Trillingenonderzoek proeftuin dwarsliggers te Zwolle

Hoofdrapportage – Proefvak A t/m D

1021-188974 | 7 november 2022

Definitief

Documentbeheer

Documentgegevens

Projectnaam	Trillingenonderzoek Proeftuin dwarsliggers te Zwolle
Documentnaam	Hoofdrapportage – Proefvak A t/m D
Fugro-projectnr.	1021-188974
Fugro-documentnr.	1021-188974.R01V03
Versienummer	3.0
Versiestatus	Definitief
Fugro entiteit	Fugro NL Land B.V.
Adres Fugro-kantoor	Veurse Achterweg 10 Postbus 63 2260 AB Leidschendam T 070 31 11333

Klantgegevens

Klant	Prorail, afd. Leefomgeving, Juridische zaken en Vastgoed
Adres klant	Postbus 2038, 3500 GA Utrecht
Contactpersoon klant	N. R. IJntema

Versiebeheer

Versie	Datum	Status	Omschrijving	Opgesteld door	Gecontroleerd door	Goedgekeurd door
0.1	05-08-21	Concept ter controle	Rapport, eerste concept ter controle	ASN	LWS	ASN
1.0	05-10-21	Definitief	Nav bespreking 25/08/21 en div mail contacten	ASN	LWS	
2.0	29-11-21	Definitief		ASN	DWE	ASN
3.0	07-11-22	Definitief	Opmerkingen opdrachtgever verwerkt	ASN/RDN	ASN	ASN

Projectteam

Initialen	Naam	Rol
ASN	ir. A.J. Snethlage	Senior Consultant Geotechniek
LWS	ir. L.W. Schadee	Consultant Geotechniek
DWE	D. Wessling	Consultant Geotechniek
RDN	ir. R. Drieman	Consultant Geotechniek

Inhoudsopgave

Documentbeheer ii

Documentgegevens ii
Klantgegevens ii
Versiebeheer ii
Projectteam ii

1. Inleiding 3

2. Projectomschrijving 5

2.1 Projectlocatie 5
2.2 Dwarsliggers proeftuin 6
2.3 Treinen, rijrichting 7
2.4 Trillingsmeting 9
2.4.1 Meetuitvoering 9
2.4.2 Meetpuntlocaties 11

3. Dataverwerking 15

3.1 RIVAS procedure 15
3.2 FFT -Fast Fourier transformaties 16
3.3 Bepalen waarden 17

4. Correctiefactoren 19

4.1 Correctie op spoorligging 19
4.1.1 Correctie op grondgesteldheid 21

5. Meetresultaten en analyse 22

5.1 Proefvak A 22
5.2 Proefvak B 23
5.2.1 MP 5 en MP 6 23
5.2.2 MP 14 en MP 15 25
5.3 Proefvak C 26
5.3.1 MP 7 en MP 8 26
5.3.2 MP 16 en MP 17 27
5.4 Proefvak D 29
5.5 Treinsnelheid 30

6. Samenvatting en conclusies 31

Bijlagen 0

A. Trillingstechnische vaktermen 1

B. Grafische weergave signalen 3
C. Grafische weergave FFT analyses 4

1. Inleiding

Opdrachtverstrekking
In opdracht van Prorail, afd. Leefomgeving, Juridische Zaken en Vastgoed te Utrecht heeft Fugro Land NL een trillingenonderzoek uitgevoerd voor de proeftuin duurzame dwarsliggers te Zwolle. Voorliggend trillingenonderzoek bestaat uit een deel trillingsmetingen (uitgevoerd op 15 en 16 juni 2021) en een analyse van de data. De trillingsmetingen zijn uitgevoerd met een systeem waarbij versnellingsopnemers worden gebruikt (geen geofoons).

Aanleiding
Op het enkelsporige baanvak Zwolle – Heino (geocode 206) zijn, als test, in het trajectdeel km 2.9 tot km 3.5 een viertal verschillende duurzame dwarsliggertypen aangebracht (100 m per type dwarsligger). Daarnaast bestaat de proeftuin uit twee referentievakken (elk 100 m) met standaard betonnen dwarsliggers (NS90). Het baanvak is geëlektrificeerd en er wordt gereden met materieel Flirt3 (III en IV). Met de realisatie van de proeftuin is aangesloten bij een bestaand bovenbouwvernieuwingsproject. De proeftuin is gerealiseerd begin juli 2019. Ter verbetering van de spoorligging is een laatste onderstopping uitgevoerd in de tweede helft van 2020.

Doelstelling
Het doel van het voorliggend trillingsonderzoek is het voor de vier aanwezige duurzame type dwarsliggers bepalen van optredende trillingsintensiteiten en deze te vergelijken met de betonnen dwarsliggers gelegen in de twee referentievakken.

Opsplitsen rapportage per proefvak
Op verzoek van ProRail zijn, naast voorliggende hoofdrapportage (rapportnummer 1021-188974.R01), de vier proefvakken separaat gerapporteerd in de volgende rapportages (versie 3 van de eerdere rapportages):

- Proefvak A: rapportnummer 1021-188974.R02
- Proefvak B: rapportnummer 1021-188974.R03
- Proefvak C: rapportnummer 1021-188974.R04
- Proefvak D: rapportnummer 1021-188974.R05

MASW metingen (geofysisch)
Dit project bood de kans om eveneens geofysische metingen uit te voeren (Multi Analysis Surface Wave, MASW). Met MASW metingen wordt de schuifgolfsnelheid(sverschillen) van de ondergrondse lagen naast/in het spoor in beeld gebracht als een functie van de diepte. Met MASW metingen is een betere relatie te leggen met de voortplanting / afdracht van de trillingen. Naast inzicht in afdracht van de trillingen afkomstig van de treinen, wordt met MASW metingen inzicht verkregen ten behoeve van de boeggolfproblematiek. Dat wil zeggen, bij welke kritieke treinrijsnelheid wordt de schuifgolfsnelheid nog niet ingehaald waardoor geen discomfort en geen risico op ontsporen optreedt.

Rivas, uitvoering en verwerking van data
Met de trillingsmetingen wordt geprobeerd zoveel mogelijk aan te sluiten op het meetprotocol van Rivas (Protocol for free field measurements of mitigation effects in the project RIVAS for WP2,3,4,5, Deliverable D1.2.). Op dit project is Procedure 1 van toepassing; effect na aanbrengen van de maatregel.
Omdat de proeftuin niet ideaal is qua setup, is door Prorail aangegeven dat een enigszins afwijkende uitvoering/aanpak mogelijk is. De trillingsmetingen zijn uitgevoerd op basis van de SBR -Meet- en beoordelingsrichtlijnen A '*Schade aan bouwwerken'* en SBR richtlijn B "Hinder voor personen".

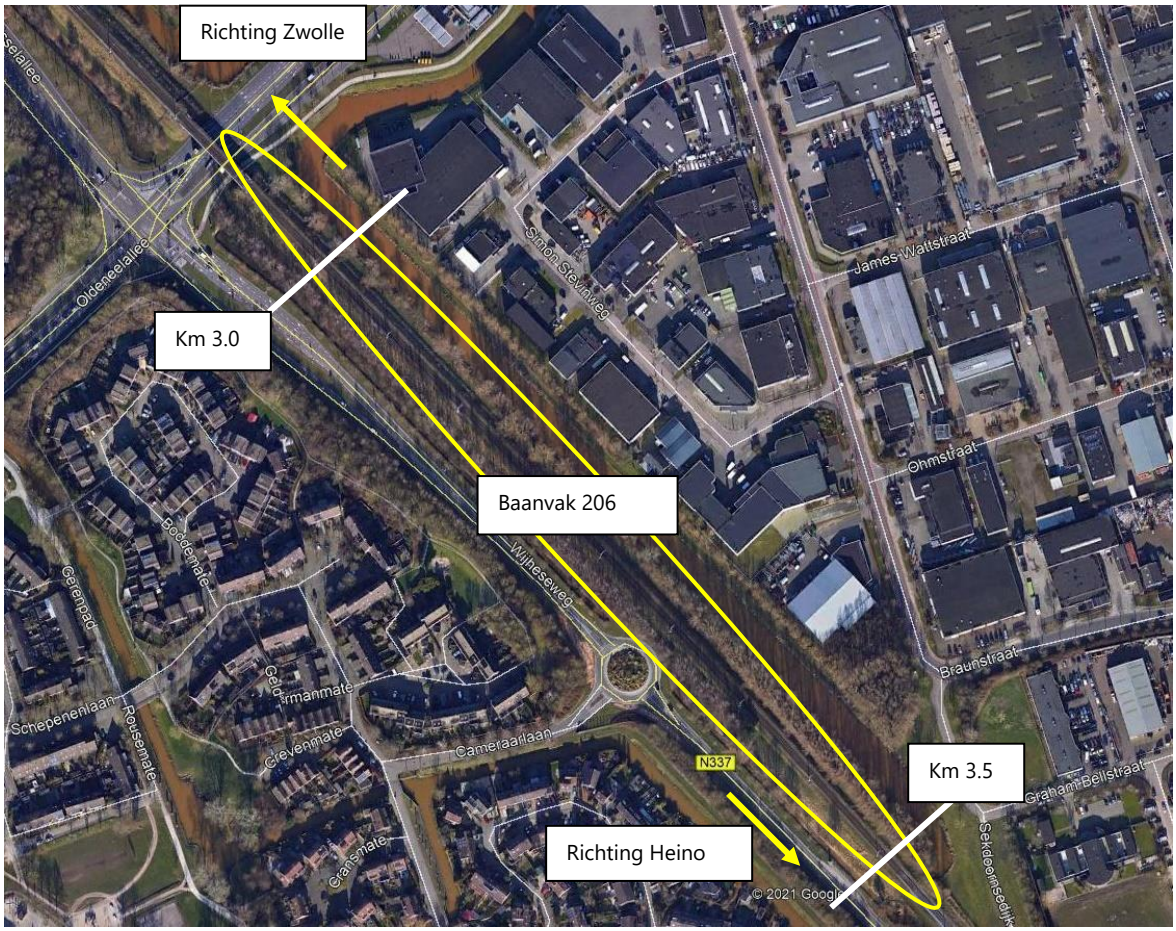
Opgemerkt wordt dat RIVAS procedures voor verwerking van data met name gebaseerd zijn op de Duitse DIN normen waarbij de eenheid dB (decibelgeluid) gehanteerd wordt. In Nederland worden trillingen beoordeeld/getoetst aan de genoemde SBR richtlijnen uitgebracht door de Stichting Bouw Research, waarbij de eenheid mm/s (snelheid) gehanteerd wordt. Bij de verwerking van de data is zoveel mogelijk het protocol van RIVAS gevolgd, waarbij ook de eenheid mm/s is gehanteerd.

Vaktermen en definities
Ter verduidelijking is in bijlage "*Trillingstechnische vaktermen*" een verklarende woordenlijst voor de belangrijkste trillingstechnische vaktermen opgenomen.

2. Projectomschrijving

2.1 Projectlocatie

De projectlocatie te Zwolle ligt naast de provinciale weg N337 ter hoogte van de Oldeneelalee nabij de wijk De Marslanden. In onderstaande figuur is de projectlocatie opgenomen.



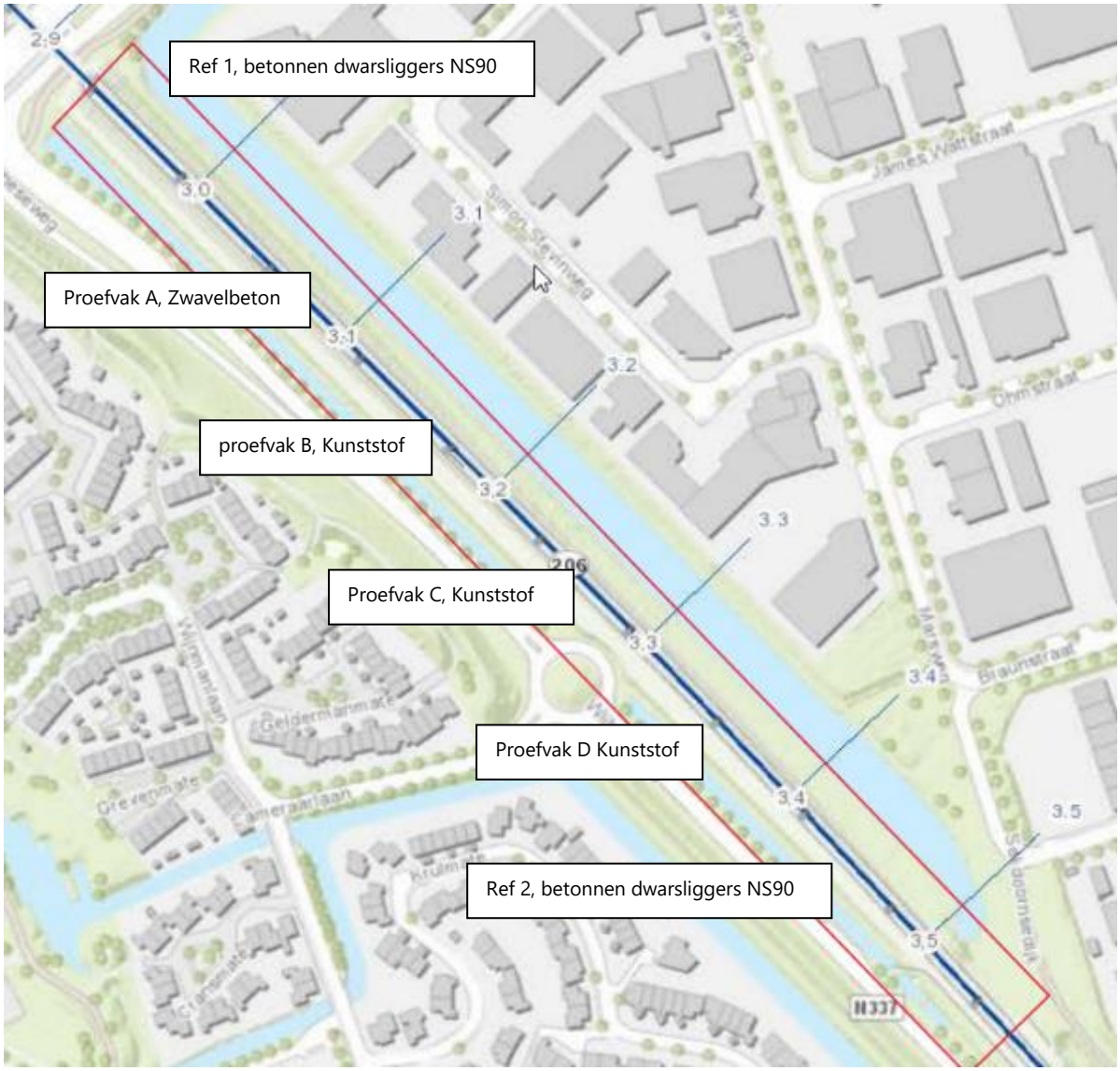
Figuur 2-1: Projectlocatie: Proeftuin dwarsliggers te Zwolle

Vanaf de kruising met de Oldeneelallee (NoordWestzijde), km 2.9 ligt het enkelsporige baanvak in ophoging. Vanaf circa km 3.6 (ZuidOosten) ligt het baanvak op maaiveld.

2.2 Dwarsliggers proeftuin

Over een lengte van circa 400 m zijn vier verschillende duurzame dwarsliggers aangebracht (proefvakken A t/m D). Elk proefvak bestaat uit ballastspoor waar UIC 54 E spoorstaven zijn toegepast. De referentie dwarsliggers NS90 en de dwarsliggers in proefvak A, zijn voorzien van standaard railbevestigingen met onderlegplaatjes. De kunststof dwarsliggers zijn voorzien van rughellingplaten met los geleverde bevestigingen met onderlegplaatjes.

De trillingsmeting is zodanig ingericht / uitgevoerd dat uit de resultaten enigszins de afdracht in de grond te bepalen is. Per proefvak (= type dwarsligger) zijn in een meetraai haaks op het spoor 2 meetpunten op maaiveld ingericht. Voor een nader inzicht in de afdracht / overdracht in de grond en vanuit grond naar draagconstructie (zo die er zijn) zijn echter meerdere meetpunten per raai nodig. Gezien de strekking/doel van de meting kon volstaan worden met 2 meetpunten per raai. Omdat met het gehanteerde meetsysteem het mogelijk is om simultaan in 4 meetpunten (in XYZ-richtingen) te meten, is per meetsessie in twee proefvakken gelijktijdig gemeten.



Figuur 2-2: Projectlocatie, proefvakindeling

2.3 Treinen, rijrichting

Tijdens de meting zijn signalen van regulier passerend railverkeer opgeslagen. Door het passerende railverkeer wordt een dynamische belasting (impuls of aanstoot) op de spoorconstructie uitgeoefend, welke de trillingen doorgeeft via de ondergrond naar woningen (zo die er zijn). Van invloed op de grootte van de trilling zijn:

- het treintype en de lengte ervan (aantal bakken);
- de rijsnelheid van de trein;

Op het enkelsporige baanvak rijden treinen type Flirt (III dan wel IV).

Tabel 2 1: Treintypen

Meetpunt	Locatie meetpunt
Flirt III (= 3 bakken)	
Flirt III,IV (7 bakken)	

In onderstaande tabel is een samenvatting opgenomen van het type trein, aantal ervan met rijrichting van de tijdens de meting gepasseerde treinen.

Tabel 2-2: Aantallen, rijrichting

Type	Type	Rijdend richting Zwolle / Heino
Refvak 1 en Proefval A	Flirt III (3 bakken) Flirt IV (4 bakken) Flirt III,IV (7 bakken)	3 / 0 1 / 4 1 / 1
Proefvak B en Proefvak C	Flirt III (3 bakken) Flirt IV (4 bakken) Flirt III,IV (7 bakken)	1 / 3 3 / 2 2 / 0
Proefvak D en Refvak 2	Flirt III (3 bakken) Flirt IV (4 bakken) Flirt III,IV (7 bakken)	1 / 0 2 / 2 3 / 2
(Extra) Proefvak B en Proefvak C	Flirt III (3 bakken) Flirt IV (4 bakken) Flirt III,IV (7 bakken)	1 / 3 4 / 2 0 / 0

Op meetdag 15 juni 2021 zijn tijdens de meetsessie in refvak 1 en proefvak A in totaal 10 passages gemeten. Tijdens de meetsessie in proefvak B en proefvak C zijn 11 passages gemeten. Op meetdag 16 juni 2021 zijn tijdens de meetsessie in refvak 2 en proefvak D in totaal 10 passages gemeten. Tijdens de meetsessie in proefvak B en proefvak C zijn 10 passages gemeten. In totaal zijn 41 passages gemeten.

2.4 Trillingsmeting

2.4.1 Meetuitvoering

De metingen zijn uitgevoerd met systemen welke voldoen aan de eisen en specificaties zoals gesteld in de SBR richtlijn A 2017 "*Schade aan bouwwerken*" en SBR richtlijn B "*Hinder voor personen in gebouwen*".

Fugro heeft de beschikking over een tweetal verschillende trillingenmeetsystemen. Enerzijds een automatisch registrerend systeem en anderzijds een meetsysteem waarbij versnellingsopnemers gehanteerd worden. Bij de meting op 15 en 16 juni 2021 zijn beide meetsystemen ingezet.

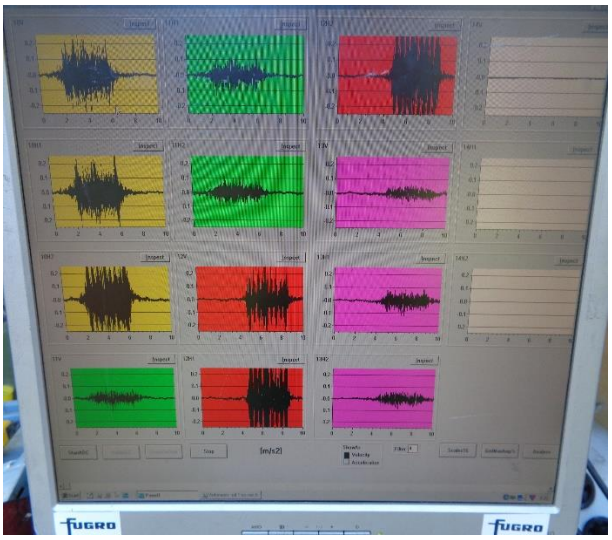
Automatisch registrerend meetsysteem (t.b.v. treinrijsnelheid)
De meetopstelling bestaat uit een verwerkingsunit (datalogger) met een geofoon als opnemer. De geofoon van het meetpunt is op een voetplaat gemonteerd, dat op maaiveld is gepositioneerd. Het systeem meet de trilling (snelheden) in de drie orthogonaal op elkaar staande richtingen (X,Y,Z). In de verwerkingsunit wordt de bijbehorende frequentie in dezelfde drie richtingen berekend. In onderstaande figuur (rechter deel) is het automatisch registrerende systeem hetgeen Fugro hanteert weergegeven.

Figuur 2-3: Meetpunt standalone meetsysteem, Vibra met opnemer

Meetuitvoering Piëzo versnellingsopnemers (t.b.v. opslag signalen passerende trein)
Met het versnellingenmeetsysteem wordt van een treinpassage de volledige trilling hoogfrequent gemeten. Dit soort (bemande) metingen worden semi-continue uitgevoerd met piëzo-elektrische versnellingsopnemers van PCB Piëzotronics Inc., type PCB 338B35, aangesloten op een PCB Piëzotronics versterker model 481.

De opnemers meten de trillingen, die worden doorgegeven via een versterker naar een PC, waarop de signalen zichtbaar worden gemaakt en opgeslagen kunnen worden. Met het systeem kan simultaan op 5 meetpuntlocaties (XYZ, 15 kanalen) gemeten worden. Per meetpunt wordt in drie orthogonaal op elkaar staande richtingen gemeten (Z-verticaal, Y-horizontaal evenwijdig aan de bron bewegingsrichting en X-horizontaal haaks op de bron

bewegingsrichting). In onderstaande linker figuur is een voorbeeld van een meetpunt op het maaiveld weergegeven.



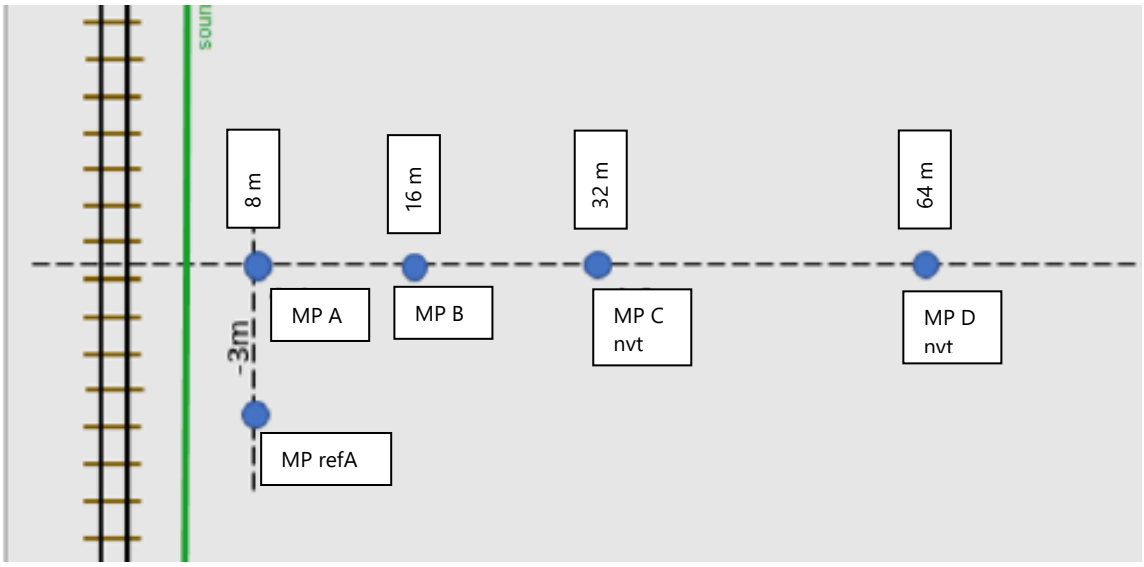
Figuur 2-4: Meetpunt 5 MP piezo meetsysteem en (rechts) beeldscherm van een meetsignaal (iedere kleur is 1 meetpunt)

Met het meetsysteem worden continu trillingen geregistreerd. Op het moment dat een passage van de trein optreedt, wordt dit zichtbaar gemaakt in een uitslag van het signaal. Na het “bevriezen” van het signaal, wordt notitie gemaakt van kenmerken van de trein (aantal treinstellen/bakken en rijrichting) en wordt het signaal opgeslagen. In voorstaande figuur is een impressie van een meetsignaal weergegeven van enkele meetpunten (per kleur 1 meetpunt XYZ).

2.4.2 Meetpuntlocaties

Conform het protocol uit Rivas dient in een meetraai haaks op het spoor gemeten te worden op 8 m, 16 m, 32 m en 64 m (onderstaande figuur). De ruimte naast het spoor op de proeftuinlocatie was te beperkt om op grote afstand meetpunten in te richten. Beperkende factoren zijn de provinciale weg (N337) op een afstand van circa 35 m uit het spoor en een sloot op een afstand van circa 27,5 m uit het spoor. Trillingen veroorzaakt door het passerende wegverkeer (N337) zouden op een afstand van circa 32 m dan wel 64 m uit het spoor hier overheersend zijn.

Omdat het doel is inzicht verkrijgen in de optredende trillingen bij de proefvakken met verschillende duurzame dwarsliggertype, zijn derhalve per proefvak enkel 2 meetpunten ingericht op afstanden van 8 m en 16 m uit het hart van het spoor.



Figuur 2-5: Rivas, meetpunt opstelling haaks op het spoor (schematisch)

Zonder (voor)kennis van de grondslag met verschillende grondstijfheden, zou het logisch zijn om de meetraai midden in het proefvak te kiezen. Het project heeft de mogelijkheid geboden om, niet destructief, met een Multi Analysis Surface Wave (MASW) onderzoek inzicht te krijgen in de verschillende grondstijfheden. Op basis van dit MASW onderzoek zijn de trillingsmeetraaien per proefvak bepaald waarbij het stijfheidsprofiel van de beide referentievakken als vergelijkingsprofiel is gehanteerd.

In onderstaande tabel is een samenvatting opgenomen van meetpunten.

Tabel 2-3: Meetpuntlocaties

Vak	Meetpunt	Afstand tot bron [m]	Locatie meetpunt [1)]	
Ref 1	MP 1 Mp 2	8 16	590 m, 2/17N – 15 m	Maaiveld, naast spoor
A	MP 3 MP 4	8 16	515 m, 3/17N + 4 m	Maaiveld, naast spoor
B	MP 5 MP 6	8 16	400 m, 3/3N + 7 m	Maaiveld, naast spoor
B (extra)	MP 14 MP 15	8 16	450 m, 3/27N + 2 m	Maaiveld, naast spoor
C	MP 7 MP 8	8 16	320 m, 3/47N - 13 m	Maaiveld, naast spoor
C (extra)	MP 16 MP 17	8 16	350 m, 3/4N - 15 m	Maaiveld, naast spoor
D	MP 10 MP 11	8 16	220 m, 3/6N - 4 m	Maaiveld, naast spoor
Ref 2	MP 12 Mp 13	8 16	120 m, 3/8N – 24 m	Maaiveld, naast spoor
1) Afstand uit MASW profiel gekoppeld aan afstand t.o.v. dichtstbijzijnde portaal nr (negatieve afstand = portaal met richting zwolle, positieve afstand = portaal met richting Heino				

Op dinsdag 15 juni 2021 zijn met de ochtendsessie de metingen uitgevoerd bij referentie vak 1 en proefvak A, in de middag bij proefvak B en proefvak C. Op woensdag 16 juni 2021 zijn met de ochtendsessie de metingen uitgevoerd bij referentie proefvak 2 en proefvak D, in de middag bij proefvak B (extra) en proefvak C (extra)

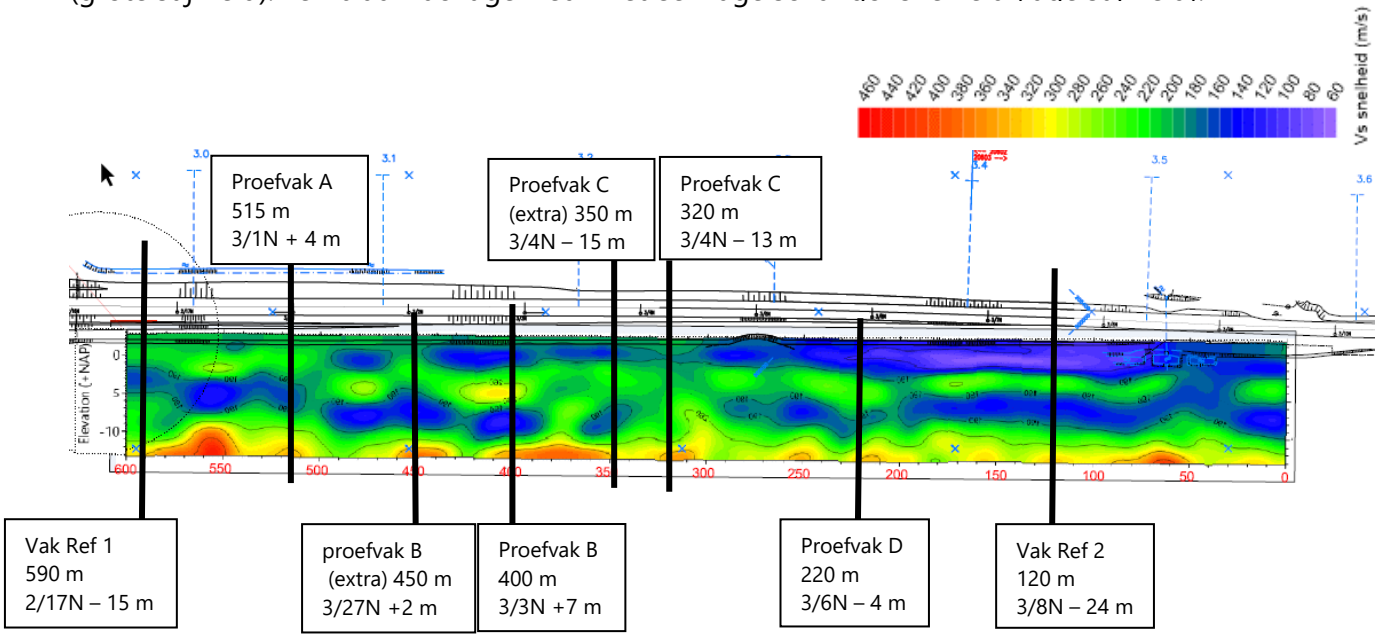
MASW onderzoek

Ten behoeve van inzicht in mogelijke stijfheidsverschillen in de ondergrond is een Multi Analysis Surface Wave (MASW) onderzoek uitgevoerd. Hierbij is een string van geofoons in een lengte raaimet onderlinge afstand van circa 2 m op maaiveld geplaatst. Met een hamer wordt op een plaat geplaatst aan de kop van de string geslagen, waardoor een trillingsgolf in de grond wordt opgewekt. De aankomsttijd van de trillingsgolf wordt in iedere geofoon gemeten. Op moment dat (enigszins) stijfheidsverschillen in de ondergrond aanwezig zijn, wordt de opgewekte trillingsgolf gereflecteerd / gerefracteerd waardoor de stijfheidsverschillen geanalyseerd kunnen worden.

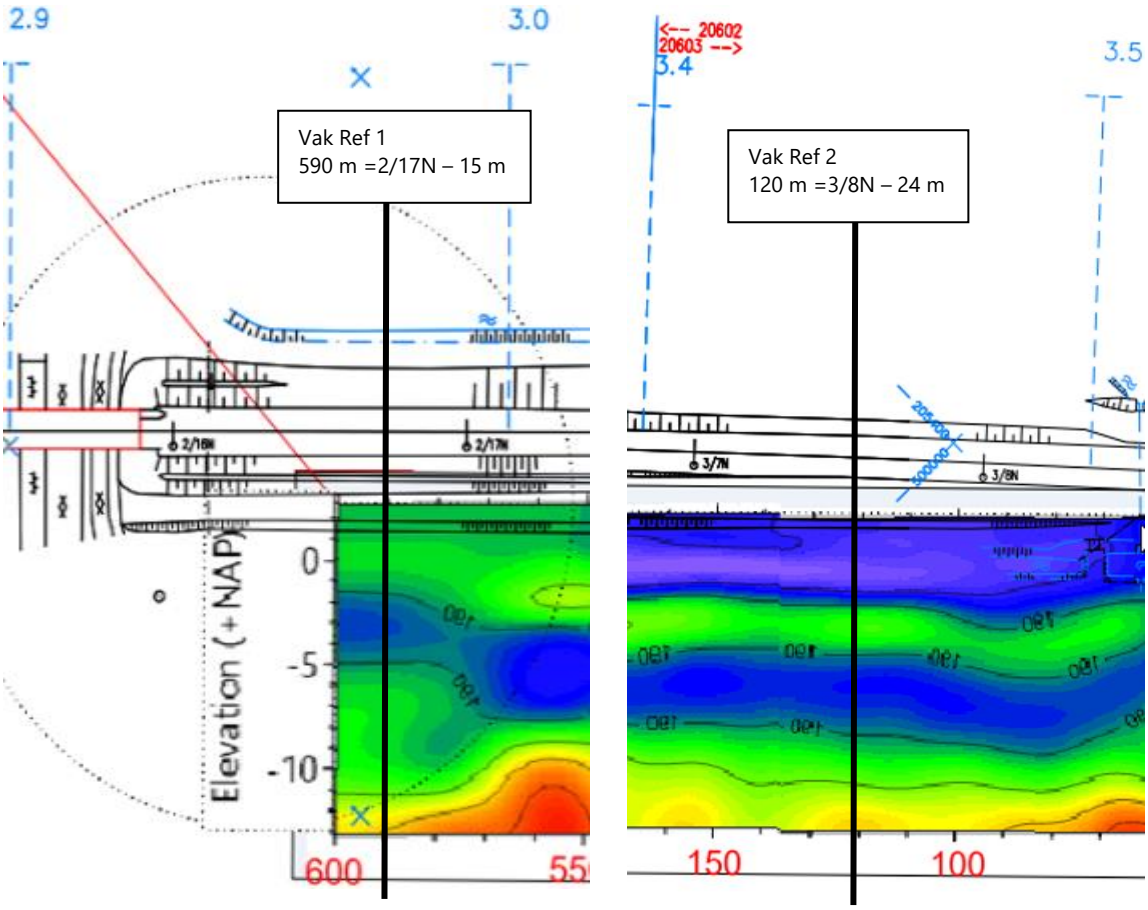
De MASW resultaten geven eveneens inzicht ten behoeve van de boeggolfproblematiek, nl de gemeten stijfheidsverschillen geven inzicht in de aanwezige schuifgolfsnelheden. Door een rijdende trein wordt in de grond een boeggolf (schuifgolf) voor de trein uit “gedrukt”. Op moment dat de boeggolfsnelheid hoger of gelijkwaardig is aan de in de grond aanwezige schuifgolfsnelheid, treedt interferentie / opslingering op, hetgeen gepaard gaat met ontoelaatbare grondbeweging met als gevolg risico op ontsporing.

In onderstaand figuur is het totaal resultaat van het MASW onderzoek weergegeven. De ligging van de meetraaien zijn eveneens weergegeven (3/1 N = portaal nr).

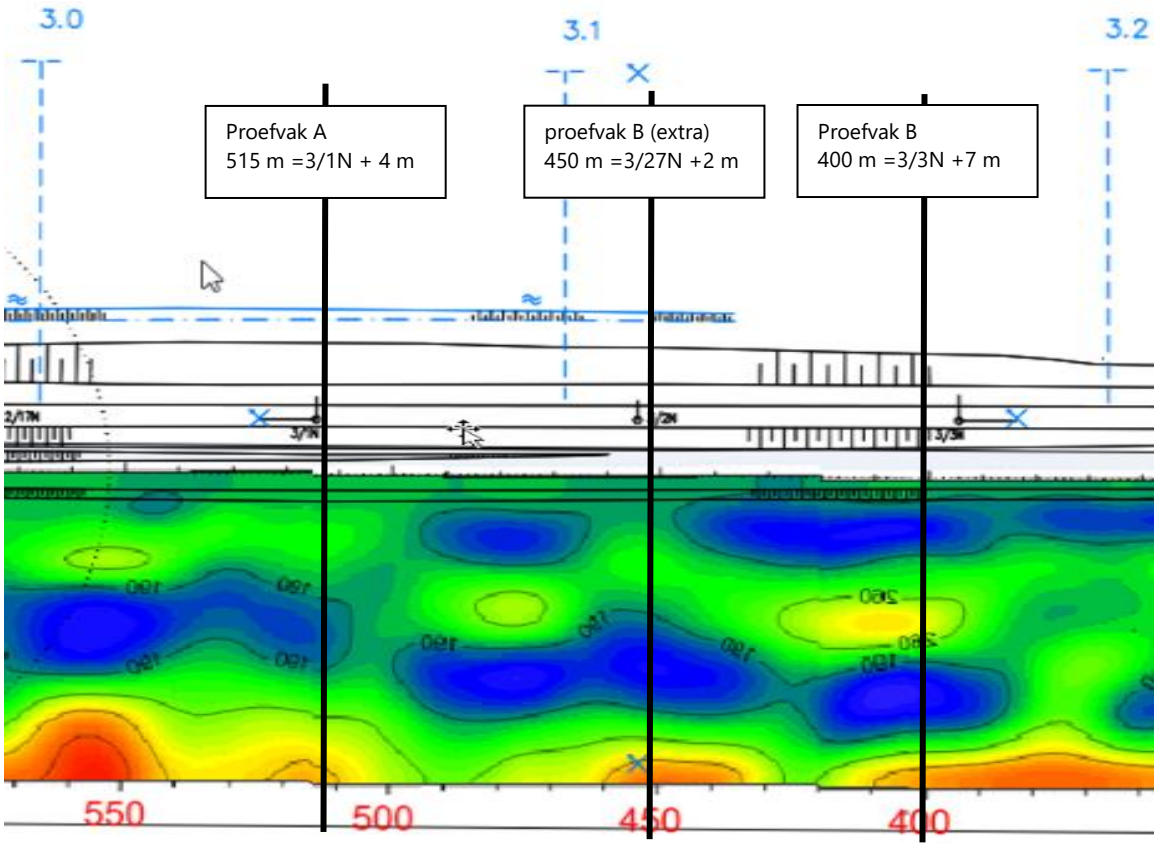
Toelichting: Een rode kleur correspondeert met hoge schuifgolfvoortplantingssnelheden (grote stijfheid). Een blauw achtige kleur met een lage schuifgolfsnelheid (lage stijfheid).



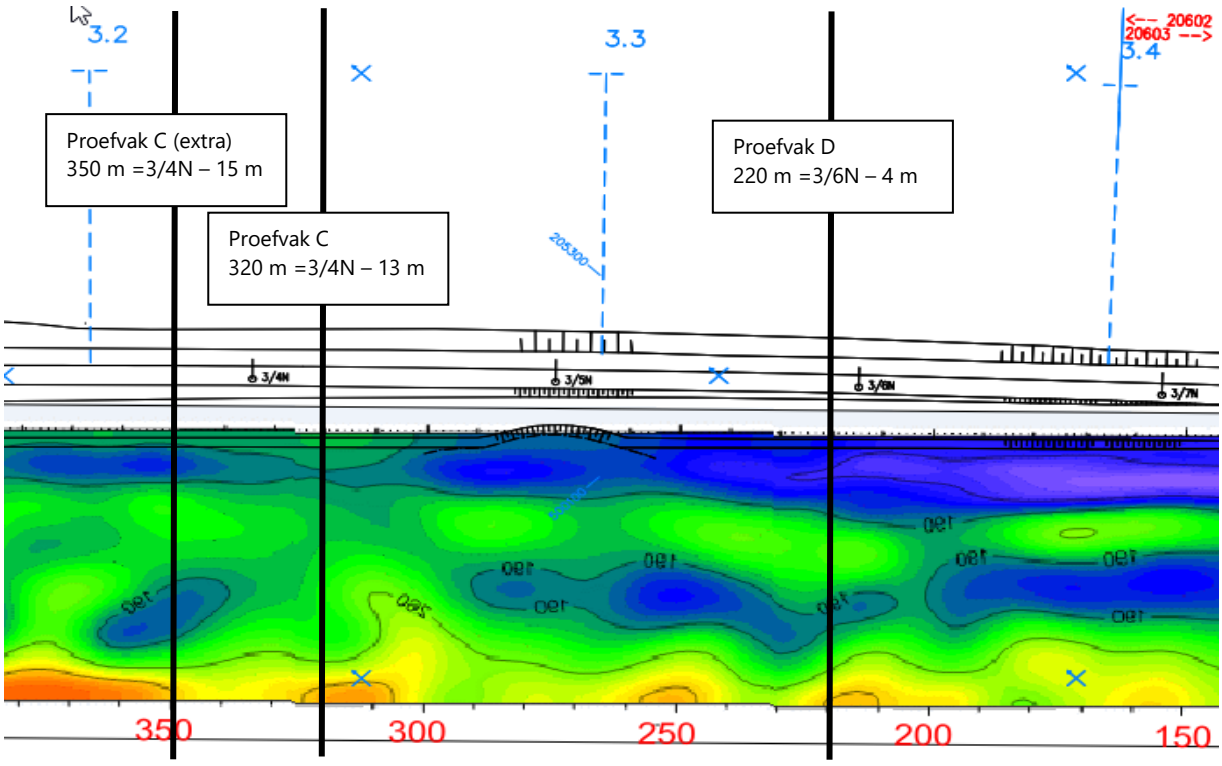
Figuur 2-6: MASW resultaat, stijfheden in ondergrond (blauw lage stijfheden, geel/rood hoge stijfheden)



Figuur 2-7a: MASW resultaat, (links) referentie vak 1 km 2.9 – km 3.0, (rechts) referentie vak 2 km 3.4 – km 3.5



Figuur 2-7b: MASW resultaat, (links) proefvak A km 3.0 – km 3.1, (rechts) proefvak B km 3.1 – km 3.2



Figuur 2-7c: MASW resultaat, (links) proefvak C km 3.2 – km 3.3, (rechts) proefvak D km 3.3 – km 3.4

3. Dataverwerking

3.1 RIVAS procedure

Met de dataverwerking wordt zoveel mogelijk het dataverwerkingsprotocol van Rivas gevolgd (Protocol for free field measurements of mitigation effects in the project RIVAS for WP2,3,4,5, Deliverable D1.2.). Procedure 1 is van toepassing.

In RIVAS Hoofdstuk 3.8 is de verwerkingsmethodiek opgenomen. Deze omvat de volgende stappen:

1. Conform figuur 9 (onderstaande uit Rivas overgenomen figuur)) worden de analysetijd (T_a) en de passagetijd (T_p) bepaald.

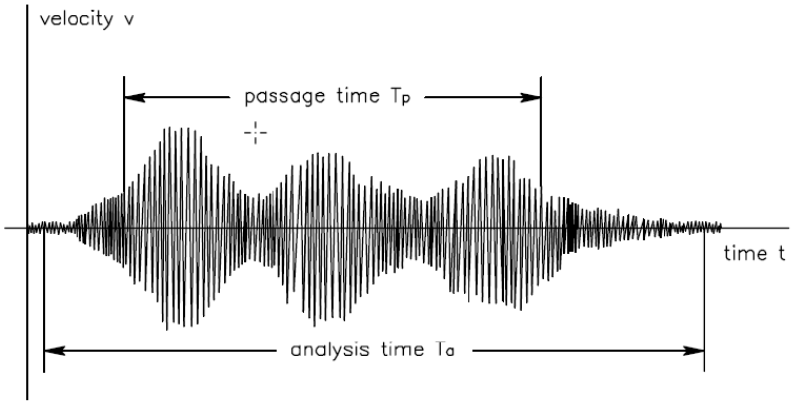


Fig. 9: Definition of passage time and analysis time: The analysis time T_a encloses the entire pass-by duration to get all the vibration energy. The passage time T_p corresponds to the pass-by time from buffer to buffer at a close reference point. If the pass-by time cannot be measured directly, the passage time can be determined from the measured data. By experience the passage time begins when the relative amplitude reaches about ¼ of the most frequently encountered maximum level and ends at the same level [9,10].

2. Per meetpunt (en passagesignaal) wordt een FFT analyse gemaakt.
3. Per meetpunt (en passagesignaal) wordt het verkregen spectrum gereduceerd tot lage frequenties. Hiertoe is een laagdoorlaatfilter van 45 Hz toegepast,
4. De trillingsintensiteit ($L_{v(f)}$) wordt bepaald conform:
   $L_v(f) = 20 \log \frac{v(f)}{v0} + 10 \log T_a/T_p$
   v0 = $1*10^{-6}$ mm/s
5. Per meetpunt (en passagesignaal) worden, gegeven dezelfde afstand van het meetpunt tot het spoor en gegeven hetzelfde treintype, de gemiddelden (XYZ) bepaald.

Procedure 1 *(geldig na doorgevoerde maatregel en met vergelijking van meetresultaten met een referentie vak)*

6. Per meetpunt (en passagesignaal) worden gemiddelden van XYZ bepaald
7. Per meetpunt (en passagesignaal) wordt (conform RIVAS) de reductie (=effect) bepaald uit: $\Delta L_v = L_v$ (testvak) – L_v (refvak).
8. Door Prorail wordt een verhoudingsgetal gevraagd, d.i. de gemiddelde XYZ waarde van het testvak gedeeld door de gemiddelde XYZ waarde van het referentie vak (1 dan wel 2).

3.2 FFT -Fast Fourier transformaties

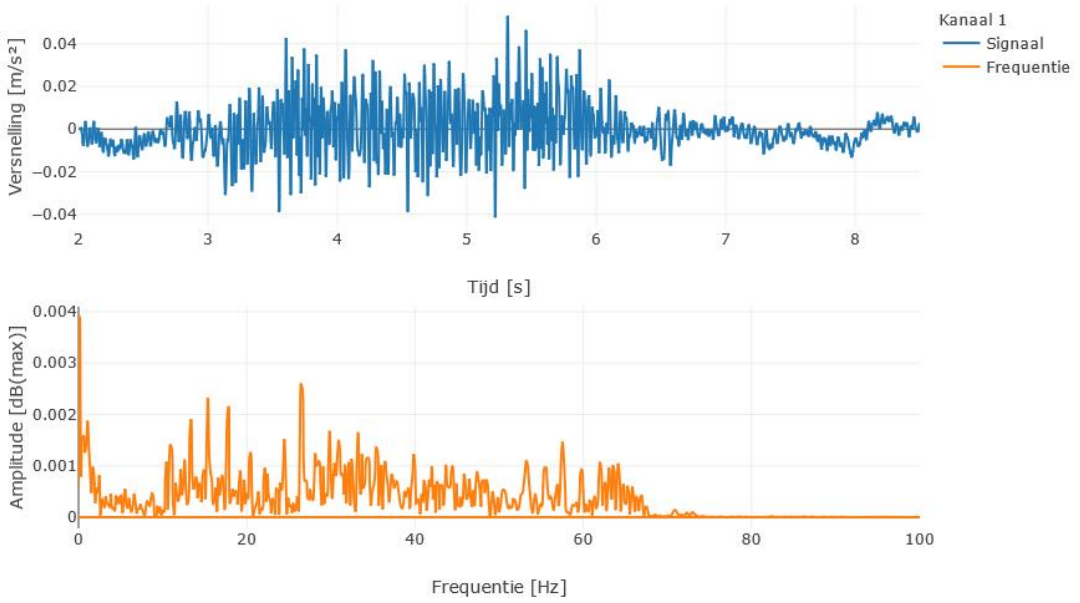
Bij een fourierreeks wordt het signaal (als functie van de tijd) som van sinus- en cosinusgolven geschreven. De stelling van Fourier geeft aan dat elke periodieke functie (mits deze stuksgewijs continue is) uitgedrukt kan worden als een superpositie van harmonische functies met cirkelfrequenties. Bij niet-periodieke signalen wordt gebruik gemaakt van fouriertransformaties.

Bij de transformatie wordt gebruik gemaakt van het algoritme Fast Fourier Transform (FFT). Het FFT algoritme rekent een discrete Fourier transformatie (DFFT) van een signaal (array) uit, waarbij het signaal wordt opgesplitst in sinusvormige signalen elk met een eigen amplitude en frequentie. Het resultaat van een FFT analyse levert het frequentiespectrum. In het frequentiespectrum is iedere bijdrage van een bepaalde discrete frequentie opgenomen.

De FFT is uitermate geschikt voor continu harmonische signalen, wat inhoudt dat het signaal zich meerdere keren herhaalt binnen het meetbereik. De meetduur bedraagt 2 sec wat leidt tot een frequentiespectrum verdeeld in stappen van 0,5 Hz.

De in de grond opgewekte trillingen reageert dispensief waarbij hogere frequenties meer worden gedempt dan lagere frequenties. Interacties tussen verschillende grondlagen (refractie en reflectie) spelen in deze ook een rol. Dit houdt in dat naast het beschouwen van de optredende versnellingen eveneens een spectrale beschouwing gedaan wordt.

Uit de metingen is gebleken dat de signalen zich goed lenen voor de spectrumanalyse. In onderstaande figuur is een voorbeeld opgenomen (signaal na filtering op 45Hz doorlaatfilter).



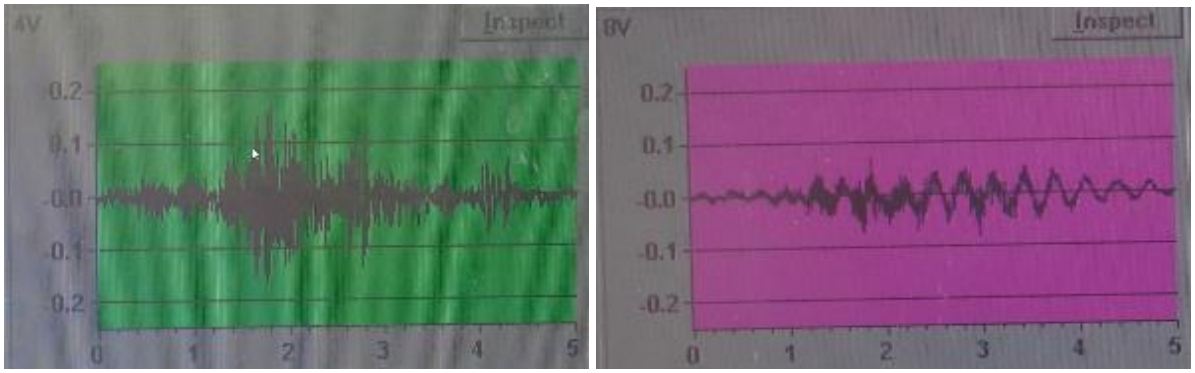
Figuur 3-1: Voorbeeld harmonisch continue signaal (Vak A.004) met bijbehorend resultaat FFT analyse (frequentiespectrum), zonder laagdoorlaatfilter van 45Hz

De FFT analyse zijn uitgevoerd op de passagetijd (T_p) tijdsdomein signaal. Bij harmonisch continue signalen volgt dan het spectrum waarin aangegeven is welke frequenties een belangrijke bijdrage leveren in het signaal

Filters op het geanalyseerde signaal.
Uit het frequentiespectrum van het ruwe signaal volgt dat er frequenties aanwezig zijn die niet van belang zijn. Vanaf een frequentie van circa 80 Hz kan men zich afvragen of er nog sprake is van een trilling of dat er sprake is van geluid. RIVAS geeft aan dat, om ruis te onderdrukken, de data gefilterd dient te worden op frequenties tussen 4 tot 250 Hz., waarna op het 1/3 octaafband de analyse uitgevoerd worden. Dit houdt in dat een laagdoorlaatfilter van 45 Hz is gehanteerd.

3.3 Bepalen waarden

Versnellingensignaal
De metingen zijn uitgevoerd met versnellingsopnemers. De amplitude in het gemeten tijdssignaal is een versnelling. Het meetsignaal is hoogfrequent (800 Hz) gesampeld. De beoordelingsgrootheden zijn in snelheden [mm/s]. Door het versnellingensignaal te integreren wordt het snelheidssignaal verkregen. Omdat het signaal hoogfrequent gesampled is, is goed onderscheid te maken tussen hoogfrequente en laagfrequente signalen (onderstaande figuur).



Figuur 3.2: Voorbeeld meetsignaal, hoog frequent (links), laag frequent (rechts)

Trillingssnelheid (eenheid mm/s)

Op het ruwe versnellingensignaal wordt een FFT analyse uitgevoerd (deel passagetijd (T_p). Het resultaat ervan is een dominante frequentie. Uit de trillingsversnelling tezamen met de dominante frequentie is de trillingssnelheid berekend volgens:

$$v_{piek} = \frac{a}{2\pi \cdot f}$$

waarin:

a	trillingsversnelling	[mm/s2];
f	frequentie	[Hz] ;
$v$piek	trillingssnelheid	[mm/s].

Hierbij is als uitgangspunt gehanteerd, dat de trillingen te benaderen zijn als harmonische trillingen volgens: $a(t) = \hat{a} \cdot sin(\omega t)$ en $v(t) = \hat{a} \cdot \int sin(\omega t)dt$.
Gezien het gemeten trillingsbeeld mag uitgegaan worden dat dit een realistisch uitgangspunt is.

Trillingssnelheid (eenheid dB)

RIVAS geeft aan dat de trillingssnelheid bepaald wordt met eenheid dB. De trillingsnelheid met eenheid dB is te bepalen volgens:

$$L_v(f) = 20 \log \frac{v(f)}{v0} + 10 \log T_a/T_p$$

waarin:

L_v	trillingsnelheid eenheid dB	[dB];
v	trillingsnelheid eenheid m/s	[m/s];
v_0	constante $1*10^{-9}$ m/s	
T_a	analysetijd (figuur 9 uit RIVAS)	[s]
T_p	passagetijd (figuur 9 uit RIVAS)	[s]

Hierbij geldt dat 0,1 mm/s 100 dB is.

4. Correctiefactoren

Er zijn vele factoren die van invloed zijn op de optredende grootte van de amplitude van de trilling. Naast de spoorcondities (o.a. de duurzame dwarsliggers) kunnen de spoorligging (maaiveld of in ophoging) en de grondgesteldheid van invloed zijn. Voor een zuivere bepaling van het effect van de duurzame dwarsligger, dienen de effecten door spoorligging dan wel grondgesteldheid hierop gecorrigeerd te worden.

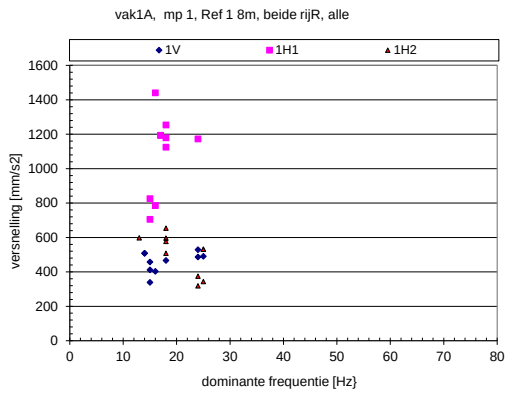
4.1 Correctie op spoorligging

De twee referentievakken liggen aan weerszijde van de proeftuin. Referentie vak 1 ten Noordwesten en Referentievak 2 ten Zuid Oosten van de proeftuin.

- Referentievak 1 hooggelegen km 2.9 – km 3.0 MASW afstand 565 m tot 600 m
- Referentievak 2 laaggelegen km 3.4 – km 3.5 MASW afstand 75 m tot 175 m

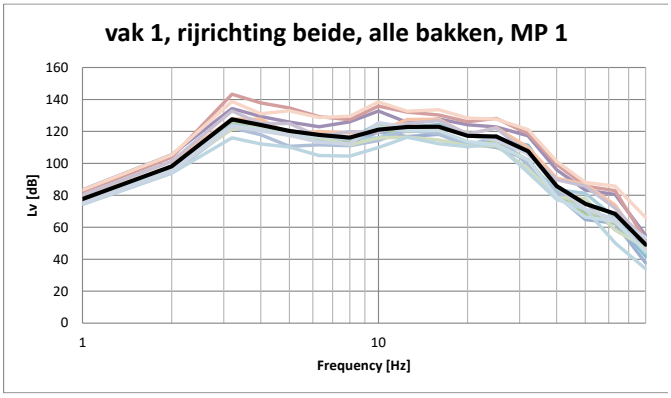
De correctie volgt uit het verschil tussen de meetwaarden van beide referentievakken.

In onderstaande figuren zijn van de beide referentievakken van alle gemeten treinpassages, de versnellingswaarden versus de dominante frequentie en spectraal ervan weergegeven. Omdat de dominante frequenties van de trilling lager ligt dan 45 Hz, is bij de spectrale weergave het signaal gefilterd op frequenties hoger dan 45 Hz.



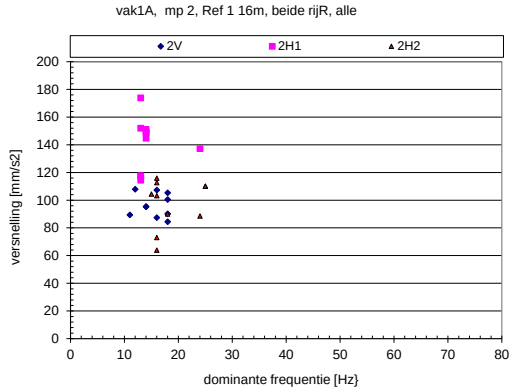
Figuur 4-1a: Ref 1, MP 1 (8 m)

Versnellingen versus dominante frequentie



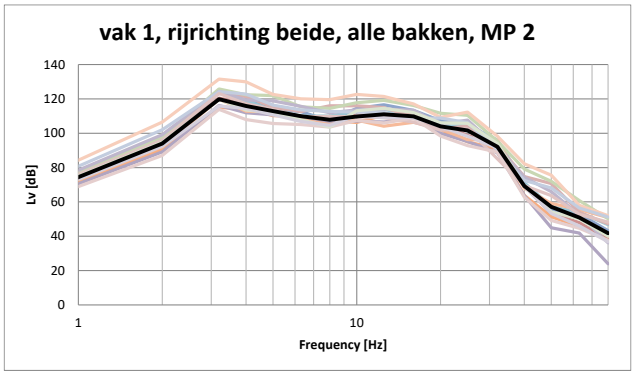
Figuur 4-1b: Ref 1, MP 1 (8 m)

Spectrum per treinpassage



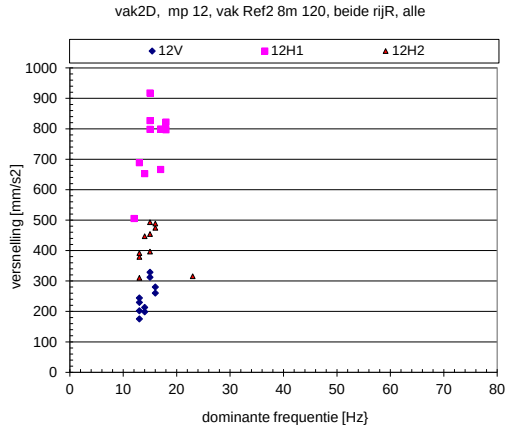
Figuur 4-2a: Ref 1, MP 2 (16 m)

Versnellingen versus dominante frequentie



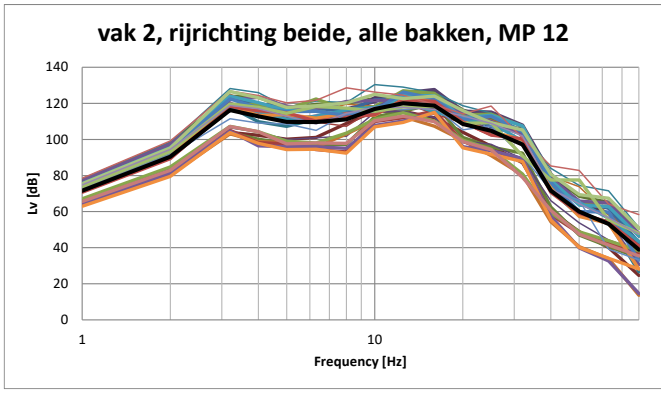
Figuur 4-2b: Ref 1, MP 2 (16 m)

Spectrum per treinpassage



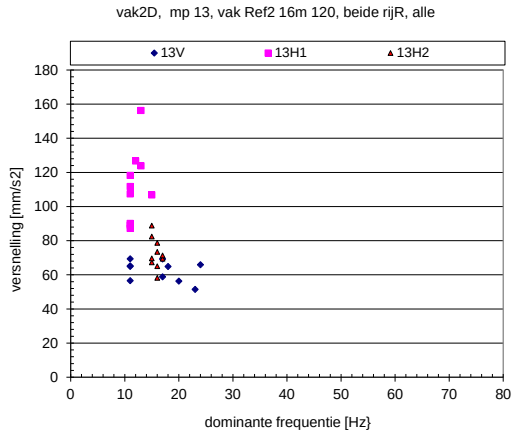
Figuur 4-3a: Ref 2, MP 12 (8 m)

Versnellingen versus dominante frequentie



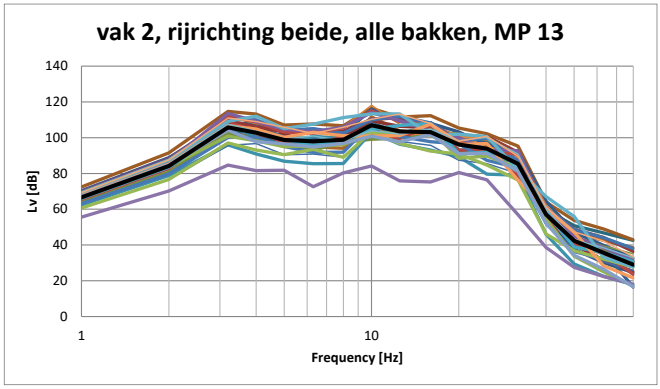
Figuur 4-3b: Ref 2, MP 13 (8 m)

Spectrum per treinpassage



Figuur 4-4a: Ref 2, MP 13 (16 m)

Versnellingen versus dominante frequentie



Figuur 4-4b: Ref 2, MP 13 (16 m)

Spectrum per treinpassage

De correctie op hoogteligging van het spoor is in onderstaande tabel opgenomen.

Tabel 3-1: Correctie op hoogteligging, referentie locaties 1 en 2, waarden in dB

Band [Hz]	3,2	4	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	32	40	50	63	80
Ref 1, 8m	138	135	133	131	129	127	125	123	121	119	116	112	109	107	102
Ref 1, 16m	140	137	135	133	131	129	127	125	123	120	117	113	110	107	104
Ref 2, 8m	137	134	132	130	128	127	125	123	120	118	115	111	107	105	100
Ref 2, 16m	137	135	133	131	129	128	125	123	121	119	116	110	106	103	99
Correctie 8m	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	-1	-1	-1	-2	-2	-2	-1
Correctie 16m	-2	-2	-2	-2	-2	-1	-2	-2	-2	-2	-2	-3	-4	-4	-2

(ivm afrondingen kunnen verschillen optreden)

Omdat de proefvakken verhoogd liggen is de correctie hierop toegepast.

4.1.1 Correctie op grondgesteldheid

Verschillen in meetresultaten worden mede beïnvloed als gevolg van verschillende bodemgesteldheden, dit is stijfheidsverschillen over aanwezige grondlaagdikten. Met het MASW onderzoek zijn de stijfheidsverschillen in de ondergrond inzichtelijk gemaakt. Uit een energetische beschouwing van stijfheden met laagdikten per proefvak, volgt een waarde geldend voor het proefvak. Door deze te vergelijken met de waarde van het referentievak, volgt de correctieterm.

Voor dit project is de uitvoering van MASW als proef uitgevoerd. Grafisch zijn de stijfheidsverschillen van de referentievakken en de proefvakken inzichtelijk gemaakt. Omdat geen nadere analyses zijn uitgevoerd qua stijfheden ed. is geen correctiefactor hiervoor opgemaakt.

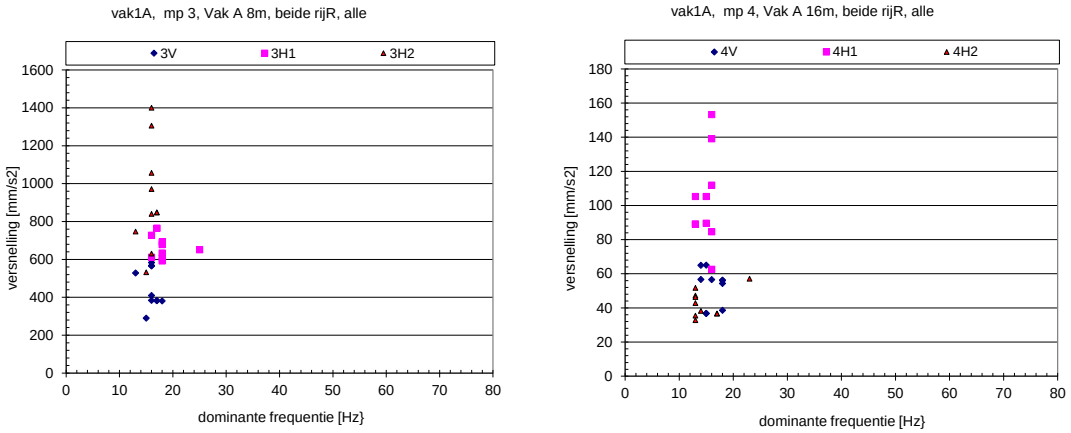
5. Meetresultaten en analyse

Grafisch zijn in navolgende figuren de meetresultaten opgenomen, waarbij geen onderscheid is gemaakt tussen passerende treintype (aantal bakken) dan wel rijrichting (er is 1 spoor aanwezig) en oriëntatie (X-, Y- Z-richting). In tabelvorm zijn het effect (invoegverlies) en het verhoudingsgetal opgenomen (conform punten 7 en 8 van procedure 1). Als referentievak is vak 2 aangehouden, het vak op maaiveldligging.

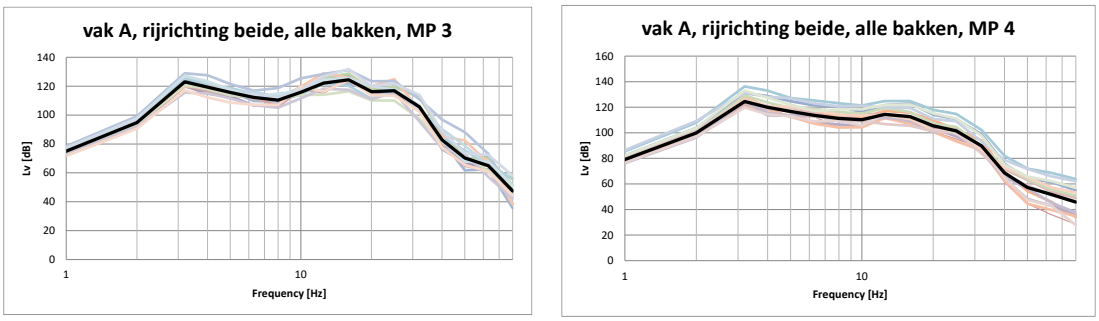
In de bijlagen is van de passages een grafische totaalweergave van de trillingsregistratie (ruwe versnellingen signalen) opgenomen. In een tweede bijlage is een grafische weergave opgenomen het ongefilterde FFT analyse signaal.

Toelichting figuur passage- en analysetijd
Per meetrichting is per passage zowel de passagetijd als de analysetijd weergegeven met een horizontale balk, waarbij de laagste (absolute) waarde de passagetijd is en de hoogste waarde de analysetijd. Om grafische weergave redenen zijn de waarden deels op een negatieve as weergegeven.

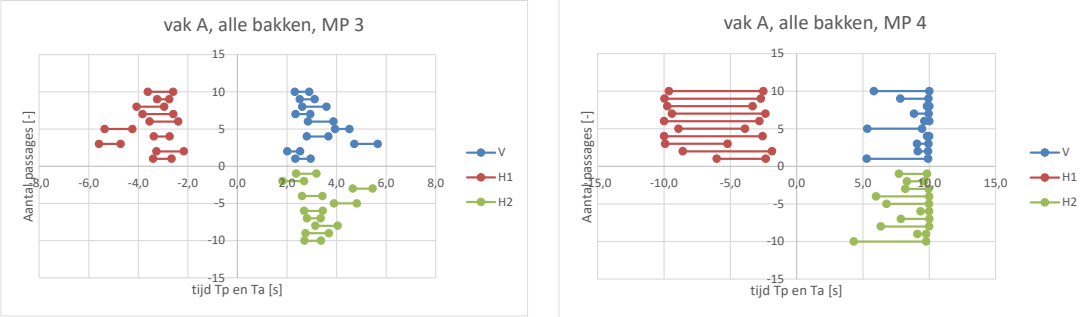
5.1 Proefvak A



Figuur 5-1: Proefvak A, versnellingen versus frequentie, (links) MP 3 (8 m), (rechts) MP 4 (16 m)



Figuur 5-2: Proefvak A, spectrum per treinpassage (links) MP 3 (8 m), (rechts) MP 4 (16 m)



Figuur 5-3: Proefvak A, passage- en analysetijd (links) MP 3 (8 m), (rechts) MP 4 (16 m)

Tabel 5-1a: Vak A, meetpunt op 8 m, effect (invoegverlies) en verhoudingsgetal

Band [Hz]	3,2	4	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	32	40	50	63
Meting[1)] [dB]	136	134	132	130	128	127	125	123	120	118	115	111	107	104
Effect [dB]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ver.getal [-]	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

1) Gecorrigeerd op hoogteligging

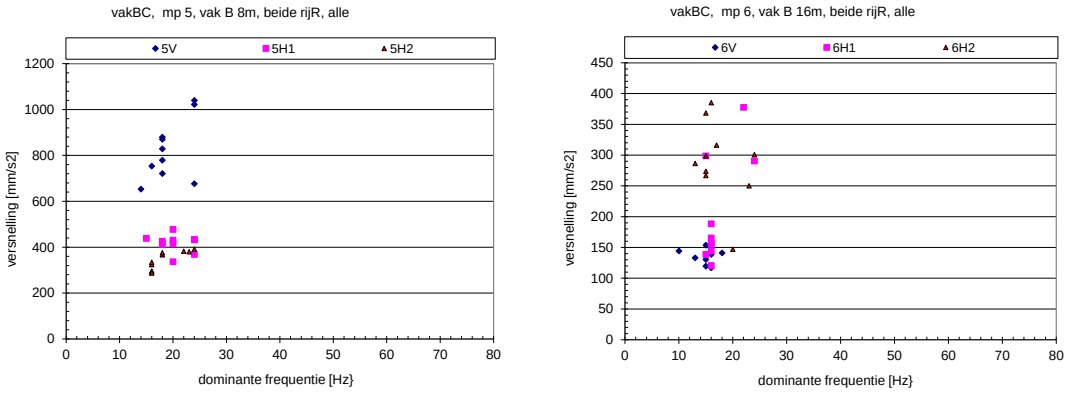
Tabel 5-1b: Vak A, meetpunt op 16 m, effect (invoegverlies) en verhoudingsgetal

Band [Hz]	3,2	4	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	32	40	50	63
Meting[1)] [dB]	136	133	131	129	127	125	123	121	119	116	113	108	104	100
Effect [dB]	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-3	-3	-3	-3
Ver.getal [-]	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,97	0,97

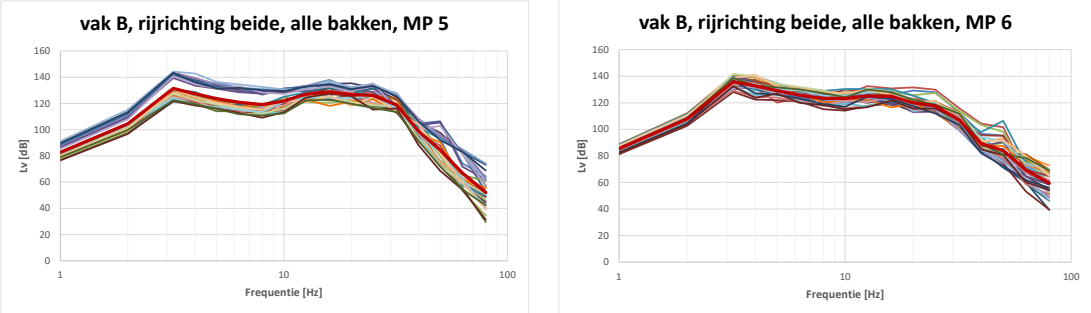
1) Gecorrigeerd op hoogteligging

5.2 Proefvak B

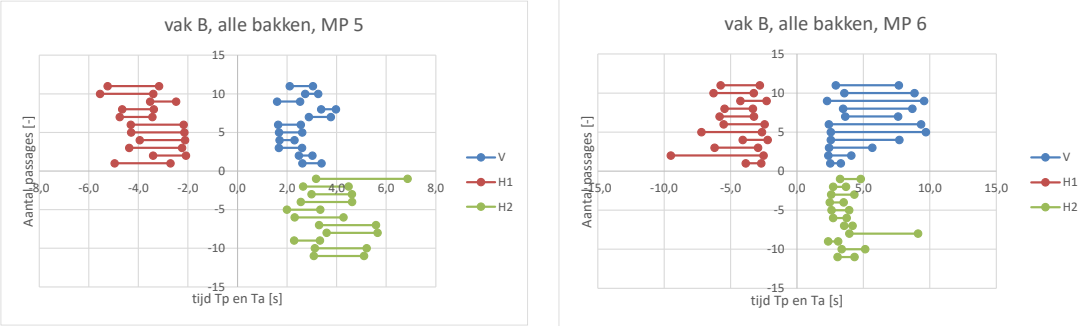
5.2.1 MP 5 en MP 6



Figuur 5-4: Proefvak B, versnellingen versus frequentie, (links) MP 5 (8 m), (rechts) MP 6 (16 m)



Figuur 5-5: Proefvak B, spectrum per treinpassage (links) MP 5 (8 m), (rechts) MP 6 (16 m)



Figuur 5-6: Proefvak B, passage- en analysetijd (links) MP 5 (8 m), (rechts) MP 6 (16 m)

Tabel 5-2a: Vak B, meetpunt op 8 m, effect (invoegverlies) en verhoudingsgetal

Band [Hz]	3,2	4	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	32	40	50	63	80
Meting[1)] [dB]	137	135	133	131	129	127	126	124	121	119	116	112	109	104	137
Effect [dB]	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
Ver.getal [-]	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,00	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,00	1,01

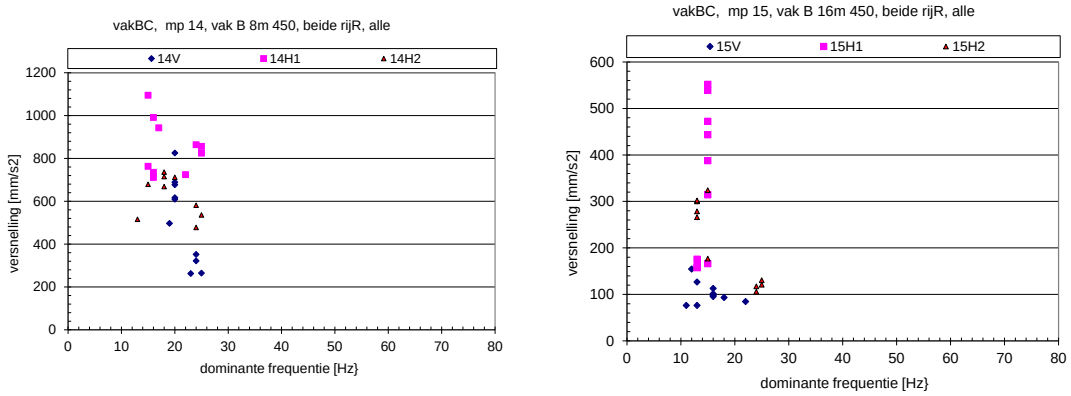
1) Gecorrigeerd op hoogteligging

Tabel 5-2b: Vak B, meetpunt op 16 m, effect (invoegverlies) en verhoudingsgetal

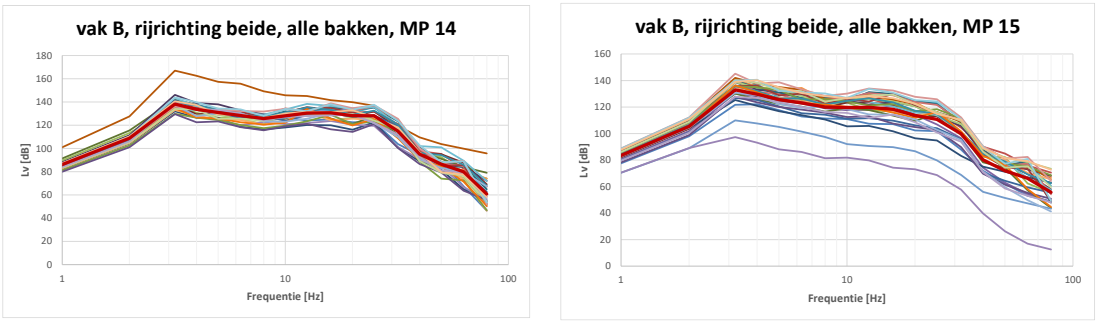
Band [Hz]	3,2	4	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	32	40	50	63	80
Meting[1)] [dB]	138	135	133	131	129	128	125	123	121	119	116	111	108	104	138
Effect [dB]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	1	0
Ver.getal [-]	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,01	1,02	1,01	1,00

1) Gecorrigeerd op hoogteligging

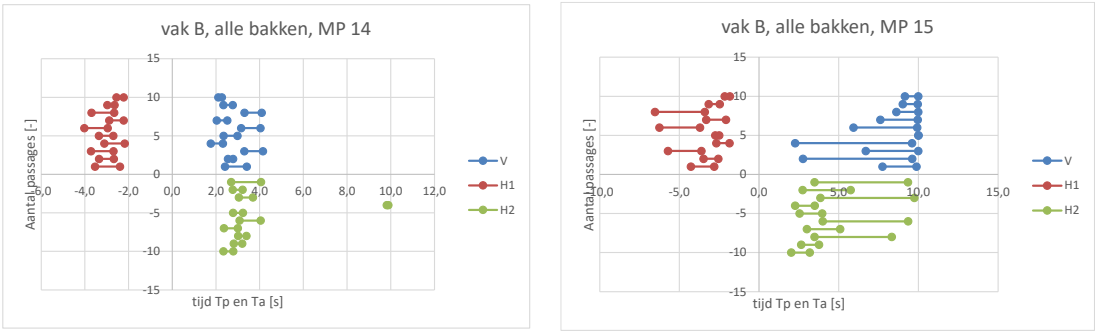
5.2.2 MP 14 en MP 15



Figuur 5-7: Proefvak B extra, versnellingen versus frequentie, (links) MP 14 (8 m), (rechts) MP 15 (16 m)



Figuur 5-8: Proefvak B extra, spectrum per treinpassage (links) MP 14 (8 m), (rechts) MP 15 (16 m)



Figuur 5-9: Proefvak B extra, passage- en analysetijd (links) MP 5 (8 m), (rechts) MP 6 (16 m)

Tabel 5-3a: Vak B, meetpunt op 8 m, effect (invoegverlies) en verhoudingsgetal

Band [Hz]	3,2	4	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	32	40	50	63	80
Meting[1)] [dB]	137	134	132	130	128	127	125	123	120	118	115	111	108	105	137
Effect [dB]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ver.getal [-]	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

1) Gecorrigeerd op hoogteligging

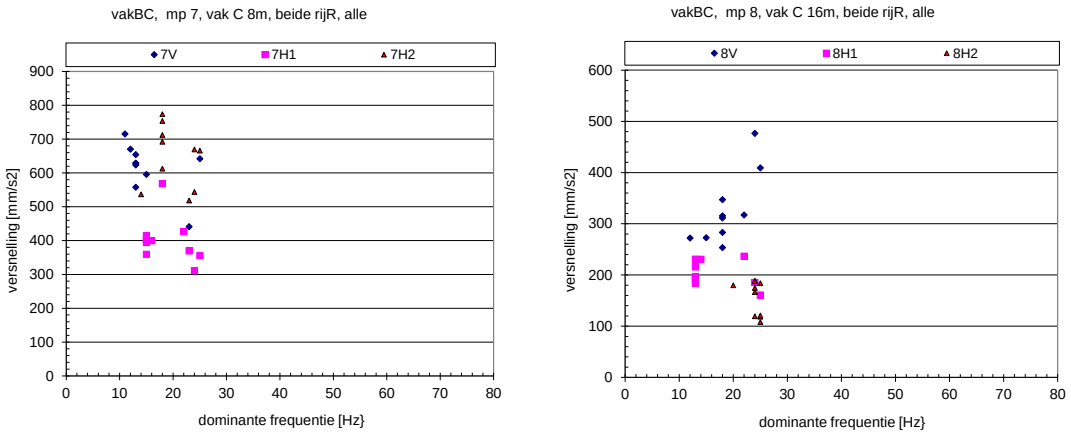
Tabel 5-3b: Vak B, meetpunt op 16 m, effect (invoegverlies) en verhoudingsgetal

Band [Hz]	3,2	4	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	32	40	50	63	80
Meting[1)] [dB]	136	134	132	130	128	126	124	122	119	117	114	109	106	102	136
Effect [dB]	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-2	-1	-1	-1	-1
Ver.getal [-]	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99

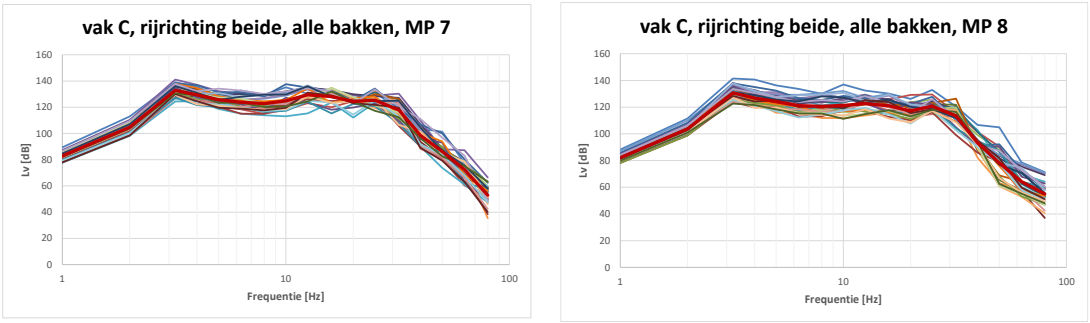
1) Gecorrigeerd op hoogteligging

5.3 Proefvak C

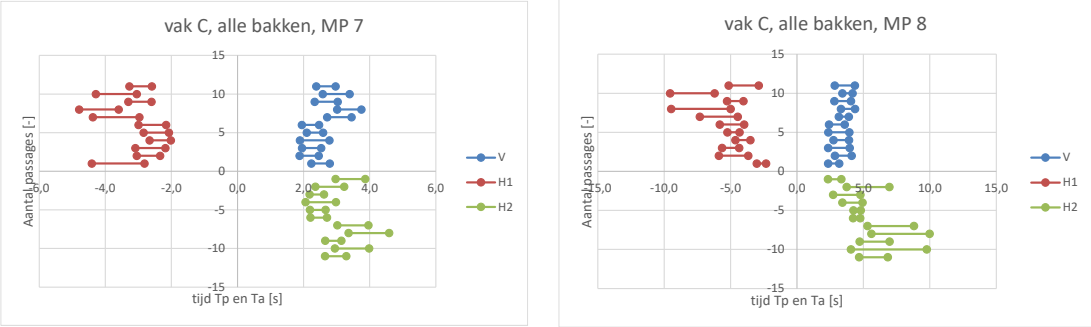
5.3.1 MP 7 en MP 8



Figuur 5-10: Proefvak C, versnellingen versus frequentie, (links) MP 7 (8 m), (rechts) MP 8 (16 m)



Figuur 5-11: Proefvak C, spectrum per treinpassage (links) MP 7 (8 m), (rechts) MP 8 (16 m)



Figuur 5-12: Proefvak C, passage- en analysetijd (links) MP 7 (8 m), (rechts) MP 8 (16 m)

Tabel 5-4a: Vak C, meetpunt op 8 m, effect (invoegverlies) en verhoudingsgetal

Band [Hz]	3,2	4	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	32	40	50	63	80
Meting[1)] [dB]	137	134	132	130	128	127	125	123	120	118	116	111	108	104	137
Effect [dB]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
Ver.getal [-]	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,01	1,01	1,00	1,00

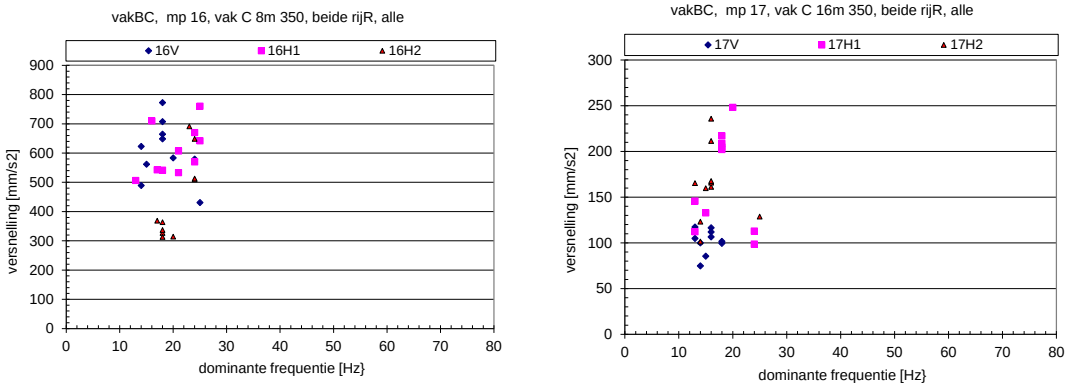
1) Gecorrigeerd op hoogteligging

Tabel 5-4b: Vak C, meetpunt op 16 m, effect (invoegverlies) en verhoudingsgetal

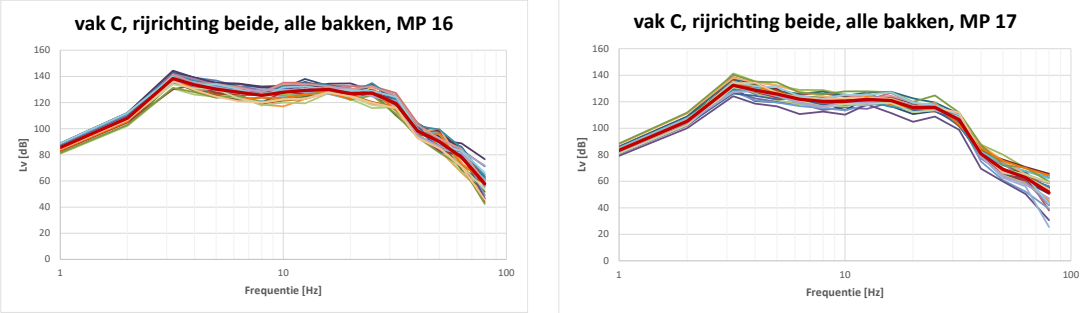
Band [Hz]	3,2	4	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	32	40	50	63	80
Meting[1)] [dB]	136	134	131	129	127	126	124	122	119	118	115	110	106	102	136
Effect [dB]	-2	-2	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	-1	-2
Ver.getal [-]	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	1,00	1,00	0,99	0,99

1) Gecorrigeerd op hoogteligging

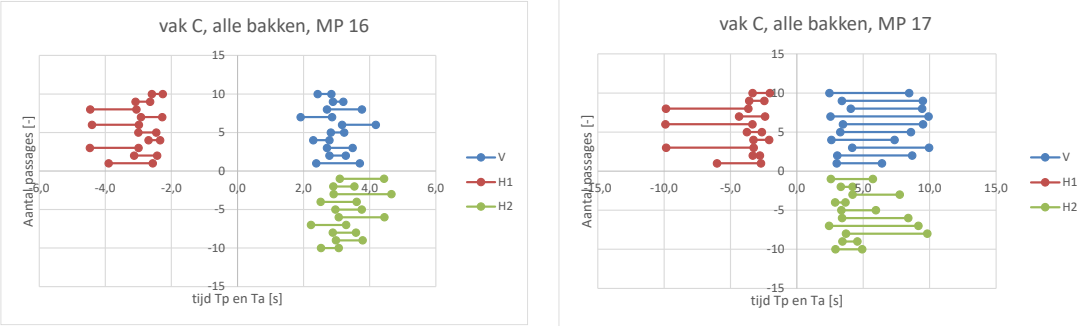
5.3.2 MP 16 en MP 17



Figuur 5-13: Proefvak C extra, versnellingen versus frequentie, (links) MP 16 (8 m), (rechts) MP 17 (16 m)



Figuur 5-14: Proefvak C extra, spectrum per treinpassage (links) MP 16 (8 m), (rechts) MP 17 (16 m)



Figuur 5-15: Proefvak C extra, passage- en analysetijd (links) MP 16 (8 m), (rechts) MP 17(16 m)

Tabel 5-5a: Vak C extra, meetpunt op 8 m, effect (invoegverlies) en verhoudingsgetal

Band [Hz]	3,2	4	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	32	40	50	63	80
Meting[1)] [dB]	137	135	133	131	129	127	125	123	120	118	116	111	108	105	137
Effect [dB]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
Ver.getal [-]	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,01	1,01	1,00	1,00

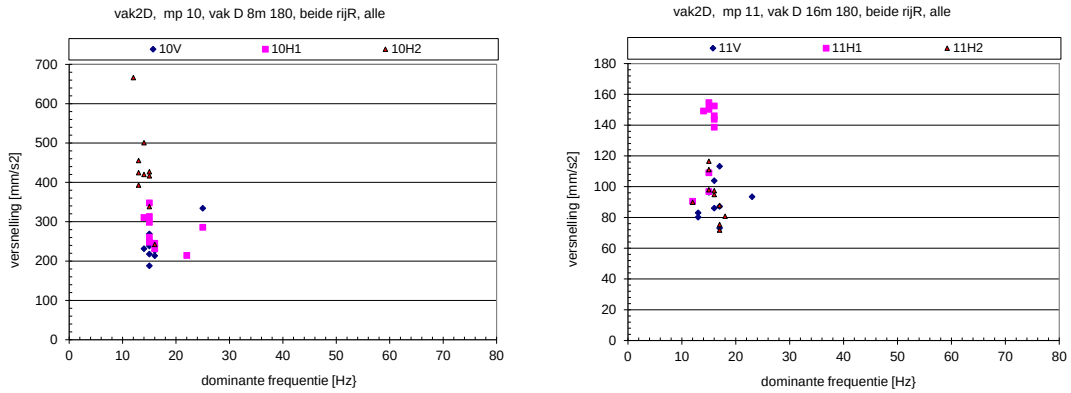
2) Gecorrigeerd op hoogteligging

Tabel 5-5b: Vak C extra, meetpunt op 16 m, effect (invoegverlies) en verhoudingsgetal

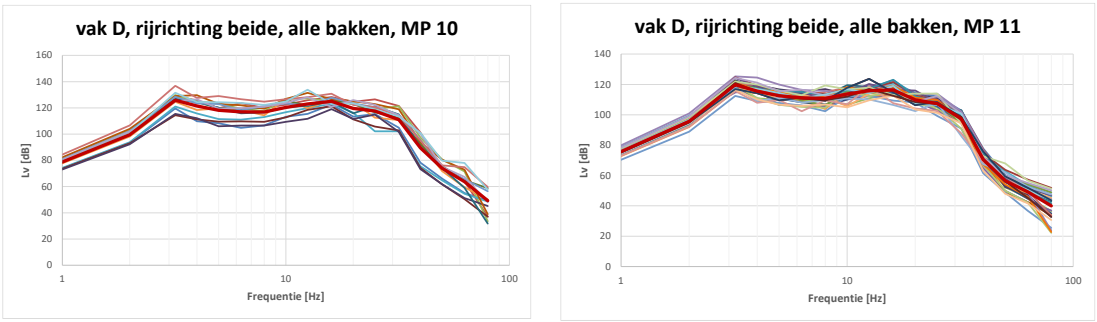
Band [Hz]	3,2	4	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	32	40	50	63	80
Meting[1)] [dB]	138	136	133	131	129	128	126	123	121	119	116	111	107	104	138
Effect [dB]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0
Ver.getal [-]	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,01	1,00	1,00	1,01	1,00

2) Gecorrigeerd op hoogteligging

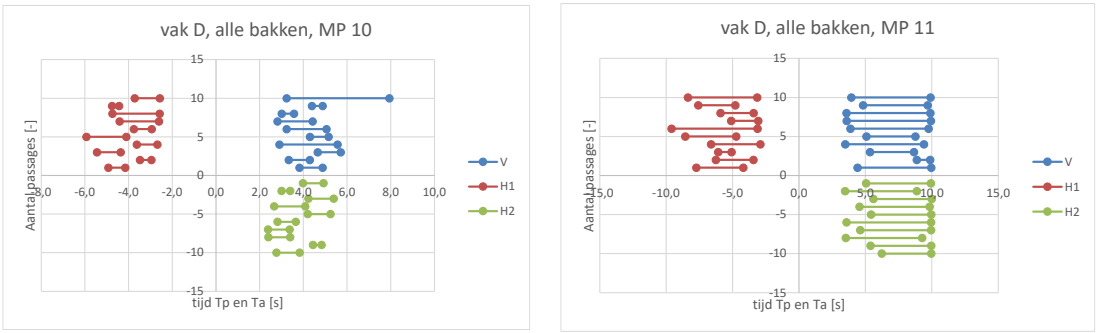
5.4 Proefvak D



Figuur 5-16: Proefvak D, versnellingen versus frequentie, (links) MP 10 (8 m), (rechts) MP 11 (16 m)



Figuur 5-17: Proefvak D, spectrum per treinpassage (links) MP 10 (8 m), (rechts) MP 11 (16 m)



Figuur 5-18: Proefvak D, passage- en analysetijd (links) MP 10 (8 m), (rechts) MP 11 (16 m)

Tabel 5-6a: Vak D, meetpunt op 8 m, effect (invoegverlies) en verhoudingsgetal

Band [Hz]	3,2	4	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	32	40	50	63	80
Meting[1)] [dB]	136	134	132	130	128	126	125	123	120	118	115	111	107	103	136
Effect [dB]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	0
Ver.getal [-]	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,99	1,00

1) Gecorrigeerd op hoogteligging

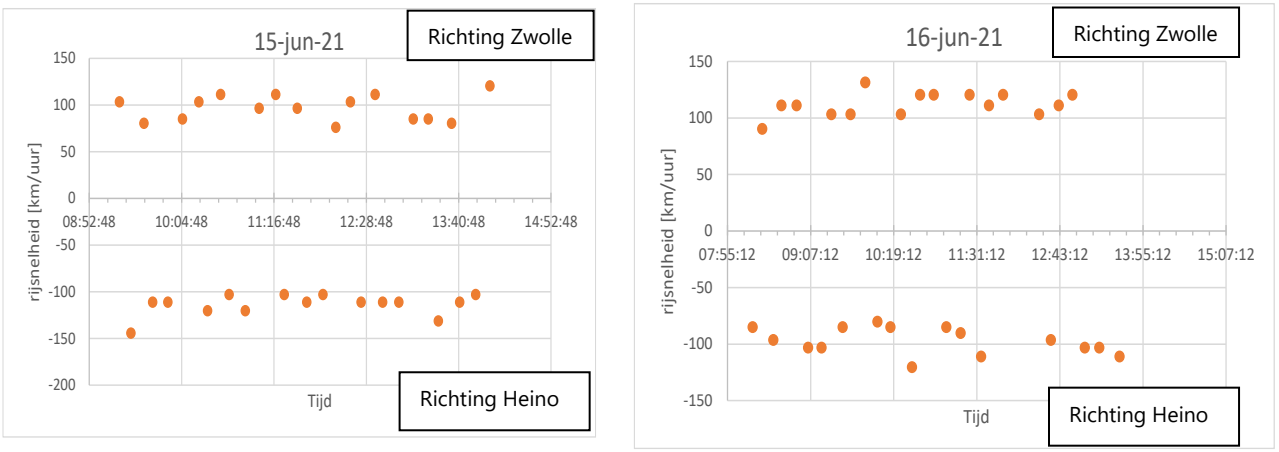
Tabel 5-6b: Vak D, meetpunt op 16 m, effect (invoegverlies) en verhoudingsgetal

Band [Hz]	3,2	4	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	32	40	50	63	80
Meting[1)] [dB]	136	134	132	130	128	127	125	123	120	118	115	109	104	101	136
Effect [dB]	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-2	-2	-1
Ver.getal [-]	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,98	0,98	0,99

1) Gecorrigeerd op hoogteligging

5.5 Treinsnelheid

Ter bepalen van de rijsnelheid van de trein zijn aan het begin en aan het eind van de projectlocatie twee onbemande automatisch registrerende meetsystemen geplaatst. De onderlinge afstand is 520 m geweest (locatie 1 nabij portaal 2-17N op 15 m richting brug en op locatie 2 nabij portaal 3-8N op 14 m richting ZuidOost). De systemen hebben de passages gemeten, waarmee de passagetijdstippen bepaald zijn. Omdat de onderlinge afstand tussen de opgestelde meetsystemen bekend is, is daarmee eveneens de rijsnelheid te herleiden. In onderstaande figuren is grafisch de gereden rijsnelheid weergegeven.



Figuur 5-13: Treinrijsnelheid (negatieve waarden richting Heino, positieve waarden richting Zwolle)

6. Samenvatting en conclusies

Opdrachtverstrekking
In opdracht van Prorail, afd. Leefomgeving, Juridische Zaken en Vastgoed te Utrecht heeft Fugro Land NL een trillingenonderzoek uitgevoerd voor de proeftuin duurzame dwarsliggers te Zwolle. Het trillingenonderzoek bestaat uit een deel trillingsmetingen (uitgevoerd op 15 en 16 juni 2021) en een deel analyse van de data.

Aanleiding
Op het enkelsporige baanvak Zwolle – Heino (geocode 206) zijn, als test, in het trajectdeel km 2.9 tot km 3.5 een viertal verschillende duurzame dwarsliggertypen aangebracht (100 m per type dwarsligger). Daarnaast bestaat de proeftuin aan het begin en aan het eind uit twee referentievakken (elk 100 m) met standaard betonnen dwarsliggers (NS90). Het baanvak is geëlektrificeerd en er wordt gereden met materieel Flirt3 (III en IV). Met de realisatie van de proeftuin is aangesloten bij een bestaand bovenbouwvernieuwingsproject. De proeftuin is gerealiseerd begin juli 2019. Ter verbetering van de spoorligging is een laatste onderstopping uitgevoerd in de tweede helft van 2020.

Opsplitsen rapportage per proefvak
Op verzoek van ProRail zijn, naast voorliggende hoofdrapportage (rapportnummer 1021-188974.R01), de vier proefvakken separaat gerapporteerd in de volgende rapportages (versie 3 van de eerdere rapportages):

- Proefvak A: rapportnummer 1021-188974.R02
- Proefvak B: rapportnummer 1021-188974.R03
- Proefvak C: rapportnummer 1021-188974.R04
- Proefvak D: rapportnummer 1021-188974.R05

MASW metingen (geofysisch)
Dit project bood Fugro de kans om eveneens geofysische metingen uit te voeren (Multi Analysis Surface Wave, MASW). Met MASW metingen wordt de schuifgolfsnelheid(sverschillen) van de ondergrondse lagen naast/in het spoor in beeld gebracht als een functie van de diepte. Met MASW metingen is een betere relatie te leggen met de voortplanting / afdracht van de trillingen. Naast inzicht in afdracht van de trillingen afkomstig van de treinen, kan met MASW metingen inzicht verkregen worden ten behoeve van de boeggolfproblematiek. Dat wil zeggen, bij welke kritieke treinrijsnelheid wordt de schuifgolfsnelheid nog niet ingehaald waardoor geen discomfort en geen risico op ontsporen optreedt.

Rivas, uitvoering
Met de trillingsmetingen zijn uitgevoerd met een systeem dat versnellingsopnemers hanteert. Hierbij is een uitvoering aangehouden die zoveel mogelijk geprobeerd aan te sluiten op het meetprotocol van Rivas (Protocol for free field measurements of mitigation effects in the project RIVAS for WP2,3,4,5, Deliverable D1.2.). Procedure 1 is van toepassing; effect (invoegverlies) na aanbrengen van de maatregel. Daarnaast is door Prorail om een verhoudingsgetal gevraagd.

Omdat de proeftuin niet ideaal is qua setup, is door Prorail aangegeven dat een enigszins afwijkende uitvoering/aanpak mogelijk is. De trillingsmetingen zijn uitgevoerd op basis van de SBR -Meet- en beoordelingsrichtlijnen A '*Schade aan bouwwerken'* en SBR richtlijn B "Hinder voor personen".

Trillingsmetingen
De trillingsmetingen zijn uitgevoerd met een systeem waarbij (piezo) versnellingsopnemers zijn gebruikt (geen geofoons). Per meetpunt (meting in XYZ-richtingen) geplaatst op 8 m en 16 m uit het spoor zijn passages van treinen gemonitord. Gedurende circa 10 sec is hoog frequent (800 Hz) het signaal gemeten en opgeslagen.

Ten behoeve van het bepalen van de rijsnelheid van de treinen zijn aan het begin en aan het eind van de proeftuin automatisch registrerende trillingsmeetsystemen geplaatst. Deze hanteren een geofoon als opnemer.

Treinen
Op het baanvak tussen Zwolle en Heino rijden treinen van het type Flirt III en Flirt IV. In totaal zijn 22 treinen rijdend richting Zwolle en 19 treinen rijdend richting Heinogemonitord. De gemiddelde rijsnelheid van de treinen varieerde tussen 80 en 110 km/uur. Een enkele trein reed circa 135 km/uur.

FFT analyses en filtering
De opgeslagen signalen zijn zeer goed geschikt voor analyses van het frequentie spectrum met Fast Fourier Transformaties (FFT). Omdat de bijdrage van de hogere frequenties minimaal is, is bij bepalen van de dominante frequenties (en versnellingswaarde) het signaal gefilterd op 45Hz en hoger. De FFT analyses zijn uitgevoerd op het "passage (T_p)" deel van het signaal.

Correctiefactoren
De hoogteligging van het deel van het baanvak waar de proeftuin is aangebracht varieert in hoogte, van maaiveldligging tot aansluiten op een kunstwerk over een weg. Derhalve is een correctiefactor hiervoor in rekening gebracht.
De ondergrond is over de gehele strekking van het proeftuintrajectdeel niet uniform en homogeen. Door verschillen in grondgesteldheid treden verschillen in meetwaarden op. Uit het MASW onderzoek is gebleken dat er een sterke gelaagdheid tezamen met grote stijfheidsverschillen aanwezig is tussen proefvak en referentievakken. De verschillen zijn dusdanig groot, dat vooralsnog geen correctie hiervoor is doorgevoerd.

Effect (invoegverlies) en verhoudingsgetal
Het effect is bepaald conform procedure 1 uit Rivas en wordt bepaald door de waarde van het proefvak verminderd met de waarde van het referentievak. Het verhoudingsgetal wordt bepaald door de waarde van het proefvak gedeeld door de waarde van het referentievak. In beiden is referentievak 2 (maaiveldligging) als referentievak aangehouden.

In onderstaande tabel is een samenvatting van de effecten en het verhoudingsgetal opgenomen.

Tabel 6-1: Samenvatting effect en verhoudingsgetal

Vak	Effect Op 8 m	Effect Op 16 m	Verhoudingsgetal Op 8 m	Verhoudingsgetal Op 16 m
A	0 dB	-1 tot -2 dB	1,0	0,97 tot 0,99
B	0 dB	+1 tot +2 dB	1,0 tot 1,01	1,0 tot 1,02
C	0 dB	0 tot -2 dB	1,0	0,98 tot 1,0
D	0 dB	-1 tot -2 dB	1,0	0,98 tot 0,99

Bijlagen

A. Trillingstechnische vaktermen

Trilling:	een periodieke beweging van een grootheid (verplaatsing, snelheid, versnelling) om een evenwichtsstand als functie van de tijd.
Trillingstijd:	de kleinste verschuiving in de tijd waarbij een periodieke tijdsfunctie met zichzelf samenvalt.
Topwaarde	de in absolute zin grootste afwijking van de momentane waarde van een grootheid ten opzichte van de gemiddelde waarde.
Frequentie	de reciproque van de trillingstijd.
Dominante frequentie:	de overheersende frequentie in dat deel van het signaal waar de topwaarde optreedt.
Verplaatsing:	een vectoriële grootheid die de verandering van een positie van een lichaam of van een punt aanduidt ten opzichte van een zekere referentie.
Snelheid:	een vectoriële grootheid die de tijdsafgeleide van de verplaatsing representeert.
Versnelling:	een vectoriële grootheid die de tijdsafgeleide van de snelheid representeert.
Trillingssterkte:	de sterkte van de trilling in relatie tot het van belang zijnde trillingseffect; in het geval van schade wordt onder de trillingssterkte verstaan de topwaarde van een trillingsgrootheid in combinatie met de dominante frequentie.
Draagconstructie:	het deel van een gebouw dat ervoor zorgt dat het gebouw als geheel en in het bijzonder de vloeren hun dragende functie kunnen blijven vervullen.
Grenswaarde schade:	waarde voor de toelaatbare trillingssterkte waarbij de kans op schade aan de draagconstructie (en overige onderdelen) van een bouwwerk aanvaardbaar klein is (minder dan 1%); schade kan de veiligheid en/ of levensduur van het bouwwerk beïnvloeden, of leiden tot een vermindering van de gebruikswaarde of de economische waarde van het bouwwerk.
Continue trilling:	een trilling die zodanige tijd continu aanwezig is, dat resonanties en/ of vermoeiingseffecten aan de draagconstructie van een bouwwerk kunnen optreden (bv. machines, intrillen damwanden).
Kortdurende trilling:	een door een stootvormige excitatie veroorzaakte trilling met een kortdurend, uitdempend karakter (bv. explosies, botsingen).
Herhaald kortdurende trilling:	een kortdurende trilling die meermalen voorkomt, steeds gescheiden door een tijdsinterval waarin een rustsituatie heerst, waarbij vermoeiingseffecten aan de draagconstructie van een bouwwerk kunnen optreden (bv. heiwerkzaamheden, weg- en railverkeer).
Indicatieve meting:	meting waarbij slechts met één meetpunt ter plaatse van de begane grond trillingen worden gemeten (conform § 8.4.2.1 SBR-richtlijn A).
Beperkte meting:	meting waarbij met tenminste één meetpunt op de begane grond en met tenminste één meetpunt op de hoogste verdieping van het gebouw trillingen worden gemeten (conform § 8.4.2.2 SBR-richtlijn A).
Uitgebreide meting:	meting waarbij met een groot aantal meetpunten wordt gemeten, dit in aanvulling op de meetpunten volgens de beperkte meting (conform § 8.4.2.3 SBR-richtlijn A).
Beoordelingsperiode:	een tijdsinterval waarin een dag wordt verdeeld voor de toetsing van de trillingsterkte aan de streefwaarden in: dagperiode: van 7:00 tot 19:00; avondperiode: van 19:00 tot 23:00; nachtperiode: van 23:00 tot 7:00.
Effectieve trillingssnelheid:	voortschrijdende effectieve waarde van de gewogen momentane trillingsgrootheid.
Maximale effectieve trillingssnelheid:	grootste optredende waarde van de voortschrijdende effectieve waarde.
Trillingssterkte over beoordelingsperiode:	het kwadratisch gemiddelde van de grootste effectieve waarde per interval van 30 seconden in de desbetreffende beoordelingsperiode.

Streefwaarde hinder:	waarde voor de trillingssterkte waarbij verwacht wordt dat er nog net geen hinder voor personen optreedt; onder hinder wordt verstaan de verstoring en/ of belemmering van (fysieke) activiteiten en/ of processen die rust en/ of concentratie behoeven.
Streefwaarde A1:	onderste streefwaarde voor de maximale trillingssterkte van de voortschrijdende effectieve waarde .
Streefwaarde A2:	bovenste streefwaarde voor de maximale trillingssterkte van de voortschrijdende effectieve waarde.
Streefwaarde A3:	streefwaarde voor de trillingssterkte over de beoordelingsperiode dag, avond en nacht.

B. Grafische weergave signalen

Zie separaat bestand
'1021-188974.R01V03 meting 15 juni 2021 Zwolle - Bijlage B Grafische weergave signalen.pdf'

C. Grafische weergave FFT analyses

Zie separaat bestand

'1021-188974.R01V03 meting 15 juni 2021 Zwolle - Bijlage C Grafische weergave FFT analyses.pdf'