DEKRA

Creating a world fit for the future

RICARDO

Synthese Simulaties voertuigmodellen t.b.v. IBS

Kenmerk	03-842055
Datum:	12 juni 2023
Versie:	1.0

Inleiding

Binnen de Innovatieagenda Bronaanpak Spoortrillingen (IBS) wordt onderzocht hoe bodemtrillingen vanuit het spoorsysteem kunnen worden gereduceerd. Naast maatregelen aan de infrastructuur (constructief en onderhoud) en onderhoudsmaatregelen aan materieel wordt ook gekeken in hoeverre constructieve maatregelen aan materieel kunnen bijdragen aan het reduceren van bodemtrillingen.

Binnen dit deel van IBS wordt gekeken of aanpassingen aan het bestaande Y25 draaistel trillingen kunnen reduceren. Basis hiervoor is projectplan [5]. Afgesproken is om daarvan WP 1 alvast uit te voeren. Hierbij moet een eerste indruk gekregen worden van de effectiviteit van aanpassingen op het reduceren van trillingen als van de (technische, bedrijfseconomische, toelatingstechnische, etc.…) haalbaarheid.

Daarnaast is binnen IBS – en ook bij NS als partner van het IBS - interesse om breder inzicht te krijgen in effecten van materieel op bodemtrillingen. De effecten van constructieve verschillen tussen (goederen/reizigers)locomotieven, goederenwagens met verschillende draaisteltypes en verschillende soorten reizigersmaterieel kunnen relevante inzichten opleveren. Enerzijds bieden die een referentie voor het beoordelen van de effecten van de onderzochte aanpassingen aan de Y25-draaistellen, ook kunnen zulke inzichten materieelhouders in de toekomst bijvoorbeeld helpen bij de bestelling van nieuw materieel bij aanbestedingen.

Binnen STEM wordt een bronmodel opgesteld, waarmee in de toekomst ook de invloed van sommige materieelparameters kunnen worden meegenomen. Op dit moment is er echter ook al heel veel kennis en inzicht te halen van materieeleffecten uit beschikbare dynamische modellen. Om deze inzichten concreet te maken voor IBS hebben DEKRA Rail en Ricardo in overleg met ProRail een gezamenlijk plan van aanpak ontwikkeld. [1]. Dit plan is dusdanig vormgegeven dat verschillende methodiek en resultaten vergelijkbaar worden, maar dat onderzoeken onafhankelijk van elkaar kunnen worden uitgevoerd.

De gekozen aanpak is om de dynamische belasting van verschillende materieeltypes op het spoor door middel van multi-body dynamica simulaties te bepalen en vergelijken. Hierbij rijden treinen virtueel over een spoor met spooronregelmatigheden en zijn de berekende voertuigreacties het resultaat van de simulaties. Uit deze voertuigreacties, meer specifiek de wiel-railkrachten, wordt vervolgens de dynamische belasting op het spoor door het voertuig bepaald. Elke voertuigconstructie heeft hierbij zijn eigen karakteristiek, en door deze te vergelijken kan inzicht verkregen worden hoe de voertuigconstructie kan bijdragen aan het verminderen van trillingsoverlast.

DEKRA en Ricardo hebben elk een deel van de simulaties voor hun rekening genomen. Om te borgen dat beide werkpakketten vergelijkbare resultaten opleveren is er afstemming geweest over de randvoorwaardes van de gebruikte baanmodellen, simulatie-software en de wijze van beoordeling van de output. Dit is vastgelegd in [2]. DEKRA en Ricardo hebben elk kun resultaten vastgelegd in respectievelijk rapportage [3] en [4].

Het doel van deze notitie is een synthese te geven van de inzichten en conclusies die in beide rapporten zijn verkregen.

Samenvatting uitgevoerde simulaties

Voor de simulaties worden drie verschillende spoormodellen gebruikt:

1. Een theoretisch spoor waarbij de spoorligging (spooronregelmatigheden) is opgesteld conform de methode gedefinieerd in ERRI rapport B176, waarbij deze verder is aangepast aan het kwaliteitsniveau van het Nederlandse spoor. Dit spoor stoot het voertuig breedbandig aan. Daarmee kan de dynamische belasting in alle voor trillingen relevante golflengtes worden bepaald;
2. Een praktijk spoor van ca. 1 km waarop zowel goederen- als reizigerstreinen rijden waar in het recent verleden trillingsmetingen zijn uitgevoerd. Met de resultaten van dit spoor kan de gesimuleerde dynamische belasting worden vergeleken met de gemeten dynamische belasting;
3. 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. Dergelijke kortdurende krachten geven in praktijk ook aanleiding tot dynamische belasting c.q. trillingsklachten.

Op basis van deze drie spoormodellen zijn simulaties uitgevoerd met verschillende voertuigmodellen en met verschillende rijsnelheden en belading.

Door DEKRA zijn er simulaties uitgevoerd aan Falns wagons met in totaal vijf verschillende ontwerpvarianten van het Y25 draaistel in combinatie met een bestaand voertuigmodel van de Falns goederenwagen. Vier van deze vijf varianten betreffen modificaties die relatief eenvoudig binnen het bestaande Y25 draaistel kunnen worden doorgevoerd:

- Een verlaagde onafgeveerde (wielstel) massa (VAR1)
- Een verlaagde verticale stijfheid door een rubber ring onder de draaikom (VAR2)
- Een modificatie van de primaire vering dmv de gigabox (VAR3)
- Een aanpassing van de verende schuifstukken (VAR4)

De onderzochte vijfde variant (VAR5) betreft een uitvoering met zwenkarmen wat dusdanig afwijkt dat er sprake is van een ander draaisteltype.

Door Ricardo zijn er ook simulaties uitgevoerd aan Falns wagons met het standaard Y25 draaistel en een variant met 3-piece bogie. Daarnaast zijn er ook drie locomotief types en zes types reizigersmaterieel gesimuleerd.

Van de simulatieresultaten, zijn de verticale krachten in het wiel-rail contact (Q-krachten) gebruikt. Hiervan is een gemiddelde FFT bepaald (Fast Fourier Transfrom) zodat van alle wielen de frequentie inhoud zichtbaar wordt. Doordat er gemiddeld wordt over alle assen wordt een inzicht verkregen dat het meest representatief is voor het materieel, maar zeker bij het reizigersmaterieel moet er rekening mee gehouden worden dat door de verschillende draaistelconstructies binnen een treinstel er verschillen in de dynamische belasting per as kan zijn.

Onderstaande tabel geeft een overzicht van de uitgevoerde runs:

Voertuigtype	40 km/u	80 km/u	100 km/u	120 km/u	140 km/u	160 km/u
Scope Ricardo						
Falns Y25 Leeg/beladen	x	x	x	x (L)	-	-
Falns 3-piece Leeg/beladen	x	x	x	x (L)	-	-
Class'66 locomotief	x	x	x	x	-	-
Loc1700 locomotief	x	x	x	x	x	-
Traxx locomotief	x	x	x	x	x	-
VIRM mBvk1 leeg	x	x	x	x	x	-
ICMm mBFk leeg	x	x	x	x	x	x
DDZ ABvk leeg	x	x	x	x	x	-
SLT 4-baks leeg	x	x	x	x	x	x
SNG 4-baks leeg	x	x	x	x	x	x
Flirt IV leeg	x	x	x	x	x	-

Scope DEKRA						
Falns Y25 Leeg/beladen	x	x	x	x (L)	-	-
VAR1 onafgeveerde massa	x	x	x	x (L)	-	-
VAR2 Reduced Vertical Stiffness	x	x	x	x (L)	-	-
VAR3 Gigabox	x	x	x	x (L)	-	-
VAR4 Silent Blocks Side Bearers	x	x	x	x (L)	-	-
VAR5 Zwenkarmen	x	x	x	x (L)	-	-

(L) = alleen leeg

Conclusies uit de uitgevoerde simulaties

A) Generieke conclusies over de gekozen aanpak en bruikbaarheid van deze aanpak

In algemene zin zien we dat de onderzoeksopzet een goed inzicht geeft in de dynamische belasting per as van voertuigen op het spoor onder invloed van hoogteafwijkingen van het spoor. Verschillen tussen voertuigen komen goed tot uiting en de onderlinge verschillen komen ook overeen met de ervaring vanuit de praktijk. De informatie in dit rapport is daarmee praktisch bruikbaar om trillingshinder beter te begrijpen en helpen bij het voorspellen van trillingshinder.

Daarbij is het goed om te realiseren dat de dynamische belasting van het voertuig op het spoor slechts één van de aspecten is die de uiteindelijke trillingsoverlast bepaalt. Deze is afhankelijk van een veelheid aan factoren zoals de aanwezige wielonrondheden of spooronregelmatigheden, het aantal assen van een trein en hun onderlinge afstand en de dynamische eigenschappen van de spoorinfra, de directe omgeving en eventuele gebouwen.

Bij de interpretatie van de hier gepresenteerde resultaten in het kader van de vermindering van trillingshinder is voor ieder type baanlichaam/ondergrond/bodem belangrijk te weten welke grondtrillingen kritisch zijn, dus in welk frequentiebereik deze trillingen worden doorgevoerd. Hoe slapper de bodem, hoe lager de kritische frequentie naar verwachting zal zijn. Omdat er voor de Nederlandse situatie nog onvoldoende bekend is over de eigenschappen van de ondergrond, kan hiermee nu nog geen rekening gehouden worden. Er wordt daarom aanbevolen om voor iedere type baanlichaam/ondergrond/bodem te onderzoeken welk frequentiebereik als kritisch geldt in relatie tot het doorgeven van grondtrillingen. Daarnaast is van groot belang voor de verschillende situaties inzichtelijk te hebben wat de relevante mechanismes van trillingsopwekking zijn en hoe het dynamisch voertuiggedrag daarin een rol speelt. Met deze informatie kan vervolgens worden beoordeeld hoe de hier in kaart gebrachte verschillen in dynamisch gedrag tussen voertuigtypes en draaistelvarianten daadwerkelijk invloed hebben op hinder en of draaistelvarianten dus de potentie hebben om grondtrillingen te verminderen. Een indicatie hieromtrent kan evenwel worden verkregen op grond van bekende locaties waar trillingshinder optreedt in relatie tot materieeltype/ baanbelasting.

B) Over de dynamische belastingen bij verschillende voertuig categorieën

Ten aanzien van het verschil tussen de verschillende voertuigtypen (bij gelijke snelheid) zien we de volgende kenmerken:

- Uit de simulatieresultaten van zowel DEKRA als Ricardo is gebleken dat voor alle baanmodellen het Q-krachten niveau van de beladen goederenwagen significant boven die voor de lege goederenwagen ligt bij frequenties onder de 20 Hz. Bij hogere frequenties, is er nauwelijks verschil tussen leeg en beladen. De resultaten van de beladen wagen zijn daarmee maatgevend ten opzichte van lege wagens.

- Tot een frequentie van ca 5 Hz resulteren de beladen goederenwagens ook t.o.v. de locomotieven en reizigerstreinen in de hoogste dynamische belasting per as. Dit hangt samen met de beweging van bak inclusief zware belading in de primaire vering.

- Tussen de ca 5 Hz en 10 Hz leveren de Traxx locomotief en de beladen goederenwagen met het standaard Y25 draaistel de hoogste belasting. Trillingen in dit frequentiegebied worden

veroorzaakt door de verticale beweging van het draaistel in de primaire vering. Het is daarbij opmerkelijk dat de belasting van Traxx hoger is dan die van de Loc1700 en de Class 66.

- Bij frequenties tussen de ca 10 Hz en 30Hz leveren de drie locomotieven de hoogste dynamische belasting per as. Deze hangt samen met bewegingen van het zware wielstel in de primaire vering. De belasting per as van de reizigerstreinen en goederenwagens zijn vergelijkbaar en liggen op een aanzienlijk lager niveau.

- Boven de 30 Hz neemt de dynamische belasting snel af en is deze vergelijkbaar voor de verschillende typen voertuigen. Wel zien we in dit bereik de specifieke frequentie ten gevolge van de dwarsliggerafstand terug komen als een flinke belastingspiek. Bij 80 km/u en 100 km/u zijn deze frequenties respectievelijk 37 Hz en 46 Hz

Ten aanzien van de snelheidsafhankelijkheid zien we dat een toename van snelheid op het theoretische ERRI spoor resulteert in een toename van de verticale aanstoting in alle golflengtes/frequenties. Voor locomotieven en reizigersmaterieel leidt dit tot een belastingsspectrum dat vrijwel gelijk blijft qua vorm en toeneemt in amplitude. Gemiddeld een factor 10 bij het verhogen van de rijsnelheid van 40 km/u uur tot 140 km/u. Bij de goederenwagens neemt de belasting eveneens toe, maar verandert tegelijkertijd de karakteristiek van de belasting. Dit hang samen met het niet-lineaire gedrag van sommige constructie elementen (zoals wrijvingsplaten), waardoor het dynamisch gedrag verandert afhankelijk van de amplitude van de aanstoting. Dit in tegenstelling tot reizigersmaterieel en locomotieven die zich grotendeels lineair gedragen.

Ten aanzien van het type goederendraaistel valt op dat de beladen goederenwagen met de 3-piece bogie tussen de 5 en 10 Hz een 2 tot 4x lagere dynamische belasting geeft dan de referentie versie met het Y25 draaistel. Ook de beoordeelde variant (VAR5), waarbij de wielstellen door middel van zwenkarmen en hydraulische lagering zijn bevestigd aan het draaistelframe, een duidelijke verlaging laat zien voor het niveau van de dynamische belasting in het frequentiegebied 3-10 Hz en voor de Schalkwijk spoorligging zelfs van 1-10 Hz. In het frequentiegebied tussen 20-30 Hz is er echter sprake van een lichte toename van de dynamische belasting. Een ander type goederendraaistel geeft een ander dynamisch gedag wat in potentie kan bijdragen aan een vermindering van trillingshinder van een goederenwagen.

Bij het vergelijken van gemengd verkeer (goederenwagens bij 80 km/u en reizigersmaterieel bij 140 km/u) zien we dat goederenwagens tot ca 5 Hz de hoogste dynamische belasting per as geven. Boven de 8 Hz à 9 Hz is de dynamische belasting per as van het reizigersmaterieel het hoogst. Op basis van de spoorgeometrie van Schalkwijk is de bijdrage van deze hoge frequenties aan de totale belasting op deze specifieke locatie echter beperkt.

Het praktijkspoor bij Schalkwijk laat vooral zien dat de bijdrage bij golflengten kleiner dan 3 m, en overeenkomstige frequenties, lager is dan bij het theoretische ERRI spoor. Dit resulteert vooral in een lagere dynamische belasting bij hogere frequenties. Het effect hiervan is onder andere dat de dominante trillingen van de locomotieven tussen de 10 Hz en 30 Hz hier vrijwel geen rol spelen.

Bovenstaande conclusies zijn de globale trends in de dynamische belasting. De FFT van de specifieke voertuigen en/of snelheden kunnen hier in detail (behoorlijk) van afwijken. Het is goed om dit in het achterhoofd te houden met het onderzoeken en verklaren van specifieke trillingsproblemen / -gedrag.

Bij de beoordeling van de dynamische belasting i.r.t. de rail-dip zien we twee invloedsfactoren: die van de onafgeveerde massa en die van de aslast. De krachtstoename ten gevolge van de rail-dip wordt gedomineerd door de onafgeveerde massa. Die is het hoogst voor locomotieven. Ruim daaronder ligt de krachttoename van de reizigerstreinen en de goederenwagens. Vanwege de lage onafgeveerde massa is die voor goederenwagens het laagst. Wanneer we kijken naar de maximale totale kracht bij de rail-dip speelt ook de aslast een rol. Dan leveren de beladen goederenwagens een relatief hoge belasting die tussen die van de locomotieven en die van het reizigersmaterieel ligt.

C) Over de mogelijkheid om trillingen te reduceren bij goederenwagens met aanpassingen in het Y25 draaistel

Op basis van de simulatieresultaten van DEKRA zijn de resultaten van de verschillende ontwerpvarianten vergeleken met de resultaten van het standaard Y25 draaistel (referentie).

- Op basis van de resultaten van de raildip simulaties kan er geconcludeerd worden dat behalve voor draaistelvariant VAR2 (Reduced Vertical Stiffness en VAR4 (Silent Blocks Side Bearers) er voor alle varianten een verlaging van de maximale Q-kracht (dynamische kracht) optreedt ten opzichte van het referentiemodel. Voor VAR3 (Gigabox) is deze afname het grootst.

- Met betrekking tot de optredende verticale wielkrachten (Q-krachten) kan er samenvattend geconcludeerd worden dat het veranderen van de parameters van het draaistel (stijfheid, demping, massa etc.) een frequentieverschuiving veroorzaakt in de voertuigreactie, waardoor de hoogste voertuigrespons naar een ander frequentiebereik wordt verplaatst. Afhankelijk van het kritische frequentiebereik, het frequentiegebied waarbinnen trillingen vanuit de baan worden doorgegeven en door omwonenden als hinderlijk worden ervaren, kan een draaistelvariant daardoor hinder in potentie laten toe- of afnemen.

- Ten aanzien van de invloed van de snelheid kan er geconcludeerd worden dat een toename van de snelheid resulteert in een toename van de voertuigreacties (Q-krachten) in het hele golflengtegebied (1-50Hz). Vooral in het hogere frequentiegebied 20 – 50 Hz ontstaat er een sterke verhoging, naarmate de snelheid toeneemt. Het relatieve verschil in Q-kracht tussen de draaistelvarianten neemt toe bij toenemende snelheid. Dus hoe hoger de snelheid, hoe hoger de invloed van de draaistel-variant op de resulterende Q-kracht.

- De draaistelvariant die voor alle baanmodellen en het gehele frequentiebereik gelijk is of een verbetering laat zien, is VAR1 RUM, waarbij de onafgeveerde massa is verlaagd. De verbetering is zichtbaar bij frequenties hoger dan 10 Hz.

- Op basis van de huidige inzichten lijkt de meest effectieve optimalisatie van het Y25 draaistel-ontwerp te liggen in de combinatie van VAR1 (onafgeveerde massa), VAR2 (rubberen ring in draaikom) en, wanneer de spoorligging Schalkwijk als representatief kan worden gesteld, VAR3 (Gigabox).

Aanbevelingen naar aanleiding van de uitgevoerde simulaties

In dit onderzoek is gekeken naar de dynamische belasting van railvoertuigen onder invloed van de verticale aanstoting vanuit het spoor. De werkelijke trillingsoverlast wordt echter bepaald door een veelheid aan factoren zoals de lokale spooronregelmatigheden, wielonrondheden, het aantal assen van een trein en hun onderlinge afstand en de dynamische eigenschappen van het spoor, de directe omgeving en de gebouwen. Om de werkelijke dynamische belasting voor de ontvanger te kunnen bepalen moeten al deze eigenschappen/invloeden bekend zijn. Om hier inzicht in te krijgen bevelen we het volgende aan:

- Omdat de spoorligging van grote invloed is op het optredende trillingsniveau bij de verschillende materieelsoorten als ook op de effectiviteit van de onderzochte draaistelvarianten voor het goederenmaterieel wordt aanbevolen om vast te stellen welke spoorligging representatief is voor de verschillende (hinder)locaties binnen de Nederlandse infra. We stellen daarbij voor om in kaart te brengen hoe groot de verticale spoorafwijkingen daar zijn in het voor trillingen relevante golflengtegebied (0,2 m – 10 m). Door deze te relateren aan die van het theoretische ERRI spoor kunnen de in dit onderzoek afgeleide FFT's gericht worden ingezet om de dynamische belasting en effectiviteit van de verschillende draaistelvarianten beter in te schatten en eventueel trillingshinder beter te begrijpen.

- Aanbevolen wordt voor verschillende types baanlichaam/ondergrond/bodem vast te stellen welk frequentiebereik als kritisch geldt in relatie tot het doorgeven van grondtrillingen. Met

deze informatie kan vervolgens worden beoordeeld welke van de onderzochte draaistelvarianten of combinaties daadwerkelijk de potentie heeft om grondtrillingen te verminderen en hoe de verschillende materieelsoorten daadwerkelijk tot meer of minder overlast leiden. Een mogelijkheid om hierin verder inzicht te verkrijgen ligt in de analyse van trillingshinder/ klachten in relatie tot de baanbelasting; onderzoek van locaties waar veel trillingsoverlast wordt ervaren welk materieeltype(n) deze overlast meest waarschijnlijk veroorzaakt. Binnen het projectdeel dat is uitgevoerd door Ricardo [4] is de dynamische belasting van verschillende bestaande materieeltypen is inzichtelijk gemaakt. Dit maakt het mogelijk om het kritische frequentiebereik voor hinder-locaties vast te stellen en als input te gebruiken voor keuzes met betrekking tot draaistelontwerp-optimalisatie als ook optimalisatie van het onderhoudsregime van de spoorligging.

- Met betrekking tot de meest effectieve optimalisatie van het Y25 draaistel-ontwerp kan overwogen worden door middel van aanvullende simulaties het effect te onderzoeken van de combinatie van de ontwerpaanpassingen: VAR1 (verlaging onafgeveerde massa), VAR2 (rubberen ring in draaikom) en VAR3 (primaire vering type ‘Gigabox’).

- De resultaten van dit onderzoek kunnen worden gekoppeld aan het nog te ontwikkelen trlllingsmodel dat bij STEM wordt ontwikkeld. Zo kan bij het trillingsmodel van STEM de invloed van het voertuig in veel detail en zekerheid worden meegenomen.

- De inzichten in hoe materieel in zijn algemeenheid afhankelijk van de frequentie van aanstoting zich gedraagt (en de materieeltype en snelheidsafhankelijkheid) kunnen gebruikt worden bij het bepalen van generieke grenswaarden voor omgevingsgericht baanonderhoud.

- Overweeg de inzichten uit de rapportage en de gebruikte methodiek als middel om trillingseisen aan nieuwbouwmaterieel te specificeren en/of toetsen.

- Overwogen kan worden om de gekozen aanpak ook toe te passen om de impact van onderhoudseffecten (bijvoorbeeld versleten hydraulische/wrijvingsdempers, wieldefecten) of constructiewijzigingen (bijvoorbeeld ander type dempers, gewichtsreductie van wielen etc.) bij de verschillende materieeltypes in kaart te brengen.

Referenties

[1] Trillingsvriendelijk Goederenmaterieel – simulaties tbv bureaustudie draaistelconfiguratie – Voorstel voor een plan van aanpak – Door DEKRA Rail en Ricardo – Datum 21/12/2021 (Ricardo ref 03-828403)

[2] IBS-simulaties trillingsbelasting – baanmodel en beoordelingsmodel – DEKRA Rail en Ricardo – 2-11-2022 (Ricardo ref 03-838477)

[3] Trillingsvriendelijk Goederenmaterieel – Simulaties t.b.v. bureaustudie draaistelconfiguratie – DEKRA Rail – Babette Dirks en Martin Hiensch – kenmerk DR/21/210496/005 – 22 april 2023

[4] Innovatieagenda Bronaanpak Spoortrillingen (IBS) – Simulaties van dynamische belasting op het spoor – Ricardo Rail – Thijs Roeleveld en Dennis de Jong – kenmerk SII/TR/6913/03-839617 – versie 1.0 18 april 2023

[5] Project plan – Reduction of ground borne vibrations by Y25 design optimization (Y25+) – Version 2.1 – 18 March 2021