

Trillingskwaliteit spoor

Rapportnummer: **LA.200902.R01**

Plaats en datum: **Eindhoven, 23 maart 2022**

Versie: **2**

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. Ruwe data
4. Resultaat: metriekkeuze
5. Resultaat: onderzoeksvragen
6. Conclusies en aanbevelingen

1. Doel

ProRail wil het mogelijk maken om spooronderhoud of –vervanging mede te sturen op het reduceren van trillingshinder in de omgeving. Dit vereist een beschrijving van de ‘trillingskwaliteit’ van (elk punt van) het spoor die in BBMS kan worden geraadpleegd. Dit leidt tot onderzoeksvraag 1:

1. Met welke metriek(en) kan de trillingskwaliteit van het spoor worden beschreven?

Zodra een metriek beschikbaar is komt de vervolgvraag: maar zien we dan ook wel een relatie met onderhoud en/of met baaneigenschappen? Dit leidt tot onderzoeksvraag 2, welke een reeks aan subvragen betreft:

2. Hoe ligt het spoor er gemiddeld bij, hoe groot zijn de bandbreedtes, is er invloed van tijd, onderhoud of baanonderdelen waar te nemen?

Indien de metriek voldoende gevoelig blijkt om vraag 2 te beantwoorden is het tijd voor BBMS

3. Op welke wijze kan de metriek voor trillingskwaliteit worden opgenomen in BBMS?

2. Aanpak

Het onderzoek kent vier stappen:

1. Opzetten van een datastructuur, bestaande uit meetgegevens van het meetrijtuig (hoogte, schift, etc.) en een beschrijving van het spoorstelsel (waar liggen duikers, type ES-lassen, etc.)
2. Toevoegen van velden (ook wel features, eigenschappen, attributen, etc. genoemd) aan de datastructuur die te maken hebben met “trillingskwaliteit”. Die velden zijn gebaseerd op een naverwerking van de meetgegevens. Ontwerp van de algoritmes daarvoor zijn onderdeel van het onderzoek.
3. Zoeken naar patronen in de data: correlaties tussen de toegevoegde velden en de gegeven velden.
4. Reflectie met potentiële gebruikers over de bruikbaarheid van de met trillingskwaliteitseigenschappen verrijkte datastructuur

Ad 1. Opzetten datastructuur

Uit BBMS worden van alle halfjaarlijkse meetcampagnes de meetgegevens geëxporteerd naar csv (comma separated value, een ascii format). Elke regel beschrijft een punt op het spoor. De ruimtelijke resolutie van de data is 25 cm. Met 7000 km aan spoor betekent dat 28 miljoen datapunten. Het ‘key veld’ (unieke identifier van een punt op het spoor) is de zgn. ‘spoortak’ (een code die gebaseerd is op de twee wissels waartussen het spoor ligt, elk wissel heeft een unieke naam) plus km (‘hectometerpaal’ op die spoortak).

BBMS levert ook csv files met daarin bovenbouwonderdelen: wissels, ES-lassen, duikers, spoorwegovergangen betonnen spoorviaducten, stalen spoorbruggen. Elk element bezet een regel in de csv file. Key veld is de naam van een object.

Beide typen csv files bevatten als veld ook “GPS” data: de breedtegraad en lengtegraad van een punt. Bij viaducten e.d. gaat het om de posities van begin en einde van zo’n object.

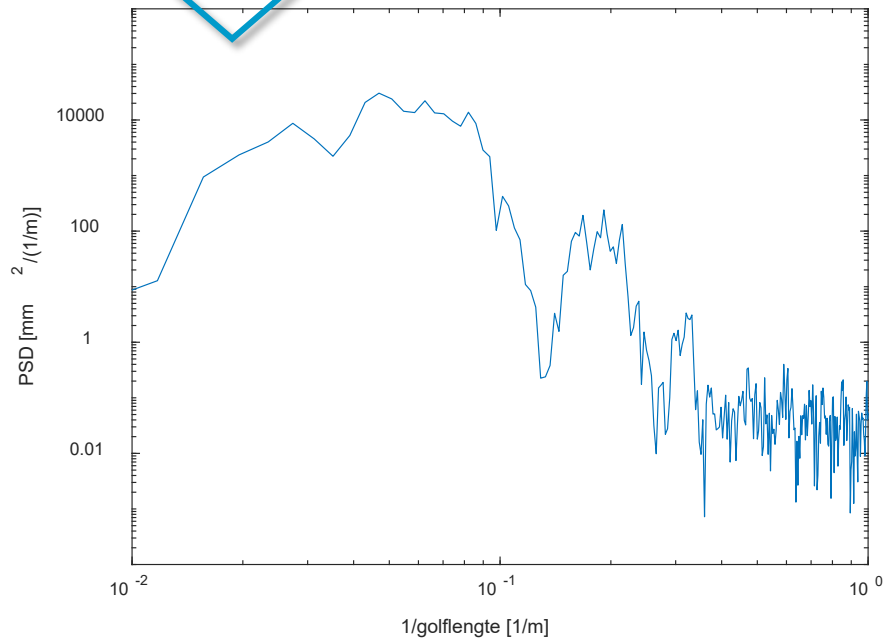
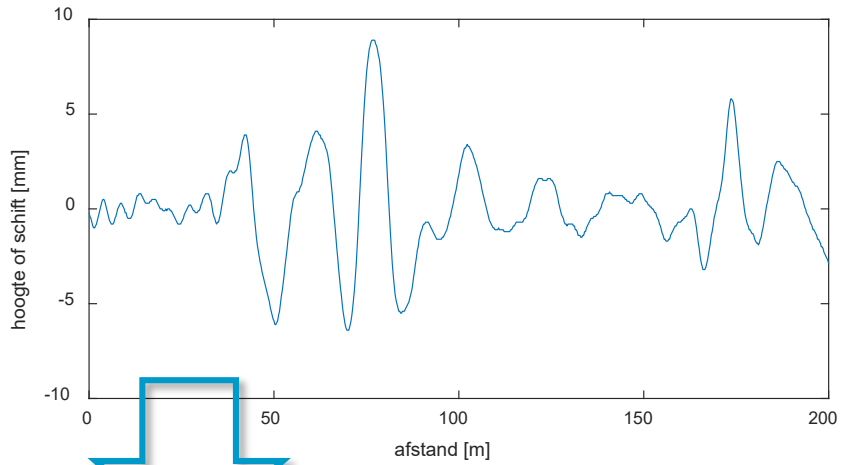
Middels de GPS data worden de meetdata en de bovenbouwonderdelen met elkaar verbonden. Op dit manier ontstaat een relationele database.

Er is uiteraard vervuiling in de data: meetdata ontbreekt op plekken, bovenbouwonderdelen worden beschreven maar zijn in werkelijkheid verdwenen, etc.

Opschonen van de data is onderdeel van dit proces.

De datastructuur wordt opgezet in Matlab. Matlab is niet specifiek een ontwikkelomgeving voor databases maar heeft drie voordelen:

- Het kan soepel omgaan met grote hoeveelheden data (lijsten met lengtes van gigabytes vormen geen probleem, zolang het maar in de RAM past).
- Het is bij uitstek geschikt om algoritmes te ontwerpen waarin signaalverwerking en statistiek een dominante rol spelen.
- Het biedt veel tools om data te onderzoeken, zoals geavanceerde plotfuncties, statistische bibliotheken, machine learning technieken, etc.

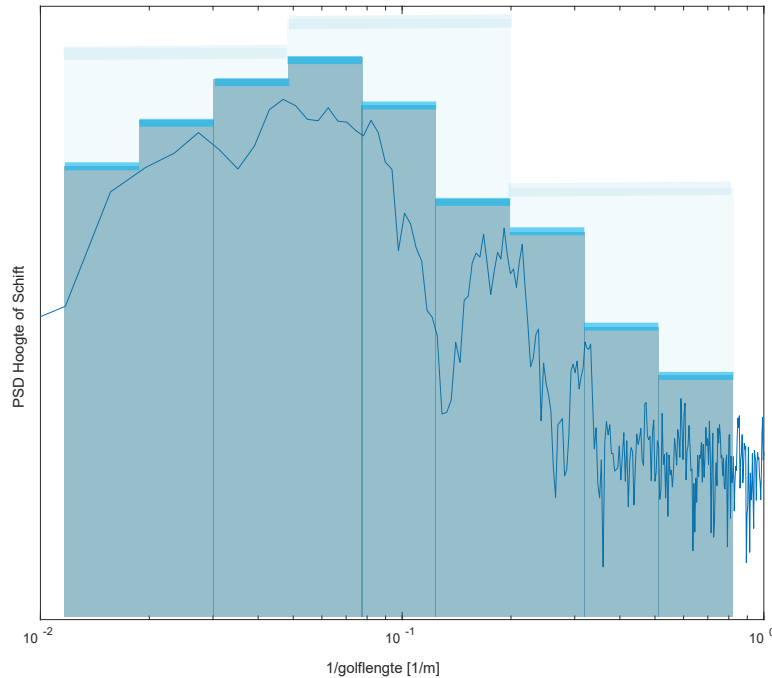


Matlab levert een omgeving om data structuren te bouwen en er queries op uit te voeren. Matlab kent overigens een toolbox voor relationele databases maar die wordt hier niet ingezet. De op dit moment zeer populaire taal Python is sterk verwant aan Matlab. In Matlab ontwikkelde functies en dergelijke kunnen relatief eenvoudig worden 'geport' naar het (gratis) Python.

2. Toevoegen van velden (ook wel features, eigenschappen, attributen, etc. genoemd) aan de datastructuur die te maken hebben met "trillingskwaliteit". Die Velden zijn gebaseerd op een naverwerking van de meetgegevens. Ontwerp van de algoritmes daarvoor zijn onderdeel van het onderzoek.
3. Zoeken naar patronen in de data: correlaties tussen de toegevoegde velden en de gegeven velden.
4. Reflectie met potentiële gebruikers over de bruikbaarheid van de met trillingskwaliteiteigenschappen verrijkte datastructuur

Ad 2. Toevoegen velden over trillingskwaliteit

Per spoortak zijn opeenvolgende gemeten data (zoals hoogte en shift) te beschouwen als een signaal (zie bovenste figuur). Een rijdende trein "leest" de hoogte, als een pick-up naald, wat leidt tot dynamische krachten en die weer tot bodemtrillingen. Met signaalverwerkingstechnieken kan het signaal worden geanalyseerd: welke golflengtes zitten er in en hoe sterk, wat voor schok gebeurtenissen zitten er in en hoe sterk? Verschillende technieken worden toegepast. Een reeds bestaande techniek voor deze toepassing is fourier transformatie, leidend tot een PSD (power spectral density). Zie de onderste figuur. 200 meter spoor, met 4 datapunten per strekkende meter dus 800 datapunten totaal, levert dan 400 waarden op (de helft van 800, door de transformatie) die iets zeggen over het voorkomen van golflengtes. NB: hoogte en shift zijn beschikbaar per spoorstaaf, maar voor trillingen wordt vooralsnog het gemiddelde van de twee bepaald en gebruikt. Zo'n PSD is een "smalbandspectrum".



Om dit verder behapbaar te maken worden de 400 waarden samengevoegd (energetisch opgeteld) tot waarden per golflengte-breedband: 9 tertsbandwaarden of 3 octaafbandwaarden.

Zie de figuur hiernaast met in donkerblauw de 9 tertsbanden en in lichtblauw de verdere samenvoeging tot 3 octaafbanden.

Deze breedbandspectra worden toegevoegd aan de database als extra velden. Uitgaande van tertsbandspectra (in plaats van octaafbandspectra), van hoogte en shift als grootheden en van twee metrieken daarop (zoals een RMS en een Max) betekent dat $9 \times 2 \times 2 = 36$ extra velden in de database. Dit in plaats van bijv. $400 \times 2 \times 2 = 1600$ als niet een breedband maar een smalbandspectrum zou worden gehanteerd. Met octaafbandwaarden zijn zelfs slechts 12 extra velden nodig. Echter, dat betekent ook meer informatieverlies.

De waarden worden glijdend bepaald: voor elk punt op het spoor wordt 200 meter spoor eromheen gebruikt om breedbandwaarden te bepalen.

PSD heeft als beperking dat het een gemiddelde over een lengte (200 meter in dit geval) geeft. Een discontinuïteit, zoals een slechte ES-las, wordt er grotendeels door weggemiddeld. Om discontinuïteiten te beschrijven wordt daarom een andere signaalverwerkingsmethode ingezet. Via filtering wordt het signaal uitgesplitst naar de golflengte-breedbanden en wordt dit signaal geconvolveerd met een exponentieel plaatsfilter. Dit levert per punt op het spoor een piekniveau in elke breedband op. Voor doorgaand spoor zal dat niveau laag zijn, maar discontinuïteiten vallen op als grote afwijkingen. Ook deze waarden worden toegevoegd aan de database als extra velden.

De signaalverwerking voor beide methoden kennen tal van parameters en opties. Het onderzoek behelst het ontwerpen van algoritmes met keuzes hiervoor die recht doen aan de aard en de achtergrond van de data en aan de toepassing als evaluatie metriek voor omgevingstrillingen.

Ad 3. Zoeken naar patronen

De met trillingskwaliteitsvelden verrijkte database kan worden onderzocht op patronen aan de hand van vragen zoals:

- Is er een ontwikkeling over de tijd?
- Is er een relatie met bepaalde eigenschappen van het spoor ter plekke (type bovenbouw, type bodem, type onderhoudscontract, etc.)
- Welke statistische distributiefunctie beschrijft de data het beste (lognormal, Weibull, etc.)?

De koppeling van deze data met de bovenbouw database maakt het mogelijk om van een bovenbouwelementen (zoals ES-las) de trillingskwaliteit te bestuderen. Bovenbouwelementen kunnen worden vergeleken met doorgaand spoor en met andere bovenbouwelementen. De ontwikkeling over jaren kan worden onderzocht, de rol van bepaalde eigenschappen (type spoorwegovergang, aanwezigheid van stootplaten, etc.), de interactie tussen elementen (ES-lassen al dan niet in de buurt van spoorwegovergangen).

Ad 4. Gebruikersreflectie

Enkele vakinhoudelijke medewerkers van ProRail worden als beoogd gebruiker meegenomen in het onderzoeksproces, leidend tot bijstellingen en aanvullingen waar nodig. Bij afronding van het onderzoek wordt een grotere groep potentiële gebruikers binnen ProRail op de hoogte gebracht van de resultaten en bevraagd over de toepasbaarheid. Het gaat om vragen zoals:

- “biedt de gegeneerde data inzicht?”
- “is het voorstelbaar dat het bij gelegenheid leidt tot onderhoudsingrepen?”
- “aan wat voor type criteria moet dan worden gedacht?”
- “is het voorstelbaar dat het ook leidt tot opname als KPI in onderhoudscontracten?”

3. Ruwe data

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, 10 cm samplefrequentie

D0 is pas sinds 2020 beschikbaar en was nog niet beschikbaar voor dit onderzoek.

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

D0 overlapt met D1. Het voorstel is bij toekomstig toevoegen van D0 als overgangspunt 5 meter te gebruiken.

Voor een bepaalde onderzoeksvraag is ook van 1 campagne (voorjaar 2015) koordes gebruikt:

- Hoogte koorde 15 meter
- Shift koorde 9 meter

Met een stapgrootte van 1 meter zijn glijdend over het spoor metriekwaardes bepaald (zie volgende hoofdstuk).

Dit levert een datastructuur op met als keyveld een volgnummer.

De velden (ook wel eigenschappen, attributes of features genoemd) zijn:

- De metrieken (zie volgend hoofdstuk)
- Contractgebiednr
- Spoortak
- Meter
- Geocode
- WGS (gps)
- RDC (rijksdriehoek)
- Koorde (van 2015)

Er zijn 5.676.444 records. Dit is minder dan de ongeveer 7.000.000 meter spoor in het bestand maar niet van alle meters is voldoende data beschikbaar om metriekwaardes te bepalen (denk aan zeer korte spoortakken of aan te lage baanvaknelheden waardoor geen hoogte of schift kan worden gemeten, beiden typisch voor bijv. emplacementen).

Bij elke record is ook lang niet altijd van elke campagne een metriek beschikbaar.

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 gegevens verzameld.

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

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

- | | |
|-------------------------|------------------------|
| - GPS | - Contractgebied |
| - Spoorstaafbevestiging | - Stootplaat |
| - Fundering | - Geleidebalk |
| - Oplegging | - Puntstuk |
| - Rijvloer | - Producent |
| - Type spoor | - Buisduikers |
| - Type overweg | - Type stalenburg |
| - Spoorstafovergang | - 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.

De datastructuur bevat 6704 overwegpunten, 1545 stalenspoorbrugpunten, 4622 duikers en 2251 betonnenspoorviaductpunten.

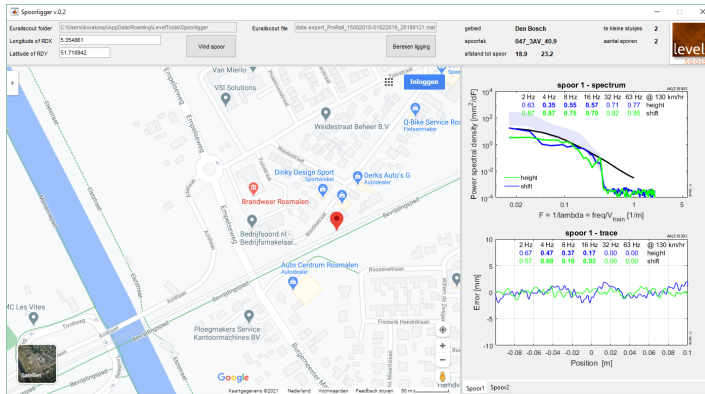
Er is een datastructuur opgezet voor ES-lassen met volgnr als key en als velden:

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

De datastructuur bevat ongeveer 49.000 ES-lassen.

Voor wissels is een vergelijkbare datastructuur opgezet maar gezien hun ruimte complexiteit, verstrengeling met ES-lassen en de rol die ze spelen in het spoortakkenmodel (begin cq eindpunten), is van de wissels vooralsnog geen studie gemaakt en is de informatie slechts gebruikt om ES-lassen die onderdeel vormen van wissels te scheiden van de overige ES-lassen.

4. Resultaat: metriekkeuze



Omgevingstrillingen hebben een sterk spectraal karakter: van bron naar ontvanger zijn er tal van frequentie-afhankelijke, dus golflengte-afhankelijke filters werkzaam. De gezochte metriek zal dus ook spectraal moeten zijn. Tot nu toe wordt daarom gebruikt in verband met omgevingstrillingen: PSD

PSD (Power spectral density)

- Grafiek (smalbandig, een soort standaarddeviatie, std, per golflengte)
- Over een zekere minimum trace lengte (bijv: 200 meter)
- Rekenintensief

PSD is een FFT (Fast Fourier Transform) maar dan zonder fase informatie en geschaald om invariant te blijven onder tracelengte (vandaar power, nl. energie per seconde) en sample-frequentie (vandaar density, nl. energie per frequentie).

PSD kan worden bepaald van de hoogte en de shift op basis van bijv. D1.

Voor onderzoek naar spoorkwaliteit, niet specifiek voor spoortrillingen, wordt soms gebruik gemaakt van de standaard deviatie van hoogte en shift op basis van bijv. D1D2. Mathematisch ligt het dicht bij een PSD maar is het niet smalbandig (std per golflengte, zoals PSD) maar breedbandig (std van een golflengtegebied).

Std (Standaard deviatie)

- Eengetalswaarde
- Van elke willekeurige trace lengte
- Makkelijk te bepalen
- Gedomineerd door de langst gemeten golflengte

Voor beoordeling van de spoorkwaliteit in het kader van onderhoud en in verband met veiligheid is er de koorde. Die heb je over 15 meter en over 9 resp. 10 meter (shift resp. hoogte).

Koorde

- Eengetalswaarde
- Over een zekere, vastgelegde trace lengte (9, 10 en 15 meter)
- Wordt direct, door het meetrijtuig gemeten en vastgelegd

Een vrij nieuwe metriek is de zogenaamde “fractale afstand”, beoogd om in de meetdata de rol van de onderbouw te scheiden van die van de bovenbouw. Het golflengte spectrum bestaat uit 3 gebieden, waarvan gepostuleerd kan worden dat deze overeenkomen met diepte in het systeem. De fractale techniek is mathematisch verwant aan de Fourier transformatie en heeft als toegevoegde waarde dat het breedbanden genereert met op grond van de data bepaalde grensfrequenties.

Fractale afstand

- Drie banden
- Banddefinitie op grond van de data zelf
- Rekenefficiënt

De fractale afstand kan worden bepaald van de hoogte en de shift op basis van bijv. D1.

Voor omgevingstrillingen zijn twee soorten oneffenheden van belang:

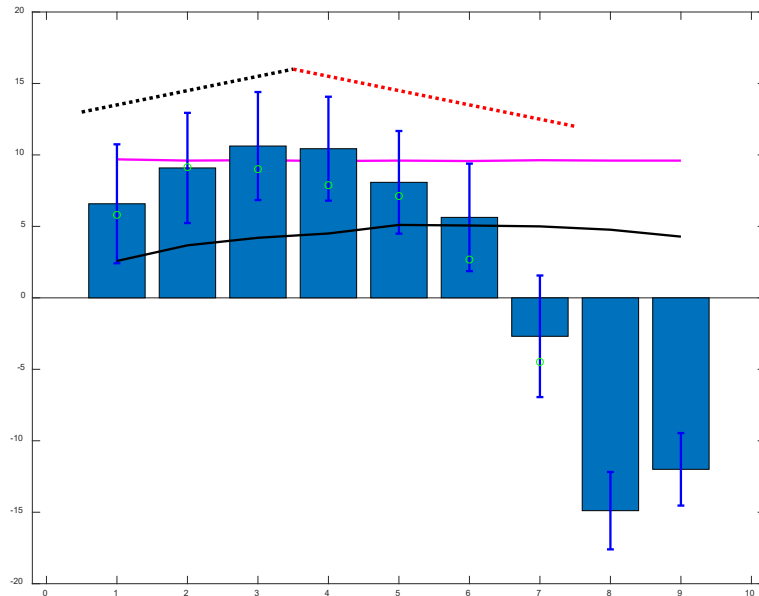
- de *gemiddelde* spoorligging, zoals die gelezen wordt door een reeks draaistellen, welke als een quasi-lijnbron trillingen de omgeving in sturen

- *lokale* oneffenheden, welke door 1 as wordt gelezen en vanuit de omgeving als een puntbron wordt ervaren
Met name de PSD, in zekere zin ook de fractale lengte en met trace-lengte keuze ook bijv. de Std zijn geschikt om de gemiddelde ligging te bepalen. Lokale oneffenheden worden echter weggemiddeld.

De koorde is erg gericht op oneffenheden maar bevat geen spectrale informatie. Daarom is een nieuwe metriek nodig, komende uit en daarom aansluitend bij de verwerkingsmethoden van trillingshinder: Max,fast. Daarvoor wordt de trace eerst gesplitst in breedbanden (zoals octave of tertsen) door middel van een filterbank, en worden deze traces vervolgens geconvolveerd met een exponentiele functie wat een amplitude oplevert: het maximum. Voor de exponentiele functie wordt een halfwaarde afstand gekozen die bij een gemiddelde treinsnelheid (100 km/hr) overeenkomt met de halfwaarde tijd die in de trillingsrichtlijnen worden gebruikt (1/8 seconde, ook wel ‘fast’ genoemd).

Max,fast

- 9 tertsbanden of 3 octaafbanden
- Van een specifiek punt op het spoor
- Rekenintensief



De metriecken 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, dus 800 meetpunten, volgen 400 waarden.

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

In lijn met de andere metriecken is een samenvatting naar breedbanden, zoals tertsen of octaven, nuttig.

Drie tertsbanden vormen een octaafband. Voor beoordelingen en trillingsprognoses is een octaafband nuttig, voor nader begrip van een specifieke situatie is iets 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 kleinst 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 frequenties. Dat is ongewenst. Een remedie is het signaal eerst te integreren of te differentieren tot een witspectrum.

De volgende twee metrieken zijn geselecteerd voor het verdere onderzoek:

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 9 tertsggebieden, met als grensgolflengtes:
 - 10 – 12.5 meter
 - 8 – 10 meter
 - 6.25 – 8 meter
 - 5 – 6.25 meter
 - 4 – 5 meter
 - 3.1 – 4 meter
 - 2.5 – 3.1 meter
 - 2 – 2.5 meter
 - 1.6 – 2 meter
- 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 9 traces.
- Elk van de 9 traces worden geconvolveerd met een exponentieel filter met een halfwaarde afstand van 2 meter
- Het maximum van het geconvolveerde signaal, binnen 1 meter afstand van het punt op het spoor, is de tertsgbandwaarde.

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

Naast RMS en Max, welke sterk gericht zijn op aansluiting bij omgevingstrillingen, zijn er nog twee metrieken die dichterbij baanonderhoud liggen. Indien uit verdere analyses blijkt dat er sterke correlatie is tussen een baanonderhoudmetriek en een omgevingstrillingsmetriek zou die laatste weer kunnen vervallen.

Std van 3 golflengtegebieden

Voor een punt op het spoor wordt een zekere lengte rondom dat punt genomen waarover de standaarddeviatie wordt bepaald. Deze lengtes zijn:

100 meter

15 meter

3 meter

Koorde

Voor elk punt op het spoor levert het meetrijtuig een koorde. Deze wordt bepaald door een virtuele lijn (koorde) rondom dat punt te laten steunen op zijn twee uiteindes. De afwijking van de koorde is de koordewaarde van dat punt. Koordelengtes zijn 9 (schift), 10 (hoogte) en 15 (schift en hoogte) meter. In dit onderzoek waren alleen de koordes beschikbaar van 1 campagne (voorjaar 2015). Die campagne is gebruikt om correlaties te zoeken tussen koorde enerzijds en RMS en Max anderzijds.

5. Resultaat: onderzoeksvragen

Hoe ligt het spoor er gemiddeld bij? 1/2

De bovenste tabel geeft het gemiddelde over het gehele spoorareaal van de **RMS** voor 7 tertsbanden.

De cijfers zijn gebaseerd op de voorjaarscampagne van 2020, de laatst beschikbare data.

De tertsbanden dragen de namen van de middelste golflengte in die band. De eerste tertsband bijvoorbeeld is dan van 11 meter en beslaat golven tussen ongeveer 10 en 12 meter.

Terzijde: drie tertsbanden vormen samen een octaafband: 11, 9 en 7 vormen samen de 9 meter octaafband met daarin golflengtes tussen ongeveer 6 en 12 meter. Het spoortrillingsmodel OURS werkt met octaafbanden dus voor de input van dit model dienen de waardes kwadratisch te worden opgeteld. De gemiddelde waarde voor de hoogte in de 9 meter octaafband bedraagt $\sqrt{0,40^2 + 0,41^2 + 0,39^2} = 0,69$.

De onderste tabel betreft de **Max**. Naast dat deze interessant is als referentie voor het vinden van hotspots op regulier spoor (met wat voor oorzaak ook), is deze gemiddelde waarde een referentie voor de Max waardes van specifieke discontinuïteiten, zoals ES lassen en kunstwerken.

Dat de Max waardes iets lager zijn de RMS waardes komt omdat bij de verwerkingsmethodes op een aantal punten verschillen. Max en, met name, RMS hebben dan ook geen duidelijke eenheid (zoals mm). Parameters zoals de $V_{eff,max}$ (trillingshinder) en L_{Aeq} (geluid) hebben vergelijkbare issues en zijn daarom dimensieloos gemaakt met deling van het signaal door een referentiewaarde. De referentiewaarde hier is 1 mm (en 1 mm/s² voor RMS bij de tertsbanden 5,5 – 2,2 meter).

RMS	11	9	7	5,5	4,5	3,7	3,1	2,6	2,2
Hoogte	0,40	0,41	0,39	0,36	0,34	0,33	0,15		
Schift	0,22	0,19	0,15	0,13	0,15	0,22	0,13		

Max	11	9	7	5,5	4,5	3,7	3,1	2,6	2,2
Hoogte	0,36	0,36	0,37	0,26	0,16	0,09	0,03		
Schift	0,21	0,17	0,14	0,09	0,07	0,06	0,02		

Hoe ligt het spoor er gemiddeld bij? 2/2

Voor ES lassen, kunstwerken en spoorwegovergangen is **een gemiddelde Max** bepaald.

De cijfers zijn gebaseerd op de voorjaarscampagne van 2020.

De waardes zijn ongeveer 2x zo hoog als die voor regulier doorgaand spoor.

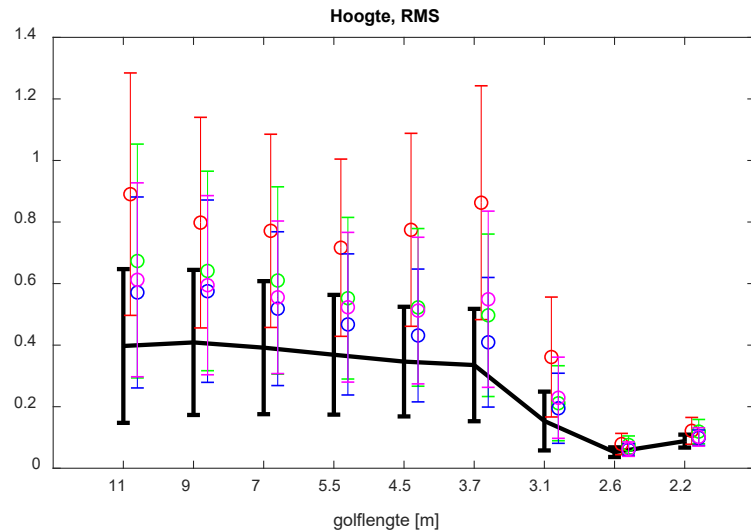
Voor de hoogste twee banden, 2,6 en 2,2 meter, zijn geen betrouwbare resultaten beschikbaar. De parameter D0 zal deze, en nog een aantal nog hogere banden, in kaart brengen.

ES-las	11	9	7	5,5	4,5	3,7	3,1	2,6	2,2
Hoogte	0,70	0,69	0,74	0,53	0,37	0,23	0,06		
Schift	0,33	0,28	0,24	0,15	0,12	0,11	0,04		

kunstwerk	11	9	7	5,5	4,5	3,7	3,1	2,6	2,2
Hoogte	0,74	0,73	0,72	0,50	0,35	0,22	0,06		
Schift	0,35	0,27	0,24	0,14	0,12	0,10	0,04		

overweg	11	9	7	5,5	4,5	3,7	3,1	2,6	2,2
Hoogte	0,67	0,66	0,71	0,48	0,33	0,20	0,05		
Schift	0,31	0,26	0,23	0,14	0,12	0,10	0,03		

Wat zijn de bandbreedtes? 1/2

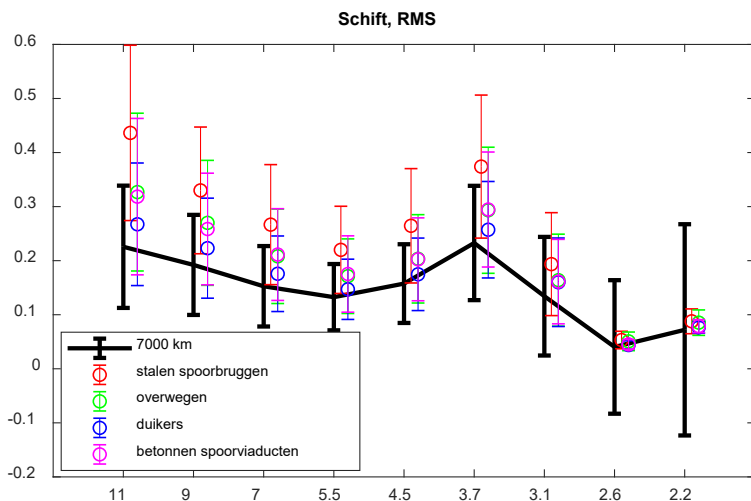


RMS

Voor de hoogte zijn hiernaast de bandbreedtes geplot voor het hele areaal (zwart) en voor specifieke onderbouwelementen. De errorbar betreft 1x de standaarddeviatie. De hoogste twee banden (2,6 en 2,2 meter) betreffen ruis, vanwege het laagdoorlaatfilter in het meetrijtuig.

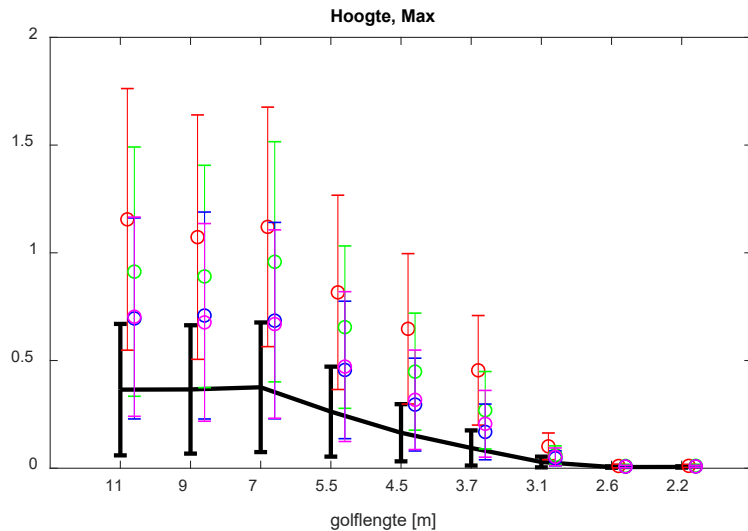
Wat betreft de onderbouwelementen gaat het, net als bij Max op de volgende pagina, om waarden bij de overgang van aarden baan naar kunstwerk. Aangezien de RMS een gemiddelde waarde over 200 meter betreft is het niet onlogisch dat de errorbars van de kunstwerken overlappen met die van het gehele areaal: er is maar een matige statistisch significante invloed van die overgangen op het 200 meter gemiddelde.

Een opmerkelijke uitzondering betreft de spoorbruggen. Die wijken statistisch significant ongunstig af. Blijkbaar is de spoorligging op de brug, of naast de brug, of op en naast de brug, in zijn geheel ongunstiger. Maar mogelijk is er sprake van een andere onderliggende verklarende factor, zoals dat spoorbruggen vooral over rivieren liggen en dus in een omgeving met slappe grond met diensgevolge slechtere spoorligging.



Bij de schift vallen de spoorbruggen wederom ongunstig op.

Wat zijn de bandbreedtes? 2/2

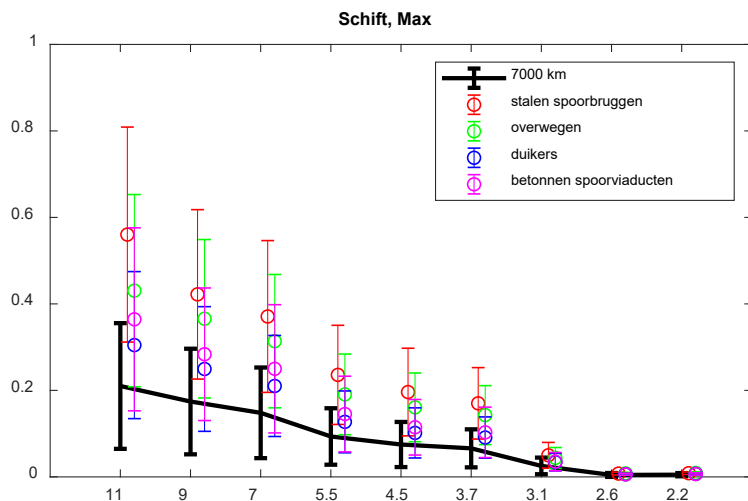


Max

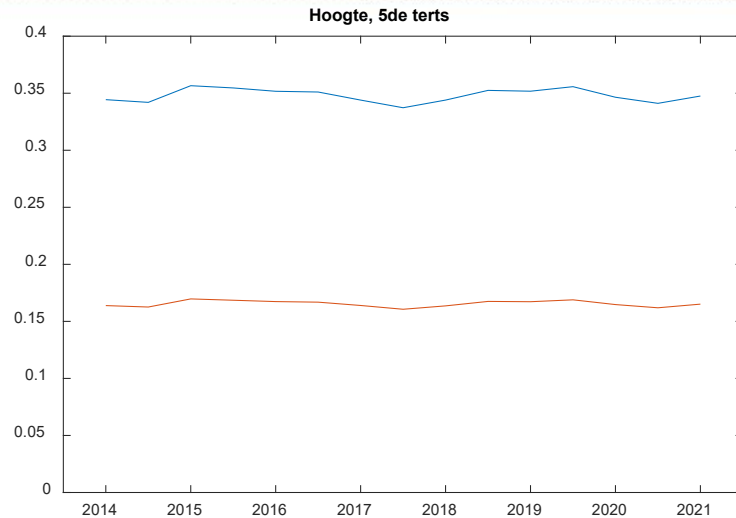
De bandbreedtes in Max zijn relatief groter, of anders gezegd: de variatiecoëfficiënt (standaard deviatie gedeeld door gemiddelde) is groter.

Wederom vallen de stalen bruggen op. De overwegen wijken ook duidelijk statistisch significant af. Dat is zoals verwacht: de Max waarde concentreert zich op de oneffenheid bij een overgang in de baanconstructie en juist van overwegen is bekend dat daar de trillingsniveaus in de omgeving sterker zijn.

Dat in de Max een sterkere neerwaardse trend optreedt dan in de RMS komt omdat in de RMS de banden vanaf 5,5 meter twee maal gedifferentieerde waarden betreffen (dus equivalent aan versnellingen in plaats van verplaatsingen). Het ligt voor de hand ook voor de Max deze banden dubbel te differentieren. Er ontstaat dan een vlakker spectrum waarbij bovendien binnen de banden er geen ongewenste zwaardere weging van de lagere golflengtes optreedt bij het bepalen van de bandwaarde. Ook vallen mogelijke informatieve afwijkingen van de witte ruis, zoals de piek bij 3,7 meter in de RMS van de shift (vorige pagina) duidelijker op. Die piek overigens treedt in de Max van de shift ook op maar is minder goed zichtbaar.

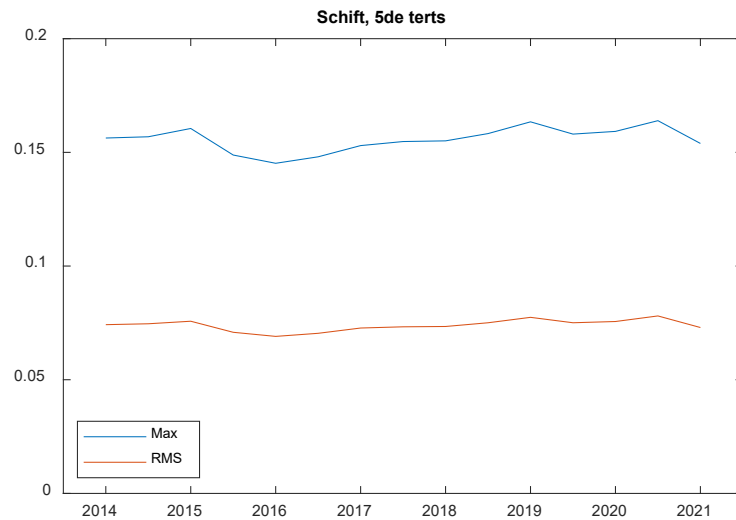


Is er een ontwikkeling over de tijd?

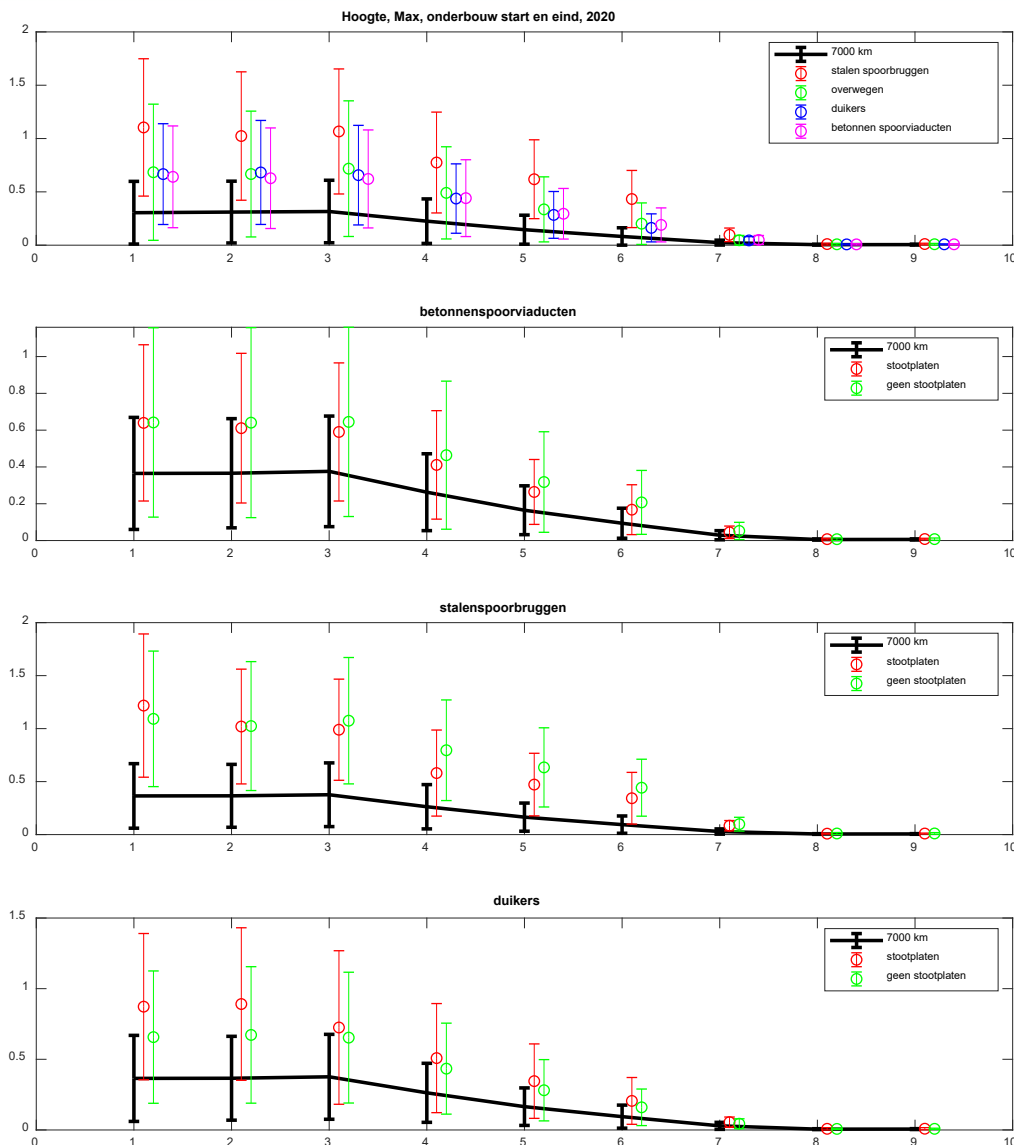


Naastgelegen grafieken tonen hoogte en schift voor opeenvolgende campagnes van de 5de terts het gemiddelde over het hele areaal. De 5^{de} terts blijkt in de analyses representatief te zijn voor wat er in 4^{de}, 5^{de} en 6^{de} terts (samen de 2^{de} octaafband) gebeurt als het gaat om ontwikkelingen in de tijd, om het effect van onderbouwelementen, etc. De hogere tertsen (7, 8 en 9, samen de 2^{de} octaafband vormend) worden voor een groot deel weggefilterd in de ruwe data (D12) en de lagere tertsen (1, 2 en 3, samen de 1^{ste} octaafband vormend) zijn voor omgevingstrillingen minder van belang. Om deze redenen is de 5^{de} tertsband een geschikte band om effecten te bestuderen.

Over de afgelopen 8 jaar is geen hele duidelijke trend in negatieve of positieve zin zichtbaar. Wel varieert het gemiddelde van jaar tot jaar. Dat is opmerkelijk want voor zo'n relatief sterke variatie is geen onmiddellijke duidelijke verklaring.



Wat is de invloed van baanonderdelen? (1/3)



Overgangen in de onderbouw kunnen leiden tot relatieve zettingen en stijfheidsvariatie die meetbaar zijn als geometrie veranderingen in de bovenbouw onder voorlast. Dat speelt bijvoorbeeld bij bruggen, viaducten, overwegen en duikers.

Die geometrieverandering kan, vanuit omgevingstrillingsoogpunt, het beste worden beschreven met de Max.

De bovenste grafiek toont hoe de Max van de begin- en eindpunten van deze onderbouwsystemen zich verhouden tot regulier spoor (zwarte lijn). Met name stalen spoorbruggen springen er uit, maar de andere onderbouwelementen geven ook significant hogere waarden.

Bij bruggen, viaducten en duikers worden vaak stootplaten toegepast. Verwacht mag worden dat die de Max reduceren, aangezien ze bedoeld zijn relatieve zetting en stijfheidsvariatie te mitigeren.

Er is volgens de tweede en de derde grafiek inderdaan een zekere heilzame werking van stootplaten te ontdekken bij Vmax. Bij duikers (onderste grafiek) echter niet.

Een verklaring kan zijn dat stootplaten dat er in harde bodems nog veel duikers zijn zonder stootplaat. Dan zou er een groot effect van de zachte bodem zijn die niet geheel wordt gecompenseerd door een stootplaat.

multivariate analyse

MaxFast van 5de terts

bodem: hard = 1, zacht = 2

stootplaat: wel = 1, geen = 2

*dus: (1,1) in theorie gunstigst
 (2,2) minst gunstig*

De verwevenheid tussen stootplaat en bodem is onderzocht met behulp van een multivariate analyse. Deze levert een "model" op voor Max met stootplaat en bodemstijfheid als parameter. Dit is gedaan voor een areaal aan spoortakken waarvan de bodem bekend en duidelijk erg slap of erg stijf is. De analyse is gedaan voor de 5de terts. Dit leverde op:

Viaduct

$$\text{MaxFast} = 0 + 0,097 \cdot \text{bodem} + 0,126 \cdot \text{plaat}$$

- een zachtere bodem en afwezigheid van een stootplaat leiden tot een hogere Max
- intuïtief logisch
- stootplaat dominant en effectief, i.t.t. wat de grafiek (vorige pagina) suggereert
- dus stootplaat ook op harde bodem goed idee

Brug

$$\text{MaxFast} = 0,95 - 0,21 \cdot \text{bodem} + 0,035 \cdot \text{plaat}$$

- bodem dominant
- stijvere bodem leidt tot hogere Max, dit vraagt om een verklaring
- mogelijke verklaring is dat bij bruggen (i.t.t. viaducten) er sprake is van grotere overspanningen en bijbehorende aanbruggen, landhoofden en grondwerken, welke bij slappe grond tot een groter en stijver talud leidt dan bij een stijve grond waar minder of niet aan grondverbetering wordt gedaan
- stootplaat helpt weinig

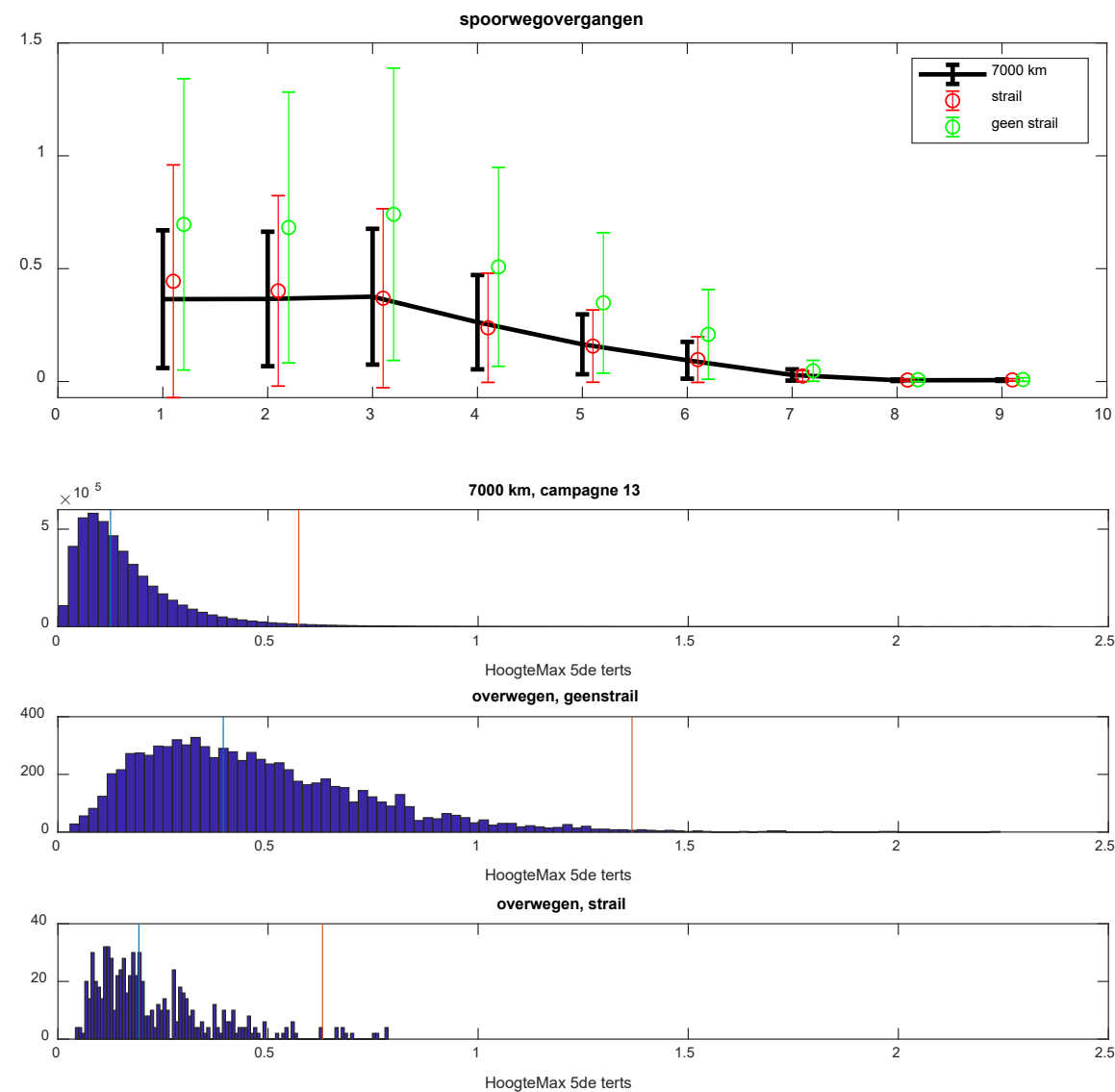
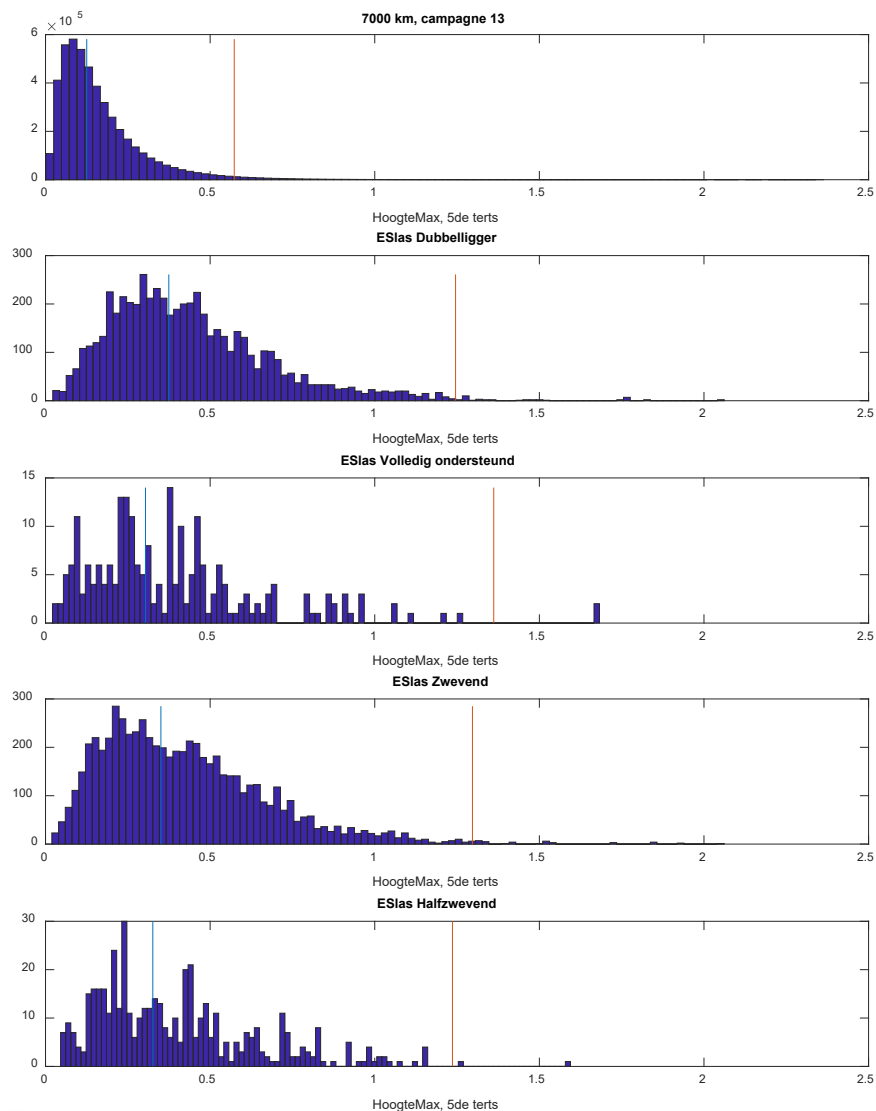
Duikers

$$\text{MaxFast} = 0,060 + 0,055 \cdot \text{bodem} + 0,085 \cdot \text{plaat}$$

- plaat dominant
- zoals bij viaducten is volgens dit model te verwachten dat bij een slappe grond de stootplaat de slappe grond meer dan compenseert
- in de grafiek (vorige pagina) is dat niet terug te zien, deze schijnbare tegenstelling is nog niet verklaard

Wat is de invloed van baanonderdelen? (3/3)

Nog enkele resultaten



7. Conclusies en aanbevelingen

Er zijn volgens dit onderzoek twee metrieken die iets toevoegen aan de bestaande set van parameters:

- **RMS** van Hoogte en Shift; deze beschrijft het spoor gemiddeld over 200 meter
- **Max** van Hoogte en Shift; deze beschrijft locale discontinuïteiten in het spoor

Deze metrieken zijn zo ontworpen dat ze representatief worden geacht voor de rol van de spoorligging voor omgevingstrillingen: de trillingskwaliteit van het spoor. Overigens is deze representativiteit nog niet onomstotelijk vastgesteld. De onderbouwing ligt in de aansluiting die ze hebben bij bronmodellen en voortplantingsmodellen voor spoortrillingen. Een empirische onderbouwing mist nog.

RMS en Max voegen iets toe ten opzichte van Std (standaarddeviatie over een lengte spoor) en bijv. de zogenaamde "fractalen" omdat ze meer informatie over golflengtes bevatten.

Ten opzichte van koordes is er sprake van statistisch slecht correlatie en geven RMS en Max blijkbaar andere, dus toevoegende informatie.

Sinds geruime tijd zijn PSD's in gebruik als metriek voor trillingskwaliteit van de spoorligging. Ten opzichte van PSD's is de toegevoegde waarde tweeledig:

- De informatie in de PSD wordt geordend in enkele breedbanden, wat vergelijking en toepassing vergemakkelijkt
- Aan de PSD is nu de Max toegevoegd waardoor discontinuïteiten (zoals spoorwegovergangen, Elassen, etc.) niet meer worden weggemiddeld

Een metriek om specifiek de rol van een discontinuïteit op omgevingstrillingen in beeld te brengen is nieuw. Max toont duidelijk een (gunstig) effect aan van STRAIL platen voor spoorwegovergangen en bijv. juist geen effect van het nieuwste type 8 ES-lassen (met langere langsplaten). Een multivariate analyse op basis van Max geeft inzicht in de verstrengeling van de effecten van stootplaten en bodemcondities bij kunstwerkovergangen.

RMS en Max zijn bruikbaar als invoer voor spoortrillingsmodellen die het trein-baan-bodem-gebouw systeem beschrijven in het frequentiedomein. Een voorbeeld hiervan is Ours, het screeningmodel van RIVM. Ours' invoerparameter Cgeo is een verhouding tussen locale spoorligging en over NL gemiddelde spoorligging, in octaafbanden. Voor puntbronnen in Ours kan Cgeo worden bepaald op basis van Max, voor lijnbronnen op basis van RMS.

Door historische BBMS data te combineren met Ours kan bijv. voor bepaalde woonwijken de ontwikkeling van omgevingstrillingen over de tijd in beeld worden gebracht. Het effect van veroudering van het spoor, bepaalde onderhoudsregimes of specifieke maatregelen aan het spoor kunnen zodoende worden geëvalueerd.

- De BMSS data in deze studie betrof alleen D12. Dat zijn golflengtes van 3 meter en langer. Voor omgevingstrillingen zijn kortere golflengtes ook van belang, zelfs meer van belang. Sinds 2020 is in BBMS ook D0 beschikbaar, met daarin de golflengtes tussen 1 en 5 meter voor de hoogte. Voor een goede karakterisering van de trillingskwaliteit van het spoor is het van groot belang **D0** te gaan gebruiken om de hoogste drie tertsbanden (dus de hoogste octaafband) van RMS en van Max te bepalen.
- In de statistische studies in dit onderzoek is steeds de vijfde tertsband gebruikt om een aantal redenen. Een van de redenen is dat een heel spectrum (9 of 3 waardes) een extra complexiteit toevoegt aan parameterstudies. Zodra de hoogste tertsen worden gebaseerd op D0 is het raadzaam daar waar een eengetalswaarde nodig is voor de karakterisering van de trillingskwaliteit, deze te baseren op bijv. de **hoogste octaafband**, of de 7de of 8ste terts. Deze komen namelijk overeen met ongeveer 8 Hz bij 80 km/uur (dominante frequentie van goederentreinen) en 16 Hz bij 140 km/uur (dominante frequentie van reizigerstreinen).
- **Wissels** zijn in deze studie buiten beschouwing gelaten. Dit heeft vooral te maken met hun geometrische complexiteit. Het zijn echter belangrijke bronnen van spoortrillingen, blijkt uit empirie. In tegenstelling tot andere baanonderdelen is het echter onduidelijk hoe ze vanuit het oogpunt van omgevingstrillingen het beste zijn te karakteriseren: als een lijnbron (dus met RMS) of als een puntbron of een reeks van puntbronnen (dus met Max)? Er sprake van een zekere ruimte uitgebreidheid met daarin puntstukken, ES-lassen en korte boogstralen. Het vraagstuk van karakterisatie speelt zowel bij trillingsbronmodellering als bij beoordeling van baankwaliteit. Het is raadzaam in een volgende onderzoeksstap de wissels nader te beschouwen door RMS waardes en Max waardes gecombineerd te beschouwen.
- Deze studie is in zijn toepassing toegespitst op discrete baanonderdelen zoals kunstwerken en lassen. Het ligt voor de hand nu ook bovenbouwconstructies zoals verschillende **dwarsliggertypes** te analyseren, op basis van RMS.
- Voor zowel RMS als voor Max mist er nog een **empirische onderbouwing** van de representativiteit voor omgevingstrillingen. RMS is weliswaar afgeleid van de internationaal in gebruik zijnde PSD maar ook daarvoor is voorzover bekend nog geen harde onderbouwing beschikbaar. Oorzaak van dat laatste is dat empirisch aantonen niet eenvoudig is. Wat nodig is zijn cases waarin alle factoren die invloed hebben op omgevingstrillingen hetzelfde blijven en alleen de spoorligging wordt veranderd. RMS of Max is representatief indien het trillingsniveau in de omgeving dan lineair schaalte met zo'n waarde: een X maal zo hoge RMS of Max moet leiden tot een Y maal zo hoge Vmax in een gebouw in de omgeving waarbij Y liefst gelijk is aan X. De meest praktische test is waarschijnlijk het gebruik van een tweesporig traject met een woning op een afstand van 50 meter waarbij beide sporen onderling flink verschillen in trillingskwaliteit en waarbij een testtrein met een vaste snelheid over beide sporen wordt gestuurd.

- De RMS en de Max betreffen een waarde per strekkende meter spoor. Het ligt voor de hand deze data te plotten tegen de achtergrond van een **grafische kaart**, in de vorm van bijv. een heatmap. Hotspots springen dan als opvallende punten naar voren. RMS en Max zijn spectra, voor kaarten is een eengetalswaarde nodig. Zoals eerder aanbevolen kan dan het beste de derde octaaf worden gebruikt, zodra D0 beschikbaar, en anders de vijfde tertz zoals in deze studie.
- RMS en Max zijn metrieken op basis van BBMS data die als afgeleide, secundaire data weer zouden kunnen worden toegevoegd aan BBMS of in ieder geval als een aparte database toegankelijk zou moeten worden gemaakt aan **gebruikers** zoals trillingsdeskundigen en spooringenieurs. Zowel de historische als de actuele data zijn voor deze gebruikers interessant dus het is te adviseren de huidige database, die start in 2013, elk half jaar te laten groeien.
- Om de **database** toegankelijk te maken voor gebruikers zijn er twee soorten processen nodig: een achtergrondproces die eens per halfjaar de nieuwe BBMS data binnenhaalt en verwerkt tot RMS en Max van het gehele areaal en een UI (user interface) waarmee gebruikers queries (zoekopdrachten) kunnen doen cq data kunnen ophalen. Het achtergrondproces zouden de in dit onderzoek ontwikkelde Matlab functies kunnen zijn, voor de UI is echter een professionele en stabiele app nodig. Daar tussen in zit de database. De database structuur die is opgezet in dit onderzoek is in principe geschikt maar beperkt in toepassing want een Matlab object. Het is raadzaam de database opnieuw te structureren en te bouwen in een voor ProRail meer geëigende database omgeving.
- Een belangrijk aspect aan het onderzoek was de koppeling van BBMS gebaseerde parameters RMS en Max aan algemene gegevens over locatie en eigenschappen van **spoorobjecten**. Dit bleek zeer nuttig en het is dus raadzaam de database met RMS en Max te verrijken met bovenbouw- en onderbouwgegevens.
- Het halfjaarlijkse binnenhaalproces, de database(s) en de UI zouden moeten worden ingebed in een ProRail omgeving maar wel eenvoudig toegankelijk worden gemaakt voor gebruikers ook buiten ProRail. Tot nu toe was BBMS data voor externe trillingsdeskundigen alleen beschikbaar als ze de “juiste contacten” hadden. Dit is voor trillingskwaliteitparameters onwenselijk, zeker nu deze input zijn voor een model van overheidswege als Ours. Het te adviseren de data als **open source Big Data** aan elke belangstellende beschikbaar te stellen. Dit zal niet alleen voordelig zijn voor de kwaliteit van trillingsonderzoek maar mogelijk ook leiden tot analyses en toepassingen buiten de kring van modelleurs van spoortrillingen en spooringenieurs van ProRail.
- Naast speciale meetrijtuigen wordt het spoor tegenwoordig ook bemonsterd met reizigerstreinen die zijn voorzien van o.a. versnellingsopnemers op de aspot. Deze **aspotversnellingen** sluiten nauw aan bij RMS, aangezien voor RMS bij de meeste tertz- en octaafbanden de BBMS data eerst twee maal wordt gedifferentieerd naar een soort “spoorversnelling”, welke idealiter overeen komt met de aspotversnelling. Dat betekent dat in principe mogelijk is RMS, maar ook Max, vanuit een beïnstuurde reizigerstreinen te meten. Daarmee zou op een veel kortere tijdschaal dan eens in de 6 maanden specifieke stukken spoor op trillingskwaliteit kunnen worden bemonsterd. Zo zou daarmee bijvoorbeeld onderzocht kunnen worden wat op een korte en middellange termijn het effect van onderstoppen is op omgevingstrillingen.