

Trillingskwaliteit Brabantroute

Vaststelling nulsituatie en hotspots,
onderzoek naar effect wissels en
dwarsliggers

Rapportnummer: LA.210903.R01

Plaats en datum: Eindhoven, 18 juni 2025

Versie: 1.1

Opdrachtgever: ProRail

Uitgevoerd door: Level Acoustics & Vibration

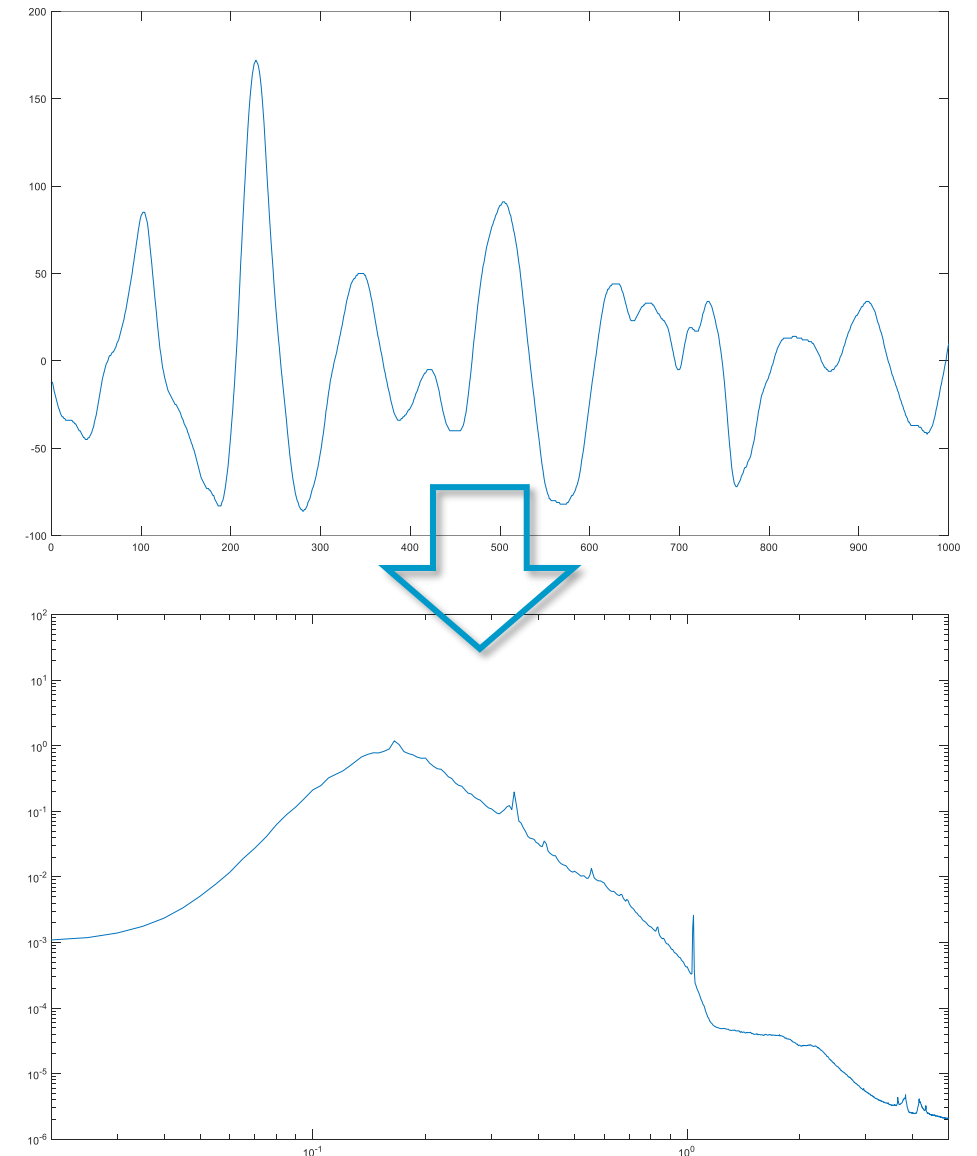
Auteur(s): Arnold Koopman

E-mail: arnold.koopman@levelav.nl

Telefoon: 040 2472700

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag openbaar gemaakt worden of aan derden beschikbaar gesteld worden zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Level Acoustics & Vibration. Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden van Level Acoustics & Vibration, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst. Het ter inzage tonen van het Level Acoustics & Vibration rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

1. Doel
2. Aanpak
3. Achtergronden
4. Nulsituatie, hotspots, gaten
5. Spoorwegovergang Breda
6. Hout versus beton
7. Wissels
8. Conclusies en aanbevelingen



1. Doel

Anno 2021 is ProRail voornemens het intensief gebruik van de Brabantroute (de goederencorridor tussen Kijfhoek en Venlo via Breda) langer voort te zetten dan eerder gepland. In de huidige situatie zijn er langs de route reeds veel klachten over geluid en trillingen. ProRail onderzoekt of “hotspots” in de baan kunnen worden weggenomen.

Bovenliggend doel is het aandragen van algemene inzichten en specifieke hotspots voor de ProRail-interne beleidsvraag wat er extra (zijnde bovenwettelijk en los van projectbesluiten) voor de omgeving van de Brabantroute kan worden gedaan op het gebied van spoortrillingen.

1. **Vaststellen nulsituatie en identificeren van hotspots op de Brabantroute**, op basis van de campagnes van het meetrijtuig, zoals vastgelegd in BBMS.
2. **Uitbreiden van de bestaande dataset met de meetcampagnes najaar 2020 en voorjaar 2021 en met de parameter D0 vanaf voorjaar 2020.**
D0 betreft hoogte- en liggingsdata die met groot detail (per 5 cm spoor) is vastgelegd waardoor de voor omgevingstrillingen belangrijke frequenties tussen de 10 en de 30 Hz beter kunnen worden beoordeeld.
3. **Versnelde evaluatie van een hotspot: een spoorwegovergang in Breda.**
4. **Beantwoorden van enkele voor de Brabantroute relevante algemene onderzoeksvragen over trillingskwaliteit**
 - a. Zijn de “gaten” in de data van het meetrijtuig, bijv. bij emplacementen, problematisch (en vragen die dus om een oplossing) of niet (want bijv. meestal ver van woningen en/of lage snelheid dus lage emissie)?
 - b. Wat is het effect van type dwarsligger (beton vs hout bijvoorbeeld) op de trillingskwaliteit?
 - c. Is het van belang wissels als bovenbouw element apart te beschrijven en beoordelen? Wissels zijn voor de trillingskwaliteitparameters complexe objecten, ook in relatie met de inzet van het meetrijtuig (rijdt niet consequent door alle wisselrichtingen) en de data-boekhouding op basis van het spoortakkenmodel lopende van wissel tot wissel. Mogelijk is het reeds voldoende de ES-lassen erin alleen in ogenschouw te nemen.

Dit rapport doet kort verslag van de resultaten van dit onderzoek, met name wat betreft onderdelen 1, 3, 4b en 4c.

Het resultaat van onderdeel 2 is enerzijds het mogelijk maken van de uitvoering van de andere onderdelen. Anderzijds heeft onderdeel 2 geleid tot een verbeterde versie van Spoorligger, de webapp waarmee de spoorliggingskwaliteitparameters toegankelijk is gemaakt voor ProRail.

2. Aanpak

De basis van het onderzoek wordt gevormd door BBMS-data, hoogte en schift, zoals halfjaarlijks bemonsterd door een meetrijtuig.

Deze data wordt verwerkt tot metrieken (RMS en Max,fast) die geacht worden representatief te zijn voor de rol die spoorligging speelt in het ontstaan van bodemtrillingen in de omgeving tijdens treinpassages. Deze metrieken zijn ontworpen en onderzocht in een eerder onderzoek (zie Level rapport LA.200902.R01, 23 maart 2022).

Voor het meten en vastleggen van hoogte en schift kent BBMS verschillende parameters die zich onderscheiden naar golflengtegebieden. Golflengtes in het spoor leiden bij een gegeven treinsnelheid tot trillingsfrequenties in de omgeving. Het frequentiegebied dat in de praktijk van belang is, in woningen bijvoorbeeld, strekt zich ongeveer uit van 6 Hz tot 60 Hz. Terugvertaald naar de golflengtegebieden van BBMS gaat het om de data van D0 ("korte golf") en D1 (de door aannemers meest gebruikte parameter).

Het project kent twee delen, elk met een aantal stappen

Deel A: vergaren informatie (doelen 1, 2 en 3)

1. Uitbreiden van de dataset (die start met de campagnes van 2014) met de meest recente campagnes en met de parameter D0.
2. Evaluatie spoorwegovergang Breda.
3. Vastleggen 'nulsituatie' Brabantroute, door de trend van de ontwikkeling van 2014 t/m 2021 vast te stellen, een nuljaar te kiezen (zoals de campagne vlak voor start intensivering gebruik Brabantroute) en die nulsituatie vast te leggen en op een kaart te presenteren.
4. Identificeren absolute hotspots, zijnde plekken waar verhoogde trillingsniveaus te verwachten zijn vanwege een trillingskwaliteit die sterk afwijkt van een gemiddelde doorgaande baan in NL.
5. Identificeren relatieve hotspots, zijnde objecten waarvan de trillingskwaliteit aanmerkelijk/merkbaar afwijkt van wat voor een dergelijk object in NL gemiddeld gebruikelijk is (dus slechte overwegen, slechte ES-lassen, etc.).
6. Afbakening onderzoeksgebied: selectie van hotspots in de buurt van woningen.
7. Ranking van hotspots uit oogpunt van omgevingsbelang. Daartoe wordt het spoortrillingsmodel OURS gerund, met als input de trillingskwaliteit van 2021 en de woningen in het BAG bestand, met als doel het identificeren welke absolute en/of relatieve hotspots relevant zijn. Daarvoor worden de sommen twee maal gedraaid: met en zonder de hotspots.
8. Effect bepalen van het type dwarsligger op de trillingskwaliteit op basis van de dataset van 2020.

Deel B: verdieping (doelen 1 en 4)

1. Identificeren van gaten (blind spots) in de hotspotidentificatie: met name de plekken waar het meetrijtuig niet komt of te langzaam rijdt. Een voorbeeld daarvan zijn emplacementen. Vaststellen of deze gaten nader (niet nader bepaalde) onderzoek behoeven, bijvoorbeeld vanwege de combi van hoge baanvaknelheid en nabijheid woningen of dat deze gaten kunnen worden genegeerd.
2. Onderzoek of van wissels en kruisingen een apart topic moet worden gemaakt. Objecten die nu apart worden behandeld en beoordeeld zijn met name stootplaten, bruggen, viaducten, duikers, ES-lassen en spoorwegovergangen. Dit onderzoek behelst dat een specifiek wisselcomplex, bijv. in een buurt waar veel klachten zijn, onder de loep wordt genomen en geanalyseerd. Dat impliceert het handmatig verzamelen en combineren van meetrijtuigdata, toepassen van de algoritmes, uitpluizen van bijdragen van ES-lassen en wisselpunten en onderscheiden naar rechtstand en boogstand. Dit leidt enerzijds tot inzicht in de wijze waarop wissels (automatisch) moeten worden verwerkt door het algoritme en anderzijds tot een beschrijving van de trillingskwaliteit van een wissel (gemiddelde ligging over 200 meter, gemiddelde van piekwaardes, enkele piekwaarde met locatie, etc.).

Stappen 6 en 7 van deel A en stap 1 van deel B zijn uiteindelijk achterwege gelaten. De focus is gaande het project komen te liggen op hotspots waarover met aannemers afspraken te maken zijn voor nader onderhoud, teneinde de haalbaarheid van hotspot gericht onderhoud te onderzoeken.

De aanpak kent een aantal uitdagingen die eerst moeten worden opgelost. De volgende bladzijde geeft een overzicht van de belangrijkste van deze.

- D0

D0, de “korte golf”, wordt sinds 2020 opgeslagen in BBMS. In tegenstelling tot de andere BBMS data, die per 25 cm wordt bemonsterd, wordt D0 per 5 cm bepaald en opgeslagen. De uitdaging is deze data (ongeveer 140 miljoen datapunten) in te lezen en te verwerken op een parallelle wijze als reeds ontwikkeld is voor D12. De vraag is hoe D0 filters (toegepast op het meetrijtuig of bij verwerking naar BBMS toe) de naverwerking beïnvloedt en of D0 bij de golflengten die overlappen met D12 (tussen 3 en 5 meter) dezelfde resultaten levert.

- Spoortakken 2.0

In het nieuwe spoortakkenmodel is een spoortak (een stuk spoor van wissel tot wissel) verder opgedeeld in 3 of meer segmenten. Voor de naverwerking naar trillingskwaliteit toe worden stukken spoor van 200 meter in zijn geheel in beschouwing genomen. Met de nieuwe segmenten indeling is de puzzel groter geworden (t.o.v. het oude spoortakkenmodel).

- Wissels

Een wissel is een boekhoudkundige uitdaging: er bestaat uit meerdere spoortakken en spoorsegmenten en het kent meerdere trillingsgenererende elementen: het wisselpunt, ES-lassen, bogen.

- Brabantroute

Goederentreinen reiden van Venlo naar Kijfhoek en v.v. De reeks aan spoorsegmenten die in volgorde worden bereden dient te worden bepaald. Bij doorgaand spoor is dat nog relatief eenvoudig maar bij een emplacement aangekomen is de vraag wat de routing is. Aan de hand van een rapportage van een aantal goederenpaden (van bepaalde vervoerders in een bepaalde week) van de Verkeersleiding zijn opvolgreeksen (en rijrichtingen binnen een spoorsegment) te bepalen.

- Koppeling D12-D0-Spoortak1.0-Spoortak2.0-Assets

De verschillende databestanden beschrijven het spoor met verschillende grids: 5 cm (D0), 25 cm (D12), kmvan-kmtot (assets). Er is een mapping nodig naar een gezamenlijk grid, om verschillende soorten data te koppelen. Zie de volgende sheet.

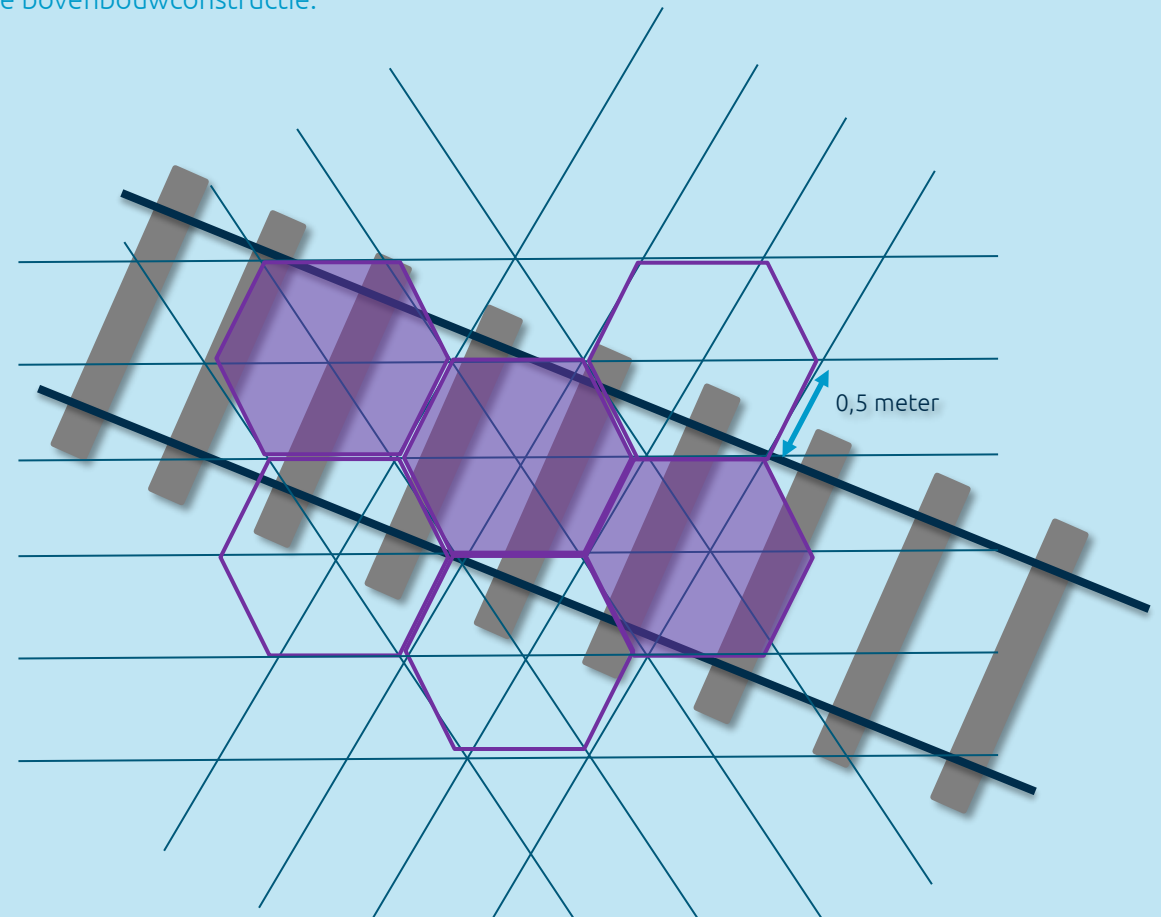
- Betrouwbare asset lijsten

Assetlijsten (bestanden met per asset een reeks aan eigenschappen zoals locatie, plaatsingsdatum en type) worden binnen Prorail op verschillende wijzen ontsloten (GIS applicaties, achterliggende SAP systemen, etc.). Elk asset wordt onderhouden door een aannemer maar de staat ervan, nu of in het verleden, wordt niet altijd accuraat en tijdig bijgehouden in de systemen en de propagatie van updates door de systemen is in principe ook niet onmiddellijk. Van een willekeurige assetlijst is het dus vaak niet duidelijk hoe betrouwbaar deze is.

Hexagon's

De verschillende databestanden beschrijven het spoor met verschillende grids: 5 cm (D0), 25 cm (D12), kmvan-kmtot (assets). Er is een mapping nodig naar een gezamenlijk grid, om verschillende soorten data te koppelen.

Om los te komen van spoortakmodellen (die steeds tijdelijk zijn en complex in gebruik) maar tegelijkertijd wel rekening te houden met het vertakkend karakter van het spoor is in plaats van een 1D grid een 2D grid een oplossing. Met een vergritting van Nederland door middel van hexagons met zijdes van 0,5 meter wordt het spoornet opgedeeld in losse punten met onderlinge afstanden van ongeveer 1 meter (zie illustratie hieronder). Aan elk hexagon kunnen spoormetrieken worden toegekend en assetkenmerken zoals aanwezigheid van ES-las of overgang in de bovenbouwconstructie.



3. Achtergronden

Startpunt is het gebruik van data dat reeds procesmatig wordt ingewonnen. Dat is op dit moment de data van de halfjaarlijkse campagnes met een meetrijtuig. In de toekomst zou dat eventueel ook de data kunnen zijn van reguliere reizigerstreinen die voorzien zijn van sensoren.

Van het meetrijtuig is de volgende ruwe data gebruikt:

- Hoogte en Shift
- gemiddeld over de twee spoorstaven (dus: Midden)
- D1

D1 is een golflengtegebied. Een veld (cq attribuut, eigenschap, feature, etc.) in de database is bijv. D1_Hoogte_Midden.

Er zijn 13 campagnes gebruikt: van voorjaar 2014 t/m voorjaar 2020.

(In eerdere campagnes was de plaatsbepaling niet op basis van het spoortakkenmodel maar op basis van geocodes, wat de verwerking complexer maakt.)

Toelichting:

D1: golflengtegebied 3 – 25 meter , 25 cm samplefrequentie

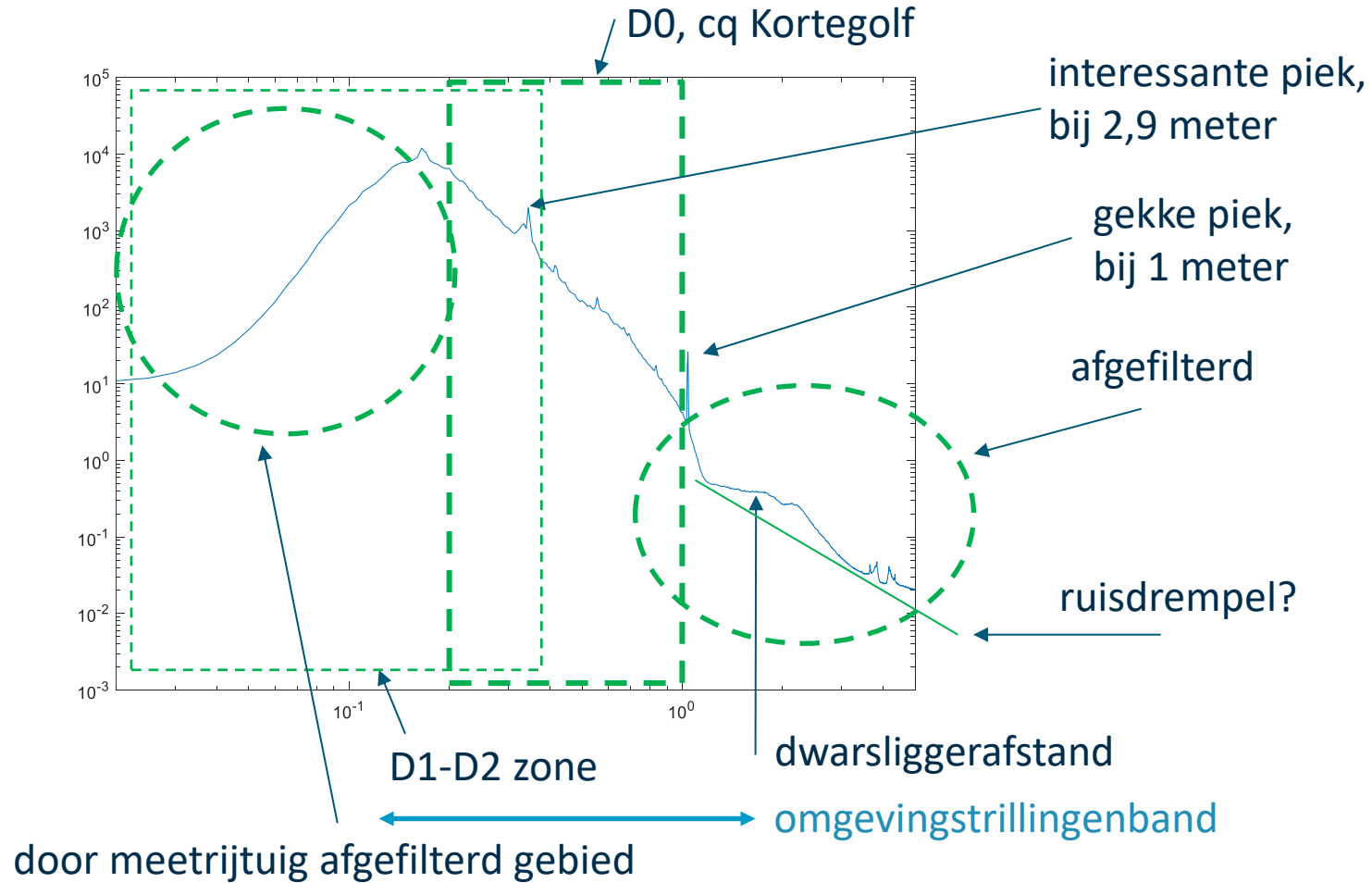
D2: golflengtegebied 25 – 70 meter (shift: 60 meter) , 25 cm samplefrequentie

D0: golflengtegebied 1 – 5 meter, 5 cm samplefrequentie

D0 is pas sinds 2020 beschikbaar.

D1 en D2 sluiten spectraal op elkaar en kunnen daarom eenvoudig letterlijk worden opgeteld.

D0 overlapt met D1. Gezien de hogere samplefrequentie van D0 is het opportuun in het overlappend gebied (tussen 3 en 5 meter) te kiezen voor D0.

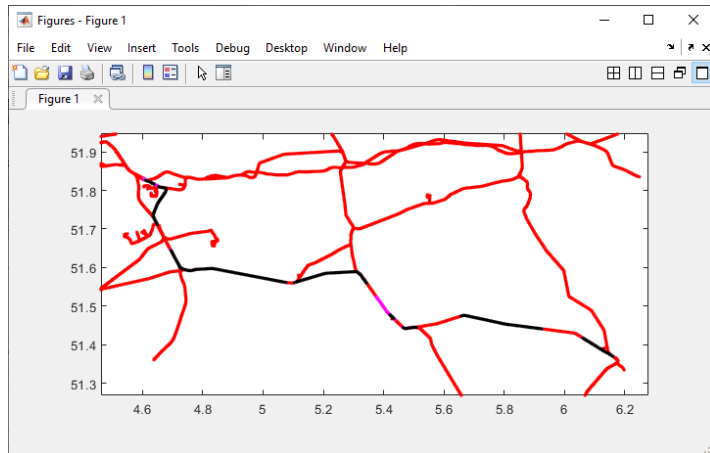


De eerste stap in het verwerkingsproces van de spoorgeometriedata is de golflengte analyse. Gangbaar is een methode op basis van Fourier transformatie die een zogeheten power spectral density (PSD) opleverend.

De figuur hiernaast toont een dergelijke PSD op basis van D0 data.

De verschillende golflengtegebieden van de BBMS data (D0 en D1-D2) zijn er in aangemerkt als vakken. Zo is te zien dat er een overlap is tussen D0 en D1. Ook is te zien hoe in D0 de lange golflengtes (in de D1-D2 zone) en de hele korte golflengtes worden weggedrukt. De filtering is nooit 100%: zo is buiten het D0 gebied toch nog een dwarsliggerafstand effect zichtbaar boven de theoretische ruisdrempel.

In het D0 gebied loopt het spectrum grotendeels vlak naar beneden, wat op stochastische aanleg- en onderhoudseffecten duidt. Bij 2,9 meter is er een piek, wat een niet-stochastische, dus fysische verklaring vereist. Het kan duiden op een bepaald (lokaal) verouderingsfenomeen in het bovenbouw systeem. Bij 1 meter is er een vergelijkbare piek. De stijlte ervan is bijzonder en zou kunnen wijzen op een anomalie in het bemonsterings- dan wel verwerkingsproces. NB: de pieken zijn verder niet nader onderzocht, ze dienen hier als (toevallige) illustratie.



Met een stapgrootte van 1 meter (van hex naar hex) zijn glijdend over het spoor metriekwaardes bepaald (zie bladzijde 15 en verder).

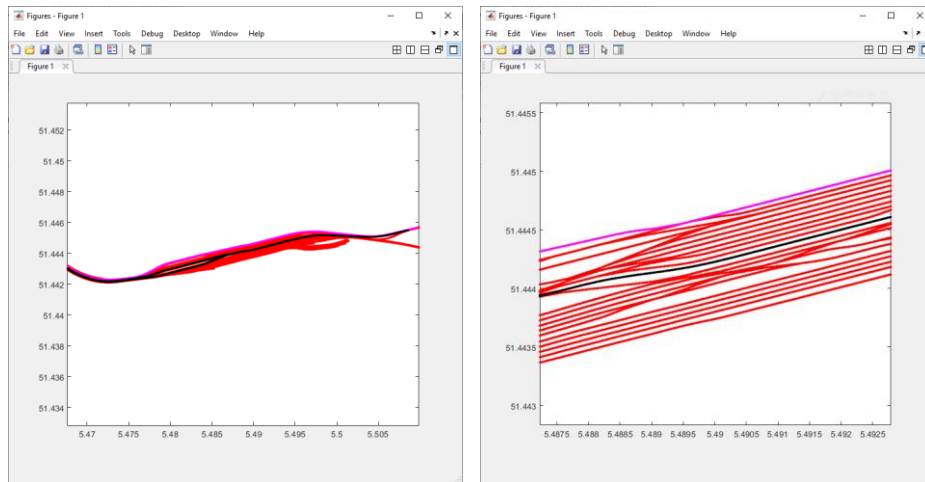
Spoorsegmenten die achtereenvolgens worden bereiden door goederentreinen over de Brabantroute dienen daartoe eerst te worden geïdentificeerd en aan elkaar geknoopt. De figuren links illustreren hoe gegevens van Verkeersleiding voor enkele goederenpaden leiden tot een aangesloten traject (zwarte lijn) die door de software als één tracé kan worden verwerkt. Te zien is dat er, in de fase van het onderzoek waarin deze figuren zijn gemaakt, nog gaten zitten in het tracé. Dit heeft te maken met een discrepantie in gebruik van versie van spoortakmodel tussen goederenpad en meetcampagne. Dit is naderhand herstelt. De onderste twee grafieken tonen routes door het emplacement van station Eindhoven.

De verwerking van de BBMS data voor een trace levert een datastructuur op met een record per meter spoor en de volgende velden (ook wel eigenschappen, attributes of features genoemd):

- De metrieken die de trillingskwaliteit beschrijven
- Contractgebiednr
- Spoortak
- Meter
- Geocode
- WGS (gps)
- RDC (rijksdriehoek)

Spoortak + Meter legt uniek de locatie vast op een topologische manier (buurpunten zijn te traceren)

WGS en RDC zijn gekoppeld en leggen ook uniek de locatie vast maar niet topologisch.



Van de volgende constructies zijn in het eerdere onderzoek (LA.200902.R01) gegevens verzameld en datastructuren opgezet.

- Onderbouw: **Overwegen, Betonnenspoorviaducten, Stalenspoorbruggen, Duikers**
- **ES-lassen**

Er is een datastructuur voor Onderbouw met volgnummer als key en als velden:

- | | |
|-------------------------|------------------------|
| - GPS | - Contractgebied |
| - Spoorstaafbevestiging | - Stootplaat |
| - Fundering | - Geleidebalk |
| - Oplegging | - Puntstuk |
| - Rijnvloer | - Producent |
| - Type spoor | - Buisduikers |
| - Type overweg | - Type stalenburg |
| - Spoorstaafovergang | - Overgangsconstructie |

Elk onderbouw element (zoals een overweg) komt zo vaak voor als het spoor het begin of het einde van het element tegenkomt. De GPS coördinaten zijn dan ook van die overgangspunten. Voor een reguliere overweg in een tweesporig traject zijn dat dus 4 records.

Er is een datastructuur voor ES-lassen met volgnr als key en als velden:

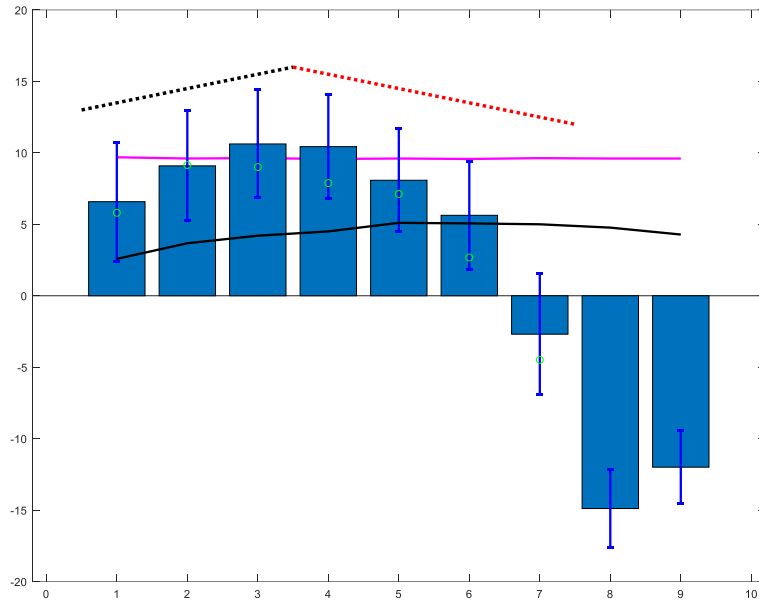
- | | |
|------------|-------------------|
| - GPS | - Contractgebied |
| - Spoornr | - Spoorstaaf |
| - Wisselnr | - Ondersteuning |
| - Type | - Plaatsingsdatum |

In het voorgaande onderzoek zijn een aantal metrieken onderzocht:

- | | |
|--------------------------------|---------------------------|
| - PSD | - Fractale afstand |
| - Koorde (9 meter en 15 meter) | - Standaarddeviatie (Std) |
| - RMS | - Max,fast |

De laatste twee, **RMS** en **Max,fast**, zijn uiteindelijk als meest bruikbaar uit de bus gekomen.

Op de volgende twee bladzijden worden deze toegelicht.



De metrieken betreffen in feite een transformatie van het plaatsdomein (informatie per plek op het spoor) naar het golflengtedomein (informatie per golflengte).

De PSD is daarbij het meest verfijnd: uit 200 meter doorgemeten traject volgt een grafiek bestaande uit 400 punten (voor D1, en zelfs 2000 voor D0).

Dit detailniveau is voor omgevingstrillingen te verfijnd. Allerlei effecten, zoals in de overdracht naar de omgeving, hebben een middelende werking tussen frequenties waardoor details toch verloren gaan.

Een samenvatting naar breedbanden, zoals tertsen of octaven, ligt voor de hand.

Drie tertsbanden vormen een octaafband. Voor beoordelingen en trillingsprognoses is een octaafband nuttig, voor nader begrip van een specifieke situatie is meer verfijning, dus in tertsbanden, gewenst.

Een typisch tertspectrum van het spoor, op basis van PSD, wordt in de figuur links geïllustreerd.

- De blauwe balken betreffen het tertsspectrum, gemiddeld over het gehele areaal
- De blauwe errorbars geven de variatie over het areaal
- De x-as is de golflengte-as: lange golflengtes (dus lage frequenties) links, korte golflengtes (hoge frequenties) rechts.
- De waarden worden gegeven op de decibel schaal
- 0 dB komt overeen met de referentiewaarde 0,01 mm, wat ongeveer de kleinste mogelijke waarde is die het meetrijtuig kan vaststellen
- De waarden onder de 0 dB, bij de drie hoogste tertsbanden, betreffen door het meetrijtuig gefilterde (dus verzwakte) waarden.
- Er zijn 4 hulplijnen getekend om het spectrum vanuit informatietheorie te begrijpen. Bij de rechte lijnen gaat het alleen om de trend (niet de hoogte) van de lijn. De gekromde lijn is een referentiespectrum, namelijk die voor de aanleg van Duits hooggesnelheidsspoor.
- De zwarte gestippelde lijn geeft de trend van "witte ruis". Witte ruis is een signaal zonder enige informatie inhoud, met dus maximale entropie. Als een spectrum die trend volgt zou je kunnen stellen dat er geen systeemeigenschappen in tot uitdrukking komen. Bij systeemeigenschappen kan je denken aan bijv. dwarsliggerafstanden, lengte van een onderstopmachine, etc.
- De magenta lijn is roze ruis, de rode lijn betreft "Brownian" ruis.

Een smalbandigspectrum (PSD spectrum) dat niet wit is, maar bijv. roze of bruin, zal bij samenvatting tot breedbanden leiden tot dominantie van bepaalde, feitelijk willekeurige, frequenties. Dat is ongewenst. Een remedie is het signaal eerst te integreren of te differentieren tot een wit spectrum.

Er zijn twee methodes geselecteerd om breedbandige spectra te genereren.

RMS (tertsbandspectrum op basis van PSD)

Er zijn twee manieren om deze te bouwen: direct vanuit het plaatsdomein, via filterbanken, of met een omweg via het fourier domein. Voor deze laatste is gekozen. De procedure is als volgt:

- Voor een punt op het spoor wordt over 200 meter (100 meter aan weerszijden) een PSD bepaalt
- Het spectrum wordt verdeeld in 12 tertsggebieden, met als grensgolflengtes, in meters:

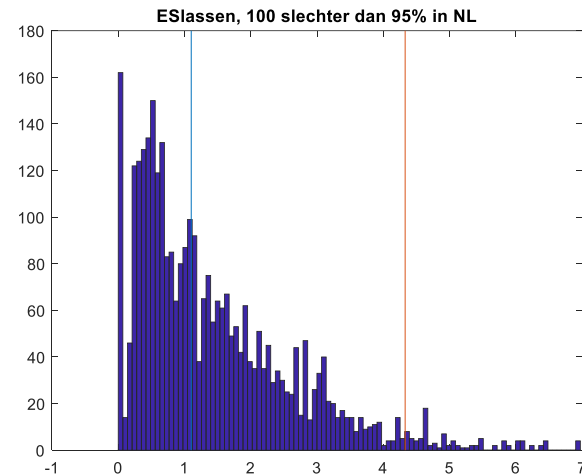
10 – 12,5	8 – 10	6,25 – 8	(4 Hz trillingsband bij 130 km/uur treinsnelheid)
5 – 6,25	4 – 5	3,1 – 4	(8 Hz band)
2,5 – 3,1	2 – 2,5	1,6 – 2	(16 Hz band)
1,25 – 1,6	1 – 1,25	0,8 – 1	(32 Hz band)
- Bovenstaande lijst is gegroepeerd naar de 4 octaafbanden die uit de 12 tertsbanden zijn samen te stellen.
- Voor de RMS voor spoorhoogte vormt D1 de basis voor eerste drie tertsen (rond 10 meter) en D0 voor de rest. Voor schift is D0 niet beschikbaar en wordt D1 voor alles gebruikt. Het highpass filter van D1 die de kortere golflengtes wegfilteren laat nog wel bruikbare informatie door voor de tertsen tussen 2 en 3 meter maar met name de laatste drie tertsen zijn niet beschikbaar voor schift.
- De 6 hoogste tertsggebieden (dus 5 tot 2 meter) worden dubbel gedifferentieerd waardoor ze een wit in plaats van een bruin karakter krijgen. Dit gebeurt door de het smalbandspectrum te vermenigvuldigen met de hoekfrequentie in het kwadraat. De waardes in die banden krijgen daardoor een “versnellings” karakter, in plaats van de gemeten relatieve verplaatsing. Die waardes komen in principe overeen met bijv. een gemeten aspotversnelling, behoudens een schaalfactor op basis van treinsnelheid.
- Per tertsggebied worden de waardes gesommeerd. Dit levert dus uiteindelijk 9 waardes op.

Max (tertsbandspectrum op basis van max,fast)

- Voor een punt op het spoor wordt 100 meter (50 meter aan weerszijden) door een tersbandfilterbank gehaald. Dit maakt van 1 trace 12 traces.
- Elk van de 12 traces worden geconvolueerd met een exponentieel filter met een halfwaarde afstand van 2 meter
- Het maximum van het geconvolueerde signaal, binnen 1 meter afstand van het punt op het spoor, is de tertsbandwaarde.

Deze waardes worden glijdend over het spoor bepaald met een stapgrootte van 1 meter.

4. Nulsituatie en hotspots



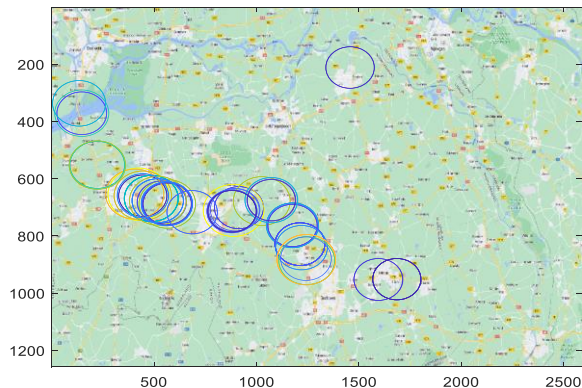
Voor de assets ES-lassen, spoorweginrichtingen, viaducten en bruggen op de Brabantroute is onderzocht in hoeverre deze in trillingskwaliteit afwijken van het landelijk gemiddelde van deze assets. Daarvoor is de metriek Max,fast van de 16 Hz octaafband gebruikt.

Voor ES-lassen worden de resultaten in de grafieken hiernaast getoond. De bovenste grafiek toont een histogram met ter referentie de mediaan (blauwe verticale lijn) en 95% onderschrijdsgrens (magenta verticale lijn). Op de x-as staat de factor ten opzichte van het Nederlands gemiddelde.

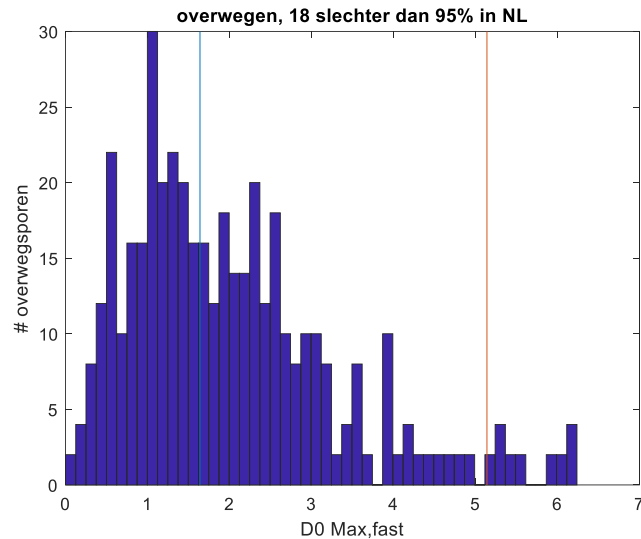
De mediaan van de Brabantse ES-lassen liggen dicht bij het Nederlandse gemiddelde, de distributie ziet er uit alsof het representatief zou kunnen zijn voor het hele land.

Er zijn een aantal ES-lassen die de 95% grens overschrijden. Dit zijn kandidaten voor trillingsgericht onderhoud. Op de kaart onder de grafiek is de locatie van deze lassen uitgelicht. Ze liggen met name in het gebied tussen Eindhoven en Breda.

NB: de ES-lassen in wissels zijn buiten beschouwing gelaten. Deze zijn, in dit punt van het onderzoek, beschouwd als onderdeel van het wissel, welke een eigen beoordeling vragen (maar niet hebben gekregen in het kader van dit onderzoek). Onderstaande lijst geeft nadere info over deze lassen.

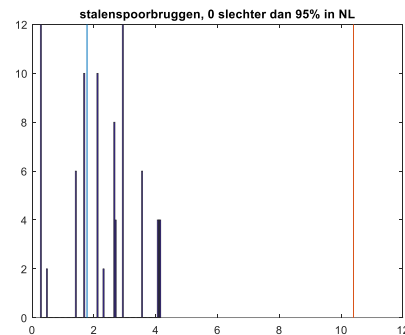
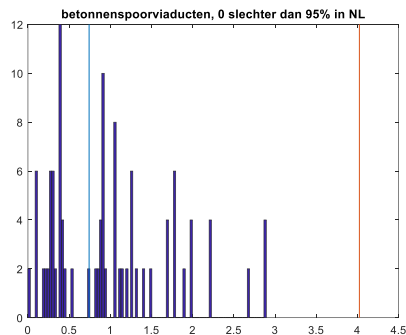


RDX	RDY	plaatsingsdatum	geo	spoor	ondersteuning	type
109344	401343	31-Jan-1800	20	1	Halfzwevend	Lijmlas Railpro-HIRD
109344	401343	31-Jan-1800	20	2	Halfzwevend	Lijmlas ETS PF1/BN2 - oud
134188	396863	31-Jan-1800	20	1	Zwevend	Lijmlas Edilon-TC
134188	396863	31-Jan-1800	20	2	Zwevend	Lijmlas Edilon-TC
163718	384111	31-Jan-1955	24	2	Dubbelligger	Lijmlas Edilon-TC
163718	384111	31-Jan-1955	24	1	Dubbelligger	Lijmlas Edilon-TC
163717	384111	31-Jan-1955	24	1	Dubbelligger	Lijmlas Edilon-TC
163717	384111	31-Jan-1955	24	2	Dubbelligger	Lijmlas Edilon-TC
123826	399328	31-Jan-1800	20	1	Dubbelligger	Lijmlas Edilon-TC
123826	399328	31-Jan-1800	20	2	Dubbelligger	Lijmlas Edilon-TC
125732	398860	31-Jan-1800	20	2	Zwevend	Lijmlas ETS PF1/BN2 - nieuw
125732	398860	31-Jan-1800	20	1	Zwevend	Lijmlas ETS PF1/BN2 - nieuw
113664	400932	31-Jan-1800	20	0	Zwevend	Lijmlas Edilon-TC
113664	400932	31-Jan-1800	20	0	Zwevend	Lijmlas Edilon-NS
139849	398623	31-Jan-1800	23	1	Halfzwevend	Lijmlas ETS PF1/BN2 - oud
139849	398623	31-Jan-1800	23	2	Halfzwevend	Lijmlas ETS PF1/BN2 - oud
131756	397385	31-Jan-1800	20	2	Zwevend	Lijmlas ETS PF1/BN2 - nieuw
131756	397385	31-Jan-1800	20	1	Zwevend	Lijmlas ETS PF1/BN2 - nieuw
104132	413605	01-Jan-2010	19	2	Zwevend	Lijmlas Edilon-NS
104132	413605	01-Jan-2010	19	1	Zwevend	Lijmlas Edilon-NS



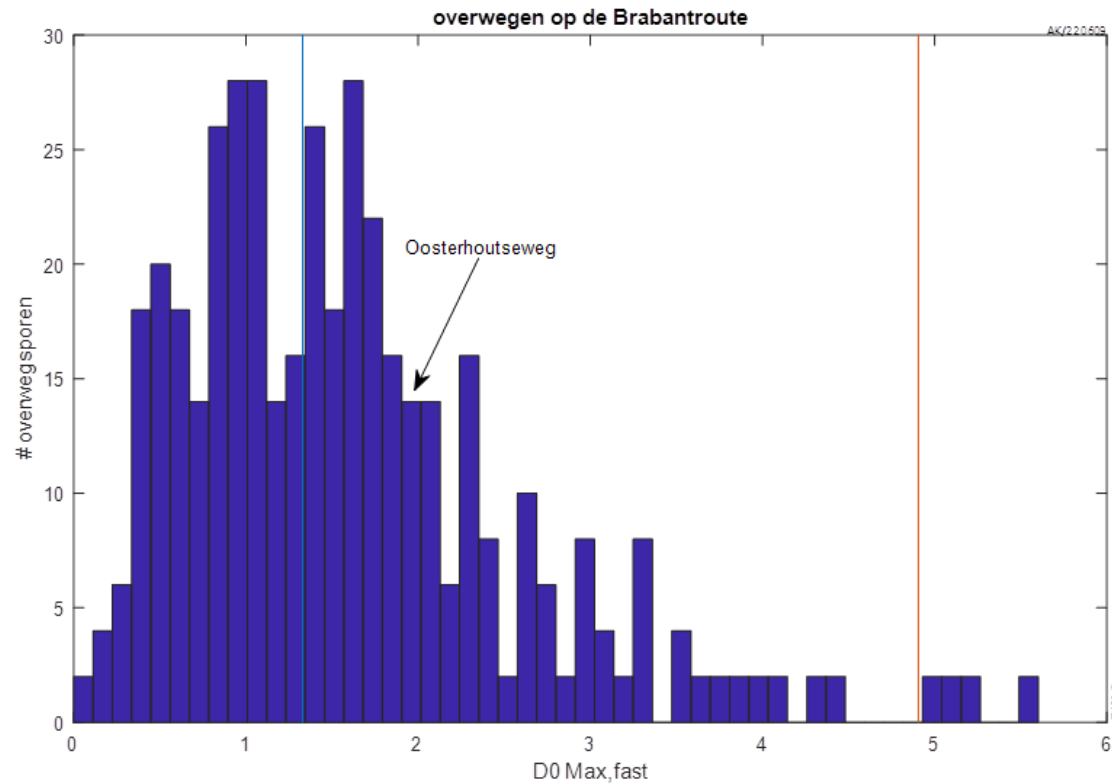
Van overwegen, viaducten en stalen spoorbruggen zijn vergelijkbare analyses gedaan. De grafieken hiernaast tonen de distributiefuncties van deze assets op de Brabantroute. Op de route zijn er onder de weinige viaducten en bruggen geen uitschieters. Voor de overwegen geldt dat wel. Onderstaande lijst is een lijst van overwegen met een hoge waarde voor Max,fast.

Latitude	Long.	geocode	type
51.4689	5.6349	24	AHOB
51.4689	5.6349	24	AHOB
51.5990	4.7284	20	AHOB
51.5990	4.7284	20	AHOB
51.5763	5.1684	23	AHOB
51.5763	5.1684	23	AHOB
51.4759	5.6697	24	AHOB
51.4759	5.6697	24	AHOB
51.4463	5.5149	24	AHOB
51.4463	5.5149	24	AHOB
51.5944	4.7414	20	AKI
51.5944	4.7414	20	AKI
51.4279	6.0393	27	Mini Ahob
51.4279	6.0393	27	Mini Ahob
51.4279	6.0393	27	Mini Ahob
51.4279	6.0393	27	Mini Ahob
51.3905	6.1162	27	AHOB
51.3905	6.1162	27	AHOB
51.5841	4.9233	20	AHOB
51.5841	4.9233	20	AHOB



5. Spoorwegovergang Breda

Spoorwegovergang Oosterhoutseweg, Breda



Rond de spoorwegovergang in de Oosterhoutseweg te Breda zijn er klachten over trillingen vanwege treinpassages.

Dit werpt de vraag op: in hoeverre is hier sprake van een spoorwegovergang die er relatief slecht bij ligt? In andere woorden: is hier sprake van een relatieve hotspot? Een spoorwegovergang die gerealiseerd is met een betonnen plaat is in beginsel een bron van extra spoortrillingen en dus een (absolute) hotspot. Maar is dit een overweg die onder overwegen daar nog ongunstig tegen af steekt?

De meest geschikte metriek om dat te beoordelen is de Max,fast. Een relatieve zetting door een overgang in de spoorconstructie, zoals vaak te vinden is bij de overgang van ballastspoor naar platenspoor, is een bron van trillingen die de Max,fast nauwkeurig signaleert.

De metriek kan worden bepaald op grond van D0 en D1 en voor verschillende golflengtebanden. Op een doorgaand traject op ruime afstand van een IC station is de golflengteband overeenkomend met 16 Hz trillingen bij 130 km/uur de meest relevante band voor een beoordeling in verband met reizigerstreinen. Die band komt overeen met 8 Hz bij 80 km/uur, de vaak dominante band voor goederentreinen.

Linksonder is grafisch de Max,fast voor 16Hz@130km/uur geplot. Grotere cirkels betekenen een hoger niveau. Rond de spoorwegovergang, ter hoogte van de veranderingen in de baanconstructie, zijn verhogingen te zien. Een eind naar het westen is echter een grotere hotspot te zien. Waarschijnlijk betreft dat een ES-las. Linksonder is een histogram van alle spoorwegovergangen in de Brabante route, wederom Max,fast voor 16Hz@130km/uur betreffende. De mediaanwaarde is ongeveer 1,3, de 95% bovengrens ligt bij 5. De Oosterhoutseweg is met een waarde van 2 niet een uitschieter te noemen. Indien de overwegen met rubberen beplating, die in het algemeen scoren onder de 1, uit de set zouden worden verwijderd is te verwachten dat de mediaanwaarde opschuift naar de 1,3. Voor een klassieke overweg is de Oosterhoutseweg dus zeer gemiddeld te noemen, dus niet slecht.

6. Hout versus beton



De invloed van het type dwarsliggers op het ontstaan van spoortrillingen is niet eenvoudig vast te stellen en daarom al heel lang een open staande vraag. Idealiter wordt het onderzocht door trillingsmetingen in het veld op enige afstand van het spoor, zoals dat bijvoorbeeld ook voor geluid gebeurt. Maar anders dan bij geluid worden vergelijkende trillingsmetingen sterk verstoord door andere factoren die mee veranderen, zoals bodembeslag, de nog onbegrepen variabiliteit van trillingsemmissie over maanden en jaren, etc. Hoe kleiner het te vinden effect, hoe maskerender de storende invloeden.

Blijkbaar is het effect van dwarsliggers niet groot aangezien deze ook nooit uit analyses van spoortrilingsonderzoeken naar boven is gekomen.

Invloed kan wel in een bron model worden onderzocht, omdat daar eenvoudig de overige omstandigheden vast kunnen worden gezet. Maar de huidige bron modellen zijn alleen in staat het effect op de dynamische interactie tussen baan en trein te beschrijven terwijl er ook invloed is via een effect op de kwaliteit van de baanligging. Wel is er een model in ontwikkeling die in potentie beide effecten kan beschrijven: STEM met zijn elasto-plastische module.

Er zijn dus tenminste twee effecten te onderzoeken:

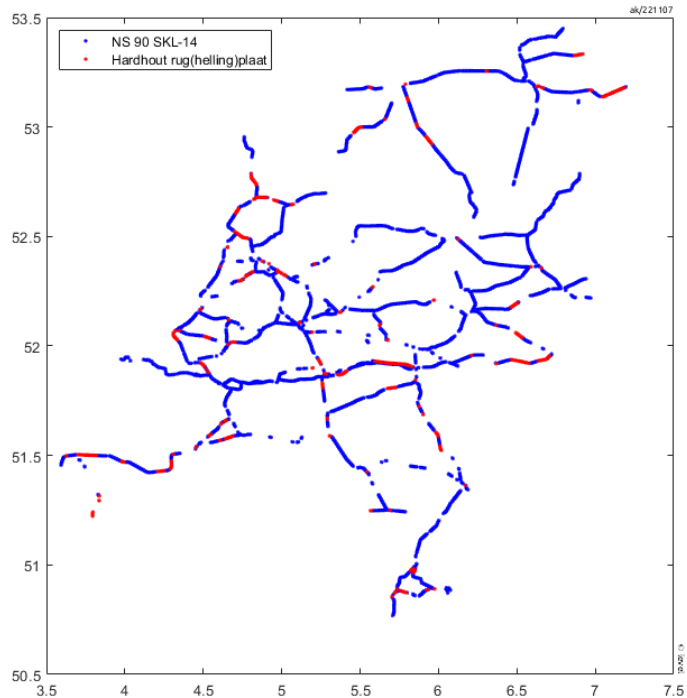
- Invloed op de dynamica, dus de krachten en versnellingen in trein en baan tijdens de passage
- Invloed op de baanligging, de bron waarmee de dynamica in gang wordt gezet

Volgens de huidige modellen is de invloed op de dynamica gering tot nihil: dwarsliggers geven krachten en versnellingen door zonder daar zelf veel aan af te doen vanwege hun relatief geringe massa en hoge stijfheid.

Wat betreft de baanligging is er wel wat effect te verwachten, vooral in verband met veroudering van de baan. Een belangrijk verouderingsproces is de grip van de ballast en zowel het materiaal als de geometrie van een verschillende typen dwarsliggers kunnen dat beïnvloeden.

Met de trillingsmetrieke voor spoorligging kan de invloed op baanligging worden onderzocht.

Illustraties: boven de NS90 met SKL14 bevestiging, onder houten dwarsliggers met rughellingplaat



Van de 7000 km spoor in NL zijn trajectdelen geselecteerd van tenminste 200 meter lang die geen wissels, ES-lassen, spoorwegovergangen of andere assets bevatten (die nl. op zichzelf al tot verhoogde trillingsniveaus aan leiding kunnen geven). Ze bestaan geheel uit of een NS90 met SKL14 bevestiging of uit hardhout met rughellingplaat (zie ook de illustraties op de vorige pagina). Deze twee types zijn de meestvoorkomende (>50%) onder respectievelijk de betonnen en de houten dwarsliggers. De selectie leverde het volgende op:

- 300 trajectdelen hout, 200 km spoor in totaal
- 3000 trajectdelen beton, 2400 km spoor in totaal

De trajectdelen zijn redelijk uniform verdeeld over het land (zie illustratie links). Op de Brabantroute is overigens volgens die criteria geen hout meer te vinden en ook weinig NS90-SKL14.

Aan de betonnen trajecten is vervolgens nog het criterium gesteld van een ouderdom van tenminste 20 jaar, aangezien houten trajecten ook tenminste die ouderdom zullen hebben en juist effect vanwege invloed op veroudering wordt verwacht en dus ter onderzoek ligt.

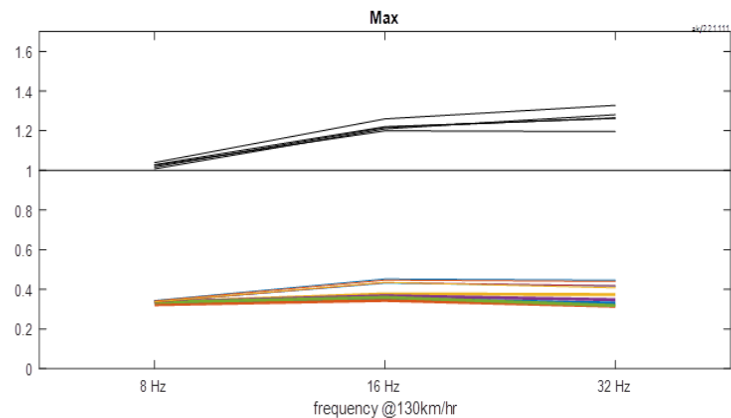
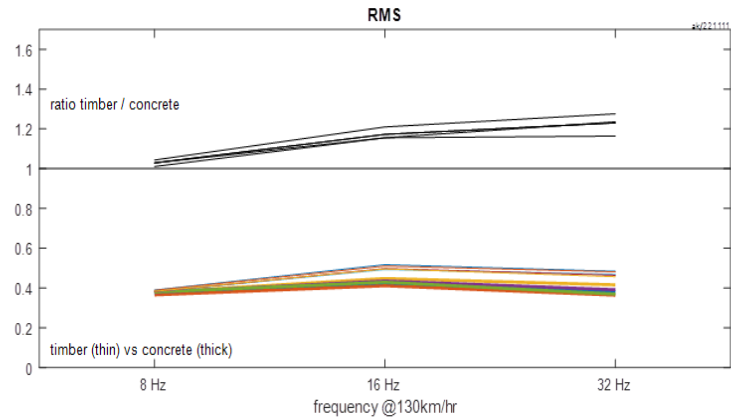
Van elk van de trajecten zijn een gemiddelde Max,fast en een gemiddelde RMS bepaald op basis van elk van de 5 meetcampagnes (voorjaar 2020 t/m voorjaar 2022) die beschikbaar zijn.

De volgende bladzijde toont resultaten en trekt daaruit conclusies.

Het is zinvol het onderzoek verder te verdiepen met o.a. de volgende onderwerpen:

- De rol van de ondergrond. Het is denkbaar dat bij een bepaalde ondergrond (stijve bodem versus slappe bodem) effecten sterker of juist minder sterk zijn.
- Het effect bij assets, zoals ES-lassen en wissels.
- Het effect op de dynamica van het spoorstelsel, aan de hand van een gedetailleerd bronmodel.

Houten dwarsliggers versus betonnen dwarsliggers 3/3



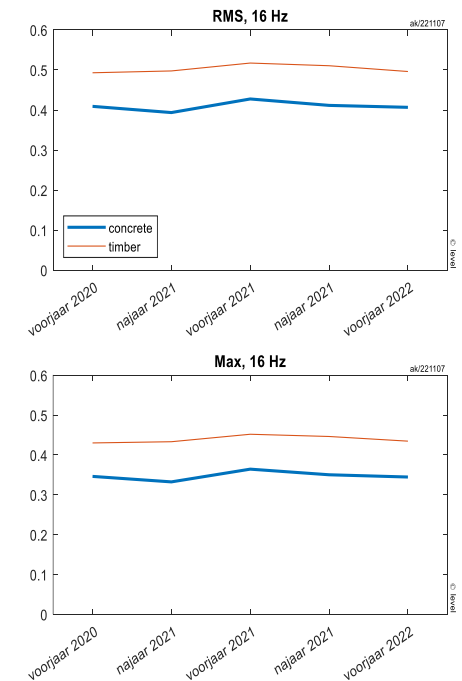
Links toont de resultaten voor RMS (boven) en Max,fast (onder) van de drie banden uit D0 (8, 16 en 32 Hz bij 130 km/uur).

Beide grafieken kennen twee helften:

- De onderste helft toont, als een spectrale lijn, de over alle trajectdelen gemiddelde waarde, voor elk van de 5 meetcampagnes. De betonnen trajecten betreffen dikke lijnen, de houten dun. In totaal zijn er dus 10 lijnen (5 campagnes x 2 soorten dwarsliggers). Te zien is dat er bij 8 Hz geen onderscheid is tussen beton en hout, maar dat bij de twee hogere banden er onderscheidt groeit. De houten dwarsliggers (dunne lijnen) hebben een wat hoger niveau. Dit geldt zowel voor de Max als de RMS.
- De bovenste helft toont, als spectrale lijn, de verhouding tussen hout en beton, op grond van de data uit de onderste helft. Per meetcampagne is er 1 lijn bepaald. Bij 8 Hz is de verhouding dichtbij 1, er is zoals reeds geconstateerd weinig onderscheid tussen beton en hout. Bij hogere frequenties loopt de verhouding op naar 1,2 en 1,3.

Geconcludeerd kan worden dat voor hogere frequenties (kortere golflengtes) het type dwarsligger effect heeft en dat betonnen dwarsliggers beter scoren. Als vuistregel kan worden gehanteerd dat **vervanging van hout door beton** conservatief geschat **15% reductie** in trillingsniveau oplevert vanaf 16 Hz. Voor reizigerstreinen is dit gunstig. Voor goederentreinen zal dat in de praktijk weinig opleveren.

Tot slot is nog gekeken naar veranderingen in de spoorkwaliteit over de loop van 2,5 jaar (de 5 meetcampagnes) aan de hand van de 16 Hz band. Rechts toont het resultaat. Er is geen duidelijke trend te ontdekken. Hout is bijv. niet verder aan het verslechteren. Er is sprake van gehobbel, wat opmerkelijk is want het gaat om landelijke gemiddelden, maar hout en beton doen dat grotendeels in een gemeenschappelijke tred.



7. Wissels



Wissels zijn complexe trillingsbronnen. Er is sprake van verschillende subbronnen zoals het wisselpunt, ES-lassen en de spoorboog. Die subbronnen liggen verspreid over een afstand van circa 100 meter.

De onderzoeksvraag is hoe wissels als trillingsbron het beste te karakteriseren:

- gezien de ruimtelijkheid en de vele bronnen: met RMS, zoals doorgaand spoor met een type dwarsliggers
- met Max,fast om recht te doen aan de localiteit van de meeste subbronnen?

De boogstand wordt in dit onderzoek verder buiten beschouwing gelaten. Enerzijds worden de meeste wissels meestal in rechtstand bereden en is daarbij de baanvaksnelheid over het algemeen een stuk hoger. Anderzijds is in een eerder onderzoek aan een specifiek wissel al eens aangetoond dat voor dat wissel het boogaspect van de boogstand wat betreft trillingsemissie ondergeschikt is, in feite niet waarneembaar is in metingen, ten opzichte van de puntbronnen in het wissel (ES-lassen en wisselpunten en kruisstukken). Het verdient aanbeveling in een apart onderzoek te kijken naar bogen, in het algemeen, met kleine boogstralen, al dan niet met verkanting.

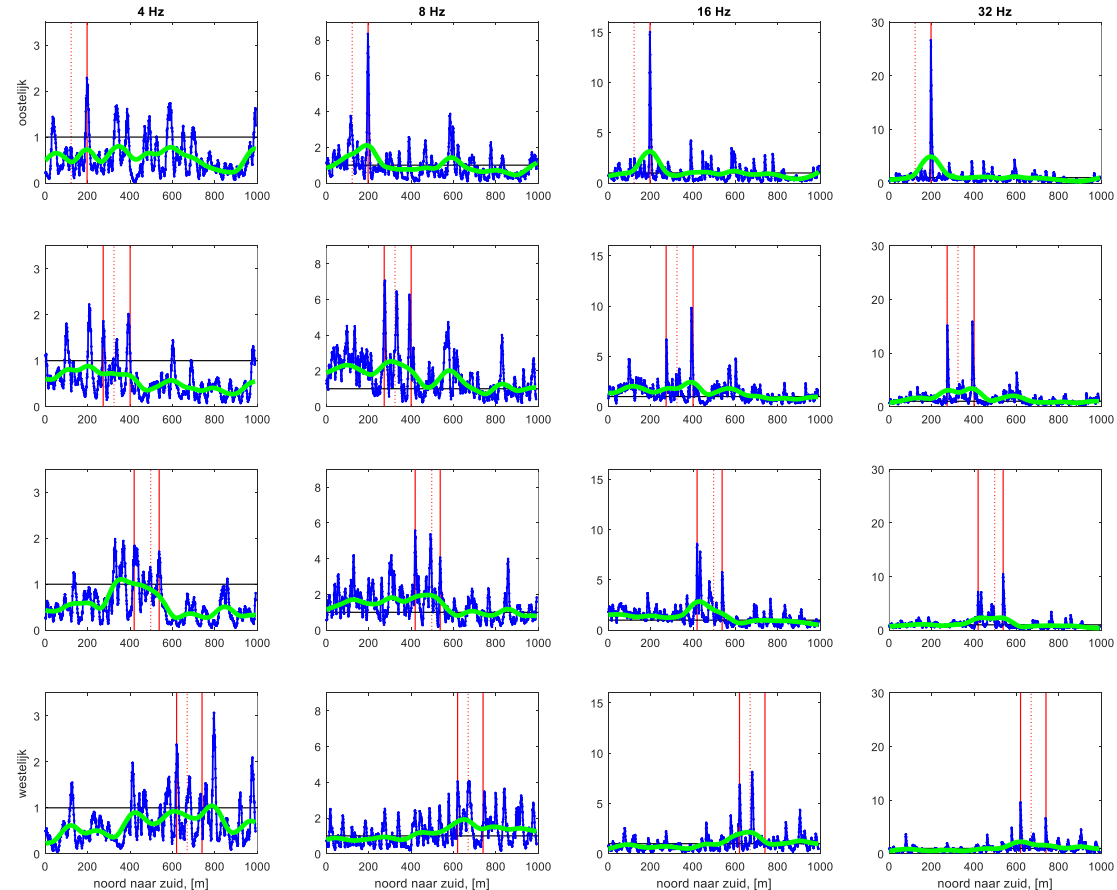
De onderzoeksvraag wordt behandeld van een specifieke case. Het betreft het spoor Eindhoven-Boxtel, ter hoogte van Acht. Zie de illustratie hiernaast. Op dit viersporig traject is een overloopspoor in één richting (van zuidwest naar noordoost) komende vanaf een 5de, emplacement-, spoor. BBMS bevat D0 data voor de vier doorgaande sporen (maar niet voor het overloop spoor).

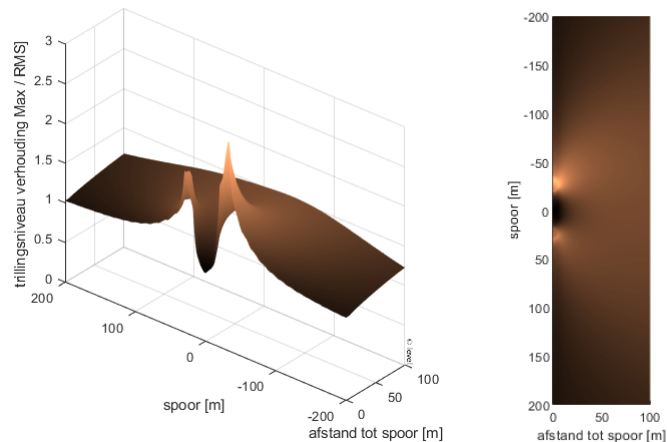
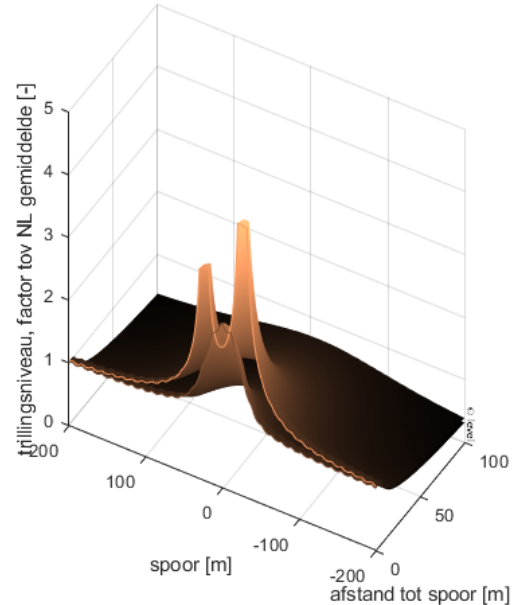
Van de vier sporen zijn over dit traject van 1 km per meter de RMS en de Max,fast bepaald. De wisselpunten en de ES-lassen zijn geïdentificeerd. De volgende pagina toont en duidt de resultaten. De pagina bediscussieert wat dit betekent voor de keuze voor een metriek voor wissels.

De 16 grafieken links tonen de 4 octaafbanden (van links naar rechts) van **Max,fast** (blauw) en **RMS** (groen) voor de vier sporen (van boven naar beneden). De verticale rode lijnen geven aan waar een **puntstuk** zit. De verticale gestippelde roden lijnen een **ES-las**. De horizontale zwarte lijn is de referentielijn: het Nederlands gemiddelde. NB: de 4 Hz band resultaten zijn indicatief, D0 is niet goed geschikt voor deze band.

In totaal zijn er 7 wissels en te zien is hoe die van het oostelijk naar het westelijk spoor elkaar opvolgen, een overloopspoor vormend. Tussen de wissels in ligt steeds een ES-las. Er zijn bij drie van de vier sporen **drie discontinuïteiten** in het spel: twee puntstukken en een ES-las. Alleen het meest oostelijke spoor kent maar één wissel en daarmee twee discontinuïteiten.

De 32 Hz octaafband in ogenschouw nemend valt op dat de wisselpunten steeds de Max,fast domineren. De ES-lassen vallen veel minder op. Naar lagere banden toe komen de ES-lassen ook in beeld en worden even belangrijk. De RMS reageert niet bijzonder uitgesproken op de wissels: over het algemeen is zonder de verticale hulplijnen niet evident waar de wissels liggen.





Terugkomend op de onderzoeksvraag (welke metriek is het meest geschikt?) is het nuttig drie zones te onderscheiden:

- grote afstand tot het spoor, orde 50 meter en verder, daar waar RMS beoogd is het meest geschikt voor te zijn (RMS is een gemiddelde over 200 meter en daarmee een karakteristiek voor een "lijnbron", puntbronnen met hun sterke geometrische afstandsdemping doen er op grotere afstand minder toe).
- zeer nabij het spoor, orde 20 meter en dichterbij, daar waar Max,fast beoogd is het meest geschikt te zijn (Max,fast reageert sterk op locale discontinuïteiten)
- een **overgangsgebied**, waarin beiden bruikbaar zouden kunnen zijn

De resultaten op de vorige pagina laten zien dat een wissel (bereden in rechtstand) niet veel bijzonderder is dan een combi van een puntstuk en een ES-las met een onderlinge afstand die nog dermate groot is (orde 50 meter of meer) dat deze discontinuïteiten afzonderlijk kunnen worden beschouwd. Dus zeer nabij het spoor blijft Max,fast een goede beschrijver waarbij een wissel wordt beschreven met zijn Max,fast voor het puntstuk. De rond een wissel voorkomende ES-lassen kunnen afzonderlijk, als ES-lassen, niet zozeer als ES-lassen in een wissel, worden beschouwd.

De vraag is: hoe zit dat op grotere afstand?

De illustraties hiernaast koppelen de spoorgeometrie aan een eenvoudig bron- en voorplantingsmodel. De trein wordt voorgesteld als een reeks puntbronnen (draaistellen met een zekere onderlinge afstand) en middels Barkan wordt de voortplanting van bodemtrillingen naar de omgeving berekend. Het betreft een stuk spoor ter lengte van 400 meter met in het midden een wissel (met een puntstuk en een ES-las).

De bovenste grafiek toont twee oppervlaktes:

- een waarin twee pieken te zien zijn, een berekening met Max,fast als bronsterkte
- een waarin een piek te zien is, een berekening op basis van RMS

De bronsterktes zijn gebaseerd op de 16 Hz octaafband van het meest westerlijke spoor bij Acht. In principe is de berekening op basis van Max,fast het meest nauwkeurig aangezien daar geen sprake is van een middeling over 200 meter.

Het is evident dat dichtbij de discontinuïteiten de RMS de niveaus significant onderschat. Maar ook op grotere afstand is er, ter hoogte van het wissel, nog sprake van onderschatting door RMS, zoals te zien is in de onderste grafieken, die dezelfde data toont maar dan als verhouding tussen RMS en Max,fast. Geconcludeerd kan worden dat het overgangsgebied ver weg ligt. Tot voorbij de 100 meter is een karakterisering op basis van Max,fast relevanter. Ipso facto kan dit ook worden gesteld voor bijvoorbeeld solitaire voorkomende ES-lassen.

8. Conclusies en aanbevelingen

Het onderzoek kent twee elementen:

Identificeren van hotspots op de Brabantroute ten behoeve van omgevingstrillingengericht onderhoud aan assets.

De conclusie is dat de viaducten en bruggen er goed bij liggen en dat er met name een reeks ES-lassen is waarop onderhoud zou kunnen worden gericht. Het betreft het gebruikelijke “5% staartje” dat ook in de rest van Nederland voorkomt.

Antwoord op enkele meer algemene onderzoeksvragen:

*Ligt de **spoorwegovergang** in de Oosterhoutseweg te Breda, waar veel trillingsklachten zijn uit de omgeving, er bijzonder slecht bij?*

De conclusie is dat deze overweg volgens de trillingskwaliteitsmetriekeken vergeleken met andere spoorwegovergangen van het zelfde type zeer gemiddeld is en er dus niet bijzonder slecht bij ligt.

*Is er wat betreft het ontstaan van omgevingstrillingen verbetering te verwachten van het **vervangen van houten dwarsliggers door betonnen exemplaren**?*

De voorzichtige conclusie is dat voor de hogere frequentiebanden (16 Hz en 32 Hz) vervanging van hout door beton leidt tot een vermindering van trillingen met 15%. NB: de 16 Hz band betreft golflengtes in de orde van 2 meter, wat bij 130 km/uur overeenkomt met 16 Hz maar bij de voor goederentreinen relevantere snelheid van 80 km/uur met ongeveer 10 Hz. De 15% reductie is dus relevant voor alle type treinen.

Het verdient aanbeveling dit nader te onderzoeken: wat is de oorzaak van dit effect (zoals betere spoorstabiliteit van beton) en is dit effect nog afhankelijk van omstandigheden zoals onderbouwweigenschappen?

*Met welke metriek kunnen **wissels** het beste worden beschreven?*

De conclusie is dat een wissel beter niet kan worden beschreven als een “black box” van een zekere lengte en een RMS, maar dat het wisselpunt moet worden onderscheiden en beschreven met Max,fast, en de bij wissels ook voorkomende ES-lassen los van het wissel kunnen worden beschouwd. Dit geldt ook voor evaluatie van blootstelling op grotere afstand (verder dan 50 meter) van het spoor. Deze conclusies gelden voor wissels die in rechtstand worden bereden.

Het verdient aanbeveling dit te onderzoeken voor wissels die in boogstand worden bereden en daarbij eventueel kruisstukken tegenkomen. Kort op elkaar volgen dan vaak een aantal ES-lassen en een kruisstuk. Dergelijke situaties, zoals op emplacementen vaak te vinden is, maar een black box benadering met RMS mogelijk alsnog voldoende goed. De Max,fast beschrijving zal nauwkeurig blijven maar is complexer in gebruik.