DEKRA

Creating a world
fit for the future

RICARDO

IBS - simulaties trillingsbelasting

baanmodel en beoordelingsmodel

Voor: ProRail

02-11-2022
03-838477

Documentgeschiedenis en autorisatie

Versie	Datum	Wijzigingen
1	02-11-2022	

Opgesteld door: Babette Dirks / Thijs Roeleveld

Collegiaal getoetst door: Jasper Peen

Inhoud

1. Introductie 4

2. Baanmodel 5
2.1 Het theoretisch spoormodel 5
2.1.1 Invloed van dwarsliggers 6
2.2 Praktijkspoor 9
2.2.1 Onderbouwing locatiekeuze 9
2.2.2 Kenmerken van de locatie Schalkwijk 9
2.3 Korte golf defect 11
2.4 Modellering in Simpack/Vampire 13

3. Validatie van het baanmodel 16
3.1 Opzet van de validatie 16
3.2 Validatie op het theoretisch spoor 16
3.2.1 Aanpak 17
3.2.2 Resultaten 17
3.2.3 Verklaring van de verschillen 18
3.2.4 Conclusie 19
3.3 Validatie met de raildip 19
3.3.1 P2 kracht theorie 19
3.3.2 Validatie draaistelmodel raildip 21

4. Beoordelingsmodel 26
4.1 Synthetisch en praktijkspoor 26
4.2 Raildip 27

5. Referenties 28

1. Introductie

Binnen de Innovatieagenda Bronaanpak Spoortrillingen (IBS) wordt onderzocht hoe bodemtrillingen vanuit het spoorsysteem kunnen worden gereduceerd. Een aandachtsgebied daarbij is de invloed van materieel op bodemtrillingen. Bijvoorbeeld door te kijken of aanpassingen aan het veel gebruikte Y25 goederendraaistel trillingen kunnen reduceren.

Om deze inzichten concreet te maken hebben zowel Ricardo als Dekra een opdracht gekregen voor het uitvoeren van dynamica simulaties. Daarbij rijden treinen van verschillende types en draaistelvarianten virtueel over een spoor. Als resultaat krijgen we berekende voertuigreacties waaruit we vervolgens de trillingsbelasting op het spoor bepalen. De aanpak hiervoor staat beschreven in ‘Trillingsvriendelijk Goederenmaterieel – simulaties t.b.v. bureaustudie draaistelconfiguratie - Voorstel voor een Plan van Aanpak’.

Als onderdeel van de werkzaamheden moeten baanmodellen en een beoordelingsmodel worden opgesteld. De baanmodellen zijn de virtuele sporen waarop de dynamica simulaties worden uitgevoerd. Het beoordelingsmodel geeft aan op welke wijze de resultaten uit de simulaties worden verwerkt. Met ProRail is afgestemd dat we de STEM partners van het IBS meenemen met de modellering. Om hier invulling aan te geven is deze notie opgesteld.

2. Baanmodel

Dit hoofdstuk beschrijft het virtueel testtraject, het baanmodel, waarmee de dynamica simulaties uitgevoerd gaan worden. Dit baanmodel zal drie varianten hebben voor de spoorligging:

- Een theoretisch spoor waarbij de spoorligging (spooronregelmatigheden) conform de methode in ERRI B176 is [1], maar dan wel aangepast aan het kwaliteitsniveau van het Nederlandse spoor.
- Een praktijkspoor van ca. 1 km waarop zowel goederen- als reizigerstreinen rijden waar in het recent verleden trillingsmetingen zijn uitgevoerd.
- Een theoretisch spoor met een korte golf defect. Daardoor wordt het voertuig aangestoten en zal deze als reactie een dynamische verticale kracht op het spoor uitoefenen. Deze kracht wordt de P2 kracht genoemd.

In de laatste paragraaf wordt beschreven hoe het spoor wordt gemodelleerd in de simulatie software Simpack en Vampire.

2.1 Het theoretisch spoormodel

Met behulp van een PSD (Power Spectrum Density) kan een spoormodel worden opgesteld. Een dergelijke PSD geeft aan wat de amplitude is van spooronregelmatigheden bij verschillende golflengtes. Er zijn verschillende PSD's gedefinieerd voor dynamische analyses van railvoertuigmodellen. Met name de PSD's van het European Rail Research Institute (ERRI) in rapport B176 zijn erkend in Europa voor het uitvoeren van simulaties. 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.

De ERRI PSD’s zijn gedefinieerd door polynomen, volgens de volgende vergelijkingen:

Verticaal

$$S_v(\Omega) = \frac{A_v \cdot \Omega_c^2}{(\Omega^2 + \Omega_r^2)(\Omega^2 + \Omega_c^2)}$$

Zijdelings

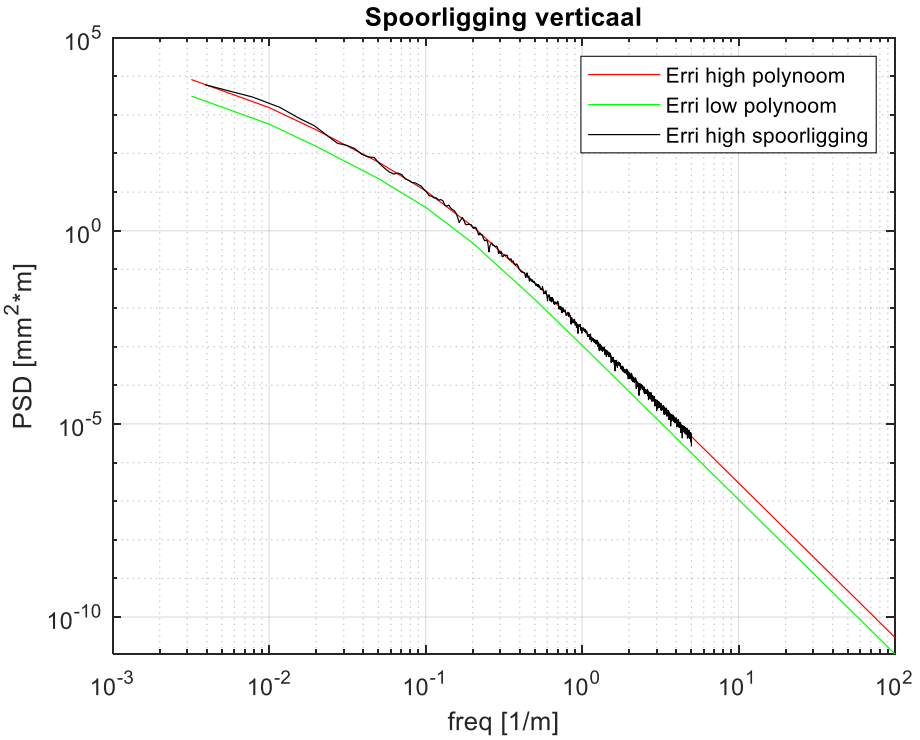
$$S_a(\Omega) = \frac{A_a \cdot \Omega_c^2}{(\Omega^2 + \Omega_r^2)(\Omega^2 + \Omega_c^2)}$$

Verkanting

$$S_c(\Omega) = \frac{A_v \cdot b^{-2} \cdot \Omega_c^2 \cdot \Omega^2}{(\Omega^2 + \Omega_r^2)(\Omega^2 + \Omega_c^2)(\Omega^2 + \Omega_s^2)}$$

Waarin Ω de frequentie is in [rad/s], Ω_c, Ω_r, Ω_s, zijn de cut-off frequenties in [rad/m]. A_v and A_a zijn de ruwheidsconstanten in [m^2 rad/m] en deze variëren voor het low/high niveau van de spooronregelmatigheden en tenslotte is b de halve zijdelingse afstand tussen de wielen (0.75 m).

In het ‘ERRI high’ hoogteliggingssignaal zijn ook korte golven vanaf 0.2m. De PSD plot van het hoogteliggingssignaal is in Figuur 1 weergegeven samen met de polynomen voor ERRI-high en ERRI-low.



Figuur 1: PSD van de ERRI-high spoorligging in verticale richting samen met de ERRI-high en ERRI-low polynomen. Hier is te zien dat kortere golven tot λ = 0.2 m (freq = 5Hz) in de ERRI-high spoorligging zitten.

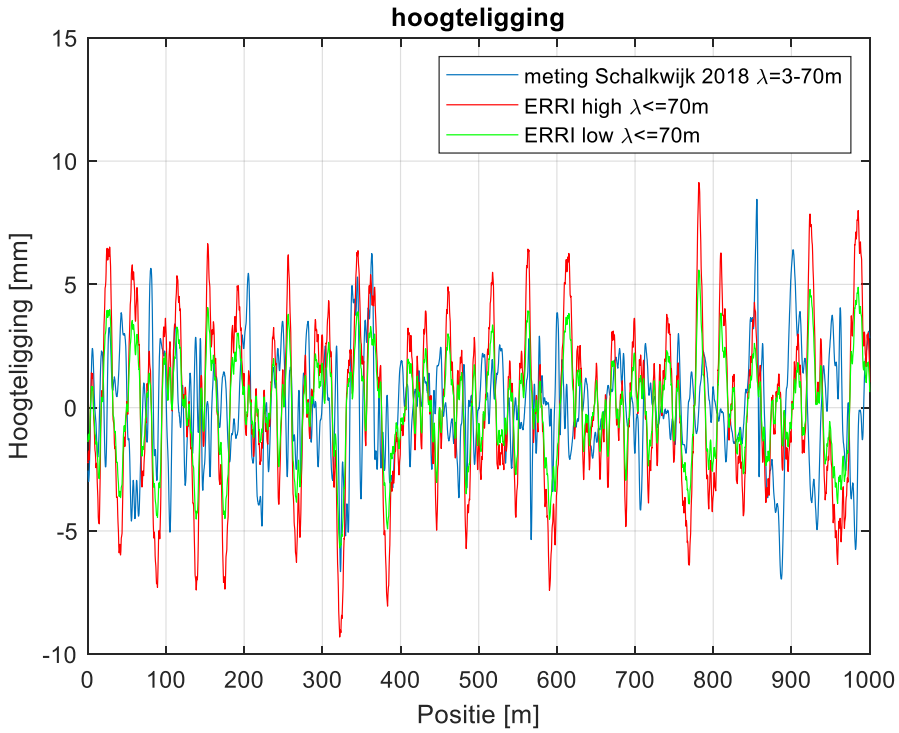
Ter referentie zijn in Figuur 2 de spooronregelmatigheden te zien van de hoogteligging op het traject bij Schalkwijk en tevens van ERRI-low en ERRI-high. De lange golven zijn hier eruit gefilterd (λ > 70 m) zodat de niveau's van de spooronregelmatigheden goed met elkaar vergeleken kunnen worden. Er kan hieruit geconcludeerd worden dat het niveau van de spooronregelmatigheden van de meting bij Schalkwijk ongeveer gelijk is aan het niveau van ERRI-high. Echter, uit ervaring is gebleken dat de spoorliggingskwaliteit van het Nederlandse spoor vaak slechter is dan de kwaliteit van 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 [2]. Voor een koordelengte van 15 m, is de bodemwaarde van de hoogteligging +/- 18 mm bij een snelheid van ≤ 120 km/u en ≤ 140 km/u. De maximale waarde van de ERRI-high spoorligging is ongeveer 9mm, daarom is ervoor gekozen om de ERRI-high spoorligging met een schalingsfactor van 2 te verhogen. De PSD plot hiervan is weergegeven in Figuur 3 (blauwe lijn).

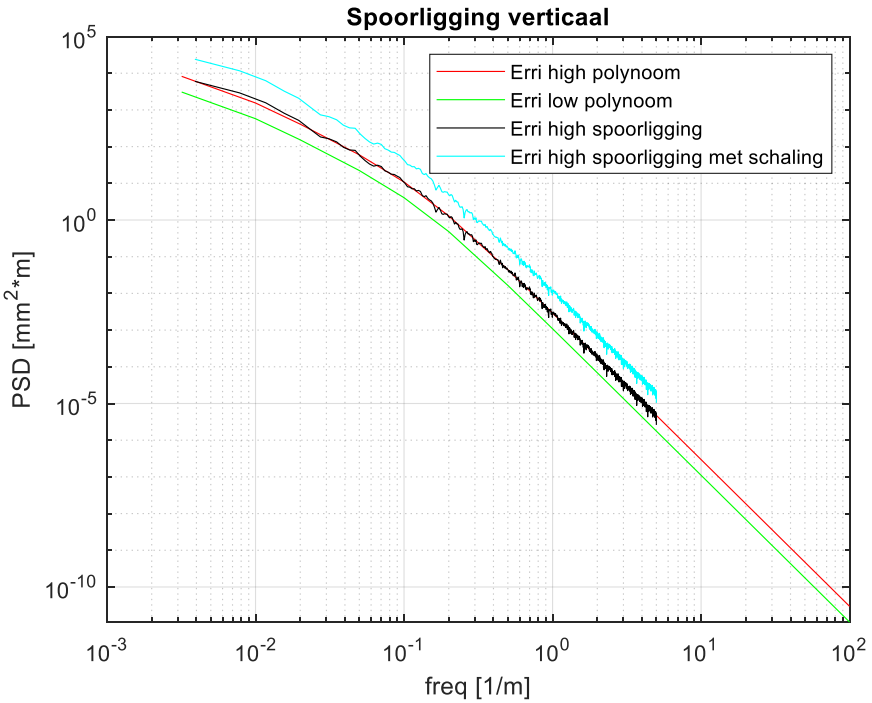
2.1.1 Invloed van dwarsliggers

Een andere belangrijke factor dat invloed kan hebben op de verticale wiel-rail krachten zijn de dwarsliggers. Doordat de stijfheid van het spoor lager is tussen twee dwarsliggers in, zal het wiel dit ervaren als een afwijking in de verticale positie van de rail. De rail buigt enigszins door tussen twee dwarsliggers. De hoogte afwijking die het wiel daardoor ervaart heeft de vorm van een sinus met de

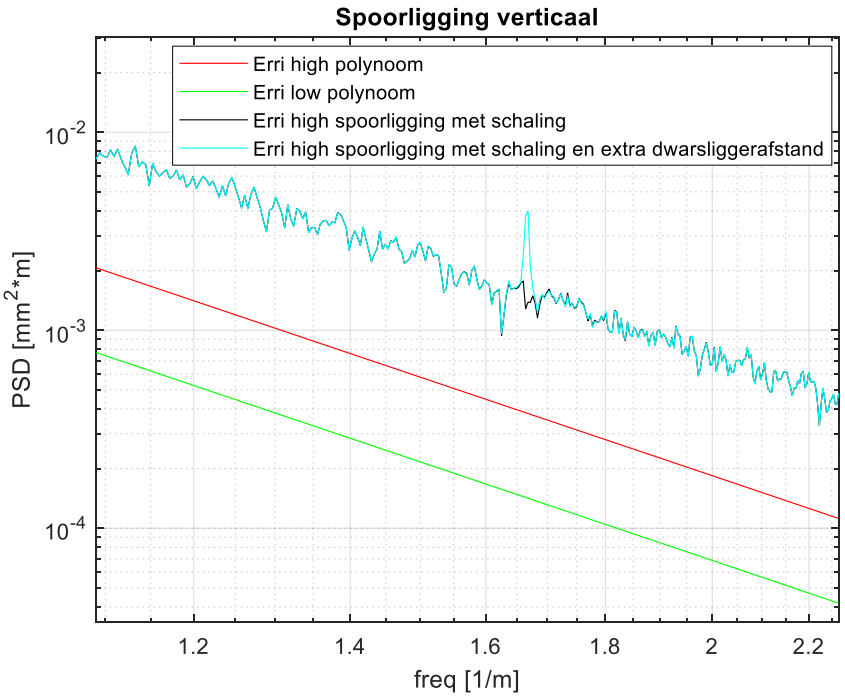
dwarsliggerafstand als golflengte (0.6m). De amplitude van deze afwijking is afgeleid uit aspotversnellingen van een VIRM trein en blijkt gelijk te zijn aan circa 0,04 mm. Aangezien het onzeker is in hoeverre de dwarsliggerpassage in het theoretische ERRI-high spoorliggingssignaal aanwezig is, is deze sinusgolf toegevoegd aan het laatste 200 meter stuk van de verticale ERRI-high spoorligging. Deze golflengte (f=1,67) is duidelijk terug te zien in de PSD plot in Figuur 4 (blauwe lijn). Deze spoorligging wordt gebruikt als theoretische spoorligging voor de dynamische simulaties.



Figuur 2: Hoogteligging op traject Schalkwijk (meting uit 2018) vergeleken met ERRI low en ERRI high van de hoogteligging.



Figuur 3: PSD van de ERRI-high spooronregelmatigheden in verticale richting samen met de ERRI-high en ERRI-low polynomen. Ook is hier geplot, de PSD van de ERRI-high spoorligging die geschaald is met een factor 2



Figuur 4: PSD van de ERRI-high spooronregelmatigheden in verticale richting samen met de ERRI-high en ERRI-low polynomen. Ook is hier geplot, de PSD van de ERRI-high spoorligging die geschaald is met een factor 2 en van de uiteindelijke ERRI-high spoorligging waarbij tevens aan de laatste 200 m een sinusgolf is toegevoegd (λ=0.6m, amplitude =0.04 mm) om het effect van de dwarsliggerpassage mee te nemen (blauwe lijn).

2.2 Praktijkspoor

Voor het praktijkspoor kiezen we een locatie waar in het recent verleden trillingsmetingen zijn uitgevoerd. Dit maakt het mogelijk om de resultaten van het onderzoek te kunnen vergelijken met praktijkmetingen.

2.2.1 Onderbouwing locatiekeuze

De keuze is uit locaties waar trillingsmetringen hebben plaatsgevonden en waar aspotversnellingen beschikbaar zijn. Deze laatste zijn nodig om de benodigde korte golf spoorgeometrie te kunnen bepalen. De geometriemeting die beschikbaar is in BBMS bevat informatie vanaf 3m, terwijl ook kleinere golflengtes relevant zijn voor het frequentiegebied waarin trillingen een rol spelen.

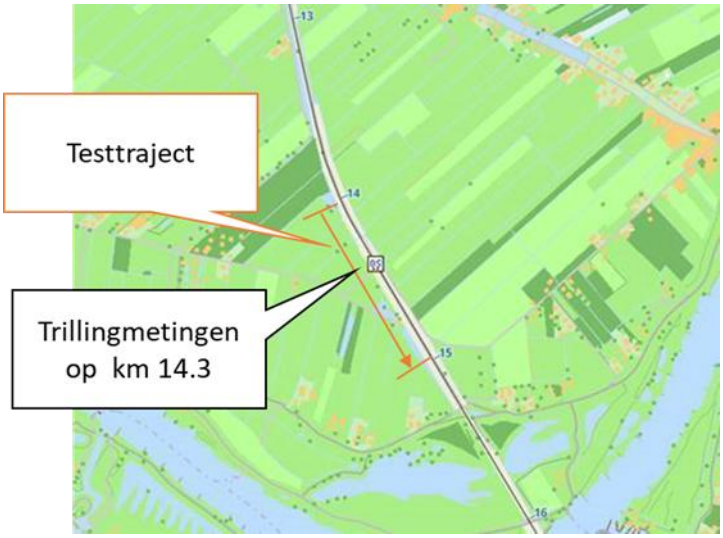
Drie locaties zijn geschikt. Dit zijn locaties de A2 corridor ter hoogte van Schalkwijk, Orthen en Den Bosch Zuid. De uiteindelijke keuze van de locatie was een afweging tussen twee aspecten: De stijfheid van de bodem en de layout van de meetlocatie. Ten aanzien van de invloed materieeleigenschappen is een hogere bodemstijfheid gewenst. Bij een hogere bodemstijfheid worden namelijk trillingen tot een hogere frequentie doorgegeven. Wanneer we naar de invloed van voertuigeigenschappen kijken, betekent dit dat ook eigenschappen die relevant zijn voor wat hogere frequenties zichtbaar kunnen zijn in trillingsmetingen. Qua layout van de meetlocatie hebben we te maken met het aantal sporen op het baanvak. Bij een tweesporig baanvak kan op basis van de rijrichting worden bepaald op welk spoor de trein heeft gereden. En dus ook welke spooronregelmatigheden een bijdrage hebben geleverd aan de trillingsbelasting. Bij een viersporig baanvak is dat niet het geval.

In overleg met ProRail is besloten dat het laatste aspect, tweesporigheid, het meest van belang is. Om die reden is gekozen voor de locatie Schalkwijk. De relatief slappe bodem op deze locatie is dan van ondergeschikt belang.

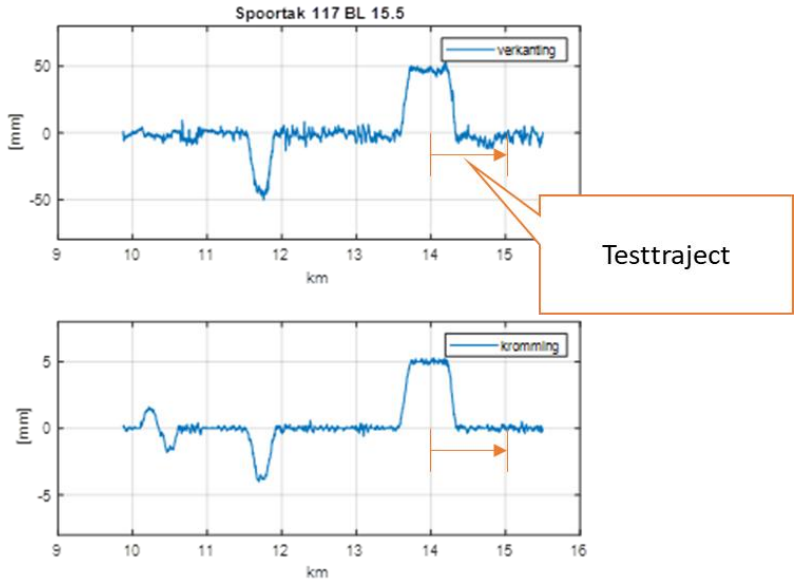
2.2.2 Kenmerken van de locatie Schalkwijk

Bij locatie Schalkwijk zijn in 2018 trillingsmetingen geweest aan de westzijde ter hoogte van km 14.4. Dit is aan de zijde van spoortak 117_1BL_15.5. Deze metingen hebben plaatsgevonden in de periode maart 2018 t/m juni 2018.

Het voorstel is om een stuk spoor van 1 km te selecteren waarbinnen zich de meetlocatie bevindt. Vanuit ProRail is daarbij nog de wens meegegeven om een stuk boog op te nemen in het spoor. Voor de locatie Schalkwijk is dat mogelijk. Op basis daarvan is de keuzen gemaakt om gegevens te gebruiken op dit traject tussen km 14.0 en 15.0 (Figuur 5). De eerste 250 m van dit traject is een boog met een straal van 2500 m. De rest van het deeltraject is recht spoor. De trillingsmetingen zijn uitgevoerd langs het stuk recht spoor.



Figuur 5: Locatie van het praktijkspoor nabij Schalkwijk



Figuur 6: Kromming en verkanting van het praktijkspoor nabij Schalkwijk

Voor het opstellen van het model wordt de spoorgeometrie gebruikt uit BBMS ten tijde van de trillingsmetingen. Dit betekent dat hoogte, schift en verkanting overeenkomen. Daarnaast worden aspotversnellingen van de Ricardo meettrein gebuikt voor de hoogteafwijkingen in het golflengtebereik tussen 0.1 en 3m. Dit betekent dat de hoogteafwijkingen van het spoor overeenkomen in het golflengtebereik van 0.1m tot 70m. Daarmee is het volledige golflengtebereik dat relevant is voor trillingen afgedekt.

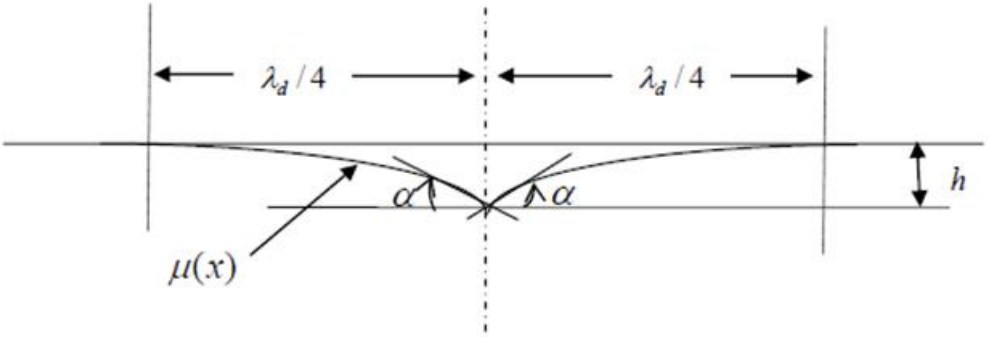
Het gekozen testtraject begint in een boog met verkanting. Voor een soepele overgang naar dit testtraject, moet er een stuk spoor voor worden gezet met een rustig opbouw van verkanting en boogstraal. Om die reden is er voor gekozen om het testtraject aan de voorkant te verlengen en te laten starten bij km 13.0. Voor het stuk tussen km 13.0 en km 14.0 worden echter geen spooronregelmatigheden toegevoegd. De resultaten van dit stuk spoor worden ook niet gebruikt ter beoordeling van de trillingsbelasting.

De bodemopbouw ter plaatse van Schalkwijk kenmerkt zicht door de bovenste 7-8 meter klei en veenlagen. Door de aanwezige klei- en veenlagen wordt verwacht dat de bodem zich relatief slap gedraagt.

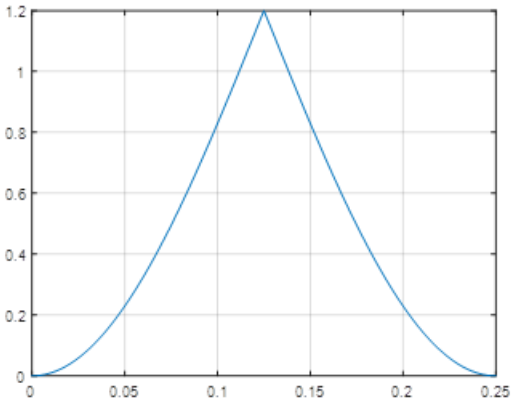
2.3 Korte golf defect

Er zijn wiel-railkrachtmetingen uitgevoerd van twee verschillende Zweedse treinen (Regina en X2), waarbij een van de wielen van iedere trein een vlakke plaats had [3]. Uit deze krachtmetingen kwam duidelijk naar voren dat de maximale kracht bij een lage frequentie werd geëxciteerd (80Hz), wat de zogenoemde P2 resonantie kracht is. Deze treedt op wanneer de onafgeveerde massa van het wielstel in fase beweegt met de rail en dwarsliggers.

De door railvoertuigen veroorzaakte grondtrillingen, zijn afhankelijk van verschillende factoren die van invloed zijn op de dynamische en quasi-statische excitatie en voortplanting door het spoorsysteem. De belangrijkste factoren van het voertuig-baan systeem die grondtrillingen bepalen, hebben betrekking op het baanontwerp en het onderhoud van wiel en rail. Zo kunnen bijvoorbeeld discontinuïteiten tussen de rails voor een stootwerking zorgen, net zoals een vlakke plaats in een wiel, wat resulteert in de P2 resonantiekracht. Om de ‘trillingsprestaties’ van de verschillende voertuigen te kunnen beoordelen, rijden de voertuigen in de dynamische simulaties ook over een spoorligging waarin een discontinuïteit zit met een korte golflengte, een rail dip. De verticale geometrie van de rail dip is overgenomen uit [4] en is weergegeven in Figuur 7. Er is gekozen voor een defecthoogte van 1,2 mm en een hoek van 0,0024 rad. Dit geeft de geometrie van de rail dip zoals weergegeven in Figuur 8.

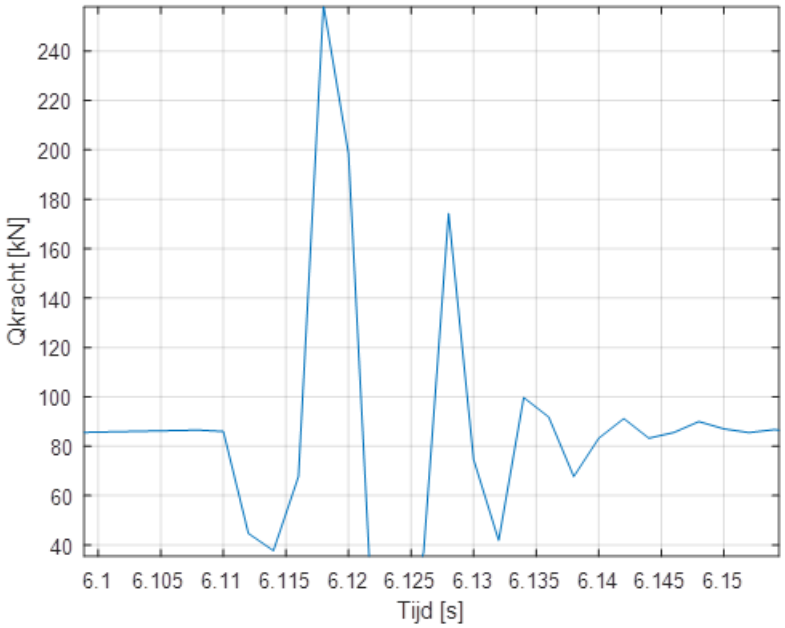


Figuur 7: De verticale geometrie van de rail dip [4].



Figuur 8: De verticale geometrie van de rail dip zoals deze wordt ingevoerd als verticale spoorligging in de simulaties. De dip is hier in positieve richting weergegeven, wat in het coördinatensysteem van de simulatiesoftware naar beneden gericht is.

Een voorbeeld van een simulatieresultaat van de dynamische wiel-rail kracht dat ontstaat door het rijden van een goederentrein met een Y25 draaistel over de rail dip, is te zien in Figuur 9. Er kan geconcludeerd worden dat de P2-kracht duidelijk te zien is in het simulatieresultaat. De frequentie van de P2 kracht ligt namelijk tussen de 50-200 Hz, wat klopt met het simulatieresultaat. De amplitude van de dynamische kracht komt ook overeen met het krachtenniveau uit metingen die zijn uitgevoerd door Jenkins [5].

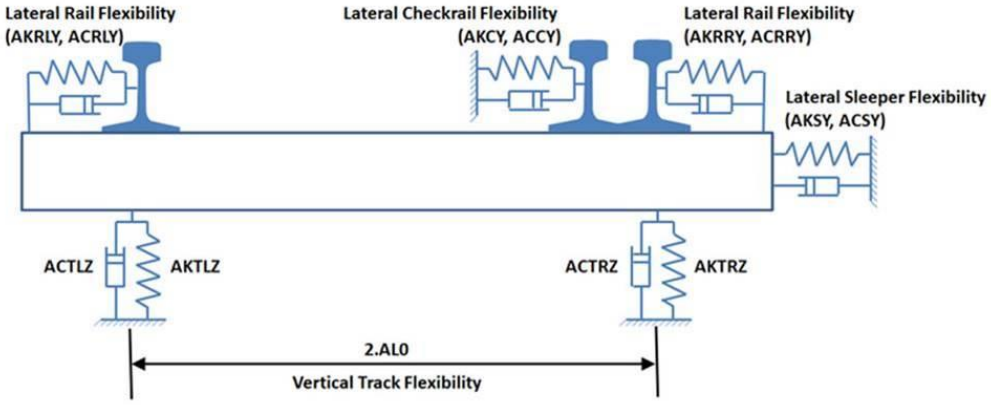


Figuur 9: Simulatieresultaat van de dynamische wiel-rail kracht bij de passage van een rail dip.

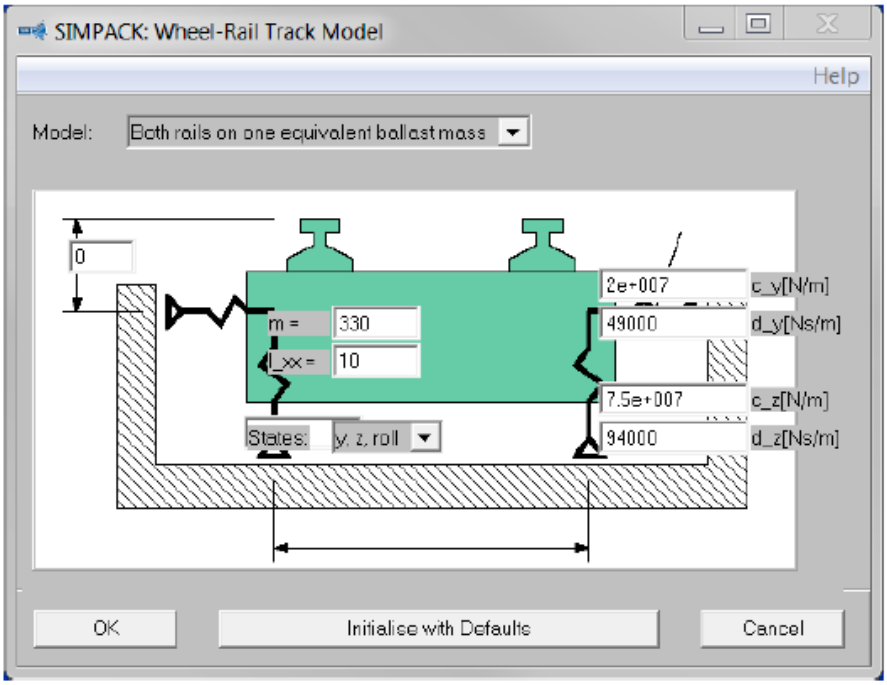
2.4 Modellering in Simpack/Vampire

Aangezien de voertuig dynamische simulaties uitgevoerd gaan worden door twee partijen, Ricardo Rail en DekraRail, worden er twee verschillende software pakketten gebruikt voor het uitvoeren van de simulaties. Ricardo Rail gebruikt namelijk de MBS (Multi Body Simulation) software Simpack, en DekraRail gebruikt Vampire. Om er zeker van te zijn dat de resultaten van Ricardo Rail en DekraRail goed met elkaar vergeleken kunnen worden, is het belangrijk om de modellering vergelijkbaar te maken een Benchmark uit te voeren waarbij de resultaten van beide software pakketten worden vergeleken.

Het verschil tussen de twee pakketten zit vooral in de mogelijkheden voor het modelleren van het spoor. Hoe het spoormodel eruit ziet, is weergegeven in onderstaande figuren. De verschillende stijfheden en dempingswaarden zijn voor beide pakketten vrij in te voeren. Het grootste verschil tussen de spoormodellen is dat in Vampire, zie Figuur 10, er nog een extra zijdelingse bewegingsvrijheid is van de rail. Deze mogelijkheid ontbreekt in Simpack, zie Figuur 11. Maar door de stijfheid/demping van deze parameters heel hoog te kiezen in Vampire, schakel je deze bewegingsvrijheid uit en zullen naar verwachting de spoormodellen hetzelfde zijn.



Figuur 10: Spoormodel in het MBS programma Vampire



Figuur 11: Spoormodel in het MBS programma Simpack

Voor de beide spoormodellen worden twee verschillende stijfheden gebruikt:

- Voor het theoretisch spoormodel wordt een relatief hoge stijfheid gebruikt. Een spoor met een relatief hoge stijfheid zal een beter hoogfrequente respons hebben. Daarmee zijn voertuigeigenschappen die invloed hebben op dat frequentiegebied beter zichtbaar in de resultaten.
- Voor het praktijk spoormodel wordt een stijfheid gebruikt die past bij de locatie. Aangezien de bodem bij Schalkwijk zich naar verwachting relatief slap gedraagt, wordt hiervoor een relatief lage bodemstijfheid gebruikt.

Als hoge stijfheid wordt een waarde van 100kN/mm gekozen voor een spoor met lage stijfheid een waarde van 50kN/mm. Deze waarden zijn eerder gebruikt in een onderzoek naar baanbelasting dat Ricardo voor ProRail heeft uitgevoerd. De waarden zijn gebaseerd op metingen met het Zweedse Track Loading Vehicle (TLV) die bij een frequentie van 7.3Hz de dynamische stijfheid van het spoor in Nederland heeft bepaald. Deze stijfheidswaarden liggen ook binnen het bereik van andere waarden die gevonden zijn in de literatuur en metingen. Voor beide sporen hanteren we een demping van 1 promille. Dit komt neer op 10e4 Ns/m voor stijf spoor en 5e4 Ns/m voor slap spoor.

Tabel 1: Overzicht gevonden stijfheids- en dempingswaarden

	Innotrack	ERRI B176	Shift2Rail	NL Ansys	NL meting
Cz [kN/mm]	30	75	220	85-660	103
Dz [Ns/m]	$1.0 \cdot 10^4$	$9.4 \cdot 10^4$		-	-
Cy [kN/m]	15	20	40	-	-
Dy [Ns/m]	$1.0 \cdot 10^4$	$4.9 \cdot 10^4$	$18.3 \cdot 10^4$	-	-

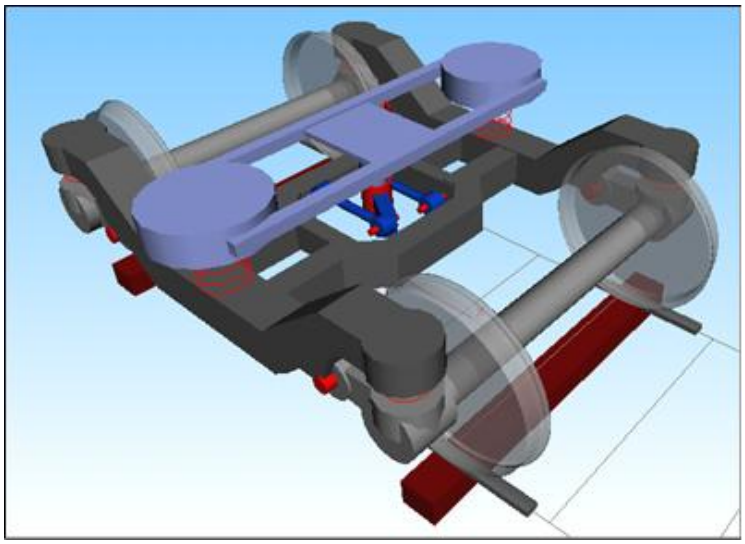
- Innotrack (D3.1.4)
- ERRI B176 - From Track access charges model Switzerland
- Shift2Rail - Universal Cost Model – track parameters Sweden
- NL Ansys – bepaald uit Ansys berekening locatie in Nederland
- NL meting – bepaald uit meting in spoor Meppel/Vleuten

3. Validatie van het baanmodel

Ter vergelijking van de beide modellen is we een benchmark uitgevoerd met een referentiedraaistel. Hiermee is we over het theoretisch spoor gereden en bepaald in welke mate de berekende voertuigreacties overeen komen. Indien nodig zijn de voertuig en/of baanmodellen aangepast.

3.1 Opzet van de validatie

Als referentie draaistel gebruiken we een speciaal voor dit doel samengesteld draaistel (Figuur 12). Het bestaat uit een model van een draaistelframe met twee wielstellen en een primaire/secundaire vering. De massa van de wiegbalk is vergroot met een half bakgewicht en via een langsmeename met het draaistelframe gekoppeld. Het is een eenvoudig, maar realistisch ontwerp. Het maakt gebruik van lineaire elementen, waarvan de implementatie in de beide simulatiepakketten vrijwel zeker gelijk is. Daarmee worden de resultaten bijvoorbeeld niet beïnvloed door de implementatie van complexe niet lineaire elementen.



Figuur 12: Referentiedraaistel dat wordt gebruikt voor de benchmark

Ter validatie van het baanmodel beoordelen we het gedrag op het theoretisch spoor en onder invloed van de raildip. In beide gevallen gaan we beoordelen in hoeverre de wiel-rail krachten voor beide simulatiepakketten overeen komen. Bij het theoretisch spoor wordt het voertuig breedbandig aangestoten en gaan we de responsie beoordelen over een breed, voor trillingen relevent frequentiegebied. Bij de raildip kijken we naar de maximale amplitude van de wiel-rail kracht ten gevolge van deze dip.

3.2 Validatie op het theoretisch spoor

De validatie met theoretisch spoor is een iteratief proces geweest, waarbij we hebben gesimuleerd met verschillende draaistelmodellen en spooreigenschappen. Het doel was om de Q krachten aan elkaar gelijk te krijgen en/of oorzaken te kunnen vinden van verschillen.

3.2.1 Aanpak

Bij het vergelijken van de Q krachten hebben we telkens verschillende aspecten beoordeeld

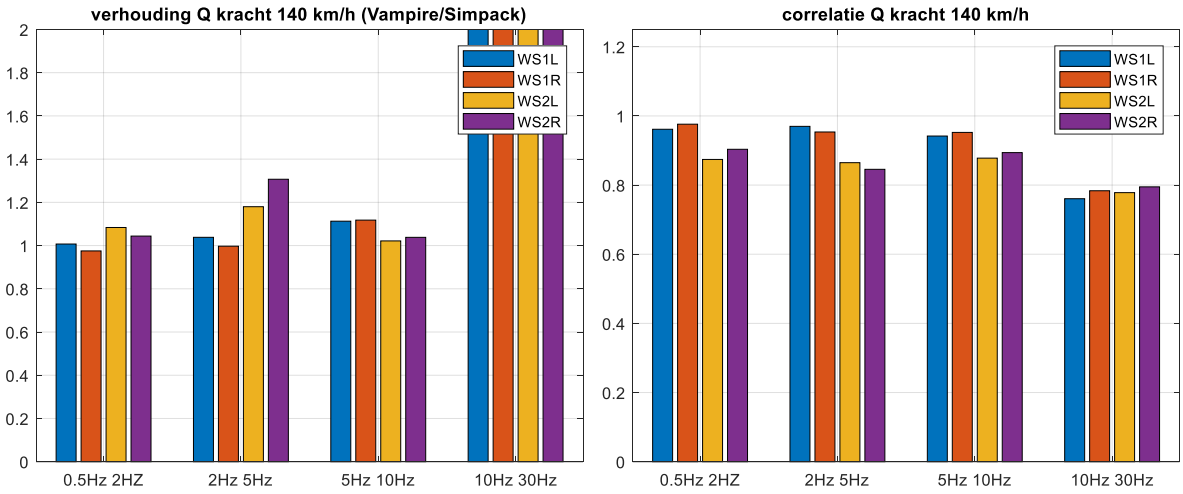
- De amplitude van de kracht in 4 verschillende frequentiebanden.
- De gelijkvormigheid van de kracht in 4 verschillende frequentiebanden
- De signaalinhoud als functie van de frequentie.

De amplitude is beoordeeld door middels van de verhouding tussen de rms waarden. Een waarde gelijk aan 1 betekent dat de rms waarden van de Q kracht aan elkaar gelijk is. Een waarde groter dan 1 betekent dat in Vampire een hogere amplitude berekent dan Simpack. De gelijkvormigheid is bepaald met behulp van de correlatie. Hoe dichter de waarde bij 1, hoe groter de overeenkomst van de vorm.

3.2.2 Resultaten

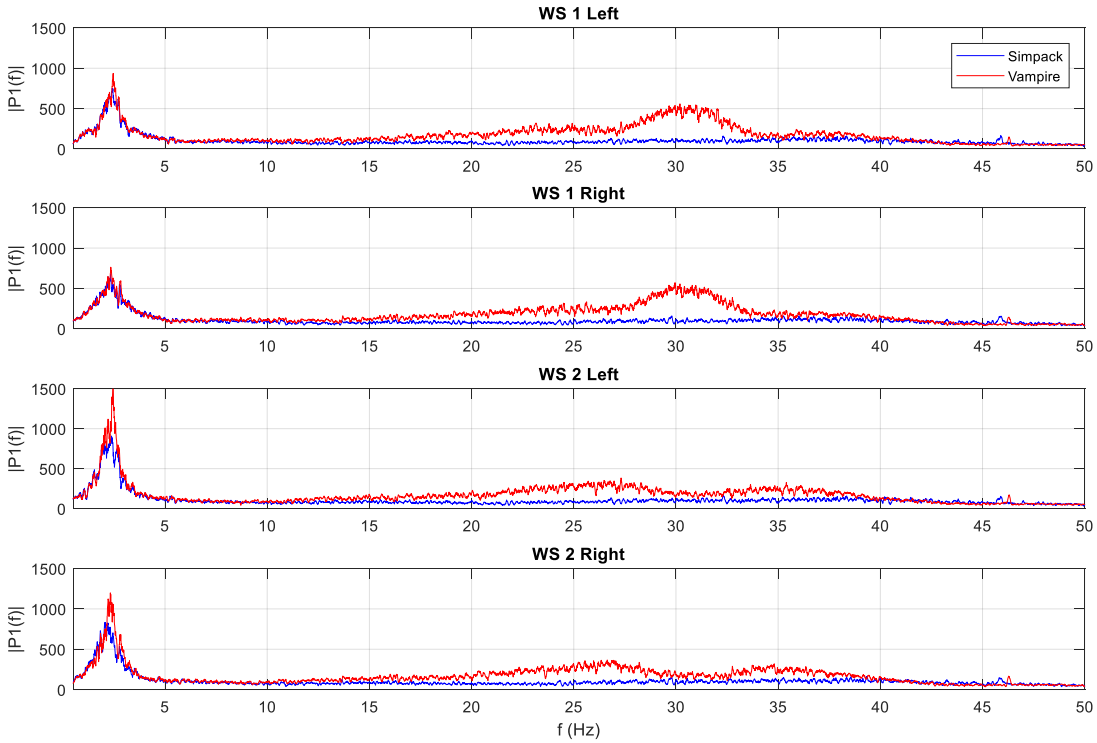
De amplitude en gelijkvormigheid zijn weergegeven in onderstaande figuren (Figuur 13). Deze resultaten zijn tot stand gekomen met een vereenvoudigd draaistelmodel zonder secundaire vering. De massa van het draaistelframe is daarbij verhoogd met de halve bakmassa. Deze vereenvoudiging was toegepast om het aantal mogelijke verschillen tussen de beide pakketten te verkleinen.

Uit de figuren blijkt dat zowel de amplitude als de vorm tot een frequentie van 10Hz goed overeen komt voor as1. Voor as2 is de overeenkomst iets minder goed. Bij de hoogste frequentieband (10Hz – 30Hz), zijn de verschillen echter aanzienlijk. Vampire berekent daar een amplitude van de Q kracht die ruim twee keer zo groot is.



Figuur 13: Beoordeling van amplitude en gelijkvormigheid

Een vergelijkbaar beeld zien we in de frequentierespons in Figuur 14. Voor as 1 (WS1L en WS1R) is deze vrijwel identiek tot een frequentie van 10Hz. Voor as 2 zien we een grotere response voor Vampire rond de frequentie van 2Hz. Dit past in het beeld van de wat lagere correlatie en verschil in amplitude uit Figuur 13. Wat ook opvalt is de aanzienlijk hogere amplitude van de door Vampire berekende krachten boven de 20Hz. Bij as 1 heeft deze veel inhoud rond de 25Hz. Voor as 2 is dit juist rond 25Hz en 35Hz.



Figuur 14: Frequentierepsons

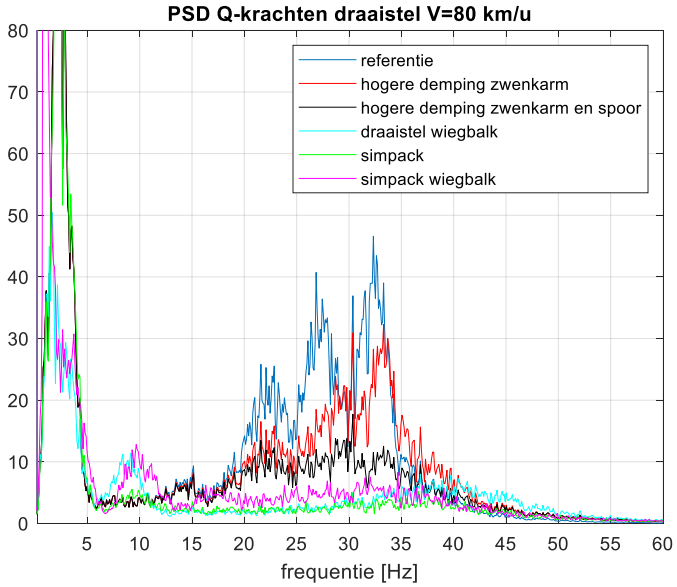
3.2.3 Verklaring van de verschillen

Het verschil in gedrag tussen de beide simulaties komt voort uit twee bronnen.

- Het verschil van as2 rond een frequentie van de 2Hz wordt vrijwel zeker veroorzaakt door een verschil tussen de beide draaistelmodellen. Ook al zijn ze zo goed mogelijk overeenkomstig gemodelleerd, de implementatie is hoe dan ook anders omdat de beide pakketten anders in elkaar zitten. In dit geval leidt dat tot een andere gedrag van de 2e as. Het feit dat de resultaten voor as 1 wel overeen komen laat zien dat het niet uit de infrastructuur komt en bevestigt dat de bron bij het draaistelmodel ligt.
- De bewegingen bij frequenties boven de 20Hz worden gekenmerkt door het gezamenlijke bewegingen van het draaistel en wielstel en spoor ten opzichte van de vaste wereld. Hierbij spelen twee dingen een rol. Ten eerste het verschil in modellering van de infra bij Simpack en Vampire. Bij Simpack bestaat het spoor uit een spoorstaaf inclusief dwarsligger die is afgeveerd ten opzichte van de vaste wereld. Bij Vampire is de spoorstaaf direct afgeveerd ten opzichte van de vaste wereld. Daarbij wordt aanzienlijk minder massa in beweging gebracht. Ten tweede is de massa van het draaistel in het versimpelde draaistelmodel onrealistisch hoog. Daardoor zal dit gedrag in praktijk niet zal voorkomen.

Om dit laatste te onderzoek zijn simulaties uitgevoerd met met verschillende varianten. Namelijk simulaties met een secundair afgeveerde bakmassa (ipv verzwaard draaistelframe) en simulaties

waarbij de demping in Vampire is aangepast. De PSD van de Q krachten uit deze simulaties staan in Figuur 15.



Figuur 15: PSD van de Q krachten bij verschillende scenario's

Wanneer we kijken naar de resultaten met een secundair afgeveerde massa (aangegeven als wiegbalk), zien we dat de krachten tussen de 20 Hz en 30Hz wel overeen komen. De lijnen ind de PSD van 'draaistel wiegbalk' en 'simpack wiegbalk' liggen daar namelijk op elkaar. Dit laat zien dat met een realistisch draaistelmodel deze verschillen nauwelijks een rol spelen. Ook wanneer we in Vampire de demping vergroten die samenhangt met de bewuste verticale beweging zien we dat deze een grote invloed heeft op de krachten tussen de 20Hz en 35Hz. Het hangt dus daadwerkelijk samen met deze beweging.

3.2.4 Conclusie

Al met al zien we dat tot een frequentie van 10Hz de Q krachten goed overeen komen. Boven de frequentie van 10Hz kunnen de resultaten tussen Simpack en Vampire verschillen vanwege het verschil in modellering van het spoor in beide simulatiepakketten. In hoeverre dit daadwerkelijk een rol speelt bij de simulatieresultaten hang af van de dynamische eigenschappen van het voertuig.

3.3 Validatie met de raildip

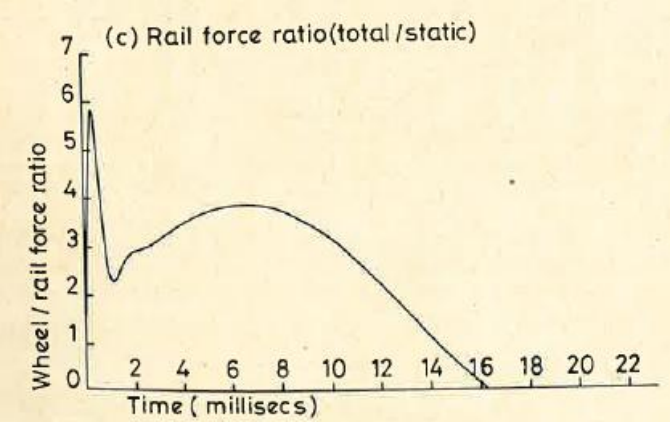
Naast de validatie met het theoretisch spoor hebben we ook gekeken naar de Q kracht ten gevolge van een raildip.

3.3.1 P2 kracht theorie

Typische verticale impactkrachten veroorzaakt door discrete geometrische onregelmatigheden (slechte lasverbinding, squats, etc.) zijn de krachten die worden veroorzaakt door de plotselinge verandering in spoor- en wielrichting.

De eerste krachtpiek die ontstaat heet de P1-kracht, zie Figuur 16. Deze krachtpiek is van korte duur, boven de 500 Hz, en wordt veroorzaakt door de samendrukking van de Herz contactstijfheid tussen wiel en rail. De P1-kracht wordt veroorzaakt door krachten die ontstaan doordat het wiel en de rail worden vervormd bij impact, voordat de rail de tijd heeft om te bewegen op de spoorstijfheid.

De P2-kracht is de tweede piek die kort na de P1 kracht optreedt en deze duurt langer, onder de 100 Hz. De kracht wordt veroorzaakt doordat het spoor naar beneden wordt geduwd in de ondergrond. De zogenoemde P2-resonantie treedt op als de onafgeveerde massa van het wiel, de rail en dwarsliggers in fase trillen op de ondergrond.



Figuur 16: Wiel/rail kracht toename (totaal/statisch) veroorzaakt door een raildip [1]. De eerste piek is de P1-kracht en de tweede piek is de P2-kracht.

De P2-kracht is dus een dynamische kracht tussen wiel-rail die wordt veroorzaakt door een kleine verticale afwijking in de rail, maar deze kracht kan ook veroorzaakt worden door een afwijking aan de wielen, zoals een vlakke plaats [3].

De P2-kracht die veroorzaakt wordt door een afwijking in de rail, kan berekend worden volgens de door Jenkins ontwikkelde vergelijking [5]:

$$P_2 = Q_0 + (A_z \cdot V_m \cdot M \cdot C \cdot K),$$

waarbij:

$$M = \left[\frac{M_v}{M_v + M_z}\right]^{0.5},$$

$$C = 1 - \left[\frac{\pi \cdot C_z}{4 \cdot [K_z(M_v + M_z)]^{0.5}}\right],$$

$$K = [K_z \cdot M_v]^{0.5},$$

Hierin is:

Q_0	=	Maximum statische wiellast [N]
V_m	=	maximum snelheid [m/s]
M_v	=	Verticale onafgeveerde massa per wiel [kg]
A_z	=	Totale hoek van de raildip
M_z	=	Equivalente railmassa per wiel [kg]

C_z	=	Equivalente verticale rail demping per wiel [Ns/m]
K_z	=	Equivalente verticale rail stijfheid per wiel [N/m]

De equivalente railmassa per wiel is als volgt gedefinieerd:

$$M_z = \frac{3mL}{2},$$

Waarin:

$$m = m_r + \frac{m_s}{a},$$

$$L = \left(\frac{4EI}{k}\right)^{\frac{1}{4}}$$

De equivalente rail stijfheid is als volgt gedefinieerd:

$$K_z = 2 \cdot k \cdot L$$

En de equivalente rail demping:

$$C_z = \frac{3 \cdot c \cdot L}{2}$$

Met

$$k = \frac{k_s}{a},$$

$$c = \frac{c_s}{a},$$

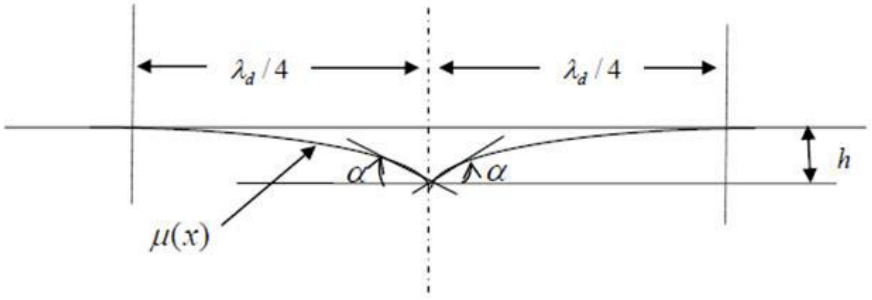
m_r	=	Rail massa per lengte [kg/m] (54 voor UIC54)
m_s	=	Massa van een halve dwarsligger [kg]
a	=	Dwarsliggerafstand [m]
k_s	=	Ballaststijfheid per dwarsliggereinde [N/m]
c_s	=	Ballastdemping per dwarsliggereinde [Ns/m]

3.3.2 Validatie draaistelmodel raildip

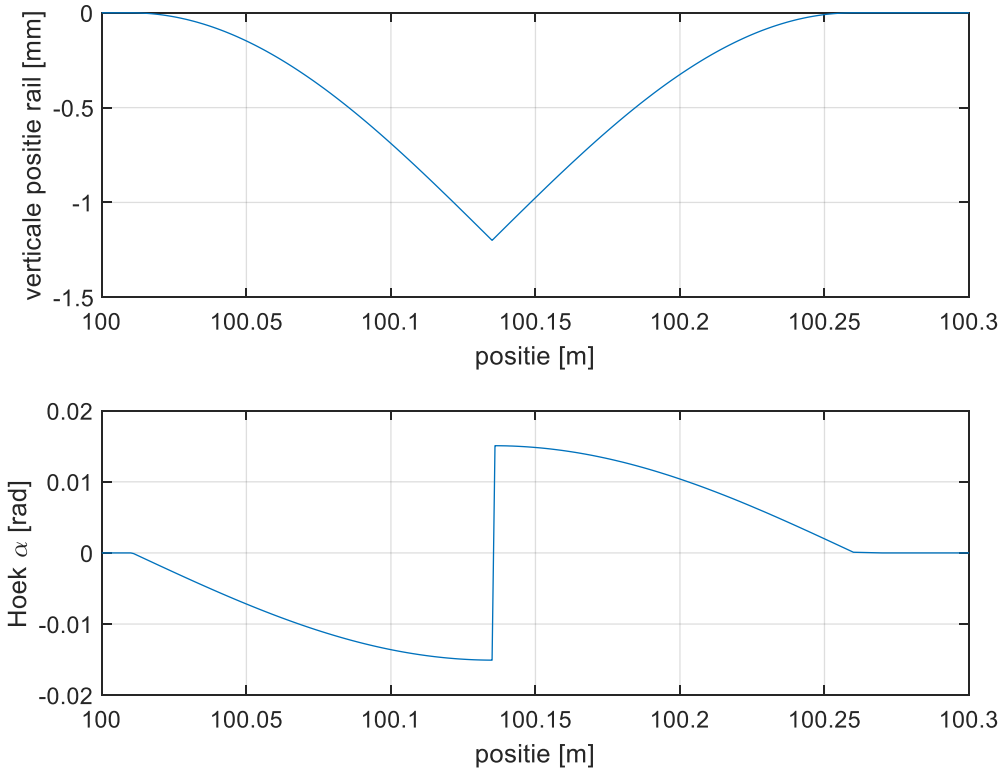
In tegenstelling tot de P1-kracht, die voornamelijk wordt doorgegeven aan alleen de rail en de dwarsligger, wordt de P2-kracht doorgegeven aan de ballast. De P2-kracht lijkt daarom een betere indicatie voor grondtrillingen.

Het ‘multi rigid body’-model in de MBS software pakketten Simpack en Vampire is niet goed genoeg voor simulaties van hoge frequenties, zoals bijvoorbeeld de P1 kracht. Maar het is gebleken dat de P2-kracht wel goed berekend kan worden door MBS programma’s [6] .

Voor de benchmark zijn er simulaties uitgevoerd met het referentiedraaistel over een raildip heen. De verticale geometrie van de raildip is weergegeven in Figuur 17 en Figuur 18



Figuur 17: De verticale geometrie van de raildip



Figuur 18: De gekozen verticale geometrie van de raildip in de simulaties. De lengte is 0.25 m en de diepte is 1.2 mm

Volgens de theoretische berekening van de P2-kracht, is deze kracht afhankelijk van de snelheid. Er zijn simulaties uitgevoerd met een vereenvoudigd draaistelmodel in Simpack en Vampire waarbij de hoek van de raildip α=0.015 rad was, de equivalente stijfheidswaarde per rail was 50 MN/m en de equivalente dempingswaarde per rail was 0.1 MNs/m. De maximale Q-kracht uit de simulaties wordt dan gezien als de P2-kracht. Er zijn voornamelijk simulaties uitgevoerd met het tweede draaistelmodel, waarin de wiegbalk en secundaire vering ontbreken en de massa van de bak aan de massa van het draaistel is toegevoegd. Er zijn ook een paar simulaties in Vampire uitgevoerd over de raildip met het eerste draaistelmodel, waarin de wiegbalk en de secundaire vering wel zijn gemodelleerd en waarin de massa van de bak als externe kracht op de wiegbalk is aangebracht.

De P2-kracht resultaten uit de simulaties met draaistelmodel 2 zijn samen met de theoretisch berekende P2-kracht in Tabel 2 weergegeven voor verschillende snelheden, V=40, 60 en 80 km/u.

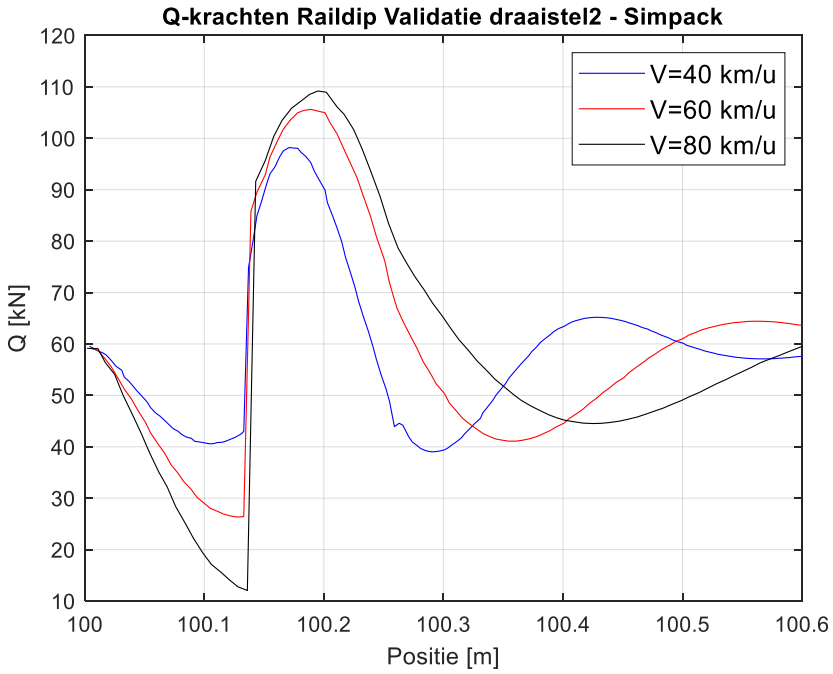
De simulatieresultaten zijn ook weergegeven in Figuur 19 (draaistelmodel 2 Simpack), Figuur 20 (draaistelmodel 2 Vampire) en Figuur 21 (draaistelmodel 1 Vampire).

Tabel 2: Maximale waarden van de Q-kracht uit simulaties met draaistelmodel 2 samen met de theoretische waarden van de P2-kracht voor verschillende snelheden, V=40, 60, 80 km/u.

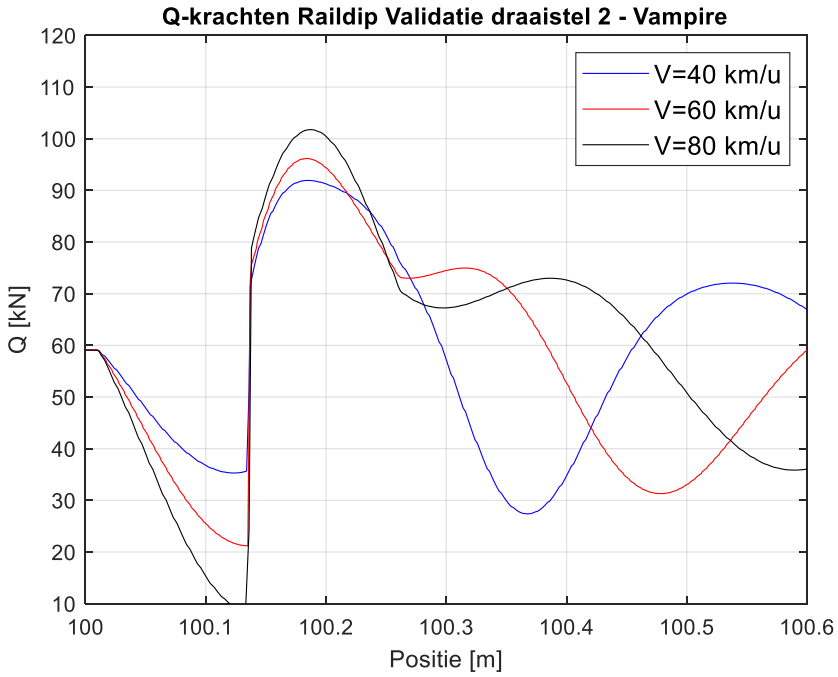
Snelheid [km/u]	P2-kracht theoretisch [kN]	Q-kracht max. Simpack [kN]	Q-kracht max. Vampire [kN]
40	90	98	92
60	106	106	96
80	121	109	102

Uit de resultaten kan geconcludeerd worden dat zowel Simpack als Vampire dicht in de buurt liggen van de theoretisch berekende P2-kracht waarden. Ook laten beiden goed de afhankelijkheid zien tussen de snelheid en de P2-kracht; hoe hoger de snelheid, des te hoger de P2-kracht. Er kan wel opgemerkt worden dat de snelheidsafhankelijkheid in de simulaties wat minder sterk is dan volgens de theorie. Zo liggen de waarden uit de simulaties bij een snelheid van 80 km/u veel lager dan de theoretische waarde van 121 kN. Dit verschil wordt echter minder als er gekeken wordt naar de simulatieresultaten van draaistelmodel 1. Dit model heeft een iets hogere statische wiellast (3.8 kN), maar de resultaten laten duidelijk zien dat de waarden relatief hoger liggen. Er kan tevens opgemerkt worden dat de theoretische P2-kracht een benadering is van de werkelijke P2-kracht. Deze zal dus ook niet helemaal correct zijn.

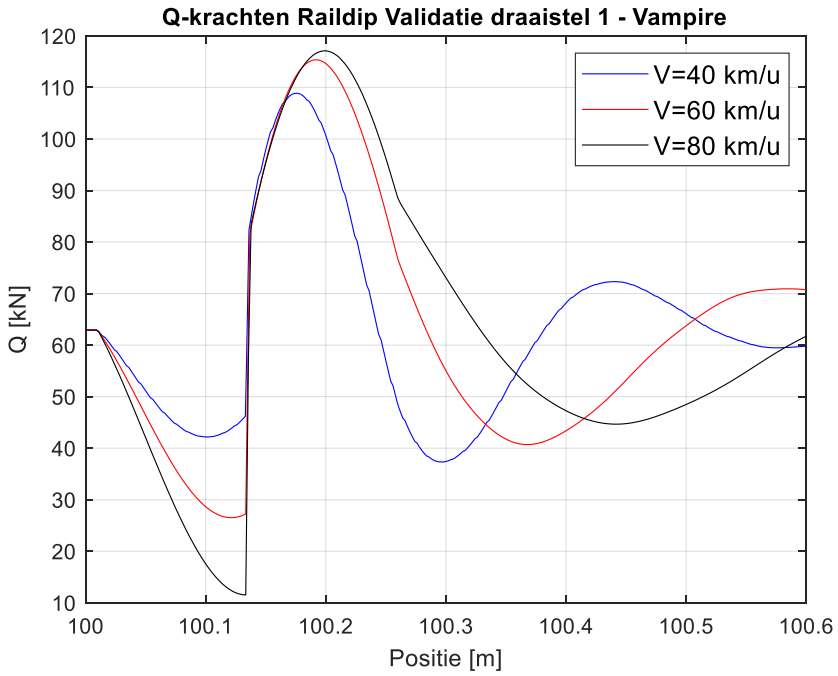
Er kan dus geconcludeerd worden dat zowel Simpack als Vampire een goede indicatie kunnen geven van de invloed van het materieeltype op de P2-kracht. Er dient wel opgemerkt te worden, gezien de verschillen tussen de programma's en gezien dit een benadering is van de werkelijke P2-kracht, dat de resultaten alleen relatief gebruikt kunnen worden. Dus men moet voorzichtig zijn met het vergelijken van de resultaten uit Simpack en Vampire. Alleen kunnen de resultaten uit hetzelfde software pakket onderling met elkaar vergeleken worden en geven deze een relatieve impact van het materieeltype op de P2-kracht en daarmee op bodemtrillingen.



Figuur 19: Simulatieresultaten van de Q-kracht voor verschillende rijsnelheden met het tweede draaistelmodel, berekend met het MBS software pakket Simpack.



Figuur 20: Simulatieresultaten van de Q-kracht voor verschillende rijsnelheden met het tweede draaistelmodel, berekend met het MBS software pakket Vampire.



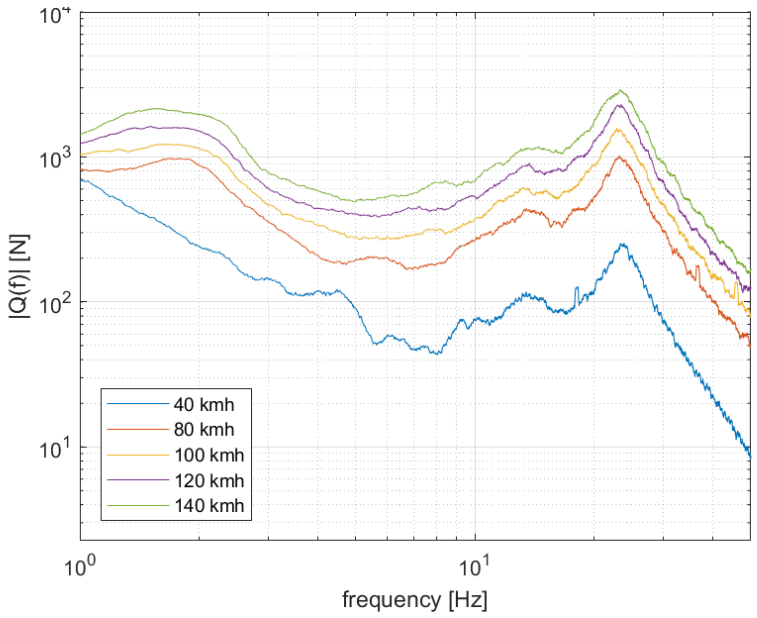
Figuur 21: Simulatieresultaten van de Q-kracht voor verschillende rijsnelheden met het eerste draaistelmodel, berekend met het MBS software pakket Vampire.

4. Beoordelingsmodel

Bij het modelleren van trillingen wordt typisch gebruik gemaakt van de overdracht tussen kracht en trillingssnelheid. Hiermee wordt namelijk grondtrillingen voorspeld op basis van een krachtspectrum. Bij het huidige onderzoek gaat het er juist om wat dit krachtspectrum is en hoe dit wordt beïnvloed door de het draaistel-/voertuigontwerp.

4.1 Synthetisch en praktijkspoor

De simulaties op het theoretisch spoor en het praktijk spoor zijn uitermate geschikt om een dergelijk krachtenspectrum te leveren. Het primaire resultaat van deze simulaties zal dan ook een PSD zijn van de wiel-rail kracht, ook wel de Q kracht. Een voorbeeld van een dergelijke PSD is weergegeven in Figuur 22. Op de x-as staat de frequentie van de kracht. Op de y-as de amplitude van de kracht in Newton. Een dergelijke PSD laat goed zien in welk frequentiegebieden het voertuig de grootste kracht uitoefent op het spoor.



Figuur 22: Voorbeeld van een PSD van de Q kracht

De simulaties worden uitgevoerd met verschillende modellen en snelheden. Voor elke as van elke simulatie wordt een PSD bepaald. Daarmee worden de volgende inzichten gecreëerd

- Afhankelijkheid aspositie voor een gegeven snelheid en voertuigtype;
- Afhankelijkheid van de snelheid voor een voertuigtype;
- Afhankelijkheid van het voertuigtype bij dezelfde snelheid.

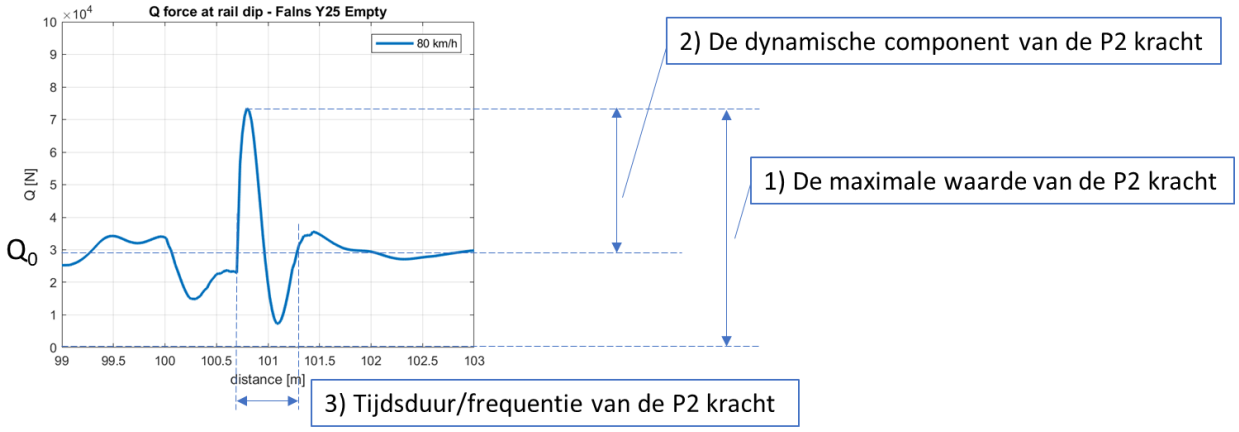
De PSD in van Figuur 22 is een voorbeeld van afhankelijkheid van de snelheid voor een voertuigtype.

4.2 Raildip

Voor de rail-dip kijken we voornamelijk naar de kenmerken van de P2 kracht. Daarbij maken we onderscheid in drie verschillende grootheden:

1. De maximale waarde van de P2 kracht;
2. De maximale waarde van de dynamische component van de P2 kracht;
3. De tijdsduur/frequentie van de P2 kracht.

Om dit te verduidelijken zijn deze kenmerken weergegeven in Figuur 23.



Figuur 23: Kenmerken van de P2 kracht

In de grafiek is een tijdsignaal te zien van de Q kracht bij passage van de rail-dip. De raildip start op bij 100m, wat in eerste instantie leidt tot een reductie van de Q kracht. Halverwege de raildip, raakt het wiel de opgaande flank, wat resulteert in een sterke toenamen van de kracht. De kenmerken van de deze krachtstoename (P2 kracht) worden gebruikt om de trillingsbelasting te kenmerken.

Ook voor de raildip worden simulaties uitgevoerd met meerder voertuigmodellen en snelheden. Elke simulatie levert bovengenoemde kenmerken op van de P2 kracht. Hiermee gaan we vergelijkbare inzichten creëren als met de PSD's. Namelijk de afhankelijkheid van de snelheid en voertuigtype.

5. Referenties

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

[2] OHD00022-2, *Instandhoudingsspecificaties voor de spoorgeometrie*, ProRail.

[3] RIVAS, D5.1, *Train Induced Ground Vibration – Influence of Rolling Stock State-of-the-Art Survey*, 2011.

[4] Mandal N.K. ea., *Impact forces at dipped rail joints*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F Journal of Rail and Rapid Transit, 2014.

[5] Jenkins H.H. ea., The effect of Track and Vehicle Parameters on Wheel/Rail Vertical Dynamic Forces, Railway Engineering Journal, Vol.3, Issue. 1, 1974.

[6] Q. Sun, M. Spiryagin e.a. (2018), 'Feasibility in assessing the dipped rail joint defects through dynamic response of heavy haul locomotive', J. Mod. Transport. 26(2):96–106.