DEKRA Rail

Effect halvering dwarsliggerafstand op bodemtrillingen

Simulatieonderzoek

12 mei 2025

Effect halvering dwarsliggerafstand op bodemtrillingen

Simulatieonderzoek

Opdrachtgever	:	ProRail, dhr. R. Damen
Adres	:	Moreelsepark 3
	:	3511 EP Utrecht
Uw kenmerk	:	Opdrachtnummer 4129217
Ons kenmerk	:	DR/25/240123/004
Auteur(s)	:	Coen Berssenbrugge, BSc en ing. Mark Linders
Onderzoek	:	Coen Berssenbrugge, BSc en ing. Mark Linders
Referent	:	dr. ing. Martin Hiensch
Vrijgave	:	dr. ing. Martin Hiensch, projectleider
Datum	:	12 mei 2025
Versie	:	1.0 definitief

© 2025 DEKRA Rail bv
Concordiastraat 67, 3551 EM, Utrecht, Nederland.
Niets uit dit rapport mag worden gebruikt voor andere doeleinden dan door de opdrachtgever met DEKRA Rail is overeengekomen.

Managementsamenvatting

Uit literatuur en onderzoek is bekend dat voertuig-baantrillingen met een hogere frequentie beter worden gedempt door de grond tussen spoor en omgeving dan voertuig-baantrillingen met een lagere frequentie en daarmee tot minder trillingshinder leiden.

Een deel van de voertuig-baantrillingen hangt samen met de afstand tussen de dwarsliggers: Als een trein over het spoor rijdt, veert het spoor enkele tiende millimeters tot enkele millimeters in. Door de elasticiteit van de spoorstaven is deze invering tussen twee dwarsliggers in wat groter dan midden boven een dwarsligger. Hierdoor ondervindt een treinwiel dat over het spoor rijdt bij iedere dwarsligger een verandering in de invering van het spoor. Als gevolg hiervan wordt het wiel in trilling gebracht met een frequentie die gelijk is aan de treinsnelheid gedeeld door de afstand tussen de dwarsliggers. Als de afstand tussen de dwarsliggers wordt gehalveerd, wordt deze frequentie twee keer zo hoog.

Vanuit dit gegeven heeft DEKRA Rail in opdracht van ProRail door middel van computersimulaties onderzocht welk het effect het halveren van de afstand tussen de dwarsliggers heeft op de voertuig-baantrillingen. Aan de hand van de simulatieresultaten is een eerste inschatting gemaakt van de gevolgen die halvering van de dwarsliggerafstand kan hebben voor bodemtrillingen als gevolg van treinverkeer en voor mogelijke trillingshinder. Daarnaast zouden de simulatieresultaten kunnen worden ingevoerd in (model)berekeningen van bodemtrillingen.

Uit de simulatieresultaten volgt dat halvering van de dwarsliggerafstand de volgende effecten heeft op de trillingen door passerende treinen. De uitwerking van deze effecten is sterk afhankelijk van het materieeltype en de treinsnelheid.

1. Door de verdubbeling van het aantal dwarsliggers per meter wordt de totale spoorconstructie stijver.
2. Door de stijvere spoorconstructie leiden onregelmatigheden in de spoorligging tot grotere dynamische krachten tussen de treinwielen en de rails en treden deze dynamische krachten op bij hogere frequenties.
3. Door deze verschuiving naar hogere frequenties kan sprake zijn van een afname van de amplitudes van de dynamische krachten bij lagere frequenties. Dit is bijvoorbeeld het geval in de simulaties met het reizigersmaterieel bij frequenties tussen 18 en 52 Hz.
4. Door de halvering van de dwarsliggerafstand buigen de spoorstaven tussen de dwarsliggers aanzienlijk minder door. Hierdoor worden de dynamische krachten in het wiel-railcontact die het gevolg zijn van de dwarsliggerafstand aanzienlijk kleiner (en treden deze dynamische krachten op bij een twee keer zo hoge frequentie).
5. Uit de simulatieresultaten volgt dat de invloed van de verminderde doorbuiging van de spoorstaven op de dynamische krachten in het wiel-railcontact veel kleiner is dan de invloed van de hogere stijfheid van de spoorconstructie.
6. Hierdoor volgt uit de simulatieresultaten dat halvering van de dwarsliggerafstand per saldo leidt tot grotere dynamische krachten in het wiel-railcontact, die optreden bij hogere frequenties dan bij de bestaande dwarsliggerafstand.
7. De grotere dynamische krachten in het wiel-railcontact geven een grotere trillingsbelasting van de bovenbouw, die optreedt bij hogere frequenties dan bij de bestaande dwarsliggerafstand.

8. Door de toename van de trillingsbelasting van het spoor nemen naar verwachting ook de bodemtrillingen en de kans op trillingshinder toe. Maar omdat ook de frequenties waarbij de trillingsbelasting optreedt omhoog gaan, zijn een mogelijke toename van de bodemtrillingen en de kans op trillingshinder ook afhankelijk van de eigenschappen van de bodem.

Op basis van de onderzoeksresultaten kan daarom niet worden vastgesteld dat halvering van de dwarsliggerafstand leidt tot een verwachte afname van de trillingshinder.

Executive Summary

Prior studies indicate that higher frequency vehicle-track vibrations are better damped by the substructure than lower frequency vehicle-track vibrations, therefore causing less nuisance to the environment.

A part of the vehicle-track vibrations is related to the sleeper spacing: When a train passes over the track, the track is depressed by a few tenths of a millimeter to a few millimeters. Due to the elasticity of the rails, this depression is somewhat greater halfway between two sleepers than it is right above a sleeper. Therefore, a train wheel rolling over the track experiences a change in the depression of the track at each sleeper. As a result, the wheel will vibrate at a frequency equal to the train speed divided by the sleeper spacing. If the sleeper spacing is reduced by a factor of two, this frequency becomes twice as high.

Because of this DEKRA Rail, by order of ProRail, has studied the effects that reducing the sleeper spacing by a factor of two has on vehicle-track vibrations. This study was performed by means of computer simulations. Using the simulation results, an initial estimate was made of the impact that reducing the sleeper spacing could have on ground vibrations caused by train traffic and on possible vibration nuisance. In addition, the simulation results could be fed into (model) calculations of ground vibrations.

It follows from the simulation results that reducing the sleeper spacing by a factor of two has the following effects on vibrations caused by passing trains. The impact of these effects is highly dependent on the type of rolling stock and the train speed.

1. By doubling the number of sleepers per meter, the overall track structure becomes stiffer.
2. Due to the stiffer track structure, irregularities in track alignment lead to greater dynamic forces between the train wheels and the rails and these dynamic forces occur at higher frequencies.
3. Due to this shift to higher frequencies, there can be a decrease in the amplitudes of the dynamic forces at lower frequencies. This is for example the case in the passenger rolling stock simulations at frequencies between 18 and 52 Hz.
4. By the reduction of the sleeper spacing by a factor of two, the vertical deflection of the rails between the sleepers is significantly reduced. This significantly reduces the dynamic forces in the wheel-rail contact resulting from the sleeper spacing (and these dynamic forces occur at twice the frequency).
5. It follows from the simulation results that the impact of the reduced deflection of the rails between the sleepers on the dynamic forces in the wheel-rail contact is much smaller than the impact of the higher overall stiffness of the track structure.
6. As a result, it follows from the simulation results that overall, reducing the sleeper spacing by a factor of two leads to greater dynamic forces in the wheel-rail contact, which occur at higher frequencies than with the existing sleeper spacing.
7. The larger dynamic forces in the wheel-rail contact result in larger vibrations of the superstructure, occurring at higher frequencies than with the existing sleeper spacing.

8. The increase in track vibrations is also expected to increase ground vibrations and the probability of vibration nuisance. However, because the frequencies at which these vibrations occur also increase, the occurrence of a possible increase in ground vibrations and the probability of vibration nuisance will also depend on the properties of the underground.

Therefore, based on the study results, it cannot be concluded that reducing the sleeper spacing by a factor of two will lead to an expected decrease in vibration nuisance.

Inhoudsopgave

Managementsamenvatting **2**

Executive Summary **4**

1 Inleiding **8**

2 Vraagstelling **8**

3 Methode **9**
3.1 Stapsgewijze opzet van het onderzoek 9
3.2 Uitvoering van de proefsimulaties 9
3.3 Berekening van de totale verticale stijfheid van de bovenbouw 10
3.4 Voertuigmodellen 11
3.5 Baanmodel voertuig-baansimulaties 11
3.6 Overige invoerparameters voor de voertuig-baansimulaties 11
3.7 Uitgevoerde voertuig-baansimulaties 12

4 Resultaten **13**
4.1 Algemene toelichting simulatieresultaten 13
4.2 Resultaten proefsimulaties 13
4.2.1 Algemene toelichting resultaten proefsimulaties 13
4.2.2 Resultaten proefsimulaties voor een treinsnelheid van 80 km/h 13
4.2.3 Resultaten proefsimulaties voor een treinsnelheid van 100 km/h 14
4.2.4 Bevindingen proefsimulaties 15
4.3 Resultaten verticale stijfheid van de bovenbouw 15
4.4 Resultaten gedetailleerde voertuig-baansimulaties 16
4.4.1 Simulatieresultaten VIRM bij verschillende snelheden 16
4.4.2 Simulatieresultaten VIRM bij 100 km/h 18
4.4.3 Simulatieresultaten locomotief 20
4.4.4 Simulatieresultaten goederenwagen 22
4.4.5 Bevindingen gedetailleerde voertuig-baansimulaties 23

5 Conclusies **24**

Referenties **25**

Bijlage 1: Invoerwaarden modelberekeningen totale verticale stijfheid van de bovenbouw **26**

Bijlage 2: Ingevoerde spooronregelmatigheden [2] **27**

Revisie-overzicht

Versie	Status	Datum	Beschrijving	Auteur
0.1	Concept	20-12-2024	Eerste conceptversie	Mark Linders
0.2	Concept	04-04-2025	Opmerkingen ProRail verwerkt	Coen Berssenbrugge
0.3	Concept	15-04-2025	Tekst verder aangevuld n.a.v. opmerkingen ProRail	Mark Linders
0.4	Concept	17-04-2025	Na interne review	Mark Linders
1.0	Definitief	12-05-2025	Definitieve versie	Mark Linders

1 Inleiding

Uit literatuur en onderzoek is bekend dat voertuig-baantrillingen met een hogere frequentie beter worden gedempt door de grond tussen spoor en omgeving dan voertuig-baantrillingen met een lagere frequentie en daarmee tot minder trillingshinder leiden.

Een deel van de voertuig-baantrillingen hangt samen met de afstand tussen de dwarsliggers: Als een trein over het spoor rijdt, veert het spoor enkele tiende millimeters tot enkele millimeters in. Door de elasticiteit van de spoorstaven is deze invering tussen twee dwarsliggers in wat groter dan midden boven een dwarsligger. Hierdoor ondervindt een treinwiel dat over het spoor rijdt bij iedere dwarsligger een verandering in de invering van het spoor. Als gevolg hiervan wordt het wiel in trilling gebracht met een frequentie die gelijk is aan de treinsnelheid gedeeld door de afstand tussen de dwarsliggers. Als de afstand tussen de dwarsliggers wordt gehalveerd, wordt deze frequentie twee keer zo hoog.

Vanuit dit gegeven heeft DEKRA Rail in opdracht van ProRail door middel van computersimulaties onderzocht welk effect het halveren van de afstand tussen de dwarsliggers heeft op de voertuig-baantrillingen. Aan de hand van de simulatieresultaten is een eerste inschatting gemaakt van de gevolgen die halvering van de dwarsliggerafstand kan hebben voor de bodemtrillingen die ontstaan door het treinverkeer en voor de mogelijke trillingshinder die hier het gevolg van is. Daarnaast zouden de simulatieresultaten kunnen worden gebruikt bij (model)berekeningen van bodemtrillingen.

De uitvoering en resultaten van dit simulatieonderzoek worden in dit rapport beschreven.

2 Vraagstelling

Het onderzoek geeft antwoord op de vraag welke invloed halvering van de op dit moment toegepaste dwarsliggerafstand heeft op de trillingen die worden veroorzaakt door een passerende trein. In hoeverre kan van deze aanpassing een reductie in trillingshinder worden verwacht?

3 Methode

3.1 Stapsgewijze opzet van het onderzoek

Het onderzoek is opgebouwd uit de volgende stappen.

1) Proefsimulaties in het multibody-simulatiesoftwarepakket VAMPIRE Pro, op basis van de al bekende stijfheidswaarden van de bovenbouw (spoorstaven, dwarsliggers en ballastbed) bij de standaard dwarsliggerafstand van 600 mm, en bij toepassing van dezelfde stijfheidswaarden bij halvering van de dwarsliggerafstand.
2) Vaststellen van het effect van halvering van de dwarsliggerafstand op de totale verticale stijfheid van de bovenbouw. Hierbij wordt gebruik gemaakt van een tweedimensionaal model van een spoorstaaf die wordt ondersteund door dwarsliggers. Door middel van dit model wordt de gecombineerde verticale stijfheid van de bovenbouw ter plaatse van het wiel-railcontact berekend.
3) Voorbereiding en uitvoering van voertuig-baansimulaties. Op basis van het resultaat van de modelberekening wordt een baanmodel opgesteld ten behoeve van voertuig-baansimulaties in het multibody-simulatiesoftwarepakket VAMPIRE Pro. In dit pakket worden voertuig-baansimulaties uitgevoerd, waarin de volgende voertuigtypen worden beschouwd:
    a. VIRM (intercity-reizigersmaterieel) in onbeladen toestand.
    b. een twee-assige goederenwagen.
    c. een locomotief (type Vectron).

    De voertuig-baansimulaties worden uitgevoerd met verschillende snelheden. Uit de voertuig-baansimulaties volgen de krachtsvariaties en trillingen die in het wiel-railcontact optreden.
4) Analyse; uit de optredende voertuigreacties volgen de grootte en de frequenties van de verticale krachten in het wiel-railcontact, de Q-krachten. Van deze Q-krachten zijn frequentiespectra bepaald. Deze frequentiespectra geven de trillingsbelasting van het spoor door het voertuig weer. De grootte en frequenties van de Q-krachten zijn in combinatie met de stijfheids- en dempingseigenschappen van de bovenbouw en de bodem bepalend voor de grootte en frequenties van de bodemtrillingen en voor de trillingshinder die kan ontstaan.

De uitvoering van de simulaties wordt in de volgende paragrafen verder toegelicht.

3.2 Uitvoering van de proefsimulaties

Als eerste stap in het onderzoek naar de invloed van de dwarsliggerafstand zijn proefsimulaties uitgevoerd in het multibody-simulatiesoftwarepakket VAMPIRE Pro, versie 6.60. Hierbij is de uit eerdere onderzoeken bekende stijfheid van de bovenbouw bij de standaard dwarsliggerafstand van 600 mm toegepast. Deze stijfheid fluctueert en is recht boven een dwarsligger het hoogst en midden tussen twee dwarsliggers het laagst.

Een dwarsliggerafstand van 300 mm is hierbij gesimuleerd door de lengte van de stijfheidsfluctuaties te halveren. Hierbij is dus niet gekeken naar het effect van verdubbeling van het aantal dwarsliggers per meter op de gemiddelde stijfheid van de spoorconstructie.

In de proefsimulaties zijn in de baan spooronregelmatigheden aangebracht die zijn overgenomen uit metingen die in het verleden zijn uitgevoerd op het traject Geldermalsen-Houten.

De proefsimulaties zijn uitgevoerd met de volgende invoerparameters:

- Voertuigmodel: VIRM (intercity-reizigersmaterieel) in beladen toestand.
- Gemiddelde verticale stijfheid van de baan: 234 kN/mm.
- Snelheden: 80 km/h en 100 km/h.

3.3 Berekening van de totale verticale stijfheid van de bovenbouw

De totale verticale stijfheid van de bovenbouw is berekend voor zowel de bestaande dwarsliggerafstand als de gehalveerde dwarsliggerafstand met behulp van het programma ‘XPAT’. Dit is een door DEKRA Rail zelf ontwikkeld programma waarmee quasi statische modelberekeningen kunnen worden uitgevoerd voor het onderzoeken van de stabiliteit van het spoor, onder andere met het oog op spoorspattingen. XPAT maakt hiervoor gebruik van tweedimensionale baanmodellen. Voor dit onderzoek is een baanmodel opgesteld dat de helft van de spoorconstructie in verticale richting beschrijft. Het baanmodel bevat dus één spoorstaaf, die is opgelegd op halve dwarsliggers.

Tijdens de modelberekeningen in XPAT is het baanmodel steeds op één punt verticaal belast met een wiellast. Ter plaatse van de verticale wiellast is de invering van het baanmodel berekend. Deze invering is daarna omgerekend naar een stijfheidswaarde volgens de formule:

verticale stijfheid van de bovenbouw per wiel [kN/mm] = (wiellast in kN) / (invering in mm)

Door dit voor verschillende posities van de verticale wiellast op het spoor te doen is het verloop bepaald van de effectieve verticale stijfheid van de bovenbouw als functie van de positie van de wiellast.

De invoerwaarden voor de modelberekeningen in XPAT zijn vermeld in Bijlage 1. Hierbij zijn een aantal invoerparameters als volgt gevarieerd.

- Dwarsliggerafstand c.q. afstand tussen de oplegpunten van de spoorstaaf:
  - 600 mm (bestaande afstand);
  - 300 mm (gehalveerde afstand);
  - Stijfheid per oplegging (gecombineerde stijfheid van spoorstaafbevestiging en ballast): 50 kN/mm (normaal);
  - 20 kN/mm (laag).

Bij de modelberekeningen in XPAT zijn de volgende uitgangspunten c.q. vereenvoudigingen toegepast.

1. De torsiestijfheid van het spoorframe om de lengteas (X-as) is buiten beschouwing gelaten. Omdat in de beschouwde situaties naar verwachting relatief kleine hoekverdraaiingen van het spoor om de lengteas optreden, is ervan uitgegaan dat de invloed van de torsiestijfheid van het spoorframe om de lengteas op de verticale inveringen van beide spoorstaven verwaarloosbaar klein is.
2. In het model worden de verticale stijfheden van de spoorstaafbevestigingen en de ballast per halve dwarsligger gecombineerd tot één stijfheid per oplegpunt.
3. Er is van uitgegaan dat alle stijfheden binnen het beschouwde bereik lineair zijn. Deze aanname is gebaseerd op het gegeven dat relatief kleine inveringen worden beschouwd en dat alle vervormingen die optreden als elastisch worden beschouwd.

3.4 Voertuigmodellen

De voertuig-baansimulaties zijn uitgevoerd voor de drie voertuigtypen die zijn vermeld in de onderstaande tabel. Er is gekozen voor deze drie voertuigtypen omdat dit drie zeer verschillende voertuigtypen zijn die samen een beeld geven van de variatie aan eigenschappen van het materieel dat in Nederland rondrijdt en om eventuele verschillen in de resultaten ten gevolge van de materieeleigenschappen zichtbaar te maken.

Materieeltype	Voertuigmodel	Max. statische wiellast
VIRM (intercity-reizigersmaterieel), onbeladen	VIRM_v0_3_4TIF	80.7 kN
twee-assige goederenwagen, beladen	TwoaxPro_acc	105 kN
Locomotief	VECTRON_v11	104 kN

Tabel 1: Toegepaste voertuigmodellen.

3.5 Baanmodel voertuig-baansimulaties

Ten behoeve van de voertuig-baansimulaties zijn de eigenschappen van de baan als volgt verwerkt in een baanmodel.

De simulaties zijn uitgevoerd op een recht stuk spoor met een lengte van 200 tot 300 meter.

Voor het simuleren van een spoorligging die representatief is voor het Nederlandse spoor, zijn in het spoor onregelmatigheden aangebracht volgens de ERRI-high spoorligging uit ERRI rapport B176 [1], verhoogd met een schalingsfactor 2. Deze onregelmatigheden zijn vastgelegd in de invoerfile *ERRI_theoretische_spoorligging.csv* en worden beschreven in Bijlage 2.

Daarnaast zijn in het baanmodel de verticale stijfheidswaarden opgenomen die zijn berekend met XPAT voor een verticale stijfheid per oplegpunt van 50 kN/mm. Deze stijfheidswaarden zijn vastgelegd in twee invoerfiles:

- *TP_interp600.csv* - stijfheidswaarden voor een dwarsliggerafstand van 600 mm.
- *TP_interp300k50.csv* - stijfheidswaarden voor een dwarsliggerafstand van 300 mm.

3.6 Overige invoerparameters voor de voertuig-baansimulaties

De overige instellingen waarmee de voertuig-baansimulaties zijn uitgevoerd zijn als volgt:

- Wielprofielen: standaardprofiel S1002, ongesleten
- Railprofielen: standaardprofiel 54E1, ongesleten
- Wrijvingscoëfficiënt in het wiel-railcontact: 0,32 (droog, ongeconditioneerd)

3.7 Uitgevoerde voertuig-baansimulaties

Een lijst van de uitgevoerde voertuig-baansimulaties is opgenomen in Tabel 2.

Materieeltype	Dwarsliggerafstand [mm]	Snelheid [km/h]
VIRM	600	140 100 80 40
	300	140 100 80 40
Locomotief	600	100 80 40
	300	100 80 40
Goederenwagen	600	100 80 40
	300	100 80 40

Tabel 2: Overzicht van de uitgevoerde voertuig-baansimulaties.

4 Resultaten

4.1 Algemene toelichting simulatieresultaten

In dit hoofdstuk worden de resultaten van de proefsimulaties, de berekeningsresultaten voor de stijfheid van de bovenbouw en de resultaten van de gedetailleerde voertuig-baansimulaties beschreven.

De resultaten van de proefsimulaties en de resultaten van de gedetailleerde voertuig-baansimulaties worden gepresenteerd in de vorm van frequentiespectra van de dynamische verticale kracht Q in het wiel-railcontact bij het vooroplopende wiel links. Deze frequentiespectra zijn weergegeven als PSD-(Power Spectral Density-)plots, waarin langs de horizontale as de frequentie is uitgezet en langs de verticale as de energie van de Q-kracht per frequentieband, uitgedrukt in kN^2/Hz.

In de beschouwing van de simulatieresultaten is in aanmerking genomen dat de dwarsliggerafstand van 600 respectievelijk 300 mm in combinatie met de treinsnelheid leidt tot de aanstootfrequenties die zijn vermeld in Tabel 3. Deze aanstootfrequenties volgen uit de formule:

$$aanstootfrequentie\ [Hz] = aantal\ gepasseerde\ dwarsliggers\ per\ s = \frac{snelheid\ [m/s]}{dwarsliggerafstand\ [m]}$$

Snelheid	**Aanstootfrequentie**	
	dwl-afstand 600 mm	*dwl-afstand 300 mm*
140 km/h	65 Hz	130 Hz
100 km/h	46 Hz	93 Hz
80 km/h	37 Hz	74 Hz
40 km/h	19 Hz	37 Hz

Tabel 3: Aanstootfrequenties dwarsliggerafstand voor verschillende treinsnelheden.

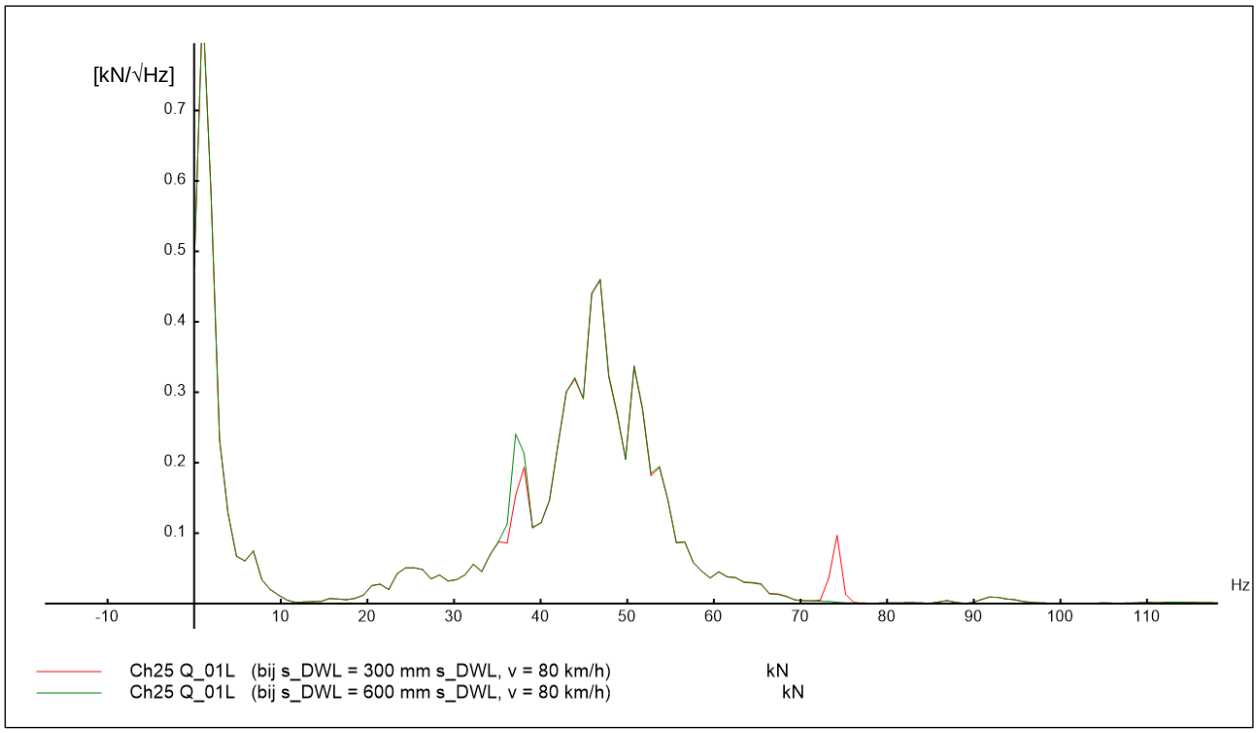
4.2 Resultaten proefsimulaties

4.2.1 Algemene toelichting resultaten proefsimulaties

De resultaten van de proefsimulaties worden hieronder beschreven. Zoals eerder is aangegeven is in de proefsimulaties nog geen rekening gehouden met verandering van de gemiddelde stijfheid van de bovenbouw als gevolg van verdubbeling van het aantal dwarsliggers per meter.

4.2.2 Resultaten proefsimulaties voor een treinsnelheid van 80 km/h

In Figuur 2 zijn de frequentiespectra weergegeven van de verticale kracht tussen het voorste wiel links van de trein en de spoorstaaf bij een treinsnelheid van 80 km/h.

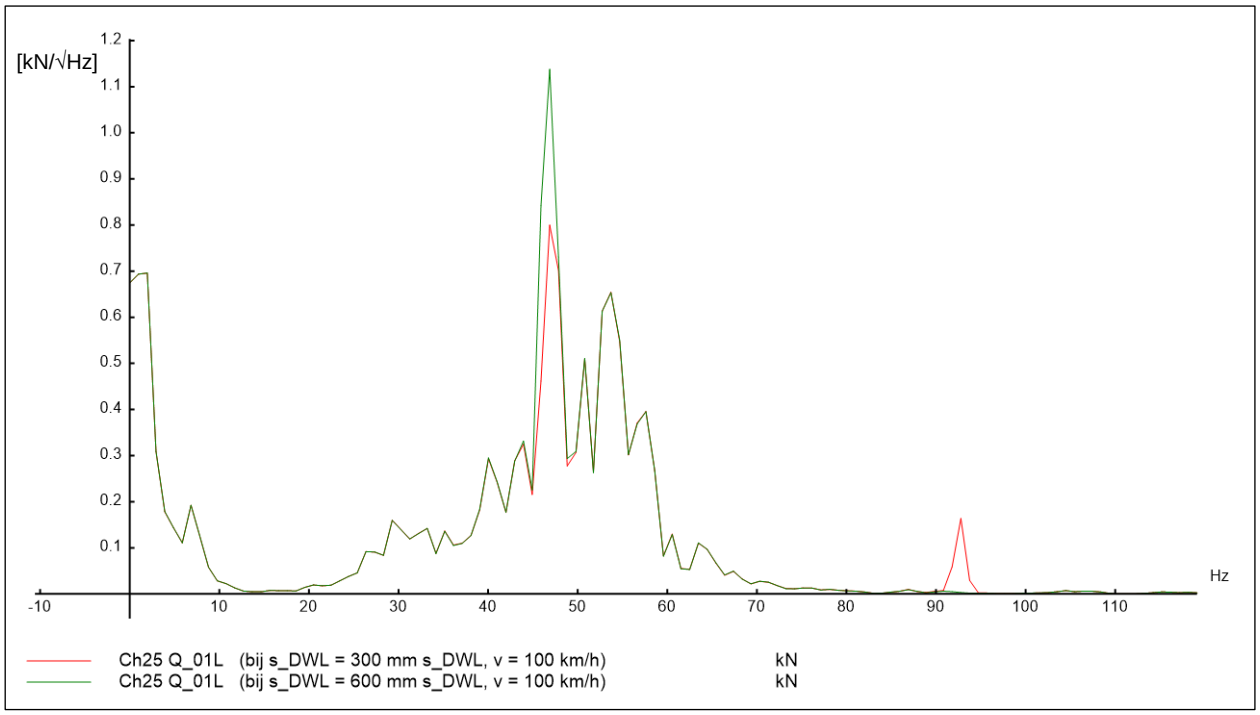


Figuur 1: Frequentiespectrum Q-kracht voorste wiel links bij een snelheid van 80 km/h. Groen: Bestaande dwarsliggerafstand 600 mm; rood: Gehalveerde dwarsliggerafstand 300 mm.

Bij een snelheid van 80 km/h zien we voor de nominale dwarsliggerafstand van 600 mm (de groene grafiek) een piek bij circa 37 Hz. Bij een halvering van de dwarsliggerafstand (de rode grafiek) is deze piek lager. In de plaats hiervan komt er een nieuwe piek bij een frequentie van 75Hz. De amplitude van de dominante frequentie van 47 Hz verandert niet. De totale oppervlakte onder de grafiek is voor beide situaties ongeveer gelijk; dit wijst erop dat de energie van de aanstoting voor beide situaties ongeveer hetzelfde is. Dit duidt erop dat er tussen beide situaties geen significant verschil is in de optredende trillingsniveaus.

4.2.3 Resultaten proefsimulaties voor een treinsnelheid van 100 km/h

In Figuur 2 zijn de frequentiespectra weergegeven van de verticale kracht tussen het voorste wiel links van de trein en de spoorstaaf bij een treinsnelheid van 100 km/h.



Figuur 2: Frequentiespectrum Q-kracht voorste wiel links bij een snelheid van 100 km/h. Groen: bestaande dwarsliggerafstand 600 mm; rood: gehalveerde dwarsliggerafstand 300 mm.

Bij een snelheid van 100 km/h zien we voor de nominale dwarsliggerafstand van 600mm (de groene grafiek) een hoge piek bij circa 47 Hz. Deze piek ten gevolge van de dwarsliggerafstand lijkt samen te vallen met de piek ten gevolge van de spooronregelmatigheden die ook in de frequentiespectra voor 80 km/h aanwezig is.

Bij halvering van de dwarsliggerafstand (de rode grafiek) is deze piek lager. In de plaats hiervan komt er een nieuwe piek bij een frequentie van circa 94Hz. De amplitude van de dominante frequentie van 47 Hz neemt significant af. De totale oppervlakte onder de grafiek neemt echter nauwelijks af. Dit wijst erop dat de energie van de aanstoting voor beide situaties vrijwel hetzelfde is. Het is mogelijk, maar niet zeker dat het verschil in aanstoting bij 47 Hz kan leiden tot een merkbaar (d.w.z. meetbaar en/of voelbaar) verschil in de optredende bodemtrillingen.

4.2.4 Bevindingen proefsimulaties

De resultaten van de proefsimulaties wijzen erop dat halvering van de dwarsliggerafstand bij een treinsnelheid van 80 km/h geen merkbaar effect heeft op de optredende trillingen, en bij een treinsnelheid van 100 km/h mogelijk wel een merkbaar (d.w.z. meetbaar en/of voelbaar) effect heeft op de optredende trillingen en kan leiden tot minder trillingshinder.

4.3 Resultaten verticale stijfheid van de bovenbouw

Uit de modelberekeningen in XPAT zijn de volgende waarden gevonden voor de wiellast gedeeld door de totale invering van de bovenbouw onder het wiel. Dit is de effectieve stijfheid in het wiel-railcontactpunt van de gehele bovenbouw van spoorstaaf tot en met ballast.

Dwarsligger-afstand	Stijfheid per oplegpunt	Invering bij 100 kN wiellast (20 t aslast)		Totale effectieve stijfheid	
		min	*max*	*max*	*min*
[mm]	*[kN/mm]*	*[mm]*	*[mm]*	*[kN/mm]*	*[kN/mm]*
600	50	0.855	0.867	117.0	115.3
600	20	1.709	1.720	58.5	58.1
300	50	0.511	0.511	195.9	195.7
300	20	1.019	1.020	98.1	98.0

Tabel 4: Gevonden waarden voor de totale effectieve verticale stijfheid van de bovenbouw in het wiel-railcontactpunt.

De gevonden stijfheidswaarden vertonen een fluctuatie, waarbij de hoogste effectieve stijfheid en de kleinste invering optreden als het wiel zich recht boven een dwarsligger c.q. oplegpunt bevindt. De laagste effectieve stijfheid en de grootste invering treden op als het wiel zich midden tussen twee dwarsliggers bevindt.

Zoals in bovenstaande tabel te zien is, volgt uit de berekeningsresultaten dat bij halvering van de dwarsliggerafstand de totale effectieve verticale stijfheid van de bovenbouw circa 70 % hoger wordt. Dit geldt zowel voor een stijfheid per oplegpunt van 50 kN/mm als voor een stijfheid per oplegpunt van 20 kN/mm.

Daarnaast volgt uit de berekeningsresultaten dat bij een dwarsliggerafstand van 600 mm de invering van het spoor onder het treinwiel 0,011 tot 0,012 mm varieert. Hierdoor varieert de gevonden totale effectieve stijfheid 0,3 tot 0,4 kN/mm.

Bij een dwarsliggerafstand van 300 mm is de variatie van de invering 0,001 mm of minder. De variatie van de totale effectieve stijfheid bedraagt dan 0,1 tot 0,2 kN/mm.

4.4 Resultaten gedetailleerde voertuig-baansimulaties

De resultaten van de gedetailleerde voertuig-baansimulaties worden hieronder gepresenteerd. Net als de simulatieresultaten in de vorige paragraaf worden de resultaten van de gedetailleerde voertuig-baansimulaties gepresenteerd in de vorm van PSD-(Power Spectral Density-)plots van de dynamische verticale kracht Q in het wiel-railcontact bij het vooroplopende wiel links. Hierbij is een selectie gemaakt van de meest relevante simulatieresultaten.

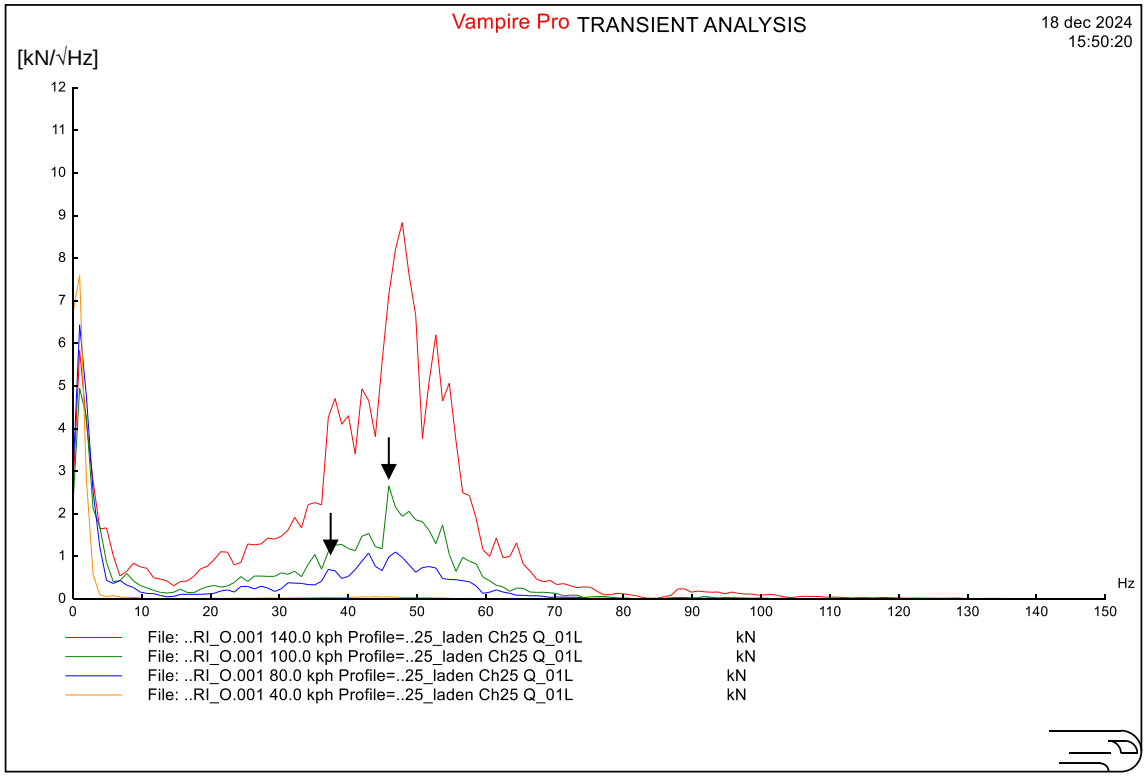
Omdat de sinusvormige fluctuaties van de verticale stijfheid van de bovenbouw die bij een dwarsliggerafstand van 300 mm zijn gevonden met 0,1 tot 0,2 kN/mm zo gering zijn dat het effect hiervan niet zichtbaar zou zijn in de resultaten van de voertuig-baansimulaties, zijn deze fluctuaties in de hieronder beschreven voertuig-baansimulaties opgeschaald tot 0,3 à 0,4 kN/mm.

4.4.1 Simulatieresultaten VIRM bij verschillende snelheden

Om een beeld te geven van het verband tussen de treinsnelheid en de frequenties en amplitudes van de dynamische wiel-railcontactkracht Q, zijn in Figuur 3 en Figuur 4 de resultaten weergegeven van de simulaties die met het voertuigmodel van de VIRM zijn uitgevoerd bij vier verschillende snelheden. In Figuur 3 zijn de simulatieresultaten weergegeven voor een dwarsliggerafstand van 600 mm en in Figuur 4 voor een dwarsliggerafstand van 300 mm.

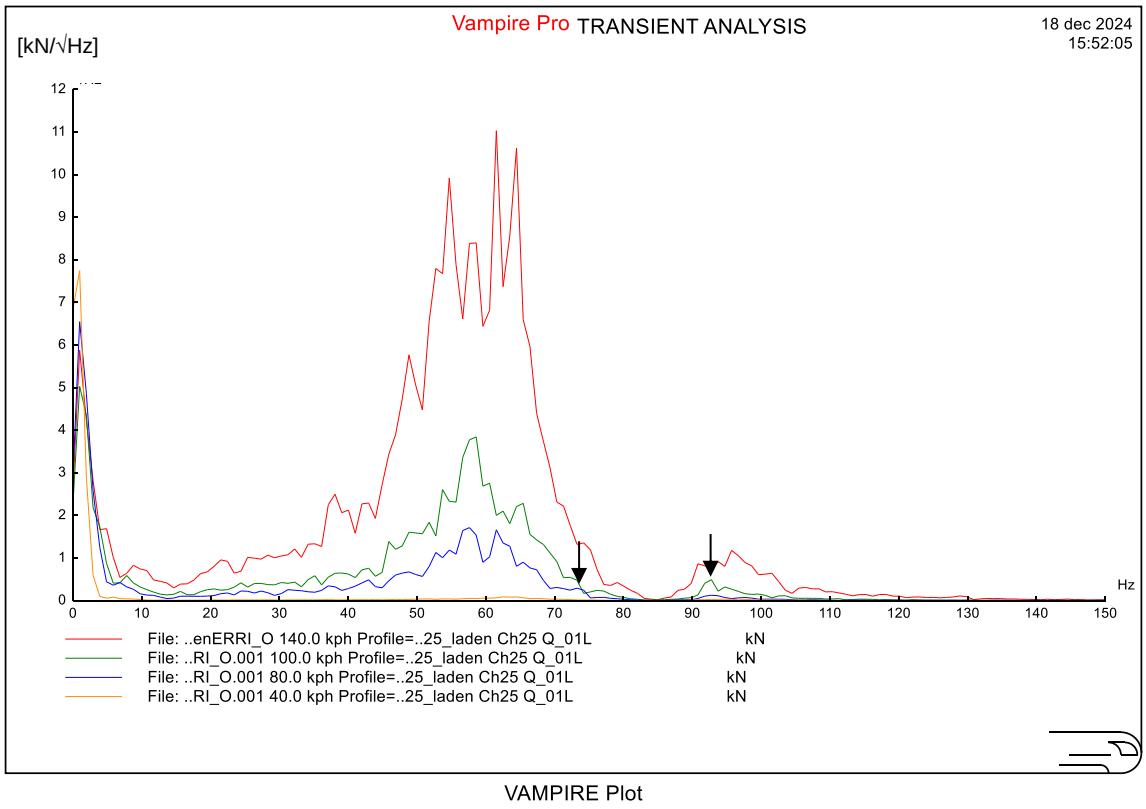
Beide figuren laten de invloed zien van de treinsnelheid op de amplitudes van de kracht waarmee de spoorstaaf wordt aangestoten: hoe hoger de treinsnelheid, des te groter de amplitudes van de dynamische kracht in het wiel-railcontact. Vooral bij een snelheidstoename van 100 naar 140 km/h nemen deze amplitudes aanzienlijk toe.

Daarnaast volgt uit deze figuren dat de treinsnelheid weinig of geen invloed heeft op de frequenties van de Q-kracht tussen 15 en 80 Hz: bij toename van de treinsnelheid veranderen in dit frequentiegebied wel de amplitudes, maar niet de frequenties van de Q-kracht. Dit wijst erop dat deze frequenties worden bepaald door de voertuigeigenschappen en niet door de eigenschappen van de baan.



VAMPIRE Plot

Figuur 3: Simulatieresultaten VIRM, wiel 1 links, voor een dwarsliggerafstand van 600 mm bij vier verschillende snelheden. (Rood: 140 km/h, groen: 100 km/h, blauw: 80 km/h, geel: 40 km/h.) De aanstootfrequenties van de dwarsliggerafstand zijn zichtbaar in de frequentiespectra voor 100 km/h (46 Hz) en 80 km/h (37 Hz).



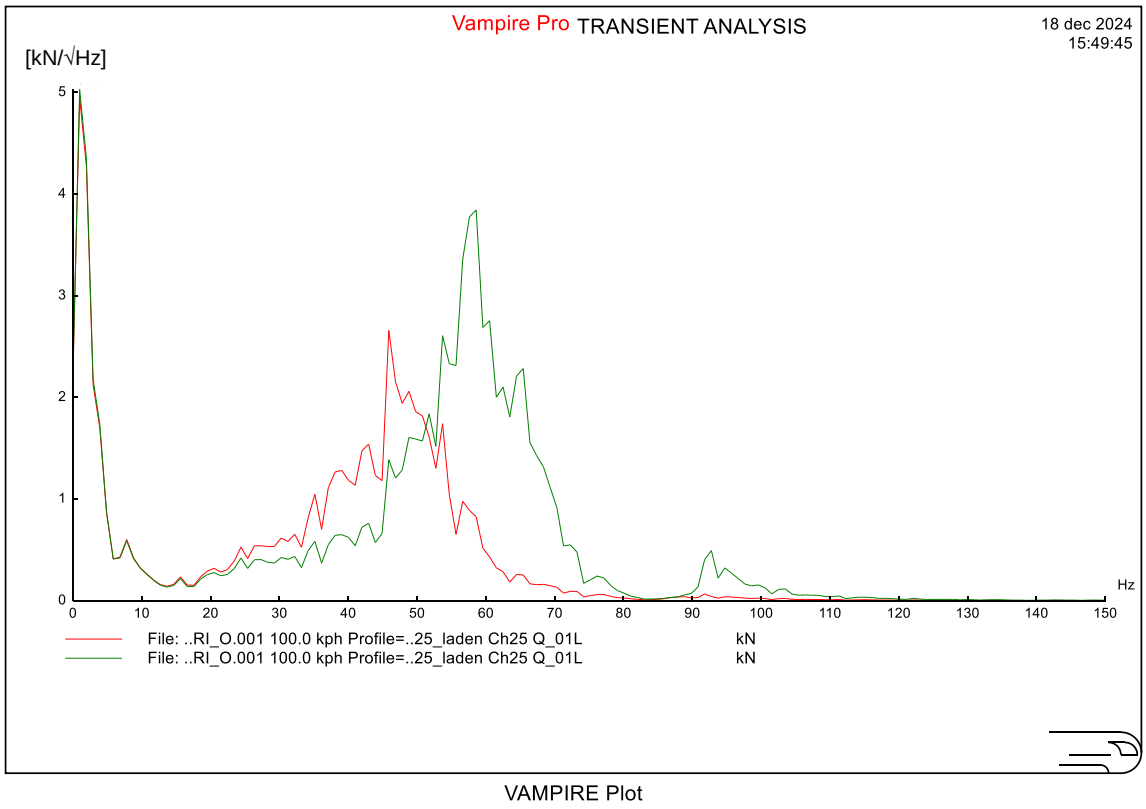
Figuur 4: Simulatieresultaten VIRM, wiel 1 links, voor een dwarsliggerafstand van 300 mm bij vier verschillende snelheden. (Rood: 140 km/h, groen: 100 km/h, blauw: 80 km/h, geel: 40 km/h.) De aanstootfrequenties van de dwarsliggerafstand zijn enigszins zichtbaar in de frequentiespectra voor 100 km/h (93 Hz) en 80 km/h (74 Hz).

4.4.2 Simulatieresultaten VIRM bij 100 km/h

Om een beeld te geven van het verband tussen de dwarsliggerafstand en de frequenties en amplitudes van de wiel-railcontactkracht Q bij een treinsnelheid van 100 km/h, zijn in Figuur 5 de frequentiespectra weergegeven van de voertuig-baansimulaties met VIRM bij deze snelheid, bij een dwarsliggerafstand van achtereenvolgens 600 mm (rood) en 300 mm (groen).

Zoals in de figuur is te zien, vertonen de frequentiespectra van de Q-kracht de hoogste amplitudes bij 1 tot 2 Hz. Dit zijn frequenties die overeenkomen met de eigenfrequenties van de bewegingen van de rijtuigbakken op de luchtveren van de trein. Uit de simulatieresultaten volgt dat de Q-kracht bij deze frequenties niet wordt beïnvloed door de dwarsliggerafstand. Hetzelfde geldt voor de overige frequenties tussen 0 en 15 Hz.

Bij een dwarsliggerafstand van 600 mm (rood) treden daarnaast dynamische krachten in het wiel-railcontact op bij frequenties tussen 15 en 70 Hz, met een maximum bij 46 Hz; dit komt overeen met de aanstoting door de dwarsliggerafstand, zoals in de vorige subparagraaf al werd vastgesteld.



Figuur 5: Simulatieresultaten VIRM, wiel 1 links, bij 100 km/h, dwarsliggerafstand: 600 mm (rood) en 300 mm (groen). Bij een dwarsliggerafstand van 300 mm zijn de krachten hoger in frequentie, maar ook groter in amplitude.

Bij een dwarsliggerafstand van 300 mm (groen) treden dynamische krachten in het wiel-railcontact op bij frequenties tussen 18 en 80 Hz, en ook tussen 90 en 100 Hz. Het maximum binnen deze frequentiebereiken bevindt zich bij 58 Hz.

De amplitudes van de Q-kracht in het frequentiegebied tussen 18 en 52 Hz zijn bij een dwarsliggerafstand van 300 mm lager dan bij een dwarsliggerafstand van 600 mm; het verschil bedraagt hier maximaal een factor 2. Bij frequenties hoger dan 52 Hz zijn de amplitudes van de Q-kracht bij een dwarsliggerafstand van 300 mm aanzienlijk hoger dan bij een dwarsliggerafstand van 600 mm.

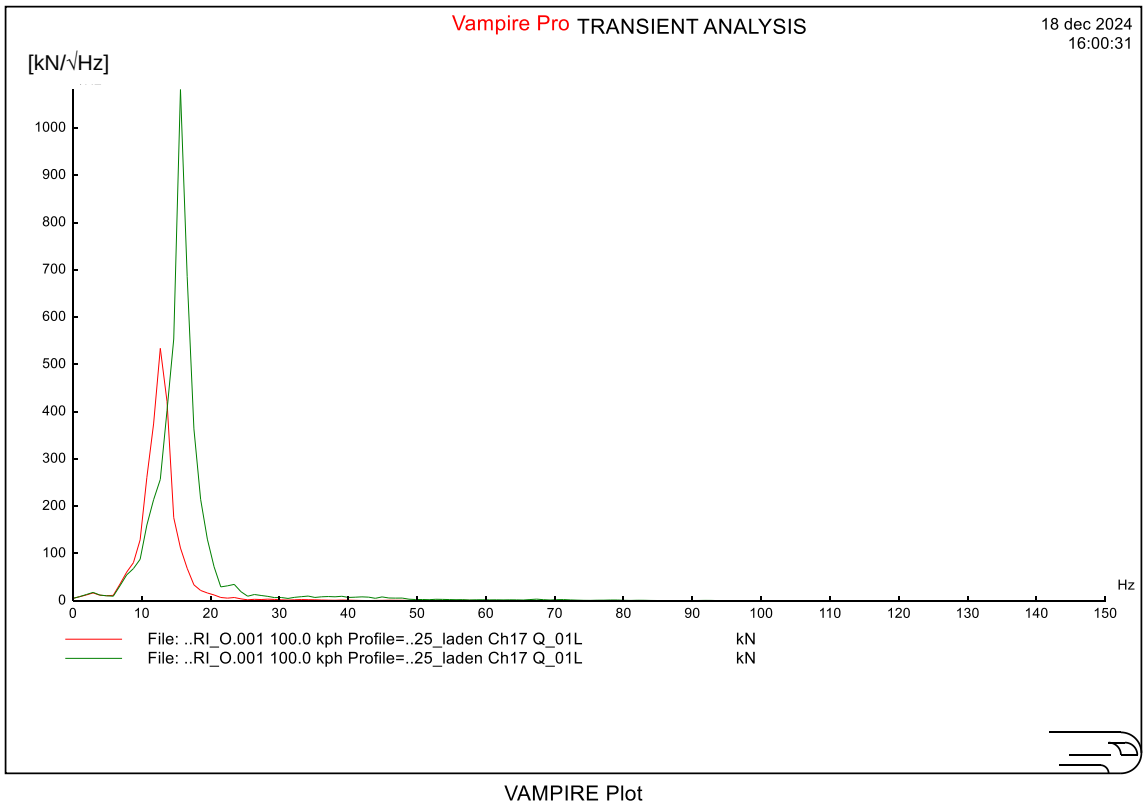
De grotere amplitudes bij hogere frequenties kunnen worden verklaard door de hogere verticale stijfheid van de bovenbouw bij halvering van de dwarsliggerafstand. Deze hogere stijfheid heeft als gevolg dat dezelfde onregelmatigheden in de spoorligging nu leiden tot grotere dynamische krachten in het wiel-railcontact.

De totale oppervlakte onder de grafiek is bij een dwarsliggerafstand van 300 mm groter dan bij een dwarsliggerafstand van 600 mm. Dit wijst erop dat de energie van de aanstoting bij een dwarsliggerafstand van 300 mm groter is dan bij een dwarsliggerafstand van 600 mm.

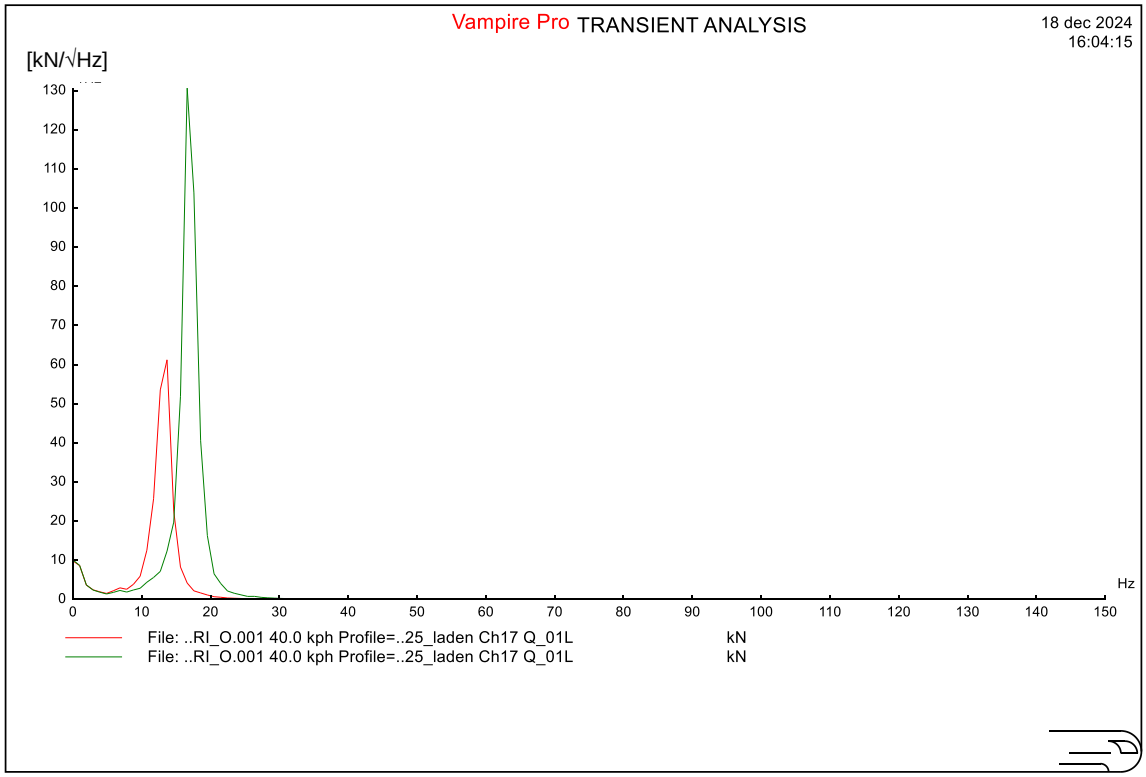
4.4.3 Simulatieresultaten locomotief

In Figuur 6 en Figuur 7 zijn de simulatieresultaten voor de locomotief weergegeven, bij een snelheid van achtereenvolgens 100 km/h en 40 km/h. Bij beide snelheden treedt een duidelijke eigenfrequentie op bij 13 Hz als de dwarsliggerafstand 600 mm bedraagt en bij 16 tot 17 Hz als de dwarsliggerafstand 300 mm bedraagt. Bij halvering van de dwarsliggerafstand neemt niet alleen de frequentie, maar ook de amplitude van deze resonantiepiek toe. Net als bij de simulatieresultaten voor de VIRM kan de toename van de frequentie en amplitude van de Q-kracht bij halvering van de dwarsliggerafstand hier worden verklaard door de toename van de stijfheid van de bovenbouw.

Naast de hierboven genoemde pieken is in de frequentiespectra voor een snelheid van 100 km/h in Figuur 6 ook een lagere piek bij 2 Hz zichtbaar, die duidt op een eigenfrequentie van het voertuig. In deze figuur is ook zichtbaar dat bij frequenties hoger dan 16 Hz de amplitudes van de Q-kracht bij een dwarsliggerafstand van 300 mm hoger zijn dan bij een dwarsliggerafstand van 600 mm, maar ten opzichte van de amplitudes bij 13 en 16 Hz zijn deze amplitudes zeer laag.



Figuur 6: Simulatieresultaten locomotief, wiel 1 links, bij 100 km/h, dwarsliggerafstand: 600 mm (rood) en 300 mm (groen). De frequentiespectra worden gedomineerd door een duidelijk aanwezige eigenfrequentie bij 13 Hz voor een dwarsliggerafstand van 600 mm en bij 16 Hz voor een dwarsliggerafstand van 300 mm.



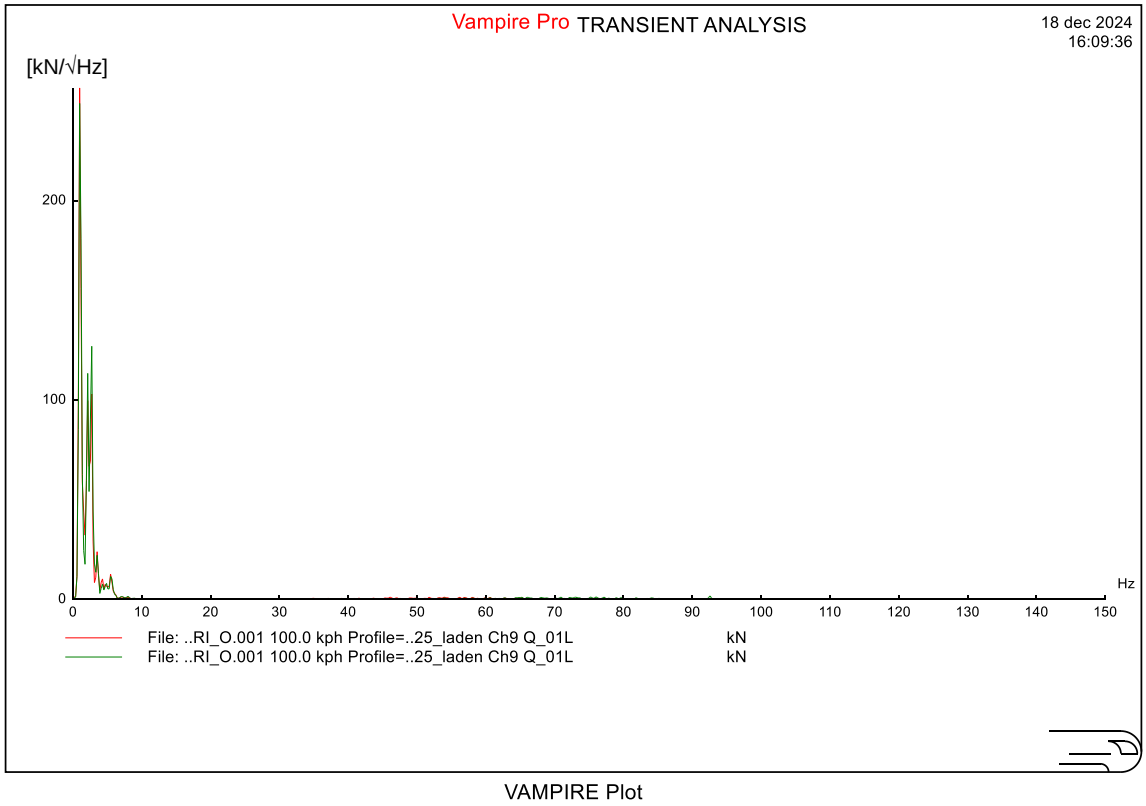
Figuur 7: Simulatieresultaten locomotief, wiel 1 links, bij 40 km/h, dwarsliggerafstand: 600 mm (rood) en 300 mm (groen). De frequentiespectra worden gedomineerd door een duidelijk aanwezige eigenfrequentie bij 13 Hz voor een dwarsliggerafstand van 600 mm en bij 17 Hz voor een dwarsliggerafstand van 300 mm.

4.4.4 Simulatieresultaten goederenwagen

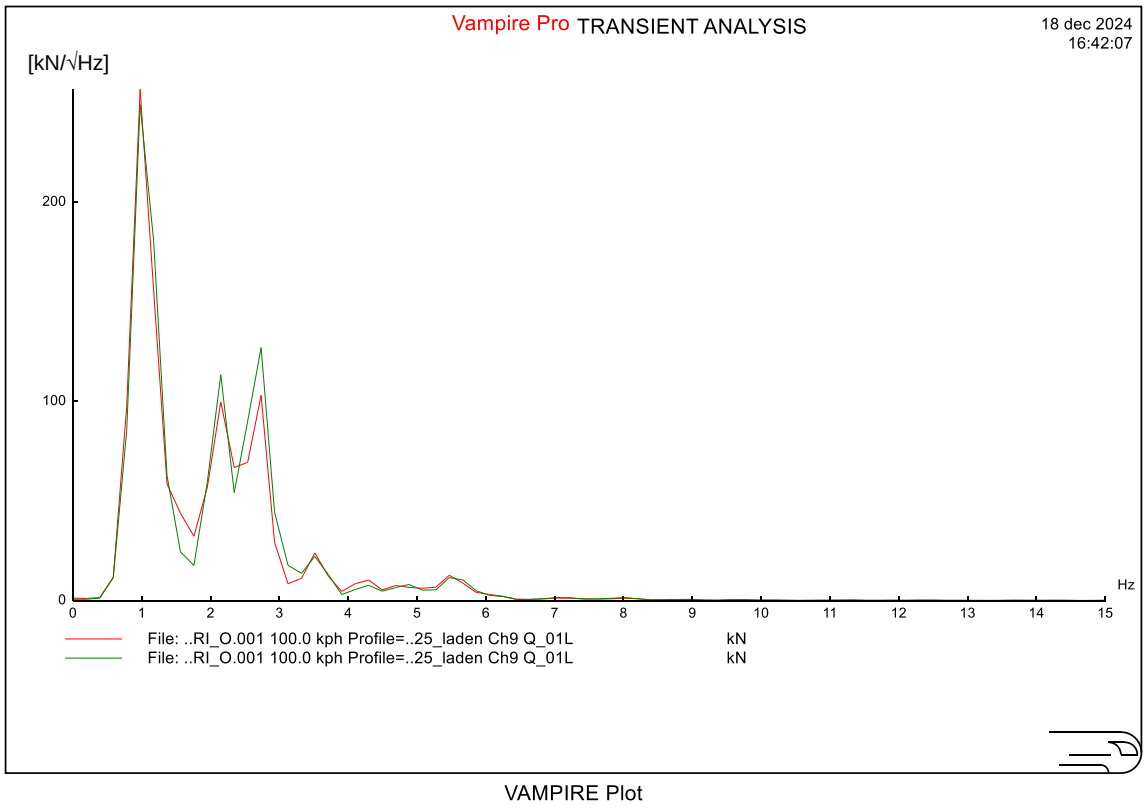
In Figuur 8 en Figuur 9 zijn de simulatieresultaten voor de goederenwagen weergegeven bij een snelheid van 100 km/h. Figuur 8 geeft de frequentiespectra weer van 0 tot 150 Hz en Figuur 9 bevat een uitsnede van dezelfde frequentiespectra tussen 0 en 15 Hz.

Zoals in deze figuren te zien is, treedt de Q-kracht hier voor het overgrote deel op in het frequentiegebied tussen 0 en 7 Hz. Zoals ook in de simulatieresultaten voor VIRM zichtbaar was, heeft halvering van de dwarsliggerafstand vrijwel geen invloed op de amplitudes van de wiel-railcontactkracht bij deze lage frequenties. Dit wijst erop dat de wiel-railcontactkracht bij deze frequenties niet wordt beïnvloed door de dwarsliggerafstand.

In Figuur 8 is zichtbaar dat de Q-kracht ook frequenties hoger dan 7 Hz bevat, maar ten opzichte van de amplitudes tussen 0 en 7 Hz zijn de amplitudes boven 7 Hz zeer laag.



Figuur 8: Simulatieresultaten goederenwagen, wiel 1 links, bij 40 km/h, dwarsliggerafstand: 600 mm (rood) en 300 mm (groen). De frequentiespectra worden gedomineerd door het frequentiegebied tussen 0 en 7 Hz.



Figuur 9: Simulatieresultaten goederenwagen, wiel 1 links, bij 100 km/h, dwarsliggerafstand: 600 mm (rood) en 300 mm (groen). Deze figuur bevat dezelfde frequentiespectra als de vorige figuur, maar nu voor het frequentiegebied tussen 0 en 15 Hz.

4.4.5 Bevindingen gedetailleerde voertuig-baansimulaties

De bevindingen van de gedetailleerde voertuig-baansimulaties kunnen als volgt worden samengevat:

1. Het effect van halvering van de dwarsliggerafstand op de dynamische krachten in het wiel-railcontact is sterk afhankelijk van het materieeltype en de treinsnelheid.
2. In de simulatieresultaten van het reizigersmaterieel (VIRM) worden de dynamische verticale krachten in het wiel-railcontact voornamelijk bepaald door een eigenfrequentie van het voertuig tussen 1 en 2 Hz en door frequenties tussen 18 en 80 Hz. Bij halvering van de dwarsliggerafstand nemen de amplitudes van de Q-kracht in het frequentiegebied tussen 18 en 52 Hz af en bij frequenties hoger dan 52 Hz toe. De totale energie van de aanstoting in het wiel-railcontact neemt dan ook toe.
3. In de simulatieresultaten van de locomotief worden de dynamische verticale krachten in het wiel-railcontact bepaald door een eigenfrequentie bij 13 Hz als de dwarsliggerafstand 600 mm bedraagt en bij 16 tot 17 Hz als de dwarsliggerafstand 300 mm bedraagt.
4. In de simulaties van de goederenwagen treden de dynamische verticale krachten in het wiel-railcontact voor het overgrote deel op in het frequentiegebied tussen 0 en 7 Hz. De wiel-railcontactkracht wordt in dit frequentiegebied niet noemenswaardig beïnvloed door de dwarsliggerafstand.

In de simulaties met de voertuigmodellen van het reizigersmaterieel (VIRM) en de locomotief leidt halvering van de dwarsliggerafstand dus tot een toename van zowel de frequenties als de amplitudes van de dynamische verticale kracht in het wiel-railcontact. De hogere frequenties kunnen worden verklaard door de hogere verticale stijfheid van de bovenbouw bij halvering van de dwarsliggerafstand. Deze hogere stijfheid heeft als gevolg dat dezelfde onregelmatigheden in de spoorligging nu leiden tot grotere dynamische krachten in het wiel-railcontact.

5 Conclusies

Uit de simulatieresultaten volgt dat halvering van de dwarsliggerafstand de volgende effecten heeft op de trillingen door passerende treinen. De uitwerking van deze effecten is sterk afhankelijk van het materieeltype en de treinsnelheid.

1. Door de verdubbeling van het aantal dwarsliggers per meter wordt de totale spoorconstructie stijver.
2. Door de stijvere spoorconstructie leiden onregelmatigheden in de spoorligging tot grotere dynamische krachten tussen de treinwielen en de rails en treden deze dynamische krachten op bij hogere frequenties.
3. Door deze verschuiving naar hogere frequenties kan sprake zijn van een afname van de amplitudes van de dynamische krachten bij lagere frequenties. Dit is bijvoorbeeld het geval in de simulaties met het reizigersmaterieel bij frequenties tussen 18 en 52 Hz.
4. Door de halvering van de dwarsliggerafstand buigen de spoorstaven tussen de dwarsliggers aanzienlijk minder door. Hierdoor worden de dynamische krachten in het wiel-railcontact die het gevolg zijn van de dwarsliggerafstand aanzienlijk kleiner (en treden deze dynamische krachten op bij een twee keer zo hoge frequentie).
5. Uit de simulatieresultaten volgt dat de invloed van de verminderde doorbuiging van de spoorstaven op de dynamische krachten in het wiel-railcontact veel kleiner is dan de invloed van de hogere stijfheid van de spoorconstructie.
6. Hierdoor volgt uit de simulatieresultaten dat halvering van de dwarsliggerafstand per saldo leidt tot grotere dynamische krachten in het wiel-railcontact, die optreden bij hogere frequenties dan bij de bestaande dwarsliggerafstand.
7. De grotere dynamische krachten in het wiel-railcontact geven een grotere trillingsbelasting van de bovenbouw, die optreedt bij hogere frequenties dan bij de bestaande dwarsliggerafstand.
8. Door de toename van de trillingsbelasting van het spoor nemen naar verwachting ook de bodemtrillingen en de kans op trillingshinder toe. Maar omdat ook de frequenties waarbij de trillingsbelasting optreedt omhoog gaan, zijn een mogelijke toename van de bodemtrillingen en de kans op trillingshinder ook afhankelijk van de eigenschappen van de bodem.

Op basis van de onderzoeksresultaten kan daarom niet worden vastgesteld dat halvering van de dwarsliggerafstand leidt tot een verwachte afname van de trillingshinder.

Referenties

[1] ERRI B176/DT 290: B176/3 *Benchmark Problem, Results and Assessment. European Rail Research Institute,* 1993.

[2] Trillingsvriendelijk Goederenmaterieel - Simulaties t.b.v. bureaustudie draaistelconfiguratie. Kenmerk: DR/25/240123/004, versie 1.0 d.d. 22 april 2023.

Bijlage 1: Invoerwaarden modelberekeningen totale verticale stijfheid van de bovenbouw

De simulaties in XPAT zijn uitgevoerd met de volgende invoerwaarden.

Lengte spoorsectie	6600 mm
Dwarsliggerafstand = afstand oplegpunten:	600 mm (bestaande dwarsligger afstand) 300 mm (gehalveerde dwarsliggerafstand)

Railprofiel	54E1 (oppervlakte doorsnede = 69.77 cm^2, I_{xx} = 2337.9 cm^4)
Stijfheid per oplegging	gecombineerde stijfheid spoorstaafbevestiging en ballast: • 50 kN/mm • 20 kN/mm
Eigen gewicht spoorconstructie	54,77 kg per meter spoorstaaf + 143 kg per halve dwarsligger (uitgaande van NS90-dwarsliggers)
Externe belasting	Simulatie van een wiellast in de vorm van een puntbelasting van 100 kN

Bijlage 2: Ingevoerde spooronregelmatigheden [2]

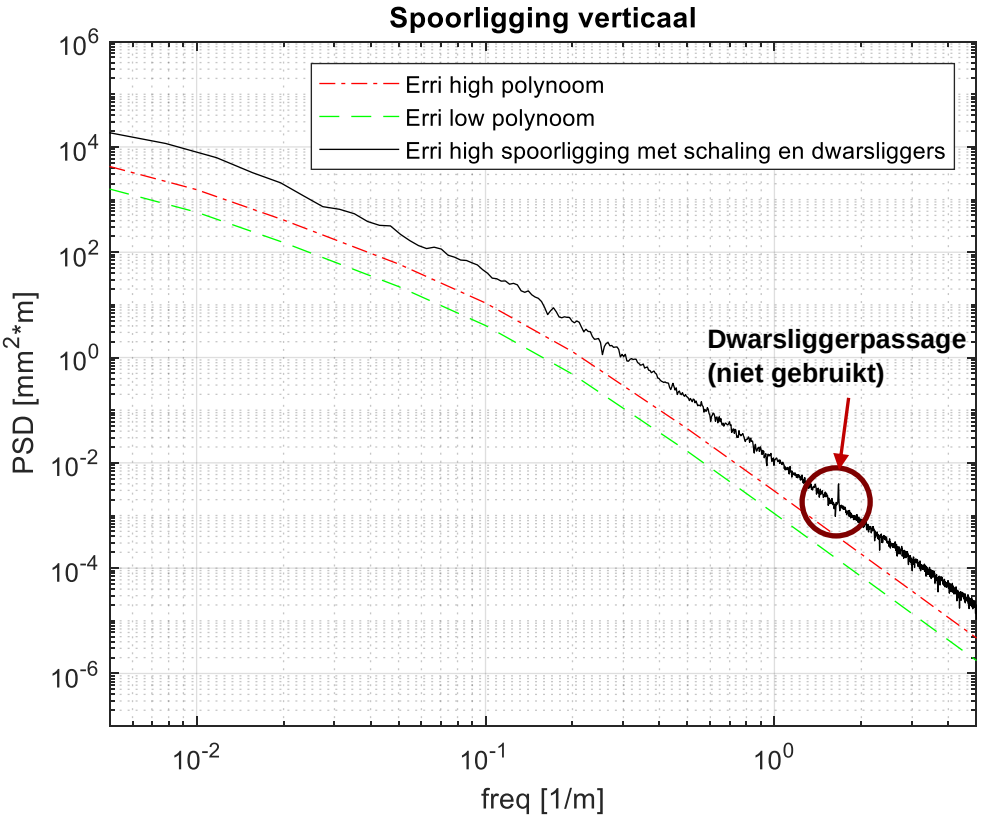
Er zijn verschillende PSD- (Power Spectral Density-) polynomen van spooronregelmatigheden gedefinieerd voor dynamische analyses van railvoertuigmodellen. Met name de PSD-polynomen van het European Rail Research Institute (ERRI) in rapport B176 zijn erkend in Europa voor het uitvoeren van simulaties [1]. Deze PSD's zijn gebaseerd op vele spoorliggingsmetingen op verschillende Europese trajecten. Er zijn twee verschillende niveaus gedefinieerd; 'ERRI low', wat een goed onderhouden spoor weergeeft en 'ERRI high' geeft een relatief slecht onderhouden spoor weer.

Uit ervaring is gebleken dat de spoorligging van het Nederlandse spoor over het algemeen slechter van kwaliteit is dan de ERRI-high spoorligging. Daarom is ervoor gekozen om de amplitude van de ERRI-high spooronregelmatigheden te verhogen. Voor het bepalen van de juiste schalingsfactor is er gekeken naar de huidige onderhoudsgrenswaarden van de spoorgeometrie in de standaard OHD00022-2. Daarom is ervoor gekozen om de ERRI-high spoorligging met een schalingsfactor van 2 te verhogen.

De met een factor 2 opgeschaalde spooronregelmatigheden volgens ERRI zijn vastgelegd in de invoerfile *ERRI_theoretische_spoorligging.csv*. De spooronregelmatigheden in deze invoerfile bestaan uit verkantings-, hoogte- en schiftafwijkingen over een lengte van 2990 meter, voorafgegaan door 10 meter zonder onregelmatigheden.

Aan de laatste 200 m van deze invoerfile met spooronregelmatigheden is in de hoogte-afwijkingen een sinusgolf toegevoegd (golflengte = 0,6m, amplitude = 0,04 mm) om het effect van de dwarsliggerpassage te simuleren. Voor het onderzoek naar halvering van de dwarsliggerafstand wordt deze laatste 200 meter niet gebruikt. In plaats daarvan wordt het effect van de dwarsliggerafstand gesimuleerd in de vorm van variaties van de verticale stijfheid van het spoor.

Een PSD-plot van de hoogte-afwijkingen in de invoerfile *ERRI_theoretische_spoorligging.csv* is weergegeven in Figuur 10. De piek als gevolg van de toegevoegde sinusgolf voor de dwarsliggerafstand over de laatste 200 meter, die dus niet van toepassing is op het onderzoek naar halvering van de dwarsliggerafstand, is hierin omcirkeld.



Figuur 10: PSD van de ERRI-high spooronregelmatigheden in verticale richting. Weergegeven zijn de ERRI-high en ERRI-low polynomen (rood en groen). Ook is hier de PSD geplot van de ERRI-high spoorligging die geschaald is met een factor 2 (zwarte lijn). Omcirkeld is een kleine piek in de opgeschaalde PSD die het gevolg is van het toevoegen van een sinusgolf (golflengte = 0,6 m, amplitude = 0,04 mm) aan de laatste 200 meter van de invoerfile om het effect van de dwarsliggerafstand te simuleren. Voor het onderzoek naar halvering van de dwarsliggerafstand wordt deze laatste 200 meter niet gebruikt.