

Drie onderzoeksvragen over spoorgeometrie en omgevingstrillingen

Rapportnummer: LA.250503.R01
Plaats en datum: Eindhoven, 3 oktober 2025
Versie: 1.3
Opdrachtgever: ProRail
Uitgevoerd door: Level Acoustics & Vibration
Auteur(s): Arnold Koopman
Erik van Gils
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. Invloed van **type ondergrond**
5. Degradatie van **ES-lassen**: oud vs nieuw
6. Trillingskwaliteit **spoorbogen**
7. Conclusies

1. Doel

Dit project behelst de beantwoording van een drietal onderzoeksvragen gericht op de relatie tussen spoor(componenten) en omgevingsfactoren als type ondergrond, de aanwezigheid van ES-lassen of bogen:

1. Toont de spoorgeometriedata een relatie tussen degeneratiegedrag van het spoor enerzijds en type ondergrond anderzijds?
2. Hoe sterk is de degradatie van ES-lassen vanuit de optiek van omgevingstrillingen, met name in relatie tot type ES-las?
3. Wijkt de trillingskwaliteit van spoorbogen positief of negatief af van recht spoor? Is een verschil te zien tussen het binnenbeen en het buitenbeen?

Het onderzoek maakt deel uit van het Innovatieprogramma Bronaanpak Spoortrillingen (IBS).

Dit rapport doet kort verslag van de resultaten van het onderzoek.

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).

Dit project is opgedeeld in drie vragen. Elke vraag kent een eigen stappenplan.

Deel 1: onderzoek relatie tussen degeneratiegedrag van spoor(componenten) en type ondergrond

1. Koppel de RMS en Max op basis van historische D1-data (hoogte en schift vanaf 2013) met de ProRail ondergrondinventarisatie.
2. Focus op een selectie van enkele trajecten (Zevenbergen – Bergen op Zoom – Roosendaal) en/of Geldermalsen – Tiel – Elst.

Deel 2: onderzoek degradatie ES-lassen vanuit de optiek van omgevingstrillingen in relatie tot type ES-las

Bepaal op basis van de BBMS D0-data van de meetcampagnes sinds 2020 steeds het octaafbandspectrum van de Max van de hoogte bij een frequentie van 16 Hz bij een rijsnelheid van 130 km/h. Vervolgens wordt gekeken naar het degradatiegedrag van de ES-lassen met "nieuwe" (langere) langsplaten ten opzichte van de oude ES-lassen.

Deel 3: onderzoek de trillingskwaliteit van spoorbogen ten opzichte van recht spoor

1. Op basis van de BBMS D0-data van de najaarcampagne van 2023 wordt de RMS van de schift bepaald bij 8 Hz bij een rijsnelheid van 130 km/h. Omdat er geen directe koppeling kan worden gemaakt met een bogen bestand, wordt de verkanting gebruikt als parameter. Er wordt gekeken of er een verschil is tussen het binnenbeen en buitenbeen.

- 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.

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 de UMF 120 meettrein 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:

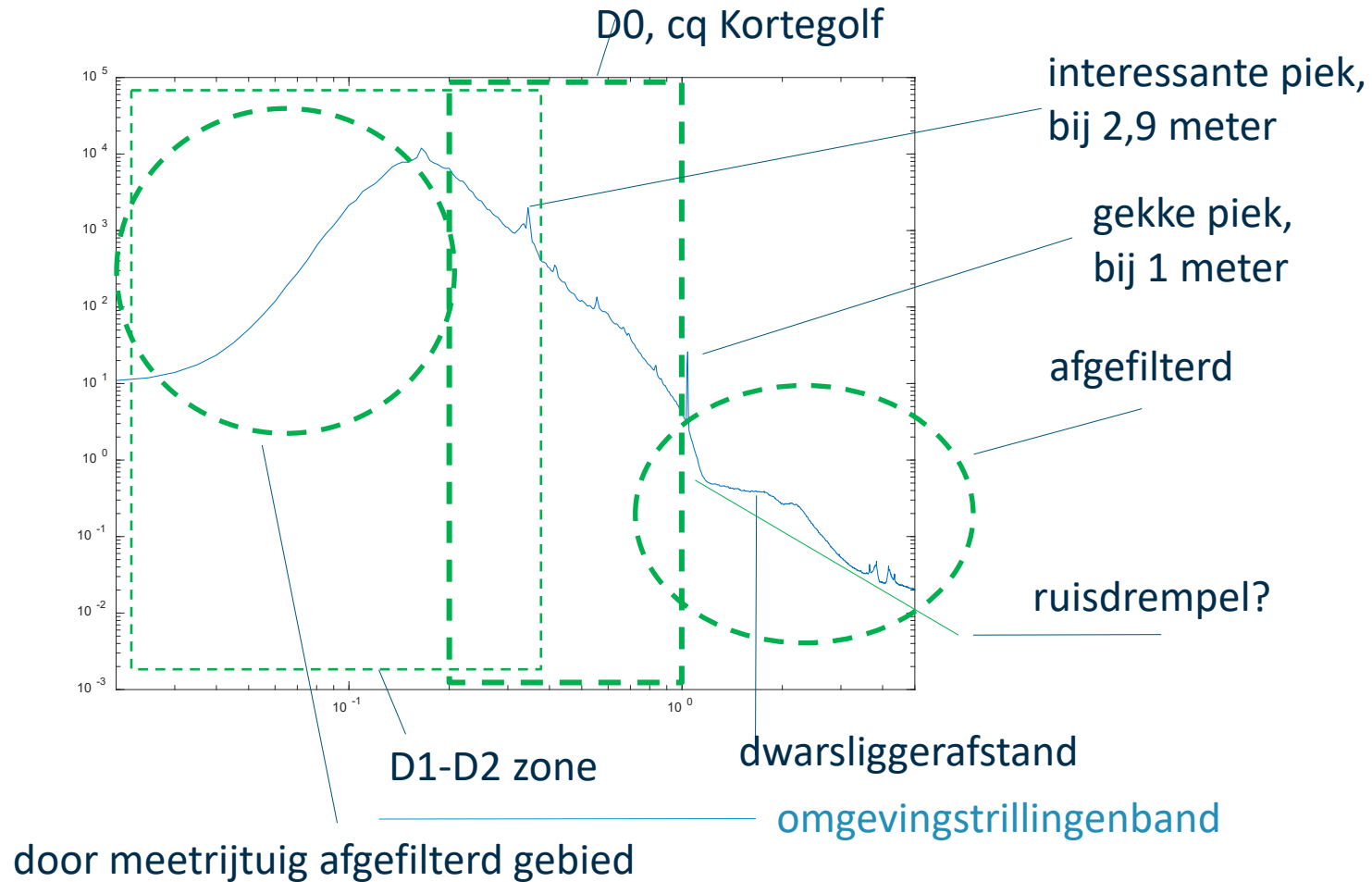
D1: golflengtegebied 3 – 25 meter , 25 cm samplefrequentie

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

D0: golflengtegebied 1 – 5 meter, 5 cm samplefrequentie

D0 is 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.

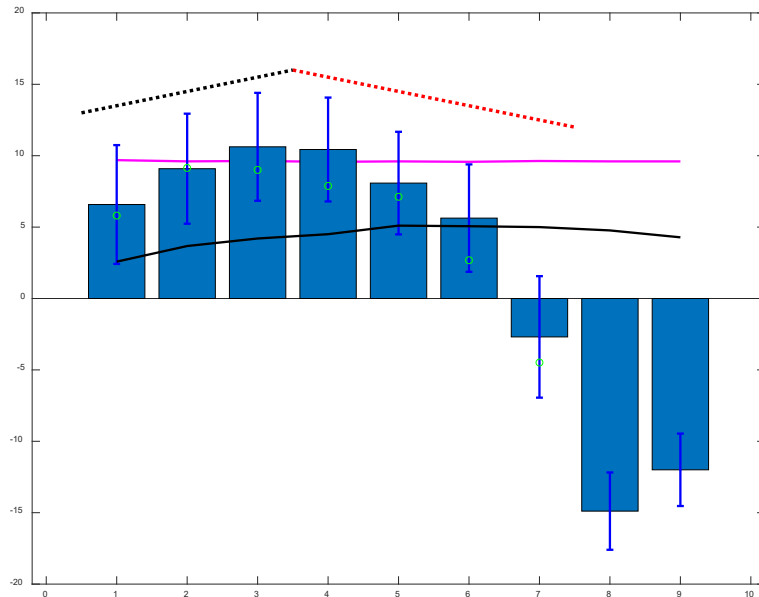
De figuur hiernaast toont een dergelijke PSD op basis van D0 data.

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 komt overeen met de omtrek van de meest gangbare treinwielen. De vraag is of we hier zien hoe bijv. een vlakke plaats het spoor heeft beschadigd of dat het meetrijtuig zelf een wiel of wielen heeft die bijv. excentrisch zijn.

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.



- De waardes 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 waardes onder de 0 dB, bij de drie hoogste tertsbanden, betreffen door het meetrijtuig gefilterde (dus verzwakte) waardes.
- 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 hoogesnelheidsspoor.
- 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 tertsgelieden, 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 tertsgelieden 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 tertsgelieden (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 tertsgelied 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 tertsgeliedfilterbank gehaald. Dit maakt van 1 trace 12 traces.
- Elk van de 12 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 tertsgeliedwaarde.

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

4. Type ondergrond

De onderzoeksvraag is of vanuit trillingsoogpunt het spoor op slappe bodems er mogelijk slechter bij ligt dan op stijve bodem en/of er sprake is van snellere veroudering op slappe bodems.

Van een aantal trajecten zijn de beschikbare bodemprofielen gebruikt. Zie figuur en lijst:

- Amsterdam – Alkmaar
- Den Haag – Schiedam
- Dordrecht – Breda
- Dordrecht – Elst
- Kijfhoek – Elst
- Meppel – Leeuwarden
- Utrecht – Den Bosch
- Utrecht – Naarden
- Vlissingen – Roosendaal

De profielen zijn door ProRail geleverd in de vorm van een xls per geocode op dat traject.

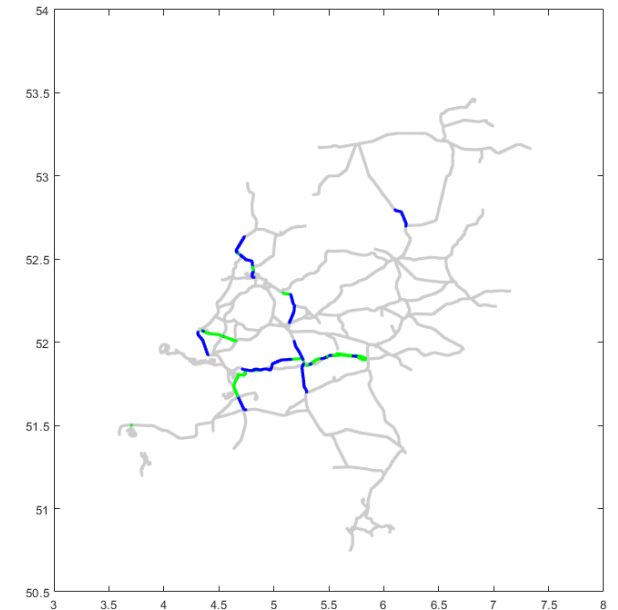
In de xls staan voor een aantal locaties langs de geocode een of meer bodemscenario's met hun kans van optreden. Een bodemscenario's betreft een beschrijving van een aantal bodemlagen met als parameters onder andere de grondsoort, de dikte en diepte, het volumiek gewicht en de schuifgolfsnelheid.

Met een analytisch model volgens Wolf¹ is voor elke locatie van het meest waarschijnlijke scenario de bodemadmittantie berekend voor bodemtrillingen met frequenties rond de 10 Hz. Deze bodemimpedantie wordt geacht een maat te zijn voor de mate van stijfheid van de bodem.

Van de locaties is uiteraard ook, naast de geocode, de kilometrering bekend. Dat maakt het mogelijk om een berekende bodemstijfheid direct te koppelen aan spoortrillingsmetrieken.

Als metriek is de RMS gebruikt in tertsbanden die uit D1 kunnen worden gehaald. D1 is namelijk beschikbaar reeds vanaf 2103 en de verwachting is een effect van bodemstijfheid in ieder geval in de wat langere golflengtes te zien zal zijn. RMS is voor een letterlijk "diepere" oorzaak zoals bodemstijfheid meer geschikt dan het alternatief Max,fast welke meer geschikt is voor effecten van de bovenbouw.

1) *Foundation vibration analysis using simple physical models*, John P. Wolf, Prentice Hall, 1994

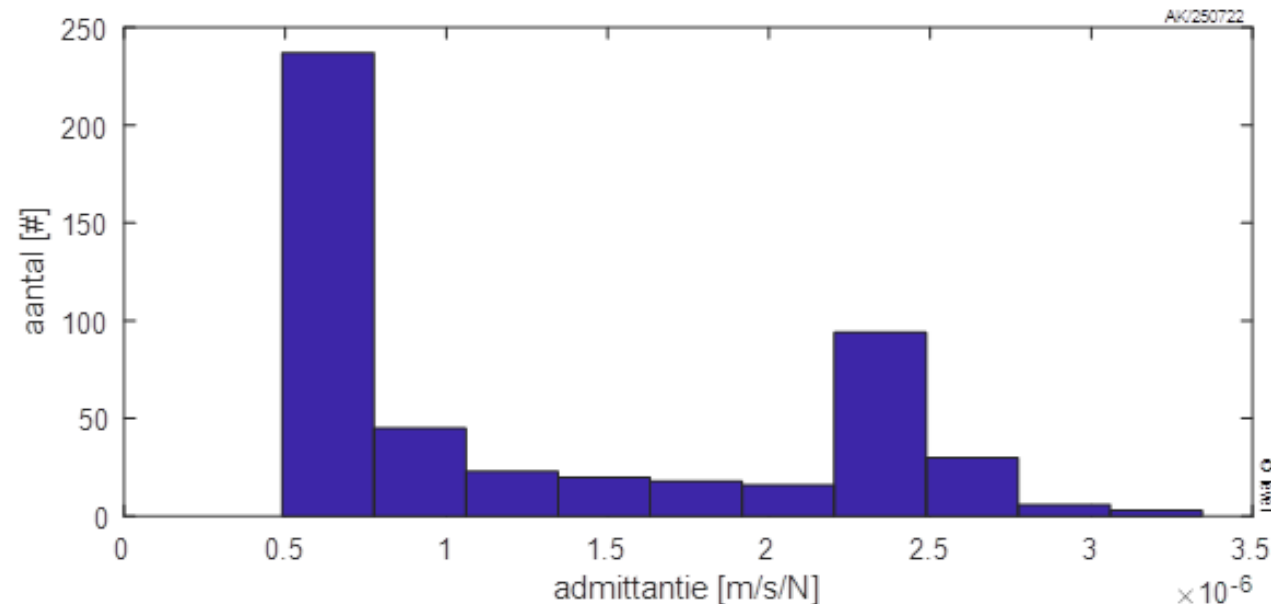


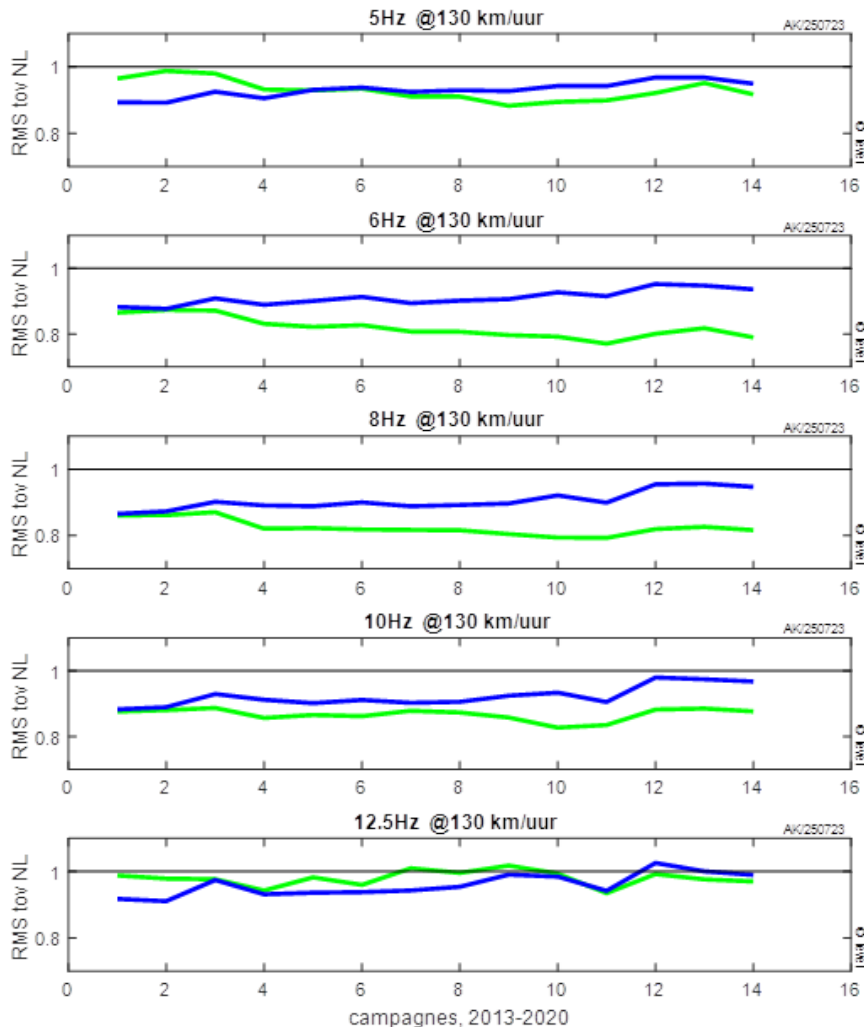
Er zijn bijelkaar 492 locaties beschikbaar.

Onderstaande grafiek toont een histogram van de uit de bodemprofielen berekende admittanties.

Er zijn twee duidelijke groepen. Ze zijn te labelen als slap versus stijf. Er zijn meer slappe locaties hetgeen verklaard kan worden uit de de selectie van trajecten.

Voor de verdere analyse is $1\text{E-}6 \text{ m/s/N}$ gebruikt als scheidslijn tussen slap en stijf. Op een logaritmische schaal van stijfheden is dat ongeveer een waarde halverwege in de range.





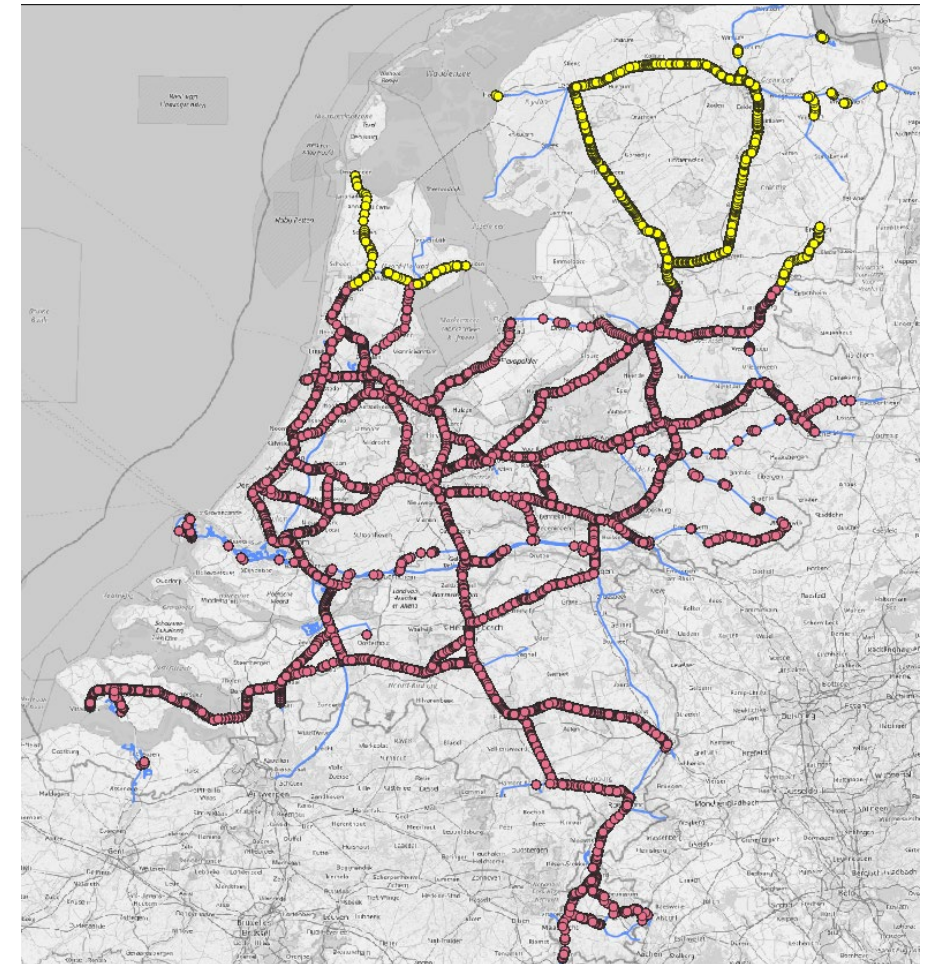
In de grafiek hiernaast wordt voor een tertsbanden (dus golflengtes) het verloop van de RMS in de halfjaarlijkse campagnes sinds 2013 gepresenteerd. De blauwe lijn betreft het gemiddelde over alle zachte bodems, de groene het gemiddelde over alle stijve bodem.

Het volgende valt op.

1. Op zachte bodems (blauw) is de RMS inderdaad hoger in de golflengten tussen 6 en 12 Hz. Aangezien dit D1 data zijn er geen tertsen beschikbaar boven de 12.5 Hz.
2. De trajecten vallen grotendeels onder het NL gemiddelde zoals vastgesteld in 2022 (de 1 lijn). Mogelijk is dit toeval. Het gaat om 310 km spoor op harde bodem en 380 op zachte. Bijelkaar is dit 10% van het areaal en is een afwijking dus niet onverwacht. Een andere mogelijke verklaring is dat het spoor er in de jaren 10 beter bij lag dan in 2022.
3. In 2013 is er nog weinig verschil tussen hard en zacht. Over de jaren verslechtert het spoor op zachte bodem. Op stijve bodem blijft het ongeveer gelijk of verbetert zelfs iets.

5. Degradatie van ES-lassen

- De D0-data van de meetcampagnes van 2020 t/m 2024 (zowel voorjaar als najaar) is gebruikt voor de analyse van het degradatiegedrag van ES-lassen in de loop van de tijd. We kijken hierbij naar de maximale waarde van de hoogte.
- De ligging van de ES-lassen is afgeleid uit de dataset `SAP\_ESLAS` en is opgehaald uit maps.prorail.nl.
- Relevante gegevens in de ES-lassen dataset
 - Ligging (RD x, RD y)
 - Plaatsingsjaar
 - Serienummer
 - Type ES-las
 - Ondersteuning (*Zwevend, Halfzwevend, Dubbelligger, Volledig ondersteund*)
- De voorbereiding van de data bestaat uit de volgende stappen:
 - Verwijderen van ES-lassen nabij grote stations (op basis van de `Station` dataset op maps.prorail.nl)
 - Verwijderen van ES-lassen met sterk afwijkende belasting (bijv. significant minder goederentreinen). Hiertoe zijn alle ES-lassen boven Alkmaar verwijderd (zie hiernaast).



In oktober 2016 is een nieuw type ES-las geïntroduceerd: de **NRG-las**.

- De hypothese is dat dit nieuwe type ES-las een significant betere trillingskwaliteit heeft dan het oude type ES-las, zowel initieel als in de loop van de tijd.
- Om deze hypothese te toetsen worden alle meetcampagnes opnieuw geanalyseerd, waarbij glijdend over het spoor de Max,fast metriek wordt bepaald ter hoogte van de ES-lassen. Dit levert een dataset met max-waarden van alle ES-lassen die zijn gemeten sinds 2020.
- In de lijst met ES-lassen staan beide spoorstaven apart vermeld. Deze entries zijn samengevoegd. Indien het type ES-las niet duidelijk was, is de entry uitgesloten van de analyse.
- Van iedere datapunt in de dataset wordt de leeftijd (in jaren) bepaald.
- **Omdat het type ES-las niet betrouwbaar is vast te stellen op basis van de ES-lassen lijst**, is ervoor gekozen om een selectie te maken op basis van aanlegdatum ("*aanleg voor 2016*" en "*aanleg na 2016*")
- Om inzicht te krijgen in de verdeling van max-waarden per leeftijdscohort, wordt een vioolplot gemaakt, waarbij een uitsplitsing wordt gemaakt tussen oude ES-lassen (blauw) en nieuwe ES-lassen (oranje). De vioolplots zijn genormaliseerd waarbij iedere vioolplot dezelfde oppervlakte heeft. De vorm geeft inzicht in de onderliggende statistische verdeling van de data, waarbij de witte lijn steeds de mediaan is en de zwarte balk de 25 tot 75 percentielwaarde aangeeft.

- De analyse wordt drie maal uitgevoerd:

1) op de gehele dataset ongeacht de ondersteuning van de ES-las (*Zwevend, Halfzwevend, Dubbelligger, Volledig ondersteund*)

In de eerste drie leeftijdscohorten is alleen data beschikbaar van aanleg na 2016. Vanaf het vierde jaar is te zien dat de max-niveaus voor de nieuwe ES-lassen iets lager liggen dan voor de oude ES-lassen. Dit verschil blijft ongeveer hetzelfde tot het zevende levensjaar. Hierna is er een overmaat van oude ES-lassen in de dataset.

2) op de dataset met alleen Dubbelliggers

Hierbij valt op dat de max-niveaus voor nieuwe ES-lassen met dubbelligger vanaf het vierde levensjaar iets lager zijn dan voor oude ES-lassen met dubbelligger.

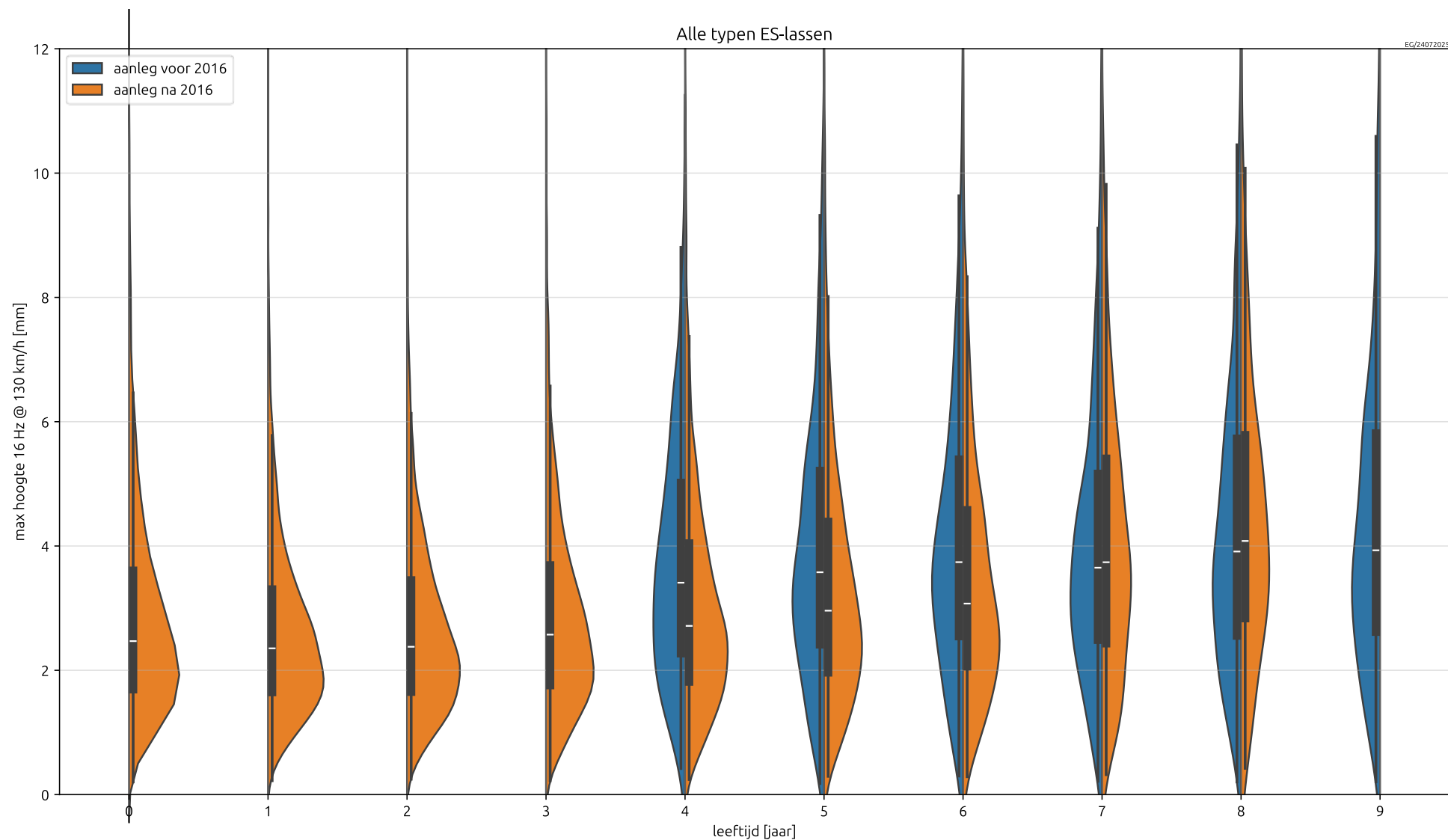
Echter: t/m het vijfde levensjaar zijn er vrijwel alleen nieuwe ES-lassen van dit type in de dataset en van het 6e levensjaar t/m 9 is er juist een overmaat van oude ES-lassen van dit type.

3) op de dataset met alleen Zwevende ES-lassen.

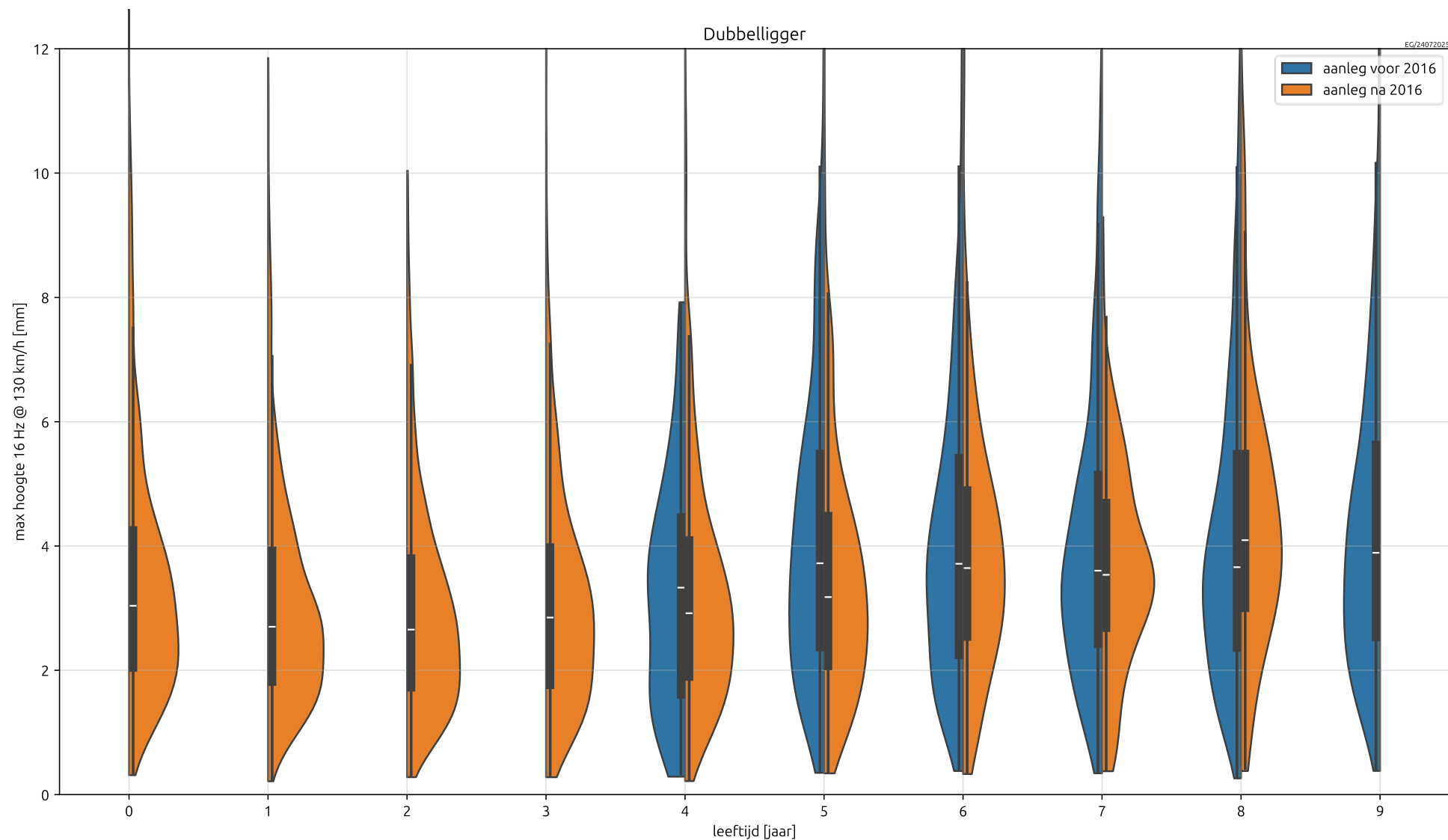
Hiervoor is ongeveer dezelfde trend te zien als de gehele dataset, met als verschil dat de niveaus over alle leeftijdscohorten lager liggen.

Er is een overmaat van nieuwe ES-lassen t/m het 6e levensjaar.

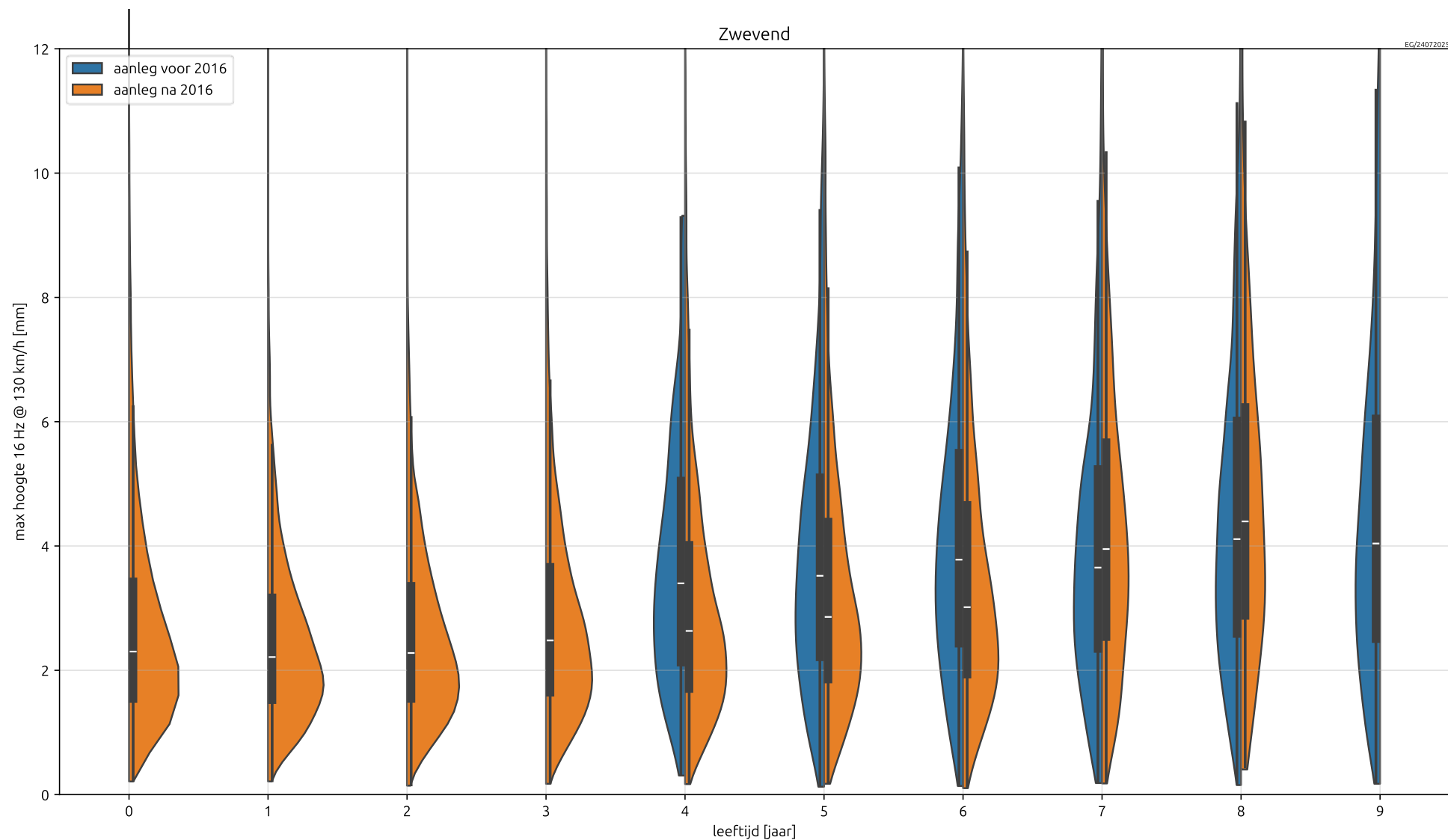
Degradatie van ES-lassen (4/7)



Degradatie van ES-lassen (5/7)



Degradatie van ES-lassen (6/7)



Het volgende valt op:

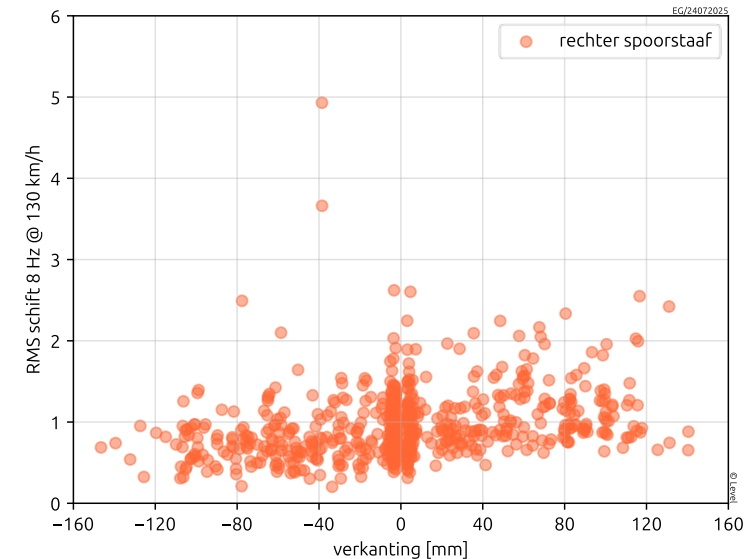
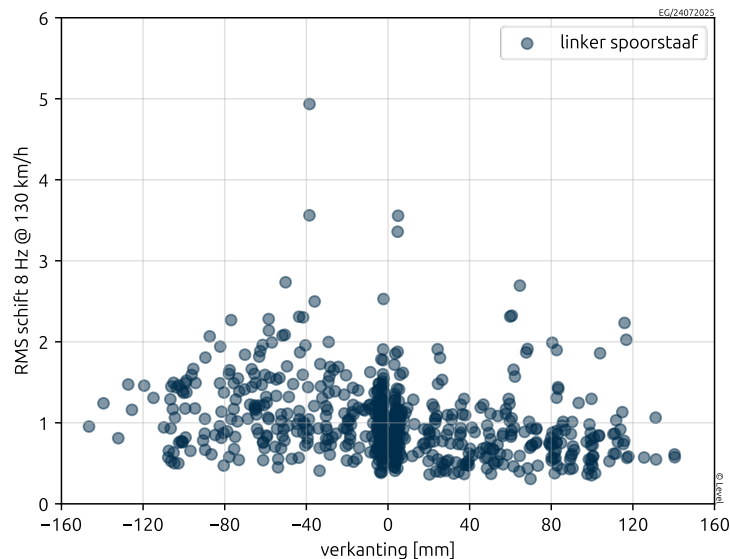
- Na 4 jaar liggen de nieuwe lassen er iets beter bij. NB: voor de eerste drie jaar is geen vergelijking beschikbaar omdat eind jaren 10 nog geen D0 werd gemeten en terwijl er geen oude types meer werden gelegd.
- Na 7 jaar lijkt het effect weg. Dat zou een statistische reden hebben: het aantal lassen van die ouderdom is gering, dus toeval gaat een grotere rol spelen (zie volgend punt).
- De statistische significantie van de genoemde effecten is mogelijk een issue. Er is geen berekening gemaakt van de significantie maar het feit dat de mediaanwaardes minder dan een percentielstap (van 25%) verschillen suggereert dat de kans dat de gevonden violdelen toevallig verschillen meer is dan 5%.
- Significantie zegt met name iets over de analyse methode. Over de jaren is een trend te zien dus als in de analyse het onderliggende verband van het feit dat het grotendeels steeds dezelfde lassen betreft wordt meegenomen is te verwachten dat de significantie sterker wordt (nu wordt aangenomen dat er elk jaar een verse batch lassen beschikbaar is met genoemde kenmerken, bij wijze van spreken in een ander land).
- De trend laat zien dat oude lassen over de jaren “groeien” naar, gemiddeld, een waarde van 4 (maxfast bij 16 Hz). Nieuwe lassen groeien eerst langzamer maar halen de oude na 7 jaar in en worden dan slechter. Dit kan wederom veroorzaakt worden door een statistische bias: mogelijk zijn het met name de slechtere oude lassen die als eerste uit de populatie zijn gehaald door vervanging met nieuwe.
- Gezien het bovenstaande, met statistische bias risico's in het achterhoofd, zijn de resultaten na 6 jaar waarschijnlijk het meest sprekend.
- De 6 jaar resultaten laten zien dat nieuwe lassen op een dubbelligger wat beter presteren dan de zwevende. Dat lijkt logisch.

Uitdagingen bij de interpretatie van de resultaten:

- Afwijkend onderhoudsregime voor ES-lassen van het oude type vanaf januari 2016. Het oude type zou vanaf toen niet zo intensief meer zijn onderhouden als het nieuwe type. Van het oude type is dus alleen al daardoor meer degradatie te verwachten.
- Verschillen in belastingen van de ES-lassen. Het is onduidelijk of er niet een bias in de data zit: bijvoorbeeld dat onder nieuwe ES-lassen de trajecten met hogere belastingen (meer en zwaardere treinen) zijn oververtegenwoordigd. Dat zou bijvoorbeeld kunnen omdat op die trajecten de lassen mogelijk sneller vervangen worden. Op die trajecten zullen de ES-lassen mogelijk sneller degraderen waardoor het gunstig effect van nieuwe lassen minder zichtbaar is in de uitgevoerde analyse.

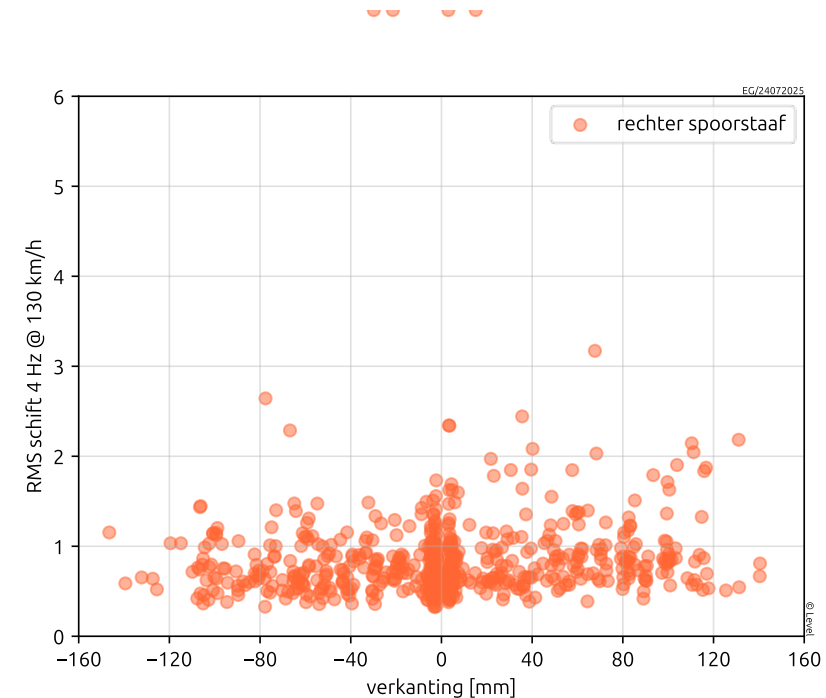
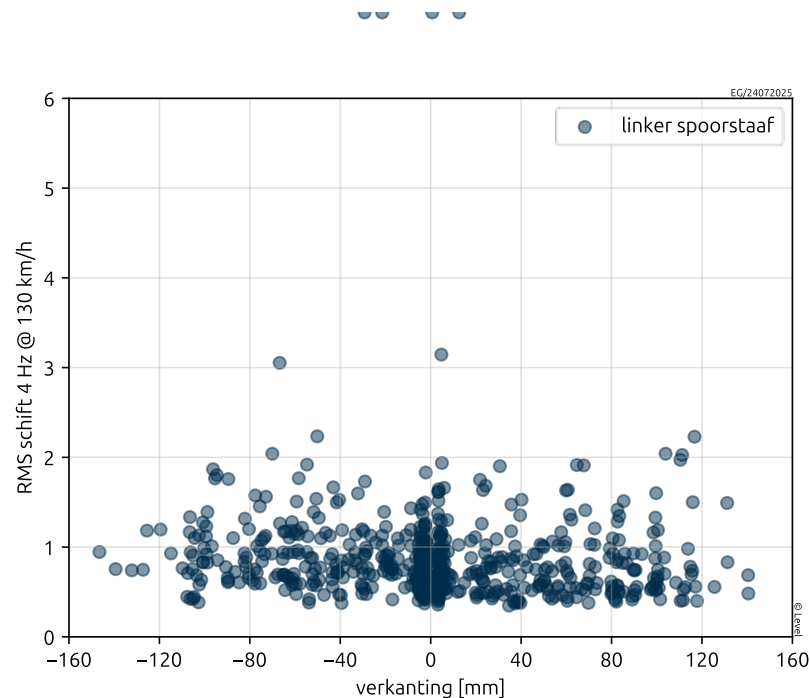
6. Trillingskwaliteit spoorbogen

- De D1-data van de najaar 2023 campagne is opnieuw geanalyseerd, waarbij glijdend over het spoor met een stapgrootte van 1 meter de metrieken RMS en Max,fast zijn bepaald. Er is hierbij een uitsplitsing gemaakt naar linker en rechterbeen.
- Data van de HSL en ter hoogte van ES-lassen worden buiten beschouwing gelaten.
- Om te kunnen vaststellen of (een gedeelte van) een segment in een boog ligt wordt gekeken naar de verkantingsdata. Het meetbereik van de verkantingsdata is +/- 150 mm.
- Binnen een segment wordt een histogram gemaakt van de verkantingen. Hiermee wordt een selectie gemaakt van aangesloten punten met (vrijwel) gelijke verkantingen. De punten met gelijke verkantingen worden gegroepeerd tot een boog en krijgen een unieke boog identifier.
- In onderstaande figuur is ieder punt een boog, met op de y-as de mediane RMS-waarde bij 8 Hz en op de x-as de mediane verkanting (beiden t.o.v. het Nederlandse gemiddelde wat gedomineerd wordt door de rechte stukken spoor).
- Positieve verkantingen betreffen bochten naar rechts.



Bevindingen:

- Uit de analyse blijkt dat er hogere RMS-waarden worden gemeten op het binnenbeen; de trillingskwaliteit van het bovenbeen lijkt gemiddeld beter te zijn dan van het onderbeen.
- De **mate** van verkanting heeft slechts een beperkte invloed op de hoogte van de RMS-waarde van de schift, hoewel er wel een trend lijkt te zijn dat de **minimum** RMS op het belaste been wel oploopt naar hogere verkanting.
- Het effect bij 4 Hz (zie hieronder) is minder uitgesproken dan het effect bij 8 Hz (vorige sheet).



8. Conclusies

Deel 1: onderzoek naar de relatie tussen degeneratiegedrag van spoor en type ondergrond

Op zachte bodems is de RMS hoger in de onderzochte golflengten (tussen 6 en 12 Hz).

In 2013 is er nog weinig verschil tussen harde en zachte ondergrond. Over de jaren verslechtert het spoor op zachte ondergrond. Op stijve ondergrond blijft het ongeveer gelijk of verbetert zelfs iets.

Deel 2: onderzoek degradatie ES-lassen vanuit de optiek van omgevingstrillingen in relatie tot type ES-las

Vanaf het vierde jaar is te zien dat de max-niveaus voor de nieuwe ES-lassen iets lager liggen dan voor de oude ES-lassen. Dit verschil blijft ongeveer hetzelfde tot het zevende levensjaar. Hierna is er een overmaat van oude ES-lassen in de dataset. Bij de interpretatie van de resultaten moet rekening worden gehouden met een afwijkend onderhoudsregime voor ES-lassen van het oude type vanaf januari 2016. Het oude type werd vanaf toen niet zo intensief onderhouden als het nieuwe type.

Deel 3: onderzoek de trillingskwaliteit van spoorbogen ten opzichte van recht spoor

Uit de analyse blijkt dat er verhoogde RMS-waarden in de schift worden gemeten op het binnenbeen; de trillingskwaliteit van het bovenbeen lijkt gemiddeld beter te zijn dan van het onderbeen.

De mate van verkanting heeft slechts een beperkte invloed op de hoogte van de RMS-waarde van de schift, hoewel er wel een trend lijkt te zijn dat de minimum RMS op het belaste been wel oploopt naar hogere verkanting.

Algemeen:

Met analyses in het golflengtedomein, zoals aan de hand van de in dit onderzoek gehanteerde metrieken, zijn langjarige trends in de spoorgeometrie te ontdekken.

In combinatie met andere gegevens (zoals kennis over veranderingen in spooronderhoud of toegepaste spoorproducten) kan dat inzichten opleveren.

Cruciaal voor het signaleren en interpreteren van trends is de kwaliteit van de metadata die aan de metrieken wordt gekoppeld. Een voorbeeld is de informatie over ES-lassen: o.a. locatie en typering zijn dermate slecht bijgehouden dat de analyses in dit onderzoek minder scherp zijn uitgepakt dan gehoopt.