

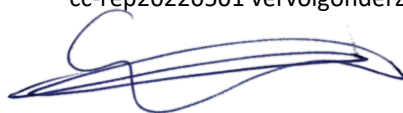


VERVOLGONDERZOEK WIELONRONDHEID EN TRILLINGEN: FREQUENTIEBANDANALYSE

A2 CORRIDOR

ProRail

Project	Vervolgonderzoek wielonrondheid en trillingen
Titel rapport	Vervolgonderzoek wielonrondheid en trillingen: frequentiebandanalyse
Referentie	CC-REP20220501
Opdrachtgever	ProRail
Status	Definitief
Versie	1.0
Datum	25 mei 2022
Opgemaakt door	ir. E.J. Vlijm
Gecontroleerd door	dr. ir. P. van der Male
Bestandsnaam	cc-rep20220501 vervolgonderzoek wielonrondheid en trillingen definitief 1.0
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
2	Onderzoek 2021 en vervolgstappen	2
2.1	Onderzoek 2021: Identificeren slechteronderhouden wielen in trillingssignalen.....	2
2.2	Vervolgstappen in dit onderzoek	3
2.3	Gebruikte meetdatasets.....	5
3	Resultaten vervolgstappen	7
3.1	Dynamische pieklast uitgezet tegen trillingsniveau: alle passages	7
3.2	Dynamische pieklast uitgezet tegen trillingsniveau: specifieke wagontypes.....	12
4	Conclusies en aanbevelingen	17
4.1	Conclusies.....	17
4.2	Aanbevelingen.....	18
Referenties		19
Bijlage I. Vrms per frequentieband uitgezet tegen gemiddelde dynamische pieklast zuidelijke richting		20
Bijlage II. Vrms per frequentieband uitgezet tegen gemiddelde dynamische pieklast Noordelijk richting		32

1

INLEIDING

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 ondervinden¹. 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. Doel van deze proef is te onderzoeken in hoeverre met gericht onderhoud via betere wielkwaliteit, trillingen in het spoor en daarmee trillingshinder in de omgeving beperkt kan worden.

ProRail heeft de beschikking over een dataset van gemeten trillingssignalen van goederentreinen gekoppeld met Quo Vadis-data. De dataset is het resultaat van een onderzoek uit 2018 naar achterliggende oorzaken van trillingshinder op locaties langs de A2-corridor. De dataset bestaat uit gemeten goederentreinpassages gekoppeld aan de dataset van Quo Vadis met daarin parameters, zoals wiellast, dynamische aslasten, asafstand en wielkwaliteit. In de analyse van 2018 is gekeken naar treinen en treintypen in relatie tot gemeten trillingsniveaus. De dataset is echter ook goed bruikbaar voor een analyse van de relatie tussen wielkwaliteit en gemeten trillingsniveau. In de dataset zijn 960 signalen van goederentreinpassages beschikbaar.

In 2021 heeft Cohere Consultants een onderzoek uitgevoerd naar het identificeren van slecht onderhouden wielen in de beschikbare dataset waaruit enkele aanbevelingen volgen over nader te zetten stappen ter voorbereiding van de praktijkproef [ref. 7]. De belangrijkste aanbevolen stap is het nader onderzoeken van de verschillende frequentiebanden en de variatie in trillingsinhoud per band gedurende de passages en daarbij een koppeling maken met de gemeten dynamische pieklast uit de Quo Vadis dataset. pieklast. In voorliggende rapportage worden de resultaten van de uitgevoerde vervolgstap besproken. Het doel is om nader inzicht te verkrijgen in de wijze van bepalen van passages met slechte wielkwaliteit.

Het doel van de analyse van de dataset is inzicht te krijgen in het verloop van de frequentie-inhoud van het trillingssignaal in combinatie met het verloop van de dynamische aslasten gedurende een treinpassage. Hierdoor kunnen mogelijk wielen met een slechte kwaliteit worden geïdentificeerd. Daarnaast wordt gezocht naar een mogelijke trend tussen de Quo Vadis-meetgegevens en de beschikbare trillingsmetingen in het kader van de wielkwaliteit.

¹ Meerjarenprogramma duurzaamheid, par. 3.2.5 Doel 2020.

2

ONDERZOEK 2021 EN VERVOLGSTAPPEN

2.1 Onderzoek 2021: Identificeren slechtonderhouden wielen in trillingssignalen

In het uitgevoerde onderzoek uit 2021 [ref. 7] is onderzocht of in de dataset van gemeten trillingssignalen van goederentreinpassages in de bodem één of meerdere slechtonderhouden wielen kunnen worden ontdekt. Hierbij is een koppeling gemaakt tussen de trillingssignalen gemeten in de bodem en de Quo Vadis-data gemeten bij het dichtstbijzijnde meetstation van dezelfde passages. Uiteindelijk zijn drie stappen gezet:

- Opstellen van criteria voor slecht onderhouden wielen;
- Zoeken naar passages in beide datasets (trillingssignalen en Quo Vadis) die aan criteria voldoen;
- Onderscheid maken voor enkele specifieke treintypes.

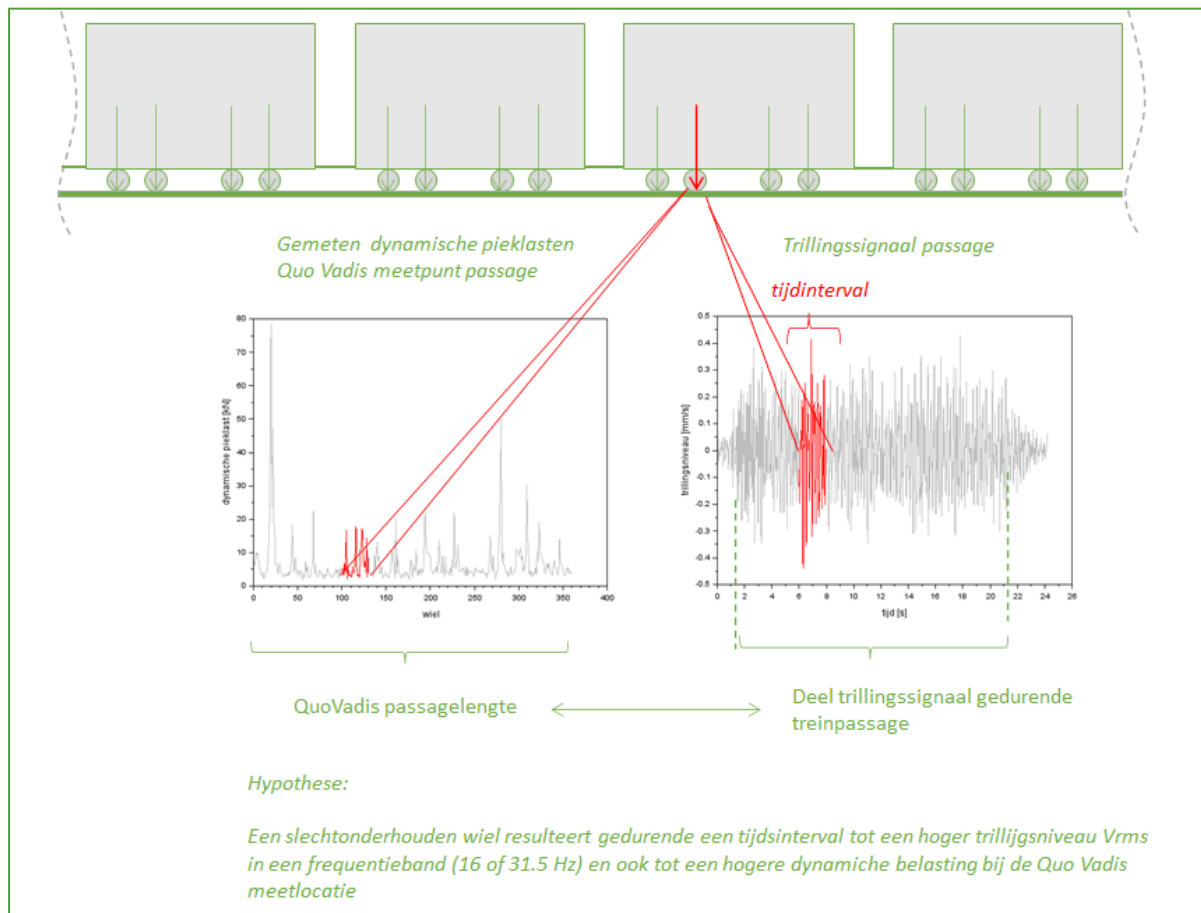
De opgestelde criteria betreffen voor de Quo Vadis-dataset een drempelwaarde voor de gemeten dynamische pieklast en een drempelwaarde voor de RMS_laag die als indicatie dienden voor een slechtonderhouden wiel. Voor de trillingssignalen in de bodem is een ratio van $V_{rms;2s}$ gedeeld door $V_{rms;passage} > 1,8$ als criteria gehanteerd. Deze ratio geeft een beeld of er een 2-secondeninterval gedurende de passage aan te wijzen is waarin hogere trillingsniveaus zijn gemeten dan gemiddeld gedurende de passage.

Uit de resultaten van het onderzoek blijkt dat geen enkele passage voldoet aan beide criteria gedefinieerd voor Quo Vadis in combinatie met het criterium gedefinieerd voor de trillingssignalen. Voor de afzonderlijke criteria worden wel passages gevonden die daaraan voldoen (146 aan criterium dynamische pieklast, 45 aan criterium RMS_laag en 86 aan criterium $V_{rms;2s}/V_{rms;totaal}$).

In de criteria wordt gekeken naar maximale niveaus gedurende de passage. Er wordt geen onderscheid gemaakt in frequentie-inhoud. Er is daarom aanvullend een eerste stap gemaakt door nader te kijken naar de variatie gedurende een goederentreinpassage. Hieruit volgt dat daar waar passages met hoge dynamische pieklasten worden gevonden ook meestal hoge RMS_laag-waarden worden gevonden. Deze passages tonen echter niet per se hogere trillingsniveaus dan passages waar lage dynamische pieklasten en RMS_laag-waarden worden gevonden. Er zijn passages gevonden waar dit wel voor lijkt te gelden zoals de passage met wagons van het type TANOOS van 8 juni 03:35, specifiek voor de 16-Hz-band. Dit resultaat duidt er mogelijk op dat bij passage van een slecht onderhouden wiel het trillingsniveau in een specifieke frequentieband toeneemt. Dit gedeelte van de passage zou zowel een hoger trillingsniveau in een frequentieband van 16 of 31,5 Hz laten zien alsook een hogere gemeten dynamische pieklast ter plaatse van het Quo Vadis-station.

In het onderzoek uit 2021 is aanbevolen om de invloed van wielonrondheid op de optredende trillingssignalen in de omgeving nader te onderzoeken door onderscheid in frequentiebanden te maken voor alle passages. Hierbij dient gekeken worden of gedurende een passage een toegenomen trillingsniveau V_{rms} in een bepaalde frequentieband overeenkomt met een toegenomen dynamische pieklast. Dit wordt schetsmatig weergegeven in Figuur 1.

Figuur 1 Schetsmatige weergave tijdsinterval trillingssignaal en bijbehorende passagedeel Quo Vadis



2.2 Vervolgstappen in dit onderzoek

In het vervolgonderzoek is de hypothese zoals beschreven in Figuur 1 nader onderzocht. Hiertoe zijn de volgende stappen gezet:

- Definieren van het deel van het trillingssignaal wat daadwerkelijk bij treinpassage hoort. Uiteindelijk is hiervoor het gemeten trillingsniveau $V(t) > 0,25$ mm/s als criterium gehanteerd.
- Bepalen van de frequentie-inhoud per tijdsinterval van het trillingssignaal gedurende de daadwerkelijke passages. Voor het tijdsinterval is zowel 1 als 2 seconden gehanteerd en is ook de totale tijdsduur van de passage gehanteerd.
- Vervolgens is onderzocht of er sprake is van mogelijke relaties tussen de dynamische pieklast en de trillingsinhoud per frequentieband per tijdsinterval. Hiertoe is voor alle tijdsintervallen het bijbehorende interval van het Quo Vadis-sigitaal bepaald en de gemiddelde dynamische pieklast gedurende dat interval en zijn het trillingsniveau en de dynamische pieklast tegen elkaar uitgezet. Onderscheid is hierbij gemaakt in rijrichting.

Begin en einde van treinpassage definiëren

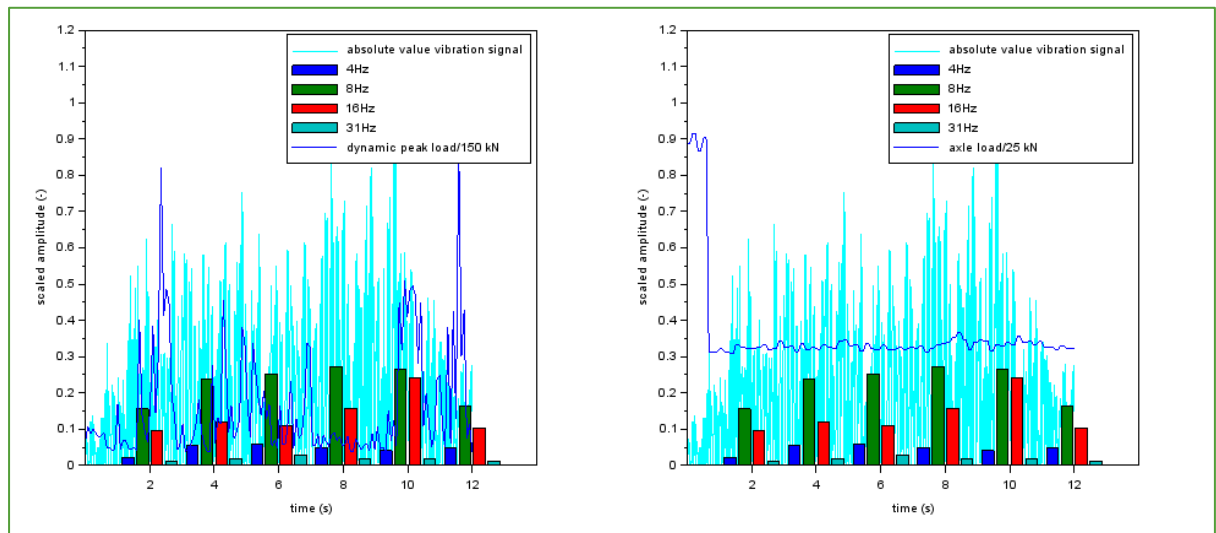
De trillingsmetingen van goederentreinpassages kennen een tijdspanne voorafgaand aan de passage en na afloop van de passage. Dit is het gevolg van een instelling van de meetunits, waardoor boven een bepaalde drempelwaarde het signaal met terugwerkende kracht van 2 tot 3 seconden wordt opgeslagen. Tot dusverre is steeds het totale beschikbare trillingssignaal geanalyseerd. Het is echter nauwkeuriger om uitsluitend het trillingssignaal gedurende de daadwerkelijke passage te analyseren. Daarom wordt in deze stap het begin en

het einde per passage gedefinieerd, op basis van een verwacht minimaal trillingsniveau van $V(t) > 0.25$ mm/s als drempelwaarde.

Frequentie-inhoud gedurende passage voor alle passages bepalen

Van de passages zijn het trillingsignaal en de gegevens per passerende as uit het Quo Vadis-systeem beschikbaar. Belangrijkste parameters zijn de dynamische pieklast per as en de RMS_laag. In het vorige onderzoek is een begin gemaakt met het kijken naar de trillingsinhoud van het signaal per frequentieband gedurende de passage. Een vergelijking met de dynamische pieklast (en de variatie hiervan) gedurende de passage levert inzicht of er een correlatie te vinden is tussen dynamische pieklast en trillingsinhoud per frequentieband (met name de 16-Hz-band is daarbij interessant omdat het effect van wielonrondheid eerste orde tot een trillingsfrequentie in deze band leidt). In het vorige onderzoek is een tijdsinterval van twee seconden gehanteerd. In Figuur 2 is van een passage een dergelijke vergelijking gegeven. In de figuur is het trillingsniveau per frequentieband per achtereenvolgende 2-secondenintervallen gepresenteerd en parallel daaraan de dynamische pieklast (links) en de aslast (rechts). Voor de dynamische pieklast lijkt rond het 10 seconden zowel een verhoogde trillingsinhoud in de 16 Hz band als een verhoogde pieklast.

Figuur 2 Voorbeeld van variatie in dynamische pieklast en frequentie-inhoud gedurende de passage.



Om te bepalen of er een correlatie te vinden is tussen trillingsinhoud per frequentieband en dynamische pieklast (en daarachterliggend een wiel met slechte kwaliteit), is in deze stap de variatie van zowel de frequentie-inhoud en de dynamische pieklast inzichtelijk gemaakt van alle beschikbare passages.

Per frequentieband per treintype bekijken of er een relatie gevonden kan worden tussen dynamische pieklast en frequentie-inhoud

Vervolgens is onderzocht of relaties tussen de dynamische pieklast en de trillingsinhoud per frequentieband geïdentificeerd kunnen worden door per tijdsinterval de dynamische pieklast (gemiddelde over het interval) uit te zetten tegen de trillingsinhoud V_{rms} per frequentieband. Per frequentieband volgt per passage een verdeling van RMS-trillingsniveau tegen dynamische pieklast van alle tijdsintervallen.

Vervolgens is een verdeling opgesteld voor alle tijdsintervallen van alle passages, maar bijvoorbeeld ook voor alle passages van eenzelfde treintype. Uiteindelijk is naast de totale set aan goederentreinpassages, naar drie verschillende type treinen (treinnummers) op deze wijze naar trends gezocht.

2.3 Gebruikte meetdatasets

Trillingsmetingen

In 2018 zijn op vier locaties trillingsmetingen over een periode van ongeveer drie maanden uitgevoerd (Witteveen+Bos, 2018). Van deze vier meetlocaties is in voorliggende rapportage de locatie Onderstation Schalkwijk nader onderzocht, zie Tabel 1 voor eigenschappen van de meetlocatie. De metingen zijn uitgevoerd ter hoogte van kilometrering 14.4, waarbij de afstand tussen de trillingsmeter en de buitenste spoorstaaf 18 m bedroeg. De metingen zijn uitgevoerd tussen 13 maart 2018 en 12 juni 2018. De goederentreinpassages gedurende de meetperiode zijn geregistreerd op verschillende Quo Vadis meetstations. In Tabel 2 wordt hiervan een overzicht gegeven.

Tabel 1. Eigenschappen meetlocaties (Witteveen+Bos, 2018).

Meetlocatie	Kilometrering	Afstand trillingsmeter tot aan buitenste spoorstaaf [m.]
Onderstation Schalkwijk	14,4	18

Tabel 2. Meetstations Quo Vadis en aantal gemeten treinpassages per meetlocatie.

Meetstation	Schalkwijk
111	668
114	797
171	58
174	26

Quo Vadis-dataset

Quo Vadis is de naam die ProRail gegeven heeft aan een meetsysteem en achterliggende database welke is toegepast op 43 locaties langs het spoor in Nederland (ProRail, 2016). De Quo Vadis-meetsystemen meten met optische vezels de doorbuiging van de spoorstaaf.

De Quo Vadis-meetsystemen meten op asniveau. Uit de meetgegevens kunnen vervolgens een aantal parameters worden afgeleid. De direct gemeten parameters zijn:

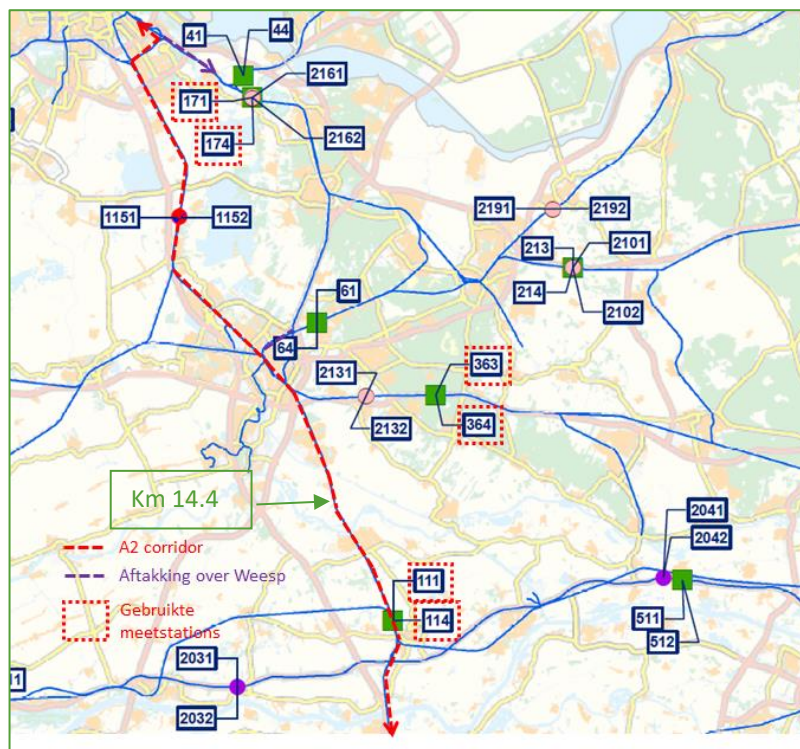
- statische aslasten
- dynamische aslasten
- asafstanden
- tag- en treinnummers

Van de statische krachten kan het gewicht op asniveau, materieelniveau en treinniveau afgeleid worden. Daarnaast kunnen verschillen in wiellast en onbalans in het draaistel worden afgeleid. Van de asafstanden kan de lengte van de trein afgeleid worden en het type materieel (treinstel).

Van de dynamische aslast kan de toestand van het wiel afgeleid worden, bijvoorbeeld of sprake is van onrondheid of een vlakke plaats. Van iedere gemeten dynamische aslast berekent het systeem de Root Mean Square (RMS) waarde.

Van alle goederentreinpassages ter plaatse van het trillingsmeetpunt in Schalkwijk zijn de meetgegevens van het dichtstbijzijnde Quo Vadis-meetpunt beschikbaar. Vanwege verschil in goederenroutes is er verschil te vinden tussen passages in Schalkwijk in het Quo Vadis-meetstation waarvan de meetgegevens beschikbaar zijn. Tabel 2 geeft een overzicht van het aantal goederentreinpassages dat tijdens de meetperiode is geregistreerd bij het dichtstbijzijnde Quo Vadis-meetstation en welk meetstation dit betreft. Een overzicht van de meetstations wordt gegeven in Figuur 3.

Figuur 3 Gebruikte Quo Vadis-meetstations in meetdataset langs A2-corridor.



In het onderzoek uit 2021 [ref.7] zijn de verschillende beschikbare meetdatasets aan elkaar gekoppeld. Hierbij is het passagetijdstip van de Quo Vadis-dataset als uitgangspunt genomen. Vervolgens is per trillingsignaal gezocht of op de betreffende meetlocatie het signaal optrad binnen een tijdsvenster rond het passagetijdstip volgens Quo Vadis. Hierbij is gevarieerd met het tijdsvenster en uiteindelijk gekozen voor +/- 2 minuten buffer.

De gekoppelde trillingssignalen hoeven niet allemaal het gevolg te zijn van goederentreinpassages. Daarnaast geldt dat door een tijdsvenster van +/- 2 minuten aan te houden er soms meerdere trillingssignalen aan een Quo Vadis-treinpassage worden gekoppeld. Er is een aantal filteringen toegepast om stoortrillingen uit de dataset te filteren en tevens zijn een aantal signalen handmatig gecontroleerd door het signaal te plotten, en waar nodig verwijderd. Tabel 3 geeft de verschillende filters weer en de uiteindelijk overgebleven datasets. Uiteindelijk is de set van 960 gekoppelde passages gebruikt in de analyse.

Tabel 3. Aanvullende selectiecriteria koppeling trillingssignalen met Quo Vadis-passages om goederentreinsignalen te identificeren.

	Schalkwijk
Minimale dominante frequentie (Hz)	1
Maximale dominante frequentie (Hz)	80
Maximale Veffmax passage (-)	3,2
Minimale tijdsduur signaal (sec.)	14
Uiteindelijk aantal gekoppelde signalen (unieke passages) *	960 (928)

* Er kunnen trillingssignalen zijn die gekoppeld worden aan dezelfde Quo Vadis-treinpassage. Dit kan komen doordat bij lage niveaus en een lange trein tussen de tijdstippen dat boven de drempelwaarde wordt uitgekomen dermate veel tijd zit dat meerdere signalen worden opgeslagen.

3

RESULTATEN VERVOLGSTAPPEN

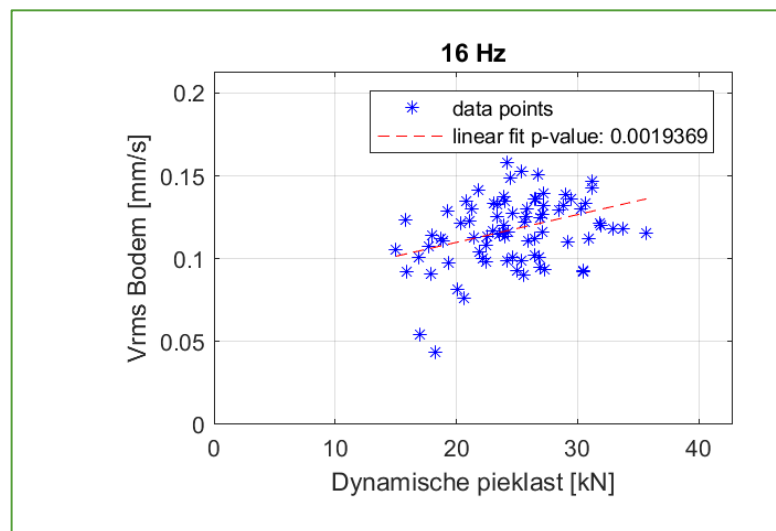
3.1 Dynamische pieklast uitgezet tegen trillingsniveau: alle passages

3.1.1 Regressieanalyses datasets

In dit hoofdstuk worden de resultaten van een uitgevoerde regressieanalyse beschreven. Hiertoe is MATLAB R2021b gebruikt. Voor elke dataset waarop een regressieanalyse is uitgevoerd zijn de volgende stappen gezet:

1. Regressiebepaling: de dataset is benaderd met een lineaire functie (fit met kleinste kwadraten methode);
2. Vervolgens is een F-test uitgevoerd;
3. Met de F-test is een p-waarde bepaald. Een p-waarde van 0,05 of minder (5%) wordt vaak gehanteerd als drempelwaarde om te bepalen of er sprake is van een statistisch significante relatie (In dit geval dus lineaire relatie). Wordt een hogere p-waarde gevonden dan betekent dit dat er een behoorlijke kans bestaat dat de dataset net zo goed met een gemiddelde waarde kan worden benaderd. In Figuur 4 wordt een voorbeeld gegeven.

Figuur 4 Voorbeeld resultaten regressie-analyse (blauwe punten = dataset, rode stippellijn = lineaire benadering met kleinste kwadratenmethode)



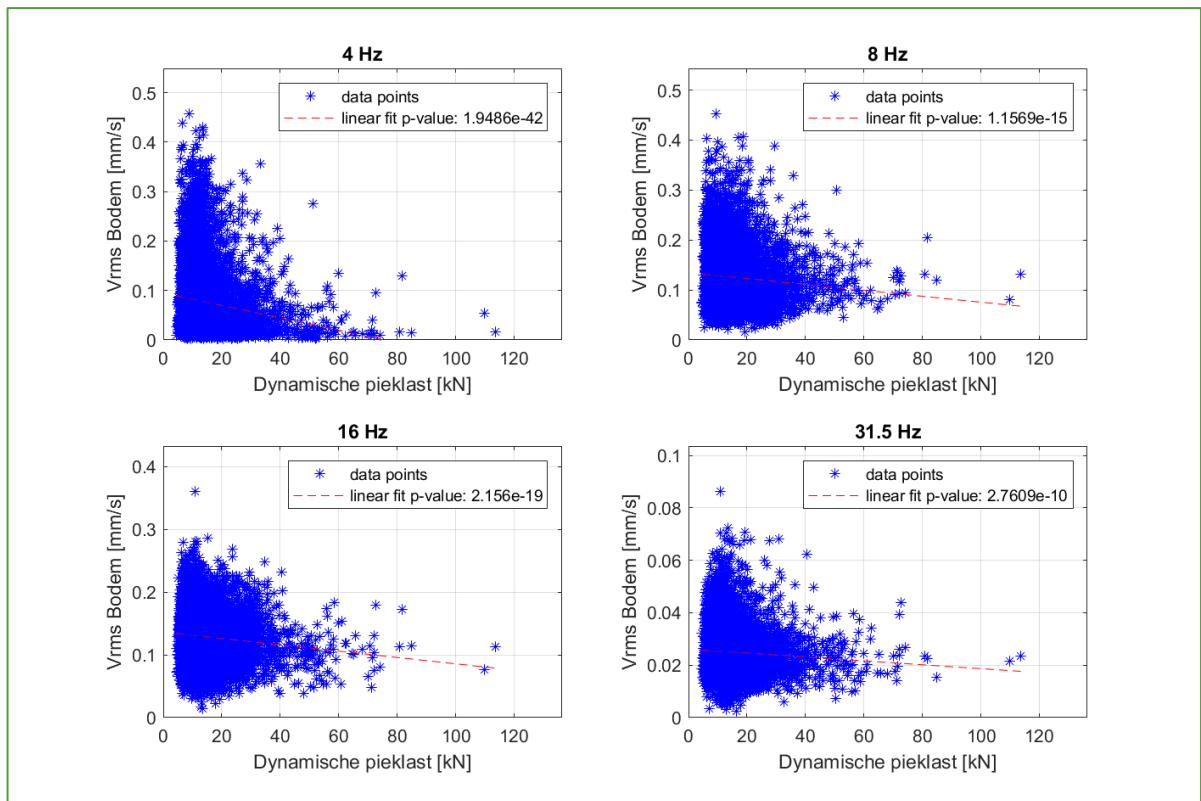
In Figuur 4 is een voorbeeld gegeven van een uitgevoerde regressieanalyse. In de figuur zijn de Vrms trillingsniveaus voor de 16 Hz-band uitgezet tegen de dynamische pieklast. Uit de figuur volgt dat de Vrms niveaus een lineaire trend laten zien waarbij met toenemende pieklast het Vrms niveau toeneemt (positieve

richtingscoëfficiënt). De blauwe gestippelde lijn is de lineaire functie die de dataset het beste benadert (kleinste kwadraten methode). Uit de F-test volgt een kleine p-waarde ($<0,01$), wat betekent dat de lineaire benadering statistisch gezien significant is en de data veel beter benadert dan een gemiddelde constante waarde.

3.1.2 Goederentreinpassages zuidelijke richting

Voor alle goederentreinpassages waarvoor een koppeling is gelegd tussen de gemeten Quo Vadis-passage en een trillingssignaal is van de passagesignalen per tijdsinterval de gemiddelde dynamische pieklast en gemiddelde V_{rms} per frequentieband bepaald. Per tijdsinterval levert dit één datapunt in de onderstaande grafieken op. Bijvoorbeeld: voor een trillingssignaal waarvoor het gemeten trillingsniveau ($V(t) > 0,25$ mm/s) 13 seconden duurt, worden er 13 waarden in onderstaande grafiek geplot. Vervolgens zijn voor alle passages de datapunten per frequentieband in de grafieken geplot zoals in Figuur 5 weergegeven. In deze paragraaf worden de resultaten van de zuidelijke richting gegeven. Passages richting het zuiden reden over het meest nabijgelegen spoor van de trillingsmeter in Schalkwijk.

Figuur 5 Alle passages zuidelijke richting, 1-seconde-interval.

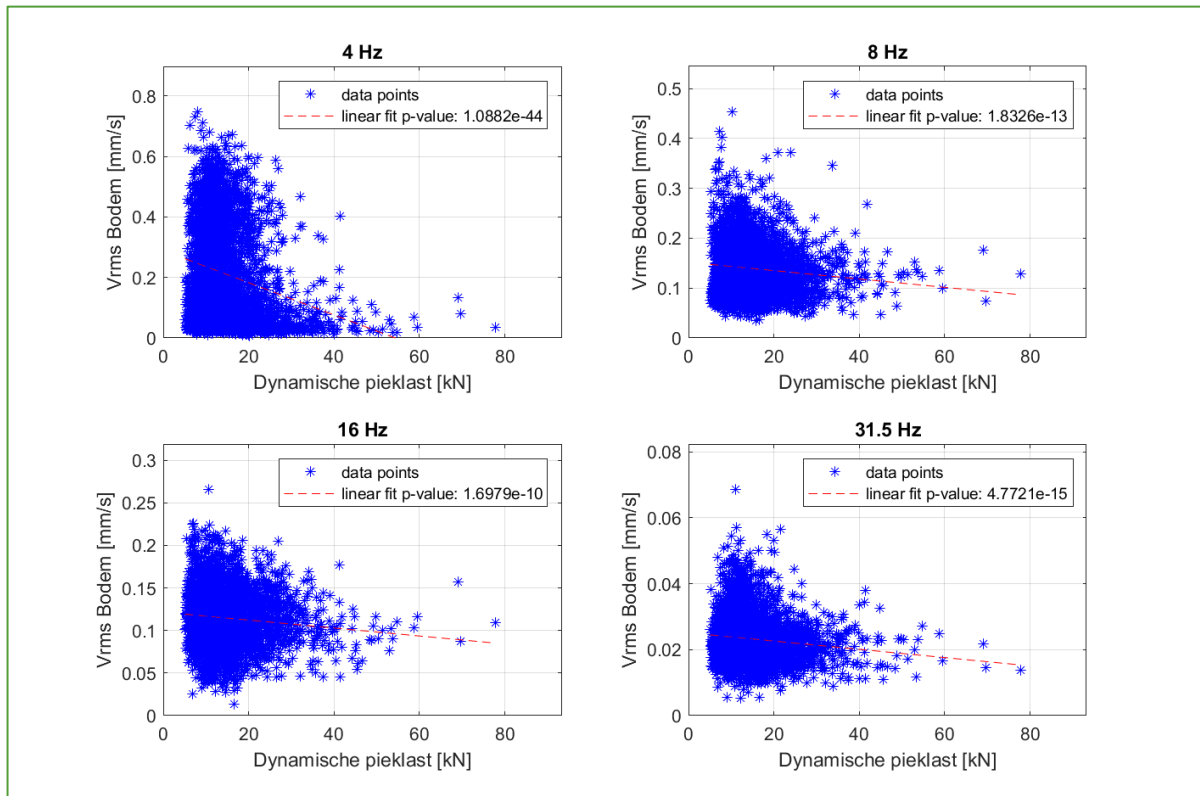


In Figuur 5 worden de resultaten voor de vier frequentiebanden weergegeven voor alle passages richting het zuiden. Het tijdsinterval is hierbij gekozen op 1 seconde. In Figuur 6 en Figuur 7 worden dezelfde resultaten weergegeven maar dan voor de tijdsintervallen 2 seconden en de volledige passagetijd. Dit resulteert met name voor Figuur 7 in veel minder datapunten in de grafiek.

Uit de resultaten blijkt dat verreweg de meeste 2-secondenintervallen een gemiddelde dynamische pieklast laten zien onder de 40 kN. Wordt een lineaire fit door alle datapunten heengetrokken dan volgt een trend dat een toename van dynamische pieklast gemiddeld over het gekozen interval niet leidt tot een toename in

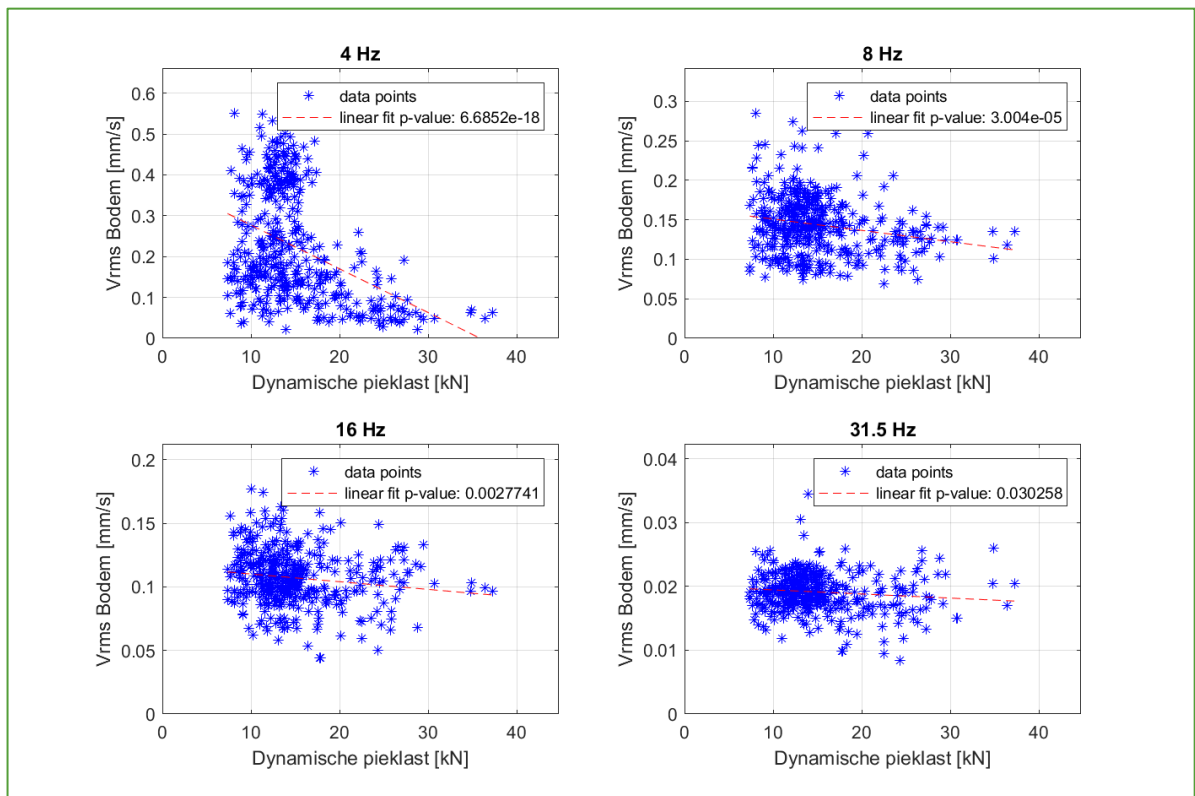
trillingsniveau V_{rms} over bijbehorend tijdsinterval. Dit geldt zowel voor intervallen van 1 seconde, 2 seconden en totale passagetijd. In eerste instantie was de verwachting dat een toename in dynamische pieklast ook zou leiden tot een toename in trillingsniveau in met name de frequentiebanden 16 en 31,5 Hz omdat in deze banden de invloed van wielonrondheid zichtbaar is². Een verklaring dat dit niet gevonden wordt is dat er mogelijk te veel variatie is tussen de verschillende type goederentreinen (en met name wagons) waardoor de invloed van wielonrondheid ondergesneeuwd raakt door andere effecten. Ook kan een verklaring zijn dat er nog steeds een mate van onbetrouwbaarheid aanwezig is in de koppeling van tijdsintervallen tussen het gemeten trillingsniveau en het Qua Vadis signaal.

Figuur 6 Alle passages zuidelijke richting, 2-secondeninterval



² In [ref. 7] wordt besproken dat de 1^e orde bij 25 m/s (=90 km/u) rond de 8-10 Hz ligt. Dit betreft echter wilexcentriciteit. Voor wielonrondheid 2^e en 3^e orde volgt 17-19 Hz en 26-28,5 Hz respectievelijk.

Figuur 7 Alle passages zuidelijke richting, tijdsinterval is gehele passage.

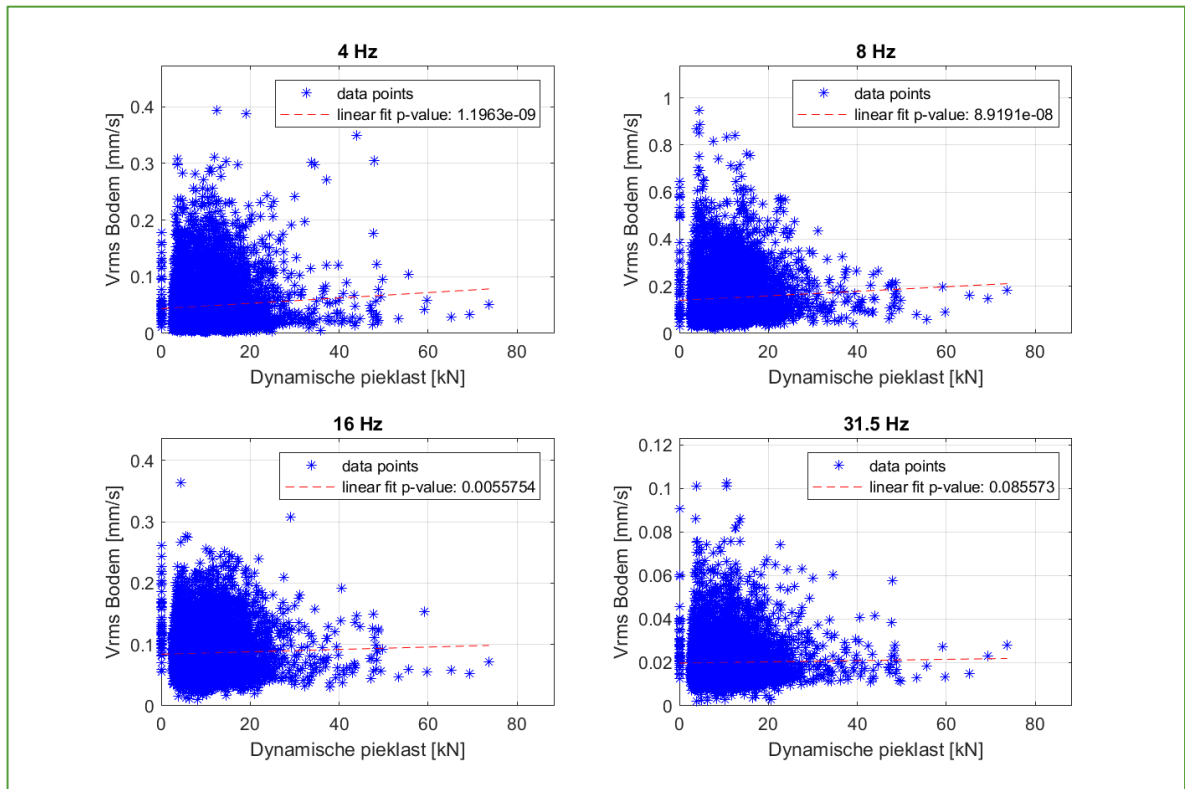


3.1.3 Goederentreinpassages noordelijke richting

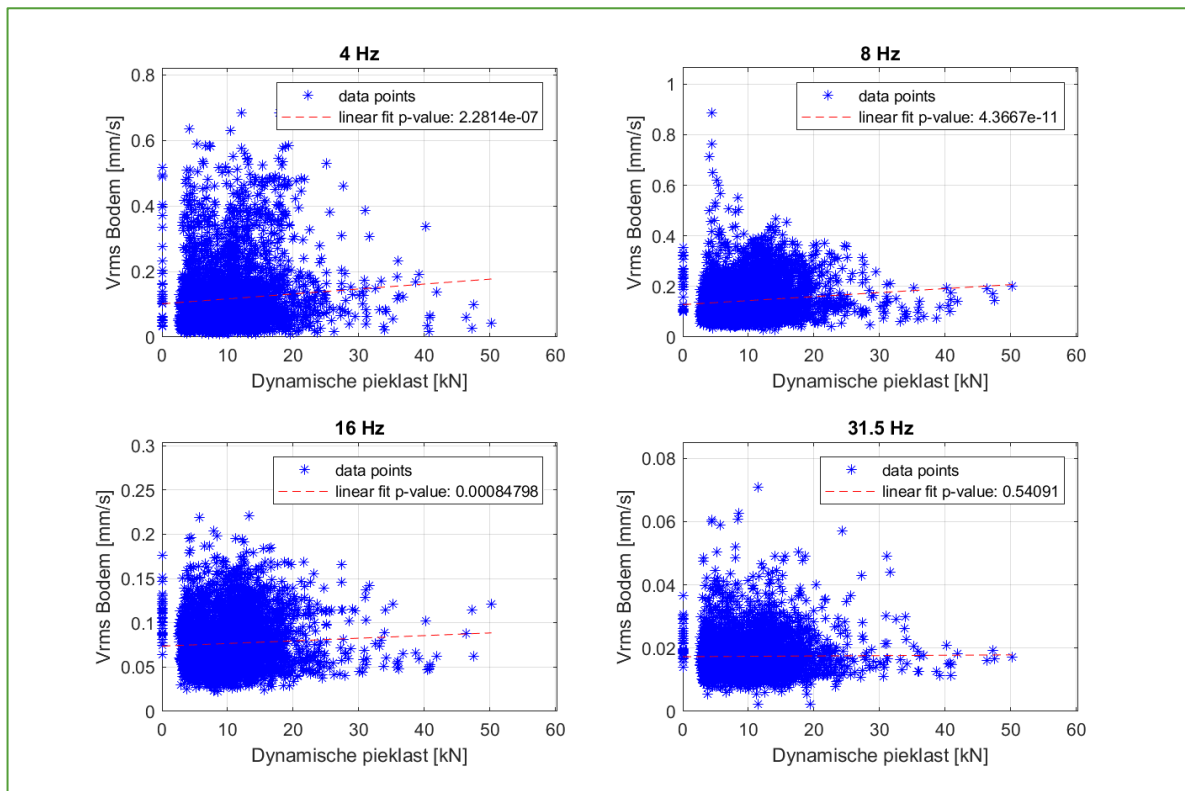
Voor de goederentreinpassages in noordelijke richting volgt eenzelfde wijde spreiding als voor de passages in zuidelijke richting. In Figuur 8 t/m 10 worden de resultaten voor de verschillende tijdsvensters weergegeven. Voor het 1-secondetijdsinterval en 2-secondetijdsinterval volgt echter wel een toename van trillingsniveau bij een toename in dynamische pieklast wanneer naar de lineaire benadering wordt gekeken. Voor het tijdsinterval waarbij naar de hele passage wordt gekeken blijkt dit alleen voor de 8-Hz-band te worden gevonden. De 4-Hz-en 16-Hz-band tonen geen statistisch significante lineaire benadering³ en de 31,5-Hz-band toont een afname van trillingsniveau bij een toename in dynamische pieklast. Het trillingsniveau in de 31,5-Hz-band is overigens laag te noemen ten opzichte van de 4- en ook 8- en 16-Hz-band.

³ Er wordt gesproken over een statistisch significante lineaire benadering wanneer uit de F-test een p-waarde onder de 0,05 wordt gevonden. Dit zegt nog niet dat de lineaire lijn de data goed benadert, maar enkel beter dan een constante waarde.

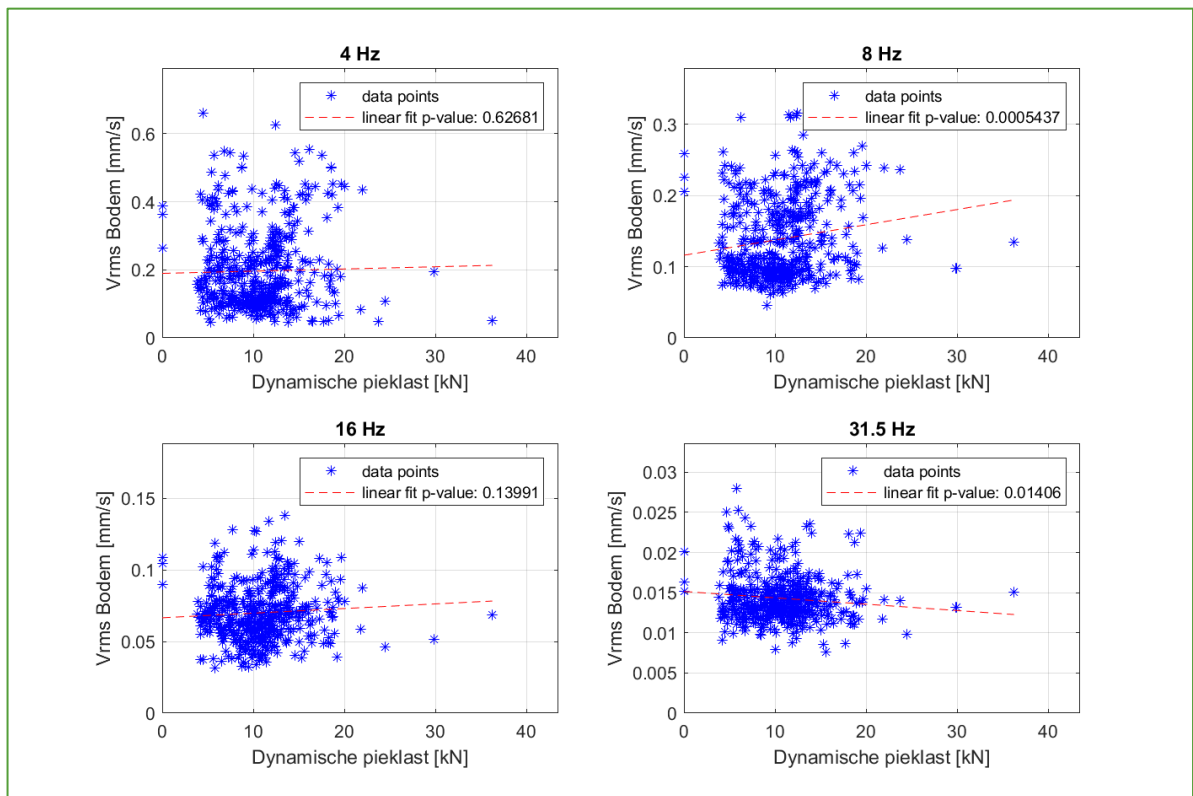
Figuur 8 Alle passages noordelijke richting, 1-seconde-interval.



Figuur 9 Alle passages noordelijke richting, 2-secondeninterval.



Figuur 10 Alle passages noordelijke richting, tijdsinterval is gehele passage.



3.2 Dynamische pieklast uitgezet tegen trillingsniveau: specifieke wagontypes

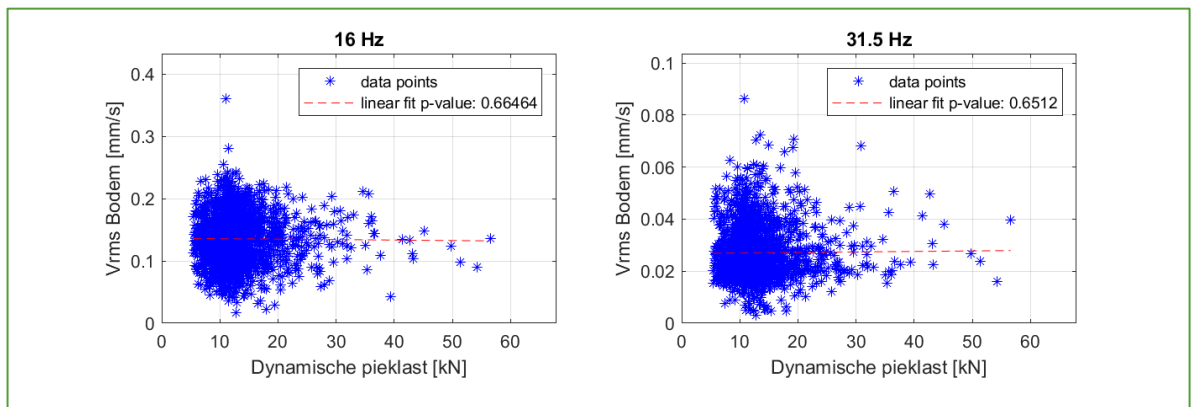
Voor drie type wagons is afzonderlijk gekeken naar de verdeling van Vrms-waarde tegen dynamische pieklast. De drie types betreffen FALNS, TANOOS en SHIMMNS. In de volgende subparagrafen wordt op de resultaten ingegaan. Hierbij worden de resultaten van de zuidelijke rijrichting gepresenteerd omdat deze passages het dichtst op het meetpunt plaatsvonden. Daarbij worden de frequentiebanden 16 en 31,5 Hz weergegeven omdat voor deze banden het effect van wielonrondheid wordt verwacht⁴. De resultaten voor de noordelijke rijrichting zijn in Bijlage II opgenomen.

3.2.1 FALNS

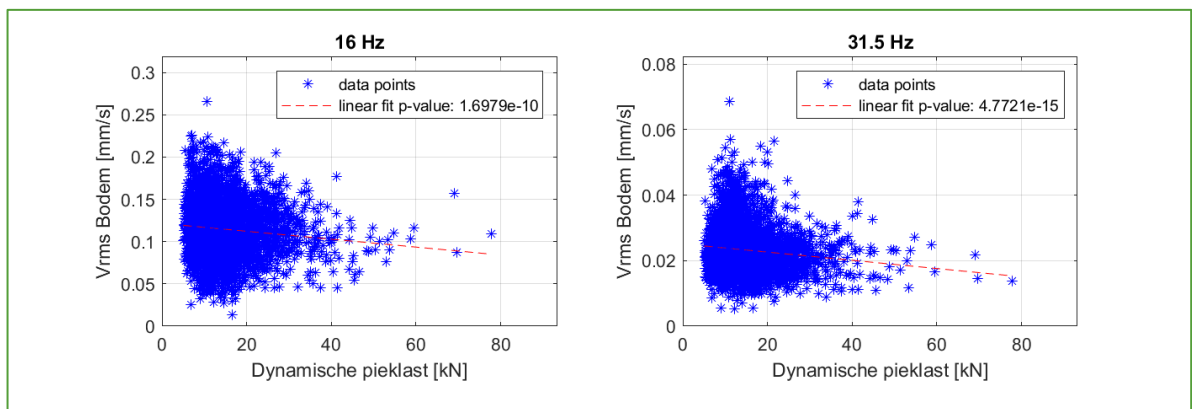
In Figuur 11 t/m 13 worden de resultaten voor het type FALNS weergegeven. De resultaten tonen een vergelijkbaar beeld als de resultaten voor alle passages, namelijk een grote spreiding aan datapunten en geen statistisch significante toename van trillingsniveau met dynamische pieklast. (Voor een 2-secondeninterval wordt juist een afname gevonden). Opgemerkt wordt dat het trillingsniveau in de 31,5-Hz-band laag te noemen is ten opzichte van de overige drie frequentiebanden.

⁴ Zoals in voetnoot 3 genoemd geldt dit bij een rijsnelheid van ca. 90 km/u voor de 2^e en 3^e orde wielonrondheden.

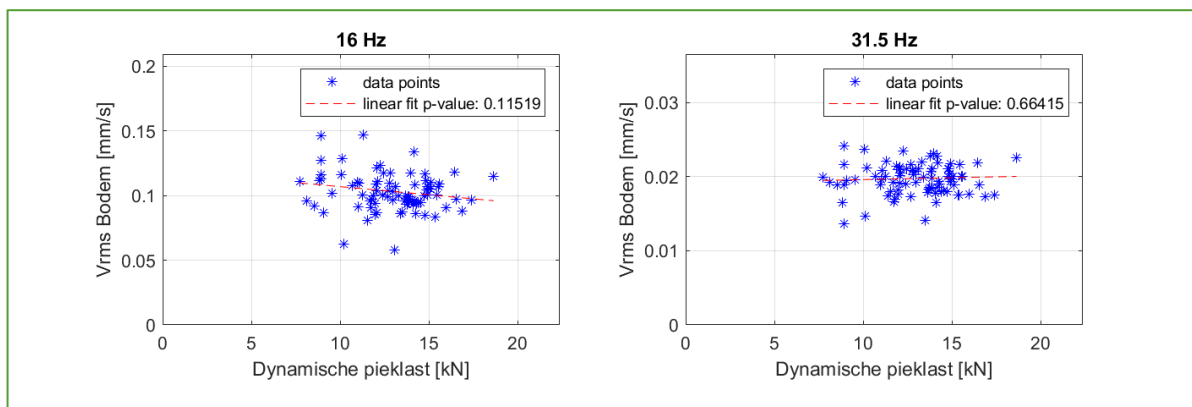
Figuur 11 Zuidelijke richting wagontype FALNS, tijdsinterval: 1seconde



Figuur 12 Zuidelijke richting wagontype FALNS, tijdsinterval: 2seconden



Figuur 13 Zuidelijke richting wagontype FALNS, tijdsinterval: gehele passage

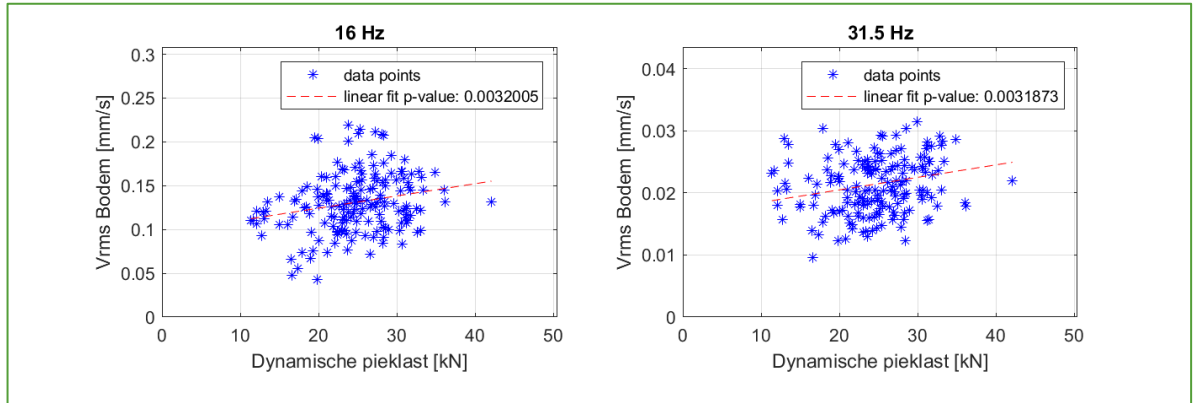


3.2.2 TANOOS

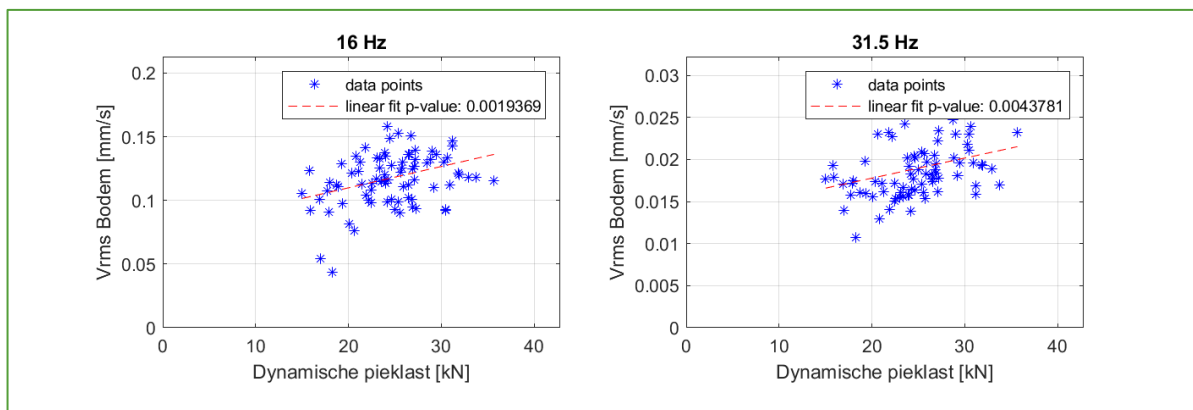
In Figuur 14 t/m 16 worden de resultaten voor het type TANOOS weergegeven. De resultaten geven een ander beeld. Er wordt namelijk wel een statistisch significante toename gevonden voor alle drie de typen

tijdsintervallen. Uit Figuur 16 blijkt dat het om een beperkt passages gaat. Het gaat hierbij naar verwachting⁵ steeds om dezelfde trein (het treinnummer is steeds hetzelfde, namelijk 47615).

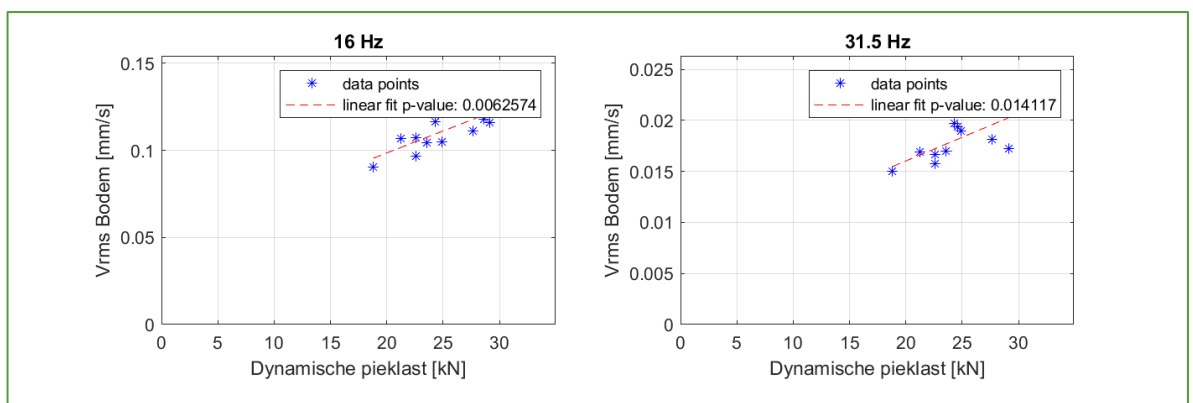
Figuur 14 Zuidelijke richting wagontype TANOOS, tijdsinterval: 1seconde



Figuur 15 Zuidelijke richting wagontype TANOOS, tijdsinterval: 2seconden



Figuur 16 Zuidelijke richting wagontype TANOOS, tijdsinterval: gehele passage

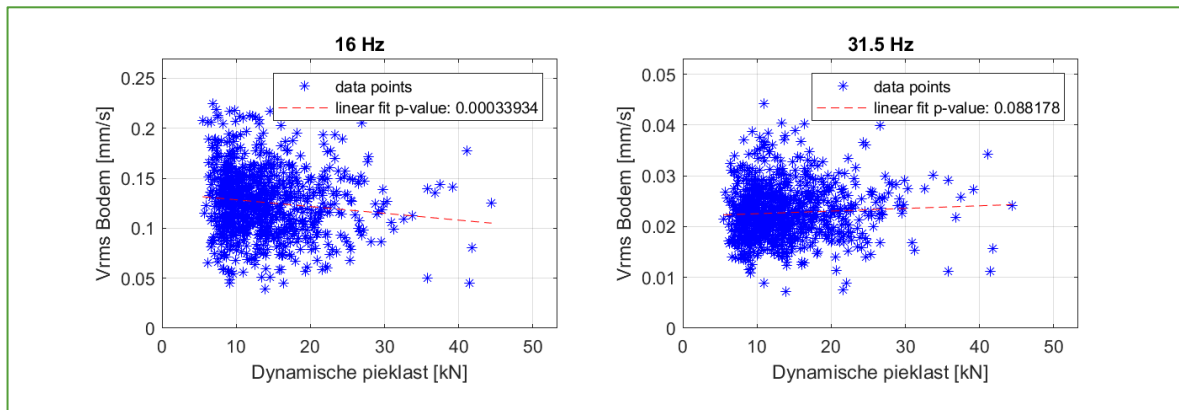


⁵ Het gaat naar verwachting steeds om dezelfde trein omdat het om hetzelfde treinnummer gaat. Een goederentrein met een bepaald treinnummer kan echter variëren in aantal wagons afhankelijk van de lading van de dag.

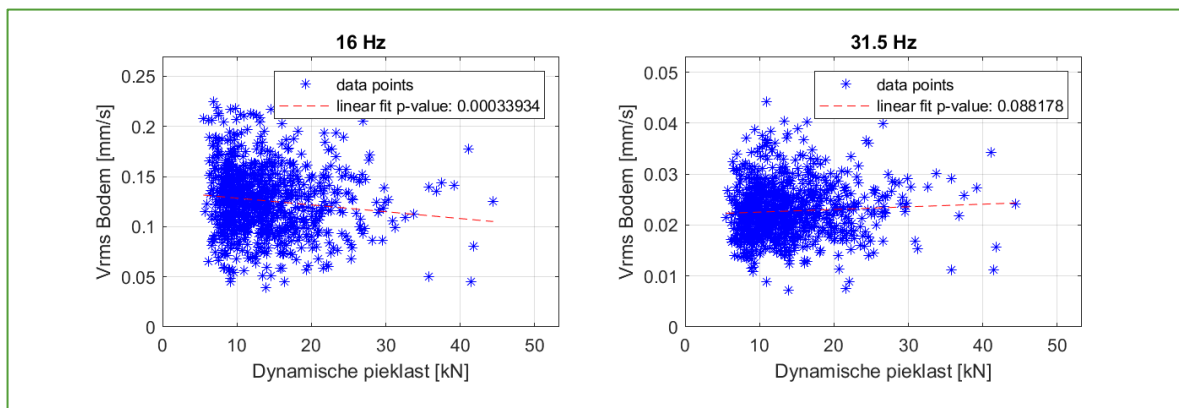
3.2.3 SCHIMNS

In Figuur 17 t/m 19 worden de resultaten voor het type SHIMMNS weergegeven. Uit de resultaten blijkt dat er of een afname van trillingsniveau met toenemende dynamische pieklast wordt gevonden óf er geen sprake is van een statistisch significante lineaire benadering.

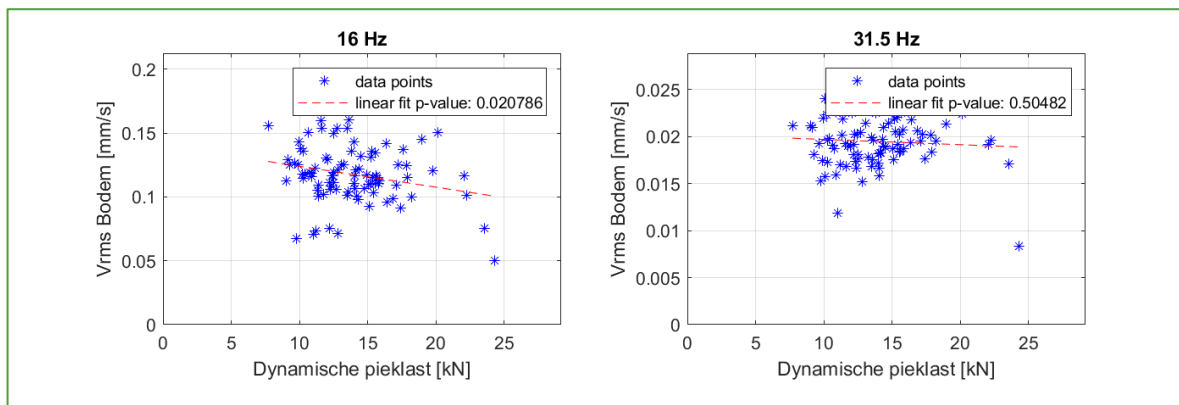
Figuur 17 Zuidelijke richting wagontype SHIMNS, 1-seconde-interval.



Figuur 18 Zuidelijke richting wagontype SHIMNS, 2 secondeninterval



Figuur 19 Zuidelijke richting wagontype SHIMNS, tijdsinterval: gehele passage.



3.2.4 Belading en rijrichting

Uit de vorige paragraaf blijkt dat de TANOOS in zuidelijke richting een statistische significante lineaire trend laten zien met dynamische pieklast maar de noordelijke rijrichting niet. Voor het wagontype FALNS blijkt dit juist voor de noordelijke richting te gelden echter wel met veel spreiding (zie bijlage II). Mogelijk dat belading hier een rol in meespeelt. Er is daarom gekeken naar de drie verschillende wagontypen en de belading van de trein per rijrichting. In Tabel 4 worden de resultaten van de gemiddelde aslast per passage weergegeven. De maximale aslast bedraagt 22,5 kN. Voor een volgeladen goederentrein wordt daarom een gemiddelde aslast verwacht > 15 kN. Uit de tabel blijkt dat de TANOOS in zuidelijke richting naar verwachting allemaal leeg waren, terwijl richting het noorden 9 van de 11 treinen volgeladen waren. Voor de FALNS volgt de verwachting dat richting het zuiden de treinen grotendeels volgeladen waren terwijl richting het noorden ongeveer de helft leeg was. Voor de SHIMNS is het juist andersom.

Tabel 4. Aanvullende selectiecriteria koppeling trillingssignalen met Quo Vadis-passages om goederentreinsignalen te identificeren.

Wagontype	Gemiddelde aslast < 15 kN	Gemiddelde aslast > 15 kN
FALNS rijrichting noorden	40	45
FALNS rijrichting zuiden	10	74
SHIMNS rijrichting noorden	5	7
SHIMNS rijrichting zuiden	75	16
TANOOS rijrichting noorden	2	9
TANOOS rijrichting zuiden	12	0

4

CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

4.1 Conclusies

Uit de resultaten van het meerwerkonderzoek naar de frequentie-inhoud van de trillingssignalen in combinatie met het verloop van de dynamische aslast voor de meetlocatie Schalkwijk volgt een aantal conclusies:

- De hypothese dat een slecht onderhouden wiel leidt tot een verhoging van het trillingsniveau in een bepaalde frequentieband (16 of 31,5 Hz) en tot een verhoging van dynamische pieklast wordt niet teruggevonden wanneer alle passages in zuidelijke richting tegen elkaar uitgezet worden. Voor zowel een tijdsventer van 1 seconde als van 2 seconden en ook de gehele passagetijd wordt geen toenemend verband (lineaire benadering) gevonden tussen Vrms bodem en dynamische pieklast in de frequentiebanden 4, 8, 16 en 31,5 Hz.
- Voor de noordelijke richting wordt wel een toenemend verband gevonden voor de 1- en 2-secondenintervallen. Waarbij de benadering voor de 31,5-Hz-band niet statistisch significant is⁶. Voor de gehele passagetijd geldt enkel een statistisch significant toenemend verband voor de 8 Hz band.
- Wordt afzonderlijk gekeken naar de drie type treinwagons FALNS, SHIMNS en TANOOS voor de rijrichting zuiden, dan blijkt dat voor het type TANOOS voor zowel het 1-secondetijdsinterval als voor de 2-secondetijdsinterval en de gehele passagetijd een statistisch significante lineaire toenemende relatie tussen de Vrms bodem en dynamische pieklast wordt gevonden voor de 16 en 31,5-Hz-band. Voor de FALNS en de SHIMNS geldt dit niet. Voor de noordelijke rijrichting, die verder van het meetpunt af ligt, geldt dat voor de TANOOS geen statistisch significante lineaire toenemende relatie wordt gevonden.
- Geconcludeerd wordt dat een toename van dynamische pieklast leidt tot een toename in trillingsniveau in de frequentiebanden 16 en 31,5 Hz voor de TANOOS-passages rijrichting zuiden. Omdat voor de frequentiebanden 16 en 31,5 Hz het effect van wielonrondheid wordt verwacht⁷, geeft dit resultaat de verwachting dat voor de TANOOS-passages mogelijk het effect van wielonrondheid zowel in de trillingsmetingen als in de metingen van het Quo Vadis-station terug is gevonden. Voor de FALNS en SHIMNS-passages zuidelijke richting is dit niet het geval.
- Voor de noordelijke richting blijkt dat de FALNS-wagons juist een statistisch significante lineaire toename laten zien. Dit wordt deels teruggevonden in de resultaten voor alle passages omdat de FALNS-passages het merendeel van de passages betreft. Wel is er sprake van veel spreiding.
- De TANOOS zuidelijke richting betreffen allen lege goederentreinen, voor de FALNS noordelijke richting geldt dat het circa de helft lege goederentreinen betreft (aannahme hierbij is dat lege treinen een gemiddelde aslast < 15 kN hebben en volgeladen treinen > 15 kN).

⁶ Er wordt gesproken over een statistisch significante lineaire benadering wanneer uit de F-test een p-waarde onder de 0,05 wordt gevonden. Dit zegt nog niet dat de lineaire lijn de data goed benadert, maar enkel beter dan een constante waarde.

⁷ In [ref. 7] wordt besproken dat de 1^e orde bij 25 m/s (=90 km/u) rond de 8-10 Hz ligt. Dit betreft echter wielexcentriciteit. Voor wielonrondheid 2^e en 3^e orde volgt 17-19 Hz en 26-28,5 Hz respectievelijk.

- Geconcludeerd wordt dat een statistisch significante relatie tussen de Vrms-frequentiebanden en dynamische pieklast het beste wordt gevonden voor een dataset waarin één specifiek wagontype aanwezig is, het om dezelfde trein gaat en het lege wagons betreft.

4.2 Aanbevelingen

Met het oog op de pilot waarin onderzoek wordt gedaan naar het reduceren van trillingen in de omgeving door wielonrondheid van goederentreinwagons te beperken volgt een aantal aanbevelingen uit dit onderzoek:

- De resultaten van het onderzoek tonen dat een statistisch significante toenemende relaties tussen dynamische pieklast en trillingsniveau Vrms per frequentieband niet goed wordt gevonden wanneer naar verschillende trein-/wagontypes als totaal wordt gekeken. Per wagontype is er mogelijk een relatie te vinden, maar dan nog geldt dat er veel variatie wordt gevonden. Enkel voor het type TANOOS zuidelijke richting en FALNS noordelijke richting wordt een relatie gevonden die in lijn is met de verwachting. Aanbevolen wordt in de pilot veel aandacht te geven aan het constant houden van zoveel mogelijk parameters (zoals as-afstanden, wielsteleigenschappen, hoeveelheid afgeveerde en onafgeveerde massa) om zodoende de invloed van slecht onderhouden wielen in kaart te kunnen brengen.
- Aanbevolen wordt lege en beladen goederentreinen apart te onderzoeken.
- Dat het Quo Vadis-meetstation niet dicht bij de trillingsmeetlocatie lag, maakt de vergelijking moeilijker. Immers, de dynamische pieklast (en invloed van wielonrondheid op trillingen in de bodem) hangt mede af van de grondgesteldheid die sterk kan variëren tussen het Quo Vadis-meetpunt en de trillingsmeetlocatie. Aanbevolen wordt in de pilot een locatie te meten waar beide systemen dicht bij elkaar zijn gepositioneerd.
- Railonregelmaticheden kunnen in hetzelfde golflengtegebied optreden als wielonregelmaticheden en daarmee in hetzelfde frequentiegebied invloed hebben op de bodemtrillingen. Aanbevolen wordt een locatie te kiezen voor de pilot waarvan de railomstandigheden goed bekend zijn en welke gunstig zijn (goed onderhouden spoor).

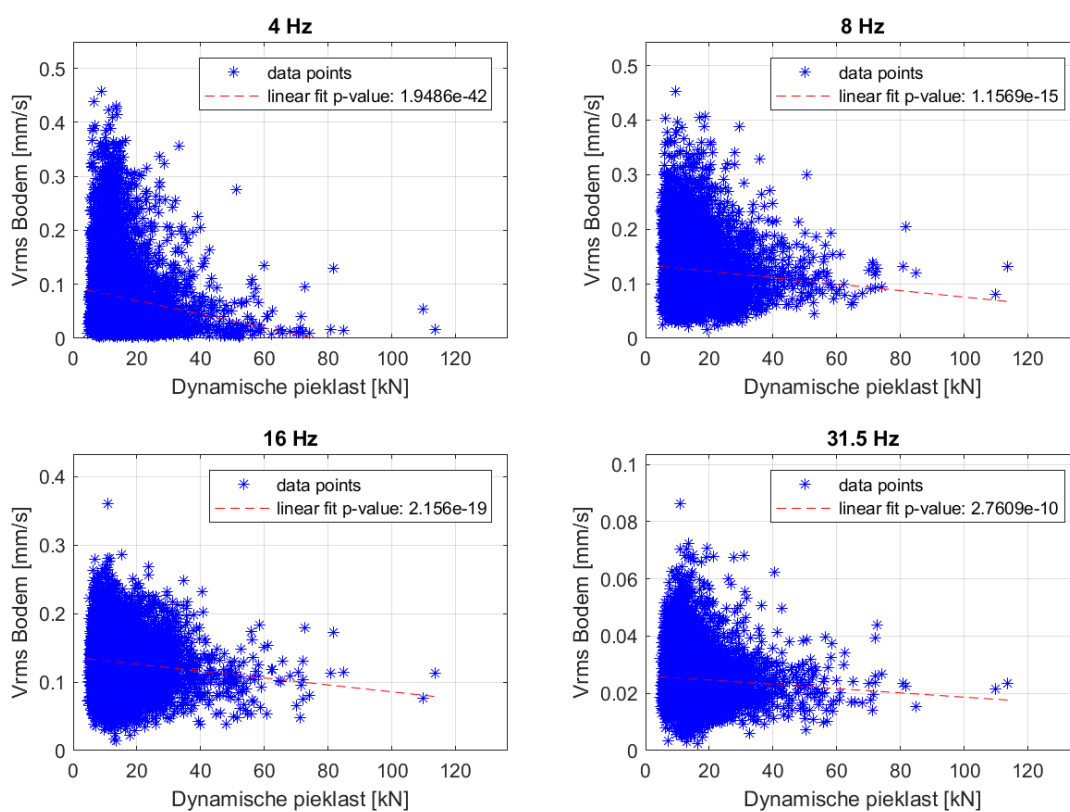
REFERENTIES

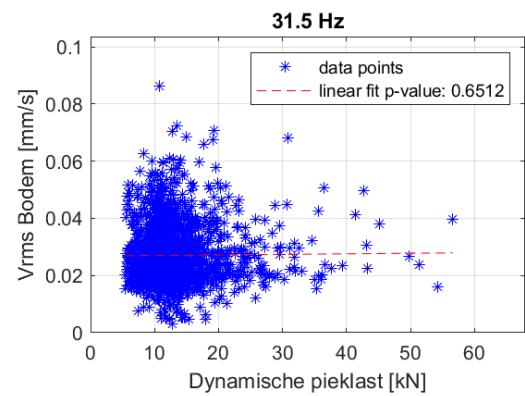
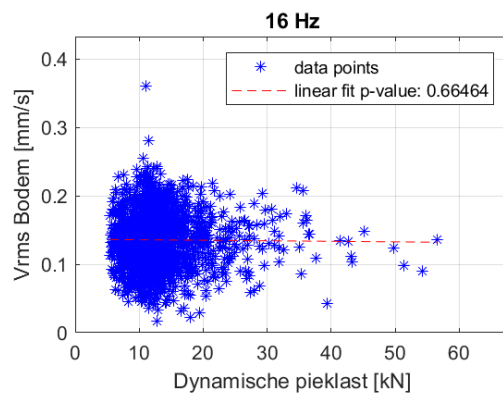
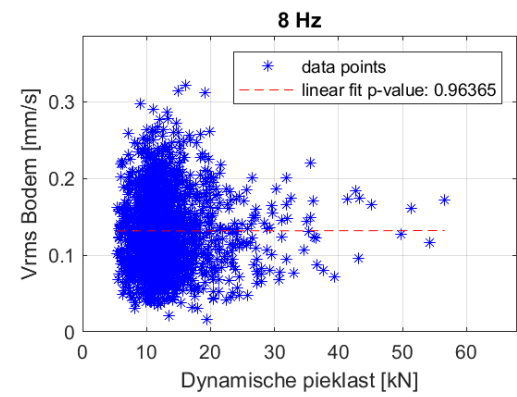
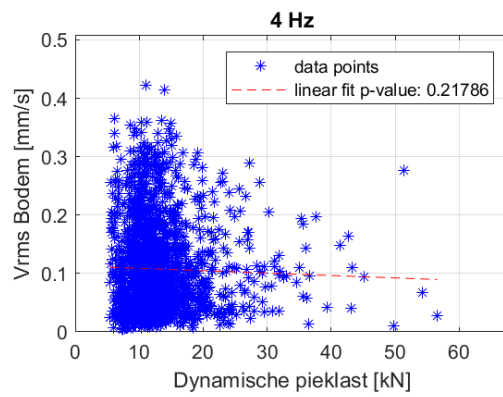
1. Stichting Bouw Research (2006). SBR-richtlijn deel B: Hinder voor personen in gebouwen.
2. Federal Transit Administration (2006). Transit Noise and Vibration impact assessment.
3. ISO14837-1 (2005). Mechanical vibration- Ground borne noise and vibration arising from rail systems part 1: General guidance.
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. Cohere Consultants (2021). Onderzoek wielkwaliteit op basis van gemeten trillingssignalen definitief 1.0. Referentie: CC-REP20210402

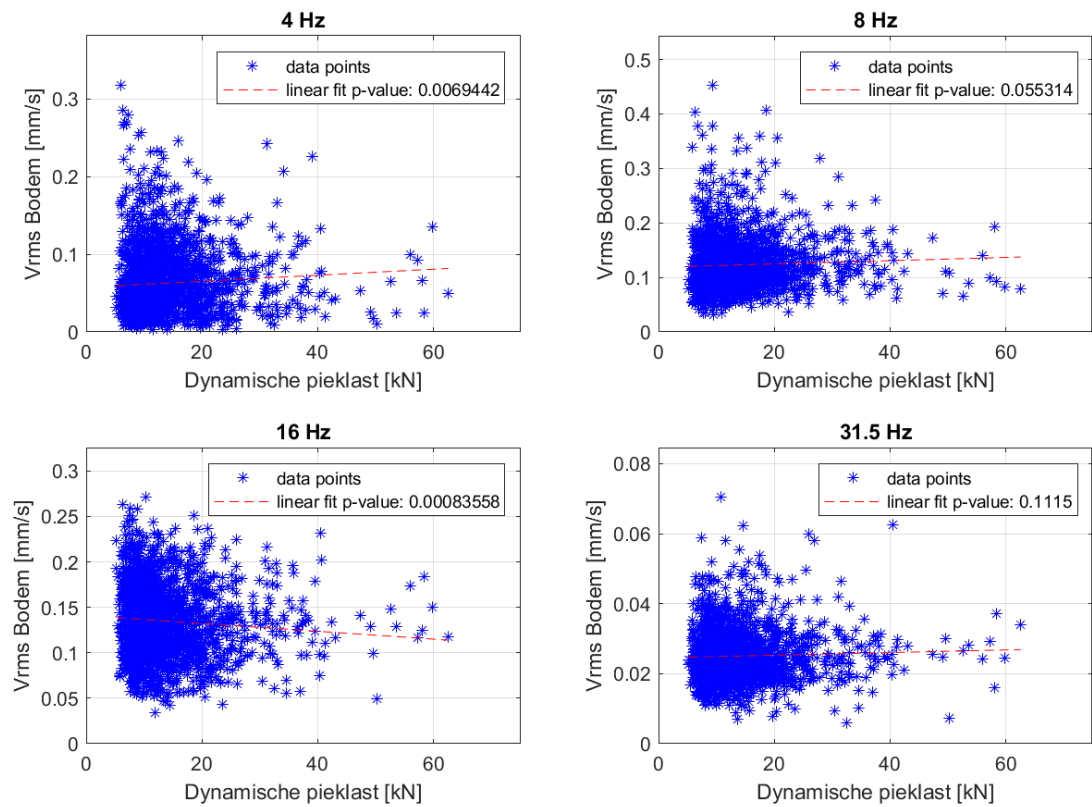
BIJLAGE I. VRMS PER FREQUENTIEBAND UITGEZET TEGEN GEMIDDELDE DYNAMISCHE PIEKLAST ZUIDELIJKE RICHTING

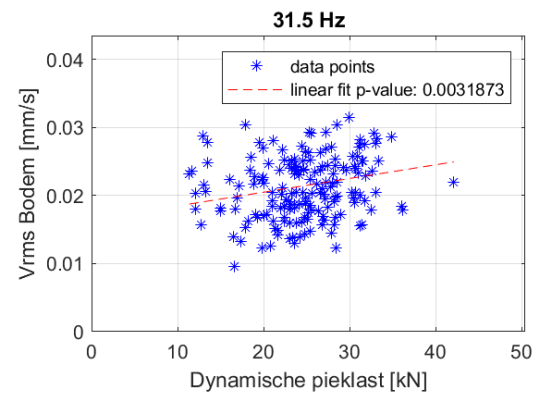
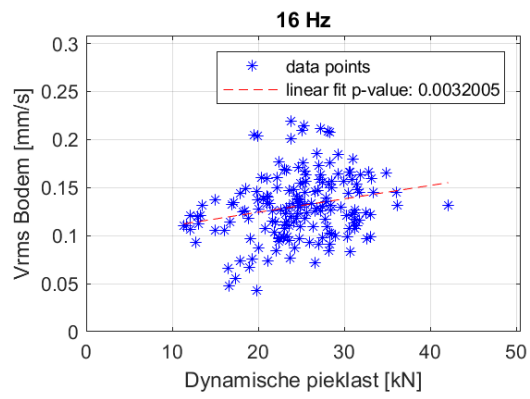
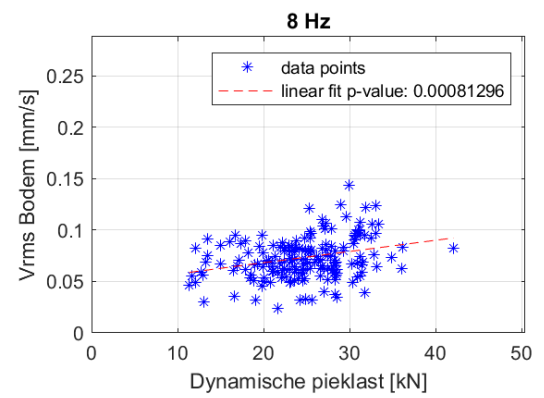
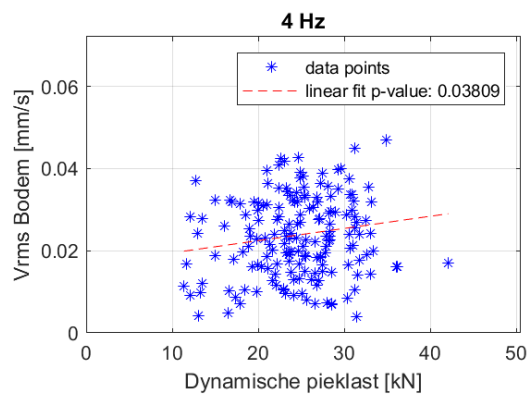
1-secondetijdsvensters

Alle passages



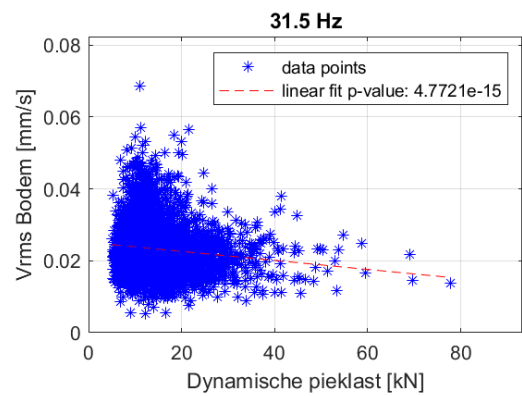
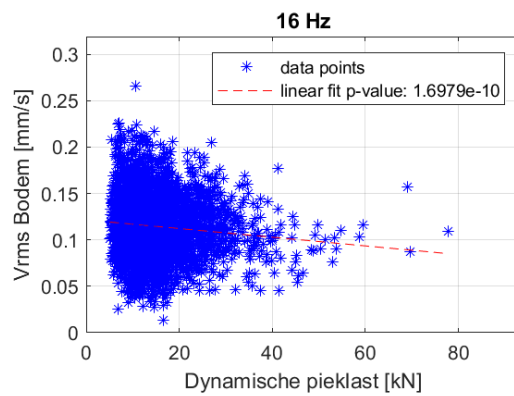
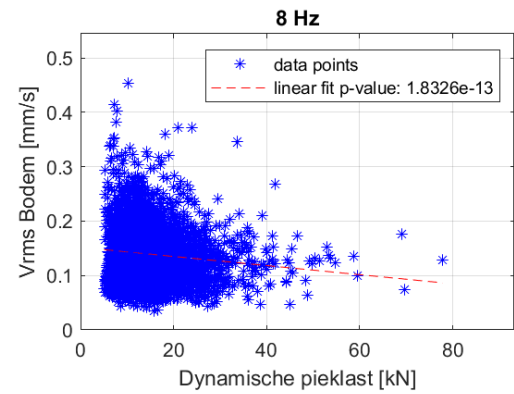
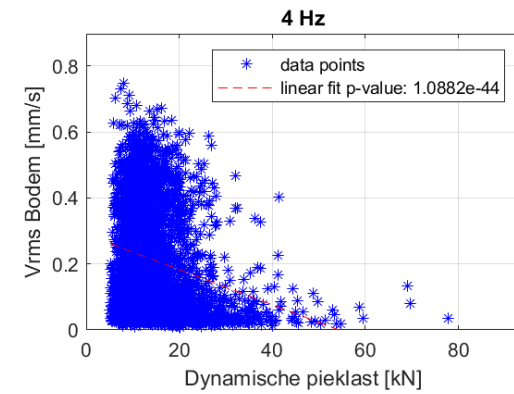


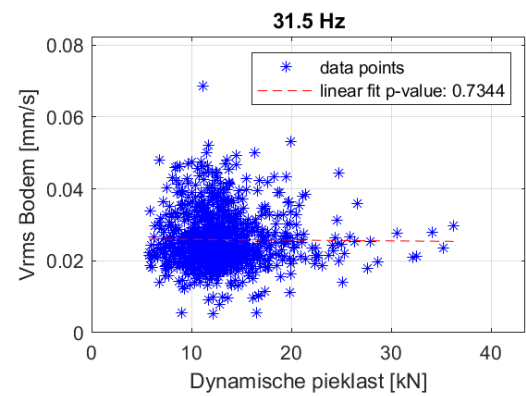
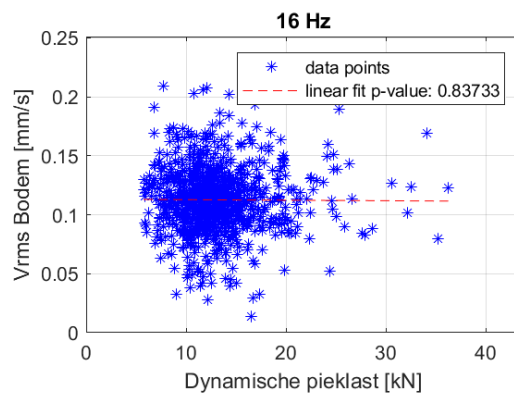
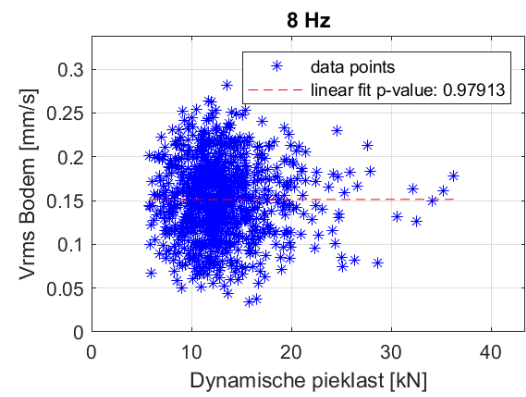
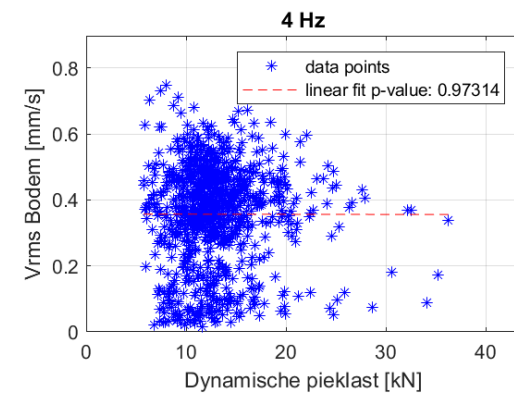


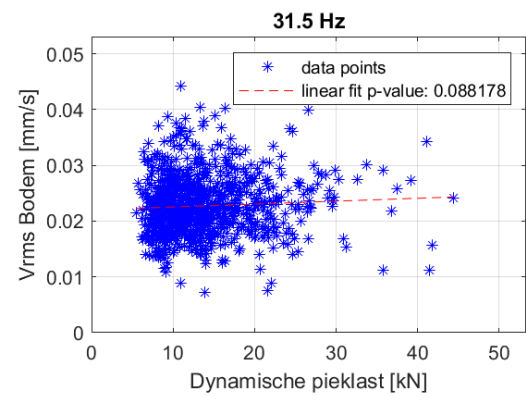
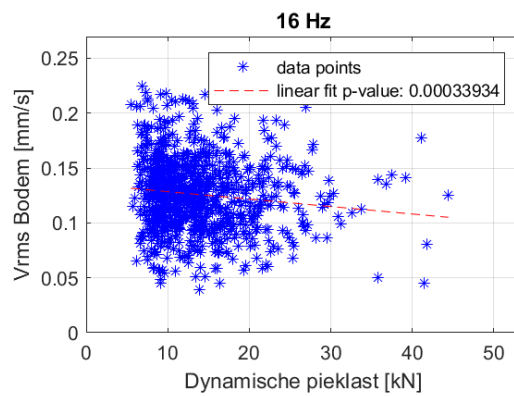
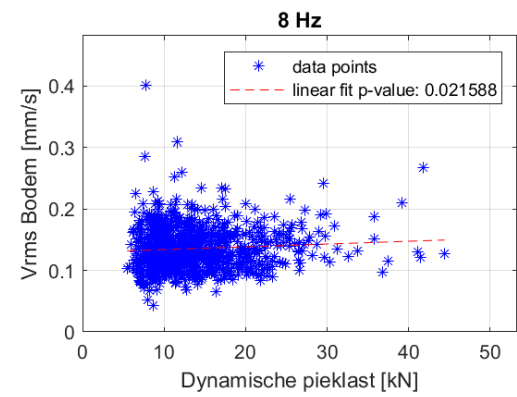
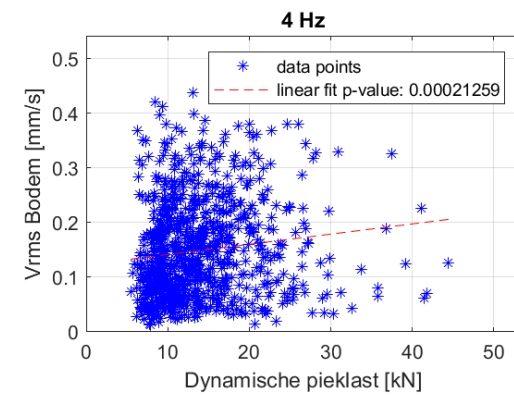


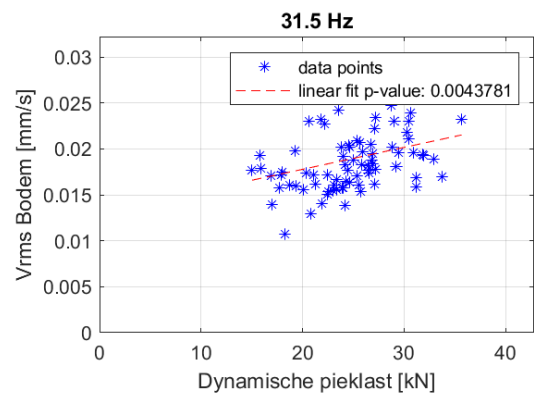
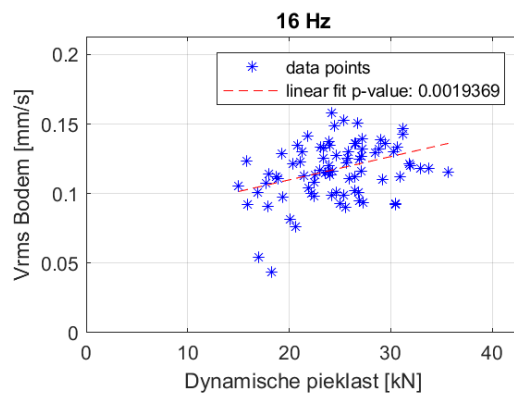
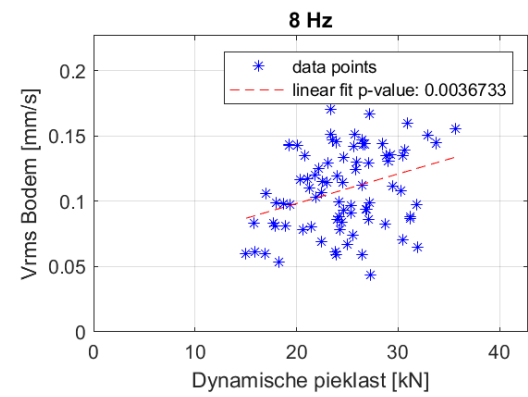
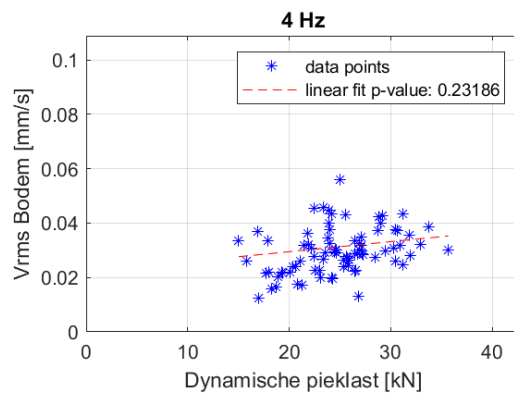
2-secondtijdsvensters

Alle passages



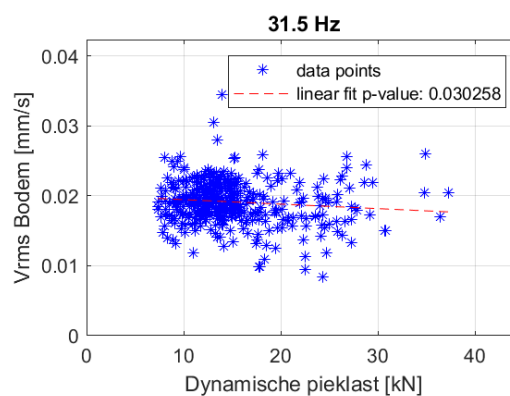
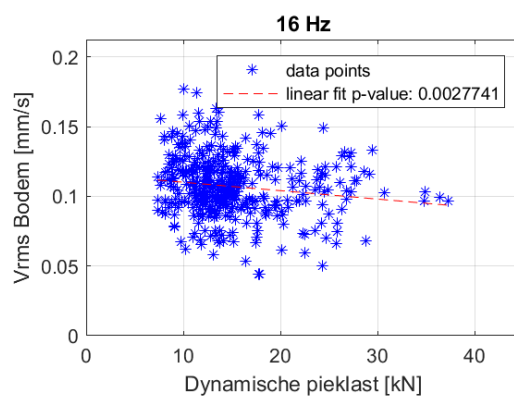
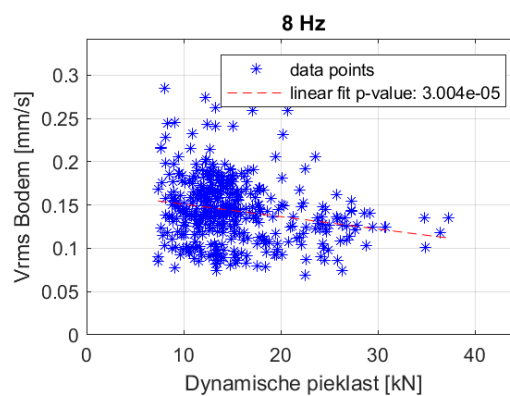
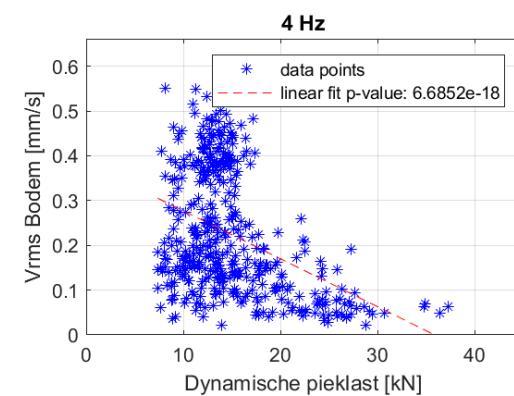


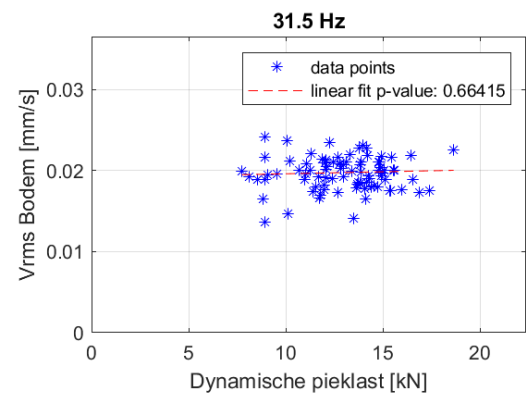
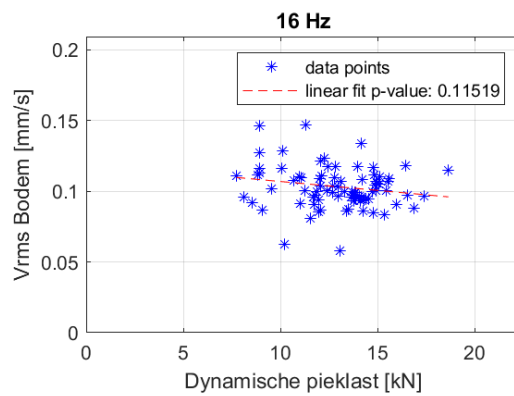
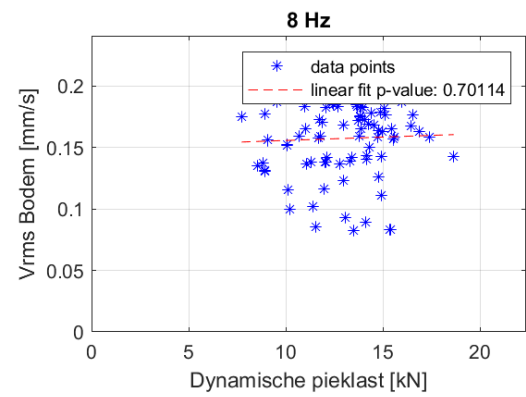
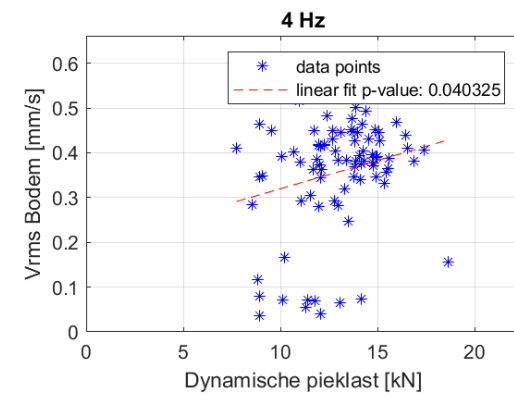


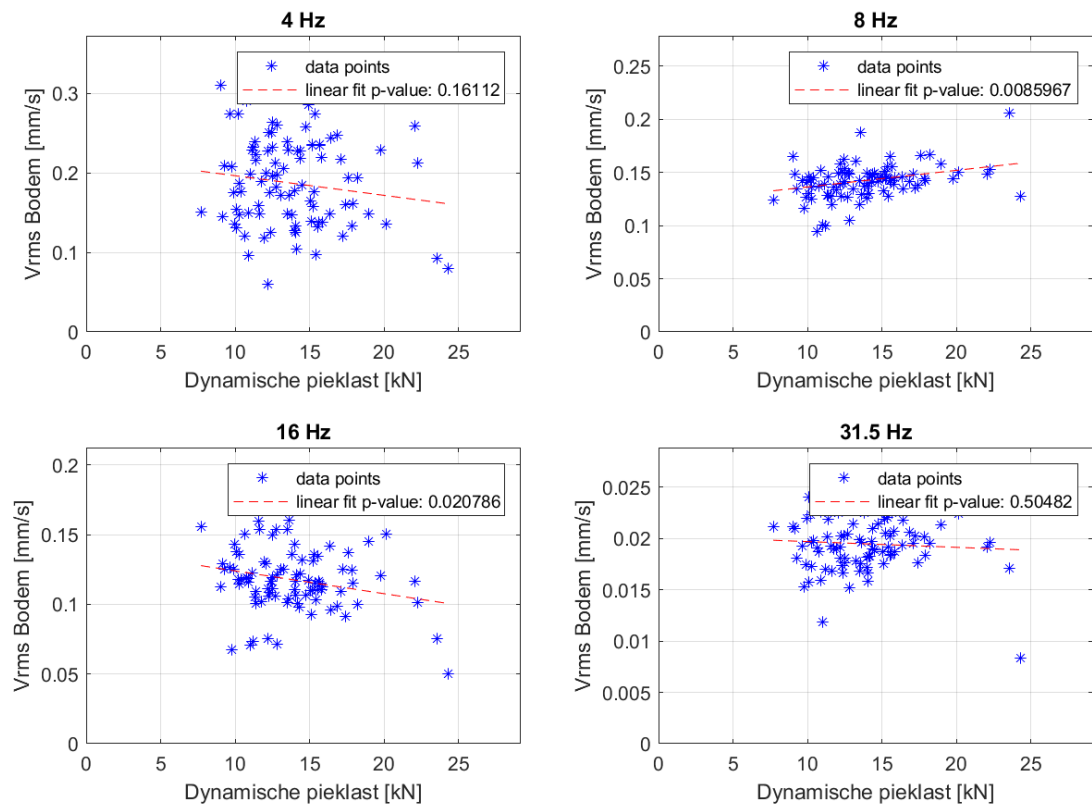


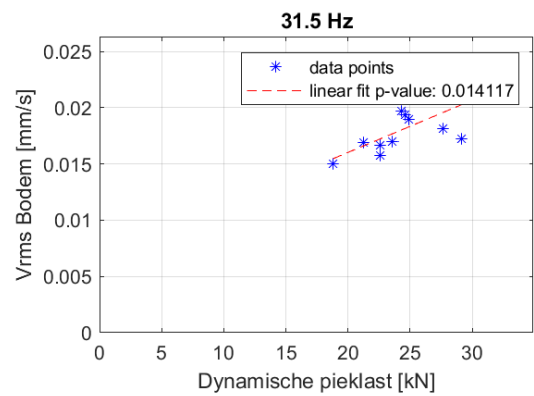
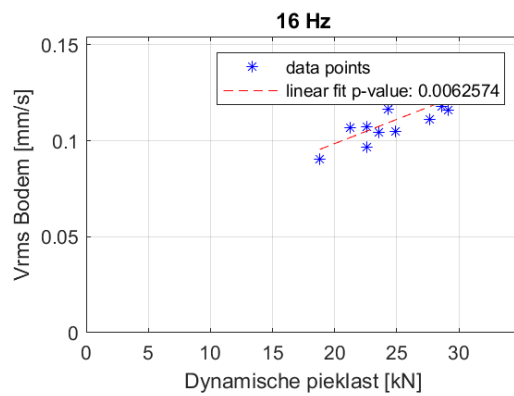
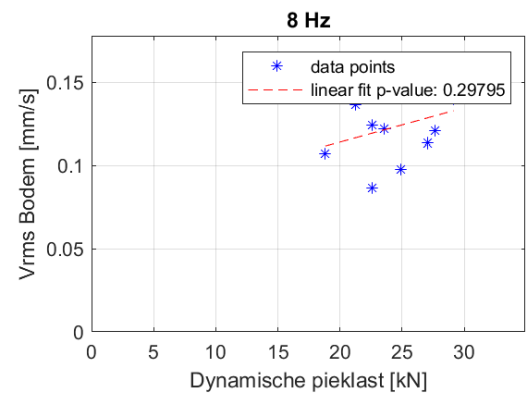
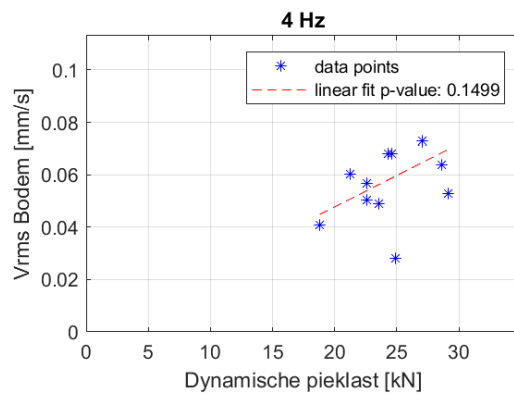
Gehele passage tijdsvenster

Alle passages





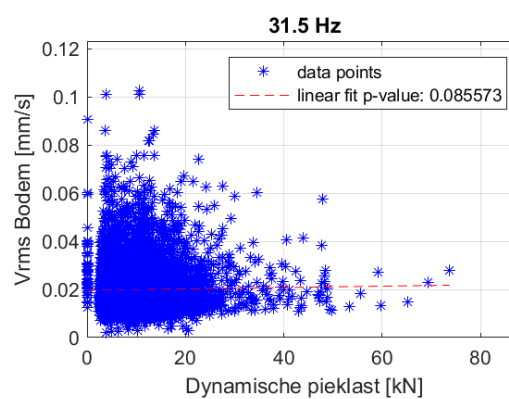
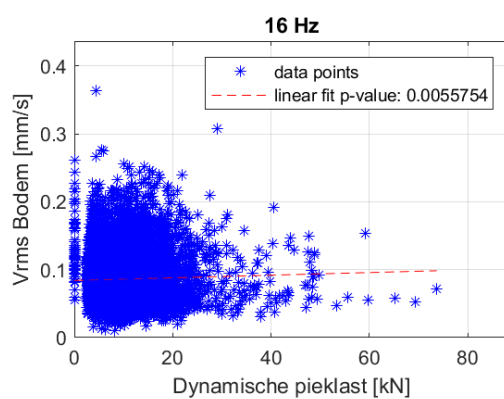
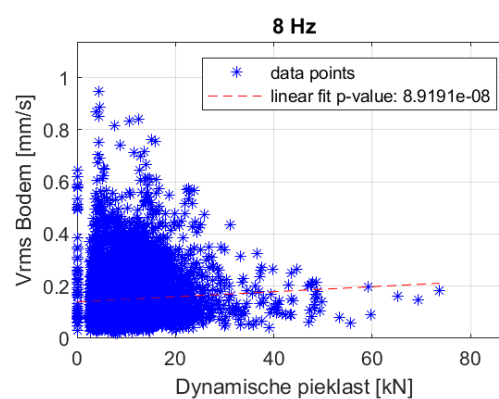
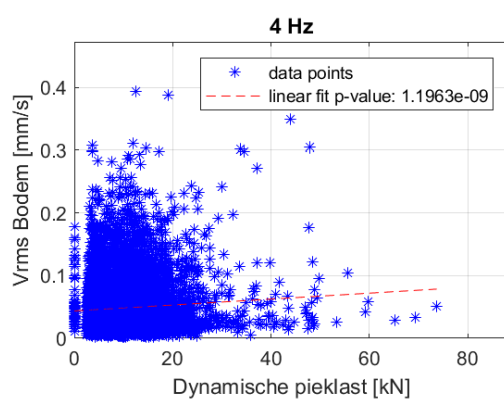


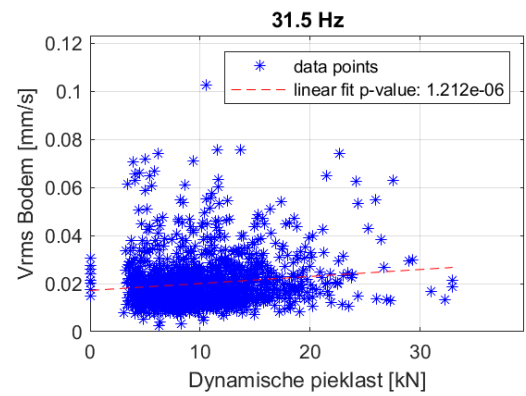
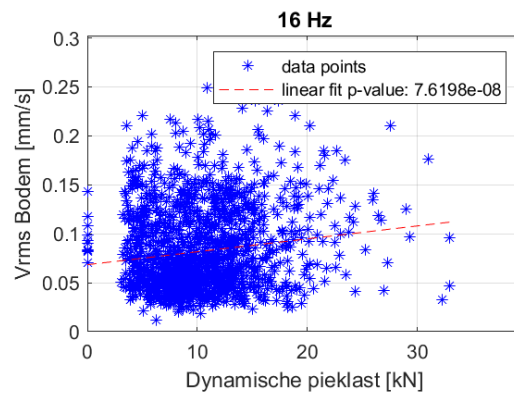
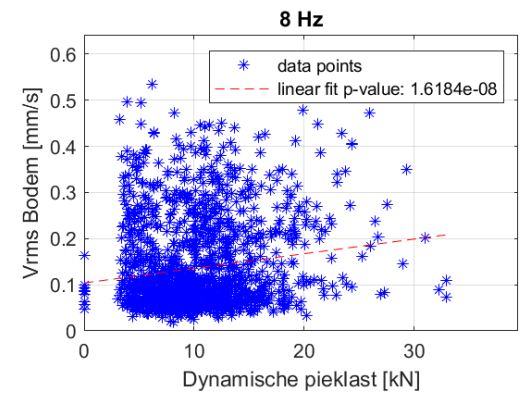
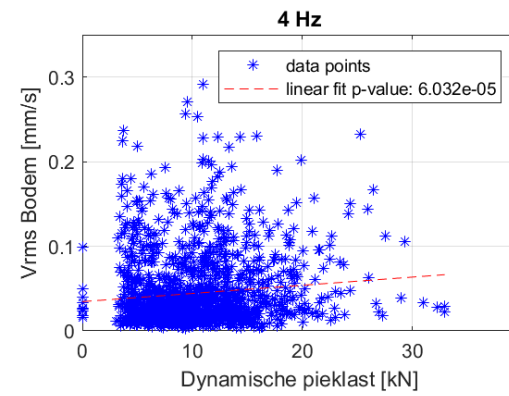


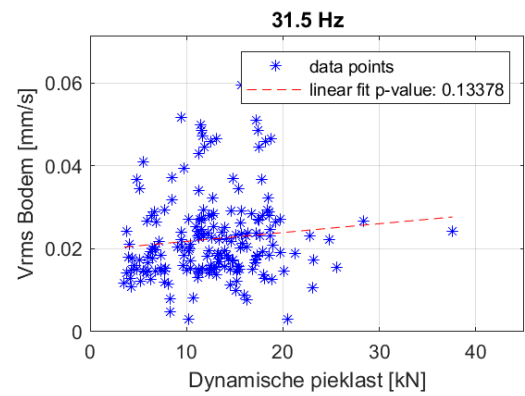
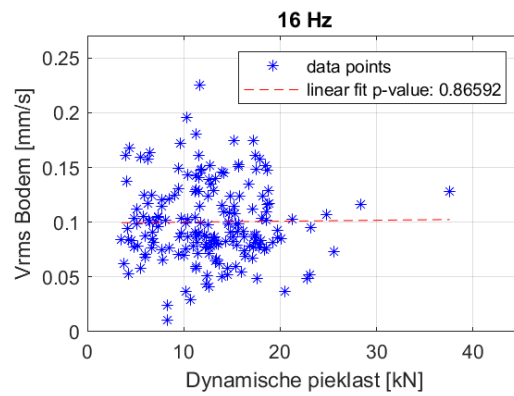
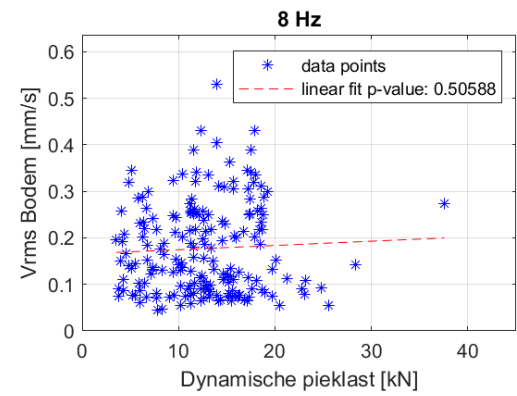
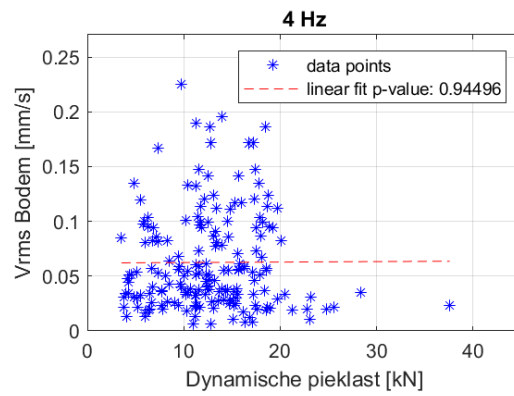
BIJLAGE II. VRMS PER FREQUENTIEBAND UITGEZET TEGEN GEMIDDELDE DYNAMISCHE PIEKLAST NOORDELIJK RICHTING

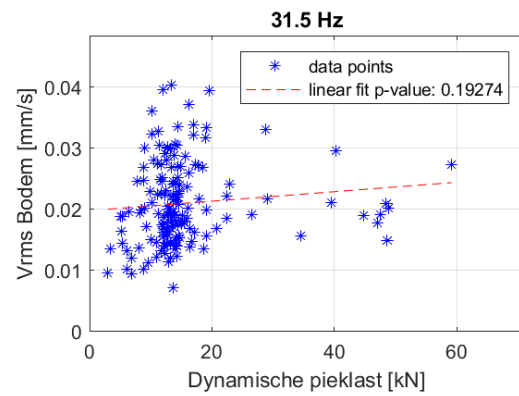
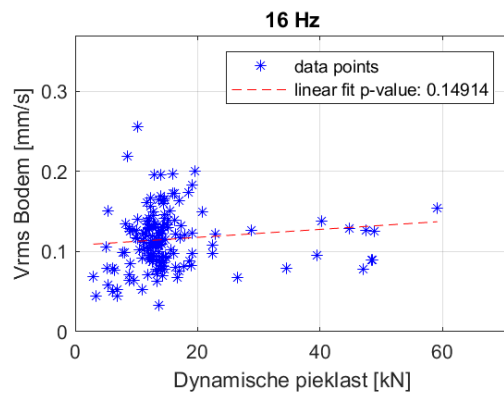
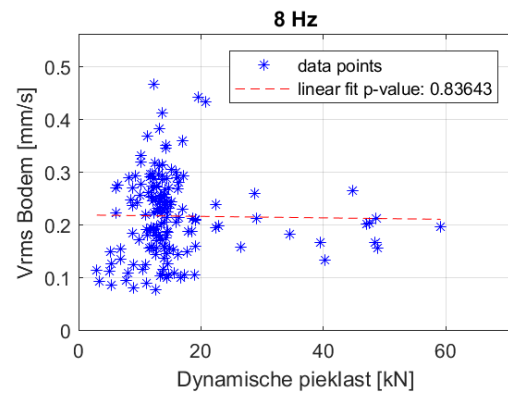
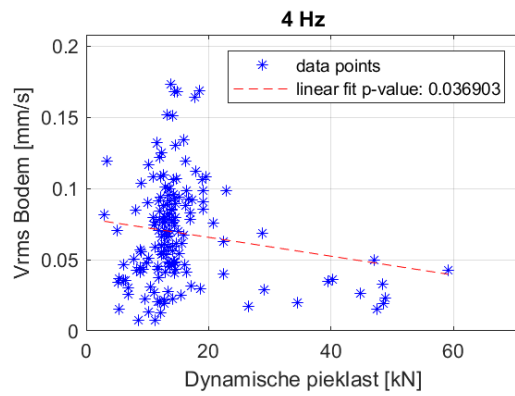
1-secondetijdsvensters

Alle passages



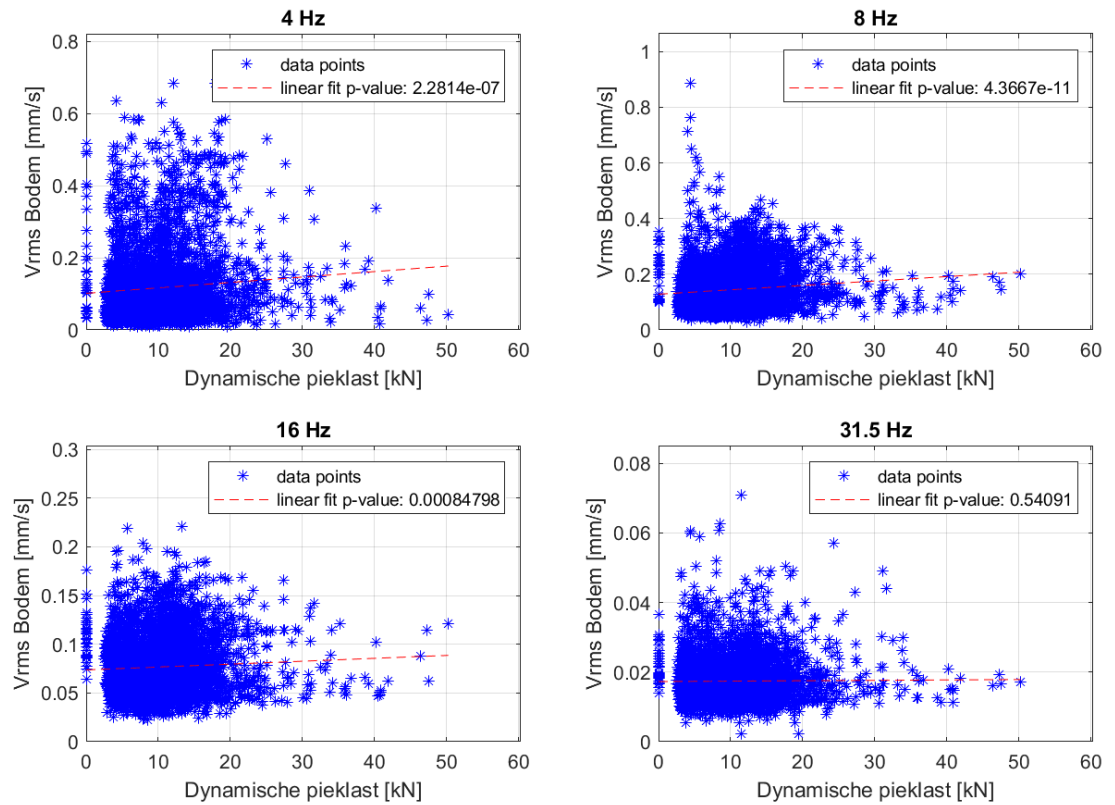


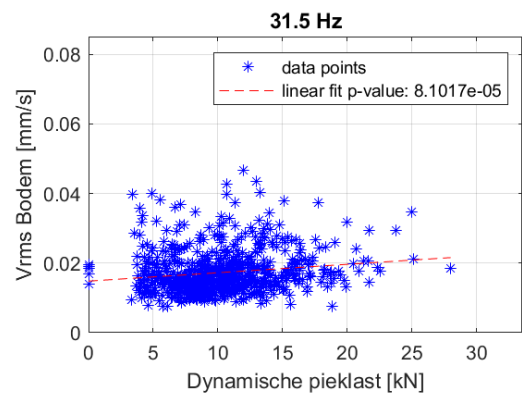
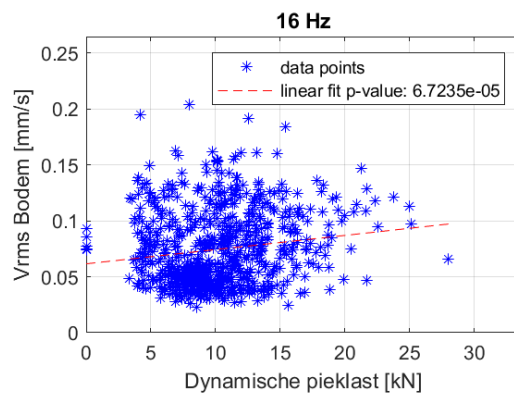
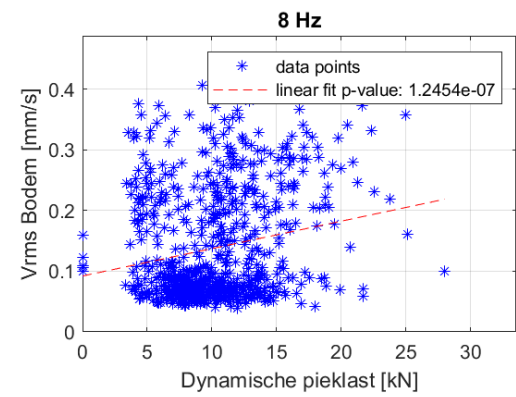
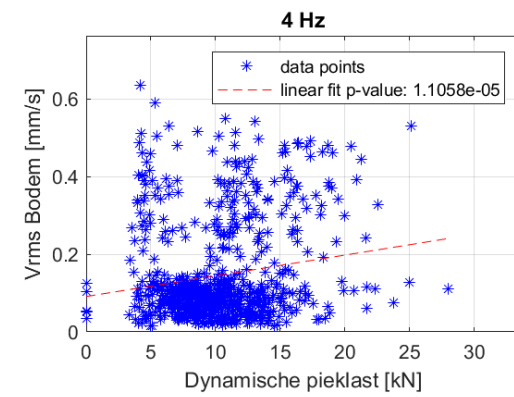


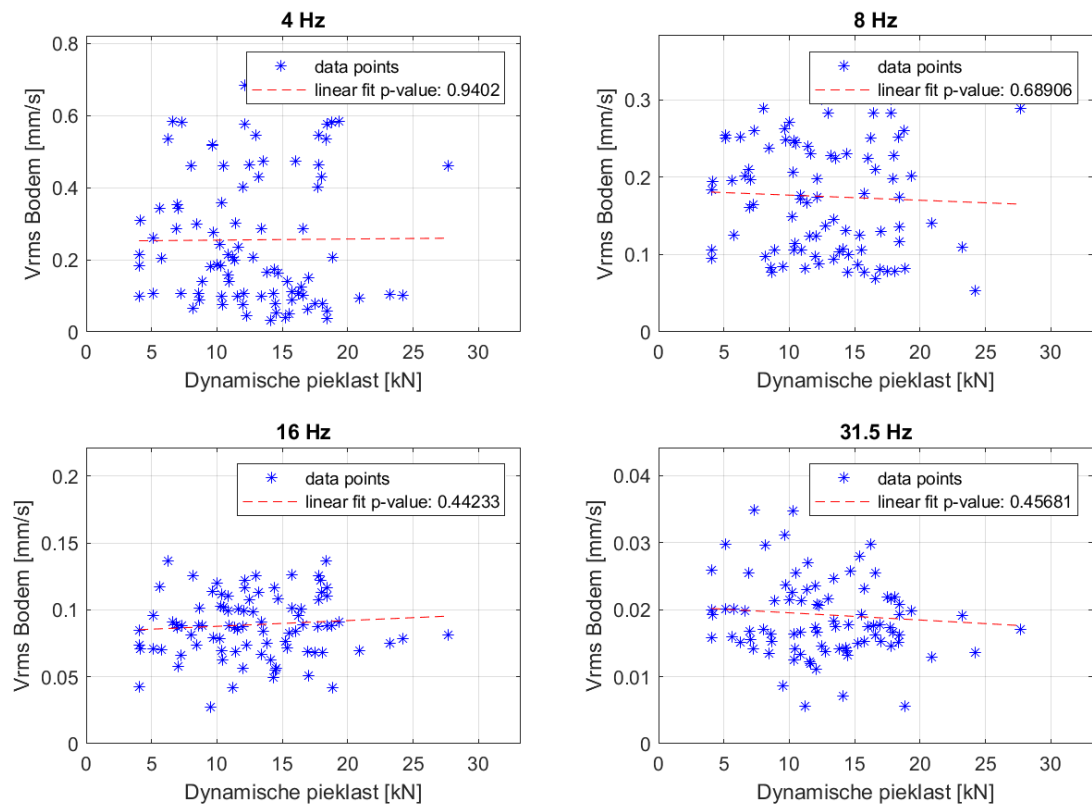


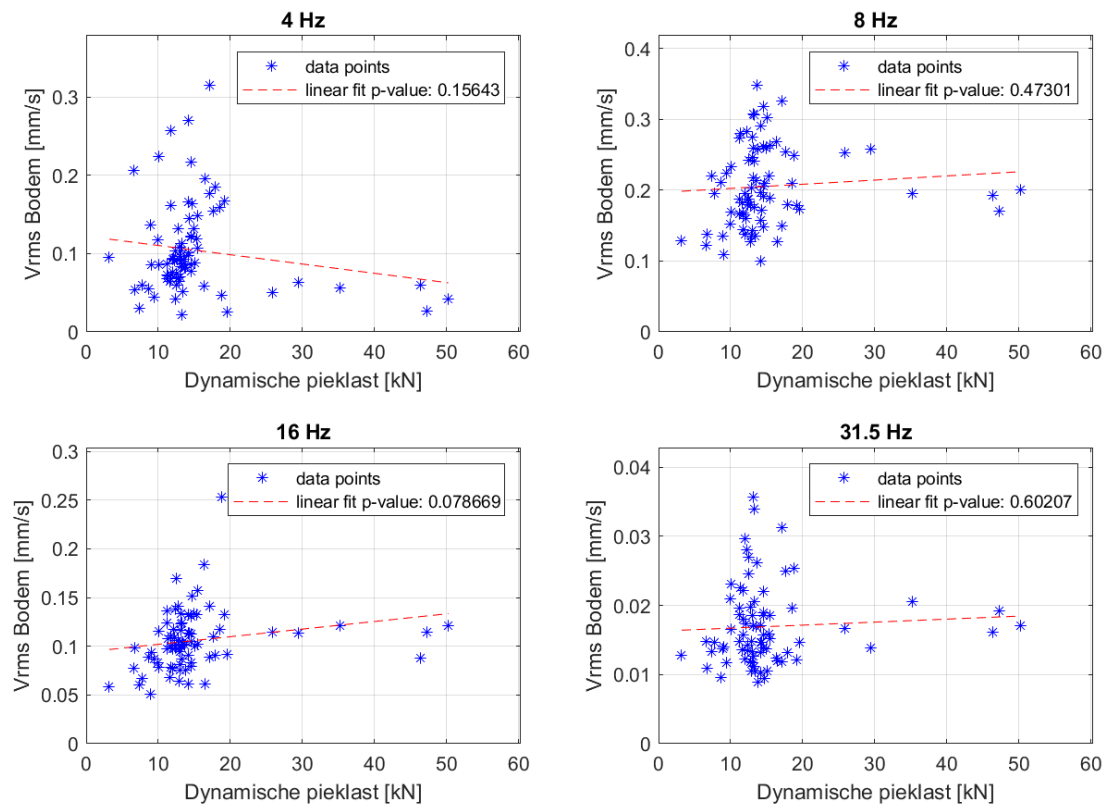
2-secondtijdsvensters

Alle passages









Gehele passage tijdsvensters

Alle passages

