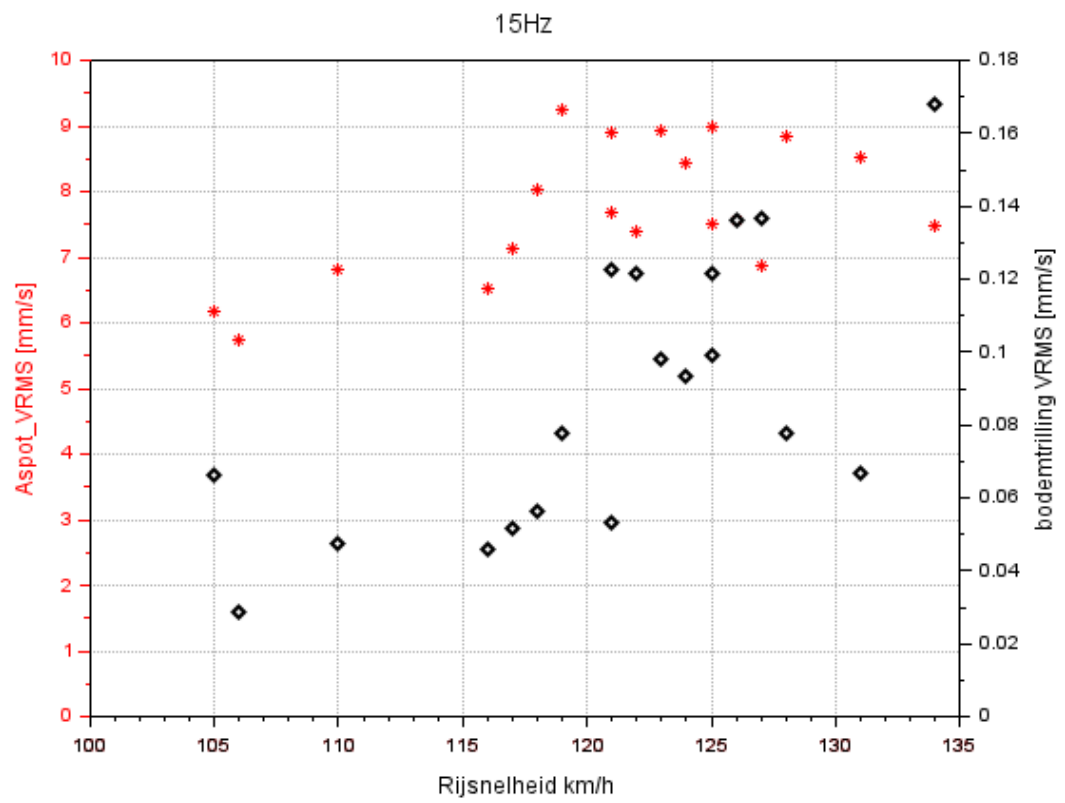
Figuur 0.1 Schalkwijk

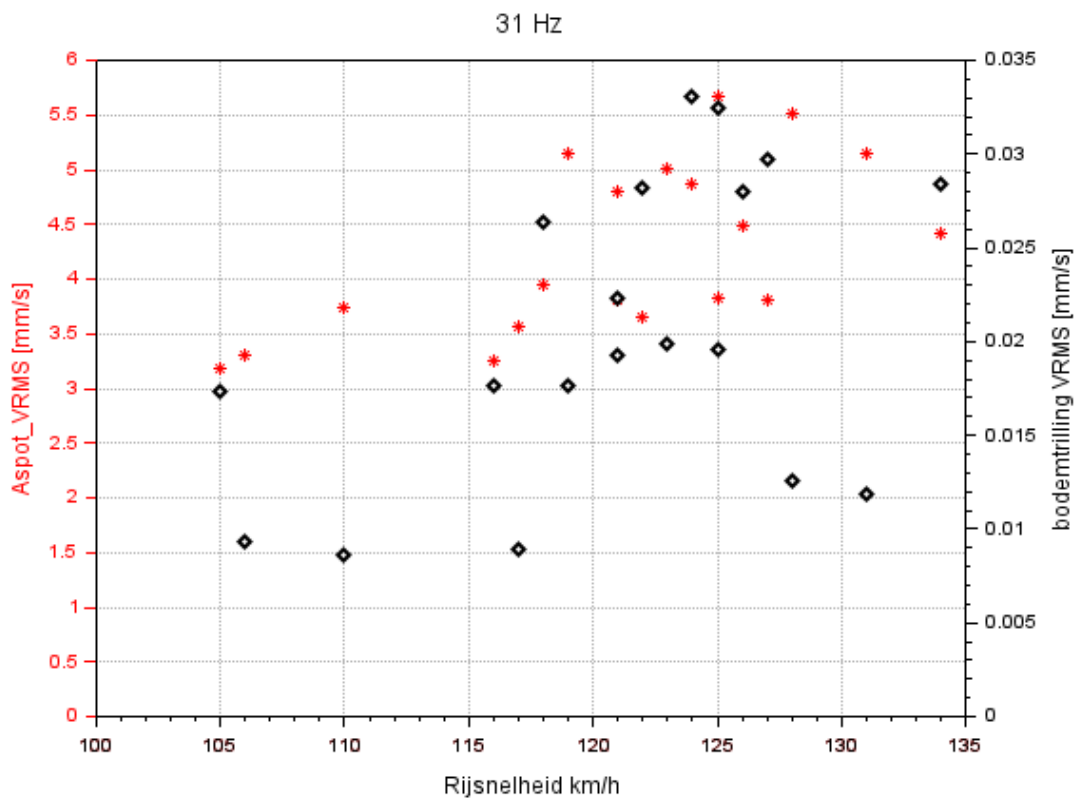
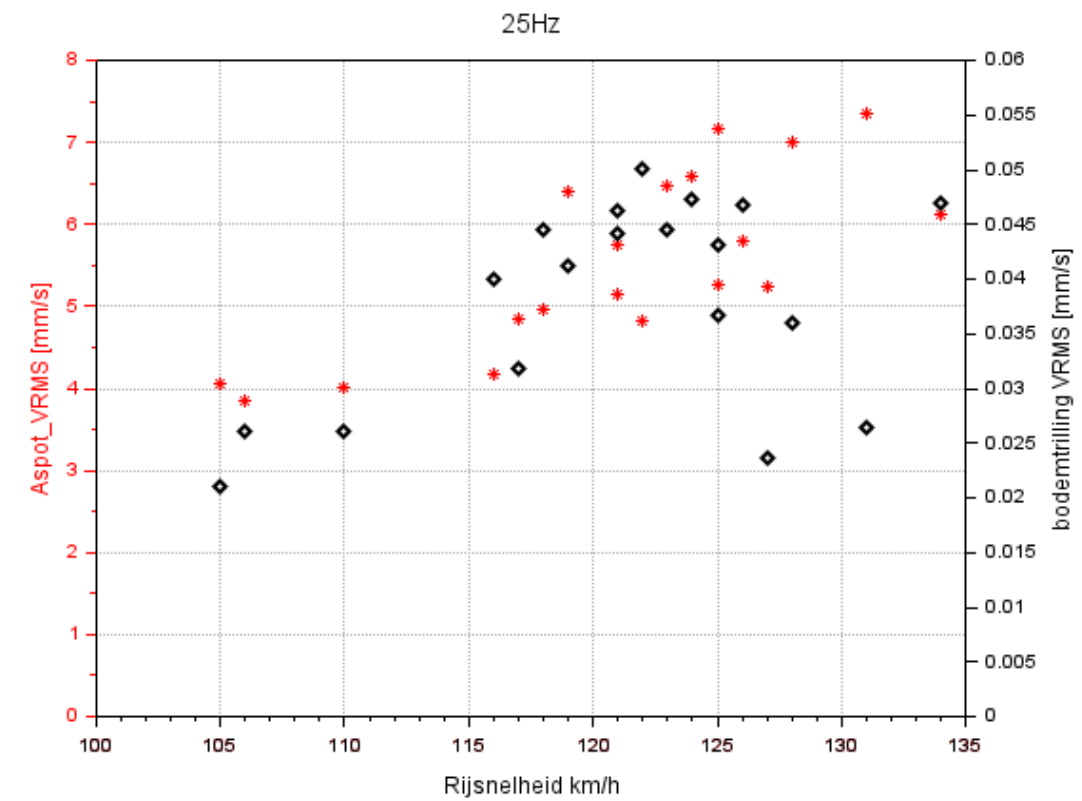


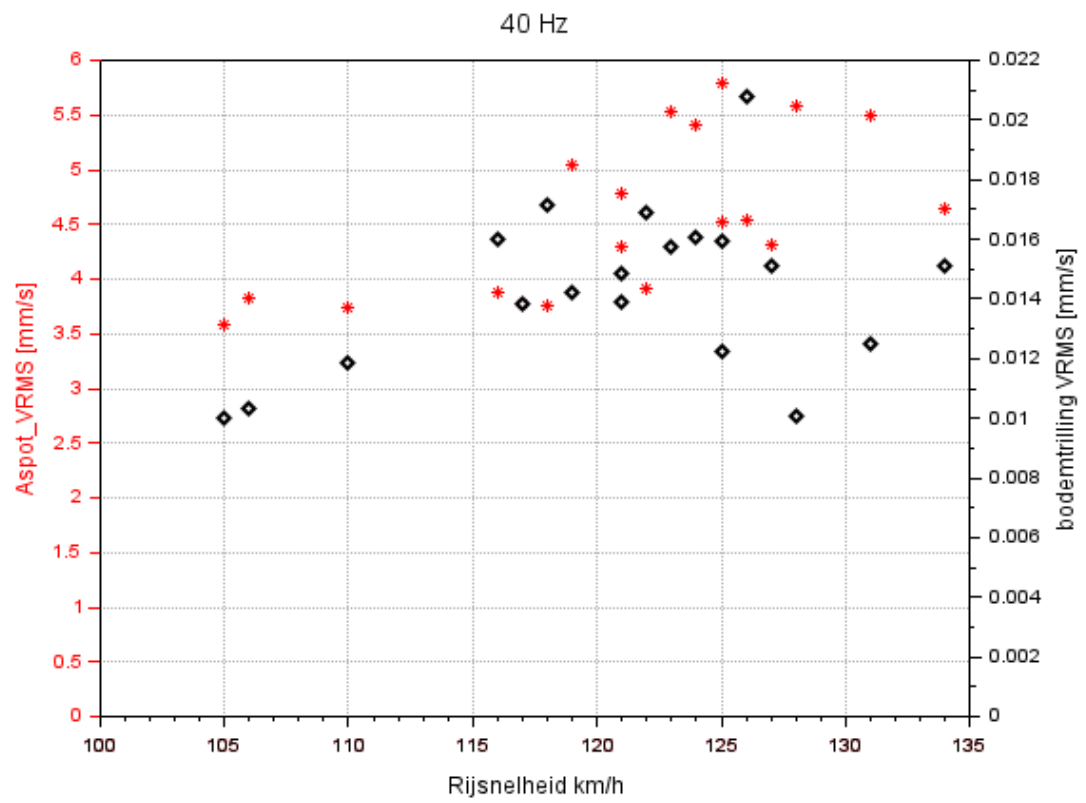




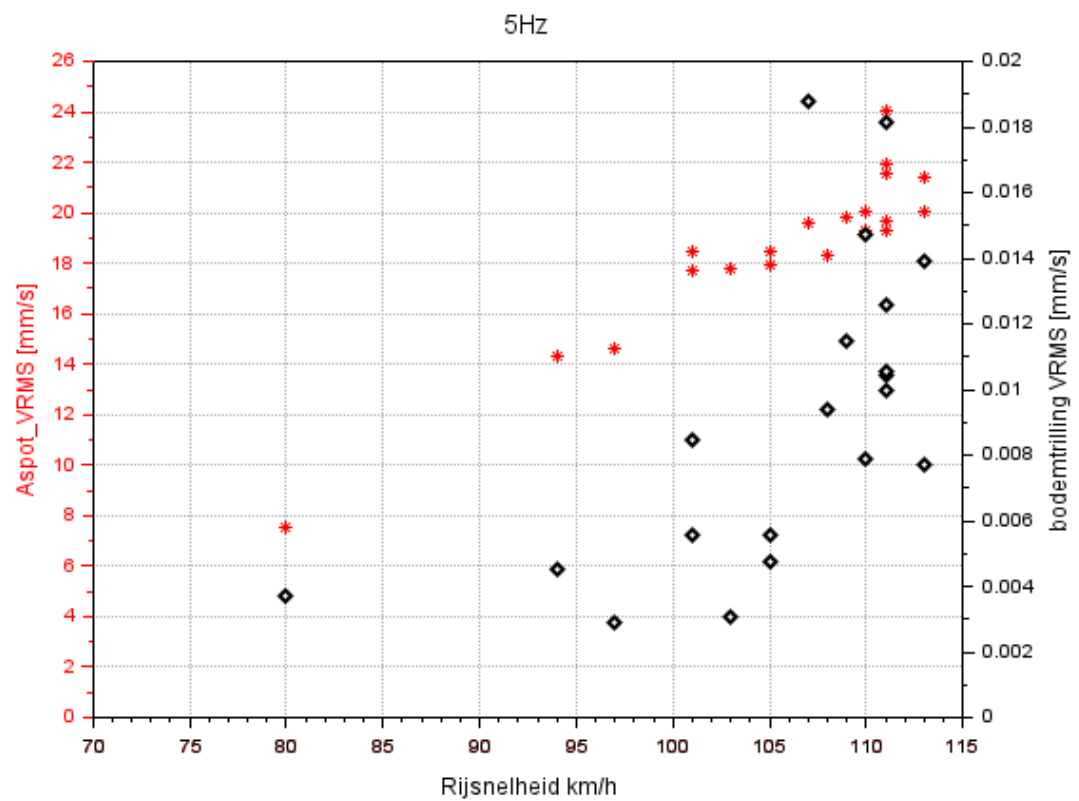
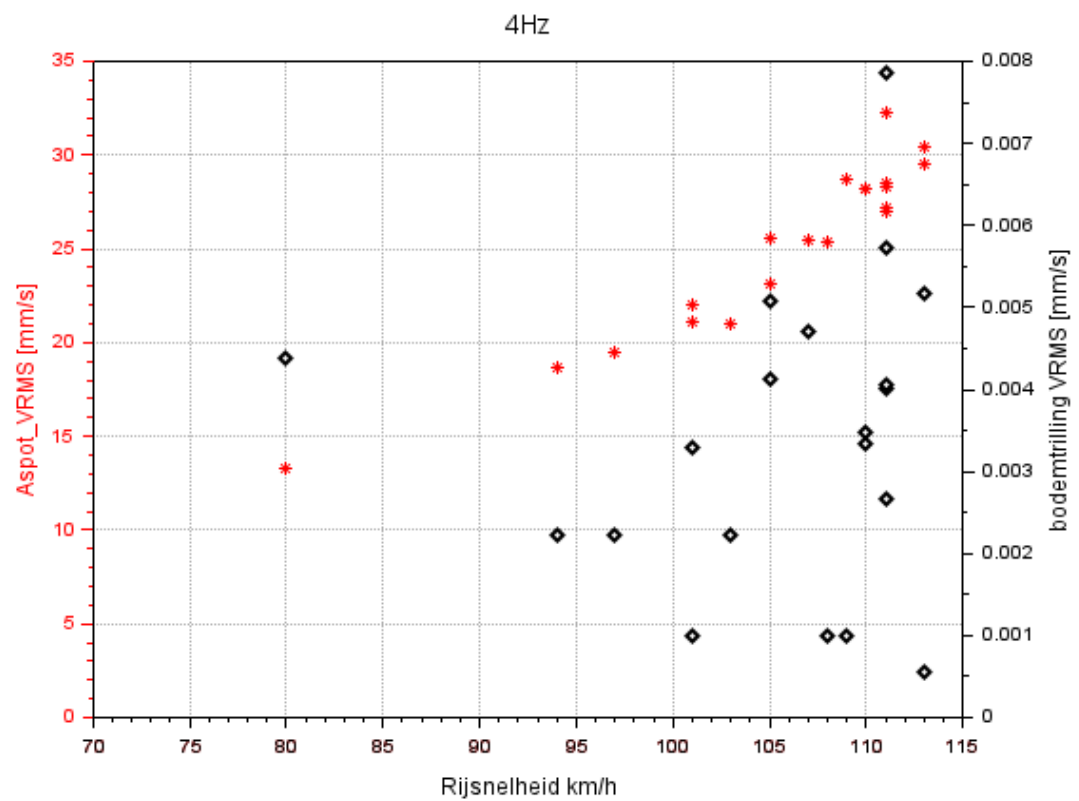


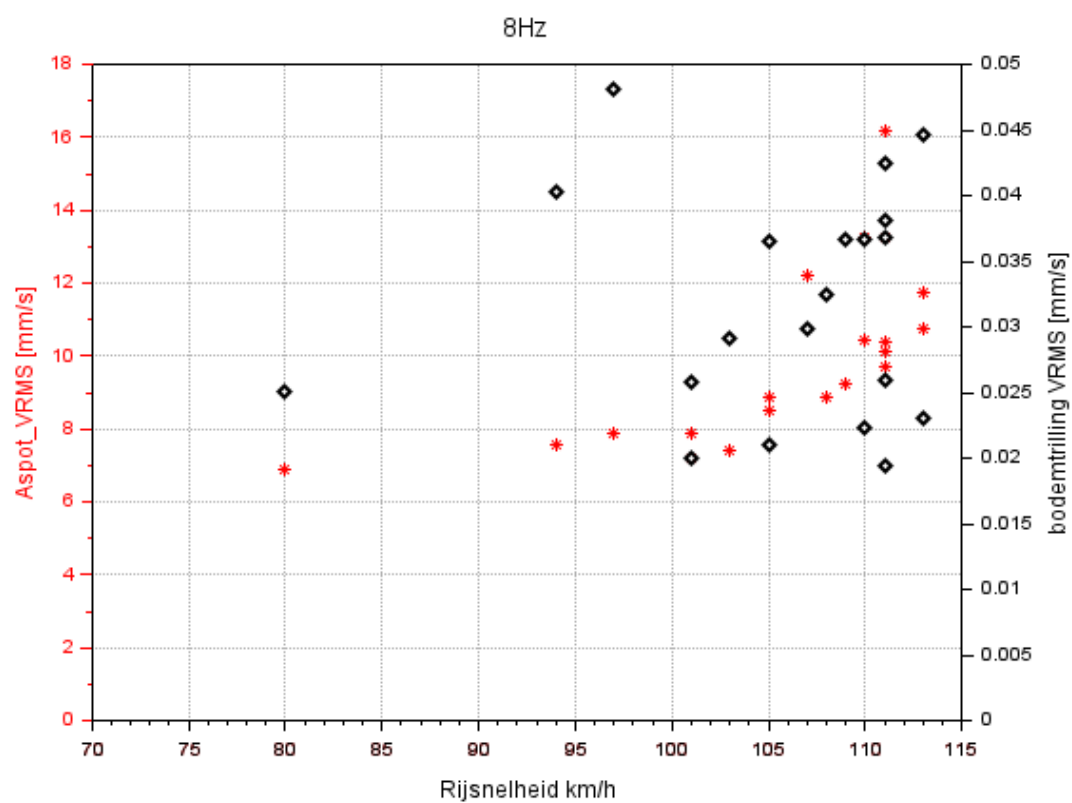
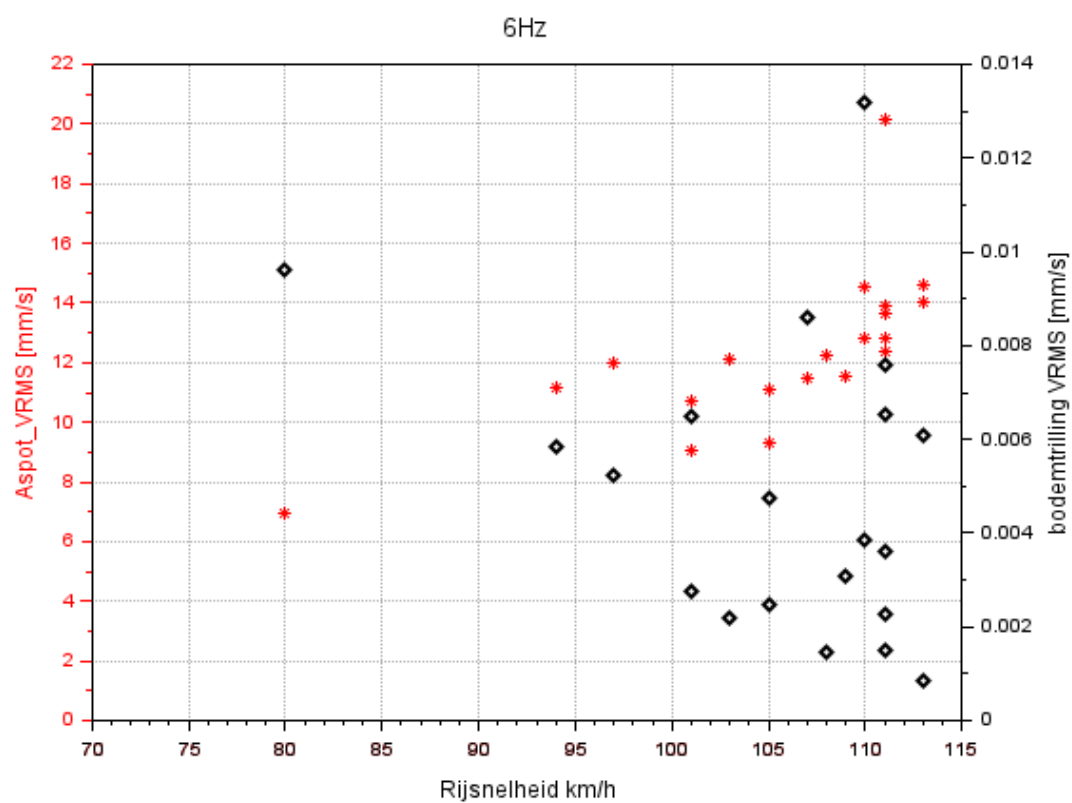


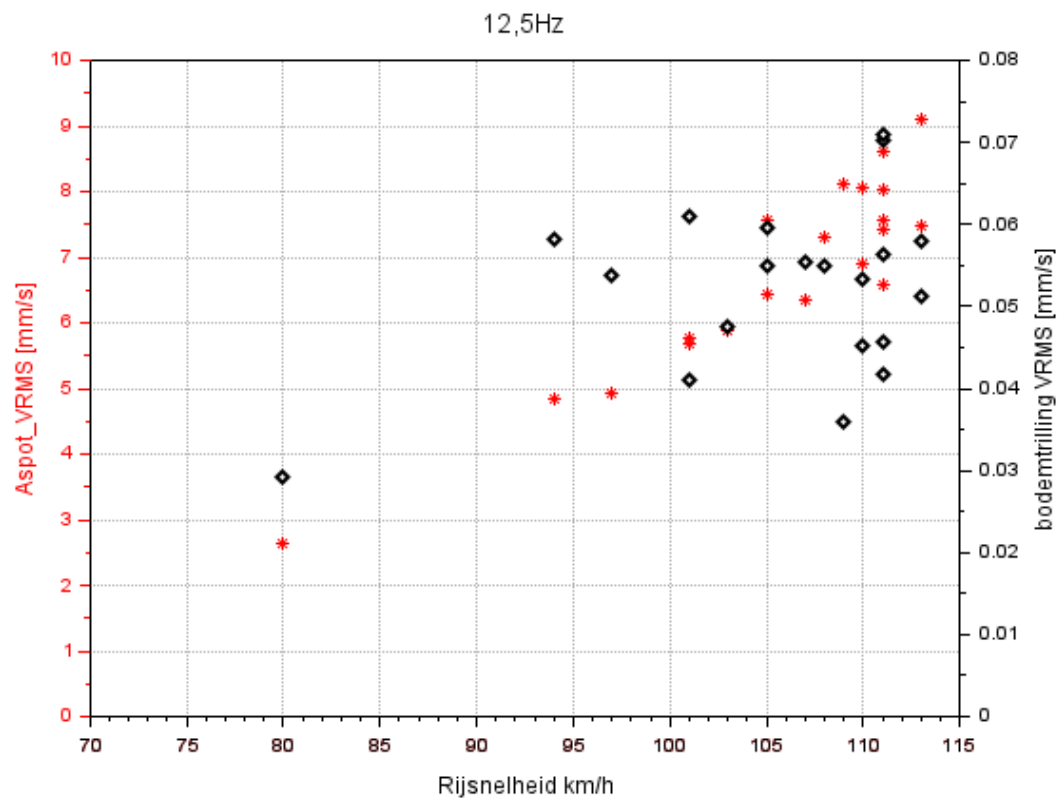
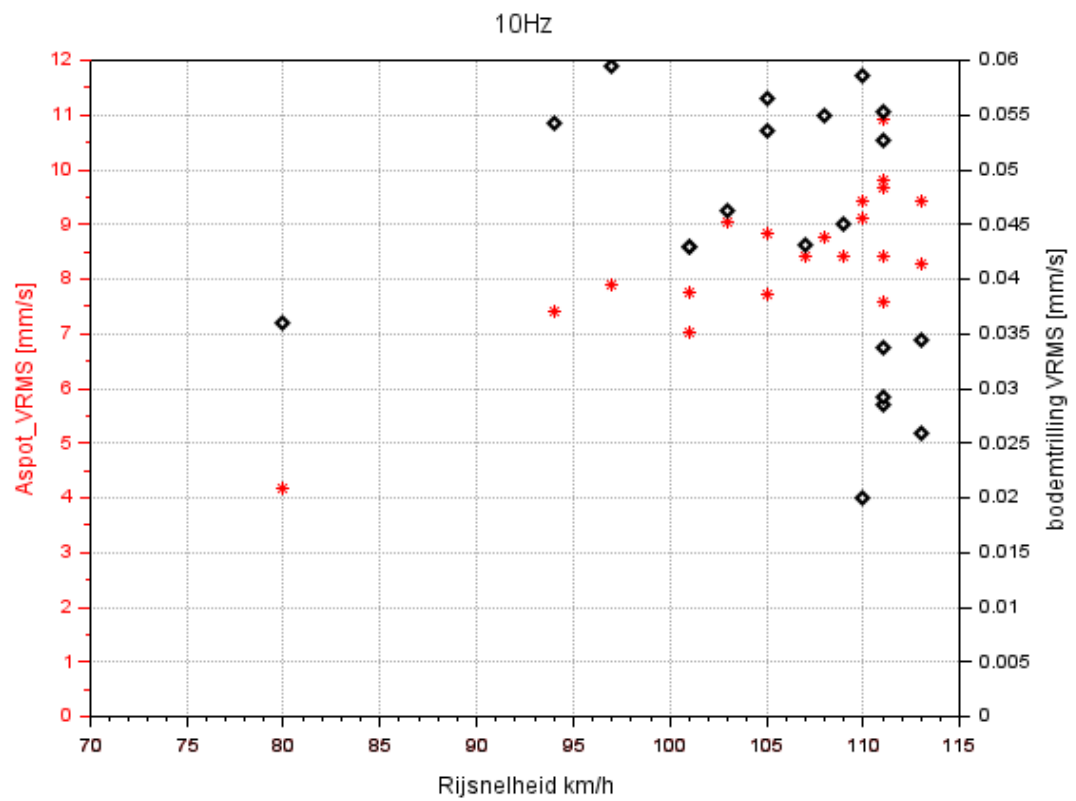


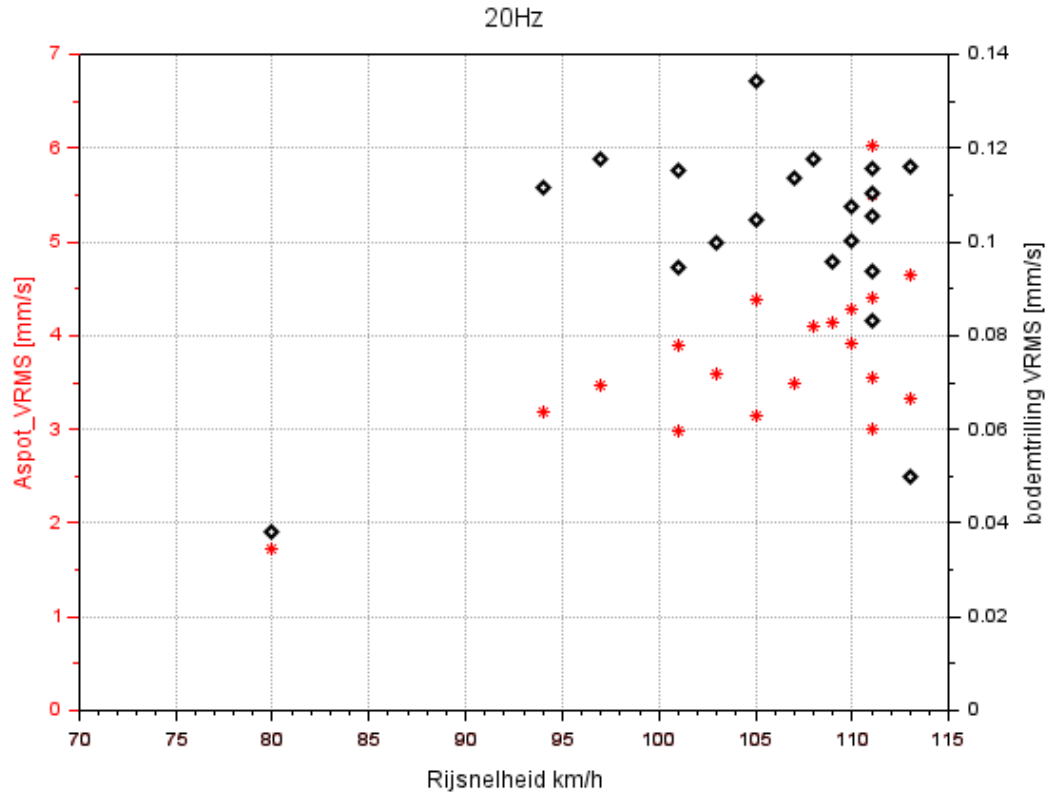
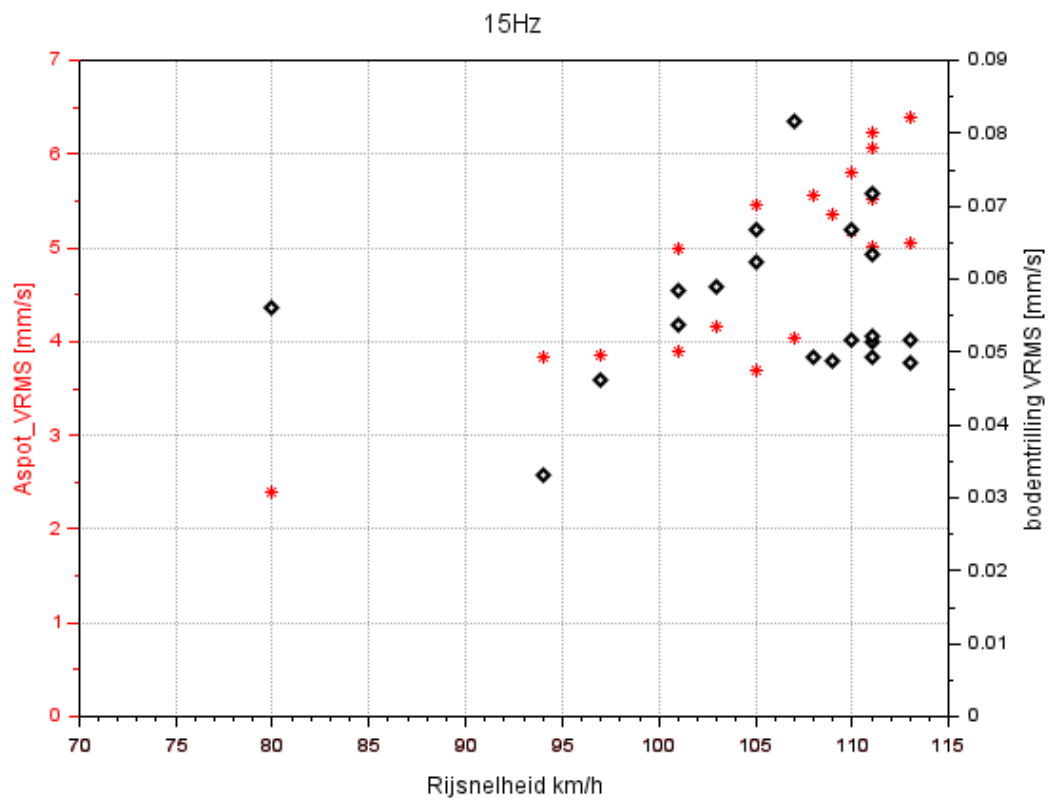


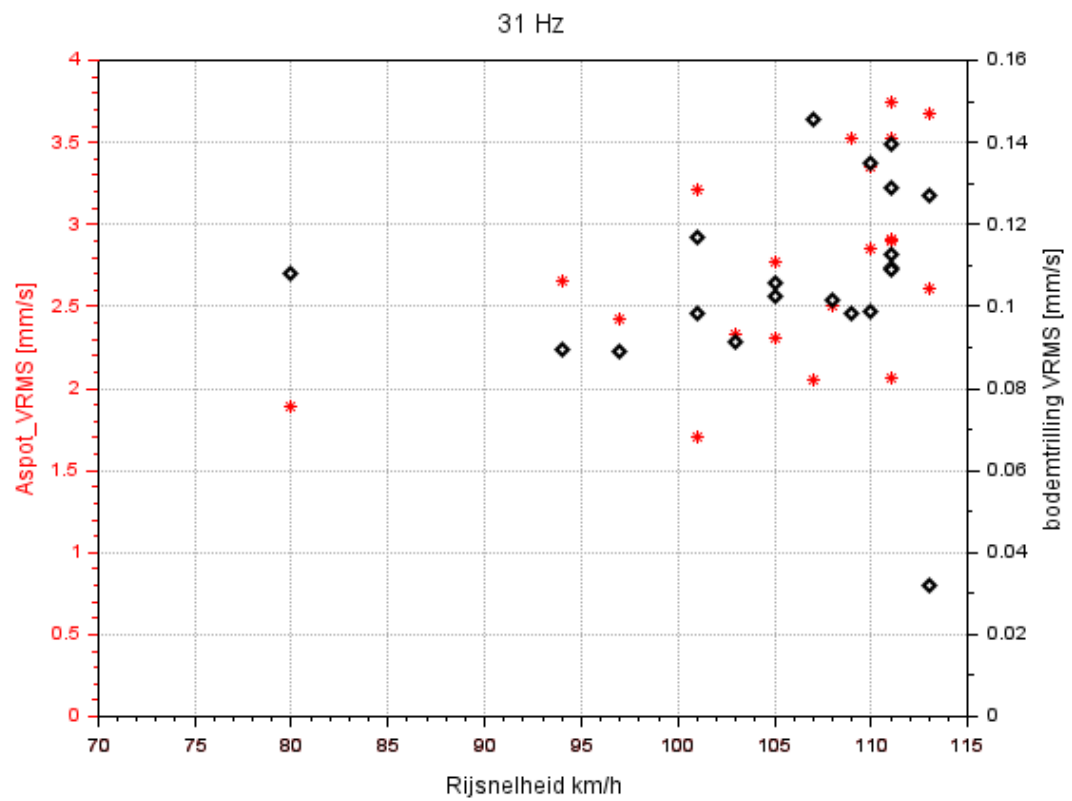
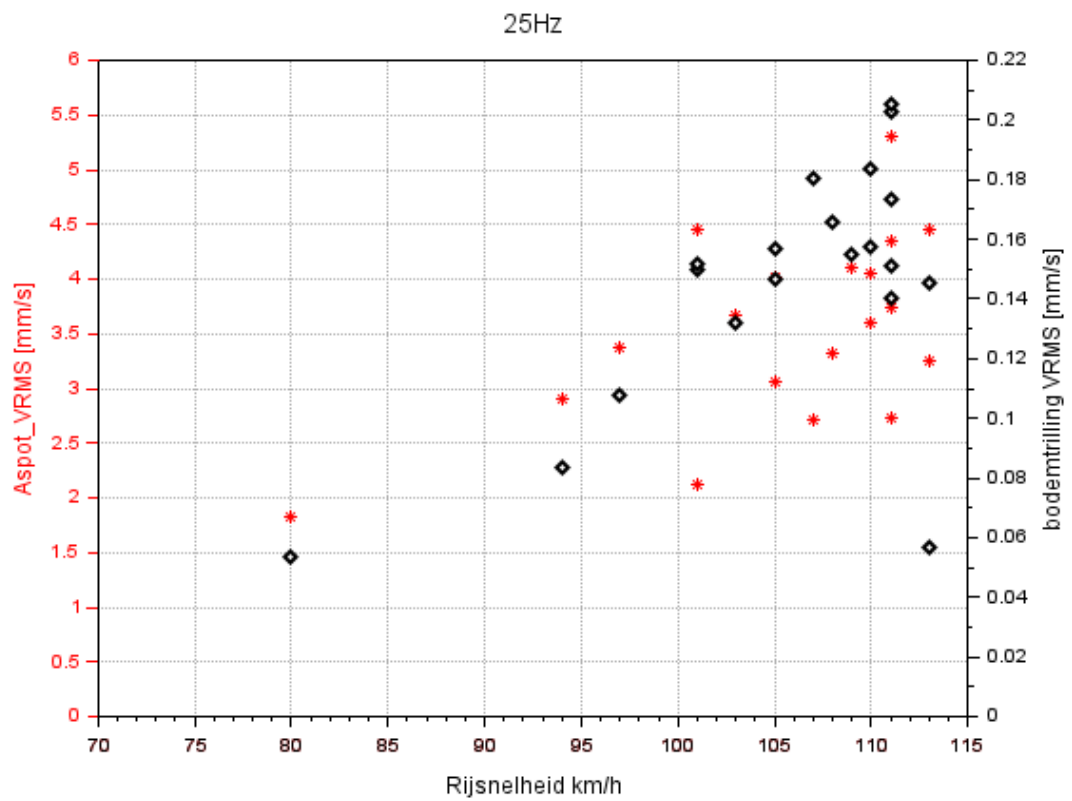
Figuur 0.2 Orthen



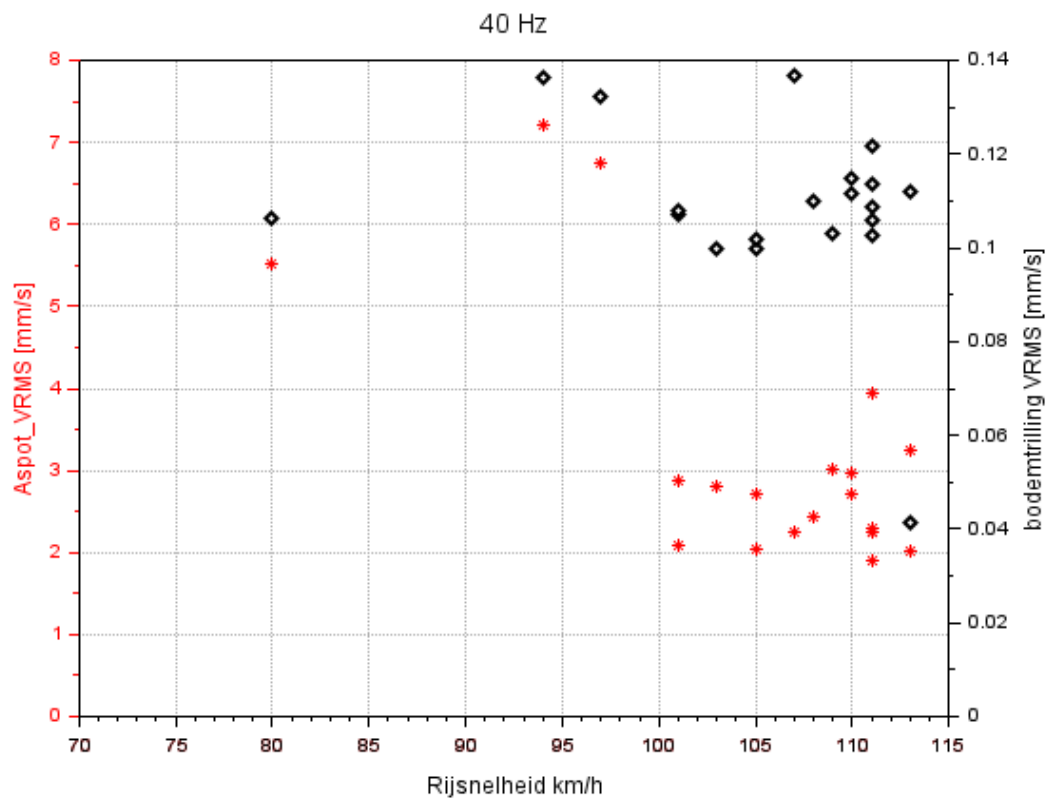




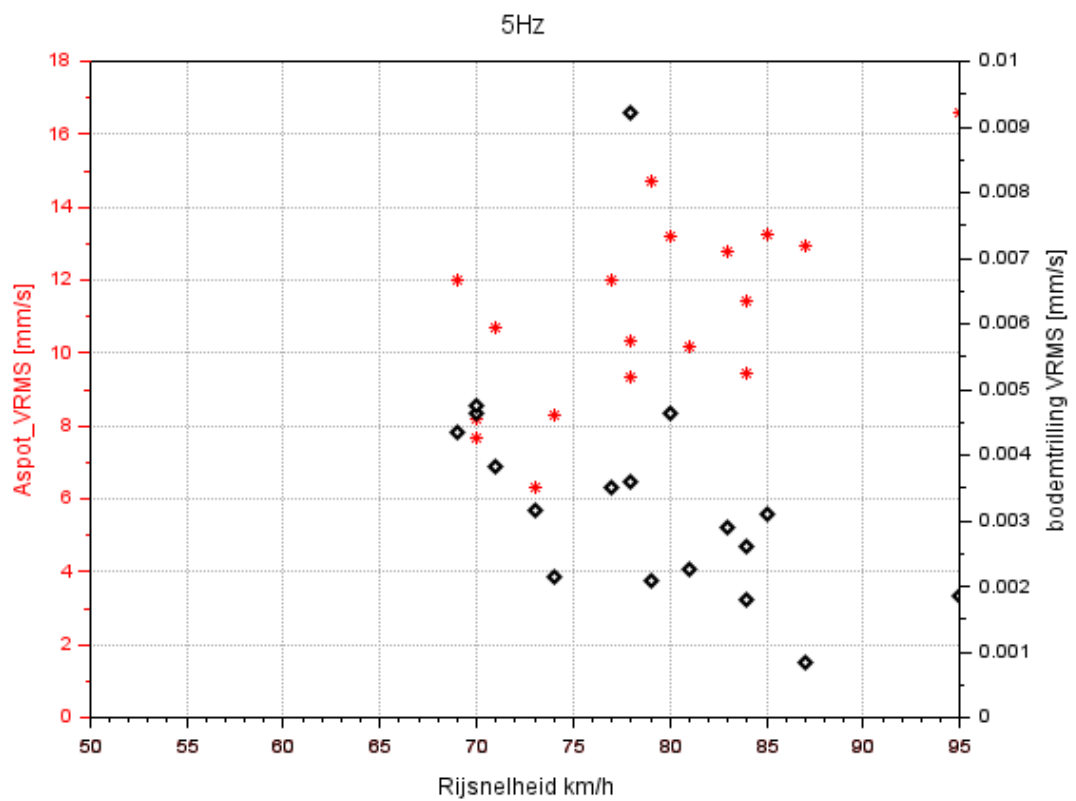
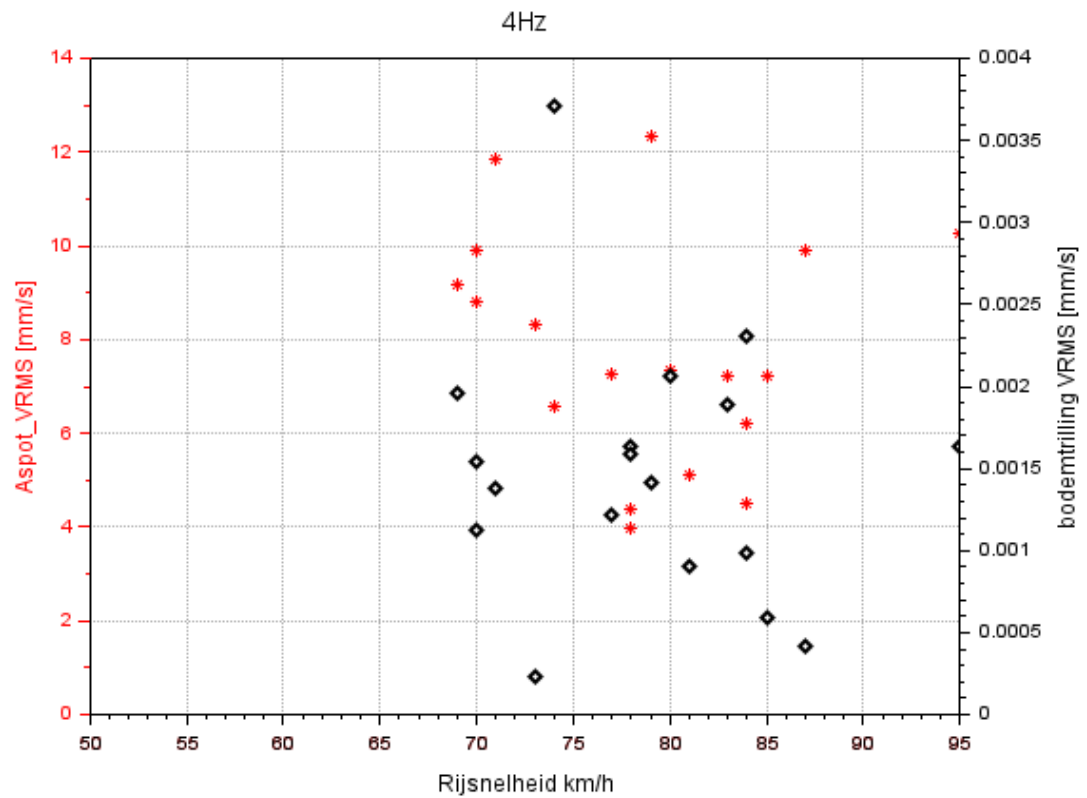


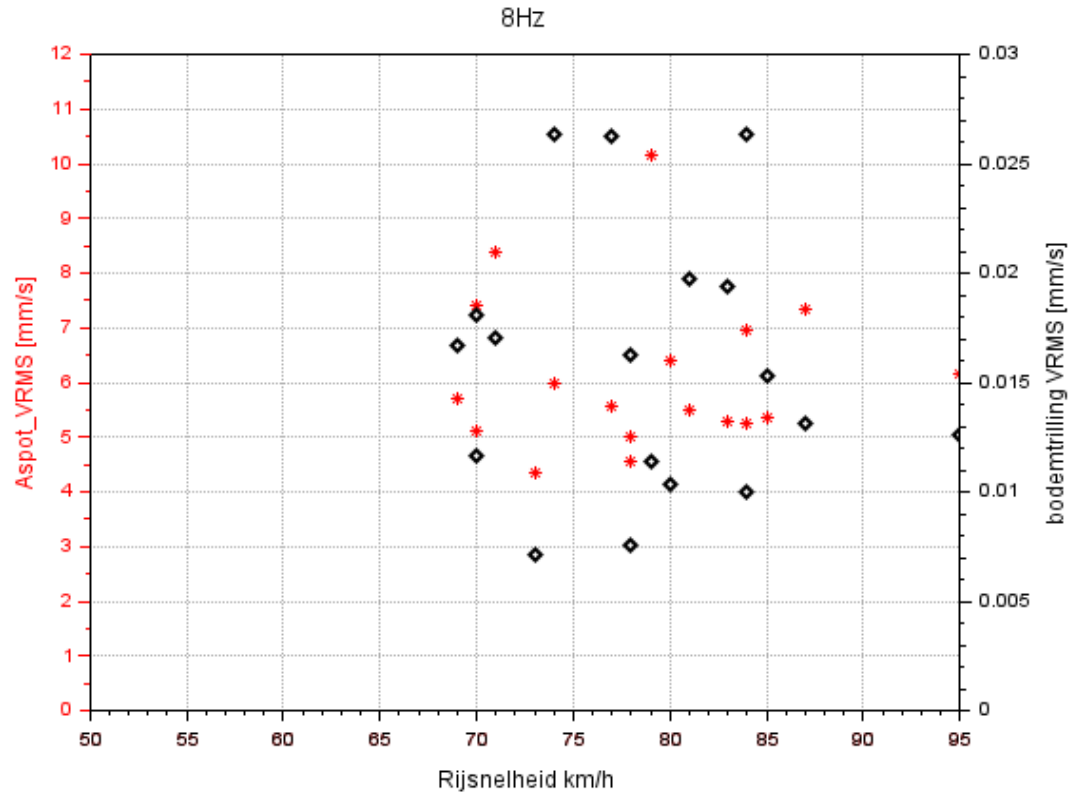
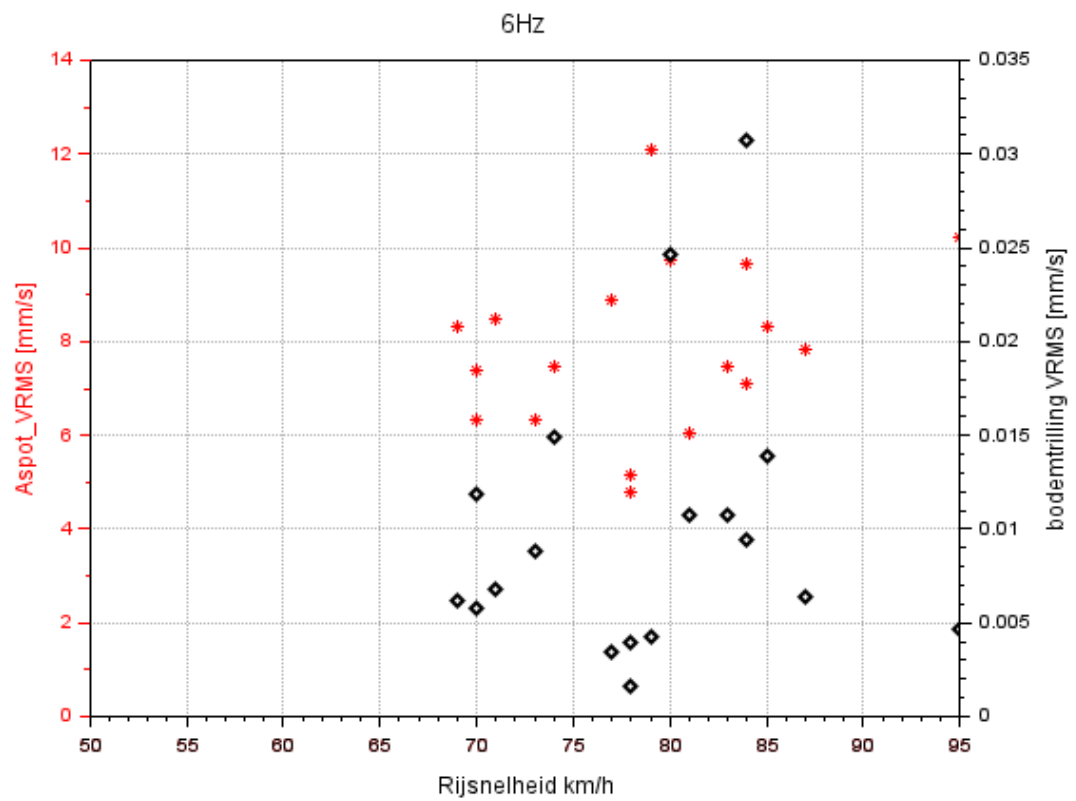


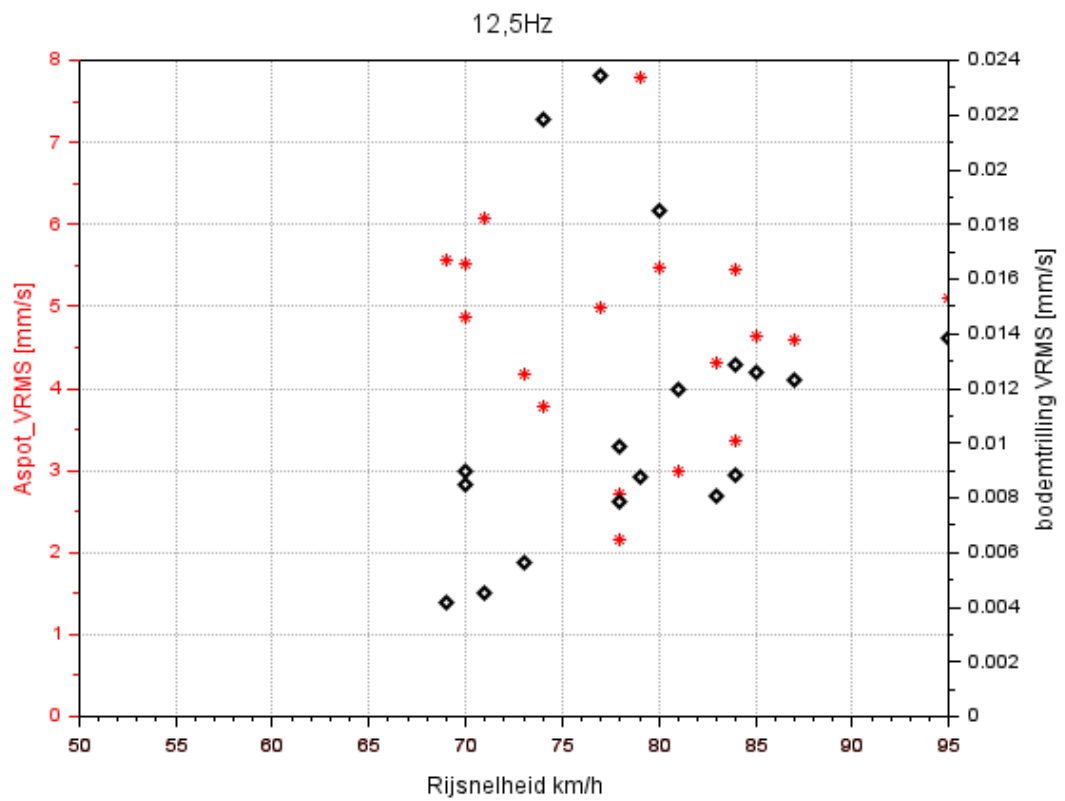
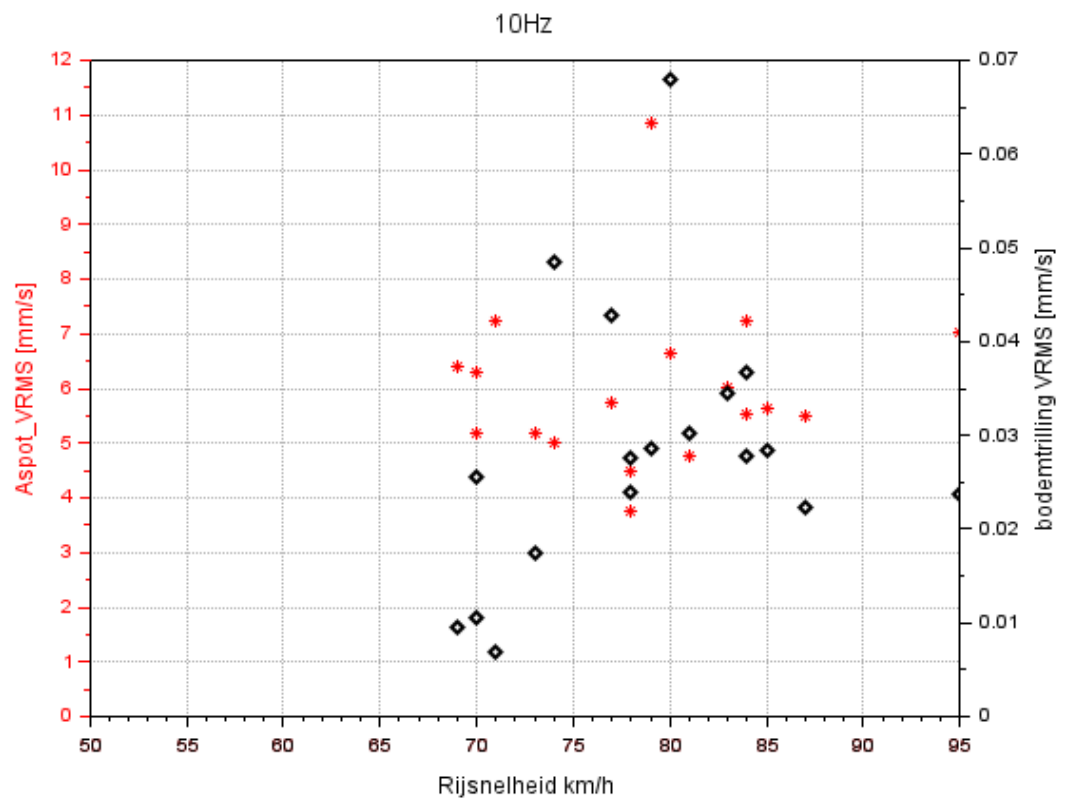


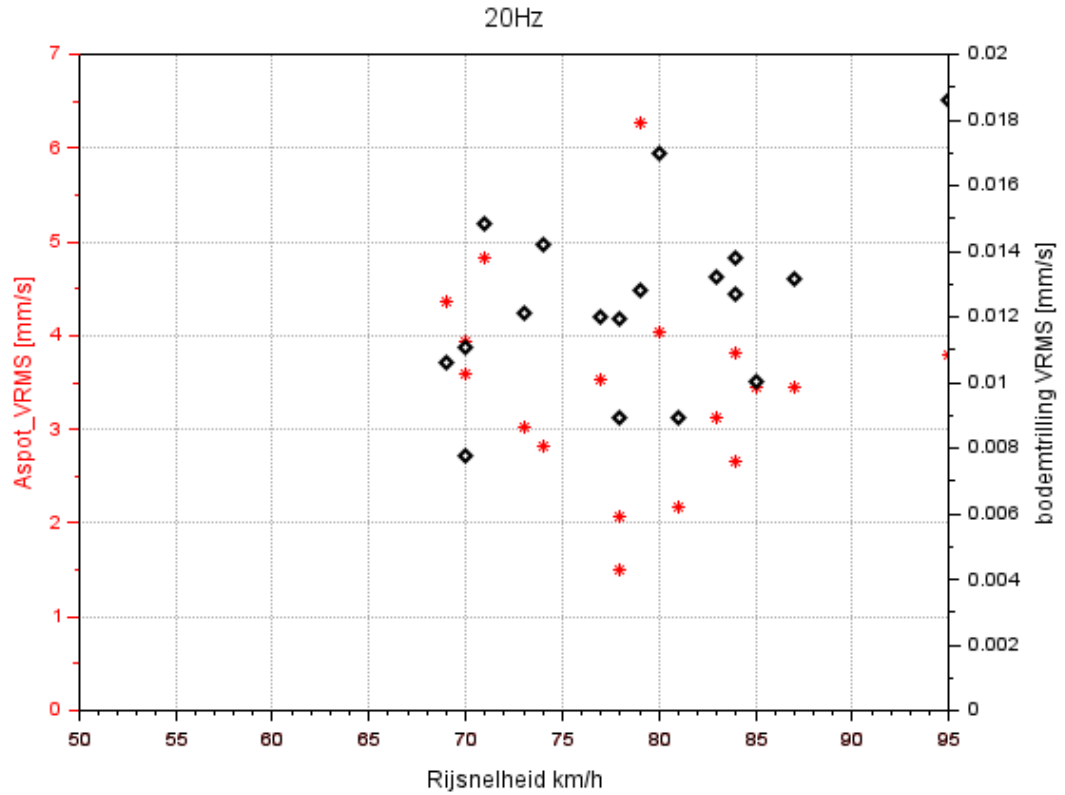
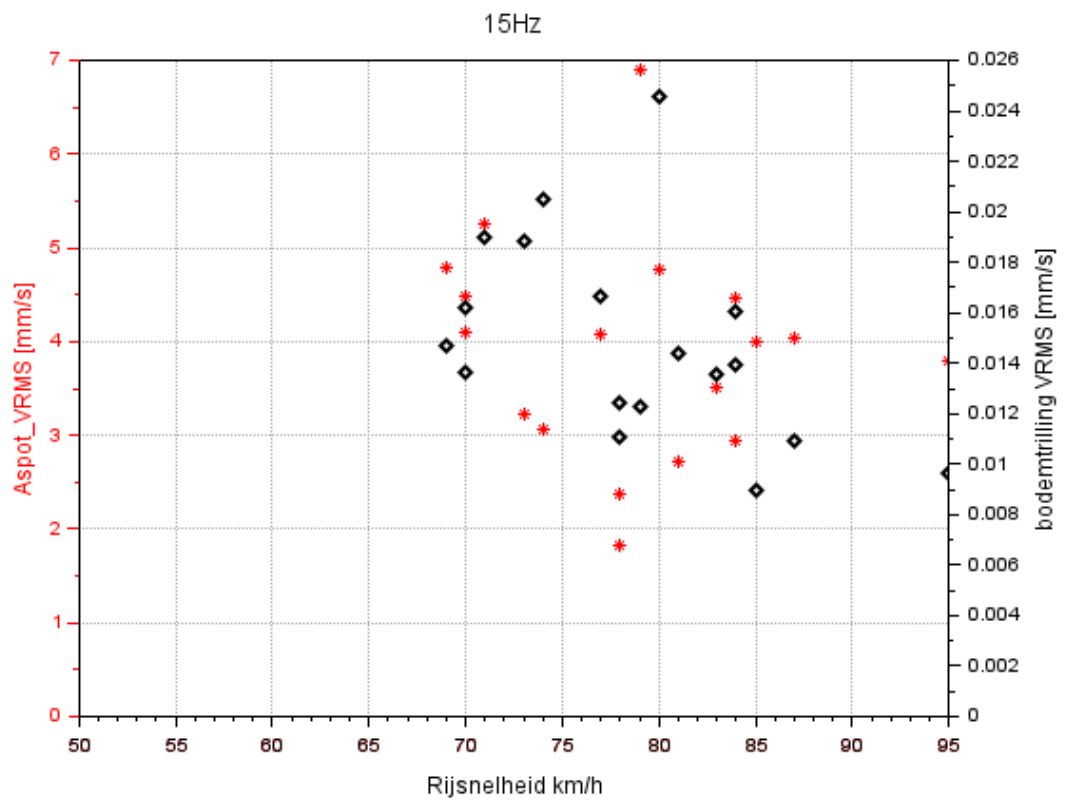


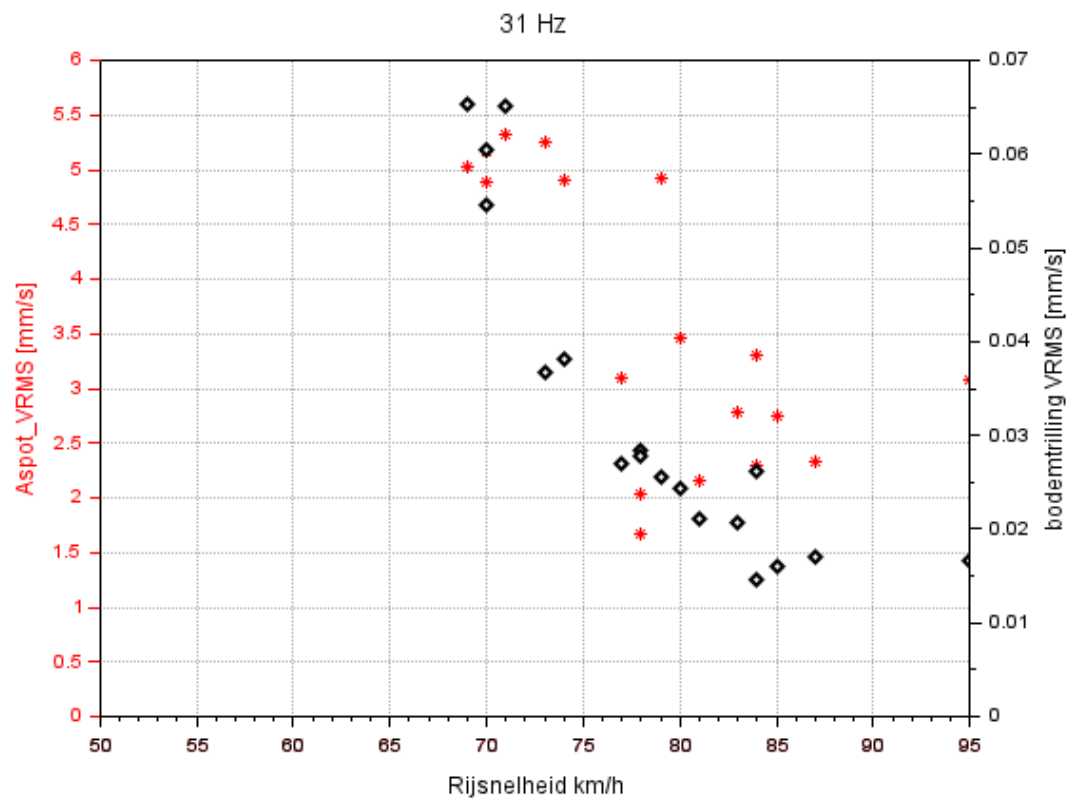
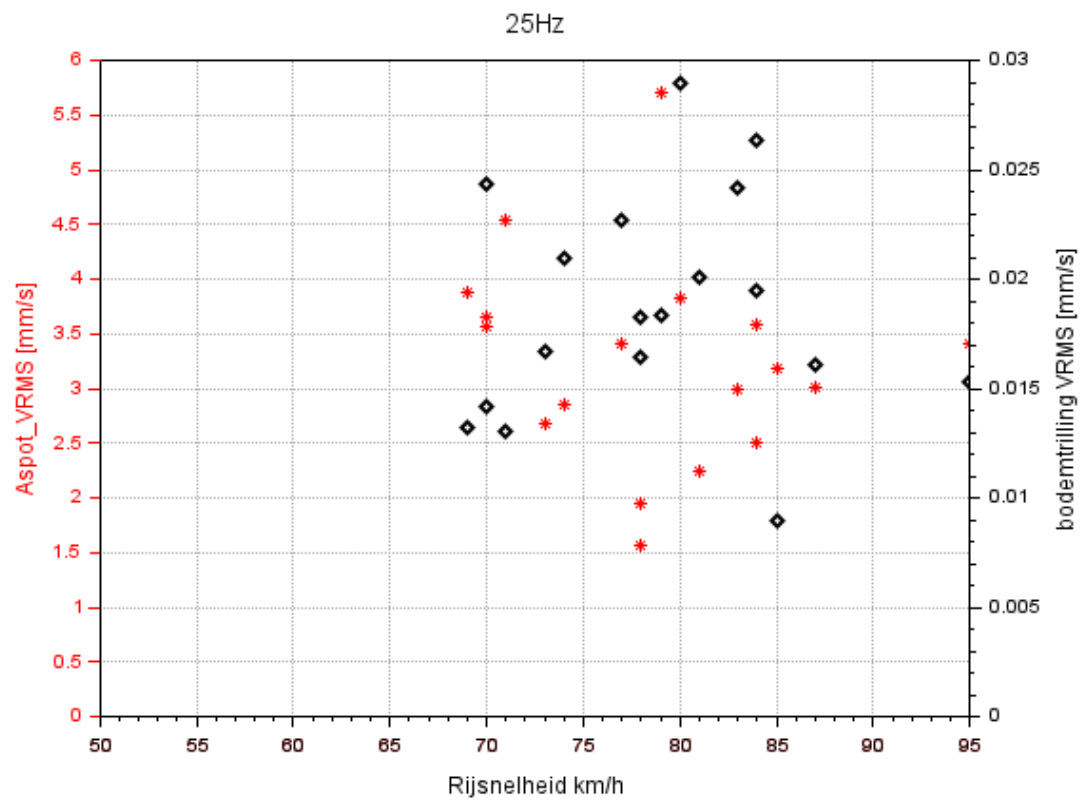
Figuur 0.3 Den Bosch Zuid

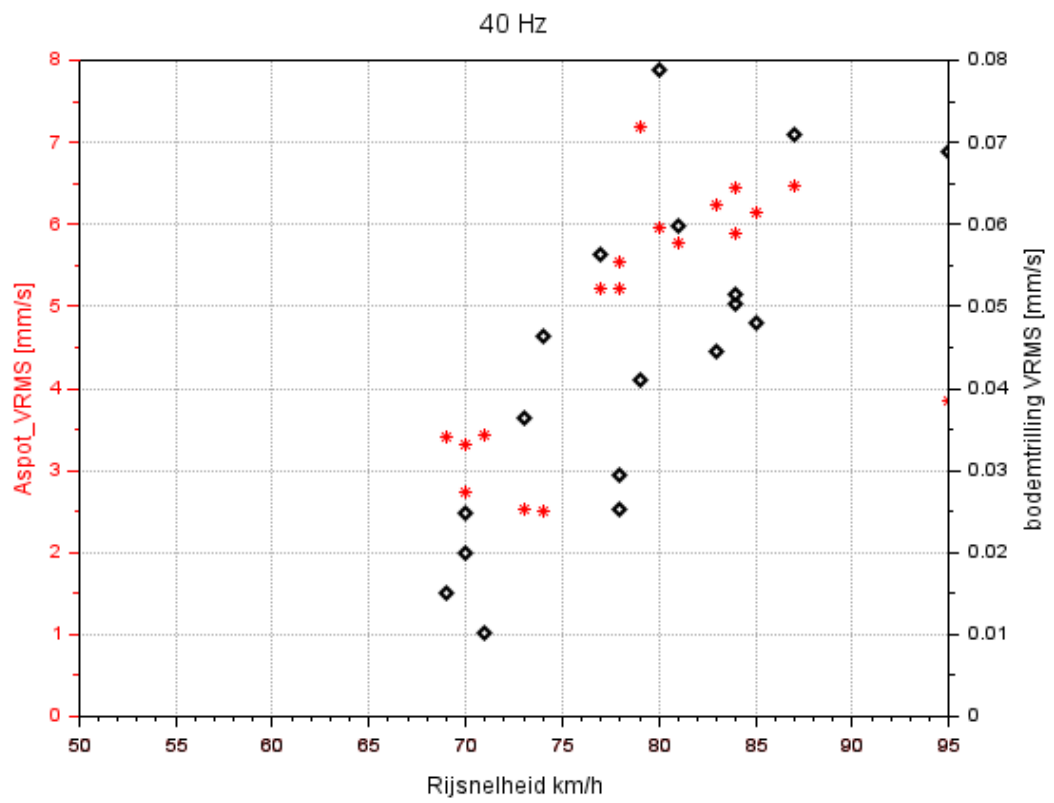








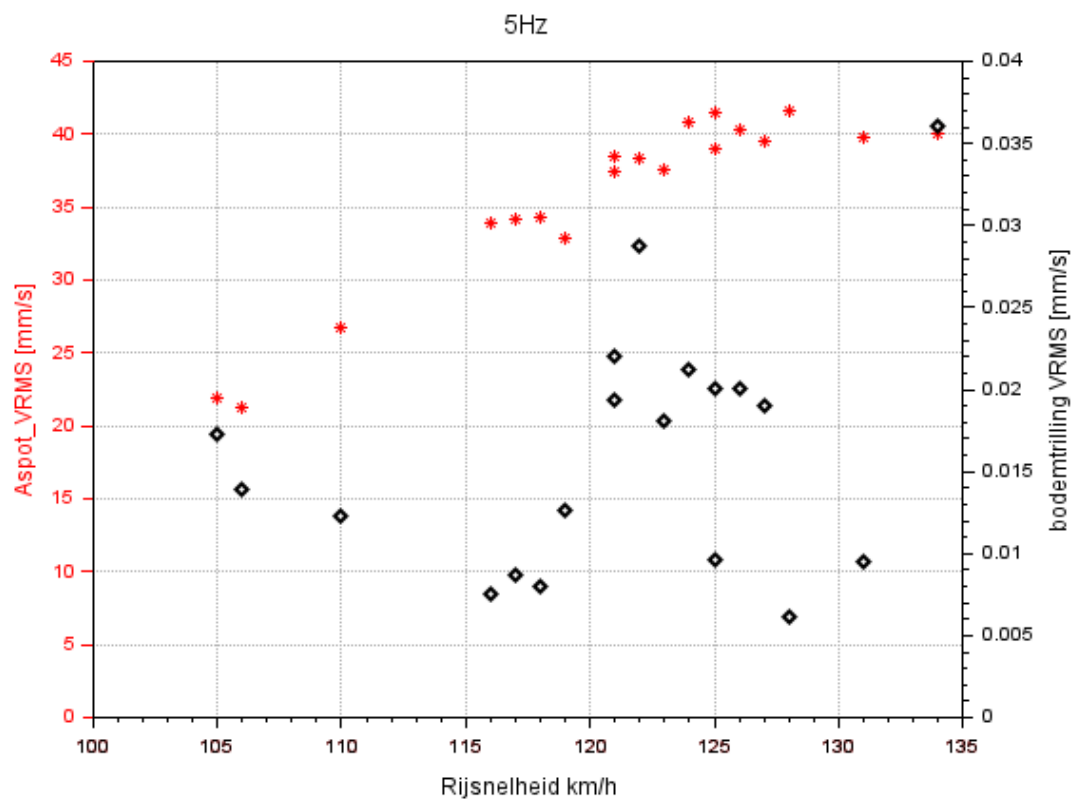
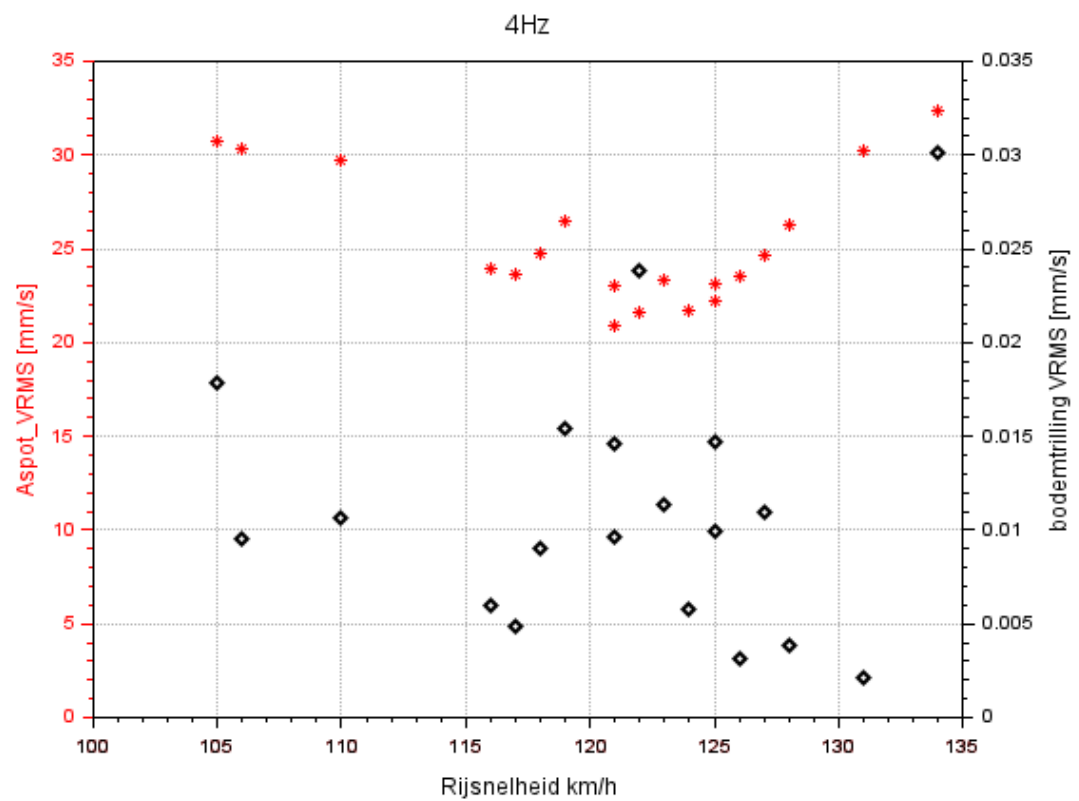


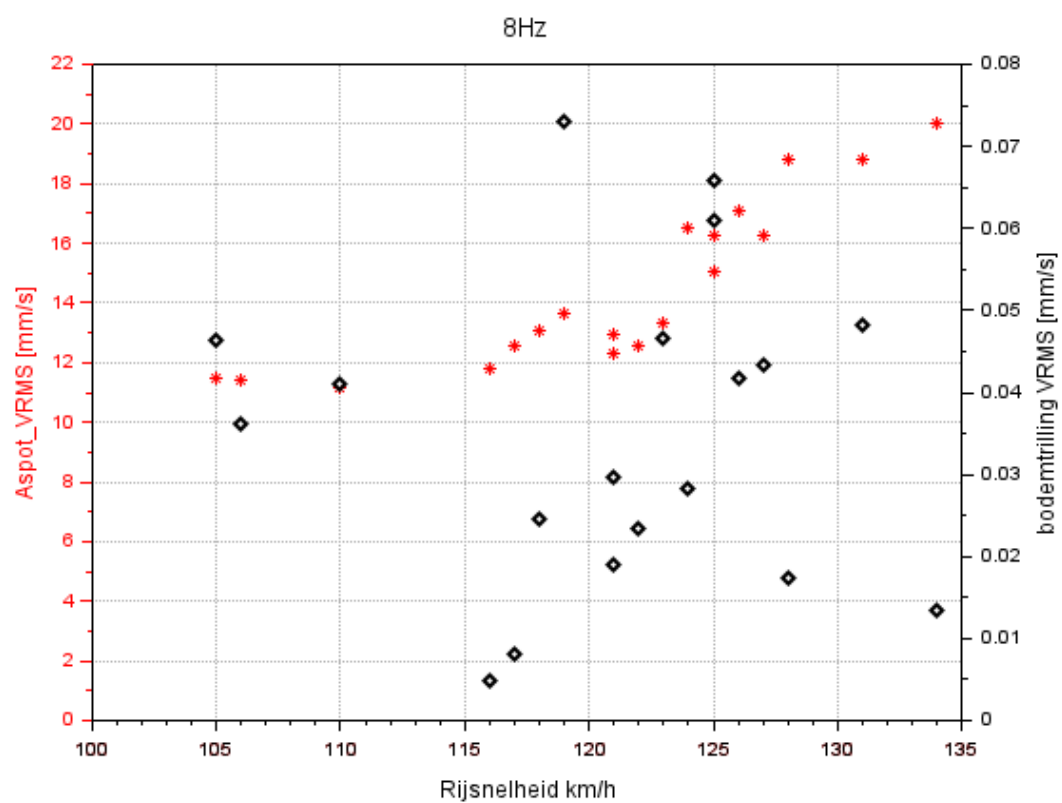
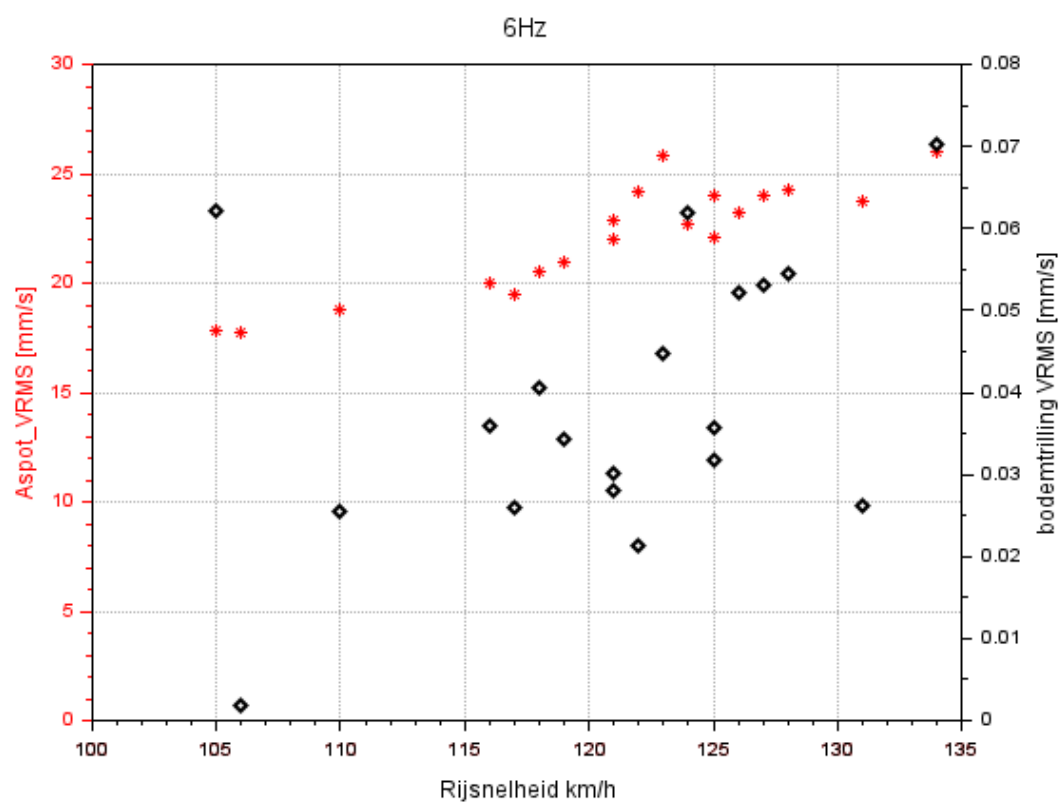


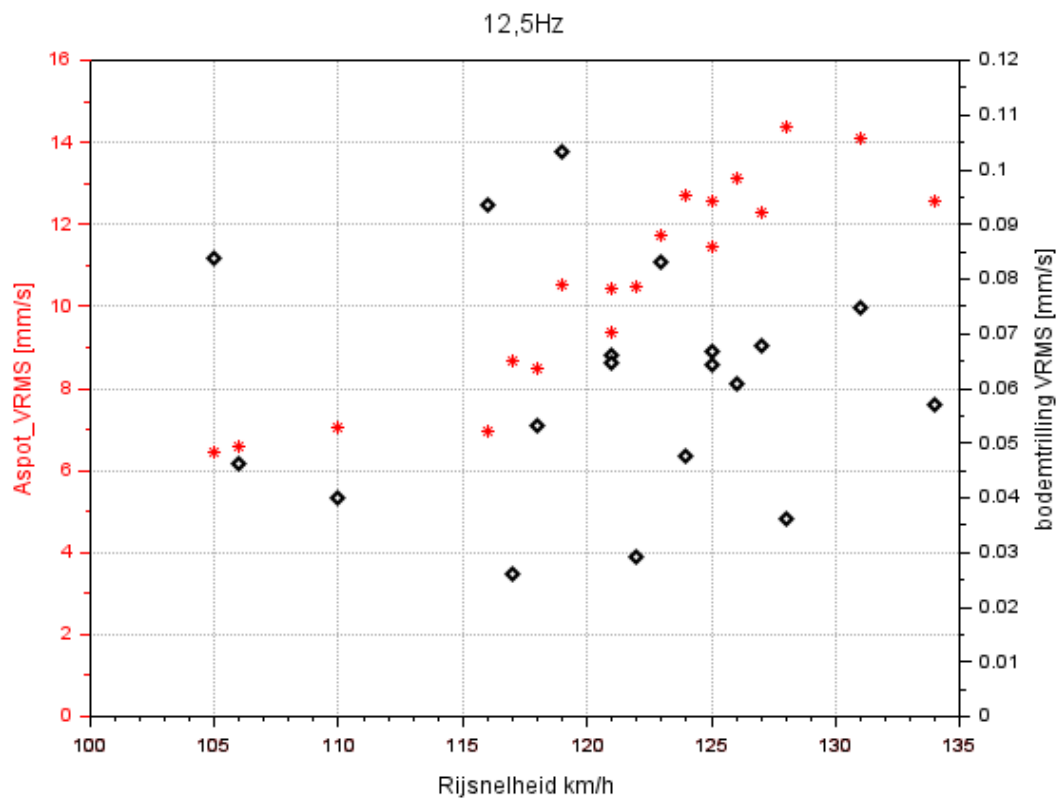
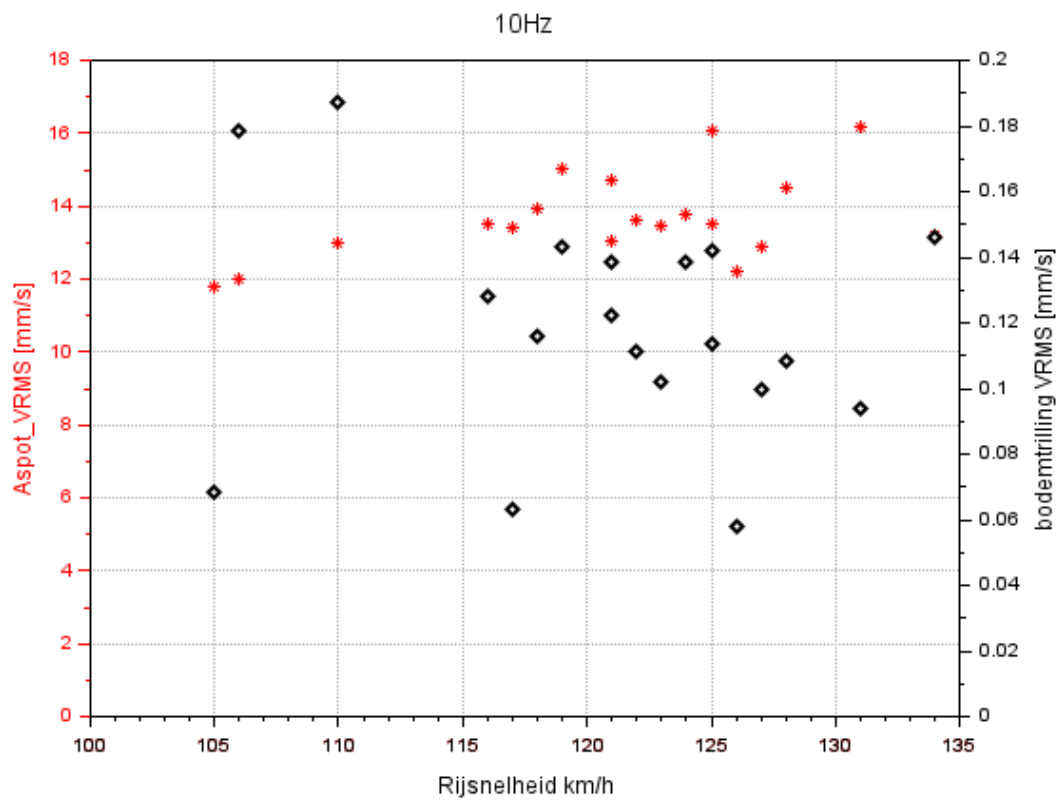
## **BIJLAGE III. VRMS UITGEZET TEGEN RIJSNELHEID 1SECONDE -INTERVALLEN**

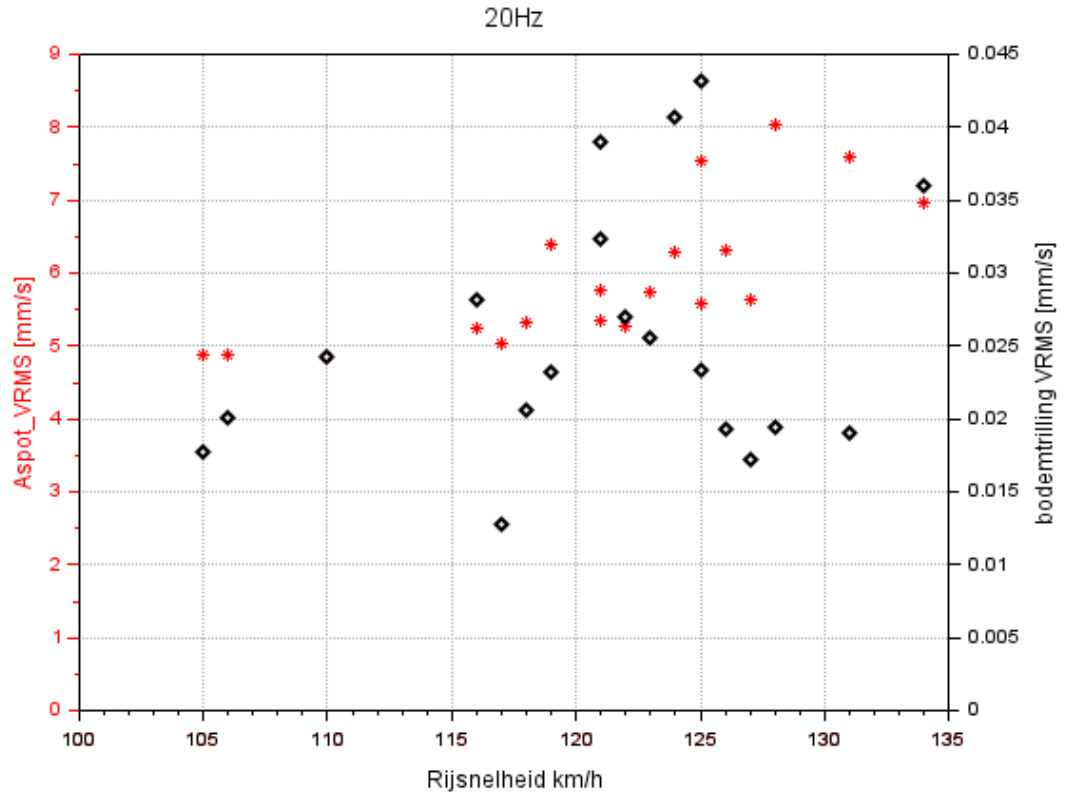
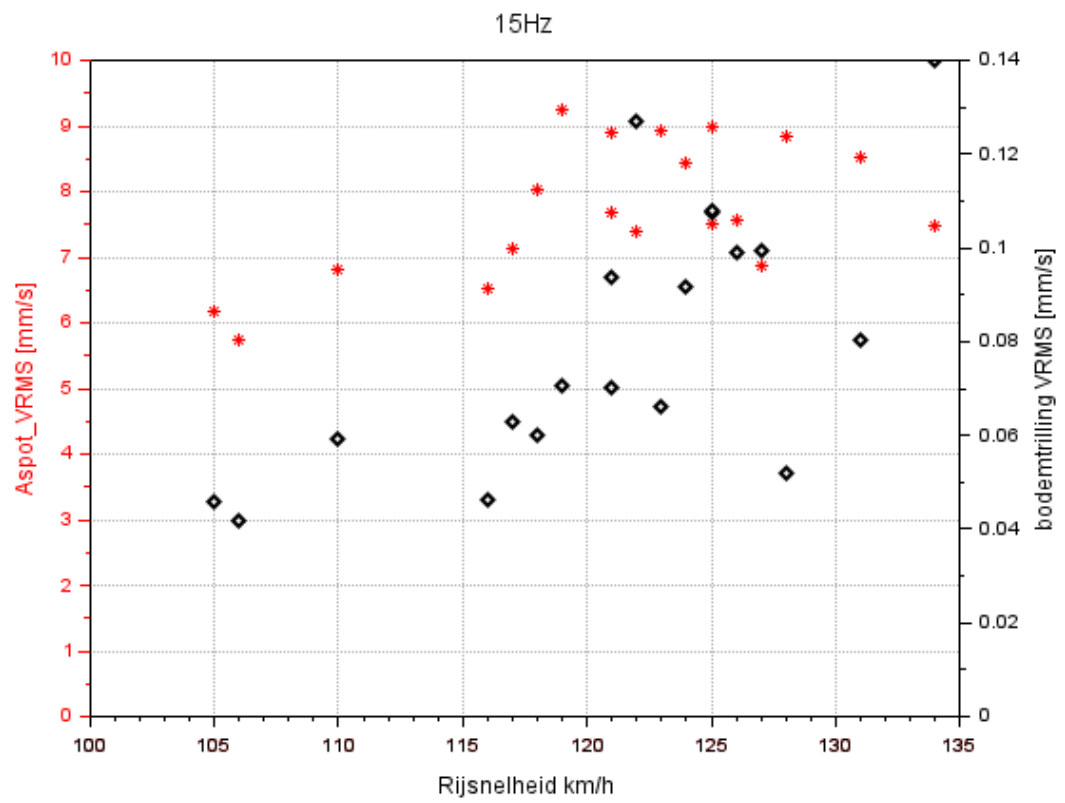


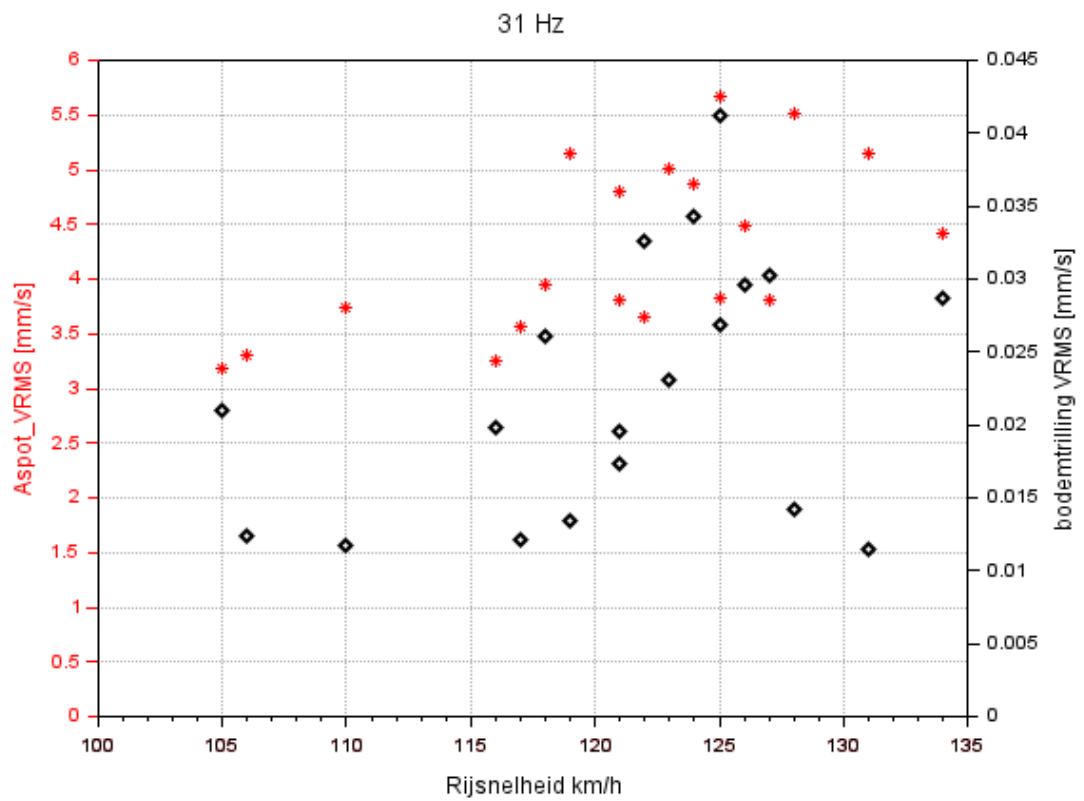
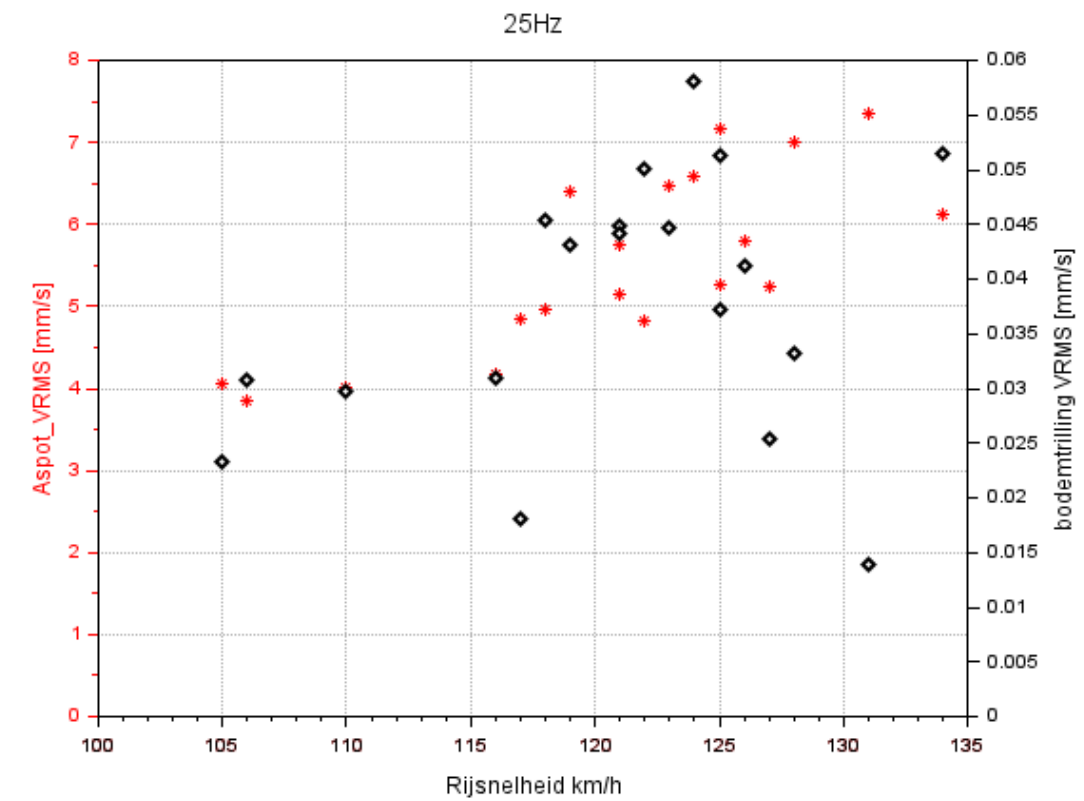
Figuur 0.1 Schalkwijk

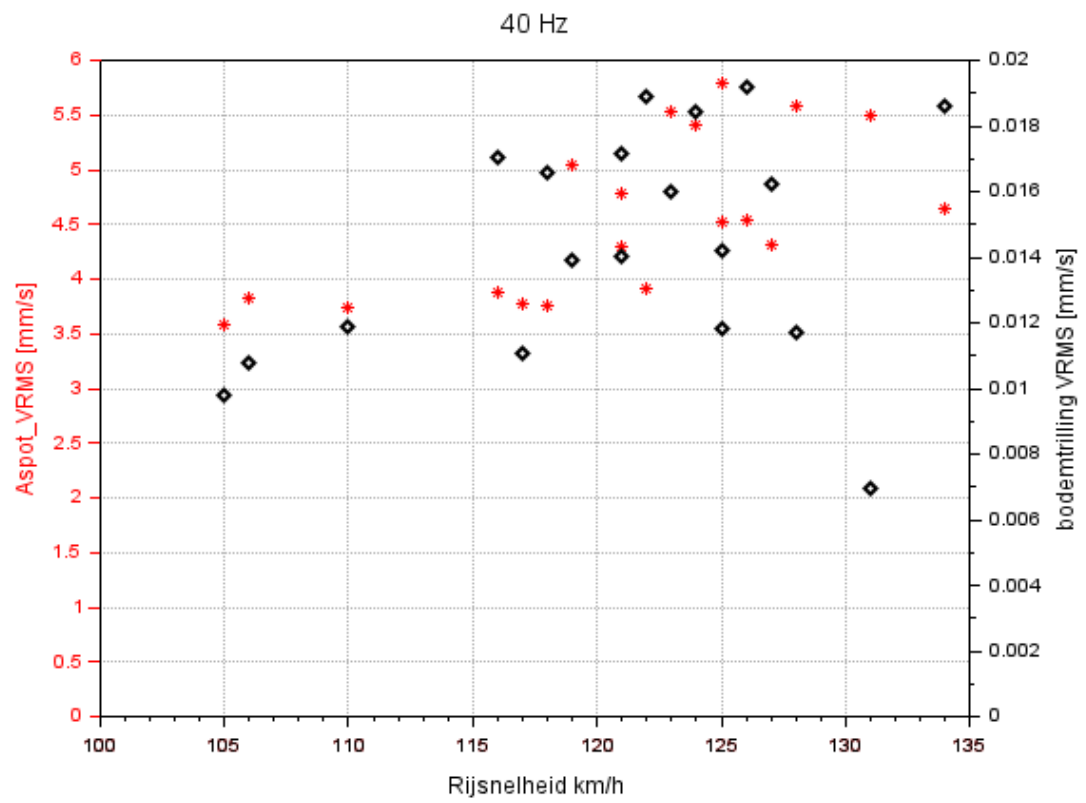




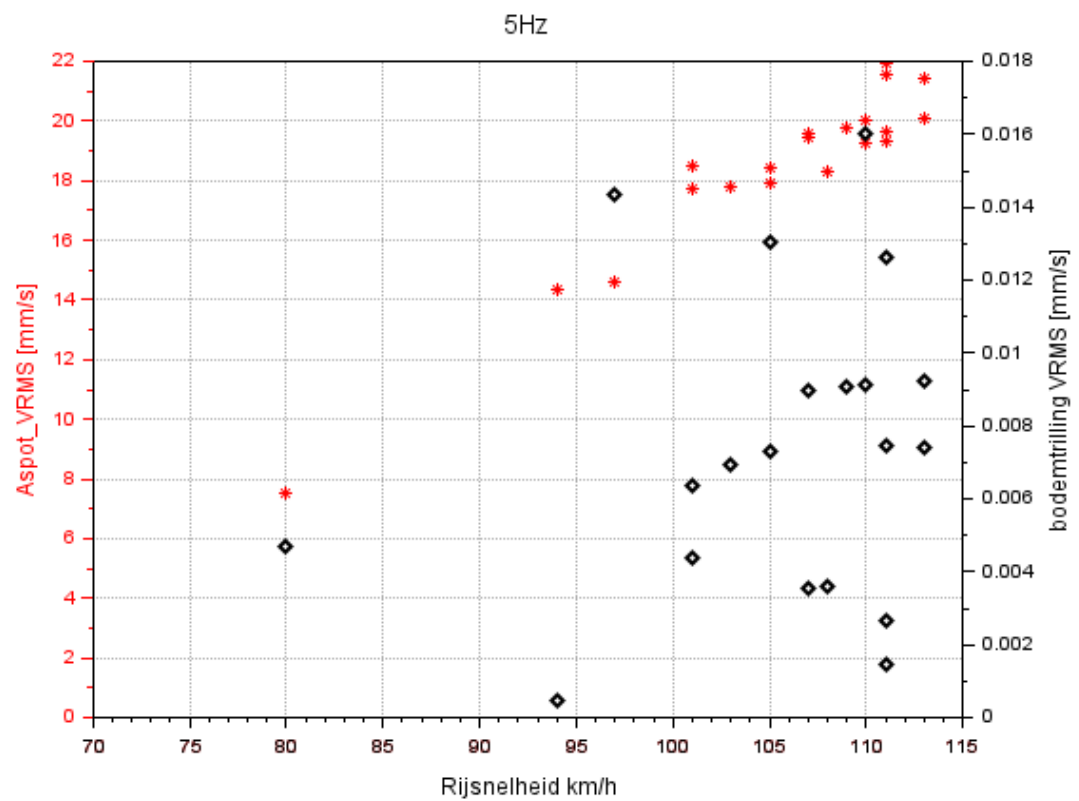
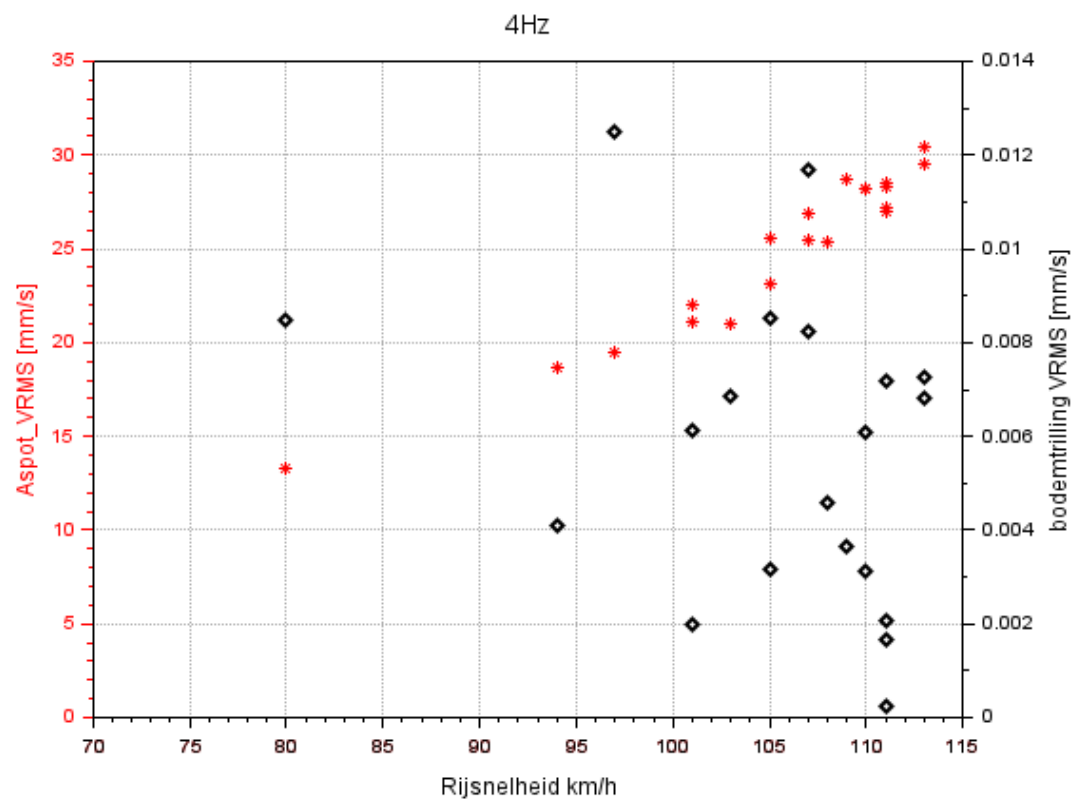


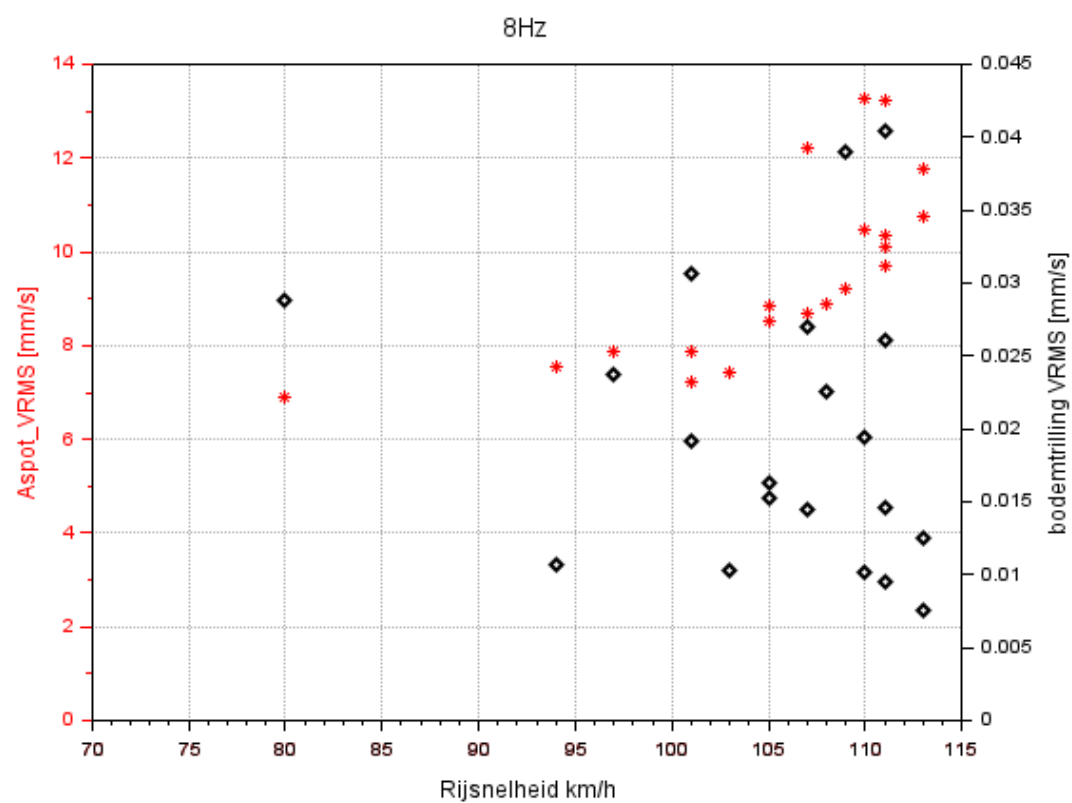
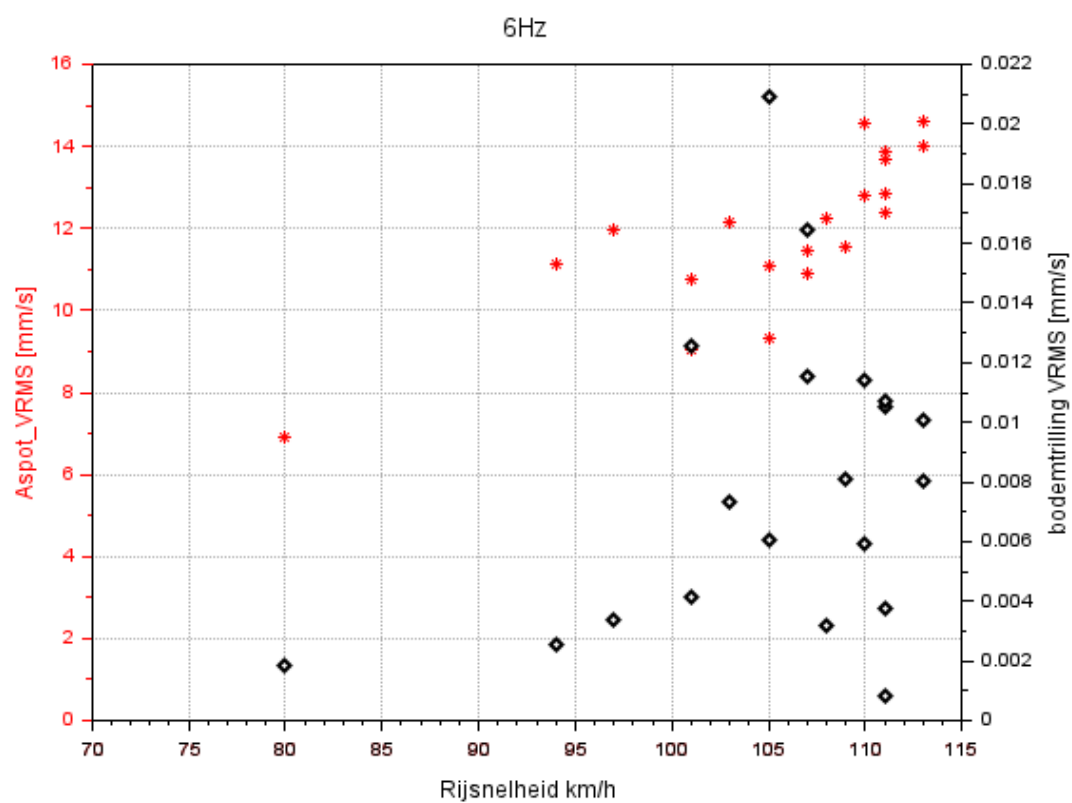




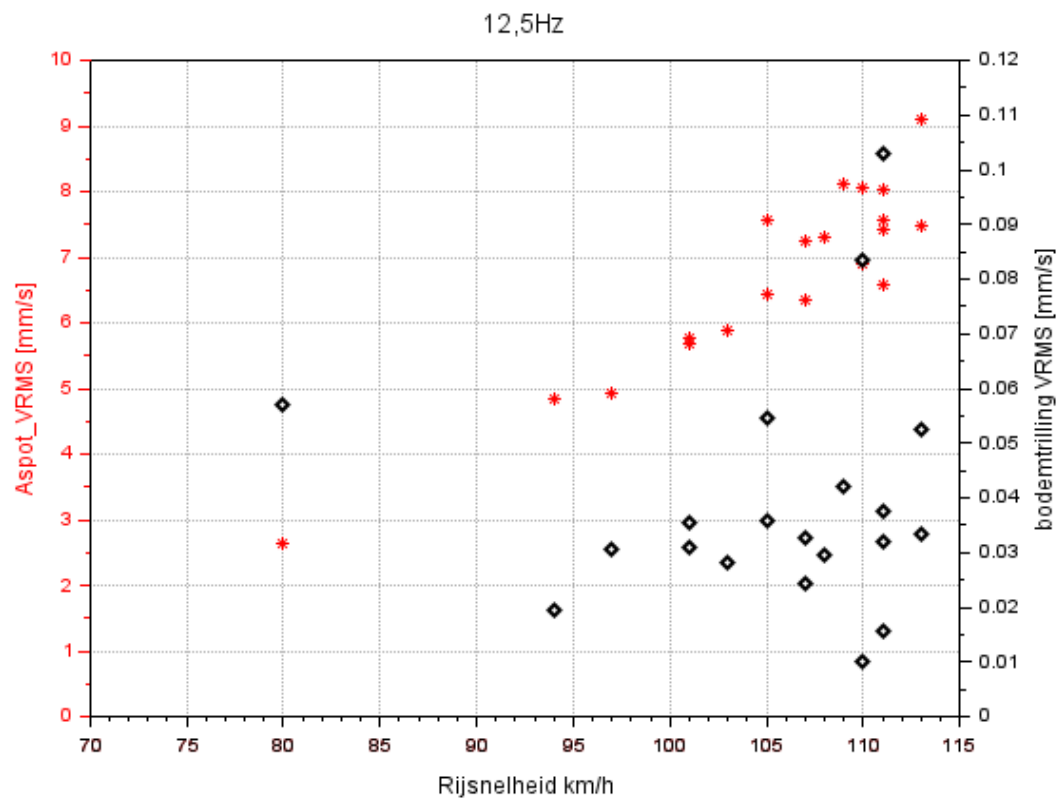
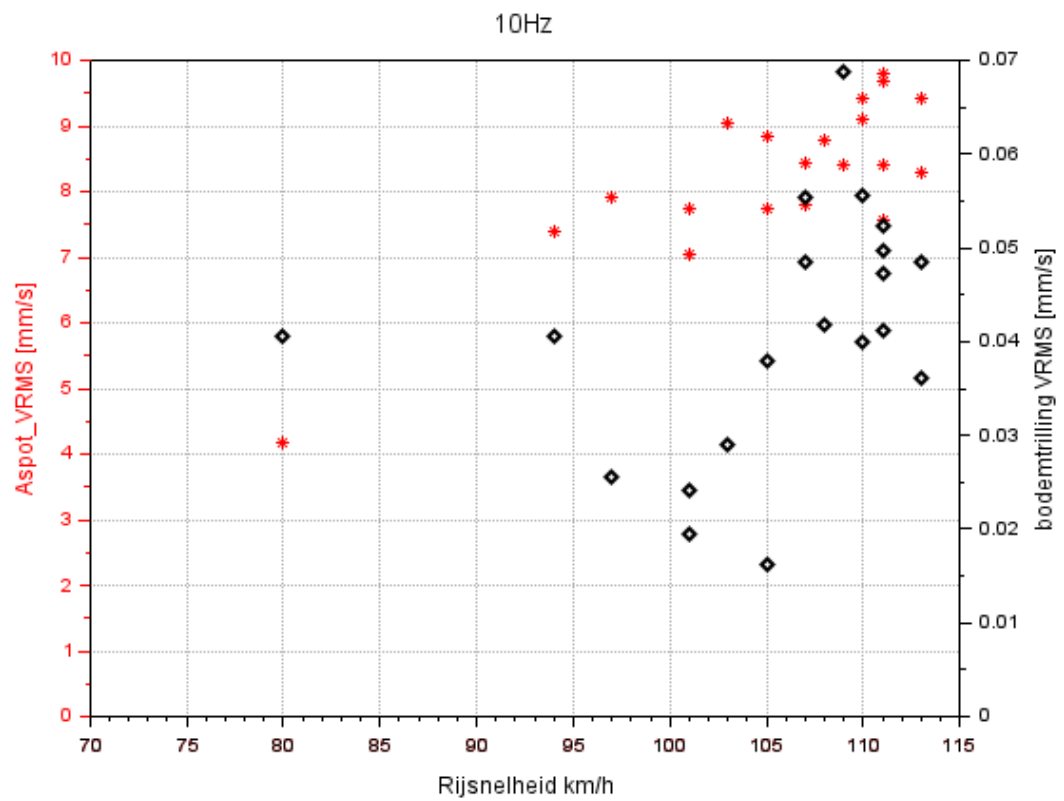


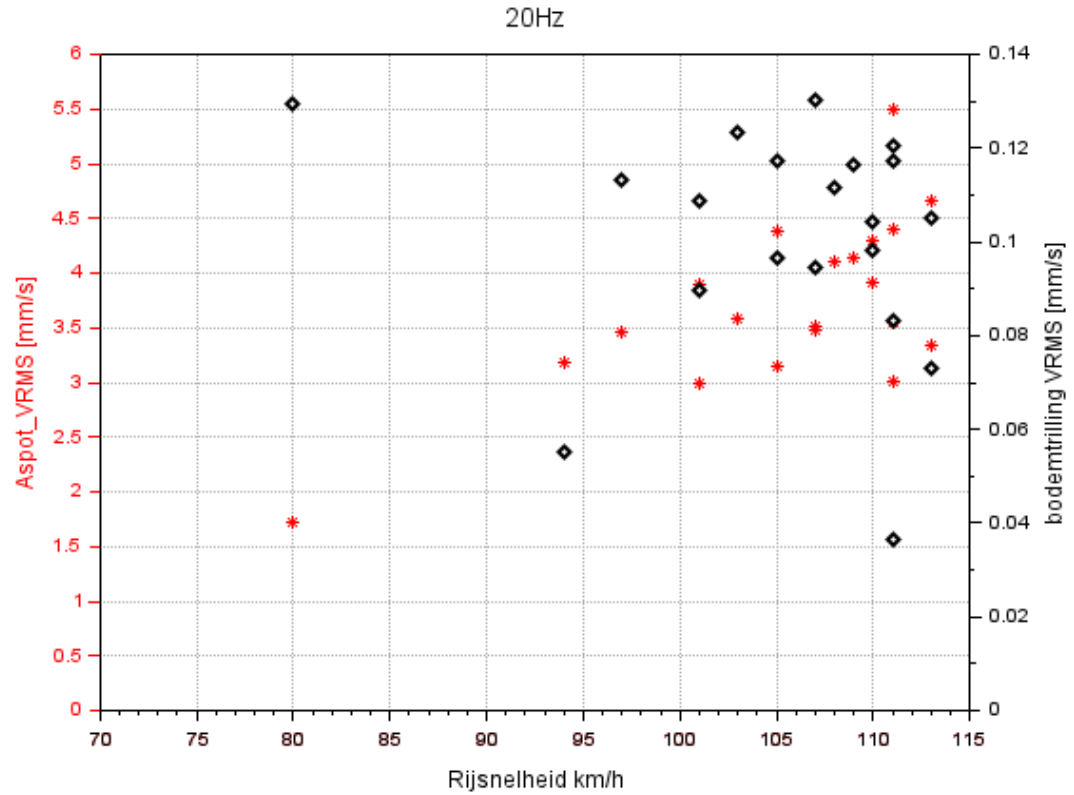
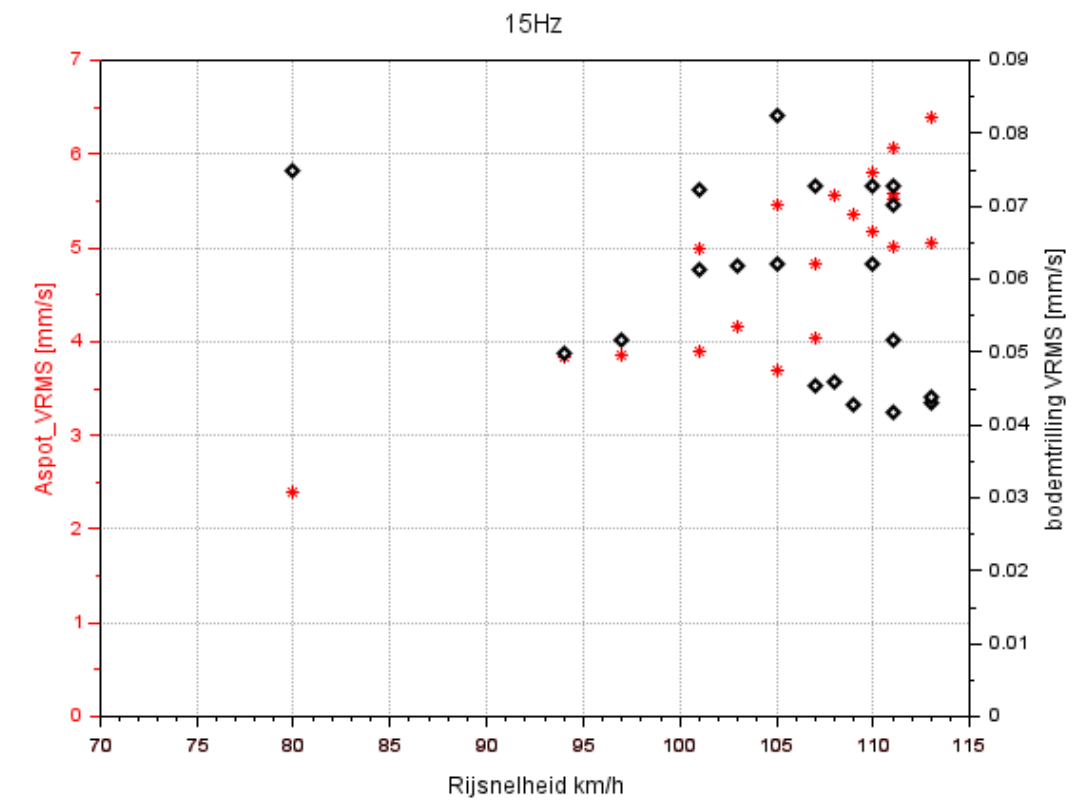
Figuur 0.2 Orthen

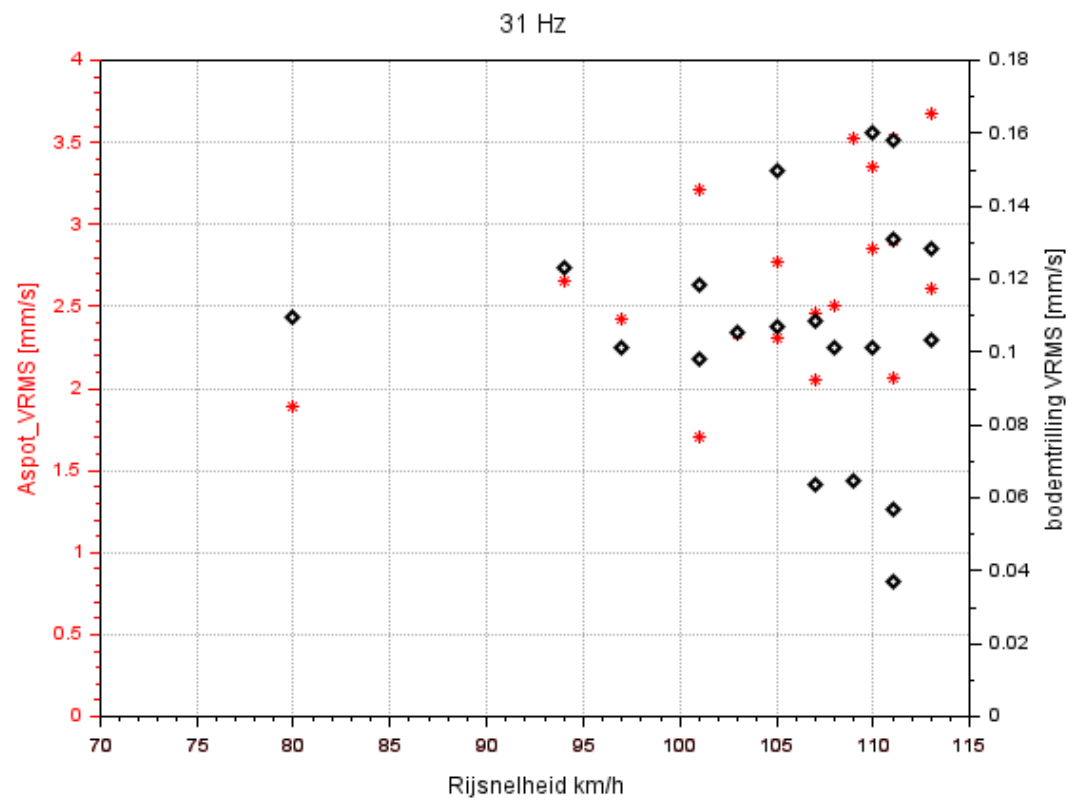
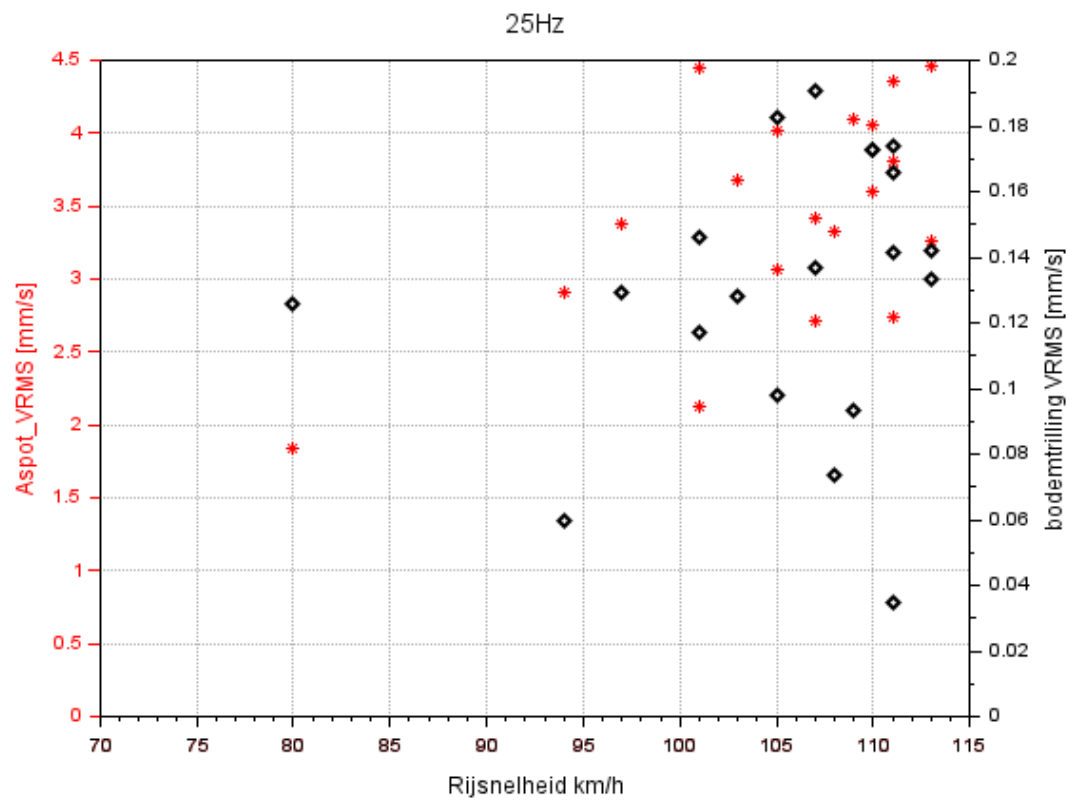


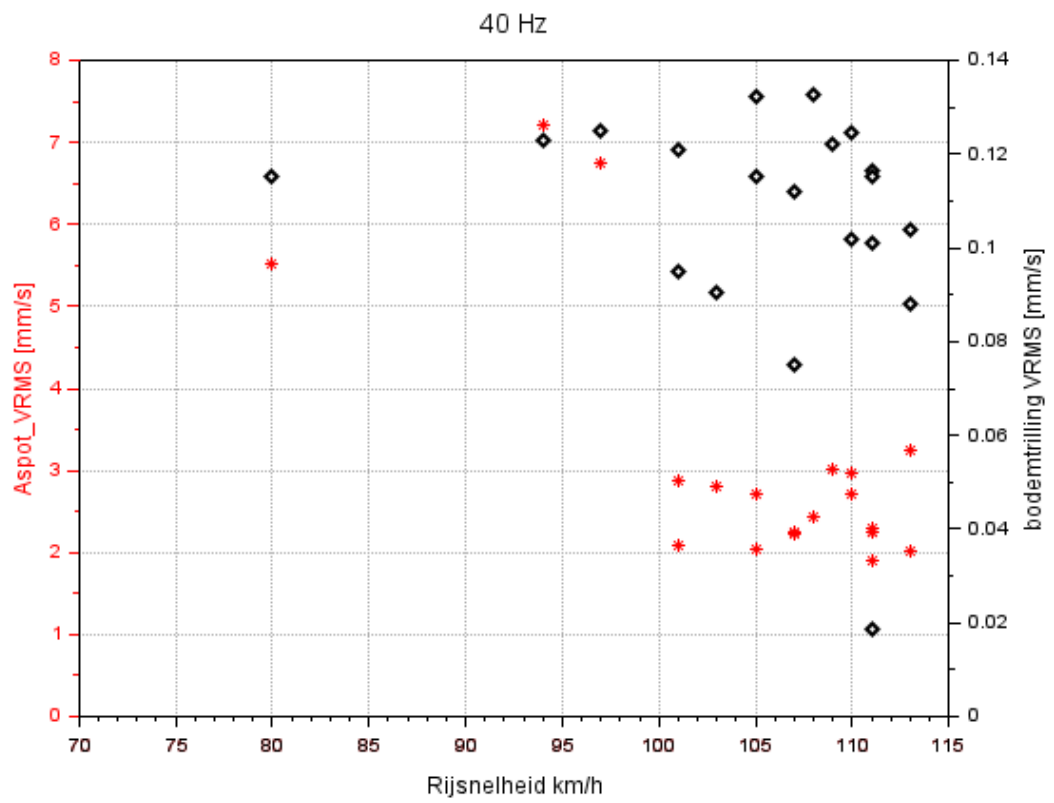












Figuur 0.3 Den Bosch Zuid

