



# Trillingsonderzoek praktijkproef gedifferentieerd rijden

Onderzoeksrapportage

16 juni 2020

Project Trillingsonderzoek praktijkproef gedifferentieerd rijden  
Opdrachtgever ProRail B.V.

Document Onderzoeksrapportage  
Status Definitief 02  
Datum 16 juni 2020  
Referentie 112920/20-009.281

Projectcode 112920  
Projectleider G.J. Dijkgraaf MSc  
Projectdirecteur mevrouw ir. J.L. Dierx

Auteur(s) G.J. Dijkgraaf MSc, F.L.H. Klein Schaarsberg MSc  
Gecontroleerd door dr.ir. A.C. de Niet, P.W. Dijkstra MSc, ing. G.A. Krone  
Goedgekeurd door G.J. Dijkgraaf MSc

Paraaf

Adres Witteveen+Bos Raadgevende ingenieurs B.V.  
Leeuwenbrug 8  
Postbus 233  
7400 AE Deventer  
+31 (0)570 69 79 11  
[www.witteveenbos.com](http://www.witteveenbos.com)  
KvK 38020751

Het kwaliteitsmanagementsysteem van Witteveen+Bos is gecertificeerd op basis van ISO 9001.

© Witteveen+Bos

Niets uit dit document mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt in enige vorm zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Witteveen+Bos noch mag het zonder dergelijke toestemming worden gebruikt voor enig ander werk dan waarvoor het is vervaardigd, behoudens schriftelijk anders overeengekomen. Witteveen+Bos aanvaardt geen aansprakelijkheid voor enigerlei schade die voortvloeit uit of verband houdt met het wijzigen van de inhoud van het door Witteveen+Bos geleverde document.

## INHOUDSOPGAVE

|       |                                                                       |           |
|-------|-----------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1     | <b>INLEIDING</b>                                                      | <b>5</b>  |
| 2     | <b>ACHTERGROND</b>                                                    | <b>6</b>  |
| 2.1   | Aanleiding onderzoek                                                  | 6         |
| 2.2   | Trillingsopwekking en -overdracht door goederentreinen                | 6         |
| 2.3   | Beoordeling van trillingen                                            | 8         |
| 2.4   | Eerder onderzoek naar relatie tussen treinsnelheid en spoortrillingen | 8         |
| 3     | <b>METINGEN</b>                                                       | <b>9</b>  |
| 3.1   | Meetlocaties                                                          | 9         |
| 3.2   | Meetopstelling                                                        | 10        |
| 3.3   | Meetperiode                                                           | 11        |
| 3.4   | Regulier passerende goederentreinen                                   | 11        |
| 3.5   | Meettrein                                                             | 11        |
| 4     | <b>ANALYSE</b>                                                        | <b>12</b> |
| 4.1   | Verwerken meetgegevens                                                | 12        |
| 4.1.1 | Bewerkingsstappen op ruwe data                                        | 13        |
| 4.1.2 | Resulterende dataset                                                  | 15        |
| 4.2   | Parameter en modelselectie                                            | 17        |
| 4.2.1 | Selectie van parameters en aggregatiemethoden                         | 18        |
| 4.2.2 | Modelselectie                                                         | 19        |
| 4.3   | Analyseprocedure                                                      | 19        |
| 5     | <b>RESULTATEN</b>                                                     | <b>22</b> |
| 5.1   | Verband tussen snelheid en trillingsniveau                            | 22        |
| 5.1.1 | Meettrein                                                             | 22        |
| 5.1.2 | Reguliere goederentreinen                                             | 25        |
| 5.2   | Andere parameters met invloed                                         | 27        |

|     |                                                                               |           |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 6   | <b>RELATIE MET ANDER ONDERZOEK</b>                                            | <b>28</b> |
| 6.1 | TB PHS Meteren-Boxtel                                                         | 28        |
| 6.2 | Trillingsonderzoek gedifferentieerd rijden (2016)                             | 28        |
| 7   | <b>CONCLUSIES</b>                                                             | <b>30</b> |
| 8   | <b>LITERATUURLIJST</b>                                                        | <b>33</b> |
|     | Laatste pagina                                                                | 33        |
|     | <b>Bijlage(n)</b>                                                             |           |
| I   | Meetopstelling en -locaties                                                   |           |
| II  | Proef met meetrein                                                            |           |
| III | Verwerking meetgegevens                                                       |           |
| IV  | Parameter- en modelselectie op basis van locatie Waardenburg                  |           |
| V   | Effect van gedifferentieerd rijden per meetlocatie                            |           |
| VI  | Effectbepaling gedifferentieerd rijden voor gidspanden OTB PHS Meteren-Boxtel |           |

## INLEIDING

In opdracht van ProRail B.V. heeft Witteveen+Bos een onderzoek uitgevoerd naar trillingen veroorzaakt door goederentreinpassages op een zevental locaties langs het spoor tussen Meteren en Boxtel. Het onderzoek heeft als doel de relatie tussen goederentreinsnelheid en trillingsniveau, en de onderliggende parameters die daarop van invloed zijn, inzichtelijk te maken. Dit is gedaan door het uitvoeren en analyseren van metingen. Het onderzoek vormt onderdeel van de 'praktijkproef gedifferentieerd rijden'. In deze praktijkproef worden de verschillende effecten van langzamer rijden met goederentreinen (het zogenaamde 'gedifferentieerd rijden') onderzocht.

Tijdens dit onderzoek zijn niet alleen de regulier passerende goederentreinen gemeten, maar is ook een proef met een meettrein uitgevoerd. Deze meettrein bestond uit vier series platte open wagons met verschillende gewichten aan belading en heeft een aantal keren met verschillende snelheden over het traject gereden.

De meetdata geregistreerd op één van de meetlocaties zijn geanalyseerd met verschillende analysemodellen. Het onderzoek beschrijft vervolgens welk model resulteert in het meeste inzicht en de meest betrouwbare voorspelling geeft.

Na de analyse gaat het rapport ook in op de relatie met andere onderzoeken, waaronder het trillingsonderzoek bij het Ontwerp-Tracébesluit PHS Meteren-Boxtel. Gedifferentieerd rijden zou een oplossing kunnen bieden voor de panden met een overschrijding van de wettelijke grenswaarden. Dit onderzoek beoordeelt in hoeverre dit inderdaad het geval is.

### Leeswijzer

De hoofdtekst van dit rapport is bondig geformuleerd. Details en onderbouwing bij de hoofdtekst zijn terug te vinden in de bijlagen. De hoofdstukken zijn grotendeels afzonderlijk leesbaar. Hoofdstuk 2 beschrijft de achtergrond van dit onderzoek. Hoofdstuk 3 gaat in op de uitgevoerde metingen, evenals bijlage I, II en III. De analyse, inclusief een verantwoording van de modelselectie, en de gekozen aggregatiemethoden voor de relevante parameters, komt aan bod in hoofdstuk 4 en bijlage IV. Hoofdstuk 5 en bijlage V vervolgen met de resultaten van de analyse van de metingen. Hoofdstuk 6 en bijlage VI gaan in op de vertaling van de uitkomsten van dit onderzoek naar de mogelijke effecten van gedifferentieerd rijden voor het traject Meteren-Boxtel. Hoofdstuk 7 sluit af met de overkoepelende conclusies.

## ACHTERGROND

Dit hoofdstuk geeft informatie die helpt om de rest van voorliggend onderzoek te begrijpen en in een breder kader van onderzoek en beoordeling van trillingen veroorzaakt door spoorverkeer te plaatsen.

Achtereenvolgens komen aan bod:

- de aanleiding voor dit onderzoek;
- hoe goederentreinen spoortrillingen opwekken;
- hoe overlast door spoortrillingen in Nederland wordt beoordeeld;
- wat uit eerdere onderzoeken bekend is over de relatie tussen treinsnelheid en spoortrillingen.

### 2.1 Aanleiding onderzoek

Overlast veroorzaakt door trillingen is de afgelopen jaren herhaaldelijk in het nieuws geweest. Bewoners van huizen langs het spoor geven aan 's nachts wakker te worden van spoortrillingen, of maken zich zorgen om de toestand van hun woning. Tegelijkertijd neemt het goederenvervoer over het spoor toe.

Eén van de gesuggereerde oplossingen om de hinder te doen afnemen is het langzamer laten rijden van goederentreinen, die vaak voor de grootste trillingsniveaus zorgen. Dit heet ook wel het zogenaamde 'gedifferentieerd rijden'. De Tweede Kamer heeft de regering verzocht met een praktijkproef onderzoek te doen naar deze oplossing [lit. 4]. Het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat heeft vervolgens ProRail opdracht gegeven dit onderzoek uit te voeren op het traject Meteren-Boxtel. Naar het effect van snelheidsverandering op het trillingsniveau is eerder onderzoek gedaan, zie paragraaf 2.4.

Het onderzoek bestaat uit een analyse van de verschillende effecten van gedifferentieerd rijden, zoals de economische- en systeemeffecten. Het effect van een lagere snelheid op het gemeten trillingsniveau is daarnaast één van die effecten. Het voorliggende rapport gaat in op dit aspect.

Het ministerie heeft daarnaast besloten tot meer acties om omwonenden verder te beschermen tegen de nadelige effecten van spoortrillingen, de zogeheten beleidsintensivering [lit. 5].

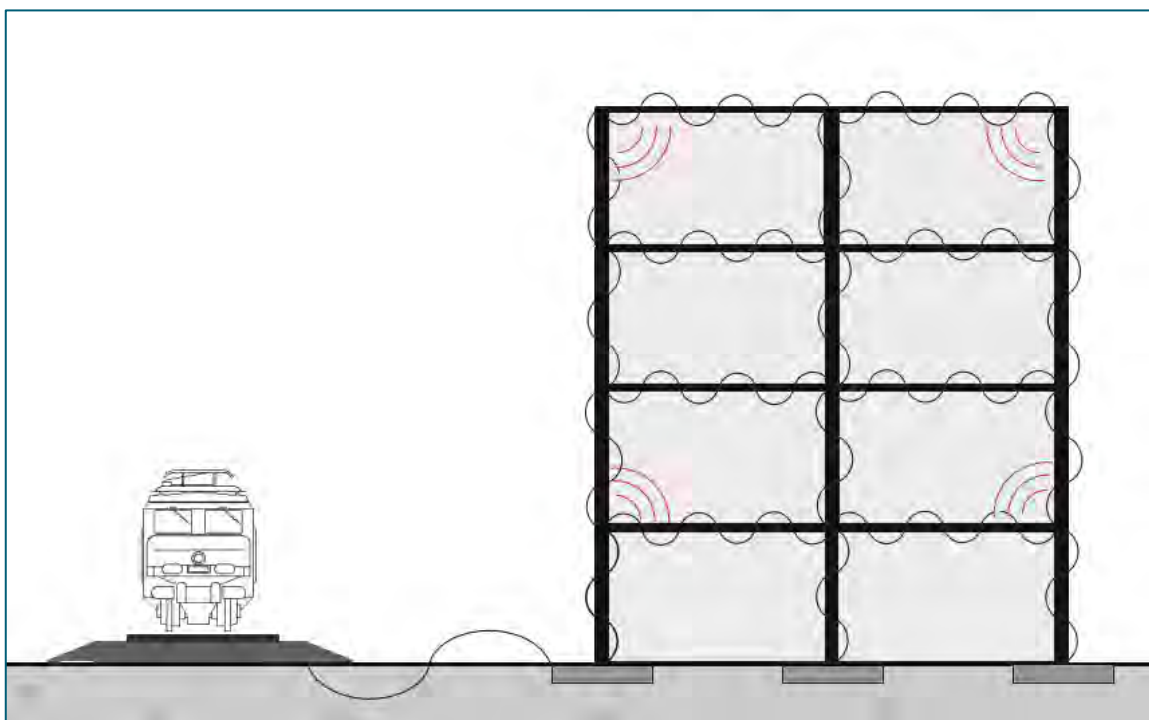
### 2.2 Trillingsopwekking en -overdracht door goederentreinen

Passerende goederentreinen genereren trillingen in de spoorstaven waarover ze rijden, die via de spoorbaanconstructie en de ondergrond worden overgedragen naar de omgeving. Afbeelding 2.1 laat deze overdracht zien. Afhankelijk van de frequentie zijn deze trillingen in woningen daadwerkelijk als trillingen voelbaar of hoorbaar als laagfrequent geluid, via afstraling door de constructie van woningen.

Deze trillingsopwekking en -overdracht vormt een complex systeem, waarin uiteenlopende eigenschappen van de passerende trein, de spoorbaanconstructie, de ondergrond, en de woning een rol spelen. Een treinpassage kan leiden tot sterke trillingen in de spoorstaaf in een bepaald frequentiegebied, die door de bodem echter worden uitgedempt en daarom in een nabije woning nauwelijks voelbaar zijn. Een andere treinpassage op dezelfde locatie, die trillingen opwekt in een ander frequentiegebied, kan echter leiden tot zwaardere trillingen in de woning, omdat deze trillingen door de bodem minder sterk worden uitgedempt.

Op voorhand is daarom niet in detail te zeggen welke trillingen op een bepaalde locatie tot overlast kunnen leiden.

Afbeelding 2.1 Trillingsoverdracht van trein naar bebouwing, resulterend in (voelbare) trillingen of geluid (bron: [lit. 1])



De volgende mechanismen spelen een rol bij de opwekking van trillingen in de bodem door goederentreinen [lit. 1]:

- de drukpuls gegenereerd door de wielen die bij passage de grond lokaal samendrukken (de quasi-statische belasting);
- rail- en wielruwheid, wielpolygonisatie ('vierkante wielen'), stijfheidsverschillen in de rails die afwisselend wel en niet door de dwarsligger wordt ingeklemd, en lokale overgangen (bij voegen of wissels) zorgen voor aanvullende excitatie van de bodem (de dynamische belasting).

Tabel 2.1 toont een overzicht van de belangrijkste mechanismen, de relevante parameters en het frequentiegebied waarin ze optreden, voor de goederentreinen die in dit onderzoek aan bod komen (rijdend met een snelheid tussen 40 en 95 km/u).

Tabel 2.1 Trillingsmechanismen bij (goederen)treinpassages en bijbehorende frequentiegebieden

| Trillingsmechanisme                         | Relevante parameters die de karakteristieken van de opgewekte trillingen bepalen                                                 | Frequentiegebied              |
|---------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| samendrukking van de bodem door wielen      | - afstand tussen assen (1,8 - 14,6 m)                                                                                            | 0-15 Hz                       |
| stijfheidsverschil in oplegging spoorstaven | - afstand tussen dwarsliggers (0,6 m)                                                                                            | 15-45 Hz                      |
| wieleffecten (wielruwheid)                  | - lokale defecten: wieldiameter (0,9 m)<br>- polygonisatie: wieldiameter (0,9 m)<br>- hogere orde-willekeurig verdeelde defecten | 4-10 Hz<br>8-20 Hz<br>> 20 Hz |
| railruwheid                                 | - lokale defecten: afstand tussen assen                                                                                          | 0 - 15 Hz                     |

## 2.3 Beoordeling van trillingen

Spoortrillingen vallen in Nederland gedeeltelijk onder het wettelijk kader van de Beleidsregel trillinghinder spoor (Bts). De Bts geldt voor spoorprojecten waarvoor een Tracébesluit noodzakelijk is. Dit zijn met name grotere spooraanpassingen. Voor al bestaande situaties met spoortrillingen geldt de Bts niet.

De beoordeling van spoortrillingen vindt in de Bts plaats met de grootheden  $V_{\max}$  en  $V_{\text{per}}$ .  $V_{\max}$  is een maat voor het maximaal optredende trillingsniveau per passage.  $V_{\text{per}}$  is een maat voor het gemiddeld optredende trillingsniveau. De manier waarop deze grootheden worden berekend ligt vast in [lit. 6].

In dit rapport wordt vooral de beoordelingsgrootte  $V_{\max}$  gebruikt, omdat deze per treinpassage wordt bepaald. Het effect van een maatregel als gedifferentieerd rijden op specifieke treinpassages kan met deze grootte dus goed worden bepaald. Daarnaast komt de grootte  $V_{\text{rms}}$  (ook bepaald per passage) aan bod, de 'root mean square'.<sup>1</sup> Uit onderzoek is bekend dat  $V_{\max}$  een goede maat is voor de beoordeling van overlast door spoortrillingen [lit. 7]. Het RIVM onderzoekt op dit moment de relatie tussen het optredende trillingsniveau en de ervaren hinder in detail [lit. 5].

## 2.4 Eerder onderzoek naar relatie tussen treinsnelheid en spoortrillingen

In verschillende projecten is onderzocht welke relatie is vast te stellen tussen treinsnelheid en spoortrillingen. Dat vond plaats met verschillende bedoelingen:

- het vaststellen van een relatie om de toekomstige overlast door spoortrillingen te bepalen (in [lit. 8];
- om de waarde van een snelheidsverlaging als trillingsbeperkende maatregel af te wegen (in [lit. 9]);
- en om de relatie tussen rijnsnelheid en trillingsopwekking te bepalen (in [lit. 10] en [lit. 11]).

De belangrijkste conclusies uit deze onderzoeken zijn:

- voor de meeste locaties geldt een positief verband tussen treinsnelheid en trillingssterkte;
- het verband tussen snelheid en trillingssterkte varieert per locatie en is afhankelijk van de lokale bodemopbouw, aslast en wieltoestand;
- de spreiding in meetdata is relatief groot, zodat de voorspellende waarde van de afgeleide modellen gering is.

---

<sup>1</sup> Voor een meetsignaal bestaande uit  $n$  afzonderlijke samples wordt  $V_{\text{rms}}$  berekend als  $V_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2}{n}}$ .



# 3

## METINGEN

### 3.1 Meetlocaties

Voor dit onderzoek zijn, in afstemming met ProRail, op een zevental locaties trillingsmeters geplaatst. De locaties liggen verdeeld langs het spoor tussen Meteren en Boxtel. Tabel 3.1 toont de locaties, het lokale bodemprofiel en eventuele bijzonderheden per locatie. Bijlage I bevat de detailgegevens.

Tabel 3.1 Meetlocaties

| # | Locatie                                | Typering bodemprofiel                   | Bijzonderheden                                                                                                                                                     |
|---|----------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Pompstraat 10, Waardenburg             | toplagen van klei, afgewisseld met zand | het spoor ligt lokaal verhoogd ten opzichte van de meetlocatie. Ca. 75 meter ten noorden van de meetlocatie voert het spoor over een kunstwerk over de lokale N830 |
| 2 | voormalige stationslocatie, Zaltbommel | toplaag van klei, gevolgd door zand     | op deze locatie is een derde spoor aanwezig, dat ook door goederentreinen wordt gebruikt                                                                           |
| 3 | Stationsweg 11, Hedel                  | toplaag van klei, daarna veen en zand   |                                                                                                                                                                    |
| 4 | onderstation Orthen, Den Bosch         | zandige toplagen                        |                                                                                                                                                                    |
| 5 | Willem van Oranjelaan 33, Den Bosch    | zandige bovenlaag                       |                                                                                                                                                                    |
| 6 | nabij Johan Frisolaan 57, Vught        | zandige bovenlaag                       |                                                                                                                                                                    |
| 7 | nabij Spoorstraat 9, Boxtel            | zandige bovenlaag                       | de meetlocatie ligt op het punt waar de sporen uit Tilburg en Den Bosch samenkomen. Hier zijn daarom meer goederentreinen gemeten dan op de andere locaties        |

Onderstaande Afbeelding 3.1 toont deze locaties op een kaart van het traject.

Afbeelding 3.1 Overzicht meetlocaties



### 3.2 Meetopstelling

Voor dit onderzoek zijn trillingsmeetsystemen van het type Syscom MR3000C ingezet. De systemen zijn, gecombineerd met een camerasysteem om passerende treinen te registreren, geplaatst op 25 meter van de hartlijn van het buitenste spoor. De afstand van 25 meter sluit aan bij het meetprotocol dat door het RIVM is ontwikkeld in de dataverzameling voor een uniform rekenmodel voor spoortrillingen. Op vijf van de zeven

locaties stond één systeem, op twee van de zeven locaties (in Zaltbommel en in Hedel) zijn drie systemen op een onderlinge afstand van 25 meter geplaatst.

De meetsystemen zijn ingegraven op één à twee decimeter onder het lokaal maaiveld, uitgebalanceerd en afgedekt om ze te beschermen tegen hemelwater. Bijlage I toont de details.

### 3.3 Meetperiode

De metingen zijn uitgevoerd tussen 18 december 2019 en 11 februari 2020. Tijdens de meetperiode zijn op enkele locaties de meters gedurende enkele dagen uitgevallen, door verschillende oorzaken (zie paragraaf 4.1.2 voor een toelichting). Dit heeft beperkte gevolgen voor de analyse: omdat voor deze locaties minder passagegegevens beschikbaar zijn, is de onzekerheid in de uiteindelijk bepaalde reductie door gedifferentieerd rijden groter.

### 3.4 Regulier passerende goederentreinen

Tijdens de meetperiode hebben zowel goederen- als reizigerstreinen over het spoor waarlangs de meetsystemen zijn opgesteld gereden. De meetsignalen van alle passerende treinen zijn opgeslagen. Omdat dit onderzoek zich richt op de trillingseffecten van goederentreinen, zijn alleen de meetsignalen van goederentreinen verder geanalyseerd (zie hoofdstuk 4). De signalen van reizigerstreinen zijn buiten beschouwing gelaten, omdat het project 'gedifferentieerd rijden' zich specifiek richt op het langzaam rijden van goederentreinen. Langs het traject Meteren-Boxtel heeft onderzoek [lit. 2] laten zien dat goederentreinen de hoogste trillingsniveaus produceren.

Er is zowel 's nachts als overdag gemeten. Voor de analyse van de relatie tussen trillingsniveau en treinsnelheid is het verschil tussen dag en nacht niet relevant. Dat geldt wel voor de uiteindelijke toetsing aan de normen van de Beleidsregel trillingshinder spoor. Dit komt aan bod in hoofdstuk 6 en Bijlage VI.

De snelheid van goederentreinen is afhankelijk van de maximumsnelheid op het traject en de specifieke omstandigheden op het spoor op dat moment (zoals de snelheid van voorgaande treinen of tijdelijke beperkingen vanwege onderhoud). Een aantal reguliere goederentreinen heeft op verzoek van het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat met een snelheid van 60 km/u gereden. Dat is lager dan de gebruikelijke snelheid op het traject en bedoeld om meer spreiding in de gemeten snelheden te introduceren. Meer spreiding in de meetdata verkleint de onzekerheid in de uiteindelijk bepaalde reductie door gedifferentieerd rijden.

### 3.5 Meettrein

Om de relatie tussen treinsnelheid en trillingsniveau gecontroleerd te kunnen onderzoeken heeft een speciaal ingerichte meettrein met verschillende snelheden over het traject gereden. De meettrein bestond uit twee locomotieven (voor en achter) en vier segmenten wagons, afwisselend beladen en onbeladen. Deze segmenten zijn uitgekozen om verschillende soorten goederenvervoer (zoals containertreinen, bulktreinen, of keteltreinen), elk met verschillende aslasten, na te bootsen. Elk segment had een lengte van ca. 100 meter.

De meettrein heeft in de nachten van 12 tot en met 14 januari gereden. Daarbij zijn twaalf passages met de reguliere snelheid van 95 km/u gerealiseerd, zes passages met een snelheid van 40 km/u, en zes passages met een snelheid van 60 km/u. Het project 'gedifferentieerd rijden' richt zich op onderzoek naar deze twee lagere snelheden.

Bijlage II behandelt de proef met de meettrein in detail.

# 4

## ANALYSE

Dit hoofdstuk gaat in op de analyse van de meetgegevens die zijn verzameld tijdens deze praktijkproef. Het beschrijft de noodzakelijke stappen van ruwe meetgegevens naar een dataset die geschikt is om de beoogde analyse mee uit te voeren. Ook wordt ingegaan op de analyseprocedure en het gebruikte analysemodel.

De opbouw van dit hoofdstuk is als volgt: Paragraaf 4.1 gaat in op de dataverwerking van ruwe metingen tot een dataset die bruikbaar is voor de analyse. Deze paragraaf vat de belangrijkste stappen samen. Bijlage III behandelt de verwerking van de meetgegevens in detail. Paragraaf 4.2 beschrijft vervolgens de procedure voor de modelselectie op basis van de dataset resulterend uit paragraaf 4.1. De paragraaf beperkt zich tot de hoofdlijnen in Bijlage IV wordt de modelselectie in detail behandeld. Paragraaf 4.3 beschrijft de analyseprocedure met het gekozen model. Deze procedure leidt tot de resultaten van de praktijkproef in hoofdstuk 5.

### 4.1 Verwerken meetgegevens

Naar aanleiding van de uitgevoerde trillingsmetingen bij goederentreinen is een dataset opgebouwd ten behoeve van de beoogde data-analyse. Deze dataset bevat passages van goederentreinen op elk van de zeven locaties langs het spoor tussen Meteren en Boxtel. Deze dataset is opgebouwd uit twee afzonderlijk aangeleverde datasets. Eén dataset bevat gegevens van de trillingsmetingen van passerende goederentreinen op elk van de meetlocaties, de andere dataset bevat de door ProRail aangeleverde dataset met eigenschappen van passerende treinen op passagepunten nabij de meetlocaties. Deze laatste dataset komt voort uit het Quo Vadis-systeem van ProRail (zie paragraaf 4.1.1 voor een toelichting op deze gegevens). Beide datasets worden voorbereid om vervolgens gecombineerd te worden tot een uniforme dataset die geschikt is voor de data-analyse. Deze bewerkingsstappen worden in detail behandeld in Bijlage III.

In de dataset worden de zeven meetlocaties aangeduid als 'S1' tot en met 'S7'. Deze aanduiding wordt ook in dit en de komende hoofdstukken gebruikt in tekst en figuren. Tabel 4.1 geeft een overzicht van de zeven meetlocaties en de aanduiding van de meetlocatie in de dataset.

Tabel 4.1 Aanduiding van locaties en beschikbare meetsystemen per meetlocatie

| # | Meetlocatie                            | Aanduiding in dataset | Aanduiding meetsystemen    |
|---|----------------------------------------|-----------------------|----------------------------|
| 1 | Pompstraat 10, Waardenburg             | S1                    | S1                         |
| 2 | voormalige stationslocatie, Zaltbommel | S2                    | S2 - 1<br>S2 - 2<br>S2 - 3 |
| 3 | Stationsweg 11, Hedel                  | S3                    | S3 - 1<br>S3 - 2<br>S3 - 3 |
| 4 | onderstation Orthen, Den Bosch         | S4                    | S4                         |

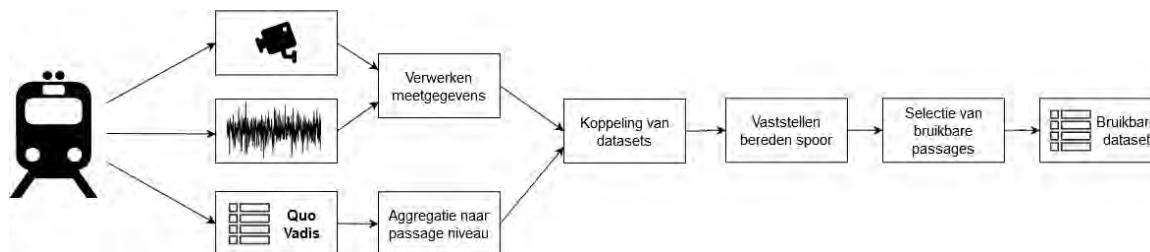
| # | Meetlocatie                         | Aanduiding in dataset | Aanduiding meetsystemen |
|---|-------------------------------------|-----------------------|-------------------------|
| 5 | Willem van Oranjelaan 33, Den Bosch | S5                    | S5                      |
| 6 | nabij Johan Frisolaan 57, Vught     | S6                    | S6                      |
| 7 | nabij Spoorstraat 9, Boxtel         | S7                    | S7                      |

Op de meetlocaties zijn één of meerdere meetsystemen geplaatst. Daar waar één meetsysteem is geplaatst, wordt deze in de dataset aangeduid met hetzelfde kenmerk als de locatie. Voor de meetlocaties in Zaltbommel en Hedel zijn meerdere meetsystemen geplaatst. Voor deze locaties worden de systemen aangeduid met een volgnummer.

#### 4.1.1 Bewerkingsstappen op ruwe data

Afbeelding 4.1 hieronder vat de stappen samen die worden doorlopen om van de ruwe datasets te komen tot een dataset die geschikt is voor analyse.

Afbeelding 4.1 Schematische weergave van dataflow van trillingsmetingen naar een voor analyse geschikte bruikbare dataset



De belangrijkste verwerkingsstappen worden hieronder kort toegelicht, voor een detailbeschrijving van de dataverwerking wordt verwezen naar bijlage III:

- 1 *meetgegevens*. Voor elke gemeten goederentreinpassage is een trillingsignaal beschikbaar in drie richtingen. Deze worden aangeduid als x-richting (in het grondvlak parallel aan de spoorlijn), y-richting (in het grondvlak parallel aan de spoorlijn en loodrecht op het spoor) en z-richting (loodrecht op het grondvlak). Voor elk van de signalen zijn waarden voor het trillingsniveau bepaald. Deze trillingsniveaus zijn uitgedrukt in de waarden  $V_{\text{eff,max}}$  en  $V_{\text{RMS}}$ . Als het trillingsignaal in richting  $i$  als functie van tijd  $t$  wordt uitgedrukt als  $v_i(t)$ , dan zijn de waarden voor  $V_{\text{eff,max}}$  en  $V_{\text{RMS}}$  in richting  $i$  gedefinieerd volgens:

$$V_{\text{eff,max}_i} = \max_t \left( \sqrt{\frac{1}{\tau} \int_0^t g(\xi) v_i^2(t - \xi) d\xi} \right), \text{ waar } g(\xi) = e^{-\xi/\tau} \text{ en } \tau = 0.125\text{s, en}$$

$$RMS_i = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [v_i(t)]^2 dt}, \text{ waar } T \text{ de lengte van het trillingsignaal is in seconden.}$$

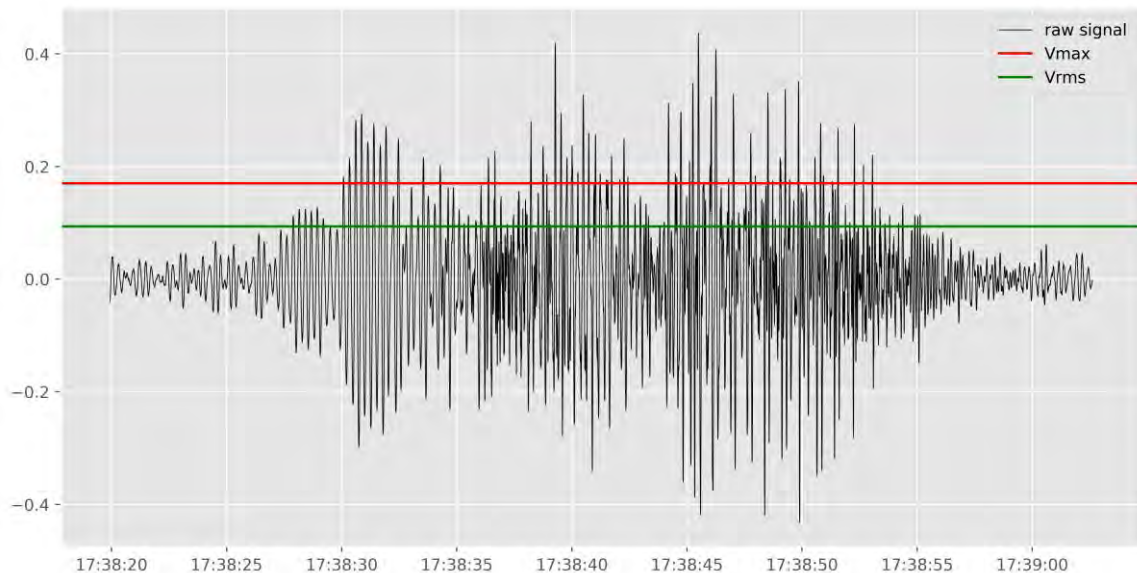
Afbeelding 4.2 laat een voorbeeld zien van een ruw meetsignaal en de daaruit bepaalde waarden voor  $V_{\text{eff,max}}$  en  $V_{\text{rms}}$ . Voor passerende treinen is ook de passagesnelheid en rijrichting bepaald. Deze snelheid wordt waar mogelijk bepaald aan de hand van beeldopnames, zo niet dan wordt de snelheid benaderd aan de hand van doorkomsttijden van dezelfde trein op de omliggende meetlocaties. Niet voor elke passage is het mogelijk gebleken de snelheid vast te stellen. Al deze gegevens zijn verwerkt in de dataset van treinpassages met het berekende trillingsniveau en de gereden snelheid. Kenmerkend is dat  $V_{\text{eff,max}}$  gevoeliger is voor de pieken in het trillingsignaal, in tegenstelling tot  $V_{\text{RMS}}$  die een gemiddeld trillingsniveau geeft. Overigens worden de trillingsignalen en bijbehorende waarden  $V_{\text{eff,max}}$  en  $V_{\text{RMS}}$  in de z-richting in deze analyse als maatgevend beschouwd voor het trillingsniveau in de omgeving. Op meetlocaties S1 tot en met S5 en S7 zijn de op het maaiveld gemeten  $V_{\text{eff,max}}$ -waarden in de z-richting



dominant. Op meetlocatie S6 is de x-richting dominant. Dit zou veroorzaakt kunnen worden door de overloopwissel die in de buurt van de meetlocatie ligt. In de toekomst verdwijnt deze wissel. In bijlage VI wordt op beide richtingen ingegaan.

In bijlage II is te lezen hoe de meetsignalen van de meettrein zijn opgesplitst voor de verschillende meettreinsegmenten;

Afbeelding 4.2 Voorbeeld van een meetsignaal en de daaruit bepaalde  $V_{\text{eff,max}}$  en  $V_{\text{rms}}$



- 2 *Quo Vadis*. Naast de dataset met trillingsmetingen, vergaard tijdens de meetperiode, is door ProRail een dataset ter beschikking gesteld van treinpassages met bijbehorende eigenschappen van de passerende trein. Deze dataset is afkomstig uit het Quo Vadis-systeem van ProRail. Deze dataset bevat onder andere gegevens over de materieelsamenstelling van de passerende trein, en verschillende numerieke gegevens over aslasten, wiellasten en wielkwaliteit. Deze gegevens zijn vanzelfsprekend beschikbaar op verschillende niveaus, van grof naar fijn: gegevens op trein-niveau tot gegevens op wiel-niveau. In de analyse wordt de treinpassage als geheel geanalyseerd, op basis van de  $V_{\text{eff,max}}$ -waarde berekend voor de passage. Om die reden dienen ook de gegevens uit de Quo Vadis-dataset te worden geaggregeerd naar waarden per passage. De aggregatie van meetwaarden geschiedt door het bepalen van meerdere kengetallen: het gemiddelde, de p80-, p90-, maximum-, minimum-, p10-, en p20-waarde (in de analyse wordt bepaald welke van deze kengetallen de beste correlatie met  $V_{\text{eff,max}}$  vertoont). Het is belangrijk op te merken dat het aggregeren van numerieke meetwaarden in dit stadium slechts een voorbereidingsstap vormt. De keuze voor de wijze van aggregeren zal worden uitgevoerd in een later stadium van de analyse (dit wordt beschreven in paragraaf 4.2.1). P#-waarde staat hier overigens voor de percentielwaarde, dit is de waarde waar #% van de gemeten waarden onder liggen;
- 3 *koppelen van datasets*. De voorbereidingsstappen geven twee datasets van treinpassages. Deze dienen aan elkaar gekoppeld te worden. Deze koppeling vindt onder andere plaats aan de hand van:
  - locatie: de passage moet vanzelfsprekend in beide datasets op dezelfde locatie geregistreerd zijn;
  - datum en tijd van de passage, en;
  - rijrichting.
 Deze koppeling resulteert in een dataset van treinpassages waarvoor trillingsniveaus, gereden snelheid en treineigenschappen (geaggregeerde waarde) beschikbaar zijn. Hierbij blijkt dat er enkele passages zijn waarvoor wel trillingsgegevens beschikbaar zijn, maar waarvoor de passage niet terug gevonden kan worden in de Quo Vadis-dataset;
- 4 *vaststellen bereden spoor op meetlocatie*. Voor de overdracht van trillingen van trein naar de meetinstallatie naast het spoor is het bereden spoor van belang. Het bereden spoor is dermate

belangrijk dat voor elk van de sporen een afzonderlijke analyse zal worden uitgevoerd. Vanuit de Quo Vadis-data is het bereden spoor op zogenaamde 'dienstregelpunten' bekend. Als extra bewerkingsstap is het noodzakelijk om, ondanks dat deze dienstregelpunten in de buurt liggen van de meetlocaties, na te gaan hoe deze sporen relateren aan het bereden spoor ter hoogte van de meetlocaties. Bij enkele passages blijkt het bereden spoor ter hoogte van de meetlocatie niet vast te stellen;

- 5 *selectie van bruikbare passages*. Tot slot volgt een laatste filter stap op de resulterende passages. Een 'bruikbare passage' typeert zich door:
- een vastgestelde passagesnelheid;
  - een koppeling met één enkele passage vanuit de Quo Vadis-dataset;
  - een vastgesteld bereden spoor ter hoogte van de meetlocatie, dit spoor dient voldoende bereden te zijn;
  - de passage betreft één enkele goederentrein, en is niet vertroebeld door gelijktijdige passage op een naastliggend spoor.

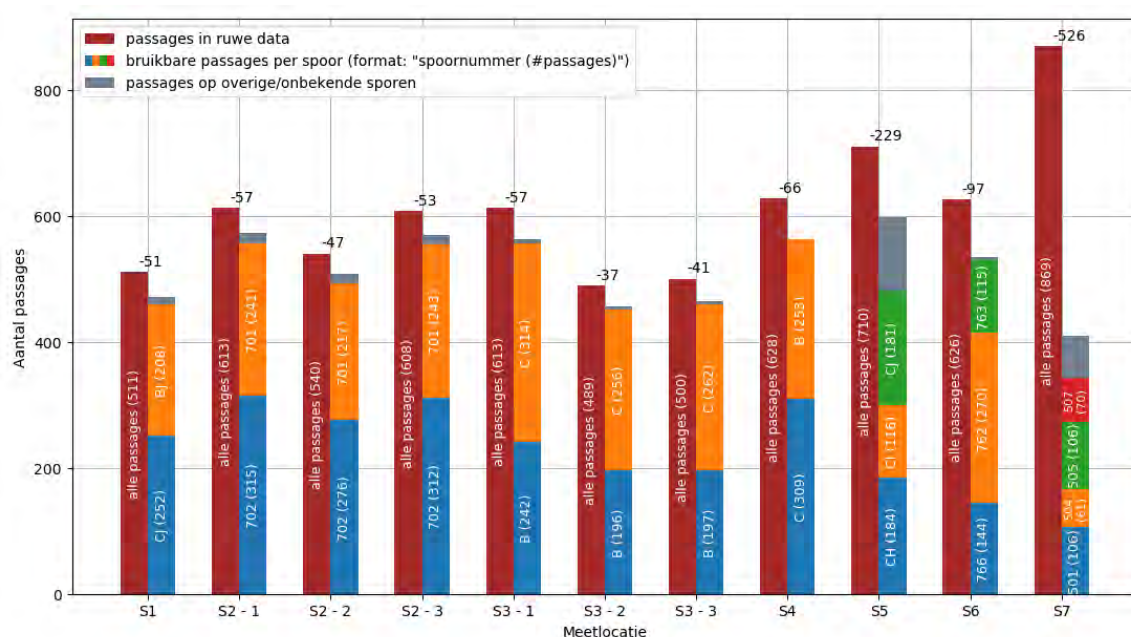
Als een passage niet voldoet aan één van bovenstaande criteria, dan valt deze passage alsnog af. Het derde criterium relateert aan de model-analyse. Aangezien de data-analyse op deze dataset zal plaatsvinden per locatie voor de beschikbare sporen afzonderlijk, dienen er voor de sporen wel 'voldoende' passages te zijn. Als vuistregel wordt hiervoor gehanteerd 'meer dan 30 passages'.

#### 4.1.2 Resulterende dataset

Samenvattend geeft de resulterende dataset per passage de gemeten trillingsniveaus uitgedrukt in  $V_{\text{eff,max}}$  en  $V_{\text{RMS}}$ . Daarnaast is de snelheid van de trein bekend op de meetlocatie. Ook zijn per passage diverse andere treineigenschappen beschikbaar, waaronder kengetallen voor aslast, wiellast en wielkwaliteit, maar ook het type materieel en het bereden spoor op de meetlocatie. Voor de passages is per meetlocatie het bereden spoor vastgesteld, en een extra filter stap leidt tot een dataset met *bruikbare* passages. Bruikbare passages worden gekenmerkt door: een vastgestelde passagesnelheid; een koppeling met Quo Vadis-data; een vastgesteld bereden spoor op de meetlocatie; het trillingsignaal betreft de passage van één enkele goederentrein. De dataset bevat de passages van de meettrein (als geheel, en opgesplitst naar de zes onderdelen) en van 'reguliere' goederentreinen. Dit onderscheid tussen 'meettrein' en 'niet-meettrein' is in de dataset duidelijk gekenmerkt.

Naar aanleiding van bovenstaande bewerkingsstappen ontstaat een overzicht van het aantal bruikbare passages in vergelijking met het aantal passages die origineel aangeleverd zijn in de dataset met trillingsmetingen. Zie hiervoor Afbeelding 4.3, hierin worden de locatieaanduidingen uit Tabel 4.1 gebruikt. Deze afbeelding geeft een overzicht van het aantal passages voor elk van de meetlocaties en meetsystemen. Telkens geeft de linker balk het aantal passages voor het betreffende meetsysteem die aangeleverd zijn in de dataset (ruwe data), en de rechter balk het aantal bruikbare passages met een uitsplitsing naar de beschikbare sporen (met een onderverdeling naar 'bruikbare passages per spoor', en 'passages op overige/onbekende sporen'). Per locatie is boven de balken het verschil tussen 'alle passages' en 'bruikbare passages' weergegeven. Dit geeft een kwantificatie van het dataverlies dat optreedt tijdens de bewerkingsstappen.

Afbeelding 4.3 Aantal passages per meetlocatie per meetsysteem met uitsplitsing naar spoor (de naamgeving van meetpunten wordt toegelicht in Tabel 4.1)



Het verlies van data in Afbeelding 4.3 kan ruwweg worden opgesplitst in twee oorzaken: het bereiden spoor is onbekend, of er treedt verlies op bij het verwerken van de data (bijvoorbeeld doordat er geen koppeling is met een Quo Vadis-passage, of er geen snelheid is vastgesteld). Het aandeel verlies met de eerste oorzaak is in de afbeelding terug te zien in de rechter balken met aanduiding 'passages op overige/onbekende sporen'. Het hoogteverschil tussen de linker en rechter balken duidt op verlies van passages met de tweede oorzaak.

Naar aanleiding van Afbeelding 4.3 zijn er een aantal bijzonderheden te vermelden:

- bij meetlocatie S7 treedt betrekkelijk veel verlies van data op. Het bleek hier voor veel passages onduidelijk om het signaal aan een goederentrein te koppelen, en daarvan de bijbehorende snelheid vast te stellen. Het grootste verlies voor deze locatie treedt daarom op vanwege het ontbreken van een vastgestelde rijnsnelheid;
- bij meetsysteem S2-2 is aan het begin van de meetcampagne een hapering geweest in de registratie. Hierdoor ontbreken enkele dagen aan meetdata in vergelijking met de andere meetsystemen op meetlocatie S2;
- bij meetlocatie S3 is aan het eind van de meetcampagne de stroomvoorziening voor de meetinstallaties onderbroken als gevolg van werkzaamheden. Daarbij is meetsysteem S3-1 toch langer voorzien gebleven van stroom, waardoor slechts twee volledige dagen ontbreken;
- op meetlocatie S1 zijn voor enkele dagen in januari geen metingen beschikbaar. De oorzaak hiervan is niet bekend;
- op meetlocatie S6 ontbreekt meetdata van een drietal dagen in februari. Vermoedelijk wordt dit veroorzaakt door een tijdelijke onderbreking van de stroomvoorziening.

De weergegeven passageaantallen in Afbeelding 4.3 zijn inclusief de meettrein passages. Bij elk meetsysteem is de meettrein 24 keer gepasseerd (op locatie S4 is één passage niet in de brondata geregistreerd, op locatie S7 is voor twee passages niet bekend op welk spoor de meettrein passeerde en deze passages zijn daarom uit de dataset gelaten). Deze passages zijn verdeeld over de beschikbare sporen ter hoogte van de meetopstelling. Tabel 4.2 hieronder geeft een overzicht van het aantal meettreinpassages per spoor per meetlocatie. Bij meetlocaties S6 en S7 heeft de meettrein niet elk spoor bereiden.



Tabel 4.2 Aantal meettrein passages per spoor per meetlocatie

| Meetlocatie | Spoor | Aantal passages |
|-------------|-------|-----------------|
| S1          | BJ    | 12              |
|             | CJ    | 12              |
| S2          | 701   | 6               |
|             | 702   | 18              |
| S3          | B     | 6               |
|             | C     | 18              |
| S4          | B     | 12              |
|             | C     | 11              |
| S5          | CH    | 12              |
|             | CI    | 8               |
|             | CJ    | 4               |
| S6          | 762   | 7               |
|             | 763   | 17              |
| S7          | 501   | 16              |
|             | 504   | 6               |

## 4.2 Parameter en modelselectie

Het doel van de data-analyse is het verwerven van inzicht in de relatie tussen de rijnsnelheid van goederentreinen en trillingen op maaiveld en in woningen. Op basis van het onderzoek gedifferentieerd rijden (2016) is bekend dat de deze relatie afhankelijk is van een aantal eigenschappen van de passerende goederentreinen (met name de aslasten en onrondheid van wielen) en van de locatie (zoals de aard van de ondergrond, de spoorkwaliteit, en de bouwwijze van de woning). In dit onderzoek zal voor de locaties uit de praktijkproef worden onderzocht wat de relatie is en welke treinparameters daarin bepalend zijn. In eerdere onderzoeken naar trillingen is multivariate regressieanalyse ingezet om de relatie tussen snelheid en trillingen te bepalen. Dat type analysemodel heeft bruikbare inzichten opgeleverd, maar is wel beperkt doordat vooraf de aard van de relatie (3e-graads polynoom) a priori wordt vastgelegd. In dit project wordt naast dit multivariate model een alternatief analysemodel toegepast uit de hoek van de datamining en machine learning, namelijk een random forest model.

In eerdere projecten hebben we ervaren dat het zinvol is zowel machine learning modellen als multivariate regressieanalyse uit te voeren. Een random forest-model is voor dit type analyse en data geschikt omdat er veel parameters van invloed zijn op de trillingsemissie van een passerende trein. De invloeden van de verschillende parameters verschillen per locatie. In tegenstelling tot bijvoorbeeld een regressiemodel ligt bij een random forest-model de modelstructuur niet vooraf vast. Een random forest-model zoekt juist naar deze structuren in de data: met deze techniek wordt de data automatisch gegroepeerd en gecategoriseerd op basis van gedeelde kenmerken. Een regressieboom heeft bovendien als voordeel dat een opdeling in subgroepen eigenlijk overbodig wordt, omdat de methode zelf deze opdeling al bepaalt aan hand van de data. Daarbij komt dat juist een random forest uitermate goed geschikt is voor dit type analyse en vaak beter presteert (d.w.z. de afwijking in de voorspelling is kleiner, zie ook paragraaf 4.3) dan multivariate regressieanalyse.

Deze paragraaf beschrijft de belangrijkste bevindingen uit bijlage IV. In dit vooronderzoek is uitgebreid gekeken naar de relatie tussen verschillende treinparameters en aggregatiemethoden op de voortgebrachte trillingsniveaus. Daarnaast zijn twee typen modellen met elkaar vergeleken: multivariate regressie en random forest. Deze modellen worden afgeleid voor de bereden sporen afzonderlijk, vanwege het afstandsverschil

en daarmee de mogelijke bodemoverdracht van spoor naar meetinstallatie. Daarnaast worden modellen afgeleid voor de meettreinpassages en de reguliere passages. De prestaties van deze modellen worden uitvoerig met elkaar vergeleken op basis van data van één van de meetlocaties. Uiteindelijk wordt hierop een modelkeuze gebaseerd, met de bijbehorende input parameters.

De keuze voor het model dat wordt ingezet voor de analyse van alle locaties is gemaakt op basis van de prestaties van de modellen voor de dataset van meetlocatie S1 in Waardenburg. De dataset van Waardenburg is gebruikt omdat er tijdens de meetperiode en het verwerken van de dataset weinig bijzonderheden zijn geconstateerd. Bij meetlocatie Waardenburg zijn twee sporen aanwezig. Bij de modelselectie en de daaropvolgende data-analyse is gekeken naar de trillingsignalen en bijbehorende waarden  $V_{\text{eff,max}}$  en  $V_{\text{RMS}}$  in de z-richting. Deze richting wordt als maatgevend beschouwd voor trillingsoverlast.

De keuze voor parameters en analysemodel wordt in de volgende twee paragrafen nader beschreven.

#### 4.2.1 Selectie van parameters en aggregatiemethoden

De beschikbare dataset met passages van locatie Waardenburg bevat een veelvoud aan geaggregeerde parameters vanuit de Quo Vadis-dataset. Zoals eerder beschreven zijn de originele waarden geaggregeerd naar de volgende kengetallen voor een treinpassage: gemiddelde, minimum, maximum, p80-, p90-, p10- en p20-waarde, en de standaarddeviatie. Voor elk van de modellen wordt een selectie gemaakt van de input parameters, en de aggregatiemethode.

Op basis van voorselectie en een correlatieanalyse wordt per Quo Vadis-parameter de aggregatiemethode geselecteerd. Hierbij wordt de aggregatiemethode gekozen waarvoor de correlatie met trillingsniveaus  $V_{\text{eff,max}}\text{-Z}$  en  $V_{\text{RMS}}\text{-Z}$  in het algemeen het sterkst is. Deze correlaties worden voor beide sporen afzonderlijk bekeken. Vervolgens worden de onderlinge correlaties van de geselecteerde geaggregeerde parameters onderzocht. Hieruit blijkt dat de parameter voor aslast volledig gecorreleerd is met die voor wiellast. De reden hiervoor is dat de aslast wordt berekend als directe som van de lasten op de betreffende wielen. Aslast wordt dan ook niet verder in beschouwing genomen als model parameter, het voegt immers geen extra informatie toe. Het is opvallend dat voor veel parameters de p80- en p90-waarden de sterkste correlatie hebben met het de trillingsniveaus. Dat is te verklaren vanuit fysisch oogpunt. Juist de zwaardere assen zorgen voor de zwaardere trillingen en bepalen daarmee de  $V_{\text{eff,max}}$ -waarde, die gevoelig is voor de pieken in het trillingssignaal. Het gemiddelde geeft een onderschatting. De p80- en p90-waarde zijn een geschikte maat omdat deze kengetallen precies de zware assen van een trein representeren. Het maximum kan een uitschieter of meetfout zijn en is daardoor minder geschikt.

Op basis van de uitgevoerde analyse worden modelparameters geselecteerd. Voor de multivariate regressiemodellen worden de parameters beperkt tot snelheid, wiellast (p80-waarde) en rms-hoog (p90-waarde). Hiervan wordt verwacht dat ze de belangrijkste factoren zijn op de trillingsniveaus, dit wordt onderbouwd door correlaties. De keuze voor deze parameters ligt in lijn met voorgaande onderzoeken, al wijkt de aggregatiemethode af. Het toevoegen van meer parameters blijkt in het lineaire multivariate model niet van meerwaarde. Het model wordt niet beter met meer parameters. Voor het data-gedreven random forest worden wel meer Quo Vadis-parameters als input meegegeven. Het model is immers zelf in staat om de invloed van al deze parameters te bepalen, en zoveel mogelijk informatie en onderliggende structuren uit de data te benutten. Naast snelheid wordt wiellast (p80-waarde), pieklast (p80-waarde), RMS-laag (p90-waarde), RMS-hoog (p90-waarde) en de links-rechts-ratio (p80-waarde) als input parameter meegegeven.

Tabel 4.3 Input parameters voor random forest met aggregatiemethode

| Parameter naam             | Parameter voor                                                                          | Aggregatie methode | Eenheid |
|----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|---------|
| speed                      | snelheid van de passerende trein                                                        | n.v.t.             | km/h    |
| qwm_gemiddelde_last_kn_p80 | statische kracht op wielen van passerende trein (wiellast)                              | p80-waarde         | kN      |
| qwm_pieklast_kn_p80        | pieklast (dynamische + statische kracht) op wielen van passerende trein                 | p80-waarde         | kN      |
| qwm_rms_laag_kn_p90        | effectieve waarde voor frequenties tussen 50-200 Hz voor wielen van passerende trein.   | p90-waarde         | kN      |
| qwm_rms_hoog_kn_p90        | effectieve waarde voor frequenties tussen 200-1000 Hz voor wielen van passerende trein. | p90-waarde         | kN      |
| qam_linksrechtsratio_p80   | verhouding tussen gewicht van het linker en rechter wielen van passerende trein         | p80-waarde         | -       |

### 4.2.2 Modelselectie

Uit deze analyse, gerapporteerd in bijlage IV, blijkt dat het random forest model structureel beter presteert dan multivariate regressie: het random forest geeft structureel een betere voorspelling van trillingsniveaus  $V_{\text{eff,max}}$  en  $V_{\text{RMS}}$ . Ook geeft dit model meer detail en een dieper inzicht in de achterliggende structuren in de beschikbare data. Daarmee blijft de voorspelling dicht bij de dataset, en doet het meer recht aan de variatie en niet-lineariteit in de dataset. Ook maakt random forest het mogelijk om alle input variabelen uit de dataset te gebruiken.

Op basis van het onderzoek naar parameters en aggregatiemethoden wordt de selectie van input parameters voor het random forest gebruikt zoals weergegeven in Tabel 4.3. Deze random forest modellen worden vervolgens gebruikt om de relatie tussen rijnsnelheid en trillingsniveau te onderzoeken. De aanpak hiervoor wordt beschreven in de volgende paragraaf.

## 4.3 Analyseprocedure

Ruwweg is de aanpak voor de data-analyse op te delen in twee onderdelen: de modelafleiding en de modeltoepassing. De data-analyse wordt uitgevoerd voor de metingen van elk van de meetsystemen, op elk van de meetlocaties, voor elk van de sporen aldaar, zie Tabel 4.1. In de data-analyse worden de volgende stappen doorlopen:

- 1 de beschikbare dataset van goederentreinpassages wordt opgedeeld in passages van de meettrein en haar afzonderlijke onderdelen, en regulier passerende treinen (ook aangeduid als 'reguliere passages'). Bij die laatste groep wordt ook de meettrein als geheel meegenomen;
- 2 vervolgens worden beide datasets opgesplitst in trainings- en testdata, 75 % en 25 % van de passages respectievelijk. De trainingsdataset wordt gebruikt om het model op te bouwen, de testdataset om het model te testen. Deze opsplitsing is van belang om eventuele overfitting (het model is te veel toegespitst op de gegeven data) van het model aan te tonen, een overfit model presteert slecht op de testdata;
- 3 de trainingsdata worden gebruikt om random forest modellen af te leiden. Deze modellen worden afzonderlijk afgeleid voor de trillingsniveaus  $V_{\text{eff,max}}$  en  $V_{\text{RMS}}$ . Deze modellen doen een voorspelling van het trillingsniveau op basis van gegeven modelinputs uit Tabel 4.3;
- 4 de kwaliteit van de modellen wordt bekeken aan de hand van de testdata. Een gebruikelijke maat voor de voorspelkwaliteit is de *Root Mean Squared Error* (RMSE). Deze waarde geeft de gemiddelde kwadratische fout tussen gemeten waarde  $y$  en modelvoorspelling  $\hat{y}$ . De waarde van de RMSE is niet geschaald, en geeft daarom nuttige informatie over de modelkwaliteit mits de magnitude van  $y$  bekend is. Om de vergelijking tussen verschillende modellen (op basis van verschillende data) te maken wordt

gekeken naar de *Normalized Root Mean Squared Error* (NRMSE), een genormaliseerde versie van de RMSE geschaald naar de gemiddelde waarde  $\bar{y}$  van  $y$ . De NRMSE wordt bepaald als:

$$NRMSE = \frac{RMSE}{\bar{y}}$$

Een hogere waarde van de NRMSE duidt dus een grotere afwijking in de voorspelling aan, en daarmee een minder nauwkeurig model;

- 5 de modellen worden vervolgens gebruikt om trillingsniveaus bij verschillende snelheden met elkaar te vergelijken. Hiervoor wordt gekeken naar trillingsniveaus bij de referentiesnelheid van 90 km/h en de gereduceerde snelheden van 60 km/h en 40 km/h. Een nadere toelichting op deze procedure volgt hieronder;
- 6 tot slot wordt in beeld gebracht welke parameters naast snelheid van invloed zijn op de trillingsniveaus. Daarbij wordt ook gekeken naar mogelijke verbanden met treintypes, en de verschillen tussen de resultaten voor de meettrein en de reguliere treinen. Een nadere toelichting op deze procedure volgt hieronder.

### Evaluatie van effect snelheidsverlaging

Op basis van de random forest modellen wordt het effect van verlaging van de rijsnelheid bij goederentreinen geëvalueerd. In het kader van 'gedifferentieerd rijden' wordt hiervoor gekeken naar de modeluitkomsten van trillingsniveaus bij de referentiesnelheid van 90 km/h en de gereduceerde snelheden van 60 km/h en 40 km/h. Hiervoor wordt met behulp van de modellen voor elke trein uit de dataset opnieuw het trillingsniveau bepaald bij deze drie snelheden.

Uit deze voorspellingen wordt per trein het reductiepercentage van trillingsniveau bepaald bij 60 km/h en 40 km/h, ten opzichte van referentiesnelheid 90 km/h. Vervolgens wordt de gemiddelde reductie bepaald over alle passages. Dit resulteert in een gemiddeld reductiepercentage (met standaarddeviatie) in trillingsniveau bij verlaging van rijsnelheid van 90 km/h naar 60 km/h en van 90 km/h naar 40 km/h. Deze reductiepercentages zijn specifiek bepaald voor de afzonderlijke meetlocaties, en de sporen die daar bereden zijn.

Voor de duidelijkheid: bij deze effectbepaling van de maatregel wordt gebruik gemaakt van dezelfde treinen als die waarmee het model is afgeleid. Voor elke trein wordt het trillingsniveau bij verschillende snelheden (90, 60 en 40 km/h) berekend met het model. Op basis hiervan wordt de reductie berekend. Door gebruik te maken van de treinen uit de dataset wordt het effect van snelheidsverlaging getoetst op treinen die daadwerkelijk op die locatie hebben gereden en daarmee representatief zijn voor de passerende treinen op de betreffende meetlocatie.

### Invloed andere parameters en relatie tot treintype

Naast snelheid wordt ook gekeken naar de invloed van andere parameters op het trillingsniveau  $V_{\text{eff,max}}$ . Vanuit het random forest wordt een overzicht van de meest bepalende parameters voor trillingsniveau opgevraagd, de zogenaamde 'feature importances'. Dit zijn waarden tussen 0 en 1 die de onderlinge relatieve bepalendheid van de input parameters op de output weergeven. Voor de belangrijkste parameters wordt gekeken naar een relatie met het trillingsniveau. Ook wordt gezocht naar verbanden tussen trillingen en het type trein dat ze veroorzaakt.

De passerende treinen worden op basis van materieelsamenstelling ingedeeld in de categorieën 'container', 'bulk', 'ketel', 'rollen staal', 'divers' en 'overig'. Ook wordt 'meettrein' als afzonderlijk treintype gezien. De categorie 'divers' omvat treinen die zijn samengesteld uit diverse categorieën materieel en belading; de categorie 'overig' bevat treinen die hoofdzakelijk zijn samengesteld uit materieel in de categorie 'overig'. Een trein wordt toegekend aan een bepaald treintype als deze voor minstens 70 % uit wagons met eenzelfde type belading bestaat. Is dat niet het geval, dan wordt de trein toegekend aan de categorie 'divers', die dus anders is dan 'overige'.

Deze categorieën worden niet als parameter meegegeven aan de modellen. Het treintype is slechts een label, dat correspondeert met de fysische parameters uit de Quo Vadis-dataset (een 'bulk'-trein zal bijvoorbeeld hogere aslasten hebben dan een 'container'-trein). Die fysische parameters zijn het die de

daadwerkelijke trillingen bepalen. Door het treintype in beeld te brengen ontstaat extra context bij de spreiding in de gemeten parameterwaarden in Quo Vadis. Bovendien geeft het de mogelijkheid om bepaalde bevindingen tastbaarder te maken door ze te linken aan een treintype, in plaats van een parameterwaarde.

Overigens kan met de beschikbare parameters slechts indicatief een uitspraak gedaan worden over de relatie tussen het gemeten trillingsniveau en het treintype. Het treintype is namelijk geen variabele die rechtstreeks in de opwekking van trillingen een rol speelt. Het effect van een specifiek type materieel (wagon of locomotief) kan dus niet expliciet worden meegenomen in de analyse, zoals ook beschreven in de paragraaf hierboven. Dat komt enerzijds doordat de specifieke factoren (zoals vering, wieltype, draaisteltype, onderlinge afstand tussen draaistellen, onafgeveerde massa, etc.) die kenmerkend zijn voor het materieeltype, en uiteindelijk van invloed zijn op de trillingsniveaus niet in de juiste vorm beschikbaar zijn in de beschikbare dataset. Anderzijds omdat een trein vaak is samengesteld uit diverse typen wagons, ook als die hetzelfde type goederen vervoeren. Er kan slechts gebruik gemaakt worden van de parameters die reeds in de dataset beschikbaar zijn, die hangen deels samen met het treintype.

# 5

## RESULTATEN

Dit hoofdstuk gaat in op de resultaten uit analyse van de meetgegevens die zijn verzameld tijdens deze praktijkproef. Daarmee geeft dit hoofdstuk een samenvatting van de resultaten zoals deze uitgebreid zijn gepresenteerd in bijlage V.

Paragraaf 5.1 gaat in op het verband tussen rijnsnelheid en trillingsniveaus voor elk van de meetlocatie. Hierbij worden de resultaten van de proef met de meettein separaat gepresenteerd van de resultaten voor de regulier passerende goederentreinen. Vervolgens gaat paragraaf 5.2 in op de invloed van andere parameters op de trillingsniveaus.

### 5.1 Verband tussen snelheid en trillingsniveau

De analyseprocedure zoals deze reeds is beschreven in paragraaf 4.3 wordt toegepast om het effect van het verlagen van de rijnsnelheid bij goederentreinen te evalueren. De resultaten voor de meettein passages worden gepresenteerd in paragraaf 5.1.1, gevolgd door de resultaten van de regulier passerende treinen (inclusief de meettein als geheel) in paragraaf 5.1.2.

In beide gevallen worden de resultaten gepresenteerd in tabellen. Deze geven per meetlocatie, per meetsysteem, per spoor, per trillingsniveau het reductiepercentage met bijbehorende standaarddeviatie zoals dit volgt volgens de analyseprocedure die is beschreven in paragraaf 4.3. In deze tabellen worden meetlocatie, meetsysteem, spoor en trillingsniveau respectievelijk gespecificeerd in de kolommen 'locatie', 'meetsysteem', 'spoor' en 'trillingsniveau'.

De kolommen 'reductie (%) van 90 naar 60 km/h' en 'reductie (%) van 90 naar 40 km/h' geven de resulterende reductiepercentages in het betreffende trillingsniveau bij verlaging van de rijnsnelheid van 90 km/h naar 60 km/h, en van 90 km/h naar 40 km/h respectievelijk. In deze kolommen is naast de gemiddelde reductie in trillingsniveau ook de standaarddeviatie weergegeven. Deze waarden komen tot stand volgens de analyseprocedure zoals eerder beschreven.

Het komt voor dat gemiddelde reductie laag is, en/of dat de standaarddeviatie betrekkelijk groot is. Dit zegt iets over de significantie van de resulterende reducties. Reductiewaarden waarvoor de reductie in het interval 'gemiddelde reductie  $\pm$  standaarddeviatie' ligt, worden gezien als niet-significant. De waarden waarvoor dit geldt worden *cursief* weergegeven.

#### 5.1.1 Meettein

Tabel 5.1 presenteert de resultaten op basis van de meettein passages. In het algemeen laat de proef met de meettein duidelijke reducties in trillingsniveau zien bij verlaging van de rijnsnelheid. Dit geldt voor zowel trillingsniveau  $V_{\text{eff,max}}$  als voor  $V_{\text{RMS}}$ . De resultaten verschillen echter sterk per meetlocatie, en per spoor. Bijzonderheden worden hieronder per locatie kort vermeld. Voor een gedetailleerd overzicht wordt verwezen naar bijlage V.



### Opsplitsing in segmenten

Uit analyse van de opgesplitste meetsignalen per meettreinsegment blijkt dat de  $V_{\text{eff,max}}$ - en  $V_{\text{RMS}}$ -waarden, bepaald per segment, per segment onvoldoende afwijken om betrouwbaar verschillen tussen de segmenten te bepalen. De signalen laten in een aantal gevallen wel duidelijke verschillen zien in de opgewekte trillingen per segment. Maar het patroon in deze verschillen is niet op elke locatie hetzelfde. Bovendien liggen de  $V_{\text{eff,max}}$ -waarden per segment dusdanig dicht bij elkaar, dat daarmee geen betrouwbare analyse van het effect van aslast kan worden uitgevoerd. De analyse is daarom uitgevoerd met de  $V_{\text{eff,max}}$ - en  $V_{\text{RMS}}$ -waarde voor het volledige meetsignaal.

### Waardenburg

De resultaten voor de meettreinpassages laten duidelijke reducties zien in trillingsniveau bij verlaging van de rijsnelheid. Deze reducties zijn vergelijkbaar voor de beide sporen, al valt de reductie voor spoor CJ iets hoger uit. Spoor CJ is vanuit de meetlocatie gezien het eerste spoor.

### Zaltbommel

Ter hoogte van de meetlocatie in Zaltbommel zijn twee actief bereden sporen. Deze sporen zijn aangeduid als spoor 701 en spoor 702. Echter, de meettrein is op spoor 701 enkel gepasseerd met een snelheid rond de 90 km/h. Daardoor is er onvoldoende spreiding in snelheid om een uitspraak te kunnen doen over het effect van snelheidsverlaging op trillingsniveau. Om die reden ontbreken de resultaten voor spoor 701. Voor de meettrein passages op spoor 702 zit er meer spreiding in de snelheid, al zijn er betrekkelijk weinig passages met een snelheid rond de 60 km/h.

De resultaten voor de verschillende meetsystemen op meetlocatie Zaltbommel zijn vergelijkbaar. Er zit wel een verschil in de reducties bij 60 km/h tussen de meetsystemen onderling. Dit is vooral te wijten aan het summiere aantal passages bij 60 km/h, en de onzekerheid die gepaard gaat bij het bepalen van de rijsnelheid. Daardoor wordt bij S2-2 een hogere reductie van het trillingsniveau geconstateerd bij verlaging naar 60 km/h dan de andere meetsystemen.

### Hedel

Ter hoogte van de meetlocatie in Zaltbommel zijn twee actief bereden sporen, aangeduid als spoor B en C. Echter, net als bij de meetlocatie in Zaltbommel, is de meettrein op spoor B enkel gepasseerd met een snelheid rond de 90 km/h. Daardoor is er onvoldoende spreiding in snelheid om een uitspraak te kunnen doen over het effect van snelheidsverlaging op trillingsniveau. Voor de meettrein passages op spoor C zit er meer spreiding in de snelheid.

Voor spoor C worden er reducties in trillingsniveauesignaleerd bij verlaging van de rijsnelheid; de verschillende meetsystemen laten hier een vergelijkbaar resultaat zien. Daarbij is er bij verlaging van 90 naar 60 km/h opvallend minder reductie te zien dan bij verlaging van 90 naar 40 km/h, waarbij de standaarddeviatie betrekkelijk hoog is.

### Den Bosch, Orthen

De resultaten op basis van de modellen voor de meettreinpassages zijn erg verschillend voor de beide sporen. Daar waar de modellen voor spoor C duidelijke reducties van het trillingsniveau laten zien bij verlaging van de snelheid, is bij spoor B sprake van een toename van trillingsniveau bij verlaging van snelheid. Een mogelijke verklaring is te vinden in de onzekere toewijzing van meettreinpassages aan de sporen op deze locatie (zie Bijlage III.3 voor een uitwerking). Als passages niet aan het juiste spoor worden toegewezen, kan dit de gevonden relatie vertroebelen.

### Den Bosch, Zuid

De passages van de meettrein zijn op dit meetpunt verspreid over de drie sporen. Op deze locatie is de meettrein op geen van de sporen met 90 km/h gepasseerd, maar liggen de snelheden ruwweg verspreid tussen de 30 en 70 km/h. Op spoor CJ is de meettrein slechts enkele keren gepasseerd. Het gebrek aan passages met 90 km/h hebben hun uitwerking op de modeluitkomsten, en daarmee de reductiepercentages ten opzichte van de referentiesituatie bij 90 km/h: de modellen maken geen onderscheid tussen trillingen bij 60 km/h en bij 90 km/h, omdat ze hierover geen informatie hebben gekregen. Om die reden zijn er in Tabel 5.1 geen reducties beschikbaar voor verlaging van snelheid van 90 naar 60 km/h. Daarnaast geeft de

reductie waarde bij verlaging van 90 naar 40 km/h eigenlijk een resultaat dat hoort bij referentiesituatie 60 tot 70 km/h.

### Vught

De meettrein is de meetlocatie in Vught enkel gepasseerd op spoor 762 en spoor 763. Voor de passages op spoor 762 laat verlaging van de snelheid naar 60 km/h een vergelijkbaar resultaat zien als verlaging van snelheid naar 40 km/h. Het model voor spoor 763 laat geen reductie van trillingsniveau zien bij verlaging van de snelheid van 90 naar 60 km/h, wel bij verlaging naar 40 km/h.

### Boxtel

Op deze meetlocatie is de meettrein enkel gepasseerd op spoor 501 en spoor 504. Opmerkelijk is dat de verlaging van rijsnelheid bij de meettrein duidelijke reducties in trillingsniveau laat zien voor spoor 501, terwijl er juist niet het geval is voor spoor 504. Daar is zelfs een voorzichtige toename zichtbaar bij verlaging van de rijsnelheid.

### Verschil tussen $V_{\text{eff,max}}$ en $V_{\text{RMS}}$

Bij nadere beschouwing van de data lijkt  $V_{\text{RMS}}$  minder gevoelig te zijn voor uitschieters dan  $V_{\text{eff,max}}$ . De meetdata voor  $V_{\text{RMS}}$  ligt (bij hetzelfde meettreinonderdeel) in het algemeen 'meer op een lijn' dan die van  $V_{\text{eff,max}}$ . Dat maakt de verbanden die gevonden worden schoner, waardoor er een wat duidelijkere (minder vertoebelde) reductie uit komt in termen van  $V_{\text{RMS}}$  dan van  $V_{\text{eff,max}}$ . Overigens is dit ook terug te zien in de modelfouten (rmse) van de betreffende modellen: bij de modellen voor de  $V_{\text{RMS}}$  waarden is deze lager dan bij de modellen voor de  $V_{\text{eff,max}}$ -waarden.

Tabel 5.1 Reductiepercentages van trillingsniveau bij verlaging van rijsnelheid op basis van de meettreindata

| Locatie           | Meetsysteem | Spoor | Trillingsniveau          | Reductie (%) van 90 naar 60 km/h | Reductie (%) van 90 naar 40 km/h |
|-------------------|-------------|-------|--------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Waardenburg       | S1          | CJ    | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | $23.87 \pm 3.25$                 | $60.96 \pm 3.08$                 |
|                   |             |       | $V_{\text{RMS}} - Z$     | $40.17 \pm 1.23$                 | $68.83 \pm 1.38$                 |
|                   |             | BJ    | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | $24.22 \pm 4.74$                 | $49.03 \pm 2.78$                 |
|                   |             |       | $V_{\text{RMS}} - Z$     | $30.87 \pm 3.63$                 | $60.09 \pm 1.0$                  |
| Zaltbommel        | S2 - 1      | 702   | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | $7.69 \pm 3.38$                  | $46.34 \pm 5.09$                 |
|                   |             |       | $V_{\text{RMS}} - Z$     | $30.31 \pm 3.62$                 | $56.15 \pm 4.03$                 |
|                   | S2 - 2      | 702   | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | $26.69 \pm 2.56$                 | $53.88 \pm 4.61$                 |
|                   |             |       | $V_{\text{RMS}} - Z$     | $38.32 \pm 7.87$                 | $62.55 \pm 5.78$                 |
|                   | S2 - 3      | 702   | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | $9.28 \pm 4.9$                   | $57.63 \pm 4.54$                 |
|                   |             |       | $V_{\text{RMS}} - Z$     | $32.76 \pm 6.81$                 | $62.34 \pm 2.55$                 |
| Hedel             | S3 - 1      | C     | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | $9.01 \pm 8.71$                  | $48.5 \pm 4.63$                  |
|                   |             |       | $V_{\text{RMS}} - Z$     | $22.52 \pm 7.21$                 | $57.58 \pm 3.26$                 |
|                   | S3 - 2      | C     | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | $5.22 \pm 7.1$                   | $48.66 \pm 8.57$                 |
|                   |             |       | $V_{\text{RMS}} - Z$     | $12.77 \pm 4.77$                 | $54.49 \pm 5.57$                 |
|                   | S3 - 3      | C     | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | $2.32 \pm 0.8$                   | $36.73 \pm 10.7$                 |
|                   |             |       | $V_{\text{RMS}} - Z$     | $3.2 \pm 1.99$                   | $44.05 \pm 5.37$                 |
| Den Bosch, Orthen | S4          | C     | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | $28.82 \pm 8.56$                 | $40.13 \pm 7.51$                 |
|                   |             |       | $V_{\text{RMS}} - Z$     | $43.83 \pm 5.33$                 | $52.18 \pm 7.84$                 |
|                   |             | B     | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | $3.31 \pm 2.29$                  | $-18.88 \pm 8.45$                |
|                   |             |       | $V_{\text{RMS}} - Z$     | $0.6 \pm 1.25$                   | $-0.63 \pm 2.07$                 |

| Locatie         | Meetsysteem | Spoor | Trillingsniveau          | Reductie (%) van 90 naar 60 km/h | Reductie (%) van 90 naar 40 km/h |
|-----------------|-------------|-------|--------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Den Bosch, Zuid | S5          | CH    | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | -                                | $43.26 \pm 5.69$                 |
|                 |             |       | $V_{\text{RMS}} - Z$     | -                                | $46.12 \pm 4.41$                 |
|                 |             | CI    | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | -                                | $39.08 \pm 7.35$                 |
|                 |             |       | $V_{\text{RMS}} - Z$     | -                                | $41.12 \pm 2.81$                 |
|                 |             | CJ    | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | -                                | $22.25 \pm 0.84$                 |
|                 |             |       | $V_{\text{RMS}} - Z$     | -                                | $24.92 \pm 0.44$                 |
| Vught           | S6          | 762   | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | $12.76 \pm 1.58$                 | $11.84 \pm 1.54$                 |
|                 |             |       | $V_{\text{RMS}} - Z$     | $29.52 \pm 2.69$                 | $25.79 \pm 2.65$                 |
|                 |             | 763   | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | $-0.22 \pm 0.64$                 | $43.21 \pm 8.59$                 |
|                 |             |       | $V_{\text{RMS}} - Z$     | $13.47 \pm 8.57$                 | $49.82 \pm 7.9$                  |
| Boxtel          | S7          | 501   | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | $19.38 \pm 4.64$                 | $44.69 \pm 6.39$                 |
|                 |             |       | $V_{\text{RMS}} - Z$     | $18.04 \pm 2.55$                 | $41.39 \pm 5.75$                 |
|                 |             | 504   | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | $-7.98 \pm 2.14$                 | $-11.24 \pm 1.52$                |
|                 |             |       | $V_{\text{RMS}} - Z$     | $-2.75 \pm 1.67$                 | $-3.21 \pm 1.55$                 |

### 5.1.2 Reguliere goederentreinen

Tabel 5.2 presenteert de resultaten op basis van de reguliere goederentreinpassages (in deze analyse zijn ook de passages van de meettrein verwerkt). In het algemeen laten de reguliere passages een reductie in trillingsniveau zien bij verlaging van de rijnsnelheid. Dit geldt voor zowel trillingsniveau  $V_{\text{eff,max}}$  als voor  $V_{\text{RMS}}$ . De resultaten verschillen echter sterk per meetlocatie, en per spoor. Bijzonderheden worden hieronder per locatie kort vermeld. Voor een gedetailleerder overzicht wordt verwezen naar bijlage V.

Opvallend is dat de reductiepercentages veel minder overtuigend zijn dan die op basis van de meettreinpassages zoals gepresenteerd in Tabel 5.1. Dit is te verklaren doordat de dataset van meettreinpassages relatief veel spreiding heeft in snelheid en weinig spreiding in de overige parameters. Bij de reguliere goederentrein passages is dit juist omgekeerd: veel spreiding in treineigenschappen, maar juist betrekkelijk weinig in snelheid. Het is daarmee moeilijker om de invloed van snelheid op het trillingsniveau te achterhalen. Dit resulteert in lagere reductiepercentages, hogere standaardafwijkingen, en daarmee ook minder vaak in significante reducties in trillingsniveau.

In het algemeen laten de resultaten lichte reducties zien in trillingsniveau bij verlaging van de snelheid. Op vijf van de zeven locaties laat het vanuit het meetsysteem gezien dichtstbijzijnde spoor de meeste reducties in trillingsniveau zien bij verlaging van de snelheid, dit komt overeen met de resultaten op basis van de meettreinpassages. De meetlocaties Hedel en Vught vormen hierop een uitzondering. Opvallend is dat er overtuigend significante reducties in trillingsniveau worden waargenomen voor spoor CH bij meetlocatie Den Bosch, Zuid.

Tabel 5.2 Reductiepercentages van trillingsniveau bij verlaging van rijsnelheid op basis van data van regulier passerende treinen

| Locatie           | Meetsysteem | Spoor | Trillingsniveau          | Reductie (%) van 90 naar 60 km/h | Reductie (%) van 90 naar 40 km/h |
|-------------------|-------------|-------|--------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Waardenburg       | S1          | CJ    | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | $6,18 \pm 7,09$                  | $14,92 \pm 9,08$                 |
|                   |             |       | $V_{\text{RMS}} - Z$     | $8,27 \pm 11,53$                 | $15,44 \pm 12,56$                |
|                   |             | BJ    | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | $4,17 \pm 4,17$                  | $4,97 \pm 4,21$                  |
|                   |             |       | $V_{\text{RMS}} - Z$     | $6,65 \pm 4,79$                  | $6,78 \pm 4,8$                   |
| Zaltbommel        | S2 - 1      | 702   | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | $6,58 \pm 5,43$                  | $21,37 \pm 8,56$                 |
|                   |             |       | $V_{\text{RMS}} - Z$     | $8,23 \pm 4,86$                  | $22,09 \pm 10,37$                |
|                   |             | 701   | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | $-0,82 \pm 1,89$                 | $-1,0 \pm 1,79$                  |
|                   |             |       | $V_{\text{RMS}} - Z$     | $0,38 \pm 4,06$                  | $0,26 \pm 3,97$                  |
|                   | S2 - 2      | 702   | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | $6,42 \pm 6,95$                  | $16,2 \pm 13,98$                 |
|                   |             |       | $V_{\text{RMS}} - Z$     | $7,39 \pm 5,38$                  | $20,49 \pm 13,39$                |
|                   |             | 701   | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | $-1,89 \pm 3,58$                 | $-1,89 \pm 3,58$                 |
|                   |             |       | $V_{\text{RMS}} - Z$     | $-1,21 \pm 4,97$                 | $-1,21 \pm 4,97$                 |
|                   | S2 - 3      | 702   | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | $5,83 \pm 4,92$                  | $26,87 \pm 11,4$                 |
|                   |             |       | $V_{\text{RMS}} - Z$     | $9,19 \pm 6,34$                  | $28,98 \pm 13,37$                |
|                   |             | 701   | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | $0,68 \pm 2,85$                  | $0,68 \pm 2,85$                  |
|                   |             |       | $V_{\text{RMS}} - Z$     | $1,99 \pm 3,67$                  | $1,99 \pm 3,67$                  |
| Hedel             | S3 - 1      | B     | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | $-4,19 \pm 6,61$                 | $-15,34 \pm 7,53$                |
|                   |             |       | $V_{\text{RMS}} - Z$     | $-2,3 \pm 14,0$                  | $-12,08 \pm 17,02$               |
|                   |             | C     | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | $4,13 \pm 2,69$                  | $3,19 \pm 5,33$                  |
|                   |             |       | $V_{\text{RMS}} - Z$     | $9,32 \pm 6,02$                  | $8,73 \pm 10,05$                 |
|                   | S3 - 2      | B     | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | $2,87 \pm 2,85$                  | $3,07 \pm 2,86$                  |
|                   |             |       | $V_{\text{RMS}} - Z$     | $4,05 \pm 6,16$                  | $3,8 \pm 6,07$                   |
|                   |             | C     | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | $2,86 \pm 5,94$                  | $7,02 \pm 7,11$                  |
|                   |             |       | $V_{\text{RMS}} - Z$     | $8,76 \pm 4,02$                  | $13,52 \pm 5,01$                 |
|                   | S3 - 3      | B     | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | $-0,44 \pm 2,42$                 | $0,11 \pm 2,56$                  |
|                   |             |       | $V_{\text{RMS}} - Z$     | $-0,22 \pm 2,47$                 | $-0,22 \pm 2,55$                 |
|                   |             | C     | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | $9,61 \pm 4,92$                  | $10,09 \pm 4,68$                 |
|                   |             |       | $V_{\text{RMS}} - Z$     | $11,66 \pm 5,15$                 | $14,28 \pm 5,54$                 |
| Den Bosch, Orthen | S4          | C     | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | $16,14 \pm 7,58$                 | $16,24 \pm 7,34$                 |
|                   |             |       | $V_{\text{RMS}} - Z$     | $25,11 \pm 6,28$                 | $22,61 \pm 5,83$                 |
|                   |             | B     | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | $-2,99 \pm 7,57$                 | $-7,52 \pm 9,51$                 |
|                   |             |       | $V_{\text{RMS}} - Z$     | $5,61 \pm 4,91$                  | $5,39 \pm 4,85$                  |
| Den Bosch, Zuid   | S5          | CH    | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | $16,68 \pm 11,28$                | $47,47 \pm 6,41$                 |
|                   |             |       | $V_{\text{RMS}} - Z$     | $26,26 \pm 10,17$                | $47,64 \pm 5,69$                 |
|                   |             | CI    | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | $3,61 \pm 3,41$                  | $28,71 \pm 5,11$                 |
|                   |             |       | $V_{\text{RMS}} - Z$     | $3,17 \pm 3,78$                  | $24,67 \pm 4,16$                 |
|                   |             | CJ    | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | $6,35 \pm 3,02$                  | $6,12 \pm 3,02$                  |
|                   |             |       | $V_{\text{RMS}} - Z$     | $4,98 \pm 3,19$                  | $7,45 \pm 5,22$                  |

| Locatie | Meetsysteem | Spoor | Trillingsniveau          | Reductie (%) van 90 naar 60 km/h | Reductie (%) van 90 naar 40 km/h |
|---------|-------------|-------|--------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Vught   | S6          | 762   | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | $5,23 \pm 4,4$                   | $18,56 \pm 7,52$                 |
|         |             |       | $V_{\text{RMS}} - Z$     | $10,38 \pm 6,4$                  | $21,63 \pm 6,65$                 |
|         |             | 763   | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | $-6,53 \pm 3,7$                  | $-3,27 \pm 2,59$                 |
|         |             |       | $V_{\text{RMS}} - Z$     | $5,86 \pm 5,49$                  | $13,66 \pm 6,85$                 |
|         |             | 766   | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | $3,89 \pm 3,53$                  | $7,07 \pm 4,18$                  |
|         |             |       | $V_{\text{RMS}} - Z$     | $-0,1 \pm 2,72$                  | $0,46 \pm 2,55$                  |
| Boxtel  | S7          | 501   | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | $18,31 \pm 4,16$                 | $25,61 \pm 4,5$                  |
|         |             |       | $V_{\text{RMS}} - Z$     | $18,04 \pm 4,22$                 | $22,39 \pm 4,96$                 |
|         |             | 504   | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | $-2,84 \pm 1,2$                  | $-2,84 \pm 1,2$                  |
|         |             |       | $V_{\text{RMS}} - Z$     | $-2,44 \pm 1,63$                 | $-2,44 \pm 1,63$                 |
|         |             | 505   | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | $-0,44 \pm 0,24$                 | $5,38 \pm 3,52$                  |
|         |             |       | $V_{\text{RMS}} - Z$     | $0,0 \pm 0,0$                    | $7,84 \pm 3,62$                  |
|         |             | 507   | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | $7,34 \pm 1,56$                  | $8,01 \pm 1,71$                  |
|         |             |       | $V_{\text{RMS}} - Z$     | $10,39 \pm 1,32$                 | $10,06 \pm 1,3$                  |

## 5.2 Andere parameters met invloed

Voor de regulier passerende goederentreinen is naast snelheid ook gekeken naar de invloed van andere parameters op het trillingsniveau, specifiek de invloed op  $V_{\text{eff,max}}$ . Vanuit het random forest wordt een overzicht van de meest bepalende parameters voor trillingsniveau opgevraagd, de zogenaamde 'feature importances'. Dit zijn waarden tussen 0 en 1 die de onderlinge relatieve bepalendheid van de input parameters op de output weergeven. Voor de belangrijkste parameters wordt gekeken naar een relatie met het trillingsniveau. Ook is gezocht naar verbanden tussen trillingen en het type trein dat ze veroorzaakt. Wederom wordt voor details verwezen naar bijlage V.

In het algemeen zijn wiellast en pieklast de factoren die voor elke meetlocatie naar voren komen als bepalende factoren in het veroorzaken van trillingen. Daarbij is de trend dat een hogere wiellast en pieklast leidt tot een hoger trillingsniveau. In andere woorden: des te zwaarder de trein, des te hoger het trillingsniveau, en des te onroder de wielen (de onroderheid van wielen correleert met de pieklast), des te hoger het trillingsniveau.

Voor alle locaties zijn het passages van containertreinen die overheersen in de dataset (ca. 45 % van het aantal passages; de treinen aangemerkt als divers volgen daarna met ca. 25 %). Dit zijn echter niet de trein die lijken te zorgen voor de hogere trillingsniveaus. Het zijn de bulk-, keteltreinen, en treinen voor het vervoer van rollen staal die de overhand hebben in de zwaardere trillingen. Dit zijn vaak ook de treinen met de zwaardere beladingen. Echter ook bij lage wiellasten zijn het deze treinen die hogere trillingsniveaus veroorzaken dan andere treintypen met een vergelijkbare wiellast. Overigens laten deze treintypen weinig spreiding zien in wiel- en pieklast. Dit is verklaarbaar vanuit de aard van het materiaal dat ze vervoeren: ze zijn in het algemeen ofwel relatief zwaar beladen, ofwel leeg. Containertreinen laten een veel bredere spreiding zien in belading, die correspondeert met de diversiteit van goederen in de containers.

## RELATIE MET ANDER ONDERZOEK

### 6.1 TB PHS Meteren-Boxtel

Het trillingsonderzoek dat hoort bij het Tracébesluit PHS Meteren-Boxtel (zie [lit. 2]) gebruikt metingen en berekeningen om de trillingsoverlast als gevolg van dit project te beoordelen. Dit onderzoek laat zien dat voor een deel van de woningen langs het traject overschrijdingen van de grenswaarden uit de Beleidsregel trillinghinder spoor (Bts) optreden.

Eén van de mogelijke maatregelen om deze overschrijdingen te reduceren is het langzamer laten rijden van goederentreinen. Omdat die maatregel alleen mogelijk is voor de nachtperiode, zal de beoordeling voor de trillingsgrootheid  $V_{\text{per}}$  daarmee niet veranderen. Voor die grootheid is de waarde in de dagperiode, wanneer meer treinen passeren, namelijk maatgevend. In het trillingsonderzoek bij het TB is voor 134 panden langs het traject een overschrijding van de grenswaarde voor  $V_{\text{per}}$  vastgesteld.

Voor de beoordeling van de trillingsgrootheid  $V_{\text{max,BTS}}$  kan de maatregel gedifferentieerd rijden wel een effect hebben.<sup>1</sup> Met de meetdata uit dit onderzoek is daarom voor elke meetlocatie bepaald welke reductie in trillingsniveau te bereiken is door goederentreinen langzamer te laten rijden. Deze reducties zijn vervolgens gekoppeld aan de in het TB-onderzoek beoordeelde clusters van overschrijdingen. Voor elk cluster gaan we uit van een representatief gidspand om deze beoordeling uit te voeren. Met de berekende reductie is getoetst of de te behalen reductie voldoende is om de benodigde reductie in  $V_{\text{max}}$  te bereiken. Bijlage VI beschrijft deze methodiek, en de uitwerking daarvan per cluster, in detail.

Deze analyse laat zien dat gedifferentieerd rijden een effectieve maatregel kan zijn voor 1 cluster (met 2 panden) in Den Bosch en 4 clusters (met 22 woningen en 5 overige panden) in Vught. Met toepassing van gedifferentieerd rijden zouden deze clusters voldoen aan de eisen uit de Bts. Voor de overige clusters kan niet voldaan worden door toepassing van deze maatregel, of is al een maatregel opgenomen in het TB. Hierbij moet worden opgemerkt dat de benodigde reductie binnen de bandbreedte van de bepaalde reducties ligt: een uitspraak met zekerheid over de effectiviteit van de maatregel is dus niet mogelijk. Zowel in Den Bosch als in Vught geldt dat, door lokale factoren, de te behalen reductie mogelijk wordt overschat.

### 6.2 Trillingsonderzoek gedifferentieerd rijden (2016)

Het trillingsonderzoek gedifferentieerd rijden uit 2016 [ref. 10] leidde tot de volgende conclusies:

- een verlaging in treinsnelheid van 90 naar 60 km/u leidt tot reducties in trillingsniveaus van 10 tot 40 %. De reductie is sterk afhankelijk van de locatie en kan ook per locatie, per spoor verschillen. Een eenmaal bepaald reductie-effect kan dan ook niet landelijk worden toegepast, maar moet per locatie worden bepaald;
- de belangrijkste parameters van invloed op de trillingsniveaus zijn, naast snelheid, aslast en onrondheid van de treinwielen.

---

<sup>1</sup> Ook dan geldt trouwens dat het  $V_{\text{max}}$ -niveau veroorzaakt door maatgevende goederentreinen in de dag- en avondperiode niet zal veranderen.

De uitkomsten van voorliggend onderzoek bevestigen deze uitkomsten. De meetlocaties laten duidelijke verschillen zien in de reducties bij verlaging in treinsnelheid. Ook de bepalende parameters komen overeen.

Voorliggend onderzoek geeft, naast het inzicht op een nieuwe reeks meetlocaties, aanvullend kijk op de effecten die optreden bij een verlaging in rijsnelheid van 90 naar 40 km/uur. Het gebruikte voorspellingsmodel laat, ten opzichte van het model gebruikt in het trillingsonderzoek gedifferentieerd rijden uit 2016, resultaten zien met een kleinere afwijking tussen voorspelling en daadwerkelijk gemeten waarde. De proef met de meettein verschaft daarnaast aanvullend inzicht in het effect van gedifferentieerd rijden onder zorgvuldig gecontroleerde omstandigheden.



## CONCLUSIES

Uit het voorliggende onderzoek volgen een aantal conclusies over het effect van langzamer rijdende goederentreinen ('gedifferentieerd rijden') op trillingen langs het traject Meteren-Boxtel. Deze conclusies zijn gebaseerd op de meetgegevens verkregen met metingen op zeven meetlocaties, aan reguliere goederentreinen en een meettrein, in de periode januari-februari 2020. Per locatie is per spoor geanalyseerd welke treinen zijn gepasseerd, welke eigenschappen deze treinen hebben, welke trillingsniveaus ze veroorzaakten, en welke relaties tussen treinsnelheid en trillingsniveau daarmee zijn te leggen.

### Reguliere goederentreinen

De relatie tussen treinsnelheid en trillingsniveau, bepaald op basis van reguliere goederentreinpassages, is op bijna alle meetlocaties gematigd positief: een reductie in treinsnelheid zorgt voor een reductie in het trillingsniveau. Daarop zijn enkele uitzonderingen: in Vught en Boxtel zijn sporen aanwezig waar een reductie in treinsnelheid juist zorgt voor een toename (van 3 tot 7 %) in het trillingsniveau.

De berekende reducties variëren, voor een afname in rijsnelheid van 90 naar 60 km/u, tussen een kleine toename (7 %, op spoor 763 in Vught) tot een afname van 18 % (spoor 501 in Boxtel). Voor een afname in rijsnelheid van 90 naar 40 km/u varieert de reductie tussen een toename van 3 % (spoor 763 in Vught) tot een afname van 48 % (spoor CH in Den Bosch-Zuid).

De bepalende parameters voor het trillingsniveau blijken, naast de snelheid, vooral de wiellast (bepaald door het gewicht van de wagons) en de pieklast (sterk bepaald door de 'onrondheid' van de wielen). Dit wordt bevestigd door een analyse van de verschillende categorieën treinen: met name de zware bulktreinen, keteltreinen en treinen met rollen staal zorgen in het algemeen voor hogere trillingsniveaus. Opvallend is daarbij te noemen dat deze treinen ook bij lagere aslasten (als ze leeg zijn) zorgen voor relatief hoge niveaus.

### Meettrein

Ten opzichte van de reguliere treinpassages laten de meettreinpassages een grotere afhankelijkheid tussen treinsnelheid en trillingsniveau zien. Naarmate de treinsnelheid daalt, zakt het trillingsniveau dus harder dan bij de reguliere goederentreinen. Dit is te verwachten: de invloed van andere parameters, zoals aslast en wiellast, is door gebruik te maken van steeds één en dezelfde trein tot een minimum teruggebracht. Een uitzondering op deze trend is spoor 504 in Boxtel. Daar zorgt een afname in treinsnelheid juist voor een toename in trillingen.

Uit analyse van de opgesplitste meetsignalen blijkt dat de  $V_{\text{eff,max}}$ - en  $V_{\text{RMS}}$ -waarden, bepaald per segment, per segment onvoldoende afwijken om betrouwbaar verschillen tussen de segmenten te bepalen. De analyse is daarom uitgevoerd met de  $V_{\text{eff,max}}$ - en  $V_{\text{RMS}}$ -waarde voor het volledige meetsignaal.

De berekende reducties variëren, voor een afname in rijsnelheid van 90 naar 60 km/u, tussen een kleine toename (8 %, op spoor 504 in Boxtel) tot een afname van 29 % (spoor C in Orthen). Voor een afname in rijsnelheid van 90 naar 40 km/u varieert de reductie tussen een toename van 11 % (spoor 504 in Boxtel) tot een afname van 61 % (spoor CJ in Waardenburg).

### Relatie met voelbaarheidsgrens

De bestaande regelgeving voor trillingen langs het spoor (de Beleidsregel trillinghinder spoor, Bts) is erop gericht bij spoorprojecten het trillingsniveau de streef- of grenswaarde niet te laten overschrijden, of de

toename in elk geval tot maximaal 30 % te beperken. Deze 30 % is in de Toelichting bij de Bts onderbouwd op basis van literatuur en normstelling in andere landen, en wordt gezien als de voelbaarheidsdrempel: een toename in trillingssterkte van minder dan 30 % is in praktijksituaties voor mensen niet waarneembaar. De in dit onderzoek bepaalde reducties door gedifferentieerd rijden liggen, met één uitzondering (spoor CH bij Den Bosch-Zuid), onder deze voelbaarheidsgrens.

### Modellering en onzekerheden

Uit een vergelijking tussen verschillende analysemodellen blijkt dat het in dit onderzoek gehanteerde random-forestmodel het beste presteert. De gemiddelde afwijking tussen modelvoorspelling en daadwerkelijke waarde is in dit model het laagst. Bovendien houdt het model rekening met alle beschikbare parameters in de dataset. Het model blijft daarmee dicht bij de verkregen data.

Dat betekent niet dat alle onzekerheid verdwijnt. Door onzekerheden in de invoergegevens (zowel uit de trillingsmetingen, snelheidsregistratie als de Quo Vadis-gegevens) ontstaat ook onzekerheid in de uitvoer. Een maat voor deze onzekerheid is meegegeven als de genormaliseerde gemiddelde afwijking tussen modelvoorspelling en daadwerkelijke waarde in de tabellen in hoofdstuk 5 en bijlage V.

De onzekerheid wordt minder wanneer meer data beschikbaar is, maar in een aantal gevallen bleken onvoldoende gegevens beschikbaar om betrouwbaar een reductie te bepalen. Voor 11 van de 26 sporen, verspreid over de verschillende locaties, resulteerden de modellen afgeleid met reguliere goederentreinpassages in een niet-significante voorspelling voor de reductie in trillingsniveau bij een snelheidsverlaging van 90 naar 60 km/u. Bij een snelheidsverlaging van 90 naar 40 km/u gold dit voor 7 sporen.

Door de kleinere variatie in invoerparameters is de onzekerheid in de modellen, afgeleid op basis van de meettrein, lager. Op de locatie Den Bosch-Zuid passeerde de meettrein niet met voldoende hogere snelheden om een betrouwbare reductie van 90 naar 60 km/u te bepalen. Daarnaast is de reductie op 2 van de 14 resterende sporen niet significant. Voor de snelheidsverlaging van 90 naar 40 km/u kon voor alle 17 sporen een significante reductie bepaald worden.

### Effectbepaling gedifferentieerd rijden voor de knelpunten uit het Tracébesluit PHS Meteren-Boxtel

Met de verkregen analysemodellen zijn per locatie gemiddelde reducties voor de snelheidsverlagingen van 90 naar 60 en 40 km/u bepaald, per octaafband. Deze reducties zijn opgenomen in het prognosemodel gebruikt in het trillingsonderzoek bij het Tracébesluit PHS Meteren-Boxtel (het TB), om te bepalen of gedifferentieerd rijden een zinnige maatregel kan zijn voor de clusters met overschrijdingen uit het TB, waarvoor geen maatregel is opgenomen.

Voor de overschrijdingen van de grenswaarde voor  $V_{\text{per}}$  biedt gedifferentieerd rijden geen uitkomst. De dagperiode is namelijk maatgevend voor de beoordeling van deze grootheid, en gedifferentieerd rijden zou alleen plaatsvinden in de nachtperiode.

Voor de overschrijdingen van de grenswaarde voor  $V_{\text{max}}$  kan gedifferentieerd rijden voor 1 cluster (met 2 panden) in Den Bosch, en voor 4 clusters (met 22 woningen en 5 overige panden) in Vught effectief zijn. Of dit inderdaad het geval is, kan niet met zekerheid worden vastgesteld, omdat de gevraagde reductie binnen de spreiding van de met deze metingen bepaalde reductie valt. Bij deze conclusie is het wel belangrijk op te merken dat de te behalen reductie door gedifferentieerd rijden tussen 0 en 25 % ligt. Omdat de voelbaarheidsgrens meestal op ca. 30 % wordt ingeschat, is het waarschijnlijk dat deze reductie niet of nauwelijks door gebruikers en bewoners van de betrokken panden waargenomen kan worden.

### Aanbevelingen

De in dit onderzoek opgedane meetgegevens bieden aanknopingspunten voor verder onderzoek, dat buiten de reikwijdte van voorliggend onderzoek viel:

- analyseren van eventuele frequentieafhankelijkheid in de meetsignalen en de daaruit bepaalde reducties. Voor de analyse in dit onderzoek is de  $V_{\text{eff,max}}$ -waarde van het hele signaal gebruikt, waarvan bekend is dat deze correleert met hinder. Analyse van frequentieafhankelijkheid kan nader inzicht geven in de

- effecten die een rol spelen in de trillingsopwekking per meetlocatie. Merk op dat voor de effectbepaling van de maatregel in het kader van het TB PHS Meteren-Boxtel wel frequentieafhankelijk is gerekend;
- uitdiepen van de invloed van verschillende typen materieel en de eigenschappen van deze typen op de trillingsniveaus per passage. Daarvoor moet de dataset worden uitgebreid met aanvullende informatie over deze materieeltypen.

Deze laatste aanbeveling leidt tot een laatste advies. De beoordelingsgrootheid  $V_{\max}$ , zoals die in de Bts wordt gehanteerd, wordt bepaald door (kleine groepen) uitschieters in trillingsniveaus, bijvoorbeeld veroorzaakt door een specifieke trein die op regelmatige tijden passeert. Veel trillingsonderzoeken geven een beperkt inzicht in de achterliggende meetgegevens. Het is dan niet mogelijk om te bepalen in hoeverre zo'n kleine groep uitschieters bepalend was voor de bepaling van de grootheid  $V_{\max}$ . Daarmee is het ook lastig om te beoordelen of een maatregel specifiek gericht op deze set met uitschieters (zoals het langzamer laten rijden van deze treinen) een positief effect op  $V_{\max}$  kan hebben. We adviseren deze informatie toegankelijk te laten maken in toekomstig trillingsonderzoek, en na te gaan of deze gerichte interventies ook een navenante reductie in ervaren hinder kunnen opleveren.

## LITERATUURLIJST

- 1 Lombaert, G., Degrande, G., François, S., Thompson, D.J. (2015). Ground-borne vibration due to railway traffic: a review of excitation mechanisms, prediction methods and mitigation measures. In: Nielsen, J.C.O. et al. (ed.). Noise and vibration mitigation for rail transportation systems: proceedings of the 11<sup>th</sup> international workshop on railway noise, Uddevalla, Sweden, 9-13 September 2013, p. 253-287. Springer.
- 2 Arcadis (2020). PHS Meteren-Boxtel: TB achtergrondrapporten - Trillingen deel 1 t/m 3. 9 maart 2020, versie 2.0, definitief.
- 3 Dinoloket (2020). <https://www.dinoloket.nl/ondergrondmodellen>. Het gebruikte model is GeoTOP versie 1.3 (locaties Waardenburg, Zaltbommel, Hedel, Orthen) en DGM versie 2.2 (locaties Den Bosch-Zuid, Vught, Boxtel).
- 4 Tweede Kamer der Staten-Generaal (2018). Motie van de leden Sienot en Jetten over gedifferentieerd rijden van goederenvervoer en onderzoek naar beperking hinder. Vergaderjaar 2017-2018, 29984/nr. 781.
- 5 Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (2019). Brief aan de Tweede Kamer betreffende Stand van zaken beleidsintensivering Spoortrillingen. 18 juli 2019, kenmerk IENW/BSK-2019/107580.
- 6 Stichting BouwResearch (2002). Hinder voor personen in gebouwen: meet- en beoordelingsrichtlijnen, deel B.
- 7 Van Kamp, I. et al. (2014). Wonen langs het spoor: gezondheidseffecten trillingen van treinen. RIVM-rapport 2014-0096.
- 8 Cauberg-Huygen (2013). Onderzoek relatie rijnsnelheid treinen en trillingssterkte. 4 maart 2013, referentie 20122368-01.
- 9 TNO (2011). Spoor door Goes: nulmeting van omgevingstrillingen, prognose en snelheidsmaatregel. 16 december 2011, referentie TNO-060-DTM-2011-00268.
- 10 DGMR (2017). Landelijk onderzoek gedifferentieerd rijden - onderzoek effect rijnsnelheid goederentreinen op trillingsopwekking in de bodem. 15 december 2017, versie 002 (definitief), referentie T.2016.0727.R003.
- 11 Cauberg-Huygen (2018). Onderzoek relatie trillingssterkte en rijnsnelheid treinen: locatie Rosmalen. 9 februari 2018, referentie 00131-13058-11.



# Bijlagen

## BIJLAGE: MEETOPSTELLING EN -LOCATIES

### I.1 Meetopstelling

Op elke meetlocatie is een meetopstelling geplaatst, die uit de volgende onderdelen bestond:

- Syscom MR3000C-trillingsmeetsysteem, waarmee het trillingssignaal per passage in drie richtingen gesampled is met een frequentie van 1.000 Hz;
- camera, om de passerende treinen te registreren op beeld en daarmee de snelheid te bepalen;
- bijbehorende randapparatuur (stroomvoorziening).

In Afbeelding I.1 zijn deze onderdelen te zien. Voor een goede registratie van de trillingen in de ondergrond is voor de meetsystemen plaatselijk een deel (ca. 1 à 2 dm) van de bovenste grondlaag verwijderd, is de bodem verdicht en het meetsysteem waterpas en in goed contact met de ondergrond gepositioneerd. De systemen zijn afgedekt om ze te beschermen tegen hemelwater.

Afbeelding I.1 Onderdelen van de meetopstelling: camera en Syscom MR3000C-meetsysteem



Op twee van de zeven locaties (Zaltbommel en Hedel) zijn drie meetsystemen op een onderlinge afstand van 25 meter langs het spoor geplaatst. De methodiek met drie systemen op rij is gekozen om de meetgegevens te kunnen gebruiken voor de ontwikkeling van een rekenmodel om spoortrillingen te berekenen.<sup>1</sup> In de verdere analyse zijn de resultaten op de drie meetsystemen onderling vergeleken (zie hoofdstuk 5 en bijlage V) en voor de bepaling van de reducties in bijlage VI is het gemiddelde van de resultaten van de drie meetsystemen gebruikt.

---

<sup>1</sup> Meer informatie is te vinden op <https://www.rivm.nl/wonen-langs-spoor/rekenmodel-spoortrillingen>.



## I.2 Selectie van meetlocaties

De meetlocaties zijn in overleg met ProRail bepaald, met de volgende uitgangspunten:

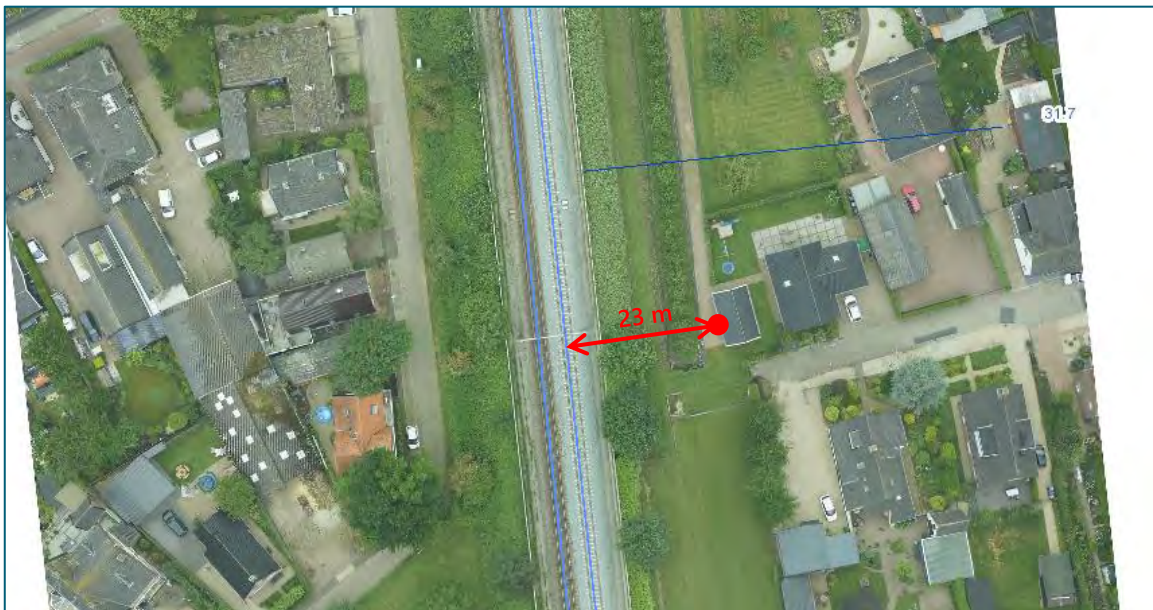
- de locaties liggen op 25 meter afstand van de hartlijn van het buitenste spoor;
- de locaties liggen bij voorkeur op plaatsen waar voor het eerdere OTB-onderzoek [lit. 2] al eerder is gemeten;
- de locaties liggen bij voorkeur op afstand van lokale trillingsbronnen in het spoor, zoals ES-lassen en wissels (tenminste 100 meter) en overwegen en bochten (200 meter);
- de locaties liggen bij voorkeur op gelijke hoogte met het spoor, om de invloed van taluds te beperken;
- bij voorkeur liggen geen watergangen of diepe greppels tussen het meetpunt en het spoor.

In de praktijk bleek het niet mogelijk om op elke meetlocatie aan alle voorwaarden te voldoen.

## I.3 Locatie Waardenburg

Op deze locatie ligt het spoor op een talud, dat ca. 4 meter hoger is gelegen dan het lokale maaiveld. De meetopstelling is op het gazon van Pompstraat 10 geplaatst, aan de oostzijde van het spoor. Ca. 75 meter ten noorden van de meetlocatie ligt het spoor op een kunstwerk over de provinciale weg N830. Langs het spoor staat een geluidscherm van ca. 2 meter hoog.

Afbeelding I.2 Meetlocatie Waardenburg



Sonderingsgegevens van de specifieke locatie zijn niet beschikbaar. In de omgeving zijn sonderingen uitgevoerd op ca. 200 meter ten westen en oosten van de locatie. Een interpolatie van deze sonderingen uit het Dinoloket [lit. 3] laat een toplaag van klei zien tot een lokale diepte van ca. 5,5 meter. Daaronder volgt een grove zandlaag tot ca. 7 meter diepte. Dan volgt nogmaals een laag van klei tot ca. 8,5 meter diepte. Daarna volgt nogmaals een (matig) grove zandlaag tot een diepte van tenminste 20 meter.

## I.4 Locatie Zaltbommel

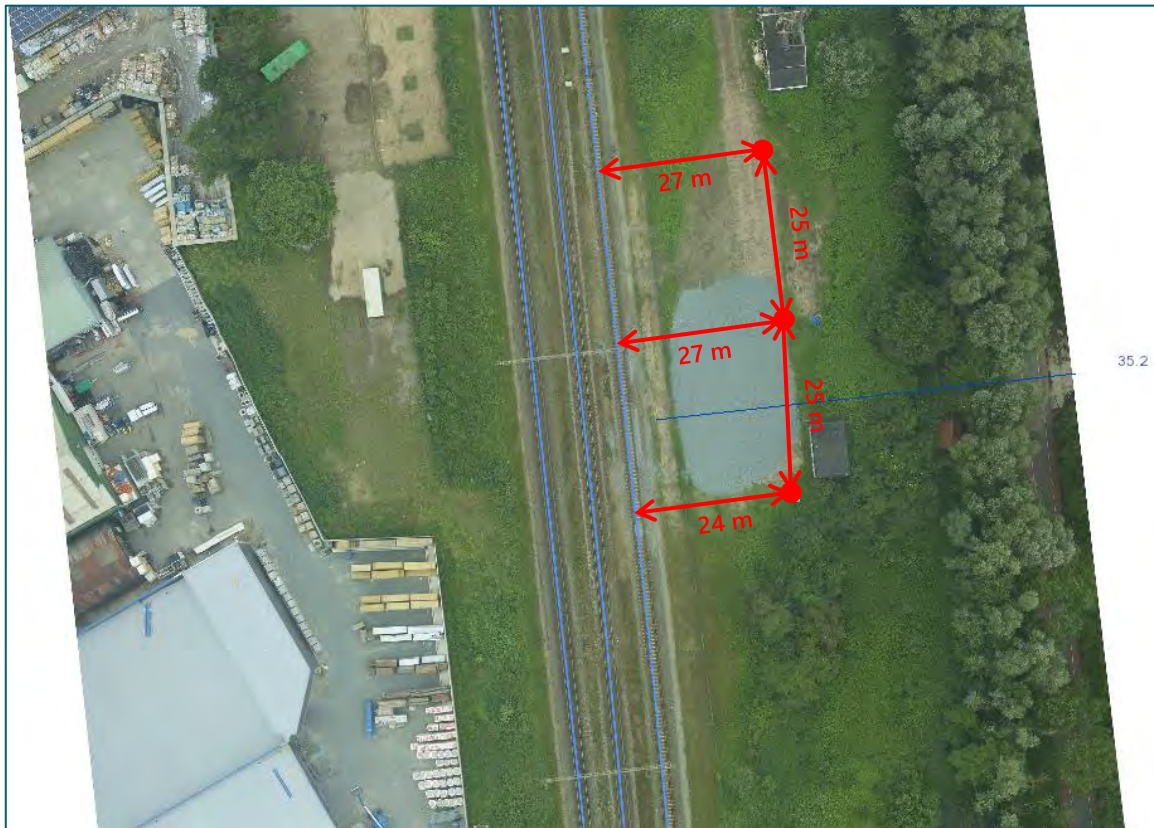
De meetlocatie Zaltbommel ligt op het terrein van het voormalige station Zaltbommel, aan de oostzijde van het spoor. Op deze locatie bestaat de sporenbundel uit drie sporen. Het derde spoor ligt ten oosten van de



doorgaande sporen en takt hier op ca. 750 meter zuidwaarts en ca. 500 meter noordwaarts op aan. Tussen meetopstelling en spoor is het terrein vlak. Deels is bestrating aanwezig.

Op dit perceel zijn drie meetsystemen geïnstalleerd met een onderlinge afstand van 25 meter.

Afbeelding I.3 Meetlocatie Zaltbommel (let op: de bult met grondmateriaal (grijs) was tijdens de meetperiode niet aanwezig)



Sonderingsgegevens van de specifieke locatie zijn niet beschikbaar. In de omgeving zijn sonderingen uitgevoerd op ca. 200 meter afstand van de locatie. Een interpolatie van deze sonderingen uit het Dinoloket [lit. 3] laat een reeks toplagen van klei en zandige klei zien tot een lokale diepte van ca. 10,5 meter. Daarna volgen (matig) grove zandlagen tot een diepte van tenminste 20 meter (op ca. 16 meter is wellicht nog een grindlaag aanwezig).

## I.5 Locatie Hedel

De meetlocatie te Hedel ligt op het gazon van Stationsweg 11, aan de westzijde van het spoor. Aan de oostzijde van het perceel, op onderstaande luchtfoto's nog niet zichtbaar, is tussen het gazon en het spoor recent een grondwal opgeworpen. Op dit perceel vond tijdens het uitvoeren van de metingen nieuwbouw plaats. De daarmee samenhangende stoortrillingen zijn uit de meetgegevens verwijderd.

Op dit perceel zijn drie meetsystemen geïnstalleerd met een onderlinge afstand van 25 meter.

Afbeelding I.4 Meetlocatie Hedel



Sonderingsgegevens van de specifieke locatie zijn niet beschikbaar. In de omgeving zijn sonderingen uitgevoerd op ca. 100-300 meter afstand van de locatie. Een interpolatie van deze sonderingen uit het Dinoloket [lit. 3] laat een toplaag van (zandige) klei zien tot een lokale diepte van ca. 3 meter. Daarna volgt een laag veen van 0,5 meter. Tot 6 meter volgt daarna een laag van matig grof zand. Tussen 6 en 10 meter is fijn zand aanwezig. Daarna bestaat de bodem tot een diepte van tenminste 20 meter uit (matig) grof zand.

## I.6 Locatie Orthen (Den Bosch)

De meetlocatie te Orthen ligt op het terrein van het onderstation Orthen, in beheer bij ProRail. Het onderstation ligt aan de oostzijde van het spoor. Tussen meetopstelling en spoor is het terrein vlak. Op ca. 90 meter ten zuiden van de meetlocatie ligt een overweg in het spoor. Op deze locatie zet het spoor zuidwaarts ook een bocht meer richting het zuiden in.



Afbeelding I.5 Meetlocatie Orthen



Sonderingsgegevens van de specifieke locatie zijn niet beschikbaar. In de omgeving zijn sonderingen uitgevoerd op ca. 100-300 meter afstand van de locatie. Een interpolatie van deze sonderingen uit het Dinoloket [lit. 3] laat een reeks lagen van matig grof en fijn zand zien tot een lokale diepte van ca. 12,5 meter. Daarna volgt een laag zandige klei van 4 meter. Vervolgens bestaat de bodem tot een diepte van tenminste 20 meter uit (matig) grof en fijn zand.

## I.7 Locatie Den Bosch-Zuid

De meetlocatie aan de zuidzijde van Den Bosch ligt aan de oostzijde van het spoor, aan de westzijde van het perceel Willem van Oranjestraat 33. Tussen spoor en meetopstelling ligt een kleine weide en is het terrein vlak. Op ca. 150 meter ten noorden van de meetlocatie voert het spoor met een brug over de Dommel. Aan de westzijde van het spoor ligt de Randweg, een belangrijke verkeersader richting Vught. Deze weg ligt op ongeveer 50 meter van de meetlocatie. Naar verwachting is de invloed van de weg op de gemeten trillingen minimaal. Langs het spoor staat een geluidscherm van ca. 1 meter hoog.

Afbeelding I.6 Meetlocatie Den Bosch-Zuid



Sonderingsgegevens van de specifieke locatie zijn niet beschikbaar. In de omgeving zijn sonderingen uitgevoerd op ca. 1 kilometer afstand van de locatie. De dichtstbijzijnde sonderingen uit het Dinoloket [lit. 3] laten een zandige bovenlaag (Formatie van Boxtel zien) tot een diepte van tenminste 20 meter.

## I.8 Locatie Vught

De meetlocatie in Vught ligt aan de westzijde van het spoor, nabij het adres Johan Willem Frisolaan 57. De sporenbundel bestaat hier uit drie sporen. Treinen kunnen ter hoogte van deze locatie overlopen van het meest westelijke spoor naar het middenspoor. De daarvoor benodigde wissels liggen op een afstand van ca. 50 meter (ten zuiden) en ca. 150 meter (ten noorden). Tussen de meetlocatie en het spoor ligt een watergang. Langs het spoor staat een geluidscherm van ca. 3 meter hoog. In de toekomst komt op deze locatie het spoor verdiept te liggen. Het overloopwissel zal daarbij verdwijnen.

Sonderingsgegevens van de specifieke locatie zijn niet beschikbaar. In de omgeving zijn sonderingen uitgevoerd op een afstand van ca. 400 - 1.000 meter afstand van de locatie. De dichtstbijzijnde sonderingen uit het Dinoloket [lit. 3] laten een zandige bovenlaag (Formatie van Boxtel zien) tot een diepte van tenminste 20 meter.

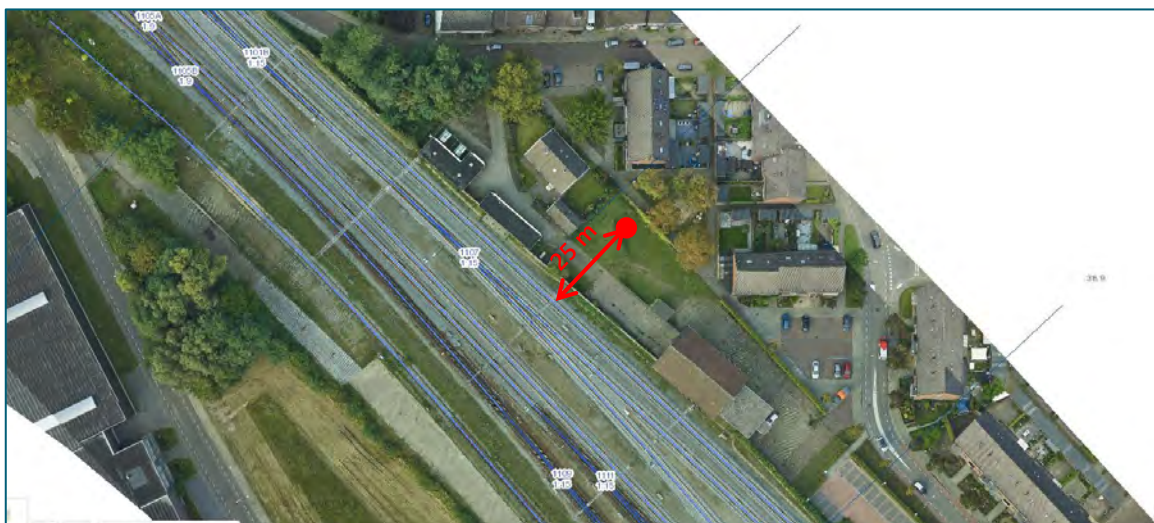


Afbeelding I.7 Meetlocatie Vught



## I.9 Locatie Bortel

Afbeelding I.8 Meetlocatie Bortel



De meetlocatie in Boxtel ligt aan de noordoostzijde van het spoor, nabij het adres Spoorstraat 9. De sporenbundel bestaat hier uit zeven sporen: dit is het punt waar het spoor uit Tilburg en het spoor uit Den Bosch samenkomen. Op ca. 40 meter van de meetlocatie is een wissel aanwezig. Tussen de meetlocatie en het spoor is een verhoogd perron (niet meer in gebruik) en een geluidscherm van ca. 2 meter hoog aanwezig.

Sonderingsgegevens van de specifieke locatie zijn niet beschikbaar. De dichtstbijzijnde sondering is uitgevoerd op ongeveer 175 meter afstand. Deze sondering uit het Dinoloket [lit. 3] laat een zandige bovenlaag (Formatie van Boxtel zien) tot een diepte van tenminste 20 meter.



## BIJLAGE: PROEF MET MEETREIN

Om de relatie tussen snelheid en trillingsniveau onder gecontroleerde omstandigheden in kaart te brengen, is een proef met een meettrein uitgevoerd. De meettrein bestaat uit speciaal geselecteerde delen (paragraaf 1, hieronder) en heeft volgens een vooraf opgesteld rittenschema met verschillende snelheden gereden (paragraaf 2). De analyse van het meettreinsignaal komt vervolgens aan bod (paragraaf 3).

De meetresultaten komen aan bod in de rapporthoofdstukken 4 en 5 en in de bijlagen III t/m V.

### II.1 Lay-out meettrein

De meettrein bestond uit de onderdelen benoemd in Tabel II.1. De locomotieven zijn moderne locomotieven, die in elk geval in het komende decennium actief zullen zijn op het spoorwegnet. Van de TRAXX-locomotief is bekend dat deze onder bepaalde omstandigheden voor hoge trillingsniveaus zorgt. De wagons zijn in vier segmenten ingedeeld, afwisselend beladen (met grind en betonplaten) en onbeladen. De segmentlengten bedragen steeds ongeveer 100 meter, met de verwachting dat met deze lengte het trillingsniveau bij de meetsystemen (die op 25 meter afstand van het spoor staan) vooral bepaald wordt door één van de segmenten.

De betrokken vervoerder heeft aangegeven dat het ingezette materieel recent in revisie is geweest, waarbij de wielen zijn behandeld. Naar verwachting is de variatie in wiel-onrondheid daarom gering. Dit betekent dat de invloed van de parameter 'pieklast' (die correleert met de onrondheid van wielen) op het veroorzaakte trillingsniveau gering is en in de analyse van het effect van treinsnelheid op het trillingsniveau niet verstrend werkt.

Uit een vergelijking op aslasten blijkt dat de spreiding in aslasten van de meettreinsegmenten een goede weerspiegeling geeft van de spreiding in aslasten van reguliere passerende goederentreinen.

Tabel II.1 Onderdelen van de meettrein

| Onderdeel                          | Aantal | Lengte [m] | Afstand tussen assen in draaistel [m] | Afstand tussen centrum draaistellen [m] | Aslasten [kN] |
|------------------------------------|--------|------------|---------------------------------------|-----------------------------------------|---------------|
| Locomotief Bombardier TRAXX BR 186 | 1      | 18,9       | 2,6                                   | 10,44                                   | 20,6          |
| Wagon Regs (onbeladen)             | 5      | 19,86      | 1,8                                   | 14,6                                    | 8,4           |
| Wagon Regs (beladen)               | 5      | 19,86      | 1,8                                   | 14,6                                    | 17,4          |
| Wagon Sgmm (onbeladen)             | 7      | 14,04      | 1,8                                   | 9                                       | 6,4           |
| Wagon Sgmm (beladen)               | 7      | 14,04      | 1,8                                   | 9                                       | 16,3          |
| Locomotief Siemens Vectron         | 1      | 18,98      | <i>onbekend</i>                       | <i>onbekend</i>                         | 22,6          |



Op onderstaande afbeeldingen zijn de wagons (beladen en onbeladen), en de gehanteerde locomotieven te zien.

Afbeelding II.1 Meettrein: beladen en onbeladen goederenwagons



Afbeelding II.2 Meettrein: locomotieven





## II.2 Rittenschema

De meettrein heeft een aantal ritten gemaakt over het traject tussen Meteren en Boxtel, langs de beschreven meetlocaties. De ritten vonden vooral plaats in de nachtperiode, om het reguliere treinverkeer niet te hinderen. Tabel II.2 laat zien welke ritten gereden zijn.

Tabel II.2 Rittenschema

| Datum     | Snelheid [km/u] | Ritnummer | Richting |
|-----------|-----------------|-----------|----------|
| 12-1-2020 | 95              | 50553     | zuid     |
| 12-1-2020 | 95              | 50552     | noord    |
| 12-1-2020 | 95              | 50551     | zuid     |
| 12-1-2020 | 40              | 50550     | noord    |
| 13-1-2020 | 40              | 50551     | zuid     |
| 13-1-2020 | 40              | 50552     | noord    |
| 13-1-2020 | 40              | 50553     | zuid     |
| 13-1-2020 | 40              | 50554     | noord    |
| 13-1-2020 | 40              | 50555     | zuid     |
| 13-1-2020 | 95              | 50556     | noord    |
| 13-1-2020 | 95              | 50558     | zuid     |
| 13-1-2020 | 95              | 50559     | noord    |
| 13-1-2020 | 95              | 50549     | zuid     |
| 13-1-2020 | 95              | 50548     | noord    |
| 13-1-2020 | 95              | 50557     | zuid     |
| 13-1-2020 | 60              | 50550     | noord    |
| 14-1-2020 | 60              | 50551     | zuid     |
| 14-1-2020 | 60              | 50552     | noord    |
| 14-1-2020 | 60              | 50553     | zuid     |
| 14-1-2020 | 60              | 50554     | noord    |
| 14-1-2020 | 60              | 50555     | zuid     |
| 14-1-2020 | 95              | 50556     | noord    |
| 14-1-2020 | 95              | 50557     | zuid     |
| 14-1-2020 | 95              | 50558     | noord    |

In totaal zijn 24 passages per meetpunt geregistreerd.

## II.3 Opsplitsing meetsignaal voor verschillende onderdelen

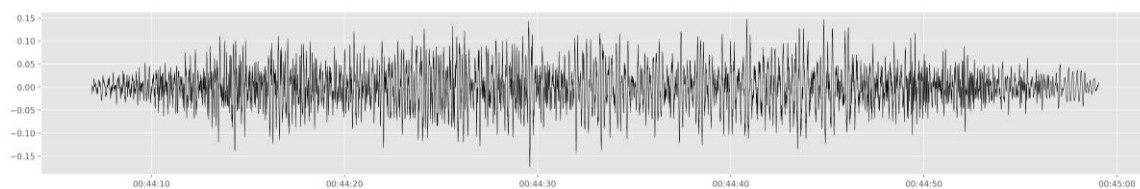
Per meettreinpassage is een continu trillingssignaal beschikbaar. De meettrein bestaat uit verschillende segmenten, en het trillingssignaal moet dus worden opgesplitst naar de verschillende segmenten. Het signaal zelf laat onvoldoende niveauverschillen tussen de segmenten zien om alleen op basis van deze verschillen het signaal betrouwbaar op te splitsen. In een aantal gevallen zijn wel duidelijke verschillen tussen segmenten te zien, maar dit geldt niet voor elke passage en locatie (zie ook Afbeelding II.3 en

Afbeelding II.4). Ook een analyse op basis van het spectrogram biedt geen duidelijk aanknopingspunt. Dit kan twee dingen betekenen: de verschillen tussen de treinsegmenten (het verschil in aslast is dominant) hebben weinig invloed op de trillingsopwekking (het tegendeel blijkt uit de analyse van de reguliere goederentreinpassages), of de trillingen afkomstig van de verschillende segmenten beïnvloeden het totale trillingsniveau op de locatie van het meetsysteem te veel om duidelijke verschillen te kunnen zien.

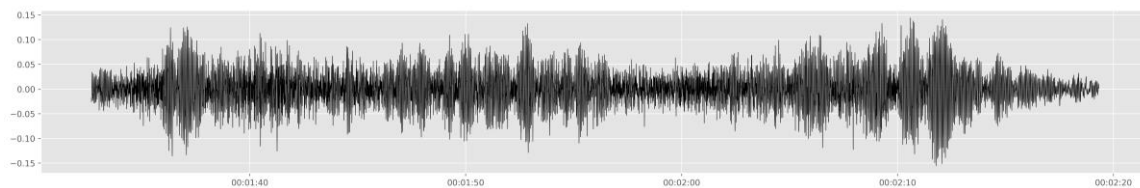
De volgende procedure is gebruikt om het signaal op te splitsen:

- bepaal de theoretische passagelengten per segment, op basis van de treinsnelheid en de gekende lengte van de trein;
- bepaal de lopende RMS-waarde (met een vensterlengte van 1 seconde) van het meetsignaal;
- bepaal de periode vanaf de eerste keer dat deze lopende RMS-waarde meer dan 50 % van het maximum bedraagt, tot het laatste moment dat deze daar onder valt;
- neem 95 % van de lengte van deze periode (dit percentage is bepaald op basis van een analyse van een aantal representatieve signalen);
- splits de periode op naar de verschillende segmenten met de eerder bepaalde passagelengten.

Afbeelding II.3 Meetsignaal zonder duidelijk segmentonderscheid



Afbeelding II.4 Meetsignaal met duidelijke verschillen tussen segmenten





## BIJLAGE: VERWERKING MEETGEGEVENS

In opdracht van ProRail B.V. heeft Witteveen+Bos trillingsmetingen uitgevoerd aan goederentreinpassages op een zevental locaties langs het spoor tussen Meteren en Boxtel. De metingen hebben als doel de relatie tussen goederentreinsnelheid en trillingsniveau, en de onderliggende parameters die daarop van invloed zijn, inzichtelijk te maken.

Tijdens dit onderzoek zijn niet alleen de regulier passerende goederentreinen gemeten, maar is ook een proef met een meettrein uitgevoerd. Deze meettrein bestond uit vier verschillende series wagons met verschillende beladingen en een locomotief aan beide uiteinden. Deze trein heeft een aantal keren met verschillende snelheden over het traject gereden. De meettrein is met name ingezet om te kunnen garanderen dat er voldoende trillingsmetingen zijn voor de lagere rijsnelheden.

Voor elk van de locaties is naar aanleiding van de metingen een dataset van treinpassages opgebouwd met daarin onder andere het gemeten trillingsniveau en de gereden snelheid voor elk van de passages. Daarnaast is door ProRail een dataset ter beschikking gesteld van treinpassages op zogenaamde dienstregelpunten nabij elk van de zeven de meetlocaties. Deze dataset is afkomstig uit het Quo Vadis-systeem van ProRail en bevat eigenschappen van de passerende trein. Deze eigenschappen omvatten onder andere de treinsamenstelling in termen van materieeltype, het aantal assen van de trein, metingen van de as- en wiellasten, en parameters voor wielkwaliteit.

Beide datasets vormen het uitgangspunt voor de analyse die de relatie tussen rijsnelheid en trillingsniveau, en de onderliggende parameters die daarop van invloed zijn, inzichtelijk dient te maken. Deze bijlage beschrijft uitvoerig de beschikbare datasets. Daarnaast wordt ingegaan op de bewerkingstappen die noodzakelijk zijn om tot een uniforme dataset van treinpassages te komen die geschikt is voor de uit te voeren analyse.

### Leeswijzer

De opbouw van deze bijlage, en daarmee de opbouw van de dataset, is als volgt: Allereerst zal in paragraaf III.1 worden ingegaan op de dataset die voortkomt uit de uitgevoerde trillingsmetingen. Hierin wordt ook ingegaan op de totstandkoming van de dataset en de voorbewerkingsstappen die getroffen zijn. Vervolgens wordt in paragraaf III.2 ingegaan op de dataset die voortkomt uit het Quo Vadis-systeem van ProRail. Voor deze dataset zijn diverse voorbewerkingsstappen noodzakelijk, deze worden dan ook uitvoerig beschreven. Om tot de uiteindelijke dataset van goederentreinen te komen worden passages uit beide datasets aan elkaar gekoppeld. Paragraaf III.3 is gewijd aan deze koppelingsprocedure. Paragraaf III.4 beschrijft de selectie van bruikbare passages. Dit leidt uiteindelijk tot een dataset met goederenpassages die wordt gebruikt in de vervolganalyse. De resulterende dataset wordt samengevat in paragraaf III.5. Tot slot stelt paragraaf III.6 enkele afrondende opmerkingen.

### III.1 Dataset naar aanleiding van trillingsmetingen

In opdracht van ProRail B.V. heeft Witteveen+Bos trillingsmetingen uitgevoerd aan goederentreinpassages op een zevental locaties langs het spoor tussen Meteren en Boxtel. Voor elk van de locaties is naar aanleiding van de metingen een dataset van treinpassages en bijbehorende waarden voor trillingsniveaus opgebouwd. In de dataset worden de zeven meetlocaties aangeduid als 'S1' tot en met 'S7'.

Deze aanduiding wordt ook in dit en de komende hoofdstukken gebruikt in tekst en figuren. Tabel III.1 geeft een overzicht van de zeven meetlocaties en de aanduiding van de meetlocatie in de dataset.

Tabel III.1 Aanduiding van locaties en beschikbare meetsystemen per meetlocatie

| # | Meetlocatie                            | Aanduiding in dataset | Beschikbare meetsystemen   |
|---|----------------------------------------|-----------------------|----------------------------|
| 1 | Pompstraat 10, Waardenburg             | S1                    | S1                         |
| 2 | voormalige stationslocatie, Zaltbommel | S2                    | S2 - 1<br>S2 - 2<br>S2 - 3 |
| 3 | Stationsweg 11, Hedel                  | S3                    | S3 - 1<br>S3 - 2<br>S3 - 3 |
| 4 | onderstation Orthen, Den Bosch         | S4                    | S4                         |
| 5 | Willem van Oranjelaan 33, Den Bosch    | S5                    | S5                         |
| 6 | nabij Johan Frisolaan 57, Vught        | S6                    | S6                         |
| 7 | nabij Spoorstraat 9, Boxtel            | S7                    | S7                         |

Op de meetlocaties zijn één of meerdere meetsystemen geplaatst. Daar waar één meetsysteem is geplaatst, wordt deze in de dataset aangeduid met hetzelfde kenmerk als de locatie. Voor de meetlocaties in Zaltbommel en Hedel zijn meerdere meetsystemen geplaatst. Voor deze locaties worden de systemen aangeduid met een volgnummer. Om dit onderscheid te kunnen maken wordt in de dataset de locatie dan ook specifiek aangegeven de meetsysteem-aanduiding. De meetsystemen zijn naast de spoorbaan geplaatst, in de regel op 25 meter uit het hart van het buitenste spoor (aan de zijde van het meetsysteem). Uitzonderingen op deze regel zijn meetlocaties S2, waar twee meetsystemen op 27 meter afstand zijn geplaatst, en een derde op 24 meter afstand, en S5, waar het meetsysteem op 26 meter afstand is geplaatst. Op de meetlocaties waar meerdere meetsystemen geplaatst zijn, zijn deze in een lijn parallel aan de spoorbaan geplaatst met 25 meter tussenafstand.

### Definitie trillingsniveau

Voor elke gemeten goederentreinpassage is een trillingsignaal beschikbaar in drie meetrichtingen. Deze worden aangeduid als x-richting (in het grondvlak parallel aan de spoorlijn), y-richting (in het grondvlak parallel aan de spoorlijn) en z-richting (loodrecht op het grondvlak). Voor elk van de signalen zijn waarden voor het trillingsniveau bepaald. Deze trillingsniveaus zijn uitgedrukt in de waarden  $V_{eff,max}$  en  $V_{RMS}$ . Als het trillingsignaal in richting  $i$  als functie van tijd  $t$  wordt uitgedrukt als  $v_i(t)$ , dan zijn de waarden voor  $V_{eff,max}$  en  $V_{RMS}$  in richting  $i$  gedefinieerd volgens

$$V_{effmax_i} = \max_t \left( \sqrt{\frac{1}{\tau} \int_0^t g(\xi) v_i^2(t - \xi) d\xi} \right), \text{ waar } g(\xi) = e^{-\xi/\tau} \text{ en } \tau = 0.125s, \text{ en}$$

$$RMS_i = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [v_i(t)]^2 dt}, \text{ waar } T \text{ de lengte van het trillingsignaal is in seconden.}$$

### Parameters in de dataset

Tabel III.2 hieronder geeft een totaal overzicht van de parameters in de dataset die voortvloeit uit de trillingsmetingen. Toelichting op enkele parameters volgt hieronder:

- *Img file*. Naast de het gemeten trillingsignalen zijn voor de passages ook beeldopnames beschikbaar. Deze beeldopnames worden gebruikt om waar mogelijk de snelheid van de trein uit af te leiden, de rijrichting van de trein te bepalen, en de trein te kunnen identificeren op de verschillende meetlocaties;
- *Speed*. Bij het vaststellen van de snelheid van de passerende trein wordt gebruik zo veel mogelijk gemaakt van de beeldopnames. Hiervoor wordt het aantal beelden tussen het passeren van twee kalibratiepunten in het beeld geteld. Indien geen camerabeelden beschikbaar zijn wordt de snelheid

geschat aan de hand van de passagetijden in de verschillende meetlocaties. Voor het vaststellen van de snelheid bij de meettreinpassages wordt een afwijkende procedure gehandhaafd. Deze staat verderop beschreven;

- *Confirmed*. Deze waarde geeft aan op welke manier de snelheid is vastgesteld. Waarde gelijk aan 1 duidt op een snelheid die is vastgesteld aan de hand van beeldopnames, waarde 2 duidt op een vaststelling a.d.h.v. doorkomsttijden. Als de snelheid voor een passage niet vastgesteld kan worden, dan is er geen waarde meegegeven; in dat geval is er dus ook geen waarde voor snelheid;
- *Direction*. De rijrichting van de passerende trein wordt vastgesteld aan de hand van de beeldopnames. Op elk van de meetlocaties ligt de spoorbaan ruwweg in noord-zuid richting. De rijrichting wordt aangeduid als 'N-Z' (van-noord-naar-zuid) en 'Z-N' (van-zuid-naar-noord);
- *Passage*. Aan de hand van de beeldopnames wordt waar mogelijk dezelfde trein geïdentificeerd op de verschillende meetlocaties. Een identificatienummer wordt in dat geval meegegeven in de parameter *Passage*;
- *Remark*. Bij enkele passages staat als opmerking vermeldt dat tijdens de meting meerdere treinen zijn gepasseerd (bijvoorbeeld in tegengestelde richting).

Tabel III.2 Overzicht van parameters in de dataset met trillingsmetingen

| Parameter         | Omschrijving                                                                                   | Opmerking                                                                                                |
|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Date              | datum van de passage op het meetpunt                                                           |                                                                                                          |
| Hour              | tijdstip van de passage op het meetpunt                                                        |                                                                                                          |
| Site              | meetsysteem waarop de passage is geregistreerd                                                 | aangeduid met S1, S2 - 1, S2 - 2, ..., S7                                                                |
| Confirmed         | type vaststelling van gereden snelheid                                                         | geeft aan of snelheid is vastgesteld a.d.h.v. beeldopnames (1) of doorkomsttijden op andere locaties (2) |
| $V_{eff,max} - X$ | berekende waarde voor $V_{eff,max}$ in x-richting                                              |                                                                                                          |
| $V_{eff,max} - Y$ | berekende waarde voor $V_{eff,max}$ in y-richting                                              |                                                                                                          |
| $V_{eff,max} - Z$ | berekende waarde voor $V_{eff,max}$ in z-richting                                              |                                                                                                          |
| $V_{RMS} - X$     | berekende waarde voor $V_{RMS}$ in x-richting                                                  |                                                                                                          |
| $V_{RMS} - Y$     | berekende waarde voor $V_{RMS}$ in y-richting                                                  |                                                                                                          |
| $V_{RMS} - Z$     | berekende waarde voor $V_{RMS}$ in z-richting                                                  |                                                                                                          |
| Duration          | duur van registratie van de passage                                                            | in seconden                                                                                              |
| Filename          | bestandsnaam van de ruwe trillingsignalen                                                      |                                                                                                          |
| Img file          | bestandsnaam van de webcam opname                                                              |                                                                                                          |
| Speed             | gereden snelheid van de passerende trein                                                       |                                                                                                          |
| Direction         | rijrichting van de passerende trein                                                            | aangeduid met 'N-Z' of 'Z-N'                                                                             |
| Passage           | identificatie van de passage                                                                   | identificatie van eenzelfde trein                                                                        |
| Remark            | opmerking                                                                                      |                                                                                                          |
| Norm              | waarde voor de nauwkeurigheid van de snelheidsbepaling a.d.h.v. doorkomsten op andere locaties | mits van toepassing                                                                                      |

### Meettreinpassages

Voor de meettrein zijn de waarden voor  $V_{eff,max}$  en  $V_{RMS}$  beschikbaar op basis van het meetsignaal van de gehele trein, alsmede op basis van een selectie van het signaal voor de verschillende onderdelen. Met onderdelen wordt hier bedoeld de beide locomotieven en de vier verschillende series wagons met variërende beladingen.



De opbouw van de meettrein is weergegeven in Tabel III.3. Daarnaast geeft deze tabel aan hoe de verschillende onderdelen zijn aangeduid in de dataset. De kolom 'lengte [m]' geeft de lengte van het betreffende materieel aan, en de waarde in de kolom 'aantal' geeft het aantal units dat van dit materieel dat in de trein is opgenomen, en daarmee het betreffende onderdeel van de meettrein vormt.

Tabel III.3 Opbouw meettrein en aanduiding in dataset

| Onderdeel | Aanduiding in dataset | Materieel                          | Lengte [m] | Aantal |
|-----------|-----------------------|------------------------------------|------------|--------|
| 1         | part 1                | Locomotief Bombardier TRAXX BR 186 | 18,9       | 1      |
| 2         | part 2                | Wagon Regs (onbeladen)             | 19,86      | 5      |
| 3         | part 3                | Wagon Regs (beladen)               | 19,86      | 5      |
| 4         | part 4                | Wagon Sgmm (onbeladen)             | 14,04      | 7      |
| 5         | part 5                | Wagon Sgmm (beladen)               | 14,04      | 7      |
| 6         | part 6                | Locomotief Siemens Vectron         | 18,98      | 1      |

Naar aanleiding van de uitgevoerde trillingsmetingen worden de datasets voor de passages van de meettrein en de passages van 'reguliere' goederentreinen separaat aangeleverd. Daarbij verschillen deze datasets doordat voor de meettrein passages de trillingsniveaus (uitgedrukt als  $V_{\text{eff,max}}$  en  $V_{\text{RMS}}$ ) beschikbaar voor zowel de meettrein als geheel, als voor de verschillende onderdelen. Uiteindelijk worden beide datasets samengevoegd tot één dataset. Om onderscheid te kunnen blijven maken tussen meettrein passages en passages van reguliere goederentreinen worden de parameters in Tabel III.2 aangevuld met de parameter 'meettrein' en 'meettrein\_part'. De eerste geeft aan of de passage een passage van de meettrein betreft of niet, aangeduid met waarden 'True' of 'False'. De tweede geeft aan welk deel van de meettrein de passage betreft, aangeduid met waarden 'n/a' (als de passage geen meettreinpassage betreft), 'full' (als de passage de volledige meettrein betreft), 'part 1', 'part 2', 'part 3', 'part 4', 'part 5' en 'part 6', direct relaterend aan de aanduidingen in Tabel III.3. Op deze wijze worden, naast de meettrein als geheel, de passages van de afzonderlijke onderdelen als afzonderlijke passage weergegeven in de dataset.

Bij de meettrein wordt een afwijkende procedure gehanteerd voor het vaststellen van de gereden snelheid. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de bekende lengte (afstand) van de trein, en de lengte (tijd) van het trillingsignaal. Om de  $V_{\text{eff,max}}$  en  $V_{\text{RMS}}$  berekeningen voor de afzonderlijke onderdelen van de meettrein uit te voeren wordt wederom de (bekende) lengte van de onderdelen gebruikt om het signaal op te splitsen.

#### Resulterende dataset

Volgens bovenstaande procedure ontstaat een dataset met de parameters zoals beschreven in Tabel III.2. Hierbij zijn twee parameters toegevoegd die aanduiden of de betreffende passage de meettrein betreft, en (mits van toepassing) welk onderdeel. Passages uit deze dataset dienen uiteindelijk gekoppeld te worden aan de treineigenschappen uit de Quo Vadis-dataset, deze dataset wordt beschreven in paragraaf III.2. Het koppelingproces wordt vervolgens beschreven in paragraaf III.3.

### III.2 Dataset met treineigenschappen vanuit Quo Vadis

Naast de in de vorige paragraaf beschreven dataset met trillingsmetingen, vergaard tijdens de metingen, is door ProRail een dataset ter beschikking gesteld van treinpassages met bijbehorende eigenschappen van de passerende trein. Deze dataset is afkomstig uit het Quo Vadis-systeem van ProRail. Deze paragraaf gaat in op de eigenschappen van deze dataset.

In algemene zin meet het Quo Vadis-systeem passerende treinen op de zogenaamde Quo Vadis-meetstations (in de aangeleverde dataset ook aangeduid als 'meetunit'). Deze meetstations zijn aangebracht

op diverse plekken in het Nederlandse spoorwegnetwerk, met als doel belastingen van treinen op het spoor te meten. De installaties meten onder andere wiel- en aslasten, en registreren het type materieel.

In de geleverde dataset zijn de metingen van dezelfde trein op één of meerdere meetstations gekoppeld aan de doorkomst van die trein op een dienstregelpunt. Dienstregelpunten en de Quo Vadis-meetstations liggen in het algemeen op verschillende plekken in het spoorwegnetwerk. De koppeling tussen doorkomsten op de Quo Vadis-meetstations en de doorkomsten op de dienstregelpunten is reeds door ProRail uitgevoerd. Deze koppeling met doorkomsten op dienstregelpunten is van belang aangezien de meetlocaties (waarop trillingen zijn gemeten) uit Tabel III.1 elk in de buurt liggen van een eigen dienstregelpunt. Onder andere de doorkomsttijden op de meetlocaties en de dienstregelpunten vormen een belangrijk aspect in de koppeling tussen de trillingsmetingen en de treineigenschappen in de Quo Vadis-dataset.

Tabel III.4 hieronder geeft een overzicht van de meetlocaties en de bijbehorende dienstregelpunten. Kolom 'dienstregelpunt gerelateerd aan meetlocatie' geeft de aanduiding van het dienstregelpunt zoals die in de Quo Vadis-dataset wordt gebruikt. Tussen haakjes staat daar achter de naam van het dienstregelpunt. In de meest rechter kolom staat per dienstregelpunt een lijst van Quo Vadis-meetstations waar passages op het betreffende dienstregelpunt aan gekoppeld kunnen zijn. Afhankelijk van de gereden route is elke passage op het dienstregelpunt gekoppeld aan metingen op tenminste één van de Quo Vadis-meetstations.

Een kaart met daarop de meetlocaties, de gerelateerde dienstregelpunten en de Quo Vadis-meetstations is bijgevoegd aan het eind van deze bijlage, zie paragraaf .

Tabel III.4 Overzicht van meetlocatie met dichtstbijzijnde dienstregelpunt met de daaraan gelinkte Quo Vadis-meetstations

| # | Meetlocatie                               | Indicatie<br>meetsystemen in<br>dataset | Dienstregelpunt gerelateerd<br>aan meetlocatie | Metingen op Quo Vadis-<br>meetstations                                                                                                                           |
|---|-------------------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Pompstraat 10,<br>Waardenburg             | S1                                      | Mbtwaz<br>(Meters aansluiting Betuwe<br>zuid)  | Deurne (263 en 264)<br>Dodewaard (511 en 512),<br>Esch (273 en 274),<br>Geldrop (253 en 254)<br>Tilburg (101 en 104)<br>Tricht (111 en 114)                      |
| 2 | voormalige stationslocatie,<br>Zaltbommel | S2 - 1<br>S2 - 2<br>S2 - 3              | Ozbn<br>(Zaltbommel Oud)                       | Deurne (263 en 264)<br>Dodewaard (511 en 512)<br>Esch (273 en 274)<br>Geldrop (253 en 254)<br>Tilburg (101 en 104)<br>Tricht (111 en 114)                        |
| 3 | Stationsweg 11, Hedel                     | S3 - 1<br>S3 - 2<br>S3 - 3              | Hdl<br>(Hedel)                                 | Deurne (263 en 264)<br>Dodewaard (511 en 512)<br>Esch (273 en 274)<br>Geldrop (253 en 254)<br>Tilburg (101 en 104)<br>Tricht (111 en 114)                        |
| 4 | onderstation Orthen, Den<br>Bosch         | S4                                      | Htda<br>(Den Bosch noord)                      | Deurne (263 en 264)<br>Esch (273 en 274),<br>Geffen (283 en 284)<br>Tilburg (101 en 104)                                                                         |
| 5 | Willem van Oranjelaan 33,<br>Den Bosch    | S5                                      | Ht<br>(Den Bosch station)                      | Deurne (263 en 264)<br>Dodewaard (511 en 512)<br>Esch (273 en 274)<br>Geffen (283 en 284)<br>Geldrop (253 en 254)<br>Tilburg (101 en 104)<br>Tricht (111 en 114) |

| # | Meetlocatie                        | Indicatie<br>meetsystemen in<br>dataset | Dienstregelpunt gerelateerd<br>aan meetlocatie | Metingen op Quo Vadis-<br>meetstations                                                                                                                           |
|---|------------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 6 | nabij Johan Frisolaan 57,<br>Vught | S6                                      | Vga<br>(Vught Loonsebaan)                      | Deurne (263 en 264)<br>Dodewaard (511 en 512)<br>Esch (273 en 274)<br>Geffen (283 en 284)<br>Geldrop (253 en 254)<br>Tilburg (101 en 104)<br>Tricht (111 en 114) |
| 7 | nabij Spoorstraat 9, Boxtel        | S7                                      | Btl<br>(Boxtel)                                | Deurne (263 en 264)<br>Esch (273 en 274)<br>Geffen (283 en 284)<br>Geldrop (253 en 254),<br>Tilburg (101 en 104)<br>Tricht (111 en 114)                          |

### Beschikbare meetgegevens vanuit Quo Vadis

Zoals eerder genoemd bevat de Quo Vadis-dataset metingen van passerende treinen. Deze gegevens zijn beschikbaar op verschillende niveaus, van grof naar fijn: gegevens op trein-niveau tot gegevens op wiel-niveau. De metingen op de Quo Vadis-meetstations worden echter uitgevoerd op wiel-niveau, bijvoorbeeld wiellast. Vervolgens wordt daaruit parameters als aslast, voertuig-/wagongewicht en treingewicht bepaald. Een volledig overzicht van de beschikbare parameters in de dataset is bijgevoegd in Tabel III.5. Hierbij is de kolom 'Behouden na aggregatie' toegevoegd ten behoeve van paragraaf III.3. Enkele parameters worden hieronder uitgelicht:

- in de dataset wordt het meetniveau van de Quo Vadis-metingen van de betreffende parameter aangeduid met prefixen: 'qtm\_' voor treinniveau, 'qvm\_' voor voertuig-/treinstel-/wagonniveau, 'qam\_' voor asniveau, en 'qwm\_' voor wielniveau;
- uitvoering en datum geven het moment waarop de gemeten trein passeert op het dienstregelpunt. Dit moment verschilt van het moment waarop de trein het Quo Vadis-meetstation passeert (parameters 'qtm\_meettijdstip\_dt' en 'qtm\_kalenderdag');
- op de Quo Vadis-meetstations wordt ook de snelheid gemeten van de doorkomende trein. Deze snelheid is echter vanwege het locatieverschil niet representatief voor de snelheid op de dienstregelpunten en dus ook niet voor de snelheid op de meetlocatie (waar de trillingen worden gemeten). Deze snelheid wordt om die reden niet gebruikt;
- parameter 'Uitvoeringtype' geeft het type trein aan. Goederentreinen worden aangeduid met 'GO';
- parameters 'qwm\_gemiddelde\_last\_kn' en 'qwm\_pieklast\_kn' geven respectievelijk de gemeten statische last en pieklast van het betreffende wiel. De pieklast (gemeten) is hier gedefinieerd als de som van wiellast (gemeten) en dynamische pieklast (niet gemeten). Daarmee wordt de parameter 'qwm\_dyn\_pieklast\_kn' berekend als 'qwm\_pieklast\_kn' minus 'qwm\_gemiddelde\_last\_kn'.

Tabel III.5 Overzicht van parameters in Quo Vadis-dataset, zoals toegelicht in [1]

| Niveau | Parameter       | Omschrijving                                              | Type      | Behouden na<br>aggregatie |
|--------|-----------------|-----------------------------------------------------------|-----------|---------------------------|
| trein  | dienstregelpunt | afkorting van dienstregelpunt (drp) waarop van de passage | ID        | ja                        |
|        | locatie         | gegeven naam aan dienstregelpunt                          | tekst     | ja                        |
|        | uitvoering      | tijd van passage op drp                                   | tijd      | ja                        |
|        | datum           | datum van passage op drp                                  | datum     | ja                        |
|        | spoor           | spoor van passage op drp                                  | ID        | ja                        |
|        | uitvoeringtype  | type trein                                                | categorie | ja                        |

| Niveau                | Parameter                | Omschrijving                                                                               | Type               | Behouden na aggregatie |
|-----------------------|--------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|------------------------|
| treinstel<br>of wagon | treinnummer              | treinnummer                                                                                | ID                 | ja                     |
|                       | qtm_meetunitnr           | nummer van het Quo Vadis-meetstation waarop de meting heeft plaatsgevonden                 | ID                 | nee                    |
|                       | Quo Vadis-sitenaam       | naam van het Quo Vadis-meetstation waarop de meting heeft plaatsgevonden                   | tekst              | ja                     |
|                       | qtm_meettijdstip_dt      | tijdstip van de meting op het Quo Vadis-meetstation                                        | tijd               | nee                    |
|                       | qtm_kalenderdag          | dag van de meting op het Quo Vadis-meetstation                                             | datum              | nee                    |
|                       | qtm_aantal_assen         | aantal assen van de passerende trein                                                       | nr.                | ja                     |
|                       | qtm_snelheid_in_kmu      | snelheid aan begin van de meting                                                           | snelheid           | nee                    |
|                       | qtm_snelheid_uit_kmu     | snelheid aan eind van de meting                                                            | snelheid           | nee                    |
|                       | qtm_rijrichting          | rijrichting op Quo Vadis-meetstation t.o.v. standaardrichting op het betreffende spoor     | categorie          | ja                     |
|                       | qtm_totale_lengte_m      | lengte van de passerende trein                                                             | lengte             | ja                     |
|                       | qtm_totaal_gewicht_ton   | gewicht van de passerende trein                                                            | gewicht            | ja                     |
|                       | qvm_volgorde_in_trein    | volgnummer van treinstel of wagon in de trein                                              | nr.                | nee                    |
|                       | qvm_start_as             | as-volgnummer van de eerst passerende as van voertuig                                      | nr.                | nee                    |
|                       | qvm_eind_as              | as-volgnummer van de laatst passerende as van voertuig                                     | nr.                | nee                    |
|                       | qvm_tag_materieel        | indicatie van materieeltype                                                                | ID                 | nee                    |
|                       | qvm_materieeltype        | indicatie van materieeltype                                                                | tekst              | ja                     |
|                       | qvm_voertuiggewicht_ton  | gewicht van treinstel of wagon                                                             | gewicht            | ja                     |
|                       | qvm_linksrechtsratio     | verhouding tussen gewicht van de linker wielen en de rechter wielen van treinstel of wagon | ratio ( $\geq 1$ ) | ja                     |
|                       | qvm_voorachterratio      | verhouding tussen gewicht van de voorste en achterste assen van treinstel of wagon         | ratio ( $\geq 1$ ) | ja                     |
| as                    | qam_as_volgorde_in_trein | volgnummer van de betreffende as in de trein                                               | nr.                | nee                    |
|                       | qam_aslast_ton           | gewicht op de as                                                                           | gewicht            | ja                     |
|                       | qam_linksrechtsratio     | verhouding tussen gewicht van het linker en rechter wiel                                   | ratio ( $\geq 1$ ) | ja                     |
|                       | qam_diagonale_onbalans   | onbalans t.o.v. het draaistel                                                              | onbalans           | ja                     |
|                       | qam_geldige_wim          | geldigheid van de meting (waarde tussen 0 en 1)                                            | geldigheid         | nee                    |
| wiel                  | qwm_wielzijde            | aanduiding linker of rechter wiel op de betreffende as                                     | categorie          | nee                    |
|                       | qwm_gemiddelde_last_kn   | statische kracht                                                                           | kracht             | ja                     |
|                       | qwm_pieklast_kn          | pieklast (dynamische + statische kracht)                                                   | kracht             | ja                     |
|                       | qwm_type_wielschade      | type defect indien van toepassing                                                          | tekst              | nee                    |
|                       | qwm_wielkwaliteit_factor | getal tussen 0 en 3 voor algemeen oordeel over het wiel                                    | categorie          | nee                    |

| Niveau | Parameter        | Omschrijving                                                                                                          | Type      | Behouden na aggregatie |
|--------|------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|------------------------|
|        | qwm_rms_laag_kn  | effectieve waarde voor frequenties tussen 50-200 Hz per wiel. Wordt gebruikt om 'qwm_wielkwaliteit_factor' te bepalen | RMS       | ja                     |
|        | qwm_rms_hoog_kn  | effectieve waarde voor frequenties tussen 200-1000 Hz per wiel. Wordt gebruikt om de polygonisatie te bepalen         | RMS       | ja                     |
|        | qwm_wiel_vlak_kn | indicatie of er sprake is van een vlakke plaats op het wiel                                                           | categorie | nee                    |

### III.3 Combineren datasets

Tot nu toe zijn de beschikbare twee datasets afzonderlijk beschreven. Een belangrijke stap is het combineren van de trillingsmetingen met treineigenschappen uit de Quo Vadis-dataset. Hiervoor zijn een aantal parameters van belang: locatie, datum en tijd, rijrichting, type trein, en of de passage een passage van de meettrein betreft.

Om tot een eenduidige koppeling tussen de datasets te komen zijn enkele voorbereidingsstappen noodzakelijk. Deze betreffen vooral de Quo Vadis-dataset, en zullen hieronder verder worden toegelicht. Deze paragraaf eindigt met de koppelingsprocedure tussen passages waarvoor trillingsmetingen beschikbaar zijn en de bijbehorende passages in de Quo Vadis-dataset.

#### Filter op passages van goederentreinen in Quo Vadis-data

De trillingsmetingen zijn alleen uitgevoerd voor goederentreinen. De dataset vanuit Quo Vadis bevat allerlei soorten treinen, waaronder goederentreinen. Goederentreinen staan in de Quo Vadis-dataset aangegeven met kenmerk 'GO' bij parameter 'Uitvoeringstype'. Op basis van deze parameter wordt de Quo Vadis-dataset gefilterd zodat enkel nog passages van goederentreinen over blijven.

#### Vaststellen meettrein passages

In de Quo Vadis-dataset wordt de meettrein gekenmerkt voor het aantal assen (bekend) en de typering van materieel met aan beide uiteinden een locomoties (type TRAXX en type Vectron). Deze eigenschappen blijken voldoende om de meettrein passages uniek te herkennen in de dataset. De samenstelling van de meettrein is hier altijd correct. De meettrein daarnaast op meerdere Quo Vadis-meetstations gemeten, waaruit blijkt dat er een lichte variatie zit in de meetwaarden.

Gegevens van deze passages worden aangemerkt met een extra parameter 'meettrein' met waarden 'True' of 'False' (waarbij vanzelfsprekend alle niet-meettrein passages worden aangemerkt als 'False'). Vervolgens wordt afhankelijk van de voorop rijdende locomotief de opsplitsing gemaakt naar de verschillende onderdelen op basis van as-tellingen. Elk onderdeel wordt daarnaast nog eens aangemerkt met parameter 'meettrein\_part', waarbij de aanduiding in lijn is met die geïntroduceerd in de dataset met trillingsmetingen in paragraaf III.1.

#### Vaststellen rijrichting op dienstregelpunt

Voor het combineren van de datasets is rijrichting een cruciale indicator. De rijrichting is in de Quo Vadis-dataset alleen beschikbaar op de Quo Vadis-meetstations, en niet op de dienstregelpunten. Kenmerkend voor het onderzoek is dat op alle meetlocaties (waarop trillingen worden gemeten) de spoorbaan in noord-zuidelijke richting ligt. De rijrichting kan dus altijd worden aangeduid met noord-naar-zuid (indicatie 'N-Z') of zuid-naar-noord (indicatie 'Z-N').

De rijrichting op een enkel Quo Vadis-meetstation blijkt niet direct indicatief voor de rijrichting op het dienstregelpunt. Deze rijrichtingen zijn, afhankelijk van de ligging van de spoorbaan op het betreffende meetstation, te herleiden tot 'noord-zuid' of 'oost-west'. Passages waarvoor vanuit de Quo Vadis-

meetstations enkel 'oost-west' rijrichtingen geregistreerd zijn, zeggen niet direct iets over de rijrichting op het dienstregelpunt. Dergelijke passages komen regelmatig in de dataset voor.

De rijrichting op het dienstregelpunt is wel altijd te achterhalen aan de hand van doorkomsttijden en geografische liggingen. De passerende trein in de Quo Vadis-dataset is immers altijd geregistreerd op tenminste twee verschillende locaties: het dienstregelpunt en tenminste één Quo Vadis-meetstation. Van beide zijn passagetijden beschikbaar, en de locatie is bekend. Op basis van de passagetijden op deze punten wordt achterhaald of de trein van noord naar zuid reed, of andersom. Zodoende wordt de rijrichting op het dienstregelpunt achterhaald.

### Aggregatie van Quo Vadis-data naar kengetallen per passage

Deze bewerkingsstap betreft het aggregeren van de data naar het niveau van een treinpassage. Bepaalde variabelen van een trein, zoals het gemeten gewicht en de gemeten krachten, zijn beschikbaar op het niveau van wagons, assen of wielen, zie Tabel III.5. In de analyse wordt de treinpassage als geheel geanalyseerd. Om die reden dienen gegevens uit de Quo Vadis-dataset te worden geaggregeerd naar waarden per passage. Daarbij wordt onderscheid gemaakt tussen numerieke waarden, en niet numerieke waarden.

De numerieke parameters die aan wagons of assen zijn gebonden (zoals aslast en polygonisatie van de wielen) worden per passage geaggregeerd. Dat kan door het gemiddelde te nemen, maar ook door een ander kengetal te gebruiken. Zodoende worden alle numerieke parameters uit Tabel III.5. geaggregeerd naar passage-niveau volgens de volgende methoden: Gemiddelde; p80-waarde; p90-waarde; maximum; minimum; p10-waarde; p20-waarde. Daarnaast is ook de standaarddeviatie bepaald. p#-waarde staat hier voor de percentielwaarde, dit is de waarde waar #% van de gemeten waarden onder liggen. De geaggregeerde waarden worden per parameter aangeduid met een suffixen: '\_mean', '\_p80', '\_p90', '\_max', '\_min', '\_p10', '\_p20', en '\_std', respectievelijk voor de aggregatiemethoden.

Gemiddelde is een voor de hand liggende aggregatiemethode. Daarnaast is aggregatie naar de maximum waarde ook te verantwoorden vanuit de verwachting dat bijvoorbeeld de zwaarst belaste assen de meeste invloed zullen hebben op de trillingsniveaus. Aggregatie naar p80- en p90-waarden zijn een tussenweg tussen gemiddelde en maximum. Beide leggen het zwaartepunt meer richting het maximum (bijvoorbeeld naar de zwaardere assen), maar zijn minder gevoelig voor 'uitschieters' dan de maximumwaarde. De minimum, p10- en p20-waarden zijn vergelijkbare aggregatiemethoden voor het geval waar parameters omgekeerde correlatie vertonen met trillingsniveau (waar dus juist kleine waarden voor de parameter veel invloed hebben op het trillingsniveau in vergelijking met hoge waarden).

Het is belangrijk op te merken dat het aggregeren van numerieke meetwaarden in dit stadium slechts een voorbereidingsstap vormt. De keuze voor de wijze van aggregeren zal worden uitgevoerd in een later stadium van de analyse. Daarnaast is eerder al eens vermeld dat dezelfde trein op meerdere Quo Vadis-meetstations kan zijn gemeten. In dat geval worden numerieke parameters geaggregeerd over alle meetwaarden (dus over metingen van alle meetstations), in tegenstelling tot het verkiezen van één meetstation.

Een bijzondere niet-numerieke parameter is 'qvm\_materieeltype', deze geeft het type materieel (type wagon of locomotief) aan. Deze parameter wordt geaggregeerd naar een treinsamenstelling waarbij enkel de unieke materieeltypen en het aantal hiervan in de trein gehandhaafd blijven. Zo blijft in de geaggregeerde dataset altijd mogelijk de originele treinsamenstelling te achterhalen.

Tot slot zijn er in Tabel III.5 parameters die niet geaggregeerd hoeven te worden, dit zijn bijvoorbeeld de parameters die al op treinniveau (en dus passage niveau) beschikbaar zijn. Ook zijn er parameters die zich niet lenen voor aggregatie, of waarvan aggregatie geen meerwaarde geeft, zoals bijvoorbeeld 'qwm\_type\_wielschade', 'qtm\_meetunitnr' of 'qam\_as\_volgorde\_in\_trein'.

### Koppelen van passages in D2S dataset met metadata in Quo Vadis-dataset

Met de hiervoor beschreven voorbereidingsstappen ontstaan twee datasets met treinpassages. Eén dataset bevat de uitkomsten van de trillingsmetingen op de meetlocaties, de andere bevat eigenschappen van passerende treinen op de dienstregelpunten. Passages uit de trillingsmetingen dienen gelinkt te worden aan



de treineigenschappen uit de geaggregeerde Quo Vadis-dataset. Het koppelen van passages gebeurt in eerste instantie op basis van de volgende criteria, en dan en slechts dan als één enkele match tussen beide datasets gevonden wordt:

- *Locatie*. De meetlocatie van de passage dient overeen te komen met een Quo Vadis-passage op het bijbehorende dienstregelpunt, zie Tabel III.4;
- *Rijrichting*. De rijrichting meegegeven met de trillingsmeting dient overeen te komen met de rijrichting van de passage op het bijbehorende dienstregelpunt;
- *Meettrein*. De indicatie bij de parameters 'meettrein' én 'meettrein\_part' dienen overeen te komen;
- *Passagetijd*. De passagetijden dienen voldoende dicht bij elkaar te liggen. Vanwege het afstandsverschil tussen de meetlocaties en de bijbehorende dienstregelpunten wordt hiervoor een marge aangehouden van 2 minuten.

Vervolgens wordt voor de passages waarvoor geen match met een passage in Quo Vadis is gevonden gekeken naar de passage identificatie die is meegegeven in de dataset met de trillingsmetingen (zie parameter 'Passage' in Tabel III.2). Als dezelfde trein dan op een andere meetlocatie wel is gelinkt aan een trein in de Quo Vadis-dataset, dan wordt deze link overgenomen. Dit is voornamelijk van toepassing op de passages van meetlocatie S4, aangezien daar niet direct een representatief dienstregelpunt in de buurt is.

### Vaststellen van bereden spoor op meetlocatie

Voor de overdracht van trillingen van trein naar de meetinstallatie naast het spoor is het bereden spoor van belang. Het bereden spoor is dermate belangrijk dat voor elk van de sporen een afzonderlijke analyse zal worden uitgevoerd. Deze data-analyse ligt niet binnen de scope van deze bijlage, maar tekent wel het belang van het vaststellen van het spoor op de meetlocatie.

Vanuit de Quo Vadis-data is het bereden spoor op het dienstregelpunt bekend. Het is noodzakelijk om, ondanks dat de dienstregelpunten in de buurt liggen van de meetlocaties, na te gaan of en hoe deze sporen relateren aan het bereden spoor op elk van de meetlocaties. Daarnaast zijn de passages die gematcht zijn op basis van passage identificatie gekoppeld via andere dienstregelpunten. Hiervoor is het ook noodzakelijk om te na te gaan of het bereden spoor op dat dienstregelpunt nog door te vertalen is naar een spoor de meetlocatie.

Tabel III.6 hieronder geeft per meetlocatie een overzicht van de sporen op het dienstregelpunt en de sporen op de meetlocatie. Hiervan is voor de passages bekend op welk spoor de trein het dienstregelpunt is gepasseerd, echter is het van belang om daaruit het bereden spoor op de meetlocatie te achterhalen. Dit blijkt vanwege tussenliggende wissels niet voor alle locaties en sporen eenduidig, om die reden staan er soms meerdere sporen in de kolom 'Sporen op meetlocatie' ingevuld. Enkele bijzonderheden (in aanvulling op opmerkingen opgenomen in de tabel) worden na de tabel toegelicht.

Tabel III.6 Beschikbare sporen per meetpunt en dienstregelpunt (zoals gepresenteerd in dataset)

| Meetlocatie         | Gerelateerd dienstregelpunt | Spoor op dienstregelpunt | Spoor op meetlocatie | Opmerking                                                      |
|---------------------|-----------------------------|--------------------------|----------------------|----------------------------------------------------------------|
| S1 (Waardenburg)    | Mbtwaz                      | CJ                       | CJ                   | spoor Mbtwaz-424 komt alleen voor bij enkele meettreinpassages |
|                     |                             | 424                      | BJ                   |                                                                |
|                     |                             | BJ                       | BJ                   |                                                                |
| S2 (Oud Zaltbommel) | Ozbm                        | 703                      | 703                  |                                                                |
|                     |                             | 702                      | 702                  |                                                                |
|                     |                             | 701                      | 701                  |                                                                |
| S3 (Hedel)          | Hdl                         | B                        | B                    |                                                                |
|                     |                             | C                        | C                    |                                                                |

| Meetlocatie             | Gerelateerd dienstregelpunt | Spoor op dienstregelpunt | Spoor op meetlocatie | Opmerking                                                                                              |
|-------------------------|-----------------------------|--------------------------|----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| S4 (Den Bosch, Orthen)  | Hdta                        | niet beschikbaar         | C                    | oostelijke spoor; aangenomen dat treinen met rijrichting zuid-naar-noord dit spoor berijden            |
|                         |                             | niet beschikbaar         | B                    | westelijke spoor; aangenomen dat treinen met rijrichting noord-naar-zuid dit spoor berijden            |
| S5 (Den Bosch, station) | Ht                          | 701                      | CI of CH             | ter hoogte van station Den Bosch is spoor 701 een zijspoor van spoor 702                               |
|                         |                             | 702                      | CI of CH             | ter hoogte van station Den Bosch is spoor 702 een zijspoor van spoor 703                               |
|                         |                             | 703                      | CI of CH             | op dit spoor zijn meettrein passages geregistreerd met rijrichting zuid-naar-noord                     |
|                         |                             | 704                      | CJ, CI of CH         |                                                                                                        |
|                         |                             | 705                      | CJ, CI of CH         | op dit spoor zijn onder andere enkele meettrein passages geregistreerd met rijrichting noord-naar-zuid |
|                         |                             | 706                      | CJ, CI of CH         |                                                                                                        |
|                         |                             | 707                      | CJ                   |                                                                                                        |
|                         |                             | 708                      | CJ                   |                                                                                                        |
| S6 (Vught)              | Vga                         | 763                      | 763                  |                                                                                                        |
|                         |                             | 762                      | 762                  |                                                                                                        |
|                         |                             | 766                      | 766                  |                                                                                                        |
| S7 (Boxtel)             | Btl                         | 501                      | 501                  |                                                                                                        |
|                         |                             | 502                      | 502                  |                                                                                                        |
|                         |                             | 503                      | 502 of 504           |                                                                                                        |
|                         |                             | 504                      | 504                  |                                                                                                        |
|                         |                             | 505                      | 505                  |                                                                                                        |
|                         |                             | 506                      | 505 of 507           |                                                                                                        |
|                         |                             | 507                      | 507                  |                                                                                                        |
|                         |                             | 508                      | 507                  | spoor leidt tot spoor 507 t.h.v. meetlocatie                                                           |

Naar aanleiding van contact met ProRail, en het analyseren van sporenplannen zijn enkele aanvullende bijzonderheden op bovenstaande tabel hieronder weergegeven:

- meetlocatie S1. Enkele passages zijn gekoppeld met Quo Vadis-data via dienstregelpunt Ozbm. Voor deze passages wordt aangenomen dat passages op spoor Ozbm-702 doorkomen op spoor CJ, en dat passages op spoor Ozbm-701 doorkomen op spoor BJ op meetlocatie S1;
- meetlocatie S2. Enkele passages zijn gekoppeld met Quo Vadis-data via dienstregelpunt Mbtwaz. Het betreft hier alleen passages op spoor Mbtwaz-BJ. Voor deze passages wordt aangenomen dat ze passeren op spoor 701 op meetlocatie S2;
- meetlocatie S4. Passages op deze meetlocatie zijn gekoppeld via andere dienstregelpunten, vanwege het gebrek aan representativiteit van dienstregelpunt Hdta. Via andere dienstregelpunten is het bereden spoor op meetlocatie S4 niet voldoende te achterhalen. Om die reden wordt aangenomen dat treinen de meetlocatie altijd passeren op het spoor in de rijrichting rechts. Voor deze meetlocatie betekent dat spoor CG voor treinen met rijrichting zuid-naar-noord, en spoor BG voor treinen met rijrichting noord-naar-zuid;
- *meetlocatie S5*. Dienstregelpunt Ht ligt op station 's-Hertogenbosch. Hier zijn diverse sporen beschikbaar. Daarnaast zijn er diverse mogelijkheden om van sporen te wisselen tussen het dienstregelpunt en de

meetlocatie S5. De bereden sporen op dienstregelpunt worden volgens de volgende observaties en aannames vertaald naar bereden spoor op meetlocatie S5:

- passages op Ht-707 en Ht-708 leiden naar CJ op meetlocatie;
- enkele passages zijn gelinkt via dienstregelpunt Vga. Hierbij leiden passages op spoor Vga-762 naar spoor CI, en passages op spoor Vga-763 naar spoor CH op meetlocatie;
- aanname: passages op Ht-703 met rijrichting zuid-naar-noord komen van spoor CH, dat is in die rijrichting het meest rechter spoor. Datzelfde geldt voor sporen Ht-702 en Ht-701;
- aanname: passages op Ht-704 met rijrichting zuid-naar-noord komen vanaf spoor CH, dat is in die rijrichting het meest rechter spoor;
- aanname: meettrein passeert spoor Ht-705 enkele keren in rijrichting noord-naar-zuid, waarbij wordt aangenomen dat deze passeert op spoor CI op de meetlocatie, dat is in de rijrichting het rechter spoor richting Boxtel;
- aanname: passages op Ht-706 met rijrichting noord-naar-zuid wisselt niet naar spoor richting de meetlocatie en passeert dus op spoor CJ op de meetlocatie;
- *meetlocatie S7*. Net als bij meetlocatie S5 bevinden zich enkele wissels tussen het dienstregelpunt en de meetlocatie S7. Echter heeft dit alleen invloed op de passages op sporen 503 en 506 op het dienstregelpunt. Voor deze sporen is niet te achterhalen naar welk spoor op de meetlocatie ze leiden. Bovendien (zo blijkt) zijn betreft slechts enkele passages.

Passages waarvoor ook na bovenstaande observaties en aannames het bereden spoor op de betreffende meetlocatie niet eenduidig is vast te stellen worden, krijgen de indicatie 'onbekend'. Vanwege het belang van het bereden spoor, blijken deze passages niet bruikbaar in de data-analyse. Dit leidt tot een laatste selectie op de resulterende goederentreinpassages om tot een dataset te komen met enkel 'bruikbare passages'. Paragraaf III.4 wordt hieraan gewijd.

### III.4 Selectie van bruikbare passages

Tot nu toe is een dataset opgebouwd waarbij uitkomsten van trillingsmetingen van goederentreinpassages zijn gecombineerd met treineigenschappen vanuit de Quo Vadis-dataset. Daarbij is nadrukkelijk aandacht gegeven aan het vaststellen van het bereden spoor op de meetlocatie. Voordat de dataset wordt gebruikt als input voor de data-analyse volgt in deze paragraaf een laatste selectie van passages. Deze selectie leidt tot een dataset met 'bruikbare passages'. Deze passages voldoen aan de volgende eisen:

Vanuit het uitgangspunt van een passage vanuit de dataset met trillingsmetingen heeft een bruikbare passage een:

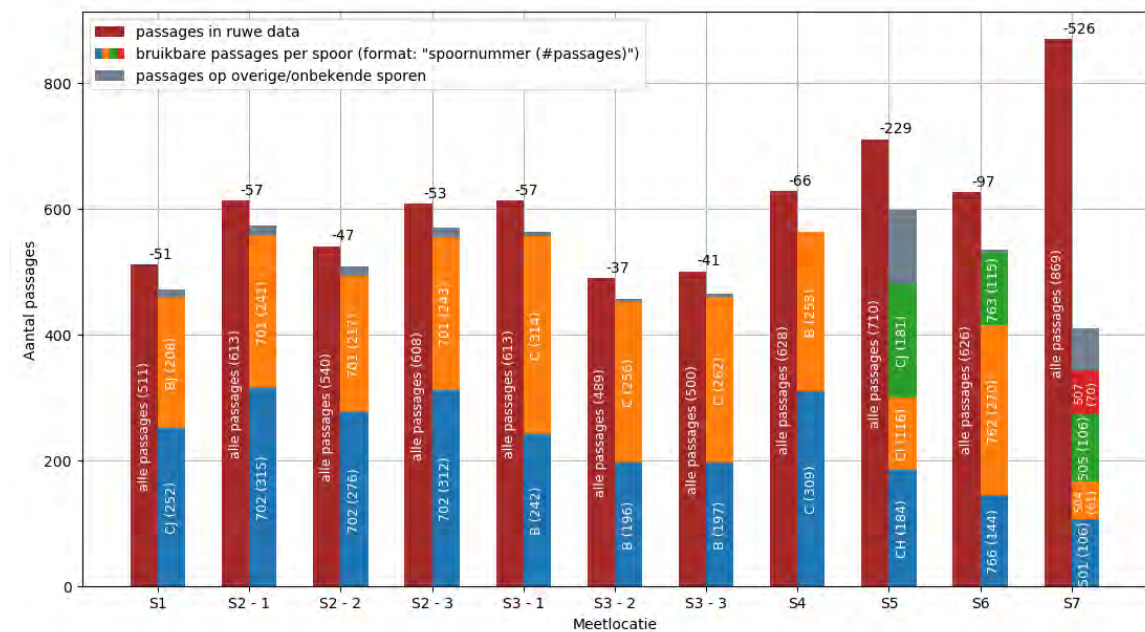
- 1 bevestigde snelheid, zie Tabel III.2;
- 2 koppeling met één enkele passage vanuit de Quo Vadis-dataset op basis van doorkomsttijden, locatie, rijrichting en meettreinaanduiding, of op basis van passage identificatie;
- 3 vastgesteld bereden spoor op de meetlocatie, en dit spoor moet voldoende bereden zijn;
- 4 de passage betreft één enkele goederentrein, en is niet vertroebeld door gelijktijdige passage op een naastliggend spoor.

Als een passage niet voldoet aan één van bovenstaande criteria, dan valt deze passage alsnog af. Het derde criterium relateert aan de model-analyse. Aangezien de data-analyse op deze dataset zal plaatsvinden per locatie voor de beschikbare sporen afzonderlijk, dienen er voor de sporen wel 'voldoende' passages te zijn. Als vuistregel wordt hiervoor gehanteerd 'meer dan dertig passages'.

Naar aanleiding van bovenstaande definitie ontstaat een overzicht van het aantal bruikbare passages in vergelijking met het aantal passages die origineel aangeleverd zijn in de dataset met trillingsmetingen. Zie hiervoor Afbeelding III.1. Deze afbeelding geeft een overzicht van het aantal passages voor elk van de meetlocaties en meetsystemen. Telkens geeft de linker balk het aantal passages voor het betreffende meetsysteem die aangeleverd zijn in de dataset (ruwe data), en de rechter balk het aantal bruikbare passages met een uitsplitsing naar de beschikbare sporen (met een onderverdeling naar 'bruikbare passages per spoor', en 'passages op overige/onbekende sporen'). Per locatie is boven de balken het verschil tussen 'alle

passages' en 'bruikbare passages' weergegeven. Dit geeft een kwantificatie van het dataverlies dat optreedt tijdens de bewerkingsstappen.

Afbeelding III.1 Aantal passages per meetlocatie per meetsysteem met uitsplitsing naar spoor



### Dataverlies

Het verlies van data kan in Afbeelding III.1 ruwweg worden opgesplitst in twee oorzaken: het bereiden spoor is onbekend, of er treedt verlies op bij het verwerken van de data. Het aandeel verlies met de eerste oorzaak is in de afbeelding terug te zien in de rechter balken met aanduiding 'passages op overige/onbekende sporen'. Het hoogteverschil tussen de linker en rechter balken duidt op verlies van passages met de tweede oorzaak.

De passages die afvallen vanwege 'overig/onbekend spoor' zijn voornamelijk passages die via een ander dienstregelpunt gekoppeld zijn aan een passage in Quo Vadis dan het 'eigen' dienstregelpunt behorende bij de betreffende locatie. Uitzonderingen hierop zijn meetlocaties S5 en S7. Daar treedt extra verlies op omdat deze locaties betrekkelijk veel sporen hebben. Enerzijds is niet elk spoor op het dienstregelpunt direct te relateren aan een spoor op de meetlocatie, anderzijds moet hier een vergelijkbaar aantal passages worden verdeeld over meerdere sporen.

Voor een aantal passages is er geen koppeling te vinden met een passage in de Quo Vadis-data, deze passages zijn dan ook niet bruikbaar in de data-analyse. Daarnaast treedt dataverlies op omdat voor een aantal passages geen snelheid vastgesteld heeft kunnen worden. Deze zijn desalniettemin opgenomen in de aangeleverde dataset, maar vervallen ten behoeve van de data-analyse.

Naar aanleiding van Afbeelding III.1 zijn er een aantal bijzonderheden te vermelden:

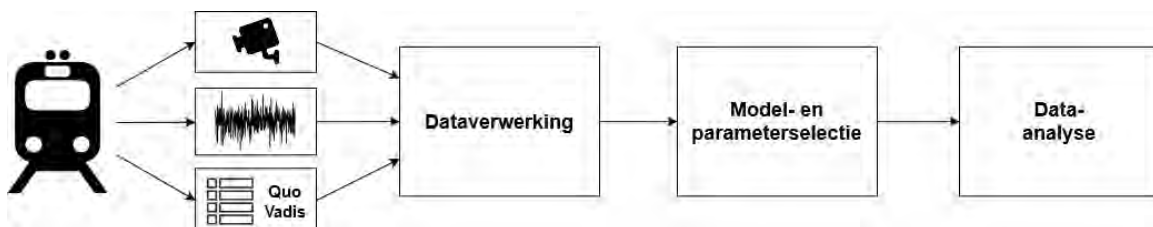
- bij meetlocatie S7 treedt betrekkelijk veel verlies van data op. Het bleek hier voor veel passages onduidelijk om het signaal aan een goederentrein te koppelen, en daarvan de bijbehorende snelheid vast te stellen. Het grootste verlies voor deze locatie treedt daarom op vanwege het ontbreken van een vastgestelde rijsnelheid. De rijsnelheid is hier lastiger te bepalen, vanwege de brede sporenbundel (6 sporen) en de daarmee relatief grote afstand van een aantal treinen tot de camera waarmee de snelheid wordt bepaald;
- bij meetsysteem S2-2 is aan het begin van de meetcampagne een hapering geweest in de registratie. Hierdoor ontbreken enkele dagen aan meetdata in vergelijking met de andere meetsystemen op meetlocatie S2;

- bij meetlocatie S3 is aan het eind van de meetcampagne de stroomvoorziening voor de meetinstallaties onderbroken als gevolg van werkzaamheden. Daarbij is meetsysteem S3-1 toch langer voorzien gebleven van stroom, waardoor slechts twee volledige daten ontbreken;
- op meetlocatie S1 zijn voor enkele dagen in januari geen metingen beschikbaar. De oorzaak hiervan is niet bekend;
- op meetlocatie S6 ontbreekt meetdata van een drietal dagen in februari. Vermoedelijk wordt dit veroorzaakt door een tijdelijke onderbreking van de stroomvoorziening.

### III.5 Resulterende dataset voor analyse

Naar aanleiding van de uitgevoerde trillingsmetingen bij goederentreinen is een dataset opgebouwd ten behoeve van de beoogde data-analyse. Deze dataset is initieel opgebouwd uit een combinatie van trillingsdata van passerende goederentreinen op elk van de meetlocaties, gecombineerd met treineigenschappen uit de Quo Vadis-dataset aangeleverd door ProRail. Om tot een uniforme dataset te komen die geschikt is voor de data-analyse zijn diverse voorbewerkingsstappen uitgevoerd. Afbeelding III.2 hieronder vat de bewerkingsstappen op de datasets samen.

Afbeelding III.2 Schematische weergave van dataflow van trillingsmetingen naar een voor analyse geschikte bruikbare dataset



De resulterende dataset geeft per passage de gemeten trillingsniveaus uitgedrukt in  $V_{\text{eff,max}}$  en  $V_{\text{RMS}}$ . Daarnaast is de snelheid van de trein bekend op de meetlocatie. Ook zijn per passage diverse andere treineigenschappen beschikbaar, waaronder kengetallen voor aslast, wiellast en wielkwaliteit, maar ook het type materieel en het bereden spoor op de meetlocatie. Een extra filter stap leidt tot een dataset met bruikbare passages. Bruikbare passages worden gekenmerkt door: een vastgestelde passagesnelheid; een koppeling met Quo Vadis-data; een vastgesteld bereden spoor op de meetlocatie; het trillingssignaal betreft de passage van één enkele goederentrein. De dataset bevat de passages van de meettrein (als geheel, en opgesplitst naar de zes onderdelen) en van 'reguliere' goederentreinen. Dit onderscheid tussen 'meettrein' en 'niet-meettrein' is in de dataset duidelijk gekenmerkt.

### III.6 Afsluitende opmerkingen

Tot slot gaat deze paragraaf in op enkele kanttekeningen bij de dataset. Dit betreft factoren die ruis kunnen veroorzaken in de dataset:

- *bepaling van snelheid.* De snelheid van de passerende treinen op de meetlocatie wordt vastgesteld aan de hand van beeldopnames waar mogelijk, en anders op basis van doorkomsten op andere locaties. Hierbij treedt een onzekerheid op, naar verwachting een afwijking tot 10 % van de daadwerkelijk gereden snelheid;
- *bereden spoor op meetlocatie.* Zoals eerder beschreven zijn er voor een aantal locaties aannames gemaakt bij het afleiden van het bereden spoor op meetlocatie van het bereden spoor op het dienstregelpunt. Dit betreft voornamelijk meetlocatie S4 en S5. Bij ter hoogte van meetlocatie S4 zijn slechts twee sporen en daar is de aanname dat de rijrichting bepalend is voor het bereden spoor: treinen passeren op het in rijrichting rechter spoor. Deze aanname is gebaseerd op de norm dat treinen in Nederland op het rechter spoor rijden. Echter zou het voor een enkele trein kunnen voorkomen dat het op het linker spoor heeft gereden, dit zou ruis kunnen veroorzaken in de dataset voor deze meetlocatie.

De aannames voor meetlocatie S5 zijn wat uitgebreider. Om dezelfde reden kan hier extra ruis in de dataset ontstaan omdat het bereden spoor ter hoogte van de meetlocatie niet voor elk spoor met zekerheid vastgesteld kan worden;

- *koppeling met Quo Vadis-gegevens*. Passages vanuit de trillingsdata worden gekoppeld aan passages uit de Quo Vadis-dataset. Deze koppeling is conservatief opgezet: er wordt eerder geen koppeling gevonden dan dat er dubbele koppelingen plaatsvinden. Ook worden data alleen gekoppeld als er één enkele koppeling mogelijk is. De situatie zou zich onverhoopt kunnen voordoen dat een passage toch wordt gekoppeld aan de verkeerde passage in Quo Vadis. In dat geval moet de 'juiste' trein in de Quo Vadis-dataset ontbreken, en moet er bij toeval een andere passage in de Quo Vadis-data aanwezig zijn die aan de koppelingscriteria voldoet.

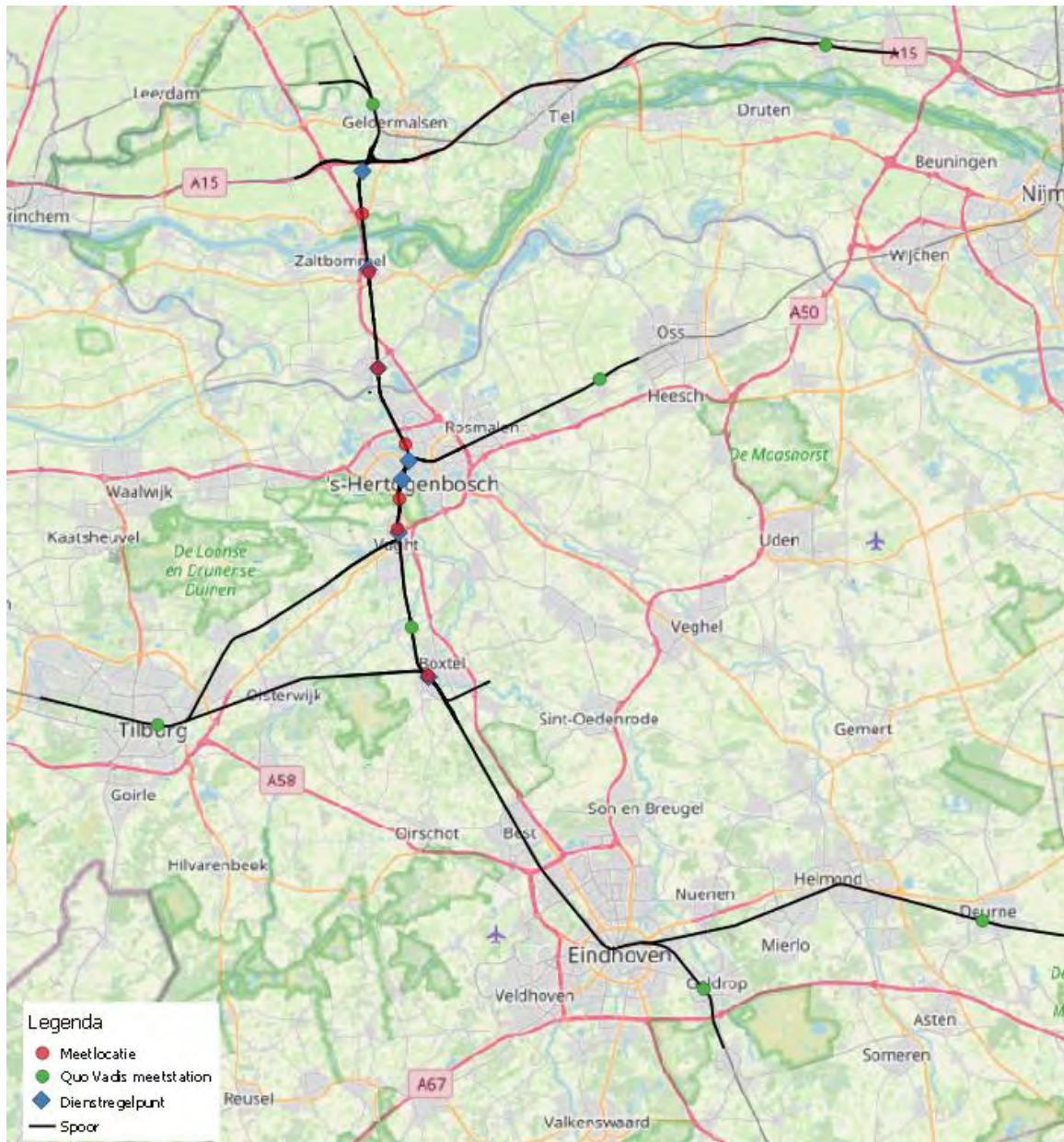
### III.7 Literatuurlijst

- 1 ProRail (2016). Productbeschrijving Quo Vadis. 04-01-2016, definitief.



### III.8 Kaart met meetlocaties, dienstregelpunten en Quo Vadis-meetstations

Afbeelding III.3 Kaart met meetlocaties, dienstregelpunten en Quo Vadis-meetstations



# IV

## BIJLAGE: PARAMETER- EN MODELSELECTIE OP BASIS VAN LOCATIE WAARDENBURG

In opdracht van ProRail B.V. heeft Witteveen+Bos trillingsmetingen uitgevoerd aan goederentreinpassages op een zevental locaties langs het spoor tussen Meteren en Boxtel. De metingen hebben als doel de relatie tussen goederentreinsnelheid en trillingsniveau, en de onderliggende parameters die daarop van invloed zijn, inzichtelijk te maken.

Tijdens dit onderzoek zijn niet alleen de regulier passerende goederentreinen gemeten, maar is ook een proef met een meettrein uitgevoerd. Deze meettrein bestond uit verschillende series wagons met verschillende beladingen en heeft een aantal keren met verschillende snelheden over het traject gereden. Voor elk van de locaties is naar aanleiding van de metingen een dataset van treinpassages opgebouwd met daarin voor de onder andere de het gemeten trillingsniveau, gereden snelheid, en andere relevante eigenschappen van de trein waaronder wiellasten, aslasten en materieeltype.

Het doel van de data-analyse is het verwerven van inzicht in de relatie tussen de rijnsnelheid van goederentreinen en trillingen op maaiveld en in woningen. Op basis van het onderzoek gedifferentieerd rijden (2016) is bekend dat de deze relatie afhankelijk is van een aantal eigenschappen van de passerende goederentreinen en van de locatie. In dit onderzoek zal voor de locaties uit de praktijkproef worden onderzocht wat de relatie is en welke treinparameters daarin bepalend zijn. In eerdere onderzoeken naar trillingen is multivariate regressie analyse ingezet om de relatie tussen snelheid en trillingen te bepalen. Dat type analysemodel heeft bruikbare inzichten opgeleverd, maar is wel beperkt doordat vooraf de aard van de relatie (3<sup>e</sup>-graads polynoom) a priori wordt vastgelegd. In dit project wordt naast dit multivariate model een alternatief analysemodel toegepast uit de hoek van de datamining en machine learning, namelijk een random forest model.

In eerdere projecten hebben we ervaren dat het zinvol is zowel machine learning modellen als multivariate regressieanalyse uit te voeren. Een random forest-model is voor dit type analyse en data geschikt omdat er veel parameters van invloed zijn op de trillingsemissie van een passerende trein. De invloeden van de verschillende parameters verschillen per locatie. In tegenstelling tot bijvoorbeeld een regressiemodel ligt bij een random forest-model de modelstructuur niet vooraf vast. Een random forest-model zoekt juist naar deze structuren in de data: met deze techniek wordt de data automatisch gegroepeerd en gecategoriseerd op basis van gedeelde kenmerken. Een regressieboom heeft bovendien als voordeel dat een opdeling in subgroepen eigenlijk overbodig wordt, omdat de methode zelf deze opdeling al bepaalt aan hand van de data. Daarbij komt dat juist een random forest uitermate goed geschikt is voor dit type analyse en vaak beter presteert (d.w.z. de afwijking in de voorspelling is kleiner, zie ook paragraaf IV.4) dan multivariate regressieanalyse.

Deze bijlage vergelijkt de prestaties van deze modellen, zodat uiteindelijk een besluit wordt genomen over het analysemodel dat voor de meetlocaties wordt toegepast. De modellen worden met elkaar vergeleken aan de hand van de beschikbare data voor één meetlocatie.

Voor dit onderzoek is gekozen voor de dataset van meetlocatie Waardenburg. De dataset van Waardenburg heeft de voorkeur aangezien er tijdens de meetperiode en het verwerken van de dataset weinig bijzonderheden zijn geconstateerd. Bij meetlocatie Waardenburg zijn twee sporen aanwezig.

Vanwege het afstandsverschil tussen spoor en meetopstelling, en daarmee de mogelijke verschillen in trillingsoverdracht in de bodem, zullen modellen worden afgeleid voor elk spoor afzonderlijk. Dit onderbouwt de keuze voor deze locatie, aangezien de dataset slechts gesplitst dient te worden over een tweetal sporen.

#### Leeswijzer

De opbouw van deze bijlage, en daarmee de modelselectieprocedure, is als volgt: Allereerst zal in paragraaf IV.1 kort worden ingegaan op de beschikbare dataset. Vervolgens zullen beide modeltypen worden toegelicht in paragraaf IV.2. Paragraaf IV.3 gaat in op de selectie van input parameters voor beide modellen. Hieruit volgt een selectie van de meest relevante input parameters, waar in het kader van 'gedifferentieerd rijden' de parameter 'snelheid' er één van zal zijn. Met de juiste parameters zullen in paragraaf IV.4 diverse modellen worden afgeleid en vervolgens met elkaar worden vergeleken. Hieruit volgt concluderend het model dat zal worden gebruikt voor de data-analyse van alle meetlocaties. Tot slot zal in paragraaf IV.7 worden ingegaan op de interpretatie en de analyse-aanpak voor het geselecteerde model.

### IV.1 Beschrijving van de dataset

De trillingsmetingen aan goederentreinpassages zijn uitgevoerd op een zevental locaties langs het spoor tussen Meteren en Boxtel. Voor elk van de locaties is naar aanleiding van de metingen een dataset van treinpassages en bijbehorende waarden voor trillingsniveaus opgebouwd. In deze dataset wordt elk van deze meetlocaties aangeduid met een locatieaanduiding. Deze locatieaanduiding wordt ook in deze bijlage gebruikt in tekst en figuren. Tabel IV.1 geeft een overzicht van de zeven meetlocaties, de aanduiding van de meetlocatie in de dataset en de bereden sporen. De spoorweergave komt overeen met de volgorde van de sporen gezien vanuit de meetopstelling (bijvoorbeeld vanuit meetsysteem S1 gezien is CJ het dichtstbijzijnde spoor).

Tabel IV.1 Aanduiding van locaties en beschikbare meetsystemen per meetlocatie

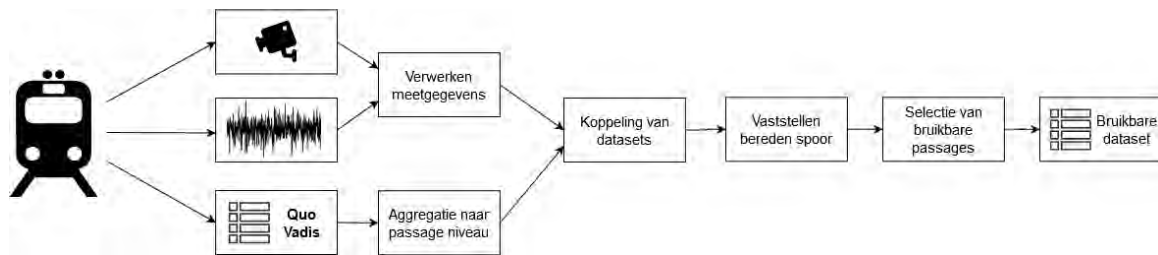
| # | Meetlocatie                            | Aanduiding in dataset | Beschikbare meetsystemen   | Ligging t.o.v. spoor | Bereden sporen t.h.v. meetlocatie |
|---|----------------------------------------|-----------------------|----------------------------|----------------------|-----------------------------------|
| 1 | Pompstraat 10, Waardenburg             | S1                    | S1                         | oostzijde            | CJ en BJ                          |
| 2 | voormalige stationslocatie, Zaltbommel | S2                    | S2 - 1<br>S2 - 2<br>S2 - 3 | oostzijde            | 702 en 701                        |
| 3 | Stationsweg 11, Hedel                  | S3                    | S3 - 1<br>S3 - 2<br>S3 - 3 | westzijde            | B en C                            |
| 4 | onderstation Orthen, Den Bosch         | S4                    | S4                         | oostzijde            | C en B                            |
| 5 | Willem van Oranjelaan 33, Den Bosch    | S5                    | S5                         | oostzijde            | CH, CI en CJ                      |
| 6 | nabij Johan Frisolaan 57, Vught        | S6                    | S6                         | westzijde            | 766, 762 en 763                   |
| 7 | nabij Spoorstraat 9, Boxtel            | S7                    | S7                         | oostzijde            | 501, 504, 505 en 507              |

Op de meetlocaties zijn één of meerdere meetsystemen geplaatst. Daar waar één meetsysteem is geplaatst, wordt deze in de dataset aangeduid met hetzelfde kenmerk als de locatie. Voor de meetlocaties in Zaltbommel en Hedel zijn meerdere meetsystemen geplaatst. Voor deze locaties worden de meetsystemen aangeduid met een volgnummer. Om dit onderscheid te kunnen maken wordt in de dataset wordt de locatie dan ook specifiek aangegeven de meetsysteem-aanduiding. De meetsystemen zijn naast de spoorbaan geplaatst, in de regel op 25 meter uit het hart van het buitenste spoor (aan de zijde van het meetsysteem). Op de meetlocaties waar meerdere meetsystemen geplaatst zijn, zijn deze in een lijn parallel aan de spoorbaan geplaatst met 25 meter tussenafstand.

Naar aanleiding van de uitgevoerde trillingsmetingen op bovenstaande meetlocaties is een dataset opgebouwd met goederentreinpassages ten behoeve van de beoogde data-analyse. In deze bijlage worden alleen de passages op meetlocatie S1 (Waardenburg) beschouwd. Ter hoogte van deze meetlocatie zijn twee sporen aanwezig. Deze sporen worden aangeduid met CJ en BJ. De meetopstelling bevindt zich aan de oostzijde van de spoorbaan, vanuit de meetopstelling gezien is spoor CJ het eerste spoor.

In het algemeen is de dataset opgebouwd uit een combinatie van trillingsdata van passerende goederentreinen op elk van de meetlocaties, gecombineerd met treineigenschappen uit de Quo Vadis-dataset aangeleverd door ProRail. Om tot een uniforme dataset te komen die geschikt is voor de data-analyse zijn diverse voorbewerkingsstappen uitgevoerd. De totstandkoming van de dataset valt niet binnen de scope van deze bijlage, deze paragraaf geeft slechts een beschrijving van de belangrijkste aspecten van de dataset. Afbeelding IV.1 hieronder vat de bewerkingsstappen op de datasets samen.

Afbeelding IV.1 Schematische weergave van dataflow van trillingsmetingen naar een voor analyse geschikte bruikbare dataset



Van passerende goederentreinen wordt het trillingssignaal door een meetsysteem gemeten. Deze meet een trillingssignaal in drie richtingen: de x-richting (in het grondvlak parallel aan de spoorlijn), y-richting (in het grondvlak parallel aan de spoorlijn) en z-richting (loodrecht op het grondvlak). Voor elk van de signalen zijn waarden voor het trillingsniveau bepaald. Deze trillingsniveaus zijn uitgedrukt in de waarden  $V_{eff,max}$  en  $V_{RMS}$ . Als het trillingssignaal in richting  $i$  als functie van tijd  $t$  wordt uitgedrukt als  $v_i(t)$ , dan zijn de waarden voor  $V_{eff,max}$  en  $V_{RMS}$  in richting  $i$  gedefinieerd volgens

$$V_{eff,max_i} = \max_t \left( \sqrt{\frac{1}{\tau} \int_0^t g(\xi) v_i^2(t - \xi) d\xi} \right), \text{ waar } g(\xi) = e^{-\xi/\tau} \text{ en } \tau = 0.125 \text{ s, en}$$

$$RMS_i = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [v_i(t)]^2 dt}, \text{ waar } T \text{ de lengte van het trillingssignaal is in seconden.}$$

Voor de analyse wordt, in lijn met vooronderzoek en richtlijnen, gekeken naar trillingsniveau in de z-richting. Het signaal in de z-richting wordt als maatgevend beschouwd. Op meetlocaties S1 tot en met S5 wordt ruimschoots meer dan de helft van de maximale  $V_{eff,max}$ -waarde per passage bepaald door de z-richting. Op locatie S7 draagt de x-richting relatief veel bij aan de het aantal maximale  $V_{eff,max}$ -waarden per passage, maar de z-richting zorgt voor de maximale  $V_{eff,max}$ -waarden over de volledige meetperiode. Op meetlocatie S6 is de x-richting dominant. Dit zou veroorzaakt kunnen worden door de overloopwissel die in de buurt van de meetlocatie ligt. In de toekomst verdwijnt deze wissel. In bijlage VI wordt op beide richtingen ingegaan.

Naast trillingsniveau is ook de passagesnelheid bepaald, en is het bereden spoor op de meetlocatie geüniformeerd. De laatste stap betreft het filteren op bruikbare passages. Bruikbare passages worden gekenmerkt door: een vastgestelde passagesnelheid; een koppeling met Quo Vadis-data; een vastgesteld bereden spoor op de meetlocatie; het trillingssignaal betreft de passage van één enkele goederentrein.

Wat betreft de Quo Vadis-data: Deze dataset wordt door ProRail aangeleverd en komt voort uit het Quo Vadis-systeem. Deze dataset bevat diverse andere treineigenschappen van passerende treinen. Deze eigenschappen omvatten kengetallen voor aslast, wiellast en wielkwaliteit, maar ook het type materieel en het bereden spoor op de meetlocatie. Bepaalde eigenschappen, zoals het gemeten gewicht en de gemeten

krachten, zijn beschikbaar op het niveau van wagons, assen of wielen. In de analyse wordt de treinpasseage als geheel geanalyseerd. Om die reden dienen gegevens uit de Quo Vadis-dataset te worden geaggregeerd naar kengetallen per passage. Deze kengetallen zijn per trein bepaald als gemiddelde-, maximum-, minimum-, p10-, p20-, p80-, en p90-waarde van de beschikbare data (waar de p#-waarde staat voor de #-percentiel waarde). Daarnaast is ook de standaarddeviatie bepaald.

### Meettrein

Zoals genoemd in de introductie van deze bijlage bevat de dataset ook passages van de meettrein. Passages van deze trein, en een opsplitsing naar de afzonderlijke onderdelen worden duidelijk gekenmerkt in de dataset. Overigens is deze meettrein opgebouwd uit verschillende typen materieel, met verschillende beladingen. Voor de volledigheid is in Tabel IV.2 een overzicht bijgevoegd met de samenstelling van de meettrein. De verschillende onderdelen worden in de dataset aangemerkt met de kenmerken in de kolom 'aanduiding in dataset'. Trillingsniveau zijn beschikbaar voor de meettrein als geheel, en voor de afzonderlijke onderdelen.

Tabel IV.2 Opbouw meettrein en aanduiding in dataset

| Onderdeel | Aanduiding in dataset | Materieel                          | Lengte [m] | Aantal |
|-----------|-----------------------|------------------------------------|------------|--------|
| 1         | part 1                | Locomotief Bombardier TRAXX BR 186 | 18,9       | 1      |
| 2         | part 2                | Wagon Regs (onbeladen)             | 19,86      | 5      |
| 3         | part 3                | Wagon Regs (beladen)               | 19,86      | 5      |
| 4         | part 4                | Wagon Sgmm (onbeladen)             | 14,04      | 7      |
| 5         | part 5                | Wagon Sgmm (beladen)               | 14,04      | 7      |
| 6         | part 6                | Locomotief Siemens Vectron         | 18,98      | 1      |

### Beschikbare parameters

In de dataset die voor de analyse wordt gebruikt zijn per goederentreinpasseage de parameters beschikbaar die zijn weergegeven in Tabel IV.3. Enkele vanuit de Quo Vadis-dataset afkomstige parameters zijn enkel beschikbaar als kengetal voor de gehele trein. Een voorbeeld hiervan is 'qam\_aslast\_ton', de parameter voor aslast. Hiervan zijn dus enkel als gemiddelde, maximum, p90-waarde, et cetera beschikbaar als kengetal voor de gehele trein. Deze kengetallen worden in de dataset aangemerkt met suffixen op de parameternaam in de tabel hieronder. Merk op dat Tabel IV.3. dit geen uitputtende lijst van parameters geeft.

Tabel IV.3 Overzicht van parameters in de dataset

| Parameter      | Omschrijving                                     | Opmerking                                                                            |
|----------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| D2S datetime   | datum en tijdstip van de passage op het meetpunt |                                                                                      |
| D2S site       | meetsysteem waarop de passage is geregistreerd   | aangeduid met S1, S2 - 1, S2 - 2, ..., S7                                            |
| spoor          | het bereden spoor op de meetlocatie              |                                                                                      |
| meettrein      | indicatie van een meettrein passage              | aangeduid met 'True' of 'False'                                                      |
| meettrein_part | aanduiding van het onderdeel van de meettrein    | mits van toepassing, aanduiding zoals in Tabel III.3                                 |
| direction      | rijrichting van de passerende trein              | aangeduid met 'N-Z' en 'Z-N' voor respectievelijk noord-naar-zuid en zuid-naar-noord |
| speed          | snelheid van de passerende trein                 |                                                                                      |



| Parameter                | Omschrijving                                                                               | Opmerking                                            |
|--------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| $V_{\text{eff,max}} - X$ | waarde voor $V_{\text{eff,max}}$ in x-richting                                             |                                                      |
| $V_{\text{eff,max}} - Y$ | waarde voor $V_{\text{eff,max}}$ in y-richting                                             |                                                      |
| $V_{\text{eff,max}} - Z$ | waarde voor $V_{\text{eff,max}}$ in z-richting                                             |                                                      |
| $V_{\text{RMS}} - X$     | waarde voor $V_{\text{RMS}}$ in x-richting                                                 |                                                      |
| $V_{\text{RMS}} - Y$     | waarde voor $V_{\text{RMS}}$ in y-richting                                                 |                                                      |
| $V_{\text{RMS}} - Z$     | waarde voor $V_{\text{RMS}}$ in z-richting                                                 |                                                      |
| train_composition        | de samenstelling van de passerende trein                                                   | beschikbaar vanuit Quo Vadis-dataset                 |
| qtm_aantal_assen         | aantal assen van de passerende trein                                                       | beschikbaar vanuit Quo Vadis-dataset                 |
| qvm_voertuiggewicht_ton  | gewicht van treinstel of wagon                                                             | beschikbaar als kengetallen uit de Quo Vadis-dataset |
| qvm_linksrechtsratio     | verhouding tussen gewicht van de linker wielen en de rechter wielen van treinstel of wagon | enkel beschikbaar als kengetallen voor gehele trein  |
| qvm_voorachterratio      | verhouding tussen gewicht van de voorste en achterste assen van treinstel of wagon         | enkel beschikbaar als kengetallen voor gehele trein  |
| qam_aslast_ton           | last op assen van passerende trein                                                         | enkel beschikbaar als kengetallen voor gehele trein  |
| qam_linksrechtsratio     | verhouding tussen gewicht van het linker en rechter wielen van passerende trein            | enkel beschikbaar als kengetallen voor gehele trein  |
| qam_diagonale_onbalans   | onbalans t.o.v. draaistellen van de passerende trein                                       | enkel beschikbaar als kengetallen voor gehele trein  |
| qwm_gemiddelde_last_kn   | statische kracht op wielen van passerende trein                                            | enkel beschikbaar als kengetallen voor gehele trein  |
| qwm_pieklast_kn          | pieklast (dynamische + statische kracht) op wielen van passerende trein                    | enkel beschikbaar als kengetallen voor gehele trein  |
| qwm_dyn_pieklast_kn      | afgeleide dynamische pieklast uit dynamische en statische kracht                           | enkel beschikbaar als kengetallen voor gehele trein  |
| qwm_rms_laag_kn          | effectieve waarde voor frequenties tussen 50-200 Hz voor wielen van passerende trein.      | enkel beschikbaar als kengetallen voor gehele trein  |
| qwm_rms_hoog_kn          | effectieve waarde voor frequenties tussen 200-1000 Hz voor wielen van passerende trein.    | enkel beschikbaar als kengetallen voor gehele trein  |

## IV.2 Beschrijving van modellen

Op de hiervoor beschreven dataset van het meetpunt bij Waardenburg (S1 in Tabel IV.1) worden twee typen modellen losgelaten: multivariate regressie en random forest. Deze modellen worden in deze paragraaf kort beschreven. Als modeloutput worden de trillingsniveaus in de z-richting beschouwd. Trillingen in deze richting worden als maatgevend gezien voor trillingsoverlast. In het vervolg van deze bijlage wordt met ' $V_{\text{eff,max}}$ ' en ' $V_{\text{RMS}}$ ' de waarden in z-richting bedoeld, tenzij anders vermeld.

### Multivariate regressie

De multivariate regressie modellen die in het kader van dit onderzoek in beschouwing worden genomen zijn lineaire modellen in de volgende vorm:

$$V = \sum_{i=1}^n a_i v^i + \sum_{j=1}^m b_j Q_j + c$$

Hierbij representeert output  $V$  een van de indicatoren voor trillingsniveau:  $V_{\text{eff,max}} - Z$  of  $V_{\text{RMS}} - Z$ .  $V$  is hier een functie van snelheid  $v$  (in de vorm van een  $n^e$  graads polynoom), en een lineaire combinatie van



$m$  geselecteerde (geaggregeerde) parameters  $Q_j$  afkomstig uit de Quo Vadis-dataset (zie ook Tabel IV.3) en een constante term  $c$ . De exacte selectie van de Quo Vadis-parameters zal in paragraaf IV.3 worden toegelicht. Merk op dat met bovenstaande modelvergelijking de structuur van de verbanden binnen het model vast ligt.

In de modelvergelijking zal een drietal multivariate regressie modellen worden beschouwd, voor  $n = 1$ ,  $n = 2$  en voor  $n = 3$ . In andere woorden: multivariate regressie modellen met een eerste-, tweede- en derdegraads snelheidspolynoom. In elk model wordt dezelfde selectie van parameters  $Q_j$  gebruikt. Deze modellen komen overeen met de aanpak die is toegepast in een eerder onderzoek naar trillingen als gevolg van passage van goederentreinen [1].

Op basis van de beschikbare data volgt het uiteindelijke model met de bepaling van constante termen  $a_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ),  $b_j$  ( $j = 1, \dots, m$ ) en  $c$ . De waarden van deze termen worden bepaald aan de hand van de 'kleinste-kwadratenmethode'. Zo ontstaat een model waarvoor de totale kwadratische fout tussen 'gemeten waarde' en 'modelwaarde' het kleinst is.

### Random Forest

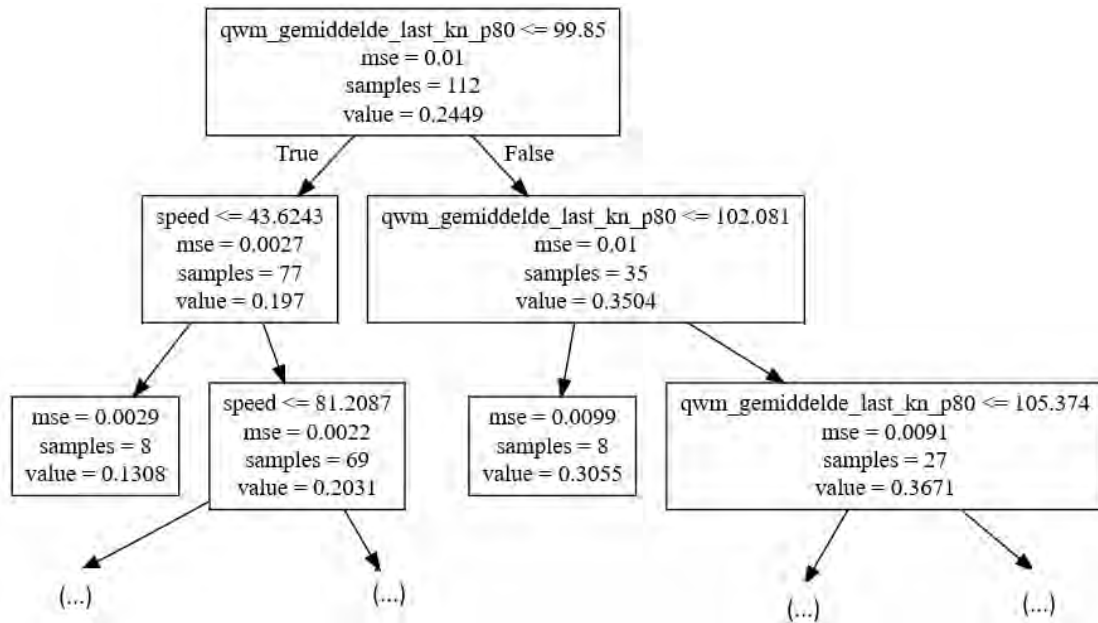
Multivariate lineaire regressie heeft als grote beperking dat het model niet goed kan omgaan met niet-lineaire relaties. Voor de snelheid van de trein worden afgedwongen door enkele hogere orde termen meegenomen, maar voor de overige parameters wordt een lineair verband gefit, terwijl uit de data-analyse (zie paragraaf IV.3) blijkt dat er veel niet-lineaire verbanden in de dataset zijn waar te nemen. Naast Multivariate regressie wordt daarom een methode toegepast uit de machine learning, namelijk het data-gedreven Random Forest model waarmee niet-lineaire relaties in de data beter omschreven kunnen worden.

Een random forest maakt gebruik van een meervoud aan zogenaamde 'decision trees' of 'beslisbomen'. Een beslisboom is een wetenschappelijk model vanuit de besliskunde. Een schematische weergave van een deel dergelijk model is weergegeven in Afbeelding IV.2. Een beslisboom bestaat uit zogenaamde 'nodes', waarop vertakkingen plaatsvinden. Een beslisboom als in Afbeelding IV.2 wordt gelezen van boven naar beneden. Inputgegevens starten boven in de boom en volgen de vertakkingen tot onderin één van de eind-nodes, zogenaamde 'leafs'. Daar volgt de modeloutput gegeven door de 'value' in de betreffende node.

Ter illustratie geeft Afbeelding IV.2 hieronder een schematische weergave van een beslisboom die is gegenereerd op passages uit de dataset voor meetlocatie S1. Het model neemt input variabelen wiellast (p80-waarde, gegeven door 'qwm\_gemiddelde\_last\_kn\_p80') en snelheid (gegeven door 'speed'). De boom is opgezet met  $V_{\text{eff,max}}-Z$  als output, deze waarde is in de nodes weergegeven als 'output'. Gegeven een treinpassage met een gekende wiellast en passagesnelheid, voorspelt de beslisboom de  $V_{\text{eff,max}}-Z$  output voortgebracht door de passage. Stel ons datapunt betreft een trein met p80-wiellast gelijk aan 80 kN die passeert met een snelheid van 40 km/h. Onderstaande beslisboom tree maakt een voorspelling van  $V_{\text{eff,max}}-Z$  door de boom van boven naar beneden te doorlopen:

- 1 in de bovenste node geldt dat de wiellast (p80-waarde) inderdaad kleiner is dan 99,85 kN, dus wordt de linker tak verkozen;
- 2 daar aangekomen geldt inderdaad dat de snelheid kleiner is dan 43,6 km/h, dus wordt wederom de linker vertakking gekozen;
- 3 deze node is een 'leaf', er zijn geen verdere vertakkingen meer. De boom geeft als output  $V_{\text{eff,max}}-Z$  gelijk aan 0,1308 ('value' waarde).

Afbeelding IV.2 Visualisatie van (een deel van) een beslisboom

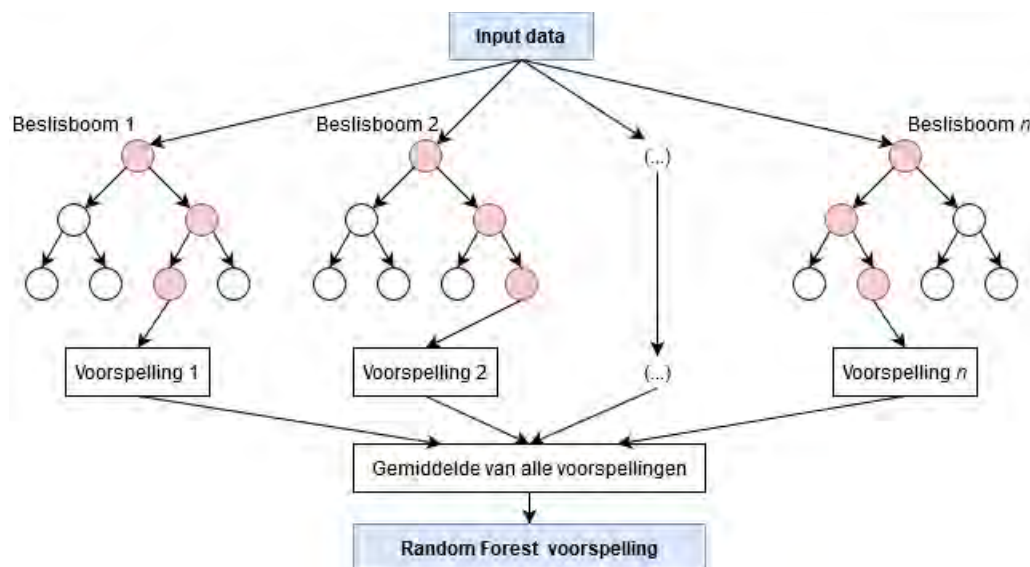


De vertakkingscriteria worden bepaald aan de hand van zogenaamde trainingsdata. Op basis van deze data 'leert' het model de structuren en verbanden tussen input en output data. De output waarde voor de leafs wordt bepaald als gemiddelde waarde van de output waarde van de trainingsdata in de betreffende leaf.

In Afbeelding IV.2 geeft elke node ook een aantal 'samples'. Dit zijn het aantal datapunten in de trainingsdata waarop de beslisboom zijn output baseert. Bij het opzetten van een dergelijk model is dit een belangrijk aspect. Vooraf kan worden ingegeven dat de voorspelling in de leaf nodes tenminste gebaseerd moet zijn op  $m$  datapunten. Een te kleine waarde van  $m$  zorgt voor een te uitgebreide boom, wat leidt tot 'overfitting', waarbij het model te specifiek wordt toegespitst op de ingegeven trainingsdata. Een te grote  $m$  geeft juist een te grof model.

In een random forest worden meerdere afzonderlijke beslisbomen (ook wel 'estimators' genoemd) gebundeld om samen te resulteren in een 'bos'. Het combineren van deze losse beslisbomen leidt uiteindelijk tot een ensemble die hogere precisie bevat en daarnaast stabiel voorspellingen kan uitvoeren. Afbeelding IV.3 geeft een schematische weergaven van een random forest met  $n$  beslisbomen. Inputgegevens doorlopen elk van de beslisbomen op de hierboven beschreven manier. De output van het random forest wordt vervolgens bepaald als de gemiddelde output van de individuele bomen.

Afbeelding IV.3 Schematische visualisatie van een random forest met  $n$  beslisbomen



Het woord 'random' duidt op de willekeurige selectie (met teruglegging) van variabelen en observaties (metingen in de data) die in elke losse beslisboom worden gekozen. Door deze selectie ontstaat variatie in de afzonderlijke bomen.

Een random forest is een model met erg veel variabelen. Het is geen model dat eenvoudig kan worden uitgedrukt in een functie, zoals dat wel kan bij het eerder beschreven multivariabel regressiemodel. Het model is daarmee minder inzichtelijk, en de interpretatie vergt wat extra aandacht. Daar staat tegenover dat de methode altijd een resultaat oplevert dat goed aansluit bij de dataset waarop het random forest is getraind. De fout van een random forest is in het algemeen kleiner dan dat van andere machine learning technieken zoals neurale netwerken.

Zoals eerder genoemd worden de vertakkingen in een beslisboom, en daarmee de bomen in het random forest, vastgesteld op basis van trainingsdata. Het is gebruikelijk om de beschikbare dataset op te delen in trainingsdata en testdata. De trainingsdata worden gebruikt om het model op af te leiden, en de testdata worden vervolgens gebruikt om de voorspellende kwaliteit van het model op te toetsen. Gebruikelijk is om 75 % van de data te gebruiken als trainingdata en 25 % als testdata, waarbij de opdeling willekeurig is. De opsplitsing in training- en testdata wordt verder toegelicht in paragraaf IV.4.

### IV.3 Dataverwerking en parameter selectie

De beschikbare dataset met passages van locatie S1 bevat een veelvoud aan geaggregeerde parameters vanuit de Quo Vadis-dataset, zie ook Tabel IV.3. Zoals eerder beschreven zijn de originele waarden geaggregeerd naar de volgende kengetallen voor een treinpassage: gemiddelde, minimum, maximum, p80-, p90-, p10- en p20-waarde, en de standaarddeviatie. Deze paragraaf gaat in op de verwerking van deze parameters en per parameter de selectie van de meest gunstige aggregatiemethode. Hiervoor wordt de methode geselecteerd die de beste relatie heeft tot de output variabelen  $V_{\text{eff,max}}-Z$  en  $V_{\text{RMS}}-Z$ .

#### Voorselectie van Quo Vadis-parameters

Voordat de verschillende aggregatiemethoden worden onderzocht, volgt eerst een voorselectie van treinparameters uit de Quo Vadis-dataset. Deze voorselectie resulteert in een selectie van parameters die worden gemeten op wielniveau. De Quo Vadis-dataset bevat meerdere parameters die hierop afgeleid worden, waaronder verschillende ratio's voor onbalans, en parameters voor gewichten. Een voorselectie is weergegeven in tabel Tabel IV.4.

Tabel IV.4 Voorselectie van Quo Vadis-parameters

| Parameter naam         | Parameter voor                                          |
|------------------------|---------------------------------------------------------|
| qam_aslast_ton         | aslast                                                  |
| qwm_gemiddelde_last_kn | wiellast                                                |
| qwm_pieklast_kn        | piekbelasting wiel                                      |
| qwm_dyn_pieklast_kn    | afgeleide dynamische last uit wiellast en piekbelasting |
| qwm_rms_laag_kn        | RMS laag                                                |
| qwm_rms_hoog_kn        | RMS hoog                                                |
| qam_linksrechtsratio   | onbalans in belading tussen wielen op as                |

Een kanttekening bij deze voorselectie is dat de aslast wordt bepaald als de som van de wiellasten op de as. De verwachting is dat deze parameters sterk gecorreleerd zullen zijn. Daarnaast is de pieklast afhankelijk van de wiellast (statische last), en de verwachting is dat ook deze parameters sterk gecorreleerd zijn. Om deze parameters te de-correleren is ook de dynamische pieklast meegenomen (de pieklast is gedefinieerd als de statische last plus de dynamische last gemeten voor het wiel). Aan het eind van deze paragraaf (zie 'Selectie van modelparameters') zal een definitieve selectie van model parameters gemaakt worden die onderling zo min mogelijk correlatie vertonen.

#### Selectie van aggregatiemethode

De voorselectie van parameters in Tabel IV.4 zijn in de dataset beschikbaar per passage met de aggregatiewaarden zoals beschreven in paragraaf IV.1. Uit deze voorselectie dient nu per parameter een aggregatiemethode geselecteerd te worden. Uit deze selectie zal blijken dat een aantal parameters weinig voorspellend zijn voor het gemeten trillingsniveau. Echter wordt ook voor deze parameters een aggregatiemethode geselecteerd. Deze aanpak wijkt af van het vooronderzoek, waar slechts de aggregatiemethoden 'maximum' en 'gemiddelde' worden gebruikt voor de modellen voor  $V_{\text{eff,max}}$  en  $V_{\text{RMS}}$  [1].

De selectie van aggregatiemethode zal gemaakt worden op basis van de volgende criteria:

- 1 correlatie. Voor elk van de parameters wordt gekeken naar de correlatiecoëfficiënt van parameter en indicator voor trillingsniveau ( $V_{\text{eff,max}}$  en  $V_{\text{RMS}}$ ). De correlatiecoëfficiënt geeft de statistische samenhang tussen beide grootheden. Correlatiewaarden zullen afzonderlijk worden bepaald voor de bereden sporen;
- 2 verwachting. Voor elk van de parameters in Tabel IV.4 is de verwachting dat een toename van parameterwaarde leidt tot en toename van trillingsniveau. Bijvoorbeeld, de verwachting is dat een toename in (gemiddelde) aslast zal leiden tot een toename van het trillingsniveau. Met andere woorden: de verwachting is positieve correlaties te zien. In hetzelfde voorbeeld is de verwachting dat de zwaarste assen een overheersend effect zullen hebben op het trillingsniveau. Dit laatste argument motiveert de a priori voorkeur voor aggregatie naar P80, P90 of maximum waarden;
- 3 spreidingsdiagrammen. Naast de correlatiecoëfficiënten is het ook noodzakelijk om de spreidingsdiagrammen in acht te nemen. Correlatie alleen kan een vertekend beeld geven voor gegroepeerde data, of data met een duidelijk zwaartepunt.

Met het oog op bovenstaande criteria is gekeken naar de spreidingsdiagrammen zoals in afbeelding Afbeelding IV.4. Deze afbeelding geeft een overzicht van spreidingsdiagrammen van de wiellast parameter 'qwm\_gemiddelde\_last\_kn' voor verschillende aggregatiemethoden uitgezet tegen de trillingsniveaus  $V_{\text{eff,max}}$ -Z en  $V_{\text{RMS}}$ -Z. Voor elke diagram is de correlatiecoëfficiënt bepaald voor de data van beide sporen, deze staan boven de diagrammen bijgevoegd als waarden  $c_{CJ}$  en  $c_{BJ}$  voor spoor CJ en BJ respectievelijk. Voor de overige parameters is geen spreidingsdiagram toegevoegd, maar zijn de correlatiewaarden bijgevoegd in.

Tabel IV.5 Correlatiecoëfficiënten per spoor per aggregatiemethode

| Trillings-niveau        | Parameter              | Correlatiecoëfficiënten per aggregatiemethode per spoor |       |            |       |            |       |         |       |
|-------------------------|------------------------|---------------------------------------------------------|-------|------------|-------|------------|-------|---------|-------|
|                         |                        | gemiddelde                                              |       | p80-waarde |       | p90-waarde |       | maximum |       |
|                         |                        | CJ                                                      | BJ    | CJ         | BJ    | CJ         | BJ    | CJ      | BJ    |
| V <sub>eff,max</sub> -Z | qam_aslast_ton         | 0.65                                                    | 0.38  | 0.52       | 0.41  | 0.47       | 0.41  | 0.35    | 0.24  |
|                         | qwm_gemiddelde_last_kn | 0.65                                                    | 0.38  | 0.53       | 0.42  | 0.49       | 0.42  | 0.42    | 0.45  |
|                         | qwm_pieklast_kn        | 0.64                                                    | 0.34  | 0.54       | 0.39  | 0.50       | 0.35  | 0.33    | 0.23  |
|                         | qwm_dyn_pieklast_kn    | 0.18                                                    | -0.16 | 0.15       | -0.07 | 0.12       | -0.09 | 0.13    | 0.02  |
|                         | qwm_rms_laag_kn        | 0.50                                                    | 0.27  | 0.55       | 0.38  | 0.51       | 0.39  | 0.2     | -0.01 |
|                         | qwm_rms_hoog_kn        | 0.07                                                    | -0.40 | 0.04       | -0.41 | 0.06       | -0.38 | 0.03    | 0.02  |
|                         | qam_linksrechtsratio   | -0.09                                                   | 0.29  | -0.08      | 0.28  | -0.07      | 0.27  | 0.01    | 0.34  |
| VRMS-Z                  | qam_aslast_ton         | 0.64                                                    | 0.34  | 0.49       | 0.40  | 0.44       | 0.39  | 0.38    | 0.23  |
|                         | qwm_gemiddelde_last_kn | 0.64                                                    | 0.34  | 0.50       | 0.40  | 0.46       | 0.40  | 0.42    | 0.45  |
|                         | qwm_pieklast_kn        | 0.64                                                    | 0.30  | 0.52       | 0.37  | 0.49       | 0.33  | 0.31    | 0.26  |
|                         | qwm_dyn_pieklast_kn    | 0.19                                                    | -0.16 | 0.17       | -0.07 | 0.15       | -0.07 | 0.10    | 0.06  |
|                         | qwm_rms_laag_kn        | 0.52                                                    | 0.29  | 0.55       | 0.40  | 0.51       | 0.42  | 0.20    | 0.03  |
|                         | qwm_rms_hoog_kn        | 0.09                                                    | -0.42 | 0.06       | -0.42 | 0.08       | -0.38 | 0.02    | 0.07  |
|                         | qam_linksrechtsratio   | -0.10                                                   | 0.35  | -0.08      | 0.34  | -0.09      | 0.33  | 0.01    | 0.39  |

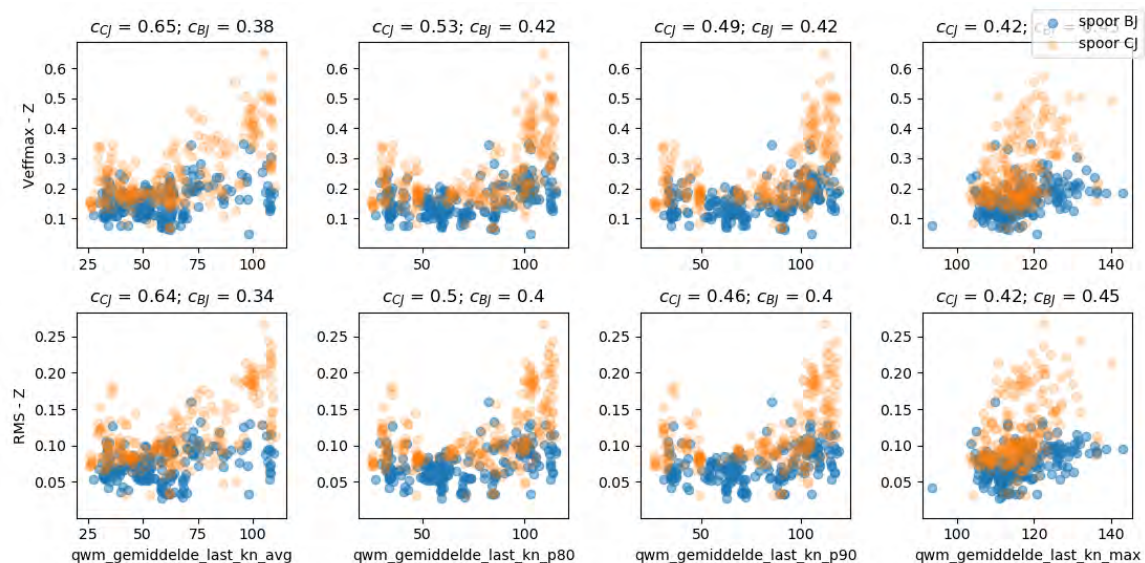
In Afbeelding IV.4 en Tabel IV.5 ontbreken de aggregatiemethoden minimum-, p10-, p20-waarde en standaarddeviatie. Deze zijn in de analyse wel beschouwd, maar blijken met de correlatiecoëfficiënt een vertekend beeld te geven. De informatie van deze aggregatiewaarden geeft geen toegevoegde waarde, en zijn om die reden weggelaten in deze overzichten.

Op basis van bovenstaande analyse worden voor de parameters de volgende aggregatiemethoden aangehouden:

- 1 aslast: aggregatie naar p80 waarde. Op basis van Tabel IV.5 geven de aggregatiemethoden gemiddelde-, p80- en p90-waarde de meeste spreiding en de beste correlatie. Op basis van de maximale correlatie valt de keuze voor deze parameter op de p80-waarde als aggregatiewaarde;
- 2 wiellast: aggregatie naar p80 waarde. Op basis van Tabel IV.5 valt volgens dezelfde redenering als voor de aslast-metingen de keuze op p80-waarde als aggregatiewaarde;
- 3 pieklast: aggregatie naar p80 waarde. Op basis van Tabel IV.5 valt volgens dezelfde redenering als voor de aslast-metingen de keuze op p80-waarde als aggregatiewaarde;
- 4 dynamische pieklast: Wat opvalt in Tabel IV.5 is dat geen van de aggregatiemethoden een duidelijke correlatie laat zien tussen dynamische pieklast en de parameters voor trillingsniveaus;
- 5 RMS-laag: aggregatie naar p90 waarde. Op basis van Tabel IV.5 geven de aggregatiemethoden gemiddelde-, p80- en p90-waarde de meeste spreiding en de beste correlatie. Van deze methoden geeft de p90-waarde de hoogste correlatie met het trillingsniveau;
- 6 RMS-hoog: aggregatie naar p90 waarde. Wat opvalt in Tabel IV.5 is dat geen van de aggregatiemethoden een duidelijke correlatie laat zien tussen RMS-hoog en de parameters voor trillingsniveaus. Lettend op de spreiding in de data en de berekende correlaties wordt voornamelijk gekozen voor p90-waarde als aggregatiewaarde;
- 7 links-rechts ratio: aggregatie naar p80 waarde. Wat opvalt in Tabel IV.5 is dat er nauwelijks verband lijkt te zijn tussen de links-rechts ratio en trillingsniveau. Daarnaast valt op dat in termen van deze ratio in de beschikbare dataset de treinen op spoor CJ in het algemeen meer gebalanceerd zijn dan voor de treinen op spoor BJ. Ondanks dat er weinig correlatie waargenomen wordt, wordt gekozen voor p80-waarde als aggregatiewaarde.

Uit de motivaties hierboven komt vaak de p80- of p90-waarde als aggregatiewaarde naar voren. Dat is te verklaren vanuit de relatie die te verwachten is tussen de parameters en de trillingsniveaus. Deze waarden zijn beide een tussenweg tussen 'gemiddelde' en 'maximum' als aggregatiemethode, ze benutten het goede van beide kanten. Beschouw ter illustratie de aslasten: De p80- en p90-waarden zijn ten opzichte van de gemiddelde aslast meer toegespitst op de zwaardere assen. Echter zijn ze minder gevoelig voor uitschieters in de data, in tegenstelling tot de maximumwaarde. Het verschil tussen de p80- en p90-waarde is dat de laatste net iets dichterbij de maximumwaarde ligt. Echter is het verschil vaak niet zo groot, wat ook terug te zien is in de spreidingsdiagrammen.

Afbeelding IV.4 Spreidingsdiagrammen van wiellast ('qwm\_gemiddelde\_last\_kn') met  $V_{\text{eff,max}}-Z$  en VRMS-Z bij verschillende aggregatiemethoden;  $c_{CJ}$  en  $c_{BJ}$  geven de bijbehorende correlatiecoëfficiënten voor de betreffende data

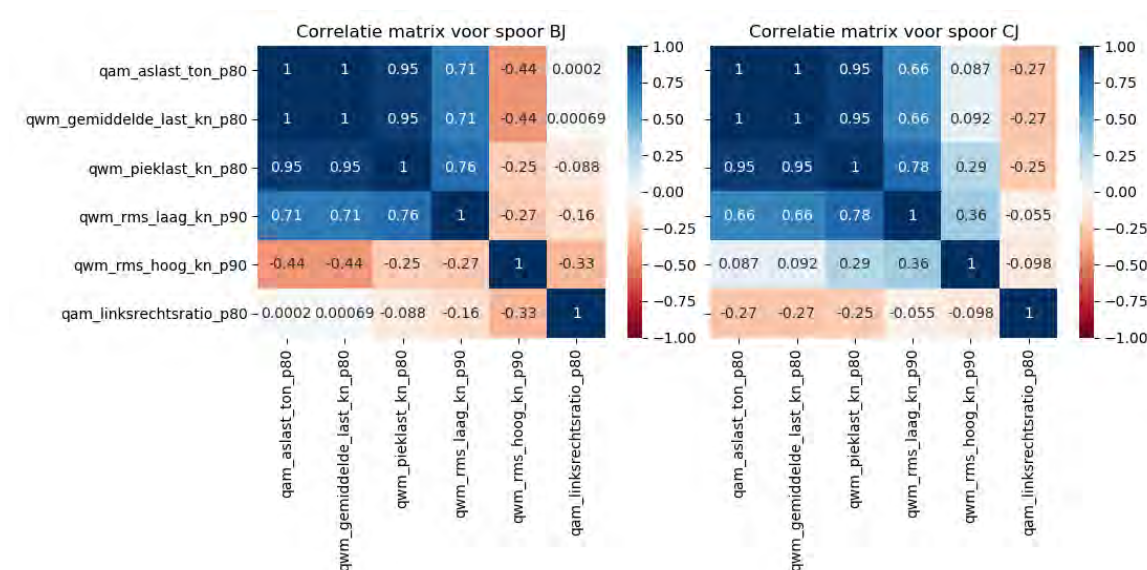


### Selectie van modelparameters

Om een definitieve selectie te maken van de modelparameters wordt tot slot gekeken naar de onderlinge correlaties tussen de parameters. Daartoe zijn correlatiematrices voor beide sporen opgenomen in Afbeelding IV.5.



Afbeelding IV.5 Correlaties tussen parameters onderling voor data van beide sporen afzonderlijk.



Zoals verwacht is de aslast volledig gecorreleerd met de wiellast (gemiddelde last). De reden hiervoor is dat de aslast wordt berekend als directe som van de lasten op de betreffende wielen. Om die reden wordt aslast dan ook niet verder in beschouwing genomen als model parameter, het voegt immers geen extra informatie toe. Verder valt op dat de pieklast en de wiellast zeer sterk gecorreleerd zijn omdat de wiellast mede bepalend is voor de gemeten pieklast. Hieraan ook gerelateerd is de RMS-laag, de effectieve waarde voor frequenties tussen 50 en 200 Hz. Tot slot zijn RMS-hoog en de links-recht-ratio weliswaar minder gecorreleerd met de overige parameters, maar lieten deze parameters ook een minder duidelijk verband zien met de bepaalde trillingsniveaus, zie Tabel IV.5.

Op basis van voorgaande analyse worden model parameters geselecteerd. Voor de multivariate regressie modellen worden de parameters beperkt tot snelheid, wiellast (p80-waarde) en RMS-hoog (p90-waarde). Hiervan wordt verwacht dat ze de belangrijkste factoren zijn op de trillingsniveaus, dit wordt onderbouwd door correlaties in Tabel IV.5. De keuze voor deze parameters ligt in lijn met voorgaande onderzoeken, al is de aggregatiemethode verschillend. Het toevoegen van meer parameters wordt in het lineaire multivariate model niet als een meerwaarde gezien. Voor het data-gedreven random forest worden wel meer Quo Vadis-parameters als input meegegeven. Het model is immers zelf in staat om de invloed van al deze parameters te bepalen, en zoveel mogelijk informatie en onderliggende structuren uit de data te benutten. Naast snelheid wordt wiellast (p80-waarde), pieklast (p80-waarde), RMS-laag (p90-waarde), RMS-hoog (p90-waarde). en de links-rechts-ratio (p80-waarde) als input parameter meegegeven.

#### IV.4 Vergelijking Modellen voor Waardenburg

In deze paragraaf worden met de hiervoor vastgestelde parameters Lineaire Regressie modellen en het Random Forest model afgeleid. Hiertoe wordt de dataset eerst opgesplitst in 'trainingsdata' en 'testdata'. De modellen worden vervolgens afgeleid uit de trainingsdata, en vervolgens getoetst op de testdata. Deze procedure zal hieronder verder worden toegelicht. Per spoor worden modellen afgeleid voor zowel de passages van reguliere goederentreinen (inclusief de volledige meettrein), als de meettrein passages met opsplitsing in de afzonderlijke delen.

Vervolgens worden de prestaties van deze modellen met elkaar vergeleken. Deze vergelijking geschiedt aan de hand van enkele indicatoren die worden afgeleid van de voorspellingen op basis van de test data, alsmede de trainingsdata. De gebruikte indicatoren zijn de *Root Mean Squared Error* (RMSE), de wortel van de gemiddelde kwadratische voorspellingsfout; de  $R^2$ -waarde van de voorspelling; de gemiddelde

voorspellingsfout met standaard deviatie; en tot slot de *Median Absolute Deviation* (MAD), een maat voor de variabiliteit van de voorspellingsfout.

### Trainings- en test data

Voor het afleiden van de modellen wordt de beschikbare dataset willekeurig opgesplitst in 75 % trainingsdata, en 25 % testdata. Alle modellen worden afgeleid op de training data. De voorspelling van het model wordt getoetst aan de hand van de testdata.

Door het gebruik van testdata kan de kwaliteit van de modellen worden getoetst op data, die onafhankelijk zijn van de data waarop het model is afgeleid. Typisch worden de modellen toegespitst op de data waarvan het model wordt afgeleid. Dat geldt in het bijzonder voor Lineaire Regressiemodellen. In Machine Learning is deze splitsing van de beschikbare data heel gebruikelijk. Met onafhankelijke testdata wordt een objectiever beeld gecreëerd van de voorspellende kracht van het model. Een model dat last heeft van overfitting valt onmiddellijk door de mand met deze splitsing.

### Modeluitkomsten

Deze paragraaf beschrijft de uitkomsten van aan de hand van de voorspellingen van de verschillende modellen. Hiertoe zijn een aantal figuren en tabellen opgenomen, die in deze paragraaf zullen worden toegelicht. Een overzicht van de afgeleide modellen, met de aanduiding in de figuren en tabellen is gegeven in Tabel IV.6. Dit overzicht geeft nogmaals een overzicht van de input parameters voor elk van de modellen, en de geselecteerde aggregatiewaarden, die hiervoor zie paragraaf IV.2.

Tabel IV.6 Modellen ter vergelijking met input parameters en indicatie in figuren en tabellen

| Model                                                    | Input parameters met aggregatiemethode                                                                                                           | Indicatie |
|----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| random forest                                            | snellheid<br>wiellast (p80-waarde)<br>pieklast (p80-waarde)<br>RMS-laag (p90-waarde)<br>RMS-hoog (p90-waarde)<br>links-rechts-ratio (p80-waarde) | rf        |
| multivariate regressie met eerste orde snelheidspolynoom | snellheid<br>wiellast (p80-waarde)<br>RMS-laag (p90-waarde)                                                                                      | lr1       |
| multivariate regressie met tweede orde snelheidspolynoom | snellheid en snelheid <sup>2</sup><br>wiellast (p80-waarde)<br>RMS-laag (p90-waarde)                                                             | lr2       |
| multivariate regressie met derde orde snelheidspolynoom  | snellheid, snelheid <sup>2</sup> en snelheid <sup>3</sup><br>wiellast (p80-waarde)<br>RMS-laag (p90-waarde)                                      | lr3       |

Bovenstaande modellen worden afgeleid voor elk van de sporen bij meetlocatie S1 afzonderlijk: spoor CJ en spoor BJ. Vervolgens worden per spoor de verschillende modellen met elkaar vergeleken op basis van de eerder beschreven indicatoren.

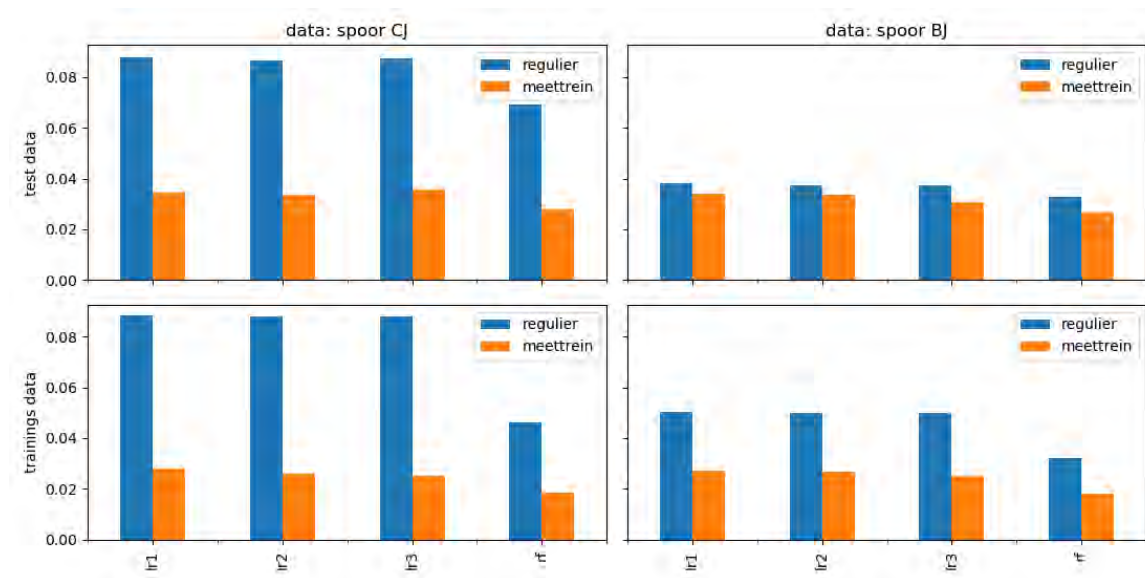
Afbeelding IV.6 geeft diagrammen weer ter vergelijking tussen de modellen op basis van RMSE voor de modellen met output  $V_{\text{eff,max}}$ . Afbeelding IV.7 geeft eenzelfde vergelijking voor output VRMS. Voor de overige indicatoren zijn de vergelijkingen samengevat in tabellen Tabel IV.7 tot en met Tabel IV.10. Op basis hiervan worden de volgende conclusies getrokken:

- 1 voorspellingen van het Random Forest model geven voor zowel  $V_{\text{eff,max}}$  als VRMS de laagste RMSE. Dit geldt voor zowel de voorspellingen op basis van de testdata als trainingsdata, en zowel voor de data van de reguliere treinen als voor de data van de meettrein;

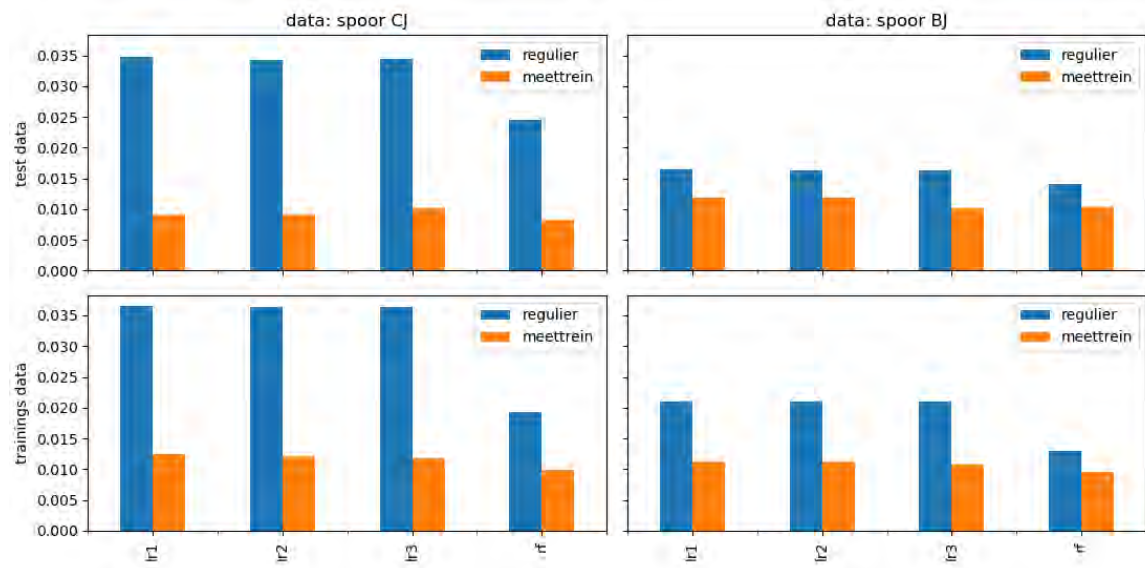
- voorspellingen van het Random Forest model geven voor zowel  $V_{\text{eff,max}}$  als VRMS de hoogste  $R^2$ . Dit geldt voor zowel de voorspellingen op basis van de testdata als trainingsdata, en zowel voor de data van de reguliere treinen als voor de data van de meettrein;
- voorspellingen van de modellen geven een structurele overschatting of onderschatting. Het Random Forest model presteert hierin beter dan het multivariate regressiemodel. In alle gevallen is de standaard deviatie op de gemiddelde voorspellingsfout voor het Random Forest model lager dan voor de Multivariate Regressie modellen;
- ook op indicator MAD presteert het Random Forest model beter dan de Multivariate Regressie modellen;
- een vergelijking tussen de Multivariate Regressie modellen leert dat de modellen gelijkwaardig presteren op de onderzochte indicatoren, met een lichte winst voor het model met een derdegraads snelheidscomponent.

Samenvattend geeft van de beschouwde modellen het Random Forest model de meest accurate voorspelling van de trillingsniveaus uitgedrukt in  $V_{\text{eff,max}}$  en VRMS. Van de Multivariate Regressie modellen geeft het model met de derdegraads snelheidscomponent de meest accurate voorspelling.

Afbeelding IV.6 Root Mean Squared Error (RMSE) voor voorspellingen van  $V_{\text{eff,max}}$  per model



Afbeelding IV.7 Root Mean Squared Error (RMSE) voor voorspellingen van VRMS per model



Tabel IV.7 Root Mean Squared Error (RMSE) voor voorspellingen op basis van testdata (enkel reguliere goederentreinen)

|     | $V_{\text{eff,max}}$ |          | VRMS     |          |
|-----|----------------------|----------|----------|----------|
|     | spoor CJ             | spoor BJ | spoor CJ | spoor BJ |
| lr1 | 0.09                 | 0.04     | 0.035    | 0.02     |
| lr2 | 0.08                 | 0.04     | 0.034    | 0.02     |
| lr3 | 0.09                 | 0.04     | 0.034    | 0.02     |
| rf  | 0.07                 | 0.03     | 0.025    | 0.01     |

Tabel IV.8  $R^2$  voor voorspellingen op basis van testdata (enkel reguliere goederentreinen)

|     | $V_{\text{eff,max}}$ |          | VRMS     |          |
|-----|----------------------|----------|----------|----------|
|     | spoor CJ             | spoor BJ | spoor CJ | spoor BJ |
| lr1 | 0.38                 | 0.29     | 0.44     | 0.31     |
| lr2 | 0.39                 | 0.31     | 0.46     | 0.32     |
| lr3 | 0.38                 | 0.31     | 0.45     | 0.32     |
| rf  | 0.61                 | 0.47     | 0.72     | 0.50     |

Tabel IV.9 Gemiddelde voorspelfout met standaarddeviatie voor voorspellingen op basis van testdata (enkel reguliere goederentreinen)

|     | $V_{\text{eff,max}}$ |               | VRMS           |               |
|-----|----------------------|---------------|----------------|---------------|
|     | spoor CJ             | spoor BJ      | spoor CJ       | spoor BJ      |
| lr1 | -0.009 ± 0.032       | 0.006 ± 0.032 | -0.003 ± 0.009 | 0.002 ± 0.012 |
| lr2 | -0.009 ± 0.031       | 0.001 ± 0.032 | -0.003 ± 0.009 | 0.002 ± 0.012 |
| lr3 | -0.009 ± 0.033       | 0.006 ± 0.029 | -0.003 ± 0.010 | 0.002 ± 0.010 |
| rf  | -0.001 ± 0.027       | 0.008 ± 0.026 | 0.000 ± 0.008  | 0.002 ± 0.010 |

Tabel IV.10 Median Absolute Deviation (MAD) voor voorspellingen op basis van testdata (enkel reguliere goederentreinen)

|     | $V_{\text{eff,max}}$ |          | VRMS     |          |
|-----|----------------------|----------|----------|----------|
|     | spoor CJ             | spoor BJ | spoor CJ | spoor BJ |
| lr1 | 0.06                 | 0.03     | 0.029    | 0.01     |
| lr2 | 0.05                 | 0.02     | 0.028    | 0.01     |
| lr3 | 0.06                 | 0.03     | 0.028    | 0.01     |
| rf  | 0.04                 | 0.02     | 0.011    | 0.01     |

### Invloed van opsplitsing trainings- en testdata

Een kanttekening bij de conclusies uit de vorige paragraaf is dat de modellen het resultaat zijn van één enkele opsplitsing van de dataset in trainings- en testdata. Hierin is het denkbaar dat de betere prestaties van het Random Forest ten opzichte van de andere modellen is toe te schrijven aan een 'gunstige' opsplitsing van data. Bij toepassing op een andere locatie zou de opdeling wellicht ongunstig kunnen uitvallen. De volgende paragraaf onderzoekt deze vraag en vergelijkt de voorspellingen Random Forest

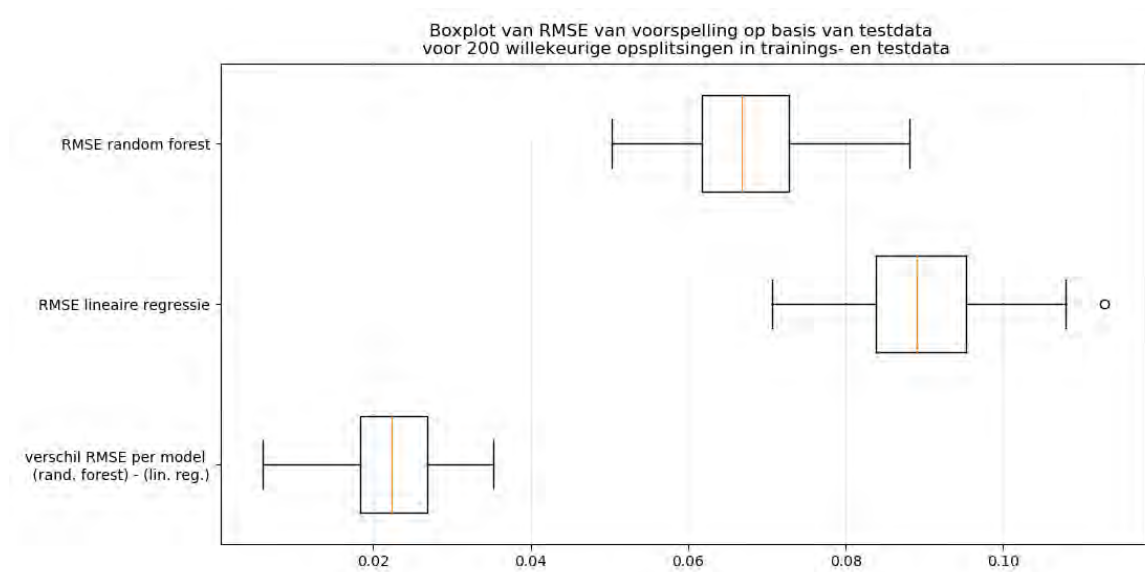
modellen met Multivariate Regressie modellen (allen met een derdegraads snelheidscomponent) voor verschillende opdelingen van de dataset in trainings- en testdata.

Het resultaat hiervan is voor de RMSE weergegeven in Afbeelding IV.8, dergelijke figuren voor  $R^2$  en MAD geven eenzelfde beeld en zijn om die reden niet bijgevoegd. De weergegeven boxplots zijn het resultaat van voorspellingen op basis van testdata van modellen die zijn afgeleid uit 200 willekeurige opsplitsingen in trainings- en testdata. Hierbij is voor elke opdeling de RMSE,  $R^2$  en MAD bepaald voor zowel het de voorspelling van het Random Forest model and het Multivariate Regressiemodel (op basis van de testdata). Ook is het verschil bepaald tussen de betreffende waarden van de modeltypen.

De conclusie is dat het Random Forest beter presteert in vergelijking met het multivariate model in elk van de indicatoren. Aan de onderste boxplot is af te leiden dat de voorspelling van het Random Forest model structureel beter is, ongeacht de specifieke opsplitsing van data.

Wat tot slot opvalt is dat in het algemeen geldt dat de specifieke selectie trainings- en testdata bepalend is voor de voorspellende kracht van het model. Een ongelukkige opdeling van data leidt tot een model dat minder goede voorspellende kracht heeft, of juist een onwaarschijnlijk goede voorspelling. Dit vraagt om een extra check op de gemaakte opsplitsing van de dataset. Idealiter is zowel de trainings- als testdata een representatieve weergave van zowel de dataset als geheel, als van elkaar. Om dit te toetsen wordt een statistische Kolmogorov-Smirnov toets uitgevoerd op de trainings- en testdata, die de opsplitsing goed- of afkeurt. In het geval van afkeuring wordt opnieuw een selectie gemaakt.

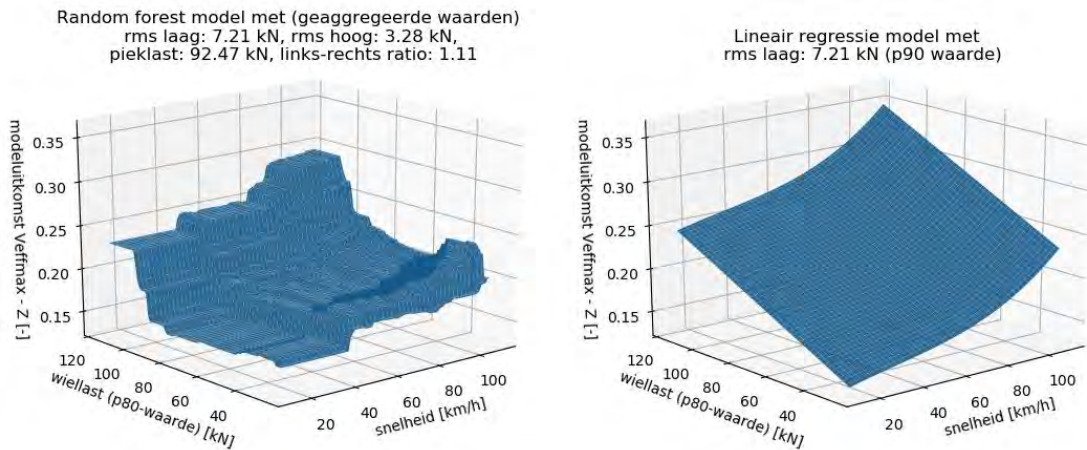
Afbeelding IV.8 Uitkomst RMSE voor 200 opsplitsingen van dataset in trainings- en testdata



## IV.5 Modelinterpretatie van Random Forest

Afbeelding IV.9 hieronder geeft een driedimensionale weergave van de modeluitkomsten van het random forest en de multivariate regressie (met derdegraads snelheidscomponent en parameters wiellast (p80-waarde) en RMS-laag (p90-waarde)). Het is een visualisatie van de modellen die zijn afgeleid voor spoor CJ, met als output  $V_{\text{eff,max}}$ . Deze afbeelding laat heel duidelijk het verschillende karakter van beide modellen zien. Zo wordt inzichtelijk dat het random forest beter in staat is om de onderliggende (niet-lineaire) structuren in de data te benutten. Het multivariate regressiemodel is hier vanwege de vooraf vastgestelde structuur niet toe in staat. Dit laatste model geeft dan ook een gladder en uitgevlakt resultaat, daar waar het random forest meer detail laat zien.

Afbeelding IV.9 3D visualisatie voor modeluitkomsten van Random Forest model (links) en Multivariate Regressie model (rechts) voor de parameters wiellast en snelheid, waarbij de overige parameters zijn vastgezet

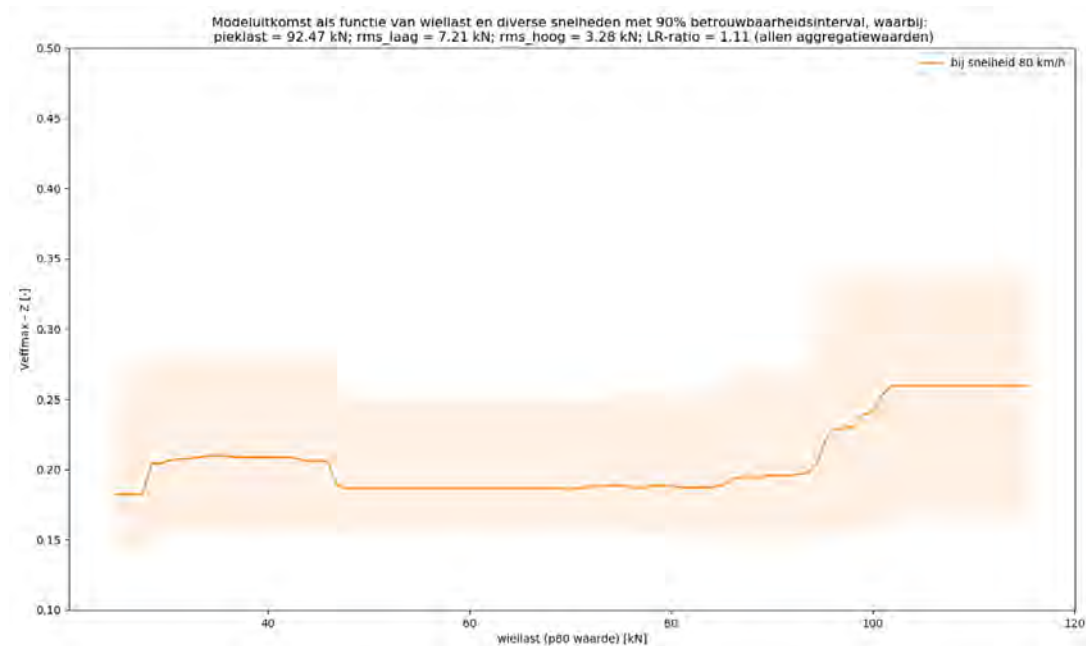


### Modelonzekerheid

Om uiteindelijk conclusies te kunnen trekken uit een random forest model is het van belang om een uitspraak te kunnen doen over de modelonzekerheid van de voorspelling. Deze onzekerheid kan worden afgeleid uit de voorspellingen van de individuele beslisbomen binnen het model. Uiteindelijk wordt de uitkomst van het random forest model bepaald uit de voorspellingen van de afzonderlijke beslisbomen binnen het model. Op basis hiervan is voor het eerder afgeleide model van Afbeelding IV.10 een tweetal dwarsdoorsneden gemaakt, zie Afbeelding IV.10 en Afbeelding IV.11 hieronder.

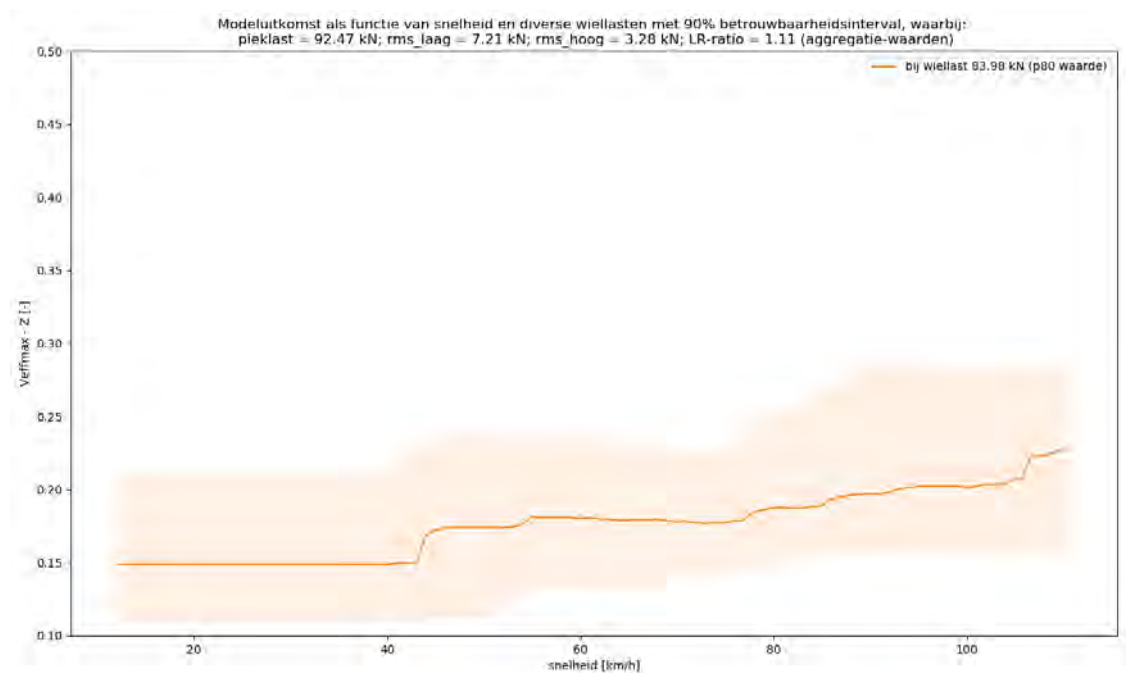
Het gearceerde gebied geeft het interval waarbinnen 90 % van de beslisbomen zijn voorspelling maakt. Dit geeft een beeld aan de betrouwbaarheid van de modelvoorspelling.

Afbeelding IV.10 Dwarsdoorsnede bij 80 km/h voor variërende wiellast (p80-waarde)





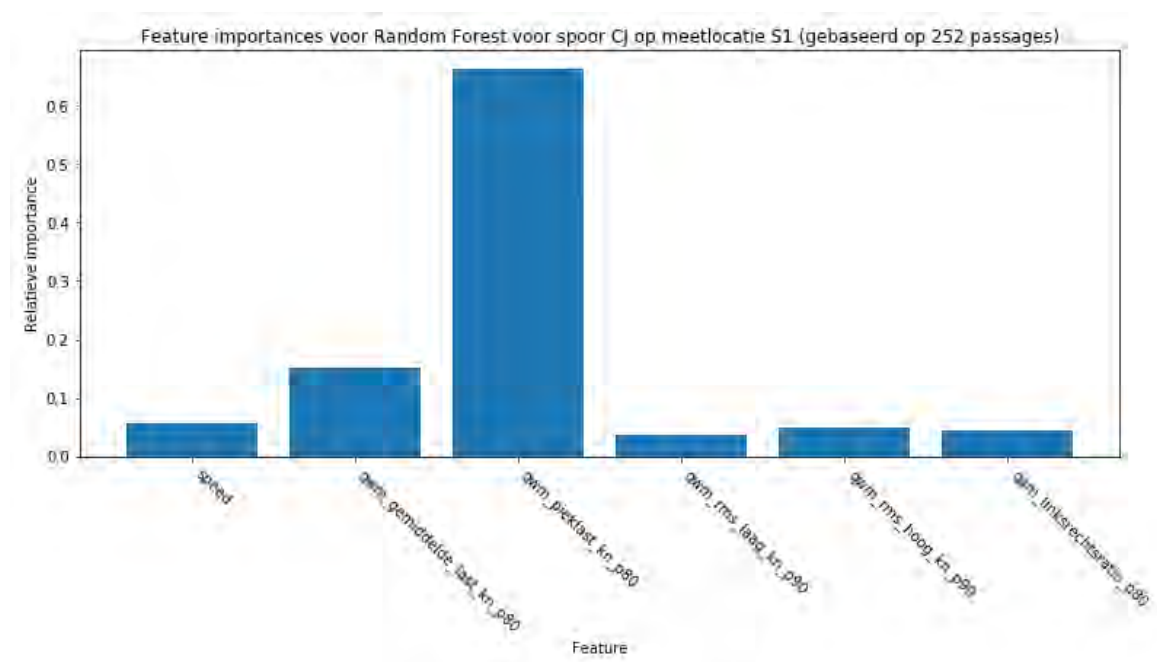
Afbeelding IV.11 Dwarsdoorsnede bij 83,96 kN wiellast (p80-waarde) voor variërende snelheid



### Feature importance

Een random forest geeft ook inzicht in de invloed van de verschillende input parameters middels de zogenaamde 'feature importances'. In het algemeen geeft deze 'importance' per input variabele een gewogen score die aangeeft hoe bepalend de betreffende variabele is in het bepalen van de modeloutput. Een voorbeeld hiervan is gegeven in Afbeelding IV.12. Hieruit blijkt dat voor deze locatie en voor dit spoor de variabele pieklast (p80-waarde) de meest bepalende factor is, vervolgens wiellast (p80-waarde), en daarna snelheid.

Afbeelding IV.12 Voorbeeld van feature importances voor meetlocatie S1 voor passages op spoor CJ



## IV.6 Conclusie

Uit bovenstaande onderzoeken blijkt het random forest model op een betere voorspelling geeft voor zowel de trillingsniveaus  $V_{\text{eff,max}}$  als VRMS. Random forest geeft de beste voorspelling in termen van RMSE, maar ook in termen van  $R^2$ , MAD en standaarddeviatie op de voorspellingsfout.

De driedimensionale weergave in Afbeelding IV.10 geeft duidelijk weer hoe het random forest model veel meer detail uit de data extraheert dan een multivariabel regressie model. Het model geeft meer detail en een dieper inzicht in de achterliggende structuren in de beschikbare data. Daarmee blijft de voorspelling dicht bij de dataset, en doet het meer recht aan de variatie en niet-lineariteit in de dataset. Ook maakt random forest het mogelijk om alle input variabelen uit de dataset te gebruiken.

Wel blijkt ook dat de vervolgaanpak met een random forest model, met het oog op het afleiden van een conclusie voor het effect van gedifferentieerd rijden, nadere uitleg behoeft.

## IV.7 Vervolgaanpak met random forest

Per locatie wordt per spoor een random forest model afgeleid voor de trillingsniveaus  $V_{\text{eff,max}}$  en VRMS. Een dergelijk model wordt ook worden afgeleid voor de beschikbare dataset van reguliere goederentreinen, en voor de meettreinpassages. Deze paragraaf gaat in op de aanpak voor het beantwoorden van de onderzoeksvraag over het effect van gedifferentieerd rijden.

Het Random Forest model maakt gebruik van veel input parameters om een output te voorspellen, en om die reden laat Afbeelding IV.10 slechts een deel van de onderliggende structuur van het Random Forest model zien. Een afbeelding als deze is immers gebonden aan een beperkt aantal dimensies. Een conclusie op basis van een dergelijke figuur is dus niet eenduidig te trekken, omdat dit slechts inzicht geeft in het effect van twee van de input parameters.

Daarmee vergt het wat meer moeite om conclusies te trekken uit het Random Forest model. De voorgestelde aanpak is als volgt:

- 1 voor elk van de locaties wordt per spoor een Random Forest model afgeleid op basis van de beschikbare data. Zo ontstaan per locatie zoveel modellen als sporen. Hierbij wordt de opsplitsing van de dataset in trainings- en testdata getoetst aan de hand van de statistische Kolmogorov-Smirnov toets;
- 2 met deze modellen wordt het effect van verschillende parameters op de trillingsniveaus  $V_{\text{eff,max}}$  - Z en  $V_{\text{RMS}}$  - Z onderzocht. Om te onderzoeken wat hierin het effect van snelheid is wordt voor de beschouwde locatie voor een representatieve populatie van goederentreinen het trillingsniveau bepaald bij verschillende snelheden. Zodoende volgt een algemene conclusie over het effect van bijvoorbeeld snelheidsverlaging voor het goederenvervoer per locatie.

Naast snelheid kan de hierboven beschreven aanpak ook toegepast worden op parameters als wiellast. Op deze manier kunne diverse scenario's onderzocht worden. Merk wel op dat de kwaliteit van het model valt en staat met de beschikbare data: in termen van kwantiteit en kwaliteit.

## IV.8 Literatuurlijst

- 1 DGMR (2017). Onderzoek effect rijnsnelheid goederentreinen op trillingsopwekking in de bodem. 15 december 2017, versie 002 (definitief), rapport T.2016.0727.R003.



## BIJLAGE: EFFECT VAN GEDIFFERENTIEERD RIJDEN PER MEETLOCATIE

In opdracht van ProRail B.V. heeft Witteveen+Bos trillingsmetingen uitgevoerd aan goederentreinpassages op een zevental locaties langs het spoor tussen Meteren en Boxtel. De metingen hebben als doel de relatie tussen goederentreinsnelheid en trillingsniveau, en de onderliggende parameters die daarop van invloed zijn, inzichtelijk te maken.

Tijdens dit onderzoek zijn niet alleen de regulier passerende goederentreinen gemeten, maar is ook een proef met een meettrein uitgevoerd. Deze meettrein bestond uit verschillende series wagons met verschillende beladingen en heeft een aantal keren met verschillende snelheden over het traject gereden. Voor elk van de locaties is naar aanleiding van de metingen een dataset van treinpassages opgebouwd met daarin voor de onder andere de het gemeten trillingsniveau, gereden snelheid, en andere relevante eigenschappen van de trein waaronder wiellasten, aslasten en materieeltype.

Het doel van de data-analyse is het verwerven van inzicht in de relatie tussen de rijnsnelheid van goederentreinen en trillingen op maaiveld en in woningen. Deze bijlage presenteert de resultaten van gedifferentieerd rijden voor elk van deze locaties voor trillingen op maaiveld. Daarnaast wordt ingegaan op andere parameters die invloed hebben op trillingsniveaus. De vertaling naar trillingen in woningen ligt buiten de scope van deze bijlage. Het effect van gedifferentieerd rijden wordt afgeleid uit de beschikbare dataset en de modellen die hierop zijn afgeleid. Het voorwerk wat betreft de dataverwerking en modelselectie valt tevens buiten de scope van deze bijlage, wel wordt kort op deze stappen in gegaan.

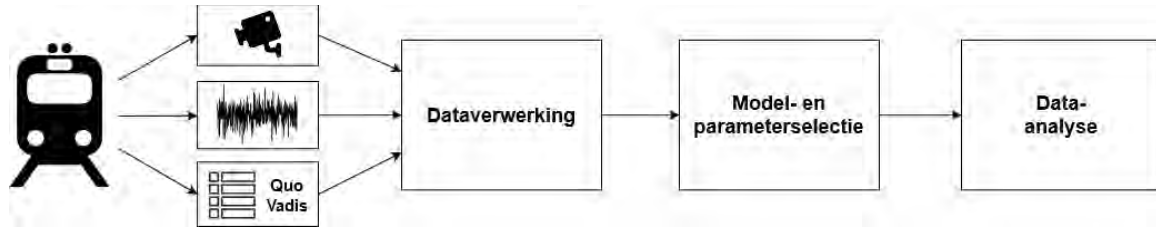
### Leeswijzer

In paragraaf V.1 wordt kort ingegaan op achtergrond- en vooronderzoek. Paragraaf V.2 beschrijft vervolgens dan aanpak van de data-analyse. Deze aanpak leidt voor elk van de zeven meetlocaties tot een beschrijving van de resultaten van de praktijkproef. Voor elke meetlocatie is een aparte paragraaf toegevoegd met de resultaten, zie hiervoor paragraaf V.3 tot en met V.9. Afbeeldingen ter onderbouwing van de resultaten zijn telkens aan het eind van elke paragraaf bijgevoegd.

## V.1 Achtergrond

Deze bijlage presenteert de resultaten van de data-analyse. Deze analyse wordt voor elk van de zeven meetlocaties uitgevoerd. Vanwege het mogelijke verschil in trillingsoverdracht van spoor naar meetopstelling wordt deze analyse afzonderlijk uitgevoerd voor elk van de beschikbare sporen ter hoogte van de meetlocaties. Voordat deze analyses uitgevoerd kunnen worden, zijn diverse voorbewerkingsstappen nodig geweest om de ruwe meetgegevens te verwerken naar een bruikbare dataset. Deze paragraaf gaat kort in op de voornaamste voorbewerkingen, een overzicht hiervan is gegeven in Afbeelding V.1. Een uitgebreide beschrijving van deze stappen ligt buiten de scope van deze bijlage.

Afbeelding V.1 Bewerkingsstappen van metingen naar data-analyse



### Dataverwerking

Naar aanleiding van de uitgevoerde trillingsmetingen bij goederentreinen is een dataset opgebouwd ten behoeve van de beoogde data-analyse. Deze dataset bevat passages van treinen op elk van de zeven locaties langs het spoor tussen Meteren en Bortel. Deze dataset is opgebouwd uit twee afzonderlijk aangeleverde datasets. Eén dataset bevat gegevens van de trillingsmetingen van passerende goederentreinen op elk van de meetlocaties, de andere dataset bevat de door ProRail aangeleverde dataset met eigenschappen van passerende treinen. Deze laatste dataset komt voort uit het Quo Vadis-systeem van ProRail. Beide datasets worden voorbereid om vervolgens gecombineerd te worden tot een uniforme dataset die geschikt is voor analyse, zie ook Afbeelding IV.1.

Van passerende goederentreinen wordt het trillingssignaal gemeten. Deze meet een trillingssignaal in drie richtingen: de x-richting (in het grondvlak parallel aan de spoorlijn), y-richting (in het grondvlak parallel aan de spoorlijn) en z-richting (loodrecht op het grondvlak). Voor elk van de signalen zijn waarden voor het trillingsniveau bepaald. Deze trillingsniveaus zijn uitgedrukt in de waarden  $V_{eff,max}$  en  $V_{RMS}$ . Als het trillingssignaal in richting  $i$  als functie van tijd  $t$  wordt uitgedrukt als  $v_i(t)$ , dan zijn de waarden voor  $V_{eff,max}$  en  $V_{RMS}$  in richting  $i$  gedefinieerd volgens

$$V_{eff,max_i} = \max_t \left( \sqrt{\frac{1}{\tau} \int_0^t g(\xi) v_i^2(t - \xi) d\xi} \right), \text{ waar } g(\xi) = e^{-\xi/\tau} \text{ en } \tau = 0.125 \text{ s, en}$$

$$RMS_i = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [v_i(t)]^2 dt}, \text{ waar } T \text{ de lengte van het trillingssignaal is in seconden.}$$

Voor de analyse wordt, in lijn met vooronderzoek en richtlijnen, gekeken naar trillingsniveau in de z-richting. Het signaal in de z-richting wordt als maatgevend beschouwd voor trillingsoverlast. Daarnaast is de  $V_{eff,max}$  gevoeliger voor zware pieken in het trillingssignaal dan de  $V_{RMS}$  waarde. De  $V_{eff,max}$  waarde wordt als richtlijn gebruikt. Naast trillingsniveaus is ook de passagesnelheid van de betreffende trein bepaald, en is het bereiden spoor op de meetlocatie vastgesteld.

Wat betreft de Quo Vadis-data: Deze dataset wordt door ProRail aangeleverd en komt voort uit het Quo Vadis-systeem. Deze dataset bevat diverse andere treineigenschappen van passerende treinen. Deze eigenschappen omvatten kengetallen voor aslast, wiellast en wielkwaliteit, maar ook het type materieel en het bereiden spoor op de meetlocatie. Bepaalde eigenschappen, zoals het gemeten gewicht en de gemeten krachten, zijn origineel beschikbaar op het niveau van wagons, assen of wielen. In de analyse wordt de treinpassage als geheel geanalyseerd. Om die reden dienen gegevens uit de Quo Vadis-dataset te worden geaggregeerd naar kengetallen per passage.

In de dataset wordt elke meetlocatie aangeduid met een locatieaanduiding. Deze locatieaanduiding wordt ook in dit en de komende hoofdstukken gebruikt in tekst en figuren. Tabel V.1 geeft een overzicht van de zeven meetlocaties en de aanduiding van de meetlocatie in de dataset. Hierin staat ook de ligging van de meetopstelling(en) ten opzichte van het spoor vermeld, en de aanduidingen voor de sporen ter hoogte van de meetopstelling(en). De volgorde van de sporen komt overeen met de volgorde vanuit het perspectief van de meetopstelling, zo is bijvoorbeeld vanuit meetsysteem S1 gezien spoor CJ het dichtstbijzijnde spoor.

Op de meetlocaties zijn één of meerdere meetsystemen geplaatst. Daar waar één meetsysteem is geplaatst, wordt deze in de dataset aangeduid met hetzelfde kenmerk als de locatie. Voor de meetlocaties in

Zaltbommel en Hedel zijn meerdere meetsystemen geplaatst. Voor deze locaties worden de meetsystemen aangeduid met een volgnummer.

Tabel V.1 Aanduiding van locaties en beschikbare meetsystemen per meetlocatie

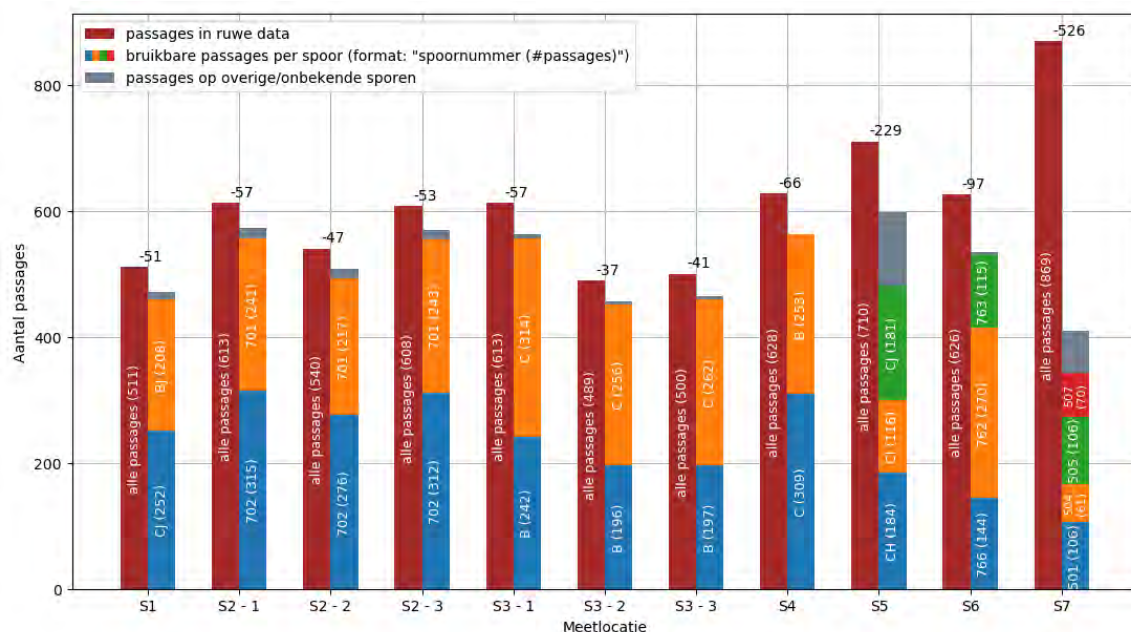
| # | Meetlocatie                            | Aanduiding in dataset | Beschikbare meetsystemen   | Ligging t.o.v. spoor | Spooraanduiding t.h.v. meetopstelling |
|---|----------------------------------------|-----------------------|----------------------------|----------------------|---------------------------------------|
| 1 | Pompstraat 10, Waardenburg             | S1                    | S1                         | oostzijde            | CJ, BJ                                |
| 2 | voormalige stationslocatie, Zaltbommel | S2                    | S2 - 1<br>S2 - 2<br>S2 - 3 | oostzijde            | 703, 702, 701                         |
| 3 | Stationsweg 11, Hedel                  | S3                    | S3 - 1<br>S3 - 2<br>S3 - 3 | westzijde            | B, C                                  |
| 4 | onderstation Orthen, Den Bosch         | S4                    | S4                         | oostzijde            | C, B                                  |
| 5 | Willem van Oranjelaan 33, Den Bosch    | S5                    | S5                         | oostzijde            | CH, CI, CJ                            |
| 6 | nabij Johan Frisolaan 57, Vught        | S6                    | S6                         | westzijde            | 766, 762, 763                         |
| 7 | nabij Spoorstraat 9, Boxtel            | S7                    | S7                         | oostzijde            | 501, 502, 503, 504, 505, 507          |

Uiteindelijk leiden de voorbereidingsstappen voor elk van de meetlocaties tot een dataset van goederentreinpassages, waarvoor trillingsniveaus, gereden snelheid, bereden spoor en kengetallen voor diverse treineigenschappen beschikbaar zijn. Afbeelding V.2 geeft een overzicht van het aantal treinpassages per meetsysteem uit Tabel V.1. Telkens geeft de linker balk het aantal passages voor het betreffende meetsysteem die aangeleverd zijn in de dataset (ruwe data, voor bewerking), en de rechter balk het aantal bruikbare passages met een uitsplitsing naar de meest bereden sporen. In de balken zijn het aantal passages weergegeven, het getal boven de balken geeft het verschil tussen 'aantal passages op meest bereden sporen' en 'aantal passages in ruwe data'. Er ontstaat dataverlies in de voorbereidingsstappen, doordat bijvoorbeeld voor een passage geen passagesnelheid of treineigenschappen beschikbaar zijn. Daarnaast ontstaat er extra verlies doordat het bereden spoor niet bekend is, of doordat het spoor nauwelijks bereden is. Dit laatste is van belang aangezien de analyse per spoor wordt uitgevoerd, en er dus voldoende data moet zijn om een zinnige analyse op uit te voeren.

Naar aanleiding van Afbeelding IV.2 zijn er een aantal bijzonderheden te vermelden:

- bij meetlocatie S7 treedt betrekkelijk veel verlies van data op. Het bleek hier voor veel passages onduidelijk om het signaal aan een goederentrein te koppelen, en daarvan de bijbehorende snelheid vast te stellen. Het grootste verlies voor deze locatie treedt daarom op vanwege het ontbreken van een vastgestelde rijsnelheid;
- bij meetsysteem S2-2 is aan het begin van de meetcampagne een hapering geweest in de registratie. Hierdoor ontbreken enkele dagen aan meetdata in vergelijking met de andere meetsystemen op meetlocatie S2;
- bij meetlocatie S3 is aan het eind van de meetcampagne de stroomvoorziening voor de meetinstallaties onderbroken als gevolg van werkzaamheden. Daarbij is meetsysteem S3-1 toch langer voorzien gebleven van stroom, waardoor slechts twee volledige daten ontbreken;
- op meetlocatie S1 zijn voor enkele dagen in januari geen metingen beschikbaar. De oorzaak hiervan is niet bekend;
- op meetlocatie S6 ontbreken meetdata van een drietal dagen in februari. Vermoedelijk wordt dit veroorzaakt door een tijdelijke onderbreking van de stroomvoorziening.

Afbeelding V.2 Overzicht van aantallen passages per locatie opgedeeld naar het bereiden spoor



## Meettrein

Zoals genoemd in de introductie van deze bijlage bevat de dataset ook passages van de meettrein. Passages van deze trein, en een opsplitsing naar de afzonderlijke onderdelen worden duidelijk gekenmerkt in de dataset. Overigens is deze meettrein opgebouwd uit verschillende typen materieel, met verschillende beladingen. Voor de volledigheid is in Tabel V.2 een overzicht bijgevoegd met de samenstelling van de meettrein. De verschillende onderdelen worden in de dataset aangemerkt met de kenmerken in de kolom 'aanduiding in dataset'. Trillingsniveau zijn beschikbaar voor de meettrein als geheel, alsmede voor de afzonderlijke onderdelen.

Tabel V.2 Opbouw meettrein en aanduiding in dataset

| Onderdeel | Aanduiding in dataset | Materieel                          | Lengte [m] | Aantal |
|-----------|-----------------------|------------------------------------|------------|--------|
| 1         | part 1                | Locomotief Bombardier TRAXX BR 186 | 18,9       | 1      |
| 2         | part 2                | Wagon Regs (onbeladen)             | 19,86      | 5      |
| 3         | part 3                | Wagon Regs (beladen)               | 19,86      | 5      |
| 4         | part 4                | Wagon Sgmm (onbeladen)             | 14,04      | 7      |
| 5         | part 5                | Wagon Sgmm (beladen)               | 14,04      | 7      |
| 6         | part 6                | Locomotief Siemens Vectron         | 18,98      | 1      |

De meettrein is op elk van de meetlocaties 24 keer gepasseerd. Deze passages zijn ook meegenomen in het diagram in Afbeelding V.2.

## Parameter- en modelselectie

Het doel van de data-analyse is het verwerven van inzicht in de relatie tussen de rijnsnelheid van goederentreinen en trillingsniveaus. Dit inzicht wordt opgedaan aan de hand modellen die worden afgeleid uit de beschikbare data.



In vooronderzoek is uitgebreid gekeken naar de relatie tussen verschillende treinparameters en aggregatiemethoden op de voortgebrachte trillingsniveaus. Daarnaast zijn twee typen modellen met elkaar vergeleken: multivariate regressie en random forest. Hiervoor is gekeken naar de prestaties deze modellen aan de hand van de dataset van meetlocatie S1 in Waardenburg.

Uit deze analyse blijkt dat het random forest model structureel beter presteert dan multivariate regressie: het random forest geeft structureel een betere voorspelling van trillingsniveaus  $V_{\text{eff,max}}$  en  $V_{\text{RMS}}$ . Ook geeft dit model meer detail en een dieper inzicht in de achterliggende structuren in de beschikbare data. Daarmee blijft de voorspelling dicht bij de dataset, en doet het meer recht aan de variatie en niet-lineariteit in de dataset. Ook maakt random forest het mogelijk om alle input variabelen uit de dataset te gebruiken.

Op basis van het onderzoek naar parameters en aggregatiemethoden wordt de selectie van input parameters voor het random forest gebruikt zoals weergegeven in Tabel V.3. Deze random forest modellen worden vervolgens gebruikt om de relatie tussen rijnsnelheid en trillingsniveau te onderzoeken. De aanpak hiervoor wordt beschreven in de volgende paragraaf.

Tabel V.3 Input parameters voor random forest met aggregatiemethode voor kengetal

| Parameter naam             | Parameter voor                                                                          | Aggregatiemethode | Eenheid |
|----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|---------|
| speed                      | snelheid van de passerende trein                                                        | n.v.t.            | km/h    |
| qwm_gemiddelde_last_kn_p80 | statische kracht op wielen van passerende trein (wiellast)                              | p80-waarde        | kN      |
| qwm_pieklast_kn_p80        | pieklast (dynamische + statische kracht) op wielen van passerende trein                 | p80-waarde        | kN      |
| qwm_rms_laag_kn_p90        | effectieve waarde voor frequenties tussen 50-200 Hz voor wielen van passerende trein.   | p90-waarde        | kN      |
| qwm_rms_hoog_kn_p90        | effectieve waarde voor frequenties tussen 200-1000 Hz voor wielen van passerende trein. | p90-waarde        | kN      |
| qam_linksrechtsratio_p80   | verhouding tussen gewicht van het linker en rechter wielen van passerende trein         | p80-waarde        | -       |

## V.2 Aanpak data-analyse

Ruwweg is de aanpak voor de data-analyse op te delen in twee onderdelen: de modelafleiding en de modeltoepassing. De data-analyse wordt uitgevoerd voor de metingen van elk van de meetsystemen, op elk van de meetlocaties, voor elk van de sporen aldaar, zie Tabel V.1. In de data-analyse de volgende stappen doorlopen:

- 1 De beschikbare dataset van goederentrein passages wordt opgedeeld in passages van de meettrein en haar afzonderlijke onderdelen, en regulier passerende treinen (ook aangeduid als 'reguliere passages'). Bij die laatste groep wordt ook de meettrein als geheel meegenomen.
- 2 Vervolgens wordt voor beide datasets een opsplitsing gemaakt naar trainings- en testdata, 75 % en 25 % van de passages respectievelijk. Deze opsplitsing is van belang om eventuele overfitting (het model is te veel toegespitst op de gegeven data) van het model aan te tonen, een overfit model presteert slecht op de testdata.
- 3 De trainingsdata worden gebruikt om random forest modellen af te leiden. Deze modellen worden afzonderlijk afgeleid voor de trillingsniveaus  $V_{\text{eff,max}}$  en  $V_{\text{RMS}}$ . Deze modellen doen een voorspelling van het trillingsniveau op basis van gegeven modelinputs uit Tabel V.3.

- 4 De kwaliteit van de modellen wordt bekeken aan de hand van de testdata. Een gebruikelijke maat voor de voorspelkwaliteit is de *Root Mean Squared Error* (RMSE). Deze waarde geeft de gemiddelde kwadratische fout tussen gemeten waarde  $y$  en modelvoorspelling  $\hat{y}$ . De waarde van de RMSE is niet geschaald, en geeft daarom nuttige informatie over de modelkwaliteit mits de magnitude van  $y$  bekend is. Om de vergelijking tussen verschillende modellen (op basis van verschillende data) te maken wordt gekeken naar de *Normalized Root Mean Squared Error* (NRMSE), een genormaliseerde versie van de RMSE geschaald naar de gemiddelde waarde  $\bar{y}$  van  $y$ . De NRMSE wordt bepaald als:

$$NRMSE = \frac{RMSE}{\bar{y}}$$

- 5 De modellen worden vervolgens gebruikt om trillingsniveaus bij verschillende snelheden met elkaar te vergelijken. Hiervoor wordt gekeken naar trillingsniveaus bij de referentiesnelheid van 90 km/h en de gereduceerde snelheden van 60 km/h en 40 km/h. Een nadere toelichting op deze procedure volgt hieronder.
- 6 Tot slot wordt in beeld gebracht welke parameters naast snelheid van invloed zijn op de trillingsniveaus. Daarbij wordt ook gekeken naar mogelijke verbanden met treintypes, en de verschillen tussen de resultaten voor de meettrein en de reguliere treinen. Een nadere toelichting op deze procedure volgt hieronder.

### Evaluatie van effect snelheidsverlaging

Op basis van de random forest modellen wordt het effect van verlaging van de rijsnelheid bij goederentreinen geëvalueerd. In het kader van 'gedifferentieerd rijden' wordt hiervoor gekeken naar de modeluitkomsten van trillingsniveaus bij de referentiesnelheid van 90 km/h en de gereduceerde snelheden van 60 km/h en 40 km/h. Hiervoor wordt met behulp van de modellen voor elke trein uit de dataset opnieuw het trillingsniveau bepaald bij deze drie snelheden. Uit deze voorspellingen wordt per trein het reductiepercentage van trillingsniveau bepaald bij 60 km/h en 40 km/h, ten opzichte van referentiesnelheid 90 km/h.

Uit deze voorspellingen wordt per trein het reductiepercentage van trillingsniveau bepaald bij 60 km/h en 40 km/h, ten opzichte van referentiesnelheid 90 km/h. Vervolgens wordt de gemiddelde reductie bepaald over alle passages. Dit resulteert in een gemiddeld reductiepercentage (met standaarddeviatie) in trillingsniveau bij verlaging van rijsnelheid van 90 km/h naar 60 km/h en van 90 km/h naar 40 km/h. Deze reductiepercentages zijn specifiek bepaald voor de afzonderlijke meetlocaties, en de sporen die daar bereden zijn.

Voor de duidelijkheid wordt bij evaluatie gebruik gemaakt van dezelfde treinen als waarvoor het model is afgeleid, echter met andere passagesnelheden. Door gebruik te maken van de treinen uit de dataset wordt het effect van snelheidsverlaging getoetst op treinen die representatief zijn voor de passerende treinen op de betreffende meetlocatie. Het zijn immers de treinen die daadwerkelijk daar zijn gemeten, over een periode van meerder weken.

### Invloed andere parameters en relatie tot treintype

Naast snelheid wordt ook gekeken naar de invloed van andere parameters op het trillingsniveau  $V_{\text{eff,max}}$ . Vanuit het random forest wordt een overzicht van de meest bepalende parameters voor trillingsniveau opgevraagd, de zogenaamde 'feature importances'. Dit zijn waarden tussen 0 en 1 die de onderlinge relatieve bepalendheid van de input parameters op de output weergeven. Voor de belangrijkste parameters wordt gekeken naar een relatie met het trillingsniveau. Ook wordt gezocht naar verbanden tussen trillingen en het type trein dat ze veroorzaakt.

De passerende treinen worden op basis van materieelsamenstelling ingedeeld in de categorieën 'container', 'bulk', 'ketel', 'rollen staal', 'divers' en 'overig'. Ook wordt 'meettrein' als afzonderlijk treintype gezien. De categorie 'divers' omvat treinen die zijn samengesteld uit diverse categorieën materieel en belading; de categorie 'overig' bevat treinen die hoofdzakelijk zijn samengesteld uit materieel in de categorie 'overig'. Een trein wordt toegekend aan een bepaald treintype als deze voor minstens 70 % uit wagons met eenzelfde

type belading bestaat. Is dat niet het geval, dan wordt de trein toegekend aan de categorie 'divers', die dus anders is dan 'overige'.

Deze categorieën worden niet als parameter meegegeven aan de modellen. Het treintype is slechts een label, daar waar de daadwerkelijke trillingen worden bepaald door de gemeten parameters vanuit de Quo Vadis-dataset. Door het treintype in beeld te brengen ontstaat extra context bij de spreiding in de gemeten parameterwaarden in Quo Vadis. Bovendien geeft het de mogelijkheid om bepaalde bevindingen tastbaarder te maken door ze te linken aan een treintype, in plaats van een parameterwaarde.

Overigens kan met de beschikbare parameters kan slechts globaal een uitspraak gedaan worden over de relatie tussen trillingen en materieeltype. Het effect van een specifiek type materieel (wagon) kan niet expliciet worden meegenomen in de analyse. Enerzijds doordat de specifieke factoren (zoals vering, wieltype, draaisteltype, type bovenbouw, etc.) die kenmerkend zijn voor het materieeltype, en uiteindelijk van invloed zijn de trillingsniveaus zijn niet in de juiste vorm beschikbaar in de geleverde dataset. Anderzijds omdat een trein vaak is samengesteld uit diverse typen wagons, ook als die hetzelfde type goederen vervoeren. Er kan slechts gebruik gemaakt worden van de parameters die reeds in de dataset beschikbaar zijn, die hangen deels samen met het treintype.

### Presentatie van resultaten

Voor elke meetlocatie is hieronder een aparte paragraaf toegevoegd met de resultaten. Resultaten van snelheidsverlaging op de trillingsniveaus staan telkens opgenomen in tabellen. Een voorbeeld van deze tabellen staat hieronder opgenomen als Tabel V.4, een toelichting op deze tabel is onder de tabel bijgevoegd. Afbeeldingen ter onderbouwing van de resultaten zijn telkens aan het eind van elke paragraaf bijgevoegd.

Tabel V.4 Template tabel voor resultaten

| Meetsysteem | Spoor     | # Passages | Trillingsniveau                                  | Reductie (%) van<br>90 naar 60 km/h | Reductie (%) van<br>90 naar 40 km/h | Nrmse |
|-------------|-----------|------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------|
| S#          | spoor nr. | #          | $V_{\text{eff,max}} - Z$<br>$V_{\text{RMS}} - Z$ |                                     |                                     |       |

Toelichting op tabel Tabel V.4:

- de kolommen 'meetsysteem' en 'spoor' geven aan voor welk meetsysteem bijbehorend spoor (zie Tabel V.1) de betreffende rijen de analyseresultaten gepresenteerd worden;
- in de kolom '# passages' staat weergegeven op hoeveel passages het bijbehorende model gebaseerd is, en dus ook op hoeveel passages het effect van snelheidsverlaging geëvalueerd is. Voor de modellen voor de meettrein geeft dit aantal het aantal passages van de meettrein als geheel, plus het aantal passages van de zes afzonderlijke onderdelen;
- kolom 'trillingsniveau' geeft aan of het betreffende model het trillingsniveau  $V_{\text{eff,max}} - Z$  of  $V_{\text{RMS}} - Z$  als uitkomst geeft;
- de kolommen 'reductie (%) van 90 naar 60 km/h' en 'reductie (%) van 90 naar 40 km/h' geven respectievelijk de waargenomen gemiddelde reductiepercentages in trillingsniveau bij verlaging van de rijsnelheid van 90 km/h naar 60 km/h, en van 90 km/h naar 40 km/h. Bij deze gemiddelde reducties wordt ook de standaarddeviatie vermeld, die waarde zegt iets over de spreiding van de resulterende reducties. Negatieve reductiepercentages duiden op een toename. De totstandkoming van deze waarden is eerder in deze paragraaf toegelicht bij 'Evaluatie van effect snelheidsverlaging';
- het komt voor dat gemiddelde reductie erg laag zijn, of dat de standaarddeviatie betrekkelijk groot is. Dit zegt iets over de significantie van de resulterende reducties. Reductiewaarden waarvoor 0 in het interval 'gemiddelde  $\pm$  standaarddeviatie' ligt, worden gezien als niet-significant. De waarden waarvoor dit geldt worden *cursief* weergegeven;

- de kolom 'nrmse' geeft de *Normalized Root Mean Squared Error* (zoals eerder beschreven bij punt 4 aan het begin van deze paragraaf) weer van het betreffende model op basis van de testdata-voorspelling. Deze waarde zegt iets over de kwaliteit van het model, en niet direct iets over de reductiepercentages.

### V.3 Meetlocatie S1 (Waardenburg)

Deze paragraaf presenteert de uitkomsten van de data-analyse voor meetlocatie S1 in Waardenburg. Ter hoogte van de meetopstelling zijn twee sporen aanwezig: in volgorde vanuit het perspectief van de meetopstelling zijn deze aangeduid als spoor CJ en spoor BJ. Op deze meetlocatie is één meetsysteem geplaatst.

Op deze locatie ligt het spoor op een talud, dat ca. 4 meter hoger is gelegen dan het lokale maaiveld. De meetopstelling is op het gazon van Pompstraat 10 geplaatst, aan de oostzijde van het spoor. Ca. 75 meter ten noorden van de meetlocatie ligt het spoor op een kunstwerk over de provinciale weg N830. Langs het spoor staat een geluidscherm van ca. 2 meter hoog.

Sonderingsgegevens van de specifieke locatie zijn niet beschikbaar. In de omgeving zijn sonderingen uitgevoerd op ca. 200 meter ten westen en oosten van de locatie. Een interpolatie van deze sonderingen uit het Dinoloket [lit. 3] laat een toplaag van klei zien tot een lokale diepte van ca. 5,5 meter. Daaronder volgt een grove zandlaag tot ca. 7 meter diepte. Dan volgt nogmaals een laag van klei tot ca. 8,5 meter diepte. Daarna volgt nogmaals een (matig) grove zandlaag tot een diepte van tenminste 20 meter.

#### Resultaten

Onderstaande tabellen presenteren de resultaten van de praktijkproef voor meetlocatie S1 in Waardenburg. Tabel V.5 geeft de resultaten op basis van de data van de meettreinpassages, en Tabel V.6 op basis van de reguliere passages. Beide tabellen geven per spoor per trillingsniveau de gemiddelde percentuele reductie plusminus de standaarddeviatie in trillingsniveau ten opzichte van de referentiesituatie bij 90 km/h.

Tabel V.5 Meetlocatie S1 (Waardenburg), meettrein passages

| Meetsysteem | Spoor | # Passages | Trillingsniveau          | Reductie (%) van 90 naar 60 km/h | Reductie (%) van 90 naar 40 km/h | Nrmse |
|-------------|-------|------------|--------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-------|
| S1          | BJ    | 84         | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | $24.22 \pm 4.74$                 | $49.03 \pm 2.78$                 | 0,25  |
|             |       |            | $V_{\text{RMS}} - Z$     | $30.87 \pm 3.63$                 | $60.09 \pm 1.0$                  | 0,17  |
|             | CJ    | 84         | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | $23.87 \pm 3.25$                 | $60.96 \pm 3.08$                 | 0,20  |
|             |       |            | $V_{\text{RMS}} - Z$     | $40.17 \pm 1.23$                 | $68.83 \pm 1.38$                 | 0,15  |

Tabel V.6 Meetlocatie S1 (Waardenburg), reguliere passages inclusief volledige meettrein

| Meetsysteem | Spoor | # Passages | Trillingsniveau          | Reductie (%) van 90 naar 60 km/h | Reductie (%) van 90 naar 40 km/h | Nrmse |
|-------------|-------|------------|--------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-------|
| S1          | BJ    | 208        | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | $4,17 \pm 4,17$                  | $4,97 \pm 4,21$                  | 0,24  |
|             |       |            | $V_{\text{RMS}} - Z$     | $6,65 \pm 4,79$                  | $6,78 \pm 4,8$                   | 0,20  |
|             | CJ    | 252        | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | $6,18 \pm 7,09$                  | $14,92 \pm 9,08$                 | 0,27  |
|             |       |            | $V_{\text{RMS}} - Z$     | $8,27 \pm 11,53$                 | $15,44 \pm 12,56$                | 0,21  |

### Opmerkingen en bijzonderheden

Naar aanleiding van de bovenstaande tabellen wordt voor deze meetlocatie het volgende geconstateerd:

- 1 Op basis van de modeluitkomsten laat de proef met de meettrein duidelijk meer reductie zien in trillingsniveau bij verlaging van de rijsnelheid dan bij de reguliere passages. Dit is te verklaren doordat de dataset van meettreinpassages relatief veel spreiding heeft in snelheid en weinig spreiding in de overige parameters. Bij de reguliere goederentrein passages is dit juist omgekeerd: veel spreiding in treineigenschappen, maar juist betrekkelijk weinig in snelheid.
- 2 Bij de reguliere passages ligt voor de reductiepercentages 90 km/h naar 60 km/h zijn 3 van de 4 reducties in trillingsniveau niet significant. Voor deze waarden ligt 0 immers in het interval 'gemiddelde  $\pm$  standaarddeviatie'.
- 3 Als toevoeging op de vergelijking tussen de resultaten voor de meettrein en voor de reguliere treinen is Afbeelding V.3 bijgevoegd. Deze afbeelding laat spreidingsdiagrammen zien van snelheid met de beide trillingsniveaus. In de figuur is het bereden spoor aangegeven middels de kleurstelling, en de symbolisatie maakt onderscheid de datapunten van de meettrein van de reguliere treinen. Hierin komt duidelijk naar voren dat er voor beide sporen behoorlijk wat spreiding zit in de passagesnelheid van reguliere goederentreinen, al ligt het zwaartepunt voor beide sporen rond de 80-90 km/h. Vergeleken met de meettrein passages bevat de dataset duidelijk meer spreiding in het gemeten trillingsniveau. Vermoedelijk zijn andere parameters hierop van invloed. Dit heeft duidelijk invloed op de resulterende reductiepercentages.
- 4 Voor de meettreinpassages zijn de reductiepercentages voor spoor CJ lichtelijk hoger dan voor spoor BJ. Deze verschillen zijn ook te zien bij de resultaten voor de reguliere passages, al zijn de gemiddelde reducties hier, zeker voor spoor BJ, nihil.

### Invloed andere parameters

Om de invloed van andere parameters op het trillingsniveau  $V_{\text{eff,max}}$  te bepalen zijn de feature importances voor de modellen van spoor BJ en spoor CJ bekeken. Afbeelding V.4 geeft een feature importance diagram voor de het model voor spoor BJ, Afbeelding V.5 die voor spoor CJ.

Uit beide figuren blijkt dat de parameter voor pieklast ('qwm\_pieklast\_kn\_p80') het meest bepalend is voor het voorspelde trillingsniveau. In mindere mate is ook de wiellast ('qwm\_gemiddelde\_last\_kn\_p80') van belang in het model van spoor CJ. Voor spoor BJ zijn de feature importances minder uitgesproken dan voor spoor CJ.

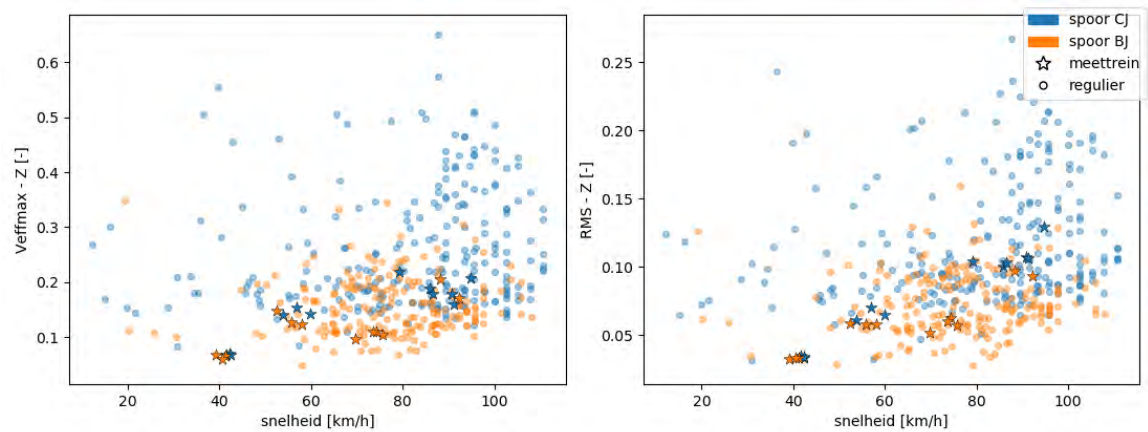
Voor deze parameters is in Afbeelding V.6 een reeks aan spreidingsdiagrammen toegevoegd. Hierin is middels het symbool het treintype aangeduid. De grootte van de marker geeft een indicatie van de gereden snelheid. Daarbij worden de volgende constatering gemaakt:

- 1 Voor beide sporen zit er voor alle typen goederentreinen spreiding in de snelheid. Een kanttekening daarbij is dat 'rollen staal' treinen op spoor BJ vooral met hogere snelheid passeren.
- 2 De algemene trend is dat zowel een toename in wiellast als pieklast leidt tot hogere trillingsniveaus.
- 3 De passages op deze meetlocatie betreffen voornamelijk containertreinen en treinen samengesteld uit diverse typen belading. Voor spoor CJ zijn het echter vooral de bulk- en keteltreinen die de zwaardere trillingen lijken te veroorzaken. Opvallend is dat deze zowel bij hogere als lagere piek- en wiellast een hoger trillingsniveau voortbrengen dan andere treintypes met vergelijkbare lasten. Voor spoor BJ kunnen treinen samengesteld uit diverse typen belading hier aan toegevoegd worden.
- 4 De RMS-hoog en -laag waarden zijn eigenlijk wat rare parameters. De diagrammen hieronder (en de vergelijkbare in andere paragrafen) geeft niet een duidelijk verband, bovendien zit er wat spreiding in de waarden voor de meettrein, wat bijzonder is. Dat geeft aan dat er spreiding zit in de metingen over de

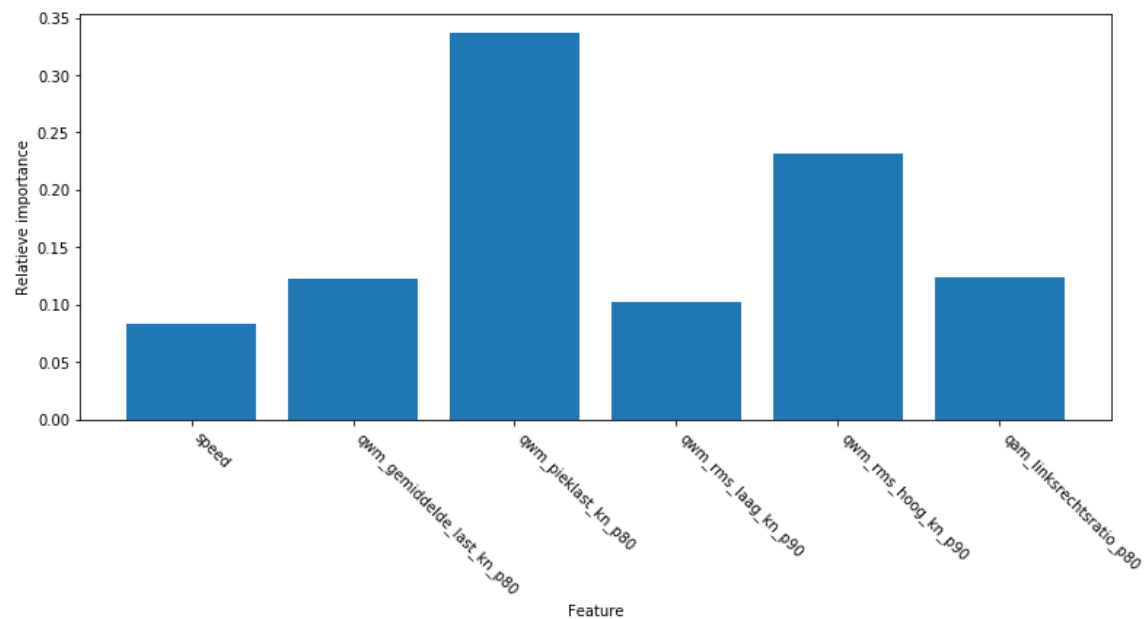
verschillende Quo Vadis-meetstations, of dat andere waarden gemeten worden als de trein op een ander moment het meetstation passeert.

Afbeeldingen

Afbeelding V.3 Spreidingsdiagram van snelheid met trillingsniveau met kleurstelling naar spoor, en indicatie voor meettrein

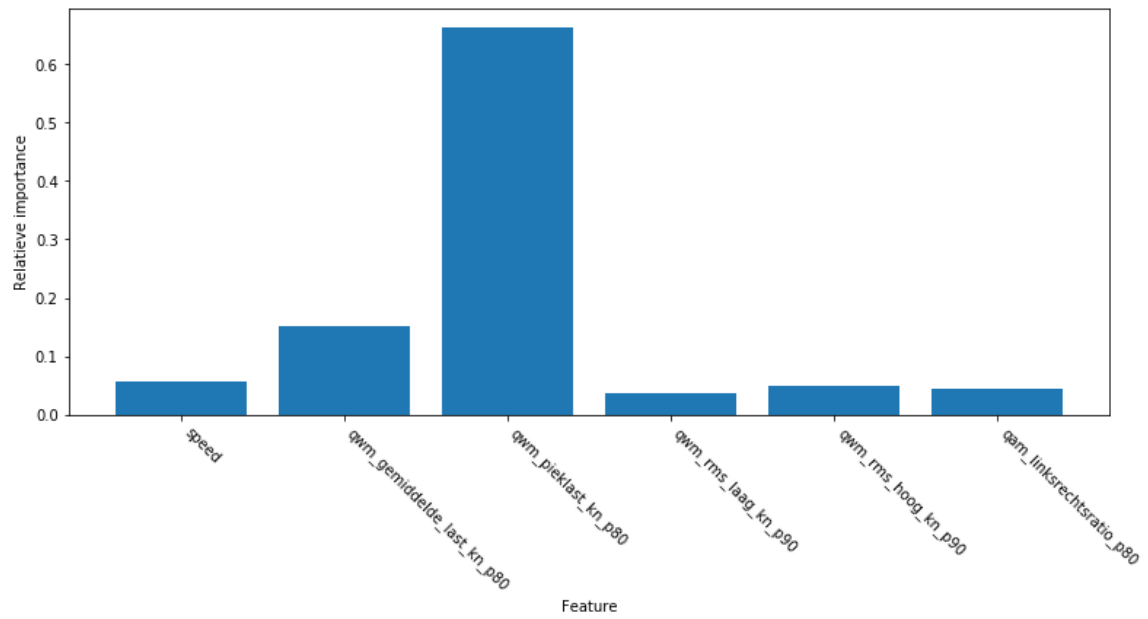


Afbeelding V.4 Feature importances van het model voor spoor BJ

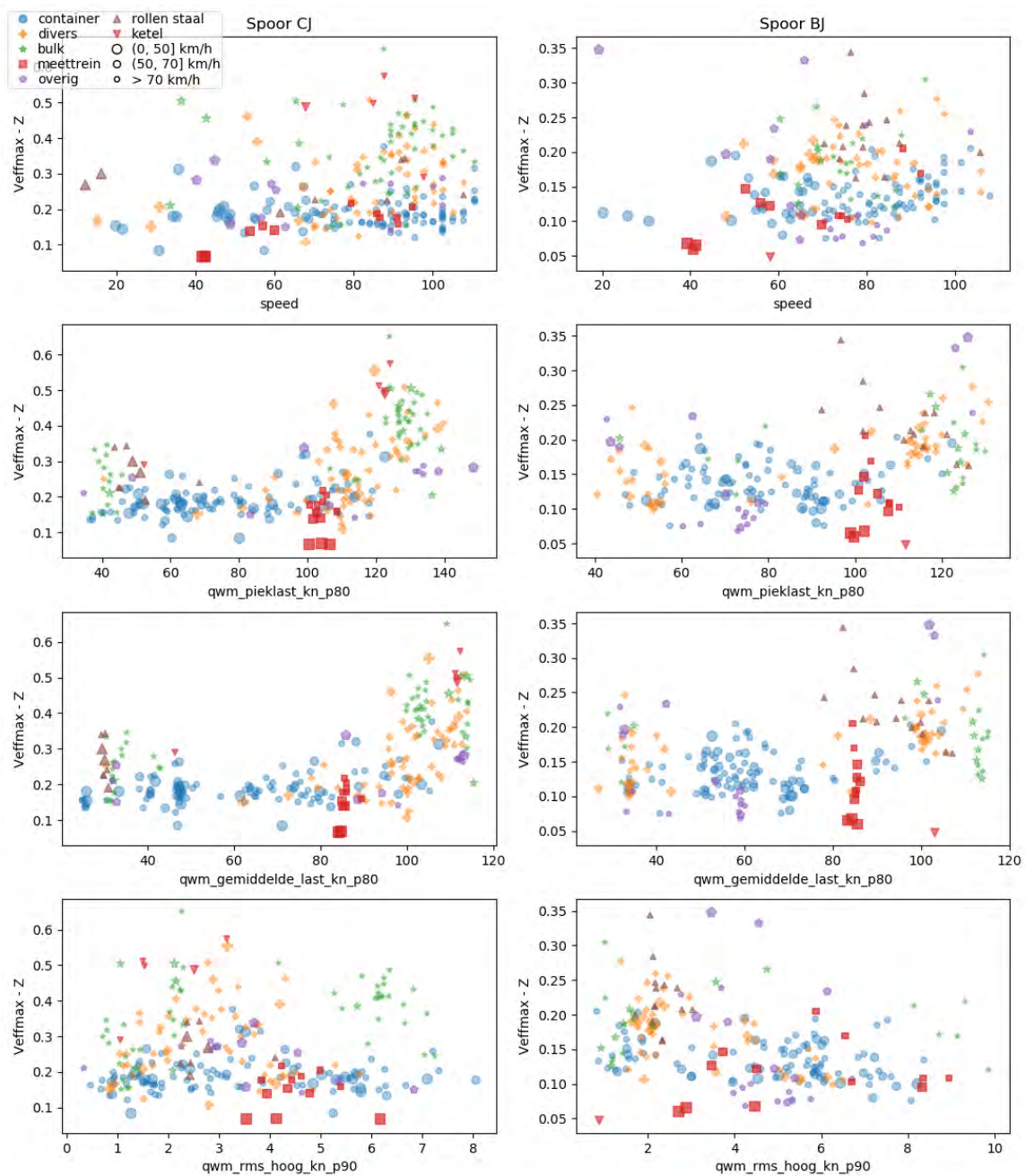




Afbeelding V.5 Feature importances van het model voor spoor CJ



Afbeelding V.6 Spreidingsdiagram van trillingsniveau  $V_{eff,max}$  met diverse parameters voor meetlocatie S1. Indicatie voor treintype en markergrootte voor snelheid



## V.4 Meetlocatie S2 (Zaltbommel)

Deze paragraaf presenteert de uitkomsten van de data-analyse voor meetlocatie S2 in Zaltbommel. Op deze meetlocatie zijn drie meetsystemen geplaatst, met een onderlinge afstand van 25 meter. Ter hoogte van de meetopstellingen zijn drie sporen aanwezig: in volgorde vanuit het perspectief van de meetopstelling zijn deze aangeduid als spoor 703, spoor 702 en spoor 701.

De meetlocatie Zaltbommel ligt op het terrein van het voormalige station Zaltbommel, aan de oostzijde van het spoor. Op deze locatie bestaat de sporenbundel uit drie sporen. Het derde spoor ligt ten oosten van de doorgaande sporen en takt hier op ca. 750 meter zuidwaarts en ca. 500 meter noordwaarts op aan. Tussen meetopstelling en spoor is het terrein vlak. Deels is bestrating aanwezig.

Sonderingsgegevens van de specifieke locatie zijn niet beschikbaar. In de omgeving zijn sonderingen uitgevoerd op ca. 200 meter afstand van de locatie. Een interpolatie van deze sonderingen uit het Dinoloket [lit. 3] laat een reeks toplagen van klei en zandige klei zien tot een lokale diepte van ca. 10,5 meter. Daarna volgen (matig) grove zandlagen tot een diepte van tenminste 20 meter (op ca. 16 meter is wellicht nog een grindlaag aanwezig).

### Resultaten

Onderstaande tabellen presenteren de resultaten van de praktijkproef voor de meetlocaties in Zaltbommel. Tabel V.7 geeft de resultaten op basis van de data van de meettreinpassages, en Tabel V.8 op basis van de reguliere passages. Deze tabellen geven geen resultaten voor spoor 703, dit spoor heeft in de dataset nauwelijks passages en is om die reden in de analyse buiten beschouwing gelaten.

Tabel V.7 Meetlocatie S2 (Zaltbommel), meettrein passages

| Meetsysteem | Spoor | # Passages | Trillingsniveau          | Reductie (%) van<br>90 naar 60 km/h | Reductie (%) van<br>90 naar 40 km/h | Nrmse |
|-------------|-------|------------|--------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------|
| S2 - 1      | 701   | 42         | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | -                                   | -                                   | -     |
|             |       |            | $V_{\text{RMS}} - Z$     | -                                   | -                                   | -     |
|             | 702   | 126        | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | $7.69 \pm 3.38$                     | $46.34 \pm 5.09$                    | 0,19  |
|             |       |            | $V_{\text{RMS}} - Z$     | $30.31 \pm 3.62$                    | $56.15 \pm 4.03$                    | 0,17  |
| S2 - 2      | 701   | 42         | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | -                                   | -                                   | -     |
|             |       |            | $V_{\text{RMS}} - Z$     | -                                   | -                                   | -     |
|             | 702   | 126        | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | $26.69 \pm 2.56$                    | $53.88 \pm 4.61$                    | 0,20  |
|             |       |            | $V_{\text{RMS}} - Z$     | $38.32 \pm 7.87$                    | $62.55 \pm 5.78$                    | 0,17  |
| S2 - 3      | 701   | 42         | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | -                                   | -                                   | -     |
|             |       |            | $V_{\text{RMS}} - Z$     | -                                   | -                                   | -     |
|             | 702   | 126        | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | $9.28 \pm 4.9$                      | $57.63 \pm 4.54$                    | 0,11  |
|             |       |            | $V_{\text{RMS}} - Z$     | $32.76 \pm 6.81$                    | $62.34 \pm 2.55$                    | 0,10  |

Tabel V.8 Meetlocatie S2 (Zaltbommel), reguliere passages inclusief volledige meettrein

| Meetsysteem | Spoor | # Passages | Trillingsniveau          | Reductie (%) van<br>90 naar 60 km/h | Reductie (%) van<br>90 naar 40 km/h | Nrmse |
|-------------|-------|------------|--------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------|
| S2 - 1      | 701   | 241        | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | $-0,82 \pm 1,89$                    | $-1,0 \pm 1,79$                     | 0,29  |
|             |       |            | $V_{\text{RMS}} - Z$     | $0,38 \pm 4,06$                     | $0,26 \pm 3,97$                     | 0,25  |
|             | 702   | 315        | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | $6,58 \pm 5,43$                     | $21,37 \pm 8,56$                    | 0,23  |

| Meetsysteem | Spoor | # Passages | Trillingsniveau   | Reductie (%) van 90 naar 60 km/h | Reductie (%) van 90 naar 40 km/h | Nrmse |
|-------------|-------|------------|-------------------|----------------------------------|----------------------------------|-------|
|             |       |            | $V_{RMS} - Z$     | $8,23 \pm 4,86$                  | $22,09 \pm 10,37$                | 0,22  |
| S2 - 2      | 701   | 217        | $V_{eff,max} - Z$ | $-1,89 \pm 3,58$                 | $-1,89 \pm 3,58$                 | 0,22  |
|             |       |            | $V_{RMS} - Z$     | $-1,21 \pm 4,97$                 | $-1,21 \pm 4,97$                 | 0,19  |
|             | 702   | 276        | $V_{eff,max} - Z$ | $6,42 \pm 6,95$                  | $16,2 \pm 13,98$                 | 0,26  |
|             |       |            | $V_{RMS} - Z$     | $7,39 \pm 5,38$                  | $20,49 \pm 13,39$                | 0,23  |
| S2 - 3      | 701   | 243        | $V_{eff,max} - Z$ | $0,68 \pm 2,85$                  | $0,68 \pm 2,85$                  | 0,26  |
|             |       |            | $V_{RMS} - Z$     | $1,99 \pm 3,67$                  | $1,99 \pm 3,67$                  | 0,21  |
|             | 702   | 312        | $V_{eff,max} - Z$ | $5,83 \pm 4,92$                  | $26,87 \pm 11,4$                 | 0,21  |
|             |       |            | $V_{RMS} - Z$     | $9,19 \pm 6,34$                  | $28,98 \pm 13,37$                | 0,18  |

### Opmerkingen en bijzonderheden

Naar aanleiding van de bovenstaande tabellen wordt voor deze meetlocatie het volgende geconstateerd:

- 1 Afbeelding V.7 laat zien dat de meettrein spoor 701 enkel heeft gepasseerd met een snelheid rond de 90 km/h. Daardoor is er onvoldoende spreiding in snelheid om een uitspraak te kunnen doen over het effect van snelheidsverlaging op trillingsniveau. Voor de meettrein passages op spoor 702 zit er meer spreiding in de snelheid, al zijn er betrekkelijk weinig passages met een snelheid rond de 60 km/h. Bovendien heeft de meettrein spoor 702 in beide richtingen bereden.
- 2 Modellen voor de data van de verschillende meetsystemen laten een vergelijkbaar resultaat zien voor de reguliere passages. Voor de meettrein passages zijn de reducties bij 60 km/h wat verschillend. Dit is te wijten aan het summiere aantal passages bij 60 km/h, en de onzekerheid die gepaard gaat bij het bepalen van de rijsnelheid waardoor S2-1 een hogere reductie van het trillingsniveau laat zien bij 60 km/h dan de andere meetsystemen.
- 3 Op basis van de modeluitkomsten voor spoor 702 laat de proef met de meettrein duidelijk meer reductie zien in trillingsniveau bij verlaging van de rijsnelheid dan bij de reguliere passages. Dit is te verklaren doordat de dataset van meettreinpassages relatief veel spreiding heeft in snelheid en weinig spreiding in de overige parameters. Bij de reguliere goederentrein passages is dit juist omgekeerd: veel spreiding in treineigenschappen, maar juist betrekkelijk weinig in snelheid.
- 4 Voor de reguliere passages zit er een verschil tussen de resulterende reducties in trillingsniveau bij het model voor spoor 702 en het model voor spoor 701. Voor spoor 702 zijn er duidelijk reducties te zien in de trillingsniveaus bij verlaging van de rijsnelheid, bij spoor 701 niet. De spreidingsdiagrammen in Afbeelding V.8 tot en met Afbeelding V.10 laten zien dat vooral voor spoor 701 geen verband tussen snelheid en trillingsniveau zichtbaar is in de data, terwijl er wel voldoende spreiding lijkt te zitten in passagesnelheid. De feature importance plot in Afbeelding V.12 laten ook zien dat het model snelheid niet als belangrijke factor ziet; volgens het model maakt het niet uit of de snelheid wordt verlaagd naar 60 of 40 km/h, het heeft allebei even weinig effect op het trillingsniveau. Dit onderbouwt waarom voor meetsystemen S2-2 en S2-3 de modellen voor spoor 702 dezelfde reducties zien voor verlaging van snelheid 90 naar 60 km/h, als van 90 naar 40 km/h.

### Invloed andere parameters

Om de invloed van andere parameters op het trillingsniveau  $V_{eff,max}$  te bepalen zijn de feature importances voor de modellen van spoor 701 en spoor 702 bekeken. Afbeelding V.11 geeft een feature importance diagram voor de het model voor spoor 701, Afbeelding V.12 die voor spoor 702.

Uit deze figuren blijkt dat het model voor spoor 701 de parameter voor wiellast ("qwm\_gemiddelde\_last\_kn\_p80") als meest bepalende parameter ziet voor trillingsniveau, en dat het model

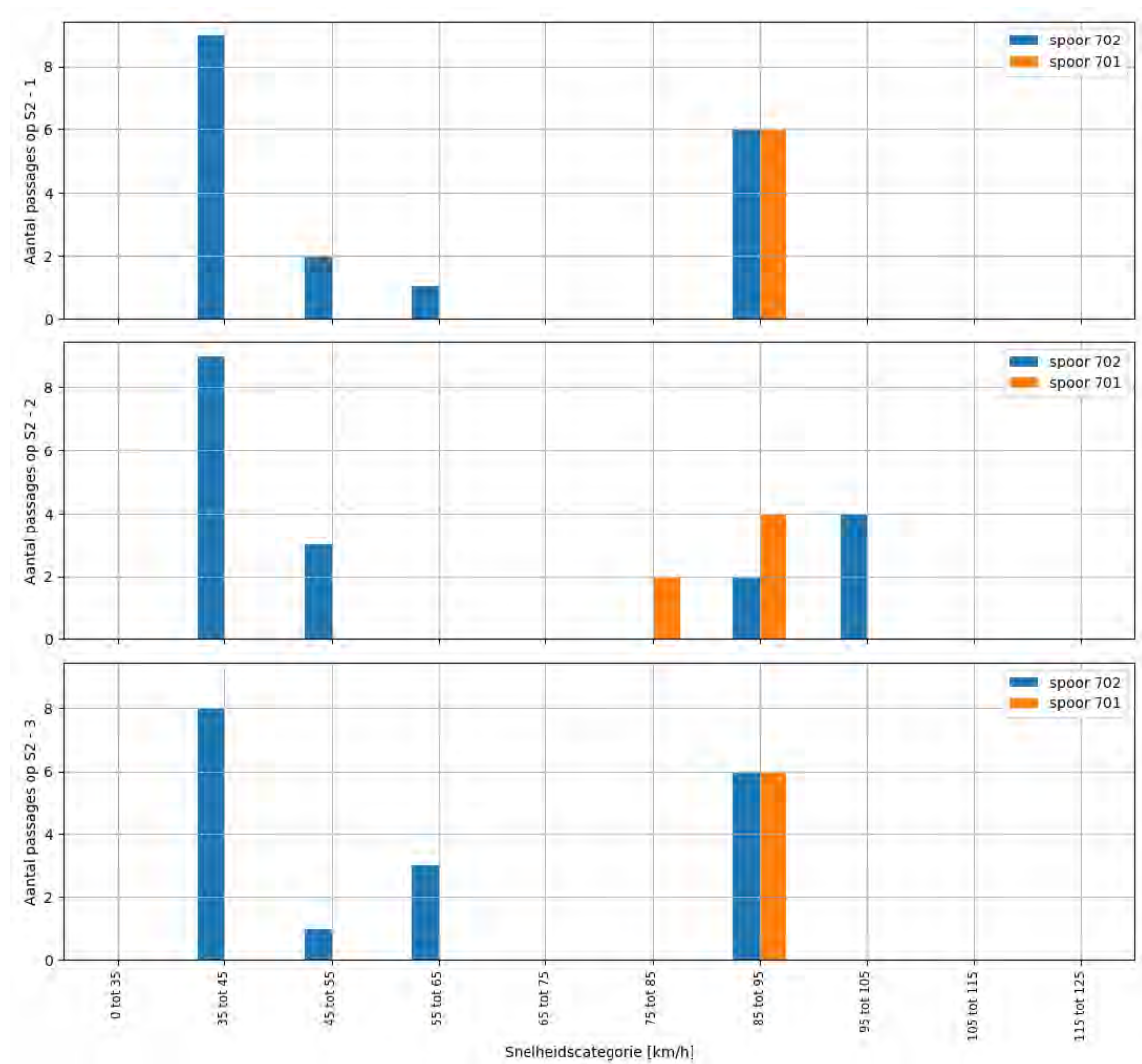
voor spoor 702 voornamelijk de pieklast ('qwm\_pieklast\_kn\_p80') ziet als meest bepalende parameter. Ook maken beide afbeeldingen duidelijk dat het model voor spoor 702 de snelheid ('speed') als grotere invloed ziet dan dat voor spoor 701.

Voor de parameters voor wiellast en pieklast is in Afbeelding V.13 een reeks aan spreidingsdiagrammen toegevoegd voor de metingen van meetsysteem S2-3. In deze afbeelding is middels de marker het treintype aangeduid. De grootte van de marker geeft een indicatie van de gereden snelheid. De diagrammen voor meetsystemen S2-1 en S2-2 geven een vergelijkbaar beeld en zijn om die reden niet bijgevoegd. Dit is een belangrijke constatering aangezien dit aangeeft dat er consistentie is tussen de verschillende meetsystemen. De volgende punten komen uit de figuren naar voren:

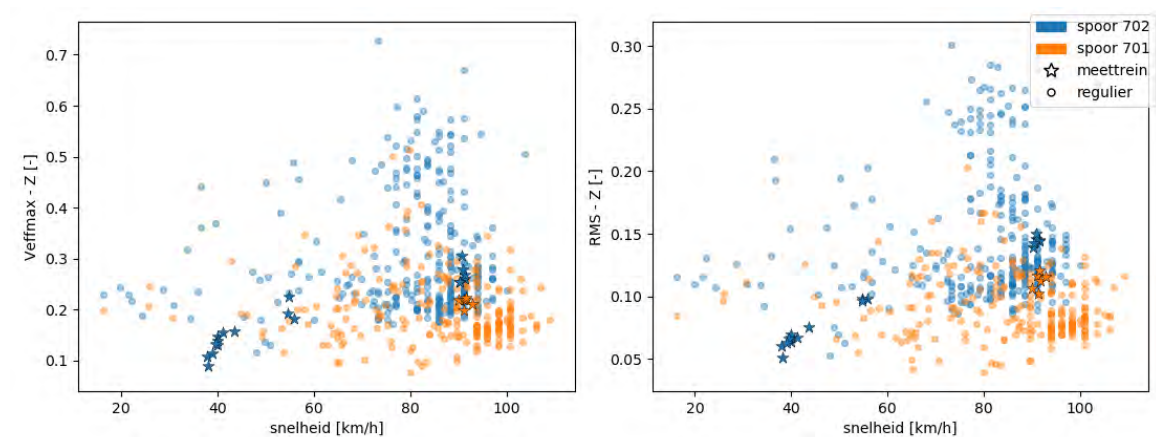
- 1 Voor beide sporen zit er voor alle typen goederentreinen spreiding in de snelheid. Daarbij is de algemene trend voor beide sporen dat een toename in wiellast en een toename in pieklast resulteert in een hoger trillingsniveau.
- 2 Voor spoor 702 zijn het vooral de bulk- en keteltreinen en treinen van een diverse samenstelling die de hogere trillingsniveaus veroorzaken. Dit zijn voor spoor 702 ook de treinen met hogere pieklasten. Daarnaast valt op dat ook bij lagere pieklasten dit type trein een hoger trillingsniveau voortbrengt dan andere treintypes met vergelijkbare pieklasten. Daarnaast lijkt er voor bulktreinen op dit spoor een licht verband zichtbaar te zijn tussen trillingsniveau en snelheid, waarbij treinen met een vergelijkbare wiel- en/of pieklast een lager trillingsniveau voortbrengen bij lagere snelheid.
- 3 Voor spoor 701 komt ditzelfde beeld terug als voor spoor 702. Daaraan toevoegend zijn het hier ook de 'rollen staal' treinen die hier de zwaardere trillingsniveaus lijken voort te brengen, deze hebben op dit spoor ook een hogere wiellast. Deze treinen rijden overigens niet met hoge wiellasten over spoor 702, vermoedelijk rijden deze onbeladen over spoor 702.
- 4 Containertreinen zijn op deze meetlocatie het meest voorkomende treintype. Deze lijken echter niet de zwaarste trillingen te veroorzaken.

## Afbeeldingen

Afbeelding V.7 Aantal meetrein passages per snelheidscategorie per spoor

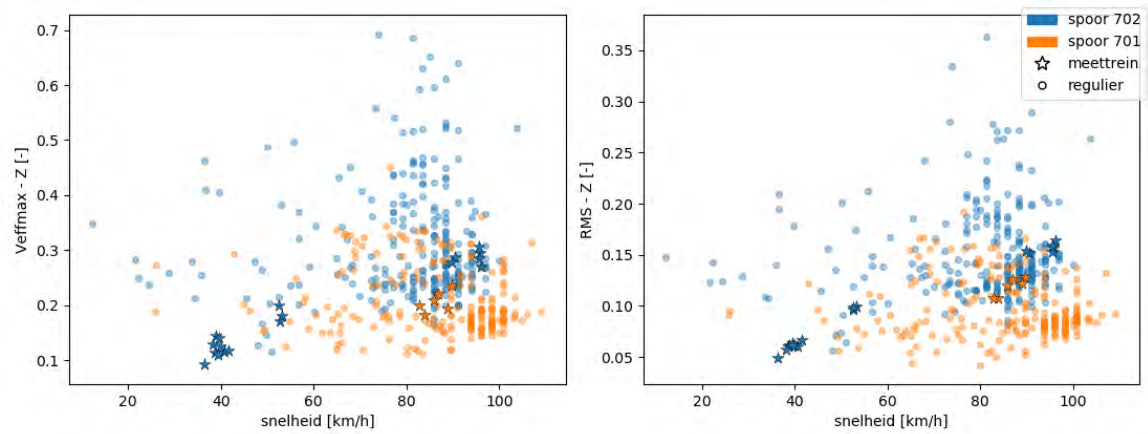


Afbeelding V.8 Spreidingsdiagram van snelheid met trillingsniveau voor passages bij meetopstelling S2-1 met kleurstelling naar spoor, en indicatie voor meetrein

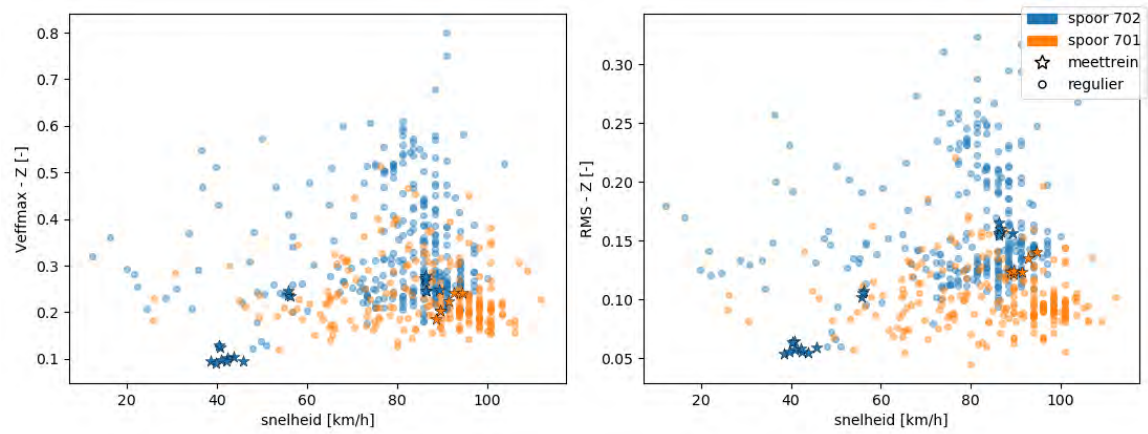




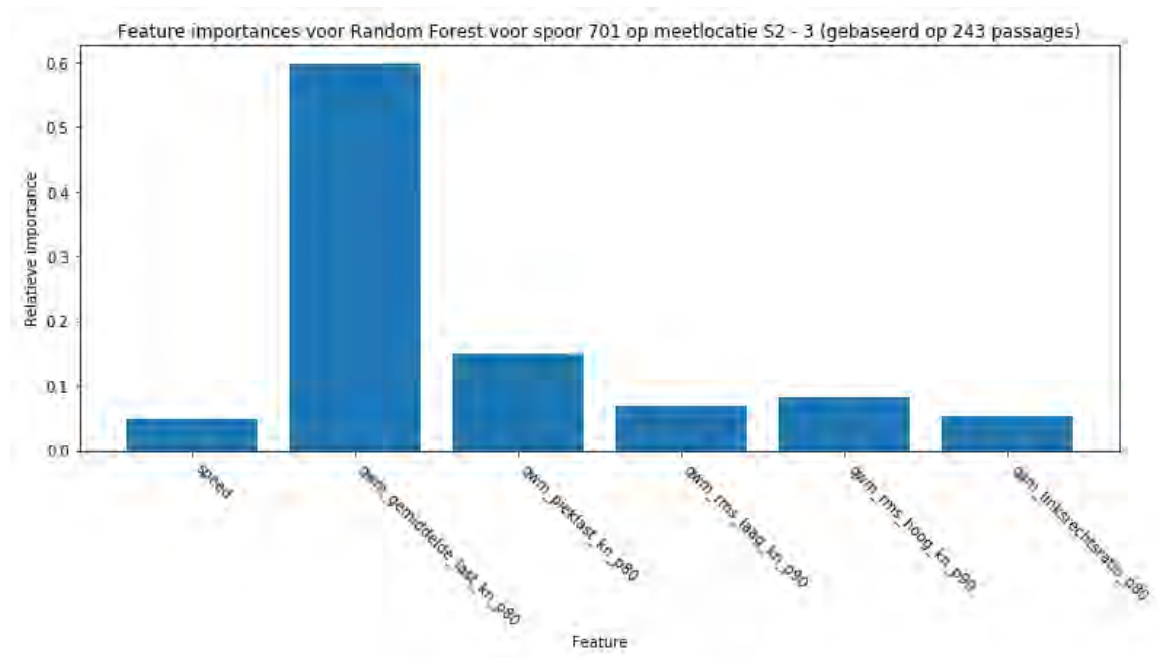
Afbeelding V.9 Spreidingsdiagram van snelheid met trillingsniveau voor passages bij meetopstelling S2-2 met kleurstelling naar spoor, en indicatie voor meettrein



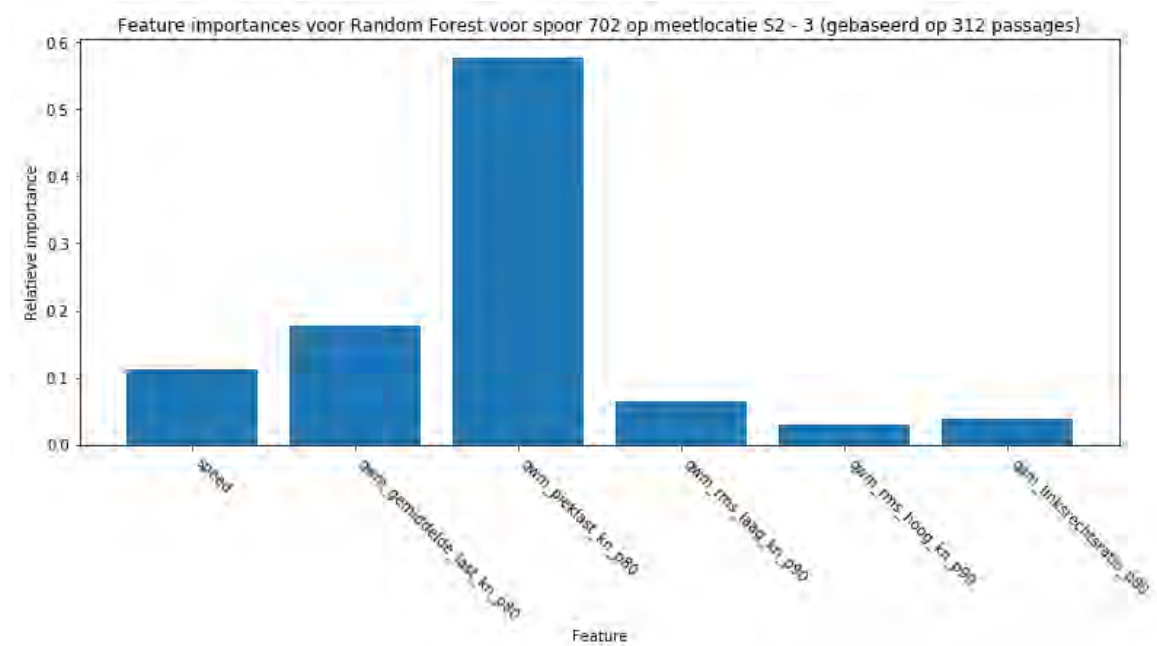
Afbeelding V.10 Spreidingsdiagram van snelheid met trillingsniveau voor passages bij meetopstelling S2-3 met kleurstelling naar spoor, en indicatie voor meettrein



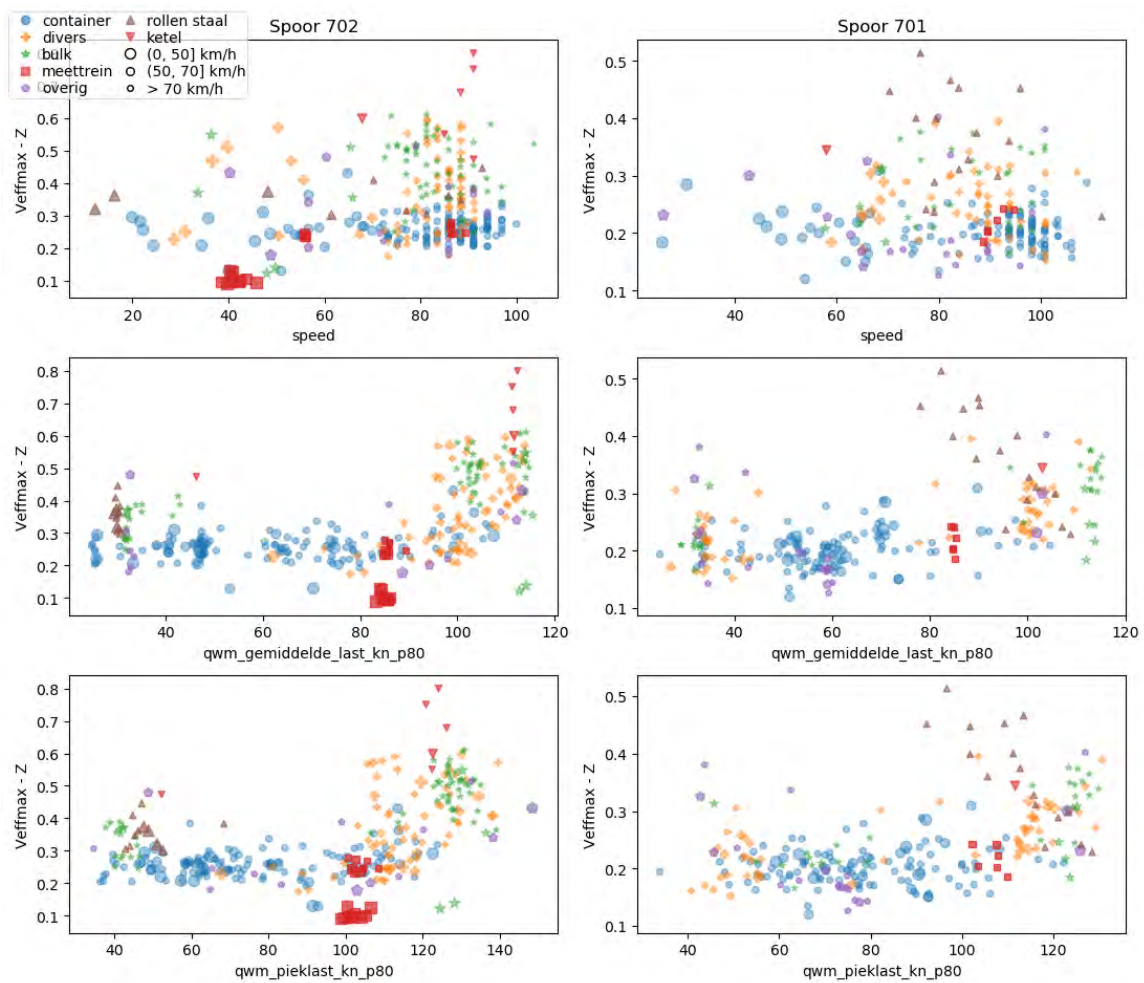
Afbeelding V.11 Feature importances van het model voor spoor 701 behorende bij meetsysteem S2-3, overige meetsystemen laten een vergelijkbaar beeld zien



Afbeelding V.12 Feature importances van het model voor spoor 702 behorende bij meetsysteem S2-3, overige meetsystemen laten een vergelijkbaar beeld zien



Afbeelding V.13 Spreidingsdiagram van trillingsniveau  $V_{eff,max}$  met diverse parameters voor meetlocatie S2-3. Indicatie voor treintype en markergroote voor snelheid



## V.5 Meetlocatie S3 (Hedel)

Deze paragraaf presenteert de uitkomsten van de data-analyse voor meetlocatie S3 in Hedel. Op deze meetlocatie zijn drie meetsystemen geplaatst, met een onderlinge afstand van 25 meter. Ter hoogte van de meetopstellingen zijn twee sporen aanwezig: in volgorde vanuit het perspectief van de meetopstelling zijn deze aangeduid als spoor B en spoor C.

De meetlocatie te Hedel ligt op het gazon van Stationsweg 11, aan de westzijde van het spoor. Aan de oostzijde van het perceel, op onderstaande luchtfoto's nog niet zichtbaar, is tussen het gazon en het spoor recent een grondwal opgeworpen. Op dit perceel vond tijdens het uitvoeren van de metingen nieuwbouw plaats. De daarmee samenhangende stoortrillingen zijn uit de meetgegevens verwijderd.

Sonderingsgegevens van de specifieke locatie zijn niet beschikbaar. In de omgeving zijn sonderingen uitgevoerd op ca. 100-300 meter afstand van de locatie. Een interpolatie van deze sonderingen uit het Dinoloket [lit. 3] laat een toplaag van (zandige) klei zien tot een lokale diepte van ca. 3 meter. Daarna volgt een laag veen van 0,5 meter. Tot 6 meter volgt daarna een laag van matig grof zand. Tussen 6 en 10 meter is fijn zand aanwezig. Daarna bestaat de bodem tot een diepte van tenminste 20 meter uit (matig) grof zand.

### Resultaten

Onderstaande tabellen presenteren de resultaten van de praktijkproef voor de meetlocaties in Hedel. Tabel V.9 geeft de resultaten op basis van de data van de meettreinpassages, en Tabel V.10 op basis van de reguliere passages.

Tabel V.9 Meetlocatie S3 (Hedel), meettrein passages

| Meetsysteem | Spoor | # Passages | Trillingsniveau          | Reductie (%) van<br>90 naar 60 km/h | Reductie (%) van<br>90 naar 40 km/h | Nrmse |
|-------------|-------|------------|--------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------|
| S3 - 1      | B     | 42         | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | -                                   | -                                   | -     |
|             |       |            | $V_{\text{RMS}} - Z$     | -                                   | -                                   | -     |
|             | C     | 126        | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | $9.01 \pm 8.71$                     | $48.5 \pm 4.63$                     | 0,25  |
|             |       |            | $V_{\text{RMS}} - Z$     | $22.52 \pm 7.21$                    | $57.58 \pm 3.26$                    | 0,21  |
| S3 - 2      | B     | 42         | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | -                                   | -                                   | -     |
|             |       |            | $V_{\text{RMS}} - Z$     | -                                   | -                                   | -     |
|             | C     | 126        | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | $5.22 \pm 7.1$                      | $48.66 \pm 8.57$                    | 0,30  |
|             |       |            | $V_{\text{RMS}} - Z$     | $12.77 \pm 4.77$                    | $54.49 \pm 5.57$                    | 0,25  |
| S3 - 3      | B     | 42         | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | -                                   | -                                   | -     |
|             |       |            | $V_{\text{RMS}} - Z$     | -                                   | -                                   | -     |
|             | C     | 126        | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | $2.32 \pm 0.8$                      | $36.73 \pm 10.7$                    | 0,28  |
|             |       |            | $V_{\text{RMS}} - Z$     | $3.2 \pm 1.99$                      | $44.05 \pm 5.37$                    | 0,20  |

Tabel V.10 Meetlocatie S3 (Hedel), reguliere passages inclusief volledige meettrein

| Meetsysteem | Spoor | # Passages | Trillingsniveau          | Reductie (%) van<br>90 naar 60 km/h | Reductie (%) van<br>90 naar 40 km/h | Nrmse |
|-------------|-------|------------|--------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------|
| S3 - 1      | B     | 242        | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | $-4,19 \pm 6,61$                    | $-15,34 \pm 7,53$                   | 0,42  |
|             |       |            | $V_{\text{RMS}} - Z$     | $-2,3 \pm 14,0$                     | $-12,08 \pm 17,02$                  | 0,33  |
|             | C     | 314        | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | $4,13 \pm 2,69$                     | $3,19 \pm 5,33$                     | 0,26  |
|             |       |            | $V_{\text{RMS}} - Z$     | $9,32 \pm 6,02$                     | $8,73 \pm 10,05$                    | 0,23  |

| Meetsysteem | Spoor | # Passages | Trillingsniveau          | Reductie (%) van 90 naar 60 km/h | Reductie (%) van 90 naar 40 km/h | Nrmse |
|-------------|-------|------------|--------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-------|
| S3 - 2      | B     | 196        | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | $2,87 \pm 2,85$                  | $3,07 \pm 2,86$                  | 0,30  |
|             |       |            | $V_{\text{RMS}} - Z$     | $4,05 \pm 6,16$                  | $3,8 \pm 6,07$                   | 0,28  |
|             | C     | 256        | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | $2,86 \pm 5,94$                  | $7,02 \pm 7,11$                  | 0,29  |
|             |       |            | $V_{\text{RMS}} - Z$     | $8,76 \pm 4,02$                  | $13,52 \pm 5,01$                 | 0,29  |
| S3 - 3      | B     | 197        | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | $-0,44 \pm 2,42$                 | $0,11 \pm 2,56$                  | 0,24  |
|             |       |            | $V_{\text{RMS}} - Z$     | $-0,22 \pm 2,47$                 | $-0,22 \pm 2,55$                 | 0,20  |
|             | C     | 262        | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | $9,61 \pm 4,92$                  | $10,09 \pm 4,68$                 | 0,28  |
|             |       |            | $V_{\text{RMS}} - Z$     | $11,66 \pm 5,15$                 | $14,28 \pm 5,54$                 | 0,25  |

### Opmerkingen en bijzonderheden

Naar aanleiding van de bovenstaande tabellen wordt voor deze meetlocatie het volgende geconstateerd:

- 1 Afbeelding V.14 laat zien dat de meettrein spoor B enkel heeft gepasseerd met een snelheid rond de 80-90 km/h. Daardoor is er onvoldoende spreiding in snelheid om een uitspraak te kunnen doen over het effect van snelheidsverlaging op trillingsniveau. Voor de meettrein passages op spoor C zit er meer spreiding in de snelheid. Voor spoor C worden er reducties in trillingsniveau gesignaleerd bij verlaging van de rijsnelheid; de verschillende meetsystemen laten hier een vergelijkbaar resultaat zien. Daarbij is er bij verlaging van 90 naar 60 km/h opvallend minder reductie te zien dan bij verlaging van 90 naar 40 km/h. Overigens is de spreiding in snelheid van de meettrein tussen de verschillende meetsystemen te wijten aan de onzekerheid optreedt bij het bepalen van de rijsnelheid.
- 2 De modellen voor de reguliere passages laten voor spoor C een voorzichtige reductie zien in trillingsniveau bij verlaging van de rijsnelheid. Bij de modellen voor spoor B is deze reductie niet of nauwelijks aanwezig. Voor de data van meetsysteem S3-1 laat het model zelfs een toename van trillingsniveau zien bij verlaging van rijsnelheid, zij het met een grote onzekerheid.
- 3 Afbeelding V.15 tot en met Afbeelding V.17 geven voor de drie meetsystemen de spreidingsdiagrammen van snelheid met de verschillende trillingsniveaus. Hieruit blijkt dat er voor de regulier passerende goederentreinen erg veel spreiding dit in de gemeten trillingsniveaus bij alle snelheden. Dit bemoeilijkt het vinden van een verband tussen rijsnelheid en trillingsniveau, wat terug te zien is in de eerder gepresenteerde tabellen.

### Invloed andere parameters

Om de invloed van andere parameters op het trillingsniveau  $V_{\text{eff,max}}$  te bepalen zijn de feature importances voor de modellen van spoor B en spoor C bekeken. In deze bijlage zijn de feature importances van de modellen voor meetsysteem S3-3 bijgevoegd. Afbeelding V.18 geeft een feature importance diagram voor de het model voor spoor B, Afbeelding V.19 die voor spoor C.

Uit deze figuren blijkt dat het model voor spoor B de parameter voor wiellast ('qwm\_gemiddelde\_last\_kn\_p80') als meest bepalende parameter ziet voor trillingsniveau, gevolgd door de parameter voor rms-hoog ('qwm\_rms\_hoog\_kn\_p90') en pieklast ('qwm\_pieklast\_kn\_p80'). Snelheid ('speed') speelt in dit model de kleinste rol. Voor het model voor spoor C zijn de parameters voor wiellast ('qwm\_gemiddelde\_last\_kn\_p80'), pieklast ('qwm\_pieklast\_kn\_p80') en snelheid ('speed') de meest bepalende factoren.

Voor de parameters voor wiellast en pieklast is in Afbeelding V.20 een reeks aan spreidingsdiagrammen toegevoegd voor de metingen van meetsysteem S3-3. In deze afbeelding is middels de marker het treintype aangeduid. De grootte van de marker geeft een indicatie van de gereden snelheid. De diagrammen voor

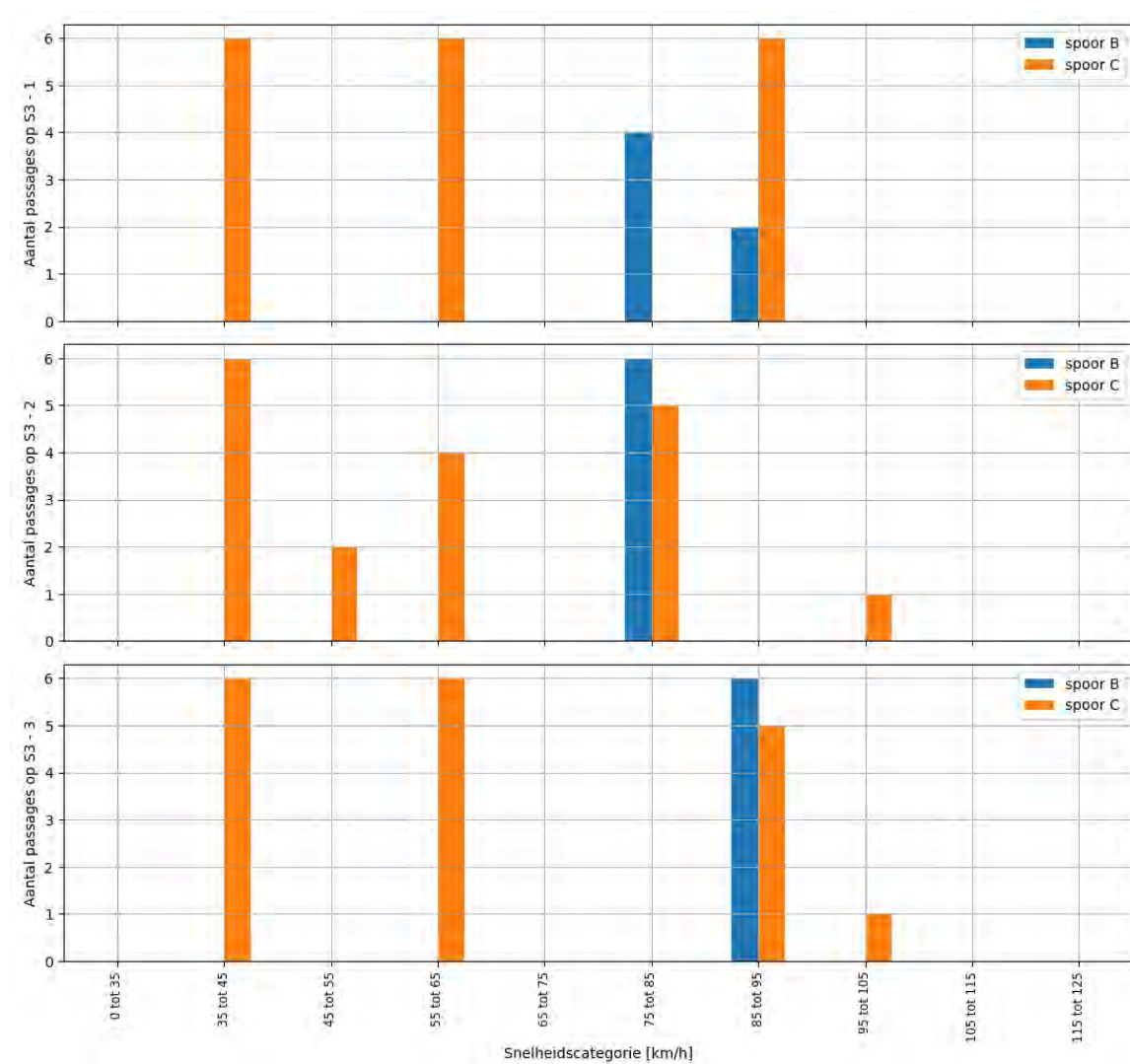
meetsystemen S2-1 en S2-2 geven een vergelijkbaar beeld en zijn om die reden niet bijgevoegd. De volgende punten komen uit de figuren naar voren:

- 1 Voor beide sporen zit er voor alle typen goederentreinen spreiding in de snelheid. Daarbij is de algemene trend dat een toename in wiellast en een toename in pieklast resulteert in een hoger trillingsniveau, al is dit verband minder duidelijk is voor spoor C. Voor rms-hoog lijkt het verband met trillingsniveau enigszins negatief. De parameter voor rms-hoog geeft de effectieve waarde voor frequenties tussen 200 en 1000 Hz, een negatief verband geeft aan dat een lagere waarde (dus een lagere effectieve waarde voor deze frequenties) een hoger trillingsniveau geeft, wat opmerkelijk is.
- 2 Voor spoor B zijn het vooral de treinen met rollen staal en met een diverse samenstelling, en in iets mindere mate ook de bulktreinen, die de hogere trillingsniveaus veroorzaken. Voor spoor C zijn dit vooral de ketel- en bulktreinen, en de treinen met een diverse samenstelling. Voor beide sporen zijn dit ook de treinen met een hogere wiel- en pieklast. Opvallend is dat voor spoor C de licht of onbeladen treinen van type 'rollen staal' hogere trillingen veroorzaken in vergelijking met andere treintypes met vergelijkbare wiel- en pieklast.
- 3 Containertreinen zijn op deze meetlocatie het meest voorkomende treintype. Deze lijken echter niet de zwaarste trillingen te veroorzaken.

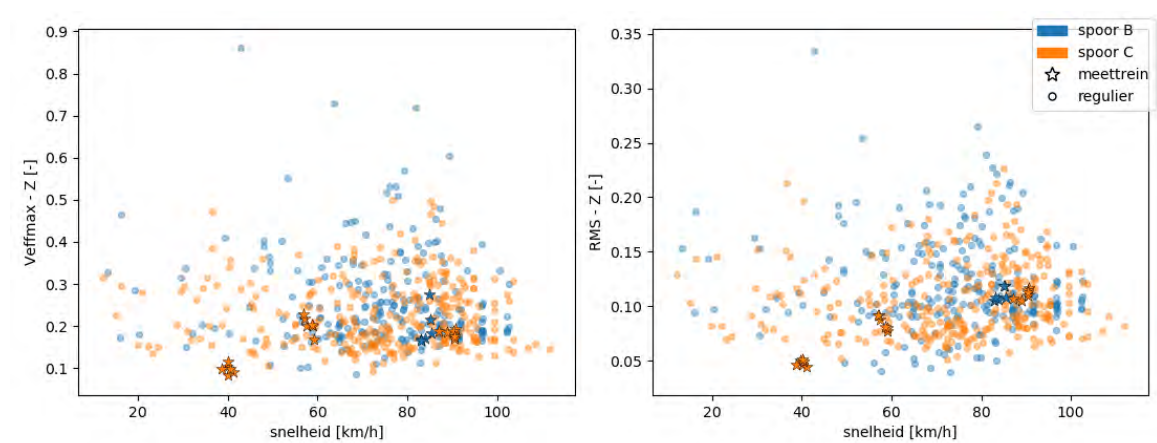


## Afbeeldingen

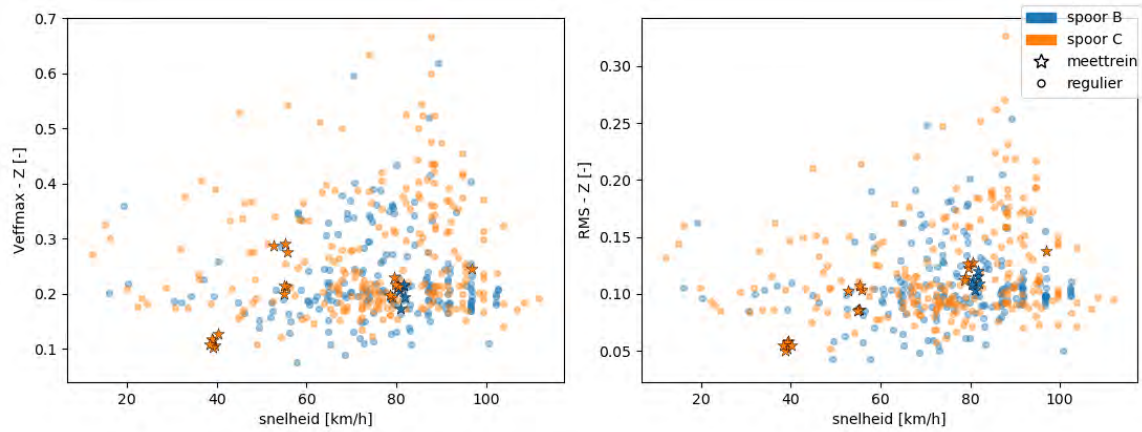
Afbeelding V.14 Aantal meetrein passages per snelheidscategorie per spoor



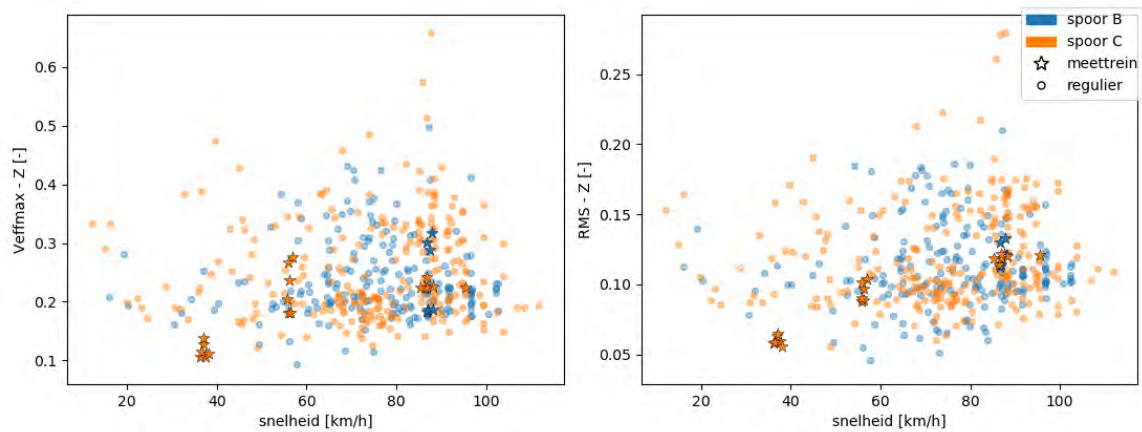
Afbeelding V.15 Spreidingsdiagram van snelheid met trillingsniveau voor passages bij meetopstelling S3-1 met kleurstelling naar spoor, en indicatie voor meetrein



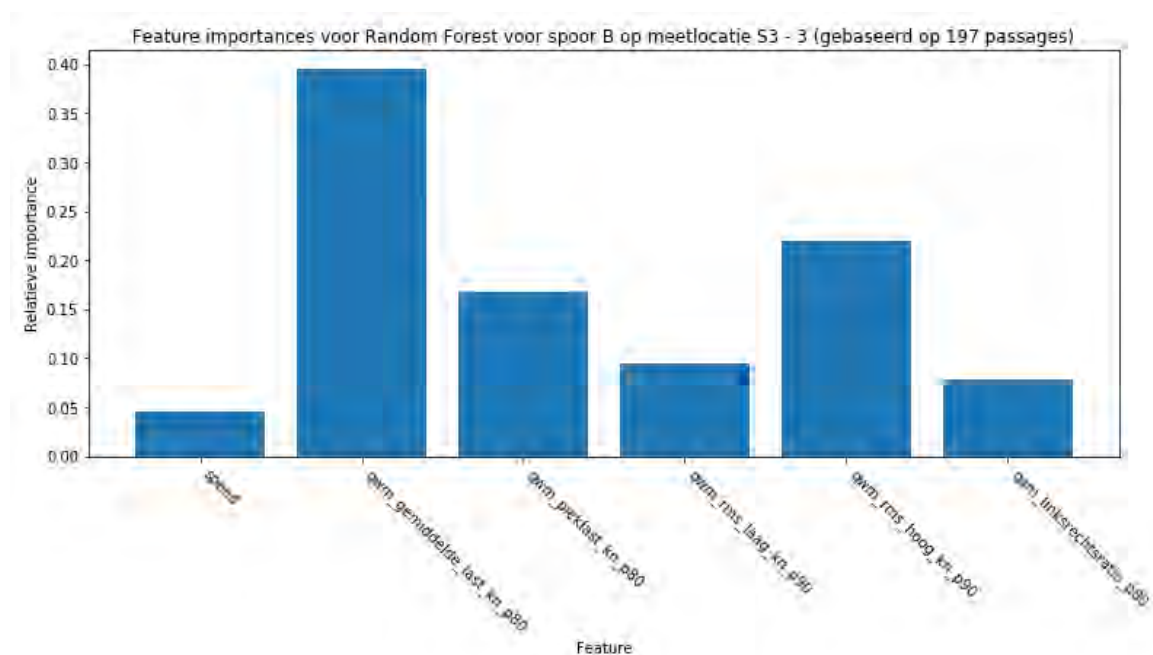
Afbeelding V.16 Spreidingsdiagram van snelheid met trillingsniveau voor passages bij meetopstelling S3-2 met kleurstelling naar spoor, en indicatie voor meettrein



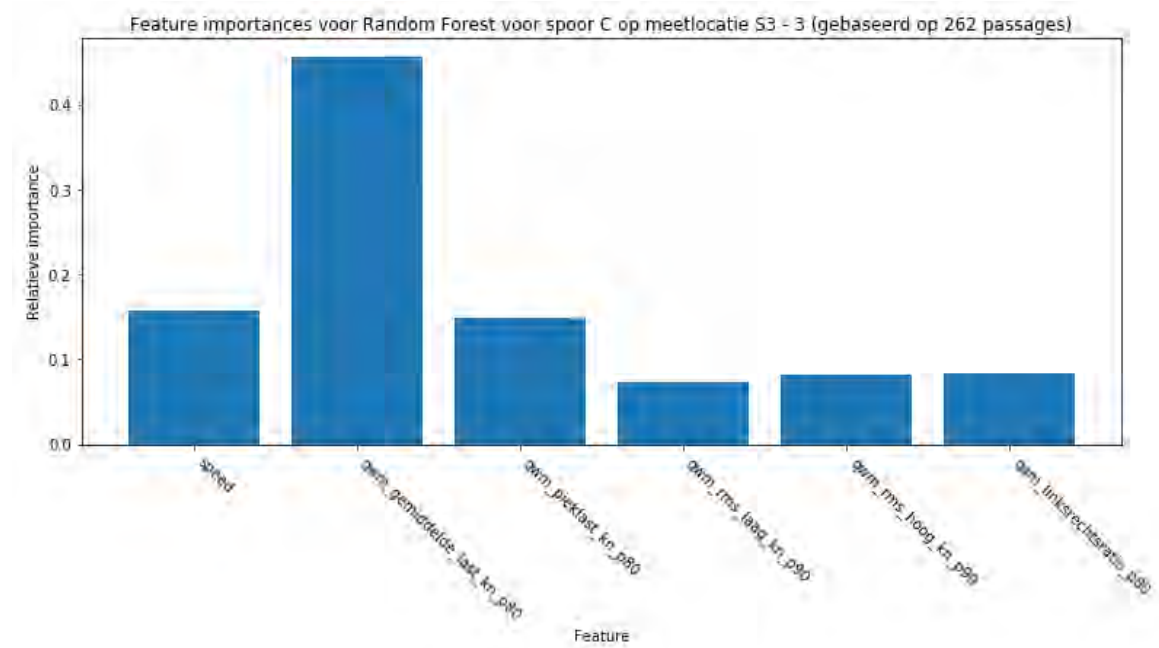
Afbeelding V.17 Spreidingsdiagram van snelheid met trillingsniveau voor passages bij meetopstelling S3-3 met kleurstelling naar spoor, en indicatie voor meettrein



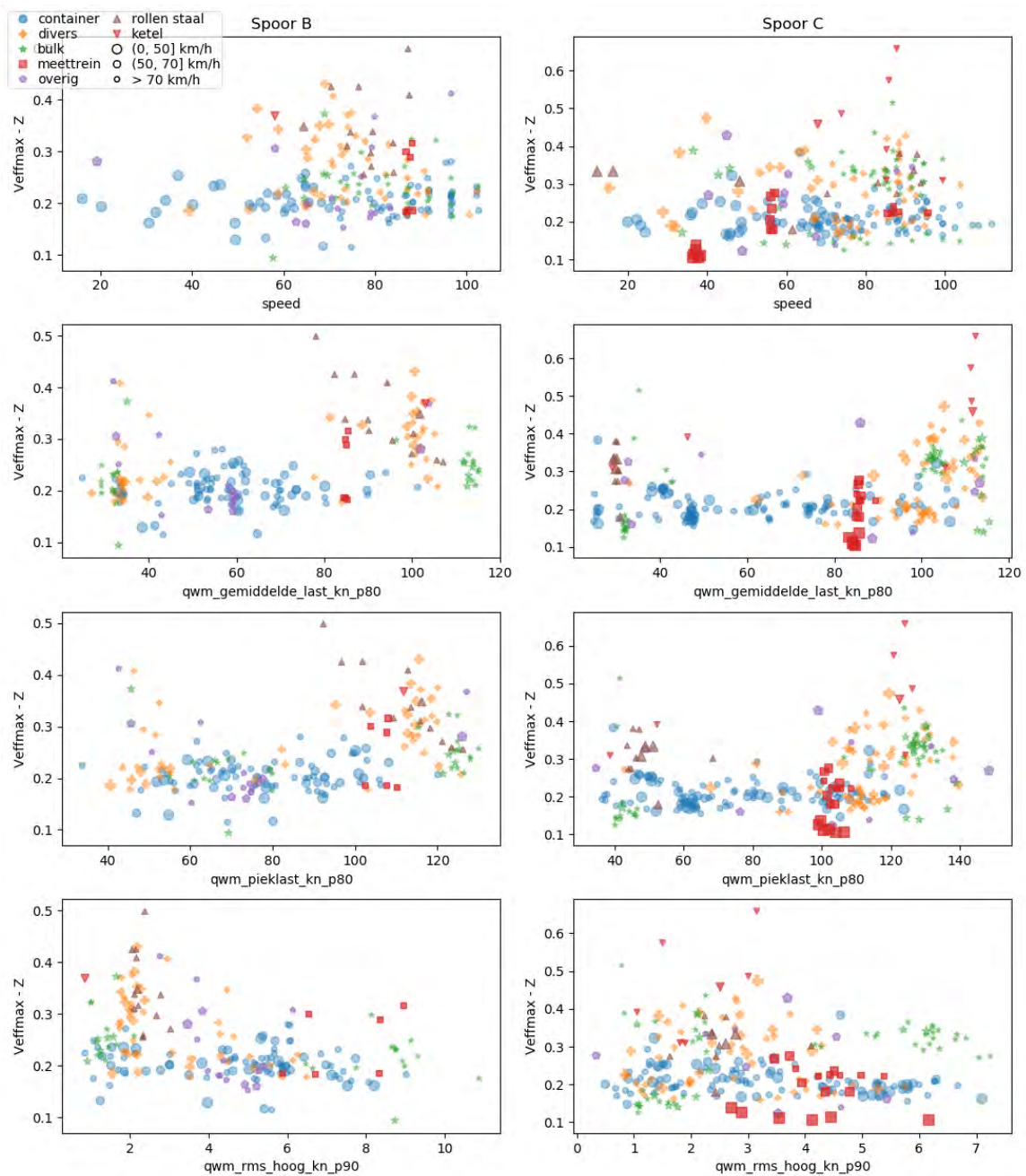
Afbeelding V.18 Feature importances van het model voor spoor B behorende bij meetsysteem S3-3



Afbeelding V.19 Feature importances van het model voor spoor C behorende bij meetsysteem S3-3



Afbeelding V.20 Spreidingsdiagram van trillingsniveau  $V_{eff,max}$  met diverse parameters voor meetlocatie S3-3. Indicatie voor treintype en markergrootte voor snelheid



## V.6 Meetlocatie S4 (Orthen, Den Bosch)

Deze paragraaf presenteert de uitkomsten van de data-analyse voor meetlocatie S4 in Orthen, Den Bosch. Op deze meetlocatie één meetsysteem geplaatst. Ter hoogte van de meetopstellingen zijn twee sporen aanwezig: in volgorde vanuit het perspectief van de meetopstelling zijn deze aangeduid als spoor C en spoor B.

De meetlocatie te Orthen ligt op het terrein van het onderstation Orthen, in beheer bij ProRail. Het onderstation ligt aan de oostzijde van het spoor. Tussen meetopstelling en spoor is het terrein vlak. Op ca. 90 meter ten zuiden van de meetlocatie ligt een overweg in het spoor. Op deze locatie zet het spoor zuidwaarts ook een bocht meer richting het zuiden in.

Sonderingsgegevens van de specifieke locatie zijn niet beschikbaar. In de omgeving zijn sonderingen uitgevoerd op ca. 100-300 meter afstand van de locatie. Een interpolatie van deze sonderingen uit het Dinoloket [lit. 3] laat een reeks lagen van matig grof en fijn zand zien tot een lokale diepte van ca. 12,5 meter. Daarna volgt een laag zandige klei van 4 meter. Vervolgens bestaat de bodem tot een diepte van tenminste 20 meter uit (matig) grof en fijn zand.

### Resultaten

Onderstaande tabellen presenteren de resultaten van de praktijkproef voor de meetlocaties in Orthen. Tabel V.11 geeft de resultaten op basis van de data van de meettrein passages, en Tabel V.12 op basis van de reguliere passages.

Tabel V.11 Meetlocatie S4 (Orthen), meettrein passages

| Meetsysteem | Spoor | # Passages | Trillingsniveau          | Reductie (%) van 90 naar 60 km/h | Reductie (%) van 90 naar 40 km/h | Nrmse |
|-------------|-------|------------|--------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-------|
| S4          | C     | 77         | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | $28.82 \pm 8.56$                 | $40.13 \pm 7.51$                 | 0,34  |
|             |       |            | $V_{\text{RMS}} - Z$     | $43.83 \pm 5.33$                 | $52.18 \pm 7.84$                 | 0,19  |
|             | B     | 84         | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | $3.31 \pm 2.29$                  | $-18.88 \pm 8.45$                | 0,35  |
|             |       |            | $V_{\text{RMS}} - Z$     | $0.6 \pm 1.25$                   | $-0.63 \pm 2.01$                 | 0,27  |

Tabel V.12 Meetlocatie S4 (Orthen), reguliere passages inclusief volledige meettrein

| Meetsysteem | Spoor | # Passages | Trillingsniveau          | Reductie (%) van 90 naar 60 km/h | Reductie (%) van 90 naar 40 km/h | Nrmse |
|-------------|-------|------------|--------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-------|
| S4          | C     | 309        | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | $16,14 \pm 7,58$                 | $16,24 \pm 7,34$                 | 0,18  |
|             |       |            | $V_{\text{RMS}} - Z$     | $25,11 \pm 6,28$                 | $22,61 \pm 5,83$                 | 0,13  |
|             | B     | 253        | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | $-2,99 \pm 7,57$                 | $-7,52 \pm 9,51$                 | 0,29  |
|             |       |            | $V_{\text{RMS}} - Z$     | $5,61 \pm 4,91$                  | $5,39 \pm 4,85$                  | 0,21  |

### Opmerkingen en bijzonderheden

Naar aanleiding van de bovenstaande tabellen wordt voor deze meetlocatie het volgende geconstateerd:

- 1 De resultaten op basis van de modellen voor de meettrein passages zijn erg verschillend voor de beide sporen. Daar waar de modellen voor spoor C duidelijke reducties van het trillingsniveau laten zien bij verlaging van de snelheid, is bij spoor B sprake van een toename van trillingsniveau bij verlaging van snelheid. Dit verband is ook zichtbaar in datapunten van de meettrein in de spreidingsdiagrammen van Afbeelding V.21.



- 2 De resultaten van de modellen voor de reguliere passages geven eenzelfde beeld als die voor de meettein passages, al zijn de reducties wat lager. Dit is te verklaren doordat de dataset van meettein passages relatief veel spreiding heeft in snelheid en weinig spreiding in de overige parameters. Bij de reguliere goederentrein passages is dit juist omgekeerd: veel spreiding in treineigenschappen, maar juist betrekkelijk weinig in snelheid.
- 3 Op basis van de modeluitkomsten voor de reguliere passages op spoor C geeft reductie in snelheid van 90 naar 60 km/h eenzelfde afname van trillingsniveau als reductie van 90 naar 40 km/h.

### Invloed andere parameters

Om de invloed van andere parameters op het trillingsniveau  $V_{\text{eff,max}}$  te bepalen zijn de feature importances voor de modellen van spoor C en spoor B bekeken. Afbeelding V.23 geeft een feature importance diagram voor de het model voor spoor C, Afbeelding V.22 die voor spoor B.

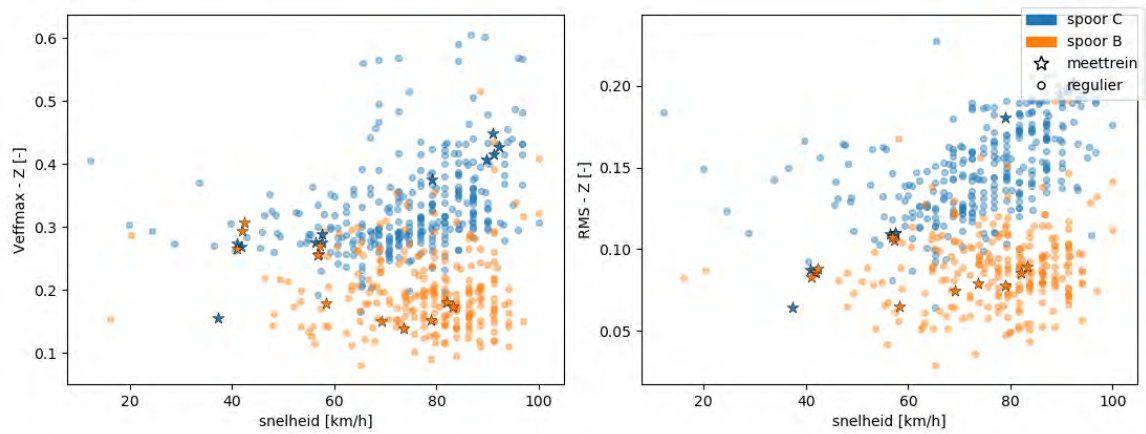
Uit deze figuren blijkt dat het model voor spoor B geen specifieke parameter kan aanwijzen die bepalend is voor het trillingsniveau. Afbeelding V.23 geeft aan dat alle parameter ongeveer even (on)belangrijk zijn. Afbeelding V.22 daarentegen geeft duidelijk aan dat voor de modeluitkomst de rijsnelheid ('speed') de meest bepalende factor is. Gevolgd door pieklast ('qwm\_pieklast\_kn\_p80') en rms-laag ('qwm\_rms\_laag\_kn\_p90'). Voor deze parameters is in Afbeelding V.24 een reeks aan spreidingsdiagrammen toegevoegd. De volgende punten komen uit de figuren naar voren:

- 1 Voor beide sporen zit er voor alle typen goederentreinen spreiding in de snelheid. Voor de passages op spoor C is er iets meer spreiding in rijsnelheid dan voor de passages op spoor B, al ligt voor beide sporen het zwaartepunt toch rond de 70-80 km/h.
- 2 Voor spoor C zijn naast snelheid de pieklast en rms-laag de belangrijkste factoren. Hiervoor is niet duidelijk een treintype aan te wijzen dat de zwaardere trillingen veroorzaakt. Al lijkt het er op dat bulktreinen in het algemeen overheersen in de hogere trillingsniveaus.

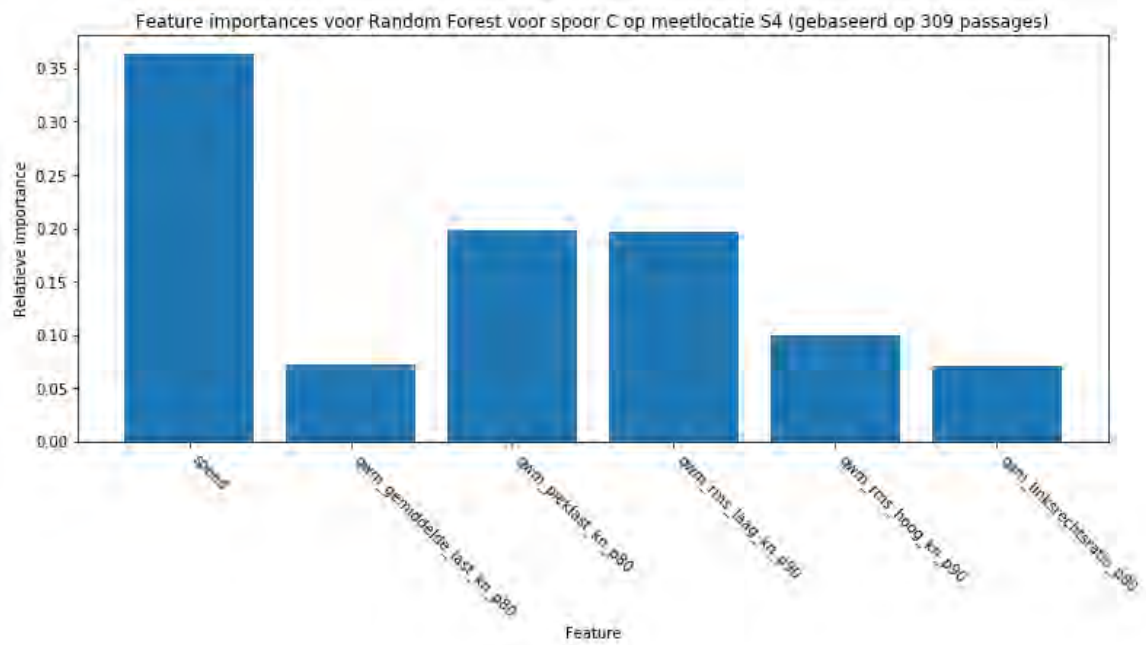


## Afbeeldingen

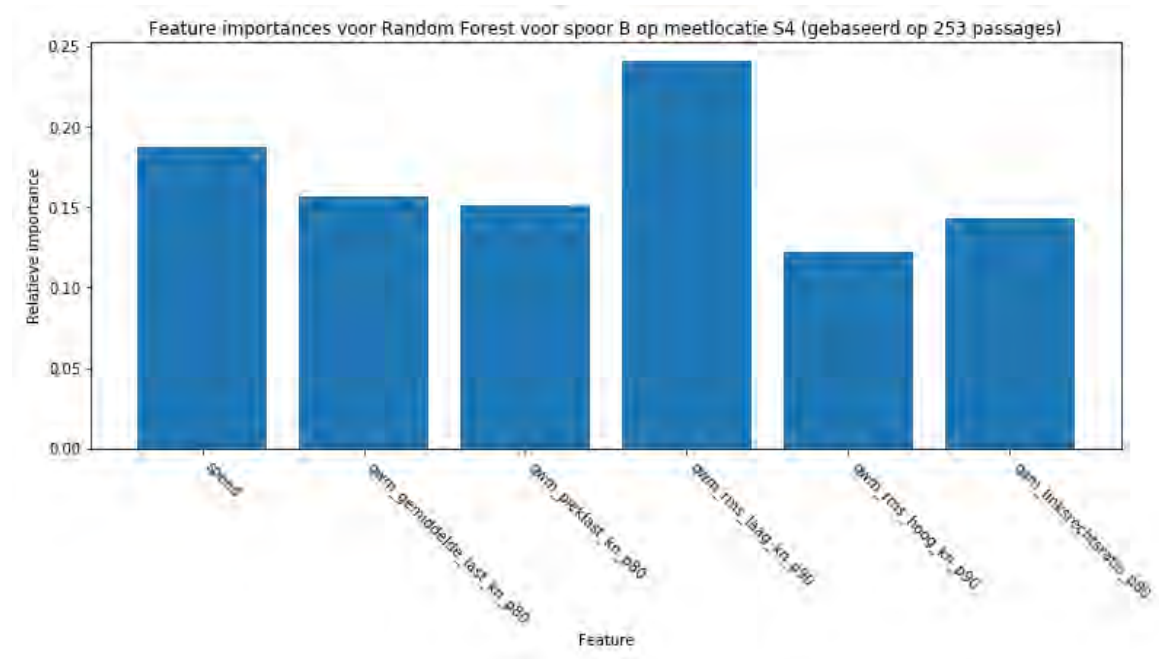
Afbeelding V.21 Spreidingsdiagram van snelheid met trillingsniveau met kleurstelling naar spoor, en indicatie voor meettrein



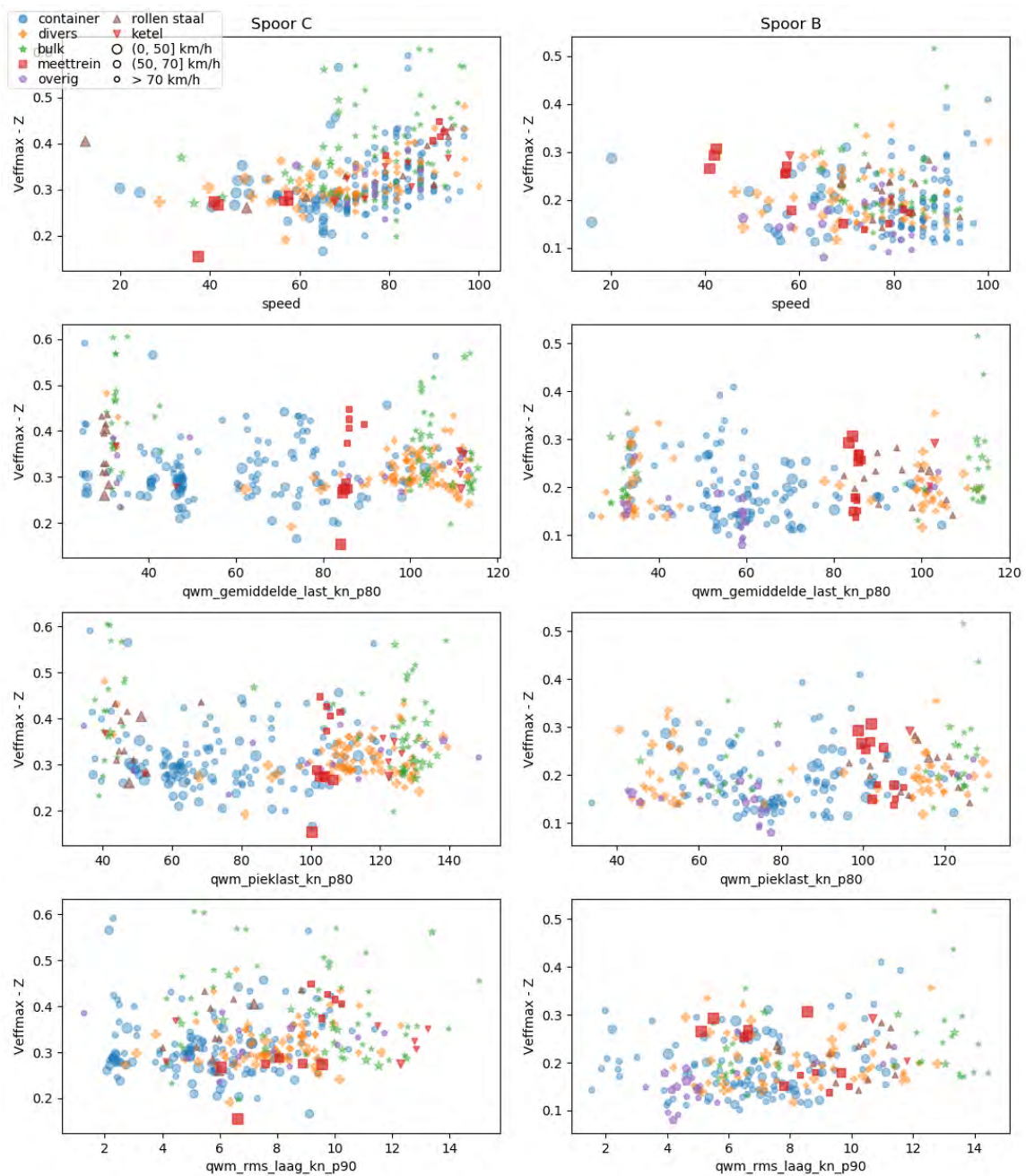
Afbeelding V.22 Feature importances van het model voor spoor C



Afbeelding V.23 Feature importances van het model voor spoor B



Afbeelding V.24 Spreidingsdiagram van trillingsniveau  $V_{eff,max}$  met diverse parameters voor meetlocatie S4. Indicatie voor treintype en markergrootte voor snelheid



## V.7 Meetlocatie S5 (Den Bosch, Zuid)

Deze paragraaf presenteert de uitkomsten van de data-analyse voor meetlocatie S5 in Den Bosch, zuid. Op deze meetlocatie één meetsysteem geplaatst. Ter hoogte van de meetopstellingen zijn drie sporen aanwezig: in volgorde vanuit het perspectief van de meetopstelling zijn deze aangeduid als spoor CH, spoor CI en spoor CJ.

De meetlocatie aan de zuidzijde van Den Bosch ligt aan de oostzijde van het spoor, aan de westzijde van het perceel Willem van Oranjestraat 33. Tussen spoor en meetopstelling ligt een kleine weide en is het terrein vlak. Op ca. 150 meter ten noorden van de meetlocatie voert het spoor met een brug over de Dommel. Aan de westzijde van het spoor ligt de Randweg, een belangrijke verkeersader richting Vught. Deze weg ligt op ongeveer 50 meter van de meetlocatie. Naar verwachting is de invloed van de weg op de gemeten trillingen minimaal. Langs het spoor staat een geluidscherm van ca. 1 meter hoog.

Sonderingsgegevens van de specifieke locatie zijn niet beschikbaar. In de omgeving zijn sonderingen uitgevoerd op ca. 1 kilometer afstand van de locatie. De dichtstbijzijnde sonderingen uit het Dinoloket [lit. 3] laten een zandige bovenlaag (Formatie van Boxtel zien) tot een diepte van tenminste 20 meter.

### Resultaten

Onderstaande tabellen presenteren de resultaten van de praktijkproef voor de meetlocaties in Den Bosch zuid. Tabel V.13 geeft de resultaten op basis van de data van de meettreinpassages, en Tabel V.14 op basis van de reguliere passages.

Tabel V.13 Meetlocatie S5 (Den Bosch-Zuid), meettrein passages

| Meetsysteem | Spoor | # Passages | Trillingsniveau          | Reductie (%) van 90 naar 60 km/h | Reductie (%) van 90 naar 40 km/h | Nrmse |
|-------------|-------|------------|--------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-------|
| S5          | CH    | 84         | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | -                                | $43.26 \pm 5.69$                 | 0,31  |
|             |       |            | $V_{\text{RMS}} - Z$     | -                                | $46.12 \pm 4.41$                 | 0,29  |
|             | CI    | 56         | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | -                                | $39.08 \pm 7.35$                 | 0,38  |
|             |       |            | $V_{\text{RMS}} - Z$     | -                                | $41.12 \pm 2.81$                 | 0,18  |
|             | CJ    | 28         | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | -                                | $22.25 \pm 0.84$                 | 0,30  |
|             |       |            | $V_{\text{RMS}} - Z$     | -                                | $24.92 \pm 0.44$                 | 0,21  |

Tabel V.14 Meetlocatie S5 (Den Bosch-Zuid), reguliere passages inclusief volledige meettrein

| Meetsysteem | Spoor | # Passages | Trillingsniveau          | Reductie (%) van 90 naar 60 km/h | Reductie (%) van 90 naar 40 km/h | Nrmse |
|-------------|-------|------------|--------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-------|
| S5          | CH    | 184        | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | $16,68 \pm 11,28$                | $47,47 \pm 6,41$                 | 0,28  |
|             |       |            | $V_{\text{RMS}} - Z$     | $26,26 \pm 10,17$                | $47,64 \pm 5,69$                 | 0,27  |
|             | CI    | 116        | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | $3,61 \pm 3,41$                  | $28,71 \pm 5,11$                 | 0,40  |
|             |       |            | $V_{\text{RMS}} - Z$     | $3,17 \pm 3,78$                  | $24,67 \pm 4,16$                 | 0,29  |
|             | CJ    | 181        | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | $6,35 \pm 3,02$                  | $6,12 \pm 3,02$                  | 0,27  |
|             |       |            | $V_{\text{RMS}} - Z$     | $4,98 \pm 3,19$                  | $7,45 \pm 5,22$                  | 0,23  |

### Opmerkingen en bijzonderheden

Naar aanleiding van de bovenstaande tabellen wordt voor deze meetlocatie het volgende geconstateerd:

- 1 Vooral voor spoor CH en CI worden duidelijk significante reducties in trillingsniveau waargenomen bij reductie van 90 km/h naar 40 km/h.
- 2 Het diagram in Afbeelding V.25 geeft aan dat de meettrein passages zijn verspreid over de drie sporen. Daarnaast is de meettrein op deze locatie niet met 90 km/h gepasseerd, maar liggen de snelheden ruwweg verspreid tussen de 30 en 70 km/h. Op spoor CJ is de meettrein slechts enkele keren gepasseerd. Het gebrek aan passages met 90 km/h hebben hun uitwerking op de modeluitkomsten, en daarmee de reductiepercentages ten opzichte van de referentiesituatie bij 90 km/h: het model ziet geen onderscheid tussen trillingen bij 60 km/h en bij 90 km/h, omdat het hierover geen informatie heeft gekregen. Om die reden zijn er in Tabel V.13 geen reducties beschikbaar voor verlaging van snelheid van 90 naar 60 km/h. Daarnaast geeft de reductie waarde bij verlaging van 90 naar 40 km/h eigenlijk een resultaat dat hoort bij referentiesituatie 60 tot 70 km/h.
- 3 Afbeelding V.26 geeft aan dat reguliere treinen wel met hogere snelheden gepasseerd zijn. Daarbij wordt spoor CI vaker bereden met een lagere snelheid, en CJ juist met een hogere. De passages op spoor CH hebben meer spreiding in rijsnelheid. Voor de reguliere passages geeft Tabel V.14 duidelijke reductiepercentages bij verlaging van de rijsnelheid. Het reductiepercentage bij verlaging van 90 km/h naar 60 km/h voor spoor CI valt lager uit dan voor de andere sporen, dit is te wijten aan het gebrek aan passages bij hogere snelheid op dit spoor. Datzelfde geldt voor de reductiepercentages bij spoor CJ bij verlaging van 90 naar 40 km/h.

#### Invloed andere parameters

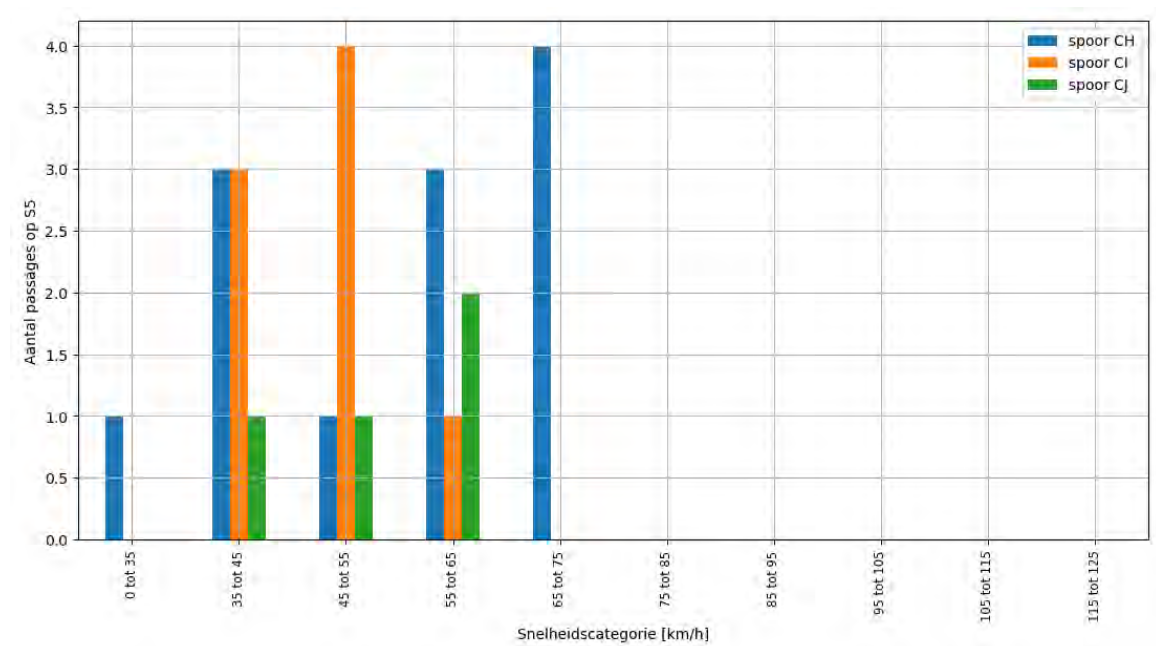
Om de invloed van andere parameters op het trillingsniveau  $V_{eff,max}$  te bepalen zijn de feature importances voor de modellen van spoor CH, CI en spoor CJ bekeken. Afbeelding V.27 tot en met Afbeelding V.29 geven de feature importance diagrammen voor de modellen van deze sporen respectievelijk.

Uit deze figuren blijkt dat de modellen voor sporen CH en CI snelheid ('speed') als belangrijke factor aanmerken voor het trillingsniveau. Voor spoor CJ komt dit minder naar voren. Daarnaast zijn voor de modellen voor alle sporen de parameters voor wiellast ('qwm\_gemiddelde\_last\_kn\_p80') en pieklast ('qwm\_pieklast\_kn\_p80') het meest bepalend voor het trillingsniveau. Voor deze parameters is in Afbeelding V.31 een reeks aan spreidingsdiagrammen toegevoegd. De volgende punten komen uit de figuren naar voren:

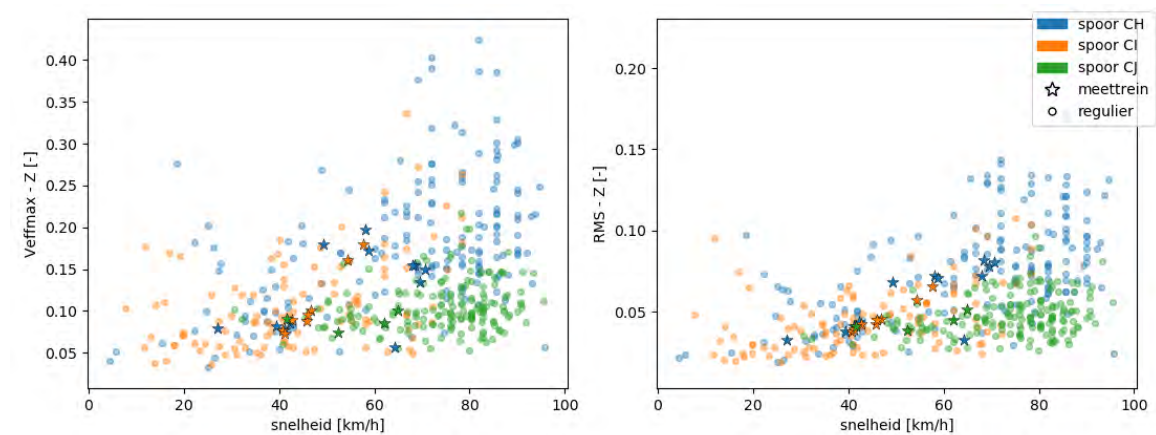
- 1 De algemene trend is dat zowel een toename in wiellast als pieklast leidt tot hogere trillingsniveaus. Dit beeld komt naar voren voor de passages op alle sporen.
- 2 Voor spoor CH zijn het vooral de bulktreinen die de hogere trillingsniveaus veroorzaken. Opvallend is dat deze treinen bij lagere wiel- en pieklasten ook meer trillingen veroorzaken dan andere treintypes bij vergelijkbare lasten.
- 3 Voor spoor CI lijken vooral de treinen samengesteld uit diverse typen belading lichtelijk hogere trillingsniveaus te veroorzaken. Dit zijn typisch ook de treinen met een hogere piek- en wiellast. Overigens wordt dit spoor nauwelijks bereden door bulktreinen.
- 4 Voor spoor CJ lijkt er niet een treintype aan te wijzen die verantwoordelijk is voor de hogere trillingsniveaus.

## Afbeeldingen

Afbeelding V.25 Aantal meettrein passages per snelheids categorie per spoor

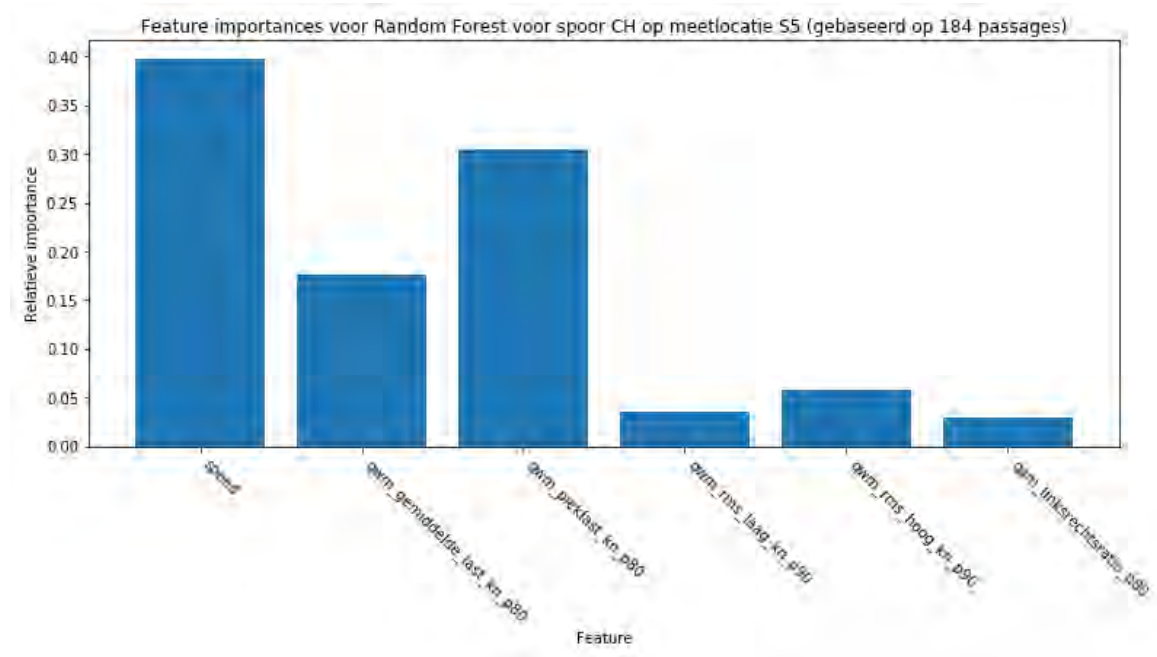


Afbeelding V.26 Spreidingsdiagram van snelheid met trillingsniveau met kleurstelling naar spoor, en indicatie voor meettrein

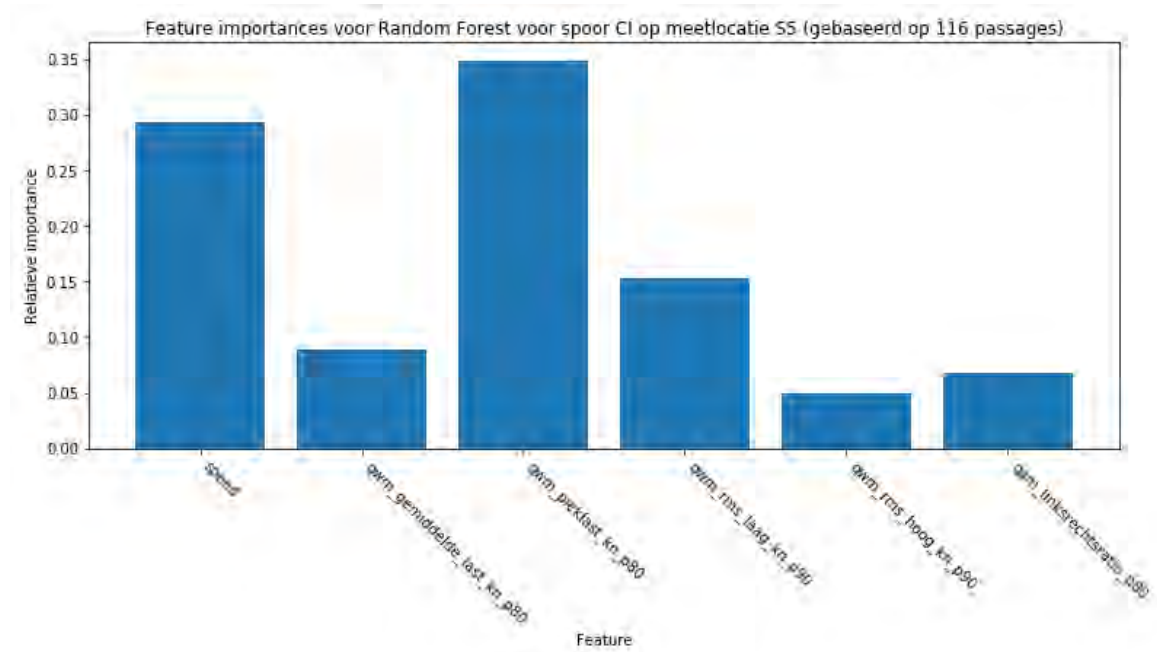




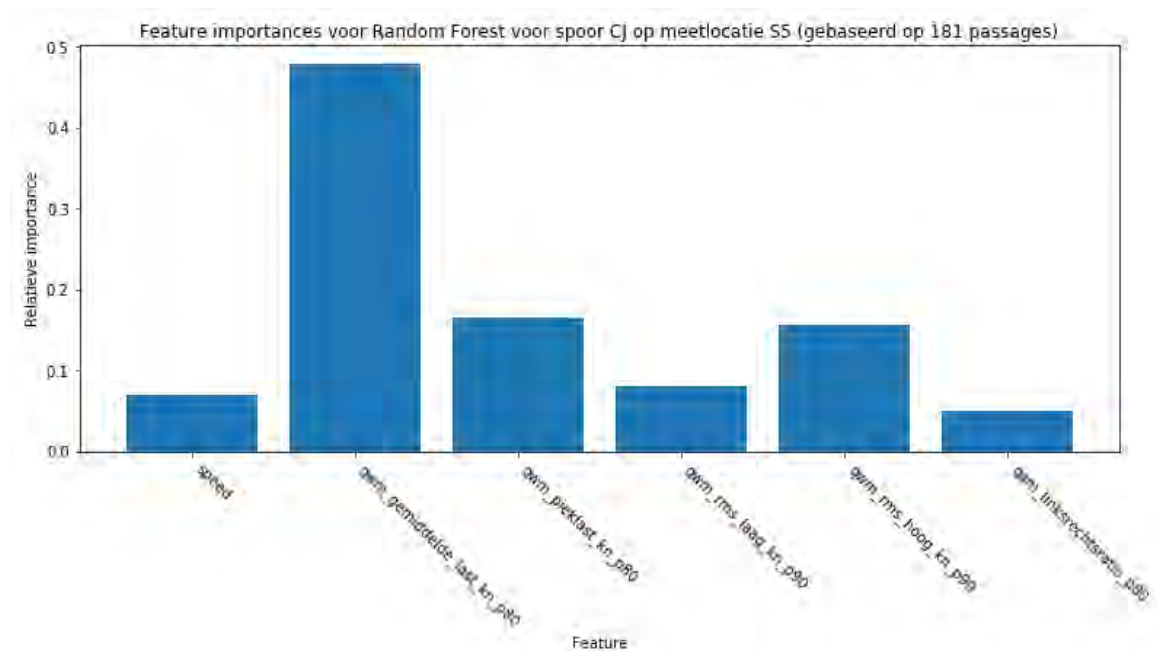
Afbeelding V.27 Feature importances van het model voor spoor CH



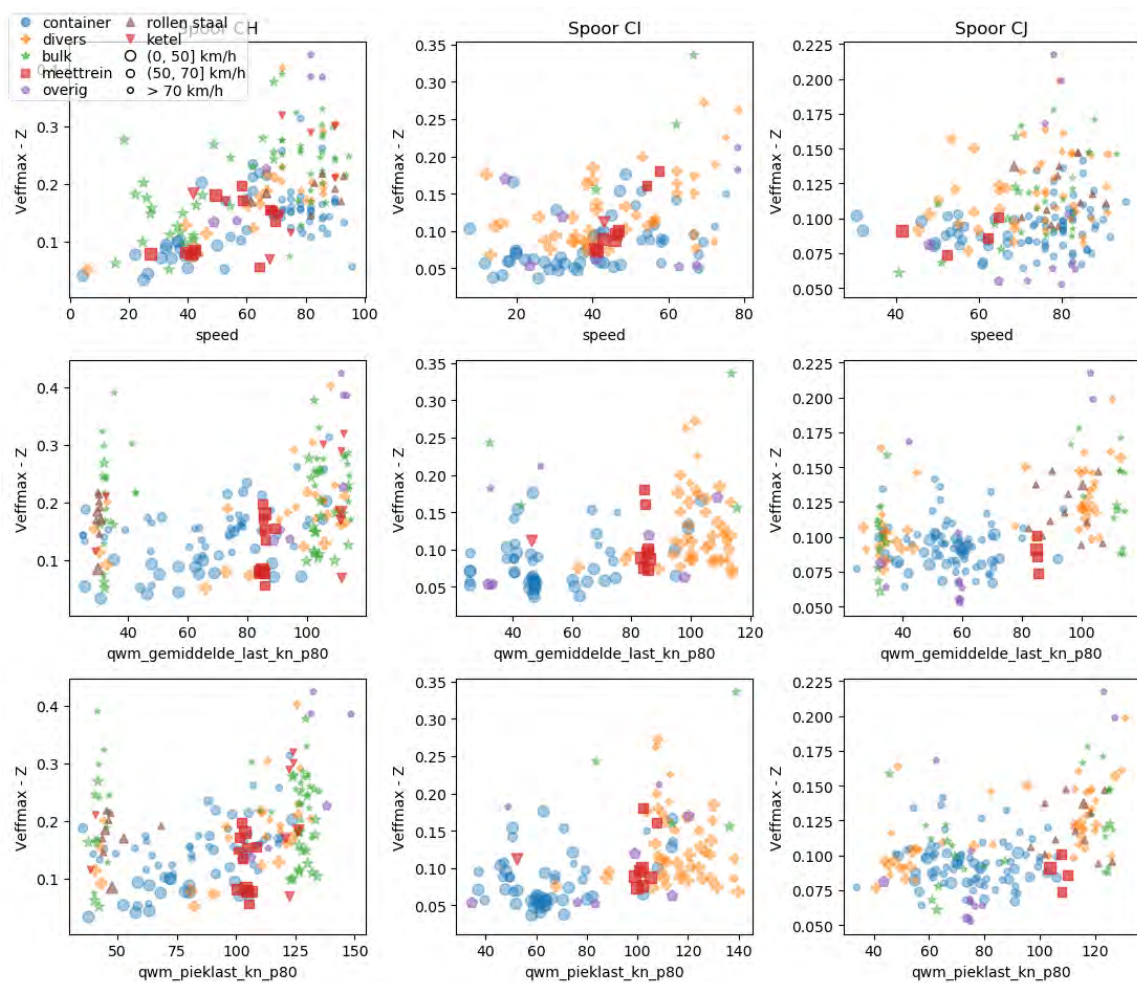
Afbeelding V.28 Feature importances van het model voor spoor CI



Afbeelding V.29 Feature importances van het model voor spoor CJ



Afbeelding V.30 Spreidingsdiagram van trillingsniveau  $V_{eff,max}$  met diverse parameters voor meetlocatie S5. Indicatie voor treintype en markergrootte voor snelheid



## V.8 Meetlocatie S6 (Vught)

Deze paragraaf presenteert de uitkomsten van de data-analyse voor meetlocatie S6 in Vught. Op deze meetlocatie één meetsysteem geplaatst. Ter hoogte van de meetopstellingen zijn drie sporen aanwezig: in volgorde vanuit het perspectief van de meetopstelling zijn deze aangeduid als spoor 766, spoor 762 en spoor 763.

De meetlocatie in Vught ligt aan de westzijde van het spoor, nabij het adres Johan Willem Frisolaan 57. De sporenbundel bestaat hier uit drie sporen. Treinen kunnen ter hoogte van deze locatie overlopen van het meest westelijke spoor naar het middenspoor. De daarvoor benodigde wissels liggen op een afstand van ca. 50 meter (ten zuiden) en ca. 150 meter (ten noorden). Tussen de meetlocatie en het spoor ligt een watergang. Langs het spoor staat een geluidscherm van ca. 3 meter hoog.

Sonderingsgegevens van de specifieke locatie zijn niet beschikbaar. In de omgeving zijn sonderingen uitgevoerd op een afstand van ca. 400 - 1000 meter afstand van de locatie. De dichtstbijzijnde sonderingen uit het Dinoloket [lit. 3] laten een zandige bovenlaag (Formatie van Boxtel zien) tot een diepte van tenminste 20 meter.

### Resultaten

Onderstaande tabellen presenteren de resultaten van de praktijkproef voor de meetlocaties in Den Bosch zuid. Tabel V.15 geeft de resultaten op basis van de data van de meettreinpassages, en Tabel V.16 op basis van de reguliere passages.

Tabel V.15 Meetlocatie S6 (Vught), meettrein passages

| Meetsysteem | Spoor | # Passages | Trillingsniveau          | Reductie (%) van 90 naar 60 km/h | Reductie (%) van 90 naar 40 km/h | Nrmse |
|-------------|-------|------------|--------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-------|
| S6          | 762   | 49         | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | $12.76 \pm 1.58$                 | $11.84 \pm 1.54$                 | 0,22  |
|             |       |            | $V_{\text{RMS}} - Z$     | $29.52 \pm 2.69$                 | $25.79 \pm 2.65$                 | 0,23  |
|             | 763   | 119        | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | $-0.22 \pm 0.64$                 | $43.21 \pm 8.59$                 | 0,24  |
|             |       |            | $V_{\text{RMS}} - Z$     | $13.47 \pm 8.57$                 | $49.82 \pm 7.9$                  | 0,15  |

Tabel V.16 Meetlocatie S6 (Vught), reguliere passages inclusief volledige meettrein

| Meetsysteem | Spoor | # Passages | Trillingsniveau          | Reductie (%) van 90 naar 60 km/h | Reductie (%) van 90 naar 40 km/h | Nrmse |
|-------------|-------|------------|--------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-------|
| S6          | 762   | 270        | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | $5,23 \pm 4,4$                   | $18,56 \pm 7,52$                 | 0,26  |
|             |       |            | $V_{\text{RMS}} - Z$     | $10,38 \pm 6,4$                  | $21,63 \pm 6,65$                 | 0,23  |
|             | 763   | 115        | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | $-6,53 \pm 3,7$                  | $-3,27 \pm 2,59$                 | 0,24  |
|             |       |            | $V_{\text{RMS}} - Z$     | $5,86 \pm 5,49$                  | $13,66 \pm 6,85$                 | 0,15  |
|             | 766   | 144        | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | $3,89 \pm 3,53$                  | $7,07 \pm 4,18$                  | 0,25  |
|             |       |            | $V_{\text{RMS}} - Z$     | $-0,1 \pm 2,72$                  | $0,46 \pm 2,55$                  | 0,22  |

### Opmerkingen en bijzonderheden

Naar aanleiding van de bovenstaande tabellen wordt voor deze meetlocatie het volgende geconstateerd:

- 1 Op deze meetlocatie is de meettrein enkel gepasseerd op spoor 762 en spoor 763. Voor de passages op spoor 762 laat verlaging van de snelheid naar 60 km/h een vergelijkbaar resultaat zien als verlaging van snelheid naar 40 km/h. Het model voor spoor 763 laat geen reductie van trillingsniveau zien bij verlaging

van de snelheid van 90 naar 60 km/h, wel bij verlaging naar 40 km/h. Dit resultaat wordt ondersteund door de datapunten van de meettrein in het spreidingsdiagram van Afbeelding V.31.

- 2 Voor de modellen voor de passages van de reguliere goederentreinen wordt voor spoor 762 en 766 een lichte reductie van trillingsniveau geconstateerd bij verlaging van de rijsnelheid. Bij de modellen voor spoor 763 wordt geen reductie geconstateerd, zelfs een lichte toename.

#### Invloed andere parameters

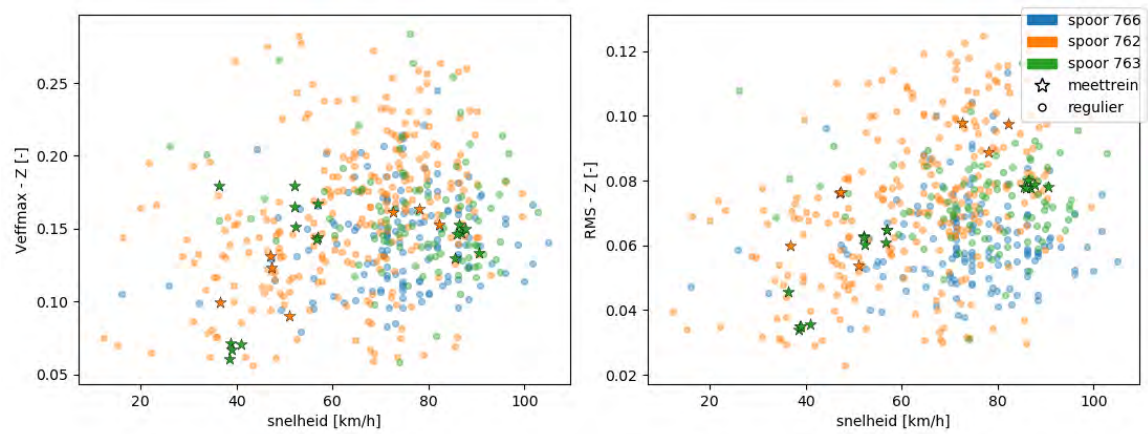
Om de invloed van andere parameters op het trillingsniveau  $V_{\text{eff,max}}$  te bepalen zijn de feature importances voor de modellen van spoor 762, 763 en spoor 766 bekeken. Afbeelding V.32 tot en met Afbeelding V.34 geven de feature importance diagrammen voor de modellen van deze sporen respectievelijk.

Uit deze figuren blijkt dat er een behoorlijk verschil zit tussen de modellen. Voor het model voor spoor 762 komen snelheid ('speed') en rms-laag ('qwm\_rms\_laag\_kn\_p90') als belangrijkste factoren naar voren. Voor spoor 766 zijn het juist de parameters voor wiel- en pieklast. Voor het model voor spoor 763 laat de feature importance diagram geen overduidelijke belangrijke parameter zien. In Afbeelding V.35 een reeks aan spreidingsdiagrammen toegevoegd. De volgende punten komen uit de figuren naar voren:

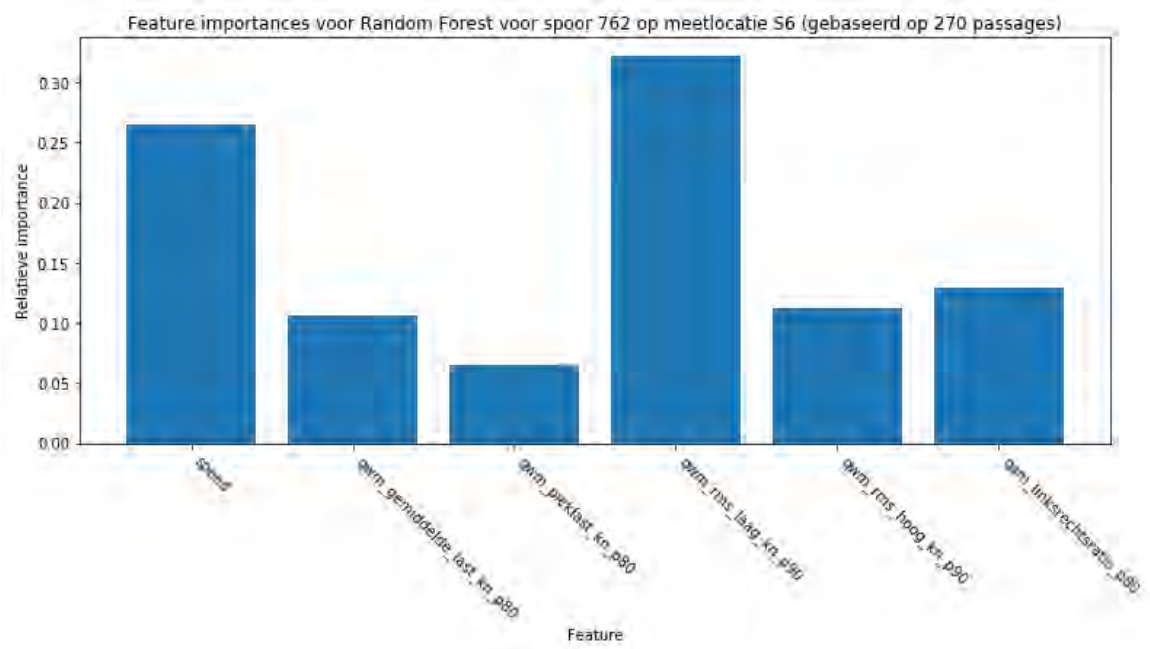
- 1 De spreidingsdiagrammen laten voornamelijk veel spreiding zien. Er zijn niet direct overduidelijke verbanden te herkennen, al lijken de trillingsniveaus wat hoger bij zowel lagere als hogere wiel- en pieklasten.
- 2 Op spoor 762 en 763 lijken de bulktreinen te overheersen in de hogere trillingsniveaus, in de dataset van spoor 766 zijn geen bulktreinpassages geregistreerd. Voor spoor 763 zijn het ook enkele keteltreinen die hogere trillingsniveaus voortbrengen, voor spoor 766 enkele zwaardere beladen treinen in de categorie 'overig'.

## Afbeeldingen

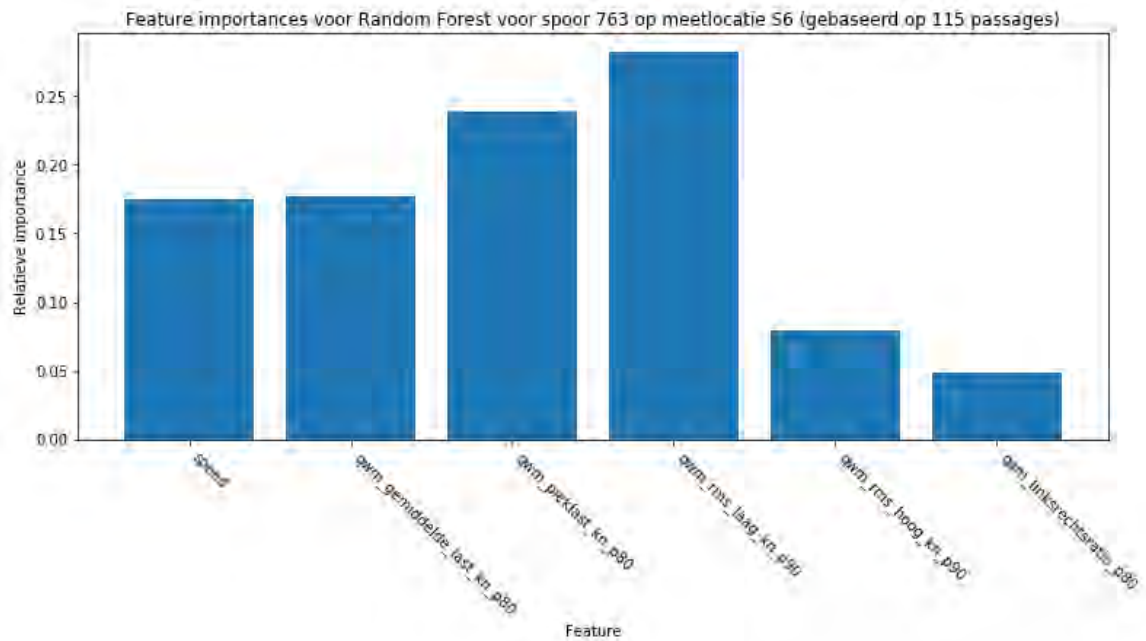
Afbeelding V.31 Spreidingsdiagram van snelheid met trillingsniveau met kleurstelling naar spoor, en indicatie voor meettrein



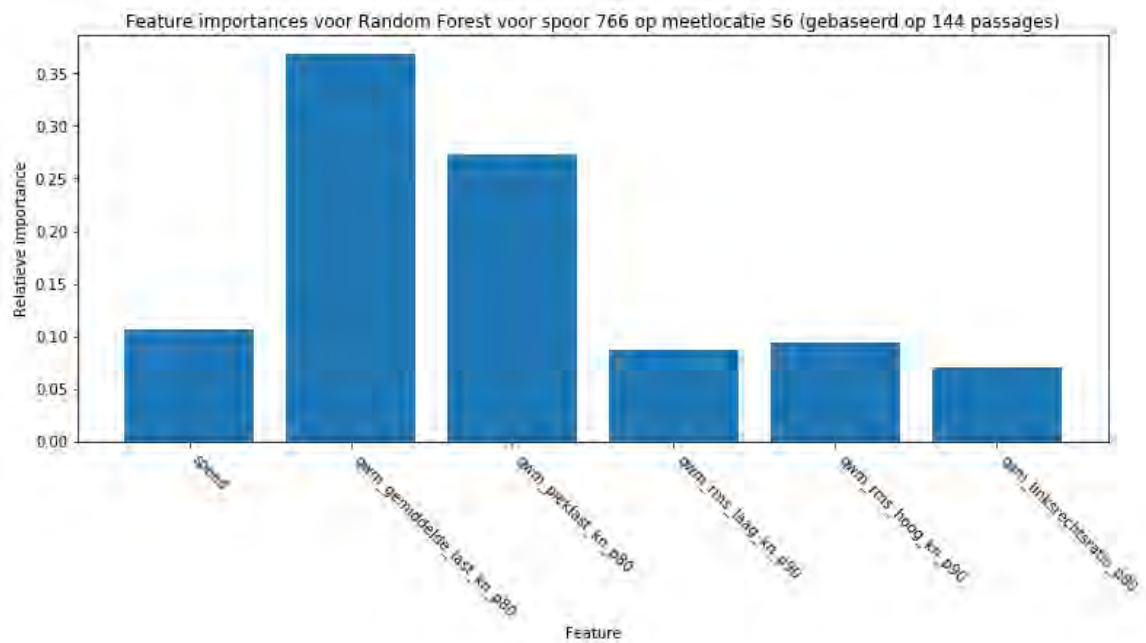
Afbeelding V.32 Feature importances van het model voor spoor 762



Afbeelding V.33 Feature importances van het model voor spoor 763

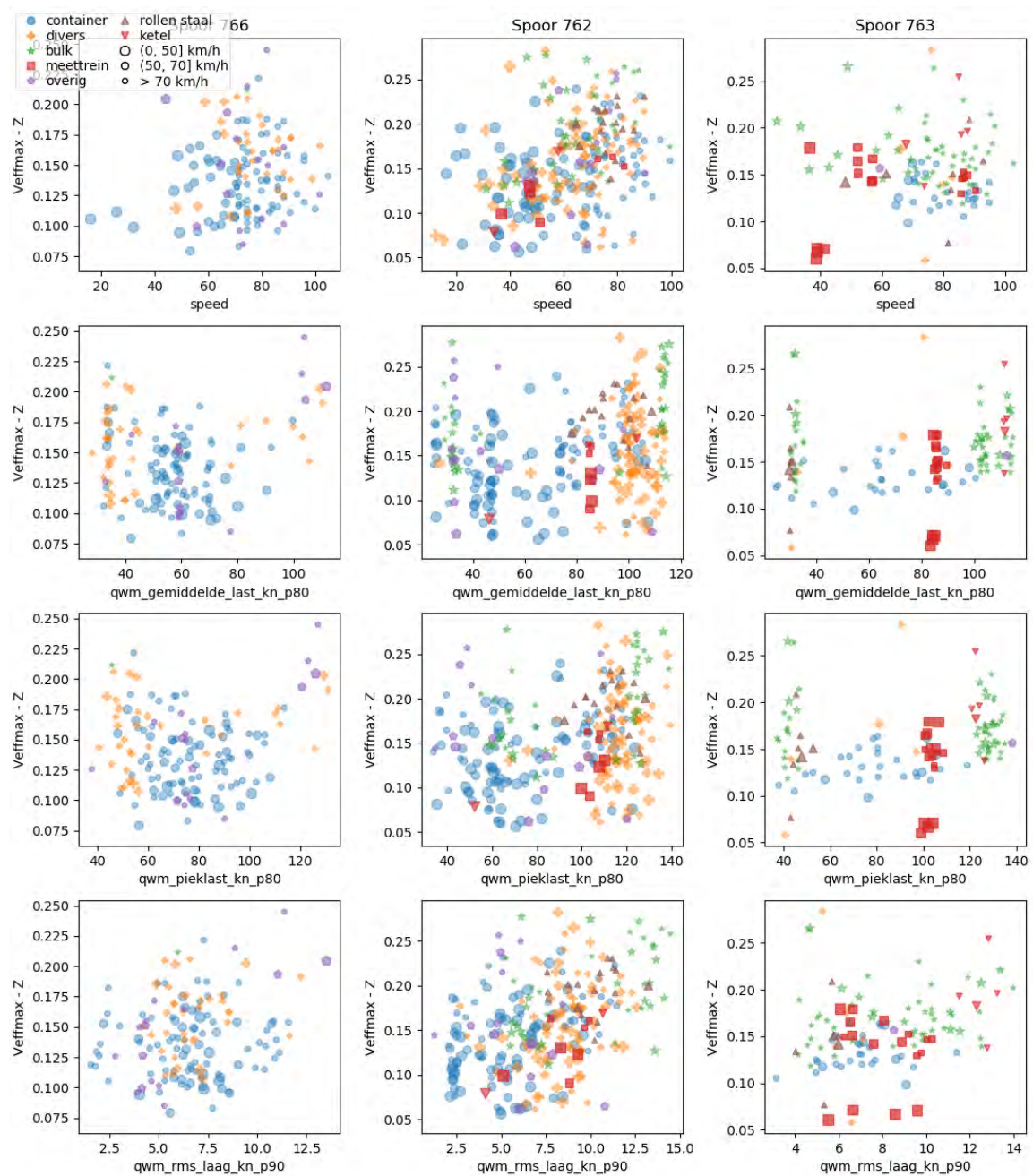


Afbeelding V.34 Feature importances van het model voor spoor 766





Afbeelding V.35 Spreidingsdiagram van trillingsniveau  $V_{eff,max}$  met diverse parameters voor meetlocatie S6. Indicatie voor treintype en markergrootte voor snelheid



## V.9 Meetlocatie S7 (Boxtel)

Deze paragraaf presenteert de uitkomsten van de data-analyse voor meetlocatie S7 in Boxtel. Op deze meetlocatie één meetsysteem geplaatst. Ter hoogte van de meetopstellingen zijn zes sporen aanwezig: in volgorde vanuit het perspectief van de meetopstelling zijn deze aangeduid als spoor 501, 502, 503, 504, 505 spoor 507.

De meetlocatie in Boxtel ligt aan de noordoostzijde van het spoor, nabij het adres Spoorstraat 9. De sporenbundel bestaat hier uit zeven sporen: dit is het punt waar het spoor uit Tilburg en het spoor uit Den Bosch samenkomen. Op ca. 40 meter van de meetlocatie is een wissel aanwezig. Tussen de meetlocatie en het spoor is een verhoogd perron (niet meer in gebruik) en een geluidscherm van ca. 2 meter hoog aanwezig.

Sonderingsgegevens van de specifieke locatie zijn niet beschikbaar. De dichtstbijzijnde sondering is uitgevoerd op ongeveer 175 meter afstand. Deze sondering uit het Dinoloket [lit. 3] laat een zandige bovenlaag (Formatie van Boxtel zien) tot een diepte van tenminste 20 meter.

### Resultaten

Onderstaande tabellen presenteren de resultaten van de praktijkproef voor de meetlocaties in Den Bosch zuid. Tabel V.17 geeft de resultaten op basis van de data van de meettreinpassages, en Tabel V.18 op basis van de reguliere passages. Deze tabellen geven geen resultaten voor sporen 502 en 503, deze sporen hebben in de dataset nauwelijks passages en zijn om die reden in de analyse buiten beschouwing gelaten.

Tabel V.17 Meetlocatie S7 (Boxtel), meettrein passages

| Meetsysteem | Spoor | # Passages | Trillingsniveau          | Reductie (%) van 90 naar 60 km/h | Reductie (%) van 90 naar 40 km/h | Nrmse |
|-------------|-------|------------|--------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-------|
| S7          | 501   | 112        | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | $19,38 \pm 4,64$                 | $44,69 \pm 6,39$                 | 0,26  |
|             |       |            | $V_{\text{RMS}} - Z$     | $18,04 \pm 2,55$                 | $41,39 \pm 5,75$                 | 0,25  |
|             | 504   | 42         | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | $-7,98 \pm 2,14$                 | $-11,24 \pm 1,52$                | 0,32  |
|             |       |            | $V_{\text{RMS}} - Z$     | $-2,75 \pm 1,67$                 | $-3,21 \pm 1,55$                 | 0,32  |

Tabel V.18 Meetlocatie S7 (Boxtel), reguliere passages inclusief volledige meettrein

| Meetsysteem | Spoor | # Passages | Trillingsniveau          | Reductie (%) van 90 naar 60 km/h | Reductie (%) van 90 naar 40 km/h | Nrmse |
|-------------|-------|------------|--------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-------|
| S7          | 501   | 105        | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | $18,31 \pm 4,16$                 | $25,61 \pm 4,5$                  | 0,21  |
|             |       |            | $V_{\text{RMS}} - Z$     | $18,04 \pm 4,22$                 | $22,39 \pm 4,96$                 | 0,20  |
|             | 504   | 61         | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | $-2,84 \pm 1,2$                  | $-2,84 \pm 1,2$                  | 0,17  |
|             |       |            | $V_{\text{RMS}} - Z$     | $-2,44 \pm 1,63$                 | $-2,44 \pm 1,63$                 | 0,14  |
|             | 505   | 106        | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | $-0,44 \pm 0,24$                 | $5,38 \pm 3,52$                  | 0,24  |
|             |       |            | $V_{\text{RMS}} - Z$     | $0,0 \pm 0,0$                    | $7,84 \pm 3,62$                  | 0,22  |
|             | 507   | 70         | $V_{\text{eff,max}} - Z$ | $7,34 \pm 1,56$                  | $8,01 \pm 1,71$                  | 0,27  |
|             |       |            | $V_{\text{RMS}} - Z$     | $10,39 \pm 1,32$                 | $10,06 \pm 1,3$                  | 0,20  |

### Opmerkingen en bijzonderheden

Naar aanleiding van de bovenstaande tabellen wordt voor deze meetlocatie het volgende geconstateerd:

- 1 Op deze meetlocatie is de meettrein enkel gepasseerd op spoor 501 en spoor 504. Opmerkelijk is dat de verlaging van rijksnelheid bij de meettrein duidelijke reducties in trillingsniveau laat zien voor spoor 501, terwijl er juist een toename in trillingsniveau is bij verlaging van de snelheid voor spoor 504. Dit beeld wordt overigens ondersteund door de datapunten van de meettrein in de spreidingsdiagrammen van Afbeelding V.37.
- 2 Ook voor de modellen voor passages van reguliere goederentreinen zijn er duidelijke verschillen in reducties van trillingsniveaus tussen de verschillende sporen. Voor sporen 501 en 507 is een reductie te zien in trillingsniveau bij verlaging van de snelheid, terwijl dit voor sporen 504 en 505 niet of nauwelijks het geval is. Afbeelding V.36 geeft een overzicht van het aantal passages per spoor per snelheidscategorie. Hieruit is op te maken dat er voor spoor 504 nauwelijks passages zijn bij lage snelheid, en voor 505 nauwelijks passages bij hoge snelheid. Dit gebrek aan spreiding in snelheid kan de resulterende reductiewaarden verklaren.

### Invloed andere parameters

Om de invloed van andere parameters op het trillingsniveau  $V_{\text{eff,max}}$  te bepalen zijn de feature importances voor de modellen van spoor 501, 504, 505 en 507 bekeken. Afbeelding V.38 tot en met Afbeelding V.41 geven de feature importance diagrammen voor de modellen van deze sporen respectievelijk.

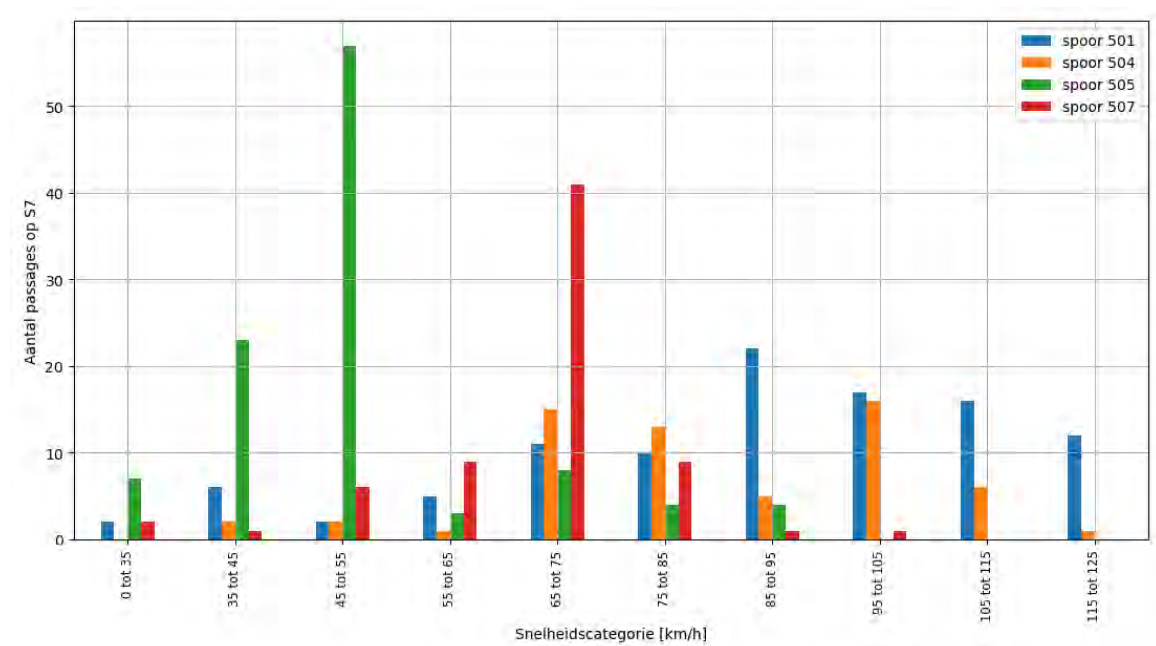
Deze diagrammen geven voor de verschillende modellen een iets ander beeld, maar in het algemeen komen de parameters voor wiel- en pieklast, en de parameter voor rms-hoog naar voren als belangrijke parameters. Snelheid komt alleen bij de modellen voor spoor 501 en 507 naar voren als belangrijke parameter, voor deze modellen wordt ook een lichte reductie in trillingsniveau waargenomen bij verlaging van de rijksnelheid.

Voor deze parameters zijn in Afbeelding V.42 en Afbeelding V.43 een reeks aan spreidingsdiagrammen toegevoegd. De volgende punten komen uit de figuren naar voren:

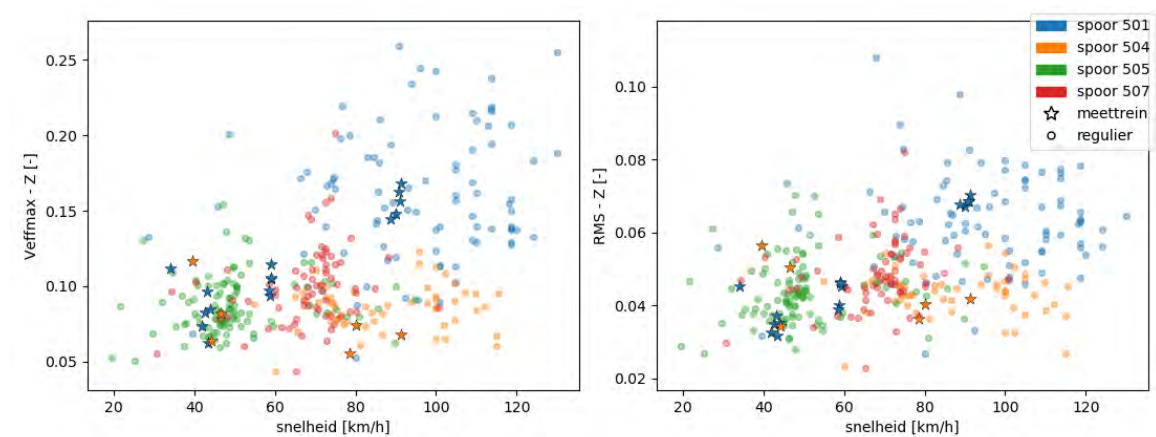
- 1 voor geen van de sporen komt in de figuren een duidelijk verband naar voren tussen de model parameters en trillingsniveau;
- 2 voor spoor 501 zijn het vooral de bulk- en keteltreinen die zowel bij hogere als lagere wiel- en pieklasten hogere trillingsniveaus voortbrengen. Ook op spoor 505 lijken de bulktreinen de hogere trillingsniveaus te veroorzaken, al rijden deze alleen met lage wiel- en pieklasten over dit spoor;
- 3 voor sporen 504 en 507 is er niet een overduidelijk treintype dat overheerst in de hogere trillingsniveaus.

## Afbeeldingen

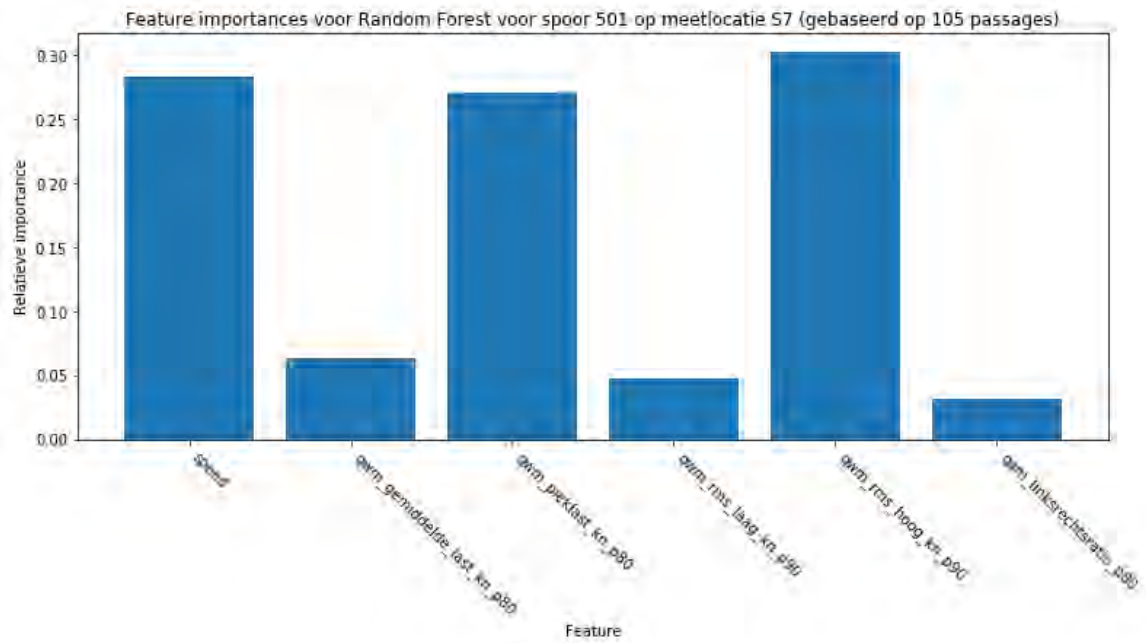
Afbeelding V.36 Aantal passages van reguliere goederentreinen per snelheidscategorie per spoor



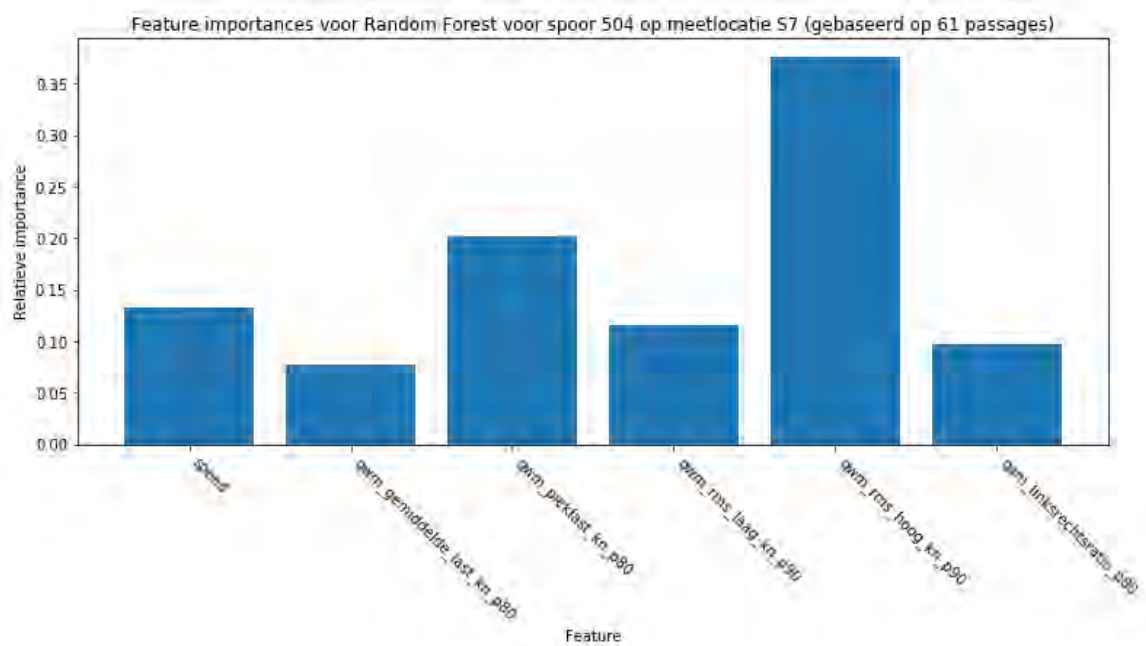
Afbeelding V.37 Spreidingsdiagram van snelheid met trillingsniveau met kleurstelling naar spoor, en indicatie voor meettrein



Afbeelding V.38 Feature importances van het model voor spoor 501

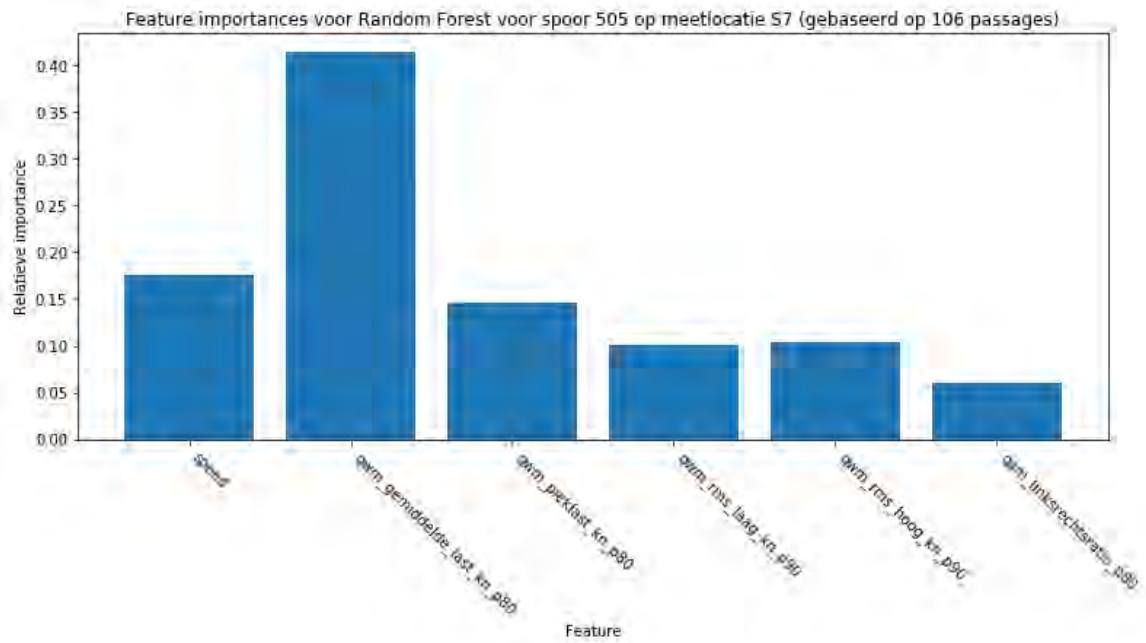


Afbeelding V.39 Feature importances van het model voor spoor 504

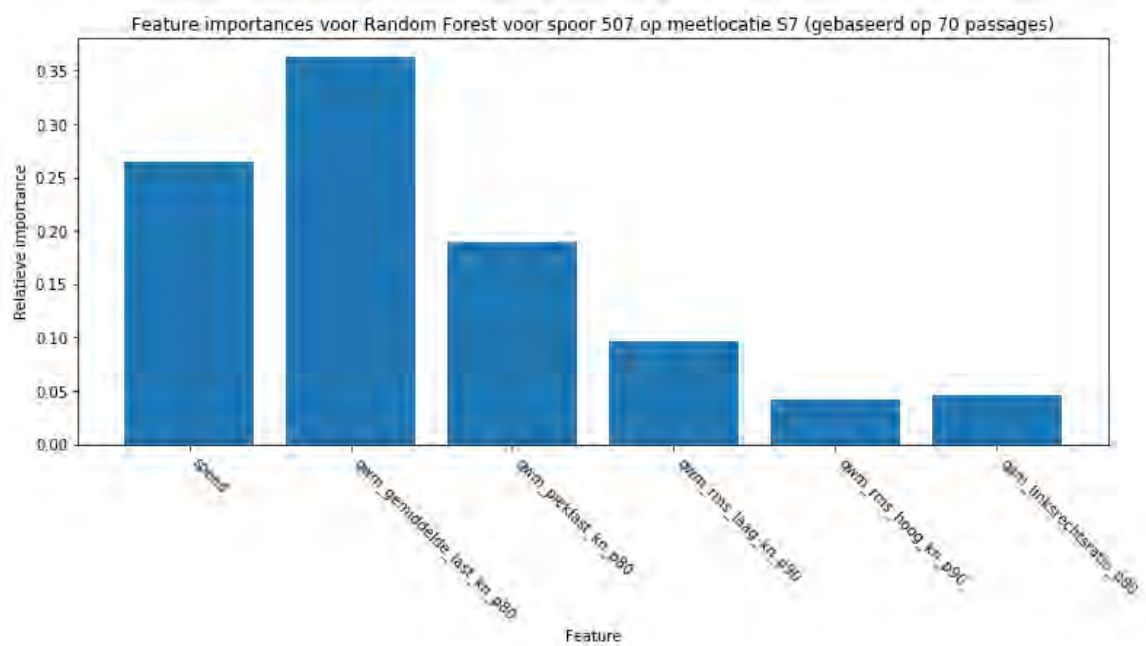




Afbeelding V.40 Feature importances van het model voor spoor 505

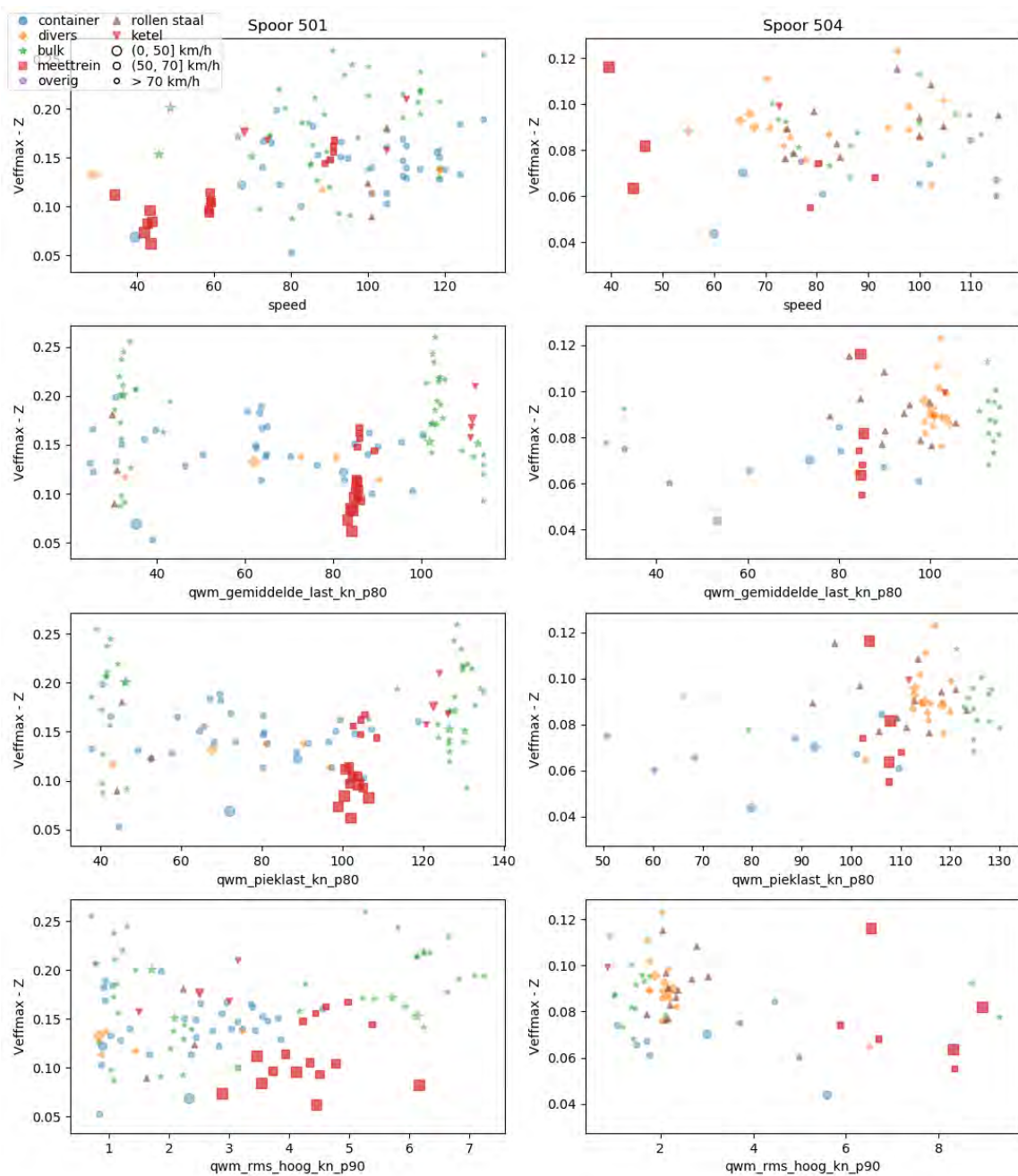


Afbeelding V.41 Feature importances van het model voor spoor 507

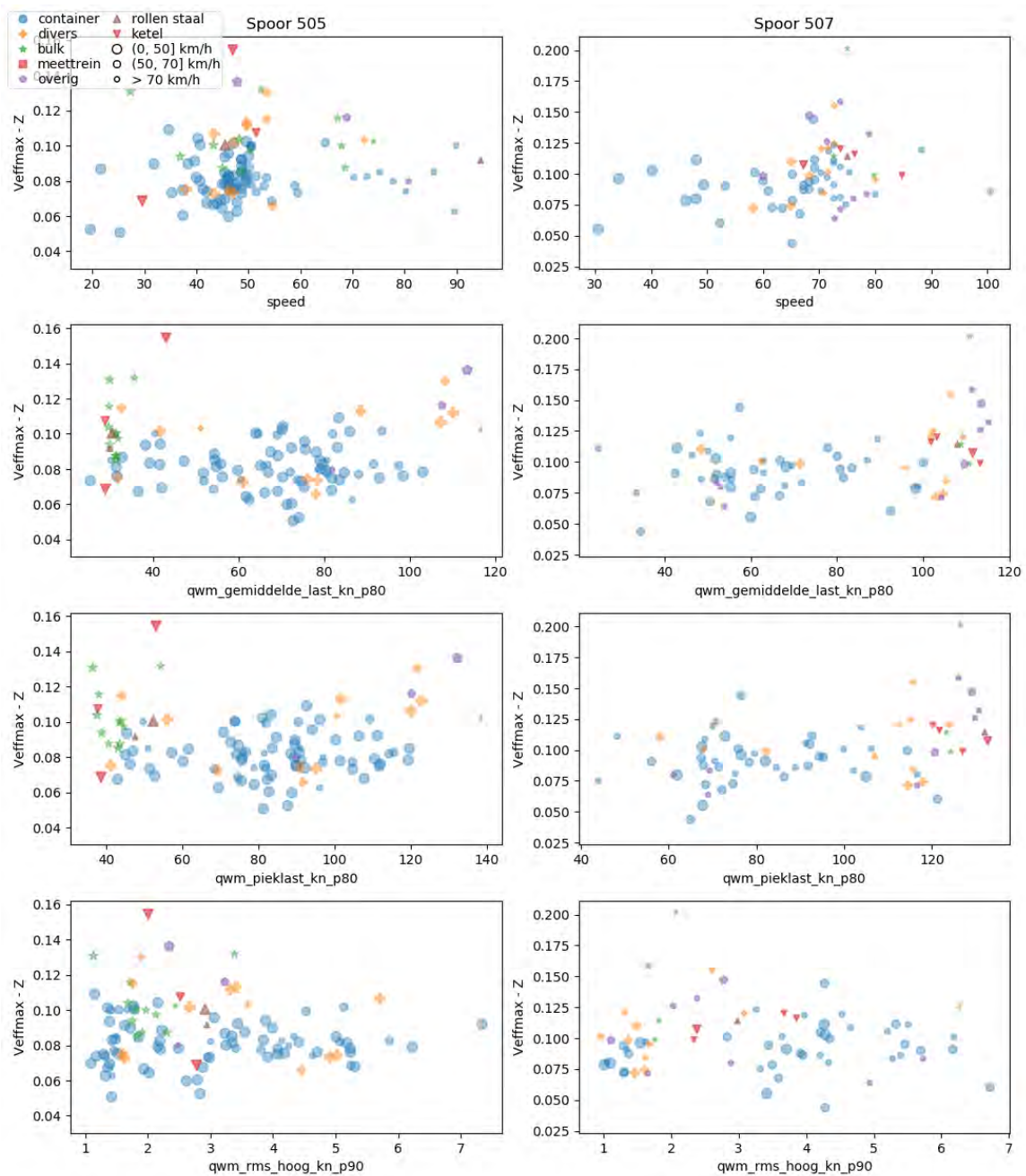




Afbeelding V.42 Spreidingsdiagram van trillingsniveau  $V_{eff,max}$  met diverse parameters voor meetlocatie S7, spoor 501 en 504.  
Indicatie voor treintype en markergrootte voor snelheid



Afbeelding V.43 Spreidingsdiagram van trillingsniveau  $V_{eff,max}$  met diverse parameters voor meetlocatie S7, spoor 505 en 507.  
Indicatie voor treintype en markergrootte voor snelheid



## V.10 Literatuurlijst

- 1 Dinoloket (2020). <https://www.dinoloket.nl/ondergrondmodellen>. Het gebruikte model is GeoTOP versie 1.3 (locaties Waardenburg, Zaltbommel, Hedel, Orthen) en DGM versie 2.2 (locaties Den Bosch-Zuid, Vught, Boxtel).

# VI

## BIJLAGE: EFFECTBEPALING GEDIFFERENTIEERD RIJDEN VOOR GIDSPANDE OTB PHS METEREN-BOXTEL

### VI.1 Inleiding

Het 'TB rapport - Trillingen deel 3' [ref. 1] (hierna: het TB-rapport deel 3) bevat de oorspronkelijke maatregelafweging voor de panden langs het traject Meteren-Boxtel, waarvoor een overschrijding van de grenswaarden uit de Beleidsregel trillingshinder spoor (Bts) is berekend. De praktijkproef beschreven in dit rapport heeft mede ten doel na te gaan of gedifferentieerd rijden voor deze panden een zinvolle maatregel kan zijn. Deze bijlage beantwoordt deze vraag.

In het TB-rapport deel 3 is deze maatregelafweging ingedeeld in vier deelgebieden. Deze deelgebieden bestaan elk weer uit clusters van panden, waarvoor een deelafweging is uitgevoerd. Voor het beoordelen van de maatregel 'gedifferentieerd rijden' sluiten we aan bij deze indeling.

De centrale vraag is voor elke afweging: *reduceert de maatregel 'gedifferentieerd rijden' het geprognosticeerde trillingsniveau uit het TB voldoende, om te voldoen aan de bepalingen uit de Bts?*

In deze bijlage komen achtereenvolgens aan bod:

- de uitgangspunten voor de effectbepaling (paragraaf 2);
- de methodiek (paragraaf 3);
- de deelgebieden en clusters met overschrijdingen uit het OTB (paragraaf 4);
- de effectbepaling per cluster (paragraaf 5) met een overkoepelende samenvatting en analyse;
- de conclusies (paragraaf 6).

### VI.2 Uitgangspunten

#### Aard van de maatregel

De maatregel 'gedifferentieerd rijden' (vanaf hier: de maatregel) duidt hier het langzamer rijden van goederentreinen aan in de nachtperiode, tussen 23.00 en 07.00 uur. Langzamer rijdende passagierstreinen, of langzamer rijdende goederentreinen in de dag- en avondperiode maken dus geen onderdeel uit van de maatregel. De maatregel kent twee varianten, beide geldend voor alle goederentreinen:

- met 60 km/u rijden, in plaats van 90 km/u;
- met 40 km/u rijden, in plaats van 90 km/u.

#### Geen beoordeling voor $V_{per}$

Voor 134 panden langs het traject is een overschrijding van de grenswaarde voor  $V_{per}$  berekend. Het niveau  $V_{per}$  duidt een gemiddeld trillingsniveau aan gedurende een bepaalde tijdsperiode. Het TB-rapport heeft de toekomstige waarde voor  $V_{per}$  bepaald en beoordeeld voor de dagperiode. Tijdens die periode rijden namelijk veruit de meeste treinen, waardoor het gemiddelde trillingsniveau dan het hoogst ligt.

Dit betekent dat de maatregel geen verandering zal brengen in de beoordeling van  $V_{per}$ : de maatregel gaat namelijk uitsluitend over de nachtperiode. Overschrijdingen uit het TB van de grenswaarde voor  $V_{per}$  kunnen daardoor niet met de maatregel worden teruggebracht.

### Beoordeling $V_{\max}$

Het TB-rapport heeft voor de beoordeling van  $V_{\max}$  de grenswaarde  $A_2$  voor de nachtperiode aangehouden, zoals de Bts voorschrijft. Die grenswaarde ligt lager (0,4) dan de grenswaarde voor de dag- en avondperiode (0,8). Omdat uit onderzoek bekend is dat trillingsniveaus 's nachts, als mensen slapen, voor meer overlast en slaapverstoring zorgen. En omdat de maatregel uitsluitend voor de nachtperiode zal gelden, is het mogelijk aan te sluiten bij deze beoordeling uit het TB.

Als de grenswaarde wordt overschreden en de toename meer dan 30 % bedraagt, stelt de Bts de volgende eis: de toename in trillingssterkte moet beperkt worden tot maximaal 30 %, óf zoveel meer als nodig om overschrijding van de grenswaarde te voorkomen. De beoordeling in deze bijlage maakt voor beide eisen inzichtelijk waaraan kan worden voldaan.

De maatregel gaat uitsluitend over de nachtperiode, waardoor in de dag- en avondperiode niet zal leiden tot gewijzigde trillingsniveaus voor de beoordeling van  $V_{\max}$ .

## VI.3 Methodiek

Bij de bepaling van het effect van de maatregel sluiten we aan bij de methodiek aangehouden in het TB-rapport, deel 2 [ref. 1]. De bepaling vindt plaats in de volgende stappen:

- selectie van een gidspand per cluster in een deelgebied, en koppelen van een representatieve meetlocatie uit de praktijkproef;
- berekening van het trillingsniveau  $V_{\max,BTS}$  in de plansituatie voor het gidspand, inclusief de maatregel gedifferentieerd rijden. Het effect van de maatregel wordt in deze berekening opgenomen door de reductie per octaafband, bepaald op de representatieve meetlocatie, op het gidspand toe te passen;
- toetsing aan de gemiddeld benodigde reductie voor de woningen per cluster, zoals opgenomen in de bijlagen bij het TB-rapport deel 2.

We lichten deze stappen hieronder toe.

### Selectie van een gidspand per cluster en koppelen van representatieve meetlocatie

Bij de overdracht van trillingen van spoorbaan naar pand spelen de eigenschappen van de spoorbaan zelf, de ondergrond, en het pand een belangrijke rol. Deze gecombineerde eigenschappen zorgen voor een grote spreiding in trillingsniveaus binnen de verschillende panden veroorzaakt door één en dezelfde trein. Het effect van gedifferentieerd rijden bepalen we daarom afzonderlijk per cluster. Voor elk cluster beschouwen we één gidspand (de gidspanden zijn beschreven in het TB-rapport, deel 1 en 2), dat zo mogelijk in het cluster ligt. Daarmee zijn de eigenschappen van de bodem en de spoorbaan zelf zoveel als mogelijk representatief. De trillingsoverdracht binnen in de panden uit het cluster varieert daarnaast ook en is niet per definitie gelijk aan de overdracht in het gidspand. De gidspanden zijn wel geselecteerd op een goede representatie van de woningen langs het tracé, zoals beschreven in het TB-rapport, deel 1. Enkele clusters zijn aan meerdere gidspanden te koppelen. In dat geval beschouwen we alle betrokken gidspanden.

Voor de praktijkproef zijn op zeven locaties langs het traject tussen Meteren en Boxtel metingen uitgevoerd. We koppelen elk gidspand aan één van deze locaties.

### Berekening van de toe- of afname in trillingsniveau $V_{\max,BTS}$

We gaan uit van de methodiek van het prognosemodel uit het TB-rapport, deel 2 [ref. 1]. Dit model berekent zowel voor de referentiesituatie als de plansituatie een trillingsniveau  $V_{\max,BTS}$ . Met deze twee niveaus is de toetsing aan de streef- en grenswaarden uit de Bts uitgevoerd.

Het prognosemodel bevat een correctiefactor  $C_{\text{snelheid}}$ , die de predictie voor het trillingsniveau corrigeert voor een gewijzigde rijsnelheid. Op basis van de praktijkproef kunnen we deze factor aanscherpen. Daartoe hebben we voor elke meetlocatie de gemiddelde reductie bepaald, die te verwachten is door de

treinsnelheid van 90 naar 60 of 40 km/u terug te brengen. De reductie is bepaald per octaafband, op basis van de maatgevende passages.

Het random forest-model, beschreven in hoofdstuk 4 en bijlage IV.2 van dit rapport, is het uitgangspunt voor het bepalen van deze reductie. De modellen zijn beschikbaar voor elk van de sporen per meetlocatie. Met deze modellen is vervolgens voor elk van de goederentreinpassages op elke meetlocatie het trillingsniveau  $V_{\text{eff,max}}$  per octaafband berekend, voor de verschillende snelheden. Met deze dataset berekenen we vervolgens de gemiddelde reductie, en daaruit de correctiefactor  $C_{\text{snelheid}}$ . Daarbij gaan we uit van de gemiddelde reductie over de maatgevende passages. Het aantal maatgevende passages is bepaald analoog aan het TB-rapport (3 % van het totaal aantal gemeten passages).

Voor de meetlocaties Zaltbommel en Hedel zijn de correctiefactoren bepaald als gemiddelde van de correctiefactoren van de 3 meetsystemen.

Onderstaande tabel toont de aangehouden reducties per meetlocatie voor een snelheidsverlaging van 90 naar 60, en van 90 naar 40 km/uur. De getoonde reducties vormen de factor  $C_{\text{snelheid}}$  in het prognosemodel.

Tabel VI.1 Reductiefactoren voor gedifferentieerd rijden per octaafband (een waarde boven 1 duidt een versterking aan, een waarde tussen 0 en 1 een verzwakking)

| Reductie bij snelheidsverlaging van 90 naar 60 km/uur |       |       |       |       |       |       |
|-------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Meetlocatie                                           | 2 Hz  | 4 Hz  | 8 Hz  | 16 Hz | 31 Hz | 63 Hz |
| Waardenburg                                           | 1.144 | 0.988 | 1.034 | 0.941 | 1.084 | 1.025 |
| Zaltbommel                                            | 1.074 | 0.783 | 0.941 | 0.813 | 1.05  | 0.752 |
| Hedel                                                 | 1.139 | 0.917 | 0.942 | 0.885 | 1.154 | 0.717 |
| Orthen                                                | 0.95  | 0.594 | 0.818 | 0.743 | 0.848 | 0.583 |
| Den Bosch-Zuid                                        | 1.005 | 0.77  | 0.548 | 0.949 | 1.016 | 0.89  |
| Vught (x-richting)                                    | 0.784 | 0.884 | 0.972 | 0.75  | 0.868 | 0.912 |
| Vught (z-richting)                                    | 1.024 | 0.934 | 0.897 | 0.958 | 1.012 | 0.964 |
| Boxtel                                                | 1.004 | 0.972 | 1.02  | 0.867 | 0.963 | 0.877 |
| Reductie bij snelheidsverlaging van 90 naar 40 km/uur |       |       |       |       |       |       |
| Meetlocatie                                           | 2 Hz  | 4 Hz  | 8 Hz  | 16 Hz | 31 Hz | 63 Hz |
| Waardenburg                                           | 0.86  | 0.969 | 1.034 | 0.92  | 0.998 | 0.986 |
| Zaltbommel                                            | 1.058 | 0.786 | 0.939 | 0.661 | 0.626 | 0.633 |
| Hedel                                                 | 1.064 | 0.9   | 0.939 | 0.899 | 1.03  | 0.702 |
| Orthen                                                | 0.952 | 0.6   | 0.814 | 0.781 | 0.767 | 0.593 |
| Den Bosch-Zuid                                        | 0.566 | 0.767 | 0.472 | 1.013 | 0.264 | 0.829 |
| Vught (x-richting)                                    | 0.776 | 0.879 | 0.853 | 0.738 | 0.846 | 0.748 |
| Vught (z-richting)                                    | 0.915 | 0.912 | 0.86  | 0.878 | 0.918 | 0.825 |
| Boxtel                                                | 1.004 | 0.972 | 0.988 | 0.896 | 0.69  | 0.881 |

Naast het model voor de goederentreinpassages bevat dit rapport in hoofdstuk 5.1 ook een afzonderlijke analyse van de relatie tussen treinsnelheid en trillingsniveau voor de meettreinpassages. Die analyse laat een sterker verband zien tussen treinsnelheid en trillingsniveau dan de analyse op basis van de volledige set aan goederentreinpassages. De oorzaak hiervan is het feit dat tijdens de meettreinpassages andere parameters (zoals wielonrondheid) die van invloed zijn op het trillingsniveau niet, of beperkt, zijn gevarieerd, omdat steeds met dezelfde meettrein is gereden. Omdat die parameters in de praktijk wel een belangrijke rol



spelen, maken we hier gebruik van de volledige dataset aan gemeten goederentreinen, in de aanname dat deze representatief zijn voor het totale goederenverkeer. De meettreinpassages maken wel onderdeel uit van deze dataset, maar vormen dus niet het geheel ervan.

Met het rekenmodel, zoals beschreven in het TB-rapport deel 2, is vervolgens een prognose voor het trillingsniveau berekend. De hierboven beschreven factor  $C_{\text{snelheid}}$  vervangt daarin de oorspronkelijke factor  $C_{\text{snelheid}}$  (een generieke formule). Door het verschil tussen de referentiesituatie (zonder snelheidsverlaging) en de plansituatie (de situatie met snelheidsverlaging) te berekenen, bepalen we uiteindelijk de reductie bij het gidspand, uitgedrukt in een percentage. Deze berekening houdt geen rekening met de effecten van mogelijke andere maatregelen: de berekende reductie is dus alleen toe te rekenen aan gedifferentieerd rijden.

### Beoordeling effectiviteit

Dit percentage vergelijken we met de benodigde reductie om na te gaan of de maatregel voldoende effect heeft. De benodigde reductie is bepaald als de gemiddelde reductie die in het cluster nodig is om aan de eisen van de Bts te voldoen. Deze gemiddelde reductie is afkomstig uit de resultaat tabellen in het TB-rapport, bijlagen B en E.

Gedifferentieerd rijden wordt alleen als maatregel afgewogen als andere maatregelen (bij de bron, in de overdracht of bij de ontvanger) niet doelmatig zijn. Voor de clusters waar in het TB al een maatregel is opgenomen, wordt daarom hier de effectiviteit wel inzichtelijk gemaakt maar niet beoordeeld.

## VI.4 Analyse per deelgebied en cluster

De tabel aan het eind van deze bijlage vat de analyse (zoals hierboven beschreven) per deelgebied samen. De tabel laat het volgende zien:

- de deelgebieden uit het TB en de bijbehorende clusters;
- de ligging van het cluster ten opzichte van de spoorlijn;
- het aantal overschrijdingen van de eisen uit de Bts aan  $V_{\text{max}}$  per cluster, verdeeld in woningen/totaal aantal panden;
- de gemiddelde reductie die in een cluster nodig is om een toename onder de grenswaarde tot 30 % te beperken (artikel 6.2 van de Bts) of om overschrijding van de grenswaarde te voorkomen (artikel 6.3, tweede voorwaarde);
- de gemiddelde reductie die nodig is om een toename boven de grenswaarde tot 30 % te beperken (artikel 6.3 van de Bts, eerste voorwaarde);
- of een maatregel in het TB is opgenomen voor het cluster ('TROC' staat hier voor 'TrillingsReducerende Ondergrondse Constructie');
- het gidspand dat aan het cluster is gekoppeld, de bijbehorende representatieve meetlocatie, en de daar te behalen reductie door gedifferentieerd rijden (gidspanden zonder koppeling met een cluster zijn ondergebracht bij het desbetreffende deelgebied). Cursief gedrukte gidspanden liggen buiten het cluster.
- een beoordeling of gedifferentieerd rijden effectief is, op basis van of de aangegeven reductie in  $V_{\text{max}}$  te behalen is met gedifferentieerd rijden. In de volgende gevallen vindt geen beoordeling plaats:
  - als onvoldoende gegevens beschikbaar zijn voor de berekening bij het gidspand (aangeduid met '-');
  - als het cluster geen overschrijding in  $V_{\text{max}}$  heeft (aangeduid met 'n.v.t.\*');
  - als in het TB al een maatregel voor het cluster is opgenomen (aangeduid met 'n.v.t.\*\*').

De tabel laat alleen de informatie voor  $V_{\text{max}}$  zien, omdat dit de beoordelingsgrootte is waarop de maatregel effect kan sorteren (zoals beschreven in de uitgangspunten).

Na de tabel volgt per deelgebied en cluster een nadere analyse.

|                     |                     |           |                                                                                |                                                                                         |                                                                   |                                                           |                                            |         |                             |                                           |                     | Is gedifferentieerd rijden effectief? |          |
|---------------------|---------------------|-----------|--------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|--------------------------------------------|---------|-----------------------------|-------------------------------------------|---------------------|---------------------------------------|----------|
|                     |                     |           | Reductie benodigd in V <sub>max</sub>                                          |                                                                                         |                                                                   | Reductie in V <sub>max</sub> door gedifferentieerd rijden |                                            |         |                             |                                           |                     |                                       |          |
| Deelgebied          | Cluster             | Ligging   | Aantal overschrijdingen V <sub>max</sub> -eisen Bts bij woningen/totaal panden | Voldoen aan grenswaarde (0,4) of toename onder grenswaarde < 30 % [gemiddelde reductie] | Toename boven grenswaarde beperken tot 30 % [gemiddelde reductie] | Maatregel in TB                                           | Gidspand                                   | Ligging | Representatieve meetlocatie | Van 90 naar 60 km/u                       | Van 90 naar 40 km/u | 60 km/u                               | 40 km/u  |
| Zuidwestboog        | -                   |           | 0                                                                              | -                                                                                       | -                                                                 | nee                                                       | -                                          |         | -                           | -                                         | -                   | -                                     | -        |
| Waardenburg-Hedel   | -                   |           | 0                                                                              | -                                                                                       | -                                                                 | nee                                                       | Pompstraat 6, Waardenburg                  | Oost    | Waardenburg                 | 0 %                                       | 0 %                 | n.v.t.*                               |          |
|                     |                     |           |                                                                                |                                                                                         |                                                                   |                                                           | Zandweg 13, Waardenburg                    | Oost    | Waardenburg                 | 0 %                                       | 2 %                 | n.v.t.*                               |          |
|                     |                     |           |                                                                                |                                                                                         |                                                                   |                                                           | Vlierdseweg 4, Bruchem                     | Oost    | Hedel                       | 5 %                                       | 6 %                 | n.v.t.*                               |          |
|                     |                     |           |                                                                                |                                                                                         |                                                                   |                                                           | Stationsweg 11, Hedel                      | West    | Hedel                       | 6 %                                       | 7 %                 | n.v.t.*                               |          |
| 's-Hertogenbosch    | -                   |           | 489/491                                                                        | -                                                                                       | -                                                                 | -                                                         | Maijweg 23, 's-Hertogenbosch               | Oost    | Den Bosch-Zuid              | onvoldoende modelgegevens voor berekening |                     |                                       | -        |
|                     |                     |           |                                                                                |                                                                                         |                                                                   |                                                           | Maijweg 57, 's-Hertogenbosch               | Oost    | Den Bosch-Zuid              | onvoldoende modelgegevens voor berekening |                     |                                       | -        |
|                     |                     |           |                                                                                |                                                                                         |                                                                   |                                                           | Maijweg 75, 's-Hertogenbosch               | Oost    | Den Bosch-Zuid              | onvoldoende modelgegevens voor berekening |                     |                                       | -        |
|                     |                     |           |                                                                                |                                                                                         |                                                                   |                                                           | Willemsplein 4, 's-Hertogenbosch           | Oost    | Den Bosch-Zuid              | onvoldoende modelgegevens voor berekening |                     |                                       | -        |
|                     |                     |           |                                                                                |                                                                                         |                                                                   |                                                           | Willem van Oranjelaan 67, 's-Hertogenbosch | Oost    | Den Bosch-Zuid              | onvoldoende modelgegevens voor berekening |                     |                                       | -        |
|                     | Sint Lucasstraat    | Oost      | 55/55                                                                          | 74%                                                                                     | 11%                                                               | TROC                                                      | Sint-Lucasstraat 30, 's-Hertogenbosch      | Oost    | Orthen                      | 18 %                                      | 25 %                | n.v.t.**                              |          |
|                     |                     |           |                                                                                |                                                                                         |                                                                   |                                                           | Boschveldweg 435, 's-Hertogenbosch         | Oost    | Orthen                      | onvoldoende modelgegevens voor berekening |                     |                                       | -        |
|                     |                     |           |                                                                                |                                                                                         |                                                                   |                                                           | Boschveldweg 455, 's-Hertogenbosch         | Oost    | Orthen                      | onvoldoende modelgegevens voor berekening |                     |                                       | -        |
|                     | Sint Maartenstraat  | Oost      | 178/178                                                                        | 23%                                                                                     | -                                                                 | TROC                                                      | Kempenlandstraat 133, 's-Hertogenbosch     | Oost    | Orthen                      | 25 %                                      | 22 %                | n.v.t.**                              |          |
|                     | Veemarktweg         | Oost      | 0/2                                                                            | 23%                                                                                     | -                                                                 | nee                                                       | Kempenlandstraat 133, 's-Hertogenbosch     | Oost    | Orthen                      | 25 %                                      | 22 %                | mogelijk                              | nee      |
|                     | Peellandstraat      | Oost      | 53/53                                                                          | 57%                                                                                     | 12%                                                               | TROC                                                      | Boschveldweg 39-83, 's-Hertogenbosch       | Oost    | Orthen                      | onvoldoende modelgegevens voor berekening |                     |                                       | -        |
|                     |                     |           |                                                                                |                                                                                         |                                                                   |                                                           | Boschveldweg 35, 's-Hertogenbosch          | Oost    | Orthen                      | 23 %                                      | 21 %                | n.v.t.**                              |          |
|                     | Orthen              | Oost-west | 0/0                                                                            | -                                                                                       | -                                                                 | nee                                                       | Orthen 156, 's-Hertogenbosch               | Oost    | Orthen                      | onvoldoende modelgegevens voor berekening |                     |                                       | -        |
|                     |                     |           |                                                                                |                                                                                         |                                                                   |                                                           | Orthen 162, 's-Hertogenbosch               | West    | Orthen                      | 21 %                                      | 24 %                | n.v.t.*                               |          |
|                     | Parallelweg         | West      | 8/8                                                                            | 30%                                                                                     | 28%                                                               | TROC                                                      | Parallelweg 72, 's-Hertogenbosch           | West    | Orthen                      | 21 %                                      | 27 %                | n.v.t.**                              |          |
|                     |                     |           |                                                                                |                                                                                         |                                                                   |                                                           | Fahrenheitstraat 18, 's-Hertogenbosch      | West    | Orthen                      | 21 %                                      | 27 %                | n.v.t.**                              |          |
|                     | Celsiusstraat       | West      | 195/195                                                                        | 21%                                                                                     | 25%                                                               | TROC                                                      | Bordeslaan 28, 's-Hertogenbosch            | West    | Orthen                      | onvoldoende modelgegevens voor berekening |                     |                                       | -        |
|                     |                     |           |                                                                                |                                                                                         |                                                                   |                                                           | Parallelweg 72, 's-Hertogenbosch           | West    | Orthen                      | 21 %                                      | 27 %                | n.v.t.**                              |          |
|                     |                     |           |                                                                                |                                                                                         |                                                                   |                                                           | Magistratenlaan 138, 's-Hertogenbosch      | West    | Orthen                      | onvoldoende modelgegevens voor berekening |                     |                                       | -        |
| Vught, plansituatie | -                   |           | 71/76                                                                          | -                                                                                       | -                                                                 |                                                           |                                            |         |                             |                                           |                     |                                       |          |
|                     | Isabellastraat      | Oost      | 15/15                                                                          | 27%                                                                                     | 10%                                                               | betonplaat/TROC                                           | Isabellastraat 10, Vught                   | Oost    | Vught                       | 14 %                                      | 18 %                | n.v.t.**                              |          |
|                     |                     |           |                                                                                |                                                                                         |                                                                   |                                                           | Willem III-Laan 13, Vught                  | West    | Vught                       | 13 %                                      | 20 %                | n.v.t.**                              |          |
|                     | Molenvenseweg Noord | Oost      | 26/26                                                                          | 58%                                                                                     | 42%                                                               | betonplaat/TROC                                           | Molenvenseweg 87, Vught                    | Oost    | Vught                       | 11 %                                      | 21 %                | n.v.t.**                              |          |
|                     |                     |           |                                                                                |                                                                                         |                                                                   |                                                           | Johan Frisolaan 33, Vught                  | West    | Vught                       | 13 %                                      | 18 %                | n.v.t.**                              |          |
|                     | Molenvenseweg Zuid  | Oost      | 1/1                                                                            | 60%                                                                                     | 44%                                                               | betonplaat/TROC                                           | Molenvenseweg 87, Vught                    | Oost    | Vught                       | 11 %                                      | 21 %                | n.v.t.**                              |          |
|                     | Pieter Bruegellaan  | Oost      | 2/2                                                                            | 35%                                                                                     | 31%                                                               | betonplaat/TROC                                           | Pieter Bruegellaan 29, Vught               | Oost    | Vught                       | 11 %                                      | 17 %                | n.v.t.**                              |          |
|                     | Aart Heymlaan       | West      | 0/0                                                                            | -                                                                                       |                                                                   | nee                                                       | Margrietlaan 59, Vught                     | West    | Vught                       | 13 %                                      | 18 %                | n.v.t.*                               |          |
|                     | Rembrandterf        | Oost      | 1/5                                                                            | 5%                                                                                      | -                                                                 | nee                                                       | Rembrandtlaan 47, Vught                    | Oost    | Vught                       | 13 %                                      | 17 %                | mogelijk                              | mogelijk |
|                     | Rembrandtlaan       | Oost      | 17/17                                                                          | 57%                                                                                     | 5%                                                                | nee                                                       | Rembrandtlaan 47, Vught                    | Oost    | Vught                       | 13 %                                      | 17 %                | mogelijk                              | mogelijk |
|                     | Helvoirtseweg       | Oost      | 4/4                                                                            | 1%                                                                                      | 1%                                                                | nee                                                       | Rembrandtlaan 47, Vught                    | Oost    | Vught                       | 13 %                                      | 17 %                | mogelijk                              | mogelijk |
|                     | Van Miertstraat     | West      | 0/0                                                                            | -                                                                                       | -                                                                 | nee                                                       | Van Miertstraat 10, Vught                  | West    | Vught                       | 15 %                                      | 18 %                | n.v.t.*                               |          |
|                     | Spoorlaan Noord     | Oost      | 0/0                                                                            | -                                                                                       | -                                                                 | nee                                                       | Spoorlaan 3, Vught                         | Oost    | Vught                       | 11 %                                      | 16 %                | n.v.t.*                               |          |
|                     |                     |           |                                                                                |                                                                                         |                                                                   |                                                           | Spoorlaan 8, Vught                         | Oost    | Vught                       | 13 %                                      | 17 %                | n.v.t.*                               |          |
|                     | Spoorlaan Zuid      | Oost      | 5/5                                                                            | 26%                                                                                     | -                                                                 | nee                                                       | Spoorlaan 43, Vught                        | Oost    | Vught                       | 15 %                                      | 19 %                | nee                                   | nee      |
|                     | De Schakel          | Oost      | 0/1                                                                            | 5%                                                                                      | 4%                                                                | nee                                                       | Repelweg 195, Vught                        | Oost    | Vught                       | 7 %                                       | 15 %                | mogelijk                              | mogelijk |
| Haaren-Boxtel       |                     |           | 0/0                                                                            | -                                                                                       |                                                                   |                                                           | Heikant 2, Esch                            | West    | Boxtel                      | onvoldoende modelgegevens voor berekening |                     |                                       | -        |
|                     |                     |           |                                                                                |                                                                                         |                                                                   |                                                           | Ridder van Cuijkstraat 33                  | Noord   | Boxtel                      | 5 %                                       | 16 %                | n.v.t.*                               |          |
|                     | Van Salmstraat      | Zuid      | 0/0                                                                            | -                                                                                       |                                                                   |                                                           | Spoorstraat 32, Boxtel                     | Noord   | Boxtel                      | 8 %                                       | 19 %                | n.v.t.*                               |          |
|                     | Brugstraat          | Noord     | 0/0                                                                            | -                                                                                       |                                                                   |                                                           | Spoorstraat 32, Boxtel                     | Noord   | Boxtel                      | 8 %                                       | 19 %                | n.v.t.*                               |          |
|                     | Spoorstraat         | Noord     | 0/0                                                                            | -                                                                                       |                                                                   |                                                           | Spoorstraat 32, Boxtel                     | Noord   | Boxtel                      | 8 %                                       | 19 %                | n.v.t.*                               |          |
|                     | Stationsplein       | Noord     | 0/0                                                                            | -                                                                                       |                                                                   |                                                           | Spoorstraat 7, Boxtel                      | Noord   | Boxtel                      | 4 %                                       | 14 %                | n.v.t.*                               |          |

n.v.t.\*: effectiviteit maatregel niet beoordeeld omdat geen overschrijding van de Vmax-eisen optreedt.  
n.v.t.\*\*: effectiviteit maatregel niet beoordeeld omdat al een maatregel is opgenomen in het Tracébesluit.

### Deelgebied Zuidwestboog Meteren

Omdat in dit deelgebied geen bebouwing die onder invloed van trillingen staat aanwezig is, hoeft niet getoetst te worden aan de Bts. Hier zijn ook geen gidspanden aanwezig.

### Deelgebied Waardenburg-Hedel

In dit deelgebied is een overschrijding van de grenswaarde voor  $V_{per}$  geconstateerd, zo blijkt uit het TB-rapport. Zoals al beschreven heeft gedifferentieerd rijden geen effect op deze beoordeling. De nachtperiode wordt namelijk niet als maatgevend voor het  $V_{per}$ -niveau beschouwd. De maatregel kan dus niet worden ingezet om de overschrijding uit het TB weg te nemen.

Het effect van gedifferentieerd rijden bij de aanwezige gidspanden is zeer beperkt en varieert tussen 0 % (Waardenburg) en 7 % (Hedel). Dit is een weerspiegeling van de zeer beperkte reducties die in hoofdstuk 5.1.2 voor deze locaties worden gerapporteerd. De reductie door gedifferentieerd rijden vindt met name plaats in de 16 Hz-octaaftband, maar dat is op deze locaties niet de maatgevende octaaftband.

### Deelgebied 's-Hertogenbosch

#### *Snelheidswijzigingen*

In dit deelgebied is de snelheid van goederentreinen in de afgelopen tijd verhoogd. Tabel 9 uit het TB-rapport deel 1 geeft hiervan een overzicht. De snelheid neemt voor een deel van de sporen (3, 6, 7 en 8, genummerd van oost naar west) toe van 40 naar 80 km/u, en voor één spoor (2) toe van 40 naar 60 km/u. De wijziging geldt in zuidelijke richting, vanaf km 47,4, ten hoogte van de Sint-Lucasstraat.

Vanaf km 49,2 (ter hoogte van Willem van Oranjelaan 59) is op sporen 3 en 4 de snelheid met 15 km/u verhoogd. Vanaf km 51,2 (Vught aansluiting) is de snelheid met 15 km/u verhoogd op spoor 2.

In de praktijk blijkt dat treinen ter hoogte van station Den Bosch de toegestane snelheid van 80 km/u niet altijd bereiken. Het effect van gedifferentieerd rijden zal daarom rond station Den Bosch waarschijnlijk worden overschat, omdat de snelheidsverlaging relatief kleiner is dan bij de representatieve meetlocatie (Orthen).

#### *Geadviseerde maatregelen*

Voor de clusters in 's-Hertogenbosch met een  $V_{max}$ -overschrijding, uitgezonderd het cluster Veemarktweg, is in het TB een maatregel geadviseerd: een trillingsreducerende ondergrondse constructie (TROC). Voor deze clusters wordt het effect van de maatregel gedifferentieerd rijden niet beoordeeld. De reductie bij de gidspanden wordt wel inzichtelijk gemaakt.

#### *Cluster Sint-Lucasstraat*

Voor dit cluster is in het TB een maatregel opgenomen. De te behalen reductie door gedifferentieerd rijden bij het gidspand Sint-Lucasstraat 30 is 18 % (60 km/u) en 25 % (40 km/u).

#### *Clusters Sint-Maartenstraat*

Voor dit cluster is in het TB een maatregel opgenomen. De te behalen reductie door gedifferentieerd rijden bij het gidspand Kempenlandstraat 133 is 25 % (60 km/u) en 22 % (40 km/u).

Het effect van een snelheidsverlaging naar 60 km/u is voor deze locatie in de maatgevende 16 Hz-octaaftband (de maatgevendheid van deze octaaftband wordt vooral bepaald door de gebouwoverdracht in het gidspand) sterker dan het effect bij 40 km/u. Daardoor is het effect bij 60 km/u sterker dan bij 40 km/u.

#### *Cluster Veemarktweg*

In dit cluster is een reductie van 23 % nodig om te voldoen aan de Bts-eis om de toename boven de grenswaarde tot 30 % te beperken. De reductie door gedifferentieerd rijden bij het gidspand bedraagt 25 % (60 km/u) en 22 % (40 km/u). Dat is voldoende om de benodigde afname te bewerkstelligen. De maatregel kan hiermee voor dit cluster effectief zijn.

Het effect van een snelheidsverlaging naar 60 km/u is voor deze locatie in de maatgevende 16 Hz-octaaftband (de maatgevendheid van deze octaaftband wordt vooral bepaald door de gebouwoverdracht in het gidsband) sterker dan het effect bij 40 km/u. Daardoor is het effect bij 60 km/u sterker dan bij 40 km/u.

#### *Cluster Peellandstraat*

Voor dit cluster is in het TB een maatregel opgenomen. De te behalen reductie door gedifferentieerd rijden bij het gidsband Boschveldweg 35 is 23 % (60 km/u) en 21 % (40 km/u).

Het effect van een snelheidsverlaging naar 60 km/u is voor deze locatie in de maatgevende 16 Hz-octaaftband sterker dan het effect bij 40 km/u. Daardoor is het effect bij 60 km/u sterker dan bij 40 km/u.

#### *Cluster Orthen*

In dit cluster treedt geen overschrijding van de  $V_{\max}$ -eis uit de Bts op. De te behalen reductie bij het gidsband Orthen 162 is 21 % (60 km/u) en 24 % (40 km/u).

#### *Cluster Parallelweg*

Voor dit cluster is in het TB een maatregel opgenomen. De te behalen reductie door gedifferentieerd rijden bij het gidsband Parallelweg 72 is 21 % (60 km/u) en 27 % (40 km/u).

#### *Cluster Celsiusstraat*

Voor dit cluster is in het TB een maatregel opgenomen. De te behalen reductie door gedifferentieerd rijden bij het gidsband Parallelweg 72 (buiten het cluster) is 21 % (60 km/u) en 27 % (40 km/u).

### **Deelgebied Vught (plansituatie)**

#### *Snelheidswijzigingen*

In dit deelgebied is de snelheid van goederentreinen in de afgelopen tijd verhoogd. Tabel 9 uit het TB-rapport, deel 1 geeft hiervan een overzicht. Zuidwaarts vanaf km 49,2 (ter hoogte van Willem van Oranjelaan 59 in Den Bosch) is op sporen 3 en 4 de snelheid met 15 km/u verhoogd. Vanaf km 51,2 (Vught aansluiting) in de richting van Boxtel is de snelheid met 15 km/u verhoogd op spoor 2.

#### *Verdiepte ligging*

Bij een aantal clusters in Vught komt het spoor in de plansituatie (deels) verdiept te liggen. Op grond van de uitgevoerde metingen is geen conclusie te trekken over het effect van een verdiepte ligging op de maatregel gedifferentieerd rijden. In het TB-onderzoek is voor deze locatie aangehouden 'dat bronsterkte en de overdracht vanuit de bakconstructie gelijkwaardig is aan die van het huidige spoor'. Deze aanname volgend gaan wij er vanuit dat het effect van gedifferentieerd rijden, zoals bepaald op de meetlocatie Vught, voor de locaties langs de verdiepte ligging kan worden aangehouden.

#### *Geadviseerde maatregelen*

Voor een deel van de clusters in Vught is in het TB een maatregel geadviseerd: een trillingsreducerende ondergrondse constructie (TROC) en betonplaat onder een deel van het spoor. Voor deze clusters wordt het effect van de maatregel gedifferentieerd rijden niet beoordeeld. De reductie bij de gidsbanden wordt wel inzichtelijk gemaakt.

#### *Dominante trillingsrichting*

Uit een vergelijking van de  $V_{\text{eff,max}}$ -waarden per meetrichting per passage blijkt dat de x-richting op de meetlocatie in Vught het grootste aantal hoogste waarden bijdraagt. Dit hangt mogelijk samen met het overloopwissel, dat vlakbij de meetlocatie ligt. Van wissels is namelijk bekend dat ze relatief hoge trillingsniveaus in horizontale richtingen veroorzaken. In de toekomst zal dit overloopwissel verdwijnen en bovendien liggen niet alle gidsbanden in Vught ter hoogte van dit wissel. In deze analyse is gebruik gemaakt van de reducties bepaald voor de x-richting. De reducties in de z-richting liggen iets lager (zie Tabel VI.1). Mogelijk wordt daarmee het effect van gedifferentieerd rijden in de toekomstige situatie overschat.

#### *Cluster Isabellastraat*

Voor dit cluster is in het TB een maatregel opgenomen. De te behalen reductie door gedifferentieerd rijden bij het gidspand Isabellastraat 10 is 14 % (60 km/u) en 18 % (40 km/u).

#### *Cluster Molenvenseweg Noord*

Voor dit cluster is in het TB een maatregel opgenomen. De te behalen reductie door gedifferentieerd rijden bij het gidspand Molenvenseweg 87 is 11 % (60 km/u) en 21 % (40 km/u).

#### *Cluster Molenvenseweg Zuid*

Voor dit cluster is in het TB een maatregel opgenomen. De te behalen reductie door gedifferentieerd rijden bij het gidspand Molenvenseweg 87 (buiten het cluster) is 11 % (60 km/u) en 21 % (40 km/u).

#### *Cluster Pieter Bruegellaan*

Voor dit cluster is in het TB een maatregel opgenomen. De te behalen reductie door gedifferentieerd rijden bij het gidspand Pieter Bruegellaan 29 is 11 % (60 km/u) en 17 % (40 km/u).

#### *Cluster Aert Heymlaan*

In dit cluster treedt geen overschrijding van de  $V_{\max}$ -eis uit de Bts op. De te behalen door gedifferentieerd rijden reductie bij het gidspand Margrietlaan 59 (buiten het cluster) is 13 % (60 km/u) en 18 % (40 km/u).

#### *Cluster Rembrandterf*

In dit cluster is een reductie van 31 % nodig om te voldoen aan de Bts-eis om de toename onder de grenswaarde tot 30 % te beperken. De reductie door gedifferentieerd rijden bij het gidspand bedraagt 13 % (60 km/u) en 17 % (40 km/u). Dat is voldoende om de benodigde afname te bewerkstelligen. De maatregel kan hiermee voor dit cluster effectief zijn.

#### *Cluster Rembrandtlaan*

In dit cluster is een reductie van 5 % nodig om te voldoen aan de Bts-eis om de toename boven de grenswaarde tot 30 % te beperken. De reductie door gedifferentieerd rijden bij het gidspand bedraagt 13 % (60 km/u) en 17 % (40 km/u). Dat is voldoende om de benodigde afname te bewerkstelligen. De maatregel kan hiermee voor dit cluster effectief zijn.

#### *Cluster Helvoirtseweg*

In dit cluster is een reductie van 1 % nodig om te voldoen aan de Bts-eis om de toename boven de grenswaarde tot 30 % te beperken. De reductie door gedifferentieerd rijden bij het gidspand bedraagt 13 % (60 km/u) en 17 % (40 km/u). Dat is voldoende om de benodigde afname te bewerkstelligen. De maatregel kan hiermee voor dit cluster effectief zijn.

#### *Cluster Van Miertstraat*

In dit cluster treedt geen overschrijding van de  $V_{\max}$ -eis uit de Bts op. De te behalen reductie bij het gidspand Van Miertstraat 10 is 15 % (60 km/u) en 18 % (40 km/u).

#### *Cluster Spoorlaan Noord*

In dit cluster treedt geen overschrijding van de  $V_{\max}$ -eis uit de Bts op. De te behalen reductie bij het gidspand Spoorlaan 3 is 11 % (60 km/u) en 16 % (40 km/u).

#### *Cluster Spoorlaan Zuid*

In dit cluster is een reductie van 26 % nodig om te voldoen aan de Bts-eis om de toename onder de grenswaarde tot 30 % te beperken. De reductie door gedifferentieerd rijden bij het gidspand bedraagt 15 % (60 km/u) en 19 % (40 km/u). Dat is niet voldoende om de benodigde afname te bewerkstelligen.

#### *Cluster De Schakel*

In dit cluster is een reductie van 4 % nodig om te voldoen aan de Bts-eis om de toename boven de grenswaarde tot 30 % te beperken. De reductie door gedifferentieerd rijden bij het gidspand bedraagt 7 % (60 km/u) en 15 % (40 km/u). Dat is voldoende om de benodigde afname te bewerkstelligen. De maatregel kan hiermee voor dit cluster effectief zijn.

### Deelgebied Boxtel

In dit deelgebied is een overschrijding van de grenswaarde voor  $V_{per}$  geconstateerd, zo blijkt uit het TB-rapport. Zoals al beschreven heeft gedifferentieerd rijden geen effect op deze beoordeling. De nachtperiode wordt namelijk niet als maatgevend voor het  $V_{per}$ -niveau beschouwd. De maatregel kan dus niet worden ingezet om de overschrijding uit het TB weg te nemen.

Het effect van gedifferentieerd rijden bij de aanwezige gidspanden is varieert tussen 4 % (voor snelheidsverlaging naar 60 km/u) en 19 % (voor snelheidsverlaging naar 40 km/u).

## VI.5 Samenvatting

De analyse hierboven laat zien dat:

- voor het deelgebied 's-Hertogenbosch bij 1 cluster (met in totaal 2 panden) de maatregel gedifferentieerd rijden mogelijk voldoende trillingsreductie kan bewerkstelligen om de trillingssterkte terug te brengen tot het niveau dat de Bts vraagt. Voor de overige clusters voorziet het TB reeds in een maatregel of is er geen overschrijding van de  $V_{max}$ -eisen uit de Bts;
- voor het deelgebied Vught in de plansituatie bij 4 clusters (met in totaal 22 woningen en 5 overige panden) de maatregel gedifferentieerd rijden mogelijk voldoende trillingsreductie kan bewerkstelligen om de trillingssterkte terug te brengen tot het niveau dat de Bts vraagt. Voor de overige clusters voorziet het TB al in een maatregel, behaalt gedifferentieerd rijden niet voldoende reductie, of is er geen overschrijding van de  $V_{max}$ -eisen uit de Bts;
- voor de overige deelgebieden geen overschrijding van de  $V_{max}$ -eis aan de orde is, en dat de reductie bij de gidspanden varieert tussen 0 % (Waardenburg) en 19 % (Boxtel).

### Onzekerheden

Bij bovenstaande inschatting gelden een aantal onzekerheden:

- de clusters in 's-Hertogenbosch liggen ter hoogte van het station. De maximumsnelheden van goederentreinen liggen rond het station lager dan bij de representatieve meetlocatie, ongeveer 1,5 km ten noorden van het station. De snelheidsverlaging is rond het station dus relatief kleiner dan bij de meetlocatie. Dit kan het effect van gedifferentieerd rijden overschatten;
- de clusters in Vught liggen deels ter hoogte van de verdiepte ligging. In aansluiting bij het TB is het trillingsreducerend effect van de verdiepte ligging conservatief ingeschat;
- de benodigde reducties liggen veelal binnen de bandbreedte van de berekende reducties door gedifferentieerd rijden (zoals getoond in hoofdstuk 5 en bijlage V). Een uitspraak met zekerheid over de effectiviteit van de maatregel is dus niet mogelijk.

De te behalen reductie door gedifferentieerd rijden ligt tussen 0 en 25 %. Omdat de voelbaarheidsgrens meestal op ca. 30 % wordt ingeschat (zie bijvoorbeeld de Memorie van toelichting bij de Bts) is het waarschijnlijk dat deze reductie niet of nauwelijks door gebruikers en bewoners van de panden waargenomen kan worden.

## VI.6 Literatuurlijst

- 1 Arcadis (2020). PHS Meteren-Boxtel: TB achtergrondrapporten - Trillingen deel 1 t/m 3. 9 maart 2020, versie 2.0, definitief.



## Bijlagen

Hierna volgen rekensheets voor de bepaling van de te behalen reductie per gidsband. Het betreft in totaal 24 panden. Voor de hier niet opgenomen gidsbanden uit het TB was onvoldoende data beschikbaar om een berekening te maken. Voor 2 gidsbanden (Orthen 162 in 's-Hertogenbosch en Spoorlaan 8 in Vught) resulteert de in het TB opgenomen informatie in een hoger berekend Vmax-niveau in de referentiesituatie dan gemeten. Het blijft daarbij wel mogelijk om een berekening van het effect van gedifferentieerd rijden te maken.

### 1. Berekening Vmax,BTS (referentie)

|                                           |                           |        |        |        |         |        |
|-------------------------------------------|---------------------------|--------|--------|--------|---------|--------|
| Gidspand                                  | Pompstraat 6, Waardenburg |        |        |        |         |        |
| Vmax,BTS uit meting (maatgevend)          | 0.69                      |        |        |        |         |        |
| Afstand tot spoor [m]                     | 36.7                      |        |        |        |         |        |
| Snelheid in referentiesituatie            | 90                        |        |        |        |         |        |
| V0 model (op 5 meter van spoor)           | 1.38                      |        |        |        |         |        |
|                                           | 2 Hz                      | 4 Hz   | 8 Hz   | 16 Hz  | 31.5 Hz | 63 Hz  |
| spectrale correctiefactor                 | 0.0137                    | 0.205  | 0.3862 | 0.2068 | 0.0438  | 0.0578 |
| V0 per octaafband                         | 0.0189                    | 0.2829 | 0.533  | 0.2854 | 0.0604  | 0.0798 |
| correctie voor bestaande spoorconstructie | 1                         | 1      | 1      | 1      | 1       | 1      |
| bodemoverdracht: factor $\alpha$          | 0.015                     | 0.015  | 0.015  | 0.018  | 0.014   | 0.013  |
| bodemoverdracht: factor n                 | 0.1                       | 0.1    | 0.1    | 0.1    | 0.1     | 0.5    |
| correctiefactor voor bodemoverdracht      | 0.51                      | 0.51   | 0.51   | 0.46   | 0.53    | 0.24   |
| correctiefactor Hbodem                    | 1.04                      | 1.09   | 1.11   | 0.64   | 0.71    | 0.54   |
| correctiefactor Hgebouw                   | 1.21                      | 1.24   | 1.78   | 4.38   | 3.36    | 0.8    |
| correctiefactor voor gebouwoverdracht     | 1.26                      | 1.35   | 1.98   | 2.80   | 2.39    | 0.43   |
| Vmax,BTS in octaafbanden in dB            | 0.01                      | 0.19   | 0.54   | 0.37   | 0.08    | 0.01   |
|                                           | 81.67                     | 105.79 | 114.59 | 111.37 | 97.59   | 78.51  |
| som in dB                                 | 116.71                    |        |        |        |         |        |
| Vmax,BTS in referentiesituatie            | 0.68                      |        |        |        |         |        |

### 2. Berekening Vmax,BTS (plan) voor snelheidsverlaging naar 60 km/u

|                                                  |        |        |        |        |         |       |
|--------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|---------|-------|
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.69   |        |        |        |         |       |
| gelijk aan referentiesituatie (ter vergelijking) | 36.7   |        |        |        |         |       |
| Snelheid in plansituatie                         | 60     |        |        |        |         |       |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.38   |        |        |        |         |       |
|                                                  | 2 Hz   | 4 Hz   | 8 Hz   | 16 Hz  | 31.5 Hz | 63 Hz |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.014  | 0.205  | 0.386  | 0.207  | 0.044   | 0.058 |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.019  | 0.283  | 0.533  | 0.285  | 0.06    | 0.08  |
| correctie voor bestaande spoorconstructie        | 1      | 1      | 1      | 1      | 1       | 1     |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.015  | 0.015  | 0.015  | 0.018  | 0.014   | 0.013 |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.1    | 0.1    | 0.1    | 0.1    | 0.1     | 0.5   |
| correctiefactor voor bodemoverdracht             | 0.51   | 0.51   | 0.51   | 0.46   | 0.53    | 0.24  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.04   | 1.09   | 1.11   | 0.64   | 0.71    | 0.54  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.21   | 1.24   | 1.78   | 4.38   | 3.36    | 0.8   |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.258  | 1.352  | 1.976  | 2.803  | 2.386   | 0.432 |
| correctiefactor voor rijsnelheid treinen         | 1.14   | 0.99   | 1.03   | 0.94   | 1.08    | 1.03  |
| Vmax,BTS in octaafbanden in dB                   | 0.01   | 0.19   | 0.55   | 0.35   | 0.08    | 0.01  |
|                                                  | 82.84  | 105.68 | 114.88 | 110.85 | 98.29   | 78.72 |
| som in dB                                        | 116.75 |        |        |        |         |       |
| Vmax,BTS in referentiesituatie                   | 0.69   |        |        |        |         |       |
| Procentuele reductie                             | 0%     |        |        |        |         |       |

### 3. Berekening Vmax,BTS (plan) voor snelheidsverlaging naar 40 km/u

|                                                  |         |        |         |         |         |         |
|--------------------------------------------------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.69    |        |         |         |         |         |
| gelijk aan referentiesituatie (ter vergelijking) | 36.7    |        |         |         |         |         |
| Snelheid in plansituatie                         | 40      |        |         |         |         |         |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.38    |        |         |         |         |         |
|                                                  | 2 Hz    | 4 Hz   | 8 Hz    | 16 Hz   | 31.5 Hz | 63 Hz   |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.0137  | 0.205  | 0.3862  | 0.2068  | 0.0438  | 0.0578  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.01891 | 0.2829 | 0.53296 | 0.28538 | 0.06044 | 0.07976 |
| correctie voor bestaande spoorconstructie        | 1       | 1      | 1       | 1       | 1       | 1       |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.015   | 0.015  | 0.015   | 0.018   | 0.014   | 0.013   |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.1     | 0.1    | 0.1     | 0.1     | 0.1     | 0.5     |
| correctiefactor voor bodemoverdracht             | 0.51    | 0.51   | 0.51    | 0.46    | 0.53    | 0.24    |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.04    | 1.09   | 1.11    | 0.64    | 0.71    | 0.54    |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.21    | 1.24   | 1.78    | 4.38    | 3.36    | 0.8     |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.2584  | 1.3516 | 1.9758  | 2.8032  | 2.3856  | 0.432   |
| correctiefactor voor rijsnelheid treinen         | 0.86    | 0.97   | 1.03    | 0.92    | 1.00    | 0.99    |
| Vmax,BTS in octaafbanden in dB                   | 0.01    | 0.19   | 0.55    | 0.34    | 0.08    | 0.01    |
|                                                  | 80.36   | 105.51 | 114.88  | 110.65  | 97.58   | 78.39   |
| som in dB                                        | 116.68  |        |         |         |         |         |
| Vmax,BTS in referentiesituatie                   | 0.68    |        |         |         |         |         |
| Procentuele reductie                             | 0%      |        |         |         |         |         |

### 1. Berekening Vmax,BTS (referentie)

|                                           |                         |                |                |               |               |               |
|-------------------------------------------|-------------------------|----------------|----------------|---------------|---------------|---------------|
| Gidsband                                  | Zandweg 13, Waardenburg |                |                |               |               |               |
| Vmax,BTS uit meting (maatgevend)          | 0.24                    |                |                |               |               |               |
| Afstand tot spoor [m]                     | 80.7                    |                |                |               |               |               |
| Snelheid in referentiesituatie            | 90                      |                |                |               |               |               |
| V0 model (op 5 meter van spoor)           | 1.01                    |                |                |               |               |               |
|                                           | 2 Hz                    | 4 Hz           | 8 Hz           | 16 Hz         | 31.5 Hz       | 63 Hz         |
| spectrale correctiefactor                 | 0.0594                  | 0.7651         | 0.3714         | 0.0908        | 0.0147        | 0.0172        |
| V0 per octaafband                         | 0.06                    | 0.7728         | 0.3751         | 0.0917        | 0.0148        | 0.0174        |
| correctie voor bestaande spoorconstructie | 1                       | 1              | 1              | 1             | 1             | 1             |
| bodemoverdracht: factor $\alpha$          | 0.015                   | 0.015          | 0.015          | 0.018         | 0.014         | 0.013         |
| bodemoverdracht: factor n                 | 0.1                     | 0.1            | 0.1            | 0.1           | 0.1           | 0.5           |
| correctiefactor voor bodemoverdracht      | 0.24                    | 0.24           | 0.24           | 0.19          | 0.26          | 0.09          |
| correctiefactor Hbodem                    | 1.27                    | 1.08           | 1.11           | 0.77          | 0.58          | 0.54          |
| correctiefactor Hgebouw                   | 1.23                    | 1.01           | 1.13           | 3.35          | 15.69         | 8.93          |
| correctiefactor voor gebouwoverdracht     | 1.56                    | 1.09           | 1.25           | 2.58          | 9.10          | 4.82          |
| Vmax,BTS in octaafbanden<br>in dB         | 0.02<br>87.16           | 0.21<br>106.24 | 0.11<br>101.17 | 0.05<br>93.23 | 0.04<br>90.99 | 0.01<br>77.84 |
| som in dB                                 | 107.71                  |                |                |               |               |               |
| Vmax,BTS in referentiesituatie            | 0.24                    |                |                |               |               |               |

### 2. Berekening Vmax,BTS (plan) voor snelheidsverlaging naar 60 km/u

|                                                  |               |                |                |               |               |               |
|--------------------------------------------------|---------------|----------------|----------------|---------------|---------------|---------------|
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.24          |                |                |               |               |               |
| gelijk aan referentiesituatie (ter vergelijking) | 80.7          |                |                |               |               |               |
| Snelheid in plansituatie                         | 60            |                |                |               |               |               |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.01          |                |                |               |               |               |
|                                                  | 2 Hz          | 4 Hz           | 8 Hz           | 16 Hz         | 31.5 Hz       | 63 Hz         |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.059         | 0.765          | 0.371          | 0.091         | 0.015         | 0.017         |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.06          | 0.773          | 0.375          | 0.092         | 0.015         | 0.017         |
| correctie voor bestaande spoorconstructie        | 1             | 1              | 1              | 1             | 1             | 1             |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.015         | 0.015          | 0.015          | 0.018         | 0.014         | 0.013         |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.1           | 0.1            | 0.1            | 0.1           | 0.1           | 0.5           |
| correctiefactor voor bodemoverdracht             | 0.24          | 0.24           | 0.24           | 0.19          | 0.26          | 0.09          |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.27          | 1.08           | 1.11           | 0.77          | 0.58          | 0.54          |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.23          | 1.01           | 1.13           | 3.35          | 15.69         | 8.93          |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.562         | 1.091          | 1.254          | 2.58          | 9.1           | 4.822         |
| correctiefactor voor rijsnelheid treinen         | 1.14          | 0.99           | 1.03           | 0.94          | 1.08          | 1.03          |
| Vmax,BTS in octaafbanden<br>in dB                | 0.03<br>88.33 | 0.20<br>106.13 | 0.12<br>101.46 | 0.04<br>92.70 | 0.04<br>91.69 | 0.01<br>78.05 |
| som in dB                                        | 107.72        |                |                |               |               |               |
| Vmax,BTS in referentiesituatie                   | 0.24          |                |                |               |               |               |
| Procentuele reductie                             | 0%            |                |                |               |               |               |

### 3. Berekening Vmax,BTS (plan) voor snelheidsverlaging naar 40 km/u

|                                                  |               |                |                |               |               |               |
|--------------------------------------------------|---------------|----------------|----------------|---------------|---------------|---------------|
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.24          |                |                |               |               |               |
| gelijk aan referentiesituatie (ter vergelijking) | 80.7          |                |                |               |               |               |
| Snelheid in plansituatie                         | 40            |                |                |               |               |               |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.01          |                |                |               |               |               |
|                                                  | 2 Hz          | 4 Hz           | 8 Hz           | 16 Hz         | 31.5 Hz       | 63 Hz         |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.0594        | 0.7651         | 0.3714         | 0.0908        | 0.0147        | 0.0172        |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.05999       | 0.77275        | 0.37511        | 0.09171       | 0.01485       | 0.01737       |
| correctie voor bestaande spoorconstructie        | 1             | 1              | 1              | 1             | 1             | 1             |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.015         | 0.015          | 0.015          | 0.018         | 0.014         | 0.013         |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.1           | 0.1            | 0.1            | 0.1           | 0.1           | 0.5           |
| correctiefactor voor bodemoverdracht             | 0.24          | 0.24           | 0.24           | 0.19          | 0.26          | 0.09          |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.27          | 1.08           | 1.11           | 0.77          | 0.58          | 0.54          |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.23          | 1.01           | 1.13           | 3.35          | 15.69         | 8.93          |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.5621        | 1.0908         | 1.2543         | 2.5795        | 9.1002        | 4.8222        |
| correctiefactor voor rijsnelheid treinen         | 0.86          | 0.97           | 1.03           | 0.92          | 1.00          | 0.99          |
| Vmax,BTS in octaafbanden<br>in dB                | 0.02<br>85.85 | 0.20<br>105.96 | 0.12<br>101.46 | 0.04<br>92.50 | 0.04<br>90.98 | 0.01<br>77.71 |
| som in dB                                        | 107.56        |                |                |               |               |               |
| Vmax,BTS in referentiesituatie                   | 0.24          |                |                |               |               |               |
| Procentuele reductie                             | -2%           |                |                |               |               |               |

### 1. Berekening Vmax,BTS (referentie)

|                                           |                       |                |                |                |                |                |
|-------------------------------------------|-----------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Gidsband                                  | Vliedseweg 4, Bruchem |                |                |                |                |                |
| Vmax,BTS uit meting (maatgevend)          | 2.16                  |                |                |                |                |                |
| Afstand tot spoor [m]                     | 6.6                   |                |                |                |                |                |
| Snelheid in referentiesituatie            | 90                    |                |                |                |                |                |
| V0 model (op 5 meter van spoor)           | 2.28                  |                |                |                |                |                |
|                                           | 2 Hz                  | 4 Hz           | 8 Hz           | 16 Hz          | 31.5 Hz        | 63 Hz          |
| spectrale correctiefactor                 | 0.0404                | 0.2982         | 1.025          | 0.5894         | 0.2519         | 0.134          |
| V0 per octaafband                         | 0.0921                | 0.6799         | 2.337          | 1.3438         | 0.5743         | 0.3055         |
| correctie voor bestaande spoorconstructie | 1                     | 1              | 1              | 1              | 1              | 1              |
| bodemoverdracht: factor $\alpha$          | 0.02                  | 0.02           | 0.035          | 0.035          | 0.045          | 0.045          |
| bodemoverdracht: factor n                 | 0.1                   | 0.1            | 0.1            | 0.1            | 0.1            | 0.3            |
| correctiefactor voor bodemoverdracht      | 0.94                  | 0.94           | 0.92           | 0.92           | 0.91           | 0.86           |
| correctiefactor Hbodem                    | 0.97                  | 0.83           | 0.74           | 0.58           | 0.24           | 0.21           |
| correctiefactor Hgebouw                   | 0.83                  | 0.8            | 1.02           | 1.32           | 5.98           | 6.54           |
| correctiefactor voor gebouwoverdracht     | 0.81                  | 0.66           | 0.75           | 0.77           | 1.44           | 1.37           |
| Vmax,BTS in octaafbanden<br>in dB         | 0.07<br>96.88         | 0.43<br>112.57 | 1.62<br>124.20 | 0.95<br>119.52 | 0.75<br>117.45 | 0.36<br>111.11 |
| som in dB                                 | 126.43                |                |                |                |                |                |
| Vmax,BTS in referentiesituatie            | 2.10                  |                |                |                |                |                |

### 2. Berekening Vmax,BTS (plan) voor snelheidsverlaging naar 60 km/u

|                                                  |               |                |                |                |                |                |
|--------------------------------------------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| identiek aan referentiesituatie                  | 2.16          |                |                |                |                |                |
| gelijk aan referentiesituatie (ter vergelijking) | 6.6           |                |                |                |                |                |
| Snelheid in plansituatie                         | 60            |                |                |                |                |                |
| identiek aan referentiesituatie                  | 2.28          |                |                |                |                |                |
|                                                  | 2 Hz          | 4 Hz           | 8 Hz           | 16 Hz          | 31.5 Hz        | 63 Hz          |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.04          | 0.298          | 1.025          | 0.589          | 0.252          | 0.134          |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.092         | 0.68           | 2.337          | 1.344          | 0.574          | 0.306          |
| correctie voor bestaande spoorconstructie        | 1             | 1              | 1              | 1              | 1              | 1              |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.02          | 0.02           | 0.035          | 0.035          | 0.045          | 0.045          |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.1           | 0.1            | 0.1            | 0.1            | 0.1            | 0.3            |
| correctiefactor voor bodemoverdracht             | 0.94          | 0.94           | 0.92           | 0.92           | 0.91           | 0.86           |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.97          | 0.83           | 0.74           | 0.58           | 0.24           | 0.21           |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.83          | 0.8            | 1.02           | 1.32           | 5.98           | 6.54           |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.805         | 0.664          | 0.755          | 0.766          | 1.435          | 1.373          |
| correctiefactor voor rijsnelheid treinen         | 1.14          | 0.92           | 0.94           | 0.89           | 1.15           | 0.72           |
| Vmax,BTS in octaafbanden<br>in dB                | 0.08<br>98.01 | 0.39<br>111.82 | 1.53<br>123.68 | 0.84<br>118.46 | 0.86<br>118.70 | 0.26<br>108.22 |
| som in dB                                        | 126.02        |                |                |                |                |                |
| Vmax,BTS in referentiesituatie                   | 2.00          |                |                |                |                |                |
| Procentuele reductie                             | -5%           |                |                |                |                |                |

### 3. Berekening Vmax,BTS (plan) voor snelheidsverlaging naar 40 km/u

|                                                  |               |                |                |                |                |                |
|--------------------------------------------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| identiek aan referentiesituatie                  | 2.16          |                |                |                |                |                |
| gelijk aan referentiesituatie (ter vergelijking) | 6.6           |                |                |                |                |                |
| Snelheid in plansituatie                         | 40            |                |                |                |                |                |
| identiek aan referentiesituatie                  | 2.28          |                |                |                |                |                |
|                                                  | 2 Hz          | 4 Hz           | 8 Hz           | 16 Hz          | 31.5 Hz        | 63 Hz          |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.0404        | 0.2982         | 1.025          | 0.5894         | 0.2519         | 0.134          |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.09211       | 0.6799         | 2.337          | 1.34383        | 0.57433        | 0.30552        |
| correctie voor bestaande spoorconstructie        | 1             | 1              | 1              | 1              | 1              | 1              |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.02          | 0.02           | 0.035          | 0.035          | 0.045          | 0.045          |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.1           | 0.1            | 0.1            | 0.1            | 0.1            | 0.3            |
| correctiefactor voor bodemoverdracht             | 0.94          | 0.94           | 0.92           | 0.92           | 0.91           | 0.86           |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.97          | 0.83           | 0.74           | 0.58           | 0.24           | 0.21           |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.83          | 0.8            | 1.02           | 1.32           | 5.98           | 6.54           |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.8051        | 0.664          | 0.7548         | 0.7656         | 1.4352         | 1.3734         |
| correctiefactor voor rijsnelheid treinen         | 1.06          | 0.90           | 0.94           | 0.90           | 1.03           | 0.70           |
| Vmax,BTS in octaafbanden<br>in dB                | 0.07<br>97.42 | 0.38<br>111.66 | 1.52<br>123.66 | 0.85<br>118.59 | 0.77<br>117.71 | 0.25<br>108.03 |
| som in dB                                        | 125.85        |                |                |                |                |                |
| Vmax,BTS in referentiesituatie                   | 1.96          |                |                |                |                |                |
| Procentuele reductie                             | -6%           |                |                |                |                |                |

## 1. Berekening Vmax,BTS (referentie)

|                                           |                       |        |        |        |         |        |
|-------------------------------------------|-----------------------|--------|--------|--------|---------|--------|
| Gidsband                                  | Stationsweg 11, Hedel |        |        |        |         |        |
| Vmax,BTS uit meting (maatgevend)          | 0.67                  |        |        |        |         |        |
| Afstand tot spoor [m]                     | 9.6                   |        |        |        |         |        |
| Snelheid in referentiesituatie            | 90                    |        |        |        |         |        |
| V0 model (op 5 meter van spoor)           | 0.82                  |        |        |        |         |        |
|                                           | 2 Hz                  | 4 Hz   | 8 Hz   | 16 Hz  | 31.5 Hz | 63 Hz  |
| spectrale correctiefactor                 | 0.0123                | 0.2286 | 0.9674 | 0.2093 | 0.459   | 0.3532 |
| V0 per octaafband                         | 0.0101                | 0.1875 | 0.7933 | 0.1716 | 0.3764  | 0.2896 |
| correctie voor bestaande spoorconstructie | 1                     | 1      | 1      | 1      | 1       | 1      |
| bodemoverdracht: factor $\alpha$          | 0.02                  | 0.02   | 0.035  | 0.035  | 0.045   | 0.045  |
| bodemoverdracht: factor n                 | 0.1                   | 0.1    | 0.1    | 0.1    | 0.1     | 0.3    |
| correctiefactor voor bodemoverdracht      | 0.85                  | 0.85   | 0.80   | 0.80   | 0.76    | 0.67   |
| correctiefactor Hbodem                    | 1.09                  | 1      | 1.2    | 0.72   | 0.28    | 0.24   |
| correctiefactor Hgebouw                   | 1.39                  | 0.87   | 0.75   | 1.56   | 2.17    | 3.48   |
| correctiefactor voor gebouwoverdracht     | 1.52                  | 0.87   | 0.90   | 1.12   | 0.61    | 0.84   |
| Vmax,BTS in octaafbanden in dB            | 0.01                  | 0.14   | 0.57   | 0.15   | 0.17    | 0.16   |
|                                           | 82.32                 | 102.88 | 115.11 | 103.74 | 104.82  | 104.17 |
| som in dB                                 | 116.27                |        |        |        |         |        |
| Vmax,BTS in referentiesituatie            | 0.65                  |        |        |        |         |        |

## 2. Berekening Vmax,BTS (plan) voor snelheidsverlaging naar 60 km/u

|                                                  |        |        |        |        |         |        |
|--------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.67   |        |        |        |         |        |
| gelijk aan referentiesituatie (ter vergelijking) | 9.6    |        |        |        |         |        |
| Snelheid in plansituatie                         | 60     |        |        |        |         |        |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.82   |        |        |        |         |        |
|                                                  | 2 Hz   | 4 Hz   | 8 Hz   | 16 Hz  | 31.5 Hz | 63 Hz  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.012  | 0.229  | 0.967  | 0.209  | 0.459   | 0.353  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.01   | 0.187  | 0.793  | 0.172  | 0.376   | 0.29   |
| correctie voor bestaande spoorconstructie        | 1      | 1      | 1      | 1      | 1       | 1      |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.02   | 0.02   | 0.035  | 0.035  | 0.045   | 0.045  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.1    | 0.1    | 0.1    | 0.1    | 0.1     | 0.3    |
| correctiefactor voor bodemoverdracht             | 0.85   | 0.85   | 0.80   | 0.80   | 0.76    | 0.67   |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.09   | 1      | 1.2    | 0.72   | 0.28    | 0.24   |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.39   | 0.87   | 0.75   | 1.56   | 2.17    | 3.48   |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.515  | 0.87   | 0.9    | 1.123  | 0.608   | 0.835  |
| correctiefactor voor rijsnelheid treinen         | 1.14   | 0.92   | 0.94   | 0.89   | 1.15    | 0.72   |
| Vmax,BTS in octaafbanden in dB                   | 0.01   | 0.13   | 0.54   | 0.14   | 0.20    | 0.12   |
|                                                  | 83.45  | 102.13 | 114.59 | 102.67 | 106.06  | 101.29 |
| som in dB                                        | 115.76 |        |        |        |         |        |
| Vmax,BTS in referentiesituatie                   | 0.61   |        |        |        |         |        |
| Procentuele reductie                             | -6%    |        |        |        |         |        |

## 3. Berekening Vmax,BTS (plan) voor snelheidsverlaging naar 40 km/u

|                                                  |         |         |         |         |         |         |
|--------------------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.67    |         |         |         |         |         |
| gelijk aan referentiesituatie (ter vergelijking) | 9.6     |         |         |         |         |         |
| Snelheid in plansituatie                         | 40      |         |         |         |         |         |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.82    |         |         |         |         |         |
|                                                  | 2 Hz    | 4 Hz    | 8 Hz    | 16 Hz   | 31.5 Hz | 63 Hz   |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.0123  | 0.2286  | 0.9674  | 0.2093  | 0.459   | 0.3532  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.01009 | 0.18745 | 0.79327 | 0.17163 | 0.37638 | 0.28962 |
| correctie voor bestaande spoorconstructie        | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.02    | 0.02    | 0.035   | 0.035   | 0.045   | 0.045   |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.1     | 0.1     | 0.1     | 0.1     | 0.1     | 0.3     |
| correctiefactor voor bodemoverdracht             | 0.85    | 0.85    | 0.80    | 0.80    | 0.76    | 0.67    |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.09    | 1       | 1.2     | 0.72    | 0.28    | 0.24    |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.39    | 0.87    | 0.75    | 1.56    | 2.17    | 3.48    |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.5151  | 0.87    | 0.9     | 1.1232  | 0.6076  | 0.8352  |
| correctiefactor voor rijsnelheid treinen         | 1.06    | 0.90    | 0.94    | 0.90    | 1.03    | 0.70    |
| Vmax,BTS in octaafbanden in dB                   | 0.01    | 0.13    | 0.53    | 0.14    | 0.18    | 0.11    |
|                                                  | 82.86   | 101.97  | 114.56  | 102.81  | 105.08  | 101.10  |
| som in dB                                        | 115.63  |         |         |         |         |         |
| Vmax,BTS in referentiesituatie                   | 0.60    |         |         |         |         |         |
| Procentuele reductie                             | -7%     |         |         |         |         |         |

## 1. Berekening Vmax,BTS (referentie)

|                                           |                                       |        |        |        |         |        |
|-------------------------------------------|---------------------------------------|--------|--------|--------|---------|--------|
| Gidsband                                  | Sint Lucasstraat 30, 's-Hertogenbosch |        |        |        |         |        |
| Vmax,BTS uit meting (maatgevend)          | 1.04                                  |        |        |        |         |        |
| Afstand tot spoor [m]                     | 67.8                                  |        |        |        |         |        |
| Snelheid in referentiesituatie            | 90                                    |        |        |        |         |        |
| V0 model (op 5 meter van spoor)           | 2.21                                  |        |        |        |         |        |
|                                           | 2 Hz                                  | 4 Hz   | 8 Hz   | 16 Hz  | 31.5 Hz | 63 Hz  |
| spectrale correctiefactor                 | 0.0033                                | 0.0193 | 0.0639 | 0.1049 | 0.617   | 0.2001 |
| V0 per octaafband                         | 0.0073                                | 0.0427 | 0.1412 | 0.2318 | 1.3636  | 0.4422 |
| correctie voor bestaande spoorconstructie | 1                                     | 1      | 1      | 1      | 1       | 1      |
| bodemoverdracht: factor $\alpha$          | 0.003                                 | 0.003  | 0.003  | 0.008  | 0.008   | 0.008  |
| bodemoverdracht: factor n                 | 0.1                                   | 0.1    | 0.1    | 0.1    | 0.1     | 0.1    |
| correctiefactor voor bodemoverdracht      | 0.64                                  | 0.64   | 0.64   | 0.47   | 0.47    | 0.47   |
| correctiefactor Hbodem                    | 1                                     | 1      | 1      | 1      | 1       | 1      |
| correctiefactor Hgebouw                   | 1.5                                   | 1.5    | 1.5    | 1.5    | 1.5     | 1.5    |
| correctiefactor voor gebouwoverdracht     | 1.50                                  | 1.50   | 1.50   | 1.50   | 1.50    | 1.50   |
| Vmax,BTS in octaafbanden<br>in dB         | 0.01                                  | 0.04   | 0.14   | 0.16   | 0.95    | 0.31   |
|                                           | 76.88                                 | 92.22  | 102.62 | 104.20 | 119.59  | 109.81 |
| som in dB                                 | 120.22                                |        |        |        |         |        |
| Vmax,BTS in referentiesituatie            | 1.03                                  |        |        |        |         |        |

## 2. Berekening Vmax,BTS (plan) voor snelheidsverlaging naar 60 km/u

|                                                  |        |       |        |        |         |        |
|--------------------------------------------------|--------|-------|--------|--------|---------|--------|
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.04   |       |        |        |         |        |
| gelijk aan referentiesituatie (ter vergelijking) | 67.8   |       |        |        |         |        |
| Snelheid in plansituatie                         | 60     |       |        |        |         |        |
| identiek aan referentiesituatie                  | 2.21   |       |        |        |         |        |
|                                                  | 2 Hz   | 4 Hz  | 8 Hz   | 16 Hz  | 31.5 Hz | 63 Hz  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.003  | 0.019 | 0.064  | 0.105  | 0.617   | 0.2    |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.007  | 0.043 | 0.141  | 0.232  | 1.364   | 0.442  |
| correctie voor bestaande spoorconstructie        | 1      | 1     | 1      | 1      | 1       | 1      |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.003  | 0.003 | 0.003  | 0.008  | 0.008   | 0.008  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.1    | 0.1   | 0.1    | 0.1    | 0.1     | 0.1    |
| correctiefactor voor bodemoverdracht             | 0.64   | 0.64  | 0.64   | 0.47   | 0.47    | 0.47   |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1      | 1     | 1      | 1      | 1       | 1      |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.5    | 1.5   | 1.5    | 1.5    | 1.5     | 1.5    |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.5    | 1.5   | 1.5    | 1.5    | 1.5     | 1.5    |
| correctiefactor voor rijsnelheid treinen         | 0.95   | 0.59  | 0.82   | 0.74   | 0.85    | 0.58   |
| Vmax,BTS in octaafbanden<br>in dB                | 0.01   | 0.02  | 0.11   | 0.12   | 0.81    | 0.18   |
|                                                  | 76.43  | 87.70 | 100.87 | 101.62 | 118.15  | 105.12 |
| som in dB                                        | 118.54 |       |        |        |         |        |
| Vmax,BTS in referentiesituatie                   | 0.84   |       |        |        |         |        |
| Procentuele reductie                             | -18%   |       |        |        |         |        |

## 3. Berekening Vmax,BTS (plan) voor snelheidsverlaging naar 40 km/u

|                                                  |         |         |         |         |         |         |
|--------------------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.04    |         |         |         |         |         |
| gelijk aan referentiesituatie (ter vergelijking) | 67.8    |         |         |         |         |         |
| Snelheid in plansituatie                         | 40      |         |         |         |         |         |
| identiek aan referentiesituatie                  | 2.21    |         |         |         |         |         |
|                                                  | 2 Hz    | 4 Hz    | 8 Hz    | 16 Hz   | 31.5 Hz | 63 Hz   |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.0033  | 0.0193  | 0.0639  | 0.1049  | 0.617   | 0.2001  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.00729 | 0.04265 | 0.14122 | 0.23183 | 1.36357 | 0.44222 |
| correctie voor bestaande spoorconstructie        | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.003   | 0.003   | 0.003   | 0.008   | 0.008   | 0.008   |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.1     | 0.1     | 0.1     | 0.1     | 0.1     | 0.1     |
| correctiefactor voor bodemoverdracht             | 0.64    | 0.64    | 0.64    | 0.47    | 0.47    | 0.47    |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.5     | 1.5     | 1.5     | 1.5     | 1.5     | 1.5     |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.5     | 1.5     | 1.5     | 1.5     | 1.5     | 1.5     |
| correctiefactor voor rijsnelheid treinen         | 0.95    | 0.60    | 0.81    | 0.78    | 0.77    | 0.59    |
| Vmax,BTS in octaafbanden<br>in dB                | 0.01    | 0.02    | 0.11    | 0.13    | 0.73    | 0.18    |
|                                                  | 76.45   | 87.78   | 100.83  | 102.05  | 117.28  | 105.27  |
| som in dB                                        | 117.76  |         |         |         |         |         |
| Vmax,BTS in referentiesituatie                   | 0.77    |         |         |         |         |         |
| Procentuele reductie                             | -25%    |         |         |         |         |         |



## 1. Berekening Vmax,BTS (referentie)

|                                           |                                        |        |        |        |         |        |
|-------------------------------------------|----------------------------------------|--------|--------|--------|---------|--------|
| Gidsband                                  | Kemperlandstraat 133, 's-Hertogenbosch |        |        |        |         |        |
| Vmax,BTS uit meting (maatgevend)          | 0.16                                   |        |        |        |         |        |
| Afstand tot spoor [m]                     | 36.2                                   |        |        |        |         |        |
| Snelheid in referentiesituatie            | 90                                     |        |        |        |         |        |
| V0 model (op 5 meter van spoor)           | 0.24                                   |        |        |        |         |        |
|                                           | 2 Hz                                   | 4 Hz   | 8 Hz   | 16 Hz  | 31.5 Hz | 63 Hz  |
| spectrale correctiefactor                 | 0.0107                                 | 0.0571 | 0.2166 | 0.3189 | 0.8333  | 0.3333 |
| V0 per octaafband                         | 0.0026                                 | 0.0137 | 0.052  | 0.0765 | 0.2     | 0.08   |
| correctie voor bestaande spoorconstructie | 1                                      | 1      | 1      | 1      | 1       | 1      |
| bodemoverdracht: factor $\alpha$          | 0.003                                  | 0.003  | 0.003  | 0.008  | 0.008   | 0.008  |
| bodemoverdracht: factor n                 | 0.1                                    | 0.1    | 0.1    | 0.1    | 0.1     | 0.1    |
| correctiefactor voor bodemoverdracht      | 0.75                                   | 0.75   | 0.75   | 0.64   | 0.64    | 0.64   |
| correctiefactor Hbodem                    | 1                                      | 1      | 1      | 1      | 1       | 1      |
| correctiefactor Hgebouw                   | 4                                      | 4      | 1.6    | 2.9    | 0.01    | 0.01   |
| correctiefactor voor gebouwoverdracht     | 4.00                                   | 4.00   | 1.60   | 2.90   | 0.01    | 0.01   |
| Vmax,BTS in octaafbanden in dB            | 0.01                                   | 0.04   | 0.06   | 0.14   | 0.00    | 0.00   |
|                                           | 77.70                                  | 92.25  | 95.87  | 103.04 | 62.13   | 54.17  |
| som in dB                                 | 104.10                                 |        |        |        |         |        |
| Vmax,BTS in referentiesituatie            | 0.16                                   |        |        |        |         |        |

## 2. Berekening Vmax,BTS (plan) voor snelheidsverlaging naar 60 km/u

|                                                  |        |       |       |        |         |       |
|--------------------------------------------------|--------|-------|-------|--------|---------|-------|
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.16   |       |       |        |         |       |
| gelijk aan referentiesituatie (ter vergelijking) | 36.2   |       |       |        |         |       |
| Snelheid in plansituatie                         | 60     |       |       |        |         |       |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.24   |       |       |        |         |       |
|                                                  | 2 Hz   | 4 Hz  | 8 Hz  | 16 Hz  | 31.5 Hz | 63 Hz |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.011  | 0.057 | 0.217 | 0.319  | 0.833   | 0.333 |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.003  | 0.014 | 0.052 | 0.077  | 0.2     | 0.08  |
| correctie voor bestaande spoorconstructie        | 1      | 1     | 1     | 1      | 1       | 1     |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.003  | 0.003 | 0.003 | 0.008  | 0.008   | 0.008 |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.1    | 0.1   | 0.1   | 0.1    | 0.1     | 0.1   |
| correctiefactor voor bodemoverdracht             | 0.75   | 0.75  | 0.75  | 0.64   | 0.64    | 0.64  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1      | 1     | 1     | 1      | 1       | 1     |
| identiek aan referentiesituatie                  | 4      | 4     | 1.6   | 2.9    | 0.01    | 0.01  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 4      | 4     | 1.6   | 2.9    | 0.01    | 0.01  |
| correctiefactor voor rijsnelheid treinen         | 0.95   | 0.59  | 0.82  | 0.74   | 0.85    | 0.58  |
| Vmax,BTS in octaafbanden in dB                   | 0.01   | 0.02  | 0.05  | 0.11   | 0.00    | 0.00  |
|                                                  | 77.26  | 87.72 | 94.12 | 100.46 | 60.70   | 49.49 |
| som in dB                                        | 101.57 |       |       |        |         |       |
| Vmax,BTS in referentiesituatie                   | 0.12   |       |       |        |         |       |
| Procentuele reductie                             | -25%   |       |       |        |         |       |

## 3. Berekening Vmax,BTS (plan) voor snelheidsverlaging naar 40 km/u

|                                                  |         |        |         |         |         |         |
|--------------------------------------------------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.16    |        |         |         |         |         |
| gelijk aan referentiesituatie (ter vergelijking) | 36.2    |        |         |         |         |         |
| Snelheid in plansituatie                         | 40      |        |         |         |         |         |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.24    |        |         |         |         |         |
|                                                  | 2 Hz    | 4 Hz   | 8 Hz    | 16 Hz   | 31.5 Hz | 63 Hz   |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.0107  | 0.0571 | 0.2166  | 0.3189  | 0.8333  | 0.3333  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.00257 | 0.0137 | 0.05198 | 0.07654 | 0.19999 | 0.07999 |
| correctie voor bestaande spoorconstructie        | 1       | 1      | 1       | 1       | 1       | 1       |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.003   | 0.003  | 0.003   | 0.008   | 0.008   | 0.008   |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.1     | 0.1    | 0.1     | 0.1     | 0.1     | 0.1     |
| correctiefactor voor bodemoverdracht             | 0.75    | 0.75   | 0.75    | 0.64    | 0.64    | 0.64    |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1       | 1      | 1       | 1       | 1       | 1       |
| identiek aan referentiesituatie                  | 4       | 4      | 1.6     | 2.9     | 0.01    | 0.01    |
| identiek aan referentiesituatie                  | 4       | 4      | 1.6     | 2.9     | 0.01    | 0.01    |
| correctiefactor voor rijsnelheid treinen         | 0.95    | 0.60   | 0.81    | 0.78    | 0.77    | 0.59    |
| Vmax,BTS in octaafbanden in dB                   | 0.01    | 0.02   | 0.05    | 0.11    | 0.00    | 0.00    |
|                                                  | 77.27   | 87.81  | 94.08   | 100.89  | 59.83   | 49.63   |
| som in dB                                        | 101.90  |        |         |         |         |         |
| Vmax,BTS in referentiesituatie                   | 0.12    |        |         |         |         |         |
| Procentuele reductie                             | -22%    |        |         |         |         |         |

## 1. Berekening Vmax,BTS (referentie)

|                                           |                                   |        |        |        |         |        |
|-------------------------------------------|-----------------------------------|--------|--------|--------|---------|--------|
| Gidsband                                  | Boschveldweg 35, 's-Hertogenbosch |        |        |        |         |        |
| Vmax,BTS uit meting (maatgevend)          | 0.76                              |        |        |        |         |        |
| Afstand tot spoor [m]                     | 48.7                              |        |        |        |         |        |
| Snelheid in referentiesituatie            | 90                                |        |        |        |         |        |
| V0 model (op 5 meter van spoor)           | 1.23                              |        |        |        |         |        |
|                                           | 2 Hz                              | 4 Hz   | 8 Hz   | 16 Hz  | 31.5 Hz | 63 Hz  |
| spectrale correctiefactor                 | 0.0035                            | 0.019  | 0.0722 | 0.1063 | 0.2865  | 0.1138 |
| V0 per octaafband                         | 0.0043                            | 0.0234 | 0.0888 | 0.1307 | 0.3524  | 0.14   |
| correctie voor bestaande spoorconstructie | 1                                 | 1      | 1      | 1      | 1       | 1      |
| bodemoverdracht: factor $\alpha$          | 0.003                             | 0.003  | 0.003  | 0.008  | 0.008   | 0.008  |
| bodemoverdracht: factor n                 | 0.1                               | 0.1    | 0.1    | 0.1    | 0.1     | 0.1    |
| correctiefactor voor bodemoverdracht      | 0.70                              | 0.70   | 0.70   | 0.56   | 0.56    | 0.56   |
| correctiefactor Hbodem                    | 4                                 | 4      | 4      | 4      | 4       | 4      |
| correctiefactor Hgebouw                   | 1.12                              | 1.9    | 2      | 1.9    | 0.01    | 0.01   |
| correctiefactor voor gebouwoverdracht     | 4.48                              | 7.60   | 8.00   | 7.60   | 0.04    | 0.04   |
| Vmax,BTS in octaafbanden in dB            | 0.01                              | 0.12   | 0.50   | 0.56   | 0.01    | 0.00   |
|                                           | 82.59                             | 101.87 | 113.91 | 114.93 | 77.97   | 69.95  |
| som in dB                                 | 117.58                            |        |        |        |         |        |
| Vmax,BTS in referentiesituatie            | 0.76                              |        |        |        |         |        |

## 2. Berekening Vmax,BTS (plan) voor snelheidsverlaging naar 60 km/u

|                                                  |        |       |        |        |         |       |
|--------------------------------------------------|--------|-------|--------|--------|---------|-------|
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.76   |       |        |        |         |       |
| gelijk aan referentiesituatie (ter vergelijking) | 48.7   |       |        |        |         |       |
| Snelheid in plansituatie                         | 60     |       |        |        |         |       |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.23   |       |        |        |         |       |
|                                                  | 2 Hz   | 4 Hz  | 8 Hz   | 16 Hz  | 31.5 Hz | 63 Hz |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.004  | 0.019 | 0.072  | 0.106  | 0.287   | 0.114 |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.004  | 0.023 | 0.089  | 0.131  | 0.352   | 0.14  |
| correctie voor bestaande spoorconstructie        | 1      | 1     | 1      | 1      | 1       | 1     |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.003  | 0.003 | 0.003  | 0.008  | 0.008   | 0.008 |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.1    | 0.1   | 0.1    | 0.1    | 0.1     | 0.1   |
| correctiefactor voor bodemoverdracht             | 0.70   | 0.70  | 0.70   | 0.56   | 0.56    | 0.56  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 4      | 4     | 4      | 4      | 4       | 4     |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.12   | 1.9   | 2      | 1.9    | 0.01    | 0.01  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 4.48   | 7.6   | 8      | 7.6    | 0.04    | 0.04  |
| correctiefactor voor rijsnelheid treinen         | 0.95   | 0.59  | 0.82   | 0.74   | 0.85    | 0.58  |
| Vmax,BTS in octaafbanden in dB                   | 0.01   | 0.07  | 0.41   | 0.41   | 0.01    | 0.00  |
|                                                  | 82.14  | 97.35 | 112.17 | 112.35 | 76.54   | 65.26 |
| som in dB                                        | 115.34 |       |        |        |         |       |
| Vmax,BTS in referentiesituatie                   | 0.59   |       |        |        |         |       |
| Procentuele reductie                             | -23%   |       |        |        |         |       |

## 3. Berekening Vmax,BTS (plan) voor snelheidsverlaging naar 40 km/u

|                                                  |         |         |         |         |         |         |
|--------------------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.76    |         |         |         |         |         |
| gelijk aan referentiesituatie (ter vergelijking) | 48.7    |         |         |         |         |         |
| Snelheid in plansituatie                         | 40      |         |         |         |         |         |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.23    |         |         |         |         |         |
|                                                  | 2 Hz    | 4 Hz    | 8 Hz    | 16 Hz   | 31.5 Hz | 63 Hz   |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.0035  | 0.019   | 0.0722  | 0.1063  | 0.2865  | 0.1138  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.00431 | 0.02337 | 0.08881 | 0.13075 | 0.3524  | 0.13997 |
| correctie voor bestaande spoorconstructie        | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.003   | 0.003   | 0.003   | 0.008   | 0.008   | 0.008   |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.1     | 0.1     | 0.1     | 0.1     | 0.1     | 0.1     |
| correctiefactor voor bodemoverdracht             | 0.70    | 0.70    | 0.70    | 0.56    | 0.56    | 0.56    |
| identiek aan referentiesituatie                  | 4       | 4       | 4       | 4       | 4       | 4       |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.12    | 1.9     | 2       | 1.9     | 0.01    | 0.01    |
| identiek aan referentiesituatie                  | 4.48    | 7.6     | 8       | 7.6     | 0.04    | 0.04    |
| correctiefactor voor rijsnelheid treinen         | 0.95    | 0.60    | 0.81    | 0.78    | 0.77    | 0.59    |
| Vmax,BTS in octaafbanden in dB                   | 0.01    | 0.07    | 0.40    | 0.44    | 0.01    | 0.00    |
|                                                  | 82.16   | 97.44   | 112.13  | 112.78  | 75.66   | 65.41   |
| som in dB                                        | 115.55  |         |         |         |         |         |
| Vmax,BTS in referentiesituatie                   | 0.60    |         |         |         |         |         |
| Procentuele reductie                             | -21%    |         |         |         |         |         |

## 1. Berekening Vmax,BTS (referentie)

|                                           |                              |        |        |        |         |        |
|-------------------------------------------|------------------------------|--------|--------|--------|---------|--------|
| Gidsband                                  | Orthen 162, 's-Hertogenbosch |        |        |        |         |        |
| Vmax,BTS uit meting (maatgevend)          | 2.86                         |        |        |        |         |        |
| Afstand tot spoor [m]                     | 21.1                         |        |        |        |         |        |
| Snelheid in referentiesituatie            | 90                           |        |        |        |         |        |
| V0 model (op 5 meter van spoor)           | 3.75                         |        |        |        |         |        |
|                                           | 2 Hz                         | 4 Hz   | 8 Hz   | 16 Hz  | 31.5 Hz | 63 Hz  |
| spectrale correctiefactor                 | 0.0033                       | 0.0192 | 0.0638 | 0.191  | 0.3666  | 0.1143 |
| V0 per octaafband                         | 0.0124                       | 0.072  | 0.2393 | 0.7163 | 1.3748  | 0.4286 |
| correctie voor bestaande spoorconstructie | 1                            | 1      | 1      | 1      | 1       | 1      |
| bodemoverdracht: factor $\alpha$          | 0.003                        | 0.003  | 0.003  | 0.008  | 0.008   | 0.008  |
| bodemoverdracht: factor n                 | 0                            | 0      | 0      | 0      | 0       | 0      |
| correctiefactor voor bodemoverdracht      | 0.95                         | 0.95   | 0.95   | 0.88   | 0.88    | 0.88   |
| correctiefactor Hbodem                    | 0.68                         | 0.88   | 0.95   | 0.61   | 0.2     | 0.43   |
| correctiefactor Hgebouw                   | 3.17                         | 18.7   | 1.5    | 5.51   | 10.47   | 1.57   |
| correctiefactor voor gebouwoverdracht     | 2.16                         | 16.46  | 1.43   | 3.36   | 2.09    | 0.68   |
| Vmax,BTS in octaafbanden in dB            | 0.03                         | 1.13   | 0.32   | 2.12   | 2.53    | 0.25   |
|                                           | 88.10                        | 121.05 | 110.23 | 126.51 | 128.07  | 108.11 |
| som in dB                                 | 130.91                       |        |        |        |         |        |
| Vmax,BTS in referentiesituatie            | 3.51                         |        |        |        |         |        |

## 2. Berekening Vmax,BTS (plan) voor snelheidsverlaging naar 60 km/u

|                                                  |        |        |        |        |         |        |
|--------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|
| identiek aan referentiesituatie                  | 2.86   |        |        |        |         |        |
| gelijk aan referentiesituatie (ter vergelijking) | 21.1   |        |        |        |         |        |
| Snelheid in plansituatie                         | 60     |        |        |        |         |        |
| identiek aan referentiesituatie                  | 3.75   |        |        |        |         |        |
|                                                  | 2 Hz   | 4 Hz   | 8 Hz   | 16 Hz  | 31.5 Hz | 63 Hz  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.003  | 0.019  | 0.064  | 0.191  | 0.367   | 0.114  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.012  | 0.072  | 0.239  | 0.716  | 1.375   | 0.429  |
| correctie voor bestaande spoorconstructie        | 1      | 1      | 1      | 1      | 1       | 1      |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.003  | 0.003  | 0.003  | 0.008  | 0.008   | 0.008  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0      | 0      | 0      | 0      | 0       | 0      |
| correctiefactor voor bodemoverdracht             | 0.95   | 0.95   | 0.95   | 0.88   | 0.88    | 0.88   |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.68   | 0.88   | 0.95   | 0.61   | 0.2     | 0.43   |
| identiek aan referentiesituatie                  | 3.17   | 18.7   | 1.5    | 5.51   | 10.47   | 1.57   |
| identiek aan referentiesituatie                  | 2.156  | 16.46  | 1.425  | 3.361  | 2.094   | 0.675  |
| correctiefactor voor rijsnelheid treinen         | 0.95   | 0.59   | 0.82   | 0.74   | 0.85    | 0.58   |
| Vmax,BTS in octaafbanden in dB                   | 0.02   | 0.67   | 0.27   | 1.57   | 2.15    | 0.15   |
|                                                  | 87.66  | 116.53 | 108.49 | 123.93 | 126.63  | 103.42 |
| som in dB                                        | 128.82 |        |        |        |         |        |
| Vmax,BTS in referentiesituatie                   | 2.76   |        |        |        |         |        |
| Procentuele reductie                             | -21%   |        |        |        |         |        |

## 3. Berekening Vmax,BTS (plan) voor snelheidsverlaging naar 40 km/u

|                                                  |         |        |         |         |         |         |
|--------------------------------------------------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|
| identiek aan referentiesituatie                  | 2.86    |        |         |         |         |         |
| gelijk aan referentiesituatie (ter vergelijking) | 21.1    |        |         |         |         |         |
| Snelheid in plansituatie                         | 40      |        |         |         |         |         |
| identiek aan referentiesituatie                  | 3.75    |        |         |         |         |         |
|                                                  | 2 Hz    | 4 Hz   | 8 Hz    | 16 Hz   | 31.5 Hz | 63 Hz   |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.0033  | 0.0192 | 0.0638  | 0.191   | 0.3666  | 0.1143  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.01238 | 0.072  | 0.23925 | 0.71625 | 1.37475 | 0.42863 |
| correctie voor bestaande spoorconstructie        | 1       | 1      | 1       | 1       | 1       | 1       |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.003   | 0.003  | 0.003   | 0.008   | 0.008   | 0.008   |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0       | 0      | 0       | 0       | 0       | 0       |
| correctiefactor voor bodemoverdracht             | 0.95    | 0.95   | 0.95    | 0.88    | 0.88    | 0.88    |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.68    | 0.88   | 0.95    | 0.61    | 0.2     | 0.43    |
| identiek aan referentiesituatie                  | 3.17    | 18.7   | 1.5     | 5.51    | 10.47   | 1.57    |
| identiek aan referentiesituatie                  | 2.1556  | 16.456 | 1.425   | 3.3611  | 2.094   | 0.6751  |
| correctiefactor voor rijsnelheid treinen         | 0.95    | 0.60   | 0.81    | 0.78    | 0.77    | 0.59    |
| Vmax,BTS in octaafbanden in dB                   | 0.02    | 0.68   | 0.26    | 1.65    | 1.94    | 0.15    |
|                                                  | 87.68   | 116.62 | 108.45  | 124.37  | 125.76  | 103.57  |
| som in dB                                        | 128.48  |        |         |         |         |         |
| Vmax,BTS in referentiesituatie                   | 2.66    |        |         |         |         |         |
| Procentuele reductie                             | -24%    |        |         |         |         |         |

## 1. Berekening Vmax,BTS (referentie)

|                                           |                                  |        |        |        |         |        |
|-------------------------------------------|----------------------------------|--------|--------|--------|---------|--------|
| Gidsband                                  | Parallelweg 72, 's-Hertogenbosch |        |        |        |         |        |
| Vmax,BTS uit meting (maatgevend)          | 0.36                             |        |        |        |         |        |
| Afstand tot spoor [m]                     | 53.4                             |        |        |        |         |        |
| Snelheid in referentiesituatie            | 90                               |        |        |        |         |        |
| V0 model (op 5 meter van spoor)           | 0.66                             |        |        |        |         |        |
|                                           | 2 Hz                             | 4 Hz   | 8 Hz   | 16 Hz  | 31.5 Hz | 63 Hz  |
| spectrale correctiefactor                 | 0.0039                           | 0.021  | 0.0801 | 0.1181 | 0.3194  | 0.128  |
| V0 per octaafband                         | 0.0026                           | 0.0139 | 0.0529 | 0.0779 | 0.2108  | 0.0845 |
| correctie voor bestaande spoorconstructie | 1                                | 1      | 1      | 1      | 1       | 1      |
| bodemoverdracht: factor $\alpha$          | 0.003                            | 0.003  | 0.003  | 0.008  | 0.008   | 0.008  |
| bodemoverdracht: factor n                 | 0.1                              | 0.1    | 0.1    | 0.1    | 0.1     | 0.1    |
| correctiefactor voor bodemoverdracht      | 0.68                             | 0.68   | 0.68   | 0.54   | 0.54    | 0.54   |
| correctiefactor Hbodem                    | 1                                | 1      | 1      | 1      | 1       | 1      |
| correctiefactor Hgebouw                   | 0.97                             | 1.05   | 1.3    | 2.4    | 2.6     | 3.8    |
| correctiefactor voor gebouwoverdracht     | 0.97                             | 1.05   | 1.30   | 2.40   | 2.60    | 3.80   |
| Vmax,BTS in octaafbanden in dB            | 0.00                             | 0.01   | 0.05   | 0.10   | 0.29    | 0.17   |
|                                           | 64.63                            | 79.94  | 93.42  | 100.02 | 109.36  | 104.71 |
| som in dB                                 | 111.08                           |        |        |        |         |        |
| Vmax,BTS in referentiesituatie            | 0.36                             |        |        |        |         |        |

## 2. Berekening Vmax,BTS (plan) voor snelheidsverlaging naar 60 km/u

|                                                  |        |       |       |       |         |        |
|--------------------------------------------------|--------|-------|-------|-------|---------|--------|
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.36   |       |       |       |         |        |
| gelijk aan referentiesituatie (ter vergelijking) | 53.4   |       |       |       |         |        |
| Snelheid in plansituatie                         | 60     |       |       |       |         |        |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.66   |       |       |       |         |        |
|                                                  | 2 Hz   | 4 Hz  | 8 Hz  | 16 Hz | 31.5 Hz | 63 Hz  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.004  | 0.021 | 0.08  | 0.118 | 0.319   | 0.128  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.003  | 0.014 | 0.053 | 0.078 | 0.211   | 0.084  |
| correctie voor bestaande spoorconstructie        | 1      | 1     | 1     | 1     | 1       | 1      |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.003  | 0.003 | 0.003 | 0.008 | 0.008   | 0.008  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.1    | 0.1   | 0.1   | 0.1   | 0.1     | 0.1    |
| correctiefactor voor bodemoverdracht             | 0.68   | 0.68  | 0.68  | 0.54  | 0.54    | 0.54   |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1      | 1     | 1     | 1     | 1       | 1      |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.97   | 1.05  | 1.3   | 2.4   | 2.6     | 3.8    |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.97   | 1.05  | 1.3   | 2.4   | 2.6     | 3.8    |
| correctiefactor voor rijsnelheid treinen         | 0.95   | 0.59  | 0.82  | 0.74  | 0.85    | 0.58   |
| Vmax,BTS in octaafbanden in dB                   | 0.00   | 0.01  | 0.04  | 0.07  | 0.25    | 0.10   |
|                                                  | 64.18  | 75.42 | 91.68 | 97.44 | 107.92  | 100.02 |
| som in dB                                        | 108.98 |       |       |       |         |        |
| Vmax,BTS in referentiesituatie                   | 0.28   |       |       |       |         |        |
| Procentuele reductie                             | -21%   |       |       |       |         |        |

## 3. Berekening Vmax,BTS (plan) voor snelheidsverlaging naar 40 km/u

|                                                  |         |         |         |         |         |         |
|--------------------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.36    |         |         |         |         |         |
| gelijk aan referentiesituatie (ter vergelijking) | 53.4    |         |         |         |         |         |
| Snelheid in plansituatie                         | 40      |         |         |         |         |         |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.66    |         |         |         |         |         |
|                                                  | 2 Hz    | 4 Hz    | 8 Hz    | 16 Hz   | 31.5 Hz | 63 Hz   |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.0039  | 0.021   | 0.0801  | 0.1181  | 0.3194  | 0.128   |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.00257 | 0.01386 | 0.05287 | 0.07795 | 0.2108  | 0.08448 |
| correctie voor bestaande spoorconstructie        | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.003   | 0.003   | 0.003   | 0.008   | 0.008   | 0.008   |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.1     | 0.1     | 0.1     | 0.1     | 0.1     | 0.1     |
| correctiefactor voor bodemoverdracht             | 0.68    | 0.68    | 0.68    | 0.54    | 0.54    | 0.54    |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.97    | 1.05    | 1.3     | 2.4     | 2.6     | 3.8     |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.97    | 1.05    | 1.3     | 2.4     | 2.6     | 3.8     |
| correctiefactor voor rijsnelheid treinen         | 0.95    | 0.60    | 0.81    | 0.78    | 0.77    | 0.59    |
| Vmax,BTS in octaafbanden in dB                   | 0.00    | 0.01    | 0.04    | 0.08    | 0.23    | 0.10    |
|                                                  | 64.20   | 75.50   | 91.64   | 97.87   | 107.05  | 100.17  |
| som in dB                                        | 108.37  |         |         |         |         |         |
| Vmax,BTS in referentiesituatie                   | 0.26    |         |         |         |         |         |
| Procentuele reductie                             | -27%    |         |         |         |         |         |

## 1. Berekening Vmax,BTS (referentie)

|                                           |                          |        |        |        |         |        |
|-------------------------------------------|--------------------------|--------|--------|--------|---------|--------|
| Gidsband                                  | Isabellastraat 10, Vught |        |        |        |         |        |
| Vmax,BTS uit meting (maatgevend)          | 0.39                     |        |        |        |         |        |
| Afstand tot spoor [m]                     | 40.4                     |        |        |        |         |        |
| Snelheid in referentiesituatie            | 90                       |        |        |        |         |        |
| V0 model (op 5 meter van spoor)           | 2.09                     |        |        |        |         |        |
|                                           | 2 Hz                     | 4 Hz   | 8 Hz   | 16 Hz  | 31.5 Hz | 63 Hz  |
| spectrale correctiefactor                 | 0.0123                   | 0.0165 | 0.0336 | 0.4323 | 2.6315  | 1.3479 |
| V0 per octaafband                         | 0.0257                   | 0.0345 | 0.0702 | 0.9035 | 5.4998  | 2.8171 |
| correctie voor bestaande spoorconstructie | 1                        | 1      | 1      | 1      | 1       | 1      |
| bodemoverdracht: factor $\alpha$          | 0.01                     | 0.01   | 0.01   | 0.04   | 0.04    | 0.05   |
| bodemoverdracht: factor n                 | 0.1                      | 0.1    | 0.1    | 0.1    | 0.2     | 0.1    |
| correctiefactor voor bodemoverdracht      | 0.57                     | 0.57   | 0.57   | 0.20   | 0.16    | 0.14   |
| correctiefactor Hbodem                    | 0.25                     | 0.82   | 1.72   | 0.58   | 0.21    | 0.21   |
| correctiefactor Hgebouw                   | 2.97                     | 5.28   | 1.96   | 1.67   | 1.55    | 1.01   |
| correctiefactor voor gebouwoverdracht     | 0.74                     | 4.33   | 3.37   | 0.97   | 0.33    | 0.21   |
| Vmax,BTS in octaafbanden in dB            | 0.01                     | 0.09   | 0.13   | 0.17   | 0.29    | 0.08   |
|                                           | 80.73                    | 98.59  | 102.60 | 104.73 | 109.13  | 98.34  |
| som in dB                                 | 111.58                   |        |        |        |         |        |
| Vmax,BTS in referentiesituatie            | 0.38                     |        |        |        |         |        |

## 2. Berekening Vmax,BTS (plan) voor snelheidsverlaging naar 60 km/u

|                                                  |        |       |        |        |         |       |
|--------------------------------------------------|--------|-------|--------|--------|---------|-------|
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.39   |       |        |        |         |       |
| gelijk aan referentiesituatie (ter vergelijking) | 40.4   |       |        |        |         |       |
| Snelheid in plansituatie                         | 60     |       |        |        |         |       |
| identiek aan referentiesituatie                  | 2.09   |       |        |        |         |       |
|                                                  | 2 Hz   | 4 Hz  | 8 Hz   | 16 Hz  | 31.5 Hz | 63 Hz |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.012  | 0.017 | 0.034  | 0.432  | 2.632   | 1.348 |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.026  | 0.034 | 0.07   | 0.904  | 5.5     | 2.817 |
| correctie voor bestaande spoorconstructie        | 1      | 1     | 1      | 1      | 1       | 1     |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.01   | 0.01  | 0.01   | 0.04   | 0.04    | 0.05  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.1    | 0.1   | 0.1    | 0.1    | 0.2     | 0.1   |
| correctiefactor voor bodemoverdracht             | 0.57   | 0.57  | 0.57   | 0.20   | 0.16    | 0.14  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.25   | 0.82  | 1.72   | 0.58   | 0.21    | 0.21  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 2.97   | 5.28  | 1.96   | 1.67   | 1.55    | 1.01  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.743  | 4.33  | 3.371  | 0.969  | 0.326   | 0.212 |
| correctiefactor voor rijsnelheid treinen         | 0.78   | 0.88  | 0.97   | 0.75   | 0.87    | 0.91  |
| Vmax,BTS in octaafbanden in dB                   | 0.01   | 0.08  | 0.13   | 0.13   | 0.25    | 0.08  |
|                                                  | 78.61  | 97.52 | 102.35 | 102.23 | 107.90  | 97.54 |
| som in dB                                        | 110.29 |       |        |        |         |       |
| Vmax,BTS in referentiesituatie                   | 0.33   |       |        |        |         |       |
| Procentuele reductie                             | -14%   |       |        |        |         |       |

## 3. Berekening Vmax,BTS (plan) voor snelheidsverlaging naar 40 km/u

|                                                  |         |         |         |         |         |         |
|--------------------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.39    |         |         |         |         |         |
| gelijk aan referentiesituatie (ter vergelijking) | 40.4    |         |         |         |         |         |
| Snelheid in plansituatie                         | 40      |         |         |         |         |         |
| identiek aan referentiesituatie                  | 2.09    |         |         |         |         |         |
|                                                  | 2 Hz    | 4 Hz    | 8 Hz    | 16 Hz   | 31.5 Hz | 63 Hz   |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.0123  | 0.0165  | 0.0336  | 0.4323  | 2.6315  | 1.3479  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.02571 | 0.03449 | 0.07022 | 0.90351 | 5.49984 | 2.81711 |
| correctie voor bestaande spoorconstructie        | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.01    | 0.01    | 0.01    | 0.04    | 0.04    | 0.05    |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.1     | 0.1     | 0.1     | 0.1     | 0.2     | 0.1     |
| correctiefactor voor bodemoverdracht             | 0.57    | 0.57    | 0.57    | 0.20    | 0.16    | 0.14    |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.25    | 0.82    | 1.72    | 0.58    | 0.21    | 0.21    |
| identiek aan referentiesituatie                  | 2.97    | 5.28    | 1.96    | 1.67    | 1.55    | 1.01    |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.7425  | 4.3296  | 3.3712  | 0.9686  | 0.3255  | 0.2121  |
| correctiefactor voor rijsnelheid treinen         | 0.78    | 0.88    | 0.85    | 0.74    | 0.85    | 0.75    |
| Vmax,BTS in octaafbanden in dB                   | 0.01    | 0.07    | 0.12    | 0.13    | 0.24    | 0.06    |
|                                                  | 78.52   | 97.47   | 101.21  | 102.09  | 107.68  | 95.82   |
| som in dB                                        | 109.89  |         |         |         |         |         |
| Vmax,BTS in referentiesituatie                   | 0.31    |         |         |         |         |         |
| Procentuele reductie                             | -18%    |         |         |         |         |         |

### 1. Berekening Vmax,BTS (referentie)

|                                           |                           |        |        |        |         |        |
|-------------------------------------------|---------------------------|--------|--------|--------|---------|--------|
| Gidsband                                  | Willem III-laan 13, Vught |        |        |        |         |        |
| Vmax,BTS uit meting (maatgevend)          | 0.49                      |        |        |        |         |        |
| Afstand tot spoor [m]                     | 30.4                      |        |        |        |         |        |
| Snelheid in referentiesituatie            | 90                        |        |        |        |         |        |
| V0 model (op 5 meter van spoor)           | 1.41                      |        |        |        |         |        |
|                                           | 2 Hz                      | 4 Hz   | 8 Hz   | 16 Hz  | 31.5 Hz | 63 Hz  |
| spectrale correctiefactor                 | 0.0109                    | 0.0458 | 0.2211 | 0.5375 | 1.7121  | 0.933  |
| V0 per octaafband                         | 0.0154                    | 0.0646 | 0.3118 | 0.7579 | 2.4141  | 1.3155 |
| correctie voor bestaande spoorconstructie | 1                         | 1      | 1      | 1      | 1       | 1      |
| bodemoverdracht: factor $\alpha$          | 0.01                      | 0.01   | 0.01   | 0.04   | 0.04    | 0.05   |
| bodemoverdracht: factor n                 | 0.1                       | 0.1    | 0.1    | 0.1    | 0.2     | 0.1    |
| correctiefactor voor bodemoverdracht      | 0.65                      | 0.65   | 0.65   | 0.30   | 0.25    | 0.23   |
| correctiefactor Hbodem                    | 0.45                      | 0.63   | 0.85   | 0.52   | 0.14    | 0.28   |
| correctiefactor Hgebouw                   | 1.84                      | 1.62   | 1.71   | 2.63   | 1.95    | 1.47   |
| correctiefactor voor gebouwoverdracht     | 0.83                      | 1.02   | 1.45   | 1.37   | 0.27    | 0.41   |
| Vmax,BTS in octaafbanden<br>in dB         | 0.01                      | 0.04   | 0.29   | 0.31   | 0.17    | 0.13   |
|                                           | 78.32                     | 92.60  | 109.35 | 109.92 | 104.42  | 102.07 |
| som in dB                                 | 113.62                    |        |        |        |         |        |
| Vmax,BTS in referentiesituatie            | 0.48                      |        |        |        |         |        |

### 2. Berekening Vmax,BTS (plan) voor snelheidsverlaging naar 60 km/u

|                                                  |        |       |        |        |         |        |
|--------------------------------------------------|--------|-------|--------|--------|---------|--------|
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.49   |       |        |        |         |        |
| gelijk aan referentiesituatie (ter vergelijking) | 30.4   |       |        |        |         |        |
| Snelheid in plansituatie                         | 60     |       |        |        |         |        |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.41   |       |        |        |         |        |
|                                                  | 2 Hz   | 4 Hz  | 8 Hz   | 16 Hz  | 31.5 Hz | 63 Hz  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.011  | 0.046 | 0.221  | 0.538  | 1.712   | 0.933  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.015  | 0.065 | 0.312  | 0.758  | 2.414   | 1.316  |
| correctie voor bestaande spoorconstructie        | 1      | 1     | 1      | 1      | 1       | 1      |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.01   | 0.01  | 0.01   | 0.04   | 0.04    | 0.05   |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.1    | 0.1   | 0.1    | 0.1    | 0.2     | 0.1    |
| correctiefactor voor bodemoverdracht             | 0.65   | 0.65  | 0.65   | 0.30   | 0.25    | 0.23   |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.45   | 0.63  | 0.85   | 0.52   | 0.14    | 0.28   |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.84   | 1.62  | 1.71   | 2.63   | 1.95    | 1.47   |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.828  | 1.021 | 1.454  | 1.368  | 0.273   | 0.412  |
| correctiefactor voor rijsnelheid treinen         | 0.78   | 0.88  | 0.97   | 0.75   | 0.87    | 0.91   |
| Vmax,BTS in octaafbanden<br>in dB                | 0.01   | 0.04  | 0.29   | 0.23   | 0.14    | 0.12   |
|                                                  | 76.21  | 91.53 | 109.10 | 107.42 | 103.19  | 101.27 |
| som in dB                                        | 112.36 |       |        |        |         |        |
| Vmax,BTS in referentiesituatie                   | 0.42   |       |        |        |         |        |
| Procentuele reductie                             | -13%   |       |        |        |         |        |

### 3. Berekening Vmax,BTS (plan) voor snelheidsverlaging naar 40 km/u

|                                                  |         |         |         |         |         |         |
|--------------------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.49    |         |         |         |         |         |
| gelijk aan referentiesituatie (ter vergelijking) | 30.4    |         |         |         |         |         |
| Snelheid in plansituatie                         | 40      |         |         |         |         |         |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.41    |         |         |         |         |         |
|                                                  | 2 Hz    | 4 Hz    | 8 Hz    | 16 Hz   | 31.5 Hz | 63 Hz   |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.0109  | 0.0458  | 0.2211  | 0.5375  | 1.7121  | 0.933   |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.01537 | 0.06458 | 0.31175 | 0.75788 | 2.41406 | 1.31553 |
| correctie voor bestaande spoorconstructie        | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.01    | 0.01    | 0.01    | 0.04    | 0.04    | 0.05    |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.1     | 0.1     | 0.1     | 0.1     | 0.2     | 0.1     |
| correctiefactor voor bodemoverdracht             | 0.65    | 0.65    | 0.65    | 0.30    | 0.25    | 0.23    |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.45    | 0.63    | 0.85    | 0.52    | 0.14    | 0.28    |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.84    | 1.62    | 1.71    | 2.63    | 1.95    | 1.47    |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.828   | 1.0206  | 1.4535  | 1.3676  | 0.273   | 0.4116  |
| correctiefactor voor rijsnelheid treinen         | 0.78    | 0.88    | 0.85    | 0.74    | 0.85    | 0.75    |
| Vmax,BTS in octaafbanden<br>in dB                | 0.01    | 0.04    | 0.25    | 0.23    | 0.14    | 0.09    |
|                                                  | 76.12   | 91.48   | 107.97  | 107.28  | 102.97  | 99.55   |
| som in dB                                        | 111.65  |         |         |         |         |         |
| Vmax,BTS in referentiesituatie                   | 0.38    |         |         |         |         |         |
| Procentuele reductie                             | -20%    |         |         |         |         |         |



## 1. Berekening Vmax,BTS (referentie)

|                                           |                         |        |        |        |         |        |
|-------------------------------------------|-------------------------|--------|--------|--------|---------|--------|
| Gidsband                                  | Molenvenseweg 87, Vught |        |        |        |         |        |
| Vmax,BTS uit meting (maatgevend)          | 0.33                    |        |        |        |         |        |
| Afstand tot spoor [m]                     | 26.5                    |        |        |        |         |        |
| Snelheid in referentiesituatie            | 90                      |        |        |        |         |        |
| V0 model (op 5 meter van spoor)           | 1.06                    |        |        |        |         |        |
|                                           | 2 Hz                    | 4 Hz   | 8 Hz   | 16 Hz  | 31.5 Hz | 63 Hz  |
| spectrale correctiefactor                 | 0.0276                  | 0.0377 | 0.0883 | 0.2189 | 0.6267  | 2.079  |
| V0 per octaafband                         | 0.0293                  | 0.04   | 0.0936 | 0.232  | 0.6643  | 2.2037 |
| correctie voor bestaande spoorconstructie | 1                       | 1      | 1      | 1      | 1       | 1      |
| bodemoverdracht: factor $\alpha$          | 0.01                    | 0.01   | 0.01   | 0.04   | 0.04    | 0.05   |
| bodemoverdracht: factor $n$               | 0.1                     | 0.1    | 0.1    | 0.1    | 0.2     | 0.1    |
| correctiefactor voor bodemoverdracht      | 0.68                    | 0.68   | 0.68   | 0.36   | 0.30    | 0.29   |
| correctiefactor Hbodem                    | 0.65                    | 1.15   | 1.14   | 0.89   | 1.2     | 1.35   |
| correctiefactor Hgebouw                   | 1.26                    | 1.13   | 1.04   | 1.28   | 0.79    | 0.27   |
| correctiefactor voor gebouwoverdracht     | 0.82                    | 1.30   | 1.19   | 1.14   | 0.95    | 0.36   |
| Vmax,BTS in octaafbanden                  | 0.02                    | 0.04   | 0.08   | 0.09   | 0.19    | 0.23   |
| in dB                                     | 84.27                   | 90.99  | 97.59  | 99.52  | 105.62  | 107.31 |
| som in dB                                 | 110.27                  |        |        |        |         |        |
| Vmax,BTS in referentiesituatie            | 0.33                    |        |        |        |         |        |

## 2. Berekening Vmax,BTS (plan) voor snelheidsverlaging naar 60 km/u

|                                                  |        |       |       |       |         |        |
|--------------------------------------------------|--------|-------|-------|-------|---------|--------|
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.33   |       |       |       |         |        |
| gelijk aan referentiesituatie (ter vergelijking) | 26.5   |       |       |       |         |        |
| Snelheid in plansituatie                         | 60     |       |       |       |         |        |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.06   |       |       |       |         |        |
|                                                  | 2 Hz   | 4 Hz  | 8 Hz  | 16 Hz | 31.5 Hz | 63 Hz  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.028  | 0.038 | 0.088 | 0.219 | 0.627   | 2.079  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.029  | 0.04  | 0.094 | 0.232 | 0.664   | 2.204  |
| correctie voor bestaande spoorconstructie        | 1      | 1     | 1     | 1     | 1       | 1      |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.01   | 0.01  | 0.01  | 0.04  | 0.04    | 0.05   |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.1    | 0.1   | 0.1   | 0.1   | 0.2     | 0.1    |
| correctiefactor voor bodemoverdracht             | 0.68   | 0.68  | 0.68  | 0.36  | 0.30    | 0.29   |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.65   | 1.15  | 1.14  | 0.89  | 1.2     | 1.35   |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.26   | 1.13  | 1.04  | 1.28  | 0.79    | 0.27   |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.819  | 1.3   | 1.186 | 1.139 | 0.948   | 0.365  |
| correctiefactor voor rijsnelheid treinen         | 0.78   | 0.88  | 0.97  | 0.75  | 0.87    | 0.91   |
| Vmax,BTS in octaafbanden                         | 0.01   | 0.03  | 0.07  | 0.07  | 0.17    | 0.21   |
| in dB                                            | 82.16  | 89.92 | 97.34 | 97.03 | 104.39  | 106.51 |
| som in dB                                        | 109.24 |       |       |       |         |        |
| Vmax,BTS in referentiesituatie                   | 0.29   |       |       |       |         |        |
| Procentuele reductie                             | -11%   |       |       |       |         |        |

## 3. Berekening Vmax,BTS (plan) voor snelheidsverlaging naar 40 km/u

|                                                  |         |         |        |         |         |         |
|--------------------------------------------------|---------|---------|--------|---------|---------|---------|
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.33    |         |        |         |         |         |
| gelijk aan referentiesituatie (ter vergelijking) | 26.5    |         |        |         |         |         |
| Snelheid in plansituatie                         | 40      |         |        |         |         |         |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.06    |         |        |         |         |         |
|                                                  | 2 Hz    | 4 Hz    | 8 Hz   | 16 Hz   | 31.5 Hz | 63 Hz   |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.0276  | 0.0377  | 0.0883 | 0.2189  | 0.6267  | 2.079   |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.02926 | 0.03996 | 0.0936 | 0.23203 | 0.6643  | 2.20374 |
| correctie voor bestaande spoorconstructie        | 1       | 1       | 1      | 1       | 1       | 1       |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.01    | 0.01    | 0.01   | 0.04    | 0.04    | 0.05    |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.1     | 0.1     | 0.1    | 0.1     | 0.2     | 0.1     |
| correctiefactor voor bodemoverdracht             | 0.68    | 0.68    | 0.68   | 0.36    | 0.30    | 0.29    |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.65    | 1.15    | 1.14   | 0.89    | 1.2     | 1.35    |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.26    | 1.13    | 1.04   | 1.28    | 0.79    | 0.27    |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.819   | 1.2995  | 1.1856 | 1.1392  | 0.948   | 0.3645  |
| correctiefactor voor rijsnelheid treinen         | 0.78    | 0.88    | 0.85   | 0.74    | 0.85    | 0.75    |
| Vmax,BTS in octaafbanden                         | 0.01    | 0.03    | 0.06   | 0.07    | 0.16    | 0.17    |
| in dB                                            | 82.07   | 89.87   | 96.21  | 96.89   | 104.16  | 104.79  |
| som in dB                                        | 108.22  |         |        |         |         |         |
| Vmax,BTS in referentiesituatie                   | 0.26    |         |        |         |         |         |
| Procentuele reductie                             | -21%    |         |        |         |         |         |

### 1. Berekening Vmax,BTS (referentie)

|                                           |                           |        |        |        |         |        |
|-------------------------------------------|---------------------------|--------|--------|--------|---------|--------|
| Gidspand                                  | Johan Frisolaan 33, Vught |        |        |        |         |        |
| Vmax,BTS uit meting (maatgevend)          | 0.2                       |        |        |        |         |        |
| Afstand tot spoor [m]                     | 23.8                      |        |        |        |         |        |
| Snelheid in referentiesituatie            | 90                        |        |        |        |         |        |
| V0 model (op 5 meter van spoor)           | 0.37                      |        |        |        |         |        |
|                                           | 2 Hz                      | 4 Hz   | 8 Hz   | 16 Hz  | 31.5 Hz | 63 Hz  |
| spectrale correctiefactor                 | 0.0263                    | 0.1072 | 0.6191 | 1.0044 | 1.0672  | 0.2796 |
| V0 per octaafband                         | 0.0097                    | 0.0397 | 0.2291 | 0.3716 | 0.3949  | 0.1035 |
| correctie voor bestaande spoorconstructie | 1                         | 1      | 1      | 1      | 1       | 1      |
| bodemoverdracht: factor $\alpha$          | 0.01                      | 0.01   | 0.01   | 0.04   | 0.04    | 0.05   |
| bodemoverdracht: factor $n$               | 0.1                       | 0.1    | 0.1    | 0.1    | 0.2     | 0.1    |
| correctiefactor voor bodemoverdracht      | 0.71                      | 0.71   | 0.71   | 0.40   | 0.35    | 0.33   |
| correctiefactor Hbodem                    | 0.5                       | 0.84   | 1.28   | 0.72   | 0.41    | 1.12   |
| correctiefactor Hgebouw                   | 2.77                      | 1.42   | 0.8    | 0.67   | 1.32    | 0.4    |
| correctiefactor voor gebouwoverdracht     | 1.39                      | 1.19   | 1.02   | 0.48   | 0.54    | 0.45   |
| Vmax,BTS in octaafbanden                  | 0.01                      | 0.03   | 0.17   | 0.07   | 0.07    | 0.02   |
| in dB                                     | 79.60                     | 90.51  | 104.42 | 97.18  | 97.35   | 83.80  |
| som in dB                                 | 106.00                    |        |        |        |         |        |
| Vmax,BTS in referentiesituatie            | 0.20                      |        |        |        |         |        |

### 2. Berekening Vmax,BTS (plan) voor snelheidsverlaging naar 60 km/u

|                                                  |        |       |        |       |         |       |
|--------------------------------------------------|--------|-------|--------|-------|---------|-------|
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.2    |       |        |       |         |       |
| gelijk aan referentiesituatie (ter vergelijking) | 23.8   |       |        |       |         |       |
| Snelheid in plansituatie                         | 60     |       |        |       |         |       |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.37   |       |        |       |         |       |
|                                                  | 2 Hz   | 4 Hz  | 8 Hz   | 16 Hz | 31.5 Hz | 63 Hz |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.026  | 0.107 | 0.619  | 1.004 | 1.067   | 0.28  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.01   | 0.04  | 0.229  | 0.372 | 0.395   | 0.103 |
| correctie voor bestaande spoorconstructie        | 1      | 1     | 1      | 1     | 1       | 1     |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.01   | 0.01  | 0.01   | 0.04  | 0.04    | 0.05  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.1    | 0.1   | 0.1    | 0.1   | 0.2     | 0.1   |
| correctiefactor voor bodemoverdracht             | 0.71   | 0.71  | 0.71   | 0.40  | 0.35    | 0.33  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.5    | 0.84  | 1.28   | 0.72  | 0.41    | 1.12  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 2.77   | 1.42  | 0.8    | 0.67  | 1.32    | 0.4   |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.385  | 1.193 | 1.024  | 0.482 | 0.541   | 0.448 |
| correctiefactor voor rijsnelheid treinen         | 0.78   | 0.88  | 0.97   | 0.75  | 0.87    | 0.91  |
| Vmax,BTS in octaafbanden                         | 0.01   | 0.03  | 0.16   | 0.05  | 0.06    | 0.01  |
| in dB                                            | 77.49  | 89.44 | 104.17 | 94.68 | 96.12   | 83.00 |
| som in dB                                        | 105.35 |       |        |       |         |       |
| Vmax,BTS in referentiesituatie                   | 0.19   |       |        |       |         |       |
| Procentuele reductie                             | -7%    |       |        |       |         |       |

### 3. Berekening Vmax,BTS (plan) voor snelheidsverlaging naar 40 km/u

|                                                  |         |         |         |         |         |         |
|--------------------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.2     |         |         |         |         |         |
| gelijk aan referentiesituatie (ter vergelijking) | 23.8    |         |         |         |         |         |
| Snelheid in plansituatie                         | 40      |         |         |         |         |         |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.37    |         |         |         |         |         |
|                                                  | 2 Hz    | 4 Hz    | 8 Hz    | 16 Hz   | 31.5 Hz | 63 Hz   |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.0263  | 0.1072  | 0.6191  | 1.0044  | 1.0672  | 0.2796  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.00973 | 0.03966 | 0.22907 | 0.37163 | 0.39486 | 0.10345 |
| correctie voor bestaande spoorconstructie        | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.01    | 0.01    | 0.01    | 0.04    | 0.04    | 0.05    |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.1     | 0.1     | 0.1     | 0.1     | 0.2     | 0.1     |
| correctiefactor voor bodemoverdracht             | 0.71    | 0.71    | 0.71    | 0.40    | 0.35    | 0.33    |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.5     | 0.84    | 1.28    | 0.72    | 0.41    | 1.12    |
| identiek aan referentiesituatie                  | 2.77    | 1.42    | 0.8     | 0.67    | 1.32    | 0.4     |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.385   | 1.1928  | 1.024   | 0.4824  | 0.5412  | 0.448   |
| correctiefactor voor rijsnelheid treinen         | 0.78    | 0.88    | 0.85    | 0.74    | 0.85    | 0.75    |
| Vmax,BTS in octaafbanden                         | 0.01    | 0.03    | 0.14    | 0.05    | 0.06    | 0.01    |
| in dB                                            | 77.40   | 89.39   | 103.04  | 94.54   | 95.90   | 81.28   |
| som in dB                                        | 104.46  |         |         |         |         |         |
| Vmax,BTS in referentiesituatie                   | 0.17    |         |         |         |         |         |
| Procentuele reductie                             | -16%    |         |         |         |         |         |

### 1. Berekening Vmax,BTS (referentie)

|                                           |                              |        |        |        |         |        |
|-------------------------------------------|------------------------------|--------|--------|--------|---------|--------|
| Gidsband                                  | Pieter Bruegellaan 29, Vught |        |        |        |         |        |
| Vmax,BTS uit meting (maatgevend)          | 0.33                         |        |        |        |         |        |
| Afstand tot spoor [m]                     | 35,2                         |        |        |        |         |        |
| Snelheid in referentiesituatie            | 90                           |        |        |        |         |        |
| V0 model (op 5 meter van spoor)           | 1.35                         |        |        |        |         |        |
|                                           | 2 Hz                         | 4 Hz   | 8 Hz   | 16 Hz  | 31.5 Hz | 63 Hz  |
| spectrale correctiefactor                 | 0.007                        | 0.0357 | 0.1765 | 0.2416 | 0.8592  | 0.3093 |
| V0 per octaafband                         | 0.0095                       | 0.0482 | 0.2383 | 0.3262 | 1.1599  | 0.4176 |
| correctie voor bestaande spoorconstructie | 1                            | 1      | 1      | 1      | 1       | 1      |
| bodemoverdracht: factor $\alpha$          | 0.01                         | 0.01   | 0.01   | 0.04   | 0.04    | 0.05   |
| bodemoverdracht: factor n                 | 0.1                          | 0.1    | 0.1    | 0.1    | 0.2     | 0.1    |
| correctiefactor voor bodemoverdracht      | 0.61                         | 0.61   | 0.61   | 0.25   | 0.20    | 0.18   |
| correctiefactor Hbodem                    | 0.46                         | 0.92   | 1.19   | 1.2    | 0.19    | 0.16   |
| correctiefactor Hgebouw                   | 2.39                         | 1.18   | 1.06   | 1.23   | 5.51    | 2.79   |
| correctiefactor voor gebouwoverdracht     | 1.10                         | 1.09   | 1.26   | 1.48   | 1.05    | 0.45   |
| Vmax,BTS in octaafbanden<br>in dB         | 0.01                         | 0.03   | 0.18   | 0.12   | 0.25    | 0.03   |
|                                           | 76.01                        | 90.06  | 105.24 | 101.46 | 107.80  | 90.60  |
| som in dB                                 | 110.41                       |        |        |        |         |        |
| Vmax,BTS in referentiesituatie            | 0.33                         |        |        |        |         |        |

### 2. Berekening Vmax,BTS (plan) voor snelheidsverlaging naar 60 km/u

|                                                  |        |       |        |       |         |       |
|--------------------------------------------------|--------|-------|--------|-------|---------|-------|
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.33   |       |        |       |         |       |
| gelijk aan referentiesituatie (ter vergelijking) | 35.2   |       |        |       |         |       |
| Snelheid in plansituatie                         | 60     |       |        |       |         |       |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.35   |       |        |       |         |       |
|                                                  | 2 Hz   | 4 Hz  | 8 Hz   | 16 Hz | 31.5 Hz | 63 Hz |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.007  | 0.036 | 0.177  | 0.242 | 0.859   | 0.309 |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.009  | 0.048 | 0.238  | 0.326 | 1.16    | 0.418 |
| correctie voor bestaande spoorconstructie        | 1      | 1     | 1      | 1     | 1       | 1     |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.01   | 0.01  | 0.01   | 0.04  | 0.04    | 0.05  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.1    | 0.1   | 0.1    | 0.1   | 0.2     | 0.1   |
| correctiefactor voor bodemoverdracht             | 0.61   | 0.61  | 0.61   | 0.25  | 0.20    | 0.18  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.46   | 0.92  | 1.19   | 1.2   | 0.19    | 0.16  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 2.39   | 1.18  | 1.06   | 1.23  | 5.51    | 2.79  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.099  | 1.086 | 1.261  | 1.476 | 1.047   | 0.446 |
| correctiefactor voor rijsnelheid treinen         | 0.78   | 0.88  | 0.97   | 0.75  | 0.87    | 0.91  |
| Vmax,BTS in octaafbanden<br>in dB                | 0.00   | 0.03  | 0.18   | 0.09  | 0.21    | 0.03  |
|                                                  | 73.90  | 88.98 | 104.99 | 98.96 | 106.57  | 89.80 |
| som in dB                                        | 109.38 |       |        |       |         |       |
| Vmax,BTS in referentiesituatie                   | 0.29   |       |        |       |         |       |
| Procentuele reductie                             | -11%   |       |        |       |         |       |

### 3. Berekening Vmax,BTS (plan) voor snelheidsverlaging naar 40 km/u

|                                                  |         |        |         |         |         |         |
|--------------------------------------------------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.33    |        |         |         |         |         |
| gelijk aan referentiesituatie (ter vergelijking) | 35.2    |        |         |         |         |         |
| Snelheid in plansituatie                         | 40      |        |         |         |         |         |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.35    |        |         |         |         |         |
|                                                  | 2 Hz    | 4 Hz   | 8 Hz    | 16 Hz   | 31.5 Hz | 63 Hz   |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.007   | 0.0357 | 0.1765  | 0.2416  | 0.8592  | 0.3093  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.00945 | 0.0482 | 0.23828 | 0.32616 | 1.15992 | 0.41756 |
| correctie voor bestaande spoorconstructie        | 1       | 1      | 1       | 1       | 1       | 1       |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.01    | 0.01   | 0.01    | 0.04    | 0.04    | 0.05    |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.1     | 0.1    | 0.1     | 0.1     | 0.2     | 0.1     |
| correctiefactor voor bodemoverdracht             | 0.61    | 0.61   | 0.61    | 0.25    | 0.20    | 0.18    |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.46    | 0.92   | 1.19    | 1.2     | 0.19    | 0.16    |
| identiek aan referentiesituatie                  | 2.39    | 1.18   | 1.06    | 1.23    | 5.51    | 2.79    |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.0994  | 1.0856 | 1.2614  | 1.476   | 1.0469  | 0.4464  |
| correctiefactor voor rijsnelheid treinen         | 0.78    | 0.88   | 0.85    | 0.74    | 0.85    | 0.75    |
| Vmax,BTS in octaafbanden<br>in dB                | 0.00    | 0.03   | 0.16    | 0.09    | 0.21    | 0.03    |
|                                                  | 73.81   | 88.93  | 103.86  | 98.82   | 106.35  | 88.08   |
| som in dB                                        | 108.84  |        |         |         |         |         |
| Vmax,BTS in referentiesituatie                   | 0.28    |        |         |         |         |         |
| Procentuele reductie                             | -17%    |        |         |         |         |         |

## 1. Berekening Vmax,BTS (referentie)

|                                           |                        |        |        |        |         |        |
|-------------------------------------------|------------------------|--------|--------|--------|---------|--------|
| Gidsband                                  | Margrietlaan 59, Vught |        |        |        |         |        |
| Vmax,BTS uit meting (maatgevend)          | 0.36                   |        |        |        |         |        |
| Afstand tot spoor [m]                     | 17.1                   |        |        |        |         |        |
| Snelheid in referentiesituatie            | 90                     |        |        |        |         |        |
| V0 model (op 5 meter van spoor)           | 0.69                   |        |        |        |         |        |
|                                           | 2 Hz                   | 4 Hz   | 8 Hz   | 16 Hz  | 31.5 Hz | 63 Hz  |
| spectrale correctiefactor                 | 0.0209                 | 0.0842 | 0.3208 | 1.8059 | 2.1545  | 0.57   |
| V0 per octaafband                         | 0.0144                 | 0.0581 | 0.2214 | 1.2461 | 1.4866  | 0.3933 |
| correctie voor bestaande spoorconstructie | 1                      | 1      | 1      | 1      | 1       | 1      |
| bodemoverdracht: factor $\alpha$          | 0.01                   | 0.01   | 0.01   | 0.04   | 0.04    | 0.05   |
| bodemoverdracht: factor n                 | 0.1                    | 0.1    | 0.1    | 0.1    | 0.2     | 0.1    |
| correctiefactor voor bodemoverdracht      | 0.78                   | 0.78   | 0.78   | 0.55   | 0.48    | 0.48   |
| correctiefactor Hbodem                    | 0.56                   | 1      | 0.83   | 0.32   | 0.56    | 0.43   |
| correctiefactor Hgebouw                   | 1.54                   | 1.16   | 0.92   | 0.72   | 0.69    | 1.24   |
| correctiefactor voor gebouwoverdracht     | 0.86                   | 1.16   | 0.76   | 0.23   | 0.39    | 0.53   |
| Vmax,BTS in octaafbanden in dB            | 0.01                   | 0.05   | 0.13   | 0.16   | 0.28    | 0.10   |
|                                           | 79.78                  | 94.45  | 102.44 | 103.89 | 108.84  | 100.11 |
| som in dB                                 | 111.20                 |        |        |        |         |        |
| Vmax,BTS in referentiesituatie            | 0.36                   |        |        |        |         |        |

## 2. Berekening Vmax,BTS (plan) voor snelheidsverlaging naar 60 km/u

|                                                  |        |       |        |        |         |       |
|--------------------------------------------------|--------|-------|--------|--------|---------|-------|
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.36   |       |        |        |         |       |
| gelijk aan referentiesituatie (ter vergelijking) | 17.1   |       |        |        |         |       |
| Snelheid in plansituatie                         | 60     |       |        |        |         |       |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.69   |       |        |        |         |       |
|                                                  | 2 Hz   | 4 Hz  | 8 Hz   | 16 Hz  | 31.5 Hz | 63 Hz |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.021  | 0.084 | 0.321  | 1.806  | 2.155   | 0.57  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.014  | 0.058 | 0.221  | 1.246  | 1.487   | 0.393 |
| correctie voor bestaande spoorconstructie        | 1      | 1     | 1      | 1      | 1       | 1     |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.01   | 0.01  | 0.01   | 0.04   | 0.04    | 0.05  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.1    | 0.1   | 0.1    | 0.1    | 0.2     | 0.1   |
| correctiefactor voor bodemoverdracht             | 0.78   | 0.78  | 0.78   | 0.55   | 0.48    | 0.48  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.56   | 1     | 0.83   | 0.32   | 0.56    | 0.43  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.54   | 1.16  | 0.92   | 0.72   | 0.69    | 1.24  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.862  | 1.16  | 0.764  | 0.23   | 0.386   | 0.533 |
| correctiefactor voor rijsnelheid treinen         | 0.78   | 0.88  | 0.97   | 0.75   | 0.87    | 0.91  |
| Vmax,BTS in octaafbanden in dB                   | 0.01   | 0.05  | 0.13   | 0.12   | 0.24    | 0.09  |
|                                                  | 77.66  | 93.38 | 102.19 | 101.39 | 107.61  | 99.31 |
| som in dB                                        | 109.95 |       |        |        |         |       |
| Vmax,BTS in referentiesituatie                   | 0.31   |       |        |        |         |       |
| Procentuele reductie                             | -13%   |       |        |        |         |       |

## 3. Berekening Vmax,BTS (plan) voor snelheidsverlaging naar 40 km/u

|                                                  |         |        |         |         |         |        |
|--------------------------------------------------|---------|--------|---------|---------|---------|--------|
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.36    |        |         |         |         |        |
| gelijk aan referentiesituatie (ter vergelijking) | 17.1    |        |         |         |         |        |
| Snelheid in plansituatie                         | 40      |        |         |         |         |        |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.69    |        |         |         |         |        |
|                                                  | 2 Hz    | 4 Hz   | 8 Hz    | 16 Hz   | 31.5 Hz | 63 Hz  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.0209  | 0.0842 | 0.3208  | 1.8059  | 2.1545  | 0.57   |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.01442 | 0.0581 | 0.22135 | 1.24607 | 1.48661 | 0.3933 |
| correctie voor bestaande spoorconstructie        | 1       | 1      | 1       | 1       | 1       | 1      |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.01    | 0.01   | 0.01    | 0.04    | 0.04    | 0.05   |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.1     | 0.1    | 0.1     | 0.1     | 0.2     | 0.1    |
| correctiefactor voor bodemoverdracht             | 0.78    | 0.78   | 0.78    | 0.55    | 0.48    | 0.48   |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.56    | 1      | 0.83    | 0.32    | 0.56    | 0.43   |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.54    | 1.16   | 0.92    | 0.72    | 0.69    | 1.24   |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.8624  | 1.16   | 0.7636  | 0.2304  | 0.3864  | 0.5332 |
| correctiefactor voor rijsnelheid treinen         | 0.78    | 0.88   | 0.85    | 0.74    | 0.85    | 0.75   |
| Vmax,BTS in octaafbanden in dB                   | 0.01    | 0.05   | 0.11    | 0.12    | 0.23    | 0.08   |
|                                                  | 77.57   | 93.33  | 101.06  | 101.25  | 107.39  | 97.59  |
| som in dB                                        | 109.49  |        |         |         |         |        |
| Vmax,BTS in referentiesituatie                   | 0.30    |        |         |         |         |        |
| Procentuele reductie                             | -18%    |        |         |         |         |        |

## 1. Berekening Vmax,BTS (referentie)

|                                           |                         |        |        |        |         |        |
|-------------------------------------------|-------------------------|--------|--------|--------|---------|--------|
| Gidsband                                  | Rembrandtlaan 47, Vught |        |        |        |         |        |
| Vmax,BTS uit meting (maatgevend)          | 0.69                    |        |        |        |         |        |
| Afstand tot spoor [m]                     | 21.5                    |        |        |        |         |        |
| Snelheid in referentiesituatie            | 90                      |        |        |        |         |        |
| V0 model (op 5 meter van spoor)           | 1.7                     |        |        |        |         |        |
|                                           | 2 Hz                    | 4 Hz   | 8 Hz   | 16 Hz  | 31.5 Hz | 63 Hz  |
| spectrale correctiefactor                 | 0.0108                  | 0.0573 | 0.0991 | 0.2803 | 0.7275  | 0.3383 |
| V0 per octaafband                         | 0.0184                  | 0.0974 | 0.1685 | 0.4765 | 1.2368  | 0.5751 |
| correctie voor bestaande spoorconstructie | 1                       | 1      | 1      | 1      | 1       | 1      |
| bodemoverdracht: factor $\alpha$          | 0.01                    | 0.01   | 0.01   | 0.04   | 0.04    | 0.05   |
| bodemoverdracht: factor n                 | 0.1                     | 0.1    | 0.1    | 0.1    | 0.2     | 0.1    |
| correctiefactor voor bodemoverdracht      | 0.73                    | 0.73   | 0.73   | 0.45   | 0.39    | 0.38   |
| correctiefactor Hbodem                    | 0.48                    | 0.84   | 1.23   | 0.52   | 0.24    | 0.45   |
| correctiefactor Hgebouw                   | 2.76                    | 1.2    | 0.75   | 1.55   | 5.04    | 2.73   |
| correctiefactor voor gebouwoverdracht     | 1.32                    | 1.01   | 0.92   | 0.81   | 1.21    | 1.23   |
| Vmax,BTS in octaafbanden in dB            | 0.02                    | 0.07   | 0.11   | 0.17   | 0.58    | 0.27   |
|                                           | 85.02                   | 97.14  | 101.13 | 104.69 | 115.23  | 108.55 |
| som in dB                                 | 116.56                  |        |        |        |         |        |
| Vmax,BTS in referentiesituatie            | 0.67                    |        |        |        |         |        |

## 2. Berekening Vmax,BTS (plan) voor snelheidsverlaging naar 60 km/u

|                                                  |        |       |        |        |         |        |
|--------------------------------------------------|--------|-------|--------|--------|---------|--------|
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.69   |       |        |        |         |        |
| gelijk aan referentiesituatie (ter vergelijking) | 21.5   |       |        |        |         |        |
| Snelheid in plansituatie                         | 60     |       |        |        |         |        |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.7    |       |        |        |         |        |
|                                                  | 2 Hz   | 4 Hz  | 8 Hz   | 16 Hz  | 31.5 Hz | 63 Hz  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.011  | 0.057 | 0.099  | 0.28   | 0.728   | 0.338  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.018  | 0.097 | 0.168  | 0.477  | 1.237   | 0.575  |
| correctie voor bestaande spoorconstructie        | 1      | 1     | 1      | 1      | 1       | 1      |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.01   | 0.01  | 0.01   | 0.04   | 0.04    | 0.05   |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.1    | 0.1   | 0.1    | 0.1    | 0.2     | 0.1    |
| correctiefactor voor bodemoverdracht             | 0.73   | 0.73  | 0.73   | 0.45   | 0.39    | 0.38   |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.48   | 0.84  | 1.23   | 0.52   | 0.24    | 0.45   |
| identiek aan referentiesituatie                  | 2.76   | 1.2   | 0.75   | 1.55   | 5.04    | 2.73   |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.325  | 1.008 | 0.923  | 0.806  | 1.21    | 1.229  |
| correctiefactor voor rijsnelheid treinen         | 0.78   | 0.88  | 0.97   | 0.75   | 0.87    | 0.91   |
| Vmax,BTS in octaafbanden in dB                   | 0.01   | 0.06  | 0.11   | 0.13   | 0.50    | 0.24   |
|                                                  | 82.91  | 96.07 | 100.88 | 102.19 | 114.00  | 107.75 |
| som in dB                                        | 115.36 |       |        |        |         |        |
| Vmax,BTS in referentiesituatie                   | 0.59   |       |        |        |         |        |
| Procentuele reductie                             | -13%   |       |        |        |         |        |

## 3. Berekening Vmax,BTS (plan) voor snelheidsverlaging naar 40 km/u

|                                                  |         |         |         |         |         |         |
|--------------------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.69    |         |         |         |         |         |
| gelijk aan referentiesituatie (ter vergelijking) | 21.5    |         |         |         |         |         |
| Snelheid in plansituatie                         | 40      |         |         |         |         |         |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.7     |         |         |         |         |         |
|                                                  | 2 Hz    | 4 Hz    | 8 Hz    | 16 Hz   | 31.5 Hz | 63 Hz   |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.0108  | 0.0573  | 0.0991  | 0.2803  | 0.7275  | 0.3383  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.01836 | 0.09741 | 0.16847 | 0.47651 | 1.23675 | 0.57511 |
| correctie voor bestaande spoorconstructie        | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.01    | 0.01    | 0.01    | 0.04    | 0.04    | 0.05    |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.1     | 0.1     | 0.1     | 0.1     | 0.2     | 0.1     |
| correctiefactor voor bodemoverdracht             | 0.73    | 0.73    | 0.73    | 0.45    | 0.39    | 0.38    |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.48    | 0.84    | 1.23    | 0.52    | 0.24    | 0.45    |
| identiek aan referentiesituatie                  | 2.76    | 1.2     | 0.75    | 1.55    | 5.04    | 2.73    |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.3248  | 1.008   | 0.9225  | 0.806   | 1.2096  | 1.2285  |
| correctiefactor voor rijsnelheid treinen         | 0.78    | 0.88    | 0.85    | 0.74    | 0.85    | 0.75    |
| Vmax,BTS in octaafbanden in dB                   | 0.01    | 0.06    | 0.10    | 0.13    | 0.49    | 0.20    |
|                                                  | 82.82   | 96.02   | 99.75   | 102.05  | 113.78  | 106.03  |
| som in dB                                        | 114.89  |         |         |         |         |         |
| Vmax,BTS in referentiesituatie                   | 0.56    |         |         |         |         |         |
| Procentuele reductie                             | -17%    |         |         |         |         |         |

## 1. Berekening Vmax,BTS (referentie)

|                                           |                           |        |        |        |         |        |
|-------------------------------------------|---------------------------|--------|--------|--------|---------|--------|
| Gidsband                                  | Van Miertstraat 10, Vught |        |        |        |         |        |
| Vmax,BTS uit meting (maatgevend)          | 1.09                      |        |        |        |         |        |
| Afstand tot spoor [m]                     | 27.6                      |        |        |        |         |        |
| Snelheid in referentiesituatie            | 90                        |        |        |        |         |        |
| V0 model (op 5 meter van spoor)           | 3.36                      |        |        |        |         |        |
|                                           | 2 Hz                      | 4 Hz   | 8 Hz   | 16 Hz  | 31.5 Hz | 63 Hz  |
| spectrale correctiefactor                 | 0.0041                    | 0.0214 | 0.0841 | 0.1134 | 0.6727  | 0.1365 |
| V0 per octaafband                         | 0.0138                    | 0.0719 | 0.2826 | 0.381  | 2.2603  | 0.4586 |
| correctie voor bestaande spoorconstructie | 1                         | 1      | 1      | 1      | 1       | 1      |
| bodemoverdracht: factor $\alpha$          | 0.01                      | 0.01   | 0.01   | 0.04   | 0.04    | 0.05   |
| bodemoverdracht: factor n                 | 0.1                       | 0.1    | 0.1    | 0.1    | 0.2     | 0.1    |
| correctiefactor voor bodemoverdracht      | 0.67                      | 0.67   | 0.67   | 0.34   | 0.29    | 0.27   |
| correctiefactor Hbodem                    | 0.63                      | 1.04   | 1.22   | 0.97   | 0.17    | 0.17   |
| correctiefactor Hgebouw                   | 1.77                      | 1.27   | 1.54   | 4.58   | 7.39    | 3.54   |
| correctiefactor voor gebouwoverdracht     | 1.12                      | 1.32   | 1.88   | 4.44   | 1.26    | 0.60   |
| Vmax,BTS in octaafbanden<br>in dB         | 0.01                      | 0.06   | 0.36   | 0.58   | 0.82    | 0.08   |
|                                           | 80.28                     | 96.10  | 111.05 | 115.24 | 118.25  | 97.52  |
| som in dB                                 | 120.56                    |        |        |        |         |        |
| Vmax,BTS in referentiesituatie            | 1.07                      |        |        |        |         |        |

## 2. Berekening Vmax,BTS (plan) voor snelheidsverlaging naar 60 km/u

|                                                  |        |       |        |        |         |       |
|--------------------------------------------------|--------|-------|--------|--------|---------|-------|
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.09   |       |        |        |         |       |
| gelijk aan referentiesituatie (ter vergelijking) | 27.6   |       |        |        |         |       |
| Snelheid in plansituatie                         | 60     |       |        |        |         |       |
| identiek aan referentiesituatie                  | 3.36   |       |        |        |         |       |
|                                                  | 2 Hz   | 4 Hz  | 8 Hz   | 16 Hz  | 31.5 Hz | 63 Hz |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.004  | 0.021 | 0.084  | 0.113  | 0.673   | 0.137 |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.014  | 0.072 | 0.283  | 0.381  | 2.26    | 0.459 |
| correctie voor bestaande spoorconstructie        | 1      | 1     | 1      | 1      | 1       | 1     |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.01   | 0.01  | 0.01   | 0.04   | 0.04    | 0.05  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.1    | 0.1   | 0.1    | 0.1    | 0.2     | 0.1   |
| correctiefactor voor bodemoverdracht             | 0.67   | 0.67  | 0.67   | 0.34   | 0.29    | 0.27  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.63   | 1.04  | 1.22   | 0.97   | 0.17    | 0.17  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.77   | 1.27  | 1.54   | 4.58   | 7.39    | 3.54  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.115  | 1.321 | 1.879  | 4.443  | 1.256   | 0.602 |
| correctiefactor voor rijsnelheid treinen         | 0.78   | 0.88  | 0.97   | 0.75   | 0.87    | 0.91  |
| Vmax,BTS in octaafbanden<br>in dB                | 0.01   | 0.06  | 0.35   | 0.43   | 0.71    | 0.07  |
|                                                  | 78.17  | 95.03 | 110.81 | 112.74 | 117.02  | 96.72 |
| som in dB                                        | 119.13 |       |        |        |         |       |
| Vmax,BTS in referentiesituatie                   | 0.91   |       |        |        |         |       |
| Procentuele reductie                             | -15%   |       |        |        |         |       |

## 3. Berekening Vmax,BTS (plan) voor snelheidsverlaging naar 40 km/u

|                                                  |         |        |         |         |         |         |
|--------------------------------------------------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.09    |        |         |         |         |         |
| gelijk aan referentiesituatie (ter vergelijking) | 27.6    |        |         |         |         |         |
| Snelheid in plansituatie                         | 40      |        |         |         |         |         |
| identiek aan referentiesituatie                  | 3.36    |        |         |         |         |         |
|                                                  | 2 Hz    | 4 Hz   | 8 Hz    | 16 Hz   | 31.5 Hz | 63 Hz   |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.0041  | 0.0214 | 0.0841  | 0.1134  | 0.6727  | 0.1365  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.01378 | 0.0719 | 0.28258 | 0.38102 | 2.26027 | 0.45864 |
| correctie voor bestaande spoorconstructie        | 1       | 1      | 1       | 1       | 1       | 1       |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.01    | 0.01   | 0.01    | 0.04    | 0.04    | 0.05    |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.1     | 0.1    | 0.1     | 0.1     | 0.2     | 0.1     |
| correctiefactor voor bodemoverdracht             | 0.67    | 0.67   | 0.67    | 0.34    | 0.29    | 0.27    |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.63    | 1.04   | 1.22    | 0.97    | 0.17    | 0.17    |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.77    | 1.27   | 1.54    | 4.58    | 7.39    | 3.54    |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.1151  | 1.3208 | 1.8788  | 4.4426  | 1.2563  | 0.6018  |
| correctiefactor voor rijsnelheid treinen         | 0.78    | 0.88   | 0.85    | 0.74    | 0.85    | 0.75    |
| Vmax,BTS in octaafbanden<br>in dB                | 0.01    | 0.06   | 0.30    | 0.43    | 0.69    | 0.06    |
|                                                  | 78.08   | 94.98  | 109.67  | 112.60  | 116.79  | 95.00   |
| som in dB                                        | 118.80  |        |         |         |         |         |
| Vmax,BTS in referentiesituatie                   | 0.87    |        |         |         |         |         |
| Procentuele reductie                             | -18%    |        |         |         |         |         |

### 1. Berekening Vmax,BTS (referentie)

|                                           |                   |        |        |        |         |        |
|-------------------------------------------|-------------------|--------|--------|--------|---------|--------|
| Gidspand                                  | Sporlaan 3, Vught |        |        |        |         |        |
| Vmax,BTS uit meting (maatgevend)          | 0.62              |        |        |        |         |        |
| Afstand tot spoor [m]                     | 17                |        |        |        |         |        |
| Snelheid in referentiesituatie            | 90                |        |        |        |         |        |
| V0 model (op 5 meter van spoor)           | 0.95              |        |        |        |         |        |
|                                           | 2 Hz              | 4 Hz   | 8 Hz   | 16 Hz  | 31.5 Hz | 63 Hz  |
| spectrale correctiefactor                 | 0.0186            | 0.1981 | 0.4553 | 0.7408 | 2.0468  | 0.8064 |
| V0 per octaafband                         | 0.0177            | 0.1882 | 0.4325 | 0.7038 | 1.9445  | 0.7661 |
| correctie voor bestaande spoorconstructie | 1                 | 1      | 1      | 1      | 1       | 1      |
| bodemoverdracht: factor $\alpha$          | 0.01              | 0.01   | 0.01   | 0.04   | 0.04    | 0.05   |
| bodemoverdracht: factor n                 | 0.1               | 0.1    | 0.1    | 0.1    | 0.2     | 0.1    |
| correctiefactor voor bodemoverdracht      | 0.78              | 0.78   | 0.78   | 0.55   | 0.48    | 0.49   |
| correctiefactor Hbodem                    | 0.45              | 1.08   | 1.04   | 0.69   | 0.19    | 0.19   |
| correctiefactor Hgebouw                   | 2.74              | 2.03   | 1.05   | 0.97   | 1.39    | 1.22   |
| correctiefactor voor gebouwoverdracht     | 1.23              | 2.19   | 1.09   | 0.67   | 0.26    | 0.23   |
| Vmax,BTS in octaafbanden<br>in dB         | 0.02              | 0.32   | 0.37   | 0.26   | 0.25    | 0.09   |
|                                           | 84.66             | 110.21 | 111.38 | 108.23 | 107.92  | 98.71  |
| som in dB                                 | 115.78            |        |        |        |         |        |
| Vmax,BTS in referentiesituatie            | 0.62              |        |        |        |         |        |

### 2. Berekening Vmax,BTS (plan) voor snelheidsverlaging naar 60 km/u

|                                                  |        |        |        |        |         |       |
|--------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|---------|-------|
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.62   |        |        |        |         |       |
| gelijk aan referentiesituatie (ter vergelijking) | 17     |        |        |        |         |       |
| Snelheid in plansituatie                         | 60     |        |        |        |         |       |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.95   |        |        |        |         |       |
|                                                  | 2 Hz   | 4 Hz   | 8 Hz   | 16 Hz  | 31.5 Hz | 63 Hz |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.019  | 0.198  | 0.455  | 0.741  | 2.047   | 0.806 |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.018  | 0.188  | 0.433  | 0.704  | 1.944   | 0.766 |
| correctie voor bestaande spoorconstructie        | 1      | 1      | 1      | 1      | 1       | 1     |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.04   | 0.04    | 0.05  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.1    | 0.1    | 0.1    | 0.1    | 0.2     | 0.1   |
| correctiefactor voor bodemoverdracht             | 0.78   | 0.78   | 0.78   | 0.55   | 0.48    | 0.49  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.45   | 1.08   | 1.04   | 0.69   | 0.19    | 0.19  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 2.74   | 2.03   | 1.05   | 0.97   | 1.39    | 1.22  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.233  | 2.192  | 1.092  | 0.669  | 0.264   | 0.232 |
| correctiefactor voor rijsnelheid treinen         | 0.78   | 0.88   | 0.97   | 0.75   | 0.87    | 0.91  |
| Vmax,BTS in octaafbanden<br>in dB                | 0.01   | 0.29   | 0.36   | 0.19   | 0.22    | 0.08  |
|                                                  | 82.55  | 109.13 | 111.13 | 105.73 | 106.69  | 97.91 |
| som in dB                                        | 114.80 |        |        |        |         |       |
| Vmax,BTS in referentiesituatie                   | 0.55   |        |        |        |         |       |
| Procentuele reductie                             | -11%   |        |        |        |         |       |

### 3. Berekening Vmax,BTS (plan) voor snelheidsverlaging naar 40 km/u

|                                                  |         |        |         |         |         |         |
|--------------------------------------------------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.62    |        |         |         |         |         |
| gelijk aan referentiesituatie (ter vergelijking) | 17      |        |         |         |         |         |
| Snelheid in plansituatie                         | 40      |        |         |         |         |         |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.95    |        |         |         |         |         |
|                                                  | 2 Hz    | 4 Hz   | 8 Hz    | 16 Hz   | 31.5 Hz | 63 Hz   |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.0186  | 0.1981 | 0.4553  | 0.7408  | 2.0468  | 0.8064  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.01767 | 0.1882 | 0.43254 | 0.70376 | 1.94446 | 0.76608 |
| correctie voor bestaande spoorconstructie        | 1       | 1      | 1       | 1       | 1       | 1       |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.01    | 0.01   | 0.01    | 0.04    | 0.04    | 0.05    |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.1     | 0.1    | 0.1     | 0.1     | 0.2     | 0.1     |
| correctiefactor voor bodemoverdracht             | 0.78    | 0.78   | 0.78    | 0.55    | 0.48    | 0.49    |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.45    | 1.08   | 1.04    | 0.69    | 0.19    | 0.19    |
| identiek aan referentiesituatie                  | 2.74    | 2.03   | 1.05    | 0.97    | 1.39    | 1.22    |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.233   | 2.1924 | 1.092   | 0.6693  | 0.2641  | 0.2318  |
| correctiefactor voor rijsnelheid treinen         | 0.78    | 0.88   | 0.85    | 0.74    | 0.85    | 0.75    |
| Vmax,BTS in octaafbanden<br>in dB                | 0.01    | 0.28   | 0.32    | 0.19    | 0.21    | 0.06    |
|                                                  | 82.46   | 109.09 | 110.00  | 105.59  | 106.46  | 96.19   |
| som in dB                                        | 114.25  |        |         |         |         |         |
| Vmax,BTS in referentiesituatie                   | 0.52    |        |         |         |         |         |
| Procentuele reductie                             | -16%    |        |         |         |         |         |



### 1. Berekening Vmax,BTS (referentie)

|                                           |                   |                |                |                |                |                |
|-------------------------------------------|-------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Gidsband                                  | Sporlaan 8, Vught |                |                |                |                |                |
| Vmax,BTS uit meting (maatgevend)          | 0.87              |                |                |                |                |                |
| Afstand tot spoor [m]                     | 15,2              |                |                |                |                |                |
| Snelheid in referentiesituatie            | 90                |                |                |                |                |                |
| V0 model (op 5 meter van spoor)           | 1.46              |                |                |                |                |                |
|                                           | 2 Hz              | 4 Hz           | 8 Hz           | 16 Hz          | 31.5 Hz        | 63 Hz          |
| spectrale correctiefactor                 | 0.0119            | 0.1278         | 0.2921         | 0.4485         | 1.1993         | 0.4799         |
| V0 per octaafband                         | 0.0174            | 0.1866         | 0.4265         | 0.6548         | 1.751          | 0.7007         |
| correctie voor bestaande spoorconstructie | 1                 | 1              | 1              | 1              | 1              | 1              |
| bodemoverdracht: factor $\alpha$          | 0.01              | 0.01           | 0.01           | 0.04           | 0.04           | 0.05           |
| bodemoverdracht: factor n                 | 0.1               | 0.1            | 0.1            | 0.1            | 0.2            | 0.1            |
| correctiefactor voor bodemoverdracht      | 0.81              | 0.81           | 0.81           | 0.60           | 0.53           | 0.54           |
| correctiefactor Hbodem                    | 1                 | 1              | 1              | 1              | 1              | 1              |
| correctiefactor Hgebouw                   | 1.62              | 1.2            | 1.08           | 1.28           | 3.37           | 3.51           |
| correctiefactor voor gebouwoverdracht     | 1.62              | 1.20           | 1.08           | 1.28           | 3.37           | 3.51           |
| Vmax,BTS in octaafbanden<br>in dB         | 0.02<br>87.14     | 0.18<br>105.15 | 0.37<br>111.41 | 0.50<br>113.96 | 3.14<br>129.94 | 1.32<br>122.42 |
| som in dB                                 | 130.80            |                |                |                |                |                |
| Vmax,BTS in referentiesituatie            | 3.47              |                |                |                |                |                |

### 2. Berekening Vmax,BTS (plan) voor snelheidsverlaging naar 60 km/u

|                                                  |               |                |                |                |                |                |
|--------------------------------------------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.87          |                |                |                |                |                |
| gelijk aan referentiesituatie (ter vergelijking) | 15.2          |                |                |                |                |                |
| Snelheid in plansituatie                         | 60            |                |                |                |                |                |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.46          |                |                |                |                |                |
|                                                  | 2 Hz          | 4 Hz           | 8 Hz           | 16 Hz          | 31.5 Hz        | 63 Hz          |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.012         | 0.128          | 0.292          | 0.449          | 1.199          | 0.48           |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.017         | 0.187          | 0.426          | 0.655          | 1.751          | 0.701          |
| correctie voor bestaande spoorconstructie        | 1             | 1              | 1              | 1              | 1              | 1              |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.01          | 0.01           | 0.01           | 0.04           | 0.04           | 0.05           |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.1           | 0.1            | 0.1            | 0.1            | 0.2            | 0.1            |
| correctiefactor voor bodemoverdracht             | 0.81          | 0.81           | 0.81           | 0.60           | 0.53           | 0.54           |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1             | 1              | 1              | 1              | 1              | 1              |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.62          | 1.2            | 1.08           | 1.28           | 3.37           | 3.51           |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.62          | 1.2            | 1.08           | 1.28           | 3.37           | 3.51           |
| correctiefactor voor rijsnelheid treinen         | 0.78          | 0.88           | 0.97           | 0.75           | 0.87           | 0.91           |
| Vmax,BTS in octaafbanden<br>in dB                | 0.02<br>85.02 | 0.16<br>104.08 | 0.36<br>111.17 | 0.37<br>111.46 | 2.73<br>128.71 | 1.21<br>121.62 |
| som in dB                                        | 129.63        |                |                |                |                |                |
| Vmax,BTS in referentiesituatie                   | 3.03          |                |                |                |                |                |
| Procentuele reductie                             | -13%          |                |                |                |                |                |

### 3. Berekening Vmax,BTS (plan) voor snelheidsverlaging naar 40 km/u

|                                                  |               |                |                |                |                |                |
|--------------------------------------------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.87          |                |                |                |                |                |
| gelijk aan referentiesituatie (ter vergelijking) | 15.2          |                |                |                |                |                |
| Snelheid in plansituatie                         | 40            |                |                |                |                |                |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.46          |                |                |                |                |                |
|                                                  | 2 Hz          | 4 Hz           | 8 Hz           | 16 Hz          | 31.5 Hz        | 63 Hz          |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.0119        | 0.1278         | 0.2921         | 0.4485         | 1.1993         | 0.4799         |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.01737       | 0.18659        | 0.42647        | 0.65481        | 1.75098        | 0.70065        |
| correctie voor bestaande spoorconstructie        | 1             | 1              | 1              | 1              | 1              | 1              |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.01          | 0.01           | 0.01           | 0.04           | 0.04           | 0.05           |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.1           | 0.1            | 0.1            | 0.1            | 0.2            | 0.1            |
| correctiefactor voor bodemoverdracht             | 0.81          | 0.81           | 0.81           | 0.60           | 0.53           | 0.54           |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1             | 1              | 1              | 1              | 1              | 1              |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.62          | 1.2            | 1.08           | 1.28           | 3.37           | 3.51           |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.62          | 1.2            | 1.08           | 1.28           | 3.37           | 3.51           |
| correctiefactor voor rijsnelheid treinen         | 0.78          | 0.88           | 0.85           | 0.74           | 0.85           | 0.75           |
| Vmax,BTS in octaafbanden<br>in dB                | 0.02<br>84.93 | 0.16<br>104.03 | 0.32<br>110.03 | 0.37<br>111.32 | 2.66<br>128.49 | 0.99<br>119.90 |
| som in dB                                        | 129.19        |                |                |                |                |                |
| Vmax,BTS in referentiesituatie                   | 2.88          |                |                |                |                |                |
| Procentuele reductie                             | -17%          |                |                |                |                |                |

## 1. Berekening Vmax,BTS (referentie)

|                                           |                    |        |        |        |         |        |
|-------------------------------------------|--------------------|--------|--------|--------|---------|--------|
| Gidsband                                  | Sporlaan 43, Vught |        |        |        |         |        |
| Vmax,BTS uit meting (maatgevend)          | 0.42               |        |        |        |         |        |
| Afstand tot spoor [m]                     | 30.2               |        |        |        |         |        |
| Snelheid in referentiesituatie            | 90                 |        |        |        |         |        |
| V0 model (op 5 meter van spoor)           | 1.3                |        |        |        |         |        |
|                                           | 2 Hz               | 4 Hz   | 8 Hz   | 16 Hz  | 31.5 Hz | 63 Hz  |
| spectrale correctiefactor                 | 0.0394             | 0.083  | 0.1732 | 0.6604 | 0.6742  | 0.5969 |
| V0 per octaafband                         | 0.0512             | 0.1079 | 0.2252 | 0.8585 | 0.8765  | 0.776  |
| correctie voor bestaande spoorconstructie | 1                  | 1      | 1      | 1      | 1       | 1      |
| bodemoverdracht: factor $\alpha$          | 0.01               | 0.01   | 0.01   | 0.04   | 0.04    | 0.05   |
| bodemoverdracht: factor n                 | 0.1                | 0.1    | 0.1    | 0.1    | 0.2     | 0.1    |
| correctiefactor voor bodemoverdracht      | 0.65               | 0.65   | 0.65   | 0.30   | 0.25    | 0.24   |
| correctiefactor Hbodem                    | 1                  | 1.27   | 1.49   | 0.98   | 0.35    | 0.22   |
| correctiefactor Hgebouw                   | 0.59               | 0.91   | 0.93   | 1      | 2.98    | 1.11   |
| correctiefactor voor gebouwoverdracht     | 0.59               | 1.16   | 1.39   | 0.98   | 1.04    | 0.24   |
| Vmax,BTS in octaafbanden in dB            | 0.02               | 0.08   | 0.20   | 0.26   | 0.23    | 0.04   |
|                                           | 85.85              | 98.17  | 106.13 | 108.18 | 107.34  | 93.05  |
| som in dB                                 | 112.30             |        |        |        |         |        |
| Vmax,BTS in referentiesituatie            | 0.41               |        |        |        |         |        |

## 2. Berekening Vmax,BTS (plan) voor snelheidsverlaging naar 60 km/u

|                                                  |        |       |        |        |         |       |
|--------------------------------------------------|--------|-------|--------|--------|---------|-------|
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.42   |       |        |        |         |       |
| gelijk aan referentiesituatie (ter vergelijking) | 30.2   |       |        |        |         |       |
| Snelheid in plansituatie                         | 60     |       |        |        |         |       |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.3    |       |        |        |         |       |
|                                                  | 2 Hz   | 4 Hz  | 8 Hz   | 16 Hz  | 31.5 Hz | 63 Hz |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.039  | 0.083 | 0.173  | 0.66   | 0.674   | 0.597 |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.051  | 0.108 | 0.225  | 0.859  | 0.876   | 0.776 |
| correctie voor bestaande spoorconstructie        | 1      | 1     | 1      | 1      | 1       | 1     |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.01   | 0.01  | 0.01   | 0.04   | 0.04    | 0.05  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.1    | 0.1   | 0.1    | 0.1    | 0.2     | 0.1   |
| correctiefactor voor bodemoverdracht             | 0.65   | 0.65  | 0.65   | 0.30   | 0.25    | 0.24  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1      | 1.27  | 1.49   | 0.98   | 0.35    | 0.22  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.59   | 0.91  | 0.93   | 1      | 2.98    | 1.11  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.59   | 1.156 | 1.386  | 0.98   | 1.043   | 0.244 |
| correctiefactor voor rijsnelheid treinen         | 0.78   | 0.88  | 0.97   | 0.75   | 0.87    | 0.91  |
| Vmax,BTS in octaafbanden in dB                   | 0.02   | 0.07  | 0.20   | 0.19   | 0.20    | 0.04  |
|                                                  | 83.74  | 97.10 | 105.89 | 105.68 | 106.11  | 92.25 |
| som in dB                                        | 110.92 |       |        |        |         |       |
| Vmax,BTS in referentiesituatie                   | 0.35   |       |        |        |         |       |
| Procentuele reductie                             | -15%   |       |        |        |         |       |

## 3. Berekening Vmax,BTS (plan) voor snelheidsverlaging naar 40 km/u

|                                                  |         |        |         |         |         |         |
|--------------------------------------------------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.42    |        |         |         |         |         |
| gelijk aan referentiesituatie (ter vergelijking) | 30.2    |        |         |         |         |         |
| Snelheid in plansituatie                         | 40      |        |         |         |         |         |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.3     |        |         |         |         |         |
|                                                  | 2 Hz    | 4 Hz   | 8 Hz    | 16 Hz   | 31.5 Hz | 63 Hz   |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.0394  | 0.083  | 0.1732  | 0.6604  | 0.6742  | 0.5969  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.05122 | 0.1079 | 0.22516 | 0.85852 | 0.87646 | 0.77597 |
| correctie voor bestaande spoorconstructie        | 1       | 1      | 1       | 1       | 1       | 1       |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.01    | 0.01   | 0.01    | 0.04    | 0.04    | 0.05    |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.1     | 0.1    | 0.1     | 0.1     | 0.2     | 0.1     |
| correctiefactor voor bodemoverdracht             | 0.65    | 0.65   | 0.65    | 0.30    | 0.25    | 0.24    |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1       | 1.27   | 1.49    | 0.98    | 0.35    | 0.22    |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.59    | 0.91   | 0.93    | 1       | 2.98    | 1.11    |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.59    | 1.1557 | 1.3857  | 0.98    | 1.043   | 0.2442  |
| correctiefactor voor rijsnelheid treinen         | 0.78    | 0.88   | 0.85    | 0.74    | 0.85    | 0.75    |
| Vmax,BTS in octaafbanden in dB                   | 0.02    | 0.07   | 0.17    | 0.19    | 0.20    | 0.03    |
|                                                  | 83.65   | 97.05  | 104.75  | 105.54  | 105.89  | 90.52   |
| som in dB                                        | 110.45  |        |         |         |         |         |
| Vmax,BTS in referentiesituatie                   | 0.33    |        |         |         |         |         |
| Procentuele reductie                             | -19%    |        |         |         |         |         |

## 1. Berekening Vmax,BTS (referentie)

|                                           |                     |        |        |        |         |        |
|-------------------------------------------|---------------------|--------|--------|--------|---------|--------|
| Gidsband                                  | Repelweg 195, Vught |        |        |        |         |        |
| Vmax,BTS uit meting (maatgevend)          | 0.27                |        |        |        |         |        |
| Afstand tot spoor [m]                     | 28.1                |        |        |        |         |        |
| Snelheid in referentiesituatie            | 90                  |        |        |        |         |        |
| V0 model (op 5 meter van spoor)           | 0.49                |        |        |        |         |        |
|                                           | 2 Hz                | 4 Hz   | 8 Hz   | 16 Hz  | 31.5 Hz | 63 Hz  |
| spectrale correctiefactor                 | 0.0203              | 0.2321 | 0.6422 | 1.0842 | 0.7872  | 0.2956 |
| V0 per octaafband                         | 0.0099              | 0.1137 | 0.3147 | 0.5313 | 0.3857  | 0.1448 |
| correctie voor bestaande spoorconstructie | 1                   | 1      | 1      | 1      | 1       | 1      |
| bodemoverdracht: factor $\alpha$          | 0.01                | 0.01   | 0.01   | 0.04   | 0.04    | 0.05   |
| bodemoverdracht: factor n                 | 0.1                 | 0.1    | 0.1    | 0.1    | 0.2     | 0.1    |
| correctiefactor voor bodemoverdracht      | 0.67                | 0.67   | 0.67   | 0.33   | 0.28    | 0.27   |
| correctiefactor Hbodem                    | 0.65                | 0.92   | 1.08   | 0.43   | 0.18    | 0.24   |
| correctiefactor Hgebouw                   | 1.51                | 1.85   | 0.97   | 1.17   | 2.04    | 2.25   |
| correctiefactor voor gebouwoverdracht     | 0.98                | 1.70   | 1.05   | 0.50   | 0.37    | 0.54   |
| Vmax,BTS in octaafbanden in dB            | 0.01                | 0.13   | 0.22   | 0.09   | 0.04    | 0.02   |
|                                           | 76.29               | 102.23 | 106.86 | 99.01  | 92.00   | 86.33  |
| som in dB                                 | 108.76              |        |        |        |         |        |
| Vmax,BTS in referentiesituatie            | 0.27                |        |        |        |         |        |

## 2. Berekening Vmax,BTS (plan) voor snelheidsverlaging naar 60 km/u

|                                                  |        |        |        |       |         |       |
|--------------------------------------------------|--------|--------|--------|-------|---------|-------|
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.27   |        |        |       |         |       |
| gelijk aan referentiesituatie (ter vergelijking) | 28.1   |        |        |       |         |       |
| Snelheid in plansituatie                         | 60     |        |        |       |         |       |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.49   |        |        |       |         |       |
|                                                  | 2 Hz   | 4 Hz   | 8 Hz   | 16 Hz | 31.5 Hz | 63 Hz |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.02   | 0.232  | 0.642  | 1.084 | 0.787   | 0.296 |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.01   | 0.114  | 0.315  | 0.531 | 0.386   | 0.145 |
| correctie voor bestaande spoorconstructie        | 1      | 1      | 1      | 1     | 1       | 1     |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.04  | 0.04    | 0.05  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.1    | 0.1    | 0.1    | 0.1   | 0.2     | 0.1   |
| correctiefactor voor bodemoverdracht             | 0.67   | 0.67   | 0.67   | 0.33  | 0.28    | 0.27  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.65   | 0.92   | 1.08   | 0.43  | 0.18    | 0.24  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.51   | 1.85   | 0.97   | 1.17  | 2.04    | 2.25  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.982  | 1.702  | 1.048  | 0.503 | 0.367   | 0.54  |
| correctiefactor voor rijsnelheid treinen         | 0.78   | 0.88   | 0.97   | 0.75  | 0.87    | 0.91  |
| Vmax,BTS in octaafbanden in dB                   | 0.01   | 0.11   | 0.21   | 0.07  | 0.03    | 0.02  |
|                                                  | 74.17  | 101.16 | 106.61 | 96.52 | 90.77   | 85.53 |
| som in dB                                        | 108.12 |        |        |       |         |       |
| Vmax,BTS in referentiesituatie                   | 0.25   |        |        |       |         |       |
| Procentuele reductie                             | -7%    |        |        |       |         |       |

## 3. Berekening Vmax,BTS (plan) voor snelheidsverlaging naar 40 km/u

|                                                  |         |         |         |         |         |         |
|--------------------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.27    |         |         |         |         |         |
| gelijk aan referentiesituatie (ter vergelijking) | 28.1    |         |         |         |         |         |
| Snelheid in plansituatie                         | 40      |         |         |         |         |         |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.49    |         |         |         |         |         |
|                                                  | 2 Hz    | 4 Hz    | 8 Hz    | 16 Hz   | 31.5 Hz | 63 Hz   |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.0203  | 0.2321  | 0.6422  | 1.0842  | 0.7872  | 0.2956  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.00995 | 0.11373 | 0.31468 | 0.53126 | 0.38573 | 0.14484 |
| correctie voor bestaande spoorconstructie        | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.01    | 0.01    | 0.01    | 0.04    | 0.04    | 0.05    |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.1     | 0.1     | 0.1     | 0.1     | 0.2     | 0.1     |
| correctiefactor voor bodemoverdracht             | 0.67    | 0.67    | 0.67    | 0.33    | 0.28    | 0.27    |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.65    | 0.92    | 1.08    | 0.43    | 0.18    | 0.24    |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.51    | 1.85    | 0.97    | 1.17    | 2.04    | 2.25    |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.9815  | 1.702   | 1.0476  | 0.5031  | 0.3672  | 0.54    |
| correctiefactor voor rijsnelheid treinen         | 0.78    | 0.88    | 0.85    | 0.74    | 0.85    | 0.75    |
| Vmax,BTS in octaafbanden in dB                   | 0.01    | 0.11    | 0.19    | 0.07    | 0.03    | 0.02    |
|                                                  | 74.08   | 101.11  | 105.47  | 96.38   | 90.55   | 83.81   |
| som in dB                                        | 107.32  |         |         |         |         |         |
| Vmax,BTS in referentiesituatie                   | 0.23    |         |         |         |         |         |
| Procentuele reductie                             | -15%    |         |         |         |         |         |

## 1. Berekening Vmax,BTS (referentie)

|                                           |                                  |        |        |        |         |        |
|-------------------------------------------|----------------------------------|--------|--------|--------|---------|--------|
| Gidsband                                  | Ridder van Cuickstraat 33, Boxel |        |        |        |         |        |
| Vmax,BTS uit meting (maatgevend)          | 0.44                             |        |        |        |         |        |
| Afstand tot spoor [m]                     | 14.9                             |        |        |        |         |        |
| Snelheid in referentiesituatie            | 90                               |        |        |        |         |        |
| V0 model (op 5 meter van spoor)           | 0.61                             |        |        |        |         |        |
|                                           | 2 Hz                             | 4 Hz   | 8 Hz   | 16 Hz  | 31.5 Hz | 63 Hz  |
| spectrale correctiefactor                 | 0.0055                           | 0.0687 | 0.2355 | 0.3118 | 1.4932  | 0.3117 |
| V0 per octaafband                         | 0.0034                           | 0.0419 | 0.1437 | 0.1902 | 0.9109  | 0.1901 |
| correctie voor bestaande spoorconstructie | 1                                | 1      | 1      | 1      | 1       | 1      |
| bodemoverdracht: factor $\alpha$          | 0.02                             | 0.02   | 0.025  | 0.025  | 0.025   | 0.03   |
| bodemoverdracht: factor n                 | 0.1                              | 0.1    | 0.1    | 0.1    | 0.1     | 0.1    |
| correctiefactor voor bodemoverdracht      | 0.74                             | 0.74   | 0.70   | 0.70   | 0.70    | 0.67   |
| correctiefactor Hbodem                    | 0.95                             | 1.06   | 0.99   | 0.85   | 0.29    | 0.45   |
| correctiefactor Hgebouw                   | 1.21                             | 0.89   | 2.07   | 2.14   | 1.51    | 0.99   |
| correctiefactor voor gebouwoverdracht     | 1.15                             | 0.94   | 2.05   | 1.82   | 0.44    | 0.45   |
| Vmax,BTS in octaafbanden                  | 0.00                             | 0.03   | 0.21   | 0.24   | 0.28    | 0.06   |
| in dB                                     | 69.06                            | 89.27  | 106.28 | 107.68 | 108.92  | 95.03  |
| som in dB                                 | 112.63                           |        |        |        |         |        |
| Vmax,BTS in referentiesituatie            | 0.43                             |        |        |        |         |        |

## 2. Berekening Vmax,BTS (plan) voor snelheidsverlaging naar 60 km/u

|                                                  |        |       |        |        |         |       |
|--------------------------------------------------|--------|-------|--------|--------|---------|-------|
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.44   |       |        |        |         |       |
| gelijk aan referentiesituatie (ter vergelijking) | 14.9   |       |        |        |         |       |
| Snelheid in plansituatie                         | 60     |       |        |        |         |       |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.61   |       |        |        |         |       |
|                                                  | 2 Hz   | 4 Hz  | 8 Hz   | 16 Hz  | 31.5 Hz | 63 Hz |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.006  | 0.069 | 0.236  | 0.312  | 1.493   | 0.312 |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.003  | 0.042 | 0.144  | 0.19   | 0.911   | 0.19  |
| correctie voor bestaande spoorconstructie        | 1      | 1     | 1      | 1      | 1       | 1     |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.02   | 0.02  | 0.025  | 0.025  | 0.025   | 0.03  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.1    | 0.1   | 0.1    | 0.1    | 0.1     | 0.1   |
| correctiefactor voor bodemoverdracht             | 0.74   | 0.74  | 0.70   | 0.70   | 0.70    | 0.67  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.95   | 1.06  | 0.99   | 0.85   | 0.29    | 0.45  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.21   | 0.89  | 2.07   | 2.14   | 1.51    | 0.99  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.15   | 0.943 | 2.049  | 1.819  | 0.438   | 0.446 |
| correctiefactor voor rijsnelheid treinen         | 1.00   | 0.97  | 1.02   | 0.87   | 0.96    | 0.88  |
| Vmax,BTS in octaafbanden                         | 0.00   | 0.03  | 0.21   | 0.21   | 0.27    | 0.05  |
| in dB                                            | 69.09  | 89.02 | 106.45 | 106.44 | 108.59  | 93.89 |
| som in dB                                        | 112.14 |       |        |        |         |       |
| Vmax,BTS in referentiesituatie                   | 0.40   |       |        |        |         |       |
| Procentuele reductie                             | -5%    |       |        |        |         |       |

## 3. Berekening Vmax,BTS (plan) voor snelheidsverlaging naar 40 km/u

|                                                  |         |         |         |        |         |         |
|--------------------------------------------------|---------|---------|---------|--------|---------|---------|
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.44    |         |         |        |         |         |
| gelijk aan referentiesituatie (ter vergelijking) | 14.9    |         |         |        |         |         |
| Snelheid in plansituatie                         | 40      |         |         |        |         |         |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.61    |         |         |        |         |         |
|                                                  | 2 Hz    | 4 Hz    | 8 Hz    | 16 Hz  | 31.5 Hz | 63 Hz   |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.0055  | 0.0687  | 0.2355  | 0.3118 | 1.4932  | 0.3117  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.00336 | 0.04191 | 0.14366 | 0.1902 | 0.91085 | 0.19014 |
| correctie voor bestaande spoorconstructie        | 1       | 1       | 1       | 1      | 1       | 1       |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.02    | 0.02    | 0.025   | 0.025  | 0.025   | 0.03    |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.1     | 0.1     | 0.1     | 0.1    | 0.1     | 0.1     |
| correctiefactor voor bodemoverdracht             | 0.74    | 0.74    | 0.70    | 0.70   | 0.70    | 0.67    |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.95    | 1.06    | 0.99    | 0.85   | 0.29    | 0.45    |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.21    | 0.89    | 2.07    | 2.14   | 1.51    | 0.99    |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.1495  | 0.9434  | 2.0493  | 1.819  | 0.4379  | 0.4455  |
| correctiefactor voor rijsnelheid treinen         | 1.00    | 0.97    | 0.99    | 0.90   | 0.69    | 0.88    |
| Vmax,BTS in octaafbanden                         | 0.00    | 0.03    | 0.20    | 0.22   | 0.19    | 0.05    |
| in dB                                            | 69.09   | 89.02   | 106.18  | 106.73 | 105.70  | 93.93   |
| som in dB                                        | 111.10  |         |         |        |         |         |
| Vmax,BTS in referentiesituatie                   | 0.36    |         |         |        |         |         |
| Procentuele reductie                             | -16%    |         |         |        |         |         |

### 1. Berekening Vmax,BTS (referentie)

|                                           |                        |        |        |        |         |        |
|-------------------------------------------|------------------------|--------|--------|--------|---------|--------|
| Gidspand                                  | Spoorstraat 32, Bortel |        |        |        |         |        |
| Vmax,BTS uit meting (maatgevend)          | 1.18                   |        |        |        |         |        |
| Afstand tot spoor [m]                     | 18.1                   |        |        |        |         |        |
| Snelheid in referentiesituatie            | 90                     |        |        |        |         |        |
| V0 model (op 5 meter van spoor)           | 1.86                   |        |        |        |         |        |
|                                           | 2 Hz                   | 4 Hz   | 8 Hz   | 16 Hz  | 31.5 Hz | 63 Hz  |
| spectrale correctiefactor                 | 0.0098                 | 0.0301 | 0.1189 | 0.2592 | 0.897   | 0.8496 |
| V0 per octaafband                         | 0.0182                 | 0.056  | 0.2212 | 0.4821 | 1.6684  | 1.5803 |
| correctie voor bestaande spoorconstructie | 1                      | 1      | 1      | 1      | 1       | 1      |
| bodemoverdracht: factor $\alpha$          | 0.02                   | 0.02   | 0.025  | 0.025  | 0.025   | 0.03   |
| bodemoverdracht: factor n                 | 0.1                    | 0.1    | 0.1    | 0.1    | 0.1     | 0.1    |
| correctiefactor voor bodemoverdracht      | 0.68                   | 0.68   | 0.63   | 0.63   | 0.63    | 0.59   |
| correctiefactor Hbodem                    | 0.42                   | 0.7    | 1.04   | 0.82   | 0.25    | 0.18   |
| correctiefactor Hgebouw                   | 2.65                   | 1.73   | 1.82   | 3.05   | 3.02    | 1.82   |
| correctiefactor voor gebouwoverdracht     | 1.11                   | 1.21   | 1.89   | 2.50   | 0.76    | 0.33   |
| Vmax,BTS in octaafbanden<br>in dB         | 0.01                   | 0.05   | 0.27   | 0.76   | 0.80    | 0.31   |
|                                           | 82.75                  | 93.23  | 108.47 | 117.66 | 118.04  | 109.75 |
| som in dB                                 | 121.42                 |        |        |        |         |        |
| Vmax,BTS in referentiesituatie            | 1.18                   |        |        |        |         |        |

### 2. Berekening Vmax,BTS (plan) voor snelheidsverlaging naar 60 km/u

|                                                  |        |       |        |        |         |        |
|--------------------------------------------------|--------|-------|--------|--------|---------|--------|
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.18   |       |        |        |         |        |
| gelijk aan referentiesituatie (ter vergelijking) | 18.1   |       |        |        |         |        |
| Snelheid in plansituatie                         | 60     |       |        |        |         |        |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.86   |       |        |        |         |        |
|                                                  | 2 Hz   | 4 Hz  | 8 Hz   | 16 Hz  | 31.5 Hz | 63 Hz  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.01   | 0.03  | 0.119  | 0.259  | 0.897   | 0.85   |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.018  | 0.056 | 0.221  | 0.482  | 1.668   | 1.58   |
| correctie voor bestaande spoorconstructie        | 1      | 1     | 1      | 1      | 1       | 1      |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.02   | 0.02  | 0.025  | 0.025  | 0.025   | 0.03   |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.1    | 0.1   | 0.1    | 0.1    | 0.1     | 0.1    |
| correctiefactor voor bodemoverdracht             | 0.68   | 0.68  | 0.63   | 0.63   | 0.63    | 0.59   |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.42   | 0.7   | 1.04   | 0.82   | 0.25    | 0.18   |
| identiek aan referentiesituatie                  | 2.65   | 1.73  | 1.82   | 3.05   | 3.02    | 1.82   |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.113  | 1.211 | 1.893  | 2.501  | 0.755   | 0.328  |
| correctiefactor voor rijsnelheid treinen         | 1.00   | 0.97  | 1.02   | 0.87   | 0.96    | 0.88   |
| Vmax,BTS in octaafbanden<br>in dB                | 0.01   | 0.04  | 0.27   | 0.66   | 0.77    | 0.27   |
|                                                  | 82.79  | 92.98 | 108.65 | 116.42 | 117.72  | 108.61 |
| som in dB                                        | 120.71 |       |        |        |         |        |
| Vmax,BTS in referentiesituatie                   | 1.09   |       |        |        |         |        |
| Procentuele reductie                             | -8%    |       |        |        |         |        |

### 3. Berekening Vmax,BTS (plan) voor snelheidsverlaging naar 40 km/u

|                                                  |         |         |         |         |         |         |
|--------------------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.18    |         |         |         |         |         |
| gelijk aan referentiesituatie (ter vergelijking) | 18.1    |         |         |         |         |         |
| Snelheid in plansituatie                         | 40      |         |         |         |         |         |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.86    |         |         |         |         |         |
|                                                  | 2 Hz    | 4 Hz    | 8 Hz    | 16 Hz   | 31.5 Hz | 63 Hz   |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.0098  | 0.0301  | 0.1189  | 0.2592  | 0.897   | 0.8496  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.01823 | 0.05599 | 0.22115 | 0.48211 | 1.66842 | 1.58026 |
| correctie voor bestaande spoorconstructie        | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.02    | 0.02    | 0.025   | 0.025   | 0.025   | 0.03    |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.1     | 0.1     | 0.1     | 0.1     | 0.1     | 0.1     |
| correctiefactor voor bodemoverdracht             | 0.68    | 0.68    | 0.63    | 0.63    | 0.63    | 0.59    |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.42    | 0.7     | 1.04    | 0.82    | 0.25    | 0.18    |
| identiek aan referentiesituatie                  | 2.65    | 1.73    | 1.82    | 3.05    | 3.02    | 1.82    |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.113   | 1.211   | 1.8928  | 2.501   | 0.755   | 0.3276  |
| correctiefactor voor rijsnelheid treinen         | 1.00    | 0.97    | 0.99    | 0.90    | 0.69    | 0.88    |
| Vmax,BTS in octaafbanden<br>in dB                | 0.01    | 0.04    | 0.26    | 0.68    | 0.55    | 0.27    |
|                                                  | 82.79   | 92.98   | 108.37  | 116.71  | 114.82  | 108.65  |
| som in dB                                        | 119.62  |         |         |         |         |         |
| Vmax,BTS in referentiesituatie                   | 0.96    |         |         |         |         |         |
| Procentuele reductie                             | -19%    |         |         |         |         |         |

## 1. Berekening Vmax,BTS (referentie)

|                                           |                       |        |        |        |         |        |
|-------------------------------------------|-----------------------|--------|--------|--------|---------|--------|
| Gidsband                                  | Spoorstraat 7, Boxtel |        |        |        |         |        |
| Vmax,BTS uit meting (maatgevend)          | 0.21                  |        |        |        |         |        |
| Afstand tot spoor [m]                     | 38.9                  |        |        |        |         |        |
| Snelheid in referentiesituatie            | 90                    |        |        |        |         |        |
| V0 model (op 5 meter van spoor)           | 0.59                  |        |        |        |         |        |
|                                           | 2 Hz                  | 4 Hz   | 8 Hz   | 16 Hz  | 31.5 Hz | 63 Hz  |
| spectrale correctiefactor                 | 0.0108                | 0.0525 | 0.3167 | 0.3625 | 0.847   | 0.4652 |
| V0 per octaafband                         | 0.0064                | 0.031  | 0.1869 | 0.2139 | 0.4997  | 0.2745 |
| correctie voor bestaande spoorconstructie | 1                     | 1      | 1      | 1      | 1       | 1      |
| bodemoverdracht: factor $\alpha$          | 0.02                  | 0.02   | 0.025  | 0.025  | 0.025   | 0.03   |
| bodemoverdracht: factor n                 | 0.1                   | 0.1    | 0.1    | 0.1    | 0.1     | 0.1    |
| correctiefactor voor bodemoverdracht      | 0.41                  | 0.41   | 0.35   | 0.35   | 0.35    | 0.29   |
| correctiefactor Hbodem                    | 1.56                  | 1.89   | 1.47   | 1.33   | 0.74    | 0.69   |
| correctiefactor Hgebouw                   | 1.77                  | 1.52   | 1.24   | 1.1    | 0.96    | 0.54   |
| correctiefactor voor gebouwoverdracht     | 2.76                  | 2.87   | 1.82   | 1.46   | 0.71    | 0.37   |
| Vmax,BTS in octaafbanden in dB            | 0.01                  | 0.04   | 0.12   | 0.11   | 0.12    | 0.03   |
|                                           | 77.24                 | 91.32  | 101.50 | 100.76 | 101.86  | 89.58  |
| som in dB                                 | 106.41                |        |        |        |         |        |
| Vmax,BTS in referentiesituatie            | 0.21                  |        |        |        |         |        |

## 2. Berekening Vmax,BTS (plan) voor snelheidsverlaging naar 60 km/u

|                                                  |        |       |        |       |         |       |
|--------------------------------------------------|--------|-------|--------|-------|---------|-------|
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.21   |       |        |       |         |       |
| gelijk aan referentiesituatie (ter vergelijking) | 38.9   |       |        |       |         |       |
| Snelheid in plansituatie                         | 60     |       |        |       |         |       |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.59   |       |        |       |         |       |
|                                                  | 2 Hz   | 4 Hz  | 8 Hz   | 16 Hz | 31.5 Hz | 63 Hz |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.011  | 0.053 | 0.317  | 0.363 | 0.847   | 0.465 |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.006  | 0.031 | 0.187  | 0.214 | 0.5     | 0.274 |
| correctie voor bestaande spoorconstructie        | 1      | 1     | 1      | 1     | 1       | 1     |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.02   | 0.02  | 0.025  | 0.025 | 0.025   | 0.03  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.1    | 0.1   | 0.1    | 0.1   | 0.1     | 0.1   |
| correctiefactor voor bodemoverdracht             | 0.41   | 0.41  | 0.35   | 0.35  | 0.35    | 0.29  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.56   | 1.89  | 1.47   | 1.33  | 0.74    | 0.69  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.77   | 1.52  | 1.24   | 1.1   | 0.96    | 0.54  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 2.761  | 2.873 | 1.823  | 1.463 | 0.71    | 0.373 |
| correctiefactor voor rijsnelheid treinen         | 1.00   | 0.97  | 1.02   | 0.87  | 0.96    | 0.88  |
| Vmax,BTS in octaafbanden in dB                   | 0.01   | 0.04  | 0.12   | 0.09  | 0.12    | 0.03  |
|                                                  | 77.27  | 91.07 | 101.67 | 99.53 | 101.53  | 88.44 |
| som in dB                                        | 106.01 |       |        |       |         |       |
| Vmax,BTS in referentiesituatie                   | 0.20   |       |        |       |         |       |
| Procentuele reductie                             | -4%    |       |        |       |         |       |

## 3. Berekening Vmax,BTS (plan) voor snelheidsverlaging naar 40 km/u

|                                                  |         |         |         |         |         |         |
|--------------------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.21    |         |         |         |         |         |
| gelijk aan referentiesituatie (ter vergelijking) | 38.9    |         |         |         |         |         |
| Snelheid in plansituatie                         | 40      |         |         |         |         |         |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.59    |         |         |         |         |         |
|                                                  | 2 Hz    | 4 Hz    | 8 Hz    | 16 Hz   | 31.5 Hz | 63 Hz   |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.0108  | 0.0525  | 0.3167  | 0.3625  | 0.847   | 0.4652  |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.00637 | 0.03098 | 0.18685 | 0.21388 | 0.49973 | 0.27447 |
| correctie voor bestaande spoorconstructie        | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.02    | 0.02    | 0.025   | 0.025   | 0.025   | 0.03    |
| identiek aan referentiesituatie                  | 0.1     | 0.1     | 0.1     | 0.1     | 0.1     | 0.1     |
| correctiefactor voor bodemoverdracht             | 0.41    | 0.41    | 0.35    | 0.35    | 0.35    | 0.29    |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.56    | 1.89    | 1.47    | 1.33    | 0.74    | 0.69    |
| identiek aan referentiesituatie                  | 1.77    | 1.52    | 1.24    | 1.1     | 0.96    | 0.54    |
| identiek aan referentiesituatie                  | 2.7612  | 2.8728  | 1.8228  | 1.463   | 0.7104  | 0.3726  |
| correctiefactor voor rijsnelheid treinen         | 1.00    | 0.97    | 0.99    | 0.90    | 0.69    | 0.88    |
| Vmax,BTS in octaafbanden in dB                   | 0.01    | 0.04    | 0.12    | 0.10    | 0.09    | 0.03    |
|                                                  | 77.27   | 91.07   | 101.40  | 99.81   | 98.64   | 88.48   |
| som in dB                                        | 105.15  |         |         |         |         |         |
| Vmax,BTS in referentiesituatie                   | 0.18    |         |         |         |         |         |
| Procentuele reductie                             | -14%    |         |         |         |         |         |

