NOTITIE

Onderwerp	Aanvullende analyse invloed van treinsamenstelling op spoortrillingen
Project	IBS Monitoring spoortrillingen wielonderhoud
Opdrachtgever	ProRail
Projectcode	132887
Projectleider	Ir. F. Besseling
Status	Definitief
Datum	28 januari 2025
Referentie	132887/25-001.177
Auteur(s)	J.A. de Bruijn MSc
Gecontroleerd door	Ir. F. Besseling
Goedgekeurd door	Ir. F. Besseling
Paraaf	
Bijlage(n)	I Trillingssignalen meetlocatie Schalkwijk II Trillingssignalen meetlocatie America III Correlatie analyse
Aan	ProRail — Ir. J. Peen, ir. H. Zandberg
Kopie	TU Delft — Dr.ir. M. Steenbergen

1 INLEIDING

1.1 Aanleiding onderzoek

Door groei van het spoorvervoer in Nederland groeit ook de toename van het aantal trillingsklachten. Om spoortrillingen te reduceren wordt binnen de Innovatieagenda Bronaanpak Spoortrillingen (IBS) gewerkt aan het opbouwen van kennis over het ontstaan van spoortrillingen en worden mogelijke maatregelen in de praktijk beproefd. In het kader van het project 'Monitoring spoortrillingen wielonderhoud' is een praktijkproef uitgevoerd waarin het effect van wielkwaliteit en de bijbehorende onderhoudsactiviteiten op trillingen is onderzocht [1]. Voor dit project is een uitgebreide meetcampagne uitgevoerd waarbij op meerdere locaties in Nederland trillingsmetingen zijn uitgevoerd langs het spoor. Hieruit kwam naar voren dat de samenstelling van de trein (zoals het aantal wagons, type materieel, belading) een aanzienlijke bijdrage levert aan de trillingen, vooral op slappe ondergrond. Dit sluit aan bij eerder uitgevoerde onderzoeken, zoals beschreven in [2].

Het doel van deze aanvullende analyse is om meer inzicht te krijgen in de parameters en onderliggende mechanismen gerelateerd aan de treinsamenstelling die van invloed zijn op de gemeten spoortrillingen. Deze inzichten kunnen worden gebruikt bij vervolgonderzoeken om geobserveerde effecten te verklaren of

om relevante parameters te bepalen in data-gedreven regressie- en predictiemodellen (zoals Random Forest), die kunnen worden ingezet voor het kwantificeren van effecten.

1.2 Onderzoeksvragen

De hoofdvraag voor dit onderzoek is:

Wat is de invloed van treinsamenstelling op spoortrillingen en welke parameters zijn van invloed op de optredende effecten?

Bij beantwoording van bovenstaande vragen worden de volgende parameters beschouwd:
- type ondergrond (stijf of slap) en opbouw baanlichaam;
- rijsnelheid van de trein;
- statische aslast;
- draaistel-afstand;
- as-afstand;
- totale lengte combinatie (of aantal assen);
- afstand van meetpunt tot spoor.

1.3 Leeswijzer

De notitie is als volgt opgebouwd: in hoofdstuk 1 wordt de aanleiding van het onderzoek beschreven en worden de onderzoeksvragen gedefinieerd. In hoofdstuk 2 wordt de meetopstelling toegelicht en wordt een korte beschrijving van de meetdata gegeven. In hoofdstuk 3 wordt vervolgens de methode en aanpak van de analyses beschreven waarbij de theoretische achtergrond voor de uitgevoerde analyses wordt gegeven. De resultaten van de verschillende analyses worden vervolgens gepresenteerd in hoofdstuk 4. Tot slot worden in hoofdstuk 5 de conclusies van de analyses gegeven en worden een aantal aanbevelingen voor vervolgonderzoek gegeven.

Deze notitie is een aanvulling op de eindrapportage voor het project 'Monitoring spoortrillingen wielonderhoud' [1] en voor meer informatie over de meetlocaties, de meetopstellingen en beschikbare meetdata wordt naar dit rapport verwezen.

2 MEETOPSTELLING EN MEETDATA

2.1 Beschrijving meetopstelling

Voor de aanvullende analyse is voornamelijk gekeken naar de metingen uit Schalkwijk en America. De meetopstelling zoals die op deze locaties is gerealiseerd, is schematisch weergegeven in afbeelding 2.1. De meetopstelling bestaat uit één hoofd-meetraai, loodrecht op het spoor, met meetpunten op 4, 8 en 25 meter van het spoor aan de primaire zijde.

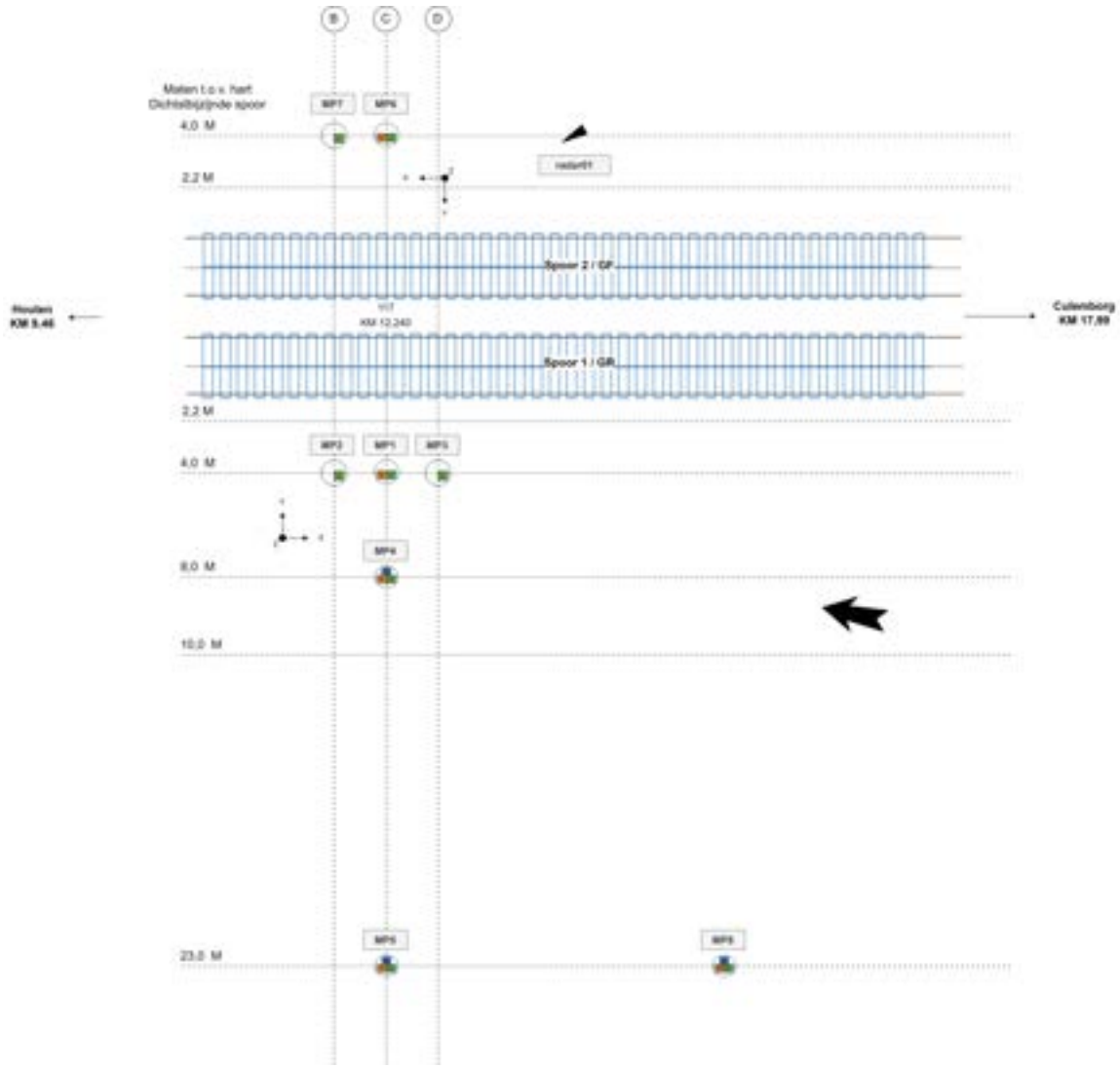
Op de primaire zijde van het spoor is de sensor op 4 meter afstand in de Z-richting driedubbel uitgevoerd, met tussenafstanden van 2 meter. Aan de andere zijde van het spoor zijn op 4 meter eveneens sensoren geplaatst om metingen dicht bij de passerende treinen op het andere spoor te kunnen uitvoeren. Hier wordt bij het meetpunt in de hoofd-meetraai gemeten in de Y- en Z-richting, terwijl bij een tweede meetpunt (op 2 meter afstand) alleen de Z-richting wordt gemeten.

Voor de aanduiding van de trillingen per richting volgen wij het Uniform Meetprotocol [3]. Dit houdt in dat de X-richting de rijrichting van het spoor betreft, de Y-richting de dwarsrichting op het spoor en de

Z-richting de verticale bodembeweging. Alle voetplaten voor de sensoren zijn met behulp van een waterpas zuiver horizontaal geïnstalleerd en zijn geplaatst met pinnen en beton om langdurig goed contact met de bodem te waarborgen.

Voor een uitgebreide beschrijving van de meetopstellingen wordt verwezen naar het hoofdrapport [1].

Afbeelding 2.1 Schematische weergave meetopstelling locatie Schalkwijk



2.2 Beschrijving meetdata

Voor deze aanvullende analyse is de meetdata uit Schalkwijk en America beschouwd. De data in Schalkwijk is ingewonnen in de periode van 5 oktober 2023 t/m 13 november 2023, en in America in de periode van 13 december 2023 t/m 1 mei 2024. De meetdata bestaat hoofdzakelijk uit trillingsmetingen (versnellingen) op het maaiveld en in een gebouw. Daarnaast is de snelheid van de trein gemeten met een radar, en zijn de as-passages geregistreerd met behulp van een optische laser sensor.

Voor een uitgebreide beschrijving van de beschikbare meetdata een de voorbewerking van deze data wordt verwezen naar het hoofdrapport [1].

De trillingssignalen zijn, na conversie van versnelling naar snelheid, opgewerkt naar een aantal trillingsparameters in het tijds- en frequentiedomein waaronder $V_{abs,max}$, V_{rms}, $V_{eff,max}$, tertsband etc.

3 METHODE EN AANPAK

De aanvullende analyse bestaat uit twee onderdelen:
1 tijd-frequentie analyse van afzonderlijke treinpassages voor het bepalen van de dominante frequenties, inclusief vergelijking met theoretische spectrum voor as-passage;
2 parameter analyse op basis van lineaire regressie en Random Forest (RF) modellen.

De eerste analyse is gericht om meer inzicht te krijgen in de onderliggende mechanismen en eigenschappen van de trein die van invloed zijn op de gemeten trillingen. Deze informatie kan vervolgens worden gebruikt voor het bepalen van 'slimme' parameters/features die de treinsamenstelling karakteriseren voor de regressie/predictie modellen in de tweede analyse.

3.1 Bepalen dominante frequenties in spoortrillingen

De trillingssignalen bij treinpassages zijn geanalyseerd in het tijdsdomein, het frequentiedomein middels Fast Fourier Transform (FFT) en in het tijd-frequentiedomein met behulp van Continuous Wavelet Transform (CWT) [4], waarmee ook voor korte tijdsintervallen de frequentieinhoud van een signaal kan worden bestudeerd [5], [6]. De frequenties worden hierbij soms omgezet naar 'golflengtes' met behulp van de volgende vergelijking:

$$\lambda = \frac{1}{(f/V)}$$

waarin V de snelheid van de trein is. Zodoende wordt de rijsnelheid verdisconteerd in de frequenties, en is het mogelijk om de amplitudes te relateren aan geometrische eigenschappen van de trein en het spoor.

3.1.1 Dominante frequenties van aslast passage

In [2] is een vergelijking gegeven voor het bepalen van de dominante frequenties van de aslast. Hierin wordt uitgegaan van de volgende vereenvoudigde beschrijving van de aslasten van een trein die een punt passeren:

$$P(t) = \sum_{j=1}^{N_c} \sum_{k=1}^{N_w} P_{axle} \cdot \delta(t - t_k - jt_c)$$

waarin $t_k = s_k/V$ met V de snelheid van de trein en s_k de afstand tussen wiel k en het begin van de wagon/treinstel, en $t_c = L/V$ met L de afstand tussen het midden van twee opeenvolgende wagons zoals weergegeven in Afbeelding 3.1. De bovenstaande vergelijking kan naar het frequentie domein worden geconverteerd met behulp van de Fourier transformatie:

$$P(f) = \int_{-\infty}^{\infty} P(t) e^{-i2\pi f} dt = \sum_{j=1}^{N_c} \sum_{k=1}^{N_w} P_{axle} \cdot e^{-i2\pi f (S_k + jL)/V}$$

De dominante frequenties zijn vervolgens gedefinieerd als de lokale maxima in het amplitude spectrum $A_f = |P(f)|$. Onder de aanname dat P_{axle} constant is en $f \cdot t_c$ een integer $n > 0$ is, ofwel:

$$f = \frac{n}{t_c} = \frac{nV}{L}$$

Kan de vergelijking van het amplitude spectrum vereenvoudigd worden tot een som van N_c wagon lasten:

$$A_{f=nV/L} = |P(f = nV/L)| = N_c P_{axle} \left| \sum_{k=1}^{N_w} e^{-i2\pi n S_k/L} \right|$$

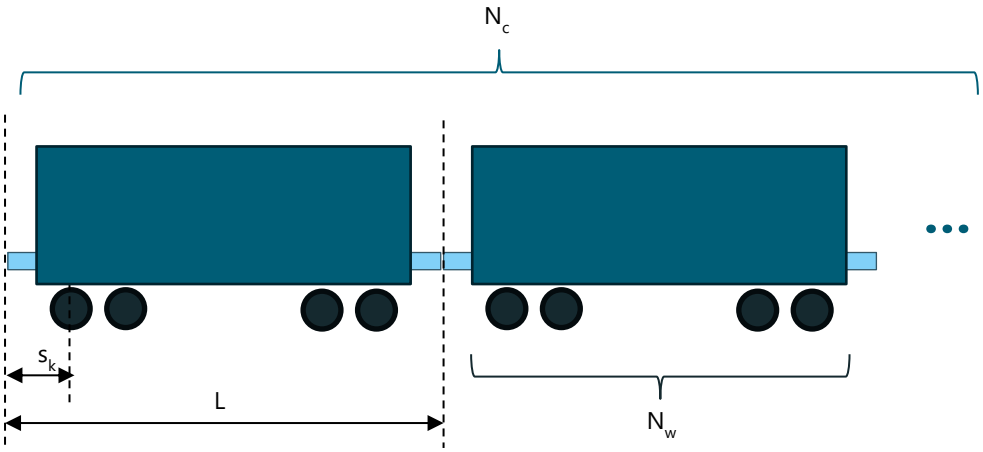
De laatste twee vergelijkingen kunnen worden gebruikt om de dominante frequenties en amplitude van de aslast passage te evalueren. De volgende punten zijn hierbij belangrijk:

1 de frequenties $f = \frac{nV}{L}$ zijn alleen afhankelijk van de ratio tussen snelheid (V) en wagonlengte (L);
2 de amplitude A_f is alleen afhankelijk van de ratio tussen wiellocatie (s_k) en wagoninterval (L).

Het aantal wagons/treinstellen N_c moet hierbij wel groot genoeg zijn, in de paper [2] is aangegeven dat voor $N_c > 3$ de dominante frequenties nauwkeurig kunnen worden bepaald uit het amplitude spectrum.

In de praktijk bestaat een goederentrein vaak uit verschillende wagontypes met verschillende lengtes en as-afstanden, hierdoor is de wagonlengte L niet constant voor de gehele trein. De bovenstaande vergelijking voor dominante frequenties is hierdoor niet geldig voor dit soort gevallen. De implicatie van variërende wagontypes is dat de bovenstaande vergelijkingen veel complexer worden. Het blijft echter nog steeds mogelijk om de dominante frequenties van de aslast passage te bepalen uit het amplitude spectrum; d.w.z. de frequenties behorende bij de lokale maxima in het amplitude spectrum. Bij veel van de analyses die hieronder volgen is deze methode toegepast voor de bepaling van de theoretische dominante frequenties in plaats van directe bepaling met behulp van de vergelijkingen.

Afbeelding 3.1 Schematisatie aslasten van een reeks wagons



Voorbeeld fictieve trein

Ter illustratie is een fictieve trein met 10 identieke 4-assige wagons beschouwd met interne as-afstanden 1,8 - 8,9 - 1,8 meter en een afstand van 3,5 meter tussen twee opeenvolgende wagons. De wagonlengte is hiermee gelijk aan 16 meter. Voor de aslast en snelheid van de trein zijn eenheidswaarden (1) aangenomen. De passage van de aslasten (beschreven als een reeks van impulsen) is weergegeven in afbeelding 3.2.

Op basis van bovenstaande vergelijkingen zijn de dominante frequenties gegeven door:

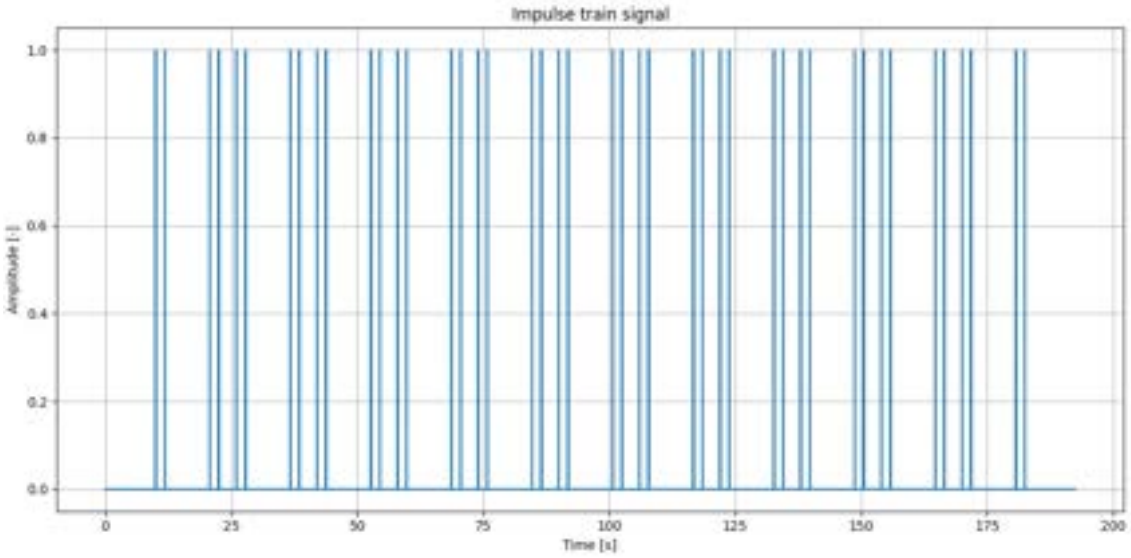
$$f = \frac{nV}{L} = \frac{n}{16}$$

In afbeelding 3.3 is het amplitude spectrum van de aslasten weergegeven, waarbij de frequenties gedeeld zijn door de factor V/L zodat de theoretische dominante frequenties gelijk zijn aan $n = 0, 1, 2, \ldots$. Uit de

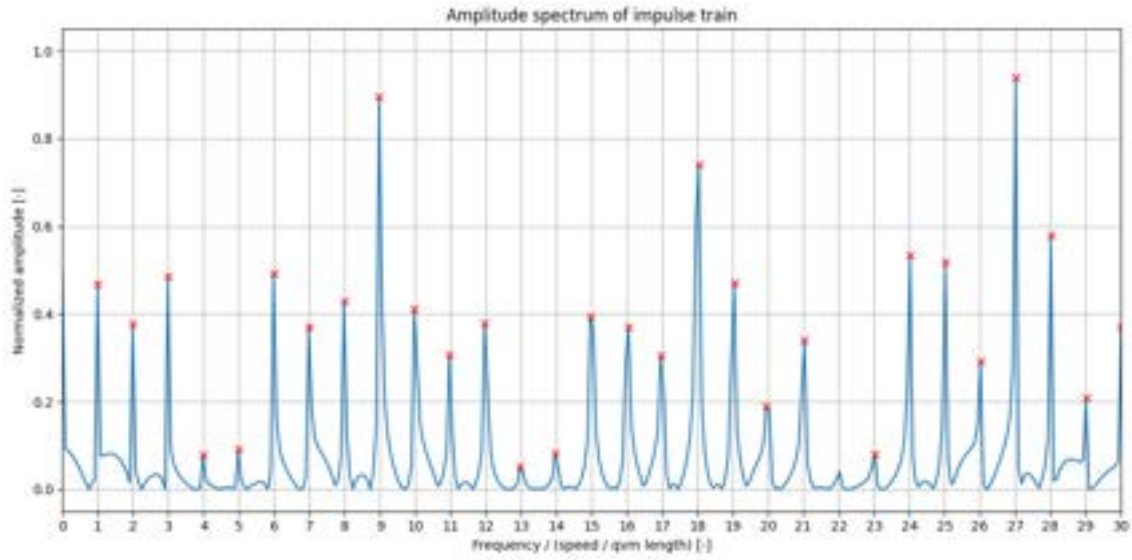
afbeelding blijkt inderdaad dat de dominante frequenties (d.w.z. de frequenties behorende bij de lokale maxima in het spectrum), een integer meervoud van V/L zijn.

De dominante frequenties kunnen in dit geval exact worden berekend met behulp van de bovenstaande vergelijking, maar zijn ook eenvoudig te bepalen aan de hand van de lokale maxima in het amplitude spectrum.

Afbeelding 3.2 Theoretische passage van aslasten van een trein met 10 identieke wagons



Afbeelding 3.3 Amplitude spectrum van theoretische passages van aslasten van een trein met 10 identieke wagons



3.1.2 Dominante frequenties van trillingssignalen bij treinpassages

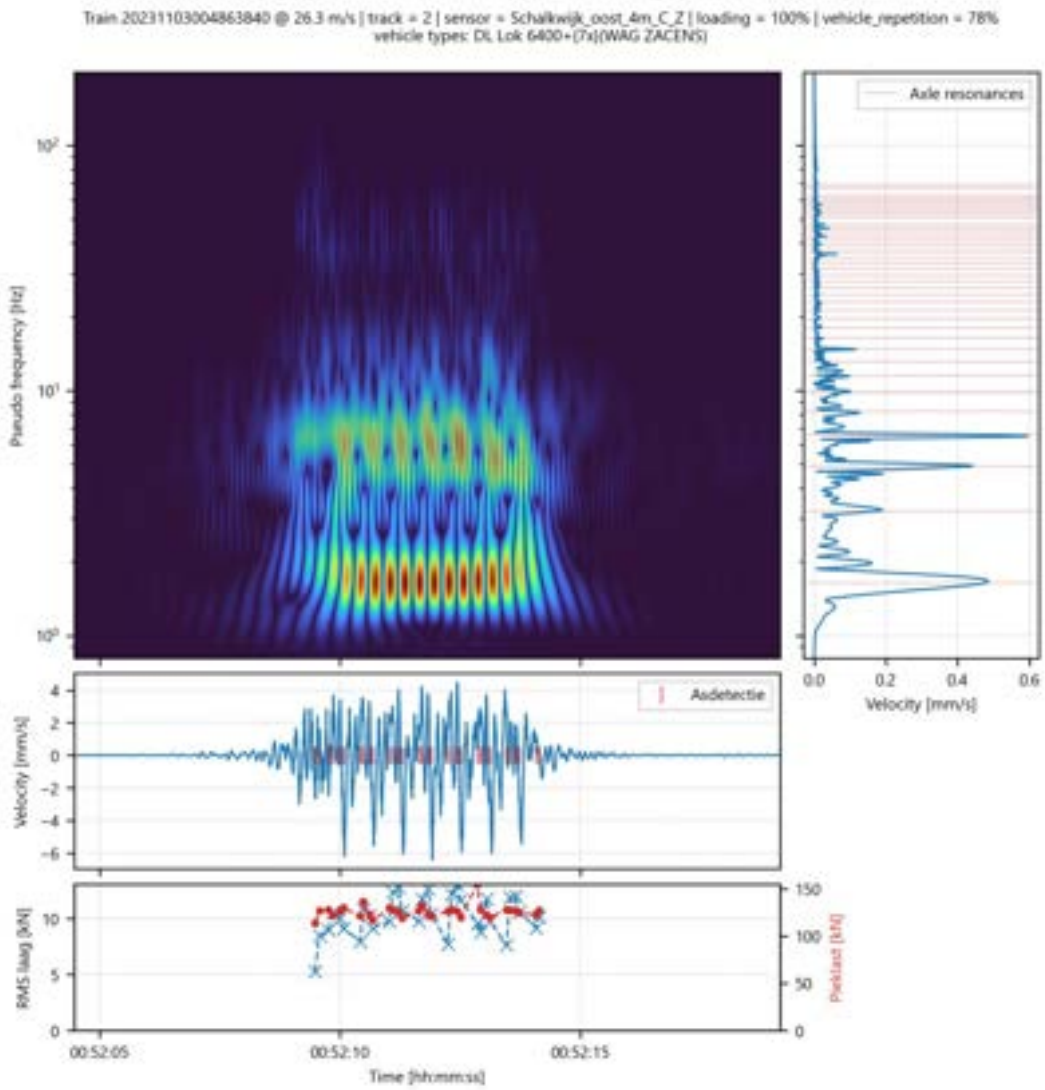
De dominante frequenties van de trillingssignalen bij een treinpassage kunnen worden bepaald op basis van een spectrale analyse. De tijdsignalen worden naar het frequentiedomein geconverteerd met behulp van de Fast Fourier Transform (FFT). Hierbij wordt de gehele passagetijd van de trein in beschouwing genomen. Om de variatie van de frequentie-inhoud over de tijd te analyseren, wordt een Continuous Wavelet Transform

(CWT) toegepast. Het resultaat van de spectrale analyse wordt gevisualiseerd in een figuur zoals weergegeven in afbeelding 3.4. De afbeelding is opgebouwd uit vier subplots:

1 **links boven:** Het spectrogram met de absolute waarden van de CWT coëfficiënten. De coëfficiënten zijn genormaliseerd tussen 0 en 1 om de relatieve verschillen in de intensiteit te benadrukken. Hierdoor is het echter niet mogelijk om de kleurintensiteit in de spectrogrammen van verschillende passages direct met elkaar te vergelijken;
2 **rechts boven:** Het amplitude spectrum van het volledige trillingssignaal, berekend met behulp van de FFT. De locaties van de dominante frequenties voor de aslasten, afgeleid uit het amplitude spectrum voor een reeks impulsen zoals beschreven in de vorige paragraaf, zijn aangeduid met rode stippellijnen (tot een maximale frequentie van 70 Hz);
3 **links midden:** De trillingssnelheid in het tijdsdomein. De detectie van het midden van de wielen/assen is weergegeven met rode verticale lijnen. Dit is het exacte tijdstip waarop een as de primaire meetraai passeert en dus het dichtst bij de sensoren staat;
4 **links onder:** De maximale waarde van de dynamische wielparameters RMS-laag en pieklast per as uit Quo Vadis. De RMS-laag waarde is een indicator voor wielkwaliteit en de pieklast is opgebouwd uit de statische aslast en een dynamische bijdrage.

De dominante frequenties kunnen worden afgeleid uit het amplitude spectrum, en de variatie van deze frequenties (en de spectrale intensiteit) over tijd is zichtbaar in het spectrogram. De overeenkomst van de dominante trillingsfrequenties met de frequenties van de aslasten volgt uit de rode stippellijnen bij het amplitude spectrum.

Afbeelding 3.4 Voorbeeld weergave trillingssignaal in tijds- en frequentiedomein inclusief Quo Vadis parameters



3.2 Identificeren en kwantificeren van relaties in de opgewerkte dataset

Voor het identificeren en kwantificeren van relaties tussen treineigenschappen en trillingsniveaus zijn Random Forest (RF) modellen toegepast. Deze analyse methode is ook toegepast in het onderzoek naar het effect van wielkwaliteit op de spoortrillingen. Voor het ontwikkelen/trainen van de RF modellen doorlopen we dezelfde stappen als beschreven in [1]. De input parameters zijn in dit geval echter minder toegespitst op het kwantificeren van wielkwaliteit maar meer op het beschrijven van de treinsamenstelling.

De samenstelling van een trein kan uit een combinatie van Quo Vadis parameters worden afgeleid. Standaard zijn dit parameters zoals as-afstanden, materieeltype, aslast, etc. Geen van deze parameters kwantificeert echter de variatie (of gelijkenis) in materieeltype en belading over een groep aaneengesloten wagons. Om die reden is een nieuwe parameter gedefinieerd die de repetitie van materieeltype of belading kwantificeert. Deze parameter is als volgt berekend:

1 tel aantal identieke aaneengesloten waarden, reset de teller wanneer de reeks wordt onderbroken door een andere waarde;
2 deel de aantallen uit 1 door het totaal aantal waarden om een ratio tussen 0 en 1 te krijgen;
3 bereken het gewogen gemiddelde van alle ratio's uit 2 om één waarde per trein (of groep wagons) te krijgen. De aantallen uit 1 worden hierbij als weegfactor gebruikt.

Voor de repetitie van het materieeltype wordt niet direct de aanduiding van het materieeltype uit Quo Vadis (*qvm_materieeltype*) gebruikt, maar worden de as-afstanden (*qam_as_afstand_m*) gebruikt. Op deze manier wordt er rekening gehouden met repetitie van verschillende materieeltypes met dezelfde as-afstanden, welke (theoretisch) hetzelfde trillingspatroon veroorzaken (aangenomen dat de draaistellen hetzelfde zijn).

De repetitie in materieeltype en belading worden afzonderlijk gekwantificeerd op basis van bovenstaande berekeningsstappen.

4 RESULTATEN

4.1 Resultaten tijd-frequentie analyse van individuele passages

Als eerst zijn de trillingssignalen van individuele passages geanalyseerd in het tijds- en frequentiedomein. Hierbij is gekeken naar de meetlocatie op slappe ondergrond in Schalkwijk en een meetlocatie op stijve ondergrond in America. Per meetlocatie worden hieronder een aantal passages weergegeven, meer passages zijn opgenomen in bijlage I voor Schalkwijk en bijlage II voor America. Deze bijlagen bevatten ook afbeeldingen van de trillingssignalen en amplitude spectra op de verschillende meetpunten/afstanden van het spoor.

4.1.1 Meetlocatie Schalkwijk (slappe ondergrond)

Hieronder worden een aantal passages van goederentreinen geanalyseerd met de volgende samenstelling:
- trein met 2-assige wagons, 1x onbeladen en 1x beladen;
- trein met 4-assige wagons, 1x onbeladen en 1x beladen;
- trein met 4-assige wagons met variërende beladingen;
- trein met 6-assige wagons, 1x onbeladen en 1x beladen/onbeladen;
- trein met combinatie van verschillende wagons en beladingen.

2-assige wagons type WAG LGNS1

Afbeelding 4.1 toont de tijd-frequentie plots voor de trillingssnelheid in de Z-richting op 5 meetpunten voor twee verschillende passages van goederentreinen met 2-assige wagons. De linker kolom toont een passage op spoor 1 met onbeladen wagons van het type WAG LGNS1 met een as-afstand van 9 meter en een afstand tussen twee wagons van 6,5 meter. De wagonlengte is dus ongeveer gelijk aan 15,5 meter en bij een snelheid van 27 m/s zijn de theoretische dominante frequenties van de aslasten gelijk aan:

$$f = n \cdot \frac{V}{L} \approx n \cdot 1{,}74\ Hz$$

De rechter kolom toont een passage op spoor 2 met beladen wagons van het type WAG KLMOS2 / WAG LGS met een as-afstand van 8 meter en een afstand tussen twee wagons van 3,7 meter. De wagonlengte is dus ongeveer gelijk aan 11,7 meter en bij een snelheid van 26,3 m/s zijn de theoretische dominante frequenties van de aslasten gelijk aan:

$$f = n \cdot \frac{V}{L} \approx n \cdot 2{,}25\ Hz$$

Voor beide passages komen de dominante frequenties van het trillingssignaal overeen met de frequenties van de aslasten, al zijn niet alle frequenties aanwezig en varieert de frequentie inhoud per meetpunt. De laagste frequenties zijn voornamelijk zichtbaar in de trillingssignalen op 4 m uit het spoor. De frequentie rond 5 Hz is in de meeste meetpunten het nadrukkelijkst aanwezig gedurende de gehele passage. Dat frequenties onder 3,5 Hz niet terugkomen in trillingssignalen gemeten verder van het spoor zien we bij

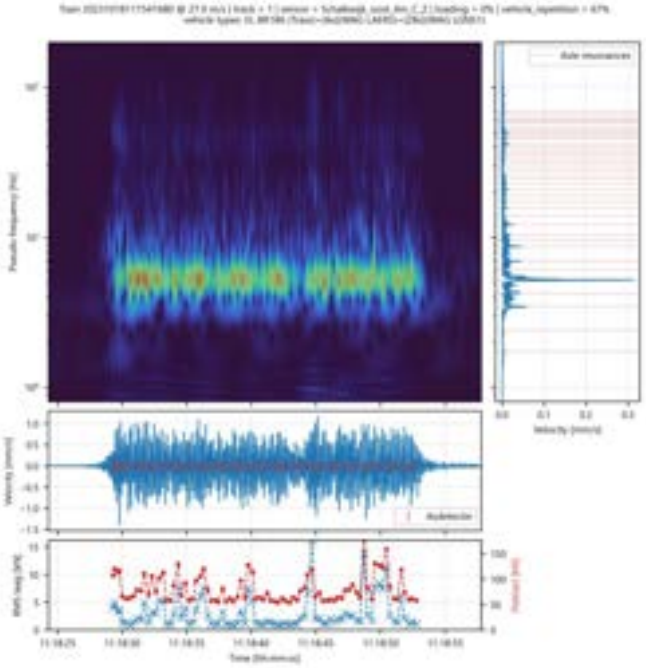
vrijwel alle treinen en is het gevolg van de cut-off frequentie behorende bij golfvoortplanting door ondiepe slappe grondlagen.

Tabel 4.1 Eigenschappen 2-assige wagons in beschouwde treinpassages

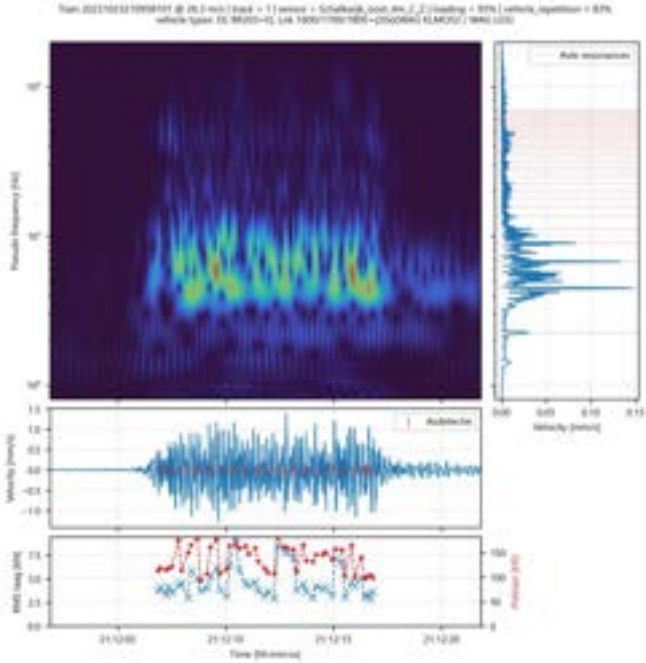
Passage	**Materieeltype**	**As-afstanden** [m]	**Wagonlengte (L)** [m]	**Snelheid (V)** [m/s]	**Theoretische fundamentele frequentie** [Hz]
spoor 1, onbeladen	WAG LGNS1	intern: 9 tussen: 6,5	15,5	27,0	1,74
spoor 1, beladen	WAG KLMOS2 / WAG LGS	intern: 8 tussen: 3,7	11,7	26,3	2,25

Afbeelding 4.1 Tijd-frequentie plots voor trillingssnelheid in Z-richting op 5 meetpunten in Schalkwijk (onder elkaar) voor twee goederentrein passages, links op spoor 1 met onbeladen WAG LGNS wagons op 18-10-2023 en rechts op spoor 2 met beladen WAG KLMOS2 / WAG LGS wagons op 23-10-2023

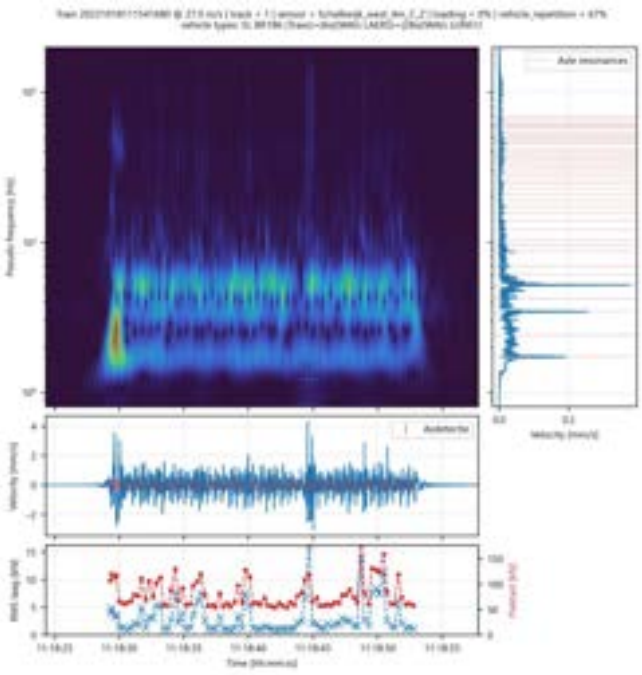
onbeladen, spoor 1, meetpunt oost 4 m



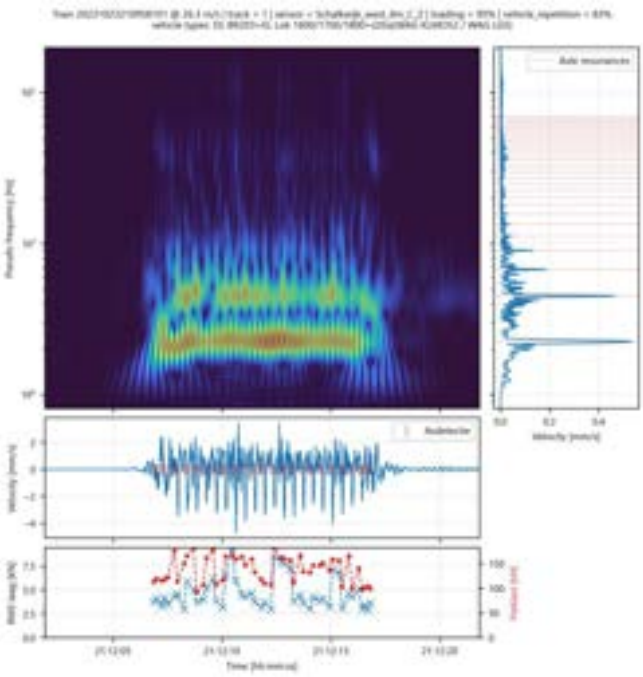
beladen, spoor 1, meetpunt oost 4 m



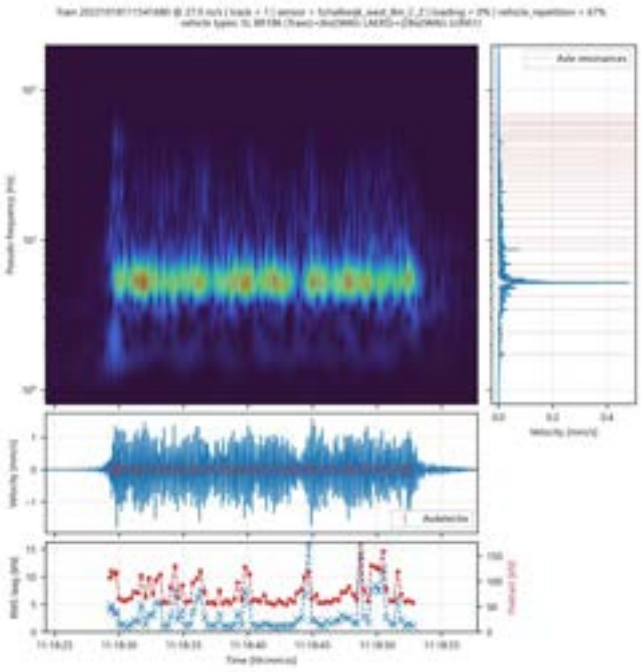
onbeladen, spoor 1, meetpunt west 4 m



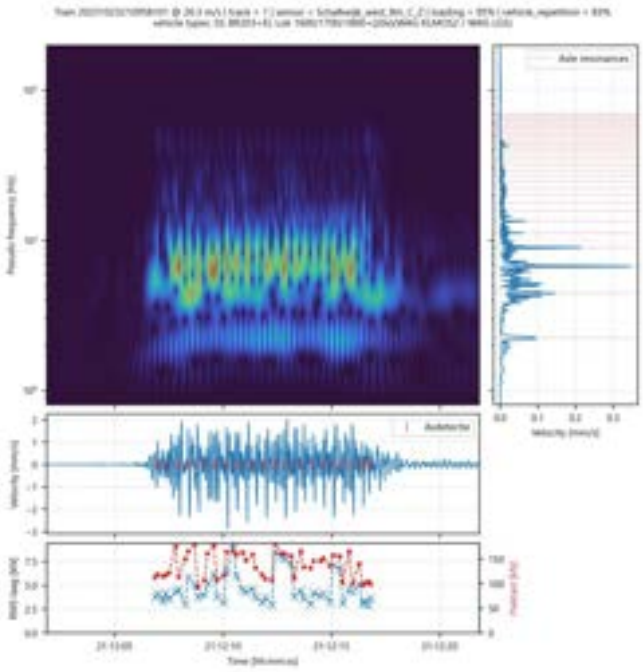
beladen, spoor 1, meetpunt west 4 m



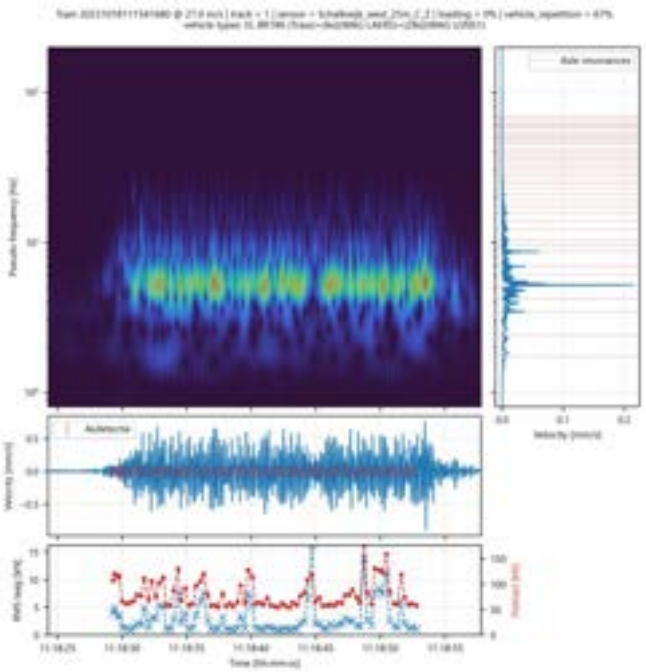
onbeladen, spoor 1, meetpunt west 8 m



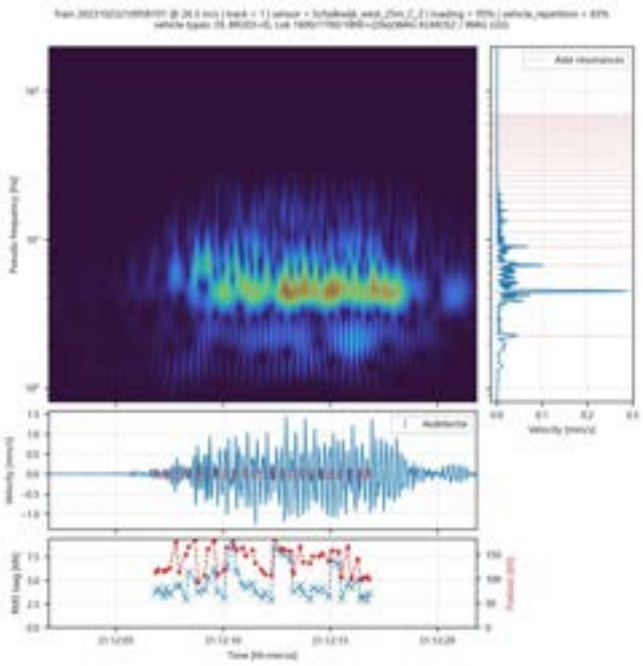
beladen, spoor 1, meetpunt west 8 m



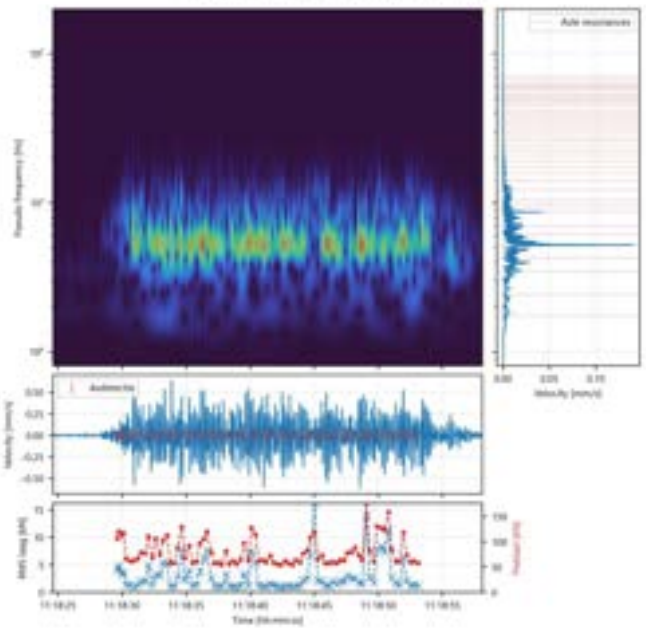
onbeladen, spoor 1, meetpunt west 25 m



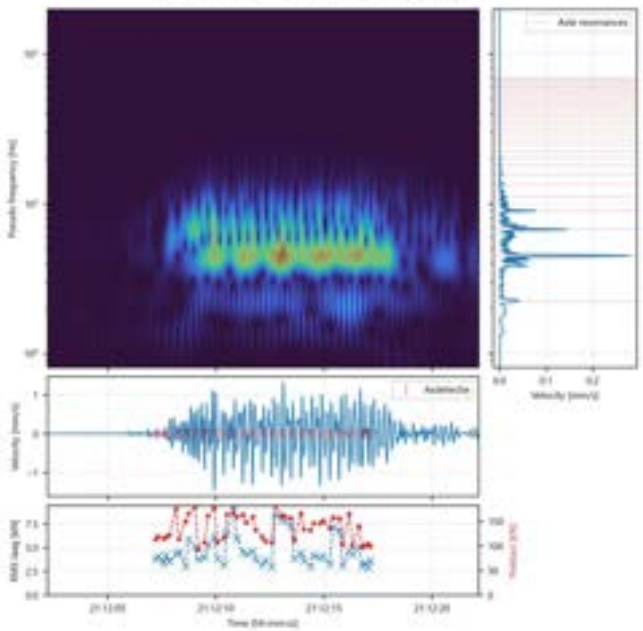
beladen, spoor 1, meetpunt west 25 m



onbeladen, spoor 1, meetpunt gebouw op +/- 25 m



beladen, spoor 1, meetpunt gebouw op +/- 25 m



4-assige wagons type WAG EANOS

Afbeelding 4.2 toont de tijd-frequentie plots voor de trillingssnelheid in de Z-richting op 5 meetpunten voor twee verschillende passages van goederentreinen met identieke wagons (type WAG EANOS). De linker kolom toont een passage op spoor 1 met onbeladen wagons en de rechter kolom toont een passage op spoor 2 met beladen wagons. De interne as-afstanden van de wagons zijn 1,8 - 8,9 - 1,8 meter en de afstand tussen twee wagons is 3,3 meter. De wagonlengte is dus ongeveer gelijk aan 15,8 meter. Bij een snelheid van 26,4 m/s en 26,9 m/s zijn de (theoretische) dominante frequenties van de aslasten gelijk aan een integer meervoud van respectievelijk 1,67 Hz en 1,70 Hz.

Voor beide passages komen de dominante frequenties van het trillingssignaal overeen met de frequenties van de aslasten, al zijn niet alle frequenties aanwezig en varieert de frequentie inhoud per meetpunt. De laagste frequentie van 1,67/1,70 Hz is voornamelijk zichtbaar in de trillingssignalen op 4 m uit het spoor. De frequentie rond 5 Hz ($n = 3$) is in de meeste meetpunten het nadrukkelijkst aanwezig gedurende de gehele treinpassage.

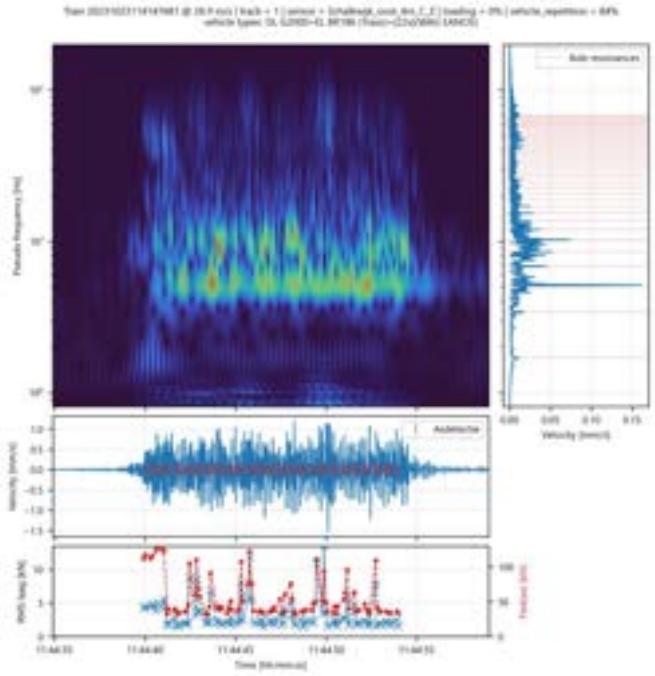
De trillingsniveaus voor de beladen wagons zijn veel hoger dan voor de onbeladen wagons (tot factor 5). Daarnaast is het relatieve aandeel van de hogere frequenties minder groot bij de beladen wagons; voor de beladen wagons domineren voornamelijk de lagere frequenties. Bij de vergelijking van de trillingsniveaus voor beladen en onbeladen wagons moet echter rekening worden gehouden met verschillende afstanden van de meetpunten tot het bereden spoor aangezien de beschouwde treinpassages niet op hetzelfde spoor zijn. Het beschouwde transport rijdt typisch met beladen wagons in de ene richting en met onbeladen wagons in de andere richting. Hierdoor is een directe vergelijking van beladen/onbeladen wagons op hetzelfde spoor niet mogelijk.

Tabel 4.2 Eigenschappen 4-assige wagons (WAG EANOS) in beschouwde treinpassages

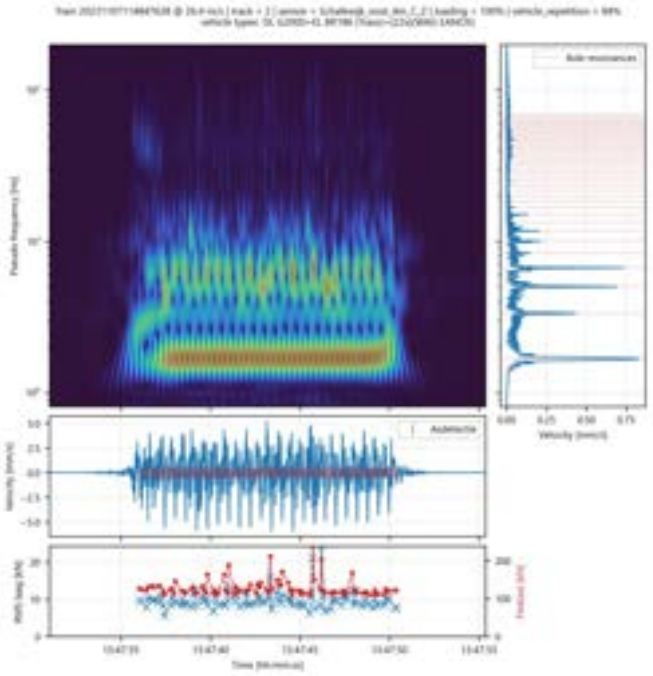
Passage	**Materieeltype**	**As-afstanden** [m]	**Wagonlengte (L)** [m]	**Snelheid (V)** [m/s]	**Theoretische fundamentele frequentie** [Hz]
spoor 1, onbeladen	WAG EANOS	intern: 12,5 tussen: 3,3	15,8	26,9	1,70
spoor 2, beladen	WAG EANOS	intern: 12,5 tussen: 3,3	15,8	26,4	1,67

Afbeelding 4.2 Tijd-frequentie plots voor trillingssnelheid in Z-richting op 5 meetpunten in Schalkwijk (onder elkaar) voor twee goederentrein passages met 22 WAG EANOS wagons, links op spoor 1 met onbeladen wagons op 23-10-2023 en rechts op spoor 2 met beladen wagons op 7-11-2023

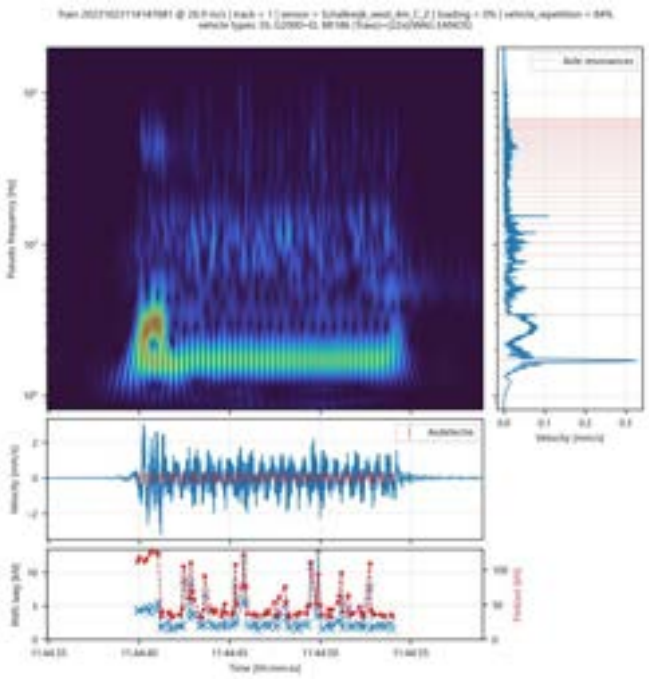
onbeladen, spoor 1, meetpunt oost 4 m



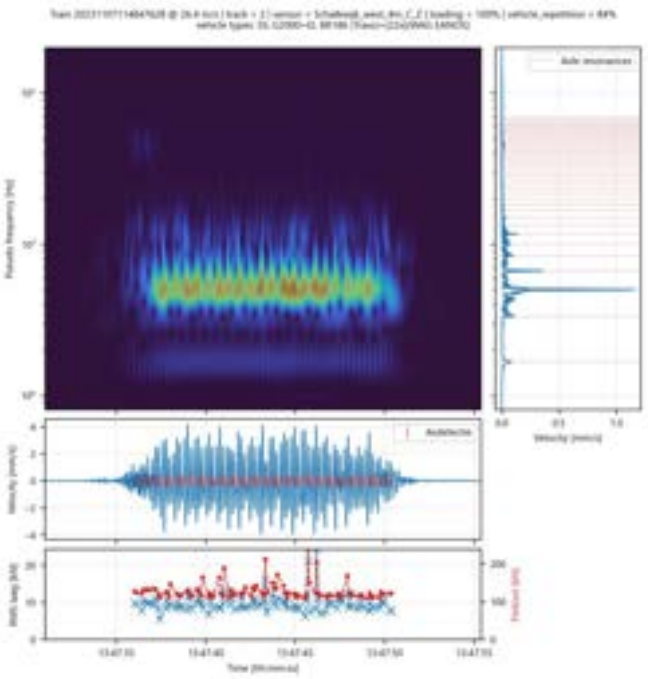
beladen, spoor 2, meetpunt oost 4 m



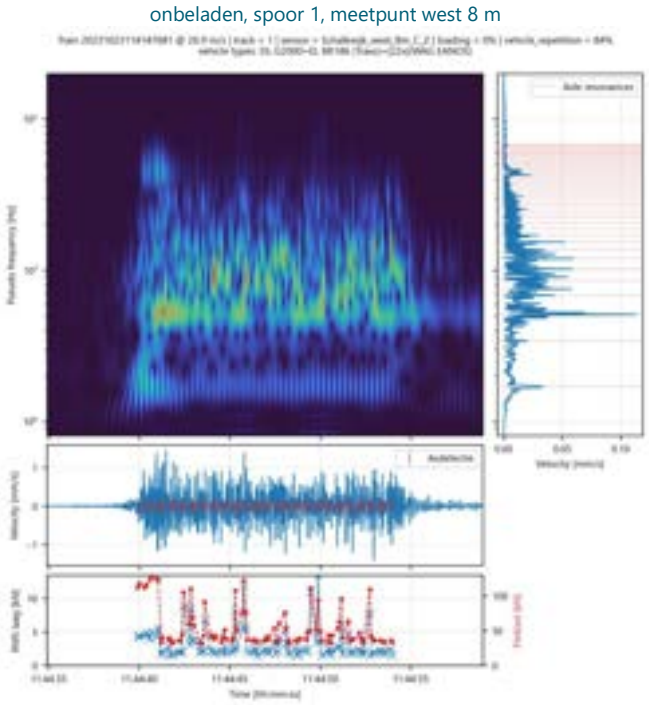
onbeladen, spoor 1, meetpunt west 4 m



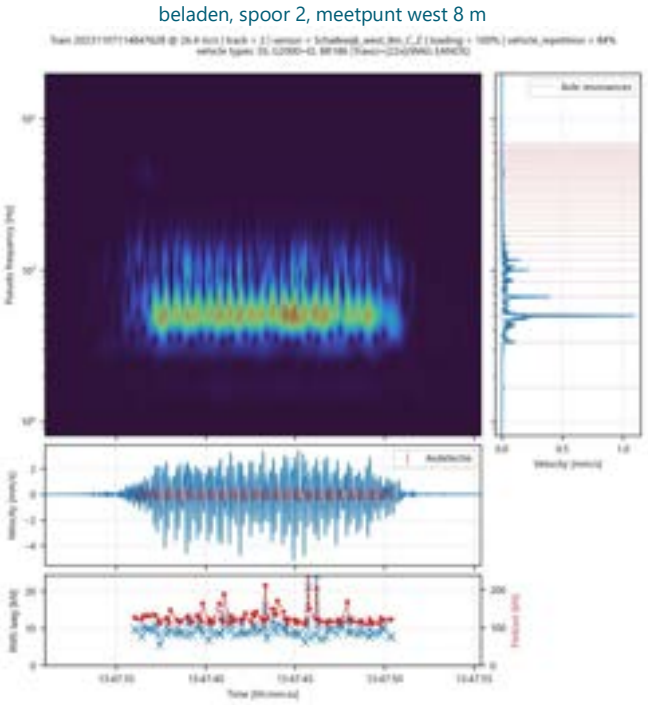
beladen, spoor 2, meetpunt west 4 m



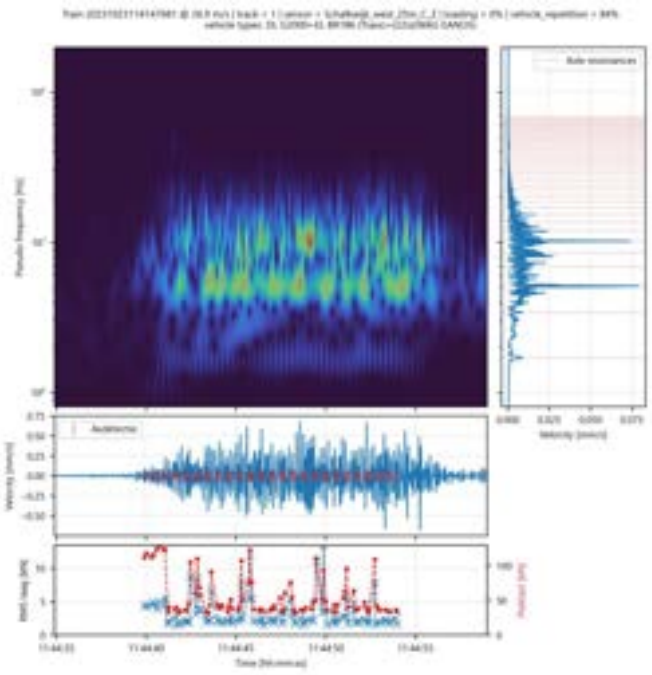
onbeladen, spoor 1, meetpunt west 8 m



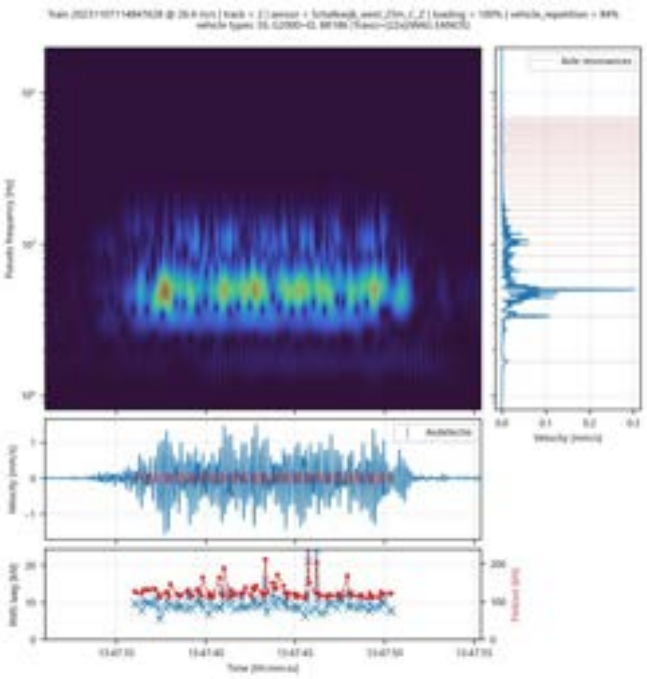
beladen, spoor 2, meetpunt west 8 m



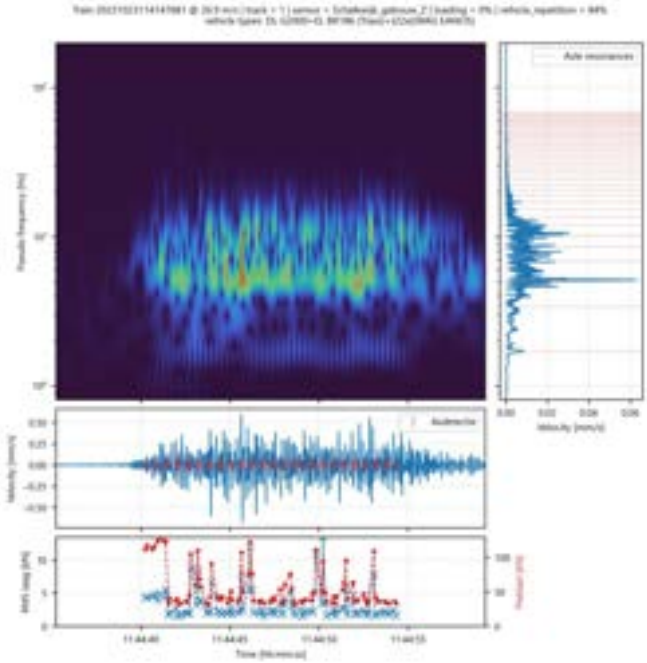
onbeladen, spoor 1, meetpunt west 25 m



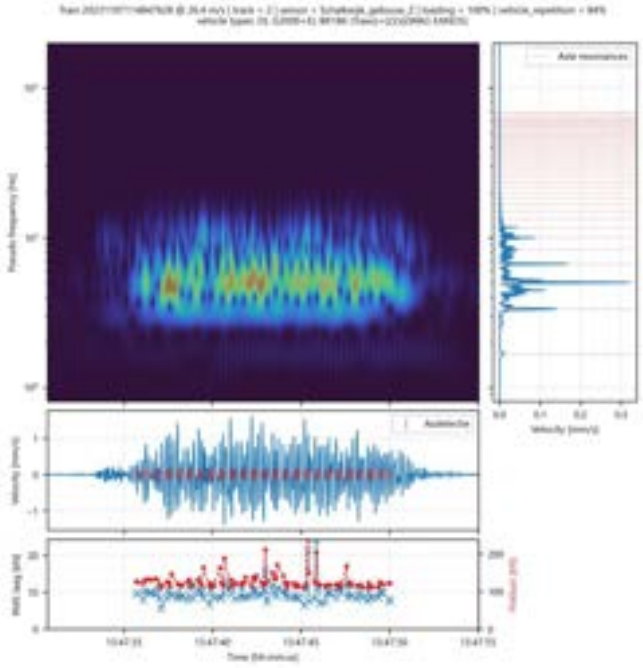
beladen, spoor 2, meetpunt west 25 m



onbeladen, spoor 1, meetpunt gebouw op +/- 25 m



beladen, spoor 2, meetpunt gebouw op +/- 25 m



4-assige wagons type WAG FALNS5

Afbeelding 4.3 toont de tijd-frequentie plots voor de trillingssnelheid in de Z-richting op 5 meetpunten voor twee verschillende passages van goederentreinen met vergelijkbare wagons (type WAG FALNS5_1 en WAG FALNS5_2). De linker kolom toont een passage op spoor 1 met beladen wagons en de rechter kolom toont een passage op spoor 2 met onbeladen wagons. De as-afstanden voor de twee wagontypes verschillen enigszins van elkaar, zoals weergegeven in tabel 4.3. Bij een snelheid van 27,0 m/s en 28,9 m/s zijn de (theoretische) dominante frequenties van de aslasten gelijk aan een integer meervoud van respectievelijk 2,07-2,15 Hz en 2,21-2,30 Hz.

Voor beide passages komen de dominante frequenties van het trillingssignaal overeen met de frequenties van de aslasten, al zijn niet alle frequenties aanwezig en varieert de frequentie inhoud per meetpunt. De fundamentele frequentie is voornamelijk zichtbaar in de trillingssignalen het dichtst bij de bron, op 4 m uit het spoor. De frequentie rond 4-5 Hz ($n = 2$) is in de meeste meetpunten het nadrukkelijkst aanwezig gedurende de gehele treinpassage.

De trillingsniveaus voor de beladen wagons zijn opnieuw veel hoger dan voor de onbeladen wagons. Daarnaast is het relatieve aandeel van de hogere frequenties minder groot bij de beladen wagons; voor de beladen wagons domineren voornamelijk de lagere frequenties. Bij de goederentrein met beladen wagons is tevens een duidelijke opbouw in trillingsniveau zichtbaar gedurende de passage; de piekniveaus worden pas bereikt richting het einde van de trein. Dit laat zien dat er onder bepaalde omstandigheden een accumulatie van energie plaatsvindt waardoor de trillingsniveaus steeds verder toenemen, tot een bepaald punt. De samenstelling van deze specifieke goederentrein met allemaal dezelfde wagons en vergelijkbare beladingen zal dit effect vermoedelijk versterken.

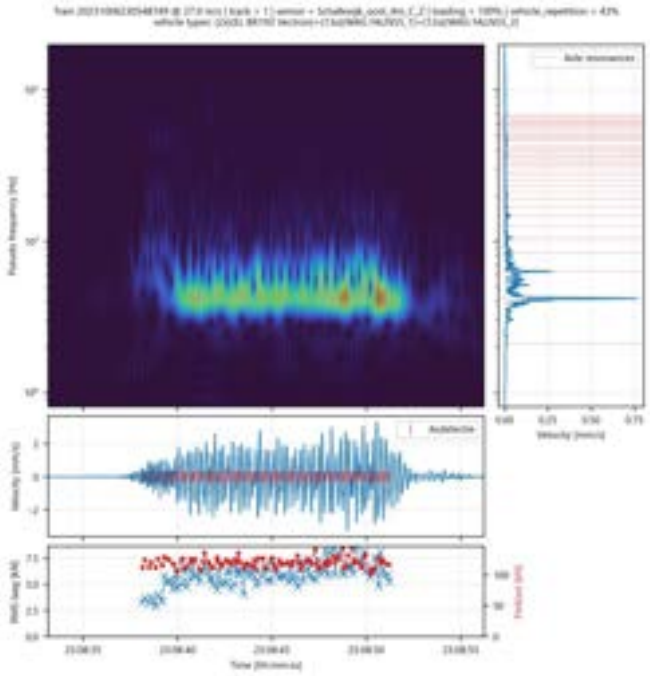
Bij de goederentreinen met onbeladen wagons is een dergelijke opbouw niet zichtbaar en zijn de trillingsniveaus redelijk uniform gedurende de gehele passage. Op 4 m uit het bereden spoor, gelegen aan de oostzijde, is echter een sterke toename in trillingsniveau zichtbaar tegelijkertijd met een verhoogde dynamische wiellast (pieklast/RMS-laag waarde). De verhoogde waarde wordt vermoedelijk veroorzaakt door een wieldefect zoals een vlakke plaats. Dit soort defecten veroorzaken typisch grotere variaties in de trillingssignalen voor onbeladen wagons dan voor beladen wagons doordat de kans op ‘contact loss’ groter is bij onbeladen wagons [1]. Op grotere afstand van het spoor is het effect van de verhoogde dynamische wiellast nauwelijks meer aanwezig en worden de trillingssignalen voornamelijk gedomineerd door de frequentie rond 4-5 Hz ($n = 2$).

Tabel 4.3 Eigenschappen 4-assige wagons (WAG FALNS5) in beschouwde treinpassages

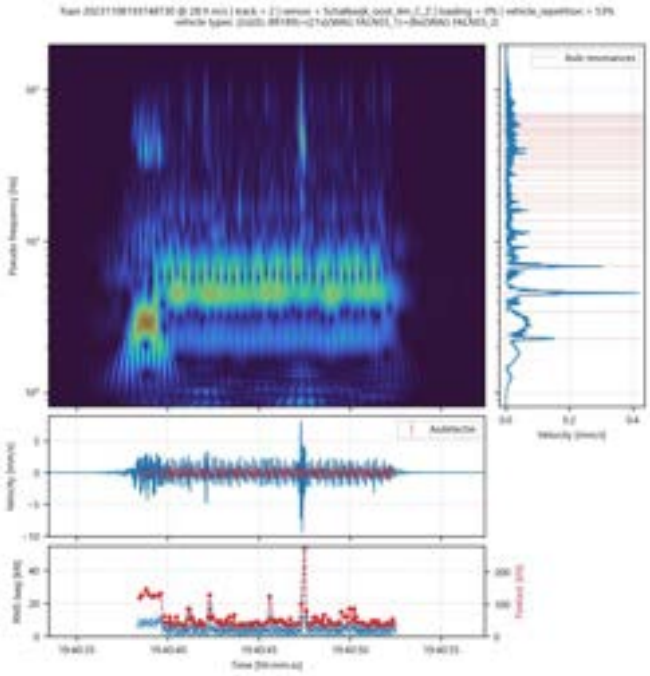
Passage	**Materieeltype**	**As-afstanden** [m]	**Wagonlengte (L)** [m]	**Snelheid (V)** [m/s]	**Theoretische fundamentele frequentie** [Hz]
spoor 1, beladen	WAG FALNS5_1	intern: 1,8 - 5,7 - 1,8 tussen: 3,25	12,55	27,0	2,15
	WAG FALNS5_2	intern: 1,8 - 5,9 - 1,8 tussen: 3,55	13,05		2,07
spoor 2, onbeladen	WAG FALNS5_1	intern: 1,8 - 5,7 - 1,8 tussen: 3,25	12,55	28,9	2,30
	WAG FALNS5_2	intern: 1,8 - 5,9 - 1,8 tussen: 3,55	13,05		2,21

Afbeelding 4.3 Tijd-frequentie plots voor trillingssnelheid in Z-richting op 5 meetpunten in Schalkwijk (onder elkaar) voor twee goederentrein passages met WAG FALNS5_1 en WAG FALNS5_2 wagons, links op spoor 1 met beladen wagons op 6-10-2023 en rechts op spoor 2 met beladen wagons op 8-11-2023

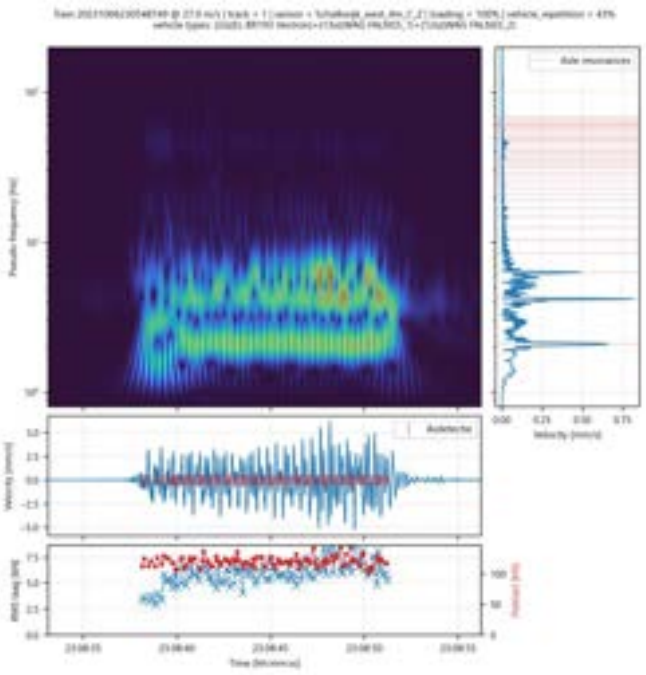
beladen, spoor 1, meetpunt oost 4 m



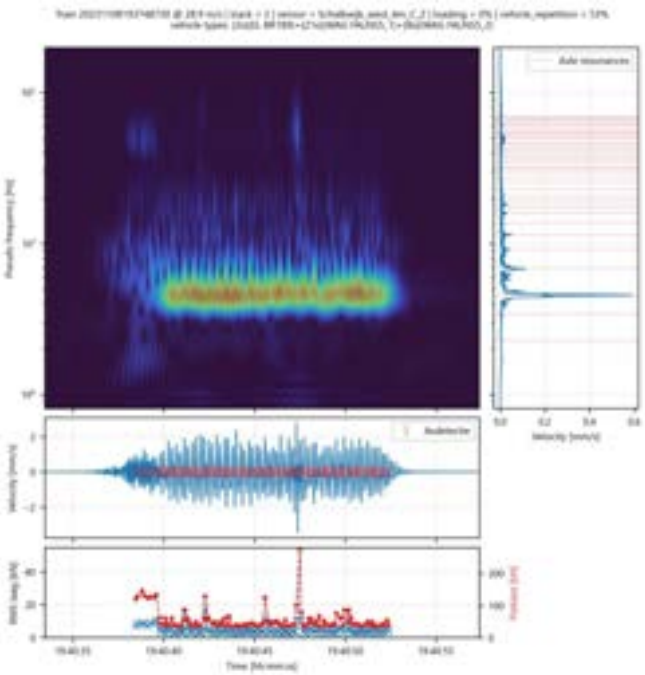
onbeladen, spoor 2, meetpunt oost 4 m



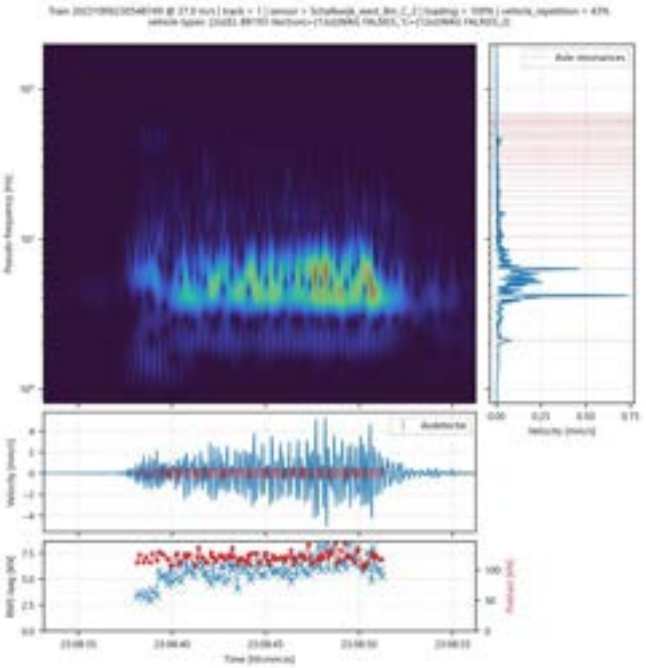
beladen, spoor 1, meetpunt west 4 m



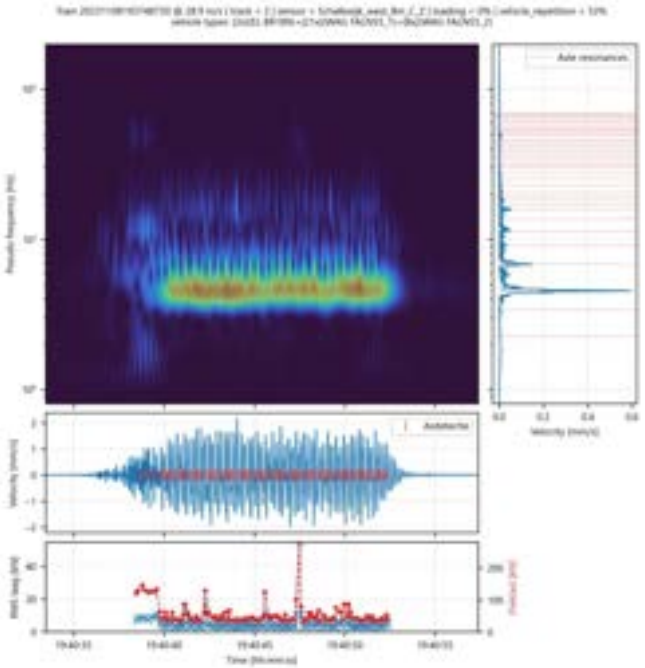
onbeladen, spoor 2, meetpunt west 4 m



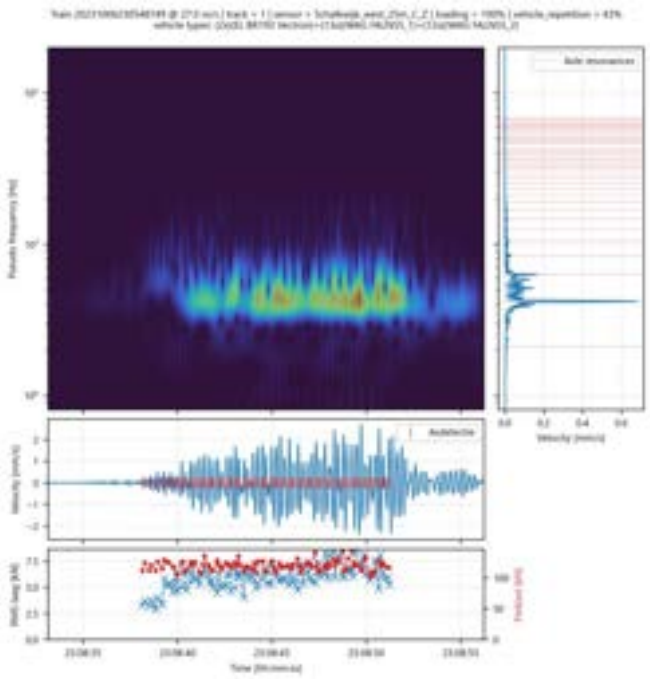
beladen, spoor 1, meetpunt west 8 m



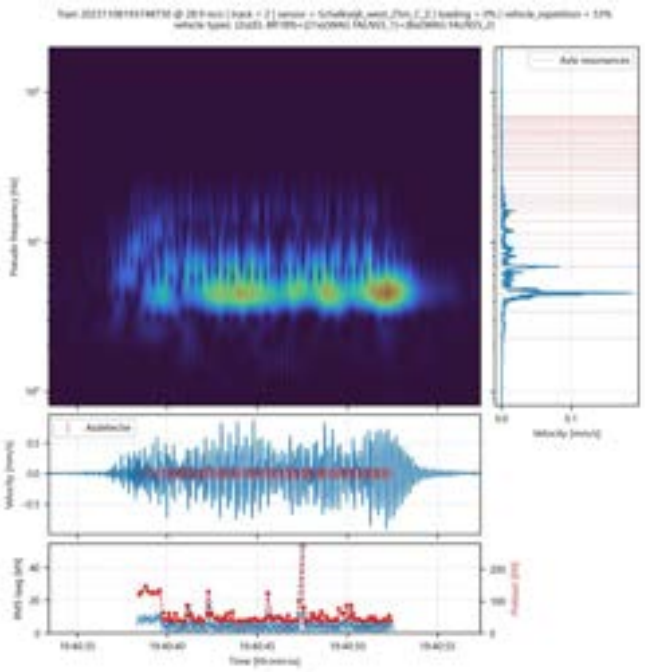
onbeladen, spoor 2, meetpunt west 8 m



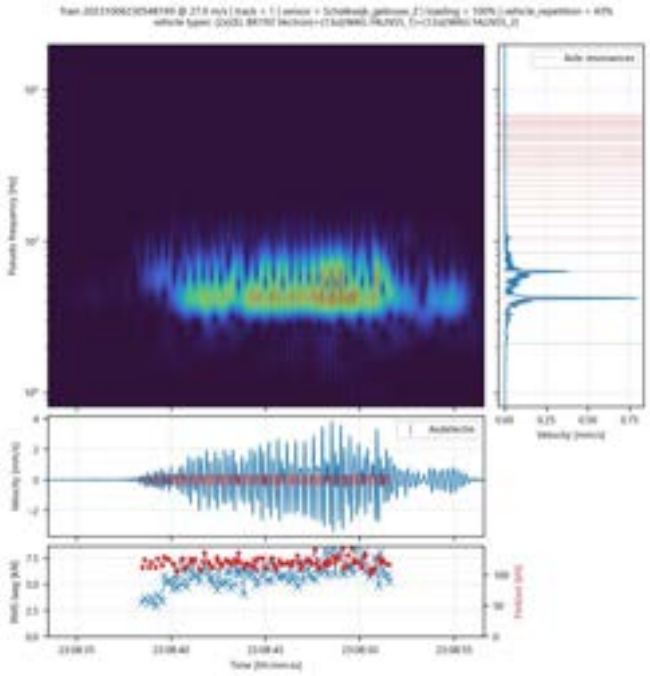
beladen, spoor 1, meetpunt west 25 m



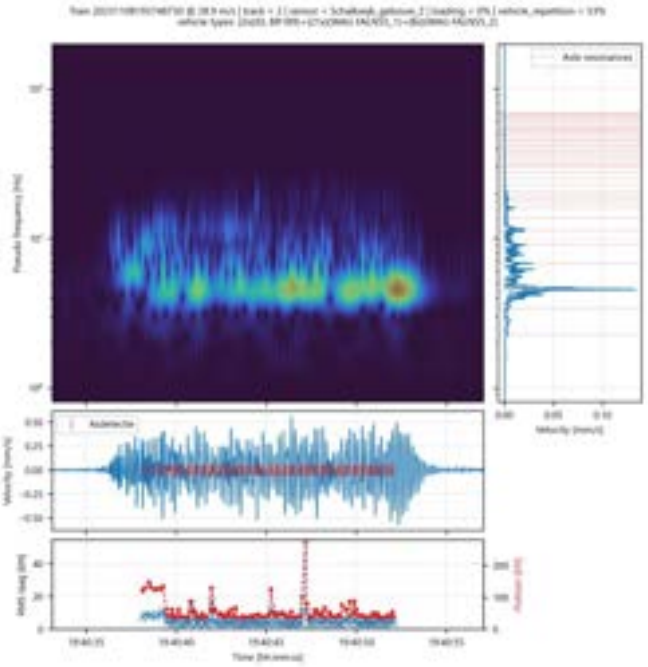
onbeladen, spoor 2, meetpunt west 25 m



beladen, spoor 1, meetpunt gebouw op +/- 25 m



onbeladen, spoor 2, meetpunt gebouw op +/- 25 m



4-assige wagons type WAG FALNS5 en WAG SHIMMNS1

Afbeelding 4.4 toont de tijd-frequentie plots voor de trillingssnelheid in de Z-richting op 5 meetpunten voor twee verschillende passages van goederentreinen met vergelijkbare wagons (type WAG FALNS5_1 en WAG SHIMMNS1). De linker kolom toont een passage op spoor 1 met half beladen en onbeladen wagons en de rechter kolom toont een passage op spoor 2 met half onbeladen en beladen wagons. De as-afstanden voor de twee wagontypes verschillen enigszins van elkaar, zoals weergegeven in tabel 4.4. Bij een snelheid van 26,2 m/s en 26,4 m/s zijn de (theoretische) dominante frequenties van de aslasten gelijk aan een integer meervoud van respectievelijk 2,09-2,17 Hz en 2,10-2,19 Hz.

Voor beide passages komen de dominante frequenties van het trillingssignaal overeen met de frequenties van de aslasten, al zijn niet alle frequenties aanwezig en varieert de frequentie inhoud per meetpunt. De fundamentele frequentie is voornamelijk zichtbaar in de trillingssignalen het dichtst bij de bron, op 4 m uit het spoor. De frequentie rond 4-5 Hz ($n = 2$) is in de meeste meetpunten het nadrukkelijkst aanwezig gedurende de gehele treinpassage.

In beide passages bestaat de goederentrein uit een groep met beladen wagons en een groep met onbeladen wagons. De overgang tussen deze twee groepen van aangesloten wagons is duidelijk zichtbaar in de trillingssignalen en spectrogrammen. Wanneer de beladen wagons worden gevolgd door een groep onbeladen wagons is een verhoging in het trillingsniveau zichtbaar voor de laatste beladen wagon. Deze verhoging is in alle meetpunten zichtbaar, en lijkt vergelijkbaar met effecten die voorkomen bij de laatste wagon van een trein. Direct na de overgang is het trillingsniveau voor de groep onbeladen wagons het laagst, en deze neemt vervolgens weer toe tot een uniform niveau. Dit effect is het duidelijkst zichtbaar in de trillingssignalen op 25 meter en in het gebouw. De piekniveaus voor de onbeladen wagons zijn over het algemeen lager dan voor de beladen wagons.

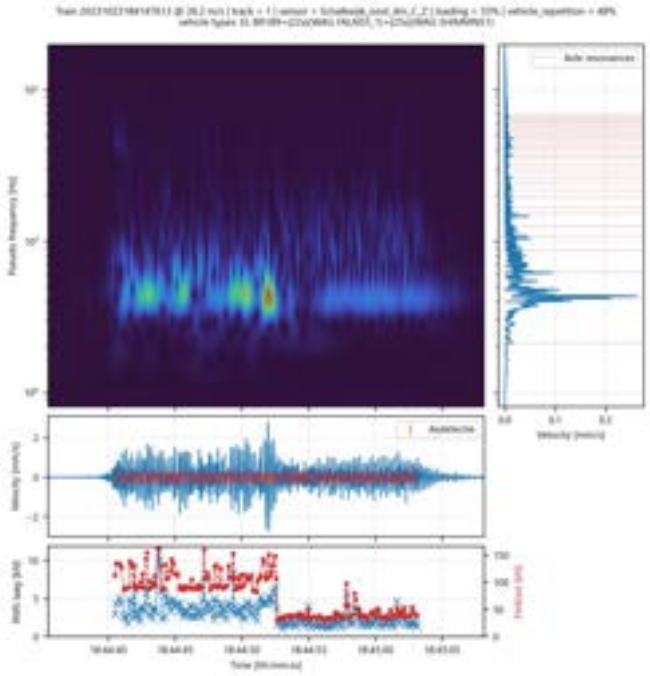
Bij een overgang van onbeladen wagons naar beladen wagons (passage in rechter kolom) treedt een dergelijke verhoging in trillingsniveau bij de overgang niet op. In de meetpunten dicht bij het spoor is een duidelijke verhoging in trillingsniveau zichtbaar op het moment dat de beladen wagons passeren. Voor de meetpunten verder van het spoor en in het gebouw is dit moment minder duidelijk te onderscheiden en neemt het trillingsniveau meer geleidelijk toe gedurende de passage. Deze observatie is vergelijkbaar met de die uit de vorige sectie, maar hier wordt de geleidelijke toename tevens veroorzaakt door de variatie in belading in tegenstelling tot eerder waarbij de goederentrein uit allemaal dezelfde wagons en beladingen bestond.

Tabel 4.4 Eigenschappen 4-assige wagons in beschouwde treinpassages

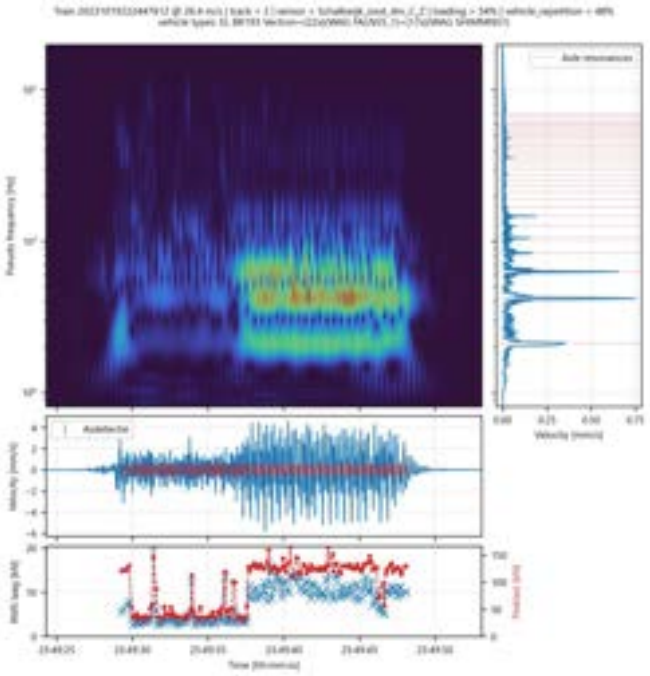
Passage	**Materieeltype**	**As-afstanden** [m]	**Wagonlengte (L)** [m]	**Snelheid (V)** [m/s]	**Theoretische fundamentele frequentie** [Hz]
spoor 1, beladen	WAG FALNS5_1	intern: 1,8 - 5,7 - 1,8 tussen: 3,25	12,55	26,2	2,09
	WAG SHIMMNS1	intern: 1,8 - 5,2 - 1,8 tussen: 3,25	12,05		2,17
spoor 2, onbeladen	WAG FALNS5_1	intern: 1,8 - 5,7 - 1,8 tussen: 3,25	12,55	26,4	2,10
	WAG SHIMMNS1	intern: 1,8 - 5,2 - 1,8 tussen: 3,25	12,05		2,19

Afbeelding 4.4 Tijd-frequentie plots voor trillingssnelheid in Z-richting op 5 meetpunten in Schalkwijk (onder elkaar) voor twee goederentrein passages met WAG FALNS5_1 en WAG SHIMMNS1 wagons, links op spoor 1 met 53/47 % beladen /onbeladen wagons op 23-10-2023 en rechts op spoor 2 met 46/54 % onbeladen/beladen wagons op 19-10-2023

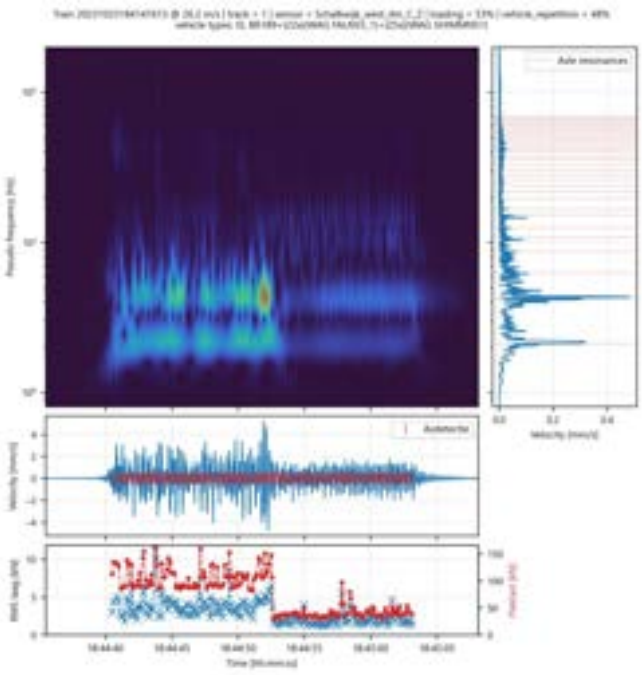
beladen/onbeladen, spoor 1, meetpunt oost 4 m



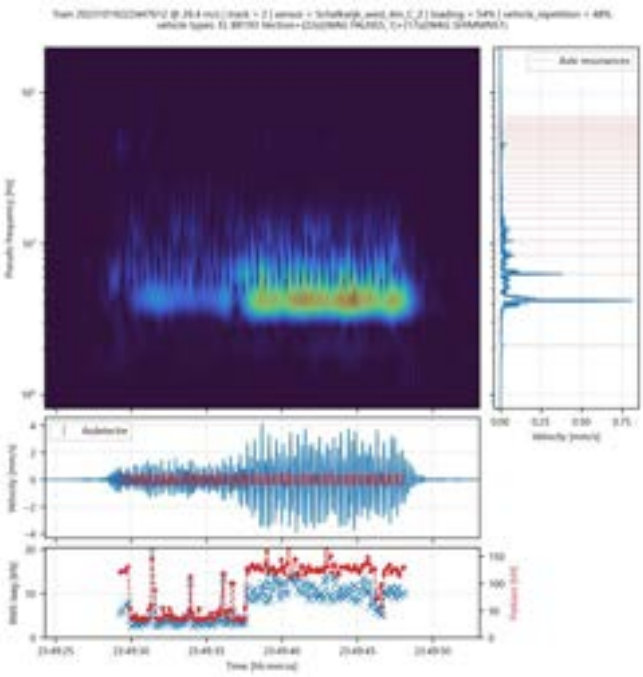
onbeladen/beladen, spoor 2, meetpunt oost 4 m



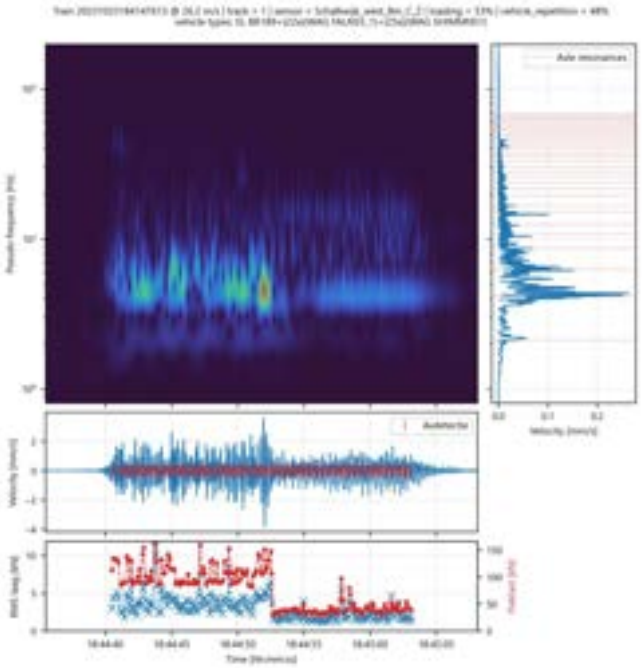
beladen/onbeladen, spoor 1, meetpunt west 4 m



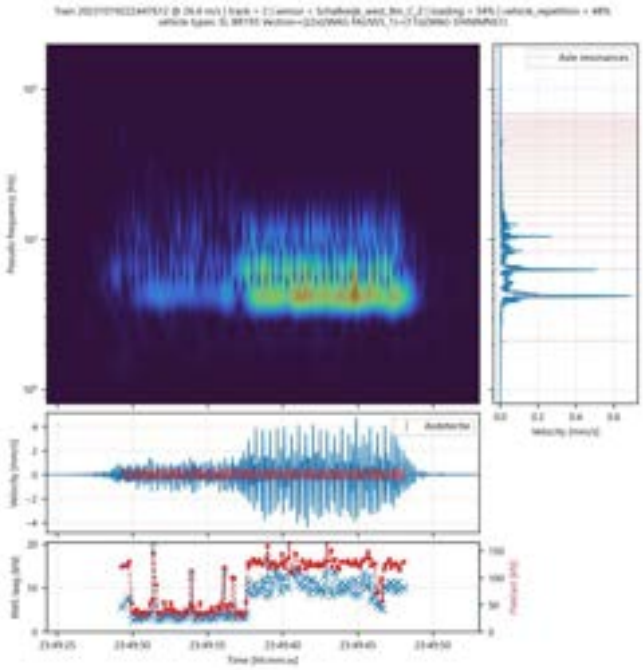
onbeladen/beladen, spoor 2, meetpunt west 4 m



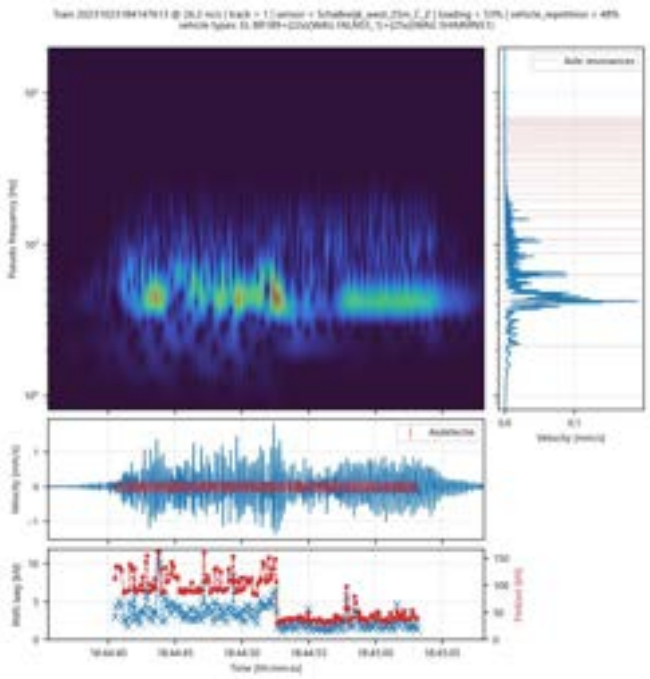
beladen/onbeladen, spoor 1, meetpunt west 8 m



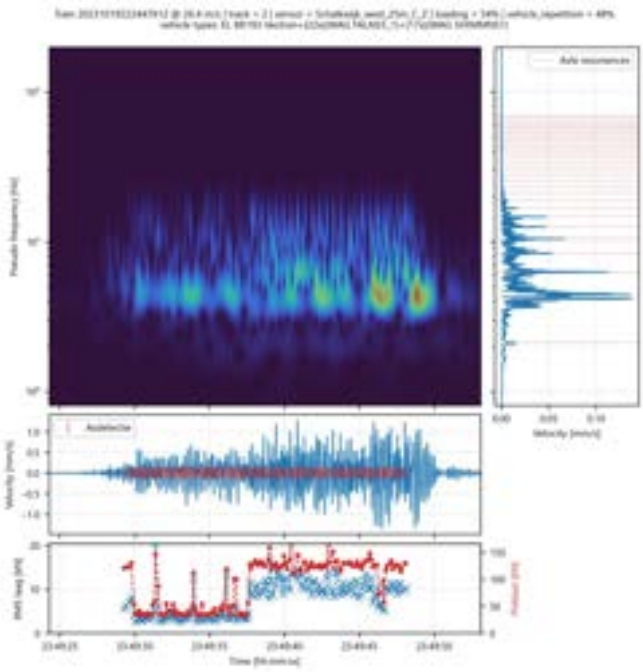
onbeladen/beladen, spoor 2, meetpunt west 8 m



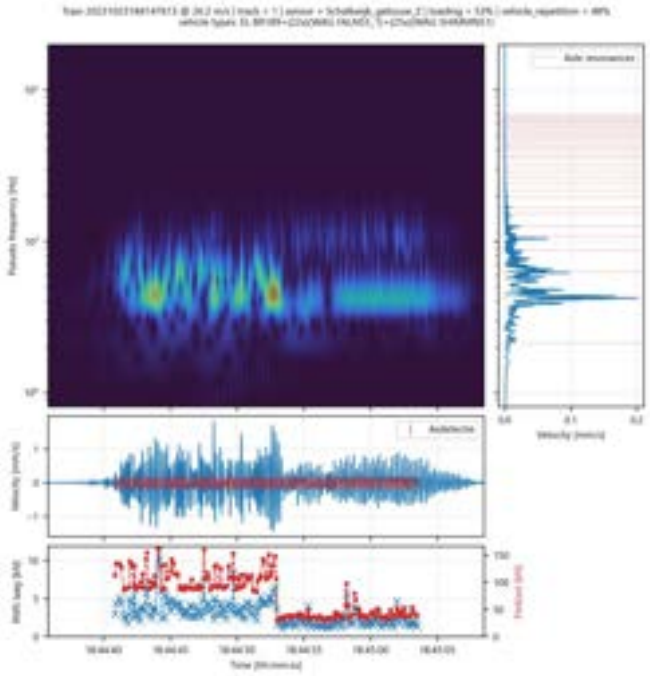
beladen/onbeladen, spoor 1, meetpunt west 25 m



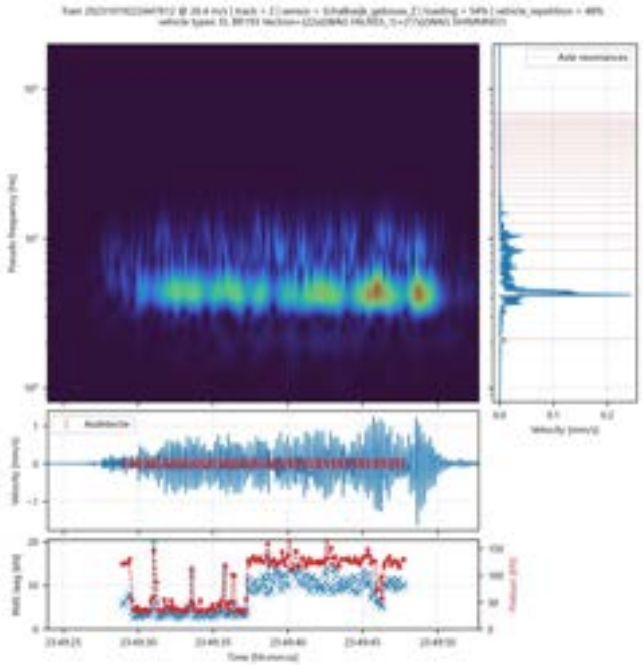
onbeladen/beladen, spoor 2, meetpunt west 25 m



beladen/onbeladen, spoor 1, meetpunt gebouw op +/- 25 m



onbeladen/beladen, spoor 2, meetpunt gebouw op +/- 25 m



6-assige wagons type WAG SGMR1

Afbeelding 4.5 toont de tijd-frequentie plots voor de trillingssnelheid in de Z-richting op 5 meetpunten voor twee verschillende passages van goederentreinen met identieke wagons (type WAG SGMR1). De linker kolom toont een passage op spoor 2 met half beladen en onbeladen wagons en de rechter kolom toont een passage op spoor 2 met onbeladen wagons. De interne as-afstanden van de wagons zijn 1,8 - 10,2 - 1,8 - 10,2 - 1,8 meter en de afstand tussen twee wagons is 3,8 meter. De wagonlengte is dus ongeveer gelijk aan 29,6 meter. Bij een snelheid van 27,4 m/s en 27,9 m/s zijn de (theoretische) dominante frequenties van de aslasten gelijk aan een integer meervoud van respectievelijk 0,93 Hz en 0,94 Hz.

Voor beide passages komen de dominante frequenties van het trillingssignaal overeen met de frequenties van de aslasten, al zijn niet alle frequenties aanwezig en varieert de frequentie inhoud per meetpunt. De fundamentele frequentie rond 0,9 Hz is echter niet zichtbaar in het trillingssignaal aangezien de signalen zijn gefilterd met een highpass filter met cutoff frequentie van 1,2 Hz. Dit filter is toegepast om laagfrequente ruis te verwijderen na de conversie van versnellingen naar snelheid met behulp van numerieke integratie. De frequentie rond 5 Hz ($n = 5$) is in de meeste meetpunten het nadrukkelijkst aanwezig gedurende de gehele treinpassage.

De variaties in trillingsniveaus zijn duidelijk het grootst bij de treinpassage met beladen en onbeladen wagons (linker kolom). Telkens wanneer een beladen wagon passeert is een verhoging in het trillingsniveau zichtbaar. Deze verhoging is eenvoudig te koppelen aan de belading van de wagons. Bij het passeren van een onbeladen wagon zakt het trillingsniveau weer naar een lager niveau. Door de afwisseling van beladen en onbeladen wagons treedt er vermoedelijk geen opbouw in trillingsniveau op, zoals we in de vorige sectie zagen, ondanks dat de goederentrein wel uit allemaal dezelfde wagons bestaat en er dus wel een repetitie van dezelfde as-afstanden is.

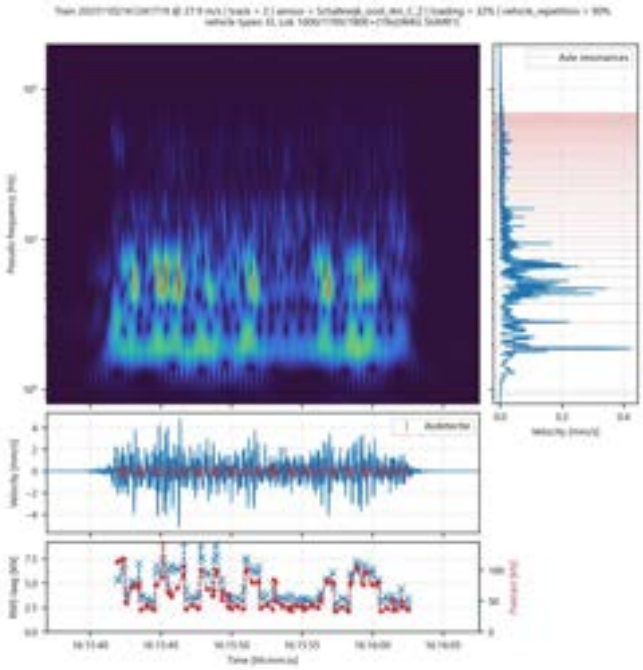
In de passage met onbeladen wagons (rechter kolom) is het trillingsniveau redelijk uniform gedurende de passage, met uitzondering van de momenten waarop een wagon met verhoogde dynamische wiellast passeert. Dit is het duidelijkst zichtbaar in het meetpunt op 4 meter. Bij de passage van de laatste wagon is in alle meetpunten een verhoogd trillingsniveau zichtbaar. Dit wordt vermoedelijk deels veroorzaakt door een wieldefect gezien de hogere dynamische wiellast. Daarnaast veroorzaakt de laatste wagon in een goederentrein vaker een hoger trillingsniveau dan de rest van de trein aangezien het dynamische gedrag van deze wagon anders is omdat de wagon maar aan één zijde is ‘ingeklemd’.

Tabel 4.5 Eigenschappen 6-assige wagons (WAG SGMR1) in beschouwde treinpassages

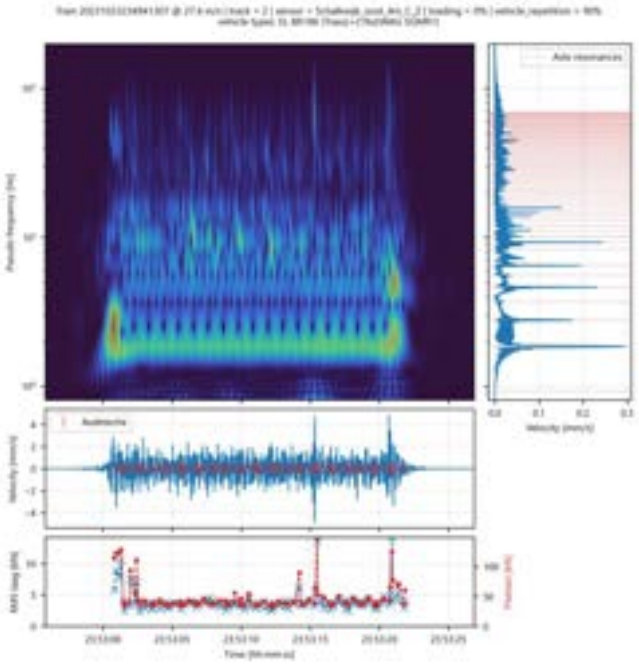
Passage	**Materieeltype**	**As-afstanden** [m]	**Wagonlengte (L)** [m]	**Snelheid (V)** [m/s]	**Theoretische fundamentele frequentie** [Hz]
spoor 2, beladen/onbeladen	WAG SGMR1	intern: 1,8-10,2-1,8-10,2-1,8 tussen: 3,8	29,6	27,4	0,93
spoor 2, onbeladen	WAG SGMR1	intern: 1,8-10,2-1,8-10,2-1,8 tussen: 3,8	29,6	27,9	0,94

Afbeelding 4.5 Tijd-frequentie plots voor trillingssnelheid in Z-richting op 5 meetpunten in Schalkwijk (onder elkaar) voor twee goederentrein passages met 19 WAG SGMR1 wagons, links op spoor 2 met beladen/onbeladen wagons op 2-11-2023 en rechts op spoor 2 met onbeladen wagons op 23-10-2023

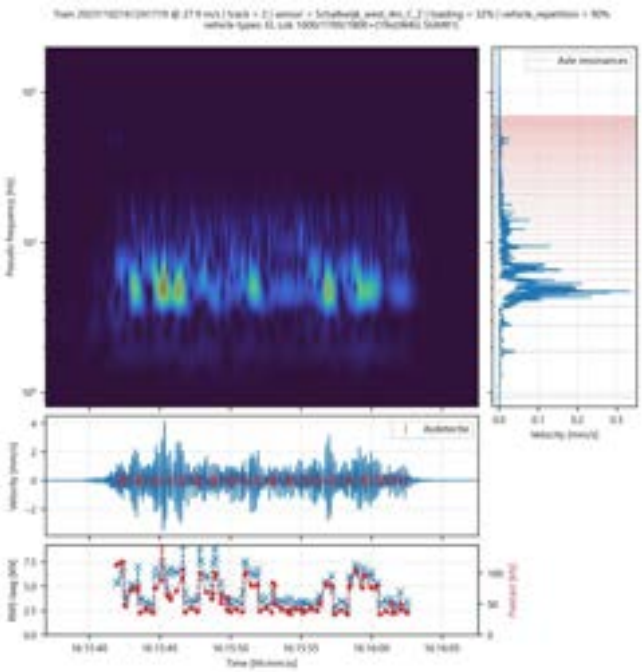
beladen/onbeladen, spoor 2, meetpunt oost 4 m



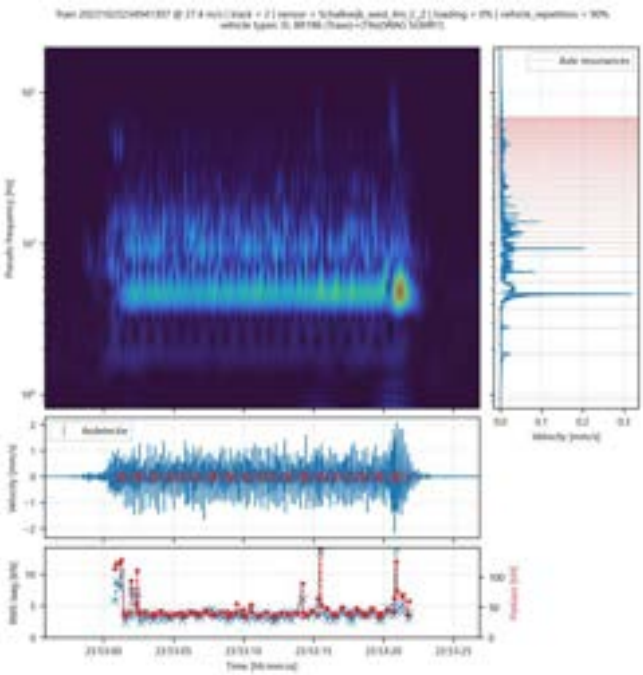
onbeladen, spoor 2, meetpunt oost 4 m



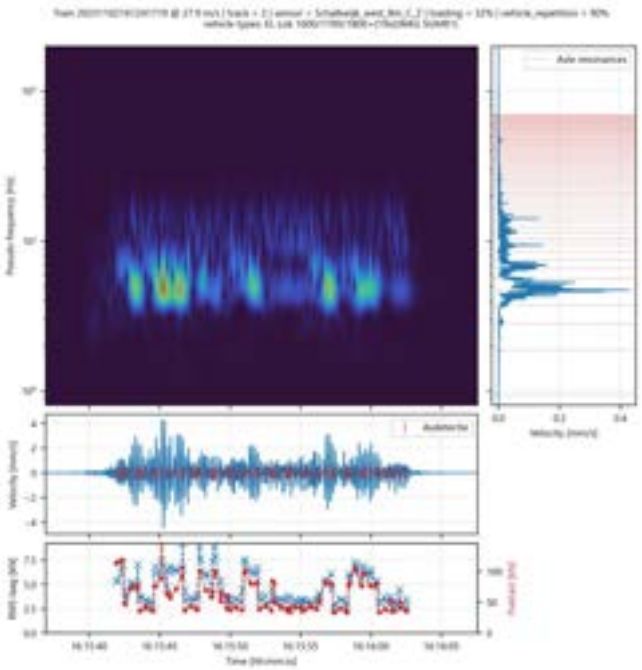
beladen/onbeladen, spoor 2, meetpunt west 4 m



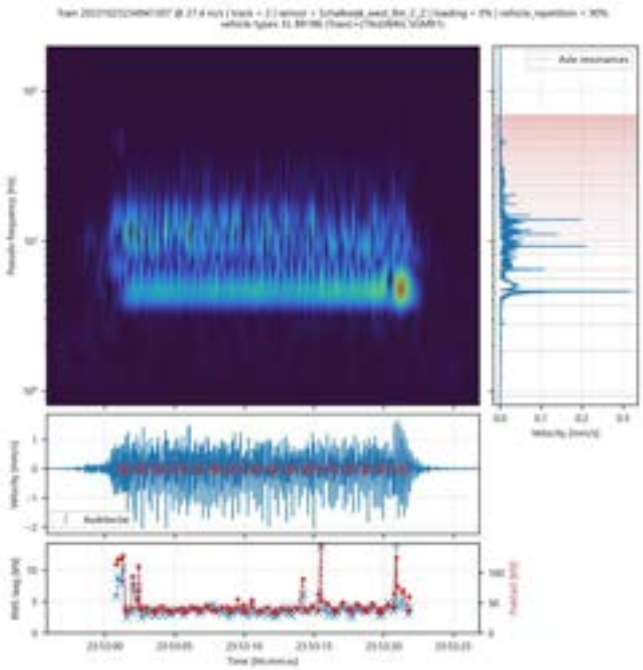
onbeladen, spoor 2, meetpunt west 4 m



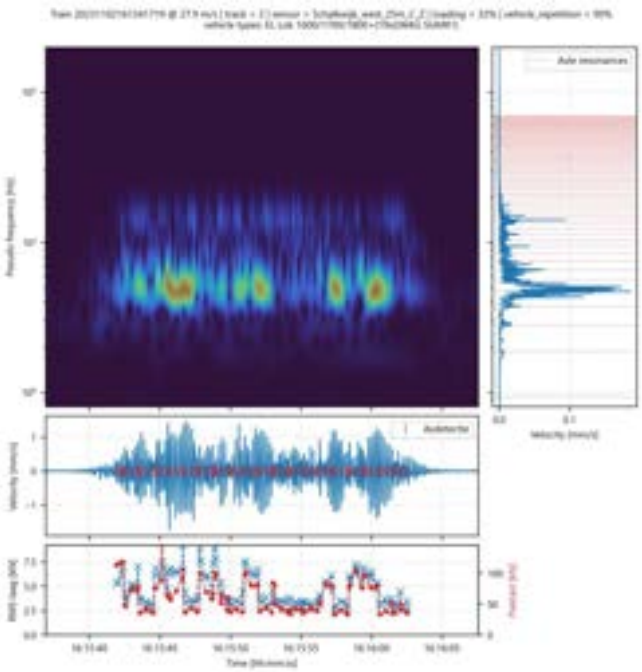
beladen/onbeladen, spoor 2, meetpunt west 8 m



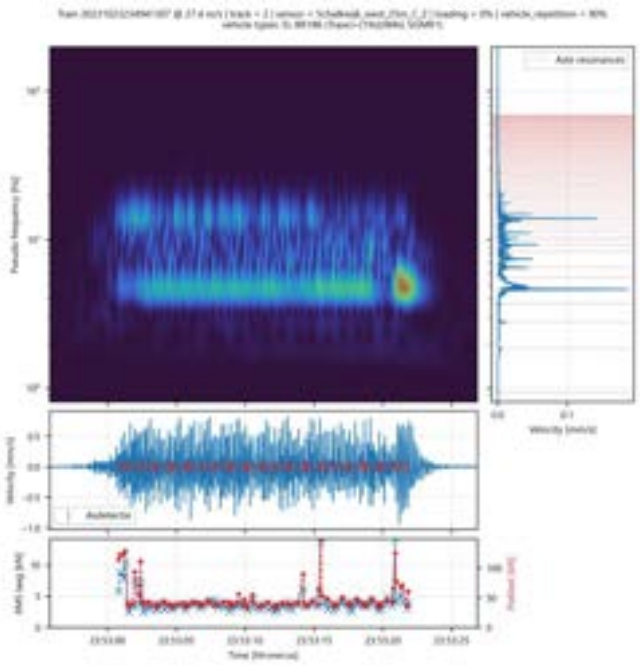
onbeladen, spoor 2, meetpunt west 8 m



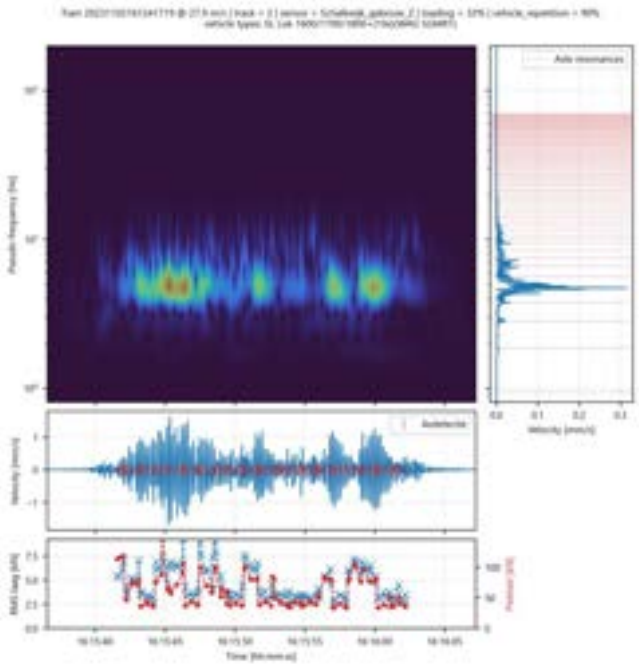
beladen/onbeladen, spoor 2, meetpunt west 25 m



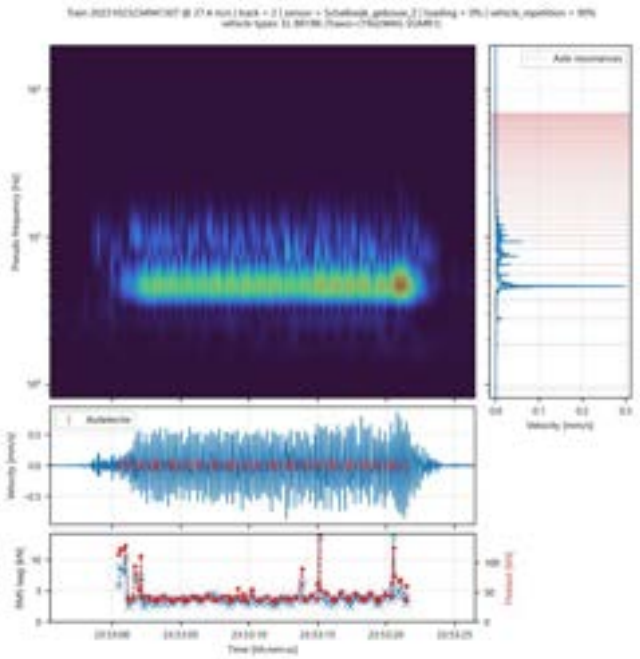
onbeladen, spoor 2, meetpunt west 25 m



beladen/onbeladen, spoor 2, meetpunt gebouw op +/- 25 m



onbeladen, spoor 2, meetpunt gebouw op +/- 25 m



Combinatie verschillende wagon types

Afbeelding 4.6 toont de tijd-frequentie plots voor de trillingssnelheid in de Z-richting op 5 meetpunten voor twee verschillende passages van goederentreinen met 4-assige wagons. De linker kolom toont een passage op spoor 1 met half beladen en onbeladen wagons van verschillende materieeltypes. De as-afstanden van de verschillende wagons verschillen enigszins maar niet meer dan 0,5 meter. De dominante wagonlengte is 16,75 meter en bij een snelheid van 26,2 m/s zijn de theoretische dominante frequenties van de aslasten gelijk aan een integer meervoud van 1,56 Hz. De dominante frequenties van het trillingssignaal komen redelijk goed overeen met de frequenties van de aslasten. Deze dominante frequenties komen overeen met de meest voorkomende wagons in de goederentrein. Echter, omdat er ook andere wagontypes in de trein

zitten, met andere as-afstanden, zijn er meer dominante frequenties aanwezig in het trillingssignaal in vergelijking met de passages van goederentreinen met maar één wagontype. De goederentrein bestaat uit onbeladen en beladen wagons, dit is ook duidelijk zichtbaar in het trillingssignaal; de trillingsniveaus zijn significant lager bij de passage van de onbeladen wagons.

De rechter kolom toont een passage op spoor 1 met 75 % beladen wagons van verschillende materieeltypes. De as-afstanden van de verschillende wagons zijn niet hetzelfde. De dominante wagonlengte is 12 meter wat overeenkomt met de meest voorkomende wagon met as-afstanden 1,8-5,2-1,8 meter en tussen afstand 3,2 meter. Bij een snelheid van 27,1 m/s zijn de theoretische dominante frequenties van de aslasten gelijk aan een integer meervoud van 2,26 Hz. In de amplitude spectra zijn echter meerdere andere dominante frequenties zichtbaar die gerelateerd kunnen worden aan de as-afstanden van de overige wagons, zie tabel 4.6. De WAG Ordinary Flat Wagon (R) zijn bijvoorbeeld bijna twee keer zo lang als de andere wagons in de goederen trein, vanwege de grotere draaistel-afstand, waardoor de fundamentele frequentie van de as-lasten lager ligt. Dit is duidelijk zichtbaar in de spectrogram voor het meetpunt op 4 meter; de dominante frequentie verschuift naar 1,4 Hz bij de passages van deze wagons. Tevens zijn de trillingsniveaus veel lager voor deze wagons terwijl de belading ongeveer gelijk is met de andere wagons. Op grotere afstand van het spoor en in het gebouw is dit verschil in trillingsniveau het meest nadrukkelijk aanwezig. Dit impliceert dat langere wagons, op slappe ondergrond, tot lagere trillingsniveau leidt (en andersom, korte wagons resulteren in hogere niveaus).

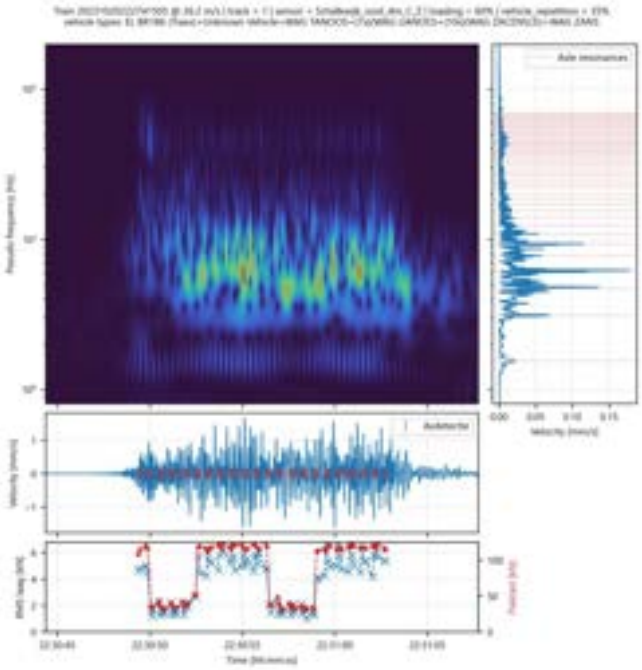
De frequentie rond 5 Hz is in de meeste meetpunten het meest dominant aanwezig, maar dit varieert enigszins gedurende de passage vanwege de verschillende wagontypes.

Tabel 4.6 Eigenschappen 4-assige wagons in beschouwde treinpassages

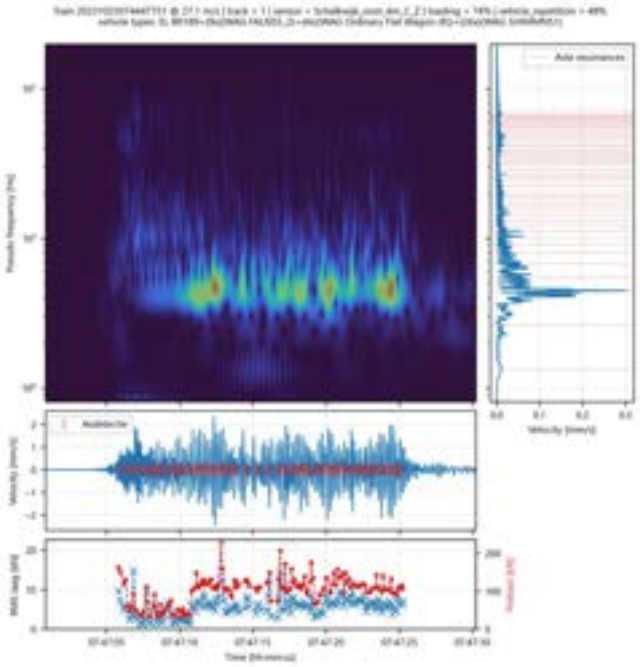
Passage	**Materieeltype**	**As-afstanden** [m]	**Wagonlengte (L)** [m]	**Snelheid (V)** [m/s]	**Theoretische fundamentele frequentie** [Hz]
spoor 1, beladen/onbeladen	WAG TANOOS	intern: 1,8-9,0-1,8 tussen: 4,0	16,6	26,2	1,58
	WAG UANOO	intern: 1,8-9,3-1,8 tussen: 3,8	16,7		1,57
	WAG ZACENS(3)	intern: 1,8-9,7-1,8 tussen: 3,5	16,8		1,56
	WAG ZANS	intern: 1,8-9,7-1,8 tussen: 3,8	17,1		1,53
spoor 1, beladen	WAG FALNS5_2	intern: 1,8-5,9-1,8 tussen: 3,6	13,1	27,1	2,07
	WAG Ordinary Flat Wagon (R)	intern: 1,8-13,0-1,8 tussen: 3,4	20,0		1,36
	WAG SHIMMNS1	intern: 1,8-5,2-1,8 tussen: 3,2	12,0		2,26

Afbeelding 4.6 Tijd-frequentie plots voor trillingssnelheid in Z-richting op 5 meetpunten in Schalkwijk (onder elkaar) voor twee goederentrein passages, links op spoor 2 met beladen/onbeladen 4-assige wagons op 20-10-2023 en rechts op spoor 1 met beladen 4-assige wagons op 23-10-2023

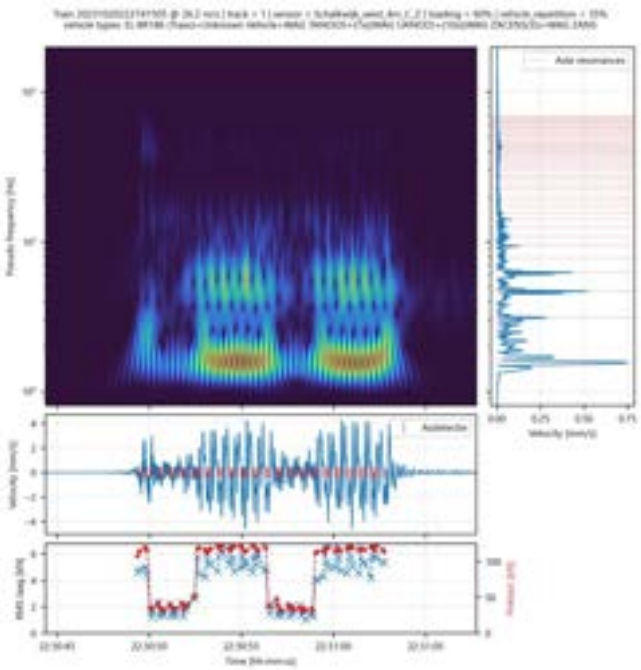
beladen/onbeladen, spoor 1, meetpunt oost 4 m



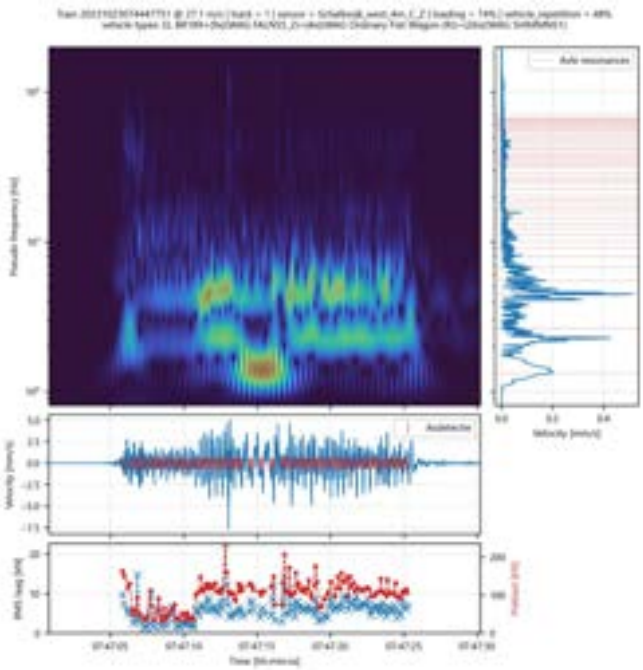
beladen, spoor 1, meetpunt oost 4 m



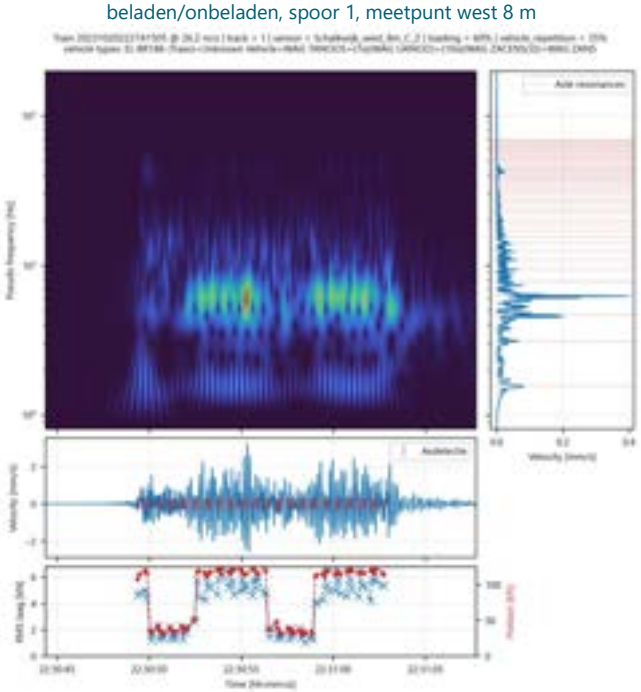
beladen/onbeladen, spoor 1, meetpunt west 4 m



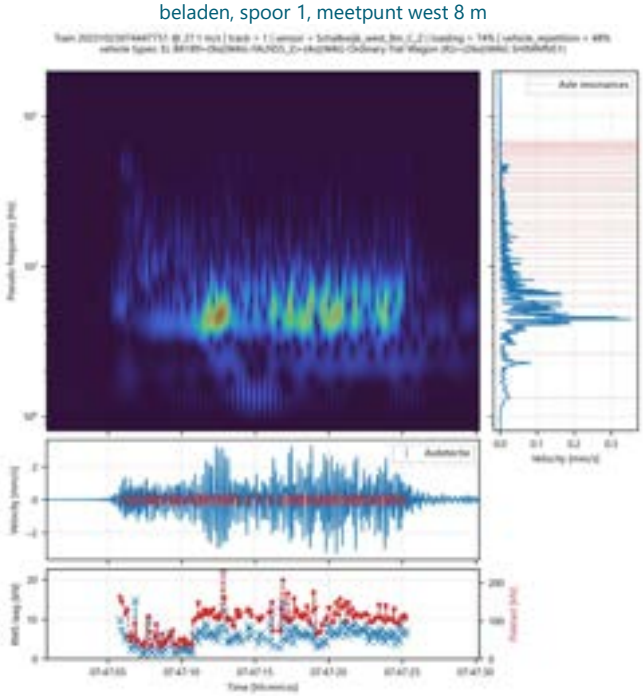
beladen, spoor 1, meetpunt west 4 m



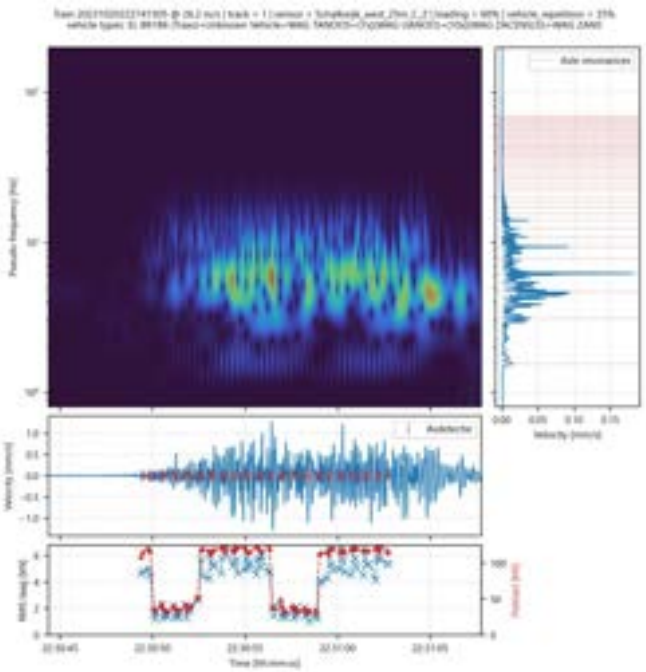
beladen/onbeladen, spoor 1, meetpunt west 8 m



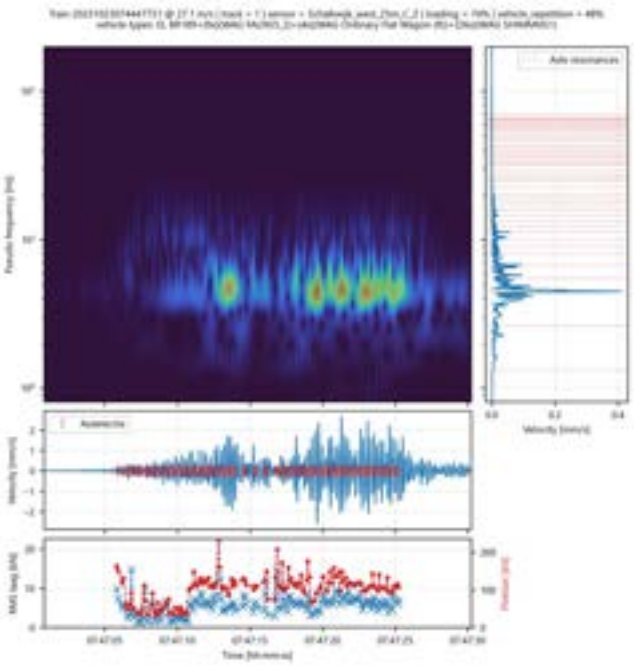
beladen, spoor 1, meetpunt west 8 m



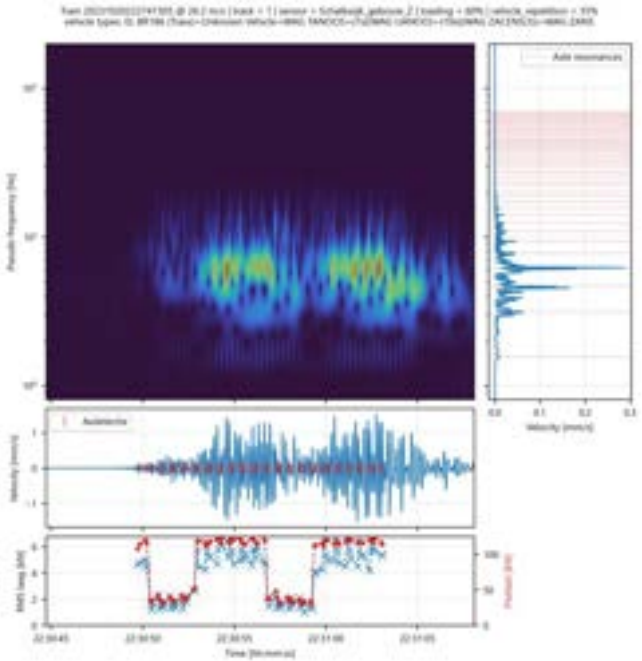
beladen/onbeladen, spoor 1, meetpunt west 25 m



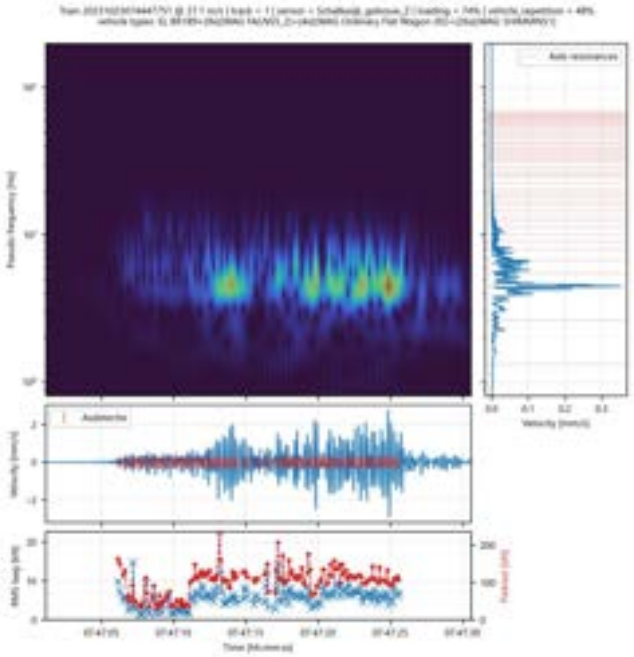
beladen, spoor 1, meetpunt west 25 m



beladen/onbeladen, spoor 1, meetpunt gebouw op +/- 25 m



beladen, spoor 1, meetpunt gebouw op +/- 25 m



4.1.2 Meetlocatie America (stijve ondergrond)

Hieronder worden een aantal passages van goederentreinen geanalyseerd met de volgende samenstelling:
- trein met 2-assige wagons, 1x onbeladen en 1x beladen;
- trein met 4-assige wagons, 1x onbeladen en 1x beladen;
- trein met 4-assige wagons met variërende beladingen;
- trein met 6-assige wagons, 1x onbeladen en 1x beladen/onbeladen.

2-assige wagons type WAG LGNS

Afbeelding 4.7 toont de tijd-frequentie plots voor de trillingssnelheid in de Z-richting op 5 meetpunten voor twee verschillende passages van goederentreinen met 2-assige wagons (type WAG LGNS). De linker kolom toont een passage op spoor 1 met onbeladen wagons en de rechter kolom toont een passage op spoor 2 met beladen wagons. De interne as-afstand is 10 meter en de afstand tussen twee wagons is 5,2 of 5,8 meter. De wagonlengte is dus ongeveer gelijk aan 15,2 of 15,8 meter en bij een snelheid van 25 m/s zijn de theoretische dominante frequenties van de aslasten gelijk aan:

$$f = n \cdot \frac{V}{L} \approx n \cdot 1{,}64\ Hz$$

Voor beide passages komen de dominante frequenties van het trillingssignaal grotendeels overeen met de frequenties van de aslasten, al zijn niet alle frequenties aanwezig en varieert de frequentie inhoud per meetpunt. Er zijn echter ook een aantal dominante frequenties in het trillingssignaal zichtbaar die niet overeenkomen met de getoonde frequenties van de aslasten, bijvoorbeeld rond 4 Hz voor de passage in de linker kolom. Deze frequenties komen overeen met de aslasten van de '6-assige wagons' met as-afstanden 10-5,2-10 en tussenafstand 5,8 zodat de wagonlengte 31 meter is en de fundamentele frequentie 0,8 Hz is bij een snelheid van 25 m/s.

In vergelijking met de passages op slappe bodem zijn voor de passage op stijve ondergrond de hogere frequenties rond 50 Hz veel dominanter. Daarnaast is de energie meer verdeeld over de frequenties en zijn er niet 1 tot 3 frequenties aanwezig die dominant zijn in alle meetpunten, zoals het geval was voor de metingen op slappe ondergrond.

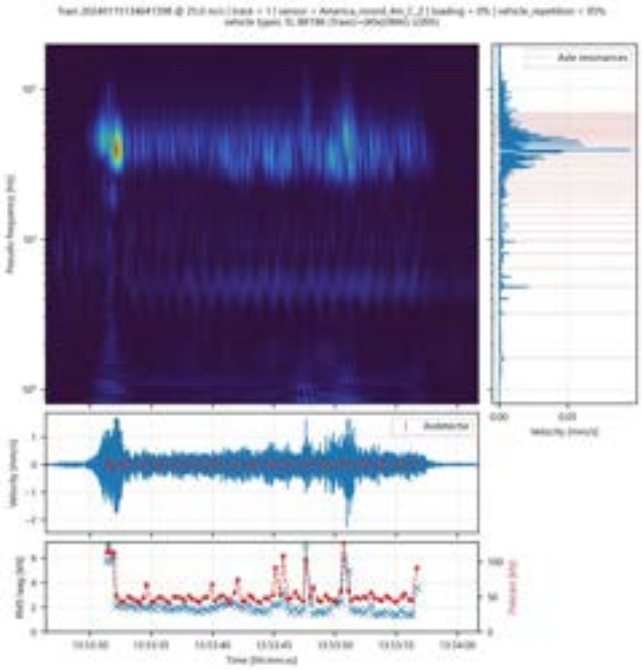
Op 25 meter van het spoor, zowel op het maaiveld en in het gebouw, is de frequentie rond 5 Hz het nadrukkelijkst aanwezig gedurende het grootste deel van de passage. Dit is vergelijkbaar met de passages op slappe ondergrond, hoewel daar deze frequentie dominant was in alle meetpunten, ook dichter bij het spoor.

Tabel 4.7 Eigenschappen 2-assige wagons (WAG LGNS) in beschouwde treinpassages

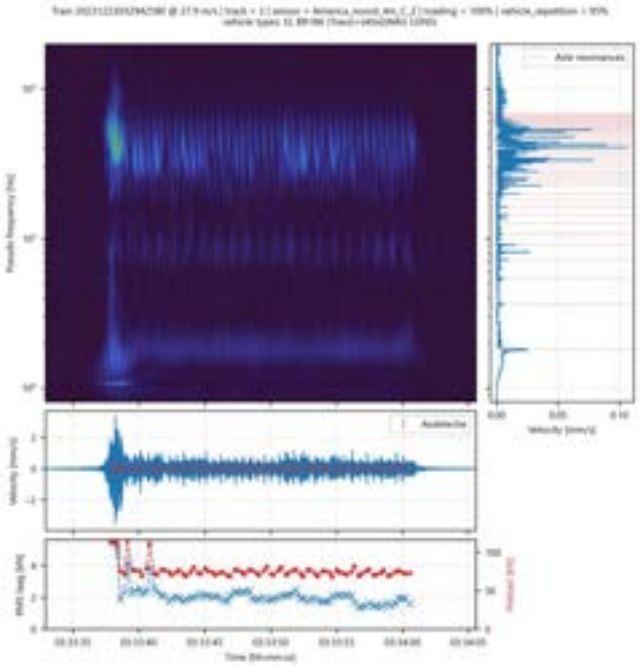
Passage	**Materieeltype**	**As-afstanden** [m]	**Wagonlengte (L)** [m]	**Snelheid (V)** [m/s]	**Theoretische fundamentele frequentie** [Hz]
spoor 1, onbeladen	WAG LGNS	intern: 10,0 tussen: 5,2 / 5,8	15,2 / 15,8	25,0	1,64
spoor 2, beladen	WAG LGNS	intern: 10,0 tussen: 5,2 / 5,8	15,2 / 15,8	27,9	1,84

Afbeelding 4.7 Tijd-frequentie plots voor trillingssnelheid in Z-richting op 5 meetpunten in America (onder elkaar) voor twee goederentrein passages met WAG LGNS wagons, links op spoor 1 met 40 onbeladen wagons op 15-1-2024 en rechts op spoor 2 met 40 beladen wagons op 23-12-2023

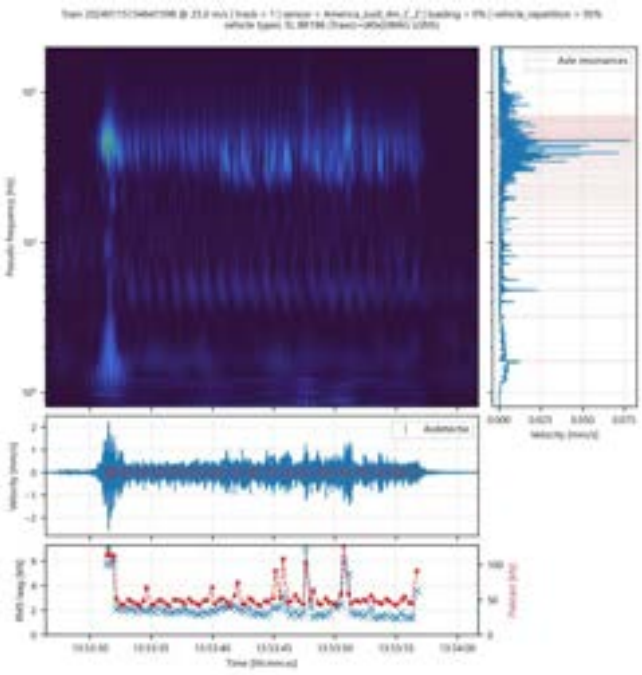
onbeladen, spoor 1, meetpunt noord 4 m



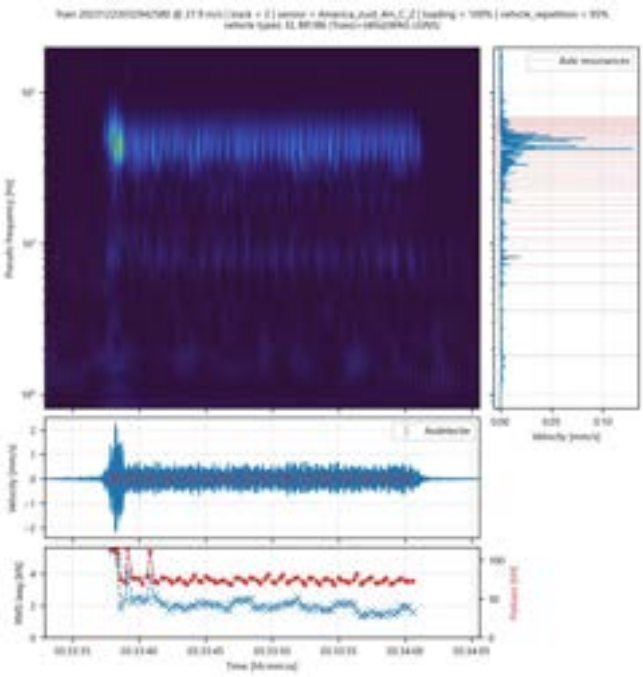
beladen, spoor 2, meetpunt noord 4 m



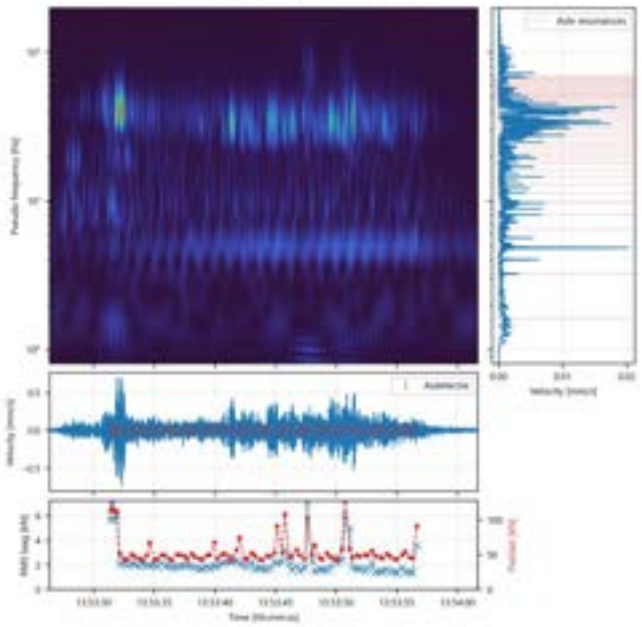
onbeladen, spoor 1, meetpunt zuid 4 m



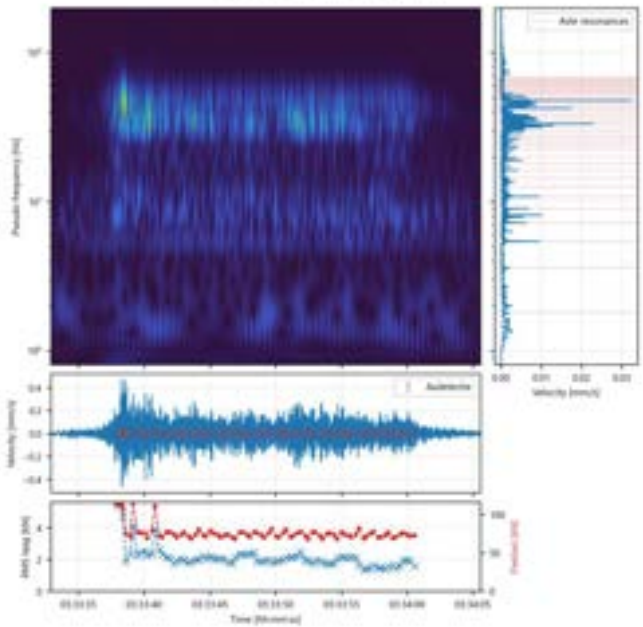
beladen, spoor 2, meetpunt zuid 4 m



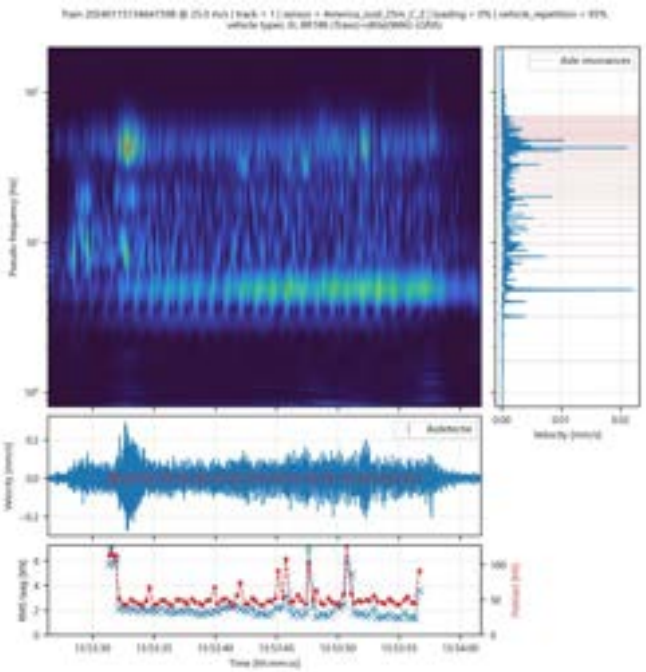
onbeladen, spoor 1, meetpunt zuid 8 m



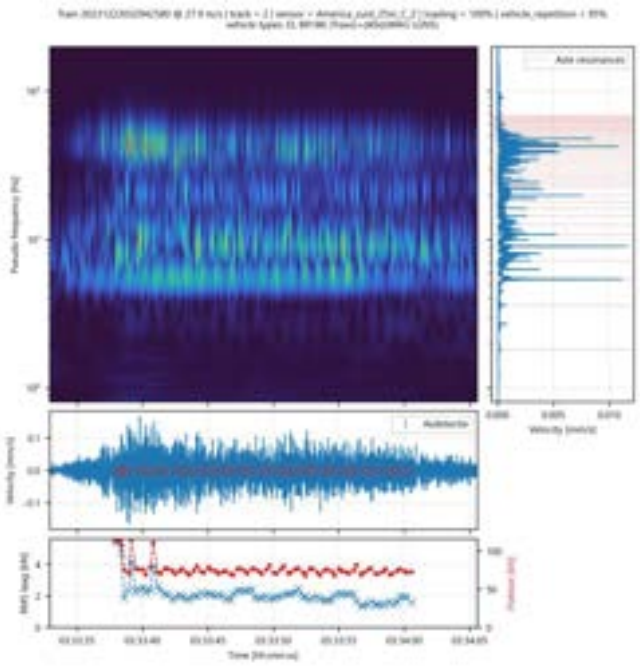
beladen, spoor 2, meetpunt zuid 8 m



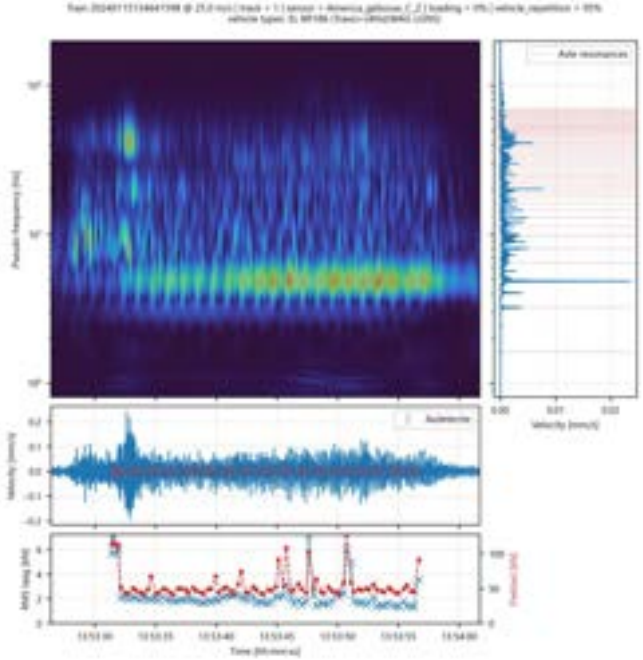
onbeladen, spoor 1, meetpunt zuid 25 m



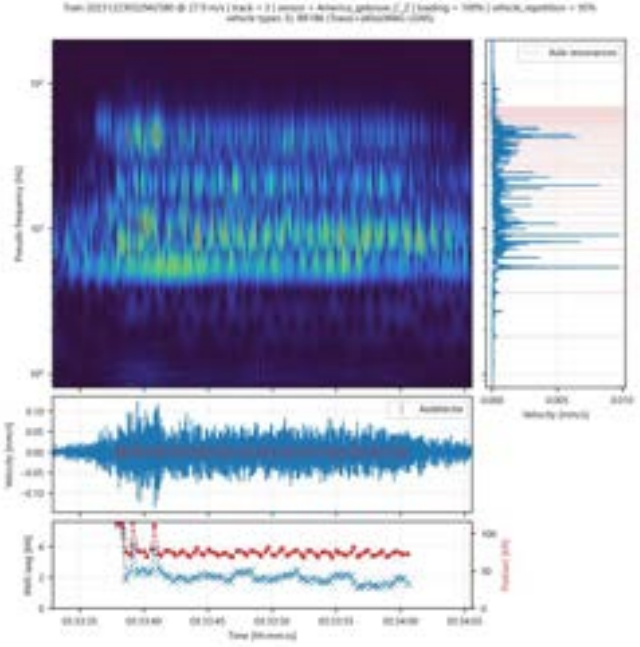
beladen, spoor 2, meetpunt zuid 25 m



onbeladen, spoor 1, meetpunt gebouw op +/- 27 m



beladen, spoor 2, meetpunt gebouw op +/- 27 m



4-assige wagons type WAG SHIMMNS1

Afbeelding 4.8 toont de tijd-frequentie plots voor de trillingssnelheid in de Z-richting op 5 meetpunten voor twee verschillende passages van goederentreinen met 4-assige wagons (type WAG SHIMMNS1). De linker kolom toont een passage op spoor 1 met beladen wagons en de rechter kolom toont een passage op spoor 2 met onbeladen wagons. De interne as-afstanden van de wagons zijn 1,8 - 5,2 - 1,8 meter en de afstand tussen twee wagons is 3,25 meter. De wagonlengte is dus ongeveer gelijk aan 12,05 meter. Bij een snelheid van 28,3 m/s en 23,8 m/s zijn de (theoretische) dominante frequenties van de aslasten gelijk aan een integer meervoud van respectievelijk 2,35 Hz en 1,98 Hz.

Voor beide passages komen de dominante frequenties van het trillingssignaal overeen met de frequenties van de aslasten, al zijn niet alle frequenties aanwezig en varieert de frequentie inhoud per meetpunt. Voor de meetpunten dicht bij het spoor zijn de frequenties rond 40 tot 50 Hz het meest dominant, terwijl voor de meetpunten verder van het spoor de dominante frequenties verschuiven naar lagere frequenties. De dominante frequenties rond 40 tot 50 Hz worden veroorzaakt door de dwarsliggers, aangezien de ‘dwarsligger frequentie’ in hetzelfde frequentiebereik ligt voor een dwarsligger afstand van 0,6 meter in combinatie met de rijsnelheid van de trein. De dominante frequentie op grotere afstand van het spoor en in het gebouw ligt wederom rond de 5 Hz.

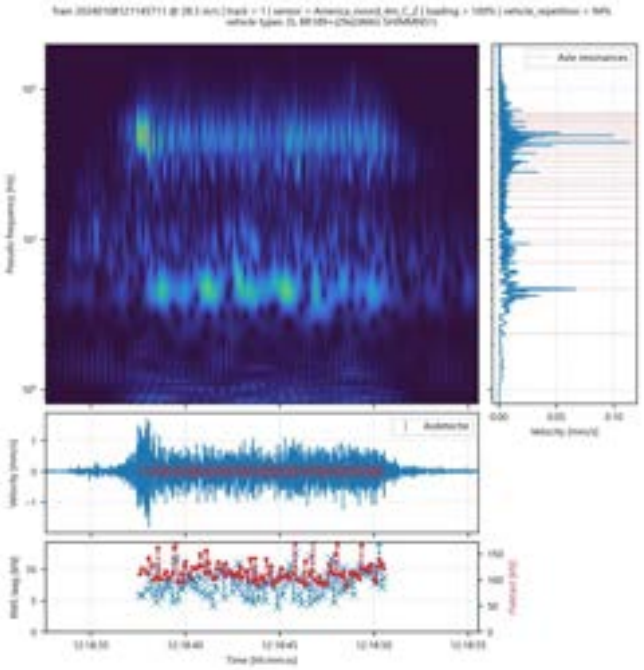
Wat verder opvalt in de onderstaande afbeeldingen is dat in het geval van onbeladen wagons het trillingsniveau van de locomotief significant hoger is dan voor de wagons. Dit verschil is het grootst op grotere afstand van het spoor. Daarnaast varieert de spectrale intensiteit redelijk veel gedurende de passage, met duidelijke verhogingen voor één of enkele specifieke wagons. De variatie van niet-materieel gebonden parameters zoals de kwaliteit van de wielen is één van de mogelijke oorzaken hiervoor. De variatie van de dynamische wiellasten (gerelateerd aan wielkwaliteit) blijkt uit de pieklast en RMS-laag waarden, weergegeven in de onderste grafiek van de afbeeldingen. Het effect van deze variatie op de trillingsniveaus is veel groter bij passages op stijve ondergrond dan op slappe ondergrond. Bij laatstgenoemde zagen we dit effect alleen in het meetpunt op 4 m uit het bereden spoor, en was het effect niet/nauwelijks zichtbaar op grotere afstand van het spoor.

Tabel 4.8 Eigenschappen 4-assige wagons (WAG SHIMMNS1) in beschouwde treinpassages

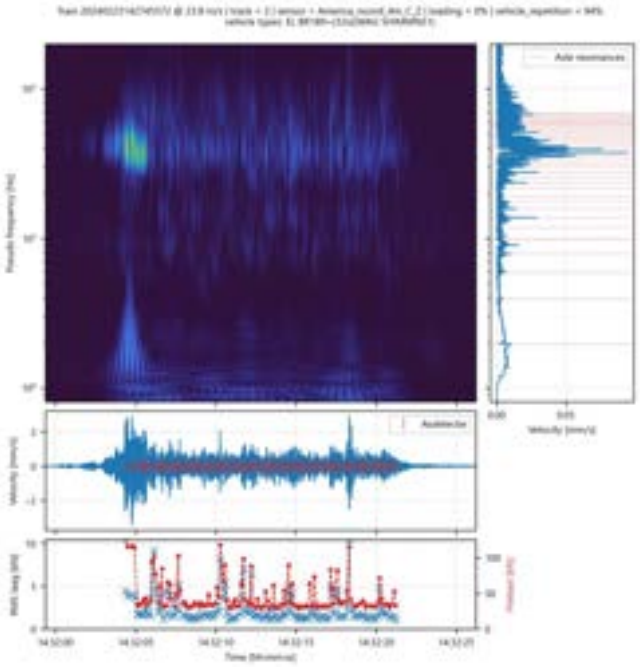
Passage	**Materieeltype**	**As-afstanden** [m]	**Wagonlengte (L)** [m]	**Snelheid (V)** [m/s]	**Theoretische fundamentele frequentie** [Hz]
spoor 1, beladen	WAG SHIMMNS1	intern: 1,8 - 5,2 - 1,8 tussen: 3,25	12,05	28,3	2,35
spoor 2, onbeladen	WAG SHIMMNS1	intern: 1,8 - 5,2 - 1,8 tussen: 3,25	12,05	23,8	1,98

Afbeelding 4.8 Tijd-frequentie plots voor trillingssnelheid in Z-richting op 5 meetpunten in America (onder elkaar) voor twee goederentrein passages met WAG SHIMMNS1 wagons, links op spoor 1 met 29 beladen wagons op 8-1-2024 en rechts op spoor 2 met 32 onbeladen wagons op 23-2-2024

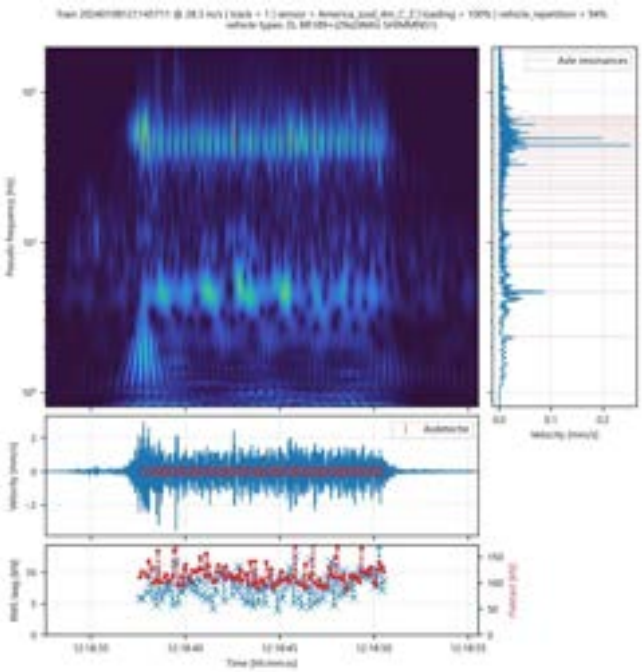
beladen, spoor 1, meetpunt noord 4 m



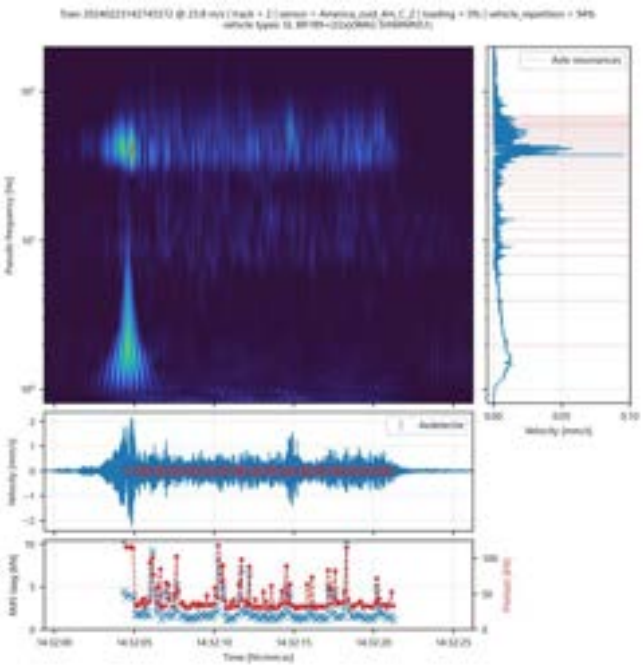
onbeladen, spoor 2, meetpunt noord 4 m



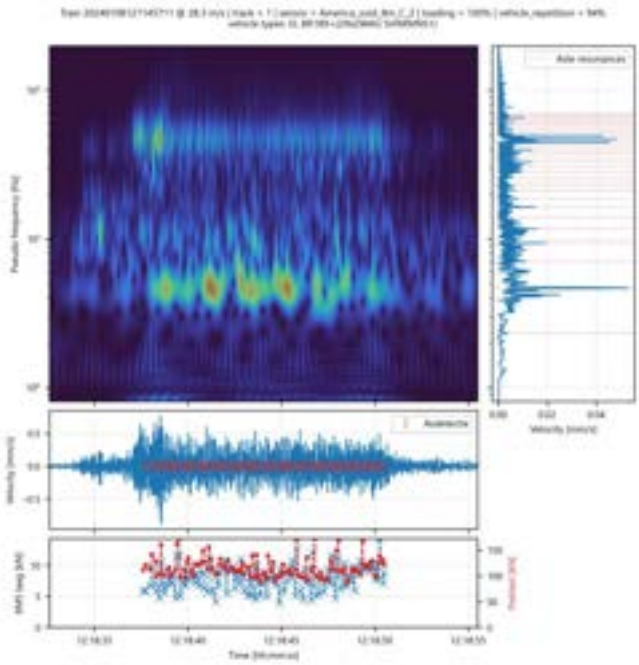
beladen, spoor 1, meetpunt zuid 4 m



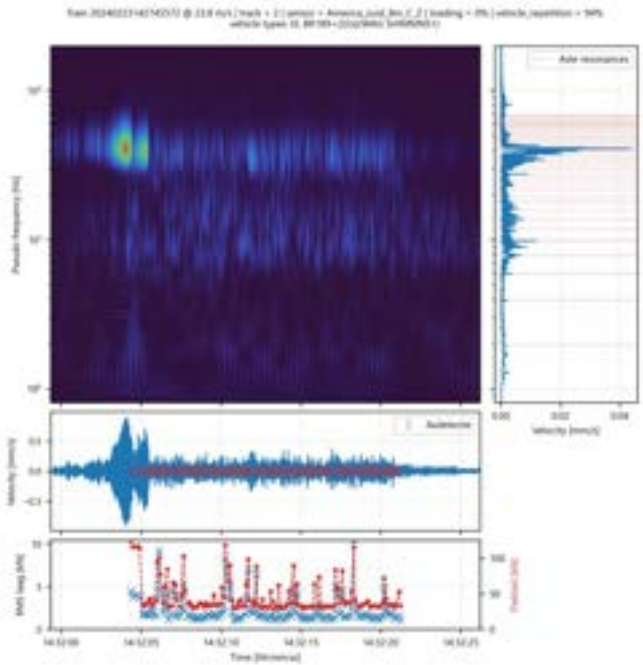
onbeladen, spoor 2, meetpunt zuid 4 m



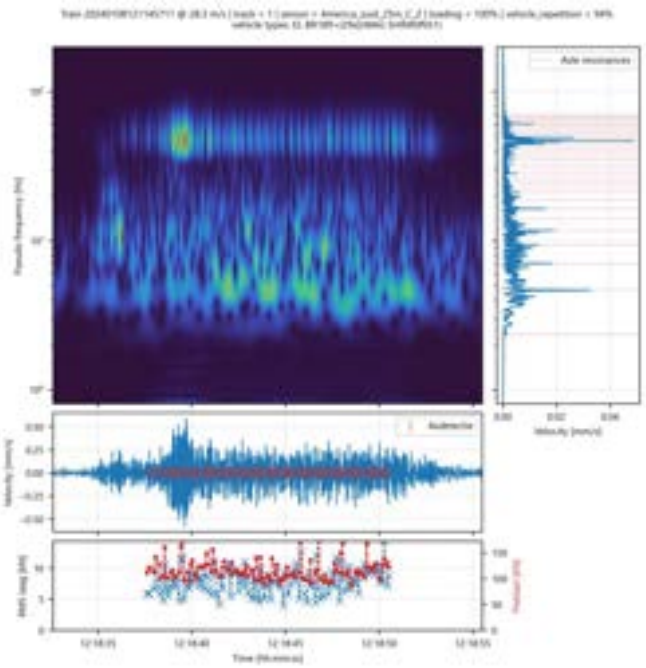
beladen, spoor 1, meetpunt zuid 8 m



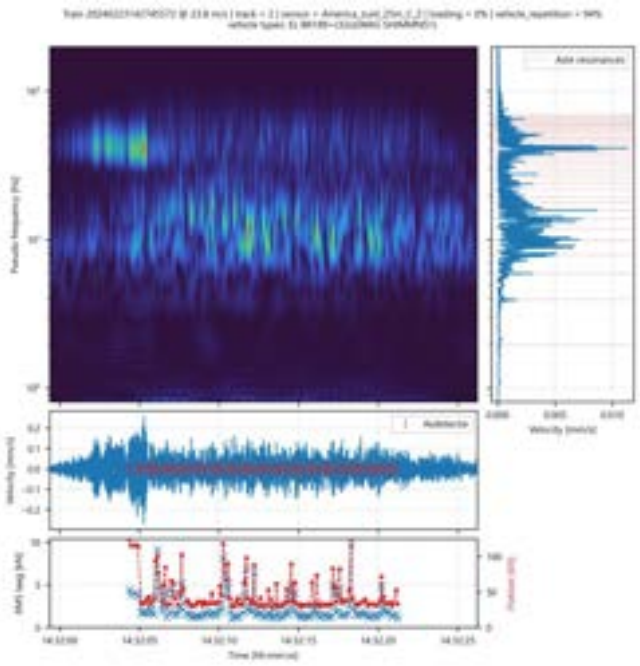
onbeladen, spoor 2, meetpunt zuid 8 m



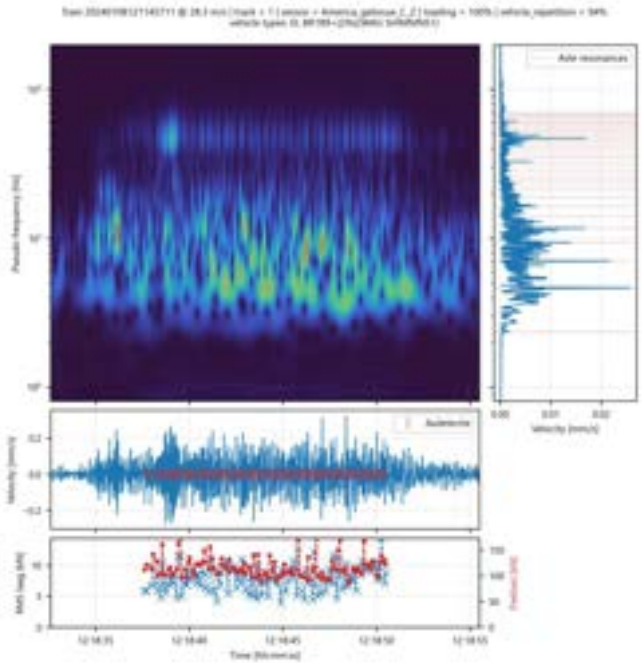
beladen, spoor 1, meetpunt zuid 25 m



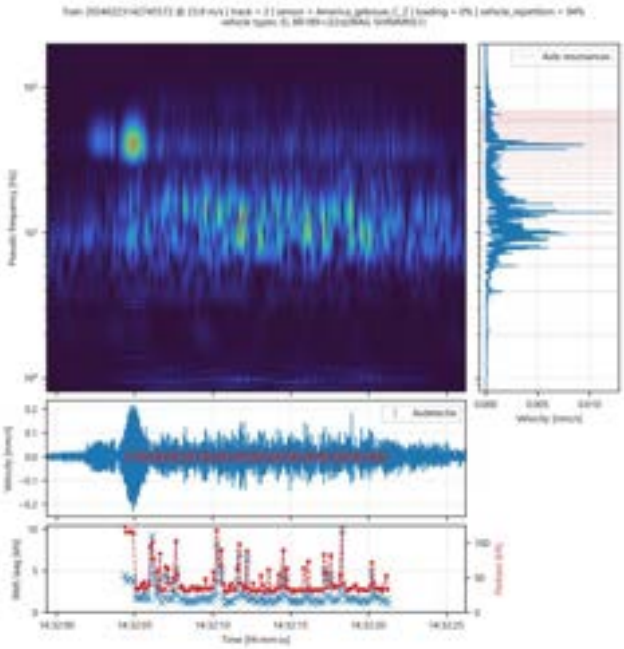
onbeladen, spoor 2, meetpunt zuid 25 m



beladen, spoor 1, meetpunt gebouw op +/- 27 m



onbeladen, spoor 2, meetpunt gebouw op +/- 27 m



4-assige wagons type WAG FACCS/TAGNPPS(1)

Afbeelding 4.9 toont de tijd-frequentie plots voor de trillingssnelheid in de Z-richting op 5 meetpunten voor twee verschillende passages van goederentreinen met 4-assige bulkwagons (type WAG FACCS/TAGNPPS(1)). De linker kolom toont een passage op spoor 1 met onbeladen wagons en de rechter kolom toont een passage op spoor 2 met beladen wagons. De interne as-afstanden van de wagons zijn 1,8 - 5,2 - 1,8 meter en de afstand tussen twee wagons is 3,25 meter. De wagonlengte is dus ongeveer gelijk aan 12,05 meter. Bij een snelheid van 28,3 m/s en 23,8 m/s zijn de (theoretische) dominante frequenties van de aslasten gelijk aan een integer meervoud van respectievelijk 2,35 Hz en 1,98 Hz.

Afbeelding 4.9 toont de tijd-frequentie plots voor de trillingssnelheid in de Z-richting op 5 meetpunten voor twee verschillende passages van goederentreinen met 4-assige bulkwagons. De linker kolom toont een passage op spoor 1 met onbeladen wagons van het type WAG FALNS5 met interne as-afstanden van 1,8-5,8-1,8 meter en een afstand tussen twee wagons van 3,2 meter. De wagonlengte is dus ongeveer gelijk aan 12,6 meter en bij een snelheid van 28,1 m/s zijn de theoretische dominante frequenties van de aslasten gelijk aan:

$$f = n \cdot \frac{V}{L} \approx n \cdot 2{,}23\ Hz$$

De rechter kolom toont een passage op spoor 2 met beladen wagons van het type WAG FACCS/TAGNPPS(1) met interne as-afstand van 1,8-8,0-1,8 meter en een afstand tussen twee wagons van 3,2 meter. De wagonlengte is dus ongeveer gelijk aan 14,8 meter en bij een snelheid van 27,8 m/s zijn de theoretische dominante frequenties van de aslasten gelijk aan:

$$f = n \cdot \frac{V}{L} \approx n \cdot 1{,}88\ Hz$$

Voor beide passages komen de dominante frequenties van het trillingssignaal overeen met de frequenties van de aslasten, al zijn niet alle frequenties aanwezig en varieert de frequentie inhoud per meetpunt. Voor de meetpunten dichtbij het spoor zijn de frequenties rond 40 tot 50 Hz het dominantst. Op grotere afstand van het spoor verschuift deze naar lagere frequenties rond de 5 Hz. De repetitie van steeds dezelfde wagons resulteert in dominante frequenties die gerelateerd kunnen worden met de wagonlengte.

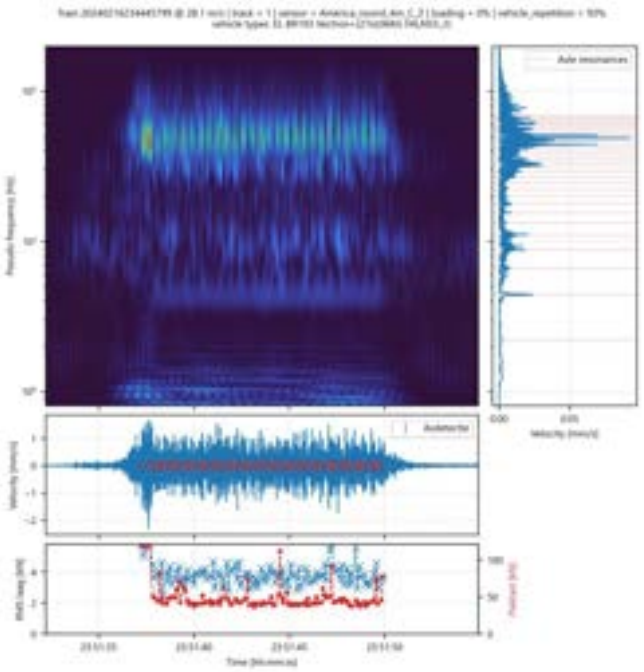
Het trillingsniveau van de wagons is redelijk uniform gedurende de passage. De wagons zijn allemaal van hetzelfde materiaaltype met vergelijkbare belading. De dynamische wiellast (pieklast en RMS-laag waarde) varieert echter enigszins over de wagons waardoor de trillingsniveaus meer variëren.

Tabel 4.9 Eigenschappen 4-assige wagons in beschouwde treinpassages

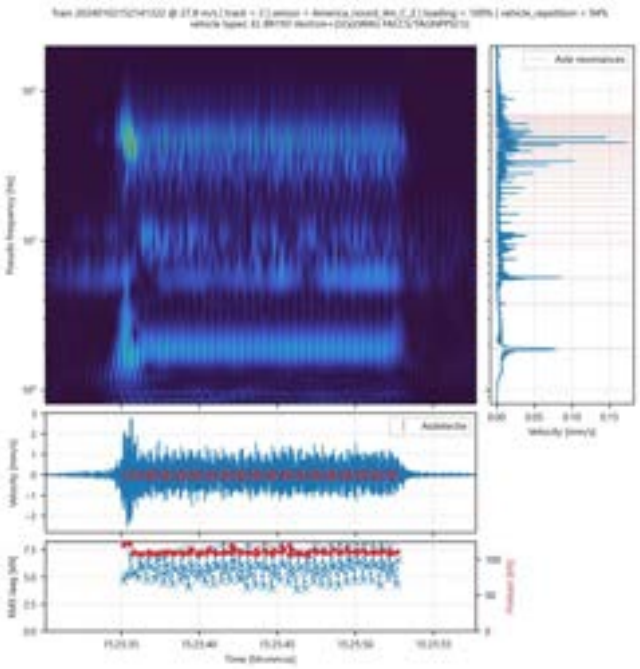
Passage	**Materieeltype**	**As-afstanden** [m]	**Wagonlengte (L)** [m]	**Snelheid (V)** [m/s]	**Theoretische fundamentele frequentie** [Hz]
spoor 1, onbeladen	WAG FALNS5_2	intern: 1,8-5,8-1,8 tussen: 3,2	12,6	28,1	2,23
spoor 2, beladen	WAG FACCS/TAGNPPS(1)	intern: 1,8-8,0-1,8 tussen: 3,2	14,8	27,8	1,88

Afbeelding 4.9 Tijd-frequentie plots voor trillingssnelheid in Z-richting op 5 meetpunten in America (onder elkaar) voor twee goederentrein passages, links op spoor 1 met 27 onbeladen FALNS5 wagons op 2-1-2024 en rechts op spoor 2 met 32 beladen WAG FACCS/TAGNPPS(1) wagons op 2-1-2024

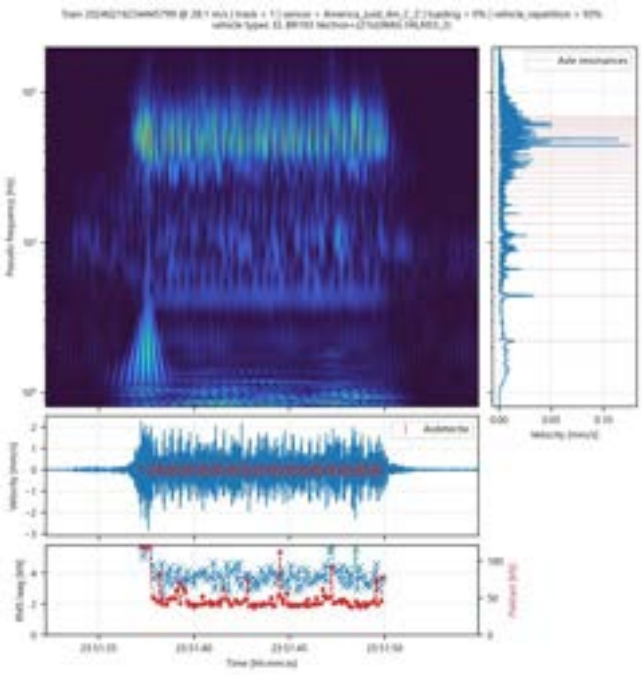
onbeladen, spoor 1, meetpunt noord 4 m



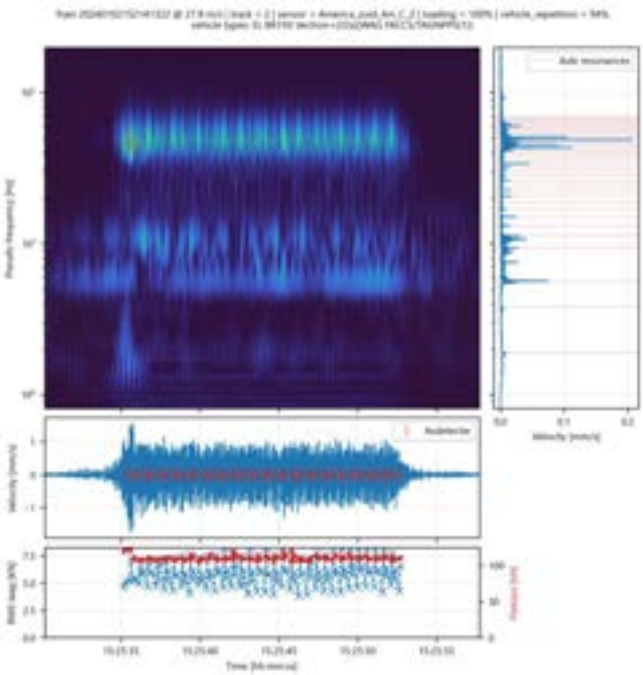
beladen, spoor 2, meetpunt noord 4 m



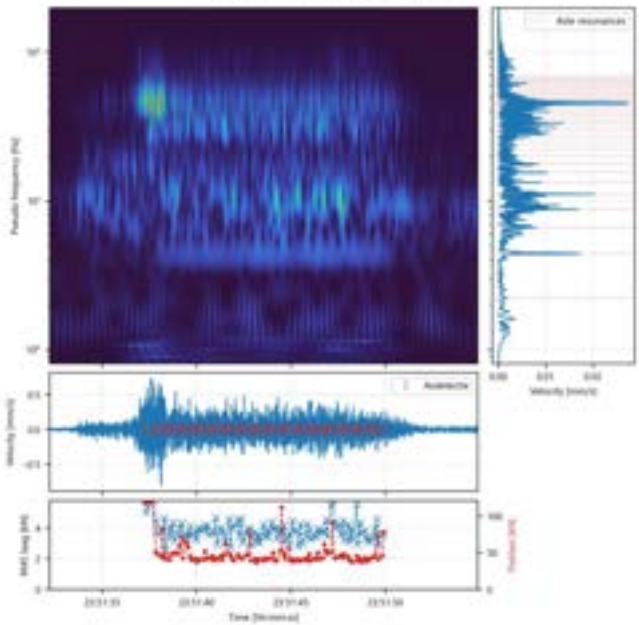
onbeladen, spoor 1, meetpunt zuid 4 m



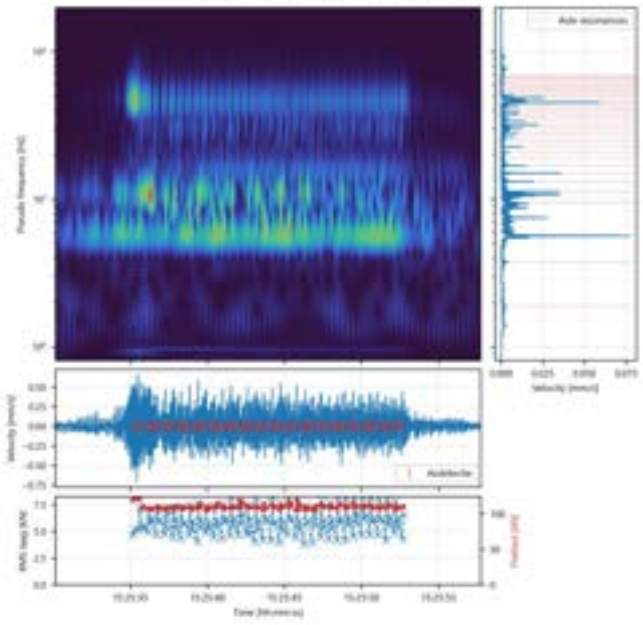
beladen, spoor 2, meetpunt zuid 4 m



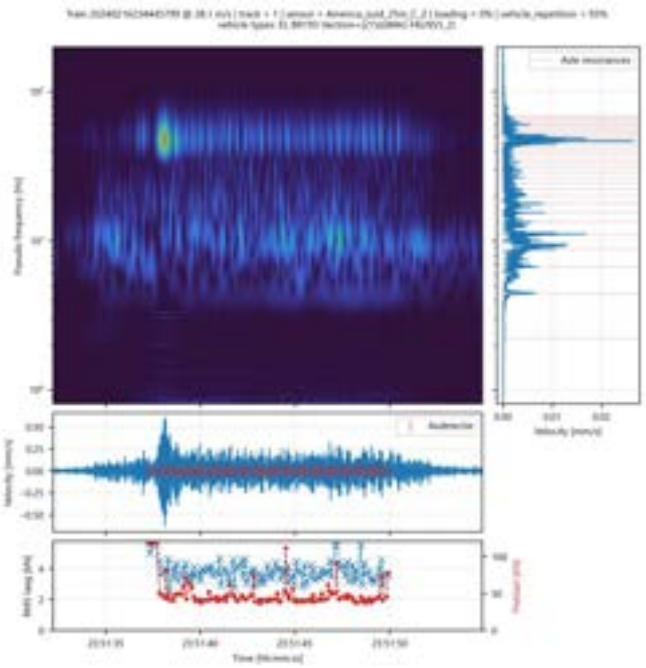
onbeladen, spoor 1, meetpunt zuid 8 m



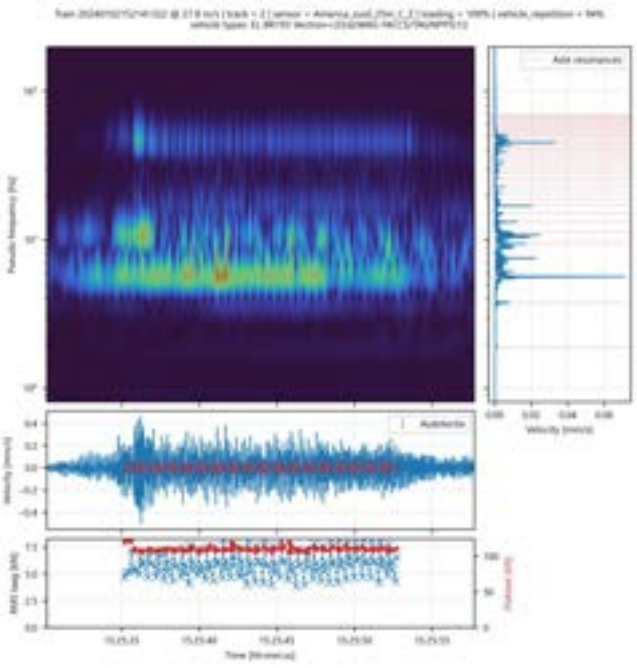
beladen, spoor 2, meetpunt zuid 8 m



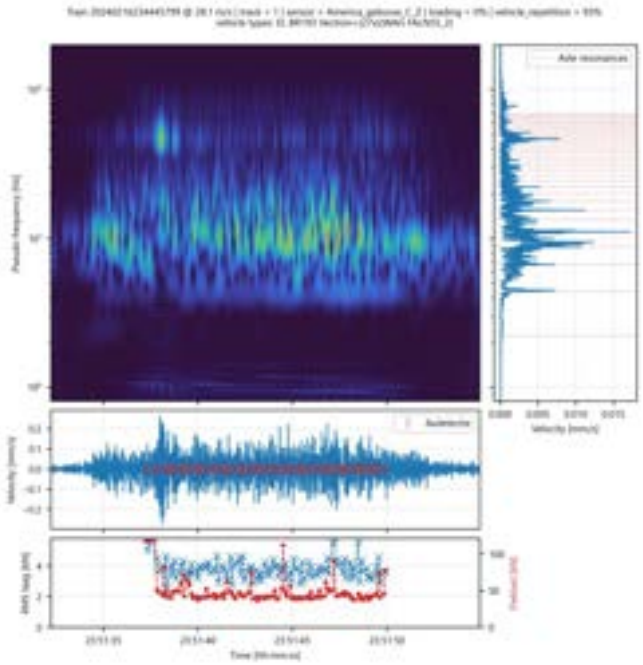
onbeladen, spoor 1, meetpunt zuid 25 m



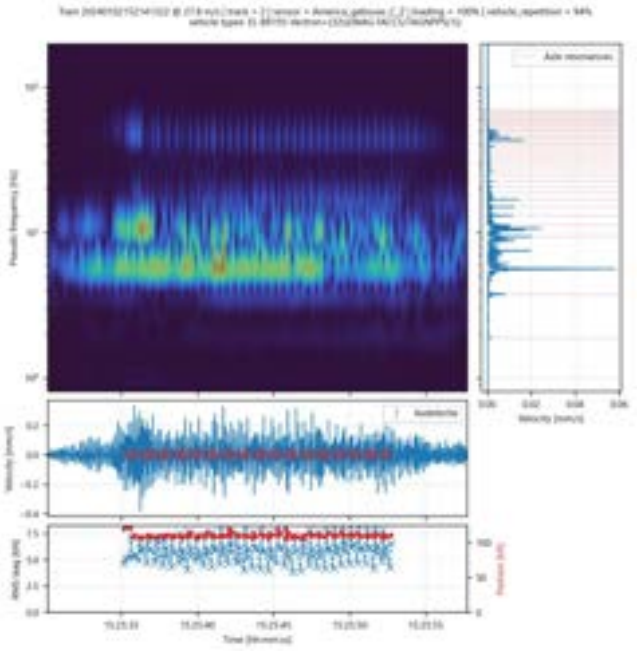
beladen, spoor 2, meetpunt zuid 25 m



onbeladen, spoor 1, meetpunt gebouw op +/- 27 m



beladen, spoor 2, meetpunt gebouw op +/- 27 m



6-assige wagons type WAG SGGRSS

Afbeelding 4.10 toont de tijd-frequentie plots voor de trillingssnelheid in de Z-richting op 5 meetpunten voor twee verschillende passages van goederentreinen met identieke wagons (type WAG SGGRSS). De linker kolom toont een passage op spoor 2 met half beladen en onbeladen wagons en de rechter kolom toont een passage op spoor 2 met onbeladen wagons. De interne as-afstanden van de wagons zijn 1,8 - 8,6 - 1,8 - 8,6 - 1,8 meter en de afstand tussen twee wagons is 3,8 meter. De wagonlengte is dus ongeveer gelijk aan 26,4 meter. Bij een snelheid van 23,3 m/s en 27,8 m/s zijn de (theoretische) dominante frequenties van de aslasten gelijk aan een integer meervoud van respectievelijk 0,88 Hz en 1,05 Hz.

Voor beide passages komen de dominante frequenties van het trillingssignaal overeen met de frequenties van de aslasten, al zijn niet alle frequenties aanwezig en varieert de frequentie inhoud per meetpunt. De fundamentele frequentie rond 0,9-1,0 Hz is echter niet zichtbaar in het trillingssignaal aangezien de signalen zijn gefilterd met een highpass filter met cutoff frequentie van 1,2 Hz. Dit filter is toegepast om laagfrequente ruis te verwijderen na de conversie van versnellingen naar snelheid met behulp van numerieke integratie. De frequentie tussen 40-50 Hz zijn in de meeste meetpunten het nadrukkelijkst aanwezig gedurende de gehele treinpassage.

Bij de treinpassage met beladen en onbeladen wagons (linker kolom) is dichtbij het spoor een duidelijk verschil in trillingsniveau zichtbaar voor de beladen en onbeladen wagons. Verder van het spoor is dit effect nauwelijks meer zichtbaar en is het trillingsniveau redelijk uniform. Dit is een duidelijk verschil met passages op slappe bodem zoals beschreven in de vorige paragraaf.

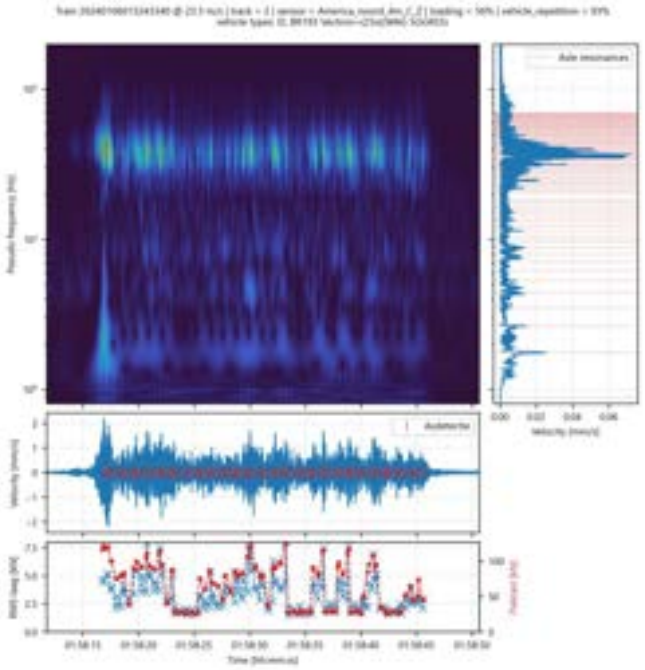
In de passage met onbeladen wagons (rechter kolom) is het trillingsniveau redelijk uniform gedurende de passage, met uitzondering van de momenten waarop een wagon met verhoogde dynamische wiellast passeert.

Tabel 4.10 Eigenschappen 4-assige wagons in beschouwde treinpassages

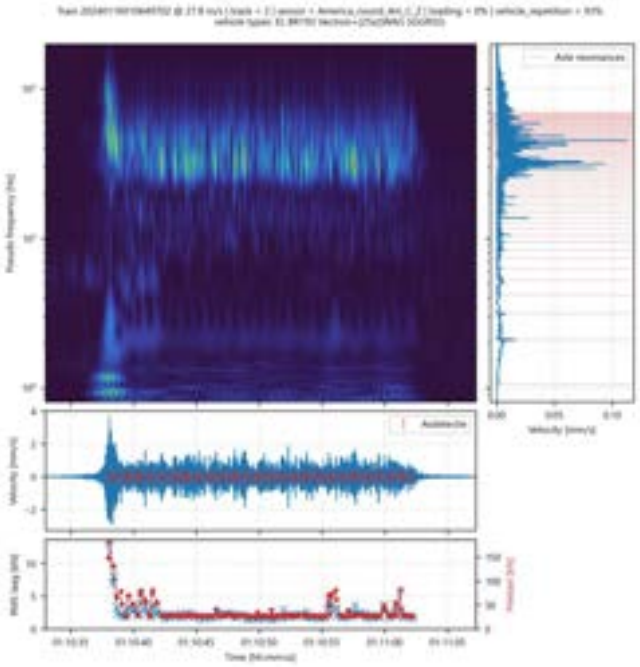
Passage	**Materieeltype**	**As-afstanden** [m]	**Wagonlengte (L)** [m]	**Snelheid (V)** [m/s]	**Theoretische fundamentele frequentie** [Hz]
spoor 2, beladen/onbeladen	WAG SGGRSS	intern: 1,8-8,6-1,8-8,6-1,8 tussen: 3,8	26,4	23,3	0,88
spoor 2, onbeladen	WAG SGGRSS	intern: 1,8-8,6-1,8-8,6-1,8 tussen: 3,8	26,4	27,8	1,05

Afbeelding 4.10 Tijd-frequentie plots voor trillingssnelheid in Z-richting op 5 meetpunten in America (onder elkaar) voor twee goederentrein passages met WAG SGGRSS wagons, links op spoor 1 met 14/11 beladen/onbeladen wagons op 6-1-2024 en rechts op spoor 2 met 25 onbeladen wagons op 16-1-2024

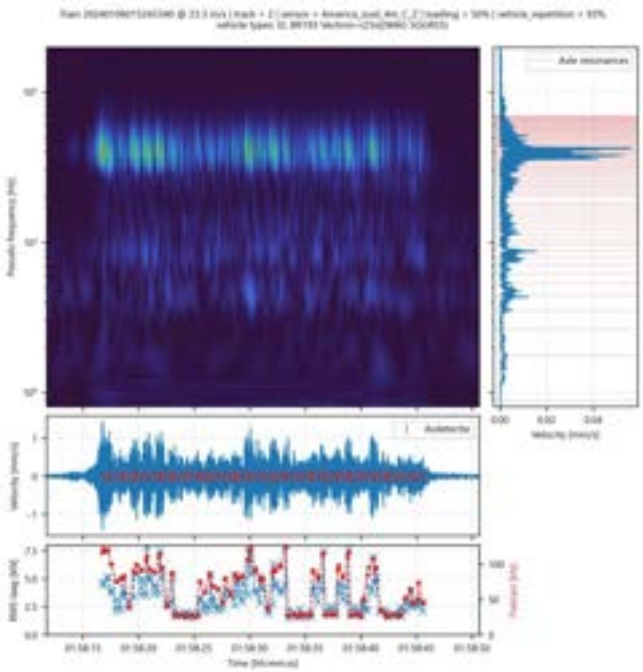
beladen/onbeladen, spoor 2, meetpunt noord 4 m



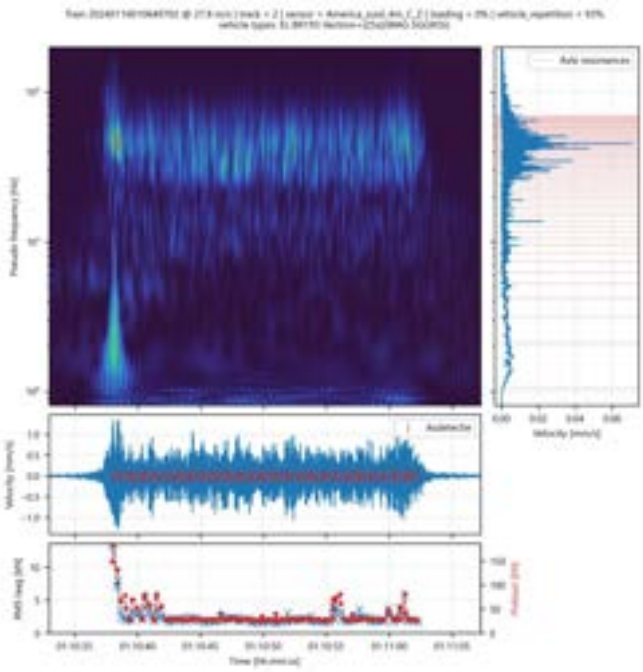
onbeladen, spoor 2, meetpunt noord 4 m



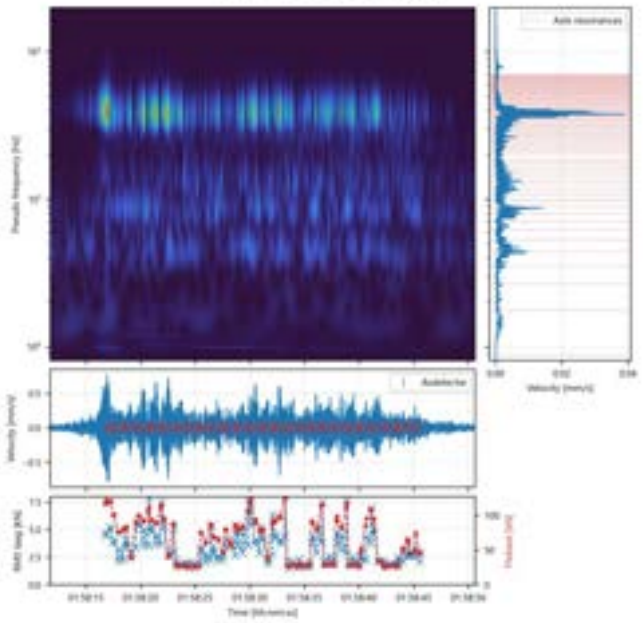
beladen, spoor 1, meetpunt zuid 4 m



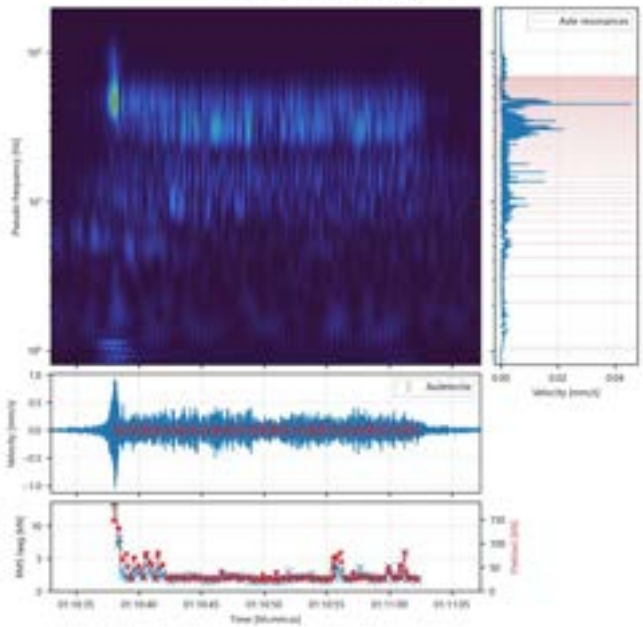
onbeladen, spoor 2, meetpunt zuid 4 m



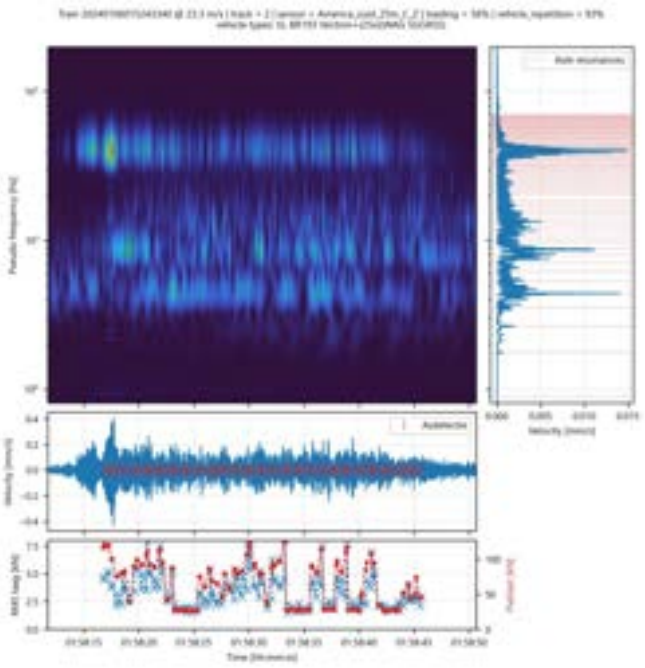
beladen, spoor 1, meetpunt zuid 8 m



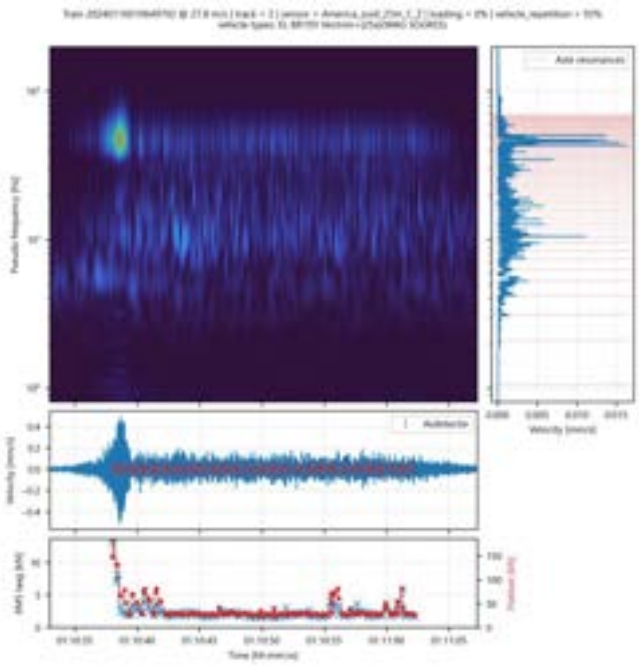
onbeladen, spoor 2, meetpunt zuid 8 m



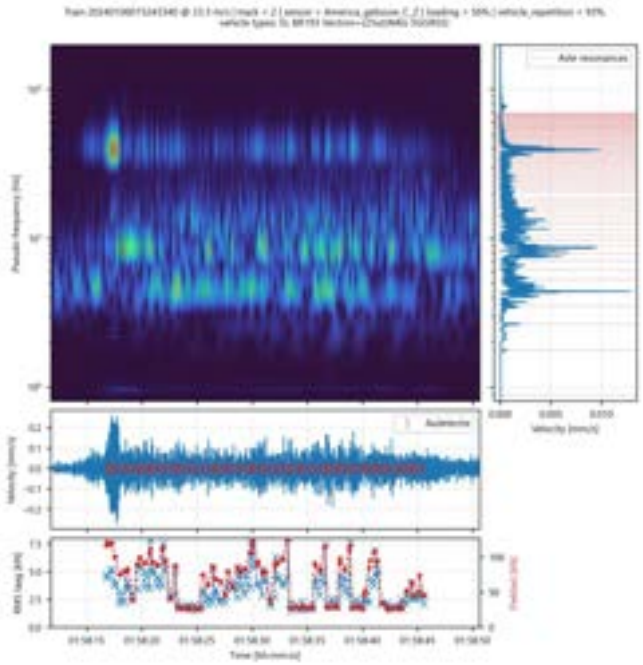
beladen, spoor 1, meetpunt zuid 25 m



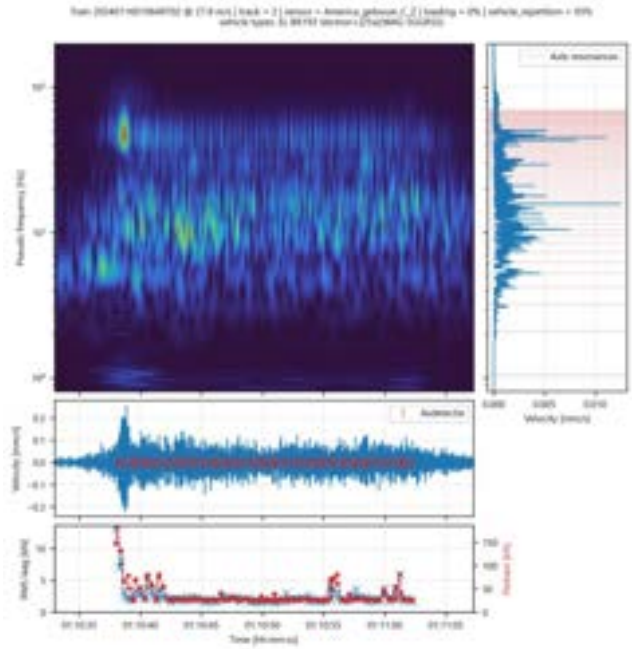
onbeladen, spoor 2, meetpunt zuid 25 m



beladen, spoor 1, meetpunt gebouw op +/- 27 m



onbeladen, spoor 2, meetpunt gebouw op +/- 27 m



4.1.3 Samenvatting resultaten tijd-frequentie analyse

In de voorgaande paragrafen zijn 20 passages van goederentreinen (12 op slappe bodem en 8 op stijve bodem) geanalyseerd in het tijds- en frequentiedomein. De belangrijkste resultaten zijn hieronder opgesomd:

- de dominante frequenties van het trillingssignaal komen over het algemeen goed overeen met de frequenties van de aslasten, voor passages op zowel slappe als stijve ondergrond. Echter, niet alle frequenties zijn aanwezig/even dominant in de trillingssignalen en de amplitudes van de dominante frequenties varieert per meetpunt. Wanneer de goederentrein uit veel verschillende wagontypes bestaat is het amplitude spectrum vaak veel grilliger en is de relatie met de aslast frequenties minder duidelijk;
- op slappe ondergrond is de fundamentele aslast-frequentie in de meeste gevallen het dominantst in het meetpunt op 4 meter van het bereden spoor. Deze frequentie is gerelateerd aan de wagonlengte via $f = V/L$, waarin V de snelheid van de trein is en L de lengte van de wagon. In de andere meetpunten is deze frequentie vaak niet of nauwelijks aanwezig;
- op slappe ondergrond is in de meeste meetpunten de frequentie rond 4-5 Hz (bij snelheden van 23 tot 28 m/s) het dominantst gedurende de gehele treinpassage. Op stijve ondergrond is dit ook zichtbaar, maar dan voornamelijk voor de meetpunten op grotere afstand van het spoor. Op slappe ondergrond is in de meetpunten op 4 en 8 m van het spoor energie aanwezig in frequenties beneden 4 Hz, maar niet op grotere afstanden. Dit is vermoedelijk het gevolg van de cut-off frequentie behorende bij golfvoortplanting in de ondiepe slappe lagen, welke kan worden geschat op basis van de basis golfvergelijkingen, sonderingen en parameter correlaties;
- op slappe ondergrond zien we in sommige gevallen accumulatie van energie bij repetitie van dezelfde wagontypes en belading. Het trillingsniveau neemt in deze gevallen geleidelijk toe gedurende de passage. Dit effect is niet aanwezig bij de passages op stijve ondergrond;
- op slappe ondergrond resulteert de afwisseling van beladen en onbeladen wagons een sterke variatie in trillingsniveau. Voor de situatie waarbij een groep beladen wagons gevolgd wordt door een groep onbeladen wagons zien we een duidelijke toename in trillingsniveau rondom de overgang van beladen naar onbeladen wagons. De variatie in trillingsniveau bij variërende beladingsgraad is minder sterk aanwezig bij passages op stijve ondergrond;
- op slappe ondergrond zien we duidelijke verschillen in trillingsniveau en dominante frequenties bij een combinatie van verschillende wagontypes in een goederentrein, met name wanneer de as-afstanden van de wagons sterk verschillen. De trillingsniveaus voor langere wagons (met grotere draaistel-afstand) kunnen significant lager zijn dan de trillingsniveaus voor de kortere wagons in dezelfde trein, en met dezelfde beladingsgraad. Uit de geanalyseerde treinpassages is niet direct op te maken of de trillingsniveaus voor langere wagons over het algemeen lager zijn dan de trillingsniveaus voor kortere wagons, of dat dit effect veroorzaakt wordt door de combinatie van verschillende wagonlengtes;
- op stijve ondergrond liggen de dominante frequenties rond de 40 en 50 Hz (bij snelheden van 23 tot 28 m/s) wat ongeveer overeenkomt met de dwarsligger-frequentie.

4.2 Resultaten correlatie analyse

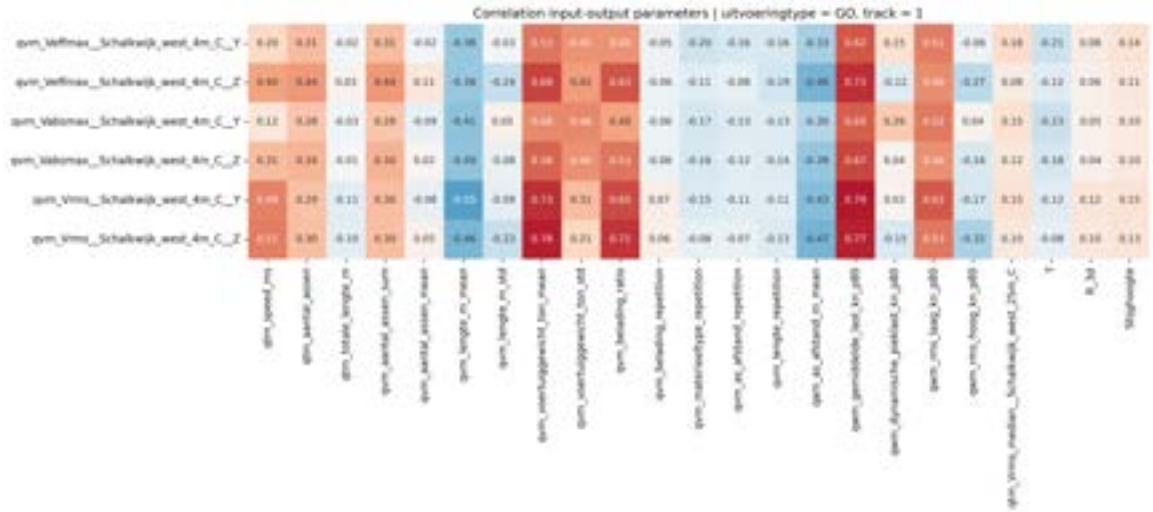
Naast de individuele passages is ook een analyse uitgevoerd op de gehele dataset voor een meetlocatie. Hierbij is de relatie tussen trillingsniveaus ($V_{abs,max}$, V_{rms}, $V_{eff,max}$) en treineigenschappen, waaronder de samenstelling van de trein onderzocht. De samenstelling van de trein of een groep wagons (wagontype en belading) is hierbij gekwantificeerd met behulp van berekeningsstappen uit paragraaf 3.2. Daarnaast worden ook 'standaard' treineigenschappen uit Quo Vadis beschouwd, zoals aantal assen, gemiddelde wagonlengte en gemiddelde gewicht.

Afbeelding 4.11 toont de lineaire correlatie coëfficiënten tussen de trillingsniveaus in het meetpunt op 4 m (westzijde) en treineigenschappen voor passages op spoor 1. Hierbij zijn de parameters (trillingsniveaus, treineigenschappen etc.) geaggregeerd over de gehele trein. Zie [1] voor een uitgebreide beschrijving van deze aanpak. De hoogste correlatie coëfficiënten zijn berekend voor de parameters gerelateerd aan het voertuiggewicht (o.a. *qvm_voertuiggewicht_ton_mean*) en voertuiglengte (o.a. *qvm_lengte_m_mean*). Het gemiddelde voertuiggewicht heeft een sterke positieve correlatie met de trillingsniveaus, en de gemiddelde lengte van de wagons heeft een matige negatieve correlatie met de trillingsniveaus. Dit komt overeen met de analyse van de individuele passages in de vorige paragraaf. De repetitie factoren voor belading en materieeltype (respectievelijk *qvm_belading_repetition* en *qvm_materieeltype_repetition*) hebben slechts een zwakke, merendeel negatieve, correlatie met de trillingsniveaus. Dit impliceert dat de invloed van deze parameters op de trillingsniveaus beperkt is.

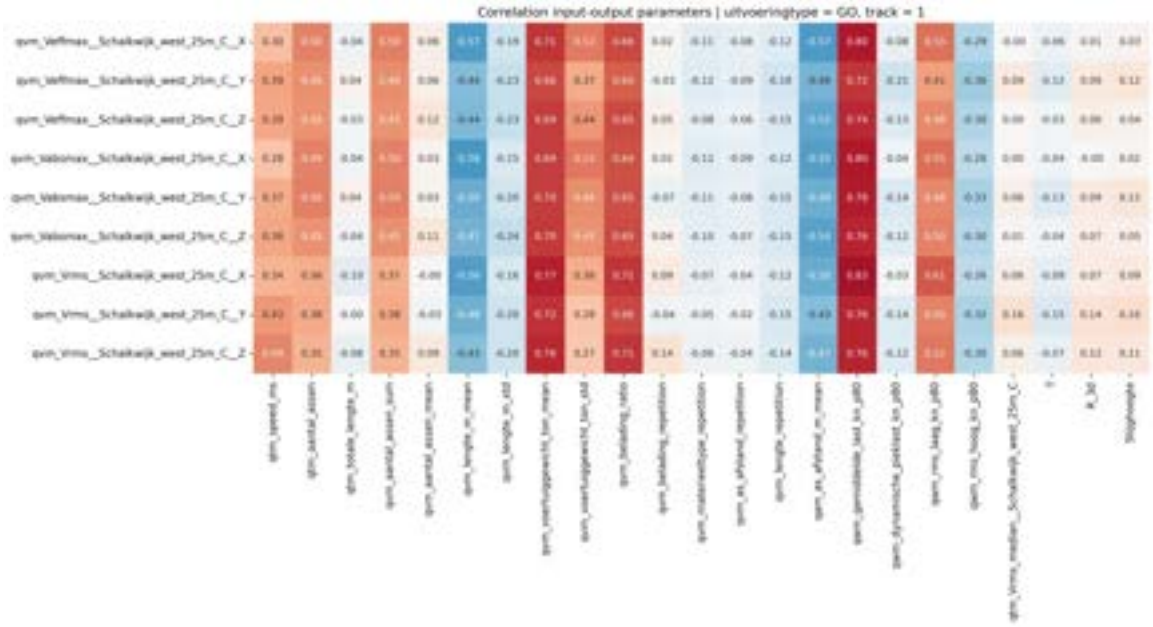
Voor de trillingsniveaus op 25 meter uit het spoor zijn vergelijkbare correlatie coëfficiënten berekend, zie afbeelding 4.12. Voor dit meetpunt hebben ook het gemiddelde voertuiggewicht en voertuiglengte de sterkste correlatie met de trillingsniveaus, en wordt slechte een zwakke correlatie gevonden voor de repetitie factoren voor materieeltype en belading.

De correlatie coëfficiënten voor de andere meetpunten en voor treinpassages op spoor 2 zijn opgenomen in bijlage III. Ook voor de andere meetpunten worden vergelijkbare correlaties gevonden.

Afbeelding 4.11 Correlatie coëfficiënten trillingsniveaus meetpunt 4 m (westzijde) voor treinpassages op spoor 1



Afbeelding 4.12 Correlatie coëfficiënten trillingsniveaus meetpunt 25 m (westzijde) voor treinpassages op spoor 1



5 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

In deze notitie is een aanvullende analyse uitgevoerd naar de invloed van treinsamenstelling op de trillingsniveaus. Hierbij is specifiek gekeken naar goederentreinen op slappe en stijve ondergrond. Er zijn twee analyses uitgevoerd:

1 tijd-frequentie analyse van individuele passages van goederentreinen met verschillende samenstellingen;
2 correlatie analyse van trillingsniveaus en treineigenschappen.

De belangrijkste conclusies van deze analyses zijn als volgt:

- de dominante frequenties van het trillingssignaal komen over het algemeen goed overeen met de frequenties van de aslasten, voor passages op zowel slappe als stijve ondergrond. Deze frequenties zijn gegeven door $f = n \cdot V/L$ waarin V de snelheid van de trein is, L de wagonlengte en n een integer groter dan nul;
- op slappe ondergrond is de frequentie rond 4-5 Hz (bij snelheden van 23 tot 28 m/s) het dominantst gedurende de gehele treinpassage. Op stijve ondergrond is dit ook zichtbaar, maar dan voornamelijk voor de meetpunten op grotere afstand van het spoor;
- op slappe ondergrond resulteert de afwisseling van beladen en onbeladen wagons en/of de combinatie van verschillende wagontypes (met verschillende as-afstanden/lengtes) in duidelijke verschillen in trillingsniveau en dominante frequenties. Beladen wagons veroorzaken over het algemeen meer trillingen dan onbeladen wagons, hetzelfde geldt voor kortere wagons ten opzichte van langere wagons. De variatie in trillingsniveau bij variërende beladingsgraad en/of materieeltype is minder sterk aanwezig bij passages op stijve ondergrond;
- op slappe ondergrond zien we in sommige gevallen accumulatie van energie bij repetitie van dezelfde wagontypes en belading. Het trillingsniveau neemt in deze gevallen geleidelijk toe gedurende de passage. Dit effect is niet aanwezig bij de passages op stijve ondergrond;
- er zijn geen duidelijke resonantie frequenties aanwezig in de trillingssignalen gemeten op slappe ondergrond die gerelateerd kunnen worden aan het aarde-baan lichaam;
- de correlatie analyses, voor meetlocatie op slappe ondergrond, laten zien dat het gemiddelde voertuiggewicht en voertuiglengte de sterkste correlaties hebben met de trillingsniveaus. De repetitie factoren voor materieeltype en belading geven slechts een zwakke correlatie.

Aanbevelingen

Naar aanleiding van deze aanvullende analyse worden de volgende aanbevelingen gedaan voor eventuele vervolgonderzoeken:

- onderzoeken van ruimtelijke variatie in trillingsniveau en overdracht bij verschillende treinsamenstellingen in 2D, zowel in richting haaks op het spoor als parallel aan het spoor. In deze notitie zijn enkel meetpunten beschouwd die in één meetraai haaks op het spoor staan. De effecten van treinsamenstelling zijn typisch een 2D probleem waardoor de gemeten trillingen, op dezelfde afstand van het spoor, een aantal meter verder significant anders kunnen zijn dan in de huidige meetpunten. Een meetopstelling met 2 of meerdere meetraaien, elk met meetpunten op verschillende afstanden uit het spoor, zou hiervoor meer geschikt zijn dan de huidige meetopstelling;
- Analyse van het effect van treinsamenstelling op de trillingsniveaus voor reizigerstreinen. De reizigerstreinen zijn niet beschouwd in deze notitie, maar bij de analyses in [1] is reeds gevonden dat de trillingsniveaus voor langere treinen van hetzelfde type; bijvoorbeeld VIRM IV versus VIRM VI, hoger ligt. Er is nog niet onderzocht of dit algemeen geldt voor langere reizigerstreinen die zijn samengesteld uit meerdere treinstellen.

6 REFERENTIES

[1] J. d. Bruijn, F. Besseling en A. Hoekstra, 'Monitoring spoortrillingen wielonderhoud - Eindrapportage,' 2024.

[2] S.-H. Ju, H.-T. Lin en J.-Y. Huang, 'Dominant frequencies of train-induced vibrations,' *Journal of Sound and Vibration,* pp. 247-259, 2009.

[3] WeBoost, 'ProRail Uniform Meetprotocol IBS Trillingen, versie 2.0, d.d. 31 augustus 2022,' 2022.

[4] S. Mallat, A wavelet Tour of Signal Processing, San Diego, CA, USA: Academic, 1999.

[5] A. Mosleh, A. Meixedo, D. Ribeiro, P. Montenegro en R. Calçada, 'Early wheel flat detection: an automatic data-driven wavelet-based approach for railways,' *Vehicle System Dynamics 61(6),* pp. 1644-1673, 2023.

[6] G. Krummenachter, C. Ong, S. Koller, S. Kobayashi en J. Buhmann, 'Wheel Defect Detection with Machine Learning,' *IEEE Transactions On Intelligent Transportation Systems, Vol. 19, No. 4,* pp. 1176-1187, 2018.

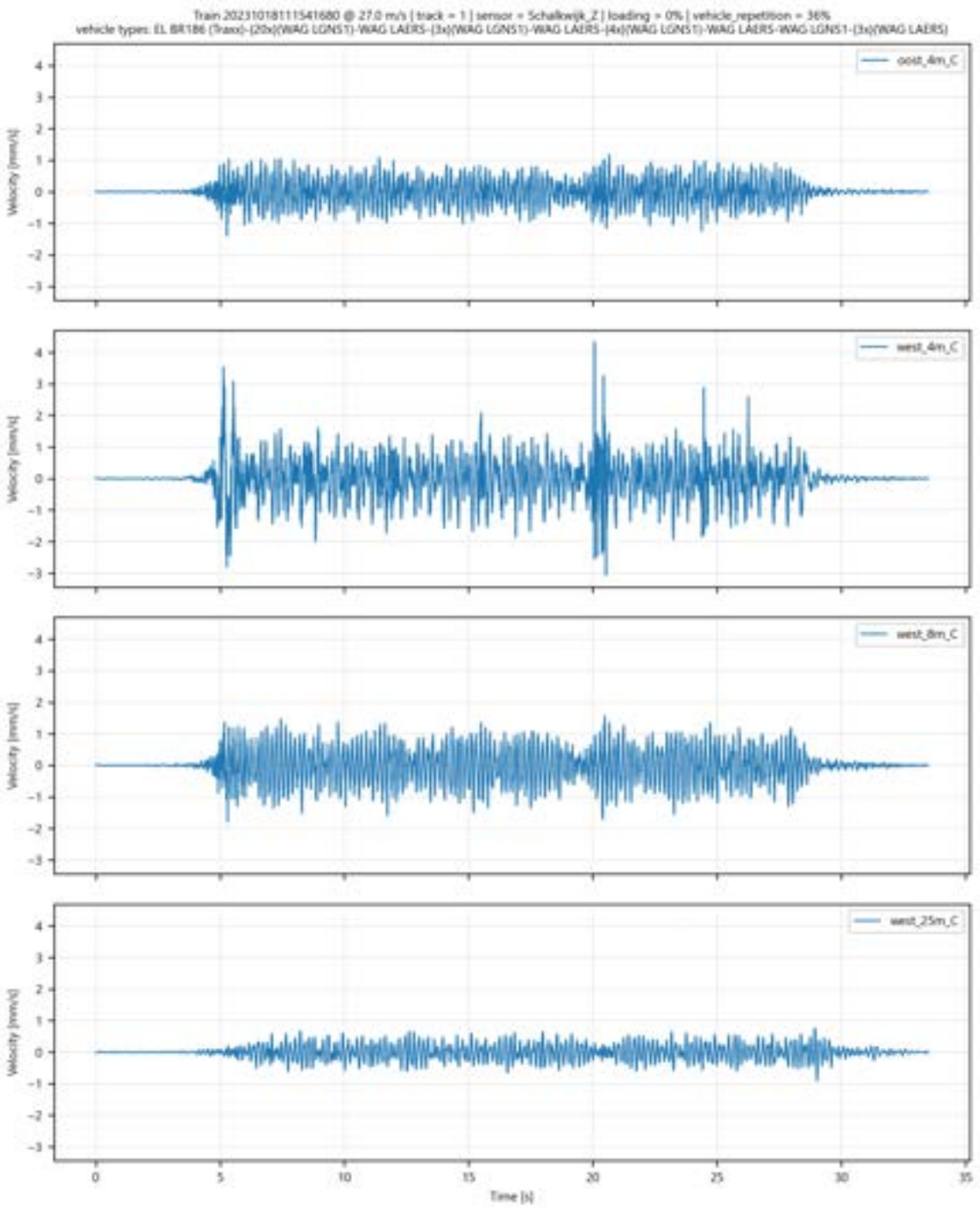
BIJLAGE: TRILLINGSSIGNALEN MEETLOCATIE SCHALKWIJK

In deze bijlage worden voor meetlocatie Schalkwijk de trillingssignalen voor verschillende treinpassages gepresenteerd in het tijdsdomein en frequentiedomein.

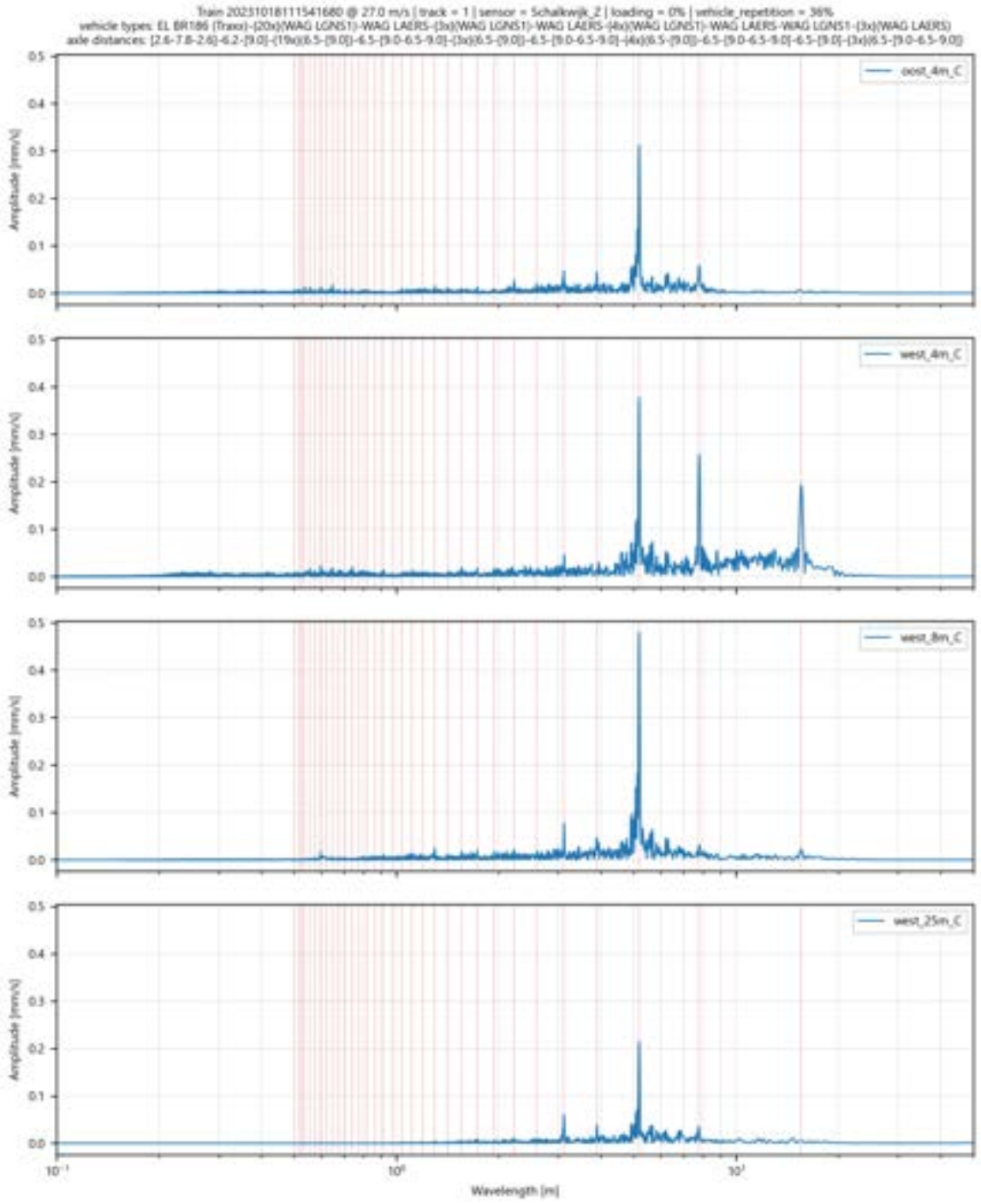
Meetlocatie Schalkwijk - spoor 1

2-assige wagons, 40 % repetitie wagons, 0 % repetitie belading

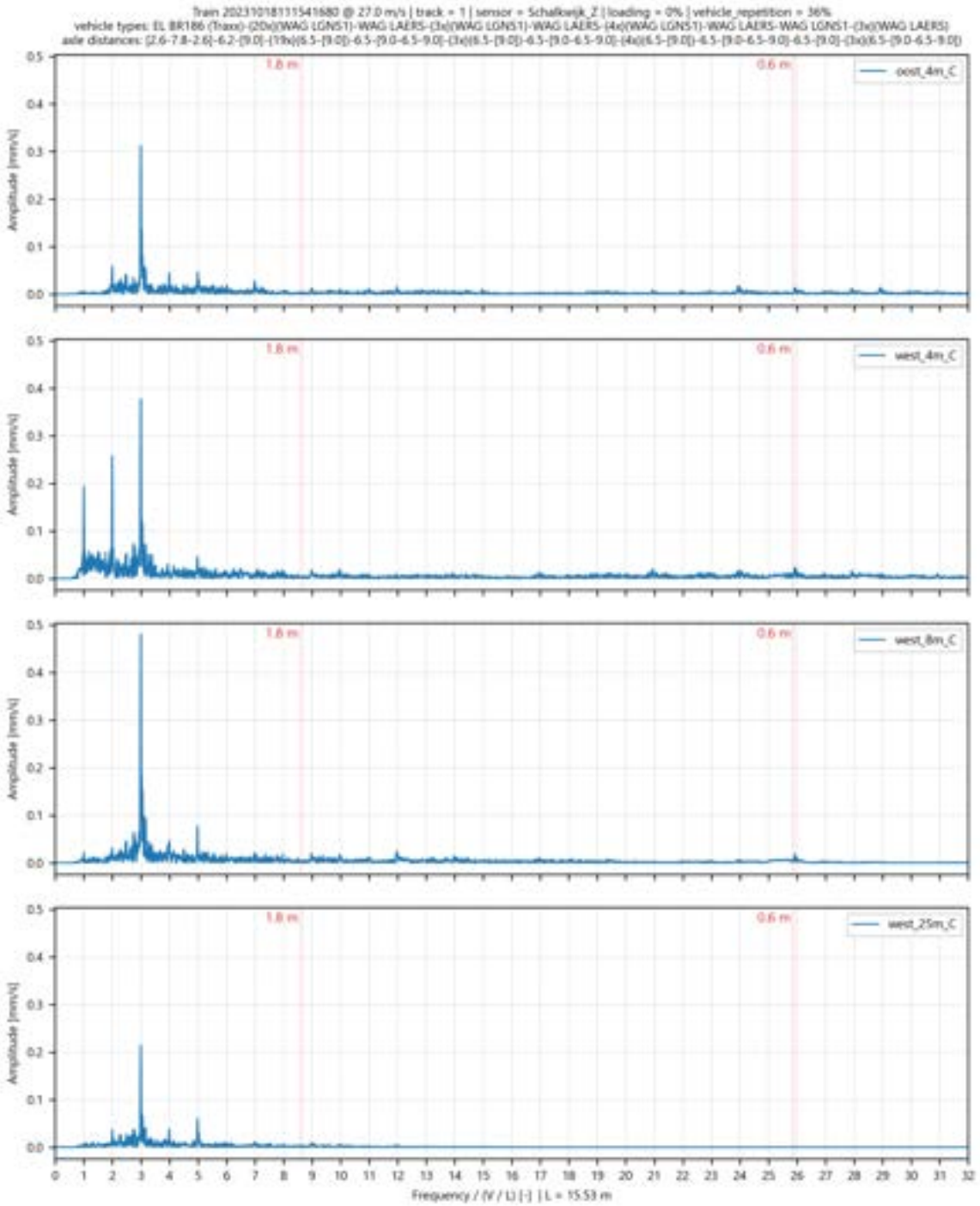
Afbeelding I.1 Trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in Schalkwijk voor goederentrein passage op spoor 1 op 18-10-2023



Afbeelding I.2 Amplitude spectrum voor trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in Schalkwijk voor goederentrein passage op spoor 1 op 18-10-2023

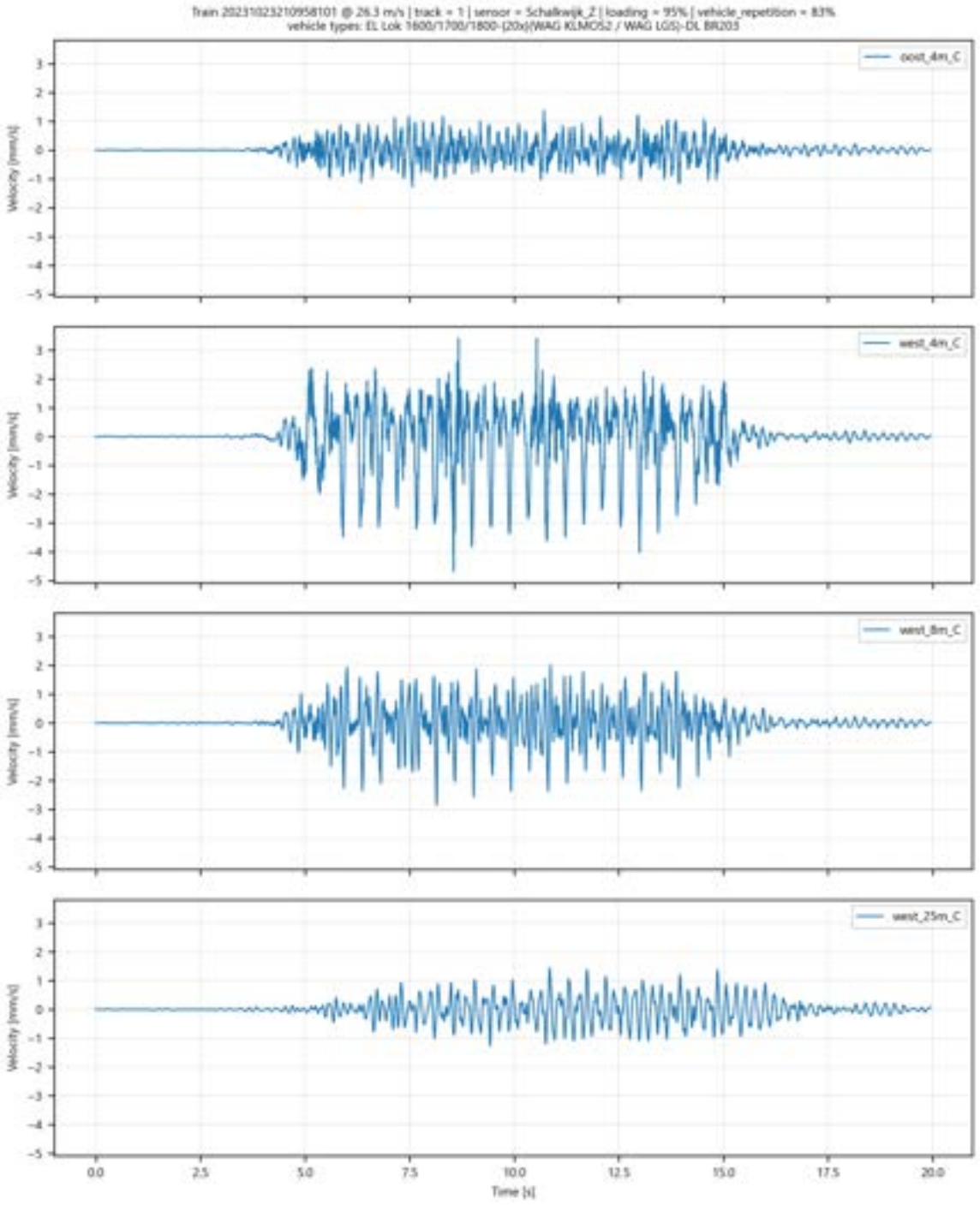


Afbeelding I.3 Genormaliseerd amplitude spectrum voor trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in Schalkwijk voor goederentrein passage op spoor 1 op 18-10-2023

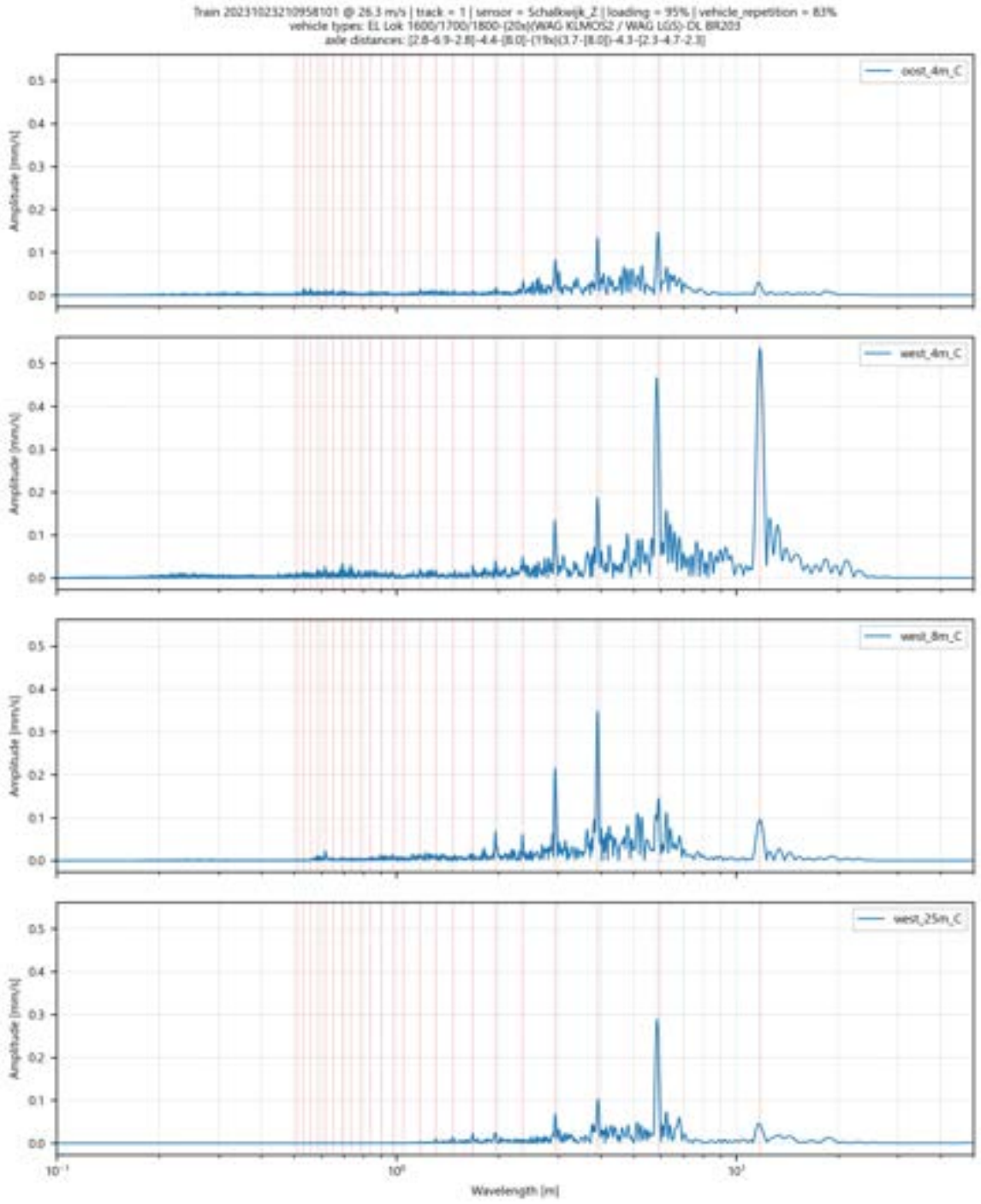


2-assige wagons, 90 % repetitie wagons, 100 % repetitie belading

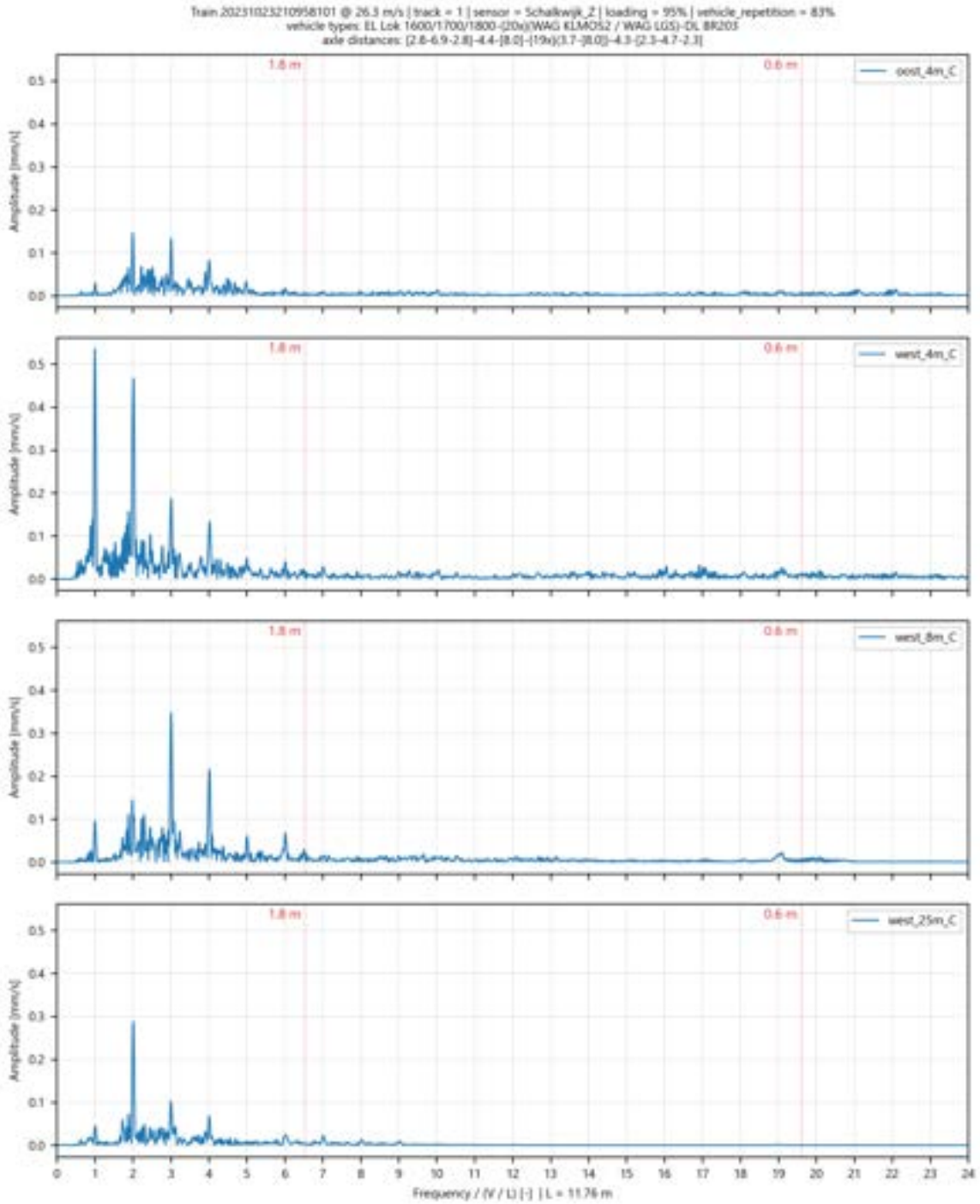
Afbeelding I.4 Trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in Schalkwijk voor goederentrein passage op spoor 1 op 23-10-2023



Afbeelding I.5 Amplitude spectrum voor trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in Schalkwijk voor goederentrein passage op spoor 1 op 23-10-2023

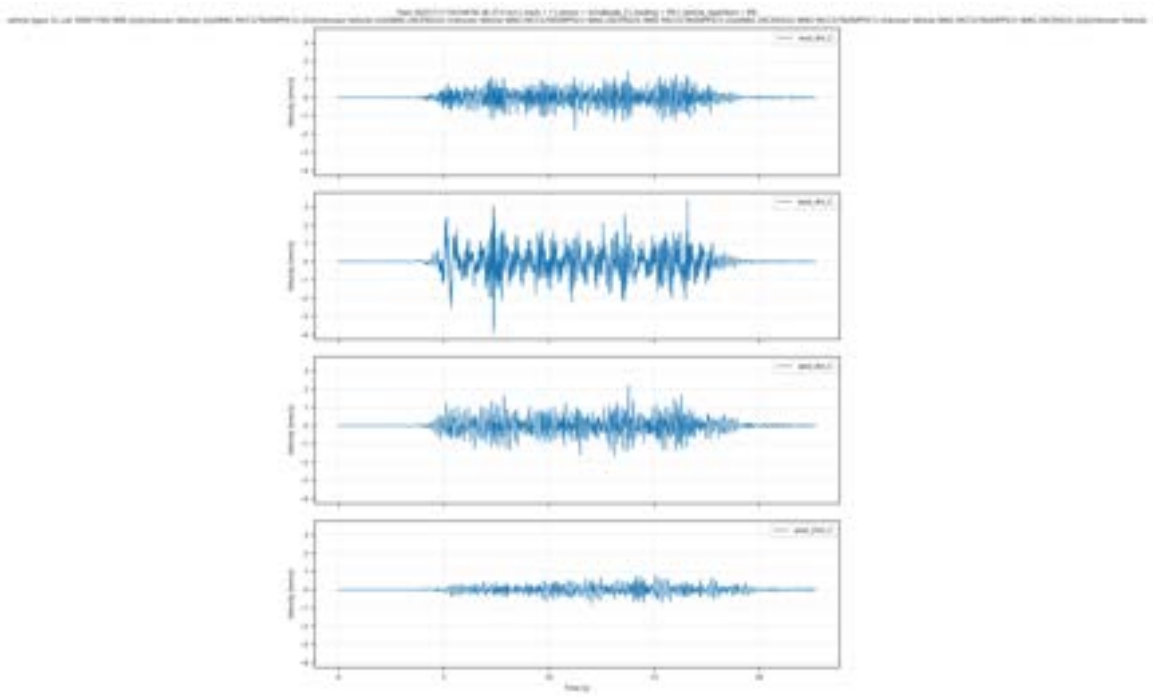


Afbeelding I.6 Genormaliseerd amplitude spectrum voor trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in Schalkwijk voor goederentrein passage op spoor 1 op 23-10-2023

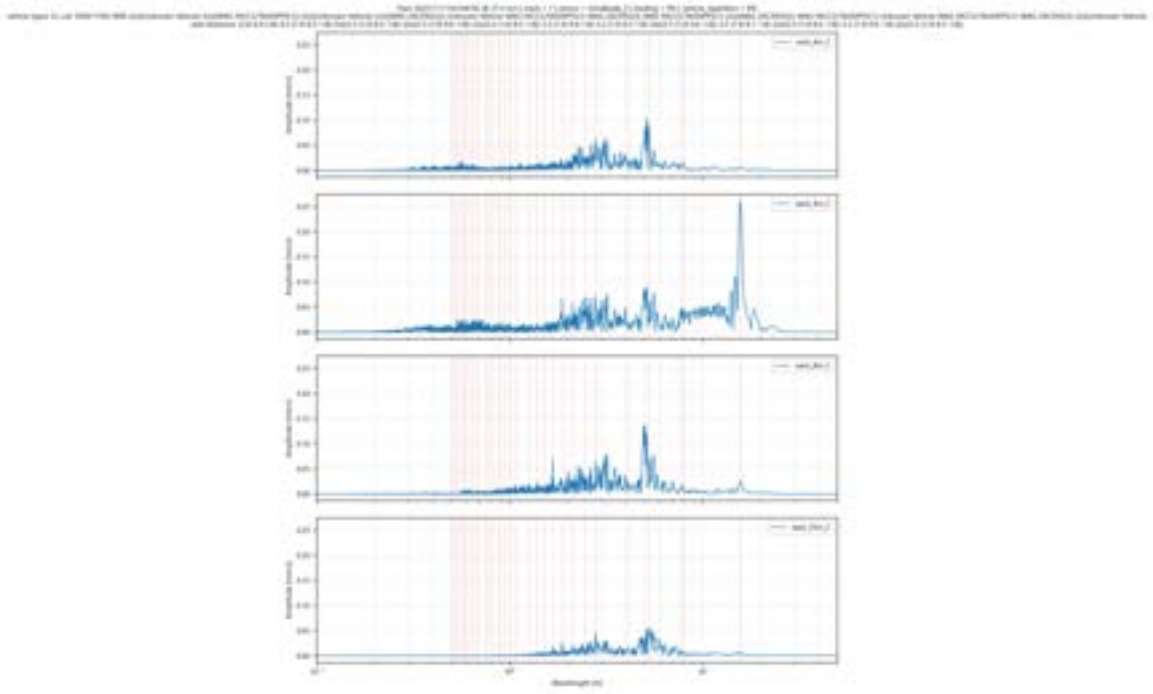


4-assige wagons, 10 % repetitie wagons, 0 % repetitie belading

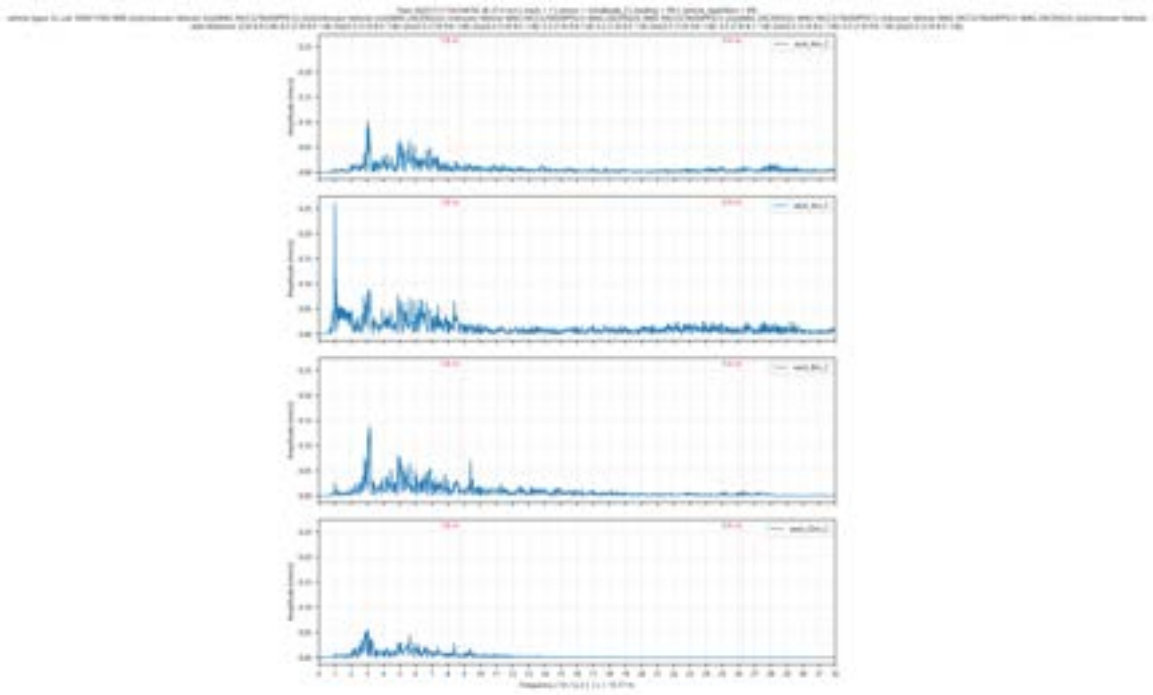
Afbeelding I.7 Trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in Schalkwijk voor goederentrein passage op spoor 1 op 11-11-2023



Afbeelding I.8 Amplitude spectrum voor trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in Schalkwijk voor goederentrein passage op spoor 1 op 11-11-2023

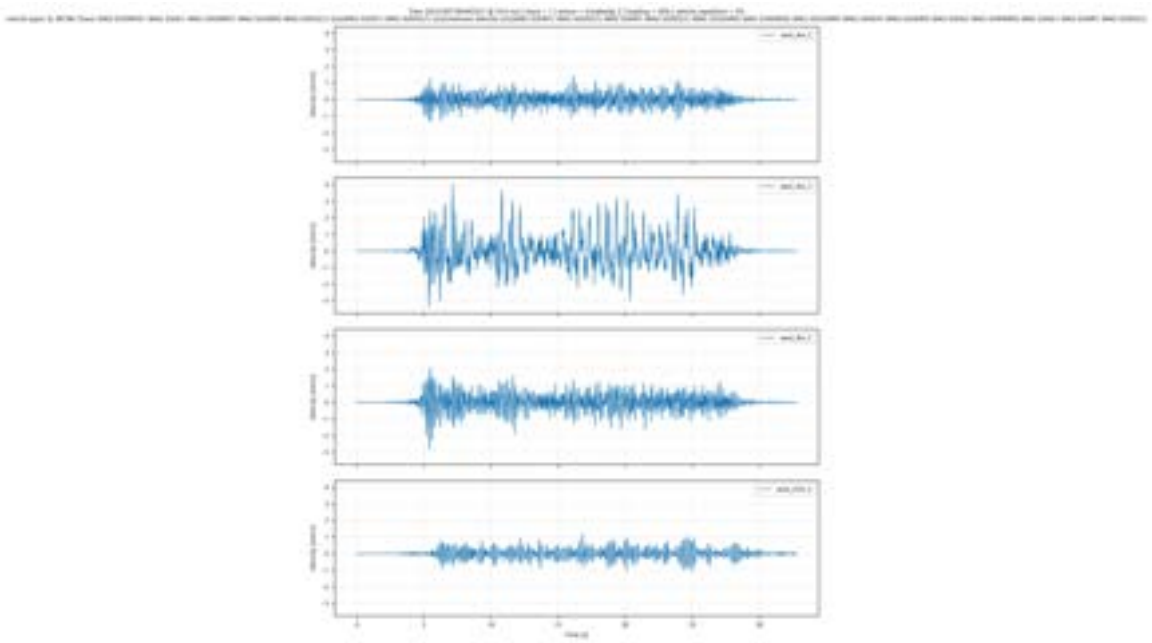


Afbeelding I.9 Genormaliseerd amplitude spectrum voor trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in Schalkwijk voor goederentrein passage op spoor 1 op 11-11-2023

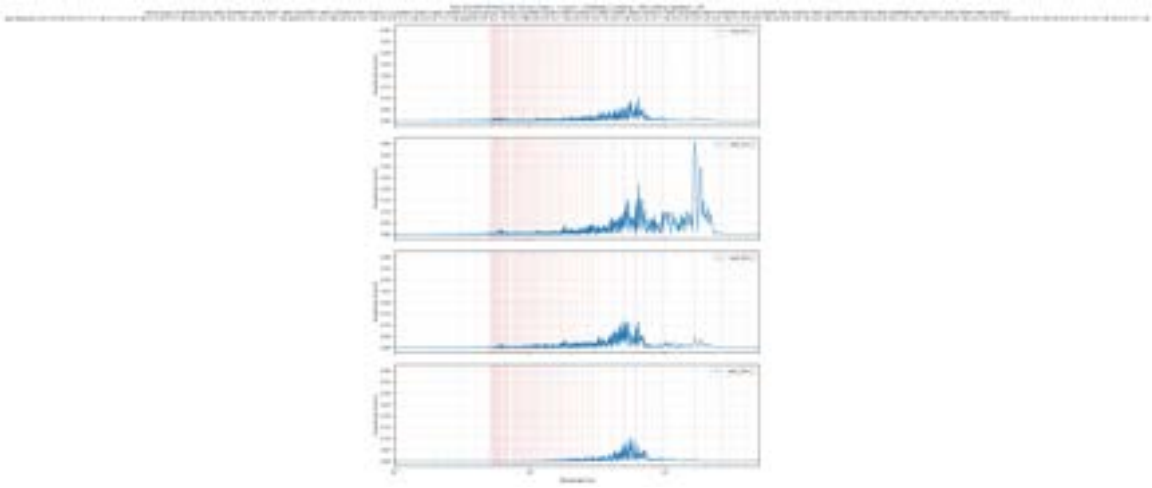


4-assige wagons, 10 % repetitie wagons, 40 % repetitie belading

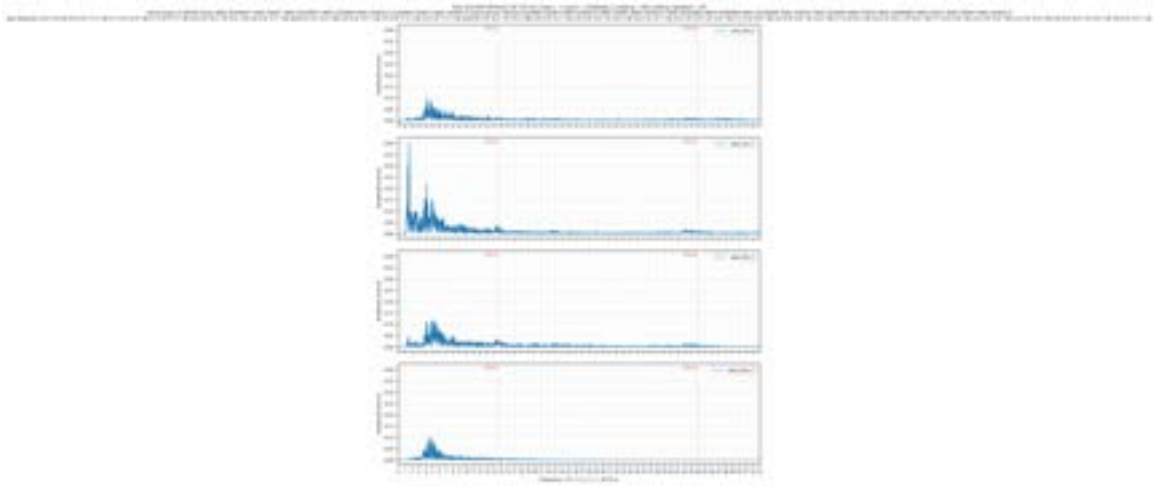
Afbeelding I.10 Trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in Schalkwijk voor goederentrein passage op spoor 1 op 07-10-2023



Afbeelding I.11 Amplitude spectrum voor trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in Schalkwijk voor goederentrein passage op spoor 1 op 07-10-2023

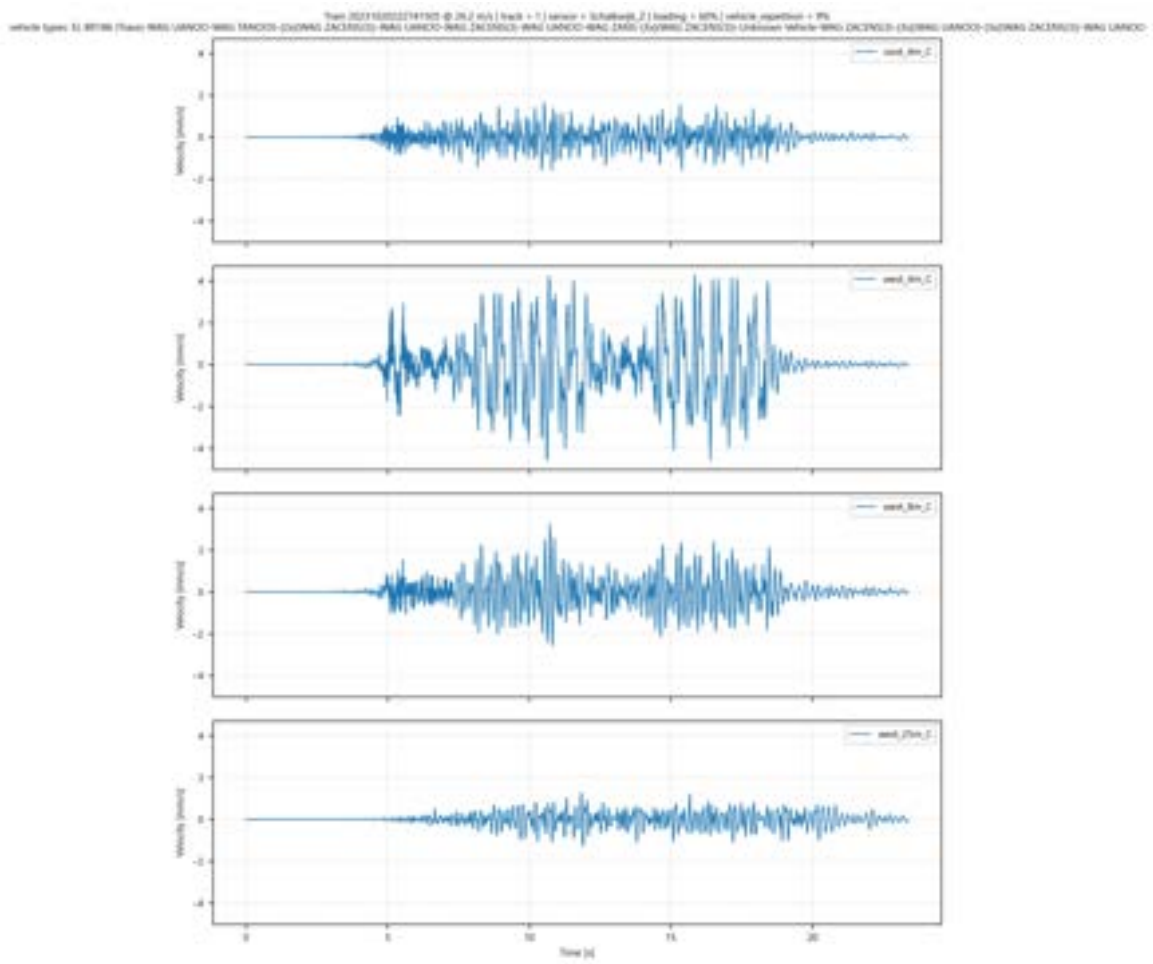


Afbeelding I.12 Genormaliseerd amplitude spectrum voor trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in Schalkwijk voor goederentrein passage op spoor 1 op 07-10-2023

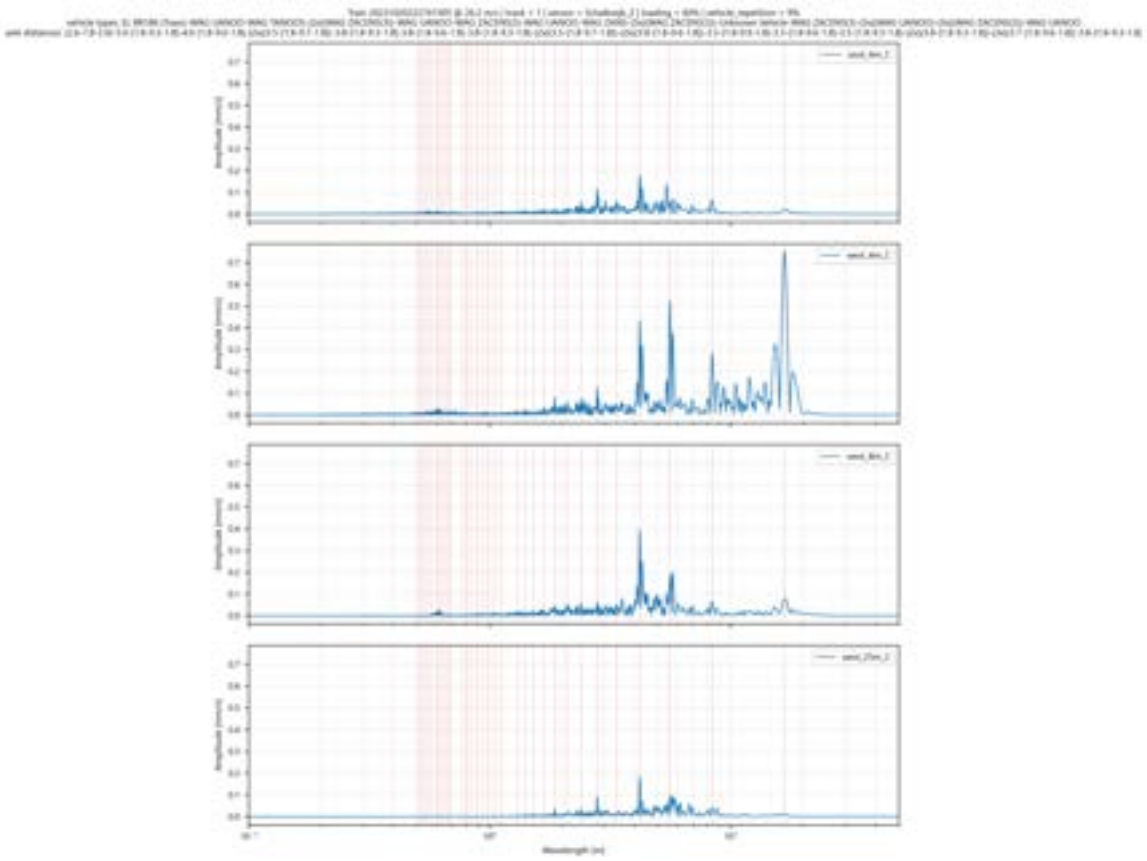


4-assige wagons, 10 % repetitie wagons, 60 % repetitie belading

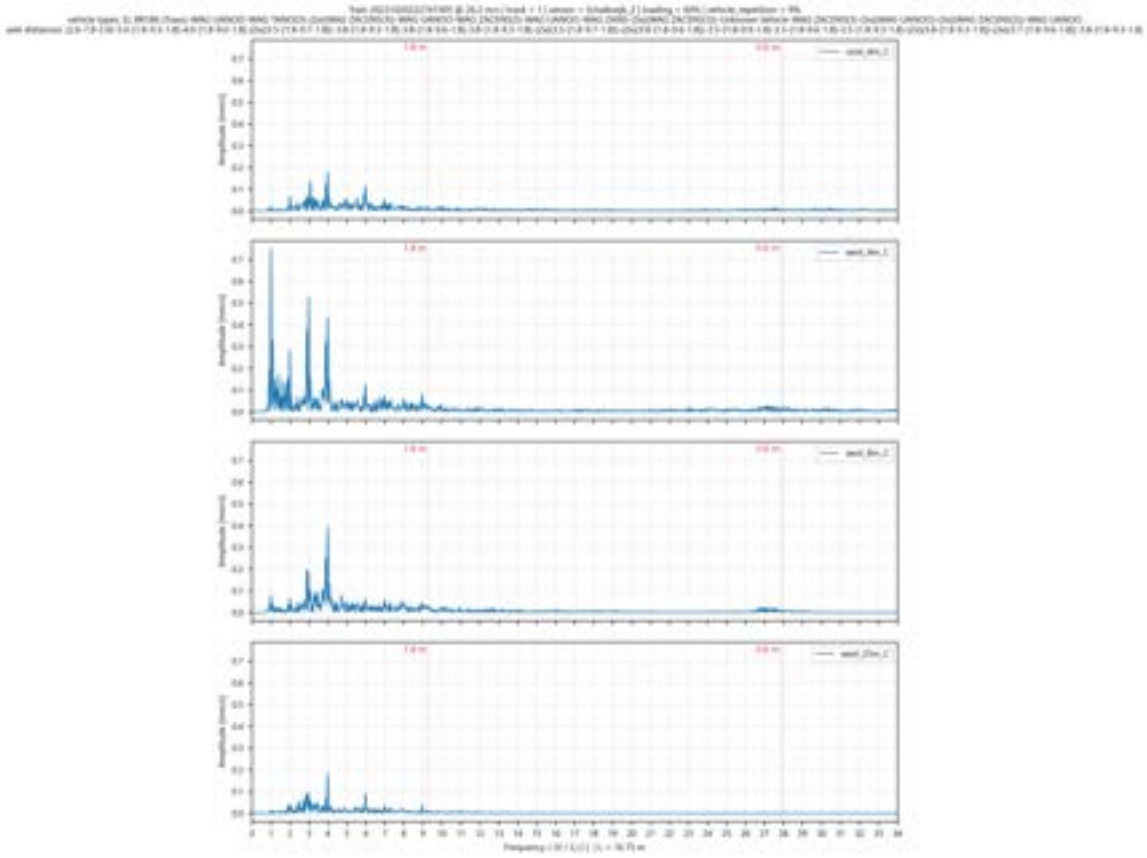
Afbeelding I.13 Trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in Schalkwijk voor goederentrein passage op spoor 1 op 20-10-2023



Afbeelding I.14 Amplitude spectrum voor trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in Schalkwijk voor goederentrein passage op spoor 1 op 20-10-2023

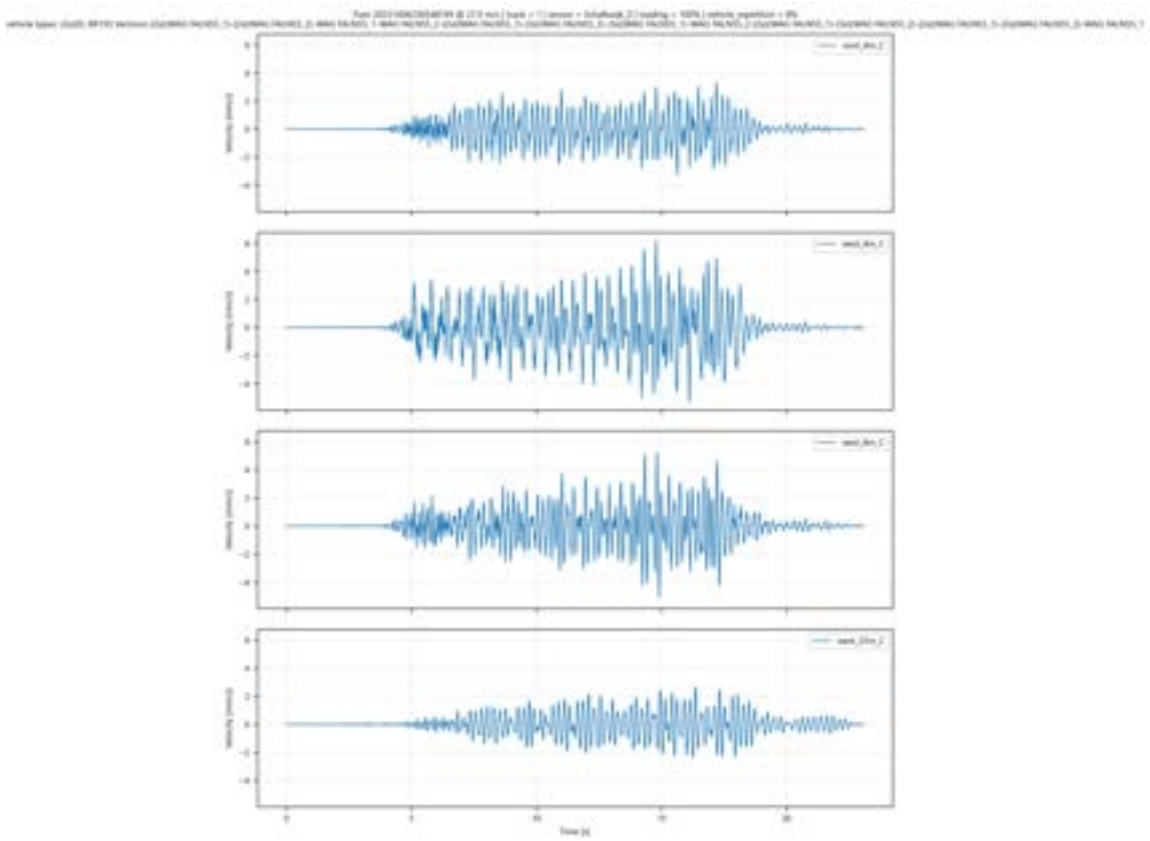


Afbeelding I.15 Genormaliseerd amplitude spectrum voor trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in Schalkwijk voor goederentrein passage op spoor 1 op 20-10-2023

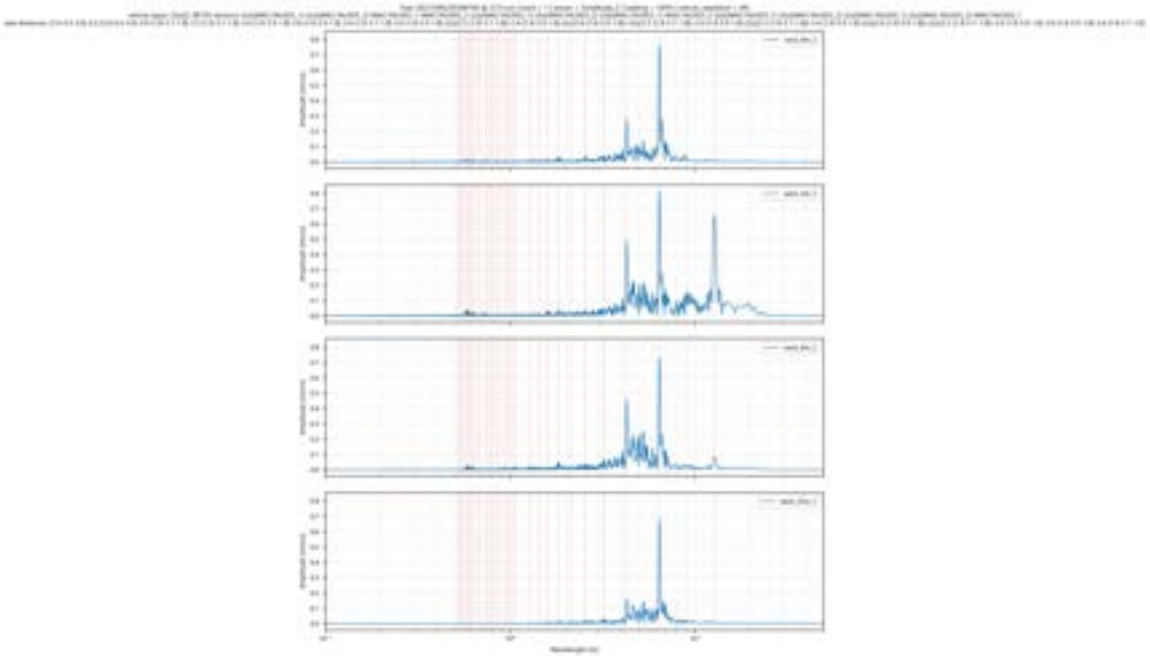


4-assige wagons, 10 % repetitie wagons, 100 % repetitie belading

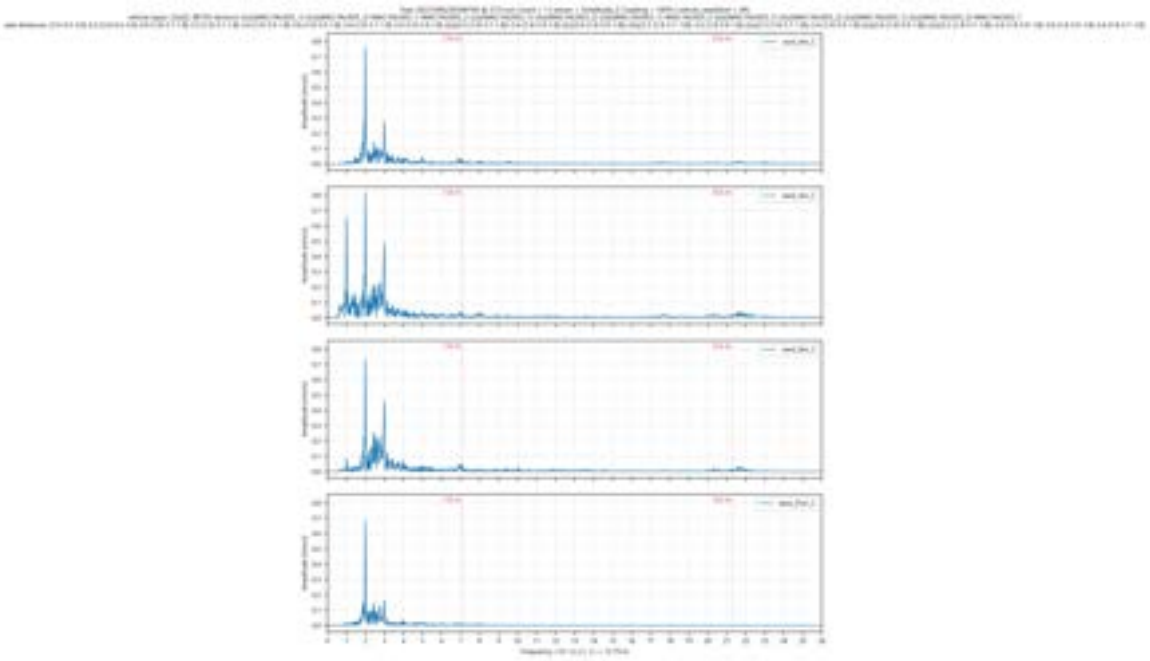
Afbeelding I.16 Trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in Schalkwijk voor goederentrein passage op spoor 1 op 06-10-2023



Afbeelding I.17 Amplitude spectrum voor trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in Schalkwijk voor goederentrein passage op spoor 1 op 06-10-2023

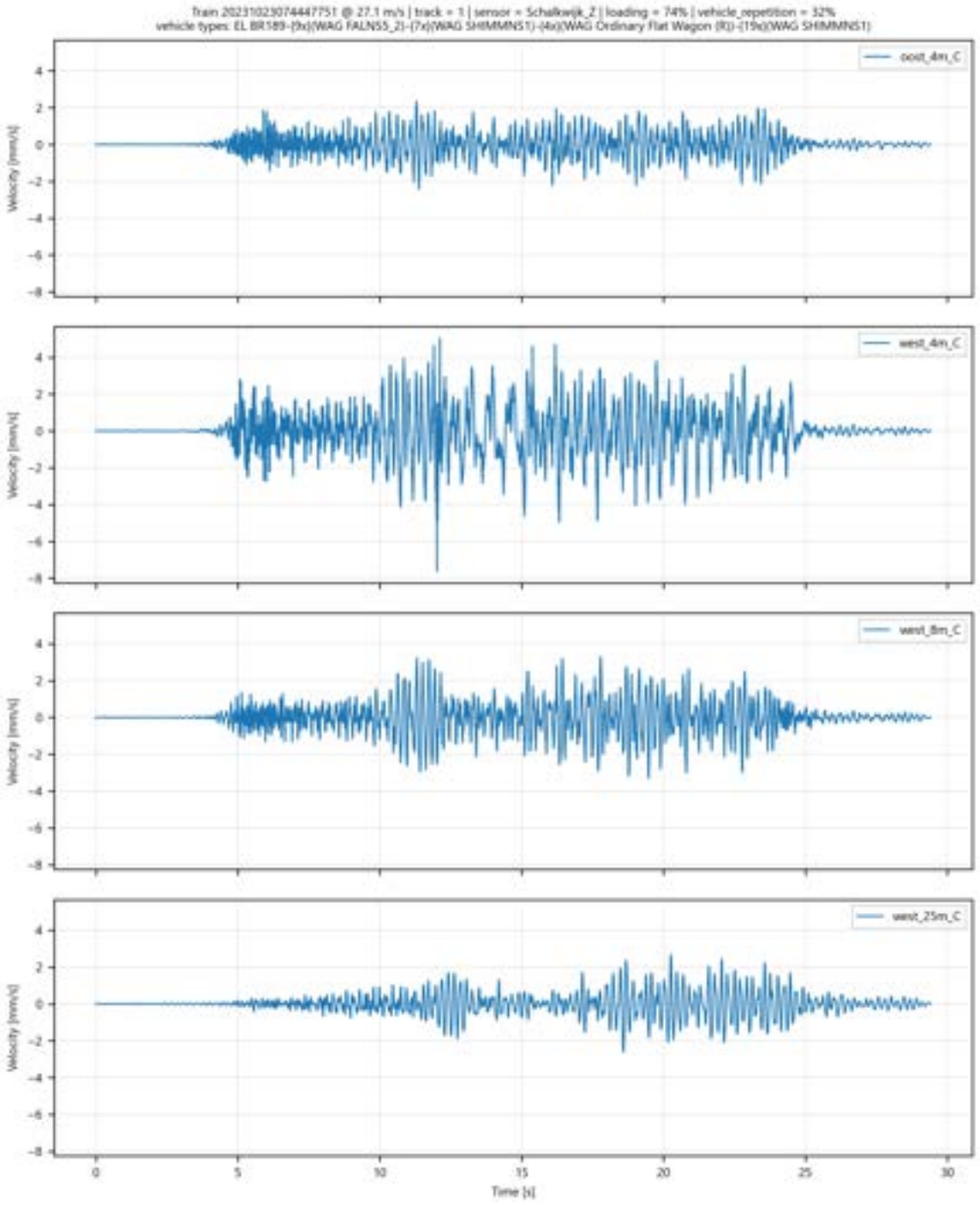


Afbeelding I.18 Genormaliseerd amplitude spectrum voor trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in Schalkwijk voor goederentrein passage op spoor 1 op 06-10-2023

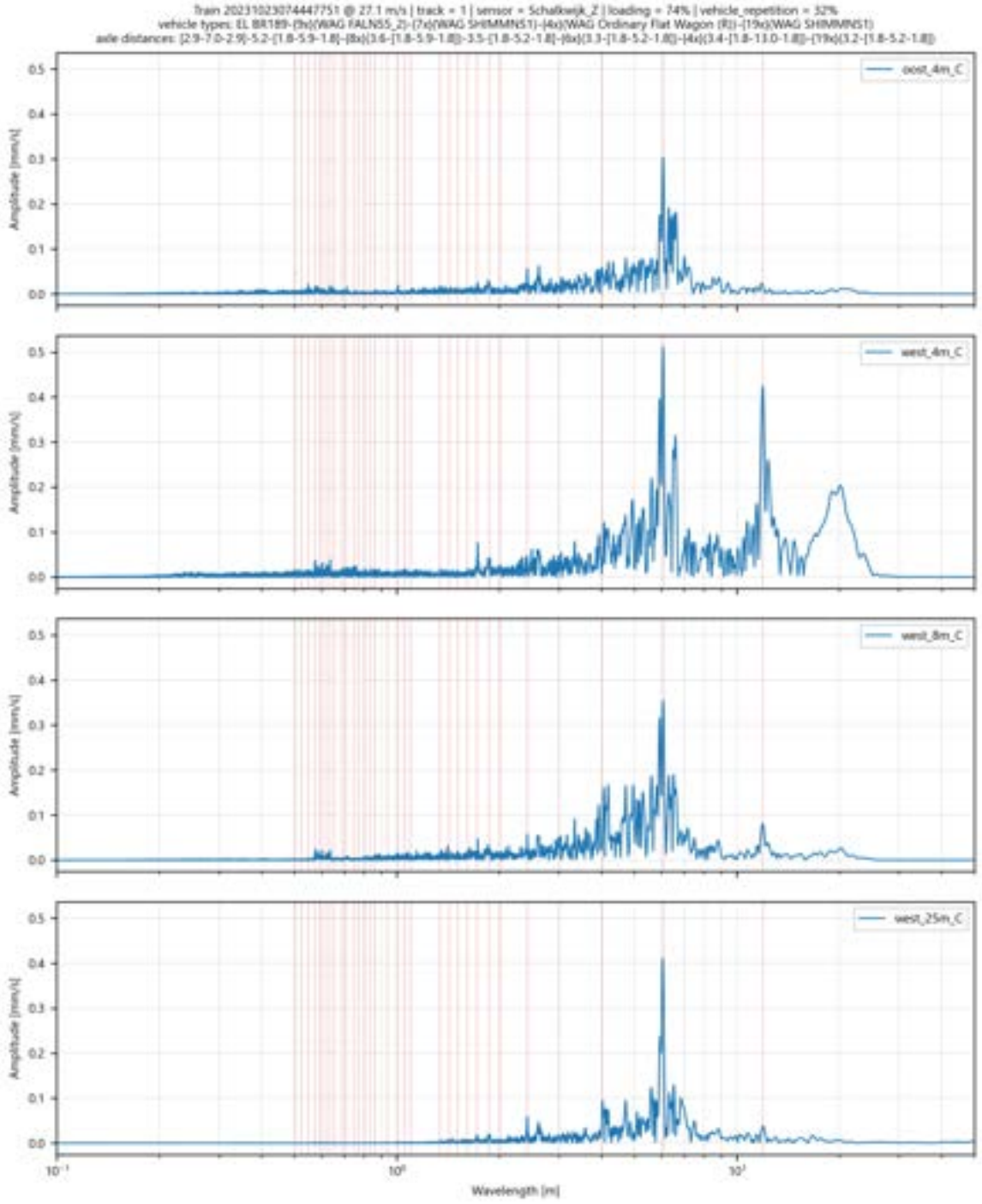


4-assige wagons, 40 % repetitie wagons, 80 % repetitie belading

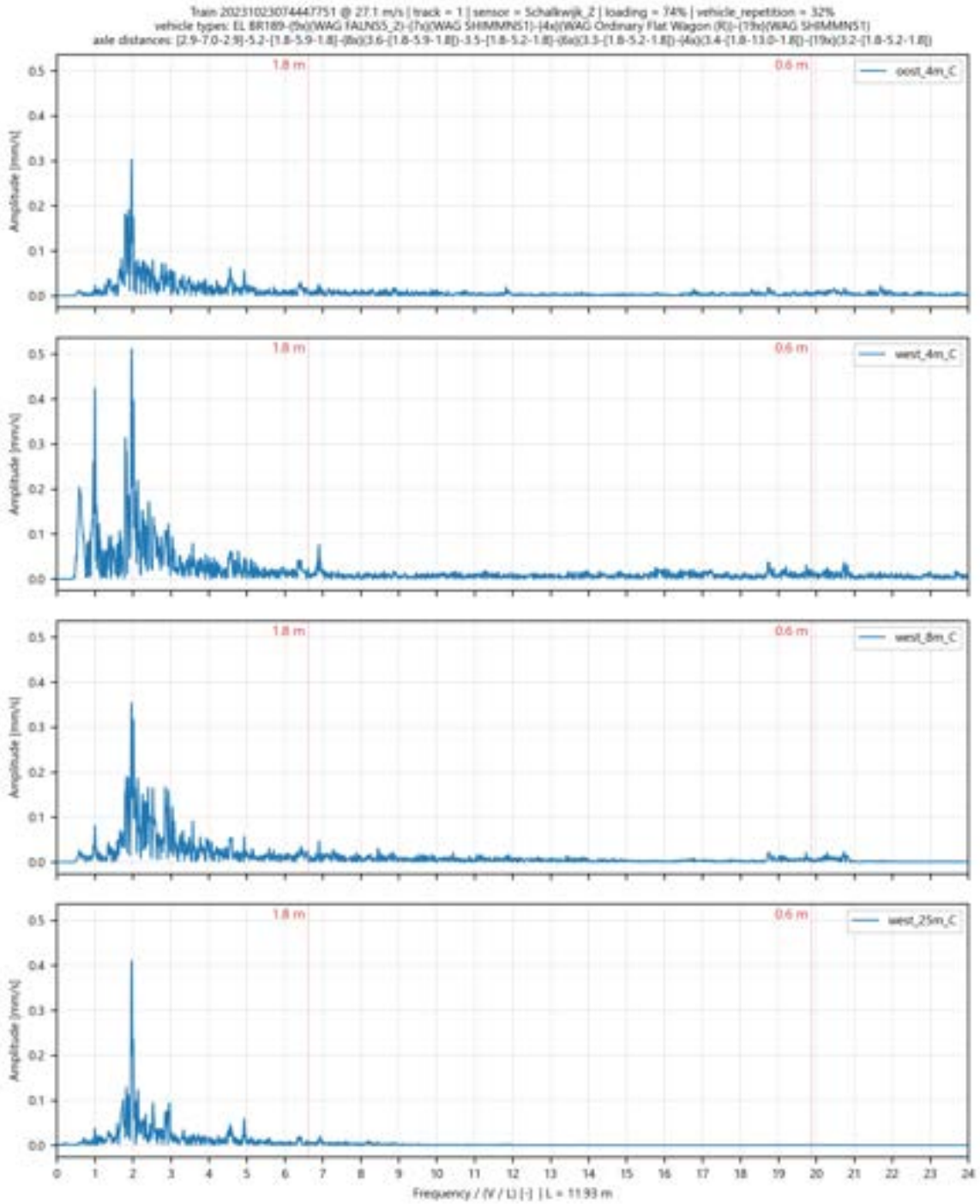
Afbeelding I.19 Trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in Schalkwijk voor goederentrein passage op spoor 1 op 23-10-2023



Afbeelding I.20 Amplitude spectrum voor trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in Schalkwijk voor goederentrein passage op spoor 1 op 23-10-2023

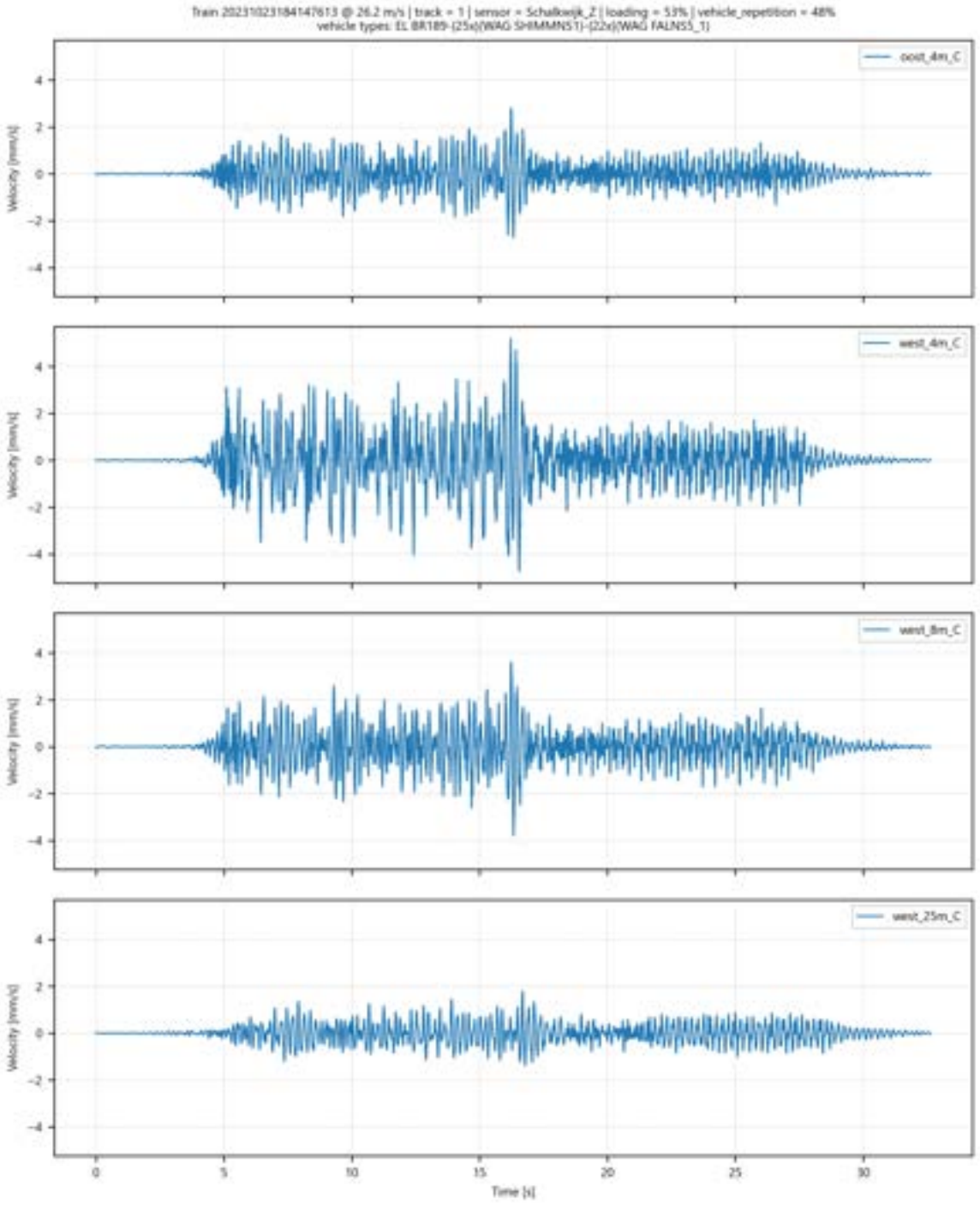


Afbeelding I.21 Genormaliseerd amplitude spectrum voor trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in Schalkwijk voor goederentrein passage op spoor 1 op 23-10-2023

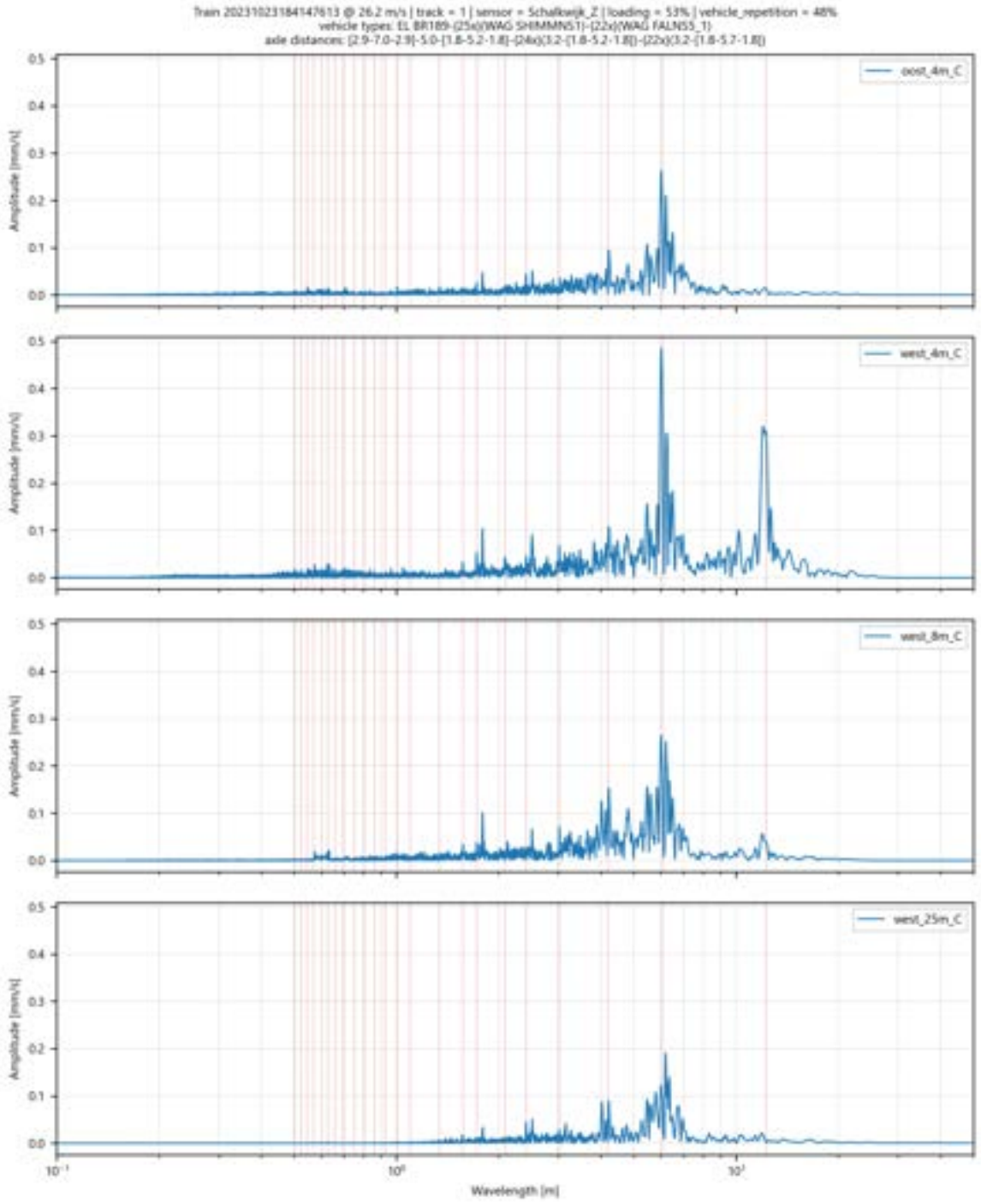


4-assige wagons, 50 % repetitie wagons, 60 % repetitie belading

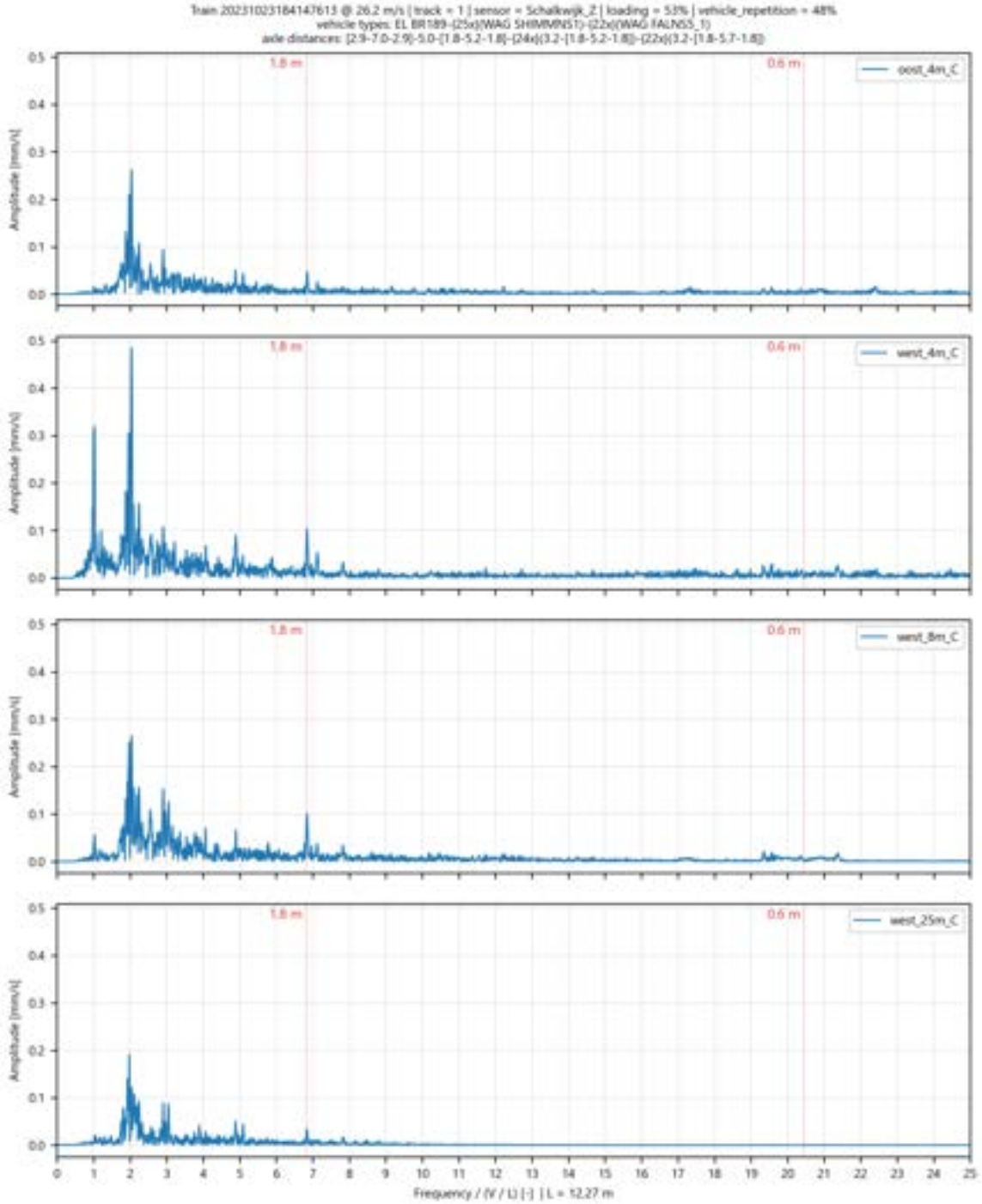
Afbeelding I.22 Trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in Schalkwijk voor goederentrein passage op spoor 1 op 23-10-2023



Afbeelding I.23 Amplitude spectrum voor trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in Schalkwijk voor goederentrein passage op spoor 1 op 23-10-2023

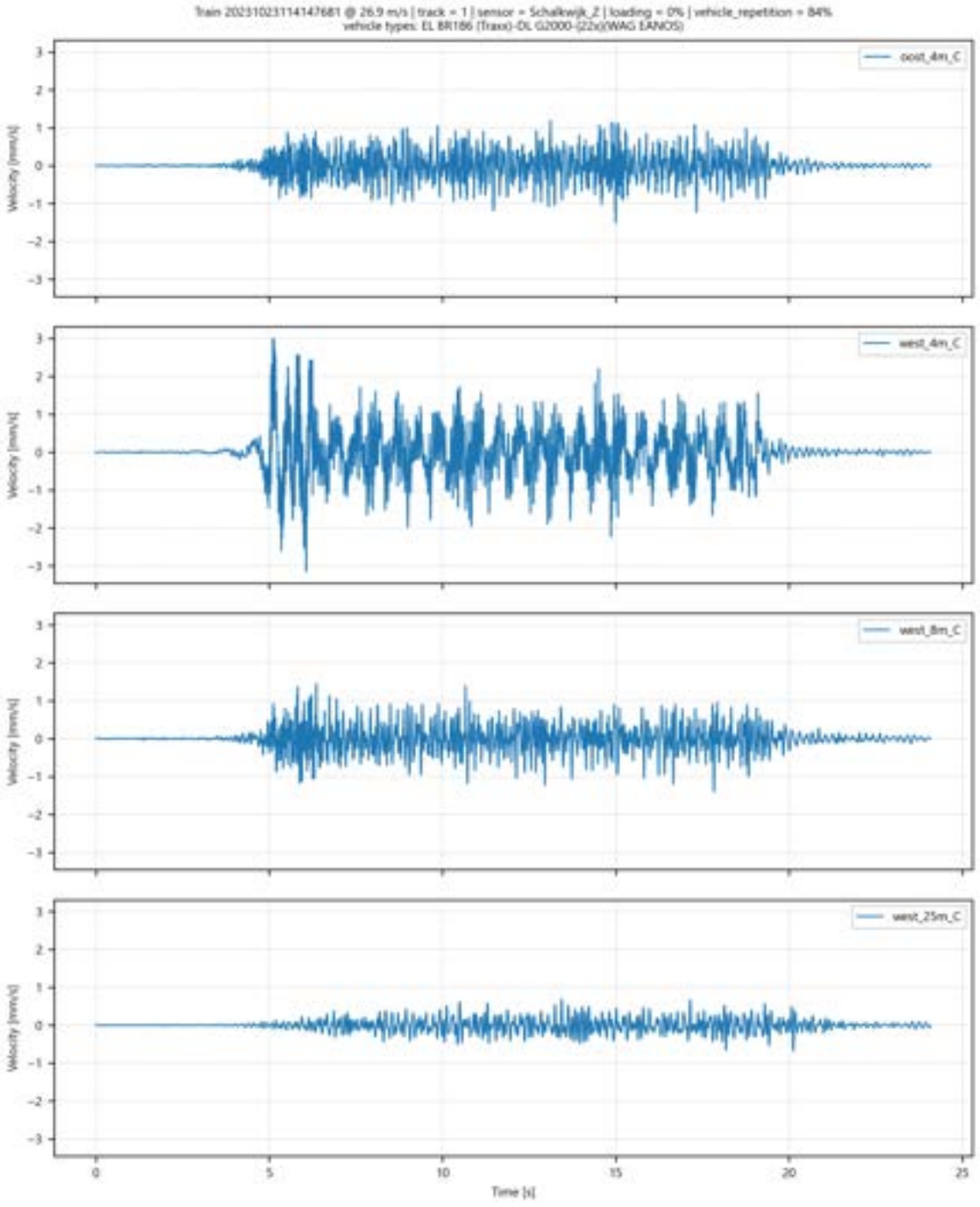


Afbeelding I.24 Genormaliseerd amplitude spectrum voor trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in Schalkwijk voor goederentrein passage op spoor 1 op 23-10-2023

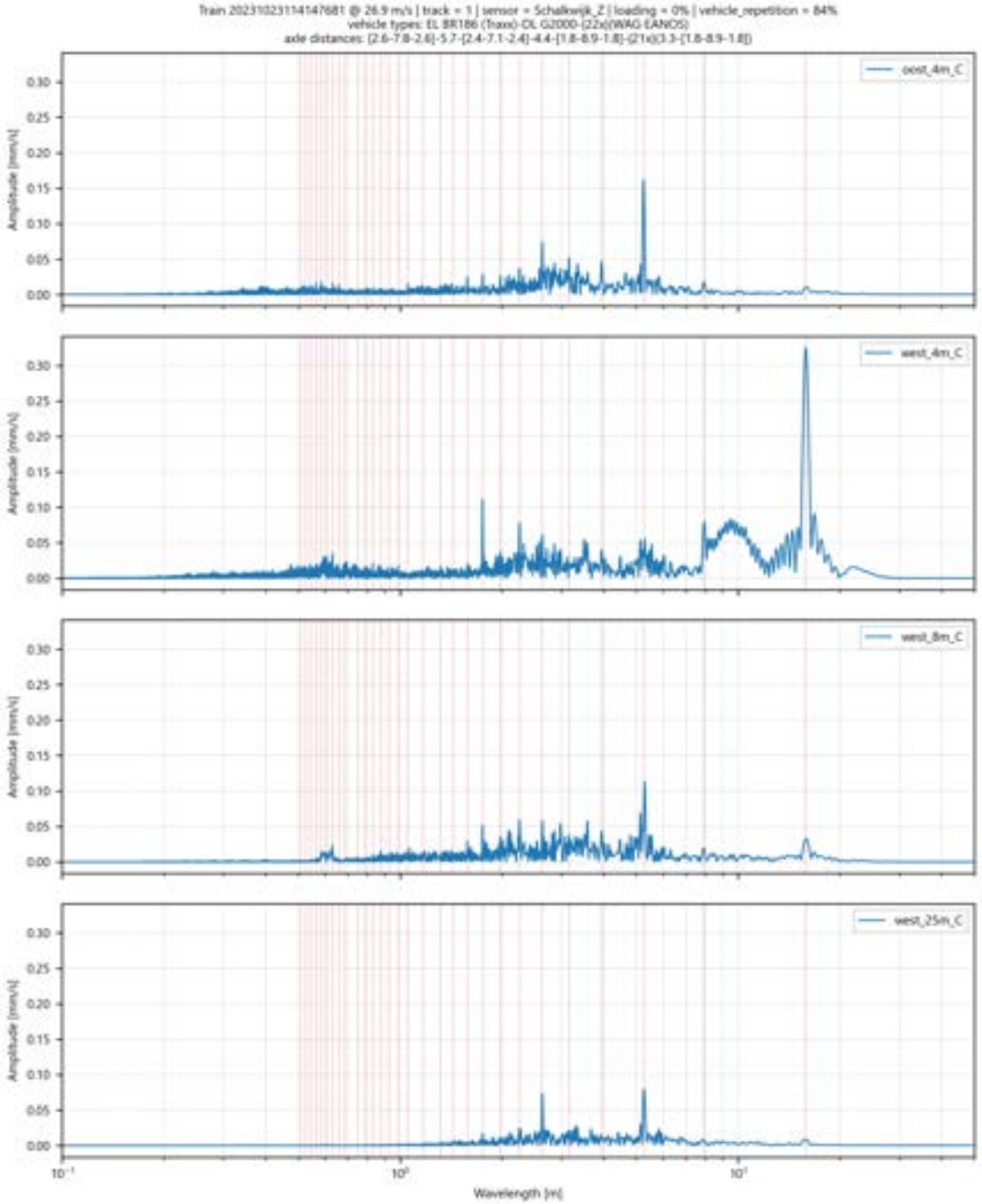


4-assige wagons, 90 % repetitie wagons, 0 % repetitie belading

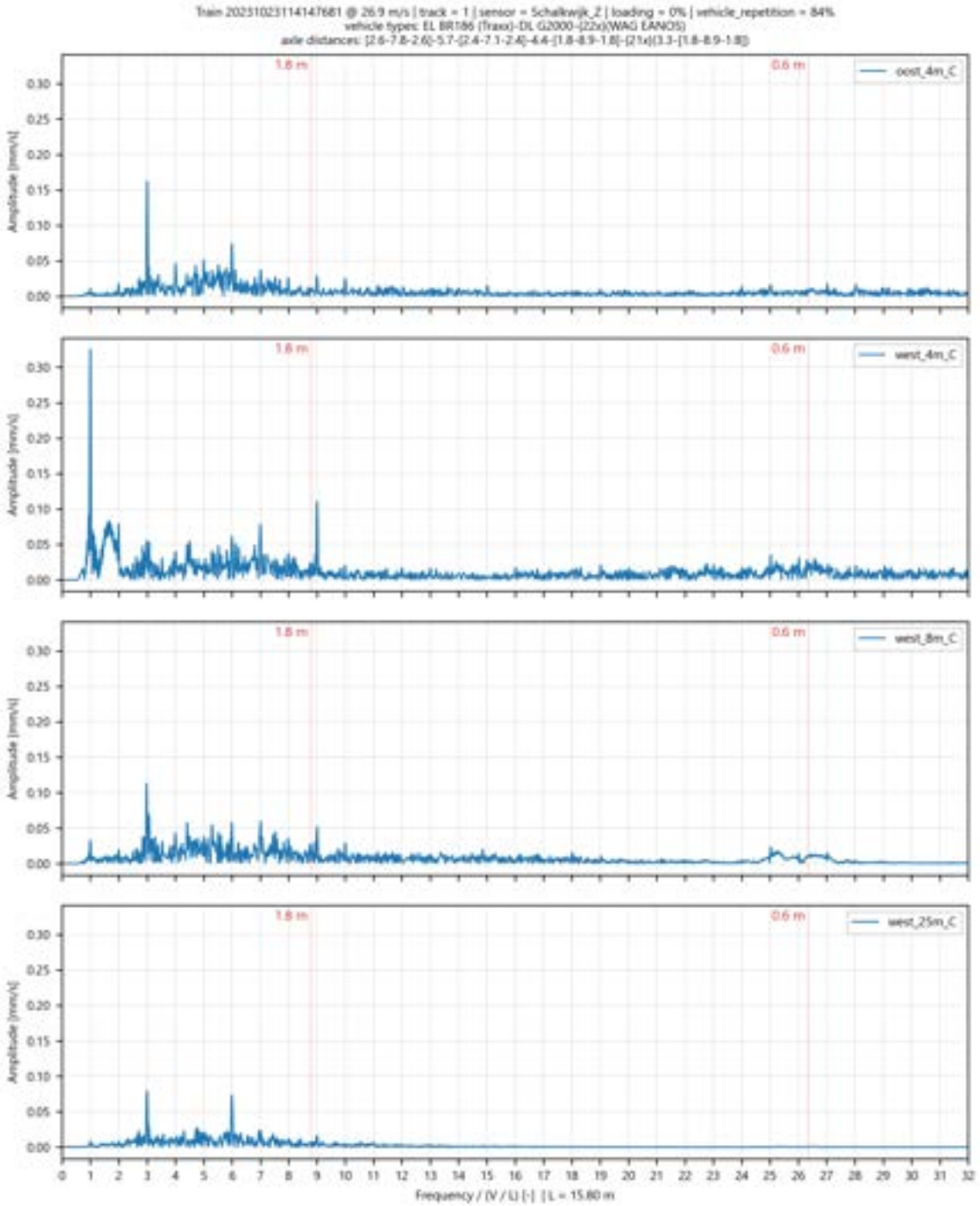
Afbeelding I.25 Trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in Schalkwijk voor goederentrein passage op spoor 1 op 23-10-2023



Afbeelding I.26 Amplitude spectrum voor trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in Schalkwijk voor goederentrein passage op spoor 1 op 23-10-2023



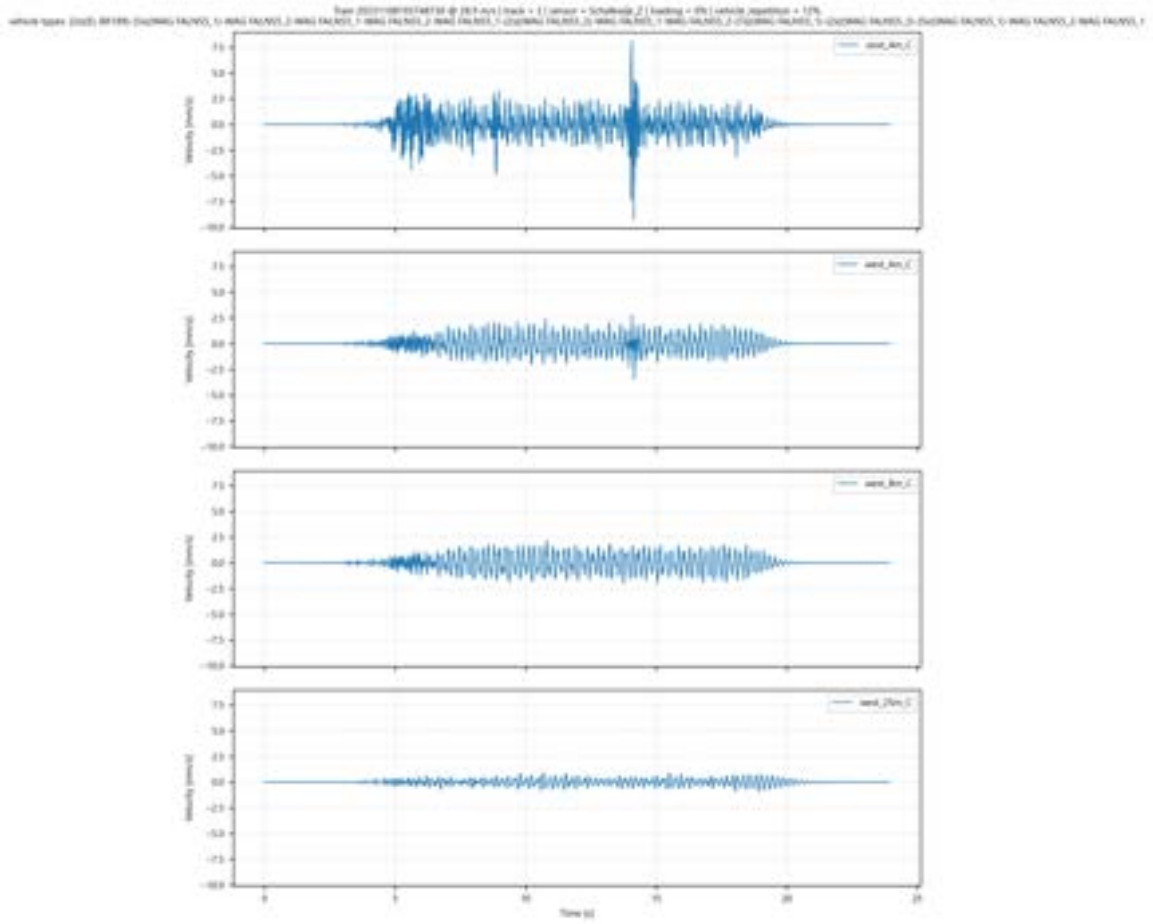
Afbeelding I.27 Genormaliseerd amplitude spectrum voor trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in Schalkwijk voor goederentrein passage op spoor 1 op 23-10-2023



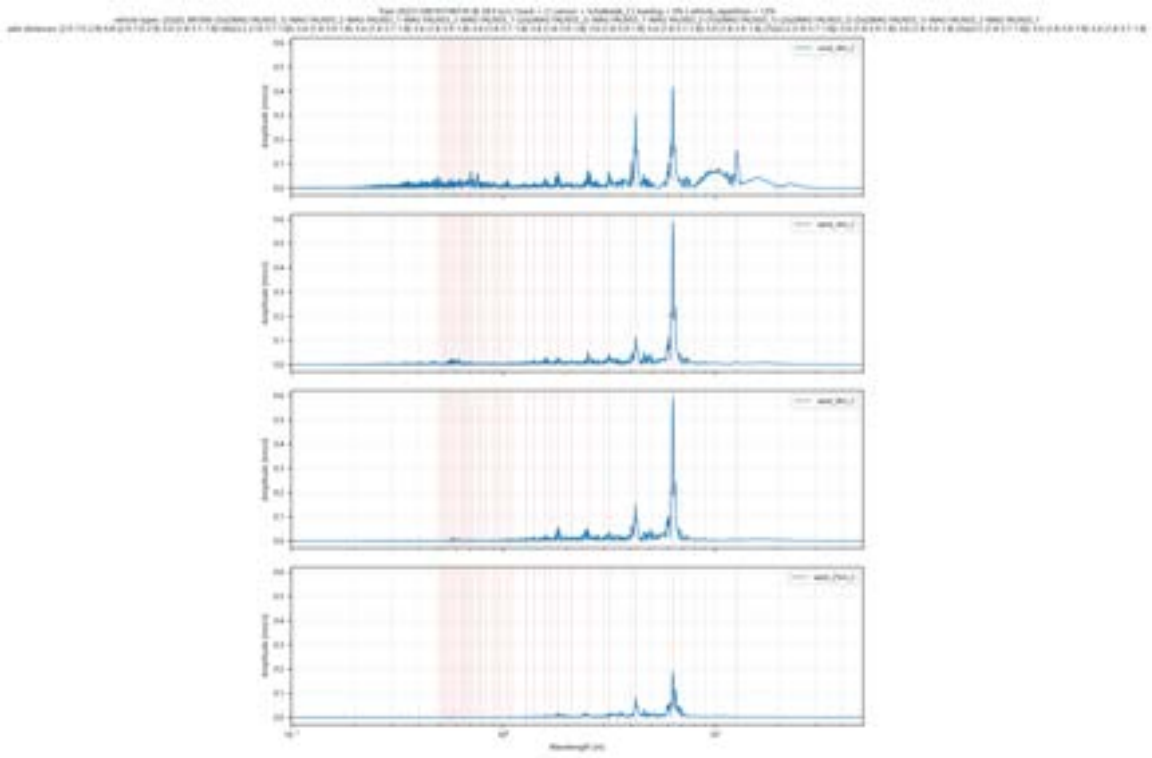
Meetlocatie Schalkwijk - spoor 2

4-assige wagons, 20 % repetitie wagons, 0 % repetitie belading

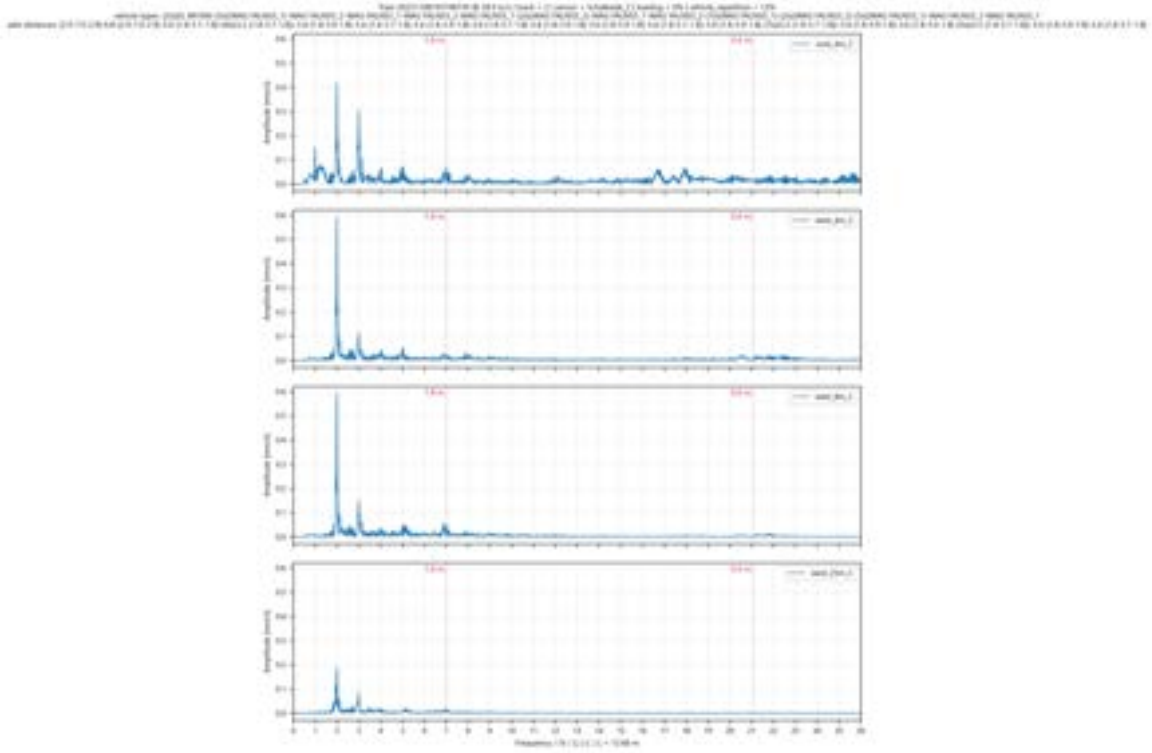
Afbeelding I.28 Trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in Schalkwijk voor goederentrein passage op spoor 2 op 08-11-2023



Afbeelding I.29 Amplitude spectrum voor trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in Schalkwijk voor goederentrein passage op spoor 2 op 08-11-2023

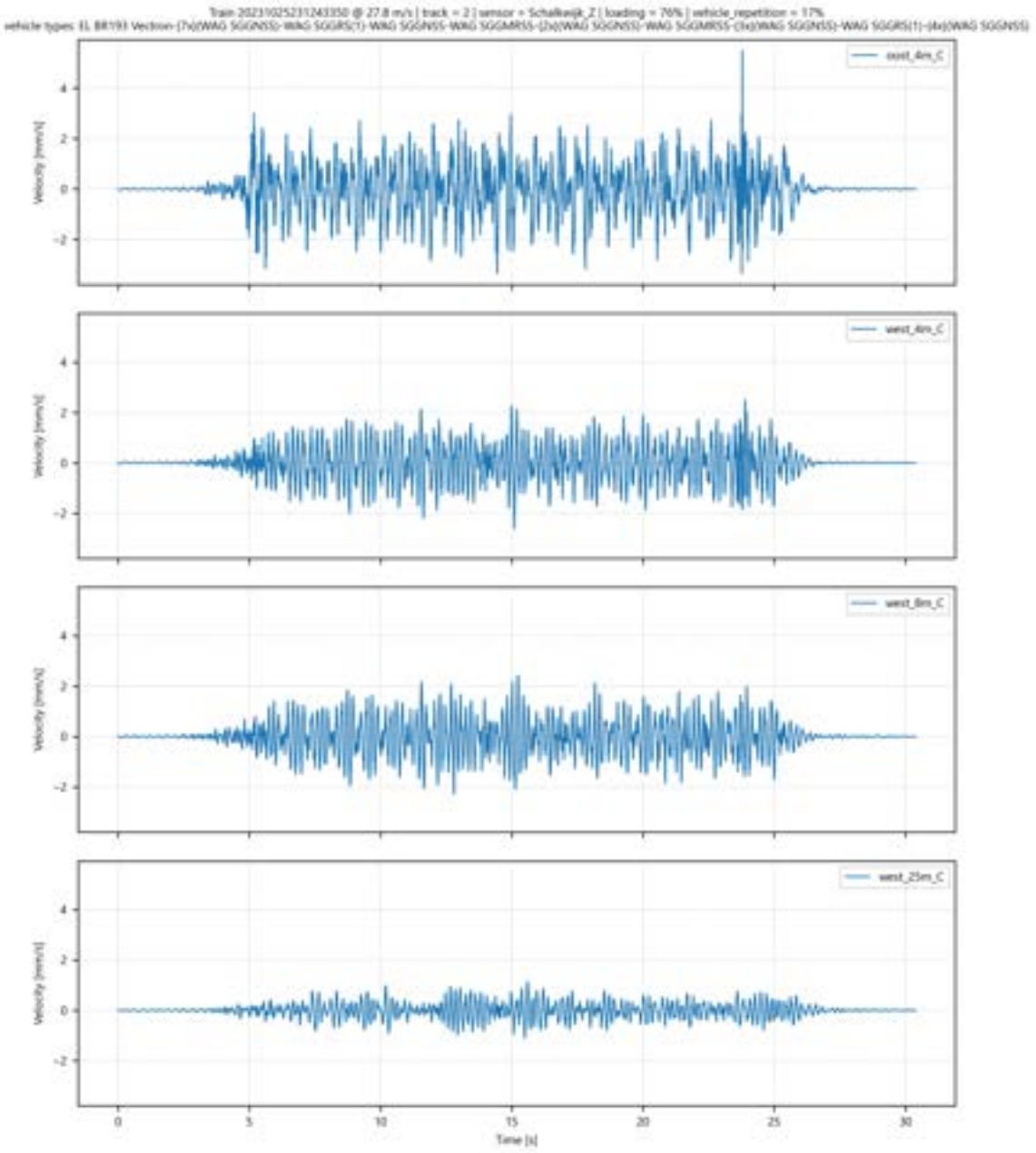


Afbeelding I.30 Genormaliseerd amplitude spectrum voor trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in Schalkwijk voor goederentrein passage op spoor 2 op 08-11-2023

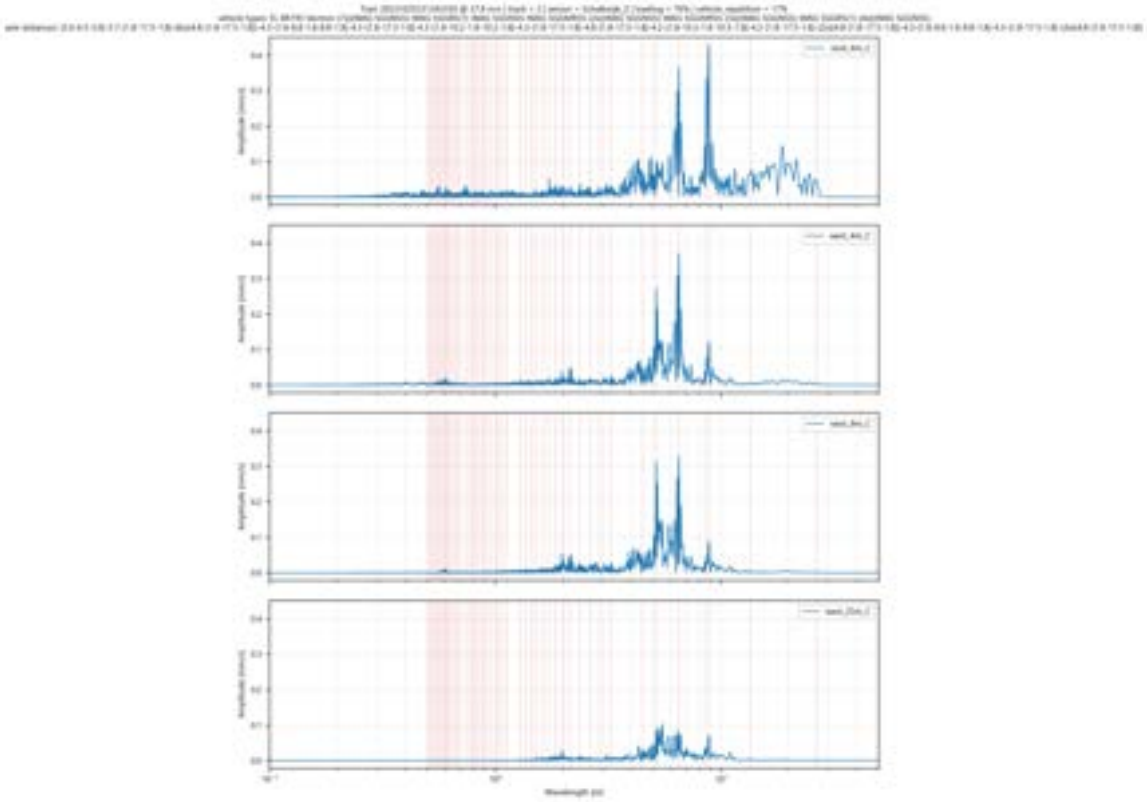


4-assige wagons, 20 % repetitie wagons, 80 % repetitie belading

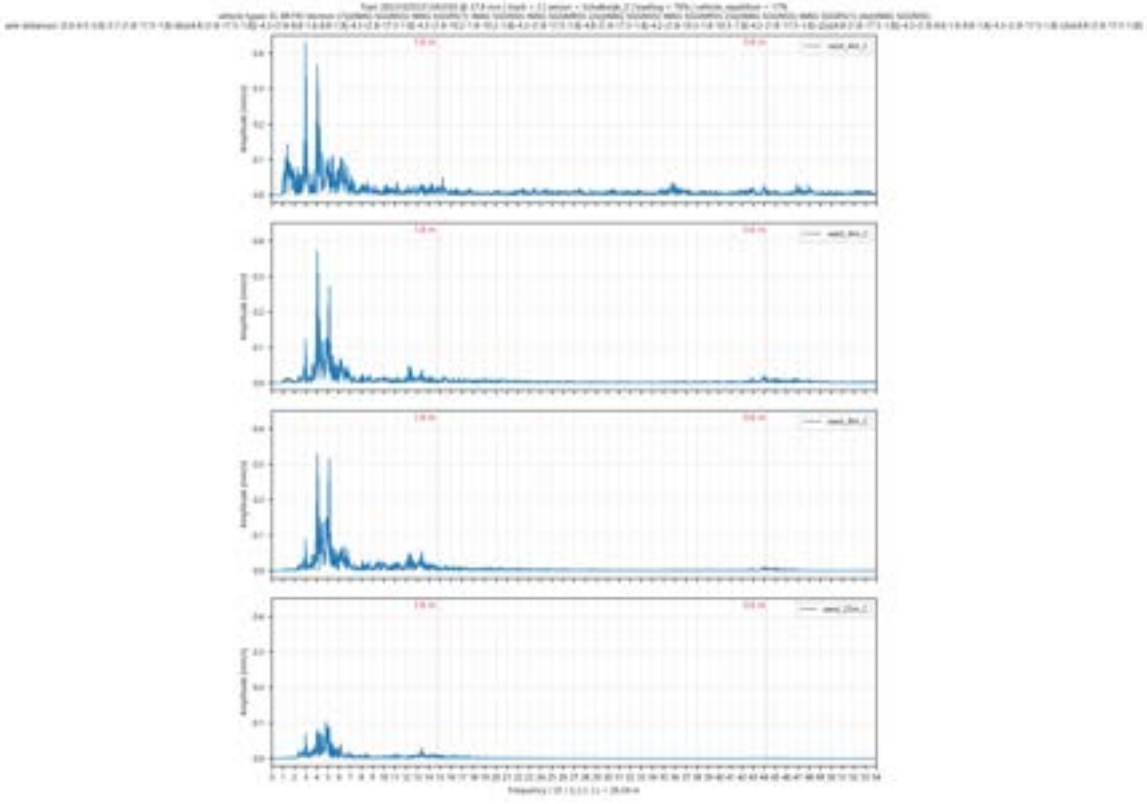
Afbeelding I.31 Trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in Schalkwijk voor goederentrein passage op spoor 2 op 25-10-2023



Afbeelding I.32 Amplitude spectrum voor trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in Schalkwijk voor goederentrein passage op spoor 2 op 25-10-2023

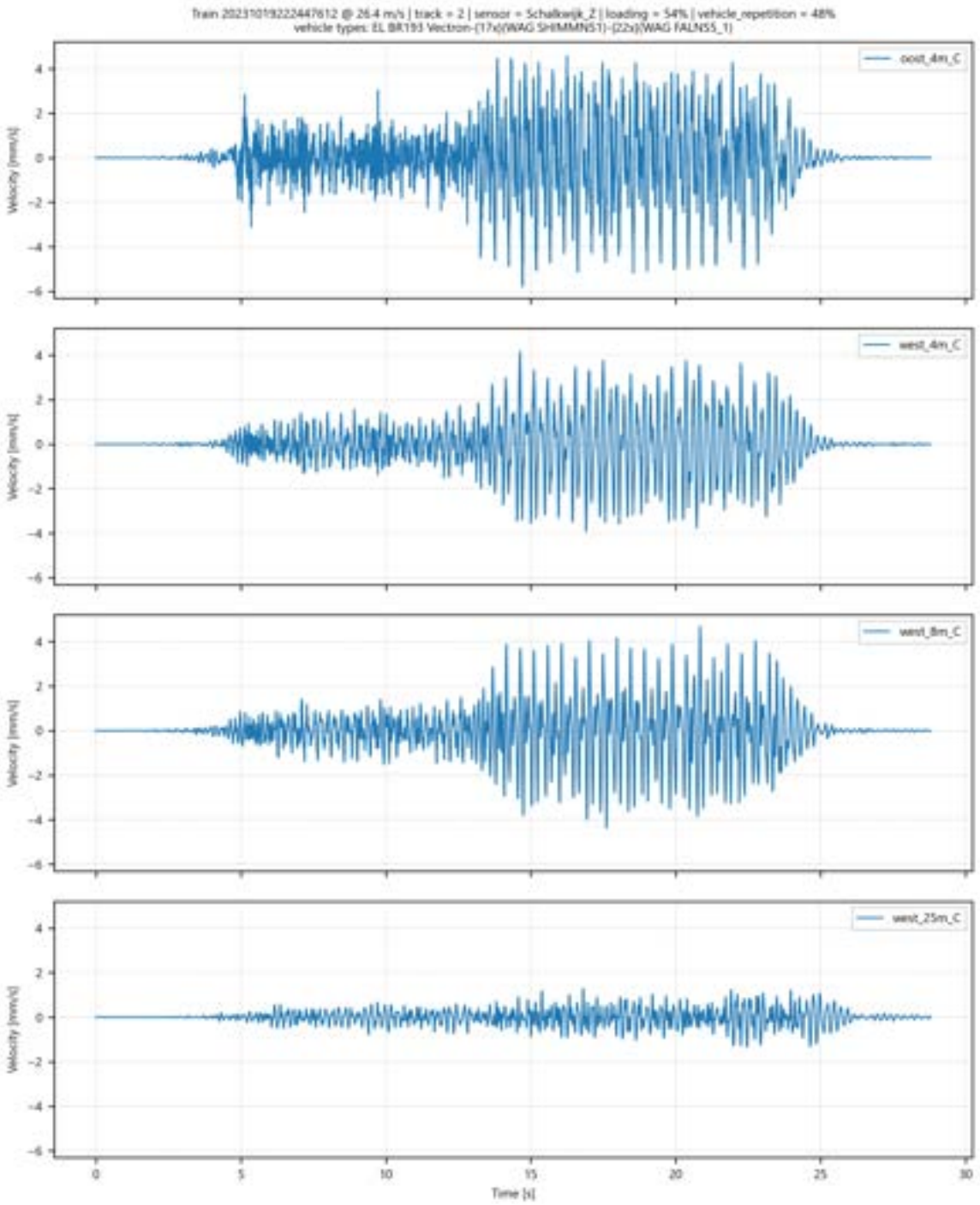


Afbeelding I.33 Genormaliseerd amplitude spectrum voor trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in Schalkwijk voor goederentrein passage op spoor 2 op 25-10-2023

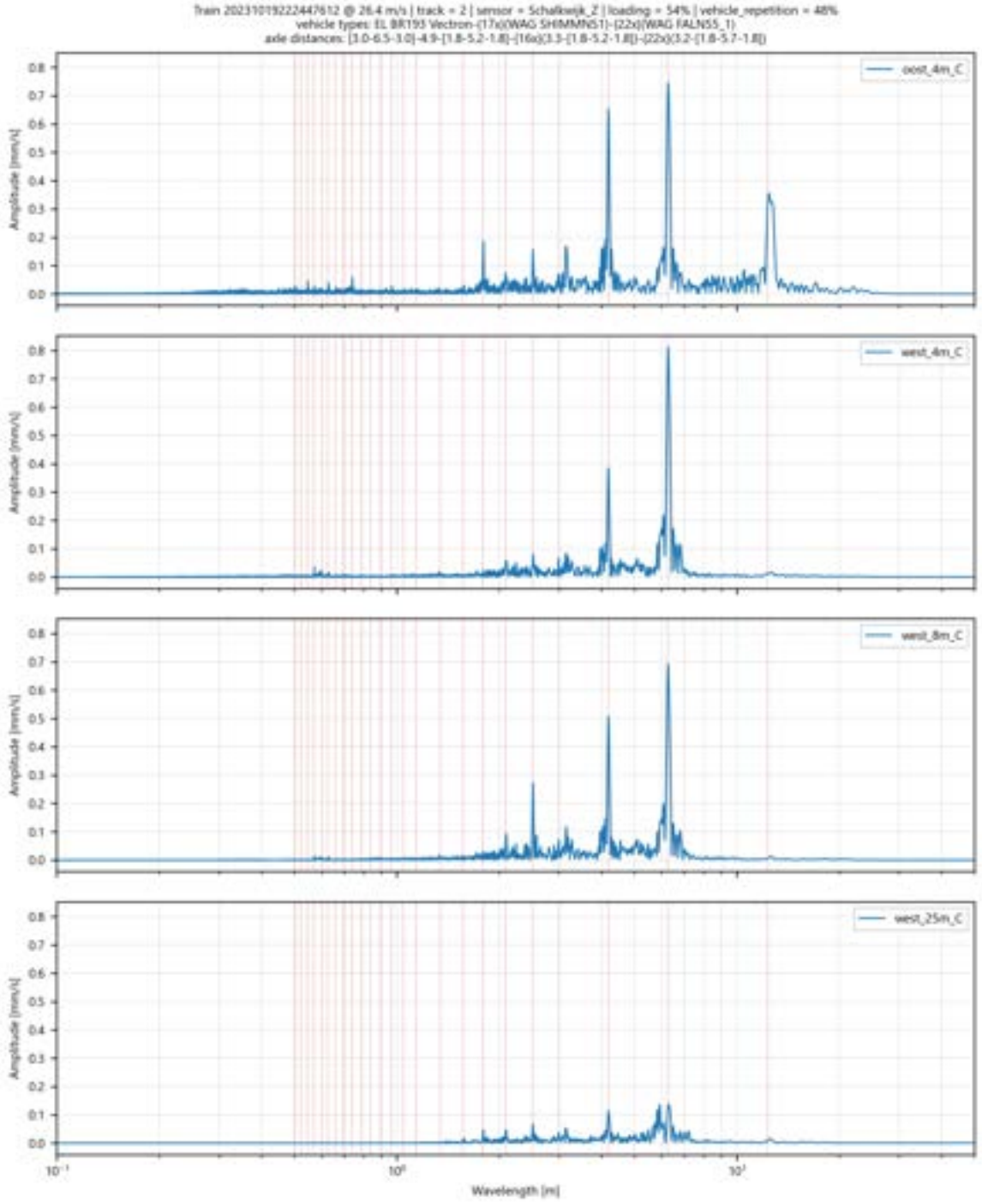


4-assige wagons, 50 % repetitie wagons, 60 % repetitie belading

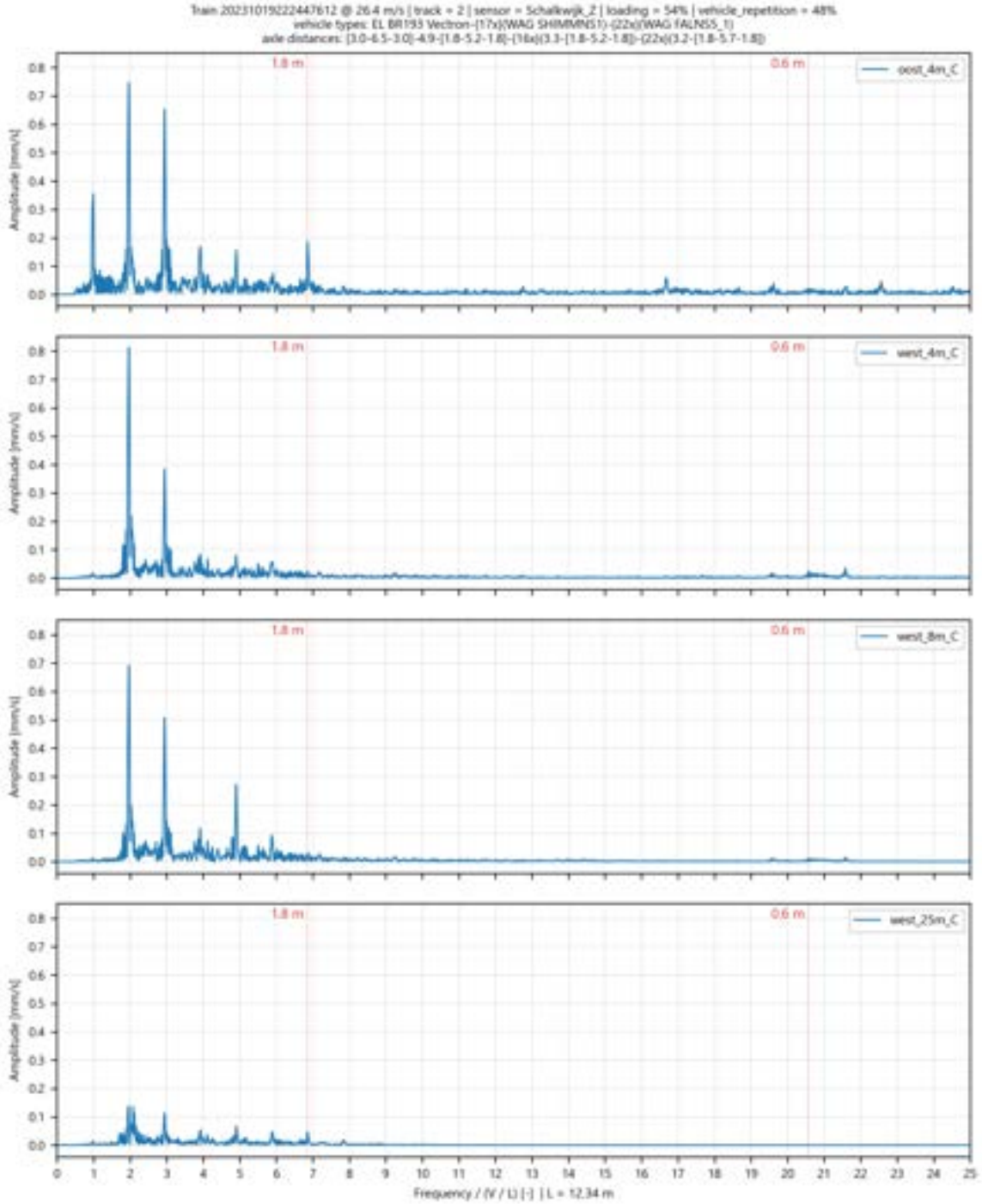
Afbeelding I.34 Trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in Schalkwijk voor goederentrein passage op spoor 2 op 19-10-2023



Afbeelding I.35 Amplitude spectrum voor trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in Schalkwijk voor goederentrein passage op spoor 2 op 19-10-2023

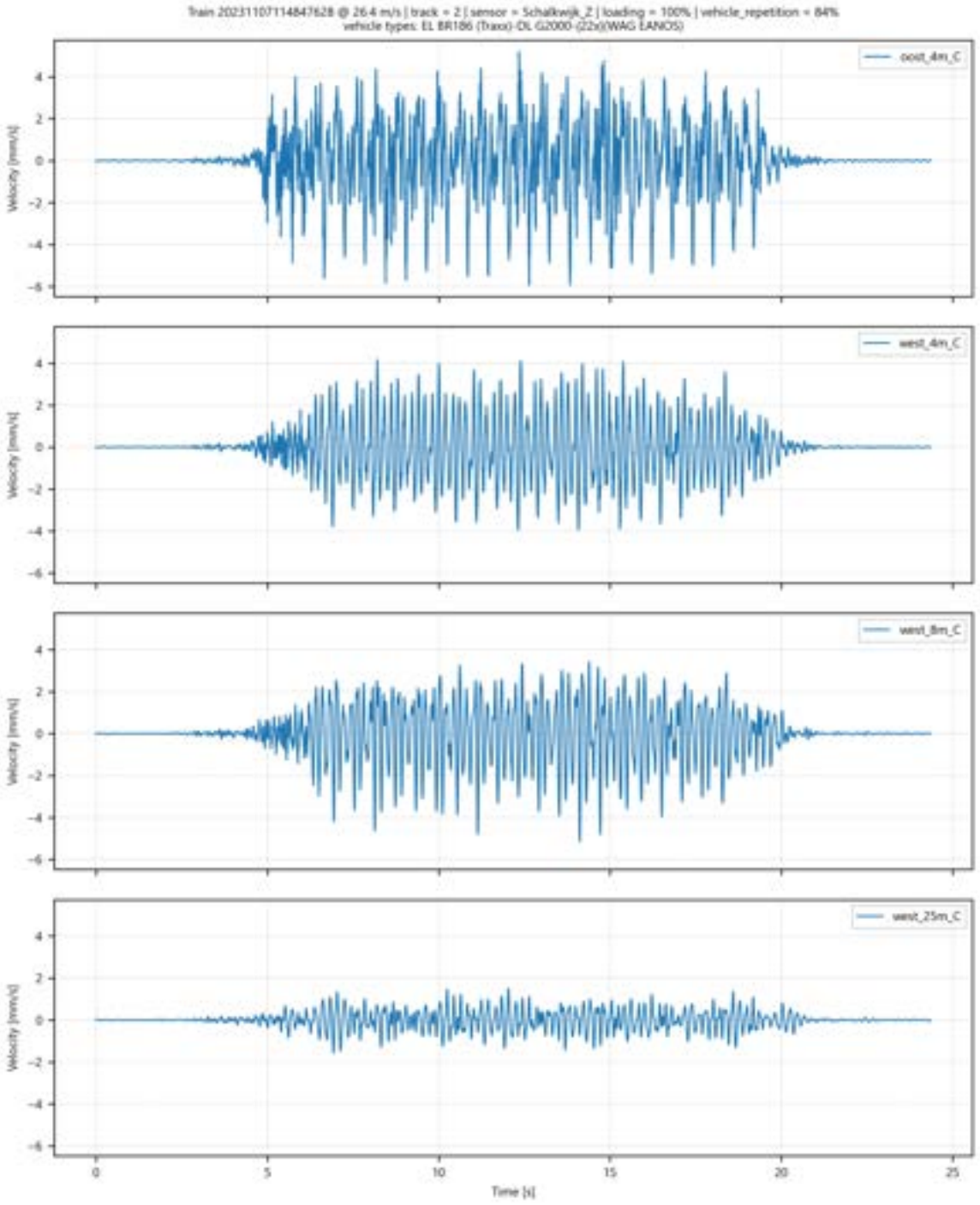


Afbeelding I.36 Genormaliseerd amplitude spectrum voor trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in Schalkwijk voor goederentrein passage op spoor 2 op 19-10-2023

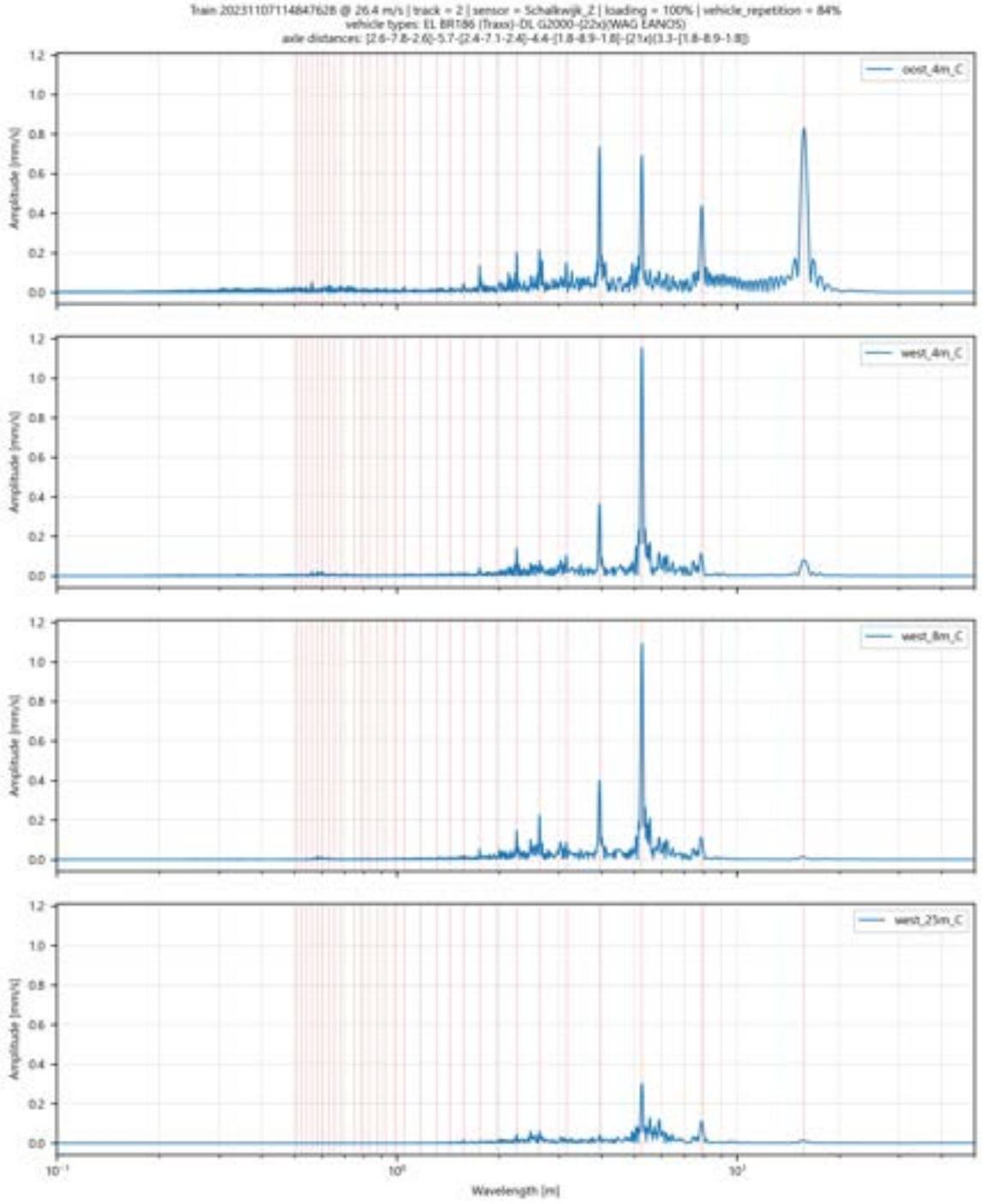


4-assige wagons, 90 % repetitie wagons, 100 % repetitie belading

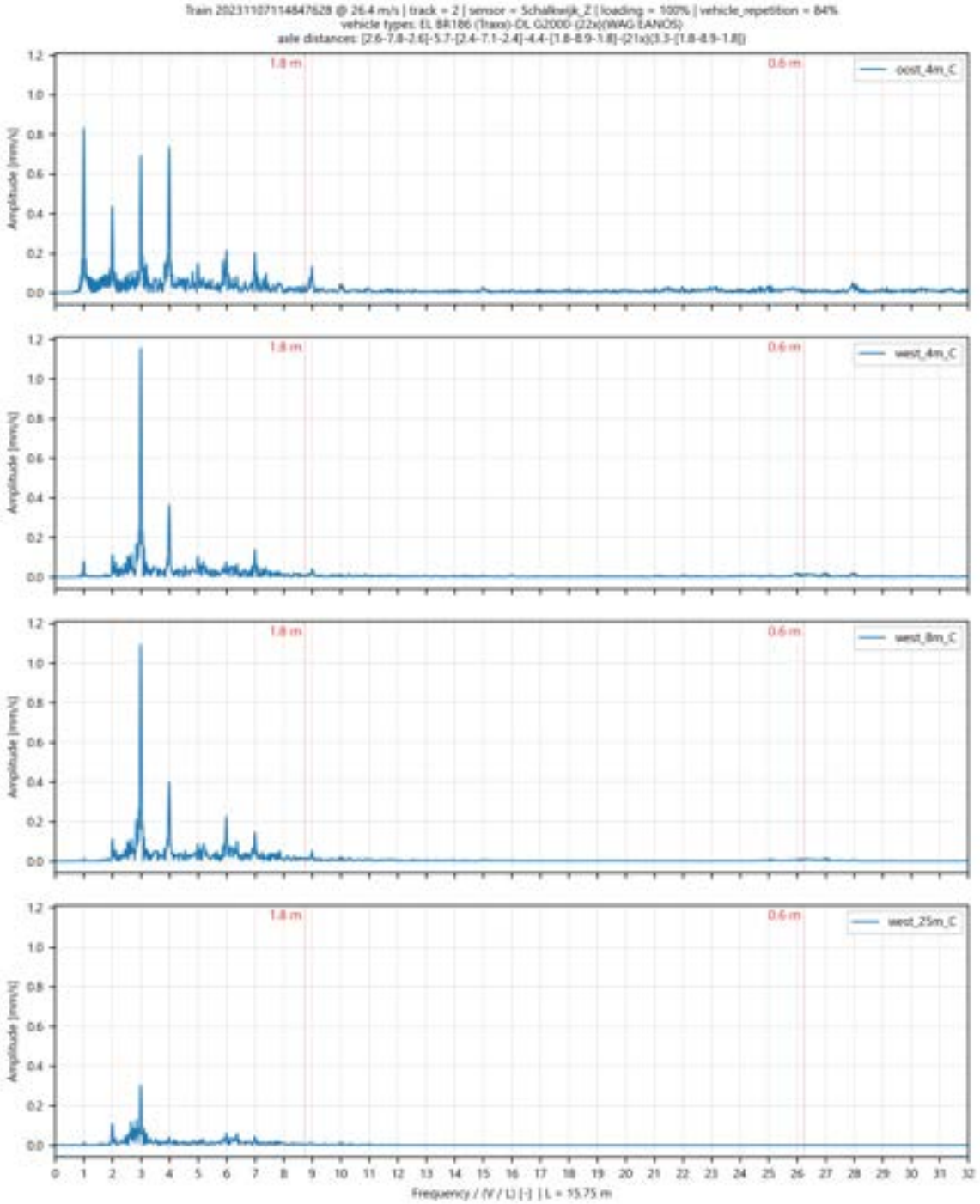
Afbeelding I.37 Trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in Schalkwijk voor goederentrein passage op spoor 2 op 07-11-2023



Afbeelding I.38 Amplitude spectrum voor trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in Schalkwijk voor goederentrein passage op spoor 2 op 07-11-2023

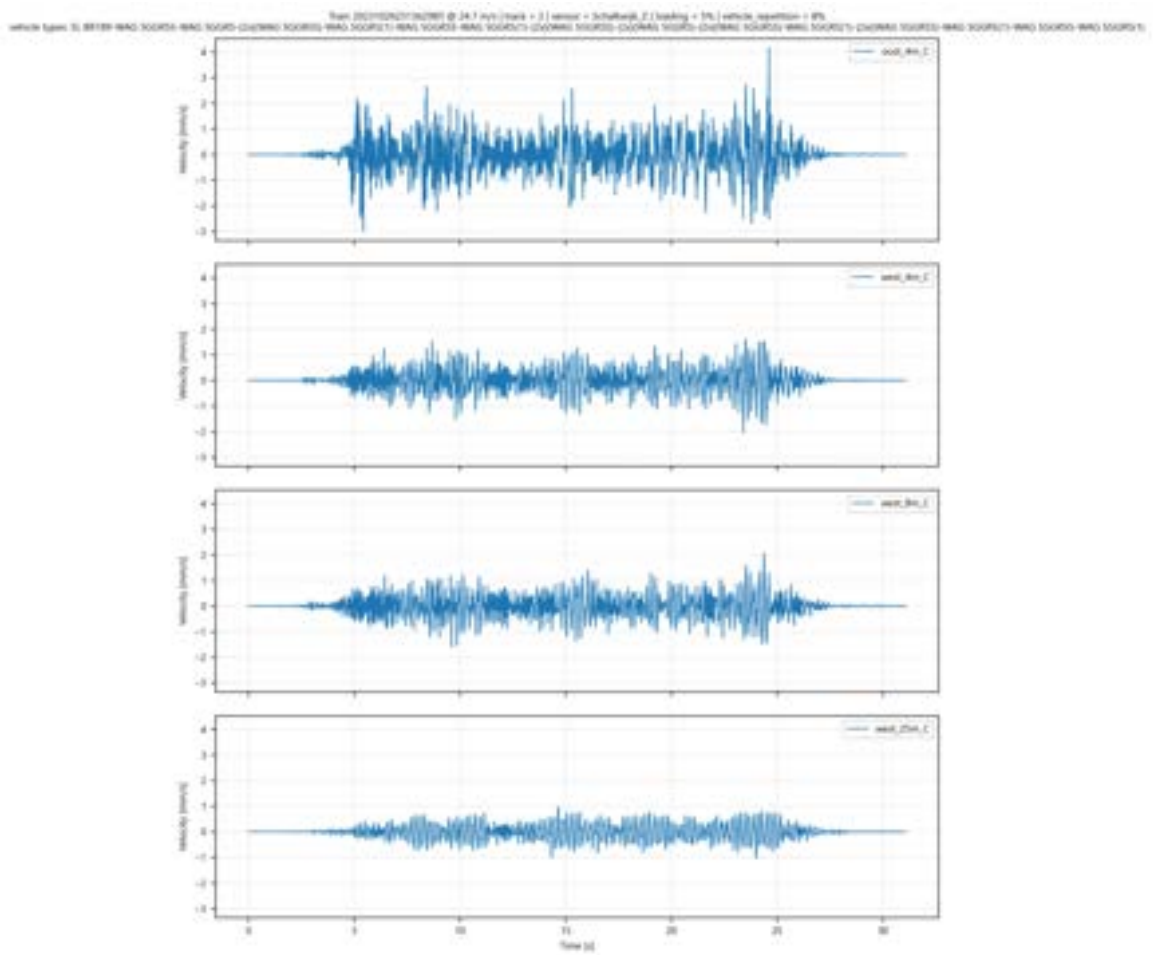


Afbeelding I.39 Genormaliseerd amplitude spectrum voor trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in Schalkwijk voor goederentrein passage op spoor 2 op 07-11-2023

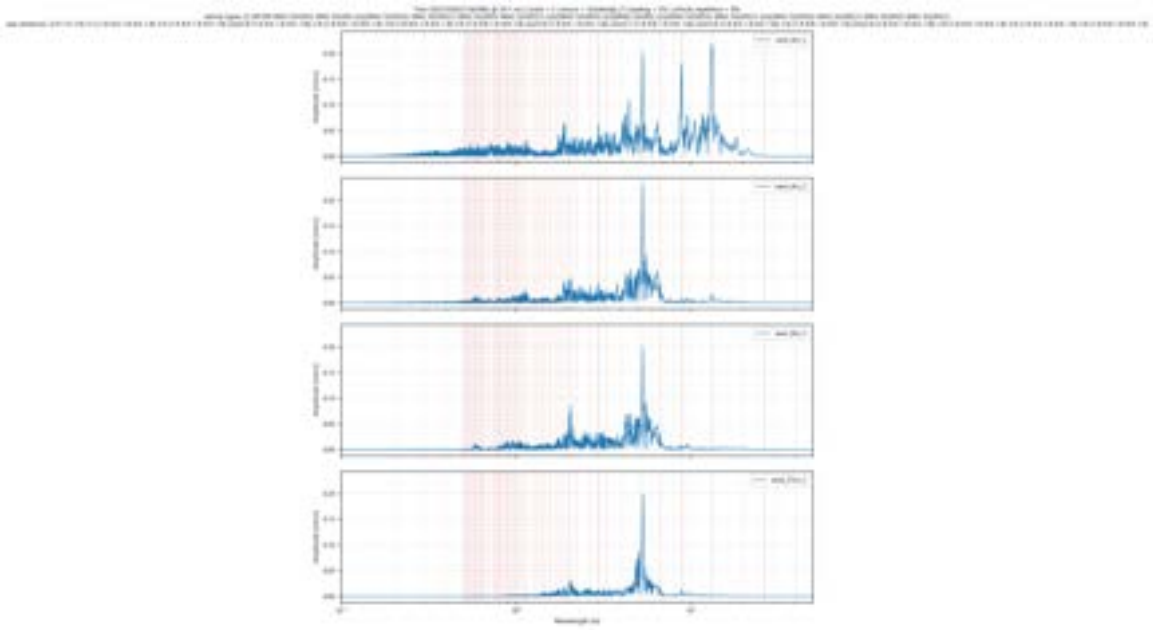


6-assige wagons, 10 % repetitie wagons, 10 % repetitie belading

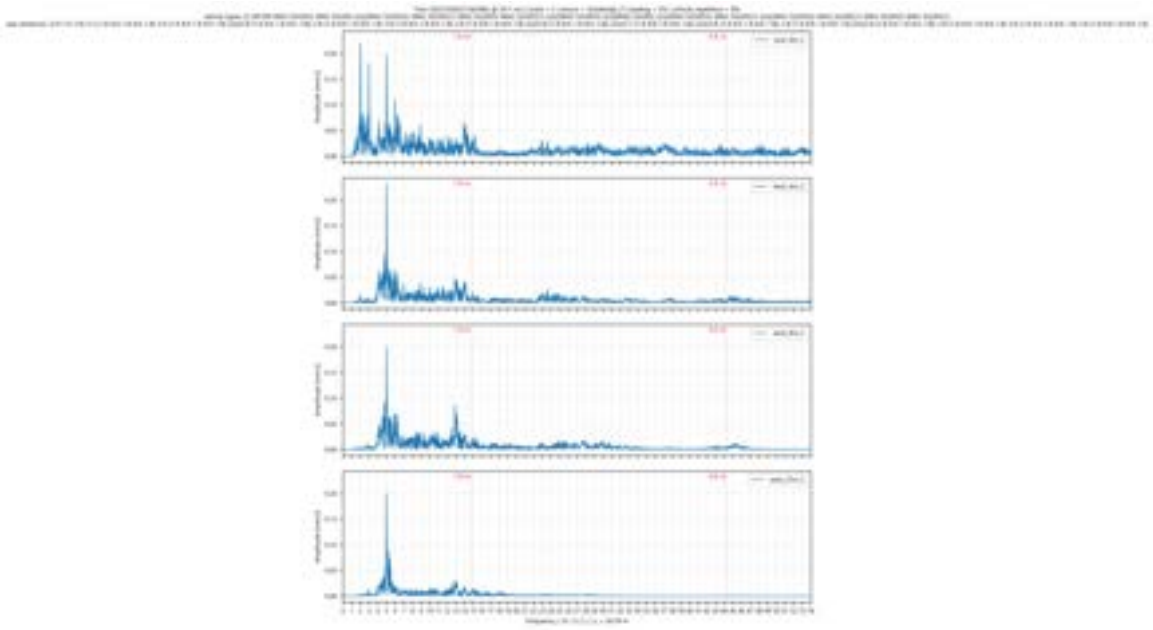
Afbeelding I.40 Trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in Schalkwijk voor goederentrein passage op spoor 2 op 26-10-2023



Afbeelding I.41 Amplitude spectrum voor trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in Schalkwijk voor goederentrein passage op spoor 2 op 26-10-2023

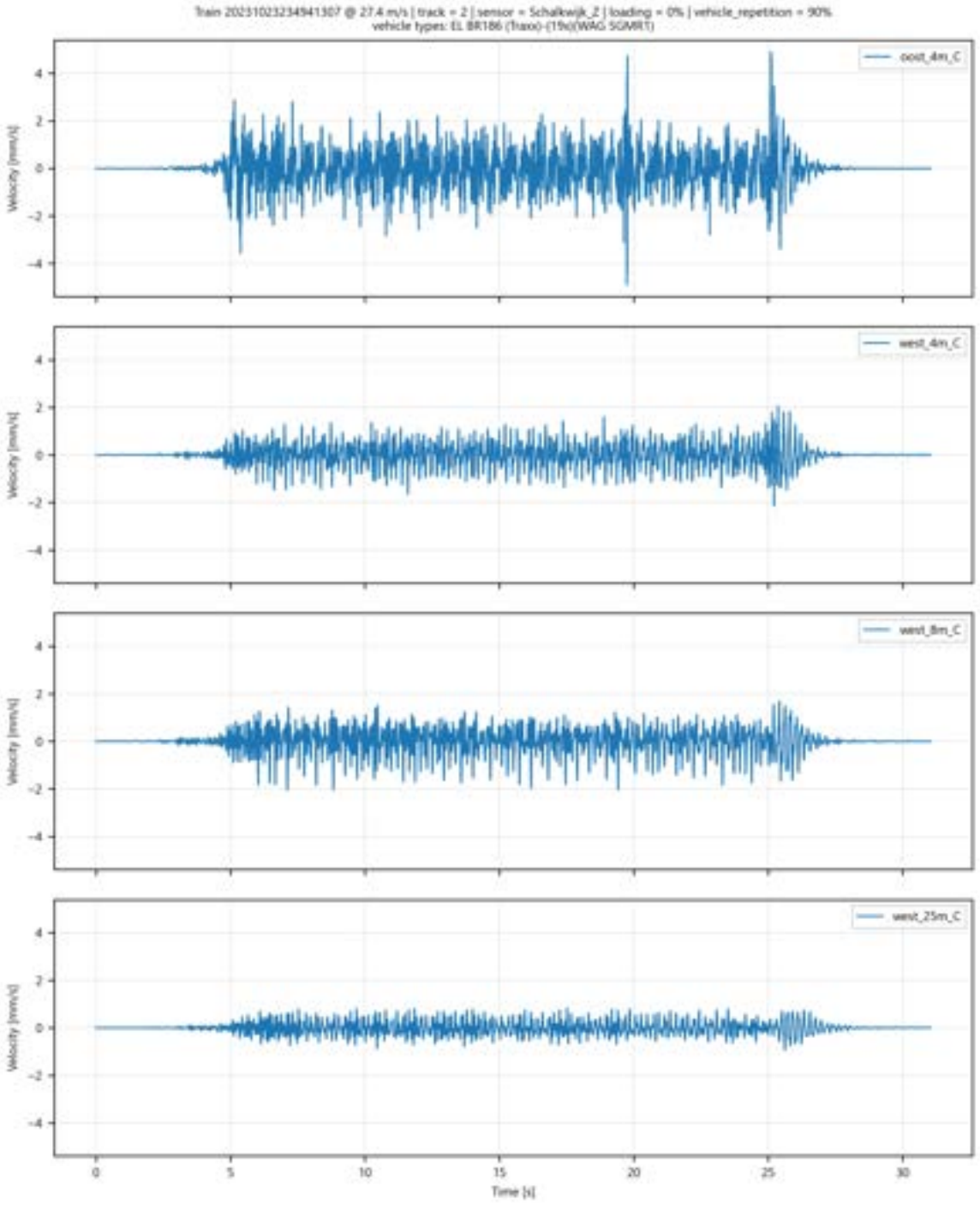


Afbeelding I.42 Genormaliseerd amplitude spectrum voor trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in Schalkwijk voor goederentrein passage op spoor 2 op 26-10-2023

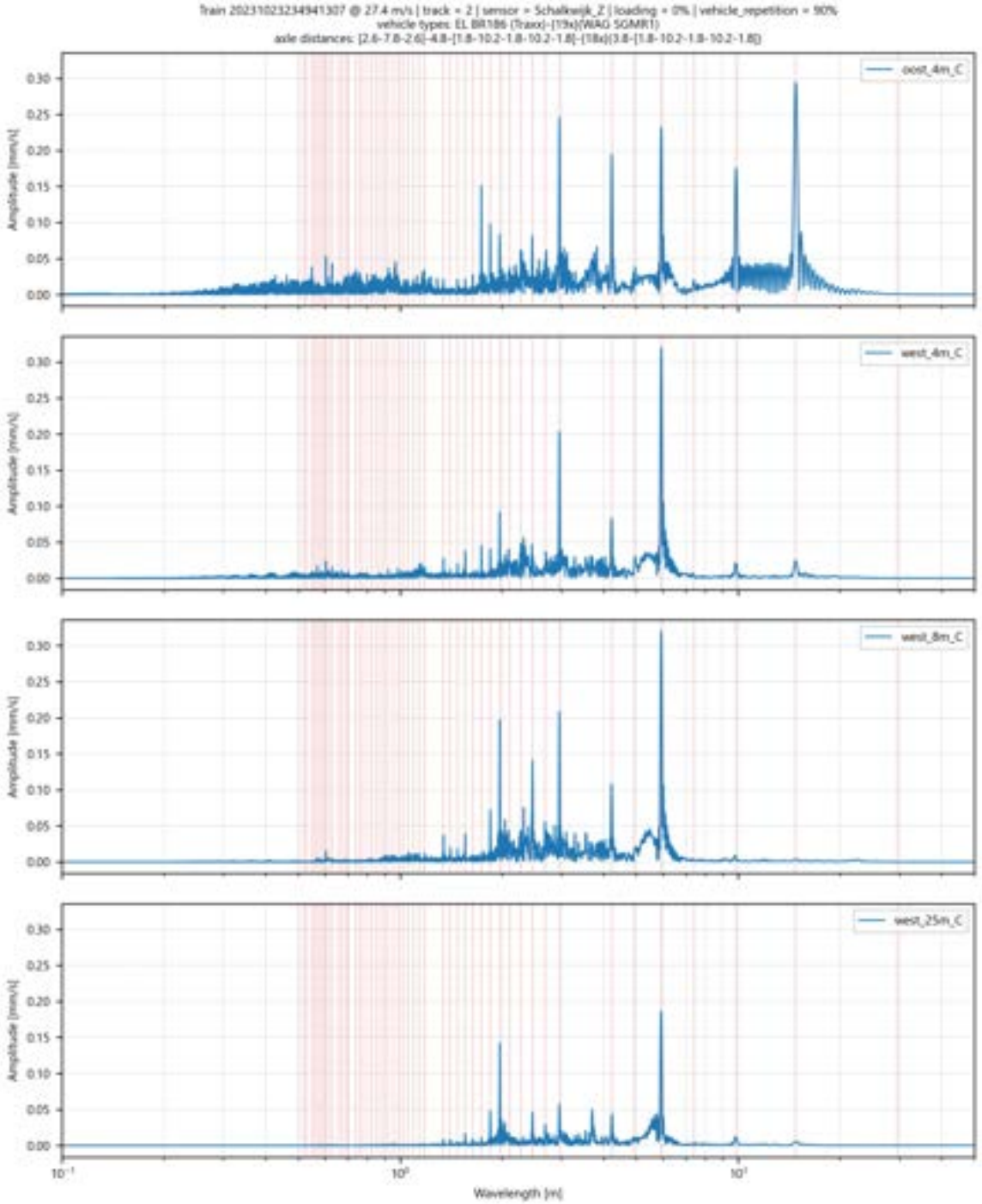


6-assige wagons, 100 % repetitie wagons, 0 % repetitie belading

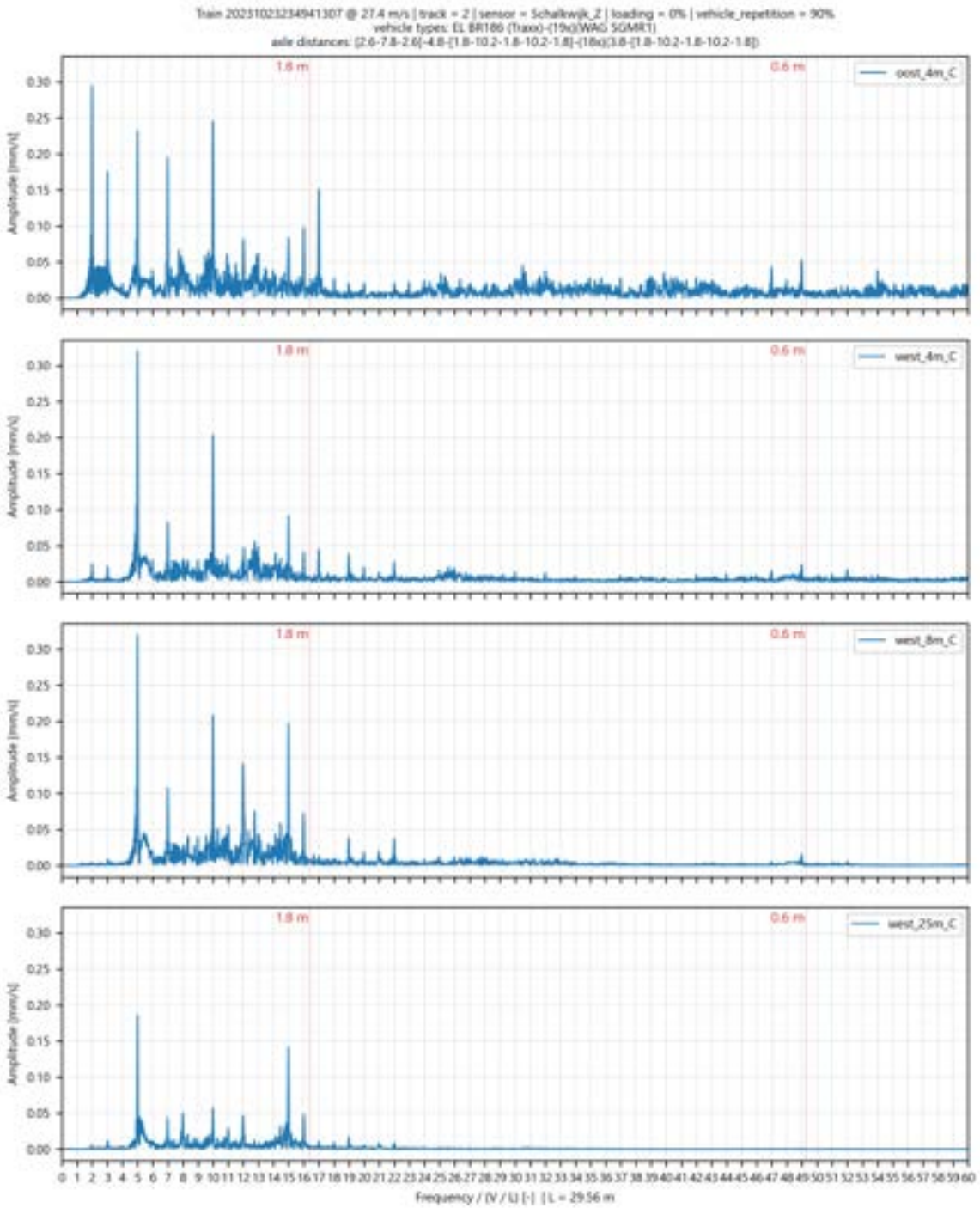
Afbeelding I.43 Trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in Schalkwijk voor goederentrein passage op spoor 2 op 23-10-2023



Afbeelding I.44 Amplitude spectrum voor trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in Schalkwijk voor goederentrein passage op spoor 2 op 23-10-2023

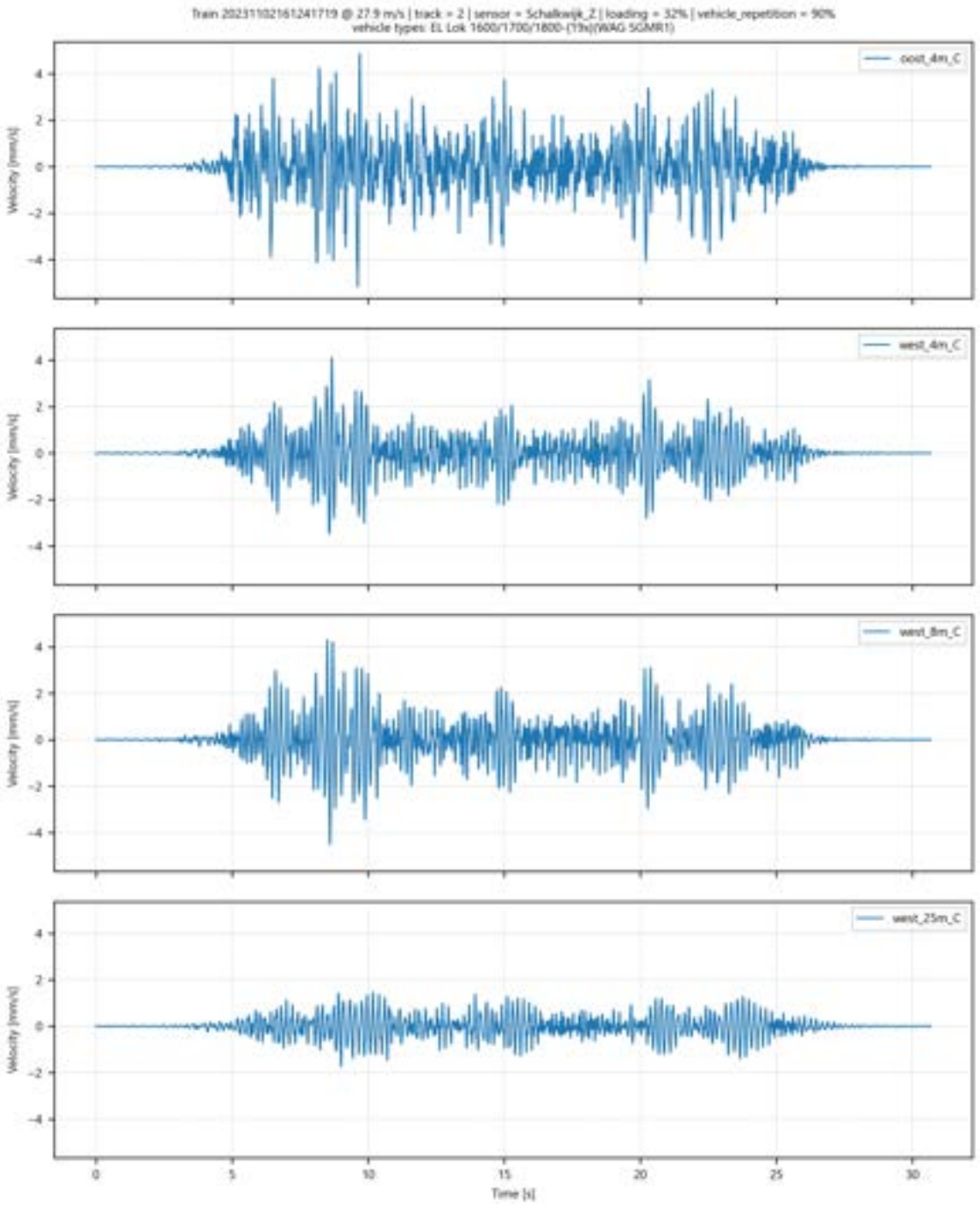


Afbeelding I.45 Genormaliseerd amplitude spectrum voor trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in Schalkwijk voor goederentrein passage op spoor 2 op 23-10-2023

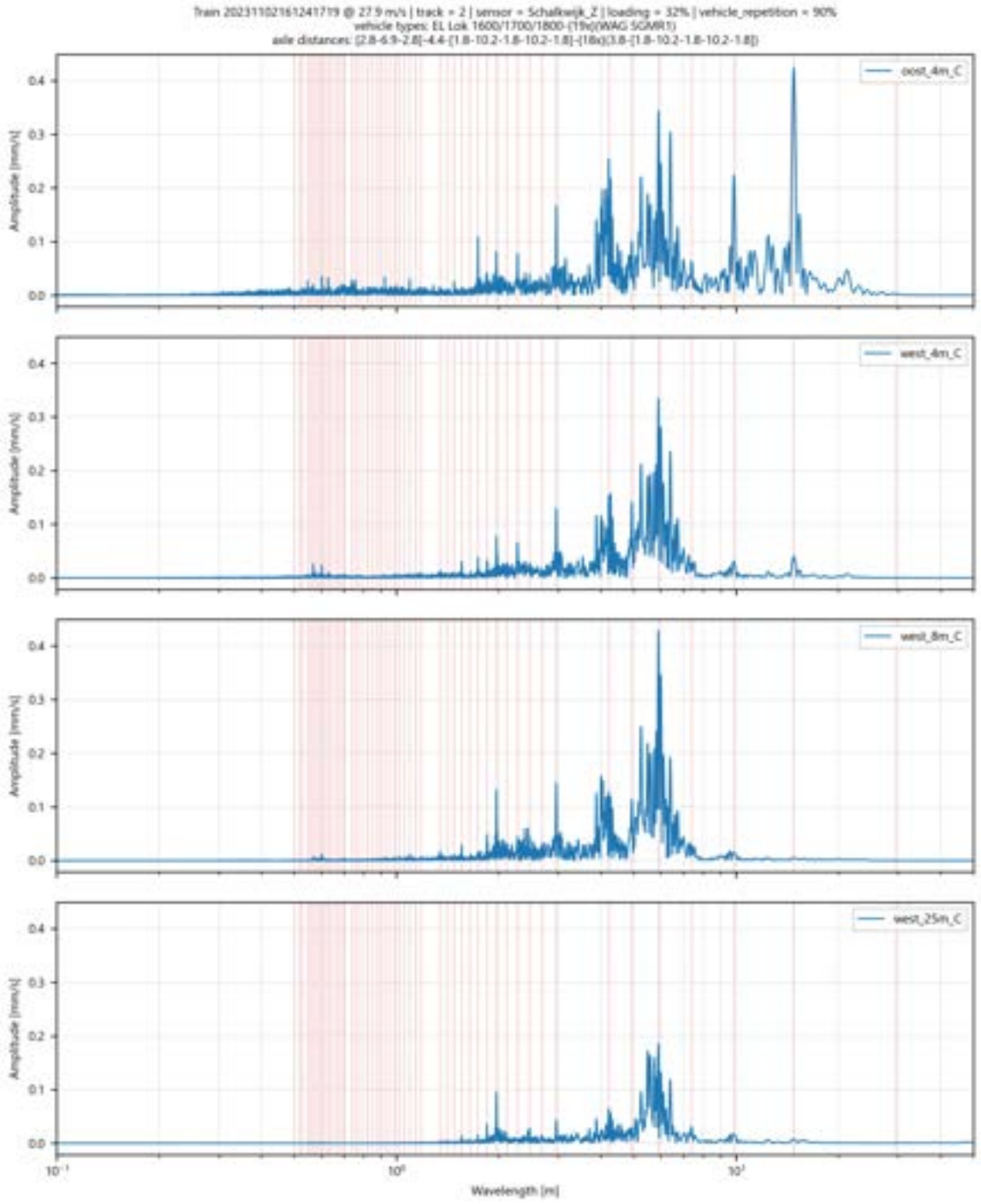


6-assige wagons, 100 % repetitie wagons, 40 % repetitie belading

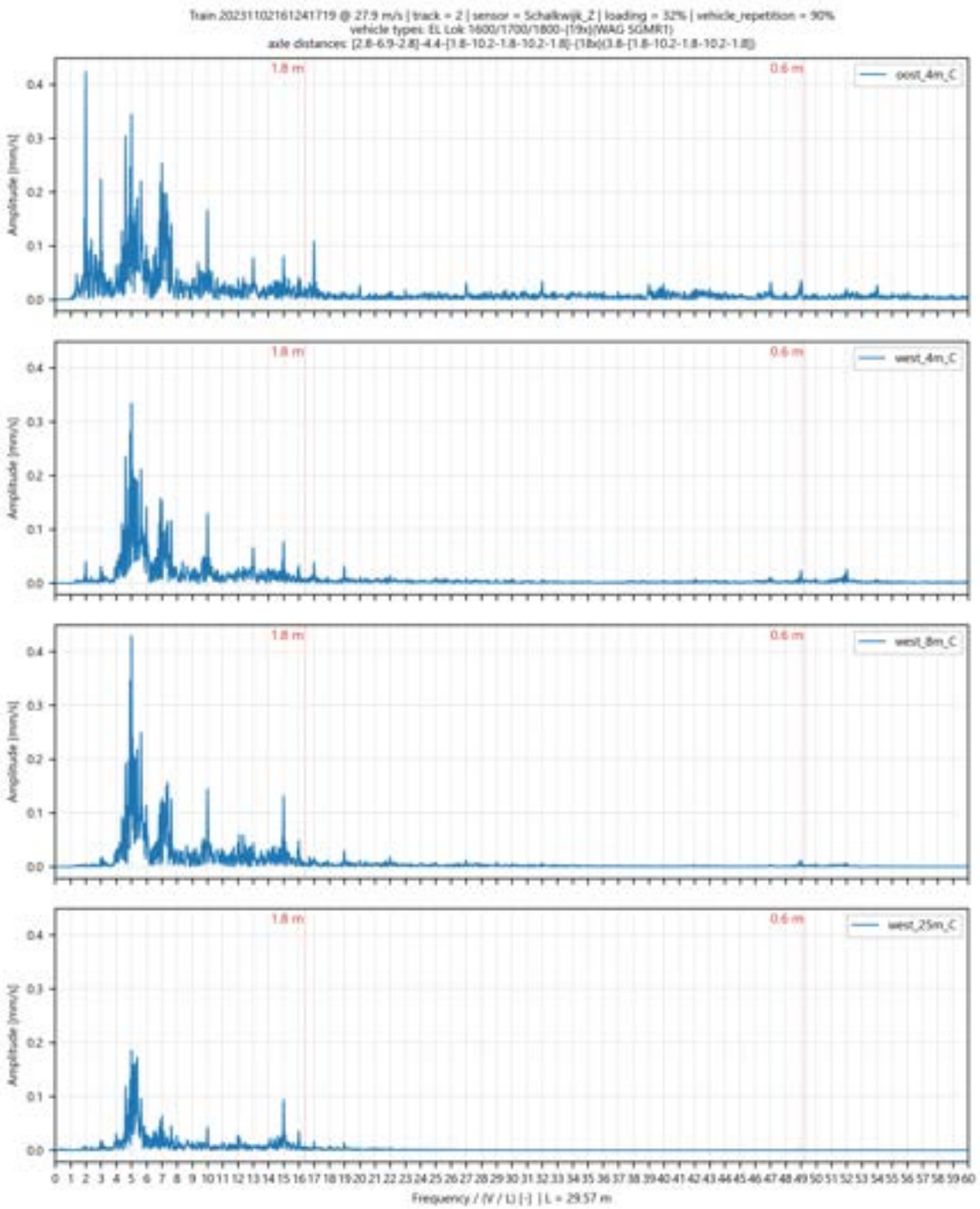
Afbeelding I.46 Trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in Schalkwijk voor goederentrein passage op spoor 2 op 02-11-2023



Afbeelding I.47 Amplitude spectrum voor trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in Schalkwijk voor goederentrein passage op spoor 2 op 02-11-2023



Afbeelding I.48 Genormaliseerd amplitude spectrum voor trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in Schalkwijk voor goederentrein passage op spoor 2 op 02-11-2023



II

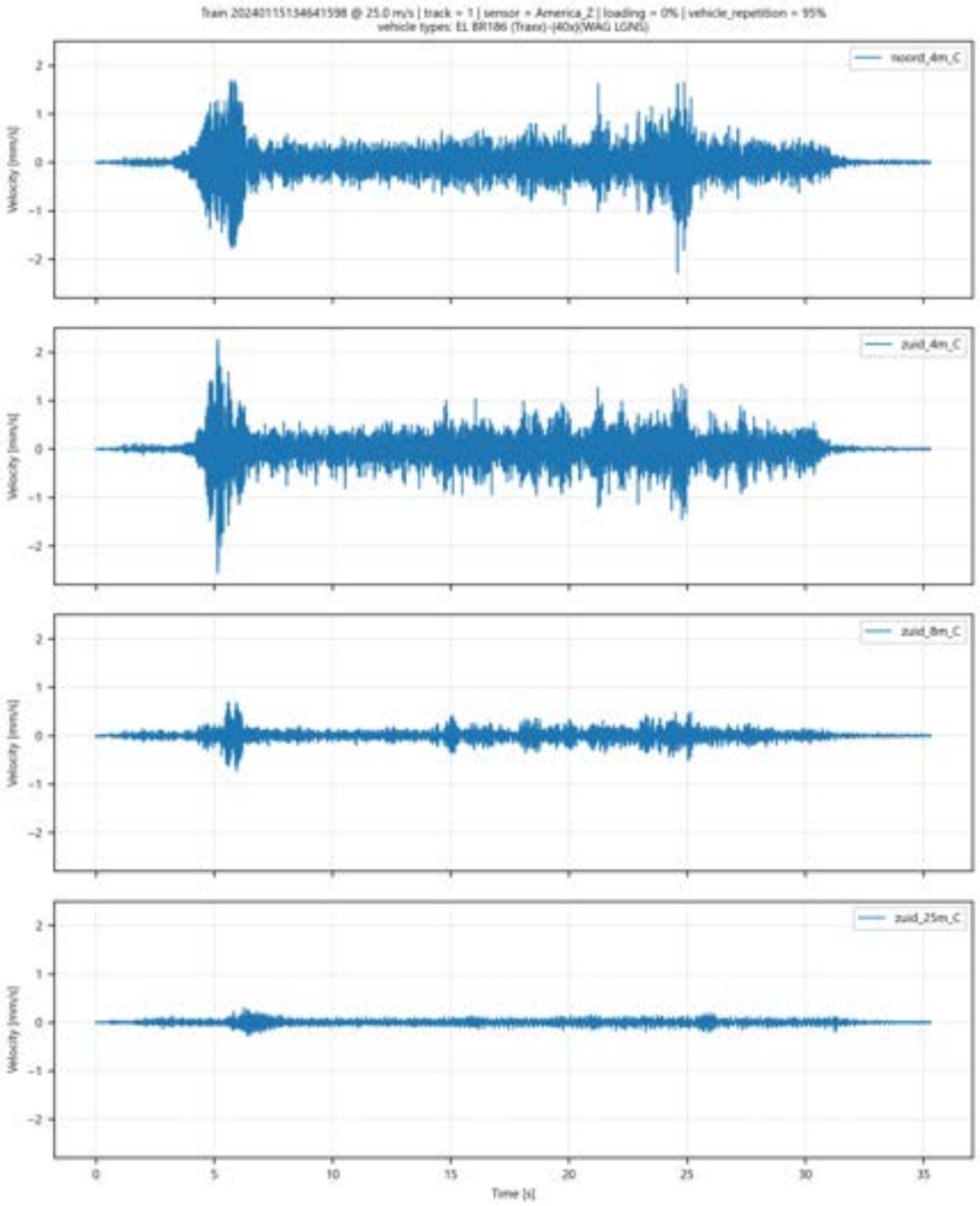
BIJLAGE: TRILLINGSSIGNALEN MEETLOCATIE AMERICA

In deze bijlage worden voor meetlocatie America de trillingssignalen voor verschillende treinpassages gepresenteerd in het tijdsdomein en frequentiedomein.

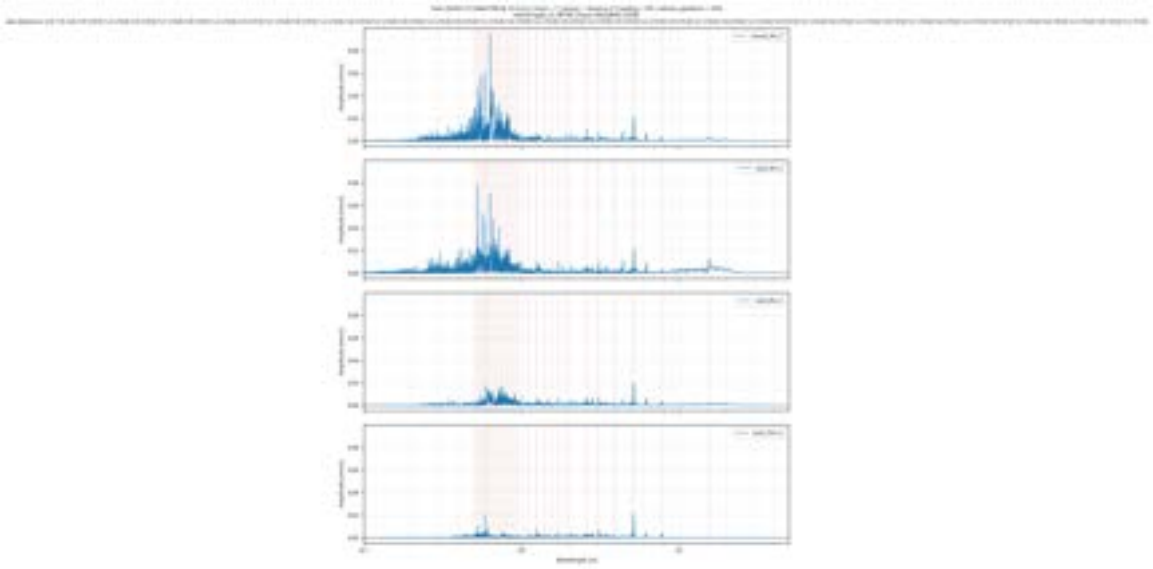
Meetlocatie America - spoor 1

2-assige wagons, 100 % repetitie wagons, 0 % repetitie belading

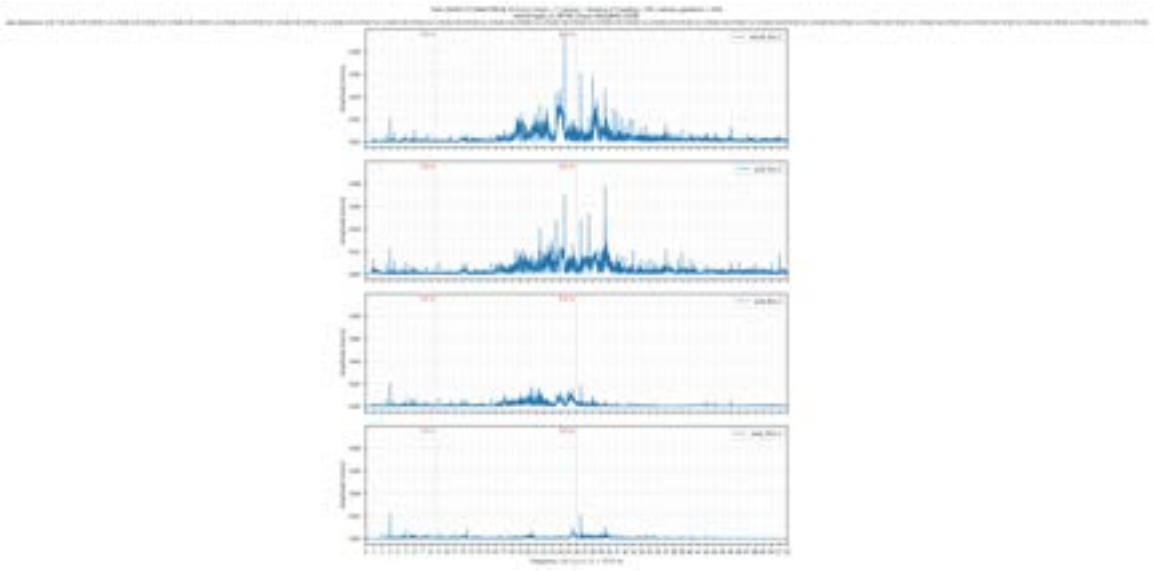
Afbeelding II.1 Trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in America voor goederentrein passage op spoor 1 op 15-01-2024



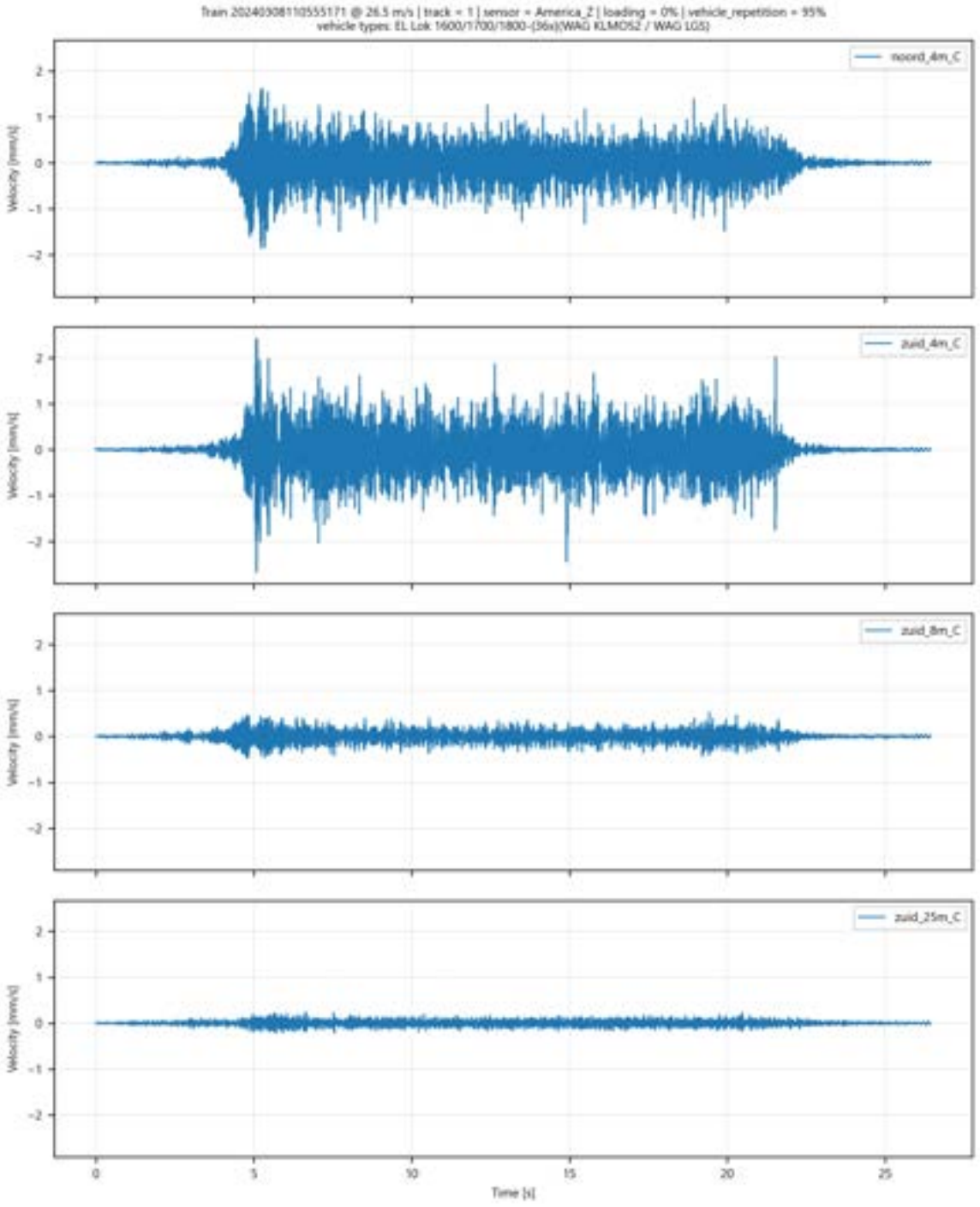
Afbeelding II.2 Amplitude spectrum voor trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in America voor goederentrein passage op spoor 1 op 15-01-2024



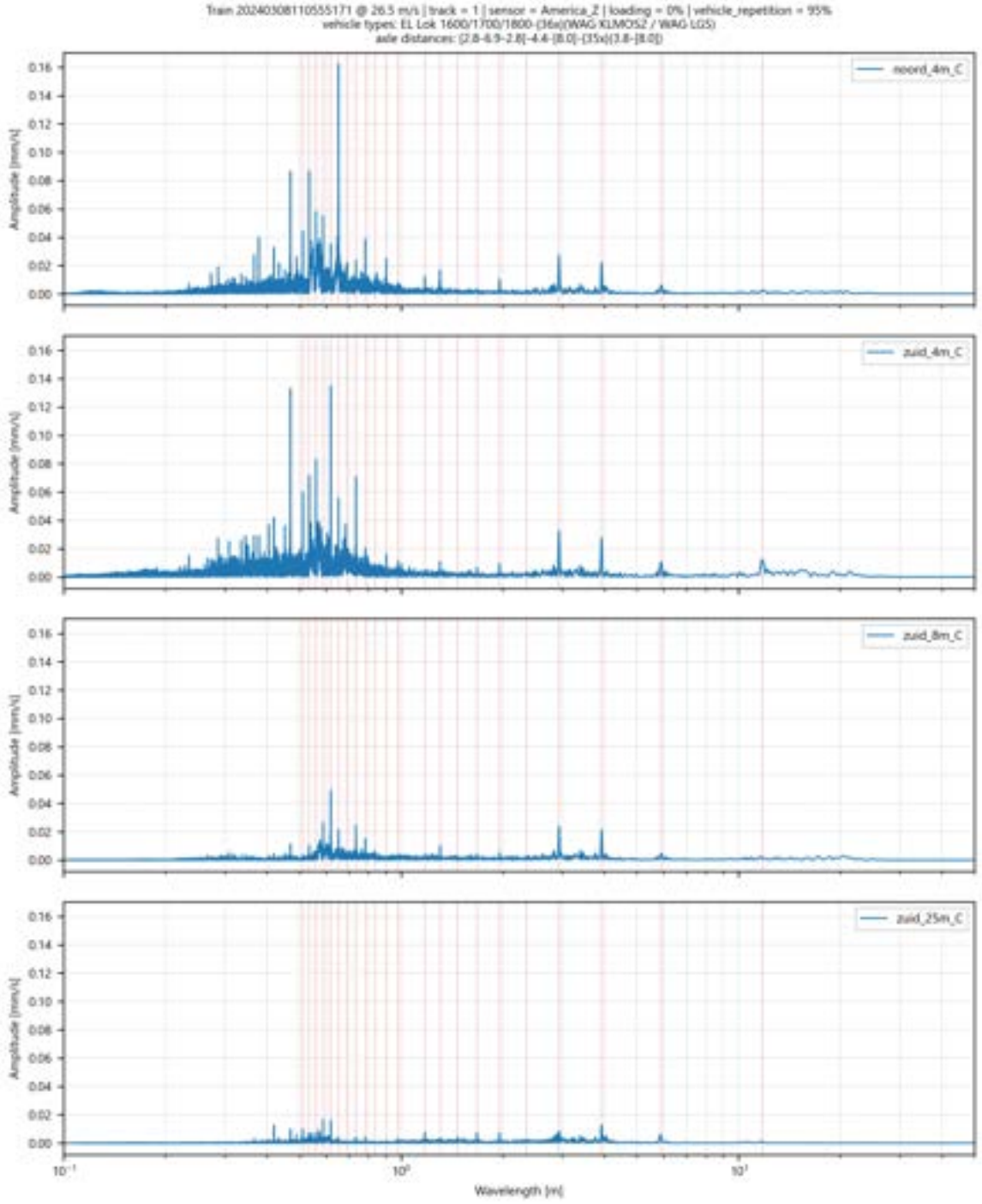
Afbeelding II.3 Genormaliseerd amplitude spectrum voor trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in America voor goederentrein passage op spoor 1 op 15-01-2024



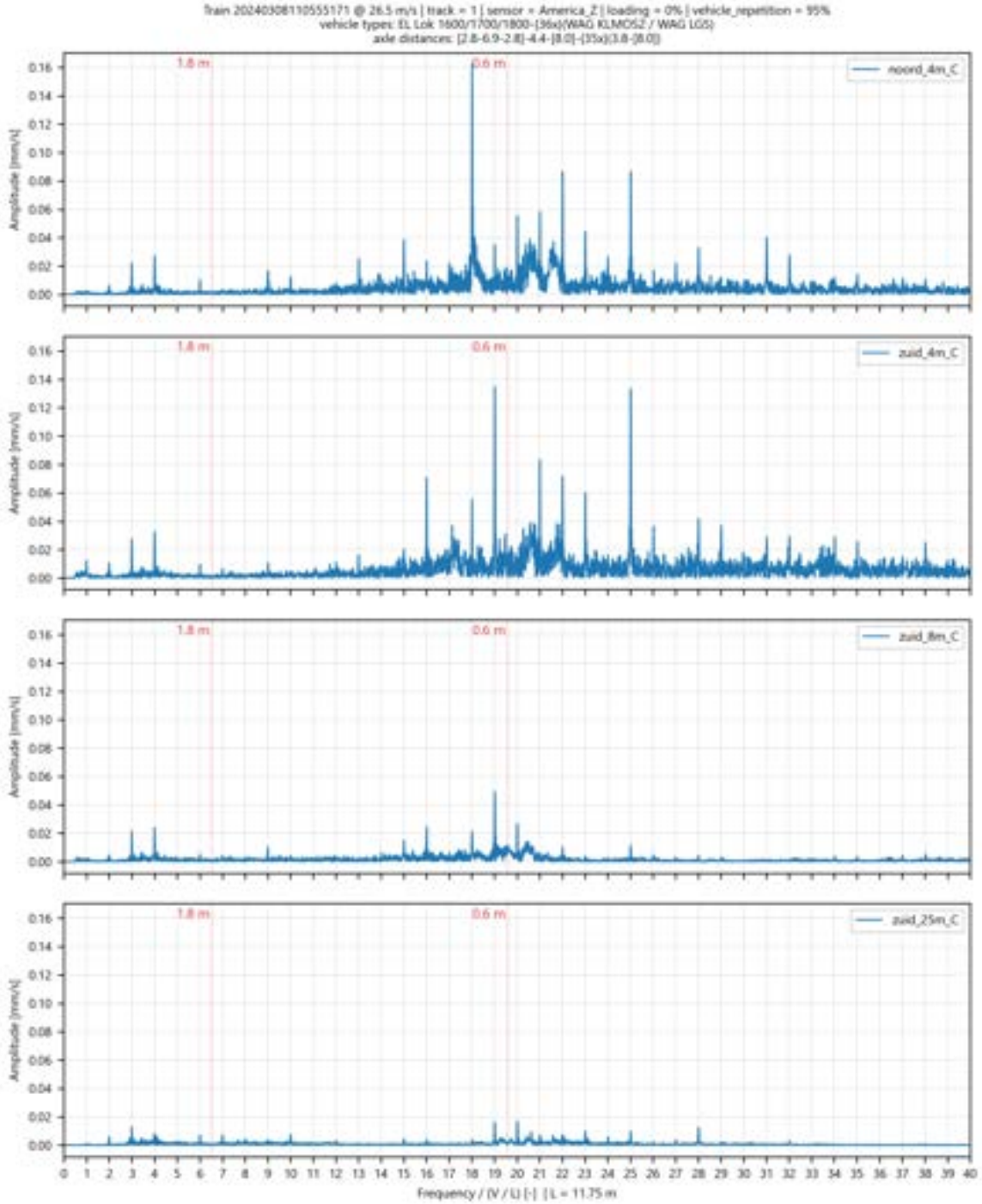
Afbeelding II.4 Trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in America voor goederentrein passage op spoor 1 op 08-03-2024



Afbeelding II.5 Amplitude spectrum voor trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in America voor goederentrein passage op spoor 1 op 08-03-2024

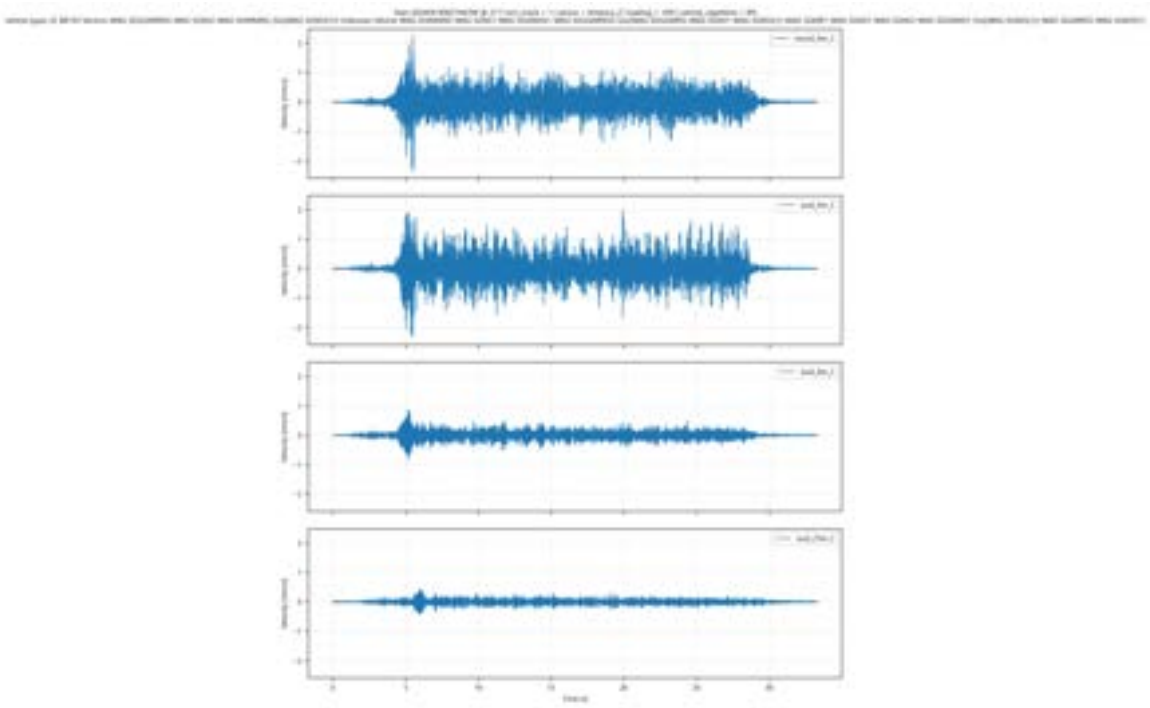


Afbeelding II.6 Genormaliseerd amplitude spectrum voor trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in America voor goederentrein passage op spoor 1 op 08-03-2024

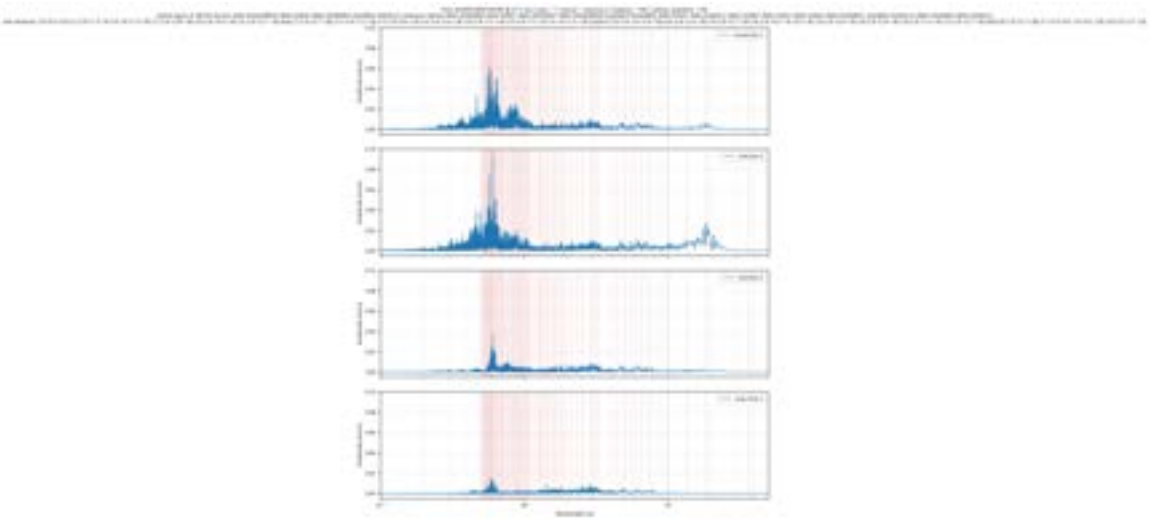


4-assige wagons, 10 % repetitie wagons, 20 % repetitie belading

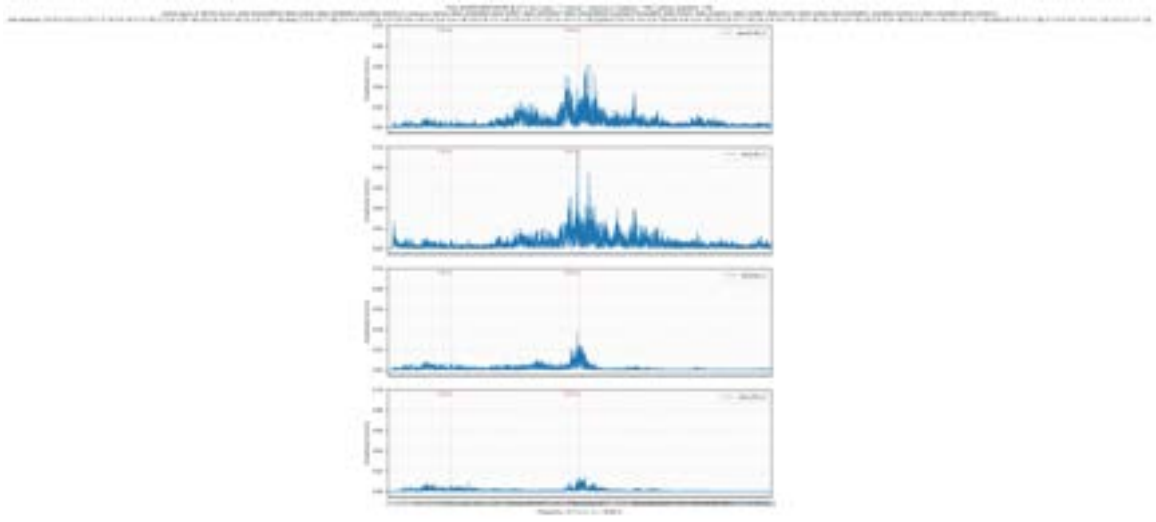
Afbeelding II.7 Trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in America voor goederentrein passage op spoor 1 op 19-04-2024



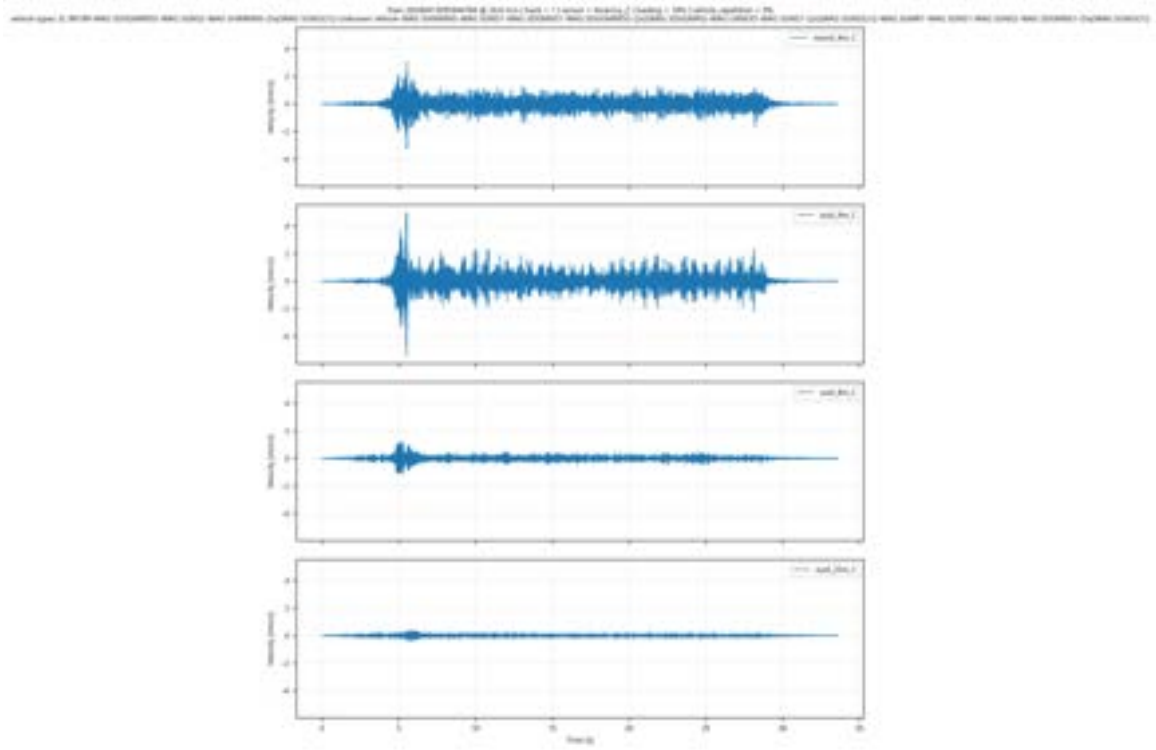
Afbeelding II.8 Amplitude spectrum voor trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in America voor goederentrein passage op spoor 1 op 19-04-2024



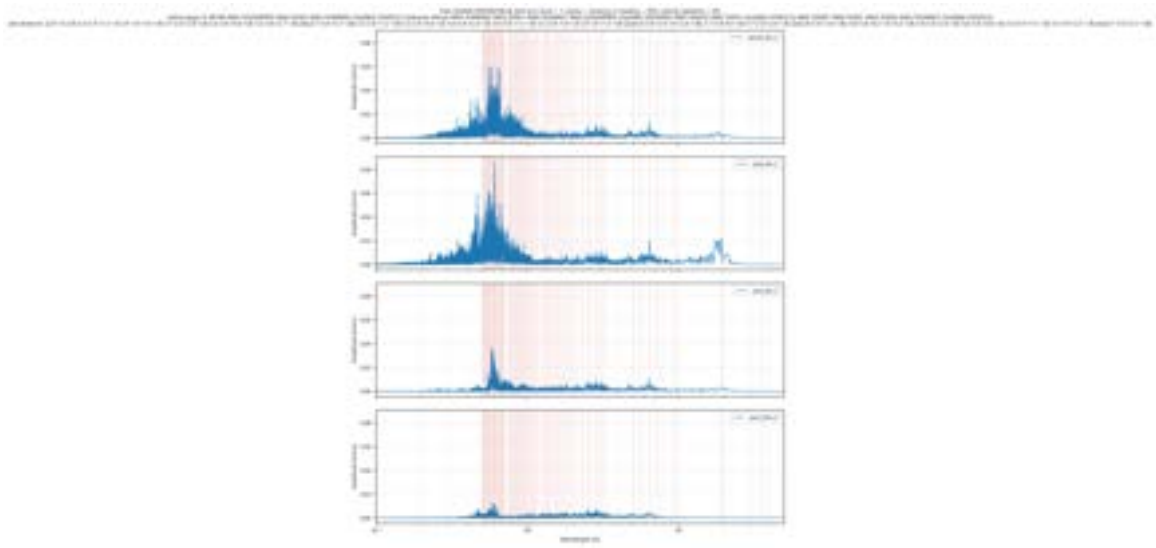
Afbeelding II.9 Genormaliseerd amplitude spectrum voor trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in America voor goederentrein passage op spoor 1 op 19-04-2024



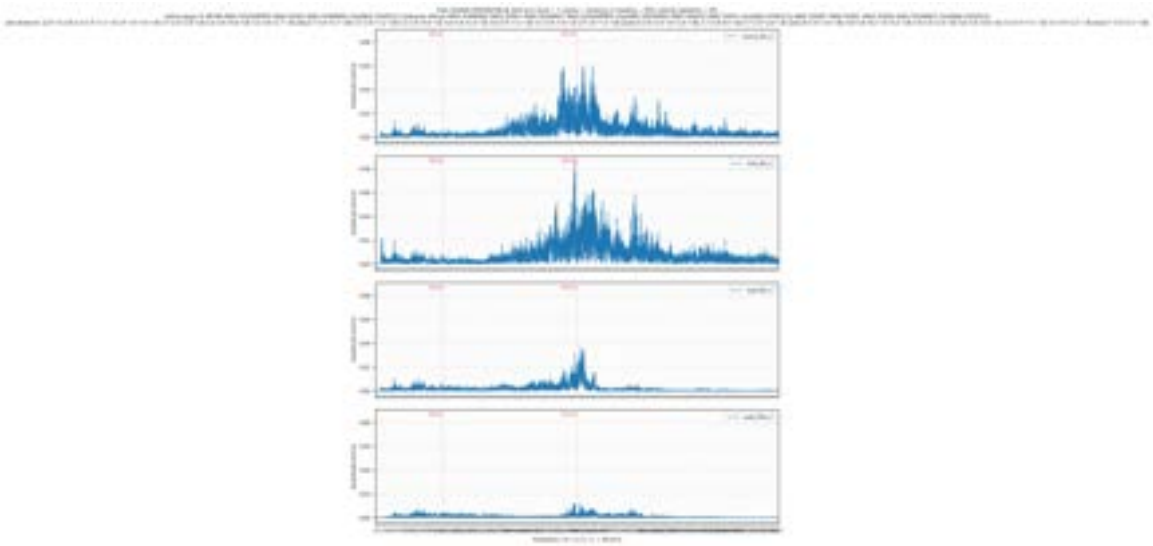
Afbeelding II.10 Trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in America voor goederentrein passage op spoor 1 op 13-04-2024



Afbeelding II.11 Amplitude spectrum voor trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in America voor goederentrein passage op spoor 1 op 13-04-2024

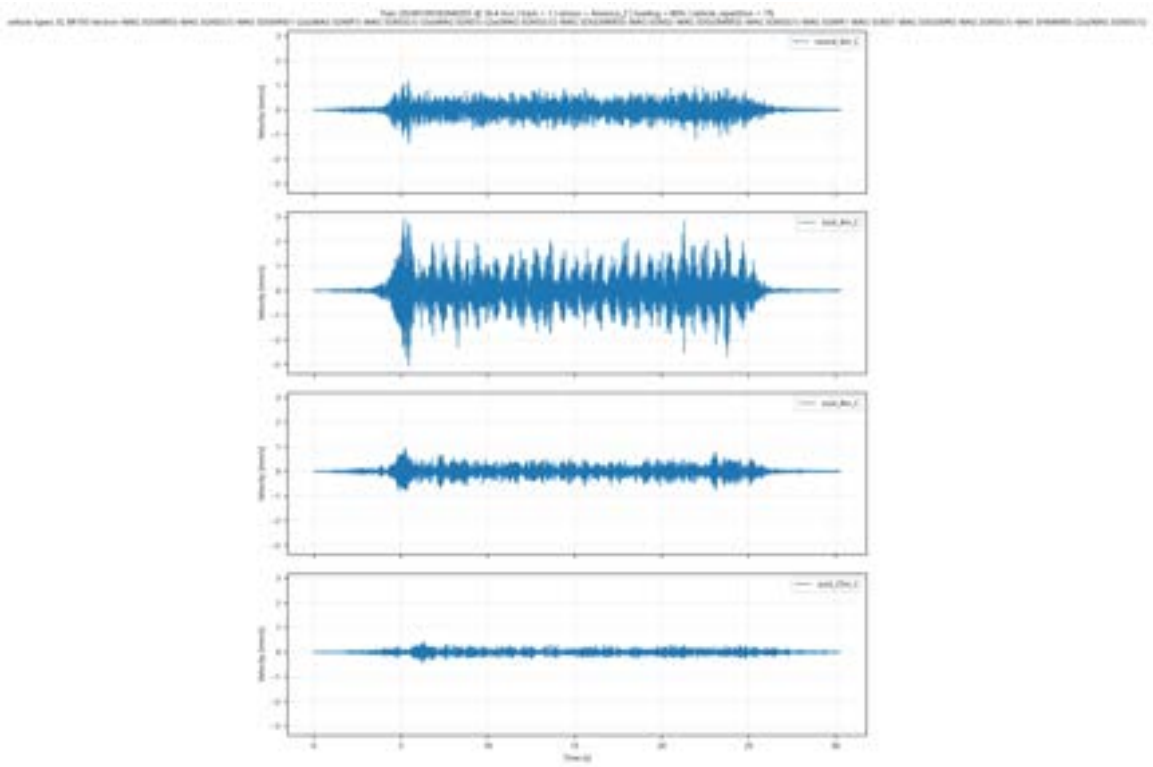


Afbeelding II.12 Genormaliseerd amplitude spectrum voor trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in America voor goederentrein passage op spoor 1 op 13-04-2024

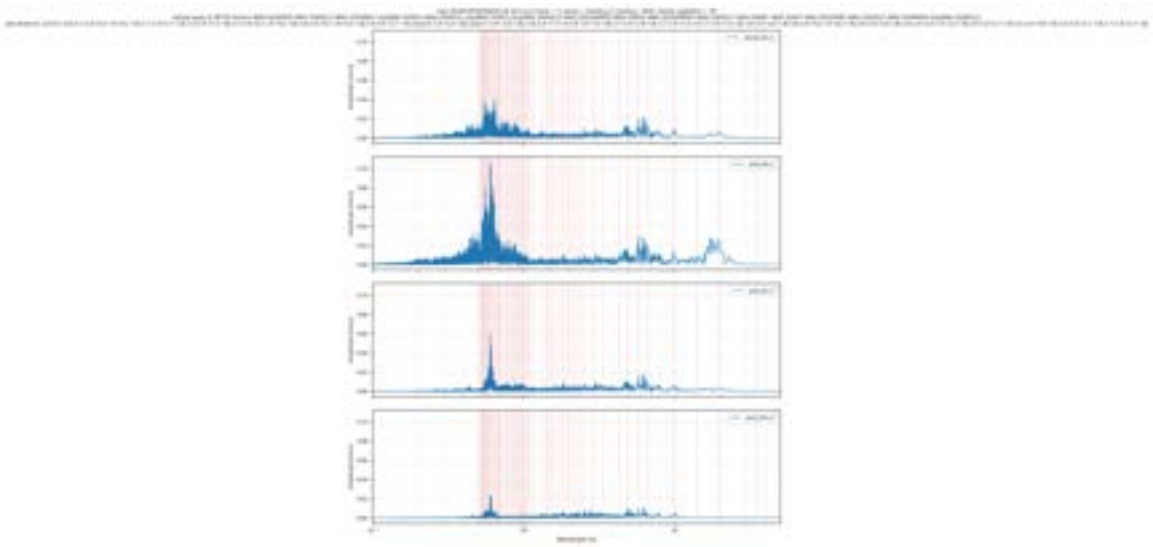


4-assige wagons, 10 % repetitie wagons, 90 % repetitie belading

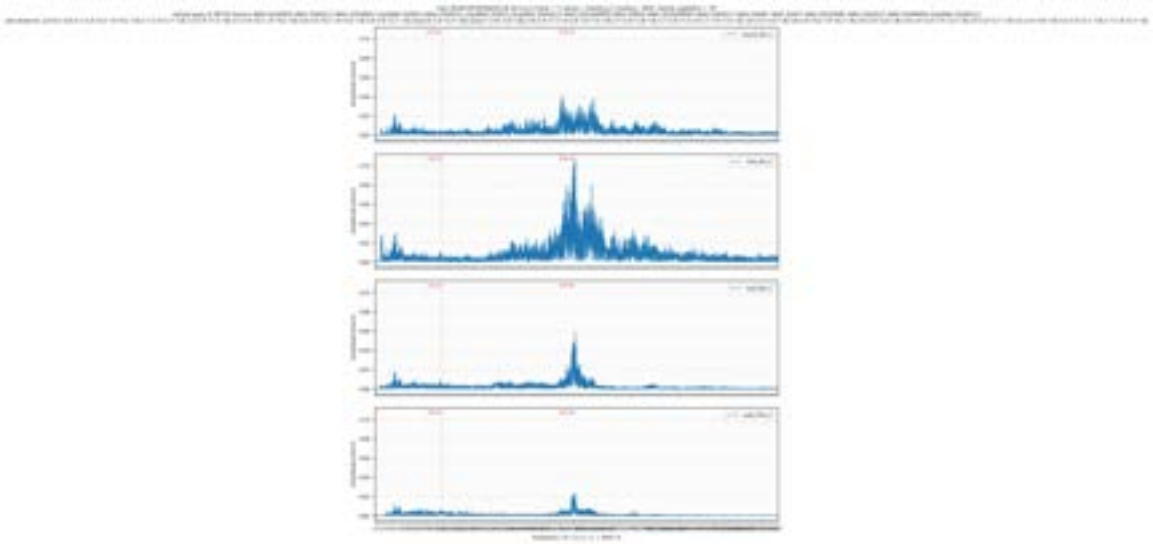
Afbeelding II.13 Trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in America voor goederentrein passage op spoor 1 op 09-01-2024



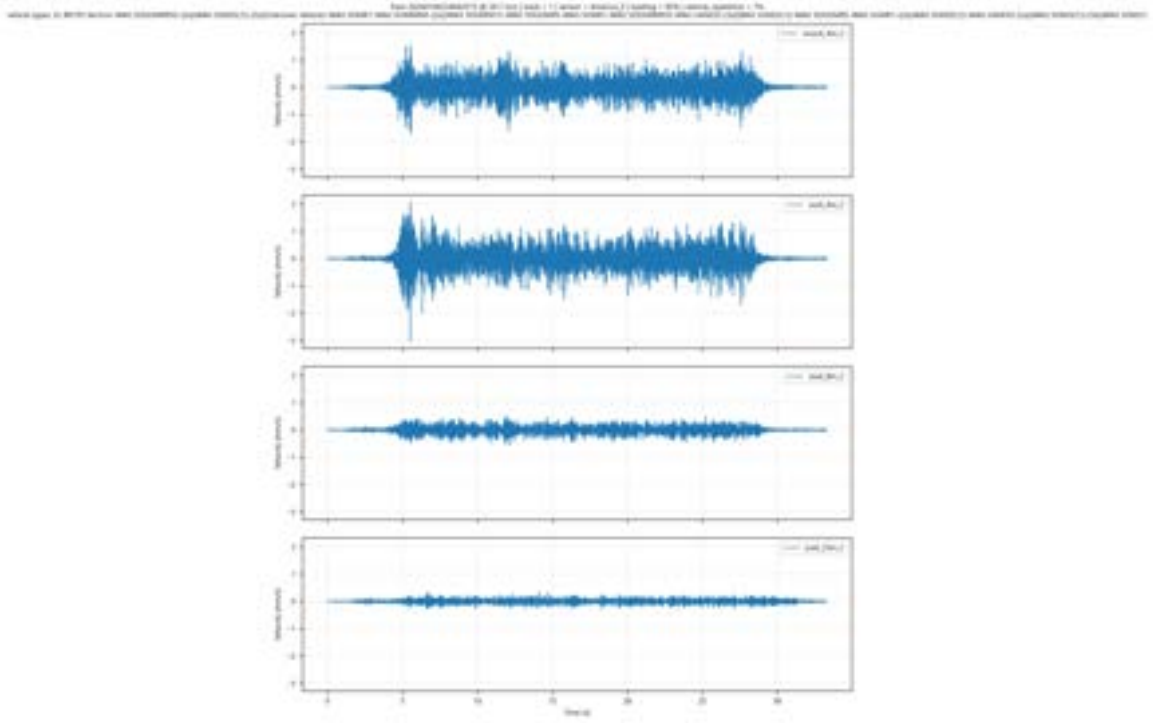
Afbeelding II.14 Amplitude spectrum voor trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in America voor goederentrein passage op spoor 1 op 09-01-2024



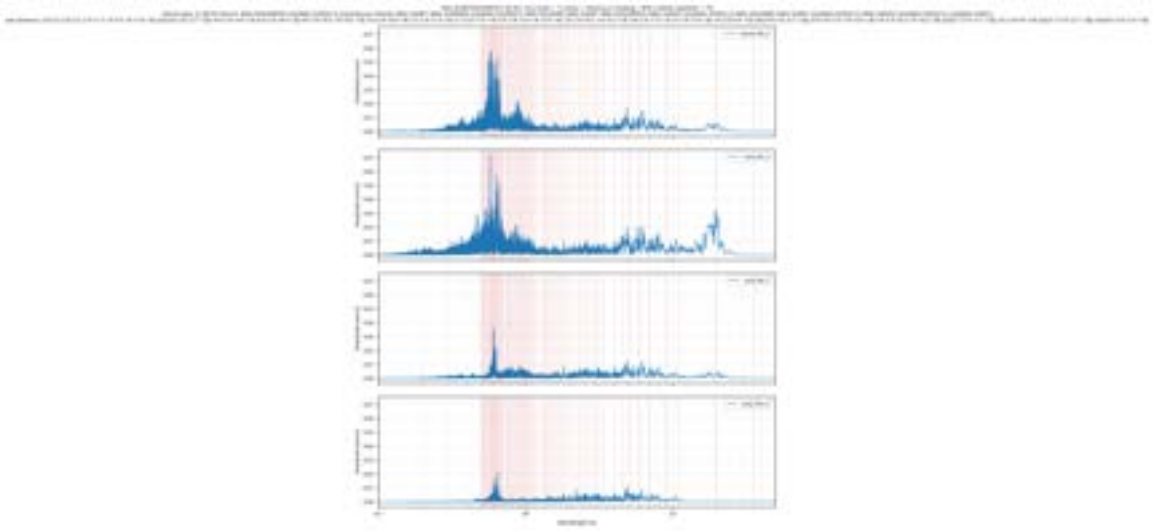
Afbeelding II.15 Genormaliseerd amplitude spectrum voor trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in America voor goederentrein passage op spoor 1 op 09-01-2024



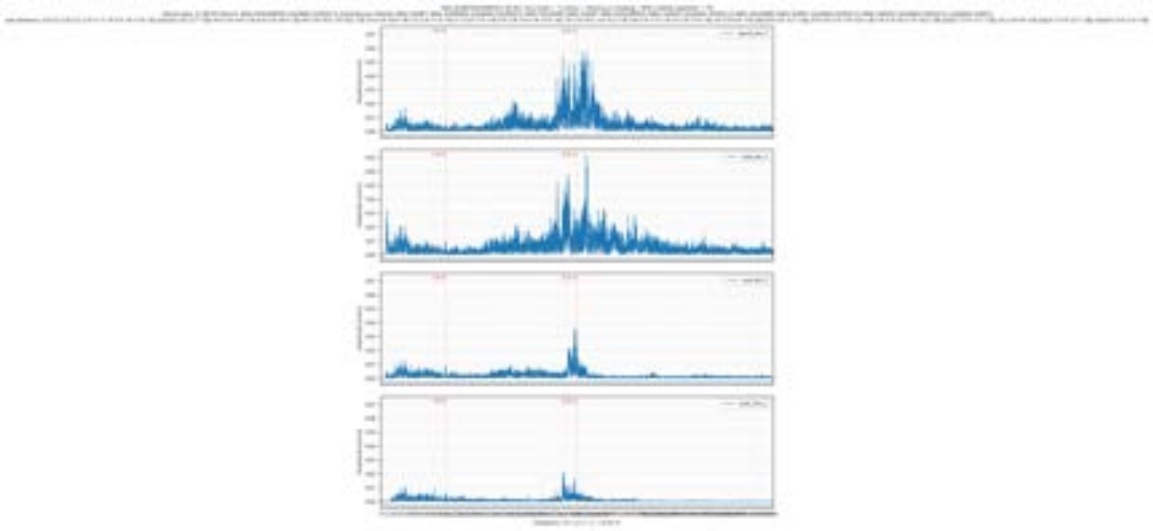
Afbeelding II.16 Trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in America voor goederentrein passage op spoor 1 op 04-01-2024



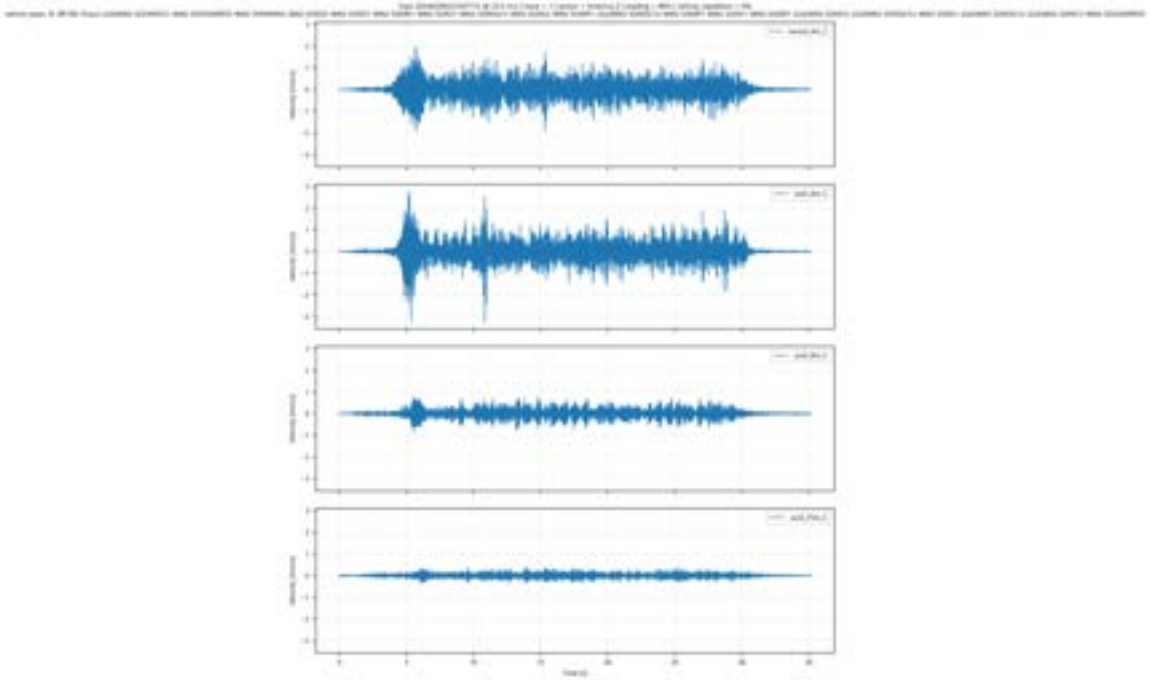
Afbeelding II.17 Amplitude spectrum voor trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in America voor goederentrein passage op spoor 1 op 04-01-2024



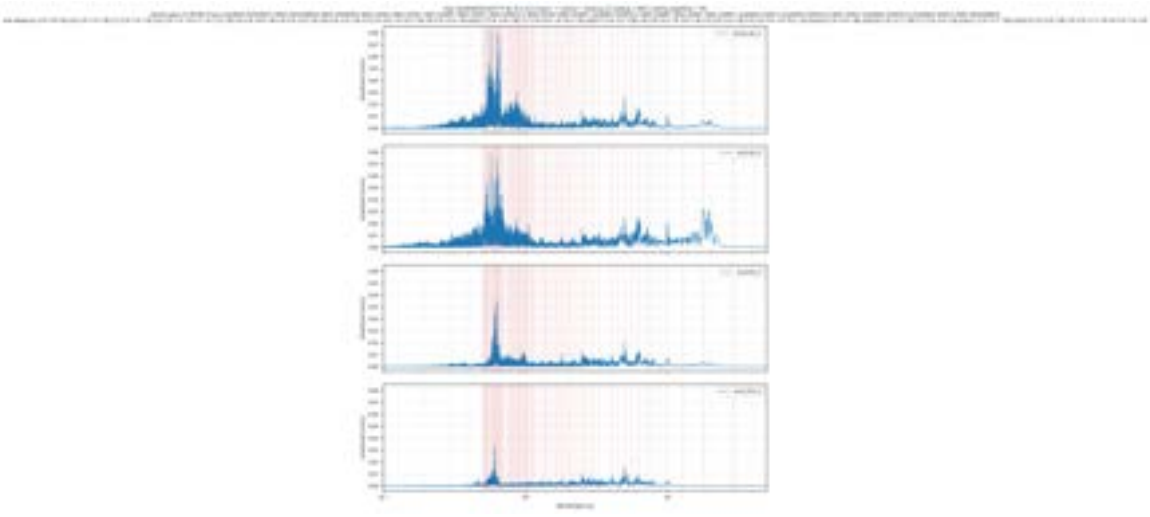
Afbeelding II.18 Genormaliseerd amplitude spectrum voor trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in America voor goederentrein passage op spoor 1 op 04-01-2024



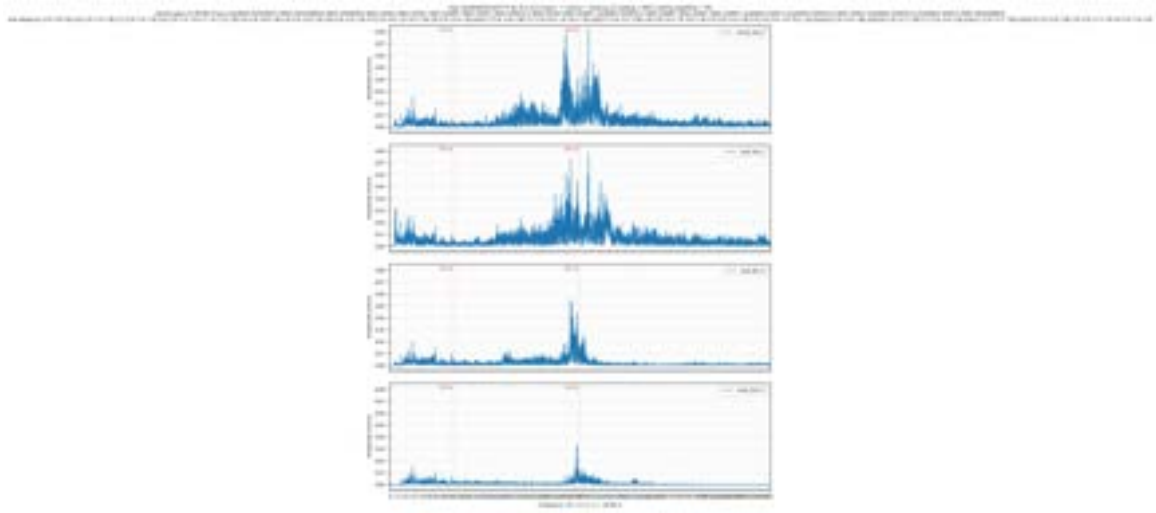
Afbeelding II.19 Trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in America voor goederentrein passage op spoor 1 op 09-02-2024



Afbeelding II.20 Amplitude spectrum voor trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in America voor goederentrein passage op spoor 1 op 09-02-2024

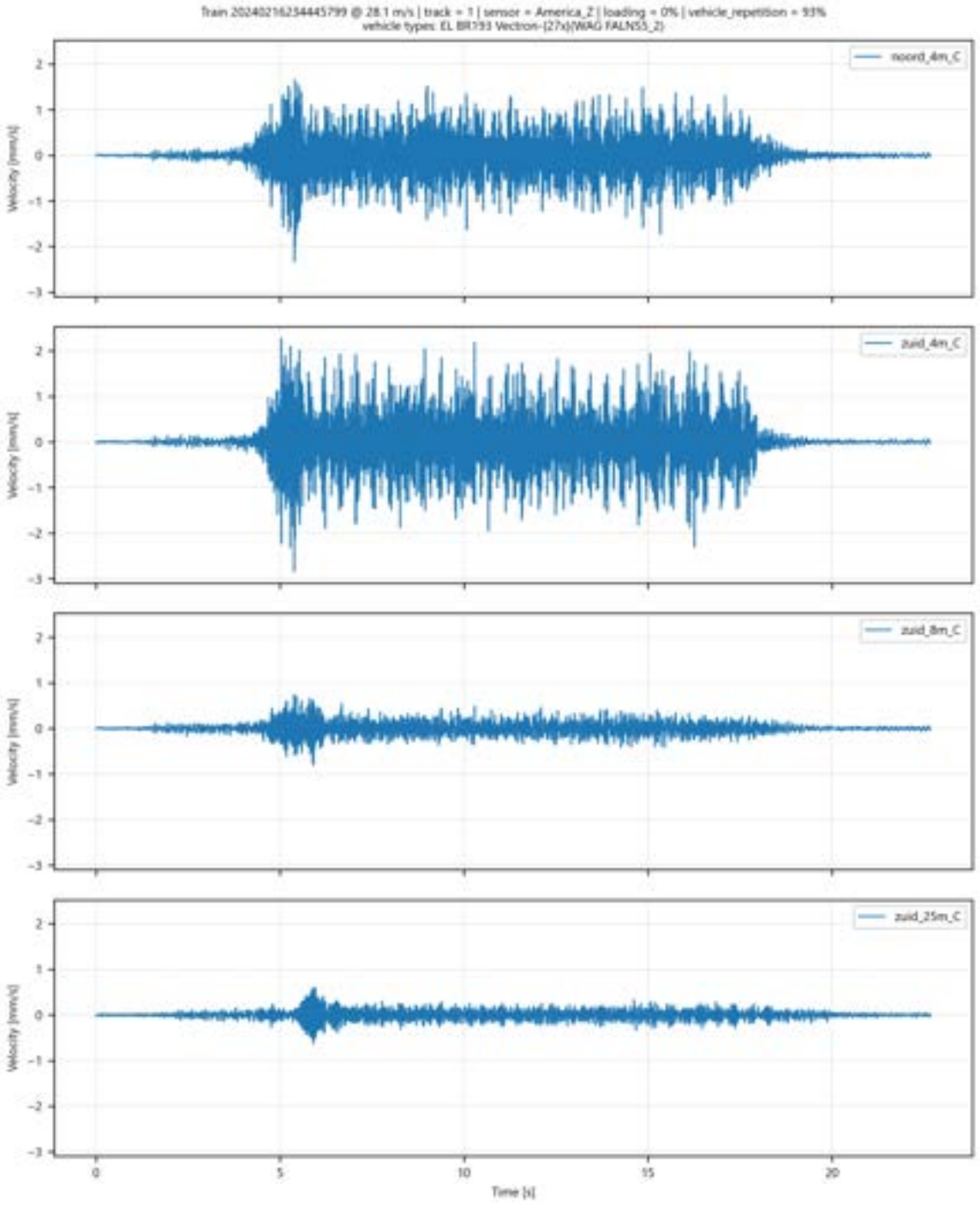


Afbeelding II.21 Genormaliseerd amplitude spectrum voor trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in America voor goederentrein passage op spoor 1 op 09-02-2024

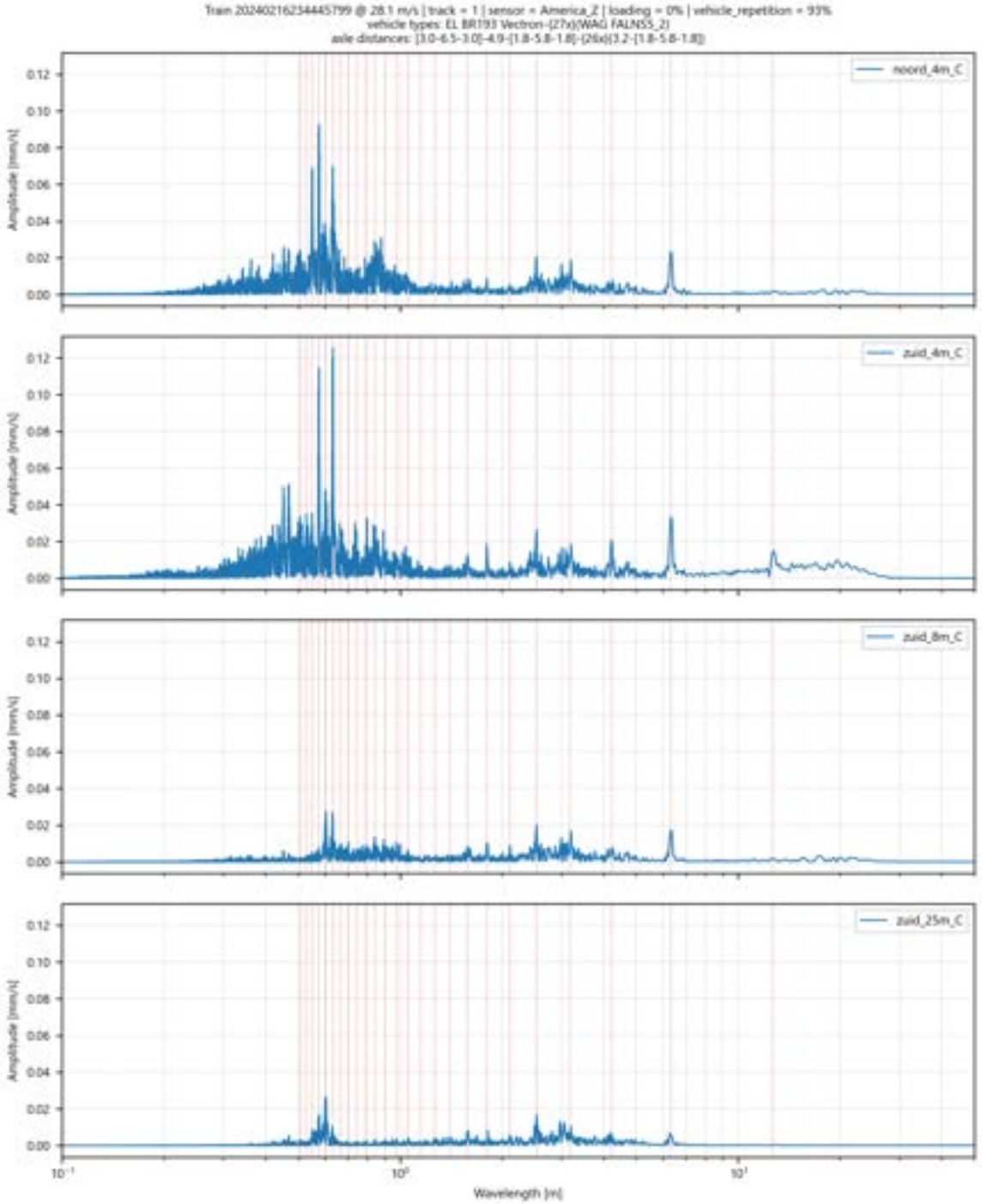


4-assige wagons, 100 % repetitie wagons, 0 % repetitie belading

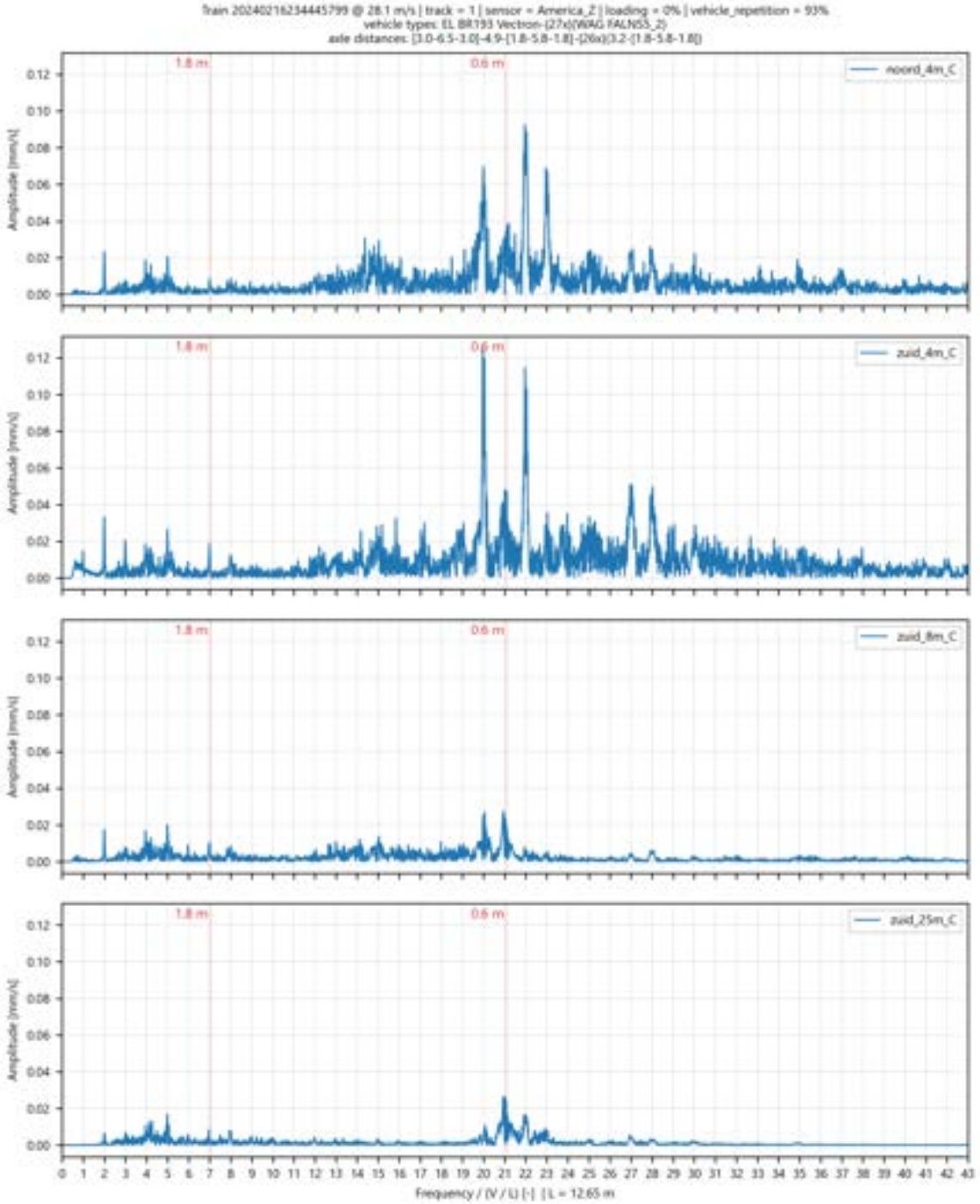
Afbeelding II.22 Trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in America voor goederentrein passage op spoor 1 op 16-02-2024



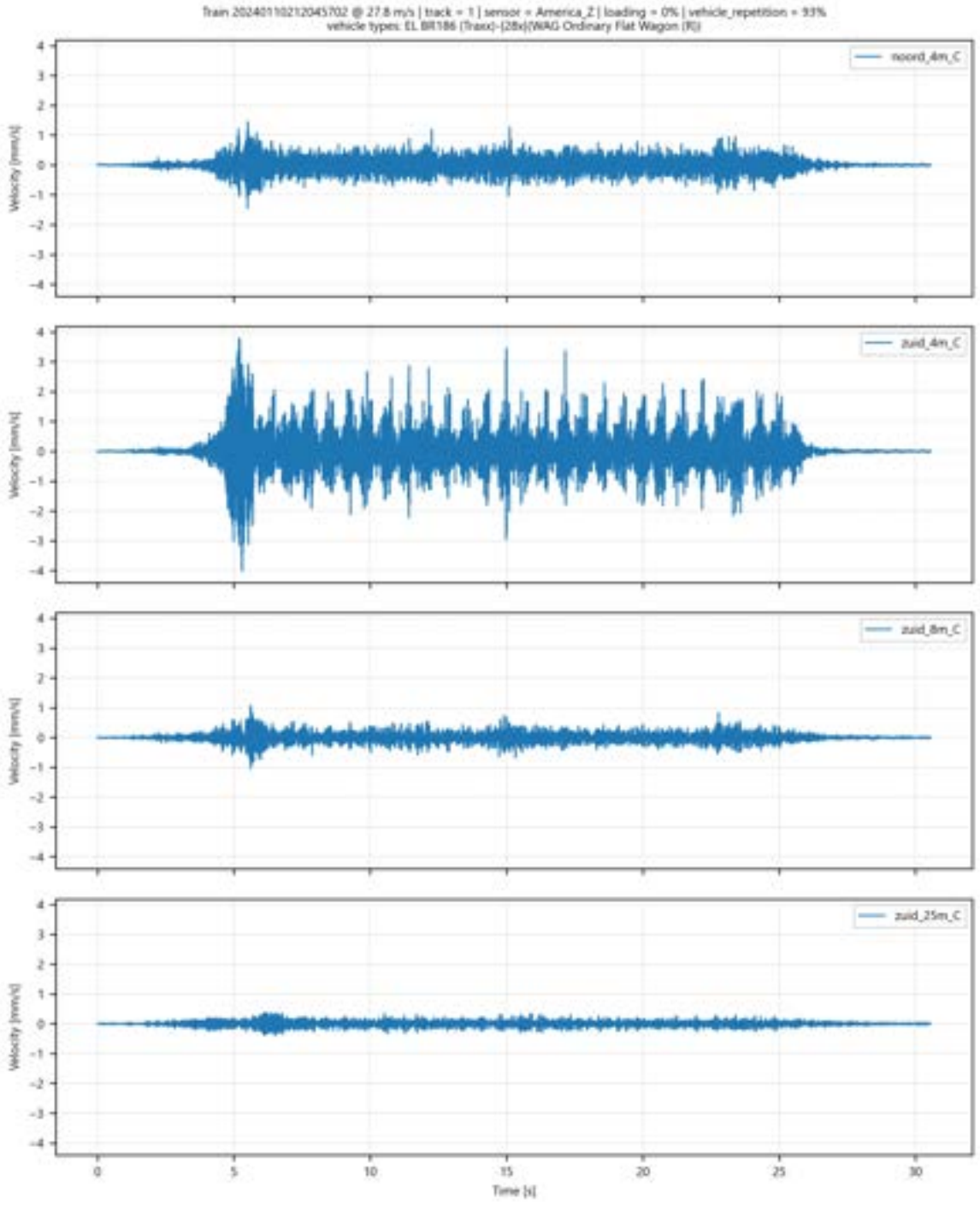
Afbeelding II.23 Amplitude spectrum voor trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in America voor goederentrein passage op spoor 1 op 16-02-2024



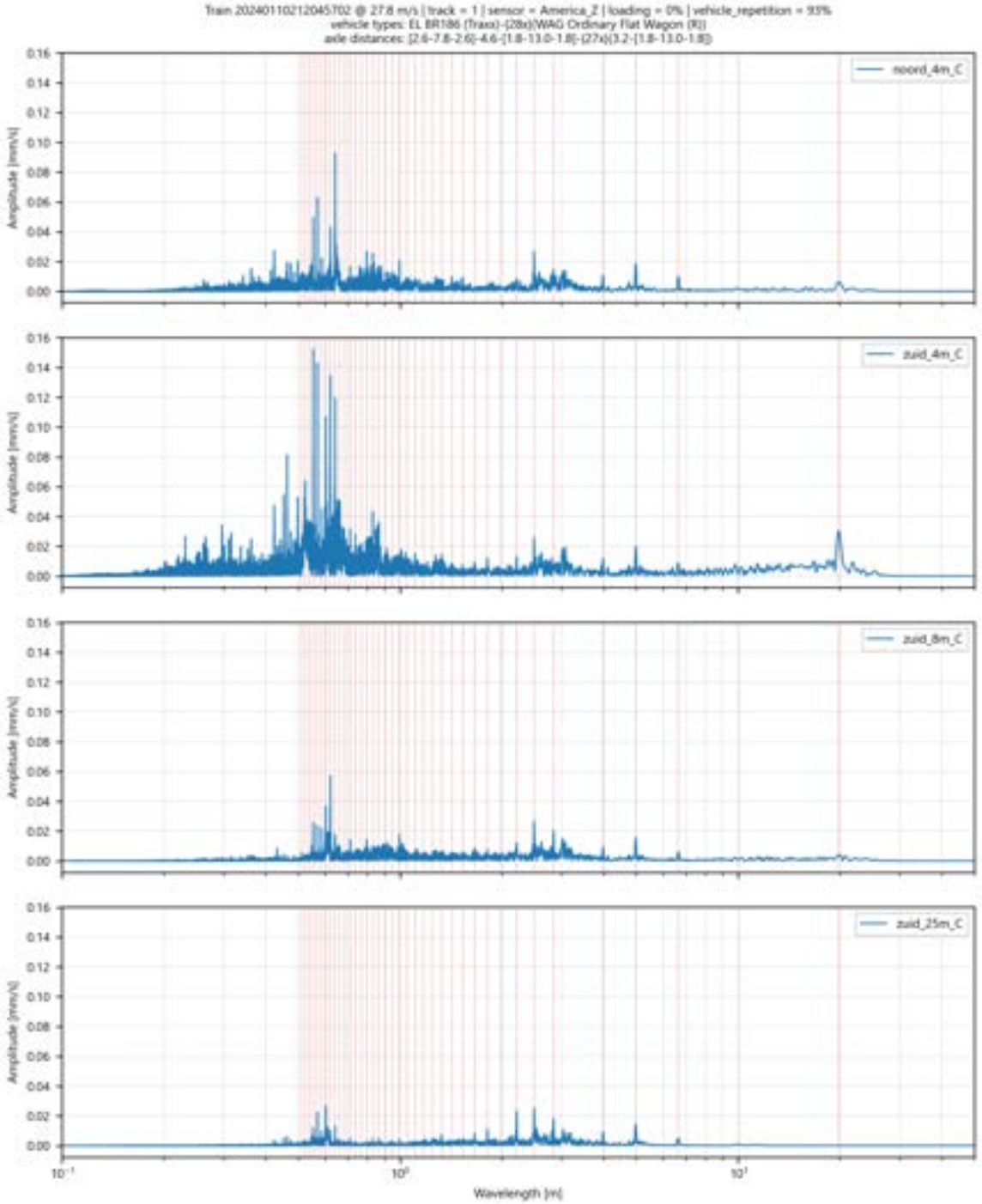
Afbeelding II.24 Genormaliseerd amplitude spectrum voor trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in America voor goederentrein passage op spoor 1 op 16-02-2024



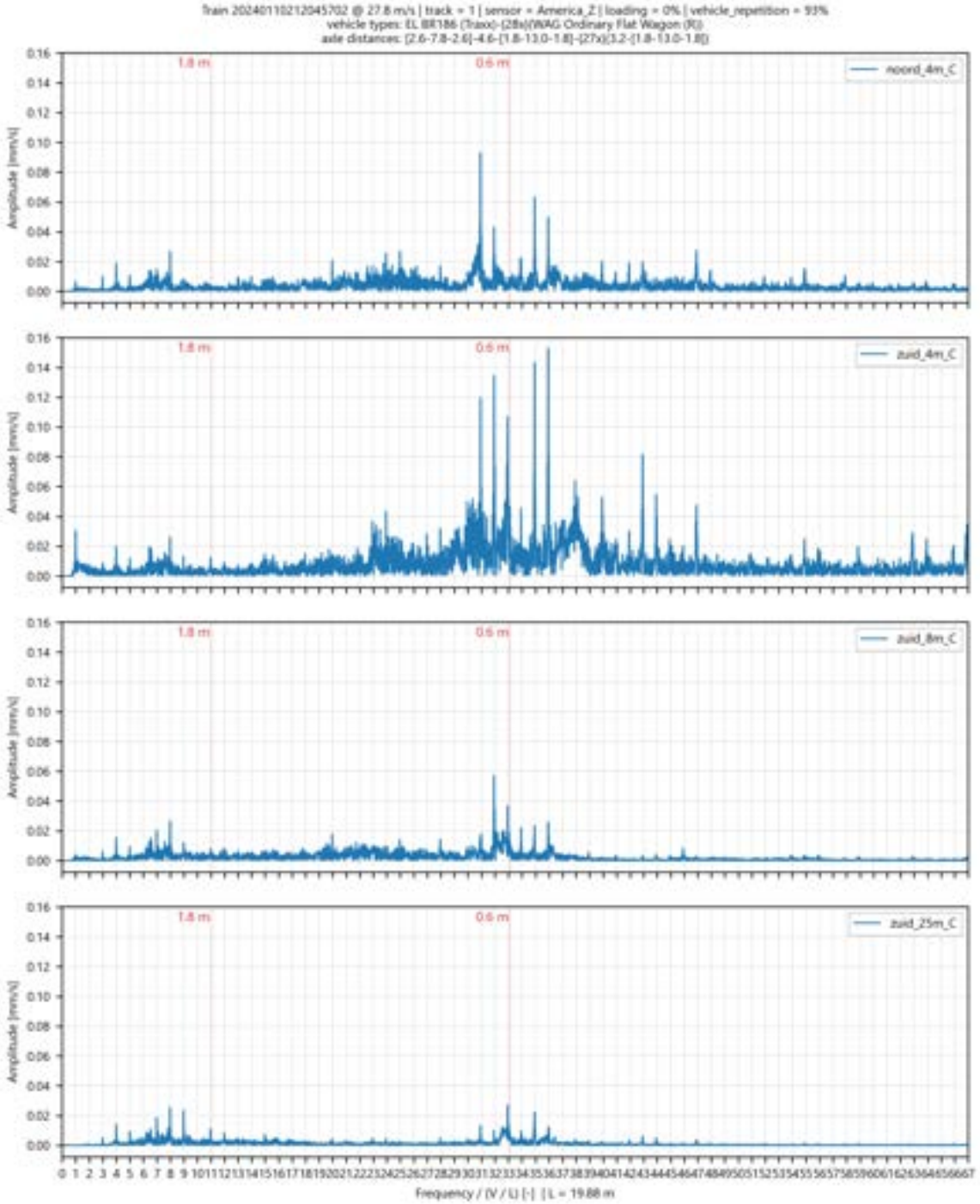
Afbeelding II.25 Trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in America voor goederentrein passage op spoor 1 op 10-01-2024



Afbeelding II.26 Amplitude spectrum voor trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in America voor goederentrein passage op spoor 1 op 10-01-2024

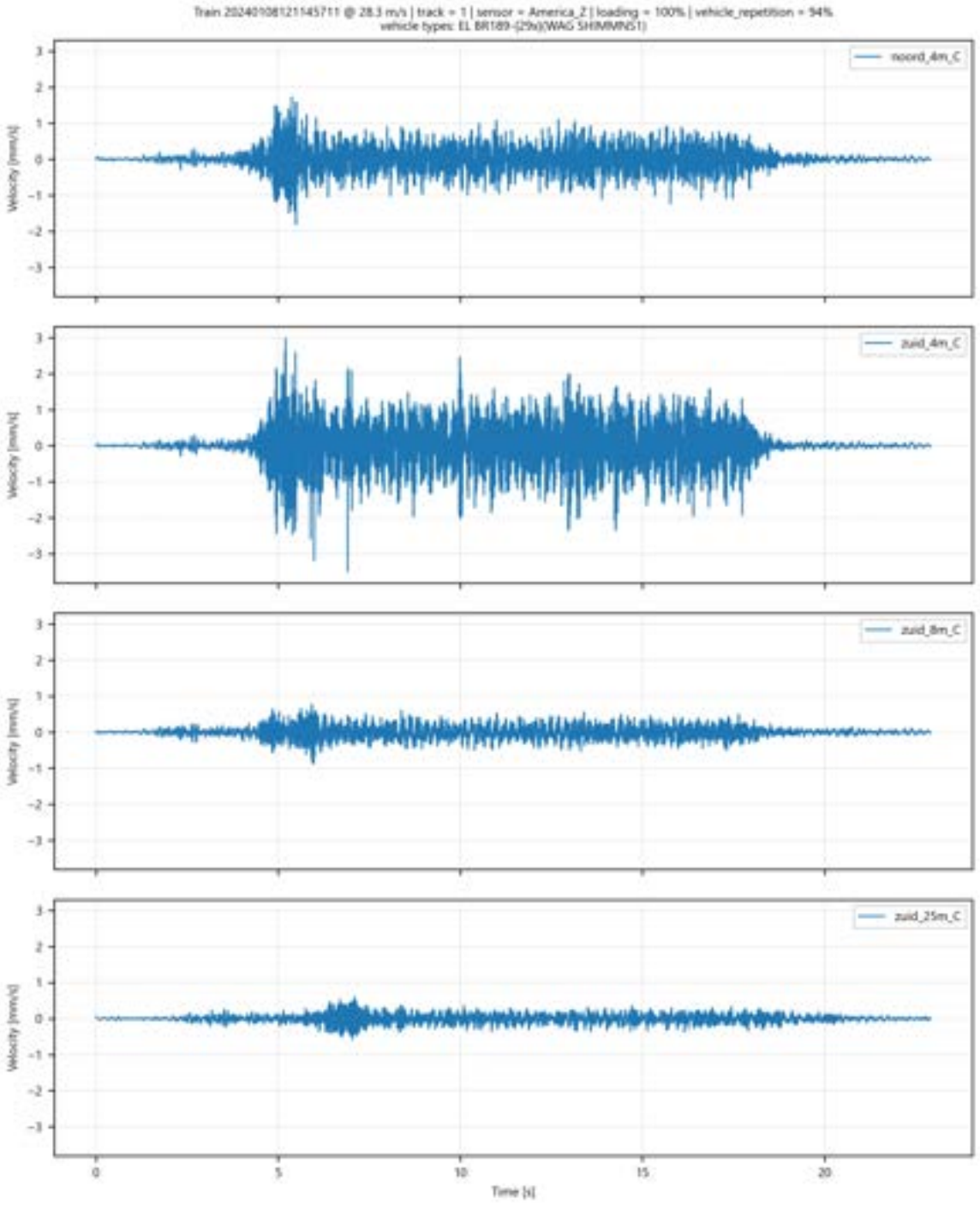


Afbeelding II.27 Genormaliseerd amplitude spectrum voor trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in America voor goederentrein passage op spoor 1 op 10-01-2024

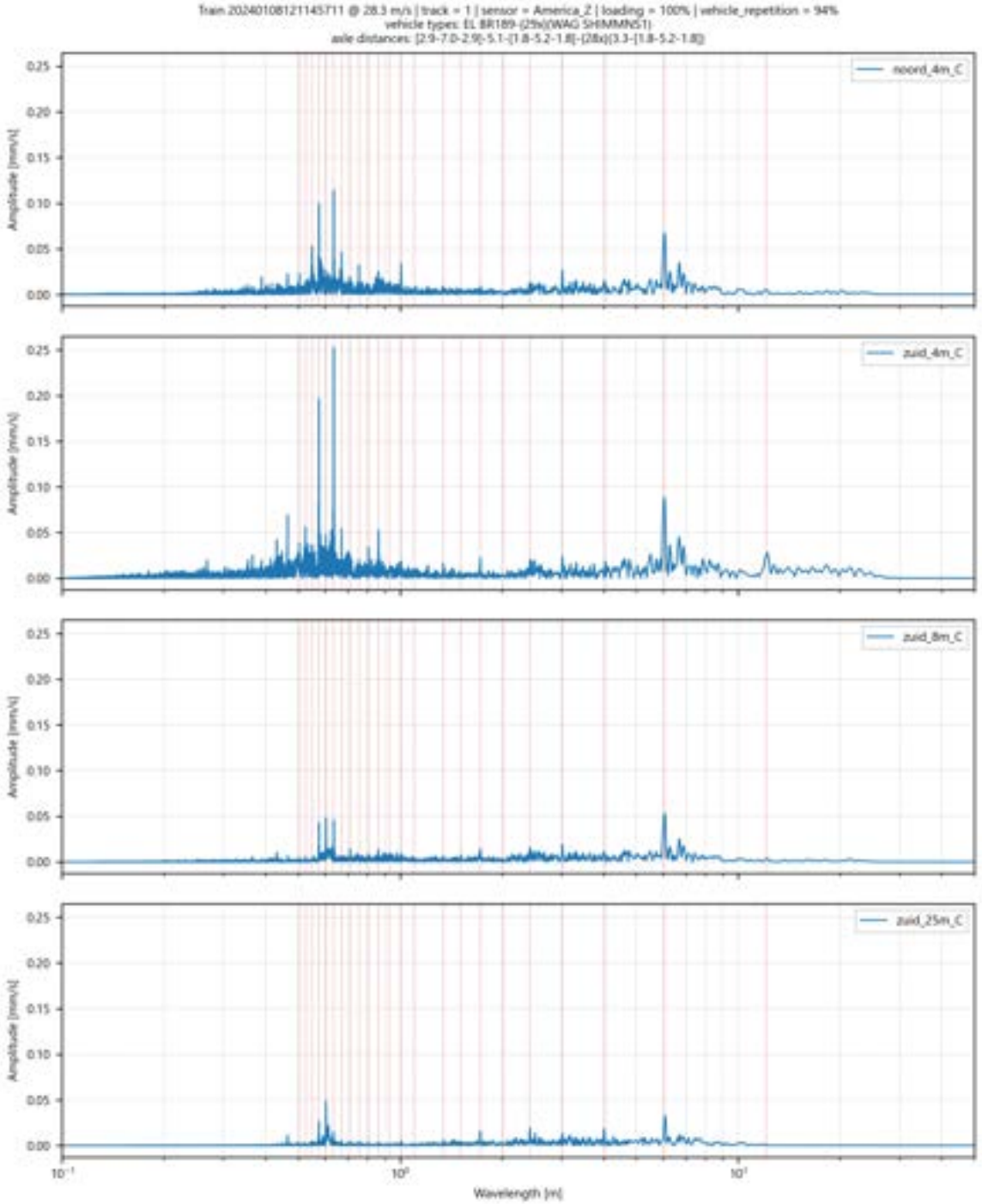


4-assige wagons, 100 % repetitie wagons, 100 % repetitie belading

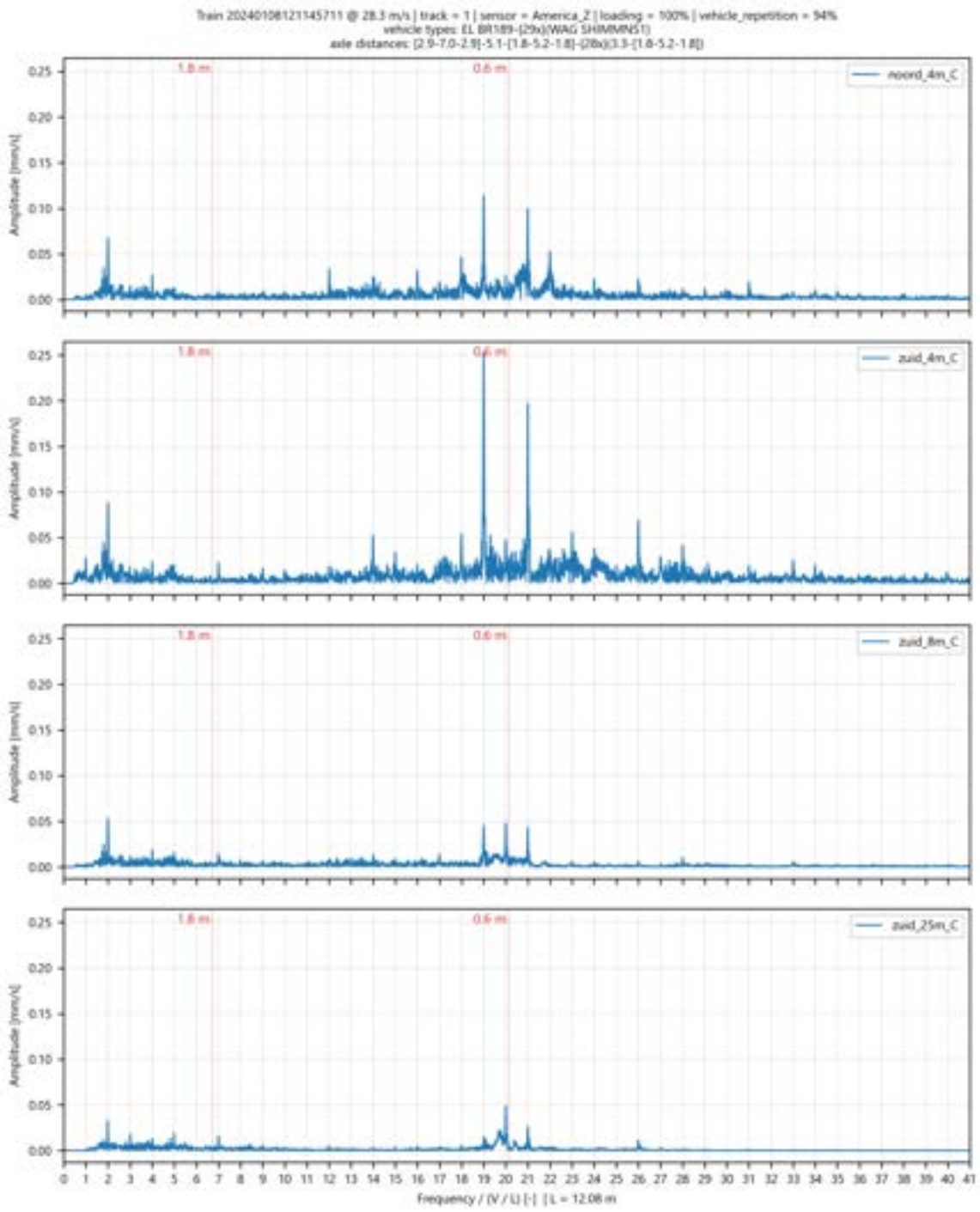
Afbeelding II.28 Trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in America voor goederentrein passage op spoor 1 op 08-01-2024



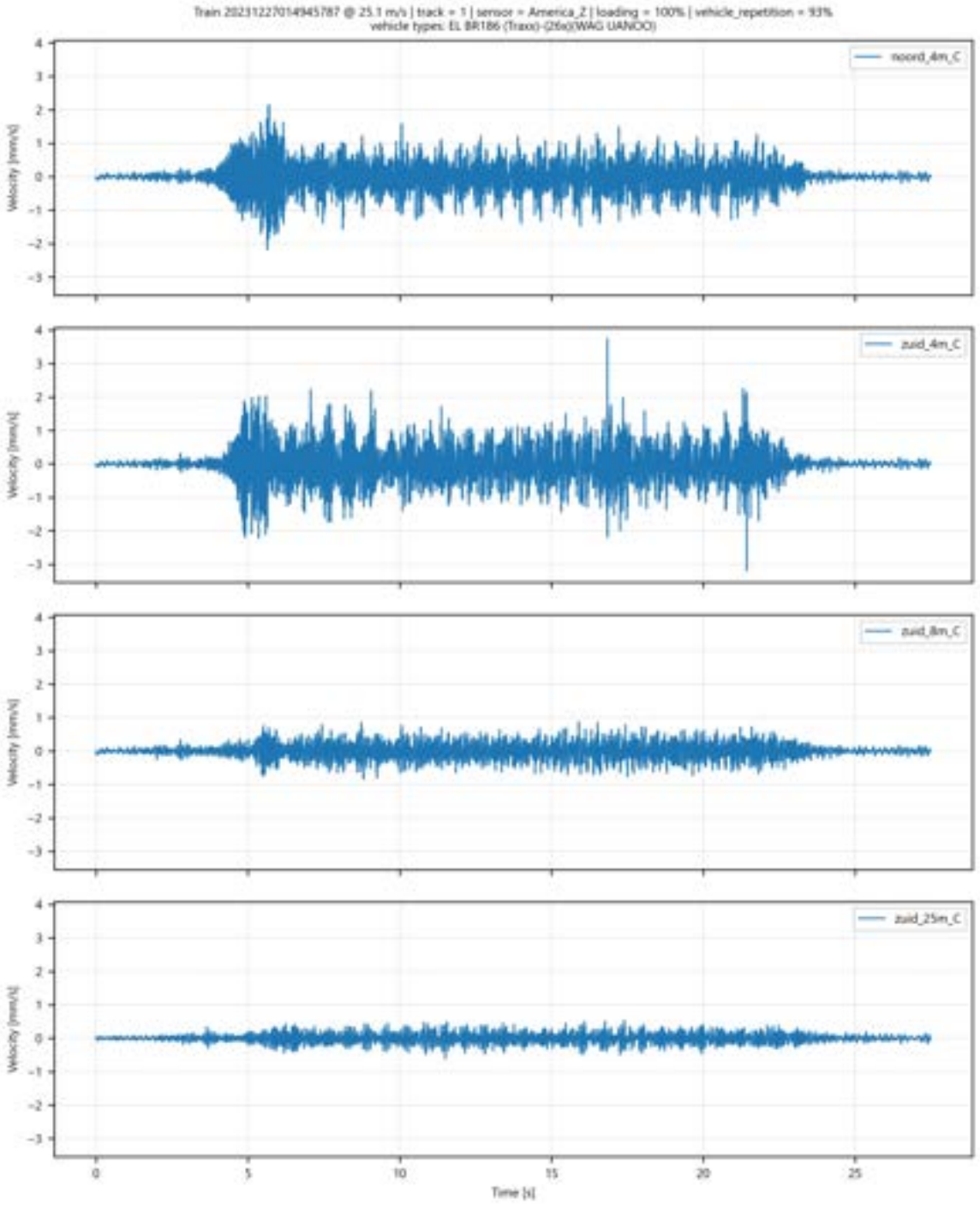
Afbeelding II.29 Amplitude spectrum voor trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in America voor goederentrein passage op spoor 1 op 08-01-2024



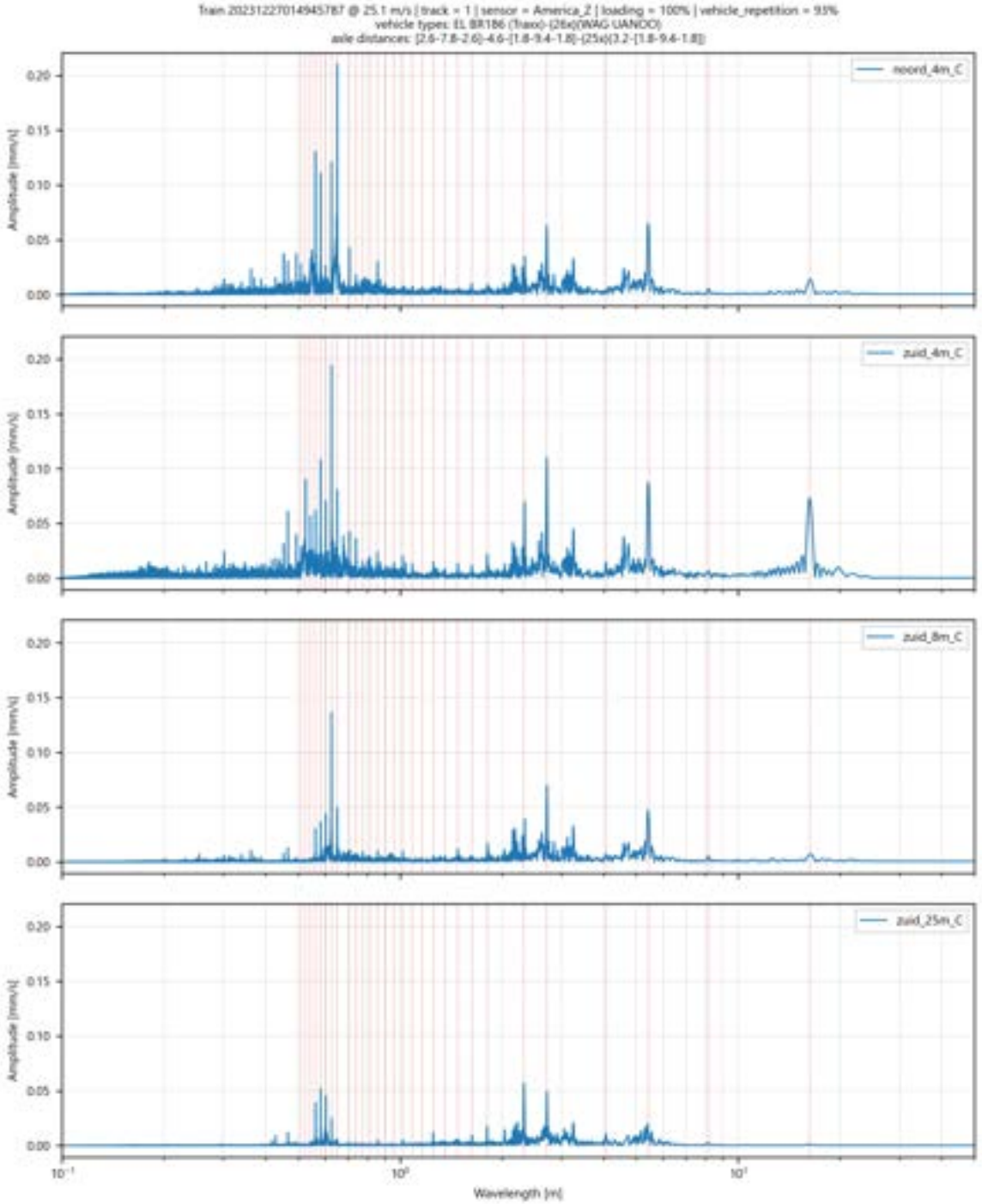
Afbeelding II.30 Genormaliseerd amplitude spectrum voor trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in America voor goederentrein passage op spoor 1 op 08-01-2024



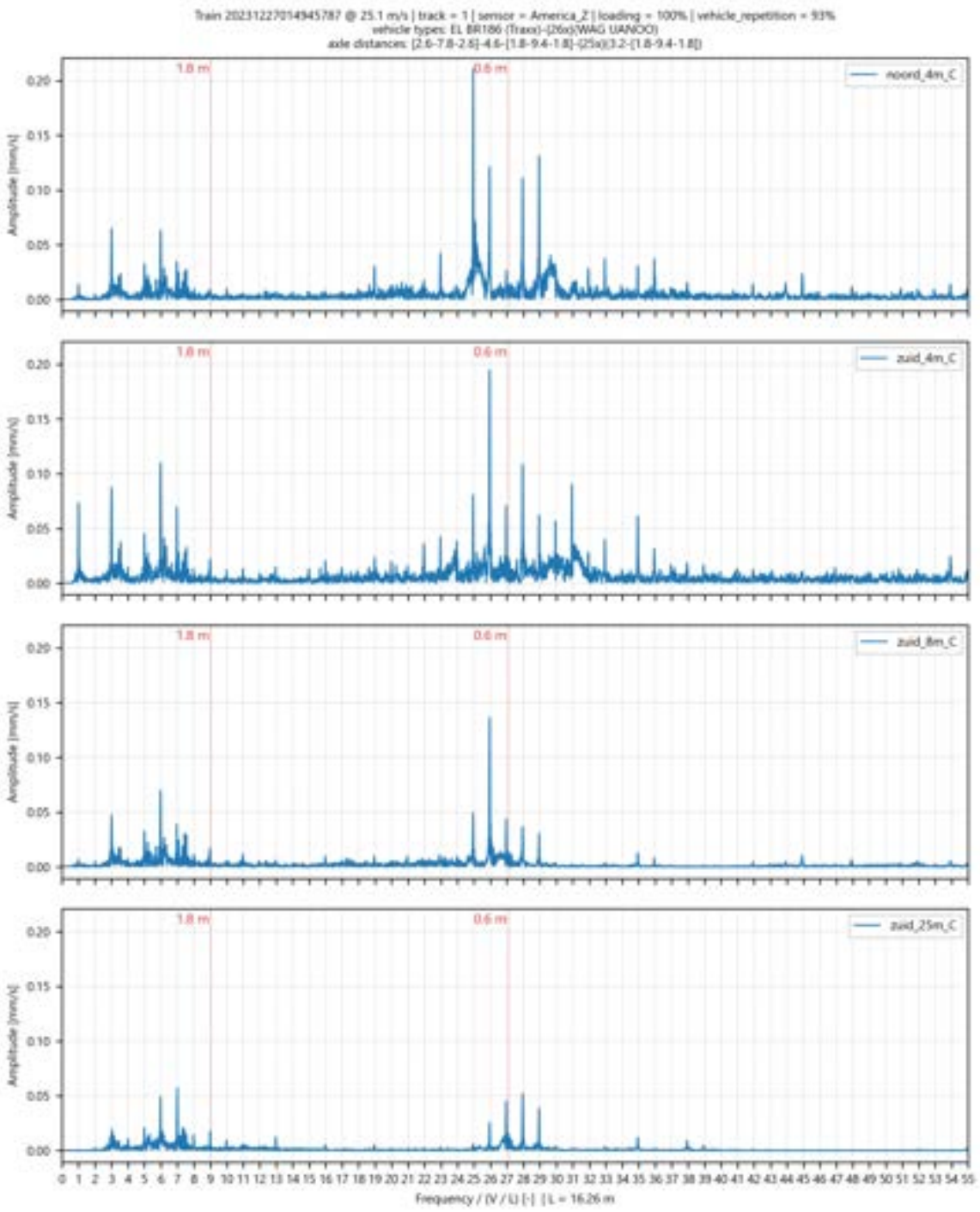
Afbeelding II.31 Trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in America voor goederentrein passage op spoor 1 op 27-12-2023



Afbeelding II.32 Amplitude spectrum voor trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in America voor goederentrein passage op spoor 1 op 27-12-2023

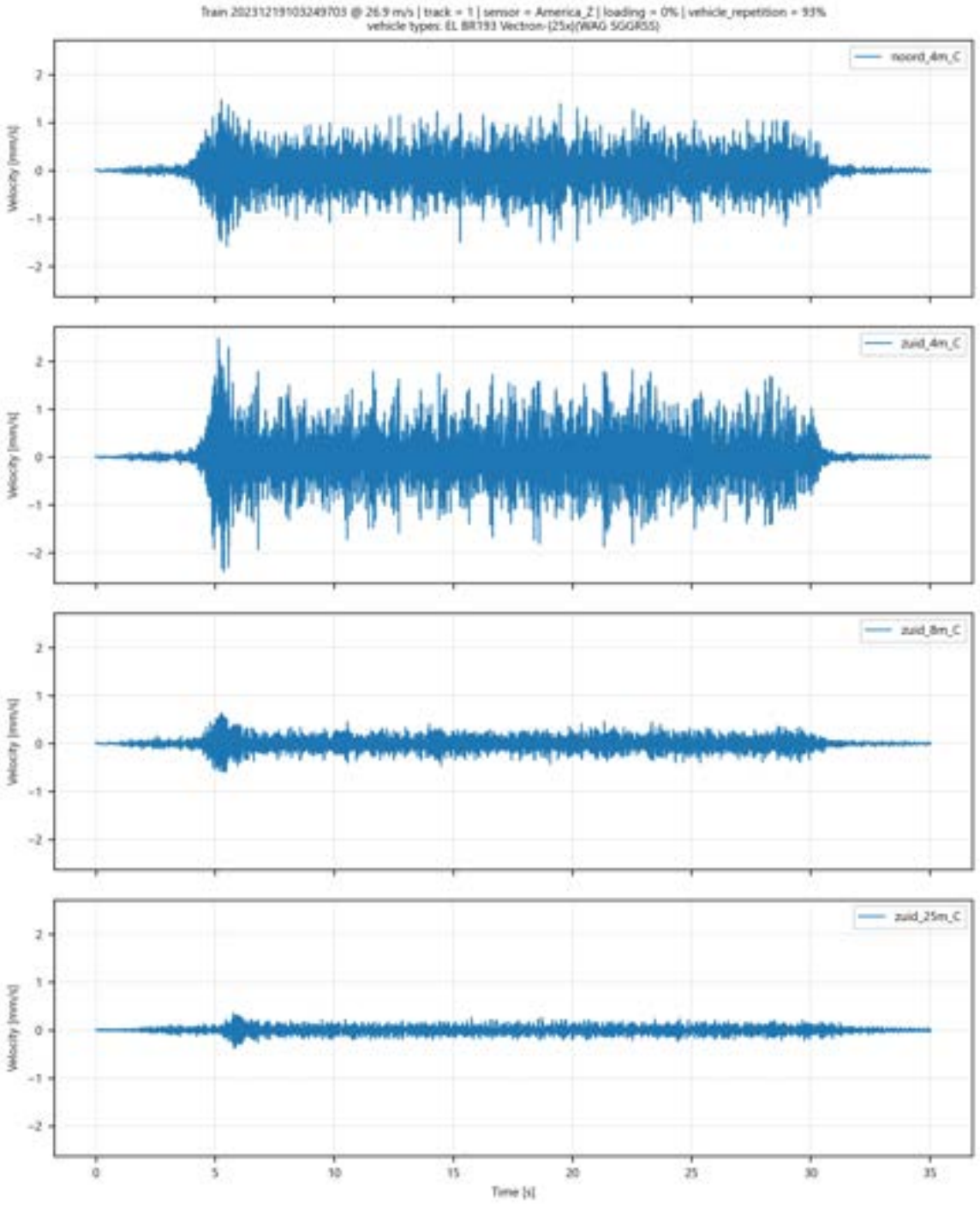


Afbeelding II.33 Genormaliseerd amplitude spectrum voor trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in America voor goederentrein passage op spoor 1 op 27-12-2023

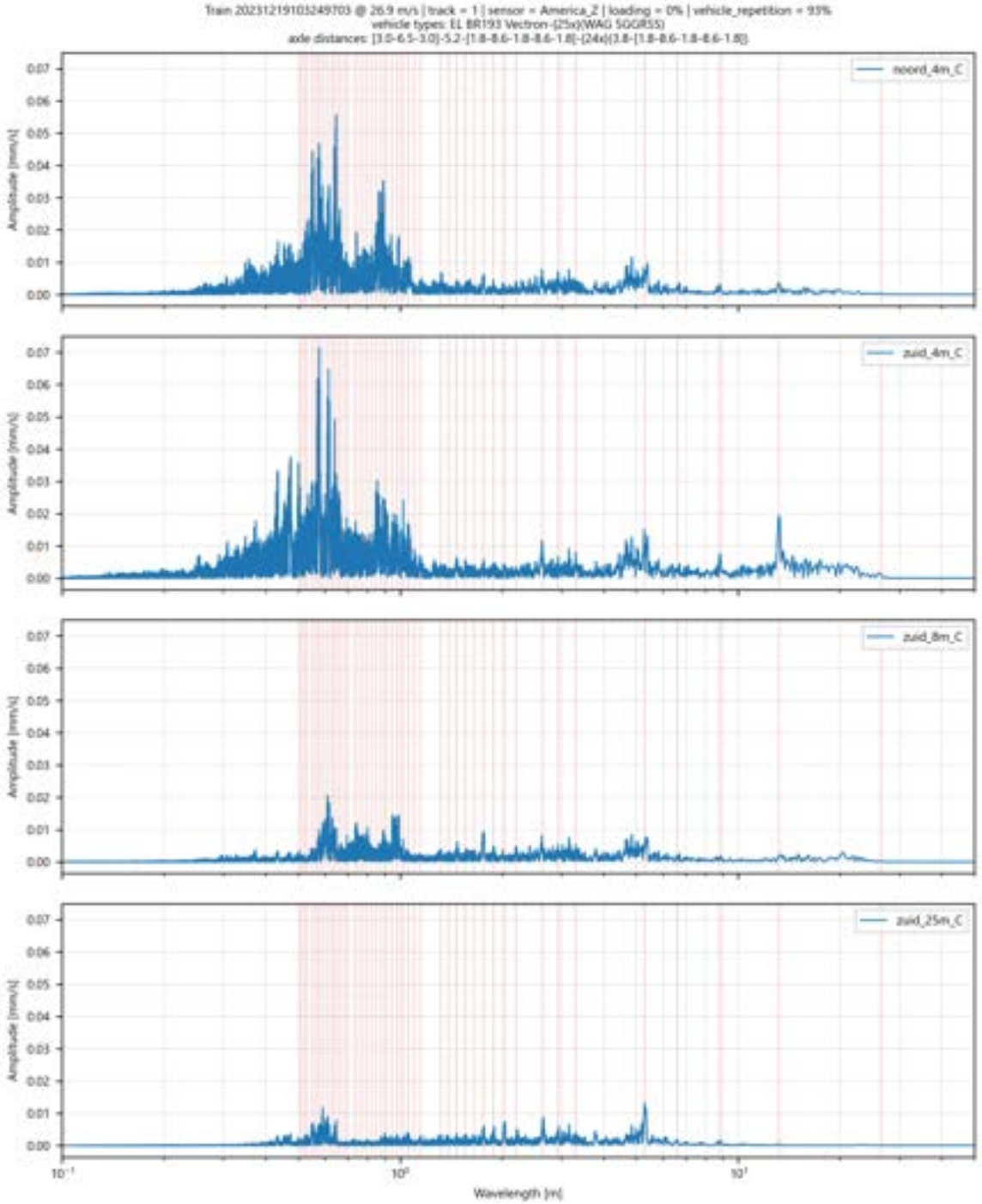


6-assige wagons, 100 % repetitie wagons, 0 % repetitie belading

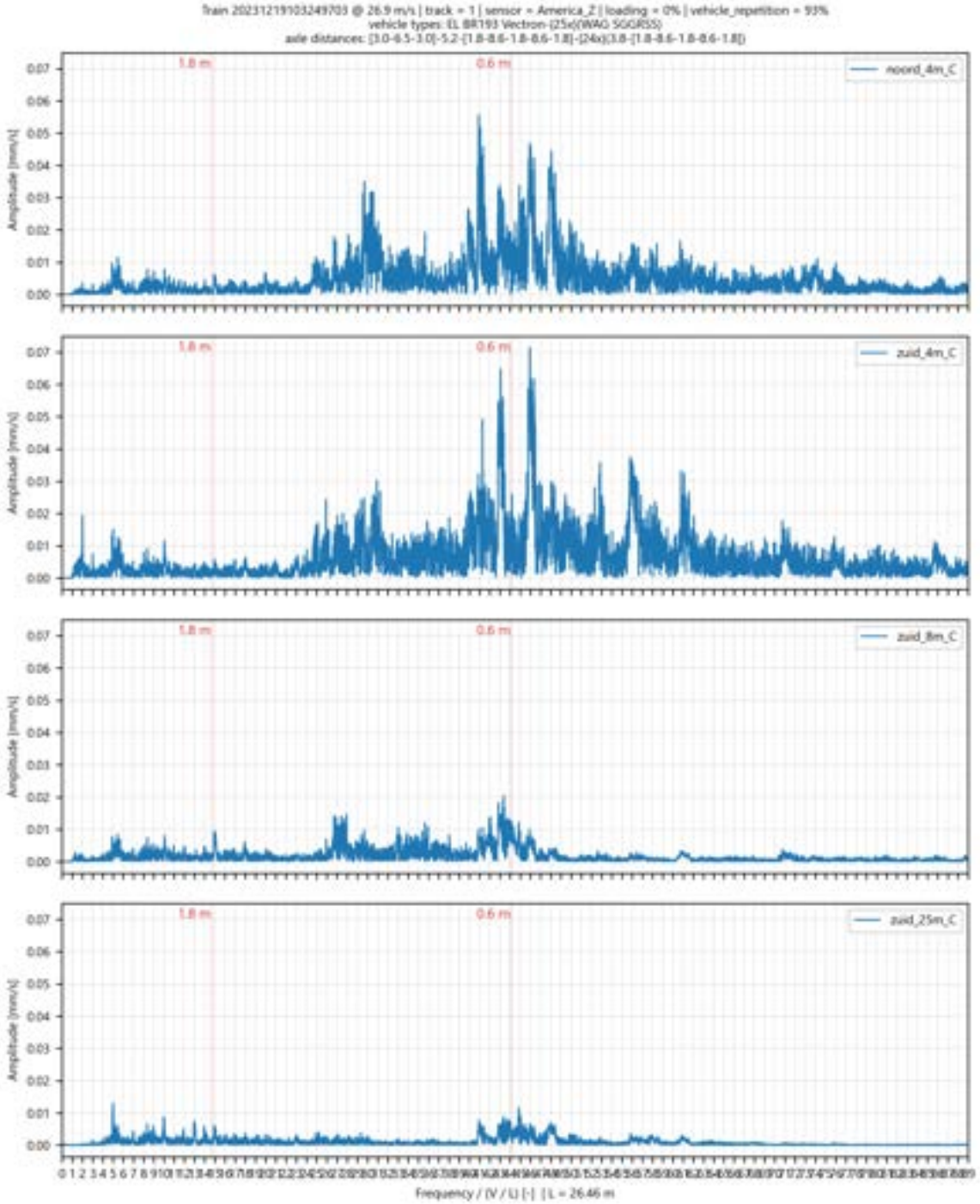
Afbeelding II.34 Trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in America voor goederentrein passage op spoor 1 op 19-12-2023



Afbeelding II.35 Amplitude spectrum voor trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in America voor goederentrein passage op spoor 1 op 19-12-2023

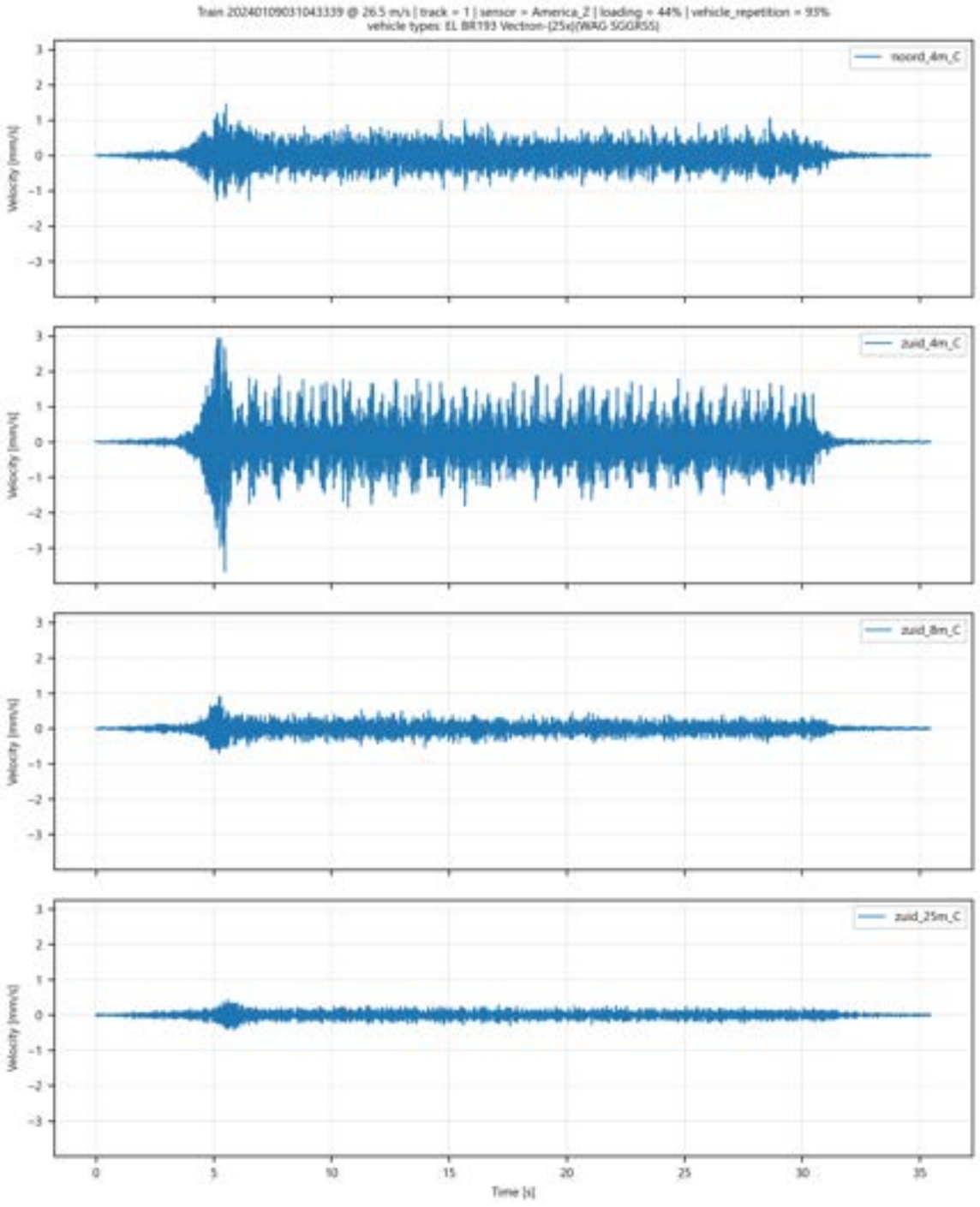


Afbeelding II.36 Genormaliseerd amplitude spectrum voor trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in America voor goederentrein passage op spoor 1 op 19-12-2023

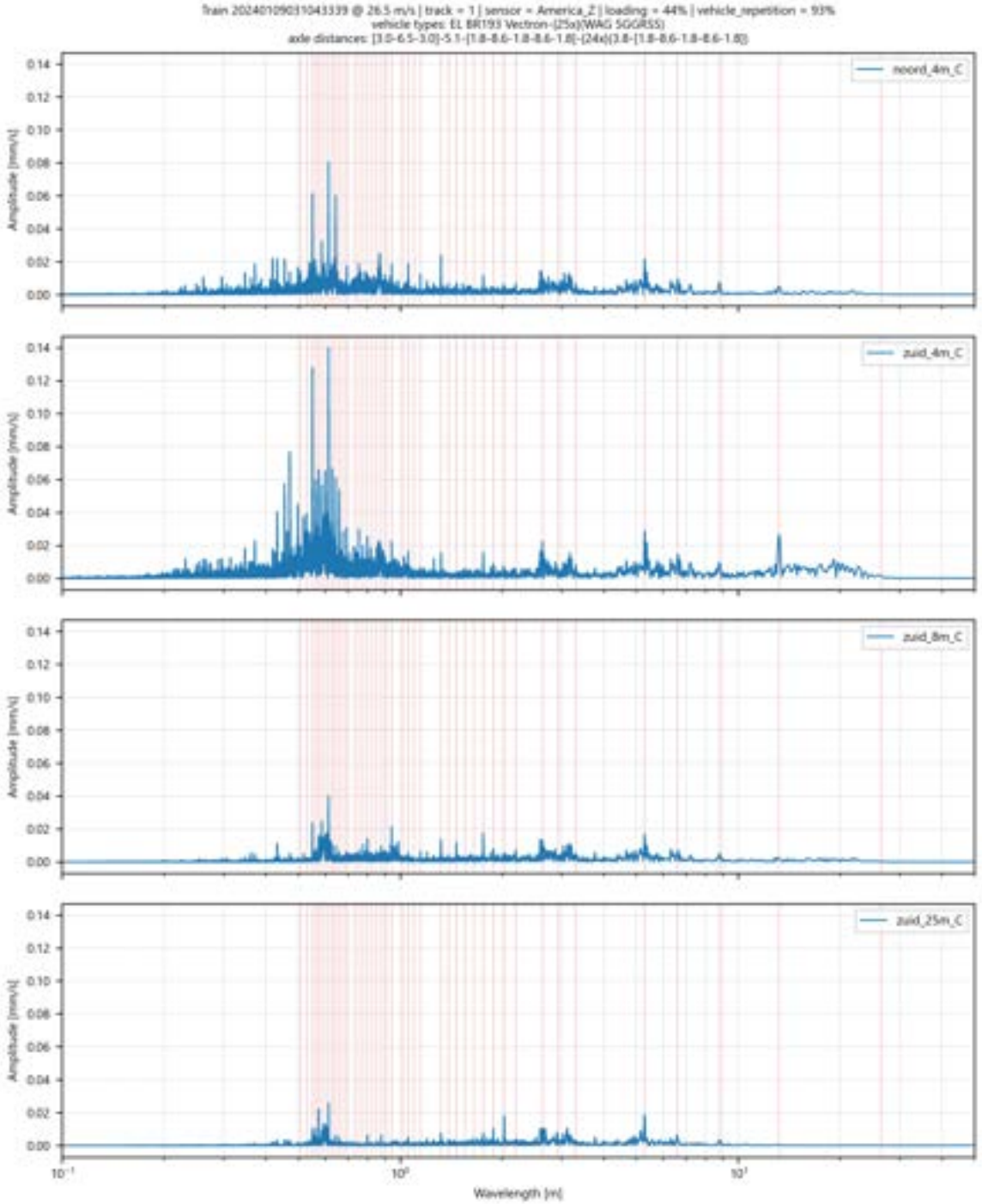


6-assige wagons, 100 % repetitie wagons, 50 % repetitie belading

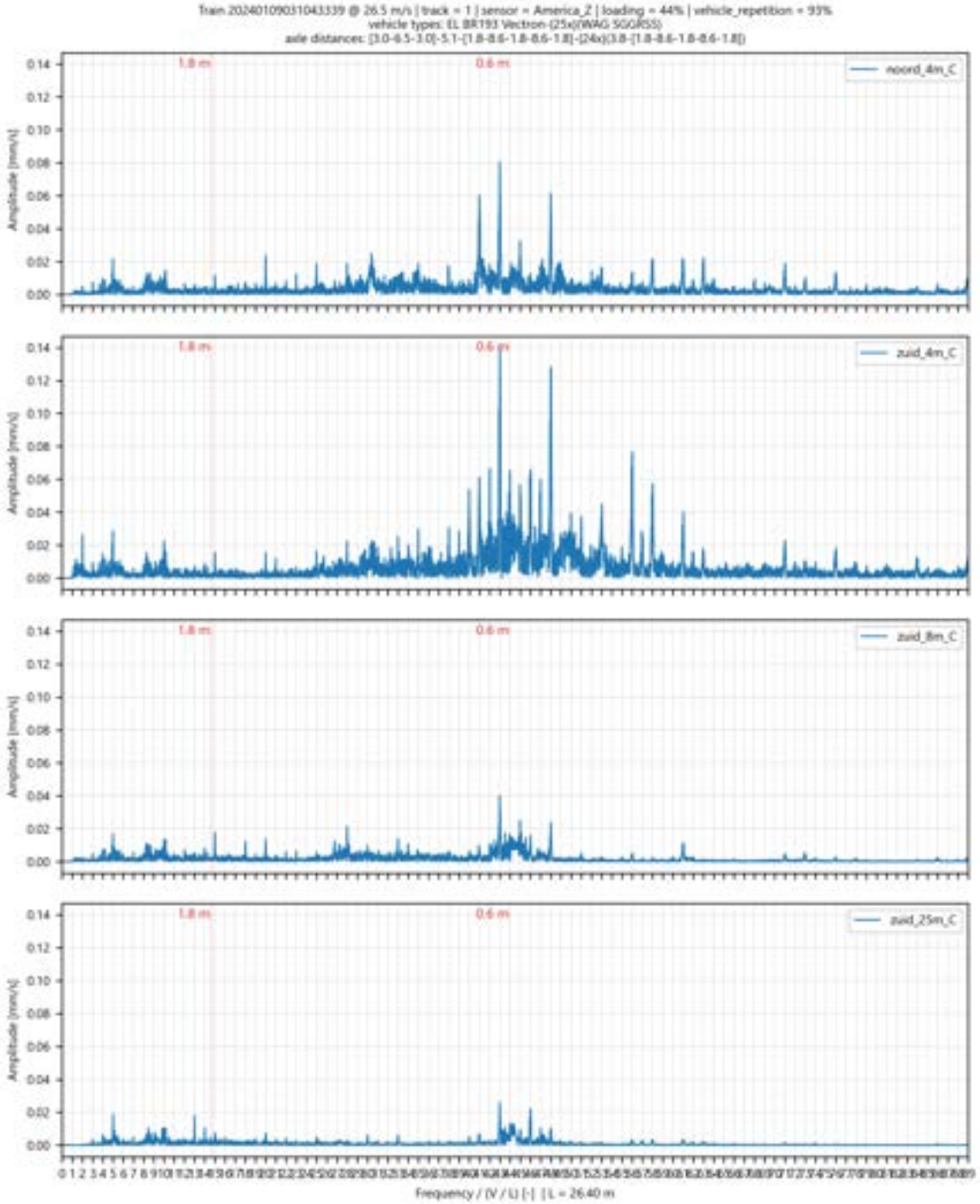
Afbeelding II.37 Trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in America voor goederentrein passage op spoor 1 op 09-01-2024



Afbeelding II.38 Amplitude spectrum voor trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in America voor goederentrein passage op spoor 1 op 09-01-2024



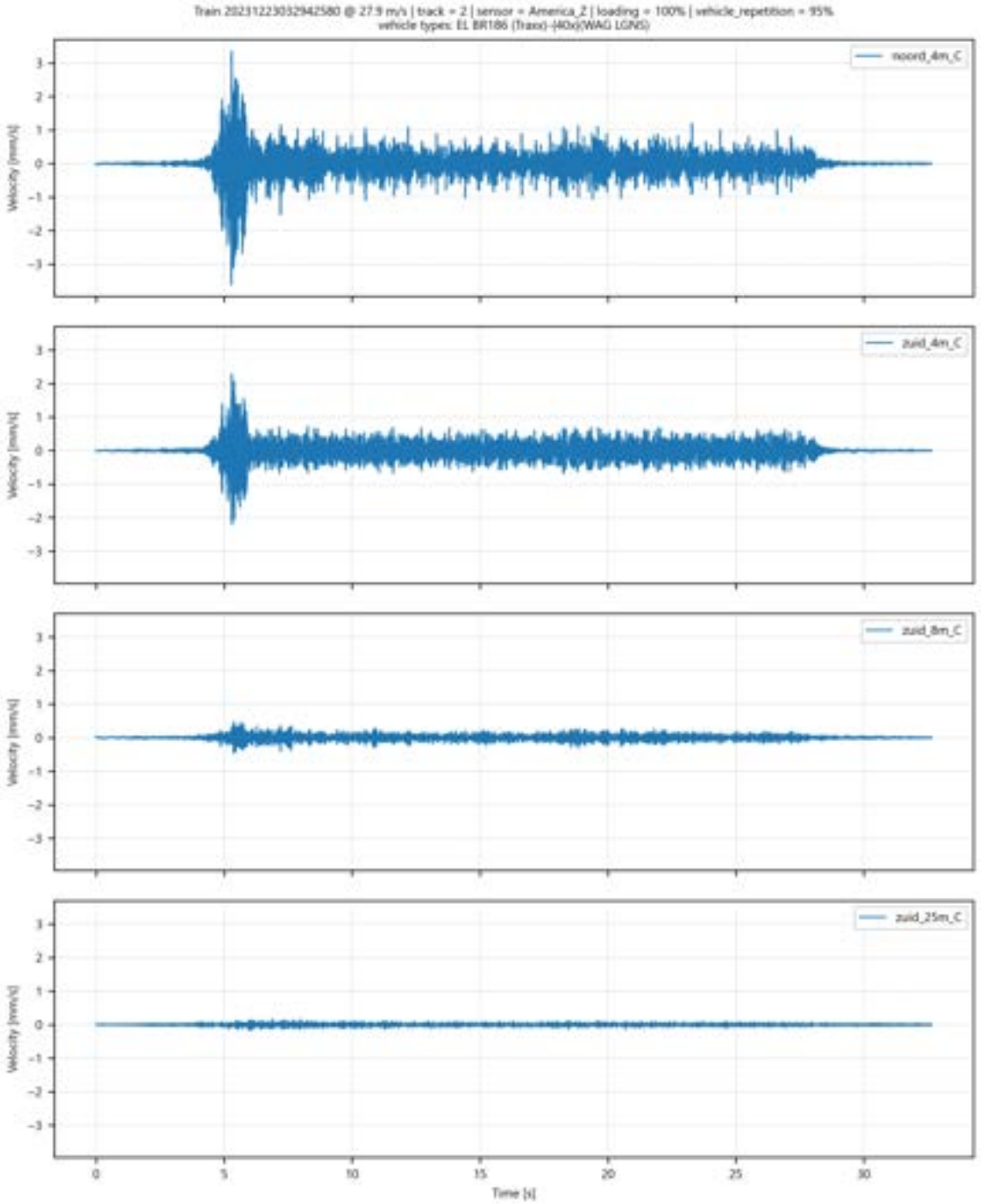
Afbeelding II.39 Genormaliseerd amplitude spectrum voor trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in America voor goederentrein passage op spoor 1 op 09-01-2024



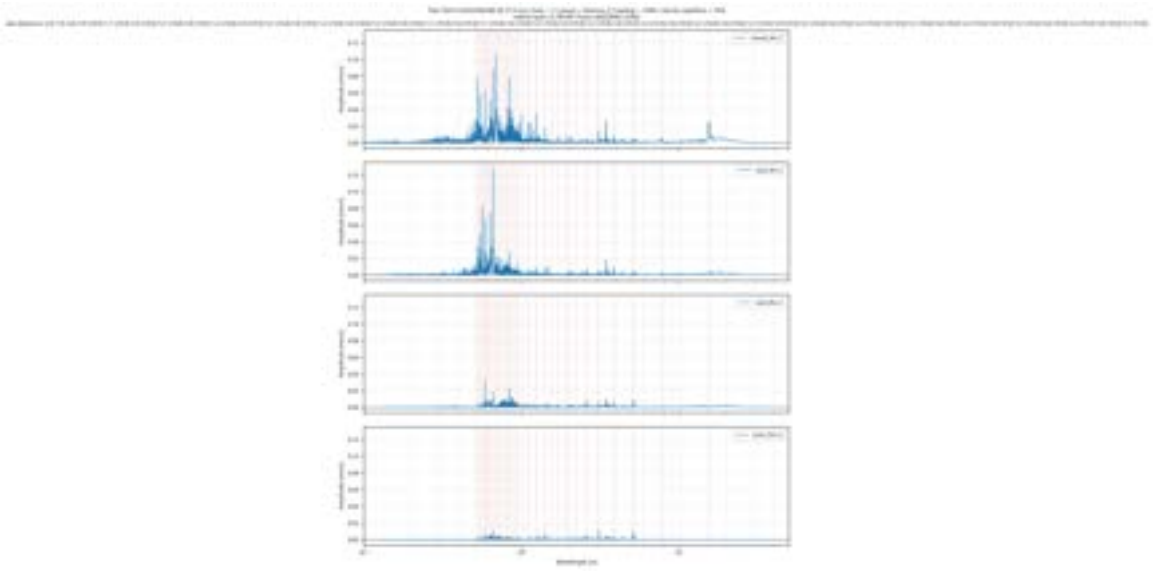
Meetlocatie America - spoor 2

2-assige wagons, 100 % repetitie wagons, 100 % repetitie belading

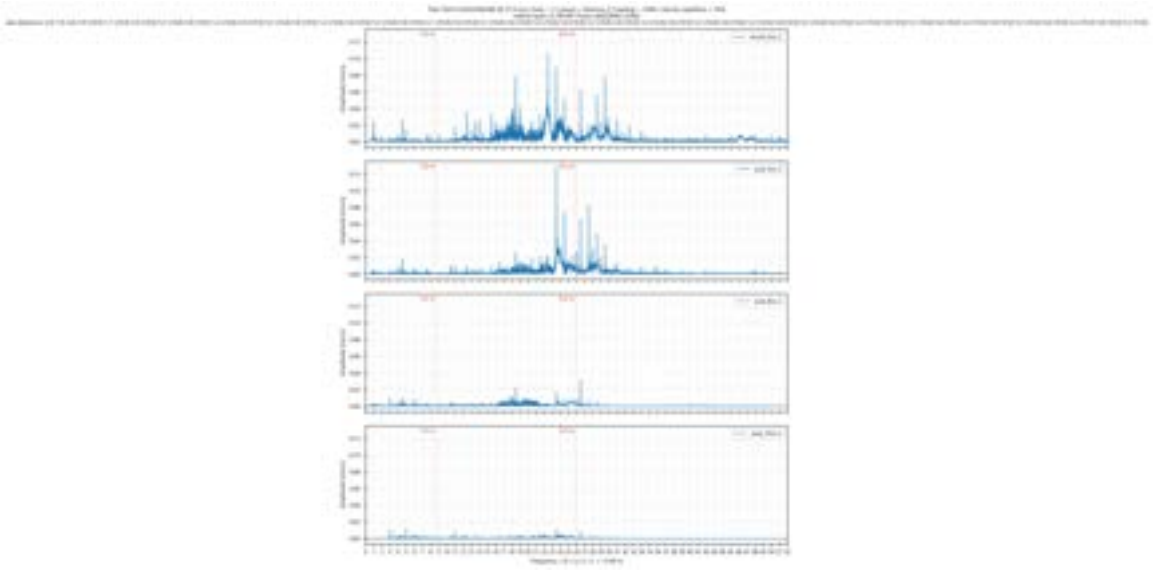
Afbeelding II.40 Trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in America voor goederentrein passage op spoor 2 op 23-12-2023



Afbeelding II.41 Amplitude spectrum voor trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in America voor goederentrein passage op spoor 2 op 23-12-2023

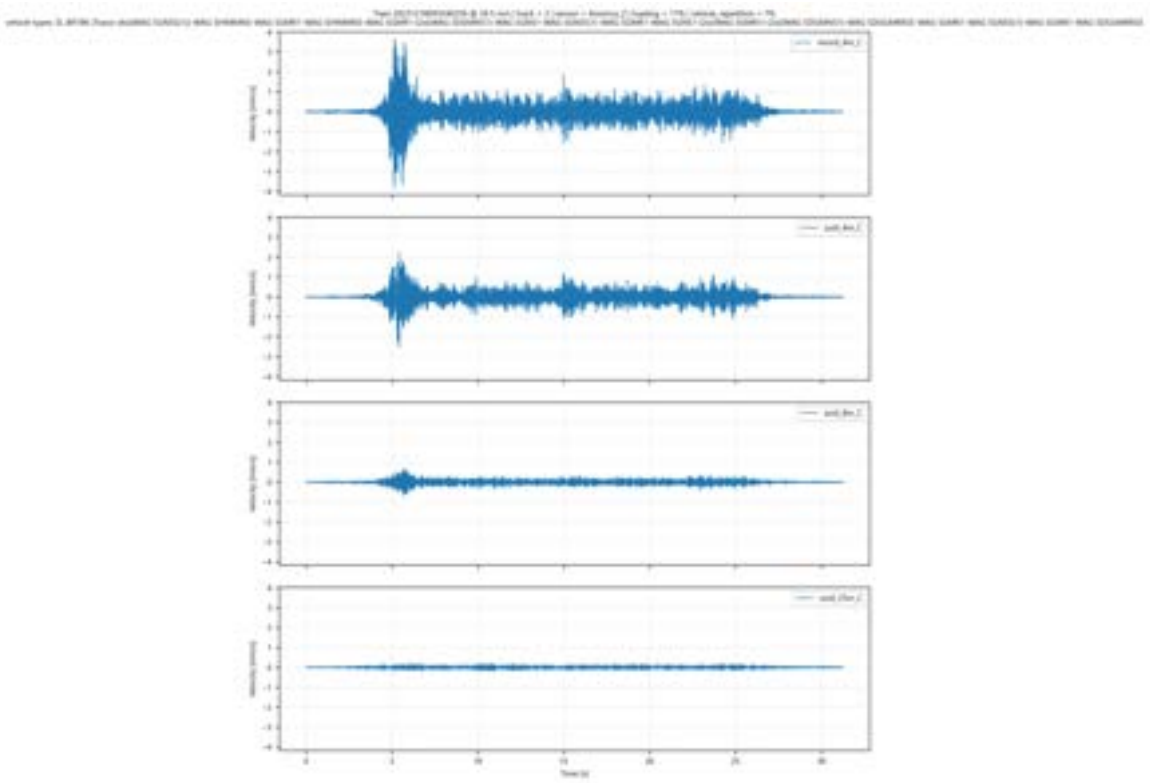


Afbeelding II.42 Genormaliseerd amplitude spectrum voor trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in America voor goederentrein passage op spoor 2 op 23-12-2023

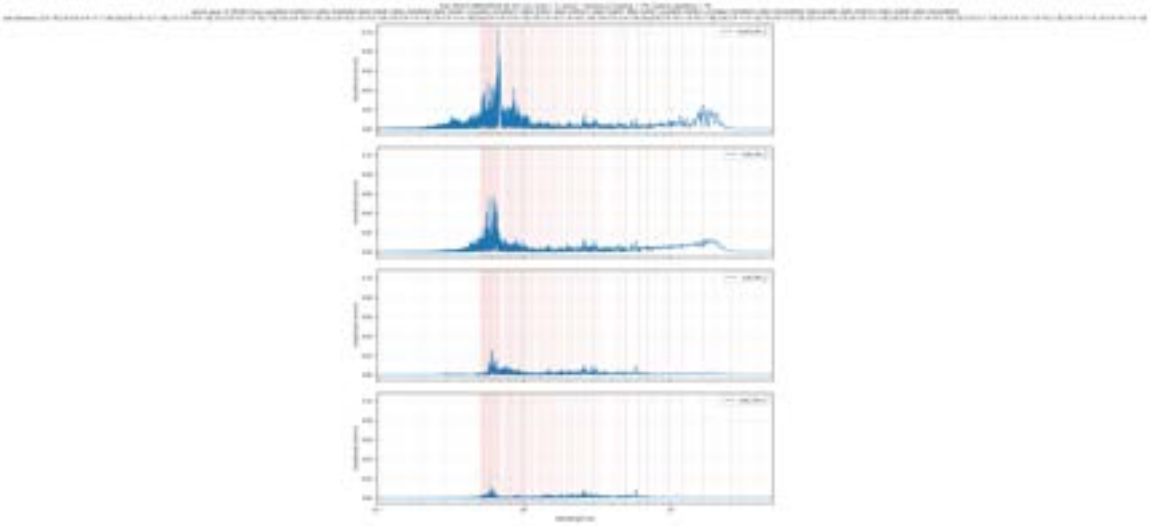


4-assige wagons, 10 % repetitie wagons, 20 % repetitie belading

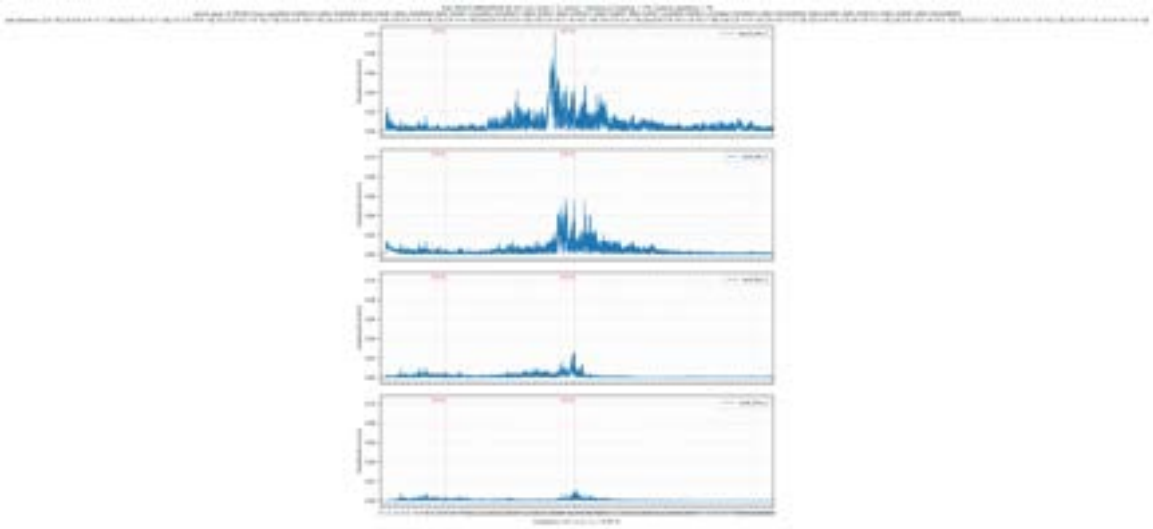
Afbeelding II.43 Trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in America voor goederentrein passage op spoor 2 op 18-12-2023



Afbeelding II.44 Amplitude spectrum voor trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in America voor goederentrein passage op spoor 2 op 18-12-2023

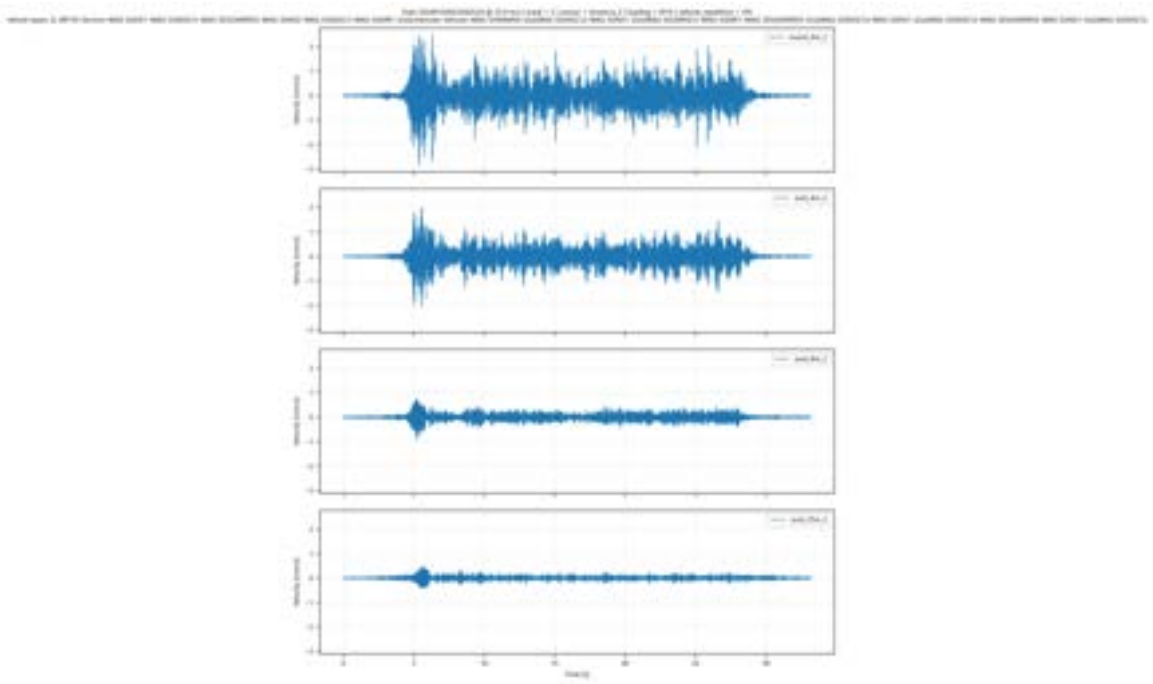


Afbeelding II.45 Genormaliseerd amplitude spectrum voor trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in America voor goederentrein passage op spoor 2 op 18-12-2023

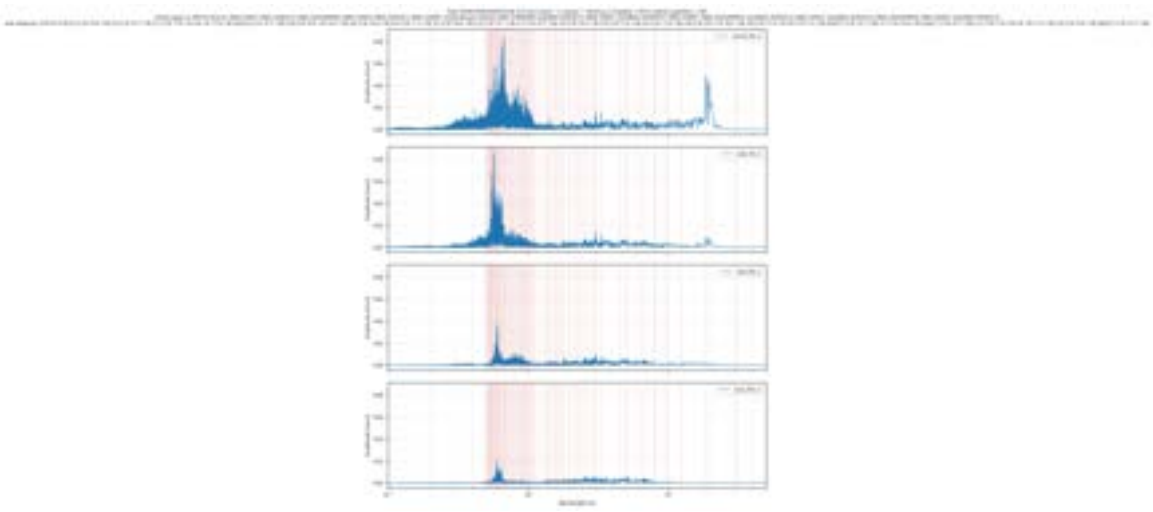


4-assige wagons, 10 % repetitie wagons, 90 % repetitie belading

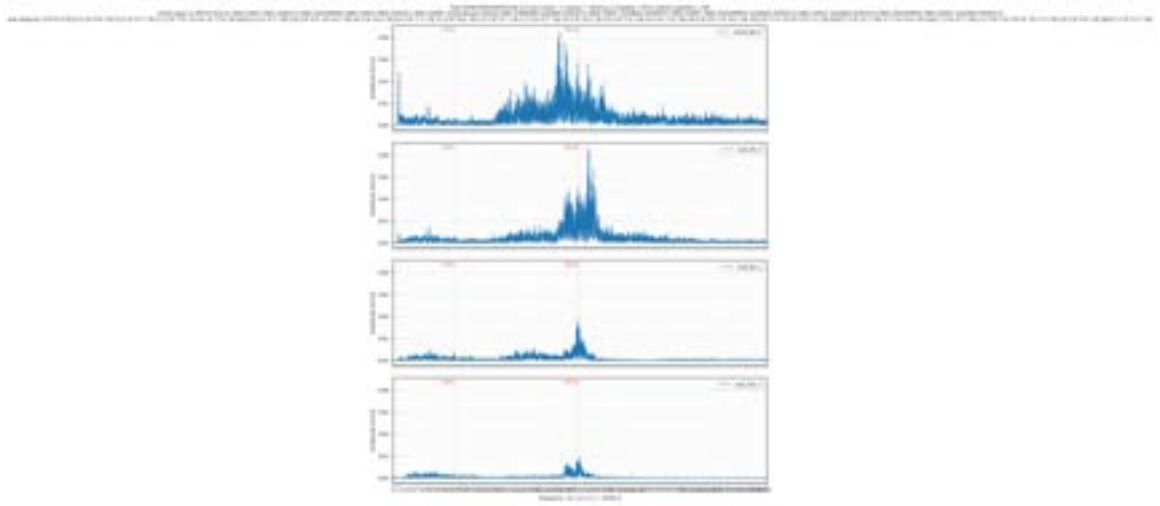
Afbeelding II.46 Trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in America voor goederentrein passage op spoor 2 op 03-01-2024



Afbeelding II.47 Amplitude spectrum voor trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in America voor goederentrein passage op spoor 2 op 03-01-2024

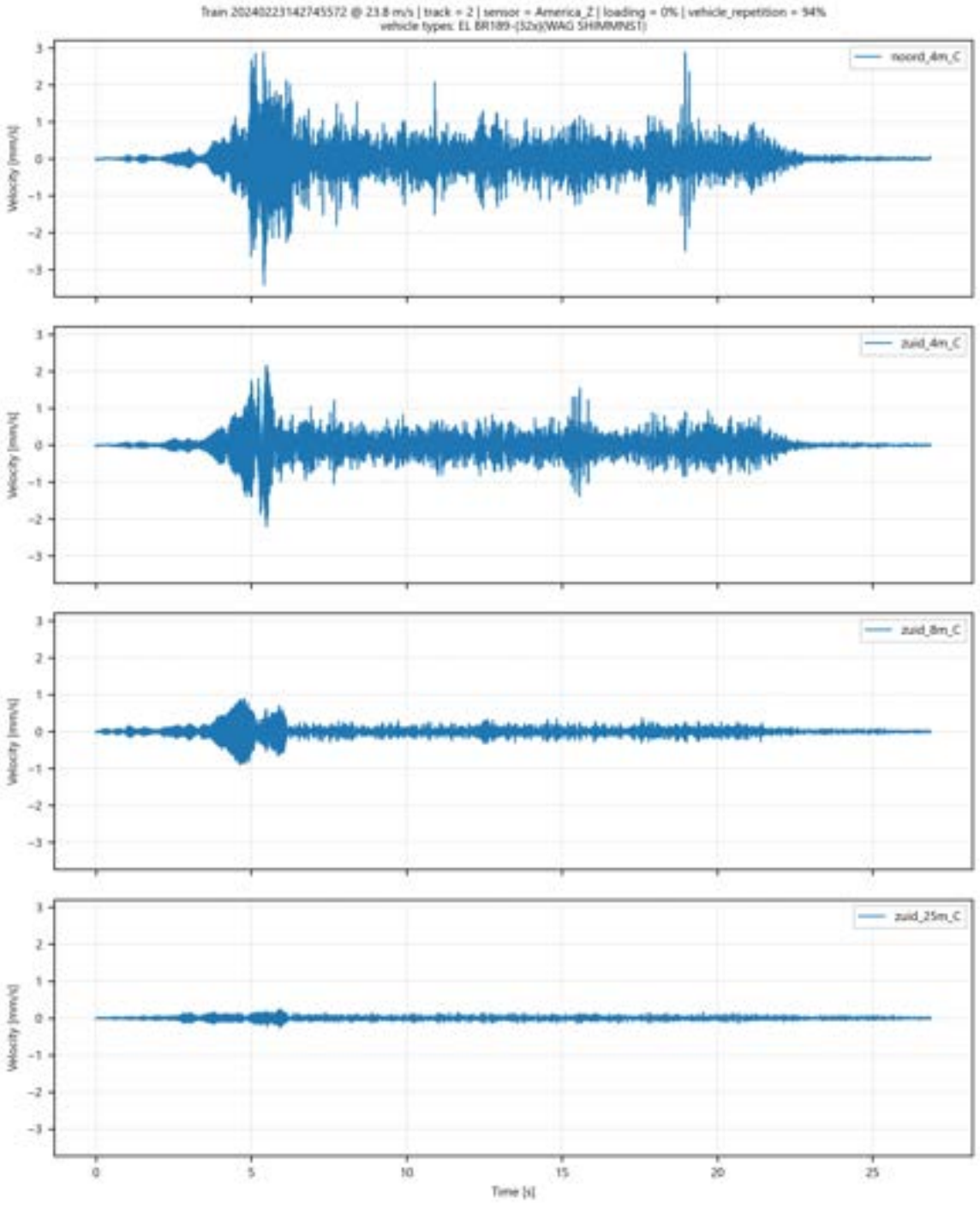


Afbeelding II.48 Genormaliseerd amplitude spectrum voor trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in America voor goederentrein passage op spoor 2 op 03-01-2024

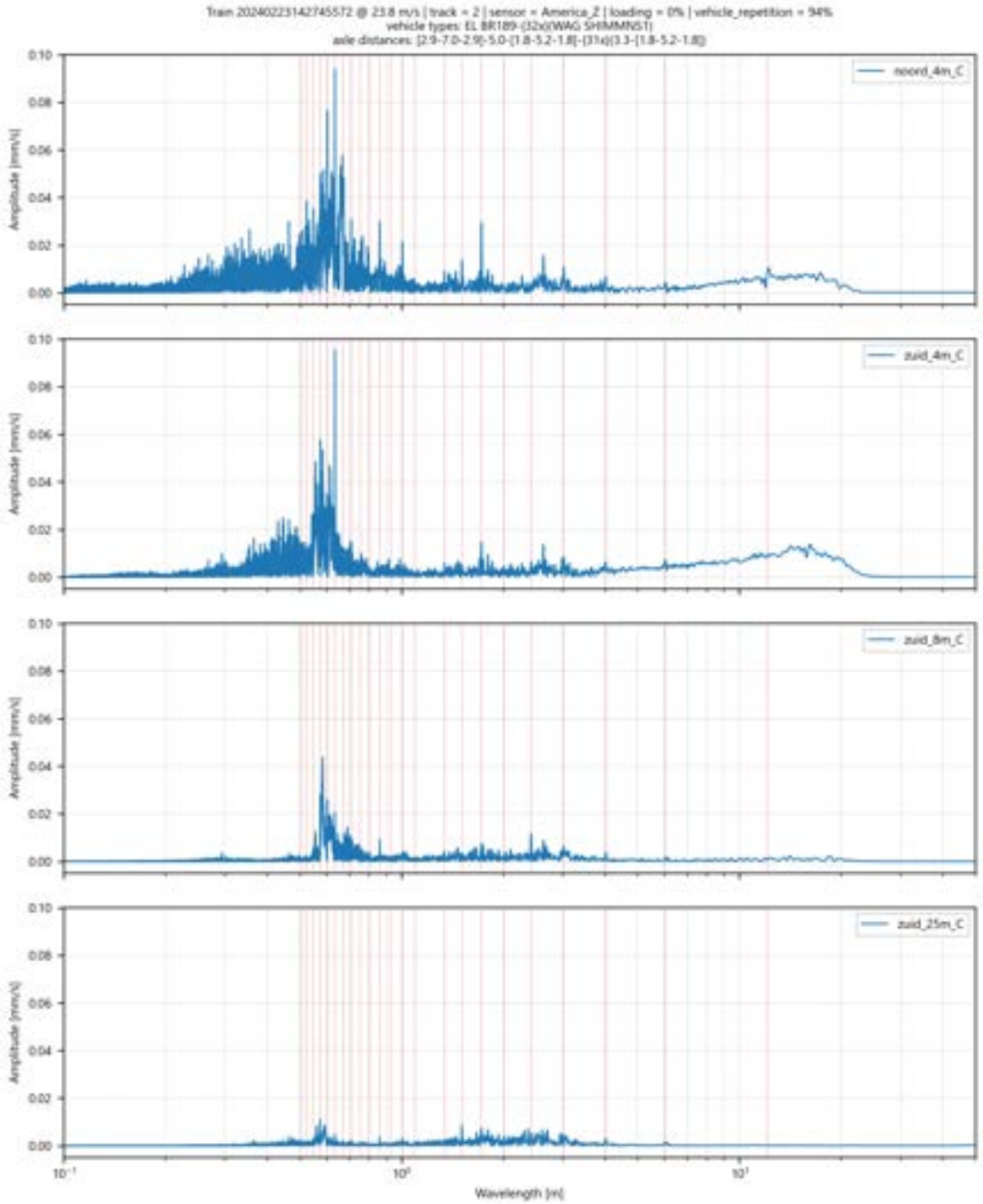


4-assige wagons, 100 % repetitie wagons, 0 % repetitie belading

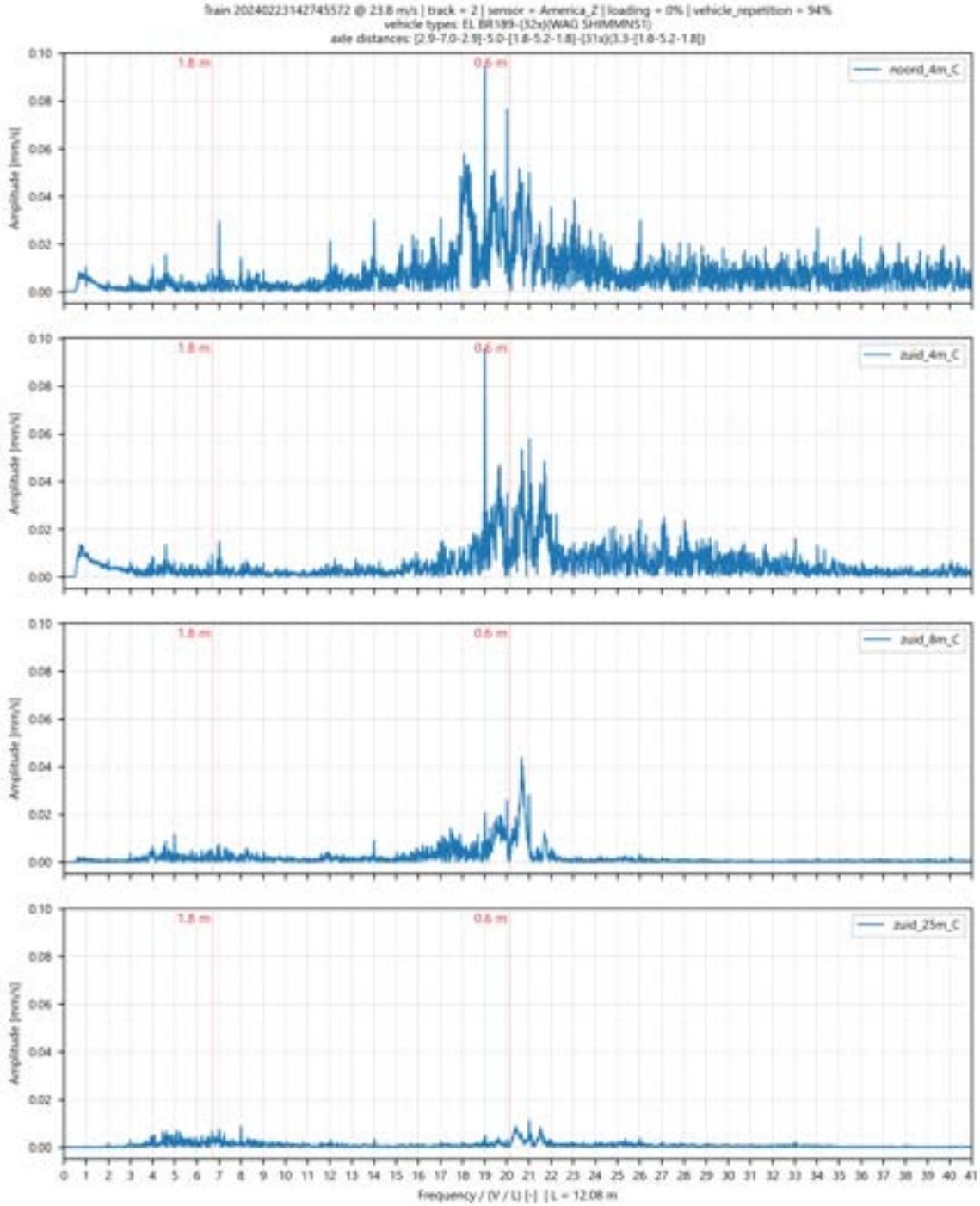
Afbeelding II.49 Trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in America voor goederentrein passage op spoor 2 op 23-02-2024



Afbeelding II.50 Amplitude spectrum voor trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in America voor goederentrein passage op spoor 2 op 23-02-2024

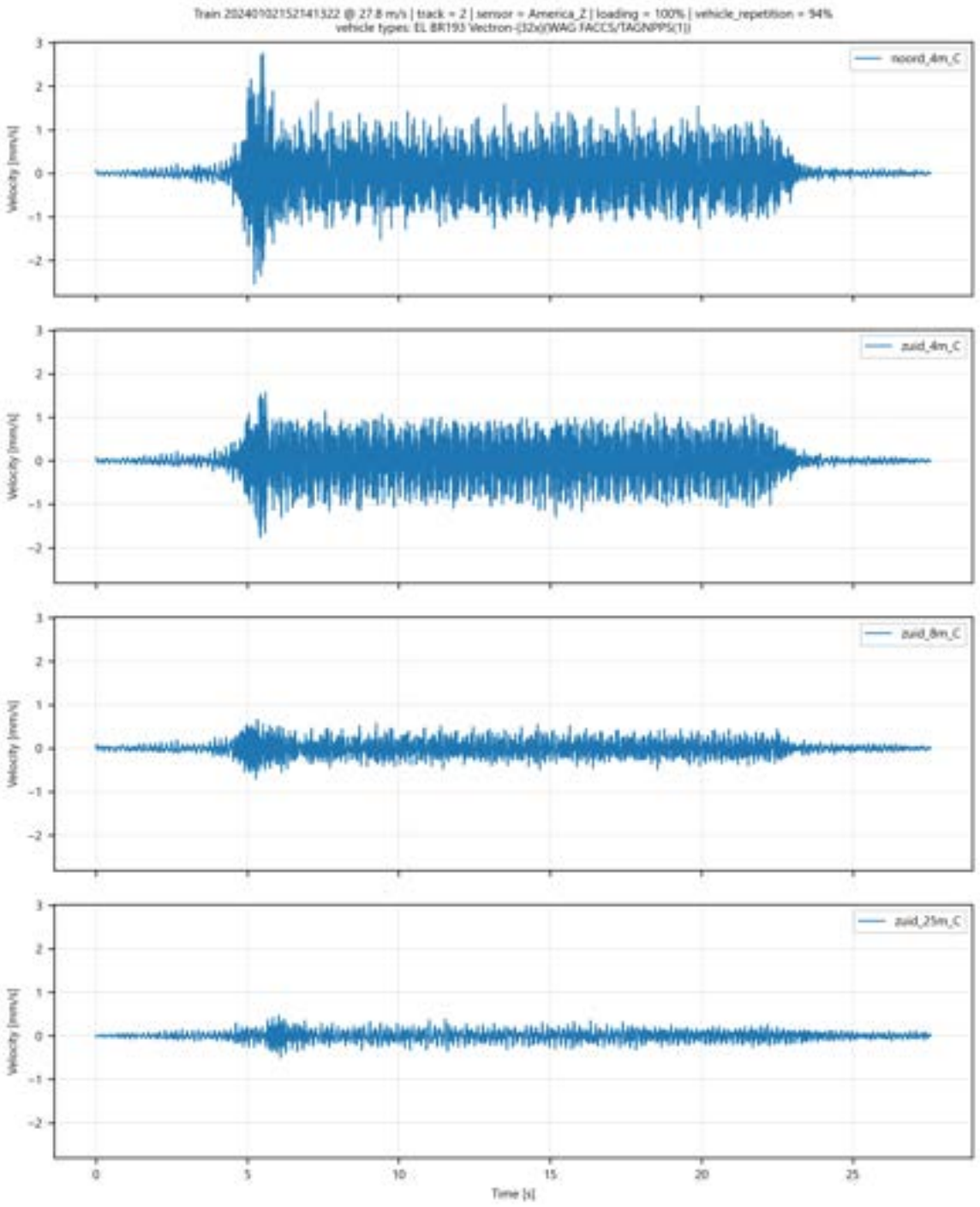


Afbeelding II.51 Genormaliseerd amplitude spectrum voor trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in America voor goederentrein passage op spoor 2 op 23-02-2024

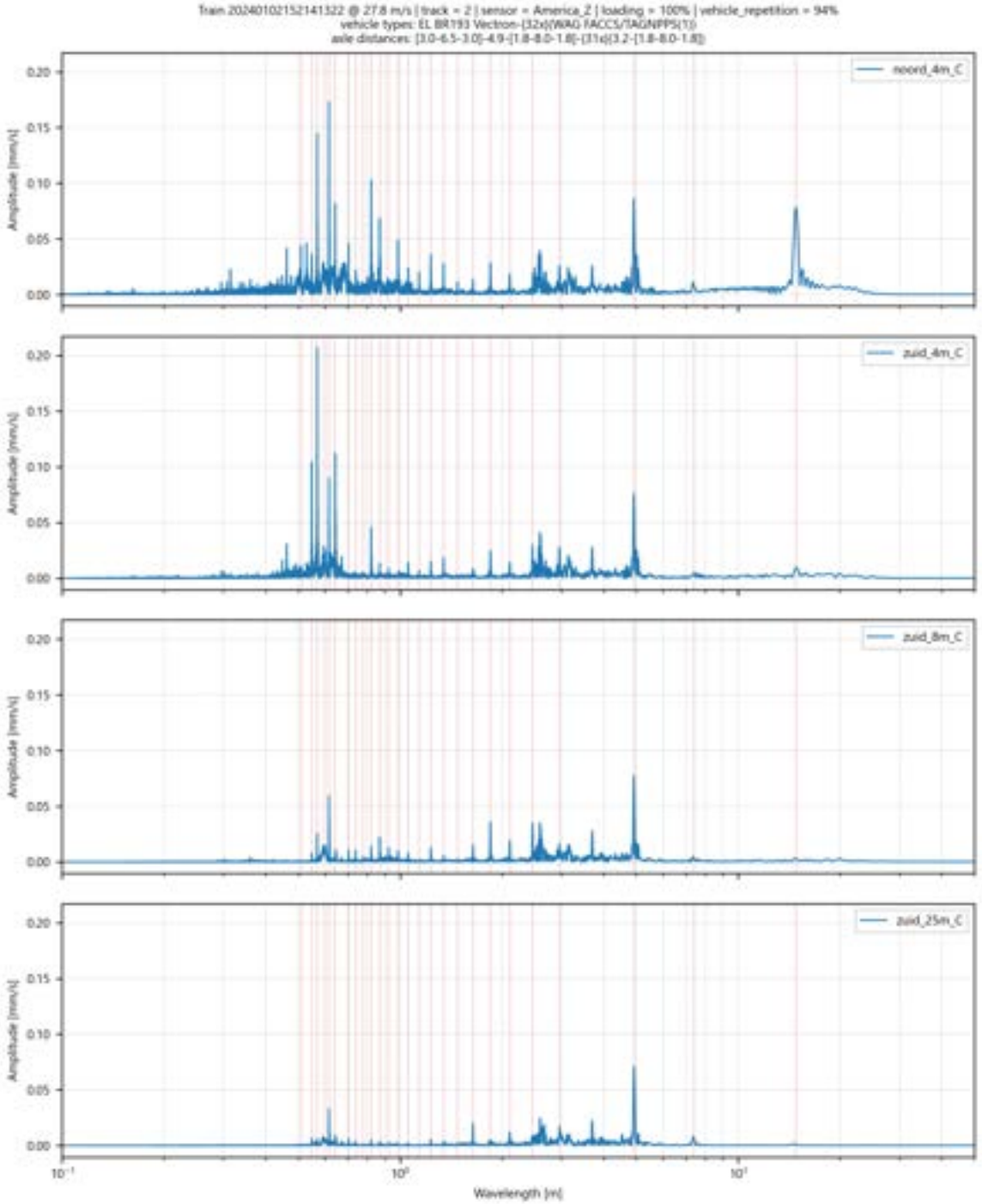


4-assige wagons, 100 % repetitie wagons, 100 % repetitie belading

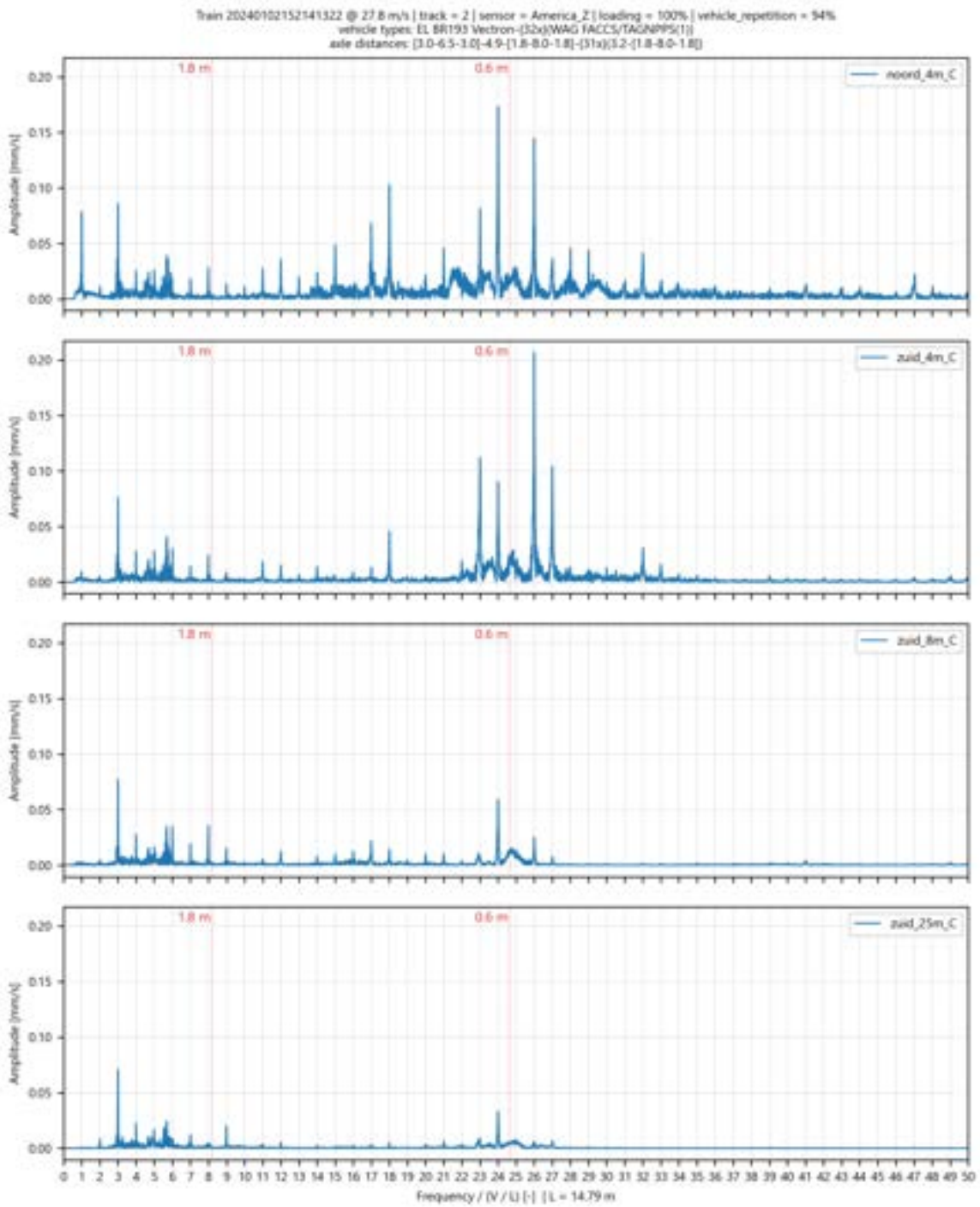
Afbeelding II.52 Trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in America voor goederentrein passage op spoor 2 op 02-01-2024



Afbeelding II.53 Amplitude spectrum voor trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in America voor goederentrein passage op spoor 2 op 02-01-2024

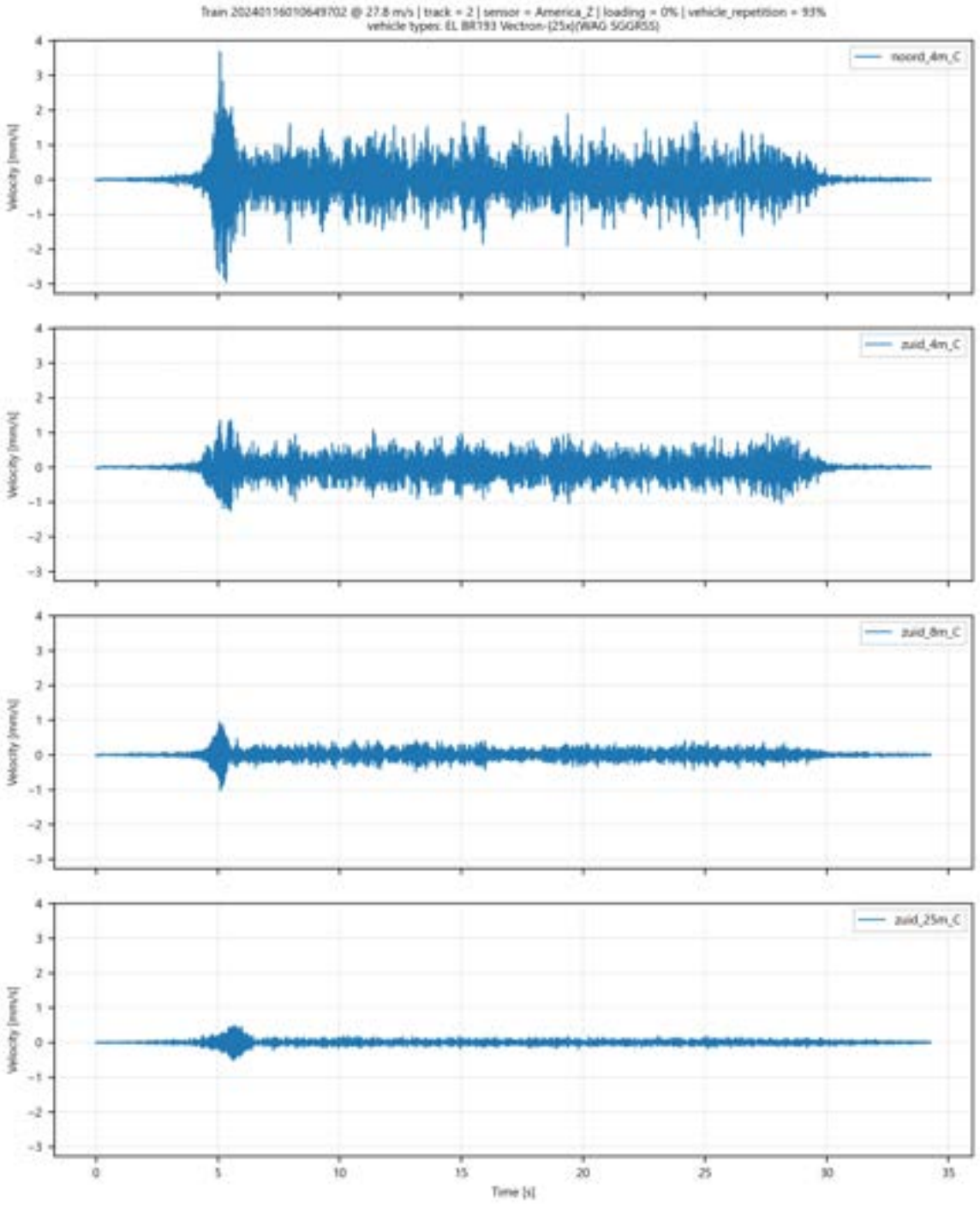


Afbeelding II.54 Genormaliseerd amplitude spectrum voor trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in America voor goederentrein passage op spoor 2 op 02-01-2024

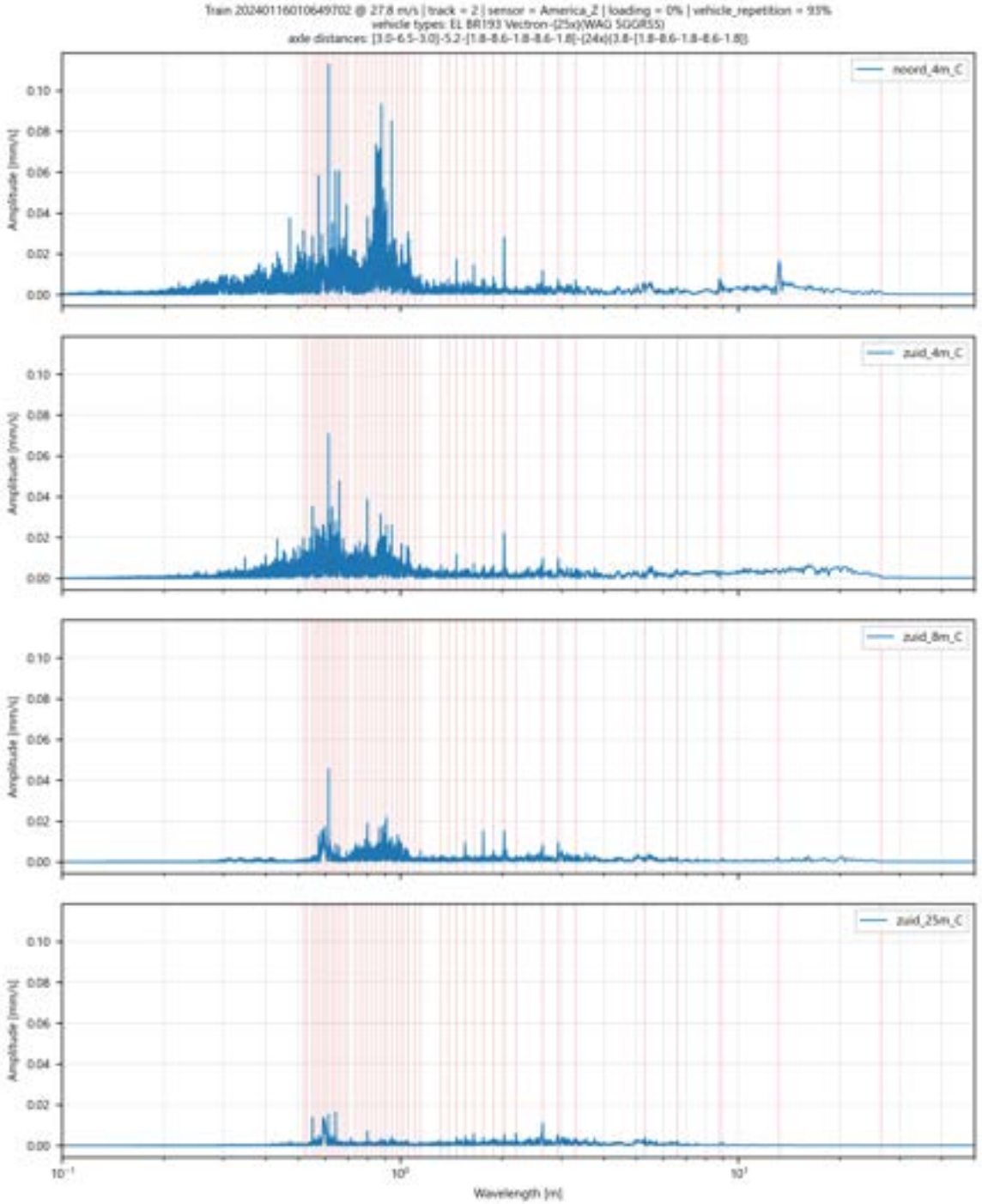


6-assige wagons, 100 % repetitie wagons, 0 % repetitie belading

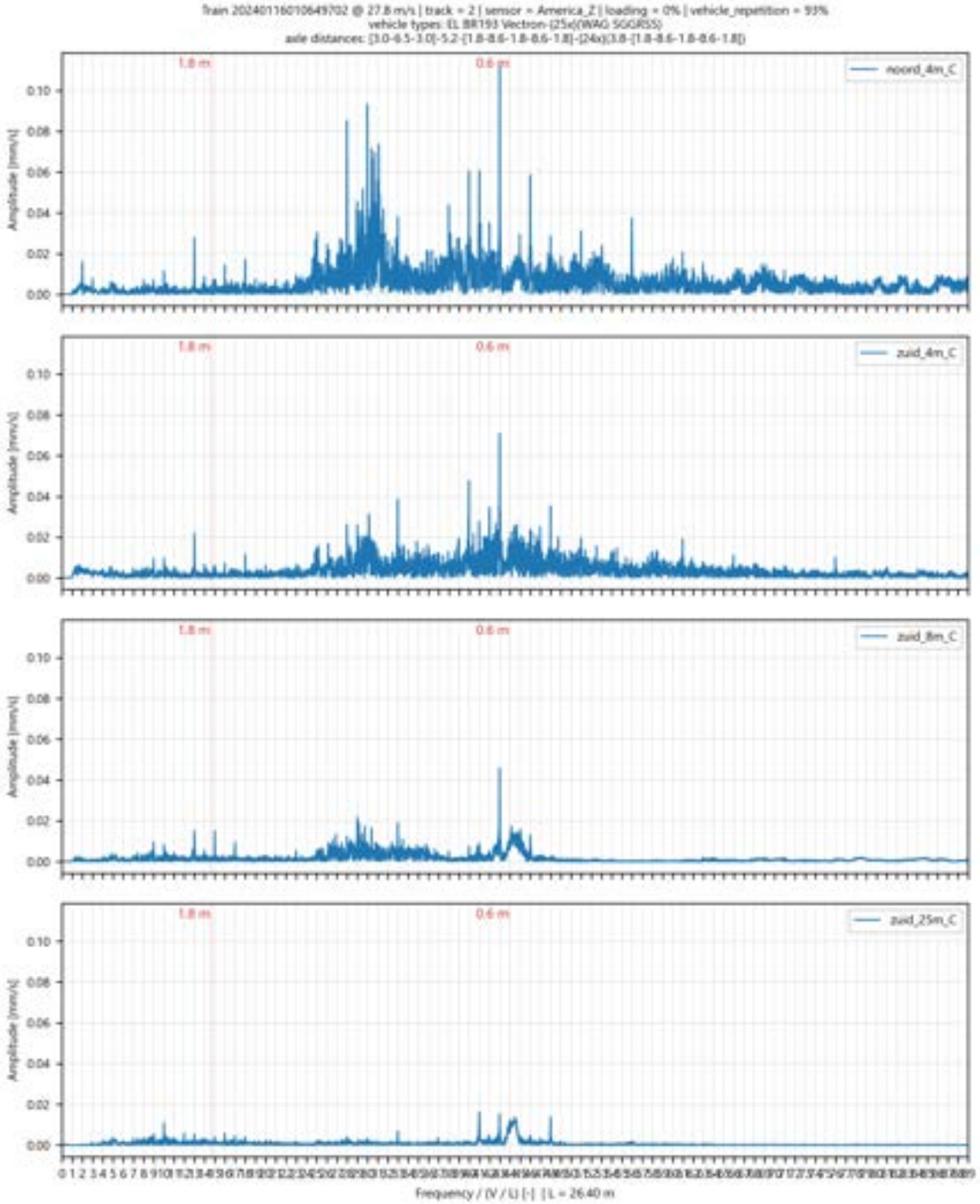
Afbeelding II.55 Trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in America voor goederentrein passage op spoor 2 op 16-01-2024



Afbeelding II.56 Amplitude spectrum voor trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in America voor goederentrein passage op spoor 2 op 16-01-2024

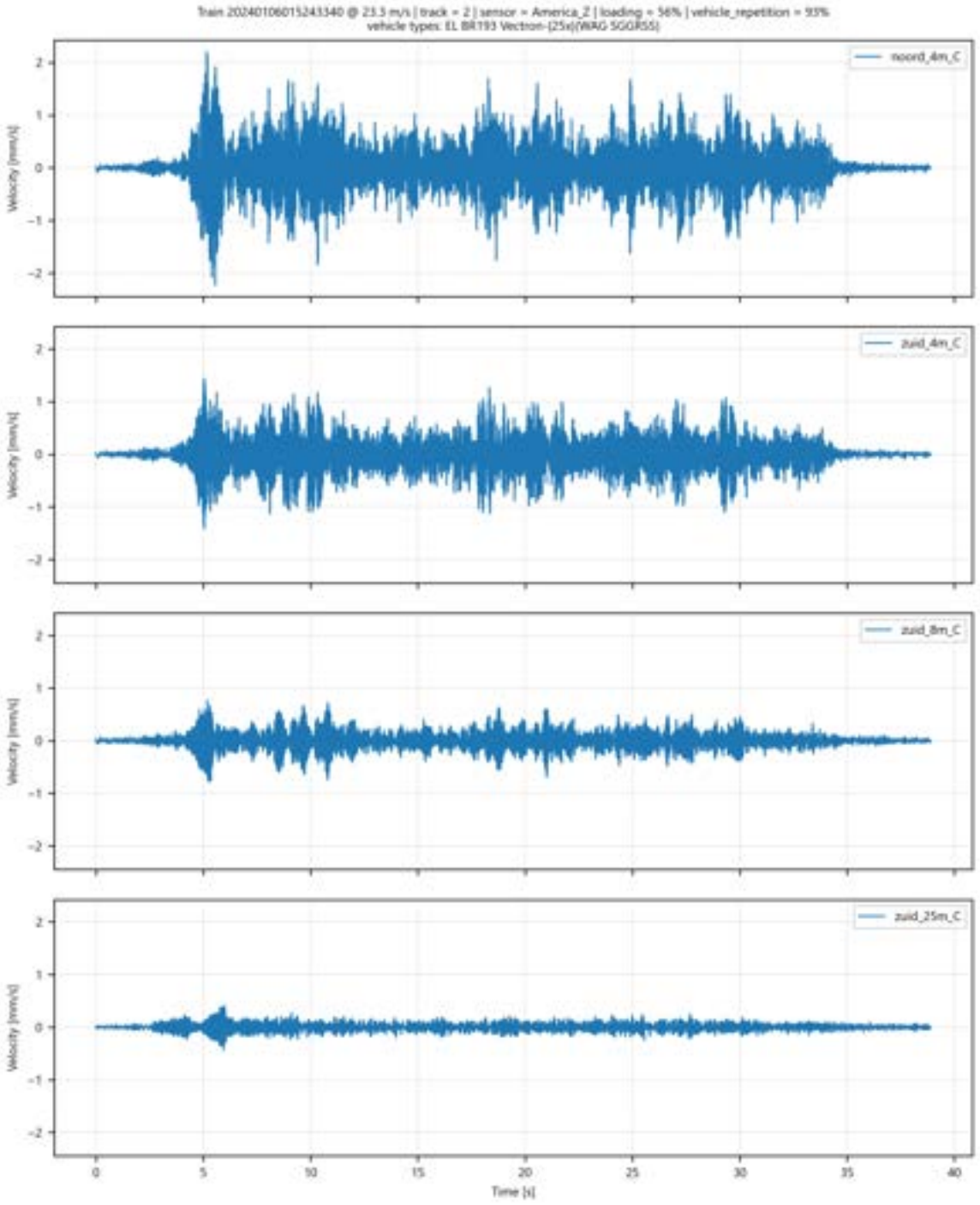


Afbeelding II.57 Genormaliseerd amplitude spectrum voor trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in America voor goederentrein passage op spoor 2 op 16-01-2024

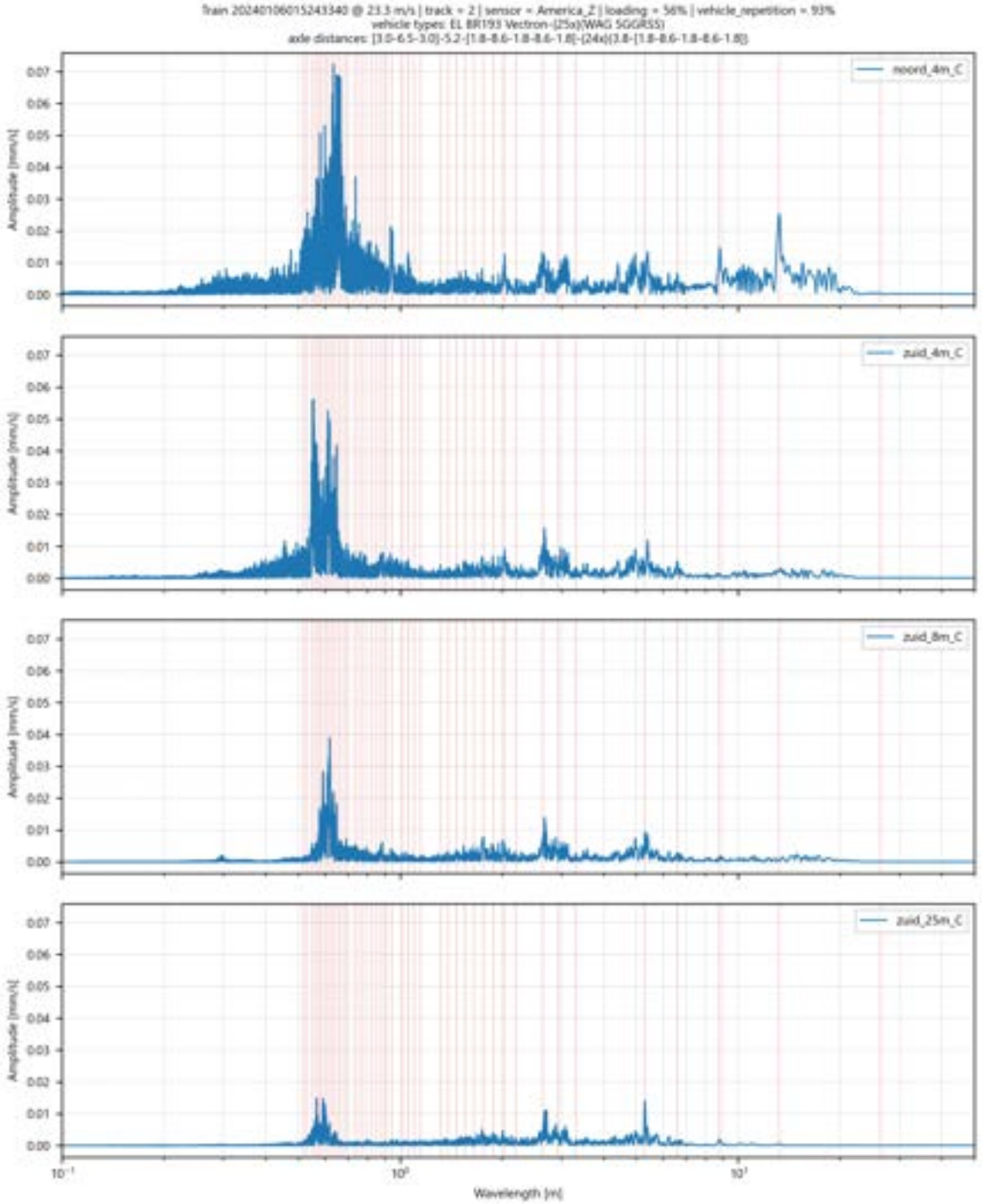


6-assige wagons, 100 % repetitie wagons, 60 % repetitie belading

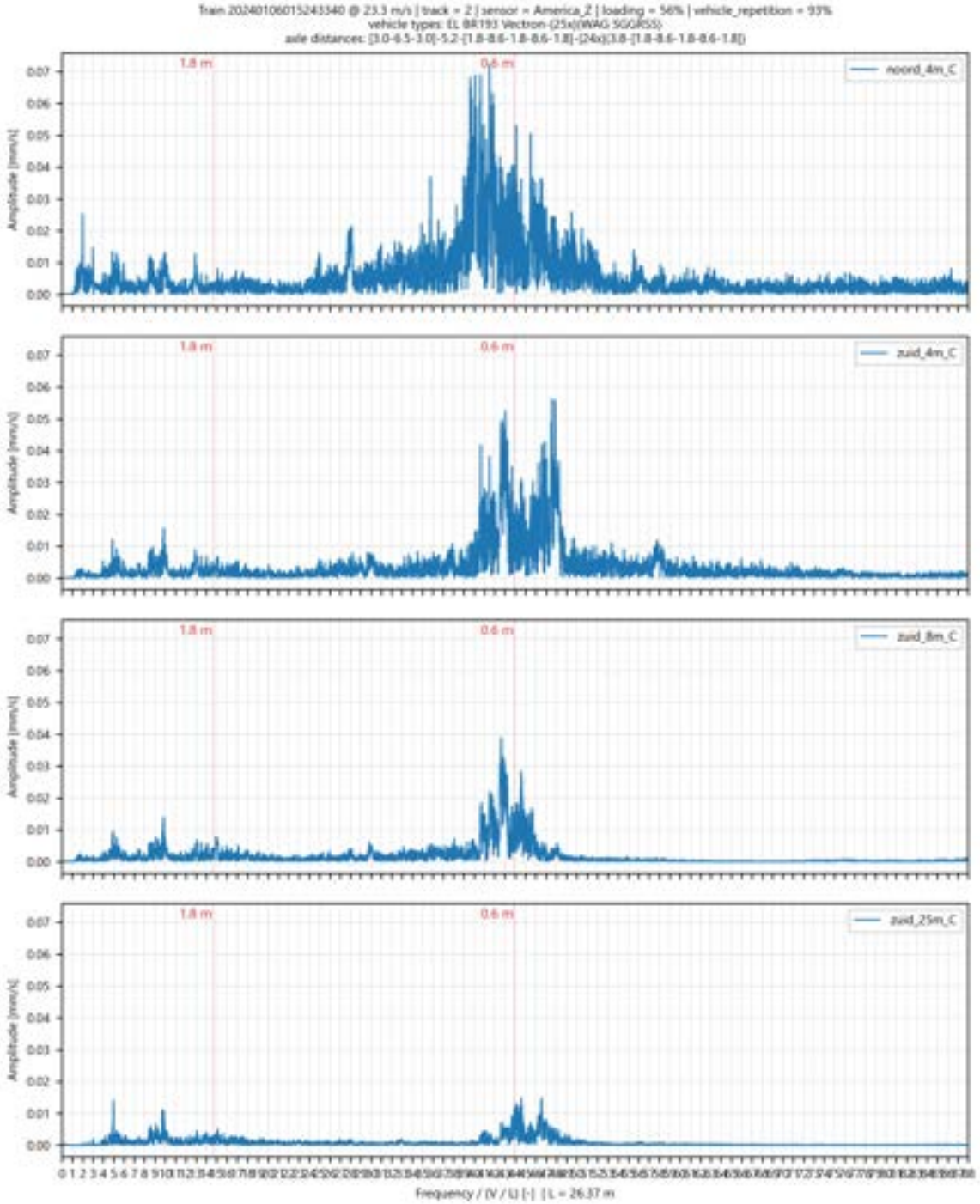
Afbeelding II.58 Trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in America voor goederentrein passage op spoor 2 op 06-01-2024



Afbeelding II.59 Amplitude spectrum voor trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in America voor goederentrein passage op spoor 2 op 06-01-2024



Afbeelding II.60 Genormaliseerd amplitude spectrum voor trillingssnelheid in Z-richting op 4 meetpunten in America voor goederentrein passage op spoor 2 op 06-01-2024



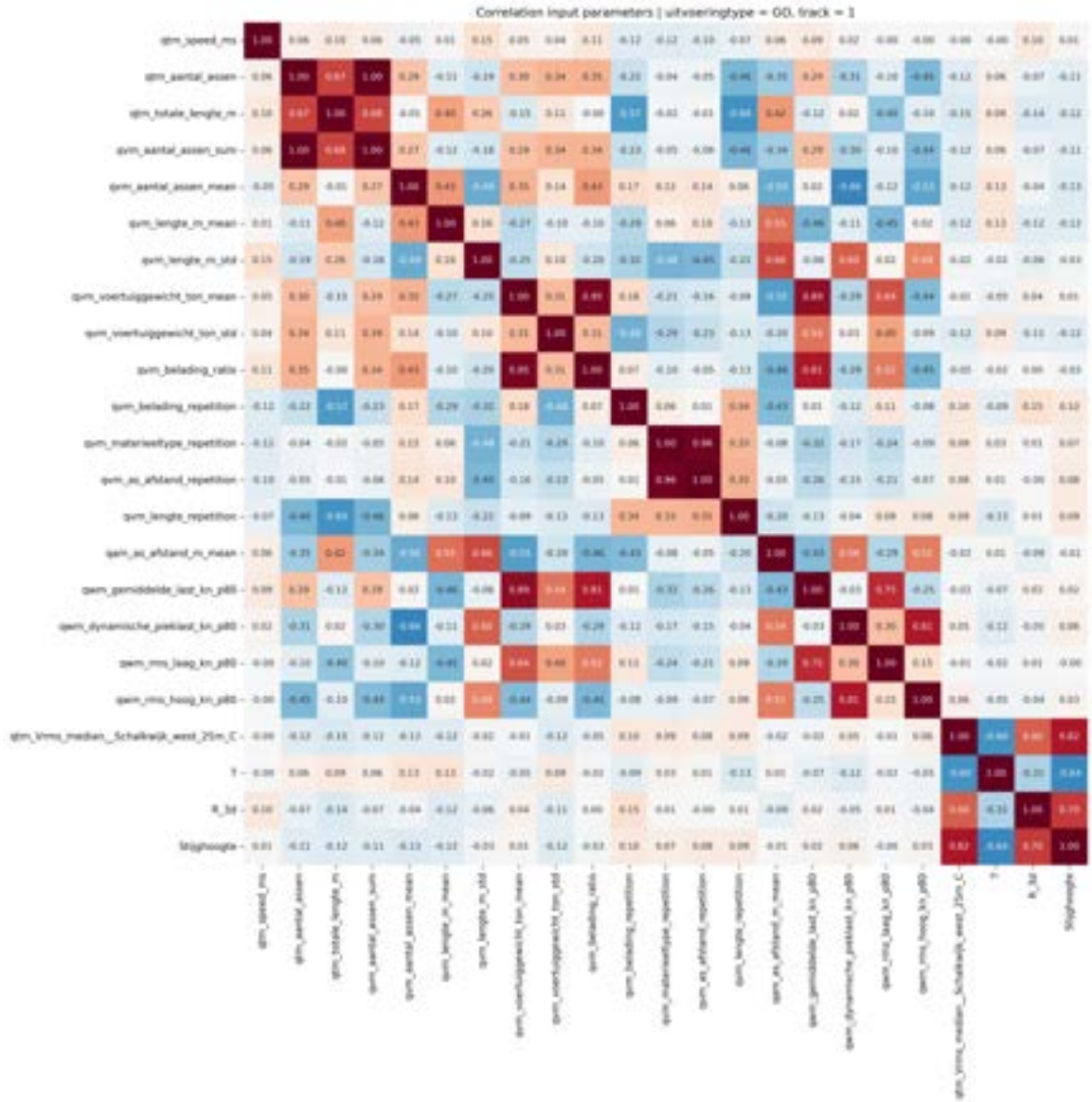
III

BIJLAGE: CORRELATIE ANALYSE

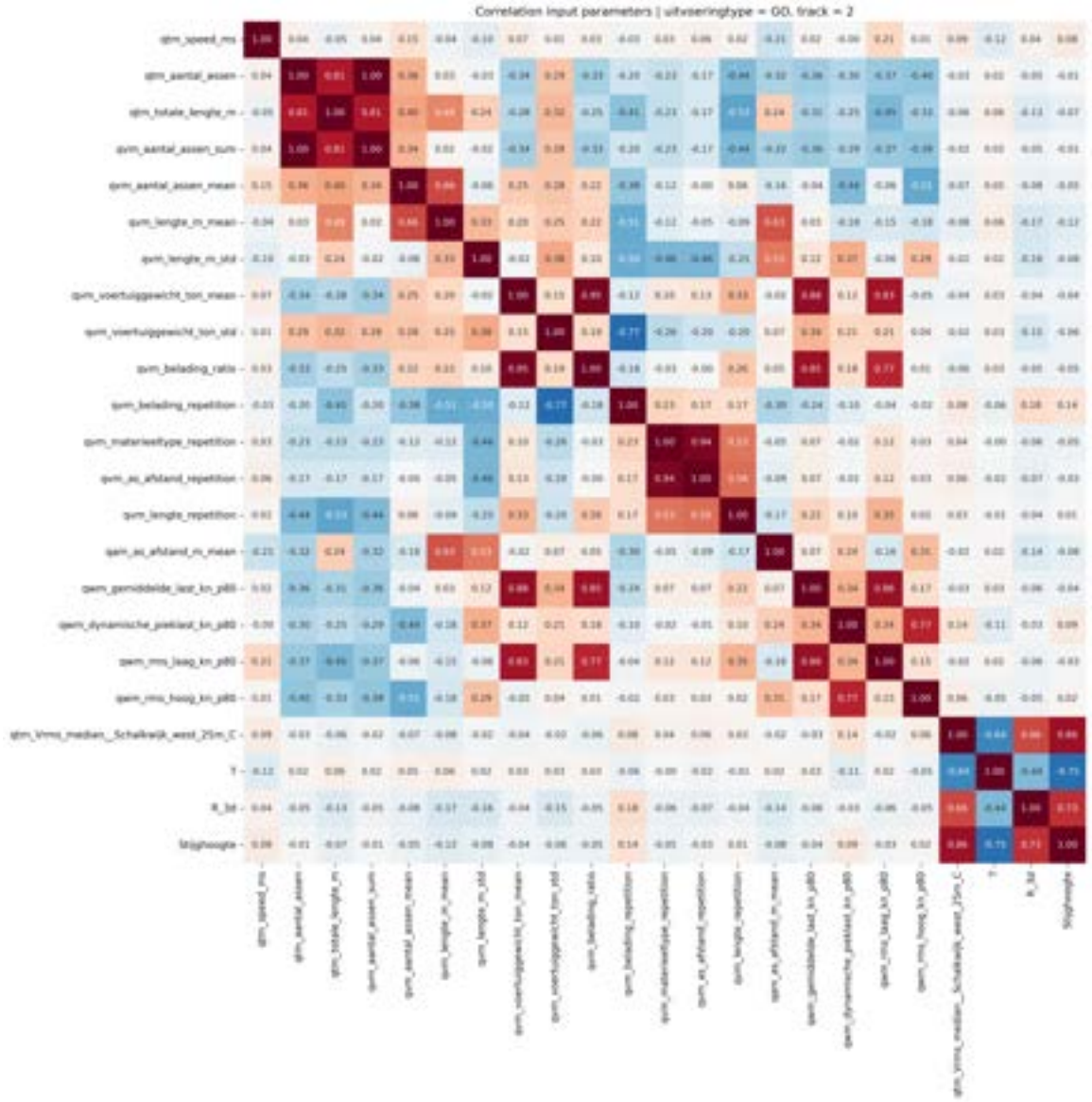
In deze bijlage worden voor meetlocatie Schalkwijk de correlatie coëfficiënten getoond tussen de input parameters en de output parameters (trillingsniveaus).

III.1 Meetpunt 4m oostzijde

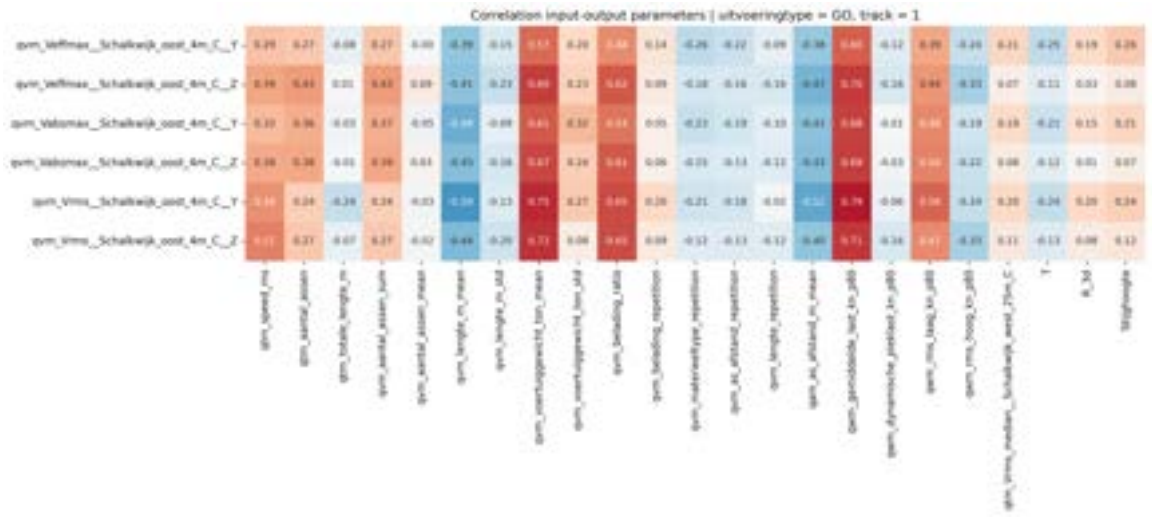
Afbeelding III.1 Correlatie coëfficiënten voor de input parameters voor goederen treinen op spoor 1



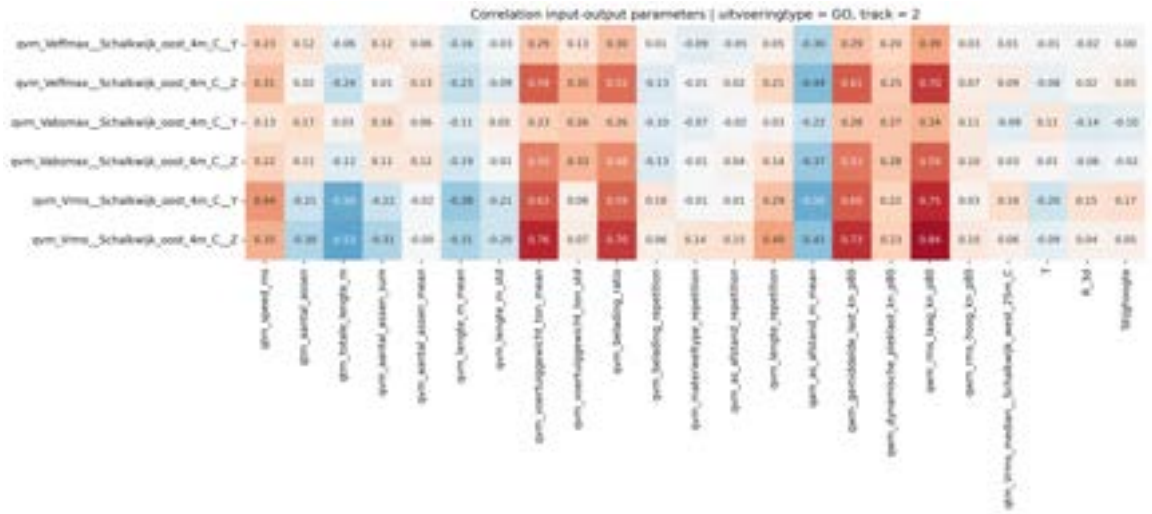
Afbeelding III.2 Correlatie coëfficiënten voor de input parameters voor goederen treinen op spoor 2



Afbeelding III.3 Correlatie coëfficiënten voor de input en output parameters voor goederen treinen op spoor 1, meetpunt 4 m oostzijde

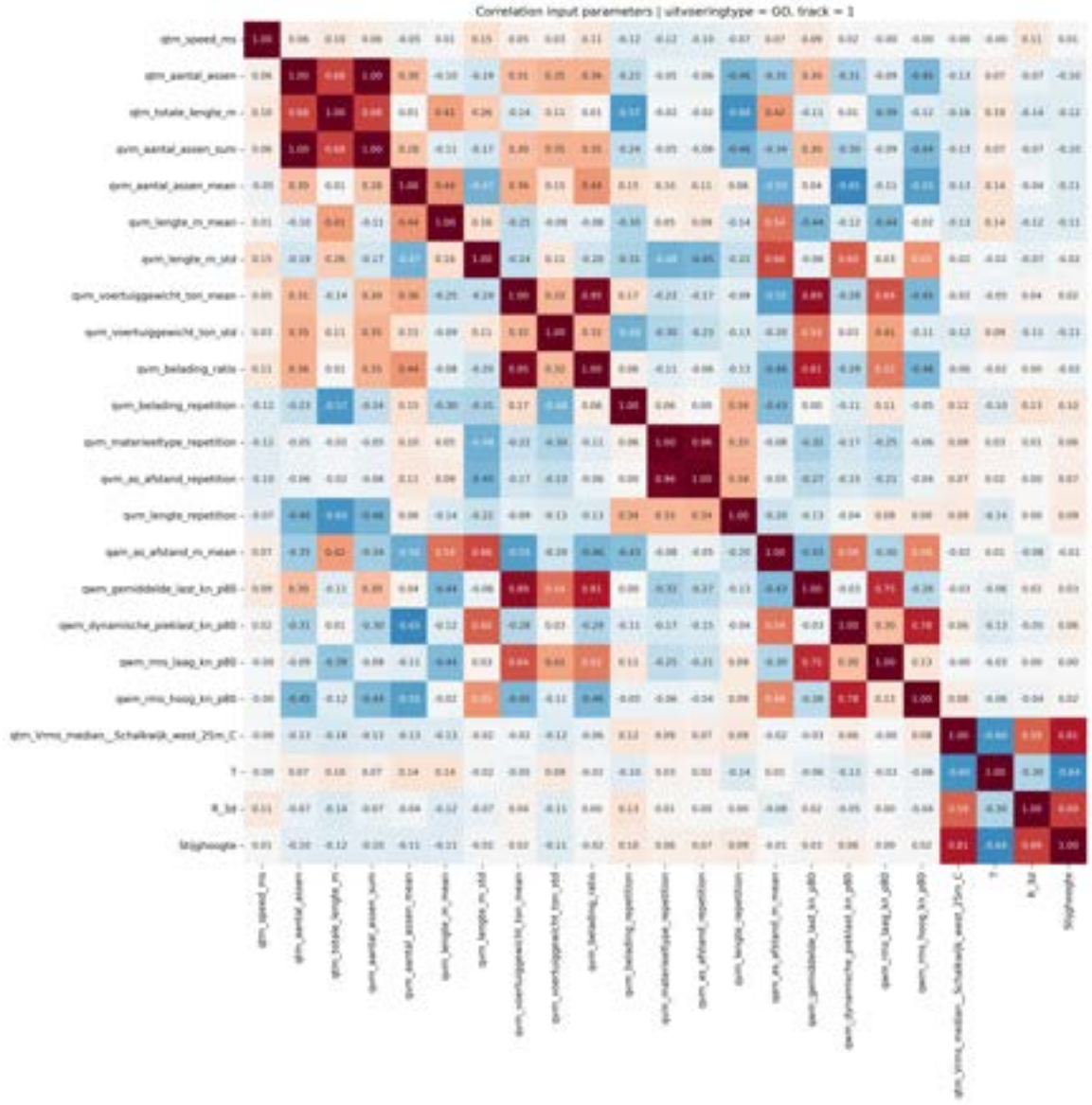


Afbeelding III.4 Correlatie coëfficiënten voor de input en output parameters voor goederen treinen op spoor 2, meetpunt 4 m oostzijde

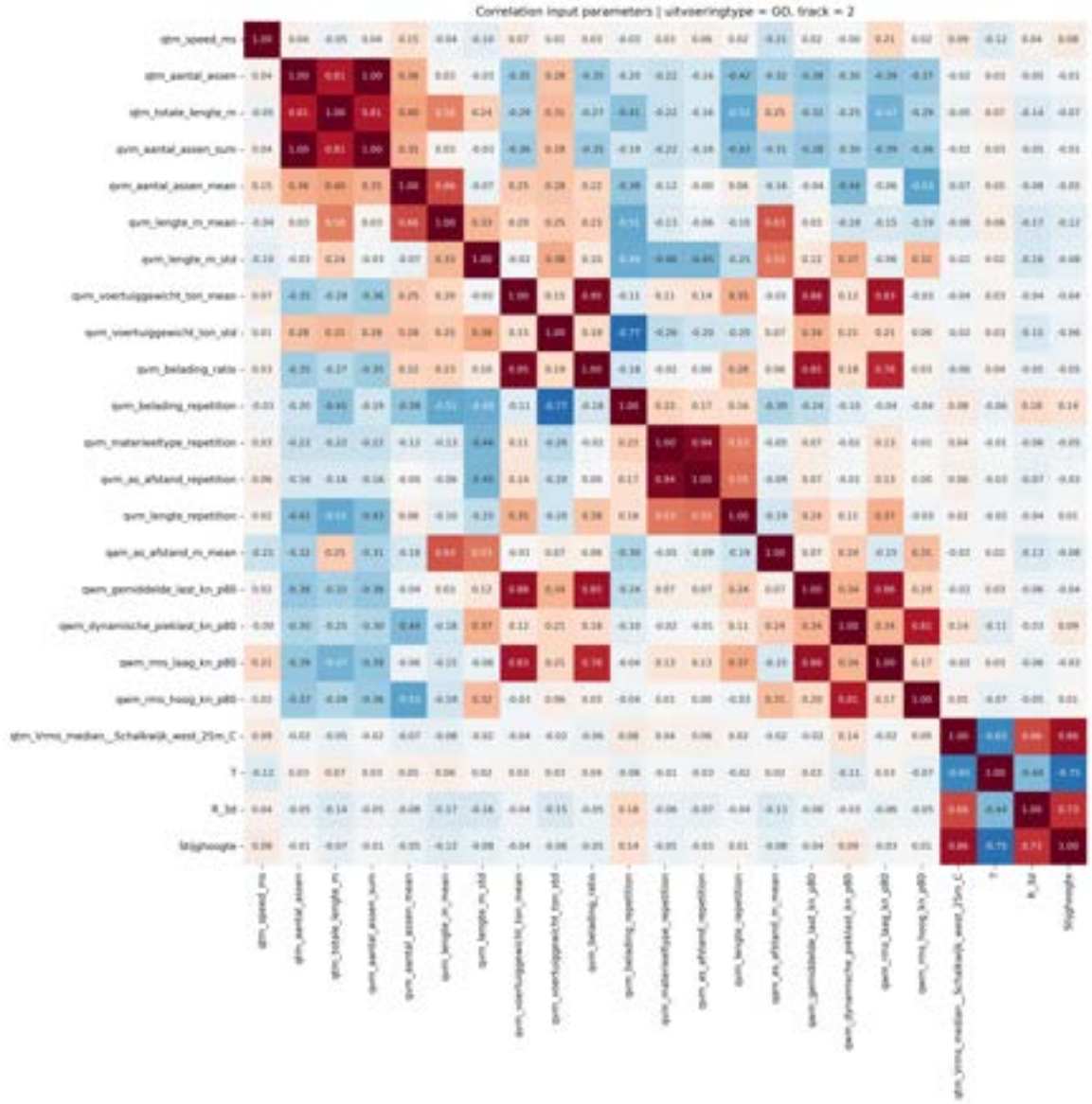


III.2 Meetpunt 4m westzijde

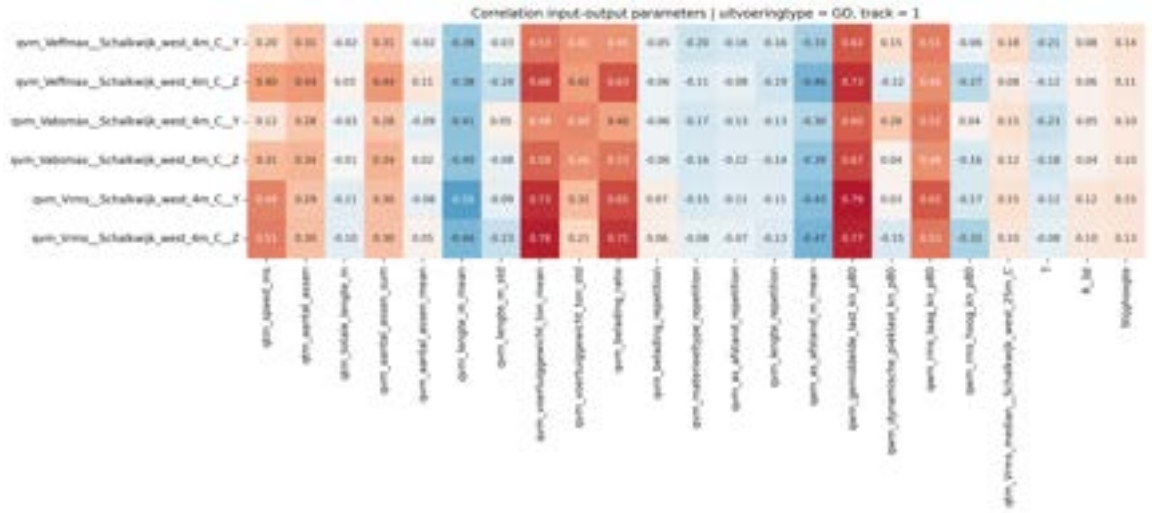
Afbeelding III.5 Correlatie coëfficiënten voor de input parameters voor goederen treinen op spoor 1



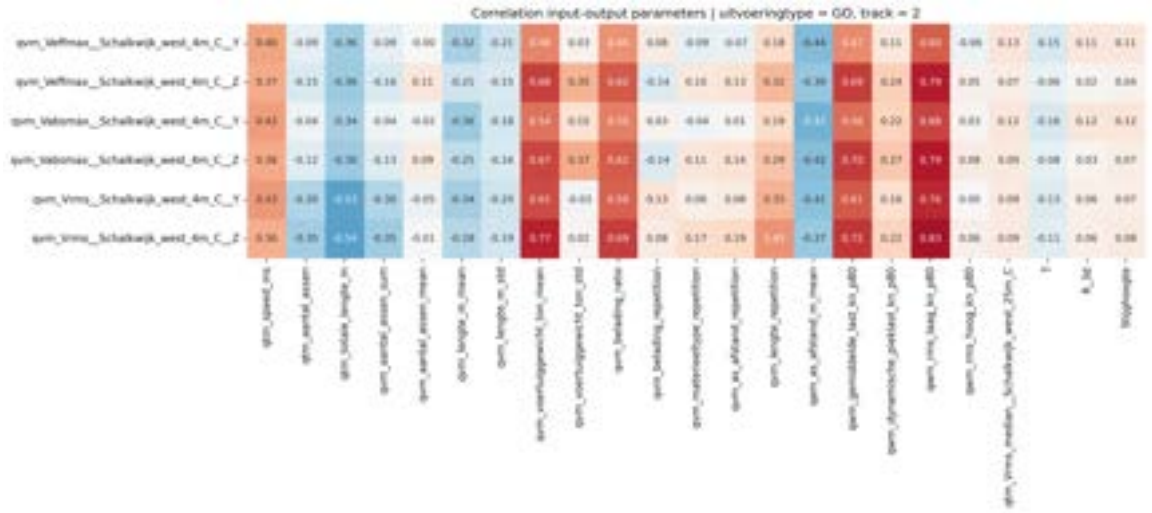
Afbeelding III.6 Correlatie coëfficiënten voor de input parameters voor goederen treinen op spoor 2



Afbeelding III.7 Correlatie coëfficiënten voor de input en output parameters voor goederen treinen op spoor 1, meetpunt 4 m westzijde

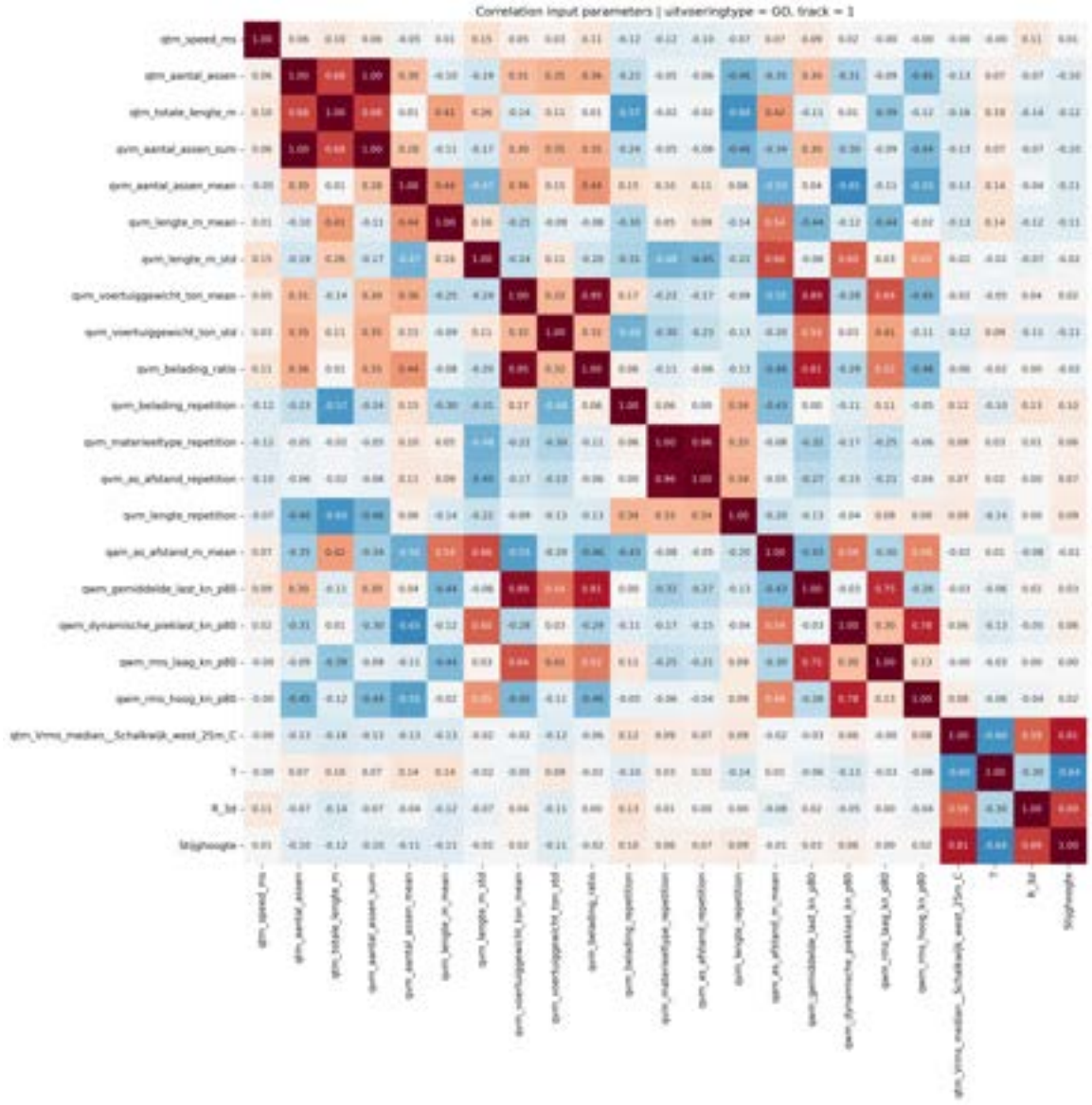


Afbeelding III.8 Correlatie coëfficiënten voor de input en output parameters voor goederen treinen op spoor 2, meetpunt 4 m westzijde

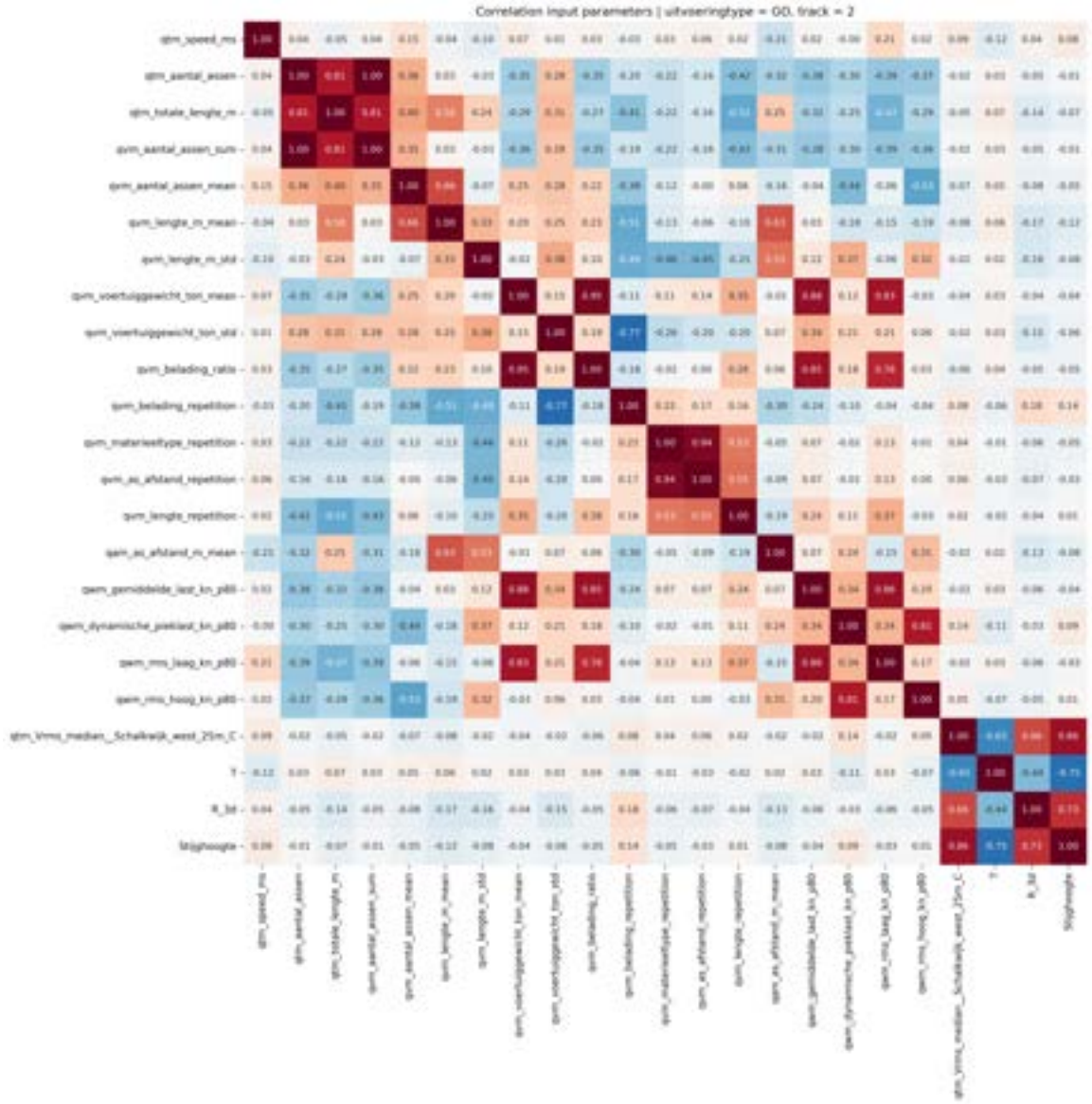


III.3 Meetpunt 8m westzijde

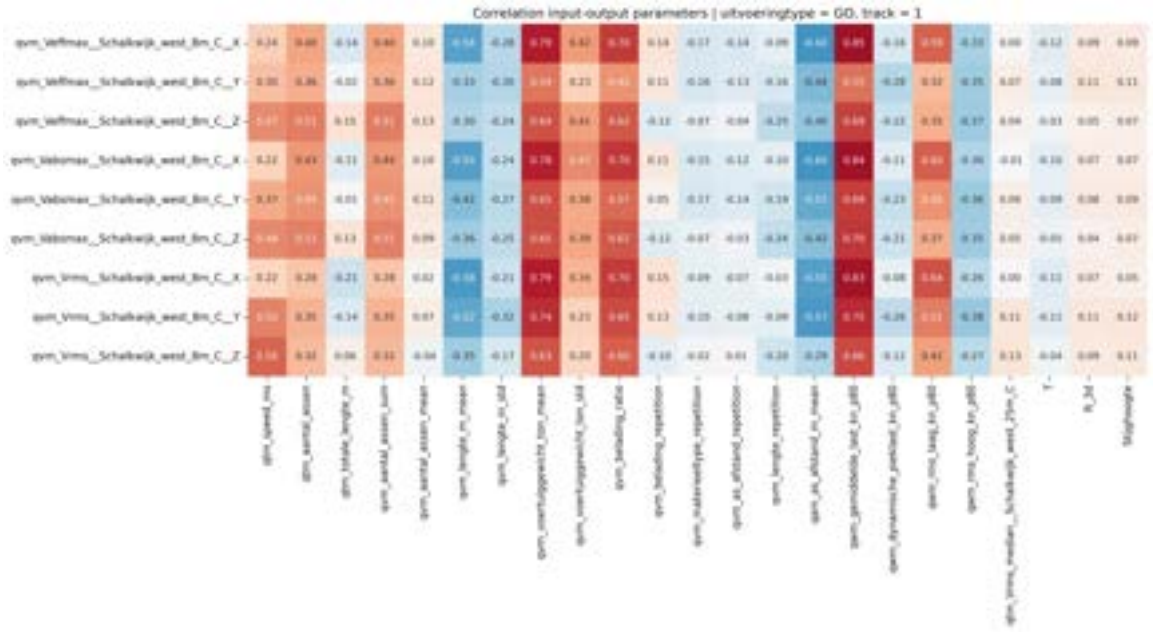
Afbeelding III.9 Correlatie coëfficiënten voor de input parameters voor goederen treinen op spoor 1



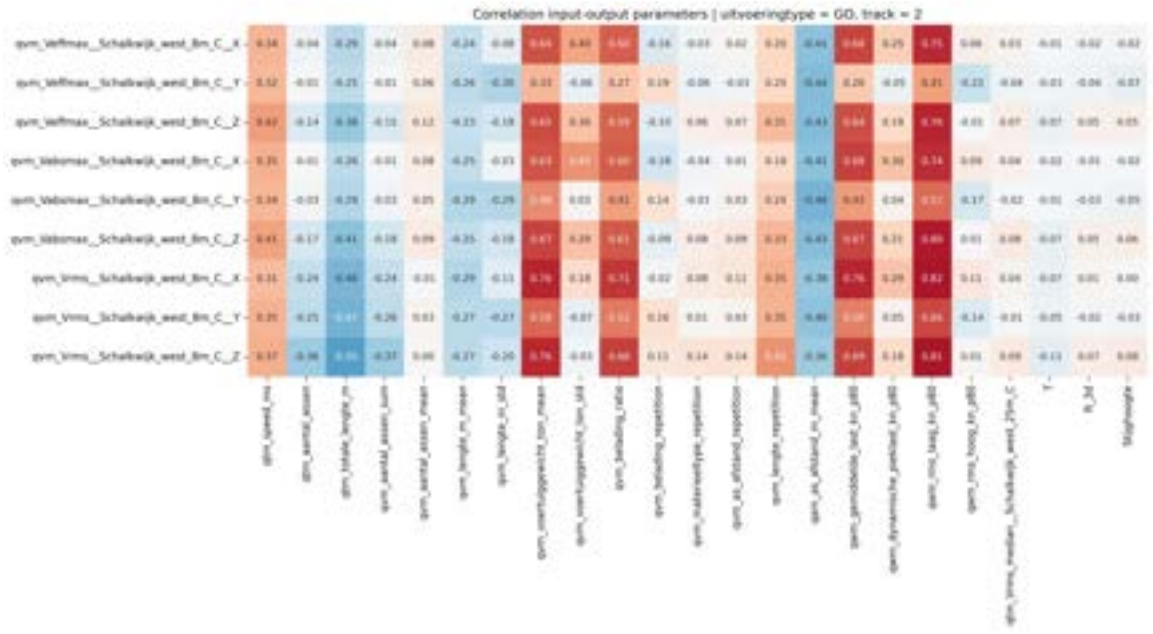
Afbeelding III.10 Correlatie coëfficiënten voor de input parameters voor goederen treinen op spoor 2



Afbeelding III.11 Correlatie coëfficiënten voor de input en output parameters voor goederen treinen op spoor 1, meetpunt 8 m westzijde

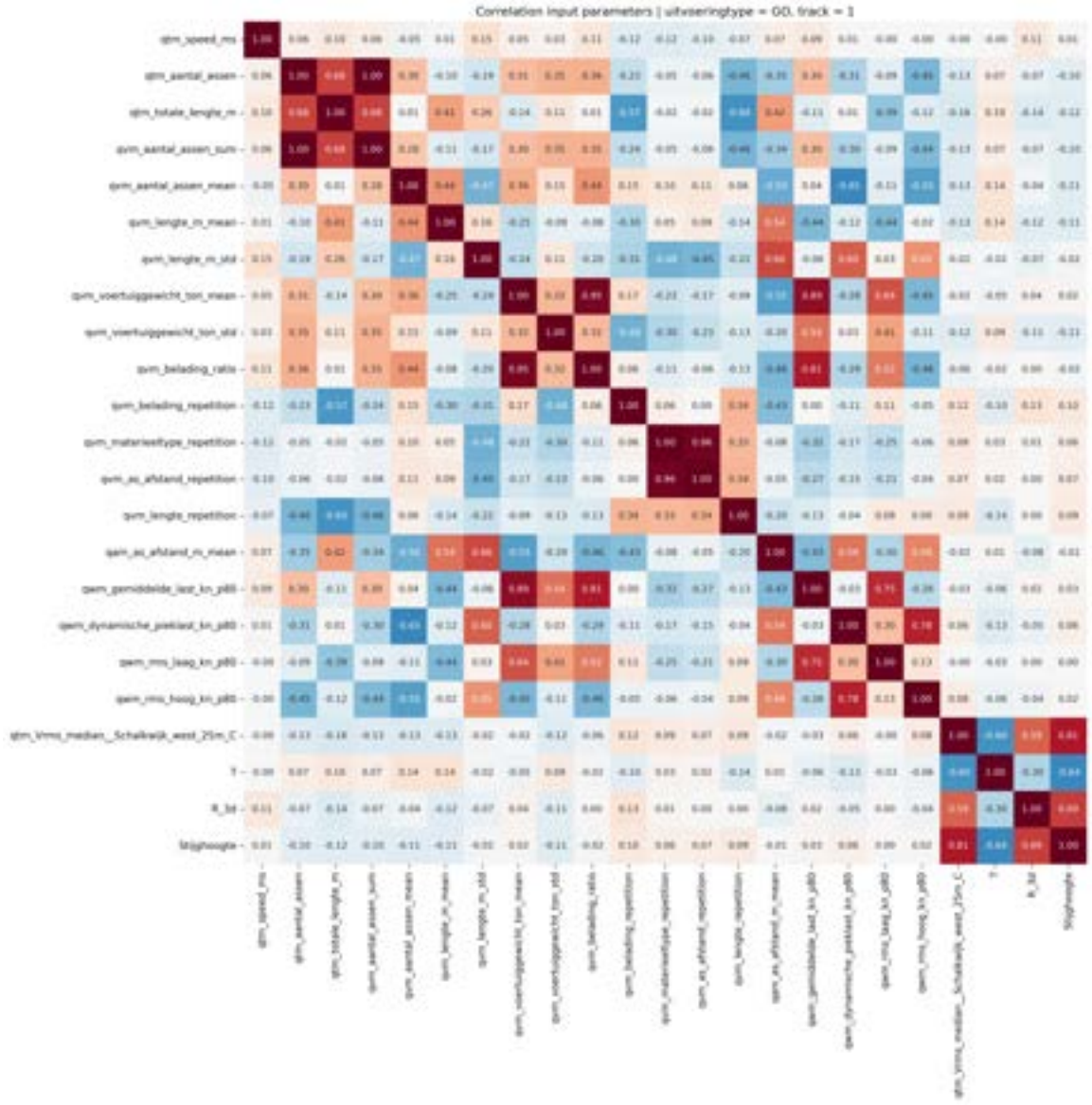


Afbeelding III.12 Correlatie coëfficiënten voor de input en output parameters voor goederen treinen op spoor 2, meetpunt 8 m westzijde

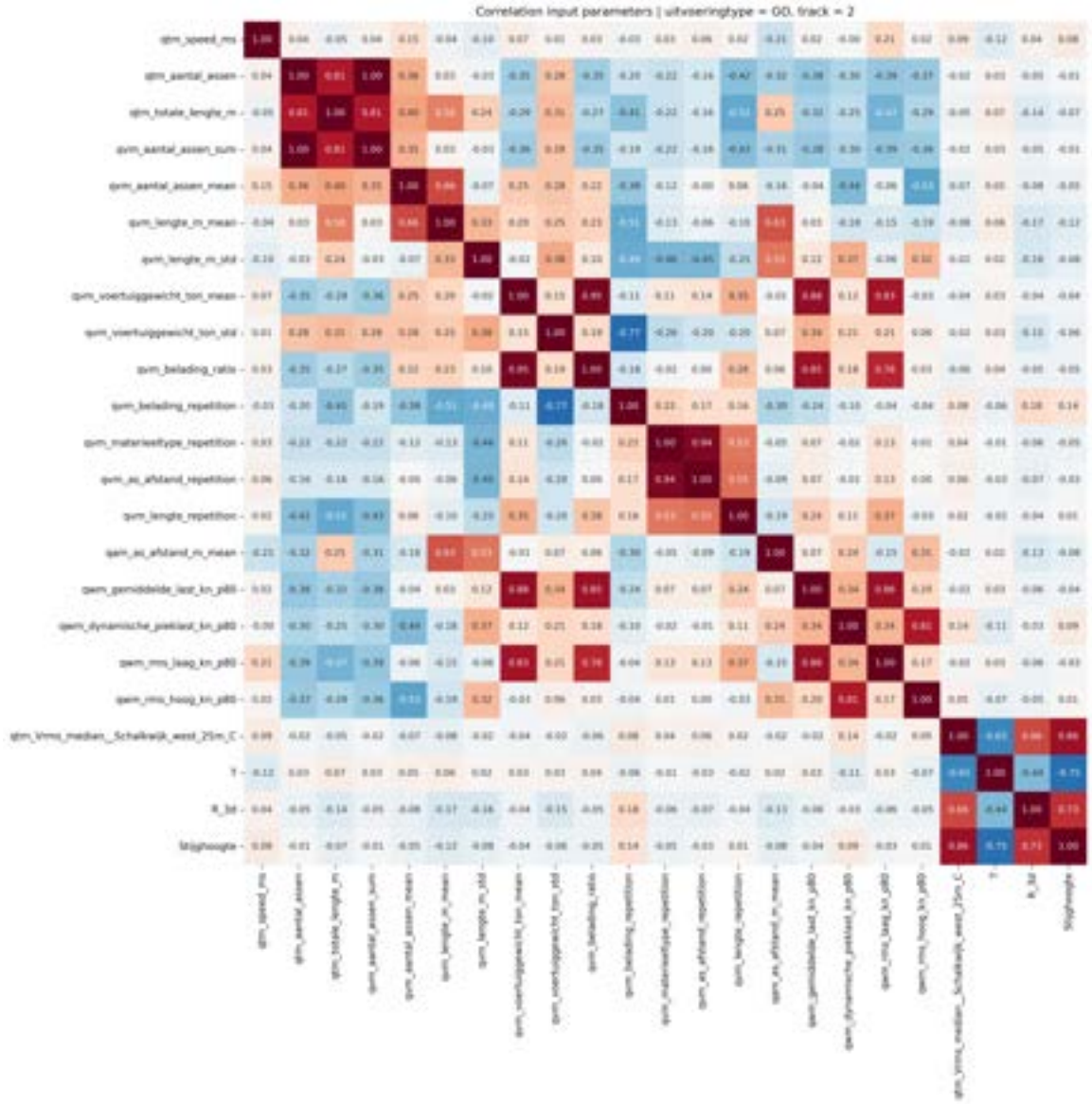


III.4 Meetpunt 25m westzijde

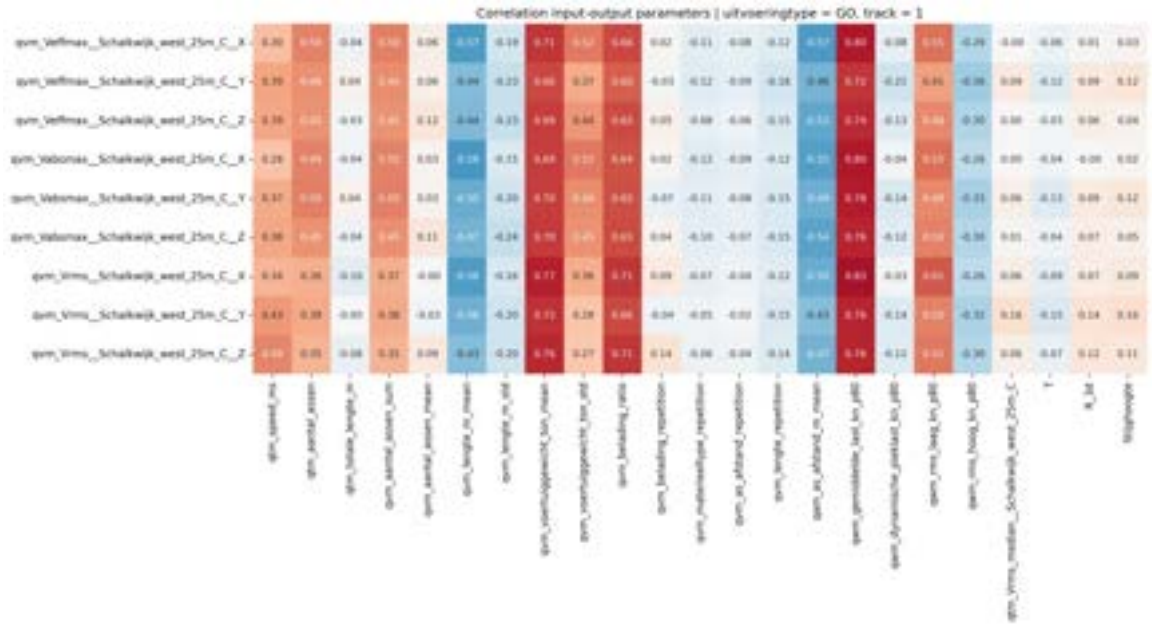
Afbeelding III.13 Correlatie coëfficiënten voor de input parameters voor goederen treinen op spoor 1



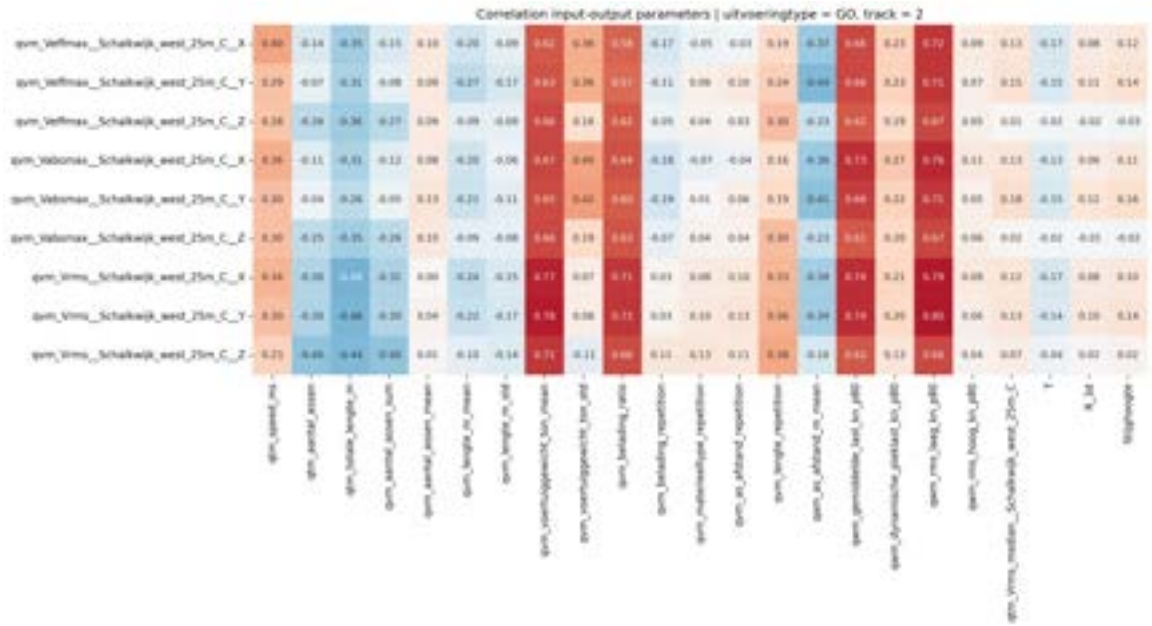
Afbeelding III.14 Correlatie coëfficiënten voor de input parameters voor goederen treinen op spoor 2



Afbeelding III.15 Correlatie coëfficiënten voor de input en output parameters voor goederen treinen op spoor 1, meetpunt 25 m westzijde

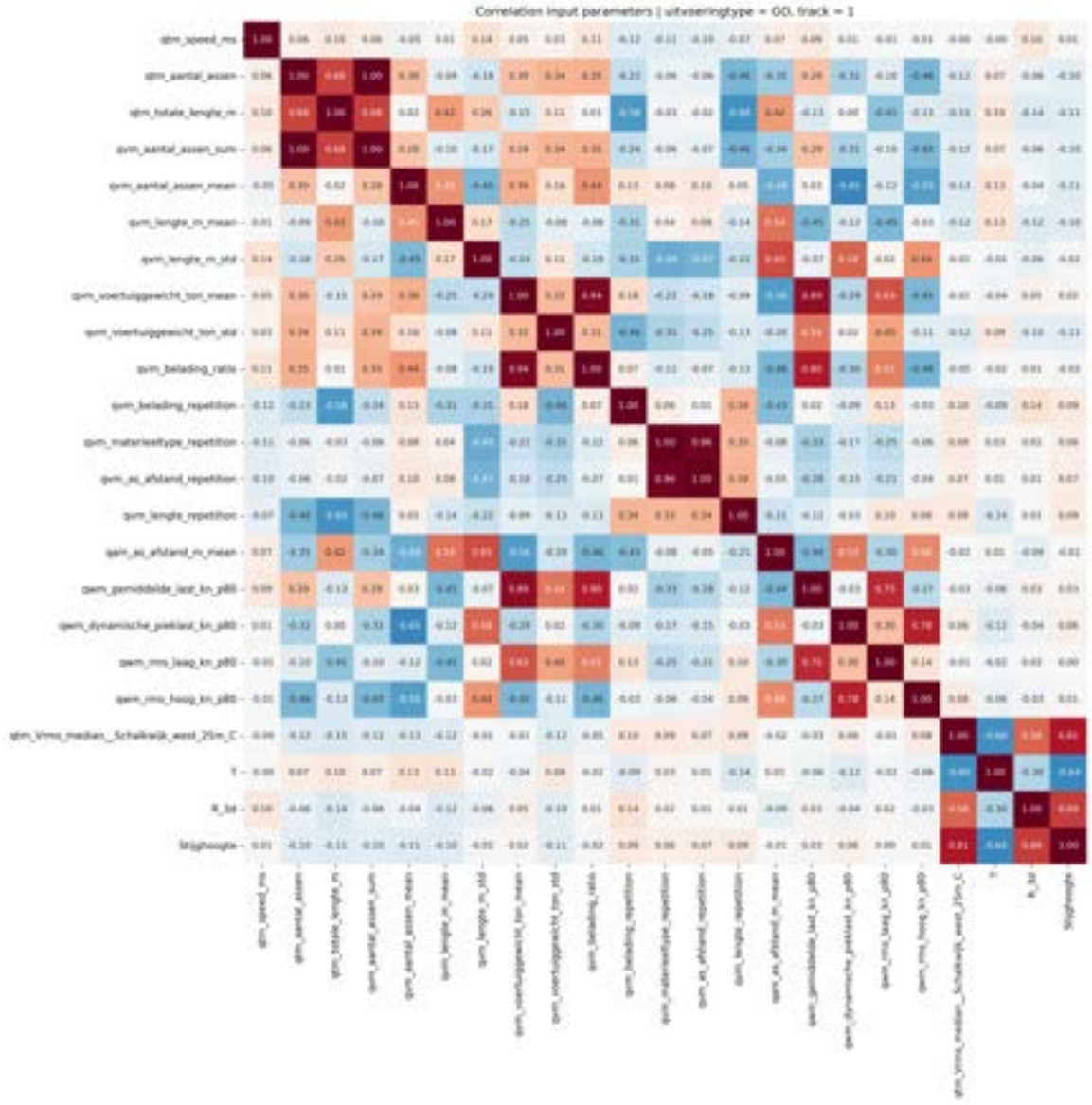


Afbeelding III.16 Correlatie coëfficiënten voor de input en output parameters voor goederen treinen op spoor 2, meetpunt 25 m westzijde

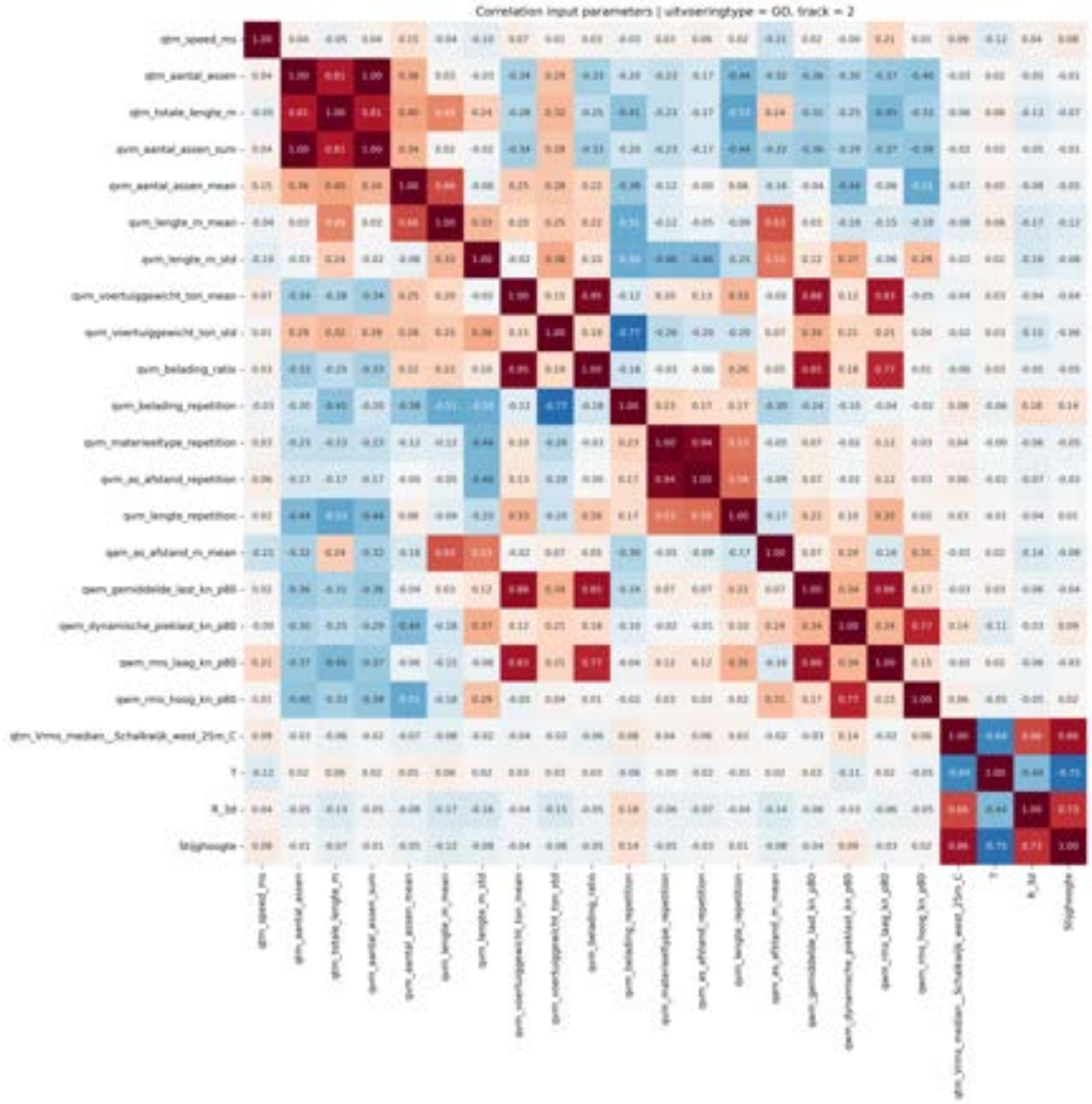


III.5 Meetpunt gebouw

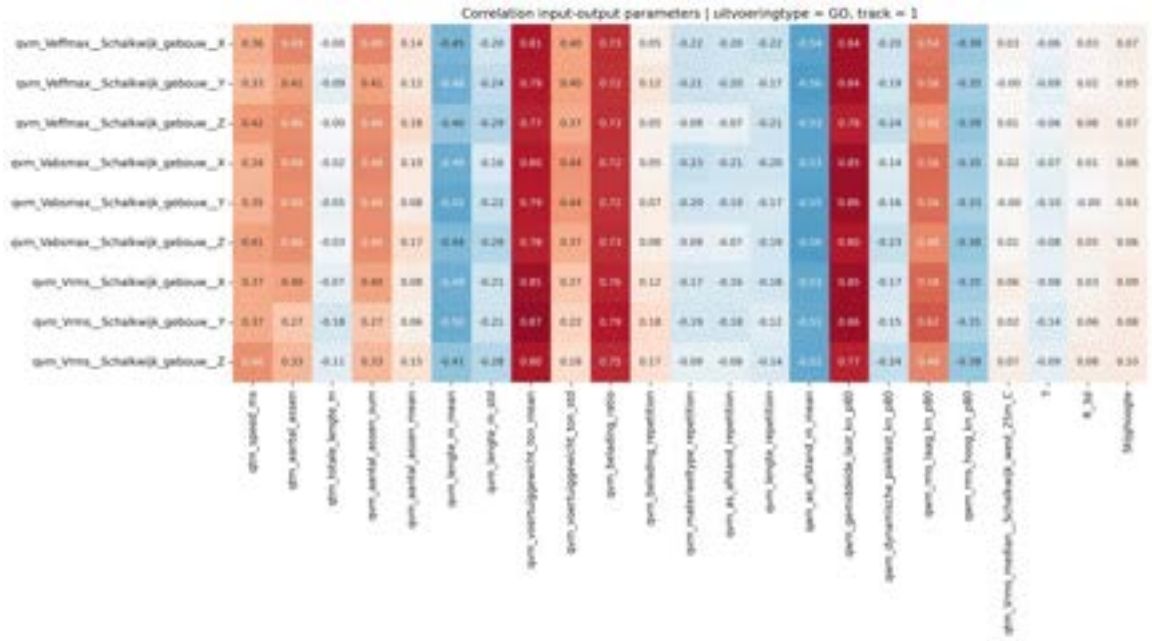
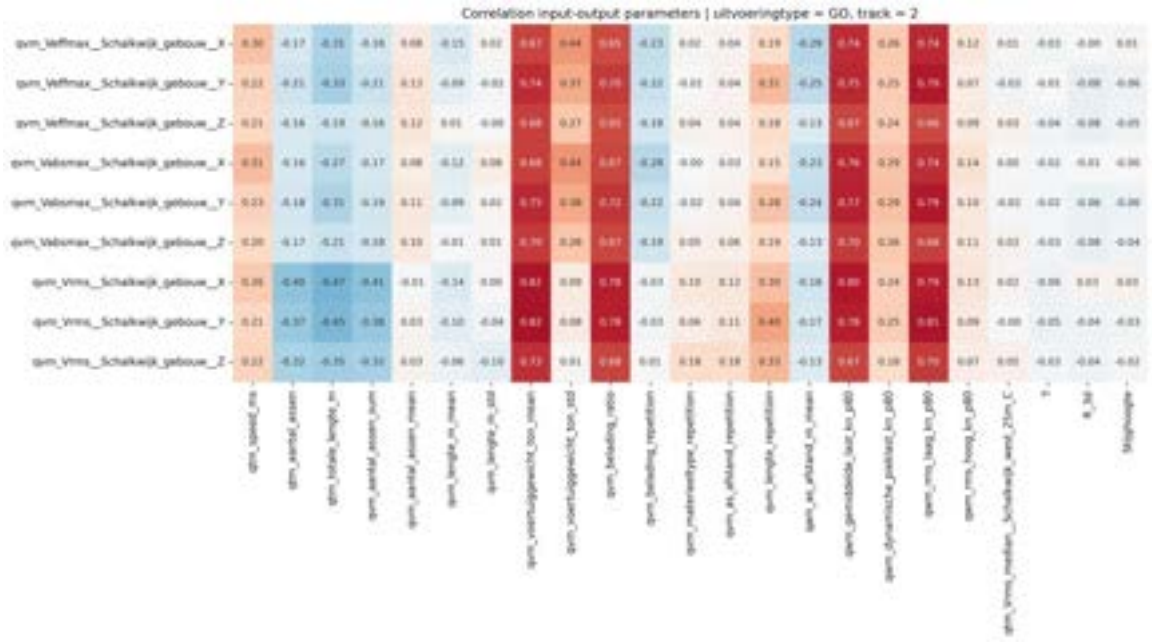
Afbeelding III.17 Correlatie coëfficiënten voor de input parameters voor goederen treinen op spoor 1



Afbeelding III.18 Correlatie coëfficiënten voor de input parameters voor goederen treinen op spoor 2



Afbeelding III.19 Correlatie coëfficiënten voor de input en output parameters voor goederen treinen op spoor 1, meetpunt gebouw



Afbeelding III.20 Correlatie coëfficiënten voor de input en output parameters voor goederen treinen op spoor 2, meetpunt gebouw