Cohere Consultants
Bergstraat 29
Postbus 1755
3811 NE Amersfoort
info@cohereconsult.com

MEMO

Titel:	Vervolgstudie aspot- en bodemtrillingen
Opdrachtgever:	ProRail
Contactpersoon:	ir. H. Zandberg
Opgesteld door:	Ir. E.J. Vlijm
Datum:	28 September 2022
Referentienummer:	MEM20220901
Status:	Definitief
Paraaf:	

Contents

Inleiding 3
DEEL 1: NADERE ANALYSES VIRM-PASSAGES 5
Uitvoeren regressieanalyse 5
Tijdsvenster in midden signalen 6
Resultaten regressieanalyse Vrms aspot tegen bodemtrillingen 6
Resultaten trillingsmetingen in golflengtedomein 7
Modelanalyse aspottrillingsniveaus Ricardo 10
DEEL 2: NADERE ANALYSE GOEDERENTREINPASSAGES DEN BOSCH ZUID 13
Aanleiding onderzoek deel II 13
Selectieprocedure treinpassages 13
Resultaten trillingssignalen in golflengtedomein 15
CONLUSIES EN AANBEVELINGEN 21
Conclusies 21
Aanbevelingen 22

Inleiding

Aanleiding

In samenwerking met Ricardo B.V. heeft Cohere Consultants in opdracht van ProRail een onderzoek uitgevoerd naar de relatie tussen trillingssignalen gemeten in de bodem als gevolg van een passerende VIRM en aspotversnellingen gemeten aan dezelfde VIRM ten tijde van de passage. Hierbij zijn drie locaties onderzocht en zijn per locatie voor 20 passages de bodem- en aspottrillingen vergeleken. De resultaten van het onderzoek worden beschreven in het rapport 'Onderzoek trilingsniveaus en aspotversnellingen VIRM, A2 corridor', 23 november 2021, met referentie CC-REP20211104. De resultaten van het onderzoek uit 2021 gaven aanleiding om een vervolgonderzoek uit te voeren.

In het onderzoek van november 2021 is gekeken naar hoe het gemeten trillingsniveau aan de as zich verhoudt tot het gemeten trillingsniveau in de bodem naast de spoorbaan. Bij twee van de drie locaties is er sprake van een stijve zandige ondergrond, bij één locatie is er sprake van een meer slappe klei/veen bodem. De analyse is uitgevoerd per tertsband in het frequentiedomein. Voor de stijve zandige ondergrond laten de hogere frequentiebanden (25 – 40 Hz) relatief veel inhoud zien in de bodemtrillingssignalen, terwijl de locatie met slappere klei/veen bodem vooral inhoud laat zien in de 10 – 15 Hz banden. De aspottrillingen laten voor alle drie locaties relatief veel inhoud in de lage frequentiebanden zien (4- 6 Hz).

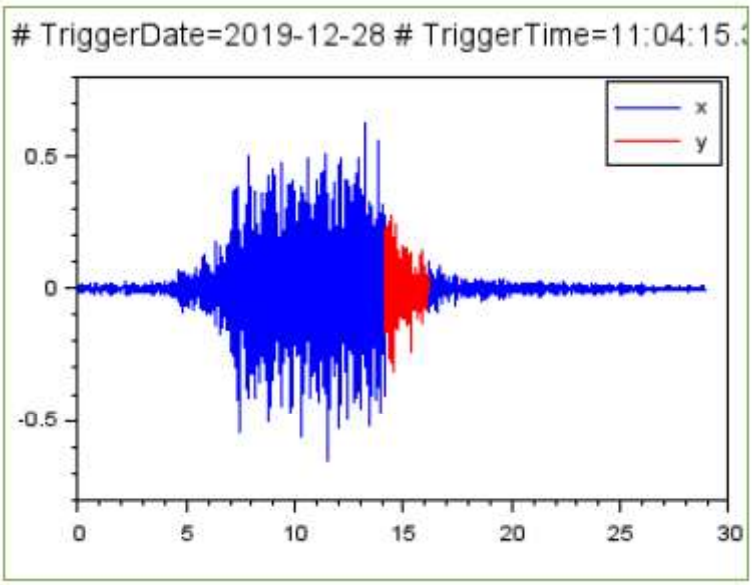
In het onderzoek van november 2021 is aanvullend gekeken of er sprake is van statistisch significante relaties tussen aspot- en bodemsignaal. Er werd echter geen statistisch significante lineaire relatie gevonden in de verschillende frequentiebanden tussen aspottrillingsniveau en bodemtrillingsniveau binnen het tijdsvenster van gemeten bodemtrillingen. Verwacht werd dat tenminste voor een aantal tertsbanden wel een statistisch verband zou worden aangetoond. De Vrms-niveaus van de trillingssignalen, berekend over de totale passagetijd, laten wel een dergelijke relatie zien.

Bovenstaande duidt erop dat de keuze voor de lengte en positie van het tijdsvenster waarin beide signalen met elkaar vergeleken worden meer van invloed is dan eerder werd aangenomen. Deze conclusie was aanleiding een nieuw vervolgonderzoek op te stellen zodanig dat de lengte en positie van het tijdsvenster veel minder van invloed is op de resultaten.

Uitgevoerd onderzoek

Voor het vervolgonderzoek was het de wens nader te kijken naar de relatie tussen aspotsignaal en bodemtrillingssignaal van treinpassages zodanig dat de lengte en positie van het tijdsvenster minder invloed heeft op de gevonden resultaten. In het onderzoek van november 2021 was het tijdvenster zodanig gekozen dat het bodemtrillingssignaal in de tijd overeenkomt met het tijdstip waarop de geïnstrumentaliseerde as zich recht voor de meetopstelling bevindt. Omdat de geïnstrumenteerde as met versnellingsopnemers zich bevindt in het draaistel van één van de koprijtuigen van een VIRM, is de passage van deze as (afhankelijk van de rijrichting) soms terug te vinden aan het begin en soms aan het eind van het gemeten bodemtrillingssignaal. Aan het begin of eind van een treinpassage is de invloed van nabijgelegen assen minder aanwezig in het bodemtrillingssignaal. Het gekozen tijdvenster met geïnstrumenteerde as aan het eind van het bodemtrillingssignaal levert dan lagere trillingsniveaus op ten opzichte van een tijdsvenster in het midden (zie Figuur 1 voor illustratie). Om deze reden is een vervolgonderzoek opgezet waarin de VIRM-passages nader zijn uitgewerkt waarin met bovenbeschreven fenomeen rekening gehouden wordt door een tijdsvenster in het midden van het signaal te kiezen.

Figuur 1 Voorbeeld van schatting tijdsvenster (rood gemarkeerd) aan het einde van het signaal doordat geïnstrumenteerde as aan het een-na-laatste draaistel is gemonteerd.



In het vervolgonderzoek is gewerkt met drie Sprints. Gedurende de Sprints zijn de resultaten van de uitgevoerde acties van de betreffende Sprint besproken en is in gezamenlijkheid (ProRail, Ricardo en Cohere) de vervolgstap bepaald. Deze aanpak is gekozen omdat de resultaten van elke stap tot nieuwe inzichten leidt, maar ook tot nieuwe vragen en vervolgonderzoek. Uiteindelijk hebben de drie Sprints geleid tot een onderzoek dat kan worden opgedeeld in twee delen:

- Deel 1: Nadere uitwerking VIRM-passages
- Deel 2 Vervolganalyses goederentreinpassages meetlocatie Den Bosch Zuid

In deel I van deze memo worden de resultaten besproken van een uitgevoerde regressieanalyse van trillingssignalen als gevolg van VIRM-passages op de drie meetlocaties Schalkwijk, Orthen en Den Bosch Zuid.

In deel I worden vervolgens de resultaten gepresenteerd van een modelonderzoek naar de invloed van rijsnelheid, baanstijfheid en radafstand (afstand tussen assen binnen draaistel). Dit om de gevonden verschillende tussen de meetlocaties nader te onderzoeken. Het onderzoek is uitgevoerd door Ricardo.

In Deel II worden de resultaten besproken van de onderzoeksstap waarbij specifiek voor de meetlocatie Den Bosch Zuid beschikbare goederentreinpassages nader zijn onderzocht. Hierbij is gezocht naar mogelijk slecht onderhouden wielen in zowel een QuoVadis dataset als een bodemtrillingsdataset. Uit de resultaten van deel I volgde namelijk dat de locatie Den Bosch Zuid naar verwachting het meest geschikt is voor het identificeren van slecht onderhouden wielen.

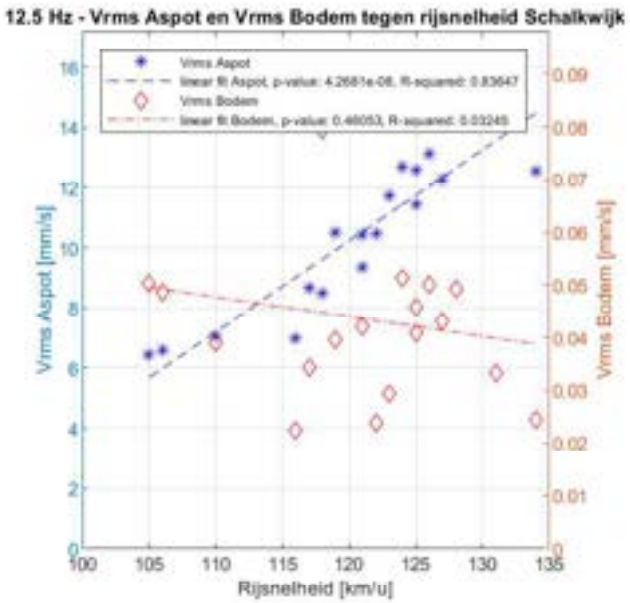
DEEL 1: NADERE ANALYSES VIRM-PASSAGES

Uitvoeren regressieanalyse

Als eerste stap in de vervolgstudie is een regressieanalyse uitgevoerd van trillingssignalen als gevolg van VIRM-passages op de drie meetlocaties Schalkwijk, Orthen en Den Bosch Zuid. Hiertoe is MATLAB R2021b gebruikt. Voor elke dataset waarop een regressieanalyse is uitgevoerd zijn de volgende stappen gezet:

1. Regressiebepaling: de dataset is benaderd met een lineaire functie (fit met kleinste kwadraten methode);
2. Bepaling R-kwadraat: R-kwadraat geeft een waardering aan hoe goed de lineaire fit de datapunten benadert en ligt meestal tussen de 0 en 1. Hoe dichter bij 1 hoe beter de lineaire lijn de datapunten fit.
3. Vervolgens is een F-test uitgevoerd;
4. Met de F-test is een p-waarde bepaald. Een p-waarde van 0,05 of minder (5%) wordt vaak gehanteerd als drempelwaarde om te bepalen of er sprake is van een statistisch significante relatie (In dit geval dus lineaire relatie). Wordt een hogere p-waarde gevonden dan betekent dit dat er een behoorlijke kans bestaat dat de dataset net zo goed met een gemiddelde waarde kan worden benaderd. In Figuur 2 wordt een voorbeeld gegeven.

Figuur 2 Voorbeeld van regressie-analyse Vrms-as en Vrms -bodem tegen rijsnelheid 12.5 Hz band Schalkwijk



In Figuur 2 is een voorbeeld gegeven van een uitgevoerde regressieanalyse. In de figuur zijn de Vrms trillingsniveaus aan de as van de VIRM alsook de gemeten Vrms trillingsniveaus in de bodem uitgezet tegen de rijsnelheid. Uit de figuur volgt dat de Vrms niveaus aan de as van de VIRM een lineaire trend laten zien waarbij met toenemende rijsnelheid het Vrms niveau toeneemt (positieve richtingscoëfficiënt). De blauwe gestippelde lijn is de lineaire functie die de dataset het beste benadert (kleinste kwadraten methode). Uit de F-test volgt een kleine p-waarde (<0,01), wat betekent dat de lineaire benadering statistisch gezien significant is en de data veel beter benadert dan een gemiddelde constante waarde. Hierbij geldt dat de R^2-waarde dicht bij 1 ligt, wat erop duidt dat de meeste datapunten dichtbij bij de lineaire lijn liggen. Wordt gekeken naar de Vrms niveaus in de bodem uitgezet tegen de rijsnelheid dan geldt dit niet. Er blijkt veel variatie en op het oog een willekeurige

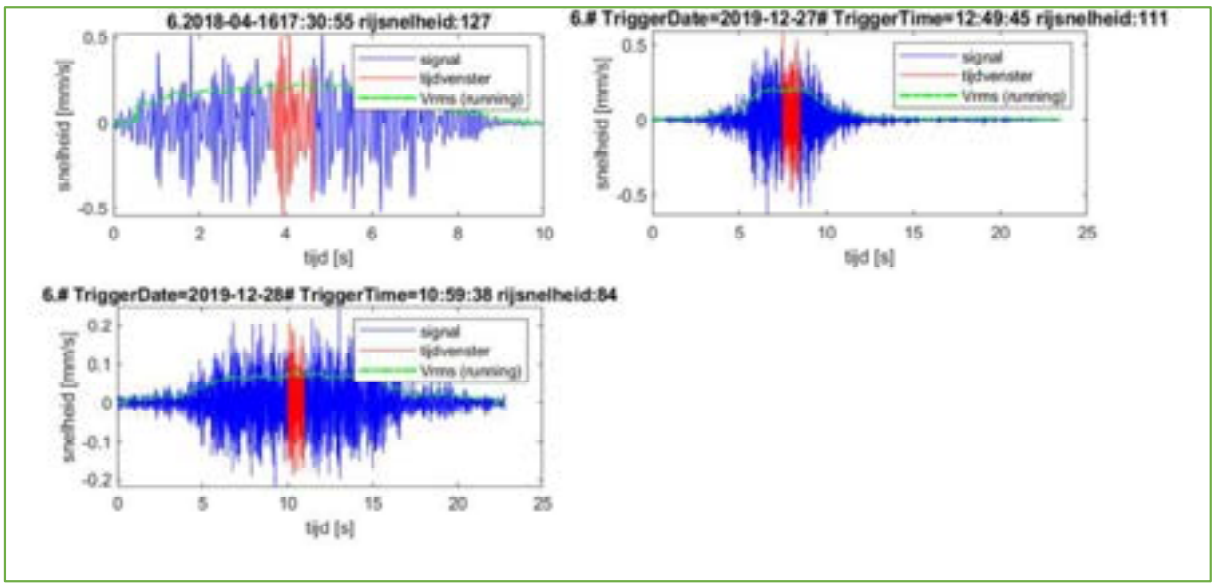
verdeling met rijsnelheid. Dit volgt ook uit de F-test. De p-waarde bedraagt 0.96 wat veel hoger is dan 0,05. Dit wil zeggen dat een constante gemiddelde waarde mogelijk net zo goed de dataset benadert als de lineaire functie. Ook benadert de lineaire lijn de datapunten niet goed (lage R^2-waarde). In dit voorbeeld is de lineaire functie overigens ook vrijwel een constante lijn (rode gestreepte lijn), wat de willekeurige verdeling verder benadrukt. Uiteindelijk zijn regressieanalyses uitgevoerd van:

- Trillingsniveau Vrms Aspot en Bodem versus rijsnelheid;
- Trillingsniveau Vrms Bodem versus Aspot.

Tijdsvenster in midden signalen

Van alle beschikbare passages is het tijdsvenster bepaald rond het midden van het signaal. In Figuur 3 wordt voor het 1-secondetijdsinterval de zesde passage getoond voor alle drie de locaties. In de figuren is een Vrms running weergegeven (deze Vrms wordt bepaald over het gekozen tijdsinterval). Bij een fluctuatie in het midden van het signaal is het tijdsvenster opgeschoven. In Bijlage I worden alle signalen getoond. Door het tijdsvenster op deze wijze te selecteren (niet op basis van de locatie van de geïnstrumenteerde as) wordt een eenduidiger vergelijk met de aspottrilingsmetingen voorzien. De invloed van nabijgelegen wielstellen wordt namelijk constant gehouden daar waar dit niet zo is als de geïnstrumenteerde as aan het uiteinde van de passage zit.

Figuur 3 Tijdsvenster (1seconde-interval) rond midden signaal 6e passage Schalkwijk (linksboven), Orthen (rechtsboven) en Den Bosch Zuid (linksonder)



Resultaten regressieanalyse Vrms aspot tegen bodemtrillingen

Vervolgens zijn de aspottrillingsniveaus in Vrms uitgezet tegen bodemtrillingsniveaus in Vrms per tertsband. De gevonden p-waarden en R^2-waarden van de lineaire benaderingen worden weergegeven in Tabel 1 en 2. In Bijlage II worden de resultaten in grafiekvorm weergegeven voor een 1seconde-interval en 2-secondeninterval.

Tabel 1. Gevonden p-waarde lineaire benadering Vrms aspot versus bodem 1seconde-interval

Frequentieband in Hz (tertsband)	Schalkwijk		Orthen		Den Bosch Zuid	
	p-waarde	R^2 waarde	p-waarde	R^2 waarde	p-waarde	R^2 waarde
4 Hz	0.09	0.16	0,75	0,01	0,91	0,00
5 Hz	0.17	0.11	0,90	0,00	0,20	0,10
6.3 Hz	0.74	0.01	0,04	0,21	0,77	0,00
8 Hz	0.05	0.21	0,15	0,11	0,15	0,13
10 Hz	0.01	0.36	0,67	0,01	0,95	0,00
12.5 Hz	0.76	0.01	0,37	0,05	0,54	0,02
16 Hz	0.08	0.17	0,88	0,00	0,63	0,01
20 Hz	0.03	0.25	0,23	0,08	0,23	0,09
25 Hz	0.06	0.19	0,03	0,24	0,68	0,01
31.5 Hz	0.89	0.00	0,05	0,19	0,00	0,63
40 Hz	0.94	0.00	0,17	0,10	0,00	0,41

Tabel 2. Gevonden p-waarde lineaire benadering Vrms aspot versus bodem 2seconden-interval

Frequentieband in Hz (tertsband)	Schalkwijk		Orthen		Den Bosch Zuid	
	p-waarde	R^2 waarde	p-waarde	R^2 waarde	p-waarde	R^2 waarde
4 Hz	0.08	0.17	0,84	0,00	0,94	0,00
5 Hz	0.46	0.03	0,96	0,00	0,38	0,05
6.3 Hz	0.43	0.04	0,06	0,18	0,64	0,01
8 Hz	0.25	0.08	0,50	0,03	0,32	0,06
10 Hz	0.04	0.23	0,58	0,02	0,92	0,00
12.5 Hz	0.06	0.19	0,87	0,00	0,38	0,05
16 Hz	0.31	0.06	0,03	0,22	0,94	0,00
20 Hz	0.19	0.10	0,66	0,01	0,88	0,00
25 Hz	0,03	0,26	0,09	0,16	0,69	0,01
31.5 Hz	0,76	0,01	0,59	0,02	0,00	0,59
40 Hz	0,40	0,04	0,49	0,03	0,00	0,48

Uit Tabellen 1 en 2 blijkt dat voor de meeste frequentiebanden er geen statistisch significante lineaire relaties worden gevonden op alle drie de meetlocaties. Echter er zijn enkele frequentiebanden aan te wijzen waarvoor wel een statistisch significante lineaire relatie wordt gevonden, daarbij geldt dat er wel sprake is van veel spreiding (R^2-waarde ligt niet dicht bij 1 maar is in verhouding tot andere frequentiebanden wel hoog). Deze waarden zijn groen weergegeven in de tabellen.

Voor de locatie Schalkwijk blijkt dit het geval te zijn rond de 10 Hz en 20-25 Hz, voor de locatie Orthen rond de 25-31,5 Hz en voor de locatie Den Bosch Zuid rond de 31.5 - 40 Hz. Er is hierbij enig verschil tussen het 1-secondeinterval en 2-secondeninterval. Voor de regressie-analyses gepresenteerd in grafiekvorm wordt verwezen naar Bijlage II.

Resultaten trillingsmetingen in golflengtedomein

Uit de resultaten blijkt dat voor sommige frequentiebanden er wel een relatie lijkt te zijn tussen aspot- en bodemtrillingen. Dit ligt in lijn met de verwachting. Immers, sommige mechanismen resulteren in een verhoogd trillingsniveau ter plaatse van de as- maar ook in de bodem. De frequentie-inhoud hangt daarbij echter af van

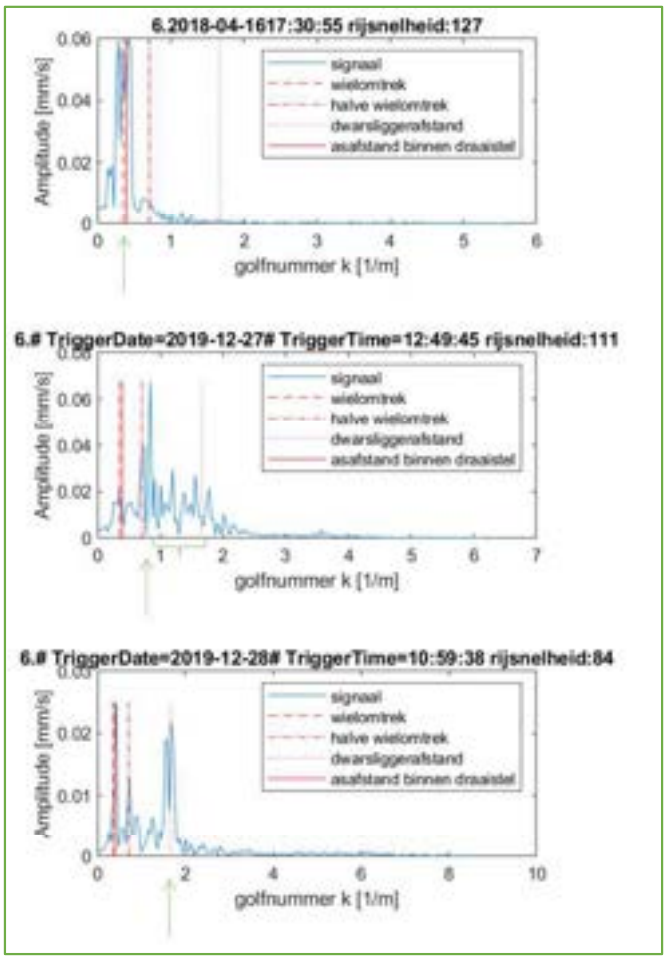
de rijsnelheid. Zo resulteren bijvoorbeeld variaties in hoogteligging afhankelijk van de rijsnelheid tot een bepaalde trillingsfrequentie in de bodem. Dit geldt eveneens voor bijvoorbeeld wielonrondheid.

Om een resultaat te generen waarin de afhankelijkheid van de rijsnelheid is verdisconteerd, is voor een trillingssignaal in de bodem een fft van het signaal gegenereerd en vervolgens uitgezet tegen het golfgetal (golfnummer) door de frequentie op de x-as te delen door de rijsnelheid. Dit levert het golfgetal (1/golflengte) behorende bij de rijsnelheid en frequentie-inhoud. Aanvullend is het golfgetal behorende bij een hele wielomtrek, halve wielomtrek, dwarsliggerafstand en asafstand van de VIRM binnen draaistel geplot.

Resultaten Bodemtrillingen

In Figuur 4 wordt het resultaat gegeven voor één van de VIRM-passages voor alle drie de locaties. Op te merken valt dat door de inhoud van de signalen zo uit te zetten tegen golfgetal er de indruk wordt gewekt dat de inhoud van het signaal behorende bij een bepaald golfgetal altijd het gevolg is van een bepaalde geometrische onregelmatigheid (of stijfheidsvariatie) met een bepaalde golflengte. Dit hoeft natuurlijk niet zo te zijn. Er kan ook een dynamische kracht op de bodem worden uitgeoefend door eigenbewegingen van het voertuig. Dit resulteert ook in bepaalde frequenties in het trillingssignaal. In de interpretatie van Figuur 4 dient hier rekening mee te worden gehouden.

Figuur 4 Signaalinhoud bodem uitgezet tegen golfgetal signaal 6e passage Schalkwijk (boven), Orthen (midden) en Den Bosch Zuid (onder)

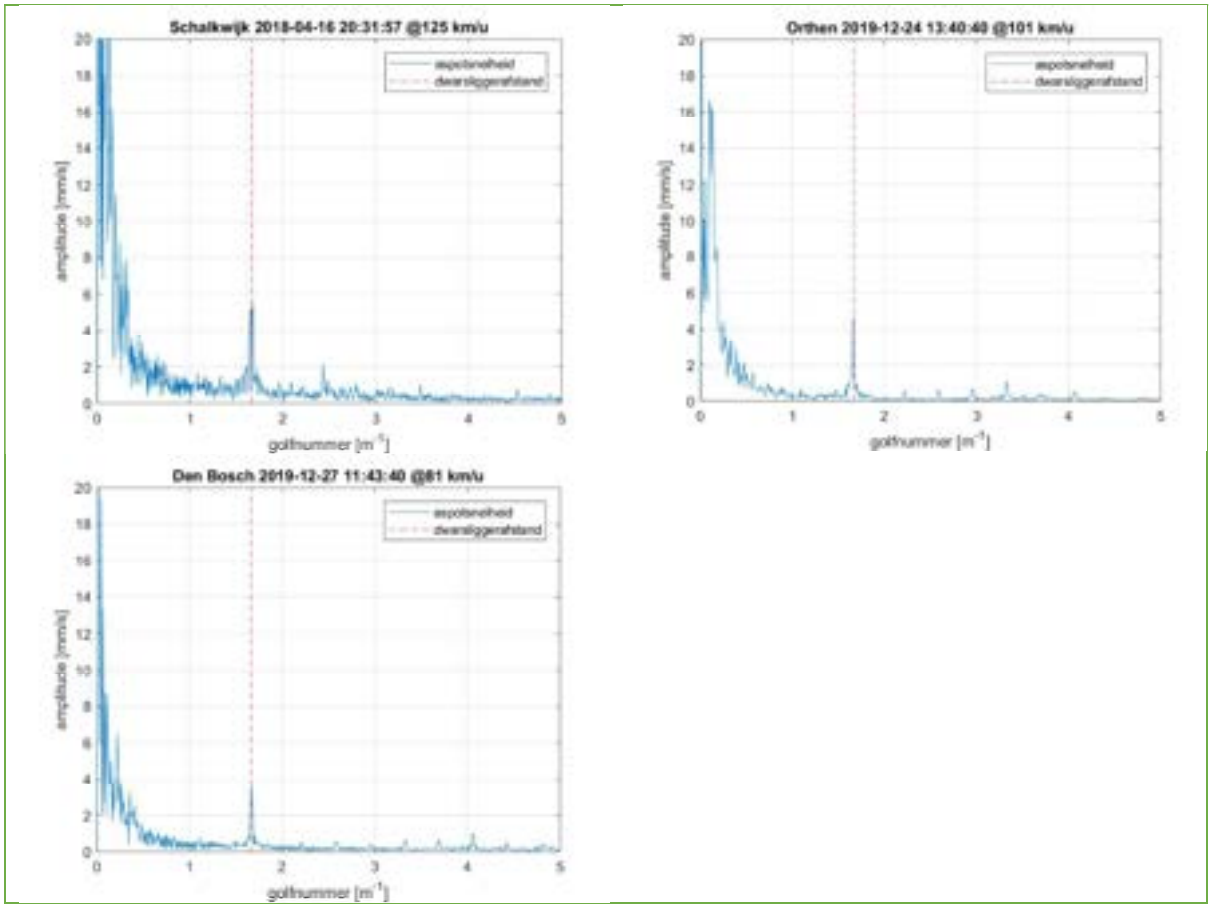


Uit Figuur 4 blijkt dat de trillingsinhoud van het bodemsignaal op de drie locaties verschillen laten zien wat betreft maatgevende golflengte en bijbehorende golfgetal. Daar waar de dwarsliggerafstand in Den Bosch duidelijk naar voren komt, lijkt de wielomtrek en asafstand binnen het draaistel (liggen dicht bij elkaar wat betreft golflengte) in Schalkwijk dominant (zie groene pijlen). Voor Orthen lijkt de halve wielomtrek terug te komen in het signaal. In Bijlage III worden de resultaten voor alle passagesignalen gegeven. De resultaten gevonden voor passage 6 lijken vergelijkbaar met de andere passages. Er wordt een consistent beeld gevonden. Passage 6 is willekeurig gekozen.

Resultaten Aspottrillingen

Voor de aspottrillingssignalen is eveneens de trillingsinhoud uitgezet tegen het golfgetal door de x-as van spectraplots te delen door de rijsnelheid. In Bijlage IV zijn de resultaten voor alle passages gegeven. In Figuur 5 worden voor de drie locaties de aspottrillingssignalen tegen golfgetal weergegeven. Uit de figuur volgt dat de dwarsliggerafstand duidelijk terugkomt voor alle drie de locaties. Daarnaast is er vooral inhoud terug te vinden bij heel grote golflengtes (en dus kleine golfgetallen), dat wil zeggen bij lage frequenties.

Figuur 5 Signaalinhoud Aspot uitgezet tegen golfgetal signaal 6e passage Schalkwijk (linksboven), Orthen (rechtsboven) en Den Bosch Zuid (linksonder)

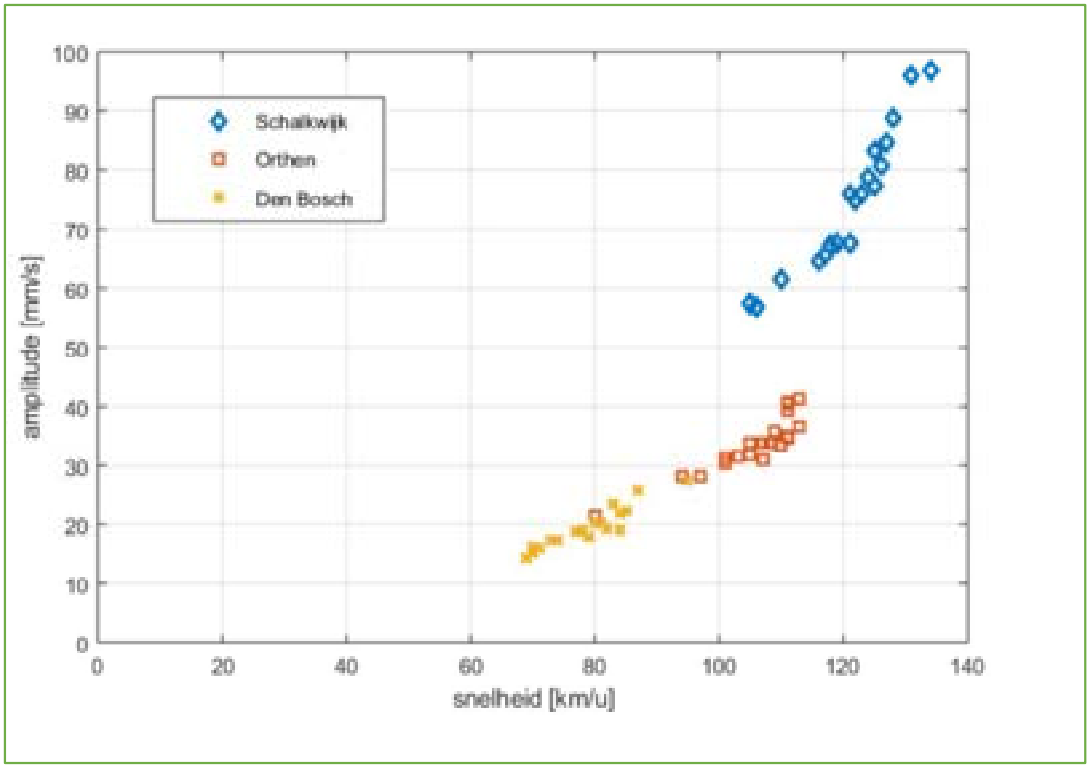


Wordt Figuur 5 vergeleken met Figuur 4 dan blijkt dat daar waar ter plaatse van de as de dwarsliggerafstand duidelijk terugkomt op alle drie de locaties, in de bodem de dwarsligger afstand vrijwel alleen ter plaatse van Den Bosch Zuid wordt teruggevonden. Een mogelijke verklaring kan zijn dat de bodemgesteldheid verschilt tussen de drie locaties. Ter plaatse van Den Bosch is veel stijvere zandbodem aanwezig dan ter plaatse van Schalkwijk waar slappere kleigrond aanwezig is als bovenste laag. Ter plaatse van Orthen is meer zandgrond

aanwezig maar wellicht minder stijf dan ter plaatse van Den Bosch. Daarnaast ligt het spoor in Den Bosch enigszins op een talud terwijl dit op de andere twee locaties niet het geval is.

Door Ricardo is het gemeten trillingsniveau aan de as gefilterd met een bandpassfilter rondom de dwarsliggerafstand van 0.6m. Voor elke passage is vervolgens de gemiddelde amplitude uitgezet tegen de rijsnelheid (zie ook Bijlage V). In Figuur 6 is het resultaat weergegeven. Uit de figuur blijkt een duidelijke trend waarbij het trillingsniveau aan de as toeneemt met rijsnelheid. Wat daarbij met name opvalt is de stap in amplitude tussen Schalkwijk en de andere twee locaties. De amplitude van de aspotsnelheid ten gevolge van de dwarsliggers is bij Schalkwijk structureel hoger.

Figuur 6 Trillingsniveau Aspot uitgezet tegen rijsnelheid voor het golflengtebereik rond 0,6 m voor alle drie de meetlocaties



Modelanalyse aspottrillingsniveaus Ricardo

Om beter inzicht te krijgen in mogelijke verschillen tussen de drie locaties en wat voor invloed dit heeft op de gemeten trillingsniveaus is door Ricardo een modelanalyse gedaan. Daarin is onderzocht wat de invloed van rijsnelheid en bodemstijfheid is op het aspottrillingsniveau. Het vermoeden bestond namelijk dat de verschillen die zijn gevonden in maatgevende frequentieband en trillingsniveau tussen Schalkwijk enerzijds en Orthen/Den Bosch anderzijds te maken heeft met de ondergrond (slappe ondergrond Schalkwijk en meer stijve zandgrond in Orthen/Den Bosch).

De modelanalyse is uitgevoerd met een dynamisch voertuig-baan model. Dit is een door Ricardo ontwikkeld model waarmee de belasting op de infrastructuur kan worden bepaald ten gevolge van een rijdende trein. Het bevat een dynamisch model van voertuig en baan die onderling zijn gekoppelde middels de wiel-rail kracht. In Bijlage V (Notitie Ricardo Modelsimulaties) is het model in meer detail beschreven. Met het door Ricardo ontwikkelde baanmodel kan worden gevarieerd in rijsnelheid, as-afstand, baanstijfheid en baanopbouw. Daarmee ontstaat de mogelijkheid met een model de gemeten verschillen tussen de drie meetlocaties beter te kunnen verklaren.

Met het model is een set simulaties uitgevoerd waarmee de invloed van de dwarsliggers op de aspotrillingen is bepaald. Met dit doel zijn de volgende aspecten gevarieerd:

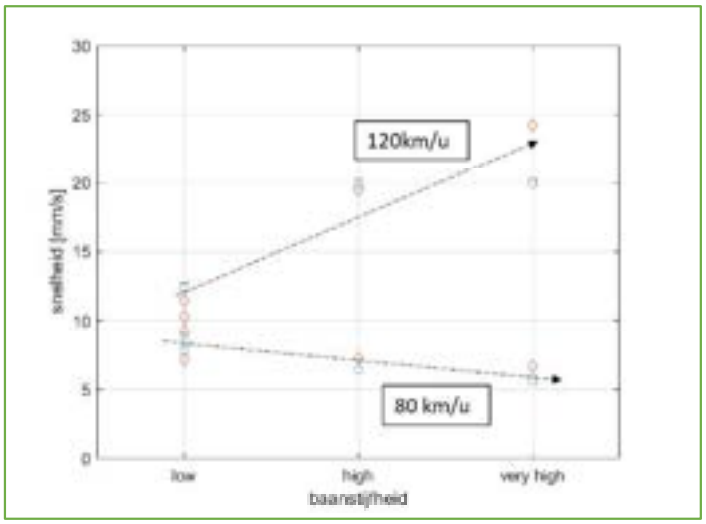
- 2 rijsnelheden: 80 km/u en 120 km/u
- 2 asafstanden: 1,8 m en 2,1 m;
- 3 baanstijfheden: laag, gemiddeld en hoog
- 2 variaties in baanopbouw: Wel of geen PSS-laag

De instellingen zijn zo gekozen dat deze representatief zijn voor goederen als voor reizigerstreinen in voor het Nederlandse spoor. Omwille van de snelheid van simuleren is gebruik gemaakt van een halve trein met één draaistel. De simulaties zijn uitgevoerd bij een aslast van 20 ton. Representatief voor een beladen goederenwagen en een beladen VIRM-treinstel. De 2 asafstanden van het draaistel zijn zo gekozen dat deze in fase is met de dwarsliggerafstand (bij 1.8m) of juist uit fase van de dwarsliggerafstand (bij 2.1m).

Als resultaat is per simulatie de gemiddelde amplitude van de trillingsnelheid van de aspot bepaald. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen de 1^{e} en 2^{e} as van een draaistel. Hiermee zijn figuren gemaakt waarmee de invloed op de trillingssnelheid ten gevolge van dwarsliggers is bepaald. De figuren worden weergegeven in Bijlage V.

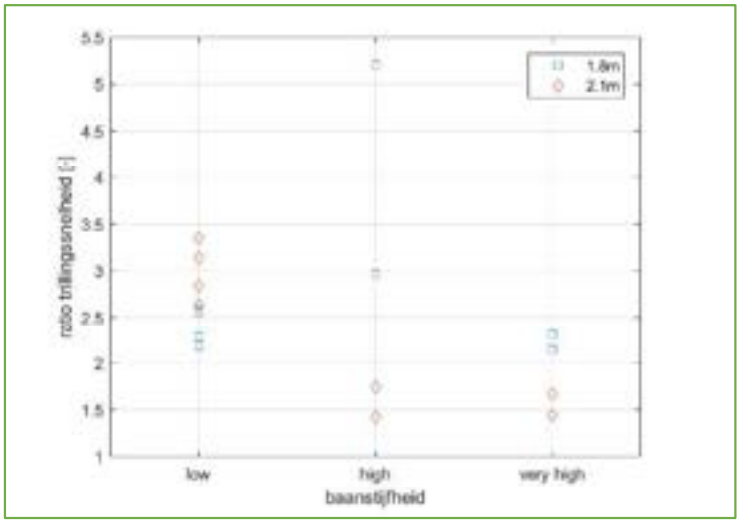
Wordt gekeken naar de invloed van baanstijfheid dan blijkt ten eerste dat het trillingsniveau bij 120 km/u structureel hoger ligt dan bij 80 km/u (zie Figuur 7). Dit is lijn met de verwachtingen. Wat opvallend is, is dat de rijsnelheid de relatie tussen baanstijfheid en trillingsniveau sterk beïnvloedt. Voor een rijsnelheid van 120 km/u neemt het trillingsniveau toe met een toename in baanstijfheid. Voor een rijsnelheid van 80 km/u neemt het trillingsniveau juist af naarmate de baanstijfheid toeneemt. Dit laat goed zien dat dat de interactie tussen voertuig en baan complex is en trends niet zondermeer generiek zijn.

Figuur 7 Gemiddelde trillingssnelheid assen draaistel onder invloed van baanstijfheid en rijsnelheid (zie ook bijlage V)



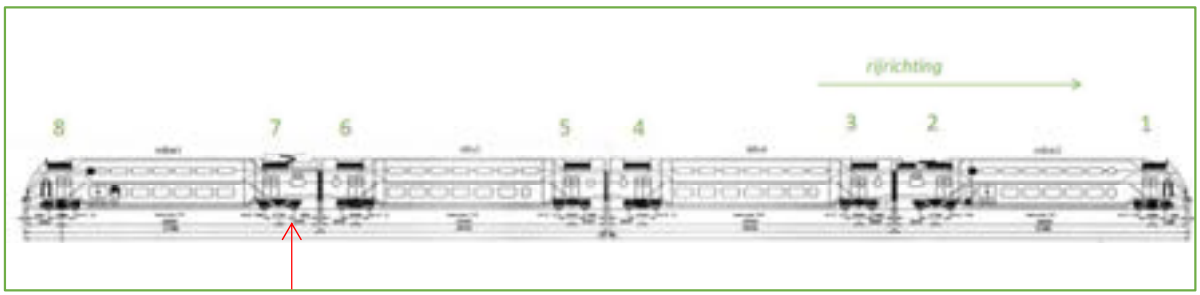
Vervolgens is gekeken naar het verschil tussen trillingsniveaus van beide assen van een draaistel (vooroplopende en achteroplopende as) waarbij is gevarieerd tussen een radafstand (afstand tussen assen binnen een draaistel) van 1,8 m en 2,1 m. Uit de resultaten blijkt dat de amplitude van de vooroplopende as structureel hoger is dan die van de achteroplopende as. Het verschil in amplitude varieert daarbij tussen de 1.5 en 3.5, afhankelijk van baanstijfheid en rijsnelheid en asafstand (zie Figuur 8). Bij een van de simulaties was het verschil zelfs factor 5 doordat er een vorm van resonantie optreedt. Dit is wederom een bevestiging dat het dynamisch gedrag zicht niet altijd goed laat voorspellen.

Figuur 8 Ratio van aspottrillingssnelheid (vooroplopende en achteroplopende as) tegen baanstijfheid (zie ook bijlage V)



Uit de resultaten volgt dat het verschil tussen de trillingssnelheid van de vooroplopende as en de achteroplopende as 2 van een draaistel verschilt door de radstand en de baanstijfheid. Wanneer de resultaten van de simulaties worden vergeleken met de drie meetlocaties waarvoor de VIRM-passages zijn onderzocht, dan kan worden geconcludeerd dat de simulatieresultaten de sprong in gemeten amplitude tussen Schalkwijk en de twee locaties Den Bosch Zuid en Orthen mogelijk verklaren. In Schalkwijk rijdt de VIRM namelijk over het dichtstbijzijnde spoor naar het zuiden en zijn de aspottrillingsniveaus afkomstig van de vooroplopende as (zie Figuur 9), terwijl voor de andere twee locaties het precies andersom is en de trillingsniveaus dus van de achteroplopende as afkomstig zijn[1]. De resultaten laten ook zien dat de dynamische interactie tussen voertuig en baan erg complex is. Uiteindelijk zijn de verschillen tussen de drie locaties een optelsom van verschillende invloeden waarbij ook de bodemstijfheid een belangrijke parameter van invloed is.

Figuur 9 Geïnstrumenteerde as aan draaistel 7 (rode pijl). Afhankelijk van rijrichting (in figuur rijrichting zoals in Schalkwijk) is dit vooroplopend of achteroplopend.



[1] Op de meetlocatie Schalkwijk is ook sprake van slappere ondergrond wat ook kan verklaren waarom hogere trillingsniveaus in de bodem worden gemeten.

DEEL 2: NADERE ANALYSE GOEDERENTREINPASSAGES DEN BOSCH ZUID

Aanleiding onderzoek deel II

Uit de resultaten van deel I blijkt dat voor VIRM-passages op de meetlocatie Den Bosch Zuid de dwarsliggerafstand zowel terugkomt in de trillingsmetingen in de bodem als in de aspotmetingen. Voor de andere twee locaties blijkt dit niet het geval en wordt de dwarsliggerafstand alleen ter plaatse van de aspot teruggevonden.

De resultaten zijn een aanvulling op eerder uitgevoerd onderzoek naar de relatie tussen aspot- en bodemtrillingen op de drie meetlocaties Schalkwijk, Orthen en Den Bosch Zuid ('Onderzoek trillingsniveaus en aspotversnellingen VIRM, A2 corridor', 23 november 2021, met referentie CC-REP20211104). Uit het eerdere onderzoek bleek dat hogere trillingsfrequenties (frequentiebanden 31.5 en 40 Hz) in Den Bosch Zuid sterker in de bodemtrillingen werden teruggevonden dan met name in Schalkwijk. Bij een rijsnelheid van 20-30 m/s resulteert een dwarsliggerafstand tot een frequentie van 28-40 Hz wat tot inhoud in de frequentiebanden 31.5 en 40 Hz resulteert.

De VIRM-passages kennen relatief weinig variatie wanneer naar treinkarakteristieken wordt gekeken. Ook geldt dat de geïnstrumenteerde VIRM naar verwachting relatief goed onderhouden wielen kent. De invloed van wielonrondheid wordt daarom niet of nauwelijks teruggevonden in de analyse van de VIRM-passages. Wat uit de analyse is geconcludeerd is dat wanneer wielonrondheid wel een rol zou spelen dit mogelijk het beste teruggevonden wordt op de locatie Den Bosch Zuid waar hogere frequentie-inhoud het beste wordt teruggevonden in de trillingsmetingen in de bodem.

Door Cohere Consultants is voor de locatie Schalkwijk in een eerder onderzoek onderzocht of een wielpassage van goederentreinen die tot een verhoging van de dynamische pieklast gemeten met Quo Vadis leidt, ook tot een verhoging in trillingsniveau in de bodem leidt ('Vervolgonderzoek wielonrondheid en trillingen: frequentiebandanalyse', 25 mei 2022, met referentie CC-REP20220501). De verhoogde dynamisch pieklast duidt naar verwachting op een slecht onderhouden wiel. Geconcludeerd wordt dat een statistisch significante relatie tussen Vrms-frequentiebanden in de bodem en de dynamische pieklast niet wordt gevonden wanneer naar de gehele dataset van goederentreinen wordt gekeken. Wordt naar specifieke treintypes (wagons) gekeken dan is er mogelijk wel een relatie te vinden maar wel met veel variatie. Omdat uit de combinatie van aspot- en bodemtrilllingen van VIRM-passages volgt dat de meetlocatie Den Bosch Zuid waarschijnlijk het meest geschikt is om een relatie te leggen tussen dynamische pieklast en bodemtrillingen is een vervolgstap uitgevoerd waarin goederentreinpassages voor de meetlocatie Den Bosch Zuid zijn onderzocht.

Selectieprocedure treinpassages

In de datasets van bodemtrillingen waarin de VIRM-passages aanwezig zijn, zijn ook goederentreinpassages aanwezig. De metingen waren namelijk uitgevoerd met als hoofddoel de invloed van rijsnelheid van goederentreinen op het optredende trillingsniveau in de bodem te bepalen. Er is daarom een vervolgstap uitgevoerd waarbij een aantal goederentreinpassages ter plaatse van Den Bosch Zuid is geselecteerd. Van de passages zijn de trillingssignalen in de bodem nader onderzocht om te bepalen of de invloed van slecht onderhouden wielen kan worden teruggevonden. De trillingssignalen zijn nader verwerkt met MATLAB op een gelijke wijze als de VIRM-passages waarbij naar die trillingsinhoud per golfgetal is gekeken. Deze stap kon worden gezet omdat ook de rijsnelheid van de meeste passages beschikbaar is.

Uiteindelijk is voor de locatie Den Bosch Zuid gezocht naar goederentreinpassages waarbij aan de volgende criteria wordt voldaan:

1. QuoVadis gegevens van passage beschikbaar[2];

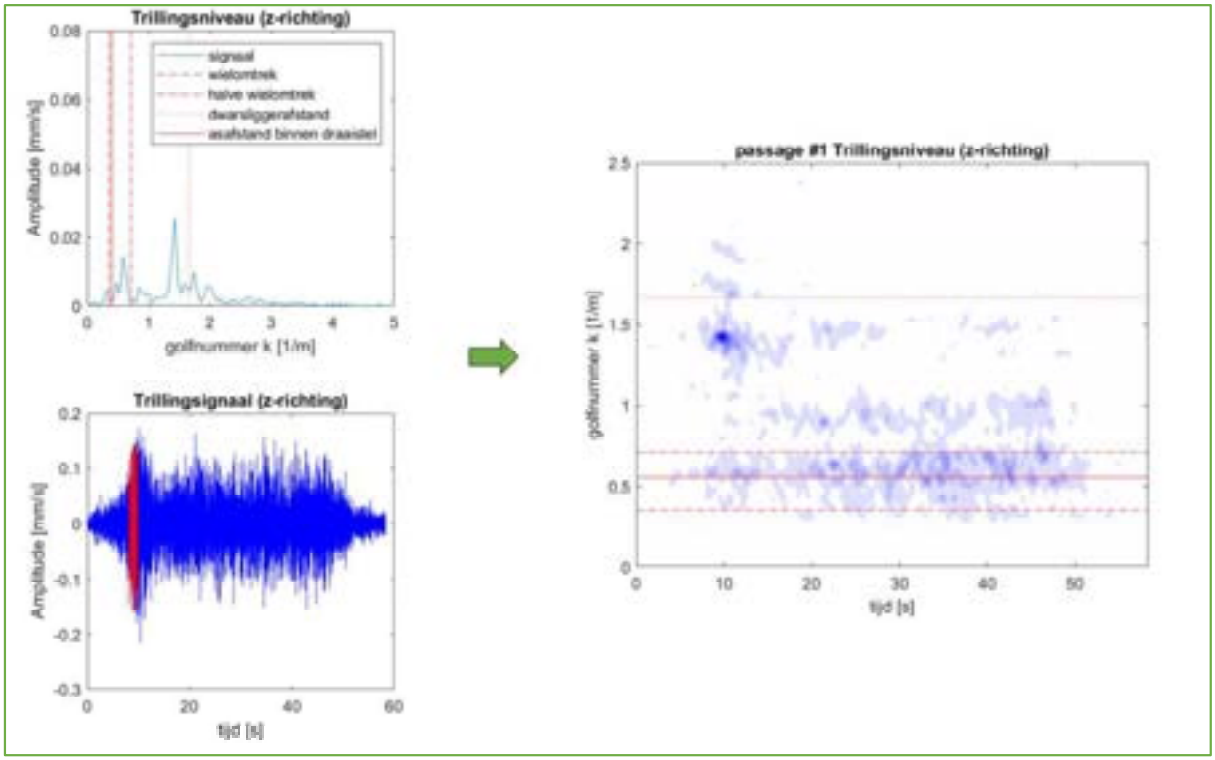
[2] In een later fase van het onderzoek bleek dat in de QuoVadis data per treinpassage de resultaten van verschillende meetstation aanwezig zijn. Voor het selectieproces geldt daarom dat voor stap 3 uiteindelijk is

2. Rijsnelheid beschikbaar;
3. Gemeten dynamische pieklast met QuoVadis toont een piek wat mogelijk duidt op een slecht onderhouden wiel;
4. Trillingssignaal in bodem eenduidig uit dataset beschikbaar

Het derde criterium is handmatig bepaald door de dynamische pieklast uitgezet tegen de treinlengte (wielnummers) visueel te onderzoeken voor passages die aan de eerste twee criteria voldoen (bleek in totaal te gelden voor tussen de 600 en 700 passages welke visueel zijn geïnspecteerd op pieken). In Figuur 11 is ter illustratie rechtsboven te zien dat er sprake is van een piek in dynamische pieklast gedurende de passage. Voor de passages die aan de eerste drie criteria voldeden is bepaald of de trillingssignalen beschikbaar waren in de dataset.

Als resultaat van het selectieproces zijn 16 trillingssignalen in de bodem op de meetlocatie Den Bosch Zuid gehanteerd om nader te onderzoek. Van deze passages bestaat op basis van de uitschieter (of uitschieters) van de dynamische pieklast ter plaatse van een QuoVadis meetstation de verwachting dat er sprake is van een slecht onderhouden wiel. Vervolgens is de frequentie-inhoud van de trillingssignalen omgezet naar de inhoud uitgezet tegen het golfgetal door te delen door de rijsnelheid. Dit levert een grafiek op waarbij de inhoud van het signaal als volgt wordt geïnterpreteerd: Welke golflengte in baan- dan wel wielonregelmatigheid zou theoretisch hebben geleid tot de inhoud van het signaal? Door deze inhoud per 1-secondetijdsinterval te bepalen wordt het signaal gescand op fluctuaties in trillingsinhoud per golflengte gedurende het signaal. Hierbij is een overlap van een 0,5 seconde gehanteerd. De resultaten van elk 1-secondetijdsinterval zijn vervolgens als contourplot uitgezet tegen de tijd. Dit wordt weergegeven in Figuur 10.

Figuur 10 Uitwerking trillingsniveau tegen golfgetal per 1-secondetijdsvenster en vervolgens contourplot van gehele passage



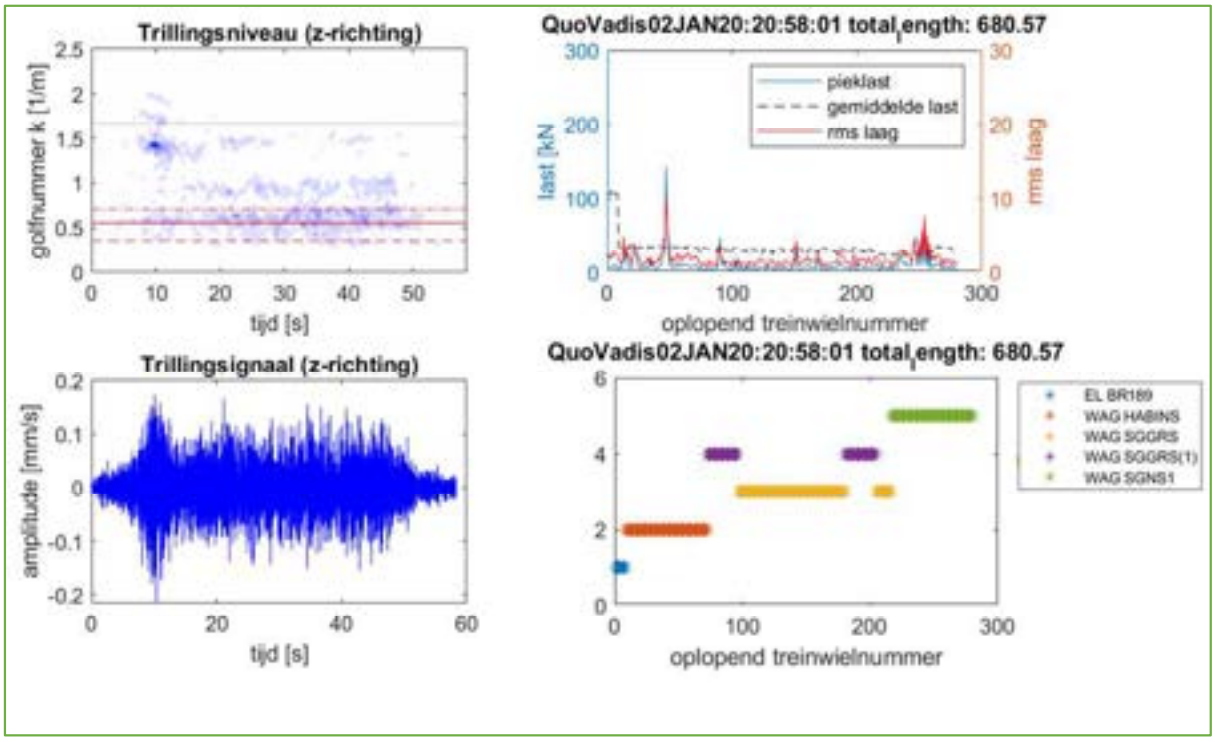
geselecteerd op de vraag of er op 1 van de meetstations een uitspringer in dynamische pieklast is gemeten. Voor de meeste passages waarvoor dit geldt, is op alle stations dan die uitspringer gemeten, maar dit bleek niet voor alle passages te gelden.

Door de contourplots te vergelijken met de gemeten QuoVadis dynamische pieklast (en RMS_laag) uitgezet tegen de treinlengte (wielnummer), is onderzocht of pieken in dynamische pieklast konden worden teruggevonden in de bodemtrillingen bij specifieke golfgetallen op de meetlocatie Den Bosch Zuid. De resultaten van de zestien passages worden gegeven in Bijlage VI.

Resultaten trillingssignalen in golflengtedomein

In Figuur 11 wordt als voorbeeld een trillingssignaal in z-richting weergegeven. In de figuur worden ook de QuoVadis gegevens getoond. In Bijlage VI zijn de resultaten voor alle 16 goederentreinpassages gegeven.

Figuur 11 Contourplot trillingsniveau uitgezet tegen golfgetal passage #1 en dynamische pieklast, gemiddelde last en rms laag uitgezet tegen wielnummers. (In contourplot rode stippellijn: dwarsliggerafstand, streep-punt: halve wielomtrek , doorgetrokken lijn: asafstand binnen draaistel, streepjeslijn: hele wielomtrek)



In Figuur 11 is linksboven de contourplot te zien. Hieruit lijkt de passage van de locomotief aan het begin van het signaal tot met name inhoud te corresponderen bij een golfgetal van 1,5. Na het begin van het signaal lijkt een golfgetal van 1,5 nauwelijks meer aanwezig. Het begin van het signaal toont ook in het tijdsdomein een enigszins verhoogd signaal (linksonder), het totale trillingsniveau ligt laag (tussen de 0,1 en 0,2 mm/s). Wordt naar de QuoVadis data gekeken dan blijkt het om een lege goederentrein te gaan (gemiddelde aslast ligt laag, zie rechtsboven). Enkel de locomotief resulteert in een hoge gemiddelde aslast. Rond ongeveer een 1/5 deel van de passage treedt een piek op zowel voor dynamische pieklast als voor rms-laag. Deze piek is niet duidelijk terug te vinden in de contourplot en ook niet duidelijk te relateren aan een bepaald golfgetal. Er zou dan een donkerblauwe vlek rond 1/5 deel van het signaal in de contourplot terug te zien zijn. Rechtsonder in de figuur wordt het type wagons en locomotief weergegeven. Dat het totale trillingsniveau laag ligt komt doordat de trein niet op het dichtstbijzijnde spoor van de meetopstelling rijdt (richting het zuiden) en doordat het om een lege goederentrein gaat.

In Tabel 3 wordt een samenvatting gegeven van alle 16 passages. Vier van de zestien goederentreinen rijden richting het noorden. Deze treinen passeren op het dichtstbijgelegen spoor en tonen ook de hoogste trillingsniveaus, namelijk 0,5 mm/s of meer. Dit betreffen ook alle vier volle goederentreinen. De andere passages resulteren in lagere trillingsniveaus. Er zijn twee specifieke type treinen te herkennen die meerdere keren zijn gepasseerd:

- Locomotief ELBR189 met type wagons WAG HABIN, WAG SGGRS en WAG SGNS1 (passages 1,2 4,5 6, 13 en 14)
- Locomotief DL HLR77 met WAG TANNOOS en/of WAG TAPPS (passages 7, 12 en 16)

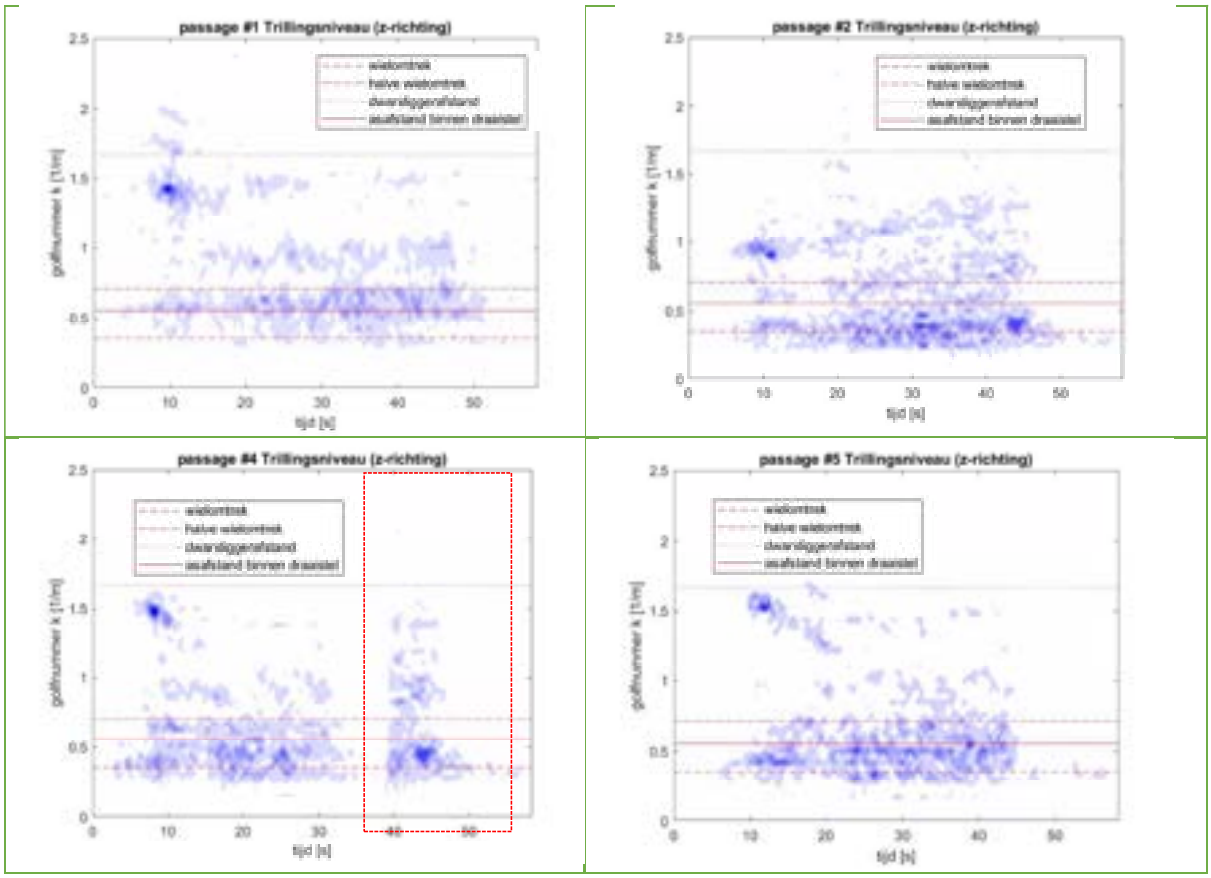
Tabel 3. Samenvatting onderzochte goederentrein signalen Den Bosch

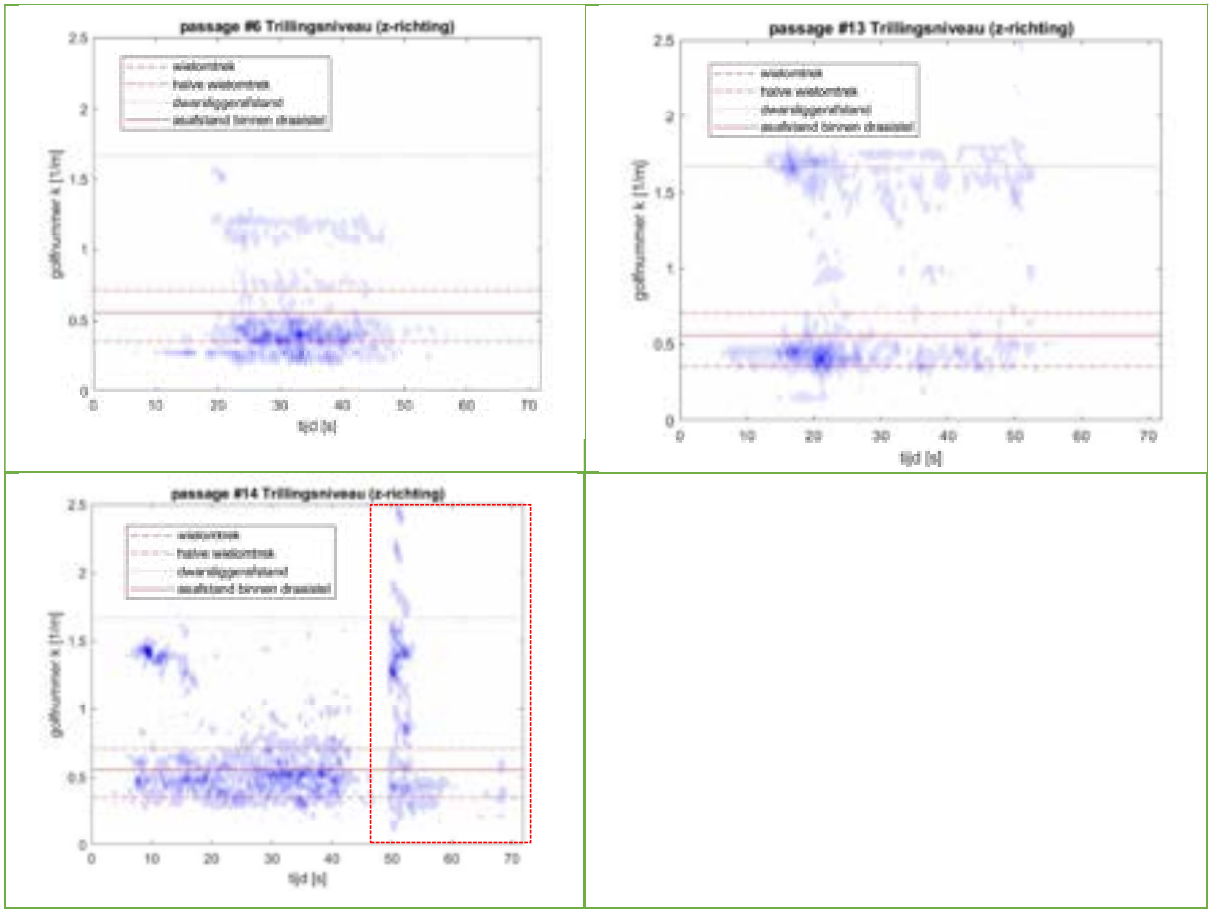
Passage	Is aan begin van signaal: piek in golfgetal te herkennen? (invloed loc)	Is gedurende rest van signaal: piek in golfgetal te herkennen? (invloed wagons)	Type loc en wagons	Treinlengte volgens QuoVadis [m]	Rijrichting	Rijsnelheid [m/s]	Trillings-niveau [mm/s]
1	k=1.5	nauwelijks	ELBR189 WAG HABINS WAG SGGRS WAG SGNS1	681	N-Z	18,9	0,1-0,2
2	k=1.0	wielomtrek, k=0.35	ELBR189 WAG HABINS WAG SGGRS WAG SGNS1	680	N-Z	27,8	0,2
3	wielomtrek, k=0.35 sterk aanwezig	wielomtrek, k=0.35 sterk aanwezig en dwarsliggerafstand sterk aanwezig	DLLok 6400 unknown	139	Z-N	22,7	0,7
4	iets onder dwarsliggerafstand k=1.5	wielomtrek k=0.35 maar niet heel sterk	ELBR189 WAG HABINS WAG SGGRS WAG SGNS1	523	N-Z	25,3	0,1-0,2
5	iets onder dwarsliggerafstand k=1.5 en wielomtrek	wielomtrek k=0.35 maar niet heel sterk	ELBR189 WAG HABINS WAG SGGRS WAG SGNS1	680	N-Z	23,7	0,1-0,2
6	wielomtrek, k=0.35 sterk aanwezig	wielomtrek, k=0.35 sterk aanwezig	ELBR189 WAG HABINS WAG SGGRS WAG SGNS1	657	N-Z	22,4	0,4-0,5
7	1.2 en 0.35 beide sterk aanwezig	1.2 en 0.35 beide sterk aanwezig	DL HLR77 WAG TANNOOS	374	Z-N	26,3	0,5-0,6
8	vooral 1.2	vooral 1.2	ELBR189 WAG FALNS 5_1 WAG FALNS 5_2	355	N-Z	19,3	0,1-0,2
9	vooral wielomtrek 0.35	vooral wielomtrek 0.35	EL BR186 (Traxx) WAG SGNS1	296	N-Z	24,2	0,1-0,15
10	nauwelijks	dwarsliggerafstand maar niet overtuigend	ELBR186 (Traxx) WAG TANNOOS WAG TAPPS	282	N-Z	14,2	0,1-0,15
11	niet duidelijk onderscheid	halve wielomtrek k=0.7 (lege deel FALNS) volle deel net iets onder dwarsliggerafstand k =1.5	EL Lok 1600/1700/1800 WAG FALNS 5_1 WAG SHMMNS1	494	N-Z	19,0	0,2-0,3
12	hele wielomtrek k=0.35 en net onder dwarsliggerafstand	hele wielomtrek k=0.35 en net onder dwarsliggerafstand	DL HLR77 WAG TAPPS	359	Z-N	23,8	0,5-0,6
13	hele wielomtrek k=0.35 en dwarsliggerafstand	hele wielomtrek k=0.35 en dwarsliggerafstand maar minder overtuigend als in begin signaal	ELBR189 WAG HABINS WAG SGGRS WAG SGNS1	679	Z-N	20,0	0,5
14	hele wielomtrek k=0.35 en dwarsliggerafstand	hele wielomtrek k=0.35 en dwarsliggerafstand maar niet overtuigend	ELBR189 WAG HABINS WAG SGGRS WAG SGNS1	680	N-Z	23,0	0,2
15	net onder dwarsligger (niet overtuigend)	nauwelijks	ELBR189 WAG LAAGRS 80	560	N-Z	23,9	0,1-0,2
16	k=1.2	hele wielomtrek k=0.35 niet overtuigend	DL HLR77 WAG TANNOOS WAG TAPPS	342	N-Z	24,4	0,2

Voor de twee type goederentreinen die meerdere keren zijn gepasseerd worden de contourplots voor het trillingsniveau in z-richting weergegeven in Figuur 12 en 13 (voor alle passages zie Bijlage VI). Uit Figuur 12 volgt dat de goederentrein met locomotief ELBR189 en type wagons WAG HABIN, WAG SGGRS en WAG SGNS1 een vrij constant beeld toont waarbij aan het begin van het signaal veel inhoud bij een golfgetal rond de 1,5 wordt gevonden. Dit is naar verwachting de invloed van de passage van de locomotief. Een golfgetal van 1,5 ligt net onder het golfgetal behorende bij de dwarsliggerafstand. De inhoud van het overige deel van de passage toont de meeste inhoud voor een golfgetal die ligt tussen de hele en halve wielomtrek (golfgetal circa 0,35 -0,7).

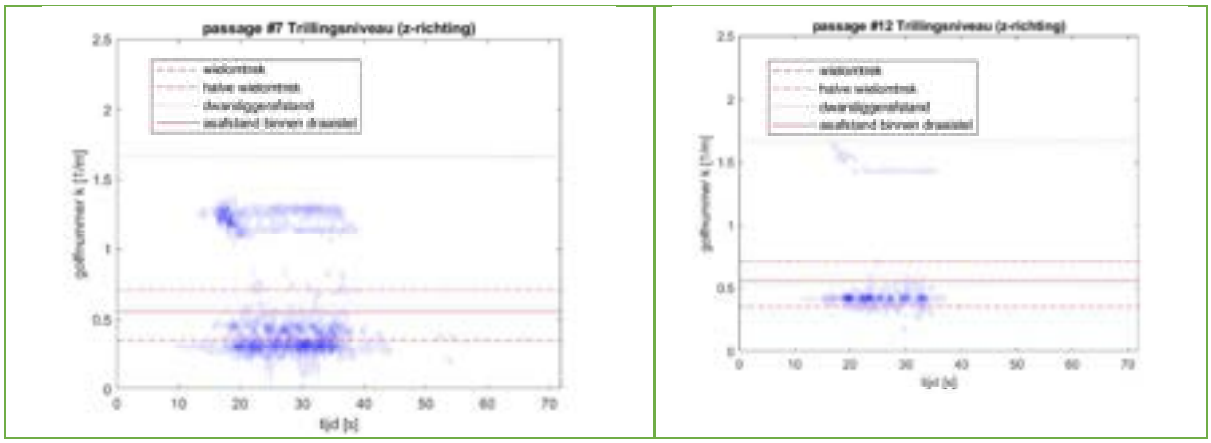
Uit Figuur 13 volgt dat de goederentrein met locomotief DL HLR77 met WAG TANNOOS en/of WAG TAPPS (passages 7, 12 en 16) de meeste inhoud rond het golfgetal behorende bij de hele wielomtrek laten zien. Een verschil wordt gevonden tussen passage 7 en 12. Passage 7 laat namelijk ook inhoud voor een golfgetal rond de 1,2 zien, maar passage 12 vrijwel niet. Beide passages betreffen volle goederentreinen richting het noorden met vrijwel dezelfde lengte. Waarschijnlijk grotendeels dezelfde trein. Passage 16 toont meer een vergelijkbaar beeld met de meeste passages uit Figuur 12. Dit betreft een lege trein richting het zuiden gelijk de meeste passages in Figuur 12. Het laatste deel van passage 16 (zie rode omkadering) moet buiten beschouwing worden gelaten, dit is waarschijnlijk een passagierstrein die juist na de goederenpassages plaatsvond en in het signaal aanwezig is. Dit geldt overigens voor meerdere passages namelijk 2, 3, 4, 9, 10, 14, 15 en 16.

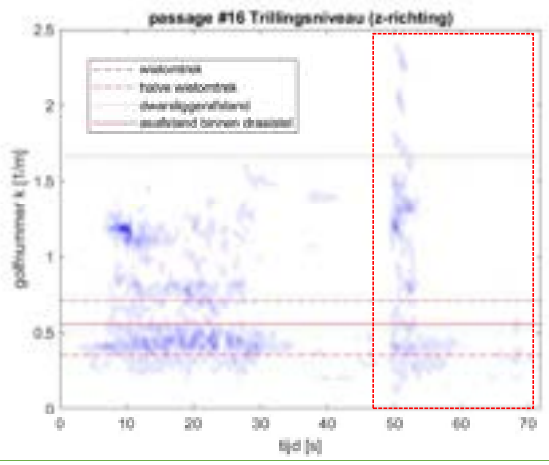
Figuur 12 Signaalinhoud bodem uitgezet tegen golfgetal passages 1,2,4,5,6,13 en 14 Den Bosch Zuid, loctype ELBR189 met type wagons WAG HABIN, WAG SGGRS en WAG SGNS1





Figuur 13 Signaalinhoud bodem uitgezet tegen golfgetal passage 7, 12 en 16 Den Bosch Zuid, , loctype DL HLR77 met WAG TANNOOS en/of WAG TAPPS (opmerking passage 7 en 12 volgeladen richting noorden)




passage #16 Trillingsniveau (z-richting)
golfnummer k [1/m]
tijd [s]
0
0.5
1
1.5
2
2.5
0
10
20
30
40
50
60
70

CONLUSIES EN AANBEVELINGEN

Conclusies

Uit het vervolgonderzoek volgt een aantal conclusies waarbij onderscheid wordt gemaakt tussen de twee delen. De conclusies uit deel I van het onderzoek luiden:

- Door een tijdsvenster te kiezen in het midden van het trillingssignaal in de bodem naast het spoor ten gevolge van VIRM-passages en deze te correleren aan de gemeten aspottrillingsniveaus, wordt voor sommige frequentiebanden een statistisch significante lineaire relatie gevonden. De frequentiebanden waarvoor dit geldt verschillen per meetlocatie. Voor de meetlocatie Schalkwijk is dit rond de 10 en 20-25 Hz, voor de locatie Orthen rond de 25-31,5 Hz en voor de locatie Den Bosch 31,5-40 Hz.
- In voorgaande onderzoek ('Onderzoek trilingsniveaus en aspotversnellingen VIRM, A2 corridor', 23 november 2021, met referentie CC-REP20211104) is bij de vergelijking tussen aspottrillingen en bodemtrillingen van VIRM-passages steeds een tijdvenster gekozen van 1 seconde en 2 seconden in het bodemtrillingssignaal rond het passagemoment van het geïnstrumenteerde draaistel. Uit een regressieanalyse, waarin gekeken is naar een statisch significante relatie tussen beide gemeten trillingsniveaus, bleek dat er geen correlatie te vinden is. Door een tijdsvenster midden in het passagesignaal te kiezen is dit voor bepaalde frequenties dus wel het geval.
- Wordt gekeken naar de trillingsinhoud van de gemeten signalen uitgezet tegen het golfgetal (door een FFT van het signaal te bekijken waar de frequentie op de x-as is gedeeld door de rijsnelheid) dan blijkt de dwarsliggerafstand voor de locatie Den Bosch Zuid duidelijk terug te komen in zowel de bodemtrillingen alsook de aspottrillingen. Voor de andere twee meetlocaties wordt de dwarsliggerafstand wel duidelijk in de meetdata van de aspot teruggevonden maar minder (Orthen) of vrijwel niet (Schalkwijk) in de bodemmetingen. Geconcludeerd wordt dat er duidelijke verschillen tussen de drie locaties wordt gevonden, terwijl naar dezelfde trein wordt gekeken. Een mogelijke verklaring betreft verschillen in bodemstijfheid in combinatie met verschillen in rijsnelheid.
- Uit de resultaten van een modelanalyse uitgevoerd door Ricardo volgt ook de conclusie dat de baanvoertuiginteractie (en als gevolg de aspottrillingsniveaus) afhangt van rijsnelheid in combinatie met baanstijfheid. Daarnaast volgt de conclusie dat het optredende trillingsniveau aan de as afhangt van of naar de vooroplopende of achteroplopende as van een draaistel wordt gekeken. Dit verklaart mede de hogere trillingsniveaus gemeten in Schalkwijk omdat op deze locatie als enige naar de vooroplopende as wordt gekeken.

De Conclusies uit deel II van het onderzoek luiden:

- Wordt gekeken naar goederentreinsignalen ter plaatse van Den Bosch Zuid waarvoor met een dichtbijgelegen QuoVadis meetstation pieken in de dynamische aslast en rms-laag zijn gemeten gedurende de passage, volgt de conclusie dat rond het tijdstip in het signaal dat de pieken optreden volgens de QuoVadis meting niet duidelijk een toename in trillingsniveau in de bodemtrillingen wordt teruggevonden. Hierbij is het trillingssignaal in de bodem opgesplitst in inhoud per golfgetal per 1-secondetijdsintervallen gedurende de passages. De veronderstelling dat slecht onderhouden wielen die tot een piek in dynamische pieklast leiden ook tot een verhoging van het bodemtrillingsniveau leiden voor een specifieke golflengte (en golfgetal), kan met de resultaten niet worden onderbouwd.
- Uit de analyse van 16 goederentreinpassages volgt dat aan het begin van het signaal veelal relatief veel inhoud met een golfgetal rond de 1,2-1,5 wordt gevonden wat juist onder het golfgetal ligt behorende bij de dwarsliggerafstand. Dit is naar verwachting het gevolg van de locomotiefpassage.
- Voor de meeste signalen wordt op het begin na, de meeste trillingsinhoud gevonden voor golfgetallen tussen de 0,35 en 0,7. In dit gebied liggen golfgetallen die horen bij de gehele wielomtrek, halve wielomtrek en ook de asafstand binnen een draaistel (1,8 meter).
- Daar waar voor de VIRM-passages de dwarsliggerafstand (golfgetal=1,67) duidelijk terugkwam in de trillingssignalen, komt deze afstand minder eenduidig terug in de trillingssignalen van

goederentreinpassages en varieert het golfgetal meer. Voor de passages van de locomotieven (begin van signalen) lijkt wel veelal een golfgetal rond de dwarsliggerafstand terug te zien, maar wel met meer variatie. Opgemerkt wordt daarbij dat onderzochte goederentreinpassages variëren in rijrichting en spoor terwijl de onderzochte VIRM-passages allen over het dichtstbijgelegen spoor reden. Geconcludeerd wordt dat voor de goederentreinpassages een minder eenduidig beeld wordt gevonden dan voor de VIRM-passages.

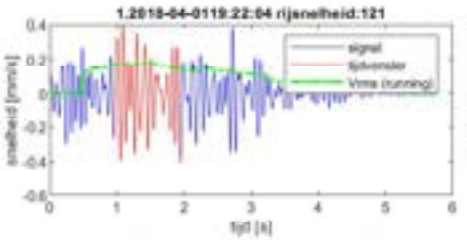
Aanbevelingen

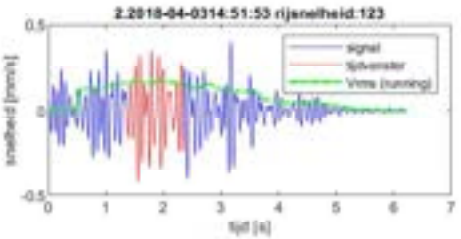
Uit het onderzoek volgen enkele aanbevelingen:

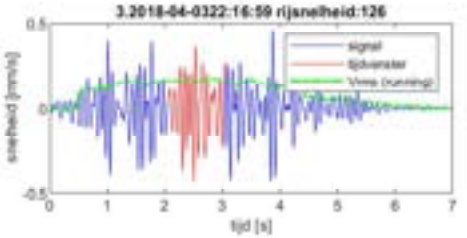
- Wanneer trillingsniveaus gemeten met aspottrillingsmeters worden gecombineerd met trillingsniveaus gemeten in de bodem naast het spoor moet goed rekening worden gehouden met waar de aspottrillingsmeters zich bevindt in het treinstel en dus ook waar in het trillingssignaal gemeten in de bodem. De locatie moet zo worden gekozen dat invloeden van bijvoorbeeld andere assen zoveel mogelijk constant wordt gehouden. Uit het onderzoek volgt dat de invloed van andere assen zoveel mogelijk constant wordt gehouden door een draaistel in het midden van de trein uit te rusten met aspottrillingsmeters.
- Uit de modelanalyse van Ricardo volgt een verschil tussen de vooroplopende en achteroplopende as. Het verschil blijkt daarbij afhankelijk van bodem/baanstijfheid en ook de radafstand. Aanbevolen wordt bij onderzoek naar aspottrillingsniveaus rekening te houden met de rijrichting en of er sprake is van een meting aan de vooroplopende of achteroplopende as.

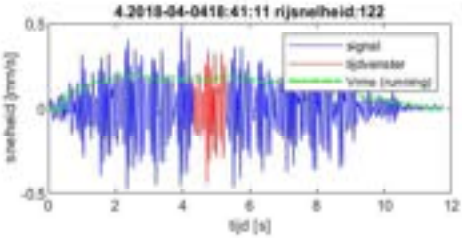
Bijlage I: Selectie tijdsintervallen

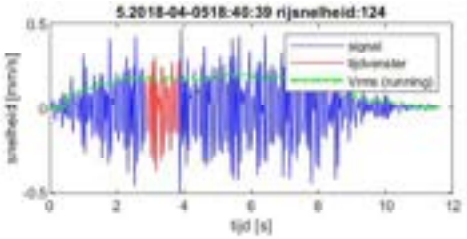
Schalkwijk 1 seconde

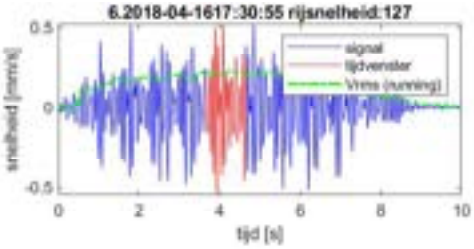


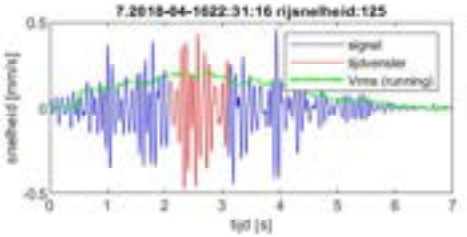


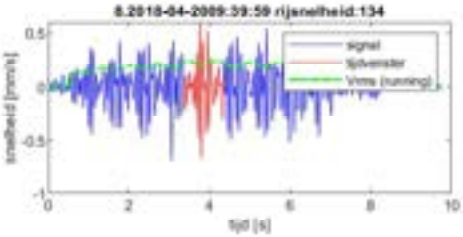


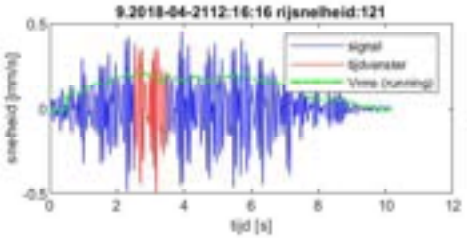


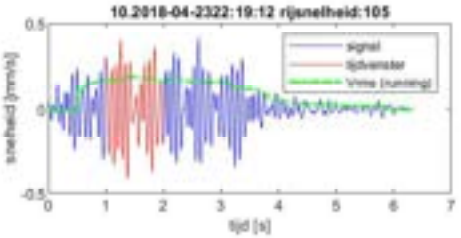


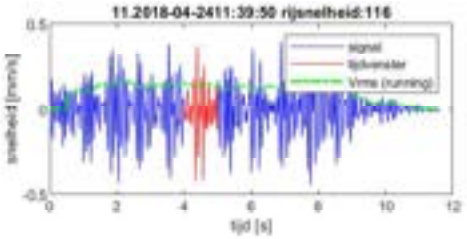


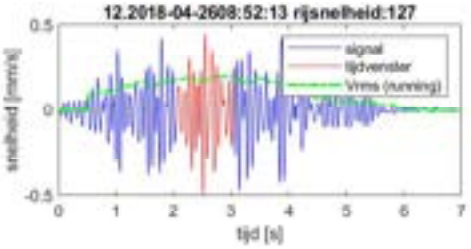


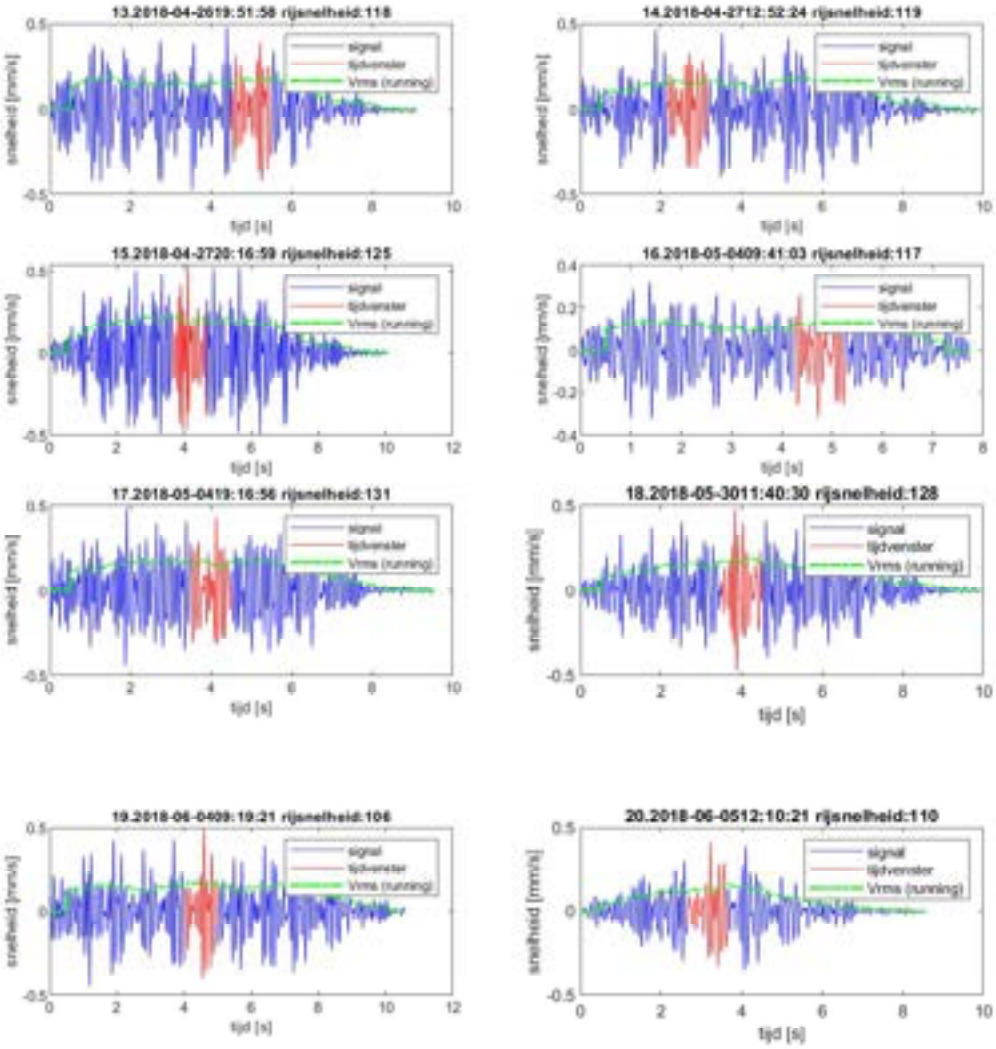




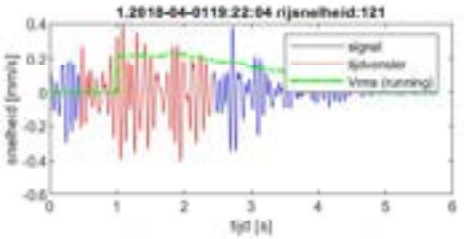


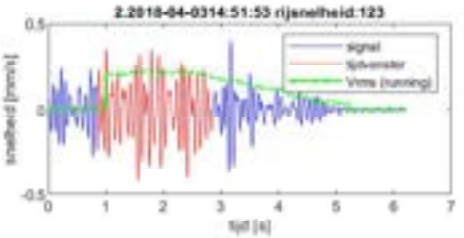


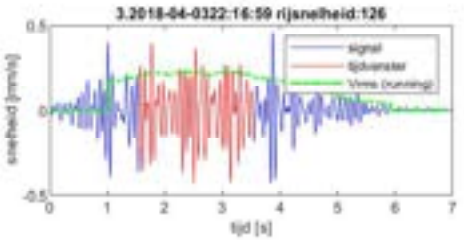


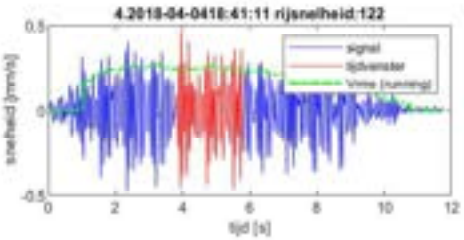


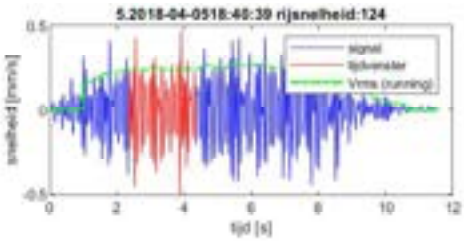
Schalkwijk 2 seconde

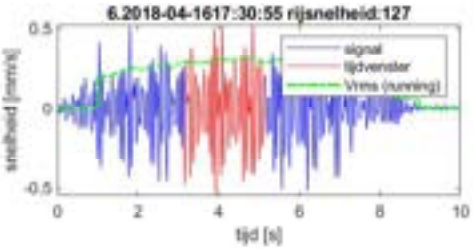

1.2018-04-0119:22:04 rijsnelheid:121
signal
tijdvenster
Vrms (running)
snelheid [mm/s]
tijd [s]

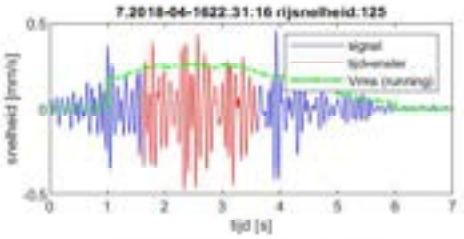

2.2018-04-0314:51:53 rijsnelheid:123
signal
tijdvenster
Vrms (running)
snelheid [mm/s]
tijd [s]

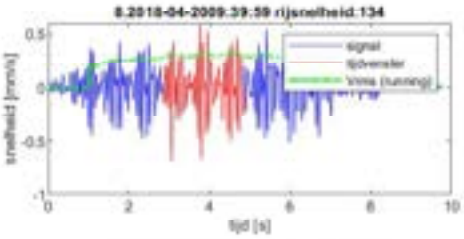

3.2018-04-0322:16:59 rijsnelheid:126
signal
tijdvenster
Vrms (running)
snelheid [mm/s]
tijd [s]

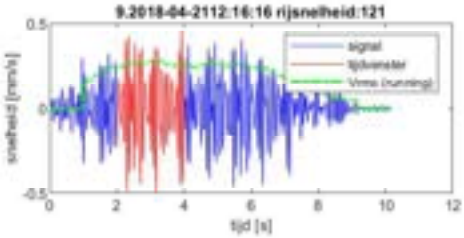

4.2018-04-0418:41:11 rijsnelheid:122
signal
tijdvenster
Vrms (running)
snelheid [mm/s]
tijd [s]

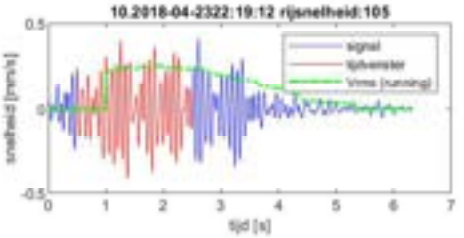

5.2018-04-0518:40:39 rijsnelheid:124
signal
tijdvenster
Vrms (running)
snelheid [mm/s]
tijd [s]

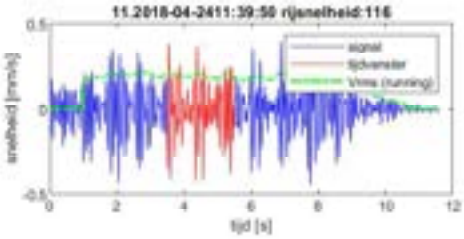

6.2018-04-1617:30:55 rijsnelheid:127
signal
tijdvenster
Vrms (running)
snelheid [mm/s]
tijd [s]

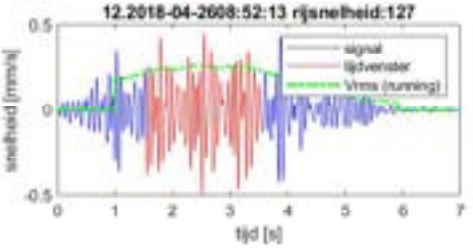

7.2018-04-1622:31:16 rijsnelheid:125
signal
tijdvenster
Vrms (running)
snelheid [mm/s]
tijd [s]

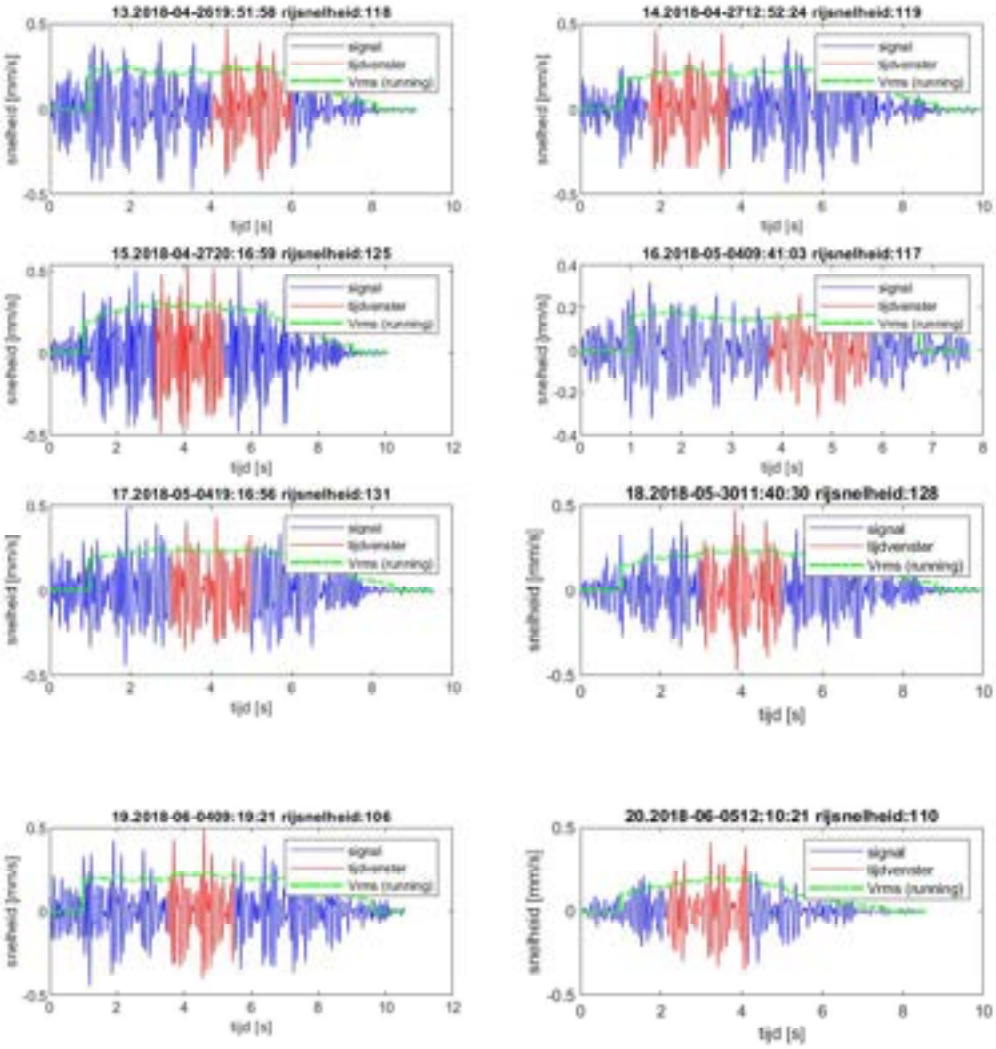

8.2018-04-2009:39:59 rijsnelheid:134
signal
tijdvenster
Vrms (running)
snelheid [mm/s]
tijd [s]


9.2018-04-2112:16:16 rijsnelheid:121
signal
tijdvenster
Vrms (running)
snelheid [mm/s]
tijd [s]

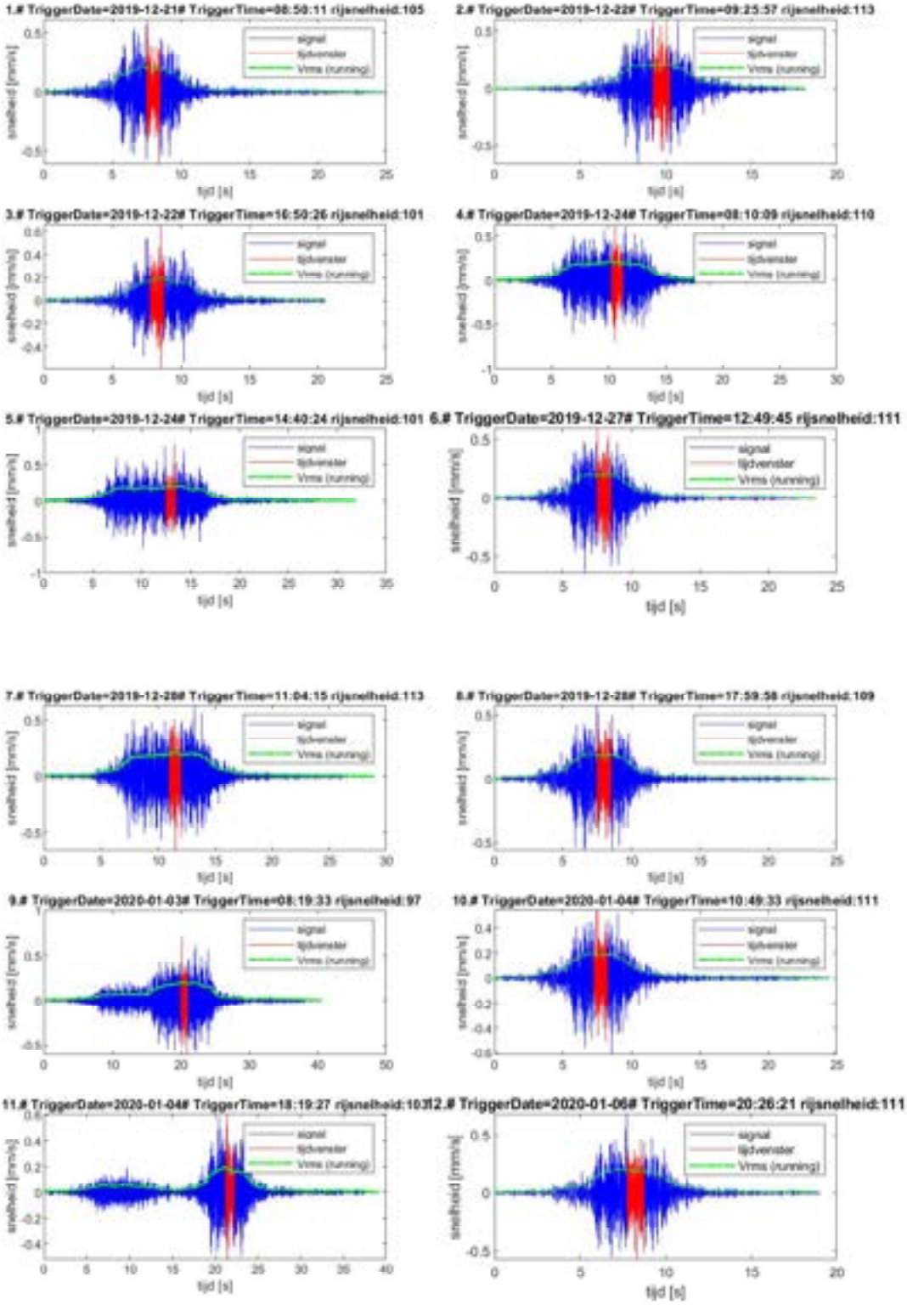

10.2018-04-2322:19:12 rijsnelheid:105
signal
tijdvenster
Vrms (running)
snelheid [mm/s]
tijd [s]

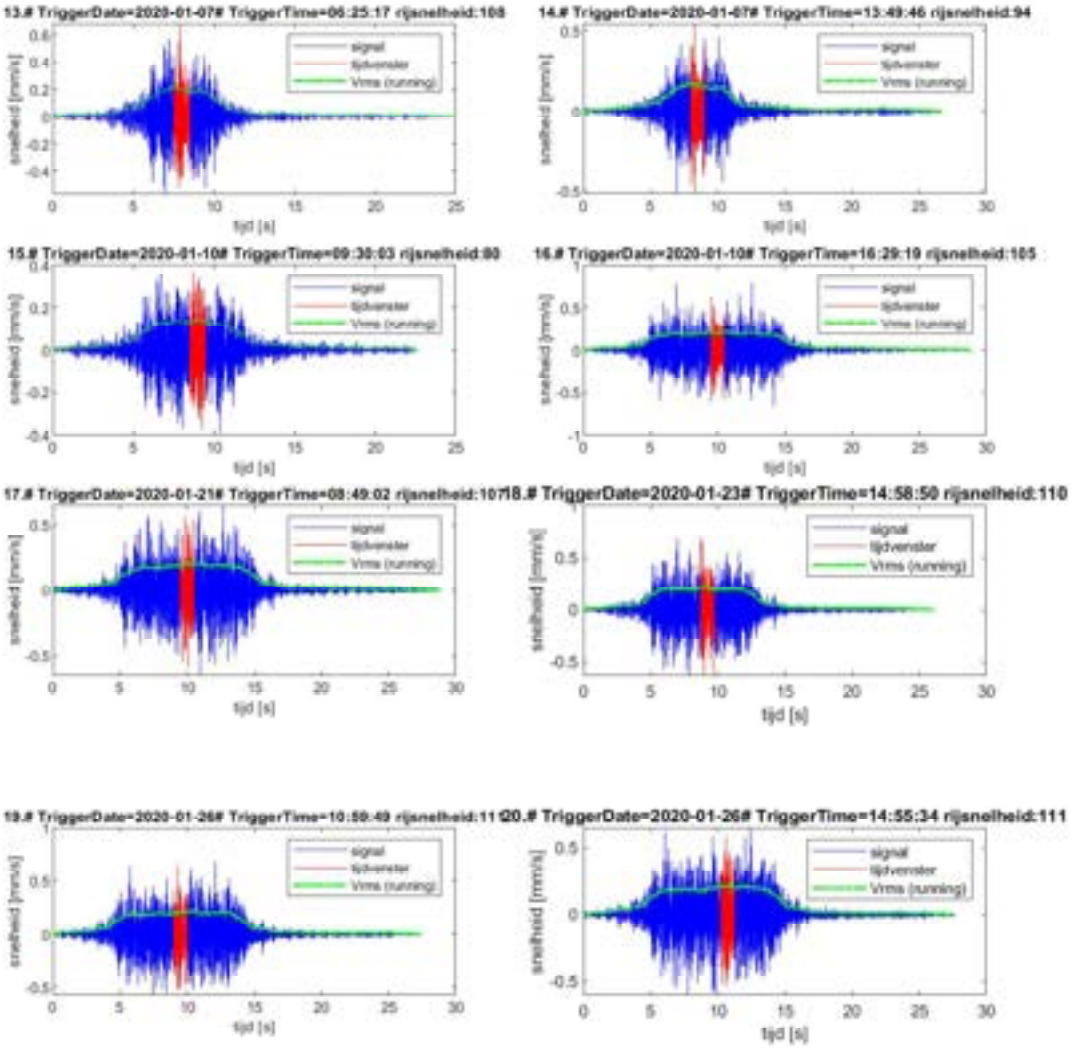

11.2018-04-2411:39:58 rijsnelheid:116
signal
tijdvenster
Vrms (running)
snelheid [mm/s]
tijd [s]


12.2018-04-2608:52:13 rijsnelheid:127
signal
tijdvenster
Vrms (running)
snelheid [mm/s]
tijd [s]

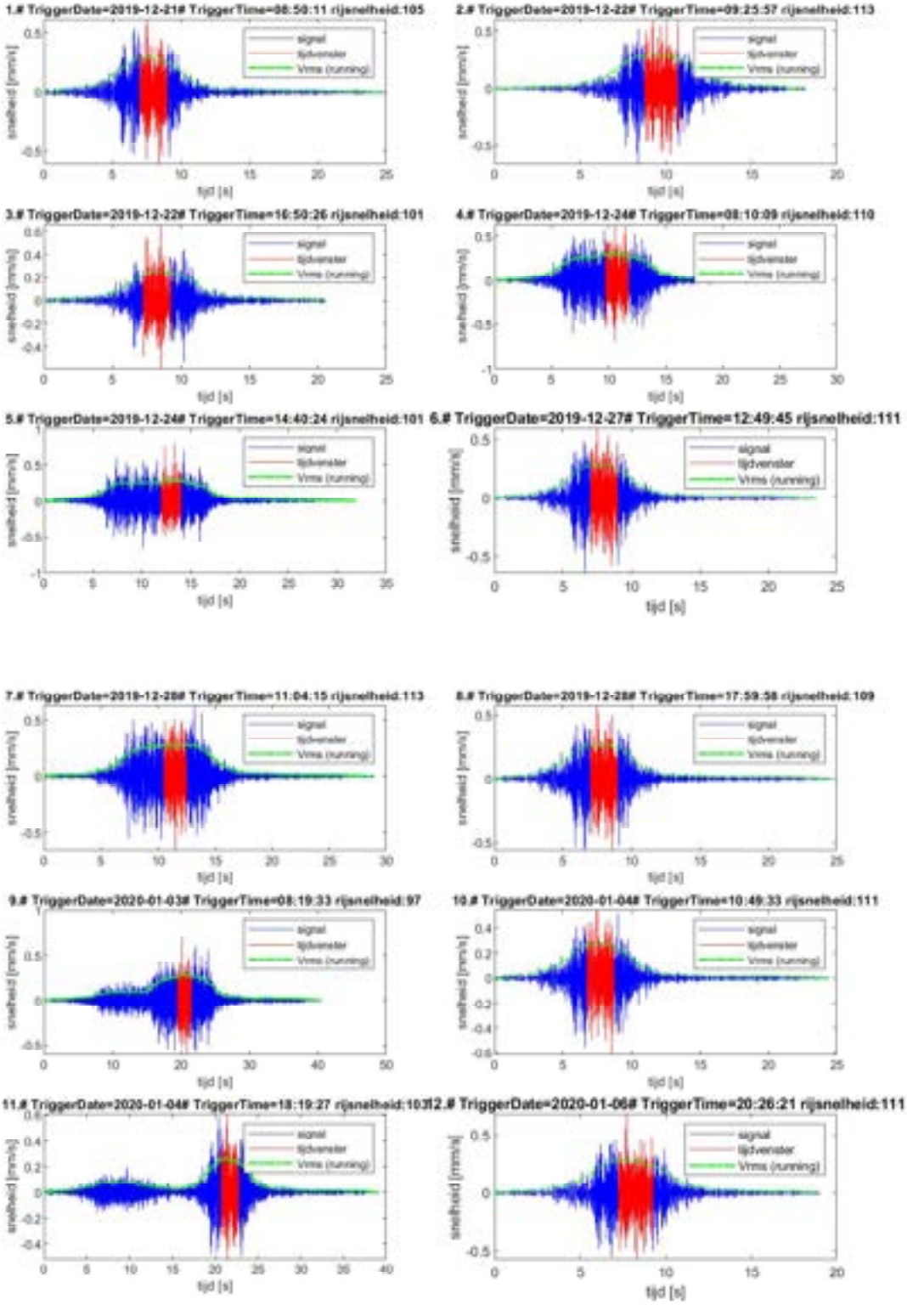


Orthen 1 seconde

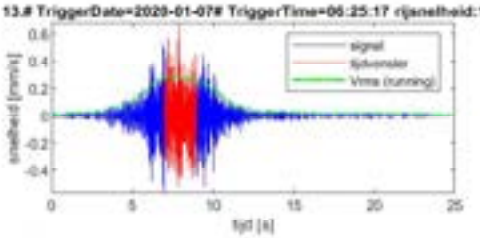

1.# TriggerDate=2019-12-21# TriggerTime=08:50:11 rijsnelheid:105
2.# TriggerDate=2019-12-22# TriggerTime=09:25:57 rijsnelheid:113
3.# TriggerDate=2019-12-22# TriggerTime=16:50:26 rijsnelheid:101
4.# TriggerDate=2019-12-24# TriggerTime=08:10:09 rijsnelheid:110
5.# TriggerDate=2019-12-24# TriggerTime=14:40:24 rijsnelheid:101
6.# TriggerDate=2019-12-27# TriggerTime=12:49:45 rijsnelheid:111
7.# TriggerDate=2019-12-28# TriggerTime=11:04:15 rijsnelheid:113
8.# TriggerDate=2019-12-28# TriggerTime=17:59:58 rijsnelheid:109
9.# TriggerDate=2020-01-03# TriggerTime=08:19:33 rijsnelheid:97
10.# TriggerDate=2020-01-04# TriggerTime=10:49:33 rijsnelheid:111
11.# TriggerDate=2020-01-04# TriggerTime=18:19:27 rijsnelheid:103
12.# TriggerDate=2020-01-06# TriggerTime=20:26:21 rijsnelheid:111
signal
tijdvenster
Vrms (running)
snelheid [mm/s]
tijd [s]



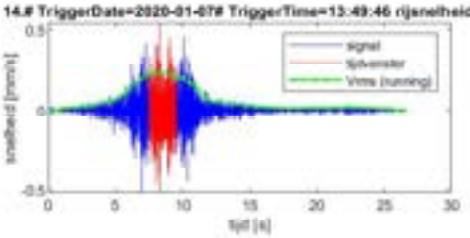
Orthen 2-seconden


1.# TriggerDate=2019-12-21# TriggerTime=08:50:11 rijsnelheid:105
2.# TriggerDate=2019-12-22# TriggerTime=09:25:57 rijsnelheid:113
3.# TriggerDate=2019-12-22# TriggerTime=16:50:26 rijsnelheid:101
4.# TriggerDate=2019-12-24# TriggerTime=08:10:09 rijsnelheid:110
5.# TriggerDate=2019-12-24# TriggerTime=14:40:24 rijsnelheid:101
6.# TriggerDate=2019-12-27# TriggerTime=12:49:45 rijsnelheid:111
7.# TriggerDate=2019-12-28# TriggerTime=11:04:15 rijsnelheid:113
8.# TriggerDate=2019-12-28# TriggerTime=17:59:58 rijsnelheid:109
9.# TriggerDate=2020-01-03# TriggerTime=08:19:33 rijsnelheid:97
10.# TriggerDate=2020-01-04# TriggerTime=10:49:33 rijsnelheid:111
11.# TriggerDate=2020-01-04# TriggerTime=18:19:27 rijsnelheid:103
12.# TriggerDate=2020-01-06# TriggerTime=20:26:21 rijsnelheid:111
signal
tijdvenster
Vrms (running)
snelheid [mm/s]
tijd [s]

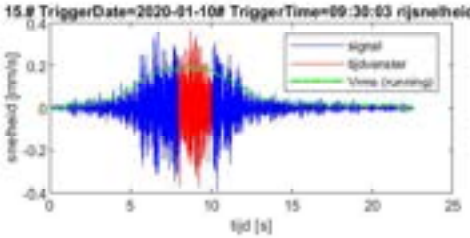
13.# TriggerDate=2020-01-07# TriggerTime=06:25:17 rijsnelheid:108



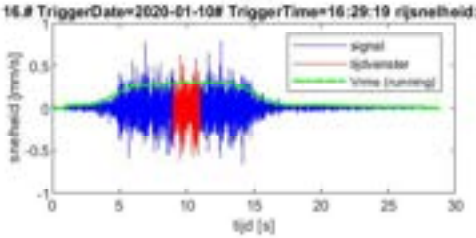
14.# TriggerDate=2020-01-07# TriggerTime=13:49:46 rijsnelheid:94



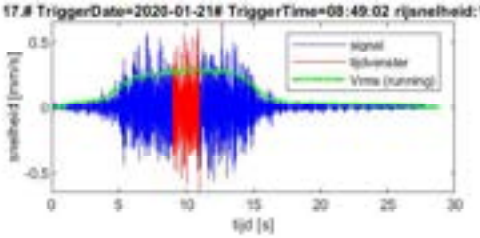
15.# TriggerDate=2020-01-10# TriggerTime=09:30:03 rijsnelheid:80



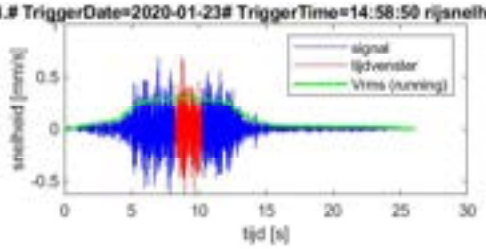
16.# TriggerDate=2020-01-10# TriggerTime=16:29:19 rijsnelheid:105



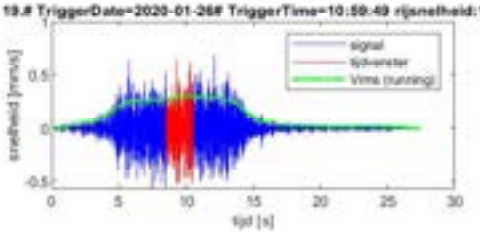
17.# TriggerDate=2020-01-21# TriggerTime=08:49:02 rijsnelheid:107



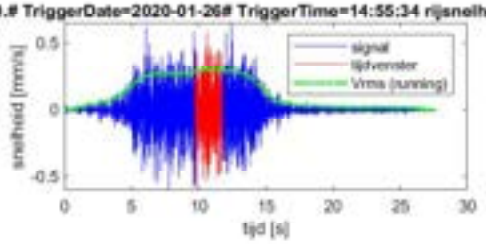
18.# TriggerDate=2020-01-23# TriggerTime=14:58:50 rijsnelheid:110



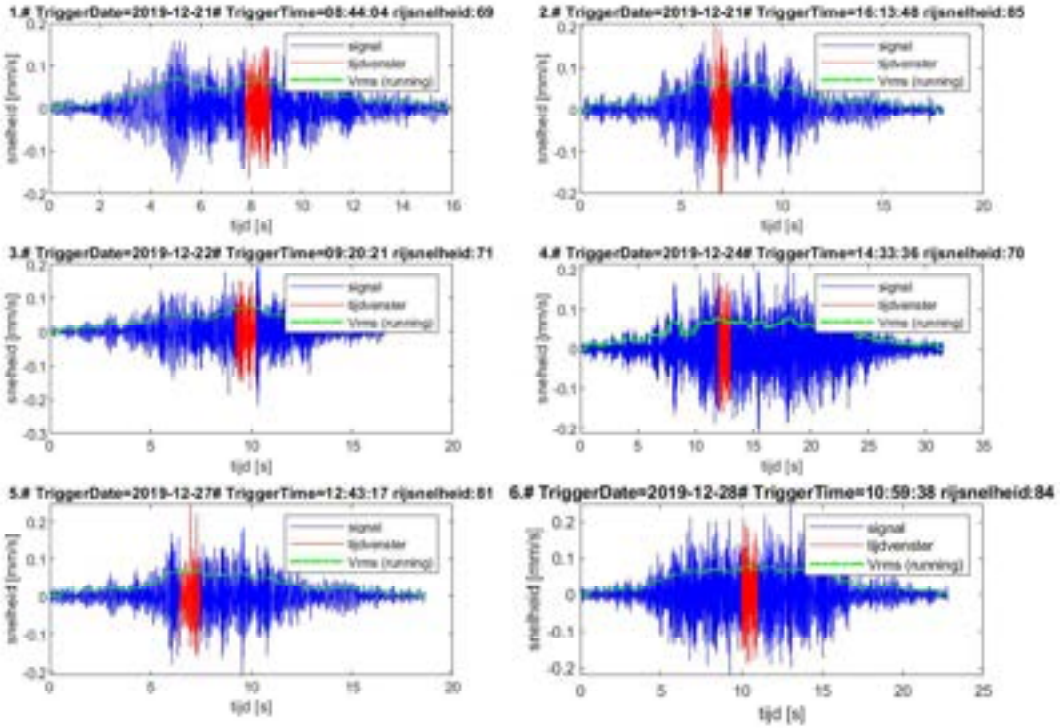
19.# TriggerDate=2020-01-26# TriggerTime=10:59:49 rijsnelheid:111

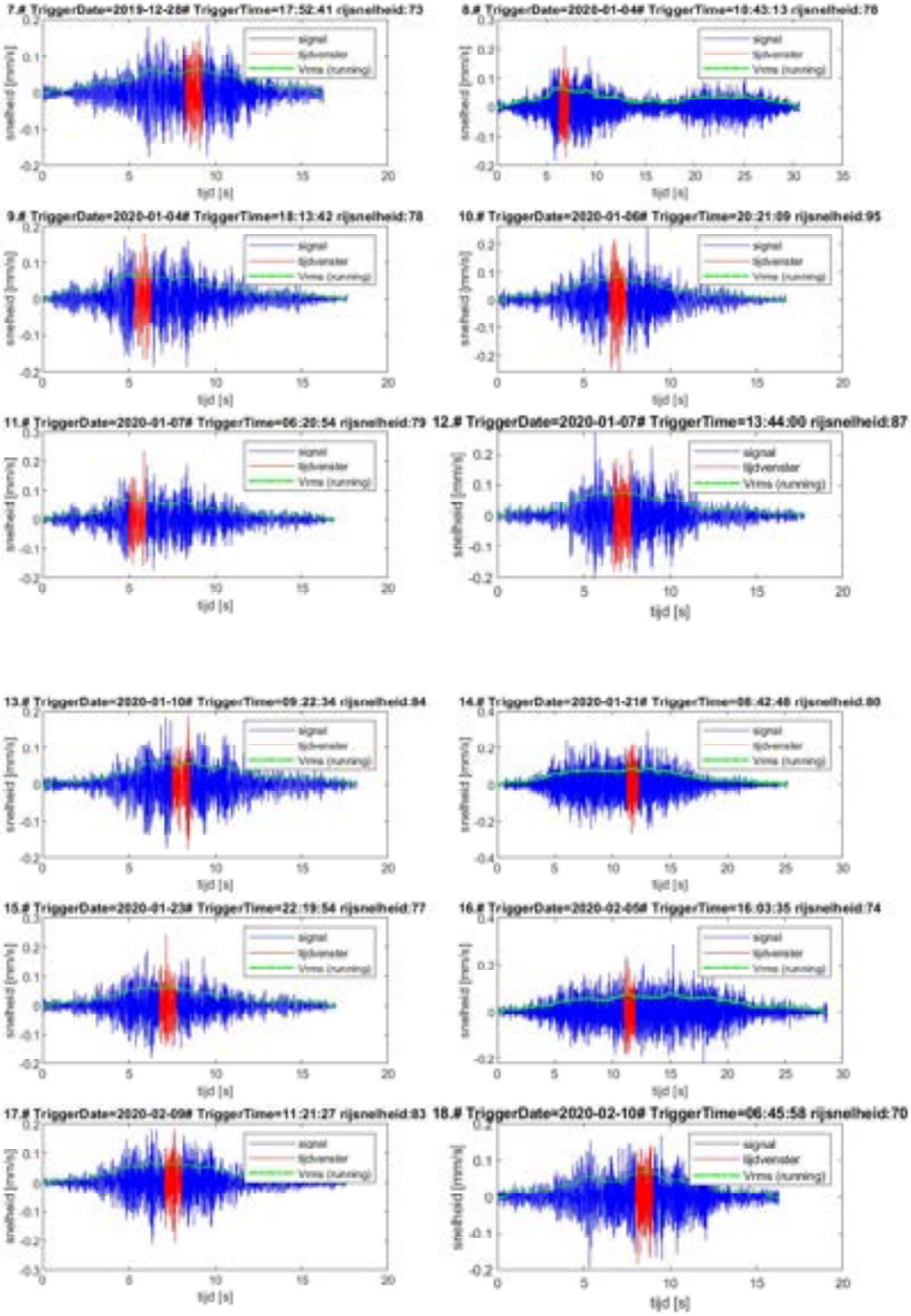


20.# TriggerDate=2020-01-26# TriggerTime=14:55:34 rijsnelheid:111

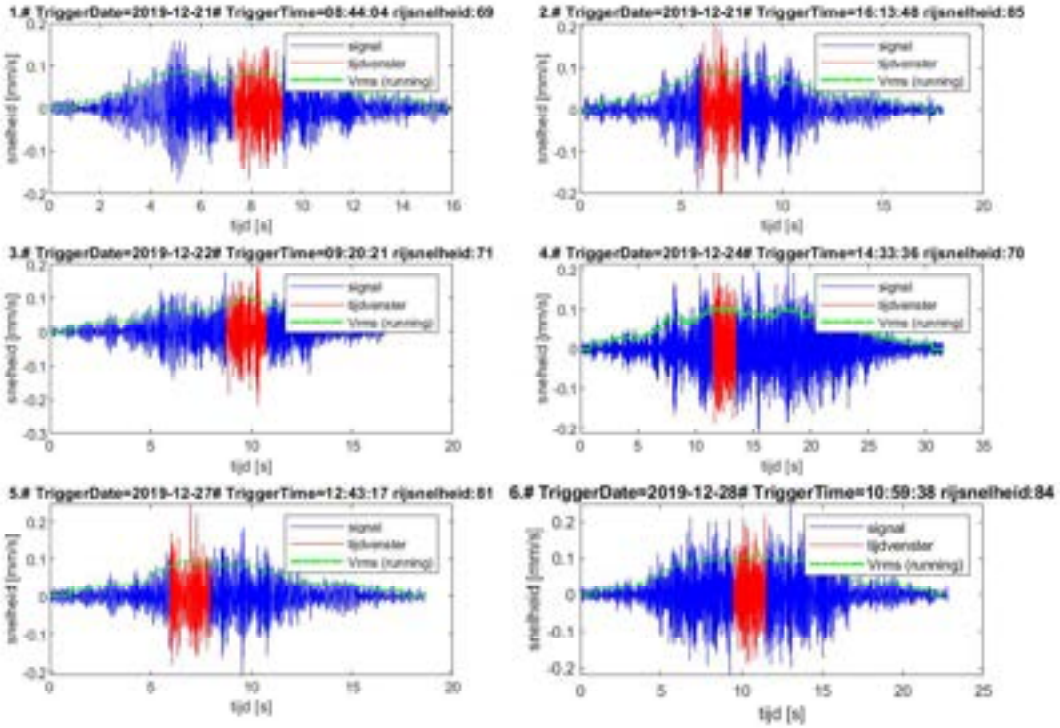


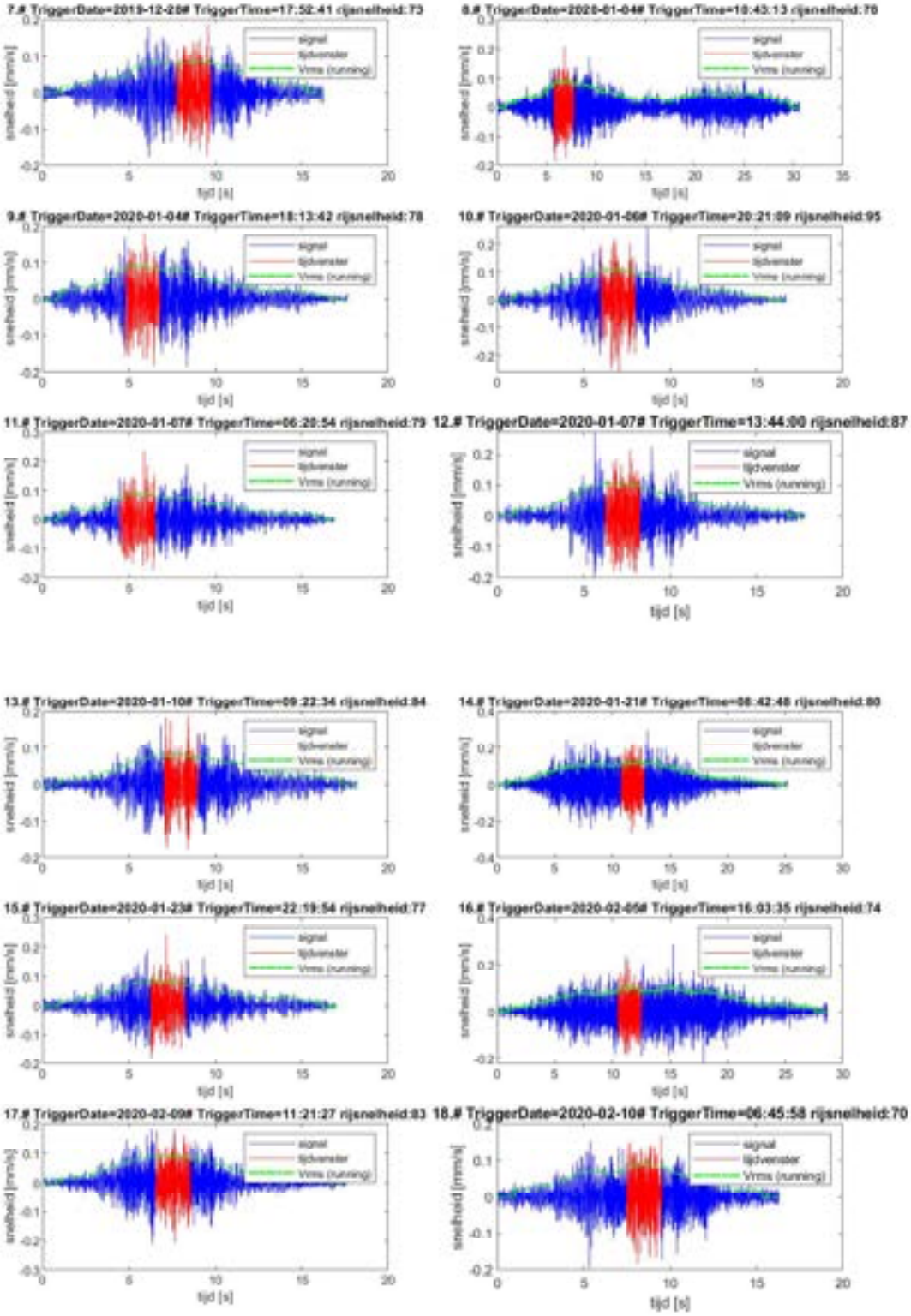
Den Bosch Zuid 1-seconde




7.# TriggerDate=2019-12-28# TriggerTime=17:52:41 rijsnelheid:73
8.# TriggerDate=2020-01-04# TriggerTime=10:43:13 rijsnelheid:76
9.# TriggerDate=2020-01-04# TriggerTime=18:13:42 rijsnelheid:78
10.# TriggerDate=2020-01-06# TriggerTime=20:21:09 rijsnelheid:95
11.# TriggerDate=2020-01-07# TriggerTime=06:20:54 rijsnelheid:79
12.# TriggerDate=2020-01-07# TriggerTime=13:44:00 rijsnelheid:87
13.# TriggerDate=2020-01-10# TriggerTime=09:22:34 rijsnelheid:84
14.# TriggerDate=2020-01-21# TriggerTime=08:42:48 rijsnelheid:80
15.# TriggerDate=2020-01-23# TriggerTime=22:19:54 rijsnelheid:77
16.# TriggerDate=2020-02-05# TriggerTime=16:03:35 rijsnelheid:74
17.# TriggerDate=2020-02-09# TriggerTime=11:21:27 rijsnelheid:83
18.# TriggerDate=2020-02-10# TriggerTime=06:45:58 rijsnelheid:70
signal
tijdvenster
Vrms (running)
snelheid [mm/s]
tijd [s]

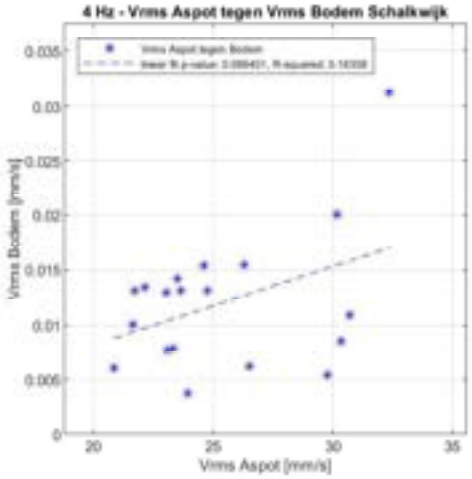
Den Bosch Zuid 2-seconden

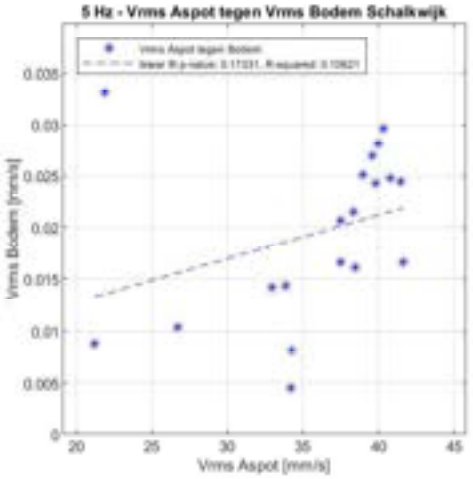


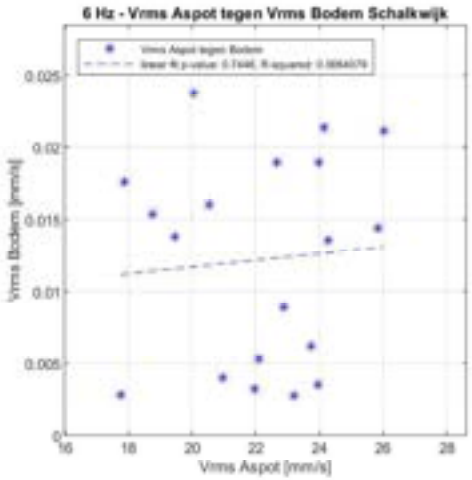

7.# TriggerDate=2019-12-28# TriggerTime=17:52:41 rijsnelheid:73
8.# TriggerDate=2020-01-04# TriggerTime=10:43:13 rijsnelheid:76
9.# TriggerDate=2020-01-04# TriggerTime=18:13:42 rijsnelheid:78
10.# TriggerDate=2020-01-06# TriggerTime=20:21:09 rijsnelheid:95
11.# TriggerDate=2020-01-07# TriggerTime=06:20:54 rijsnelheid:79
12.# TriggerDate=2020-01-07# TriggerTime=13:44:00 rijsnelheid:87
13.# TriggerDate=2020-01-10# TriggerTime=09:22:34 rijsnelheid:84
14.# TriggerDate=2020-01-21# TriggerTime=08:42:48 rijsnelheid:80
15.# TriggerDate=2020-01-23# TriggerTime=22:19:54 rijsnelheid:77
16.# TriggerDate=2020-02-05# TriggerTime=16:03:35 rijsnelheid:74
17.# TriggerDate=2020-02-09# TriggerTime=11:21:27 rijsnelheid:83
18.# TriggerDate=2020-02-10# TriggerTime=06:45:58 rijsnelheid:70
signal
tijdvenster
Vrms (running)
snelheid [mm/s]
tijd [s]

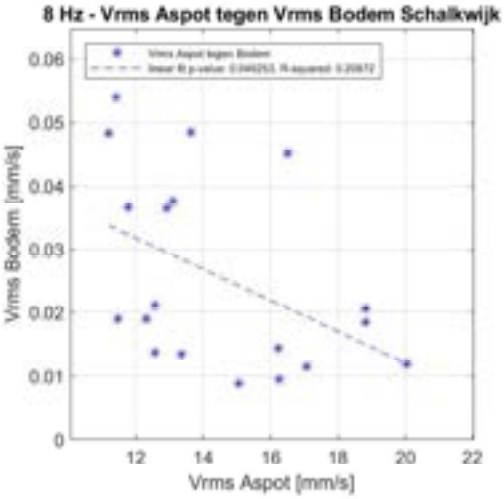
Bijlage II: Resultaten regressieanalyse Vrms aspot tegen Vrms bodem

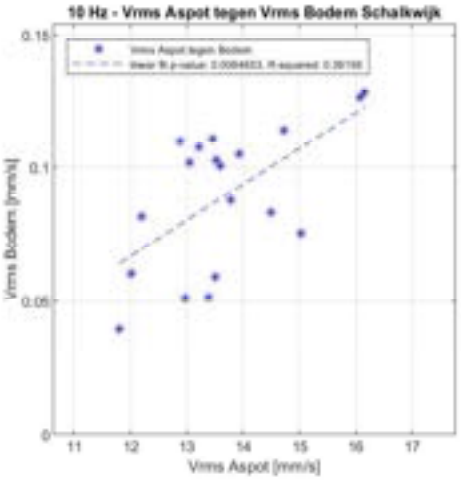
Schalkwijk 1-seconde tijdsinterval

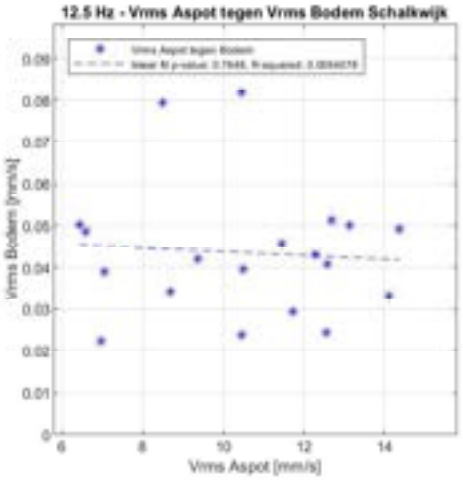


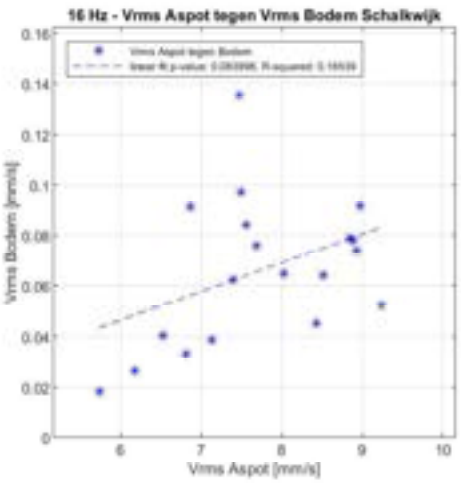


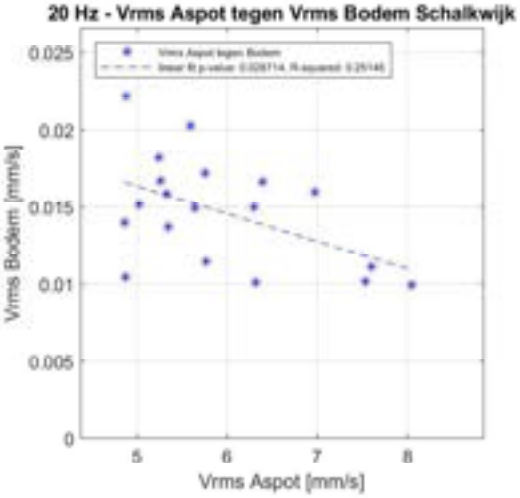


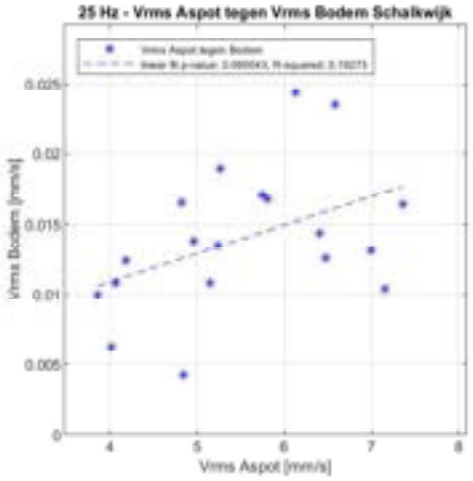


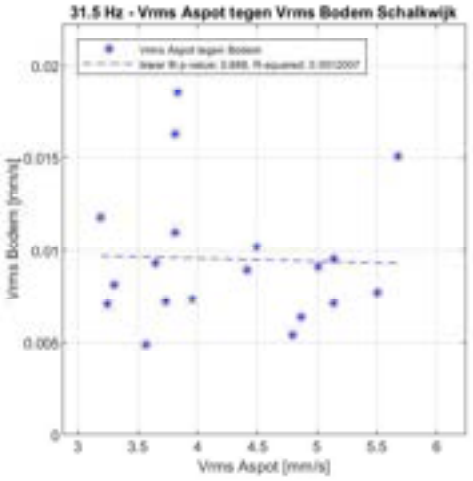

10 Hz - Vrms Aspot tegen Vrms Bodem Schalkwijk
Vrms Bodem [mm/s]
Vrms Aspot [mm/s]

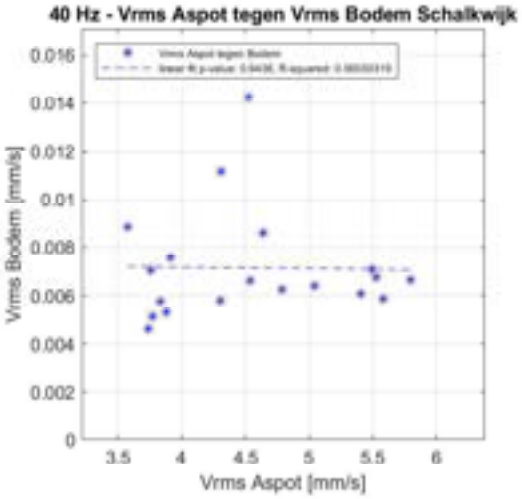

12.5 Hz - Vrms Aspot tegen Vrms Bodem Schalkwijk
Vrms Bodem [mm/s]
Vrms Aspot [mm/s]


16 Hz - Vrms Aspot tegen Vrms Bodem Schalkwijk
Vrms Bodem [mm/s]
Vrms Aspot [mm/s]

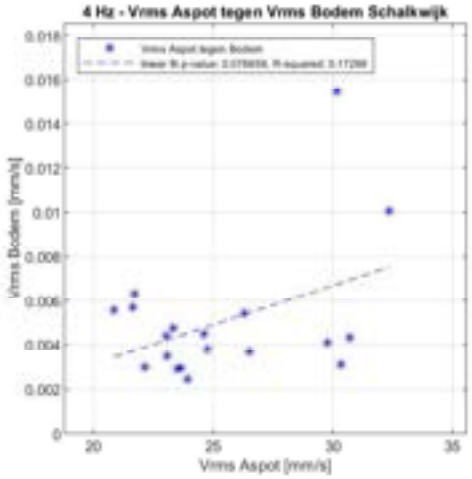

20 Hz - Vrms Aspot tegen Vrms Bodem Schalkwijk
Vrms Bodem [mm/s]
Vrms Aspot [mm/s]

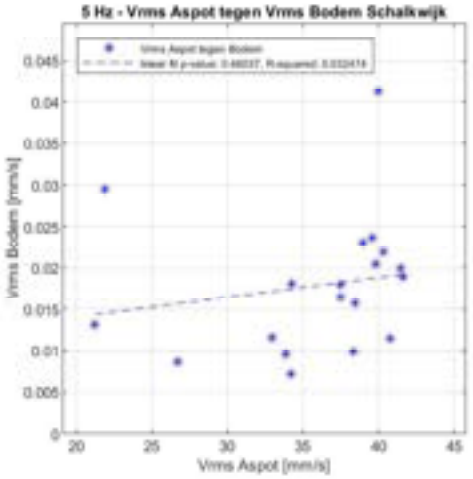

25 Hz - Vrms Aspot tegen Vrms Bodem Schalkwijk
Vrms Aspot tegen Bodem
Vrms Bodem [mm/s]
Vrms Aspot [mm/s]

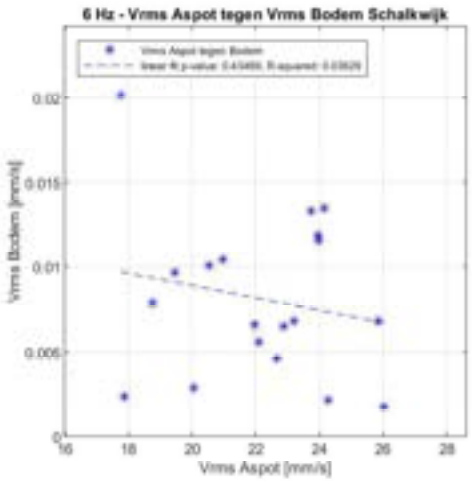

31.5 Hz - Vrms Aspot tegen Vrms Bodem Schalkwijk
Vrms Aspot tegen Bodem
Vrms Bodem [mm/s]
Vrms Aspot [mm/s]

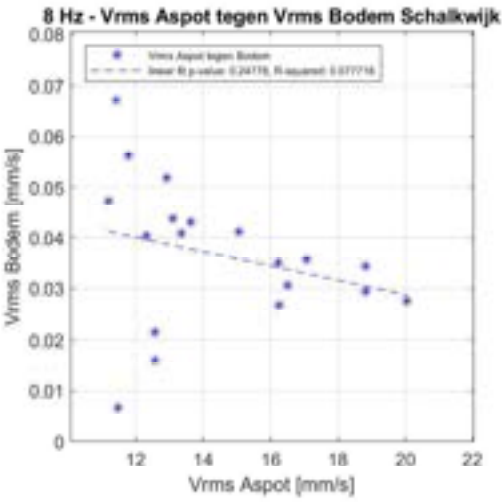

40 Hz - Vrms Aspot tegen Vrms Bodem Schalkwijk
Vrms Aspot tegen Bodem
Vrms Bodem [mm/s]
Vrms Aspot [mm/s]

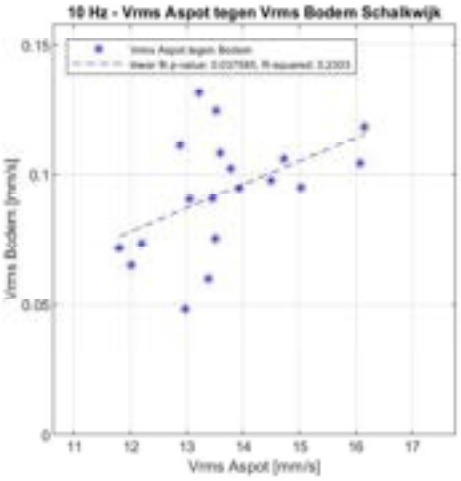
Schalkwijk 2-seconde tijdsinterval

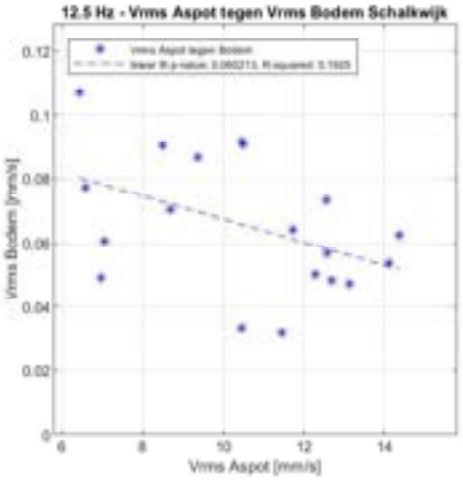


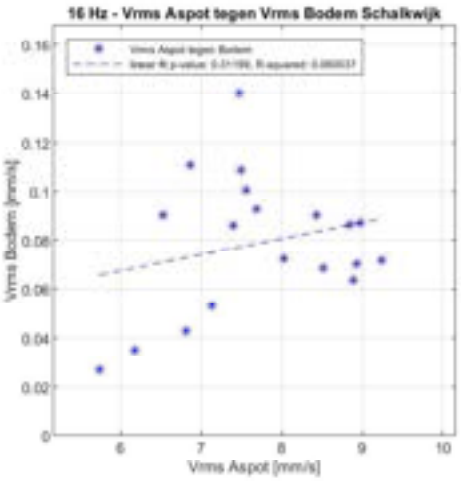


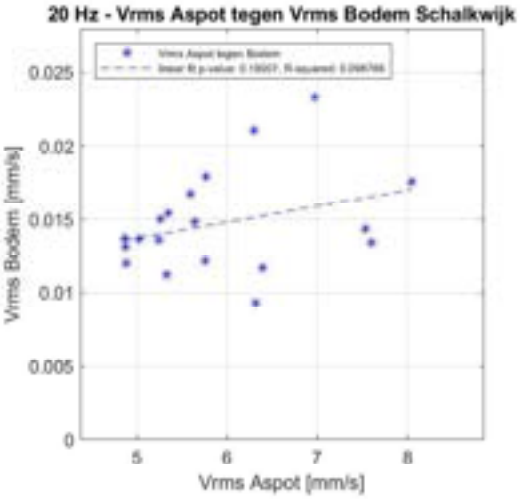


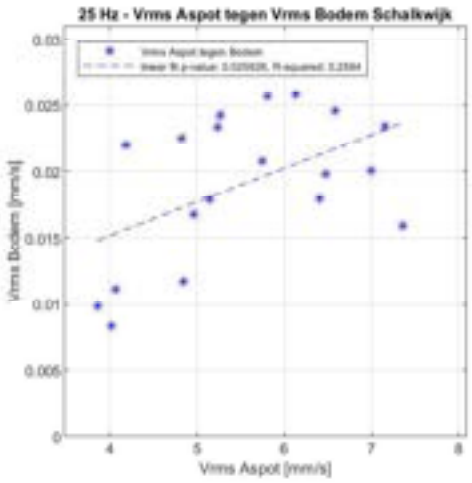


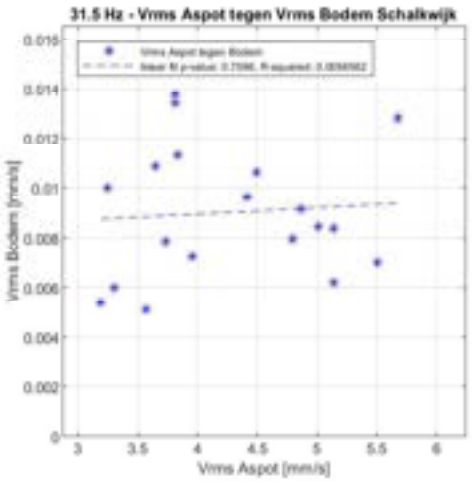

10 Hz - Vrms Aspot tegen Vrms Bodem Schalkwijk
Vrms Aspot tegen Bodem
Vrms Bodem [mm/s]
Vrms Aspot [mm/s]

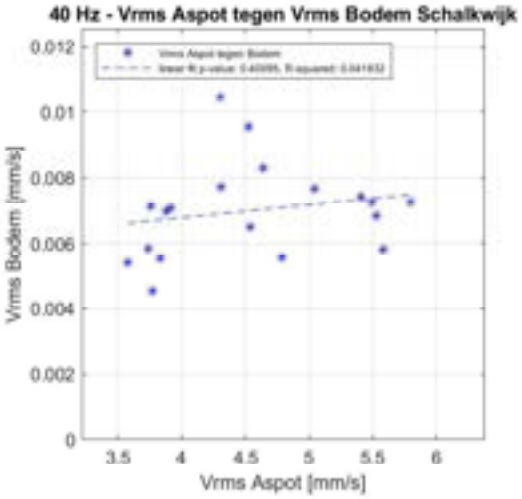

12.5 Hz - Vrms Aspot tegen Vrms Bodem Schalkwijk
Vrms Aspot tegen Bodem
Vrms Bodem [mm/s]
Vrms Aspot [mm/s]


16 Hz - Vrms Aspot tegen Vrms Bodem Schalkwijk
Vrms Aspot tegen Bodem
Vrms Bodem [mm/s]
Vrms Aspot [mm/s]

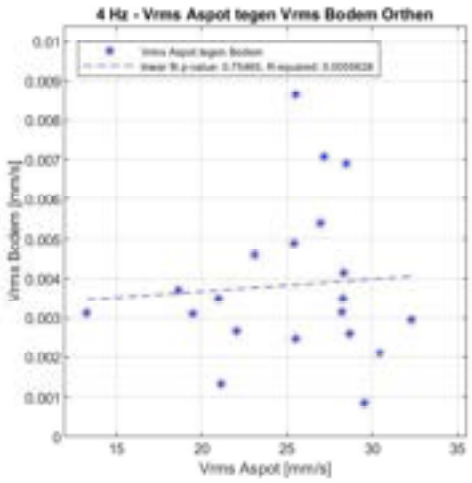

20 Hz - Vrms Aspot tegen Vrms Bodem Schalkwijk
Vrms Aspot tegen Bodem
Vrms Bodem [mm/s]
Vrms Aspot [mm/s]

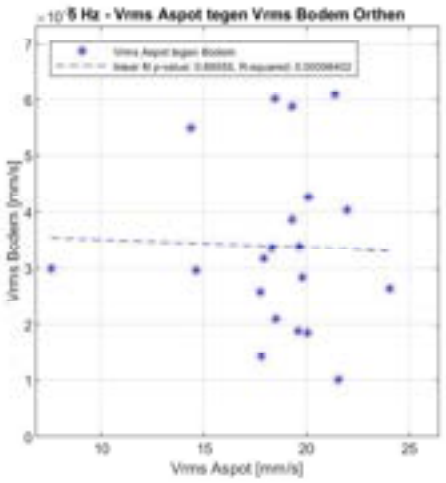

25 Hz - Vrms Aspot tegen Vrms Bodem Schalkwijk
Vrms Aspot tegen Bodem
Vrms Bodem [mm/s]
Vrms Aspot [mm/s]

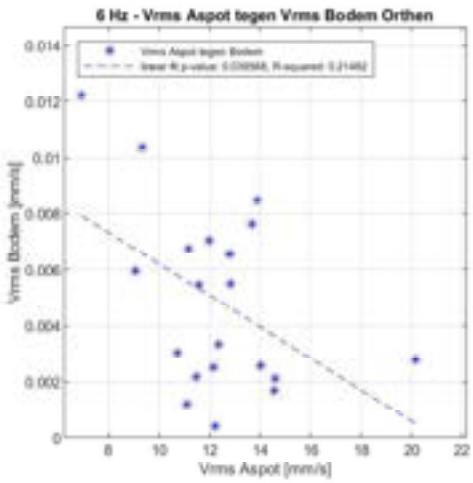

31.5 Hz - Vrms Aspot tegen Vrms Bodem Schalkwijk
Vrms Aspot tegen Bodem
Vrms Bodem [mm/s]
Vrms Aspot [mm/s]

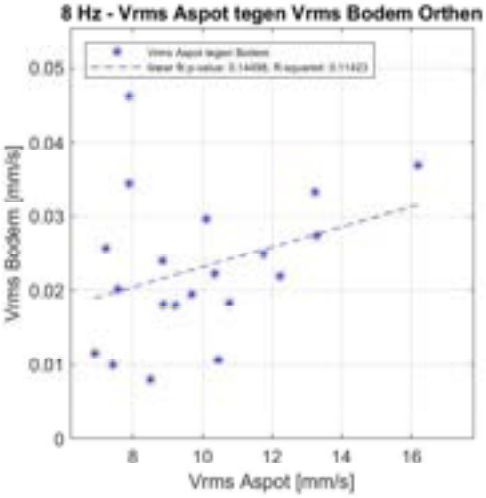

40 Hz - Vrms Aspot tegen Vrms Bodem Schalkwijk
Vrms Aspot tegen Bodem
Vrms Bodem [mm/s]
Vrms Aspot [mm/s]

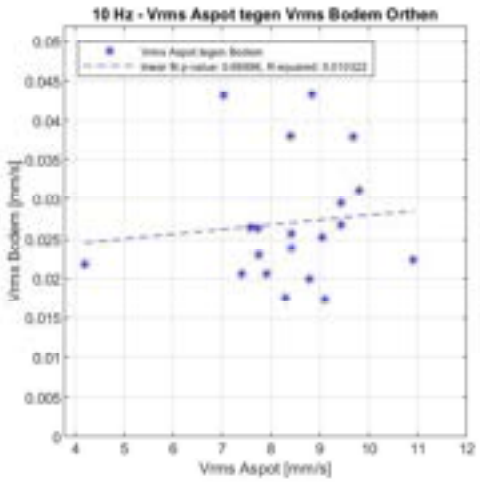
Orthen 1-seconde tijdsinterval

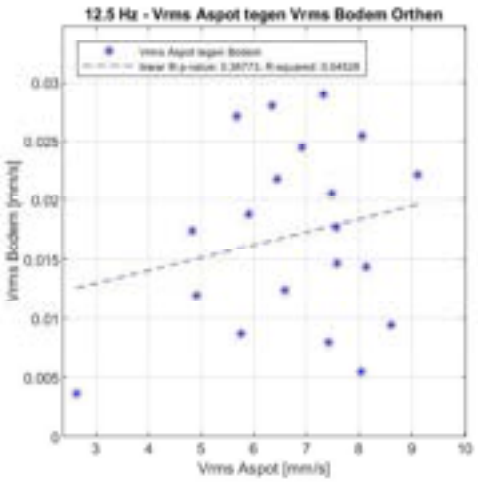

4 Hz - Vrms Aspot tegen Vrms Bodem Orthen
Vrms Bodem [mm/s]
Vrms Aspot [mm/s]

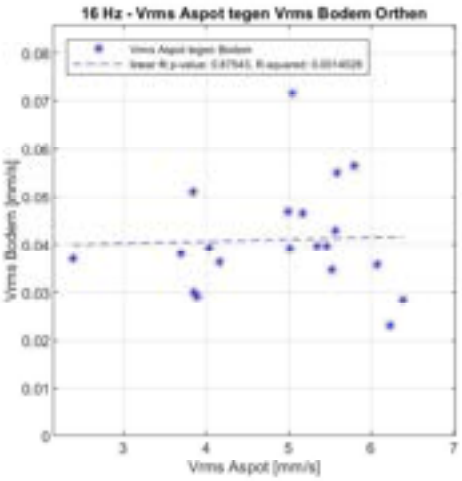

5 Hz - Vrms Aspot tegen Vrms Bodem Orthen
Vrms Bodem [mm/s]
Vrms Aspot [mm/s]

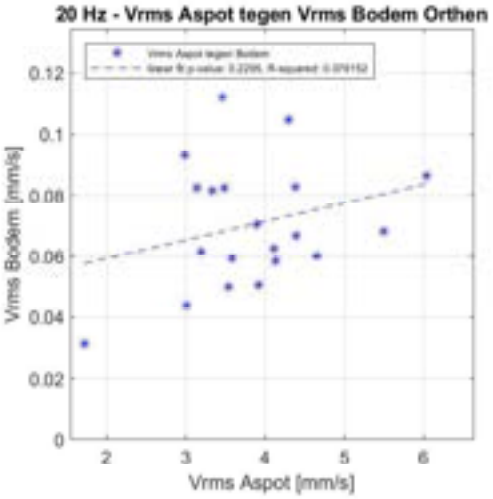

6 Hz - Vrms Aspot tegen Vrms Bodem Orthen
Vrms Bodem [mm/s]
Vrms Aspot [mm/s]

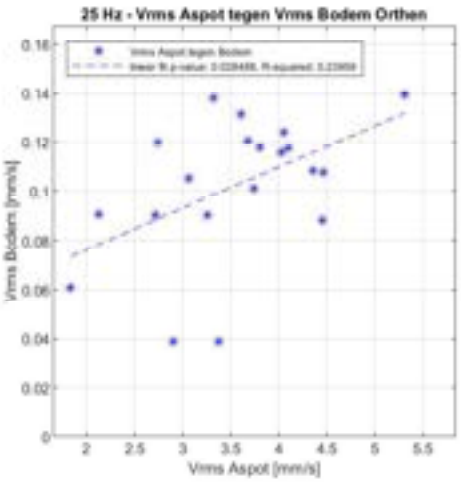

8 Hz - Vrms Aspot tegen Vrms Bodem Orthen
Vrms Bodem [mm/s]
Vrms Aspot [mm/s]

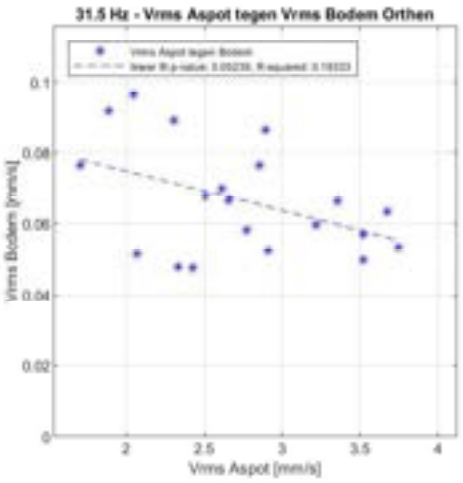

10 Hz - Vrms Aspot tegen Vrms Bodem Orthen
Vrms Bodem [mm/s]
Vrms Aspot [mm/s]

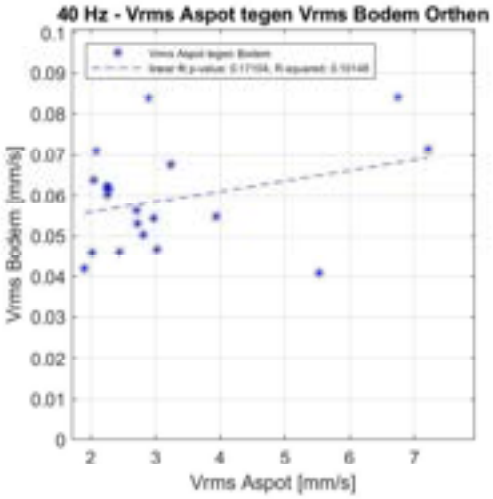

12.5 Hz - Vrms Aspot tegen Vrms Bodem Orthen
Vrms Bodem [mm/s]
Vrms Aspot [mm/s]


16 Hz - Vrms Aspot tegen Vrms Bodem Orthen
Vrms Bodem [mm/s]
Vrms Aspot [mm/s]

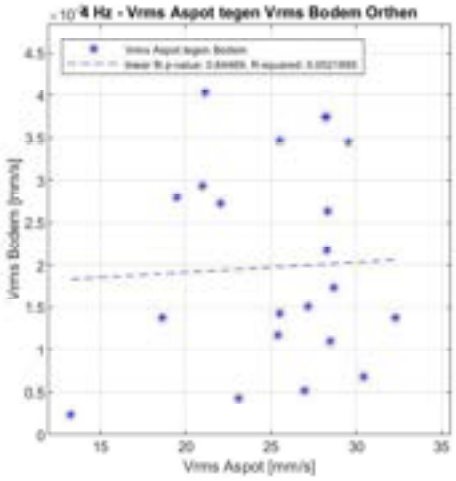

20 Hz - Vrms Aspot tegen Vrms Bodem Orthen
Vrms Bodem [mm/s]
Vrms Aspot [mm/s]

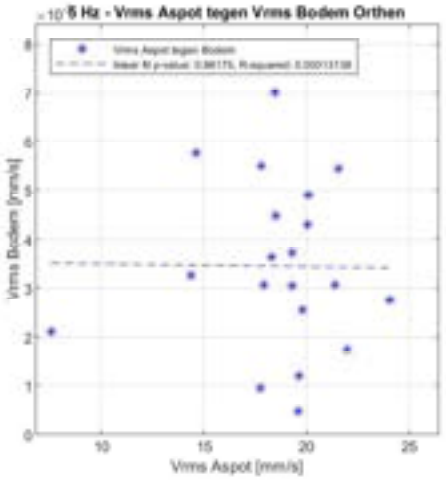

25 Hz - Vrms Aspot tegen Vrms Bodem Orthen
Vrms Bodem [mm/s]
Vrms Aspot [mm/s]

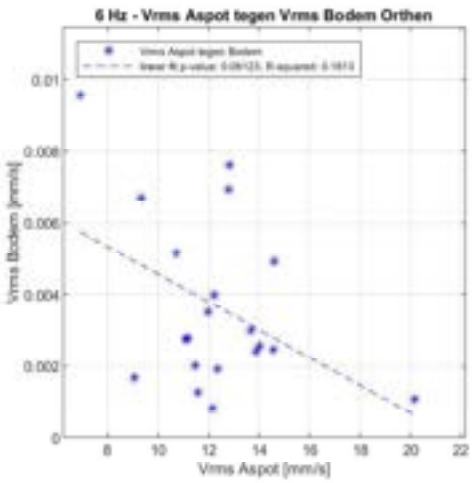

31.5 Hz - Vrms Aspot tegen Vrms Bodem Orthen
Vrms Bodem [mm/s]
Vrms Aspot [mm/s]

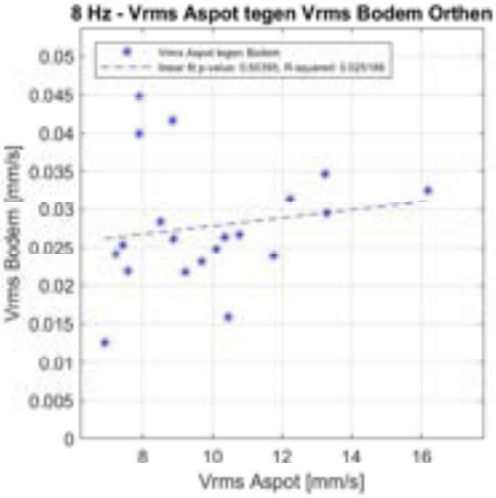

40 Hz - Vrms Aspot tegen Vrms Bodem Orthen
Vrms Bodem [mm/s]
Vrms Aspot [mm/s]

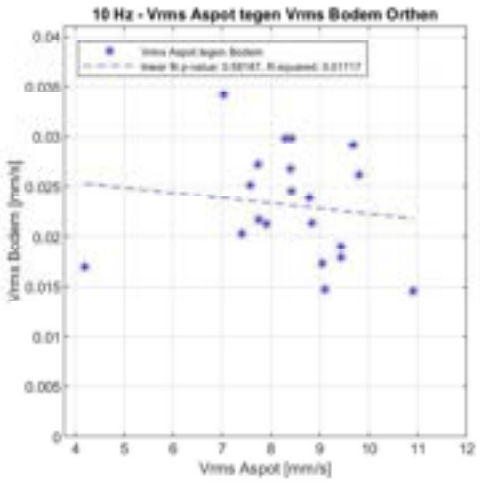
Orthen 2-seconden tijdsinterval

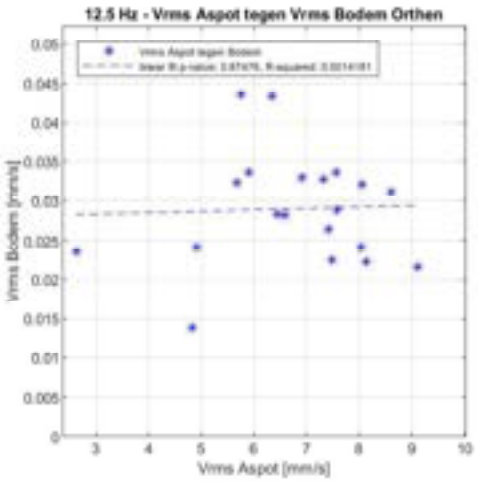

4 Hz - Vrms Aspot tegen Vrms Bodem Orthen
Vrms Bodem [mm/s]
Vrms Aspot [mm/s]

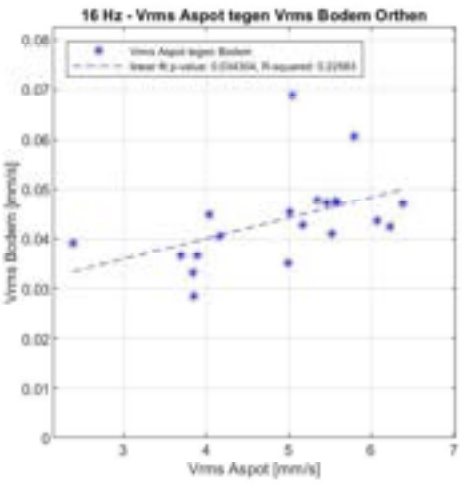

5 Hz - Vrms Aspot tegen Vrms Bodem Orthen
Vrms Bodem [mm/s]
Vrms Aspot [mm/s]

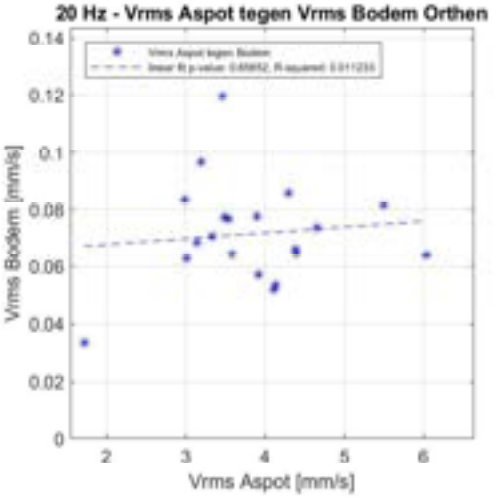

6 Hz - Vrms Aspot tegen Vrms Bodem Orthen
Vrms Bodem [mm/s]
Vrms Aspot [mm/s]

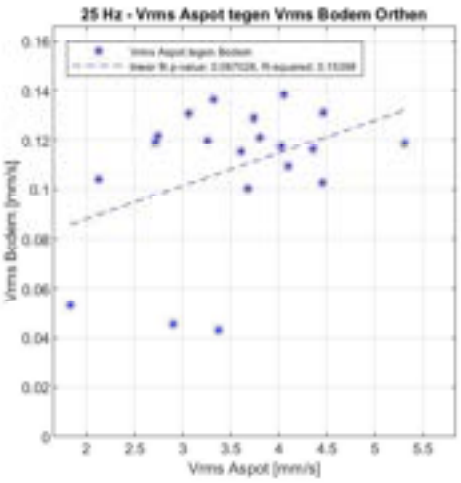

8 Hz - Vrms Aspot tegen Vrms Bodem Orthen
Vrms Bodem [mm/s]
Vrms Aspot [mm/s]

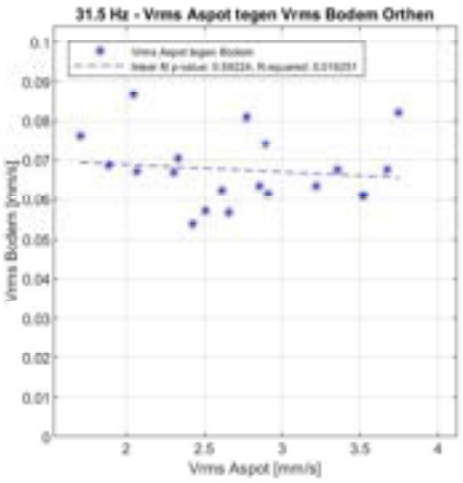

10 Hz - Vrms Aspot tegen Vrms Bodem Orthen
Vrms Bodem [mm/s]
Vrms Aspot [mm/s]

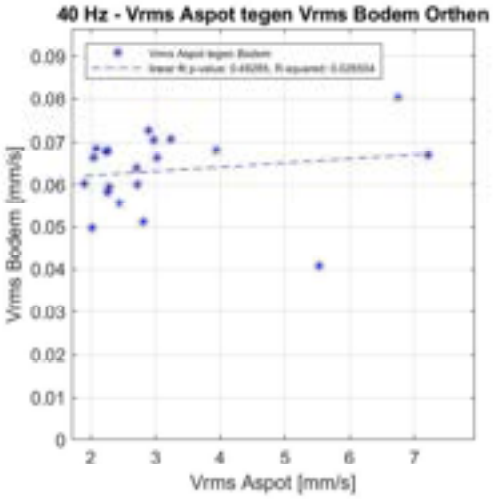

12.5 Hz - Vrms Aspot tegen Vrms Bodem Orthen
Vrms Bodem [mm/s]
Vrms Aspot [mm/s]


16 Hz - Vrms Aspot tegen Vrms Bodem Orthen
Vrms Bodem [mm/s]
Vrms Aspot [mm/s]

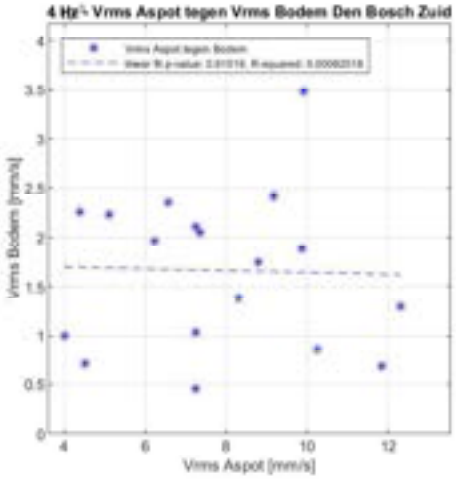

20 Hz - Vrms Aspot tegen Vrms Bodem Orthen
Vrms Bodem [mm/s]
Vrms Aspot [mm/s]

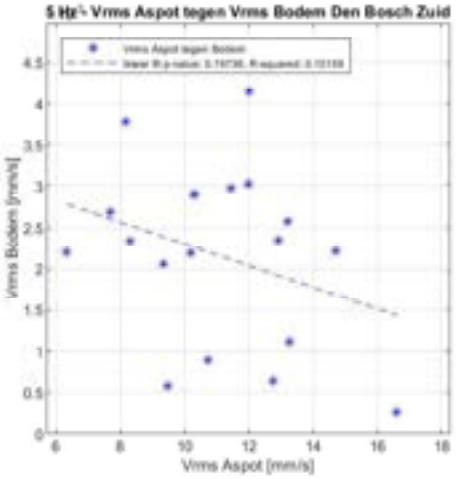

25 Hz - Vrms Aspot tegen Vrms Bodem Orthen
Vrms Bodem [mm/s]
Vrms Aspot [mm/s]

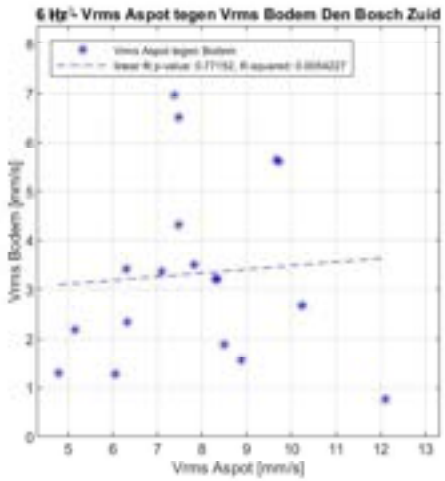

31.5 Hz - Vrms Aspot tegen Vrms Bodem Orthen
Vrms Bodem [mm/s]
Vrms Aspot [mm/s]

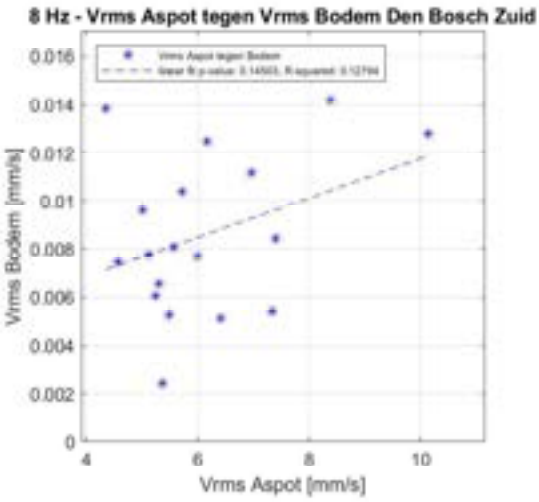

40 Hz - Vrms Aspot tegen Vrms Bodem Orthen
Vrms Bodem [mm/s]
Vrms Aspot [mm/s]

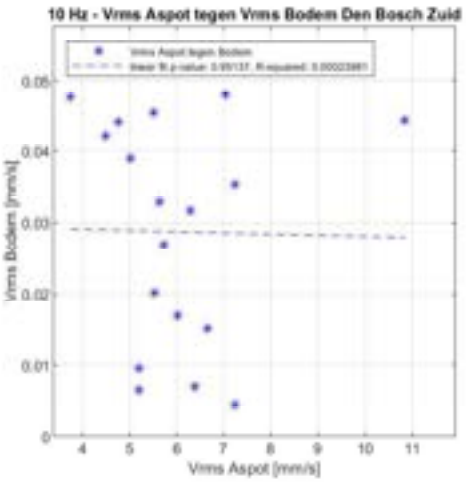
Den Bosch Zuid 1-seconde tijdsinterval

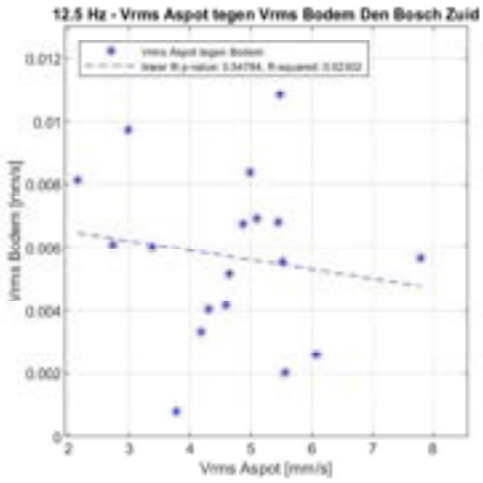


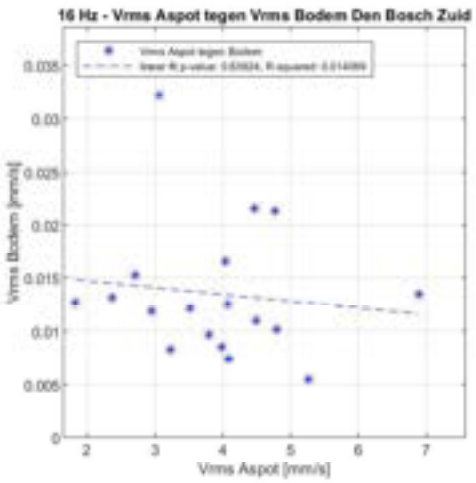


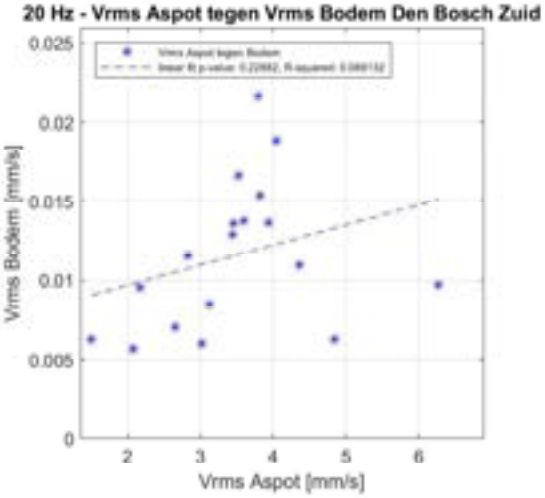


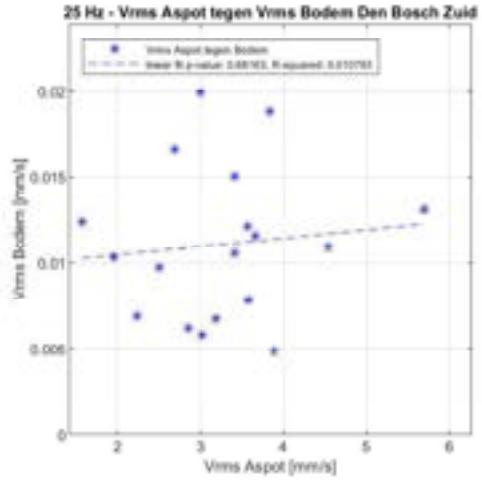


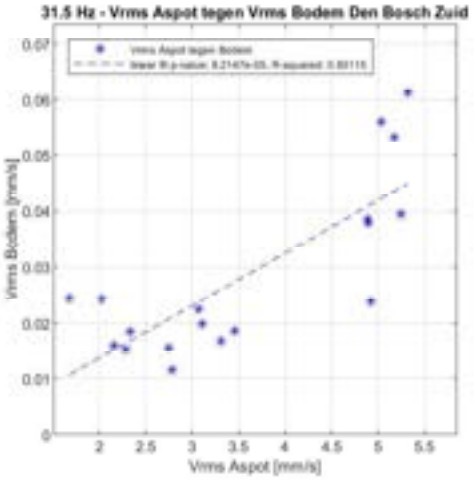

10 Hz - Vrms Aspot tegen Vrms Bodem Den Bosch Zuid
Vrms Bodem [mm/s]
Vrms Aspot [mm/s]

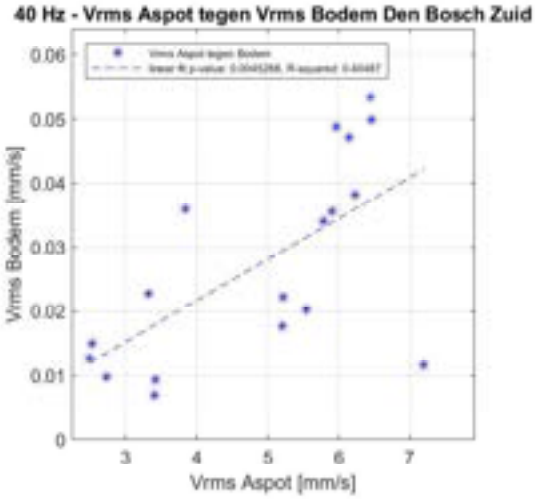

12.5 Hz - Vrms Aspot tegen Vrms Bodem Den Bosch Zuid
Vrms Bodem [mm/s]
Vrms Aspot [mm/s]


16 Hz - Vrms Aspot tegen Vrms Bodem Den Bosch Zuid
Vrms Bodem [mm/s]
Vrms Aspot [mm/s]

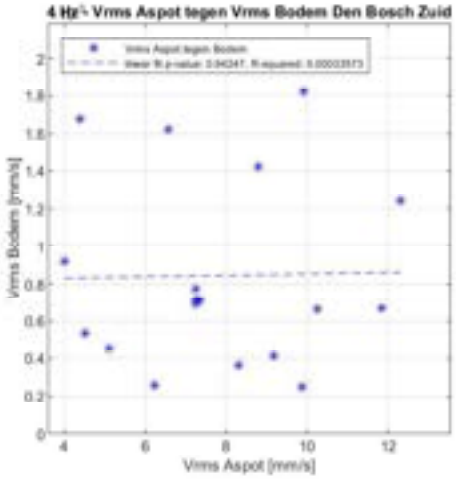

20 Hz - Vrms Aspot tegen Vrms Bodem Den Bosch Zuid
Vrms Bodem [mm/s]
Vrms Aspot [mm/s]

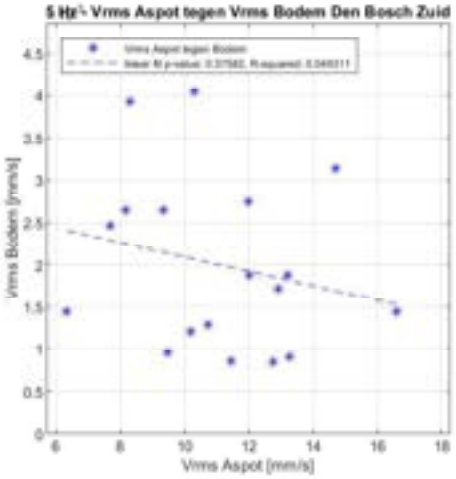

25 Hz - Vrms Aspot tegen Vrms Bodem Den Bosch Zuid
Vrms Aspot tegen Bodem
Vrms Bodem [mm/s]
Vrms Aspot [mm/s]

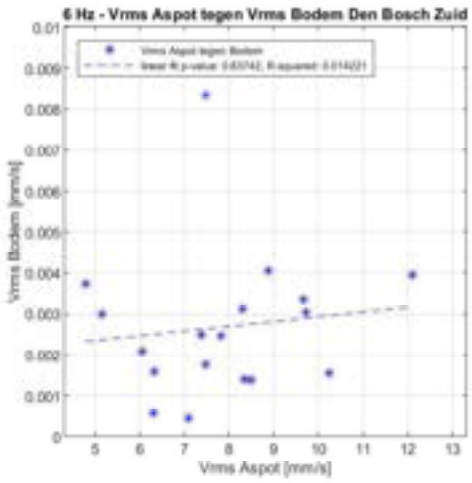

31.5 Hz - Vrms Aspot tegen Vrms Bodem Den Bosch Zuid
Vrms Aspot tegen Bodem
Vrms Bodem [mm/s]
Vrms Aspot [mm/s]

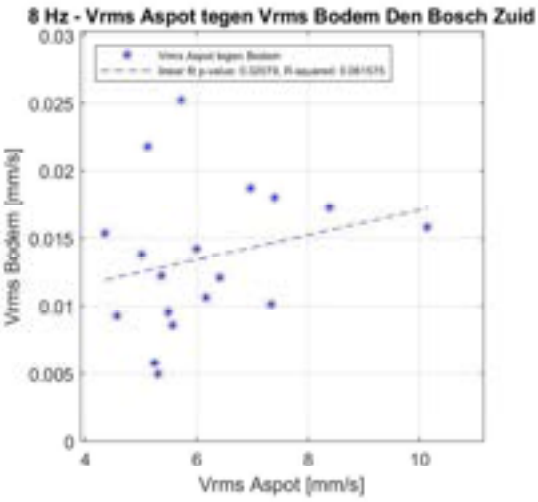

40 Hz - Vrms Aspot tegen Vrms Bodem Den Bosch Zuid
Vrms Aspot tegen Bodem
Vrms Bodem [mm/s]
Vrms Aspot [mm/s]

Den Bosch Zuid 2-seconden tijdsinterval

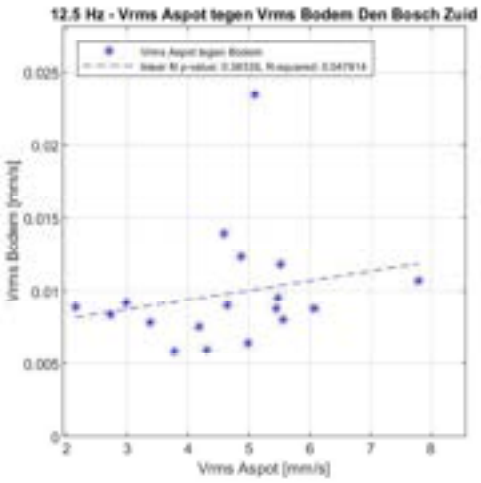


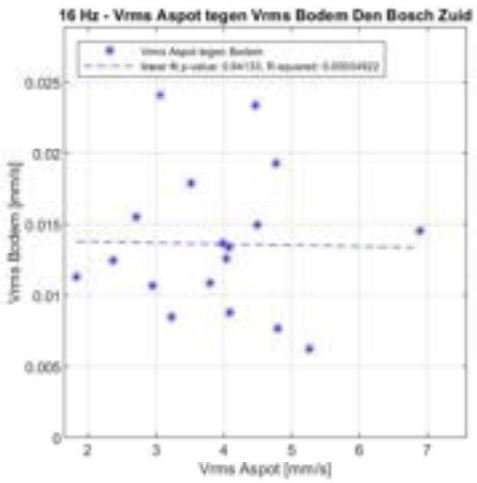


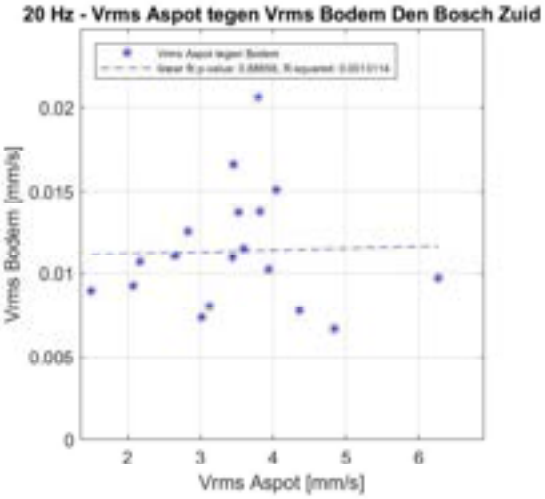


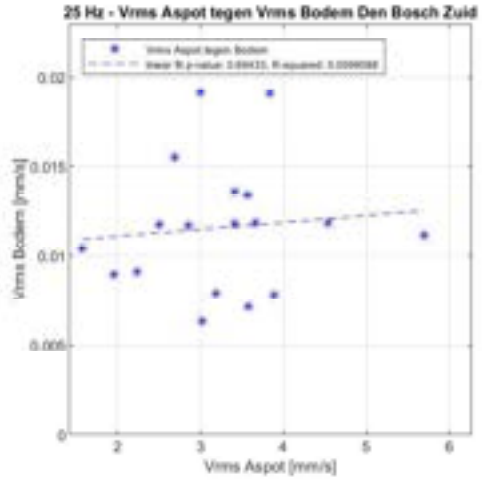


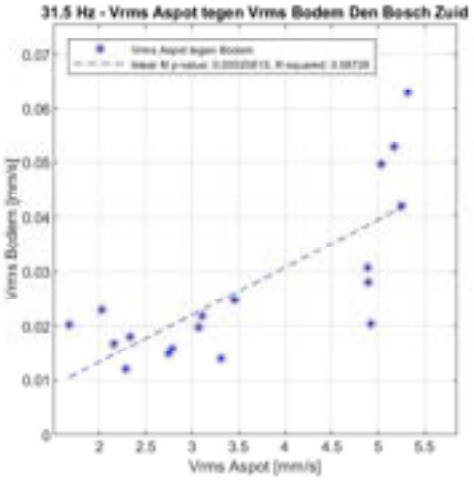
10 Hz - Vrms Aspot tegen Vrms Bodem Den Bosch Zuid
Vrms Bodem [mm/s]
Vrms Aspot [mm/s]

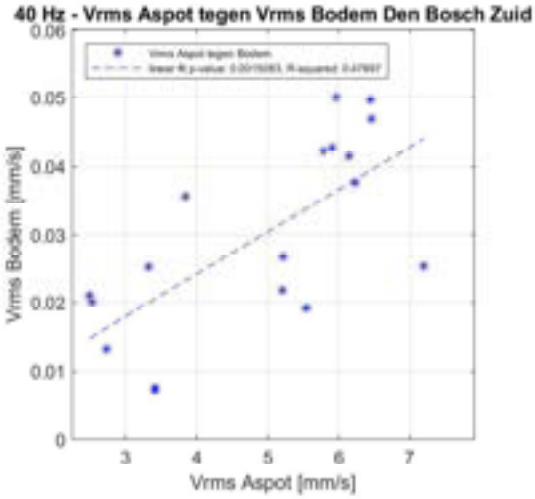

12.5 Hz - Vrms Aspot tegen Vrms Bodem Den Bosch Zuid
Vrms Bodem [mm/s]
Vrms Aspot [mm/s]


16 Hz - Vrms Aspot tegen Vrms Bodem Den Bosch Zuid
Vrms Bodem [mm/s]
Vrms Aspot [mm/s]


20 Hz - Vrms Aspot tegen Vrms Bodem Den Bosch Zuid
Vrms Bodem [mm/s]
Vrms Aspot [mm/s]

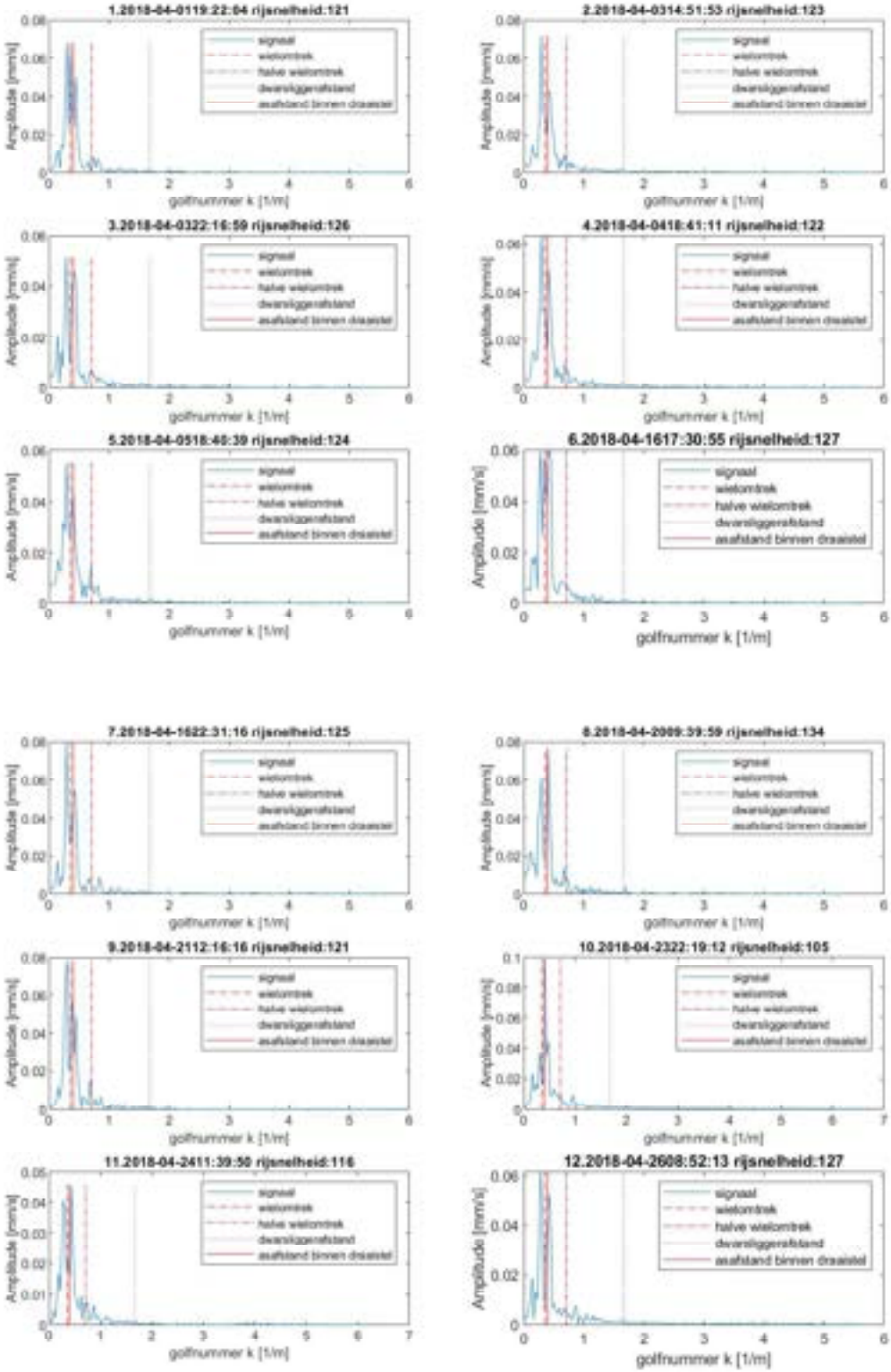

25 Hz - Vrms Aspot tegen Vrms Bodem Den Bosch Zuid
Vrms Bodem [mm/s]
Vrms Aspot [mm/s]

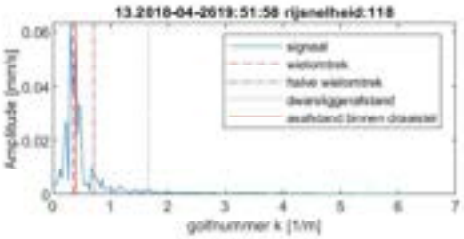

31.5 Hz - Vrms Aspot tegen Vrms Bodem Den Bosch Zuid
Vrms Bodem [mm/s]
Vrms Aspot [mm/s]

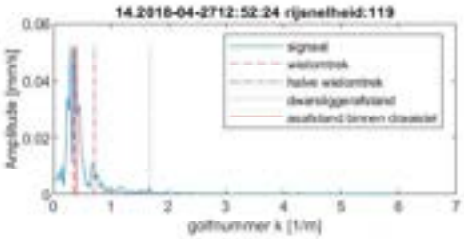

40 Hz - Vrms Aspot tegen Vrms Bodem Den Bosch Zuid
Vrms Bodem [mm/s]
Vrms Aspot [mm/s]

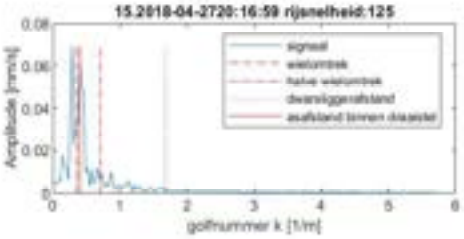
Bijlage III: Bodemtrillingssignalen uitgezet tegen golfgetal

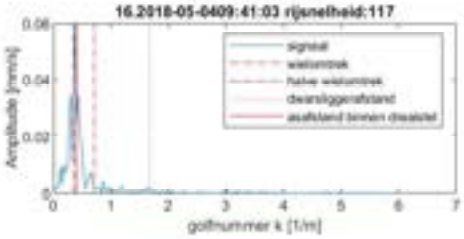
Schalkwijk

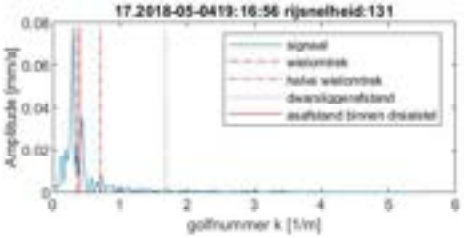


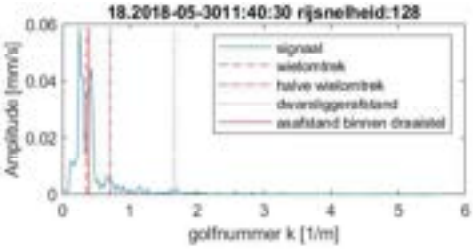

13.2018-04-2619:51:58 rijsnelheid:118
signaal
golfnummer k [1/m]

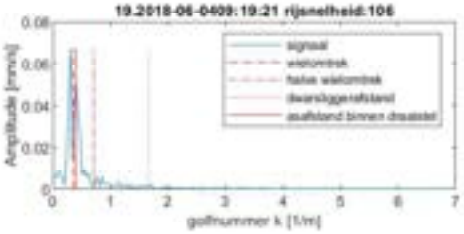

14.2018-04-2712:52:24 rijsnelheid:119
signaal
golfnummer k [1/m]

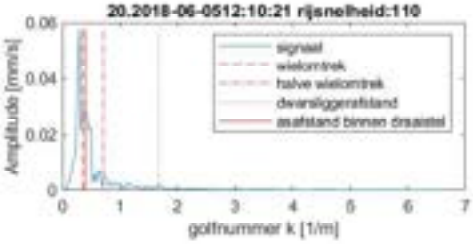

15.2018-04-2720:16:59 rijsnelheid:125
signaal
golfnummer k [1/m]


16.2018-05-0409:41:03 rijsnelheid:117
signaal
golfnummer k [1/m]

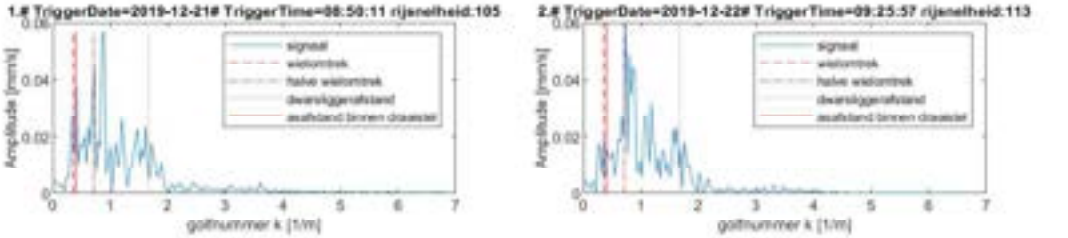

17.2018-05-0419:16:56 rijsnelheid:131
signaal
golfnummer k [1/m]

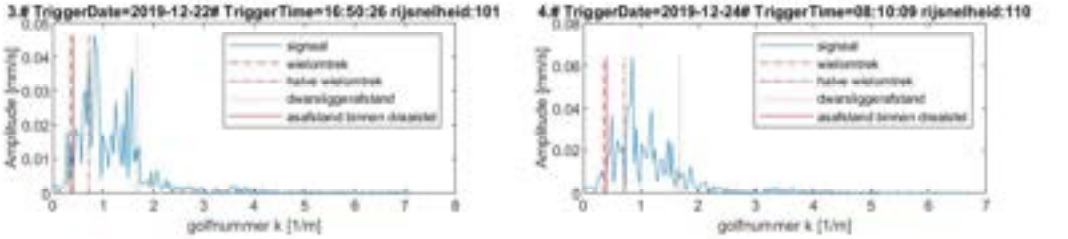

18.2018-05-3011:40:30 rijsnelheid:128
signaal
golfnummer k [1/m]

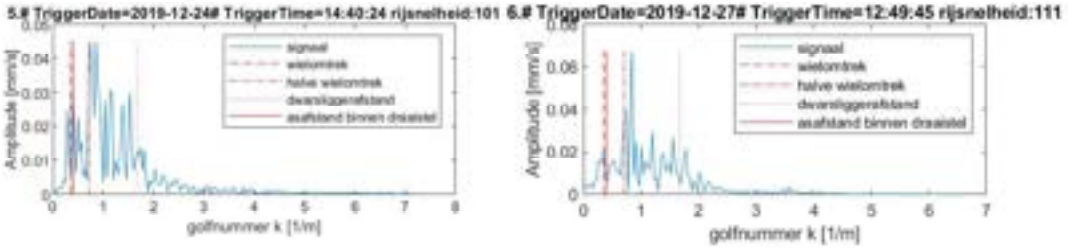

19.2018-06-0409:19:21 rijsnelheid:106
signaal
golfnummer k [1/m]

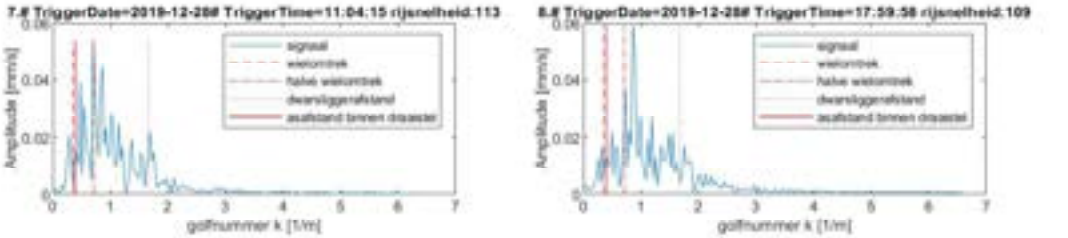

20.2018-06-0512:10:21 rijsnelheid:110
signaal
golfnummer k [1/m]

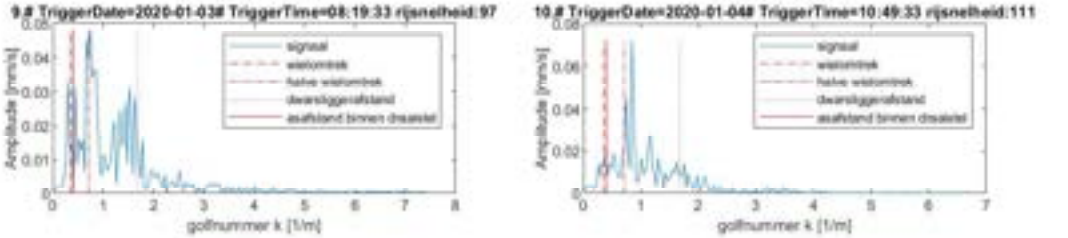
Orthen

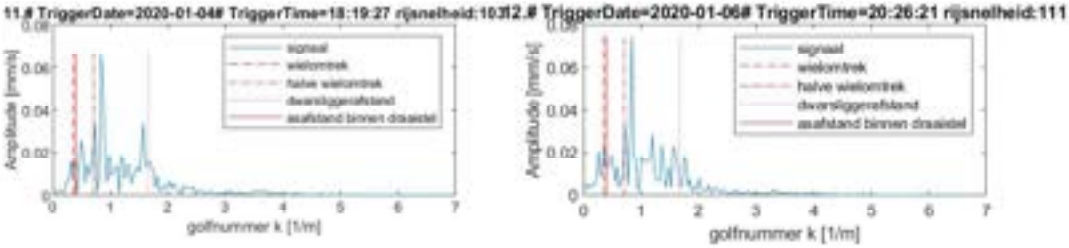

1.# TriggerDate=2019-12-21# TriggerTime=08:50:11 rijsnelheid:105
2.# TriggerDate=2019-12-22# TriggerTime=09:25:57 rijsnelheid:113
signaal
wielomtrek
halve wielomtrek
dwarsliggerafstand
asafstand binnen draaistel
Amplitude [mm/s]
golfnummer k [1/m]

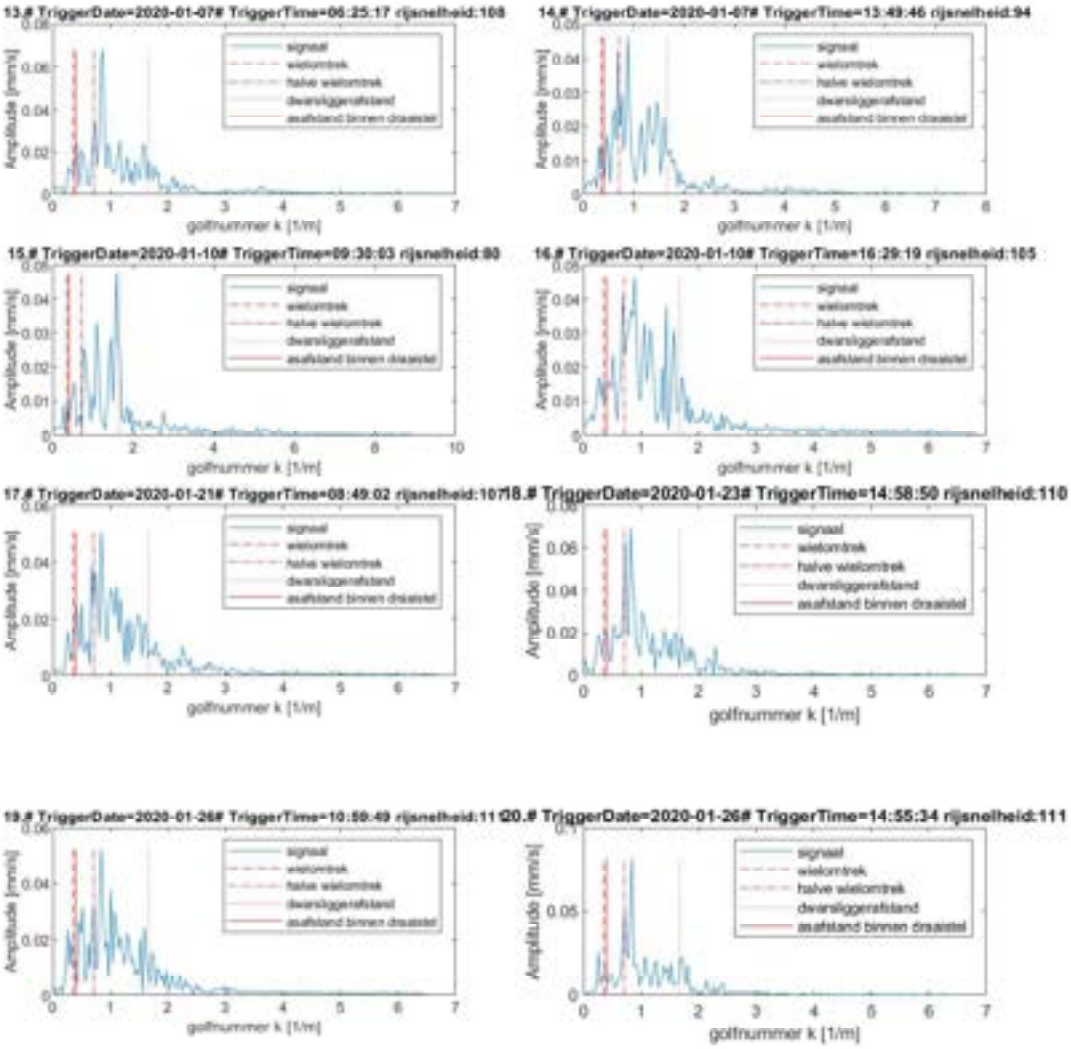

3.# TriggerDate=2019-12-22# TriggerTime=16:50:26 rijsnelheid:101
4.# TriggerDate=2019-12-24# TriggerTime=08:10:09 rijsnelheid:110
signaal
wielomtrek
halve wielomtrek
dwarsliggerafstand
asafstand binnen draaistel
Amplitude [mm/s]
golfnummer k [1/m]

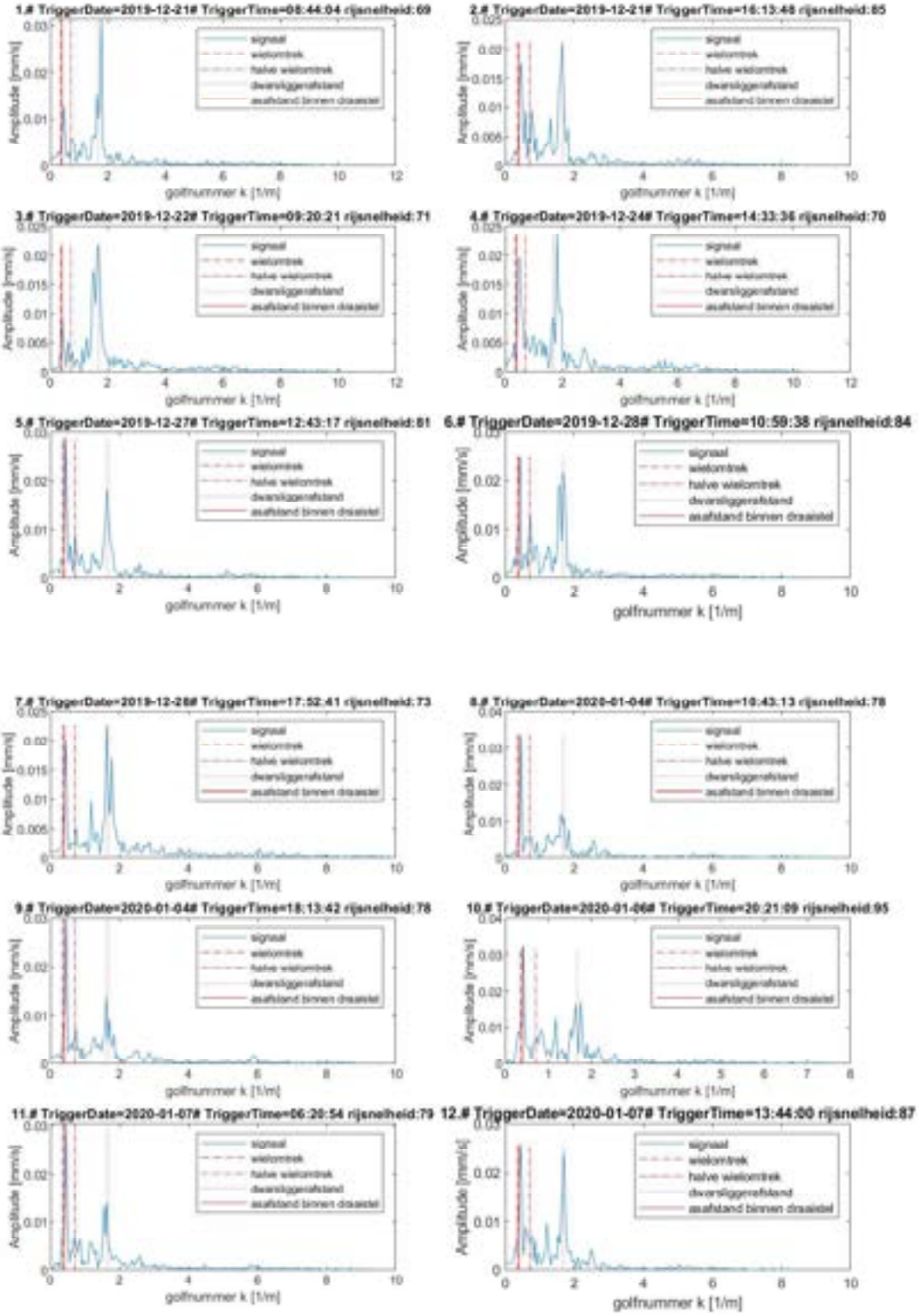

5.# TriggerDate=2019-12-24# TriggerTime=14:40:24 rijsnelheid:101
6.# TriggerDate=2019-12-27# TriggerTime=12:49:45 rijsnelheid:111
signaal
wielomtrek
halve wielomtrek
dwarsliggerafstand
asafstand binnen draaistel
Amplitude [mm/s]
golfnummer k [1/m]

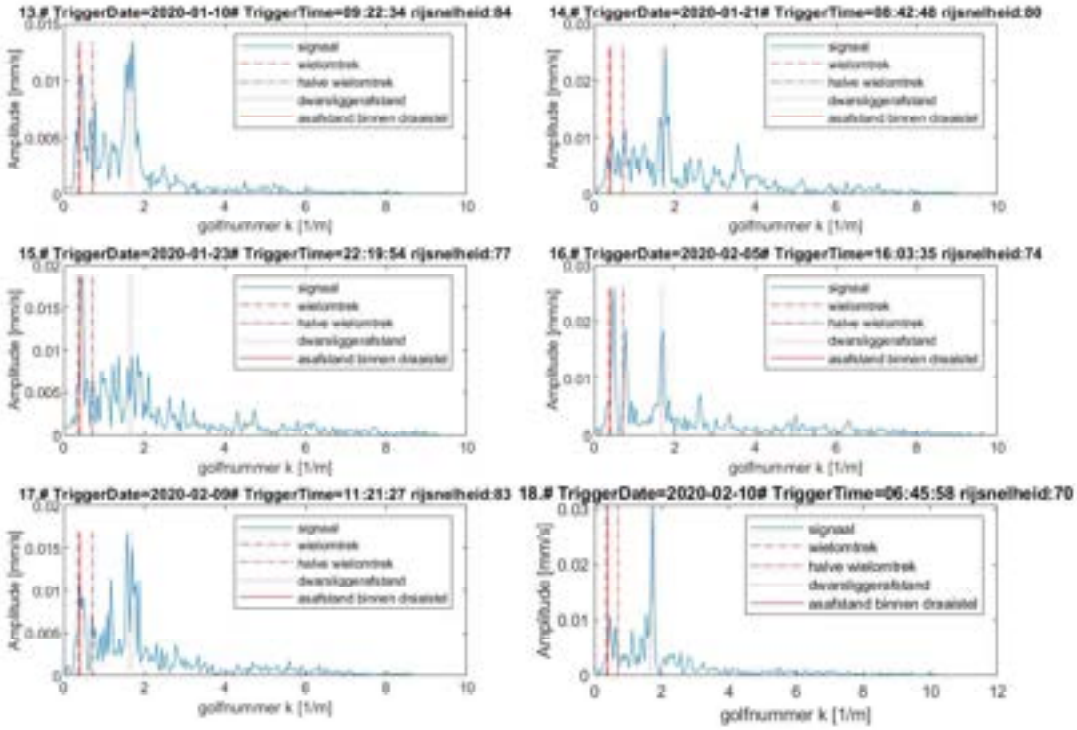

7.# TriggerDate=2019-12-28# TriggerTime=11:04:15 rijsnelheid:113
8.# TriggerDate=2019-12-28# TriggerTime=17:59:58 rijsnelheid:109
signaal
wielomtrek
halve wielomtrek
dwarsliggerafstand
asafstand binnen draaistel
Amplitude [mm/s]
golfnummer k [1/m]


9.# TriggerDate=2020-01-03# TriggerTime=08:19:33 rijsnelheid:97
10.# TriggerDate=2020-01-04# TriggerTime=10:49:33 rijsnelheid:111
signaal
wielomtrek
halve wielomtrek
dwarsliggerafstand
asafstand binnen draaistel
Amplitude [mm/s]
golfnummer k [1/m]

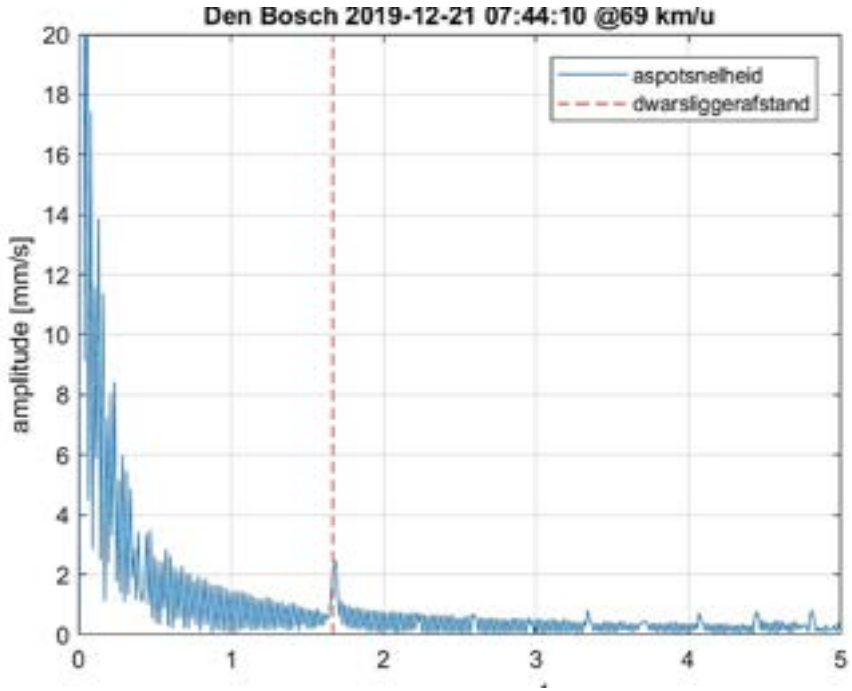

11.# TriggerDate=2020-01-04# TriggerTime=18:19:27 rijsnelheid:103
12.# TriggerDate=2020-01-06# TriggerTime=20:26:21 rijsnelheid:111
signaal
wielomtrek
halve wielomtrek
dwarsliggerafstand
asafstand binnen draaistel
Amplitude [mm/s]
golfnummer k [1/m]

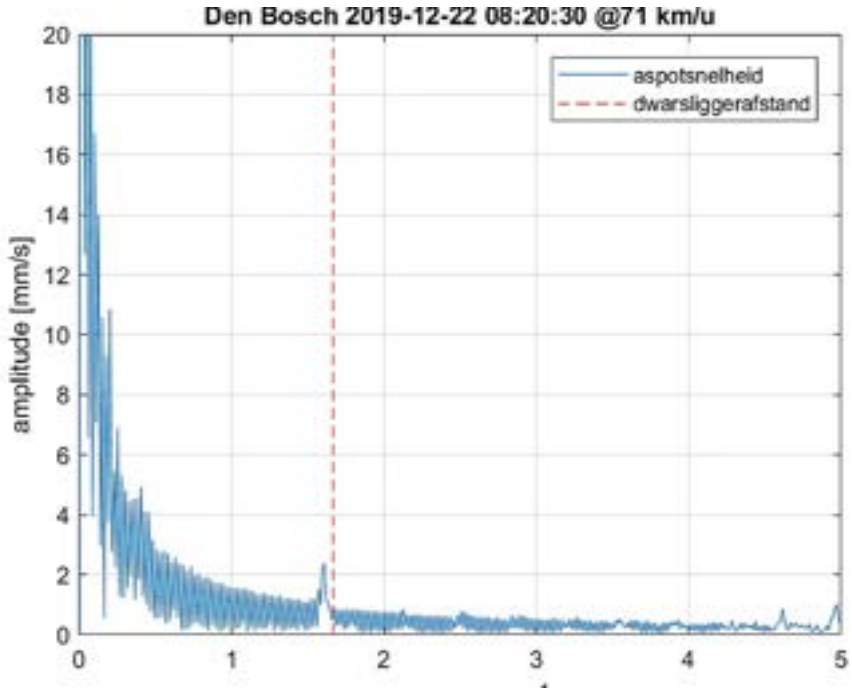

13.# TriggerDate=2020-01-07# TriggerTime=06:25:17 rijsnelheid:108
14.# TriggerDate=2020-01-07# TriggerTime=13:49:46 rijsnelheid:94
15.# TriggerDate=2020-01-10# TriggerTime=09:30:03 rijsnelheid:80
16.# TriggerDate=2020-01-10# TriggerTime=16:29:19 rijsnelheid:105
17.# TriggerDate=2020-01-21# TriggerTime=08:49:02 rijsnelheid:107
18.# TriggerDate=2020-01-23# TriggerTime=14:58:50 rijsnelheid:110
19.# TriggerDate=2020-01-26# TriggerTime=10:59:49 rijsnelheid:111
20.# TriggerDate=2020-01-26# TriggerTime=14:55:34 rijsnelheid:111
signaal
wielomtrek
halve wielomtrek
dwarsliggerafstand
asafstand binnen draaistel
Amplitude [mm/s]
golfnummer k [1/m]

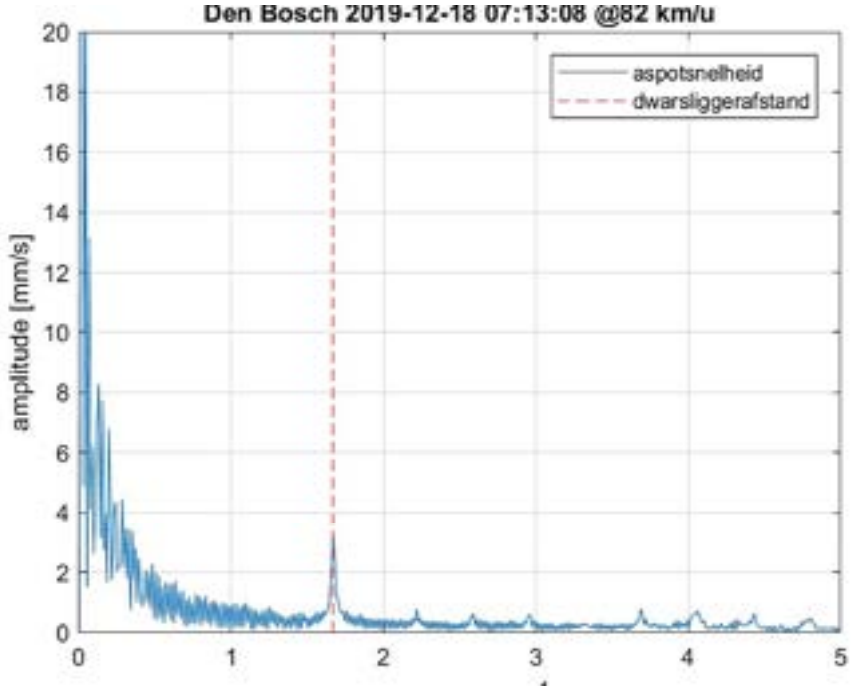

1.# TriggerDate=2019-12-21# TriggerTime=08:44:04 rijsnelheid:69
2.# TriggerDate=2019-12-21# TriggerTime=16:13:48 rijsnelheid:85
3.# TriggerDate=2019-12-22# TriggerTime=09:20:21 rijsnelheid:71
4.# TriggerDate=2019-12-24# TriggerTime=14:33:36 rijsnelheid:70
5.# TriggerDate=2019-12-27# TriggerTime=12:43:17 rijsnelheid:81
6.# TriggerDate=2019-12-28# TriggerTime=10:59:38 rijsnelheid:84
7.# TriggerDate=2019-12-28# TriggerTime=17:52:41 rijsnelheid:73
8.# TriggerDate=2020-01-04# TriggerTime=10:43:13 rijsnelheid:78
9.# TriggerDate=2020-01-04# TriggerTime=18:13:42 rijsnelheid:78
10.# TriggerDate=2020-01-06# TriggerTime=20:21:09 rijsnelheid:95
11.# TriggerDate=2020-01-07# TriggerTime=06:20:54 rijsnelheid:79
12.# TriggerDate=2020-01-07# TriggerTime=13:44:00 rijsnelheid:87
signaal
wielomtrek
halve wielomtrek
dwarsliggerafstand
asafstand binnen draaistel
Amplitude [mm/s]
golfnummer k [1/m]

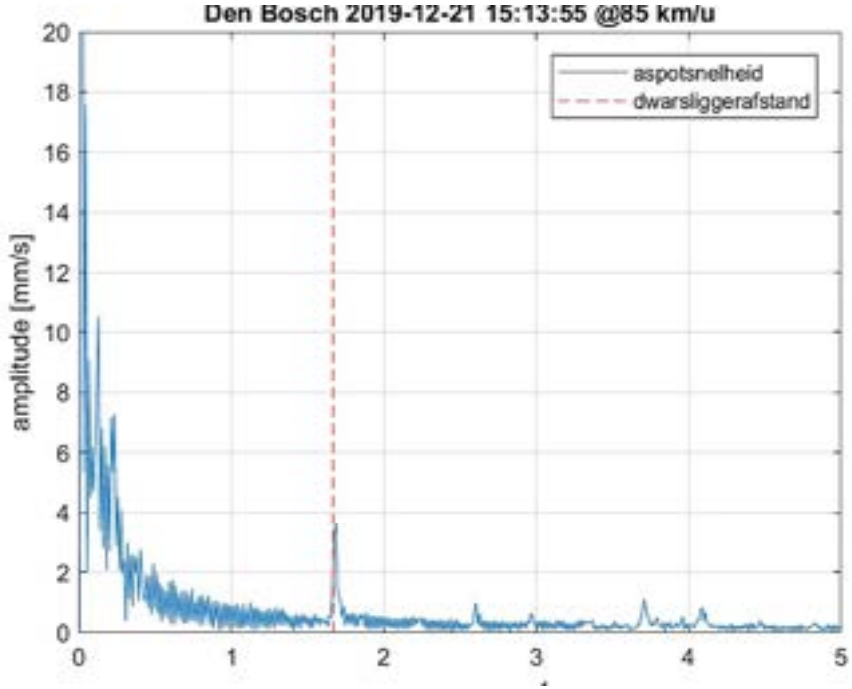

13.# TriggerDate=2020-01-10# TriggerTime=09:22:34 rijsnelheid:84
14.# TriggerDate=2020-01-21# TriggerTime=08:42:46 rijsnelheid:80
15.# TriggerDate=2020-01-23# TriggerTime=22:19:54 rijsnelheid:77
16.# TriggerDate=2020-02-05# TriggerTime=16:03:35 rijsnelheid:74
17.# TriggerDate=2020-02-09# TriggerTime=11:21:27 rijsnelheid:83
18.# TriggerDate=2020-02-10# TriggerTime=06:45:58 rijsnelheid:70
signaal
wielomtrek
halve wielomtrek
dwarsliggerafstand
asafstand binnen draaistel
Amplitude [mm/s]
golfnummer k [1/m]

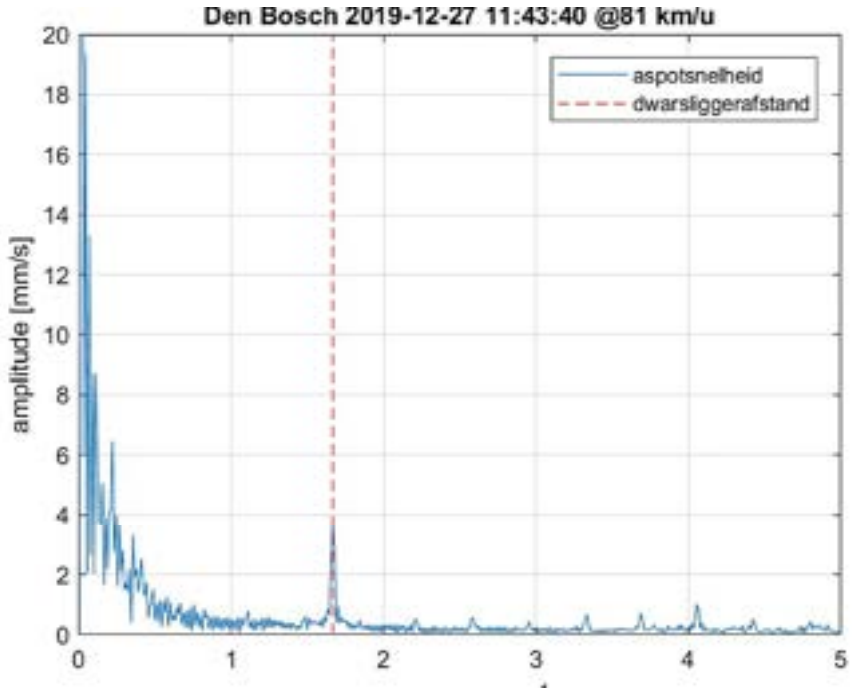
Bijlage IV: Aspottrillingssignalen uitgezet tegen golfgetal

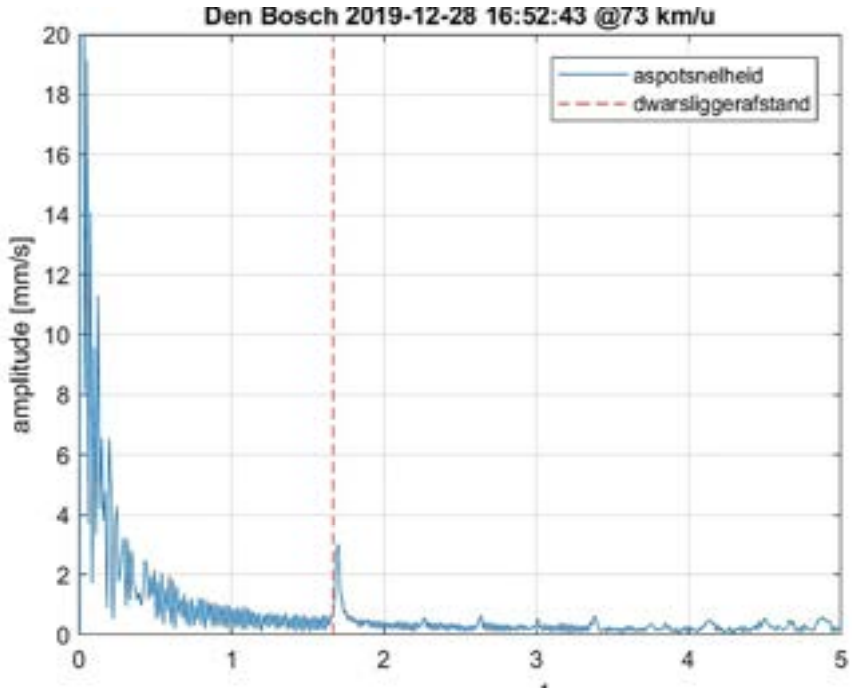

Den Bosch 2019-12-21 07:44:10 @69 km/u
aspotsnelheid
dwarsliggerafstand
amplitude [mm/s]

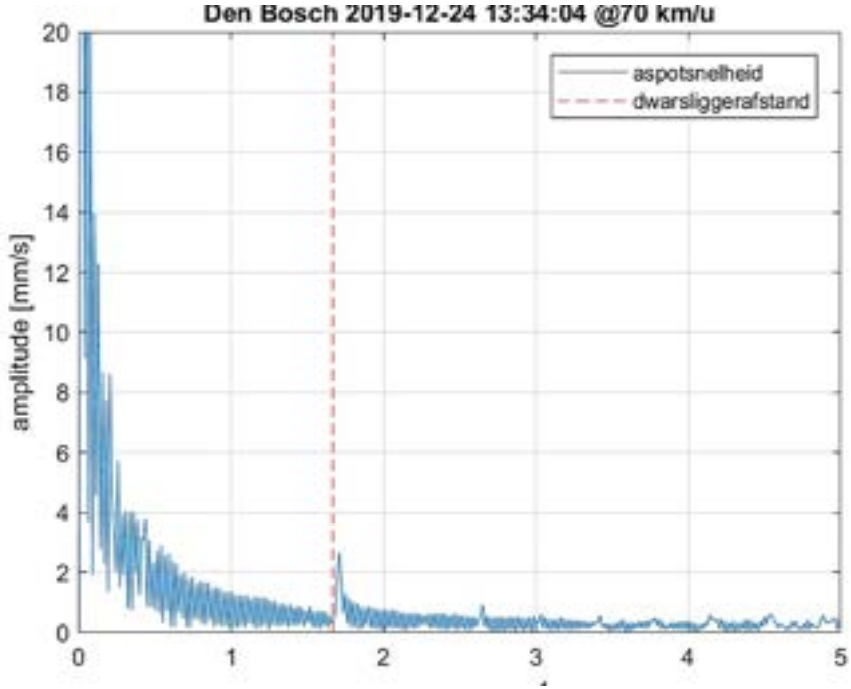

Den Bosch 2019-12-22 08:20:30 @71 km/u
aspotsnelheid
dwarsliggerafstand
amplitude [mm/s]

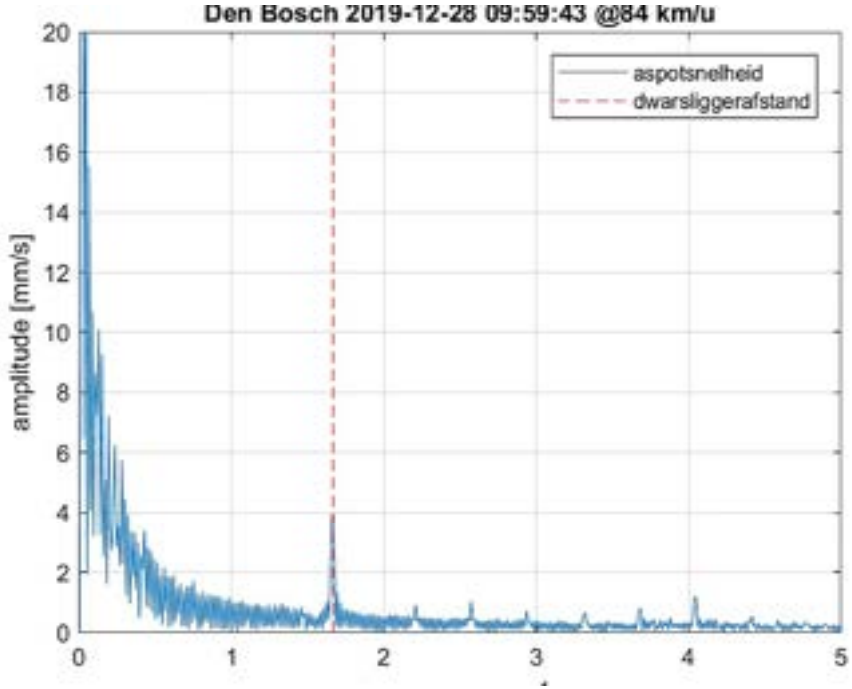

Den Bosch 2019-12-18 07:13:08 @82 km/u
aspotsnelheid
dwarsliggerafstand
amplitude [mm/s]

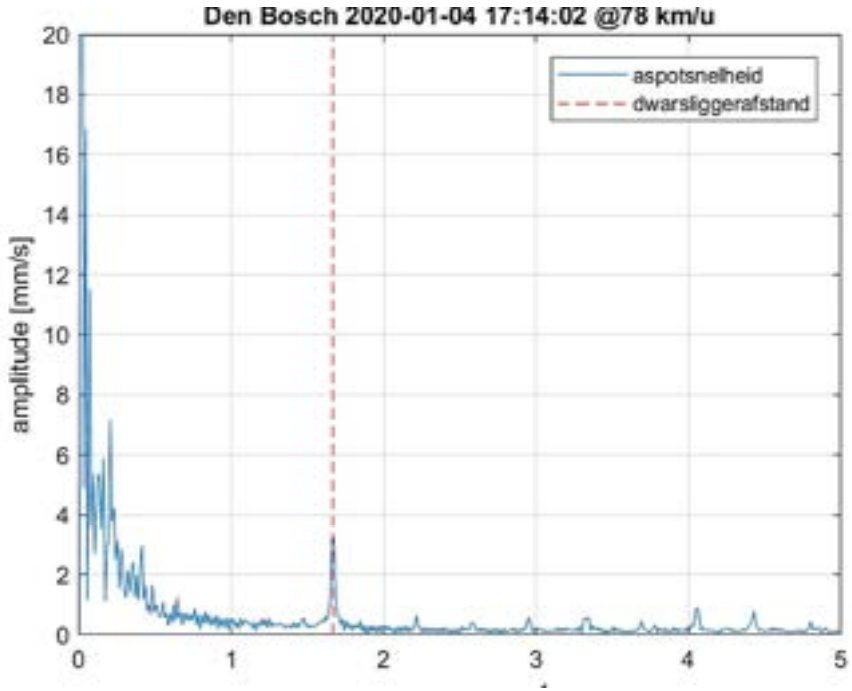

Den Bosch 2019-12-21 15:13:55 @85 km/u
aspotsnelheid
dwarsliggerafstand
amplitude [mm/s]

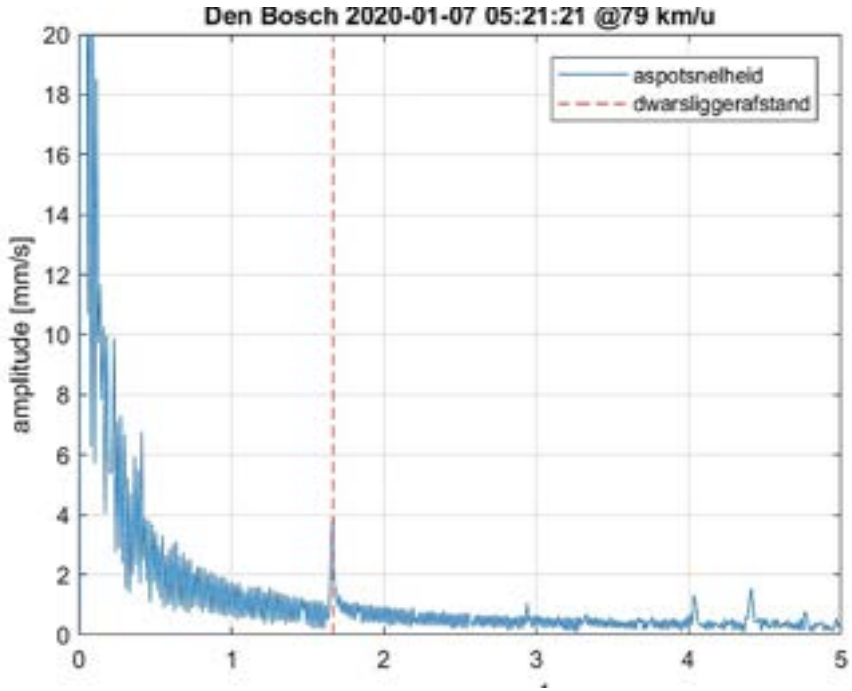

Den Bosch 2019-12-27 11:43:40 @81 km/u
aspotsnelheid
dwarsliggerafstand
amplitude [mm/s]

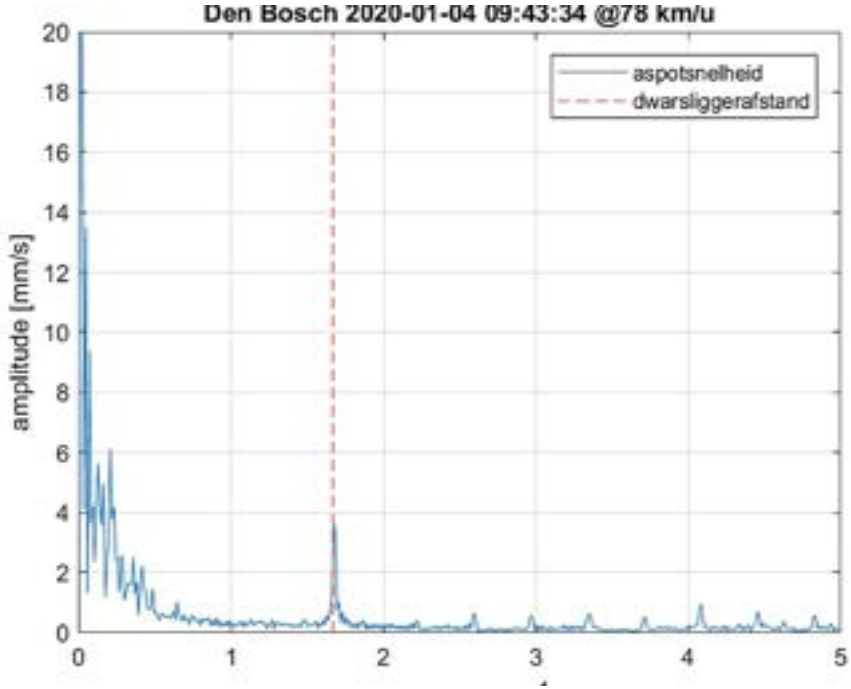

Den Bosch 2019-12-28 16:52:43 @73 km/u
aspotsnelheid
dwarsliggerafstand
amplitude [mm/s]

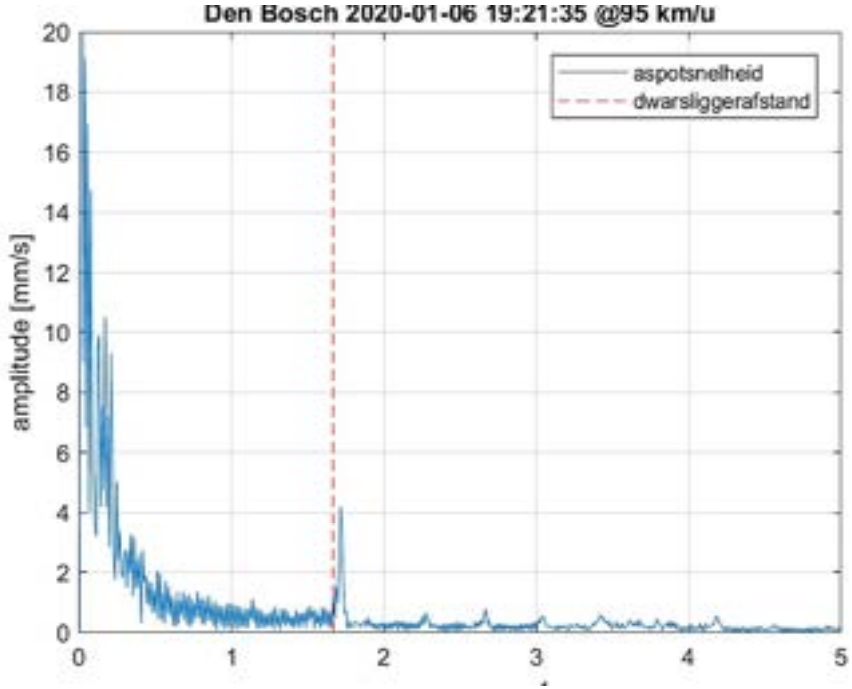

Den Bosch 2019-12-24 13:34:04 @70 km/u
aspotsnelheid
dwarsliggerafstand
amplitude [mm/s]

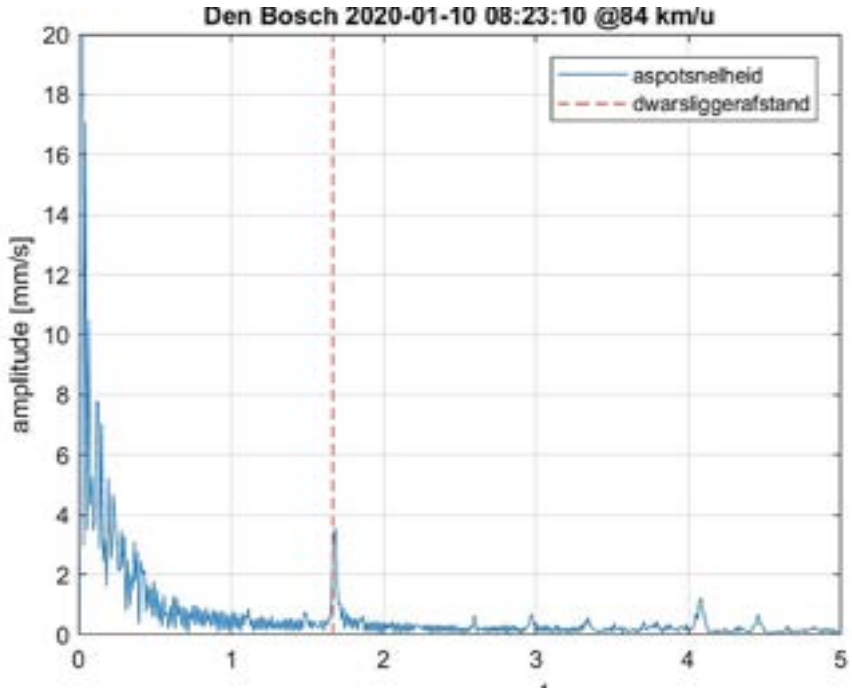

Den Bosch 2019-12-28 09:59:43 @84 km/u
aspotsnelheid
dwarsliggerafstand
amplitude [mm/s]

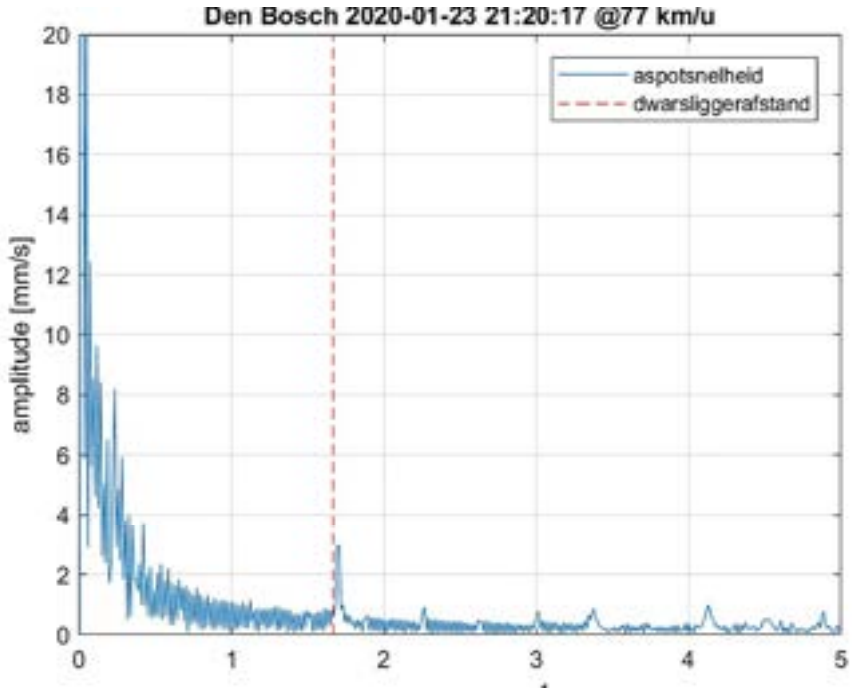

Den Bosch 2020-01-04 17:14:02 @78 km/u
aspotsnelheid
dwarsliggerafstand
amplitude [mm/s]

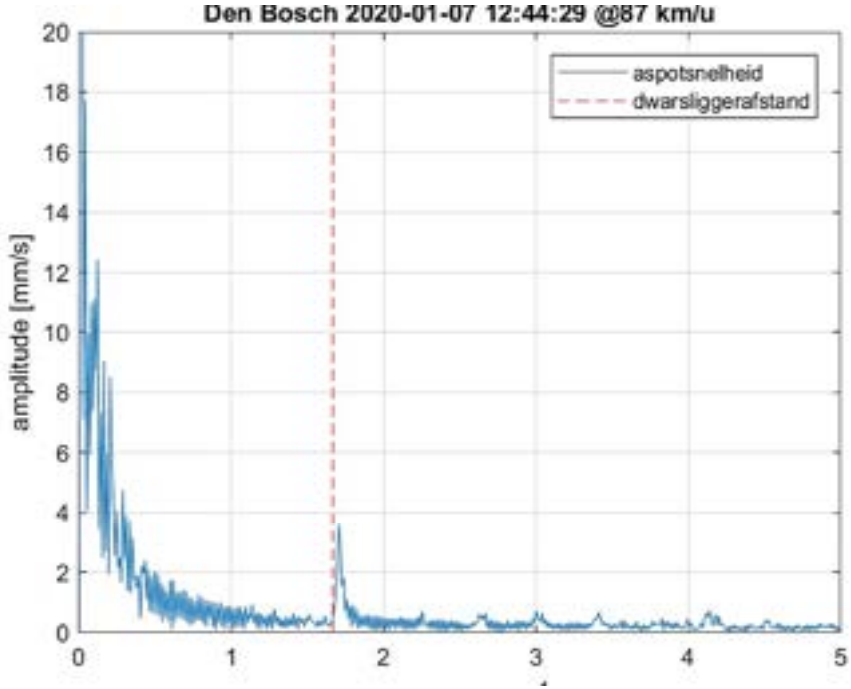

Den Bosch 2020-01-07 05:21:21 @79 km/u
aspotsnelheid
dwarsliggerafstand
amplitude [mm/s]

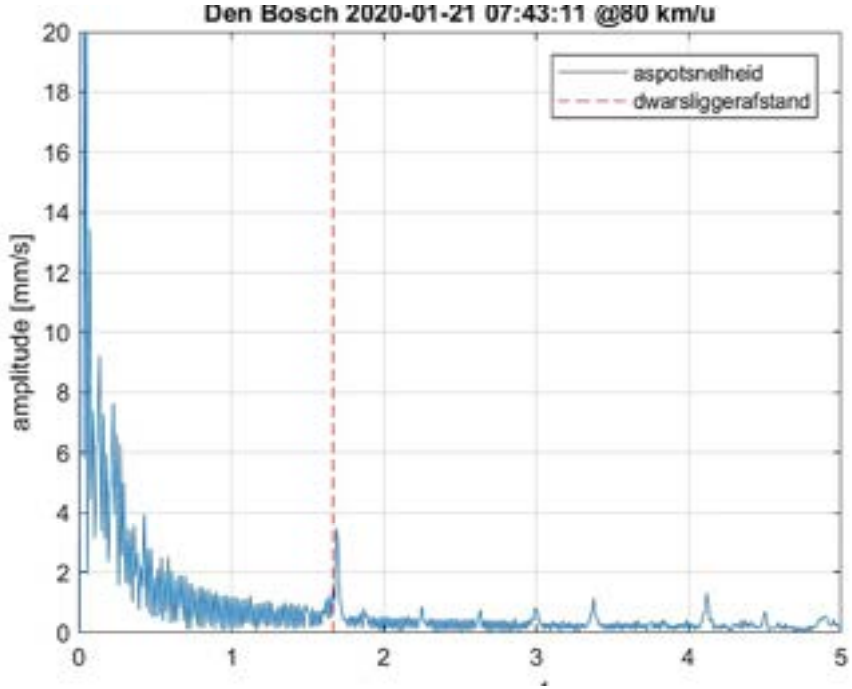

Den Bosch 2020-01-04 09:43:34 @78 km/u
aspotsnelheid
dwarsliggerafstand
amplitude [mm/s]

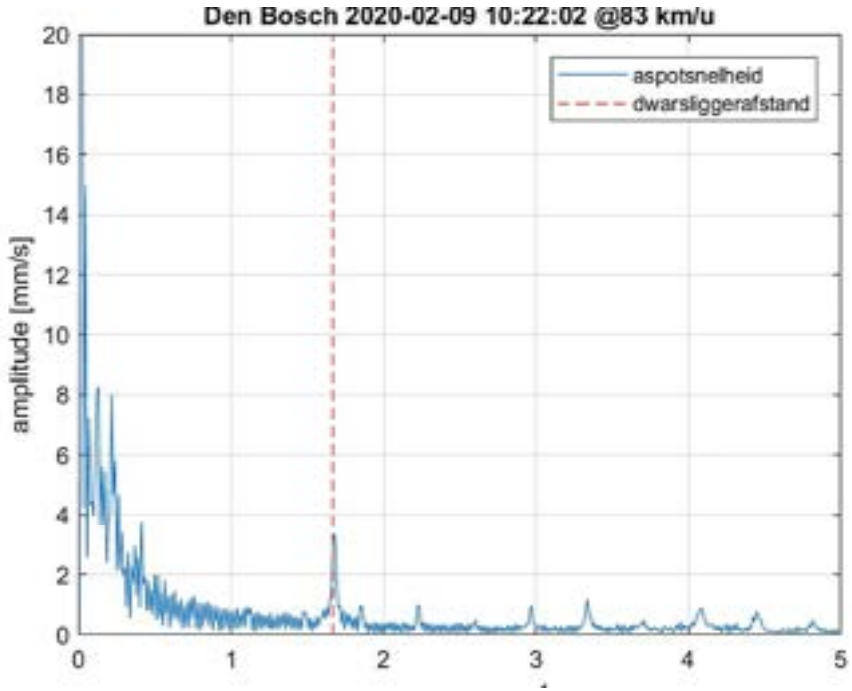

Den Bosch 2020-01-06 19:21:35 @95 km/u
aspotsnelheid
dwarsliggerafstand
amplitude [mm/s]

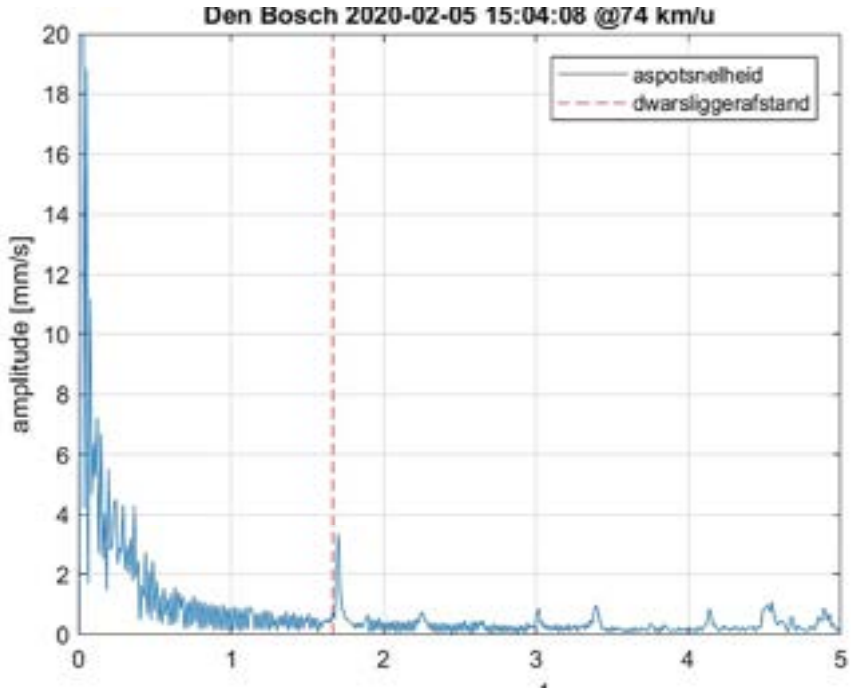

Den Bosch 2020-01-10 08:23:10 @84 km/u
aspotsnelheid
dwarsliggerafstand
amplitude [mm/s]

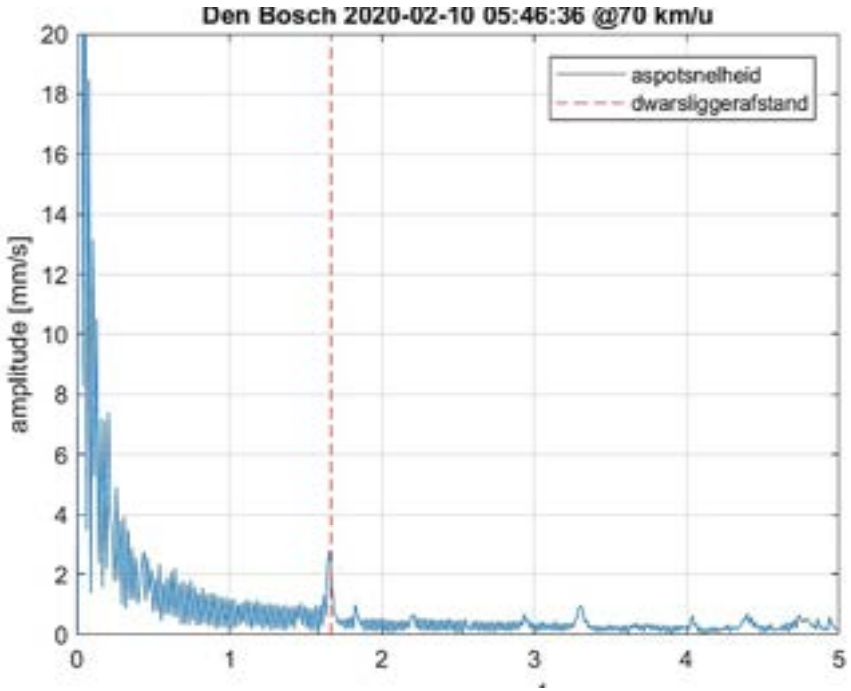

Den Bosch 2020-01-23 21:20:17 @77 km/u
aspotsnelheid
dwarsliggerafstand
amplitude [mm/s]

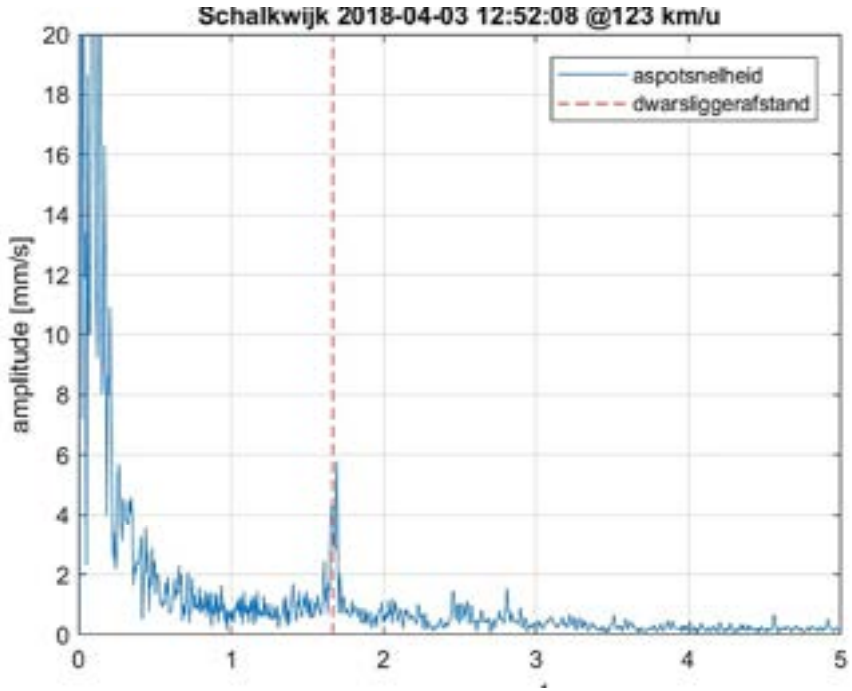

Den Bosch 2020-01-07 12:44:29 @87 km/u
aspotsnelheid
dwarsliggerafstand
amplitude [mm/s]

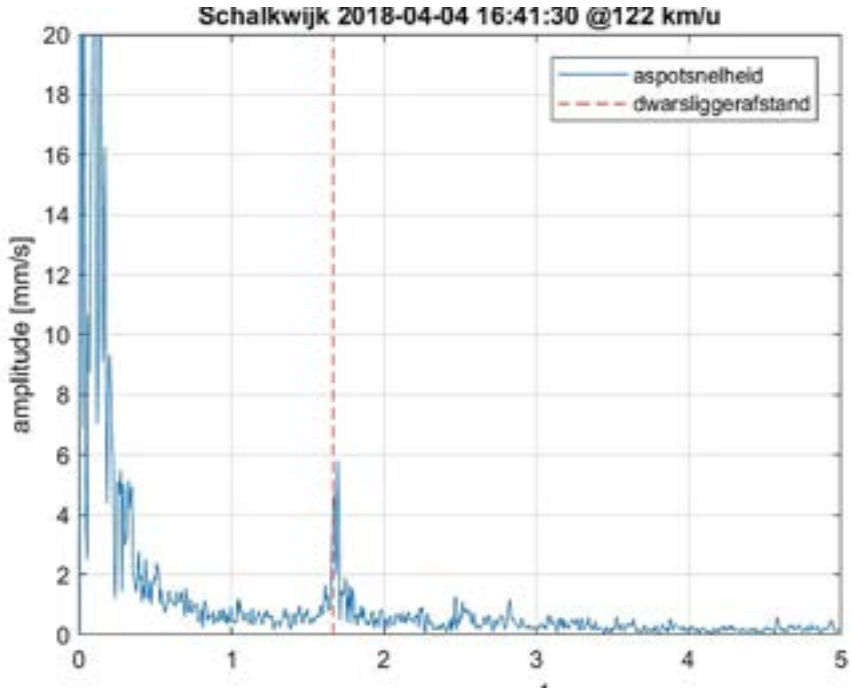

Den Bosch 2020-01-21 07:43:11 @80 km/u
aspotsnelheid
dwarsliggerafstand
amplitude [mm/s]

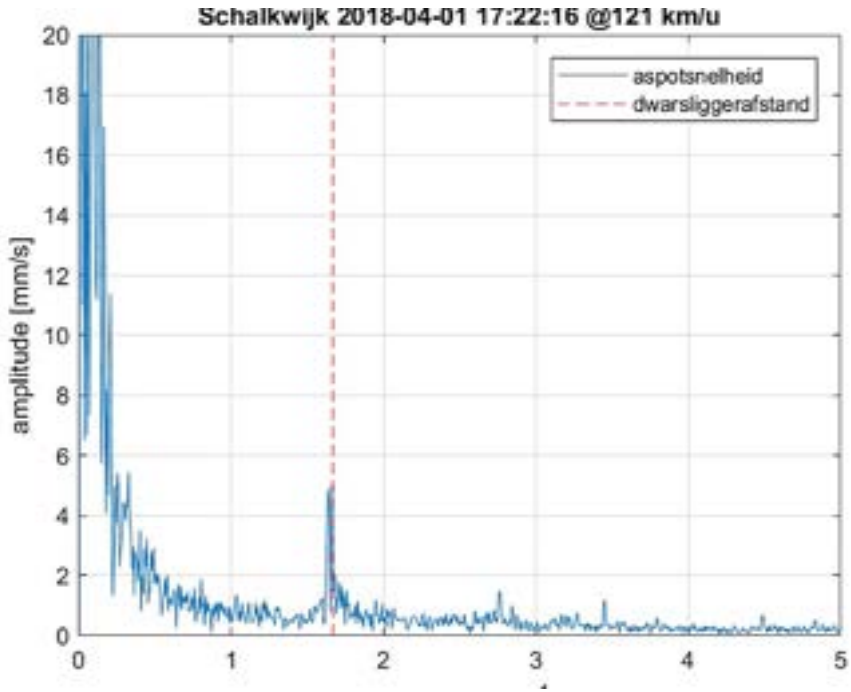

Den Bosch 2020-02-09 10:22:02 @83 km/u
aspotsnelheid
dwarsliggerafstand
amplitude [mm/s]
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20
0
1
2
3
4
5

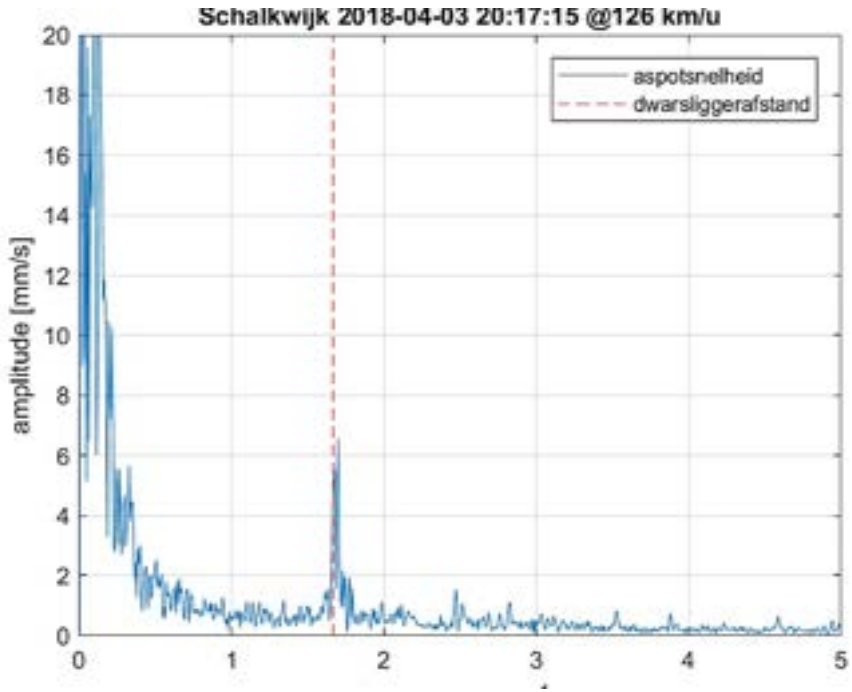

Den Bosch 2020-02-05 15:04:08 @74 km/u
aspotsnelheid
dwarsliggerafstand
amplitude [mm/s]
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20
0
1
2
3
4
5

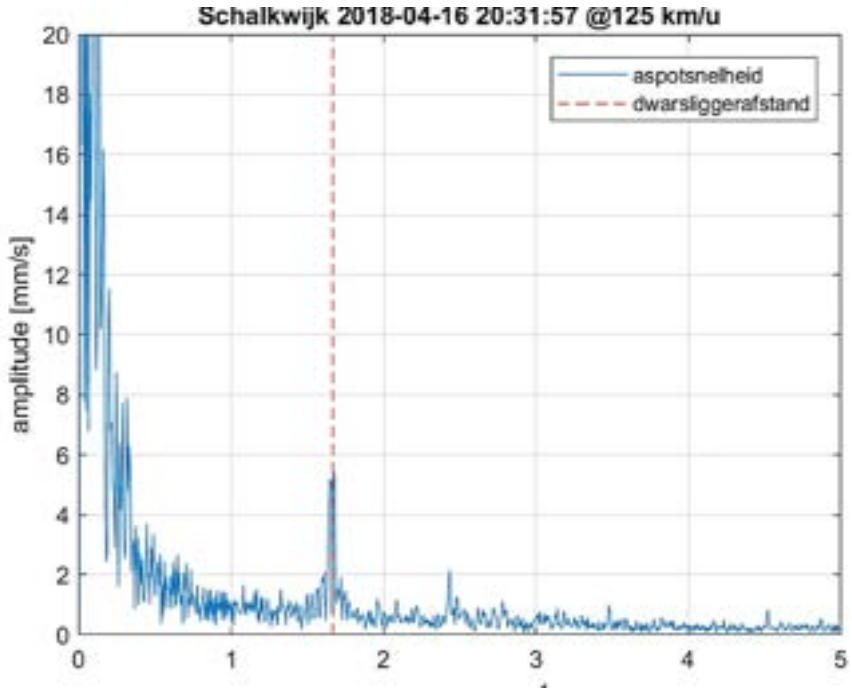

Den Bosch 2020-02-10 05:46:36 @70 km/u
aspotsnelheid
dwarsliggerafstand
amplitude [mm/s]
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20
0
1
2
3
4
5

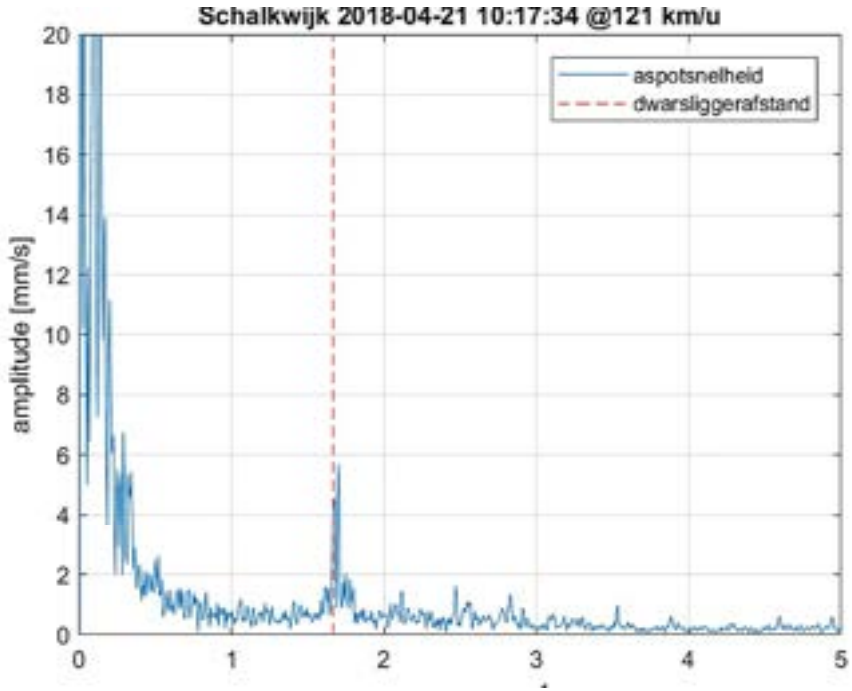

Schalkwijk 2018-04-03 12:52:08 @123 km/u
aspotsnelheid
dwarsliggerafstand
amplitude [mm/s]
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20
0
1
2
3
4
5

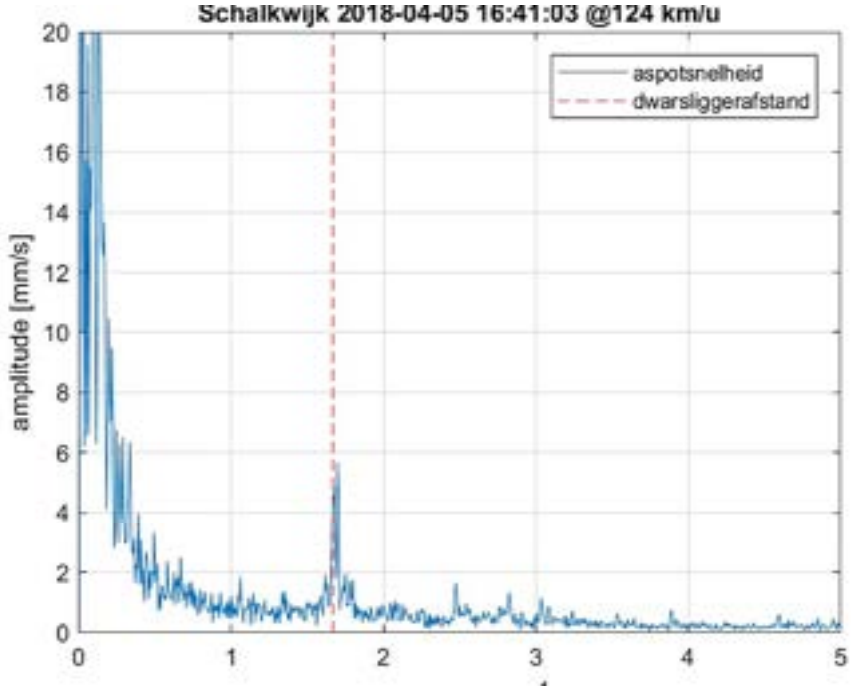

Schalkwijk 2018-04-04 16:41:30 @122 km/u
aspotsnelheid
dwarsliggerafstand
amplitude [mm/s]
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20
0
1
2
3
4
5

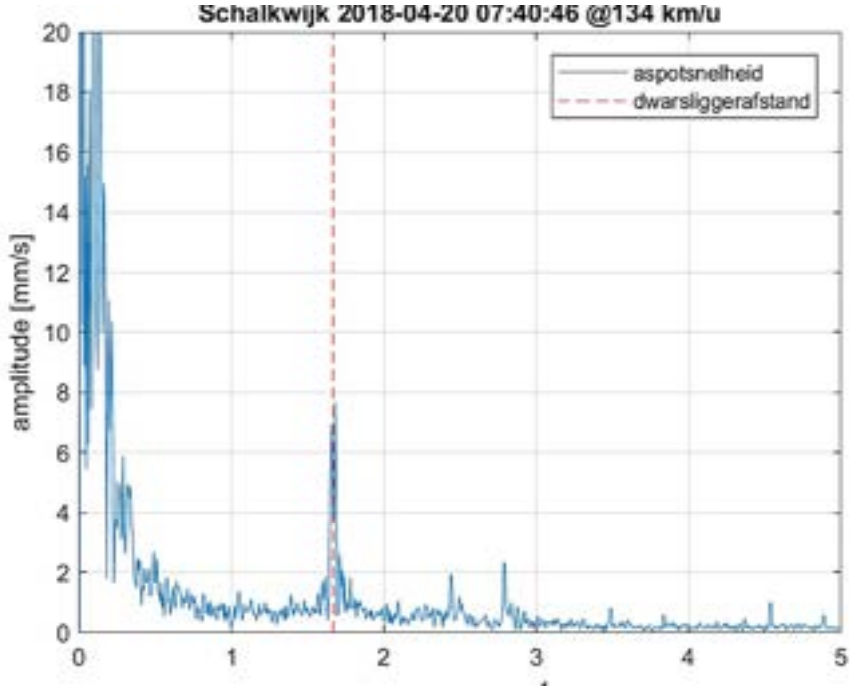

Schalkwijk 2018-04-01 17:22:16 @121 km/u
aspotsnelheid
dwarsliggerafstand
amplitude [mm/s]
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20
0
1
2
3
4
5

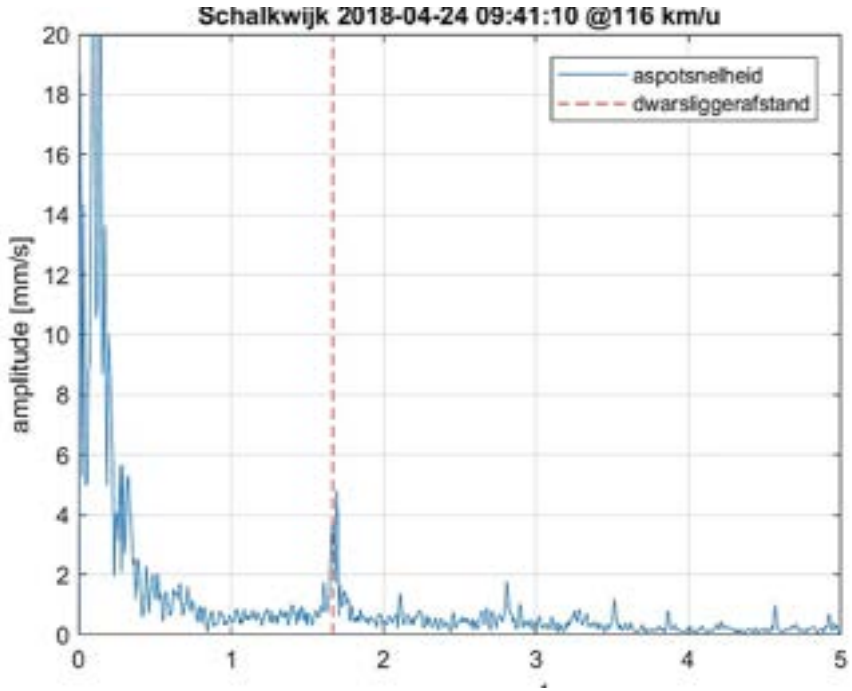

Schalkwijk 2018-04-03 20:17:15 @126 km/u
aspotsnelheid
dwarsliggerafstand
amplitude [mm/s]
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20
0
1
2
3
4
5

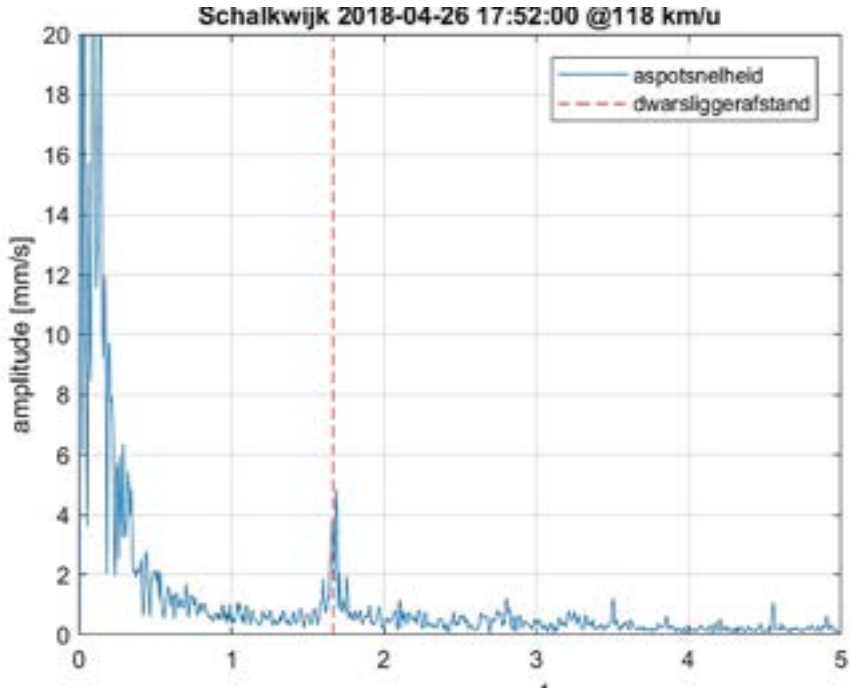

Schalkwijk 2018-04-16 20:31:57 @125 km/u
aspotsnelheid
dwarsliggerafstand
amplitude [mm/s]

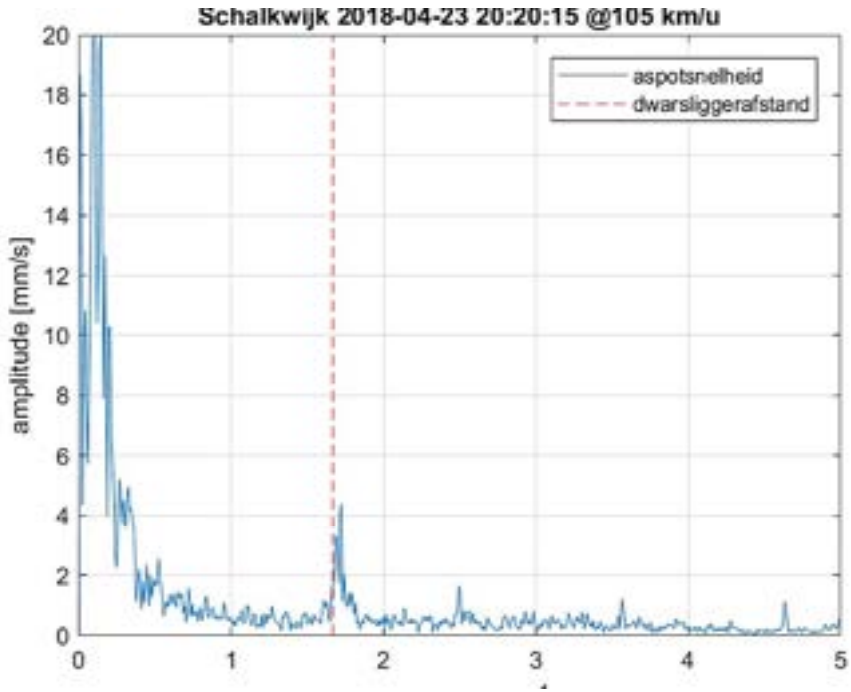

Schalkwijk 2018-04-21 10:17:34 @121 km/u
aspotsnelheid
dwarsliggerafstand
amplitude [mm/s]

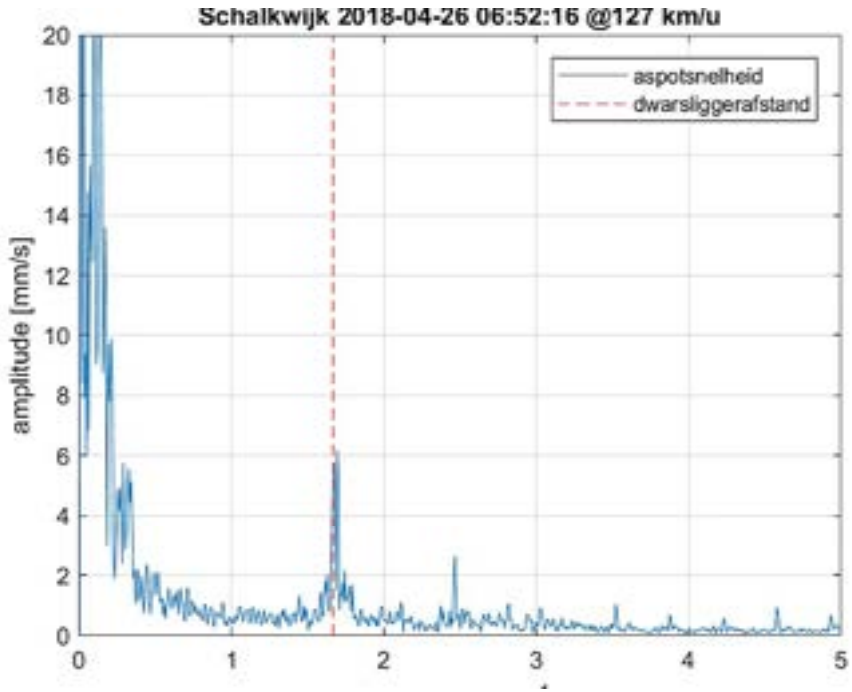

Schalkwijk 2018-04-05 16:41:03 @124 km/u
aspotsnelheid
dwarsliggerafstand
amplitude [mm/s]

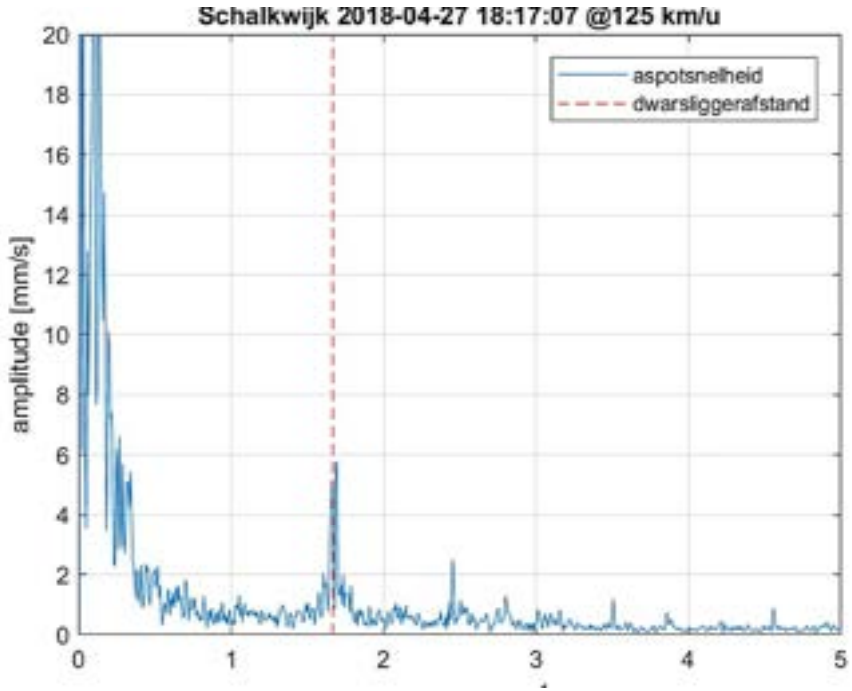

Schalkwijk 2018-04-20 07:40:46 @134 km/u
aspotsnelheid
dwarsliggerafstand
amplitude [mm/s]

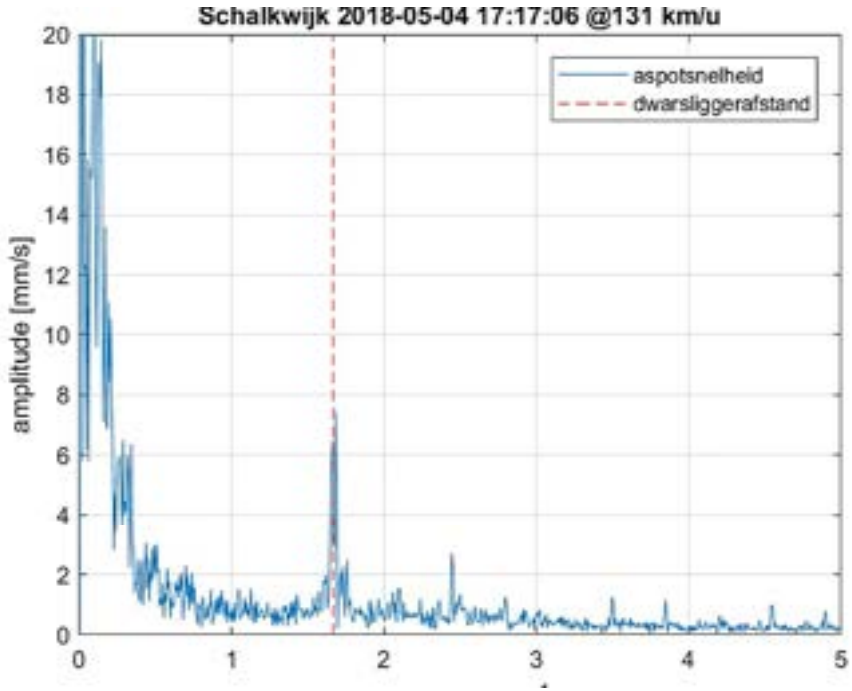

Schalkwijk 2018-04-24 09:41:10 @116 km/u
aspotsnelheid
dwarsliggerafstand
amplitude [mm/s]

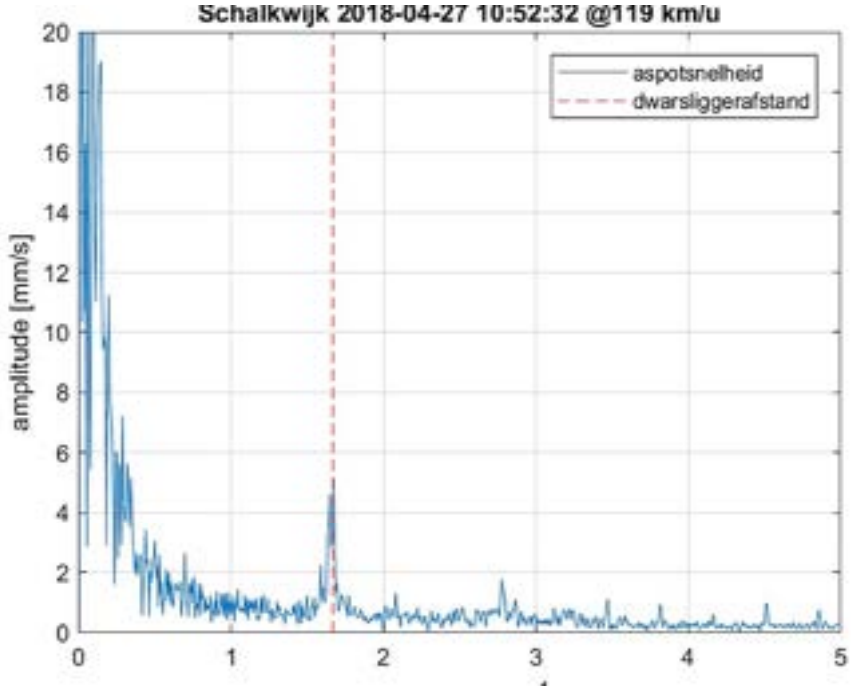

Schalkwijk 2018-04-26 17:52:00 @118 km/u
aspotsnelheid
dwarsliggerafstand
amplitude [mm/s]

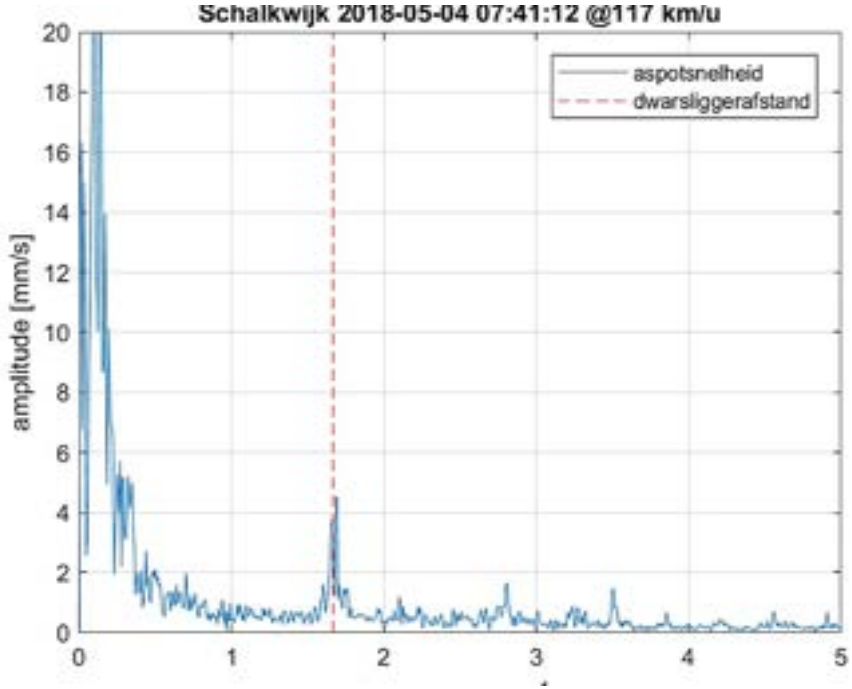

Schalkwijk 2018-04-23 20:20:15 @105 km/u
aspotsnelheid
dwarsliggerafstand
amplitude [mm/s]

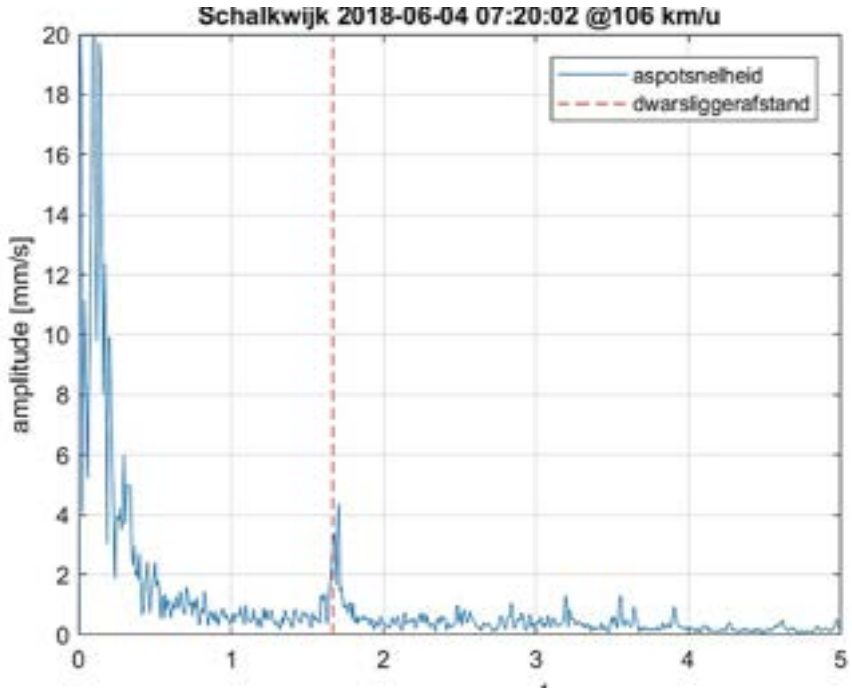

Schalkwijk 2018-04-26 06:52:16 @127 km/u
aspotsnelheid
dwarsliggerafstand
amplitude [mm/s]

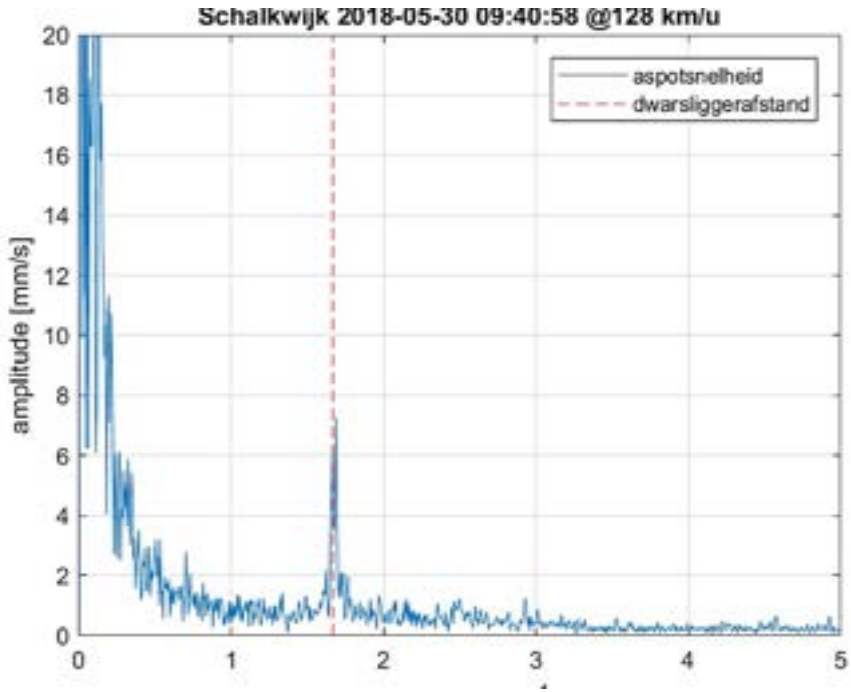

Schalkwijk 2018-04-27 18:17:07 @125 km/u
aspotsnelheid
dwarsliggerafstand
amplitude [mm/s]

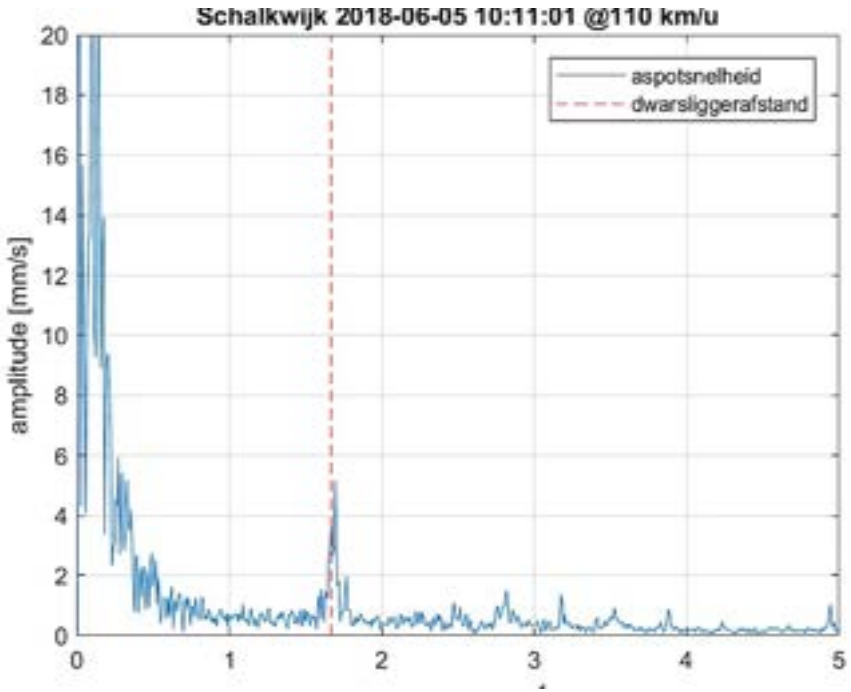

Schalkwijk 2018-05-04 17:17:06 @131 km/u
aspotsnelheid
dwarsliggerafstand
amplitude [mm/s]

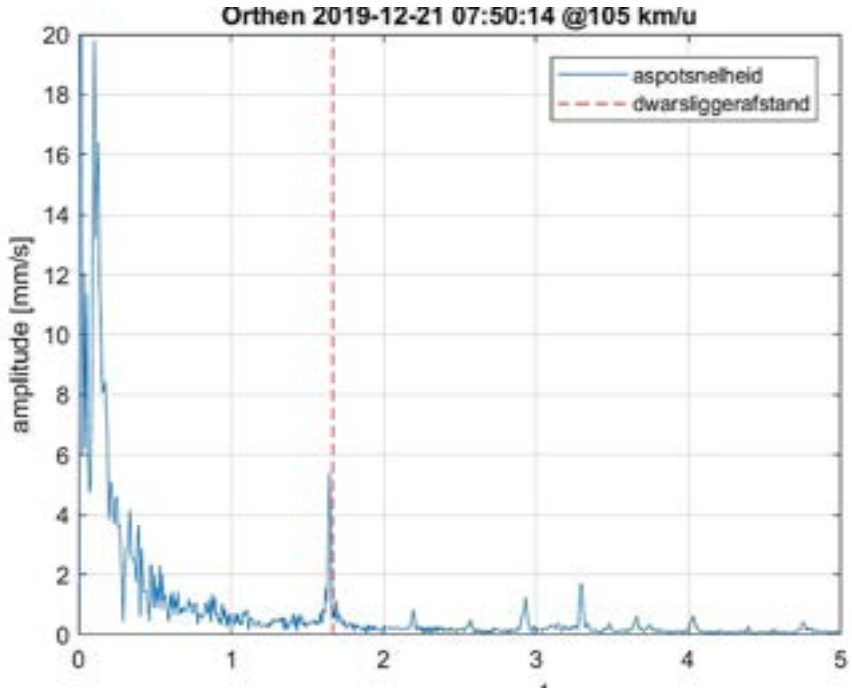

Schalkwijk 2018-04-27 10:52:32 @119 km/u
aspotsnelheid
dwarsliggerafstand
amplitude [mm/s]

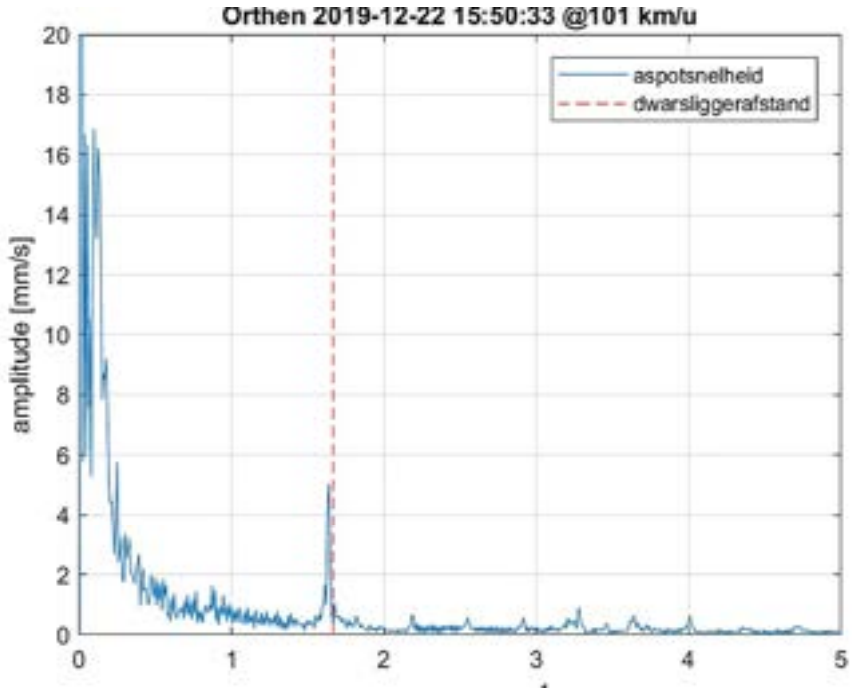

Schalkwijk 2018-05-04 07:41:12 @117 km/u
aspotsnelheid
dwarsliggerafstand
amplitude [mm/s]

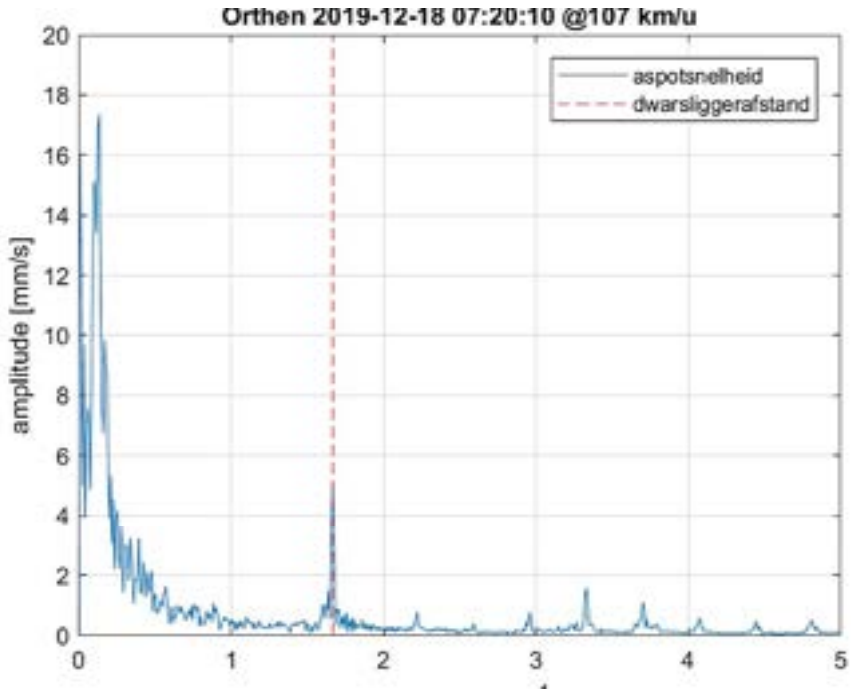

Schalkwijk 2018-06-04 07:20:02 @106 km/u
aspotsnelheid
dwarsliggerafstand
amplitude [mm/s]
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20
0
1
2
3
4
5

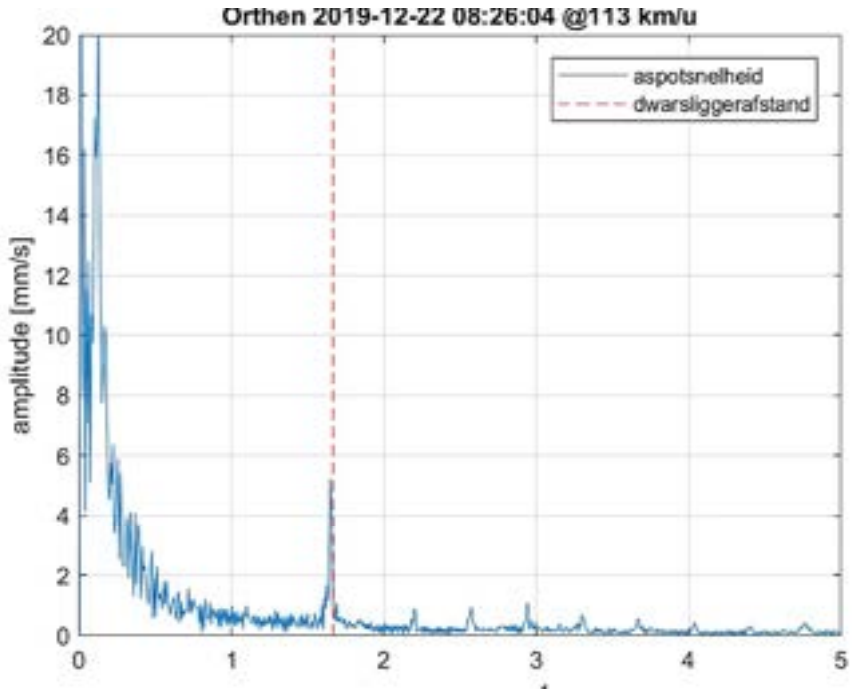

Schalkwijk 2018-05-30 09:40:58 @128 km/u
aspotsnelheid
dwarsliggerafstand
amplitude [mm/s]
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20
0
1
2
3
4
5

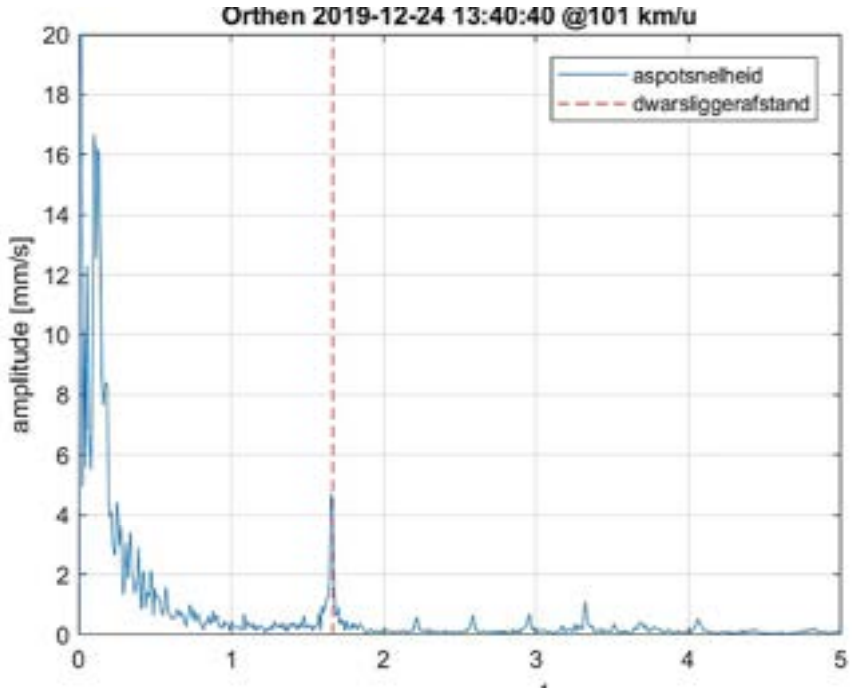

Schalkwijk 2018-06-05 10:11:01 @110 km/u
aspotsnelheid
dwarsliggerafstand
amplitude [mm/s]
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20
0
1
2
3
4
5

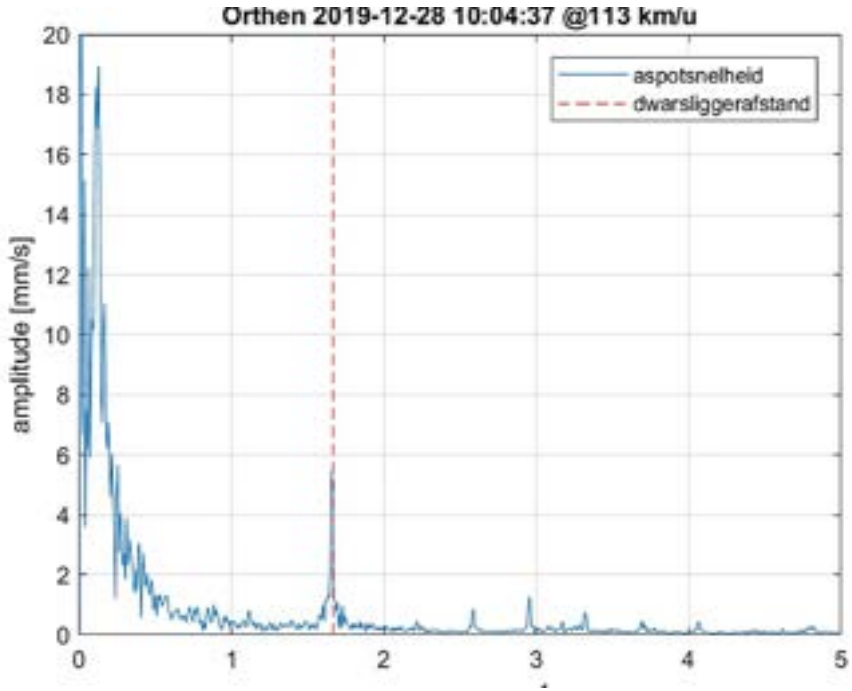

Orthen 2019-12-21 07:50:14 @105 km/u
aspotsnelheid
dwarsliggerafstand
amplitude [mm/s]
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20
0
1
2
3
4
5

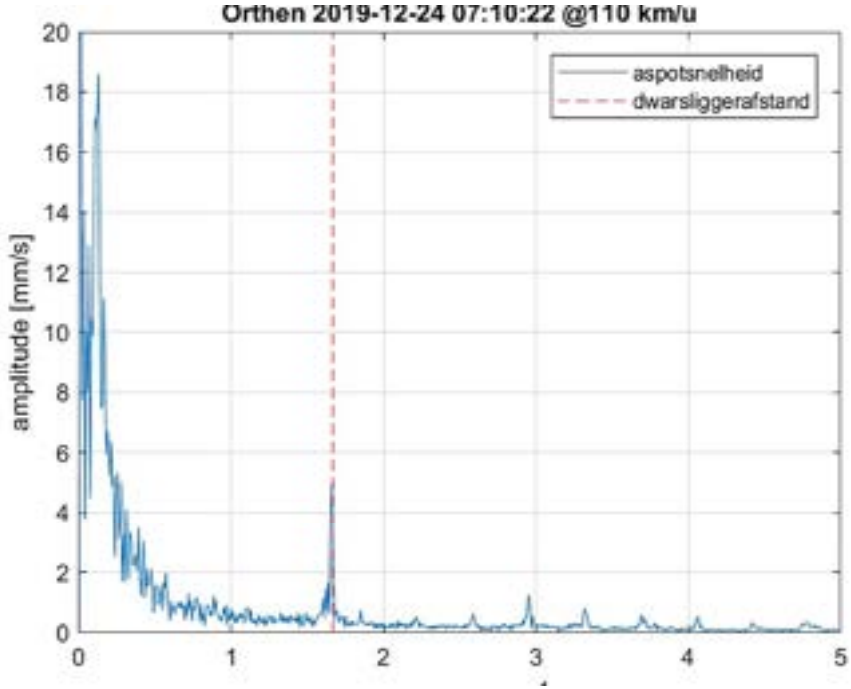

Orthen 2019-12-22 15:50:33 @101 km/u
aspotsnelheid
dwarsliggerafstand
amplitude [mm/s]
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20
0
1
2
3
4
5

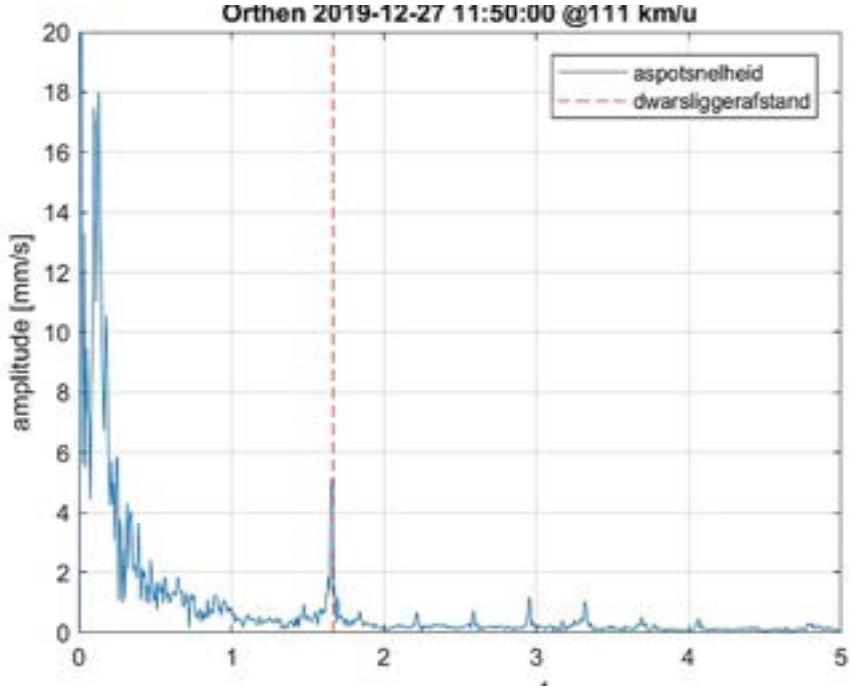

Orthen 2019-12-18 07:20:10 @107 km/u
aspotsnelheid
dwarsliggerafstand
amplitude [mm/s]
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20
0
1
2
3
4
5

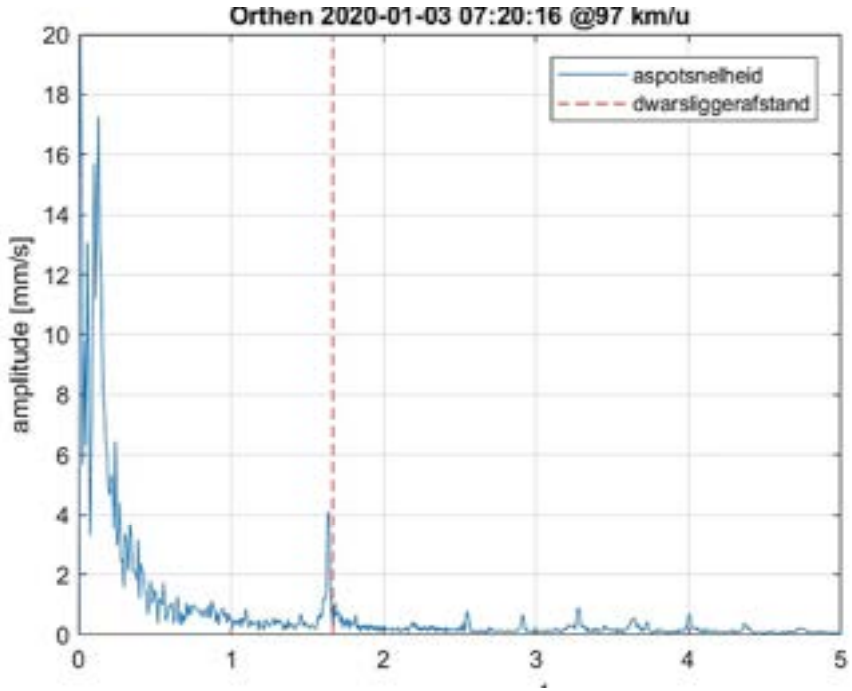

Orthen 2019-12-22 08:26:04 @113 km/u
aspotsnelheid
dwarsliggerafstand
amplitude [mm/s]
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20
0
1
2
3
4
5

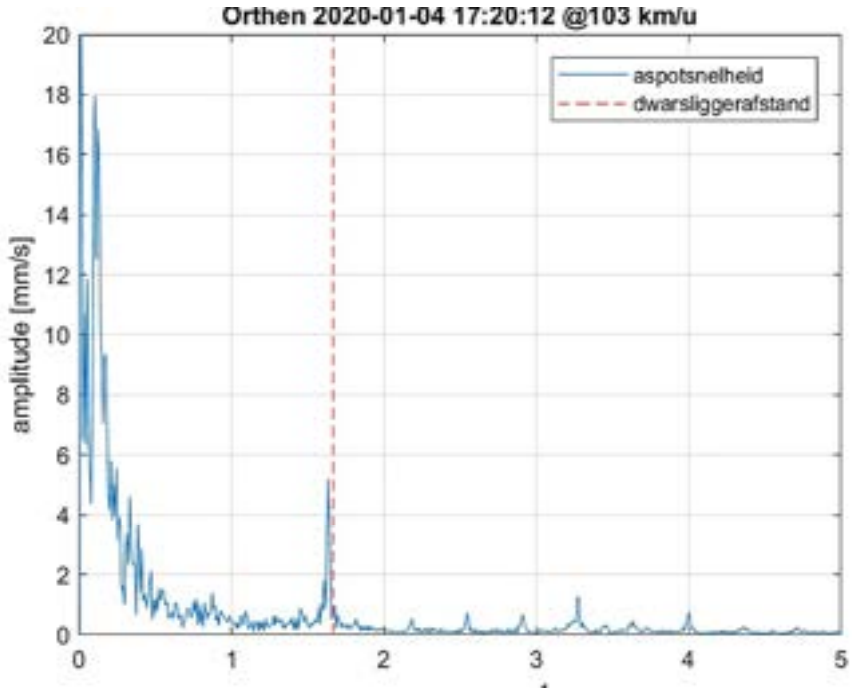

Orthen 2019-12-24 13:40:40 @101 km/u
aspotsnelheid
dwarsliggerafstand
amplitude [mm/s]

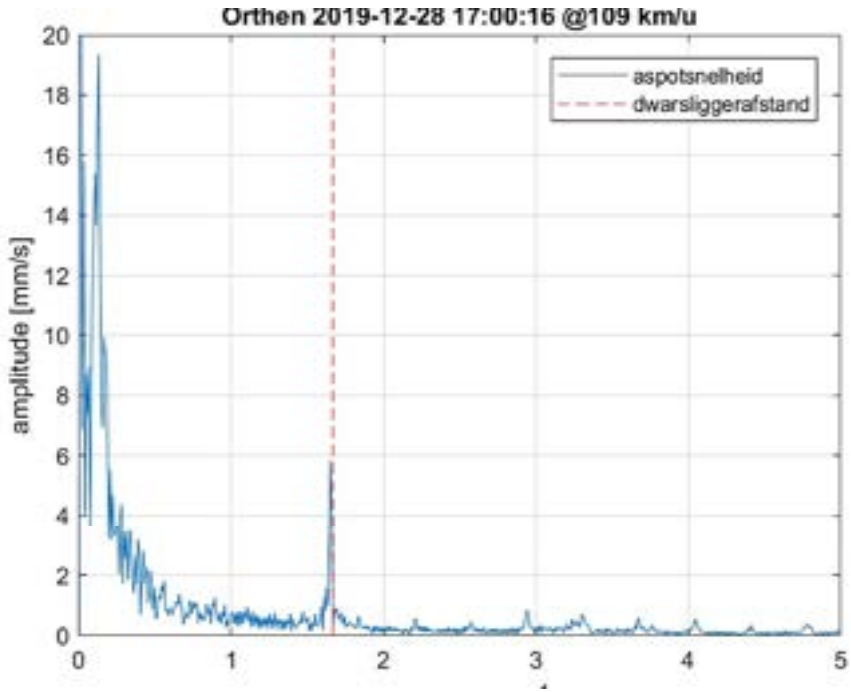

Orthen 2019-12-28 10:04:37 @113 km/u
aspotsnelheid
dwarsliggerafstand
amplitude [mm/s]

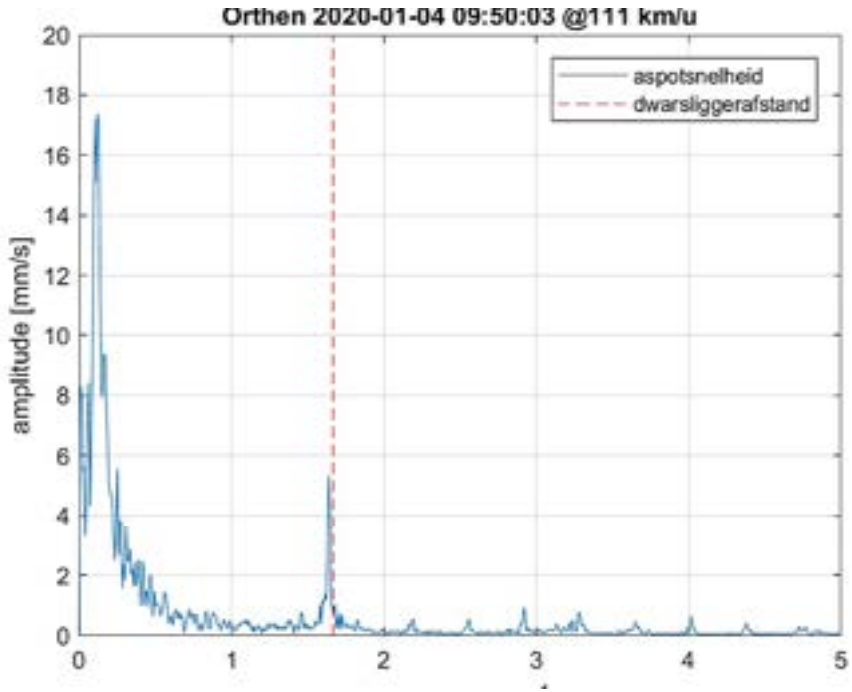

Orthen 2019-12-24 07:10:22 @110 km/u
aspotsnelheid
dwarsliggerafstand
amplitude [mm/s]

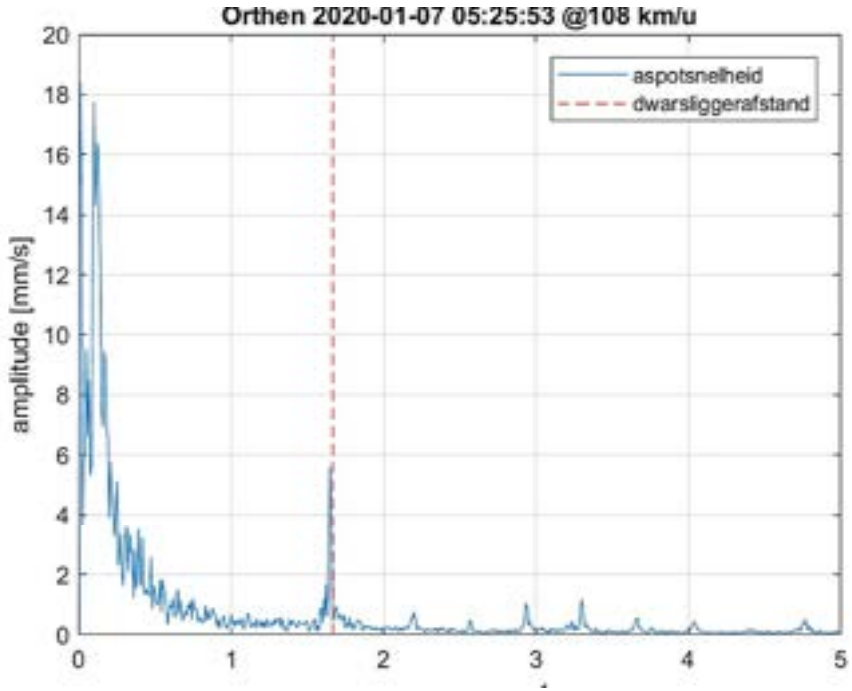

Orthen 2019-12-27 11:50:00 @111 km/u
aspotsnelheid
dwarsliggerafstand
amplitude [mm/s]

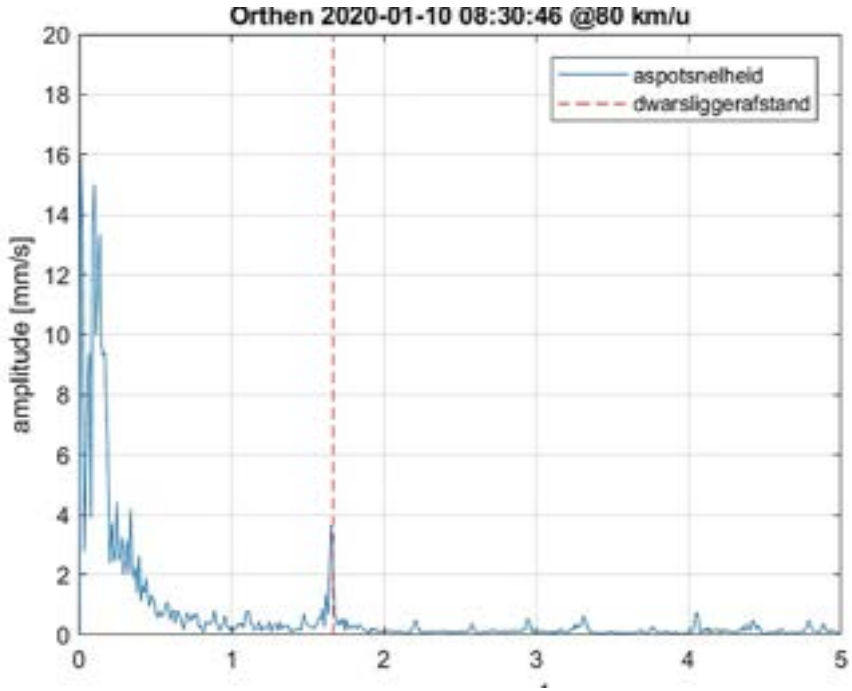

Orthen 2020-01-03 07:20:16 @97 km/u
aspotsnelheid
dwarsliggerafstand
amplitude [mm/s]
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20
0
1
2
3
4
5

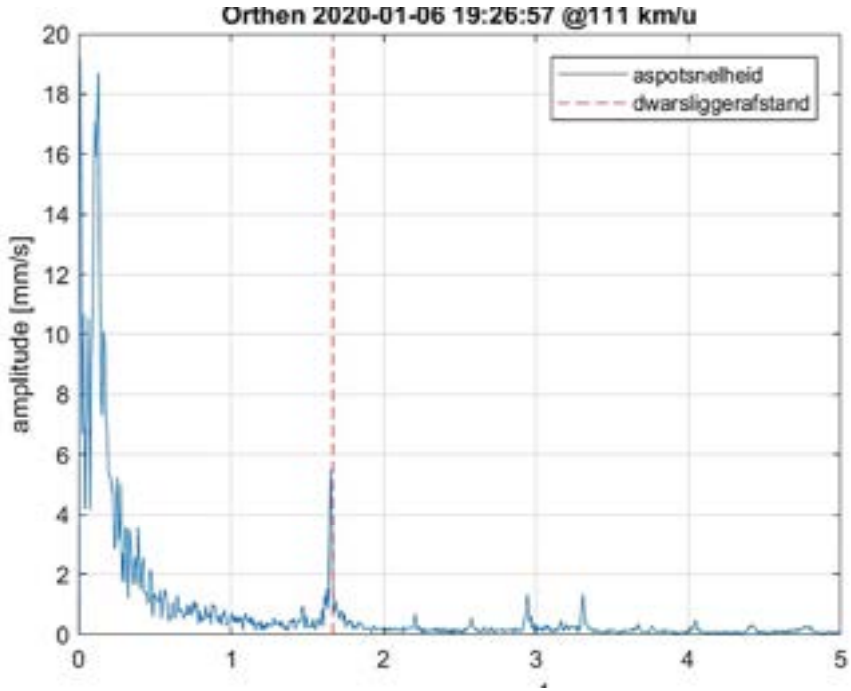

Orthen 2020-01-04 17:20:12 @103 km/u
aspotsnelheid
dwarsliggerafstand
amplitude [mm/s]
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20
0
1
2
3
4
5

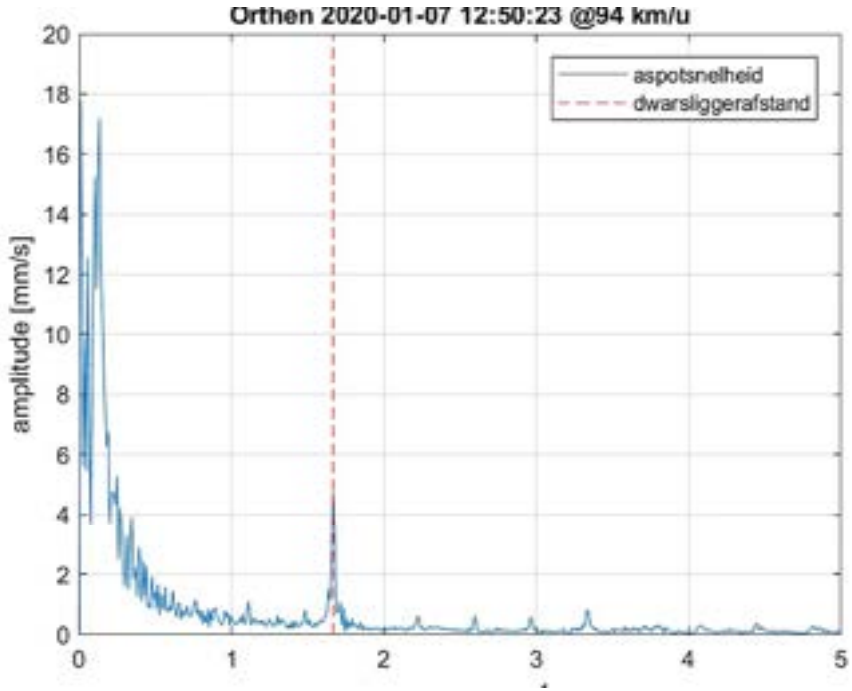

Orthen 2019-12-28 17:00:16 @109 km/u
aspotsnelheid
dwarsliggerafstand
amplitude [mm/s]
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20
0
1
2
3
4
5

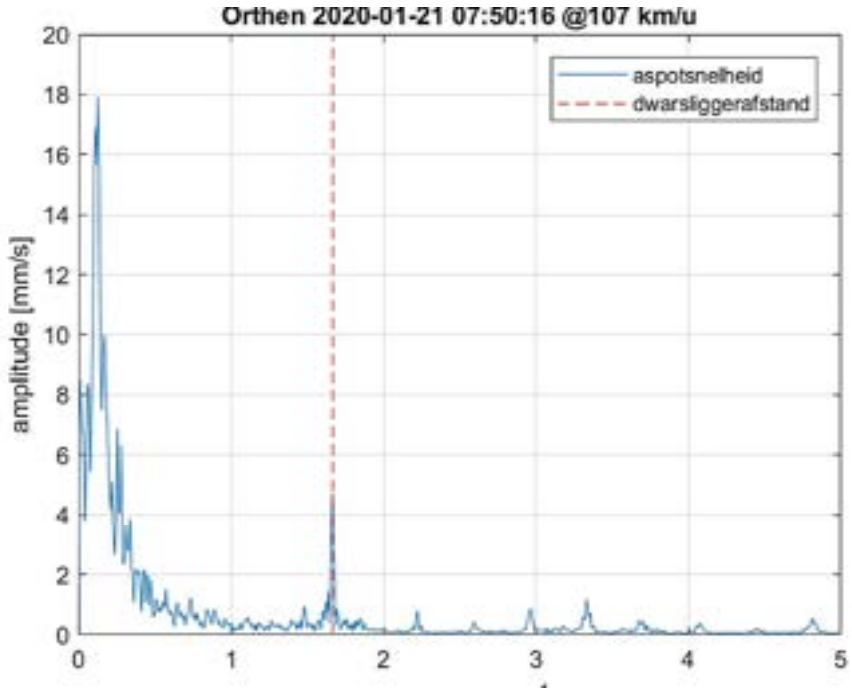

Orthen 2020-01-04 09:50:03 @111 km/u
aspotsnelheid
dwarsliggerafstand
amplitude [mm/s]
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20
0
1
2
3
4
5

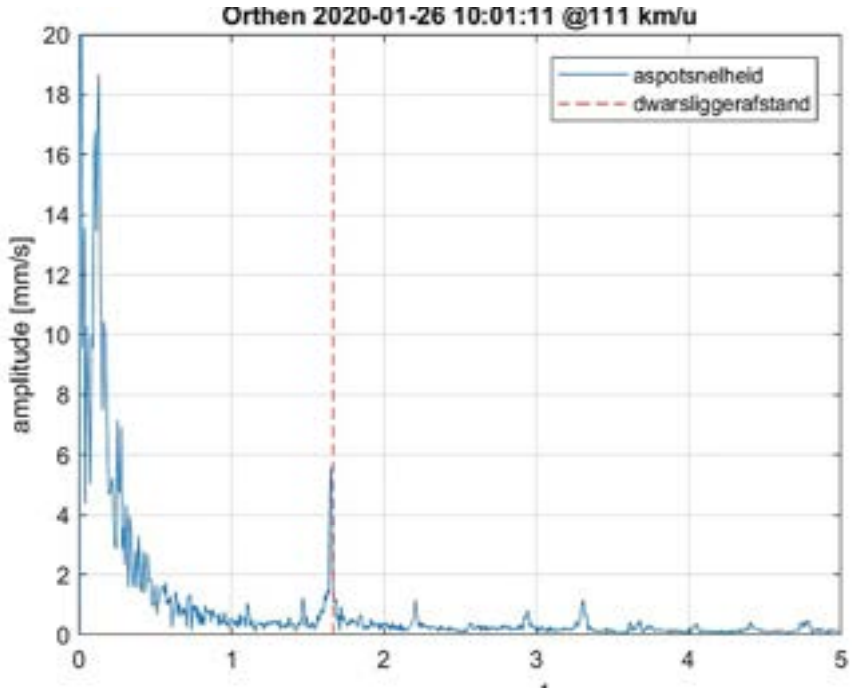

Orthen 2020-01-07 05:25:53 @108 km/u
aspotsnelheid
dwarsliggerafstand
amplitude [mm/s]
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20
0
1
2
3
4
5

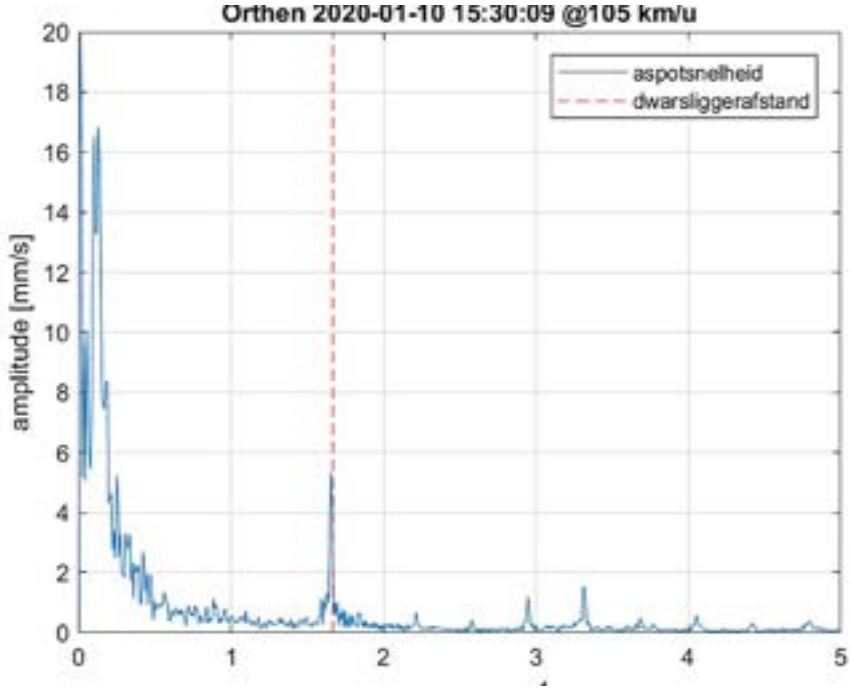

Orthen 2020-01-10 08:30:46 @80 km/u
aspotsnelheid
dwarsliggerafstand
amplitude [mm/s]
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20
0
1
2
3
4
5

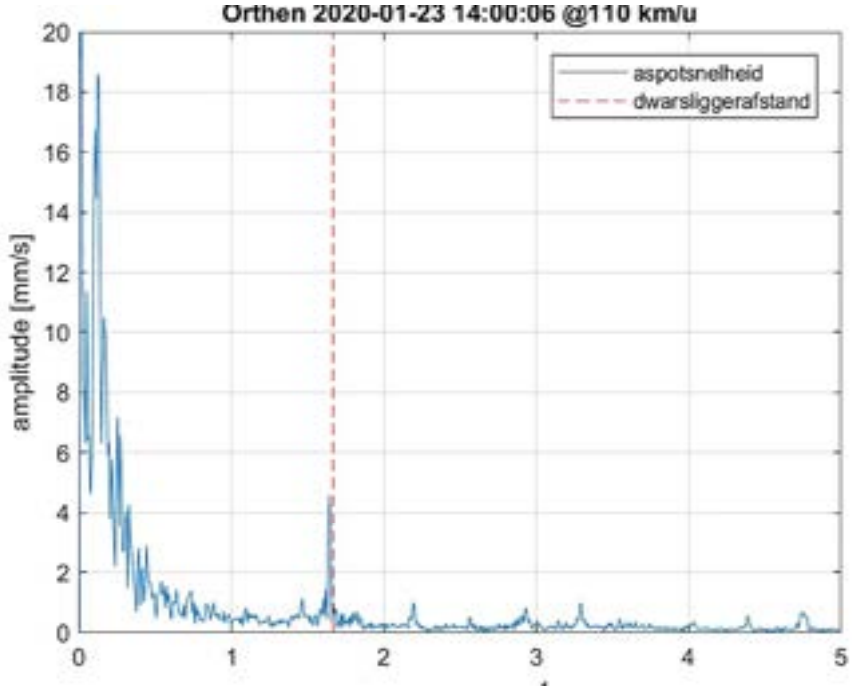

Orthen 2020-01-06 19:26:57 @111 km/u
aspotsnelheid
dwarsliggerafstand
amplitude [mm/s]
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20
0
1
2
3
4
5

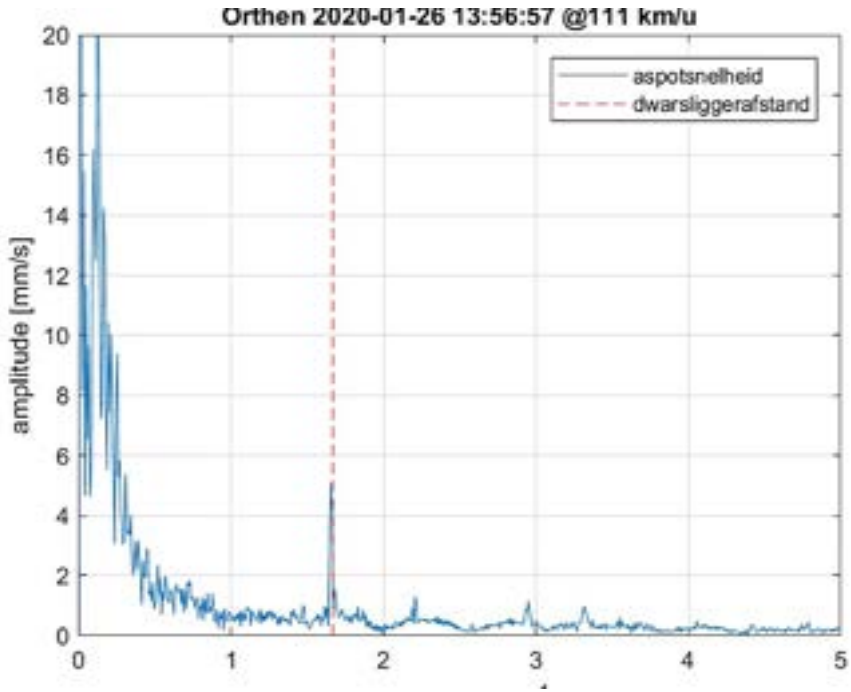

Orthen 2020-01-07 12:50:23 @94 km/u
aspotsnelheid
dwarsliggerafstand
amplitude [mm/s]
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20
0
1
2
3
4
5


Orthen 2020-01-21 07:50:16 @107 km/u
aspotsnelheid
dwarsliggerafstand
amplitude [mm/s]


Orthen 2020-01-26 10:01:11 @111 km/u
aspotsnelheid
dwarsliggerafstand
amplitude [mm/s]


Orthen 2020-01-10 15:30:09 @105 km/u
aspotsnelheid
dwarsliggerafstand
amplitude [mm/s]


Orthen 2020-01-23 14:00:06 @110 km/u
aspotsnelheid
dwarsliggerafstand
amplitude [mm/s]


Orthen 2020-01-26 13:56:57 @111 km/u
aspotsnelheid
dwarsliggerafstand
amplitude [mm/s]
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20
0
1
2
3
4
5

Bijlage V: Notitie Ricardo Modelsimulaties

Ricardo Nederland BV
Registered Office: Daalsesingel 51 • 3511 SW Utrecht • The Netherlands
Tel: +31 (0)30 7524 700 • **Web:** www.ricardo.com

Registered in The Netherlands Company Number 30156895

Notitie

Onderwerp: **Invloed baaneigenschappen op dwarsliggerexcitatie**

Opdrachtgever: Cohere Consultants

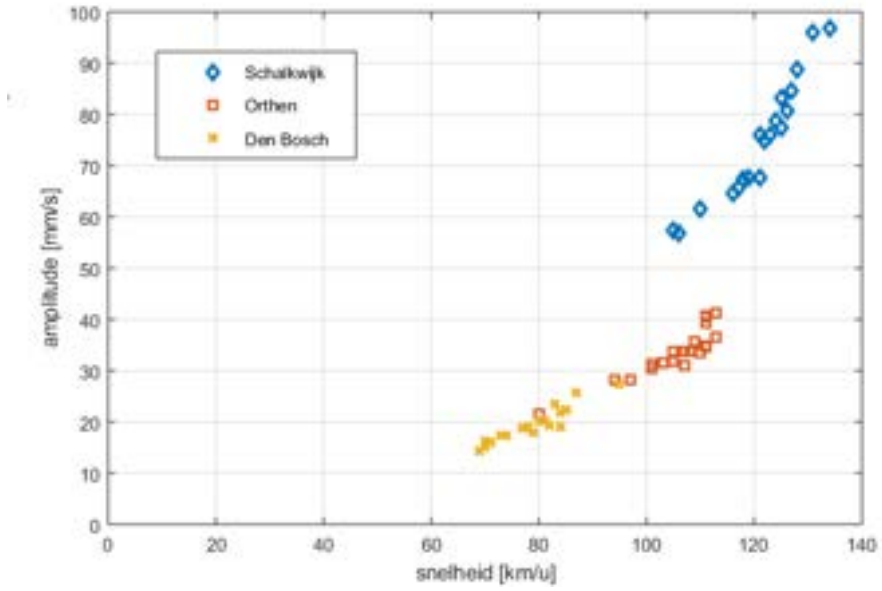
Auteur: Thijs Roeleveld

Goedkeuring door: Jasper Peen
Datum: 28-09-2022
Reference: SII/TR/03-830887

1. Inleiding

In opdracht van ProRail voeren Cohere Consultants en Ricardo een gezamenlijk onderzoek uit naar de relatie tussen aspotversnellingen en bodemtrillingen. Tijdens dit onderzoek is onder andere gekeken naar de aspotversnellingen/-snelheid ten gevolge van de discrete ondersteuning van dwarsliggers.

In onderstaande figuur (Figuur 1) is weergegeven hoe de aspotsnelheid voor de drie beschouwde locaties varieert onder invloed van snelheid. Daaruit bleek onder andere een toename met de snelheid. Dit is in lijn der verwachting. Ook bleek er een verschil in amplitude tussen de locaties Orthen en Den Bosch enerzijds en Schalkwijk anderzijds. Dit was aanleiding om te kijken in hoeverre de spooreigenschappen hierop van invloed zijn.



Figuur 1: Snelheidsafhankelijkheid van aspottrillingen voor de drie meetlocaties

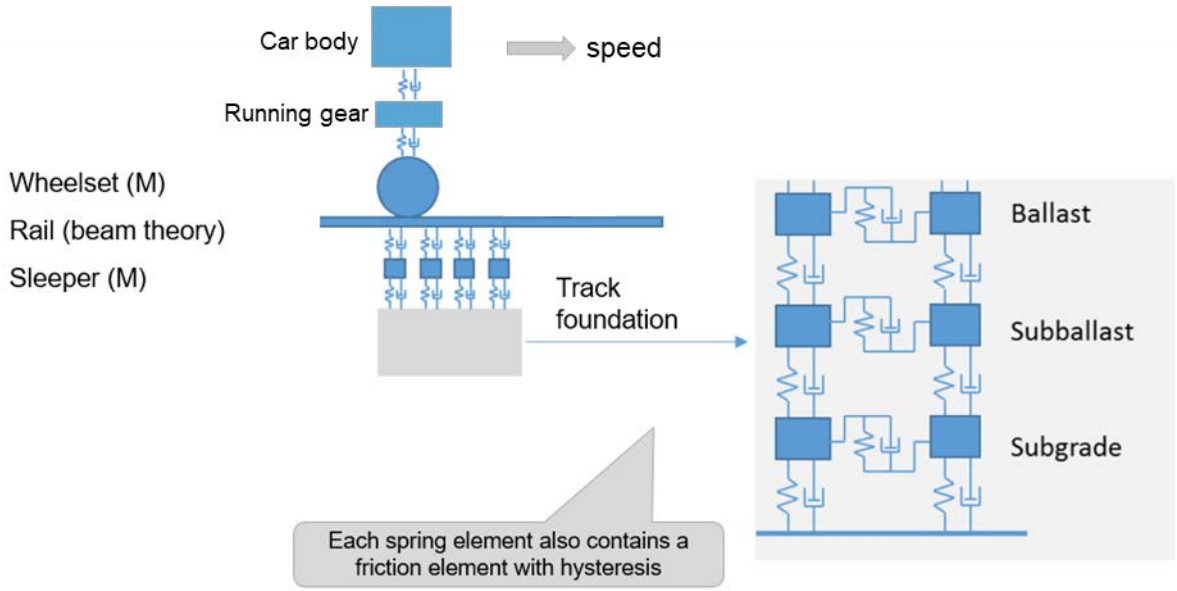
2. Aanpak

Om de invloed van spooreigenschappen op aspotsnelheid te onderzoeken zijn simulaties uitgevoerd met een baanmodel dat bij Ricardo is ontwikkeld.

Baanmodel

Het baanmodel is een dynamisch model waarin zowel het voertuig als de baan zijn gemodelleerd. Voertuigen bevatten maximaal twee veerniveaus en de baan bevat alle lagen tot en met de onderbouw. Dit baanmodel is weergegeven in onderstaande figuur (Figuur 2).

Dit baanmodel maakt het mogelijk om de respons van de baan te bepalen onder invloed van de belasting zoals een kracht of een voertuig.



Figuur 2: Dynamisch model van voertuig en baan

Uitgevoerde simulaties

Met behulp van het baanmodel is een kleine set simulatie uitgevoerd waarbij een aantal aspecten zijn gevarieerd. Dit zijn de volgende

- Snelheid: 80 km/u en 120 km/u
- Asafstand: 1.8m en 2.1m
- Baanstijfheid: Laag (50 kN/mm), Hoog (100 kM/mm) en zeer hoog (150kN/mm)
- PSS-laag: ja of nee

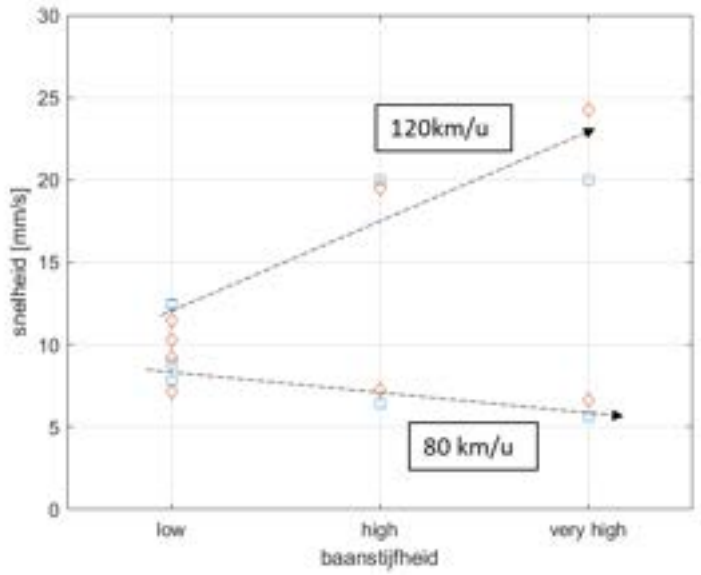
Simulaties zijn uitgevoerd met een draaistel waarop een kracht is aangebracht ter representatie van een beladen goederenwagen. De asafstanden zijn zo gekozen dat deze overeenkomen met een standaard Y25 draaistel en 0.3m meer. De 1.8m meter van het Y25 draaistel is in fase met de dwarsliggerafstand, het is immers 3 keer 0.6m. De 2.1m is precies uit fase van de dwarsliggerafstand.

De baanstijfheden zijn gebaseerd op het metingen met Track Loading Vehicle. Deze heeft de dynamische stijfheid bij 7.3Hz bepaald voor delen van het Nederlandse spoor.

Een PSS laag is een laag van gestabiliseerd zand die op sommige locatie is aangebracht onder de ballast. Deze heeft als doel om de stabiliteit van de baanligging te vergroten.

3. Resultaten

Als resultaat is per simulatie de gemiddelde amplitude bepaald van de aspotsnelheid. De resultaten zijn samengevat in onderstaande figuur waarin de gemiddelde trilsnelheid van de 1e en 2e as is weergegeven. In de figuur is zowel de invloed van snelheid, en baanstijfheid zichtbaar.

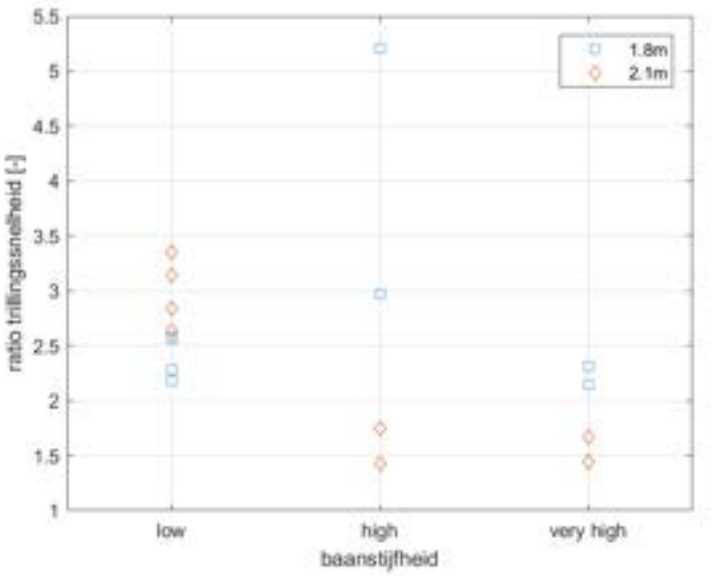


Figuur 3: Trillingssnelheid onder invloed van de discrete ondersteuning door dwarsliggers (gem as1 en as2)

In de resultaten vallen een aantal dingen op. Ten eerst zien we dat de aspotsnelheid voor de metingen bij 120 km/u structureel hoger ligt. Dat is in lijn der verwachting en overeenkomstig de praktijkmetingen. Wat daarnaast interessant is, is hoe de amplitude verandert onder invloed van de baanstijfheid. Bij 120 km/u leidt een hoge baanstijfheid tot een hogere trillingssnelheid. Bij 80 km/u leidt een hoge baanstijfheid juist tot een lagere trillingssnelheid.

Dit laat goed zien dat de interactie tussen voertuig en baan complex is en trends niet zondermeer generiek zijn.

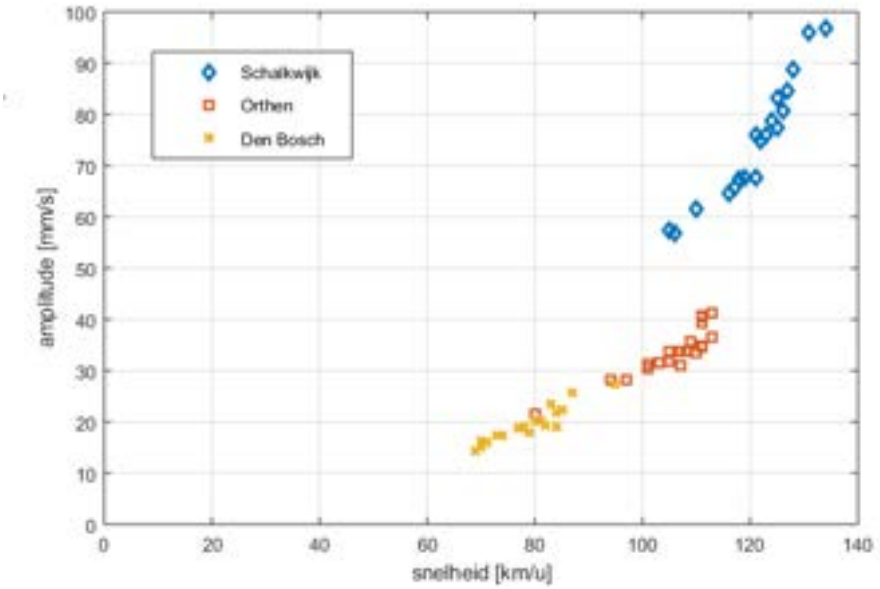
Naast invloeden op de gemiddelde trillingssnelheid, speelt nog een ander fenomeen een rol. Namelijk het verschil in amplitude tussen de vooroplopende en achteroplopende as van een draaistel. Dit is weergegeven door de amplitude van de vooroplopende as te delen door die van de achteroplopende as.



Figuur 4: Ratio van de aspotsnelheid (as1 / as2)

Het blijkt dat de amplitude van de vooroplopende as structureel hoger is dan die van de achterlopende as. Bij het draaistel met een radstand van 1.8m is dat verschil gemiddeld een factor 2.4. Voor het draaistel met een radstand van 2.1m is dat gemiddeld een factor 1.7. Het verschil wordt daarbij sterk beïnvloed door de stijfheid van de baan. Met als extreem voorbeeld een radstand van 1.8m bij een baanstijfheid ‘high’. Daarbij is de amplitude van de vooroplopende as ruim 5 keer hoger. Hier ontstaat een soort resonantie tussen voertuig en baan, waarbij de voorste as een zeer hoge amplitude heeft ten opzichte van de achterste as.

Dit laat wederom zien dat de dynamische interactie tussen voertuig en baan complex is. Tegelijkertijd verklaart het waarschijnlijk ook het verschil tussen de gemeten amplitudes bij tussen de locaties Orthen en Den Bosch enerzijds en Schalkwijk anderzijds. Bij Schalkwijk zijn de metingen uitgevoerd waarbij de trein reed in zuidelijke richting en de aspotversnellingen afkomstig waren van de vooroplopende as. De metingen bij Orthen en Den Bosch zijn uitgevoerd in de andere richting waarbij de metingen afkomstig waren van de achteroplopende as.

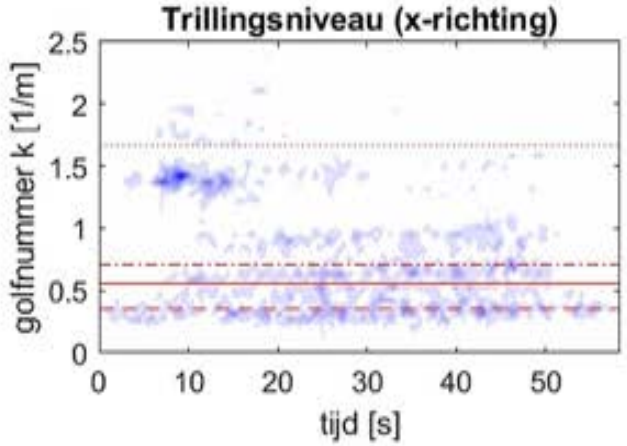


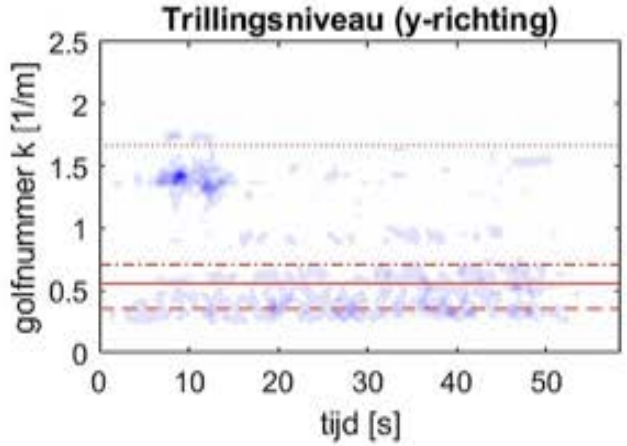
Figuur 5: Snelheidsafhankelijkheid van aspottrillingen voor de drie meetlocaties

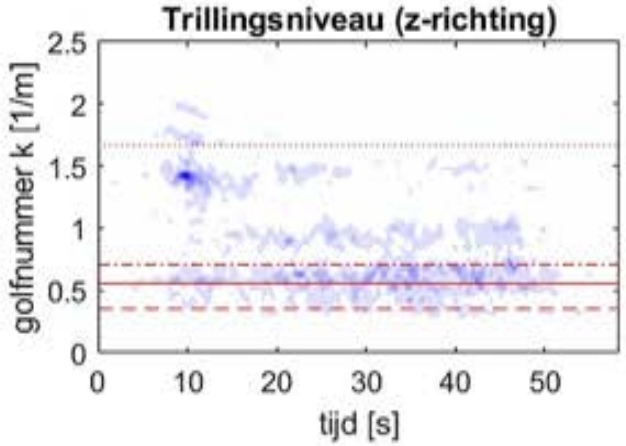
Het verschil in aspottrillingen tussen Schalkwijk en de overige twee locaties (hierboven in Figuur 5 nogmaals weergegeven) is uiteindelijk een optelsom van verschillende invloeden. Het staat vast dat de voorlopende as bijdraagt aan het hogere niveau. Deze meetpositie resulteert namelijk consistent in hogere trillingssnelheid. Daarnaast zal bodemstijfheid ook een rol spelen. Die is bij Schalkwijk echter lager, wat zal resulteren in een lagere trillingssnelheid. Het is aannemelijk dat de invloed van de meetpositie dominant is en verantwoordelijk is voor de hogere trillingssnelheid.

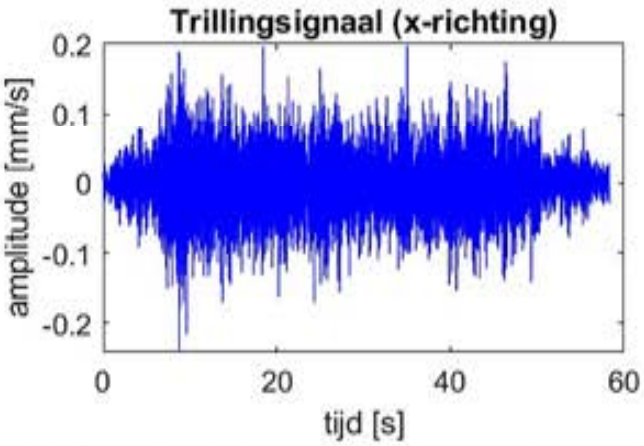
Bijlage VI: Bodemtrillingssignalen Goederentreinpassages uitgezet tegen golfgetal Den Bosch Zuid

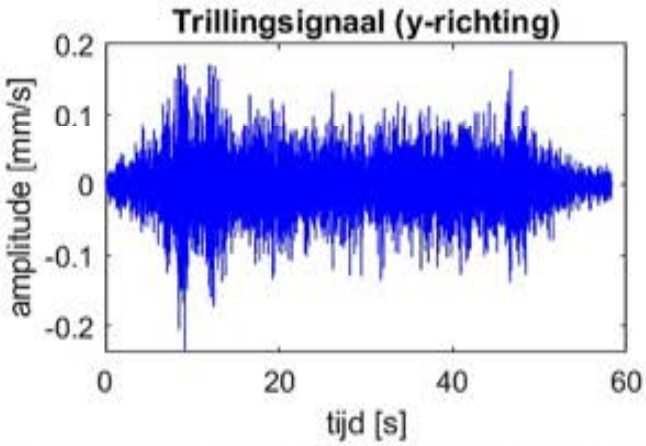
#1.# TriggerDate=2020-01-02# TriggerTime=20:58:40 rijsnelheid:18.9444 m/s rijrichting:N-Z

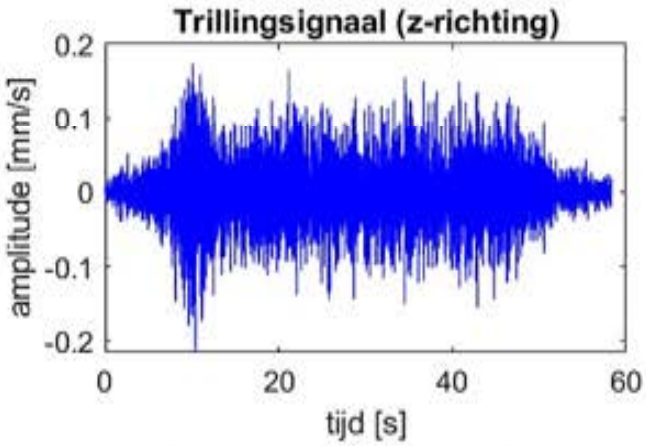


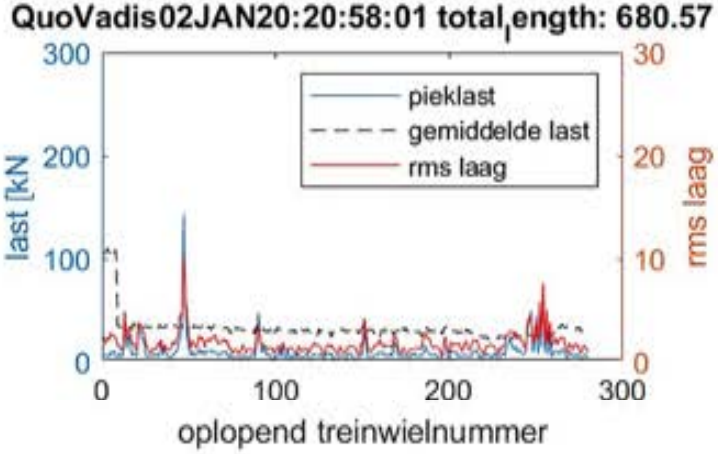


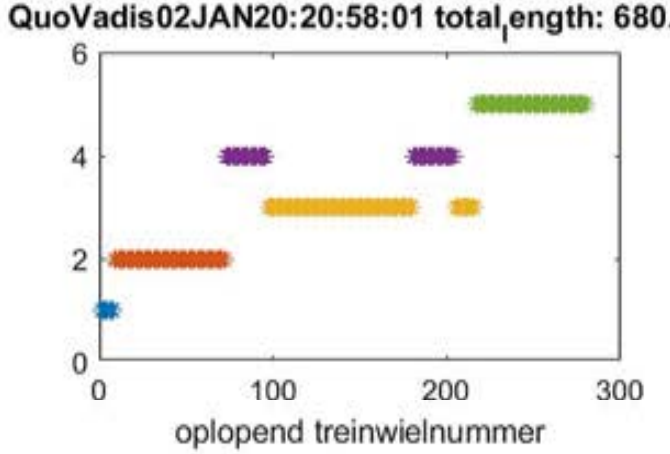


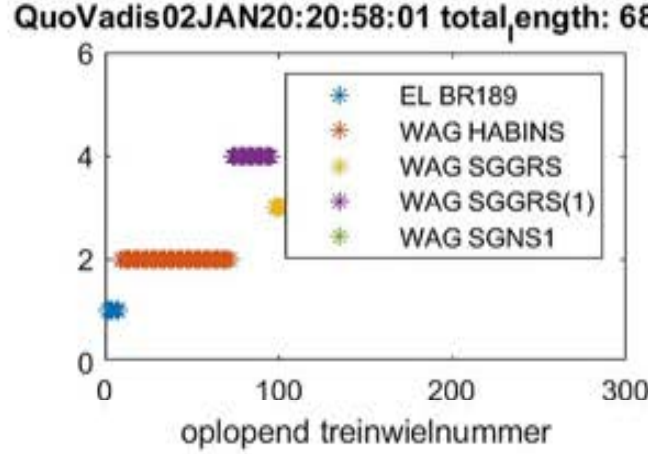




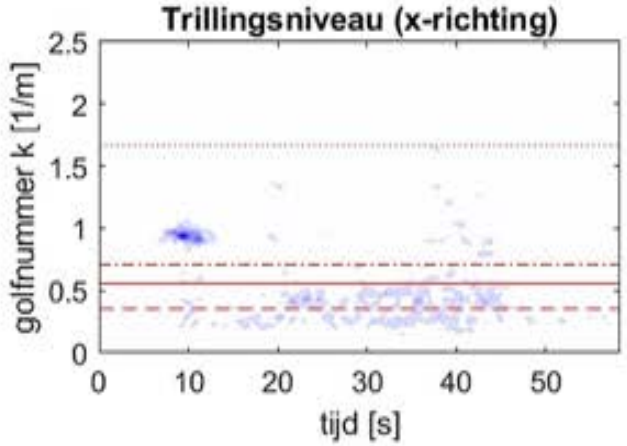


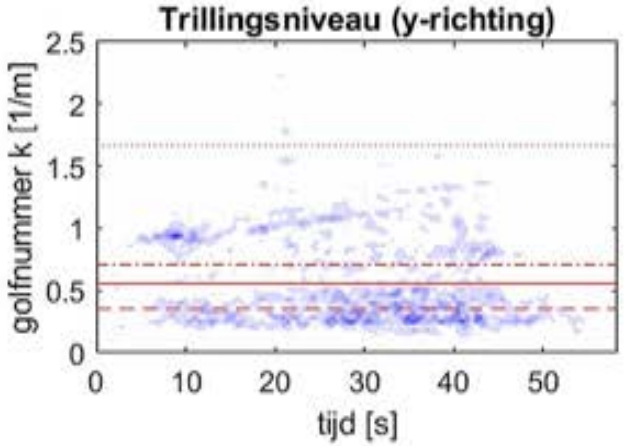


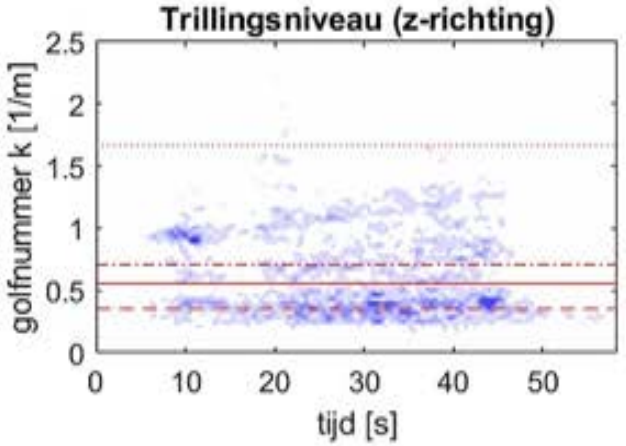


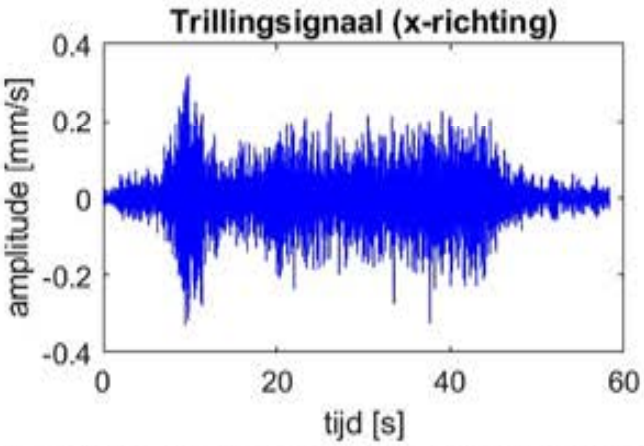


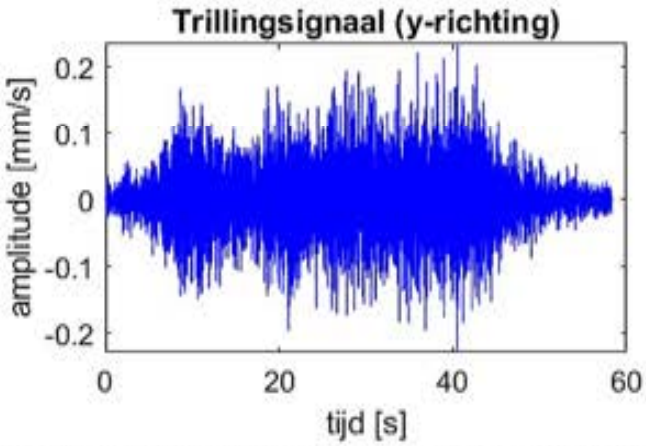
#2.# TriggerDate=2020-01-07# TriggerTime=21:01:21 rijsnelheid:27.7778 m/s rijrichting:N-Z

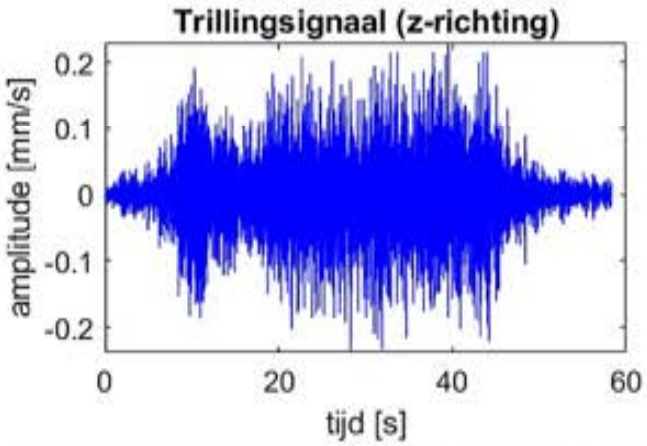


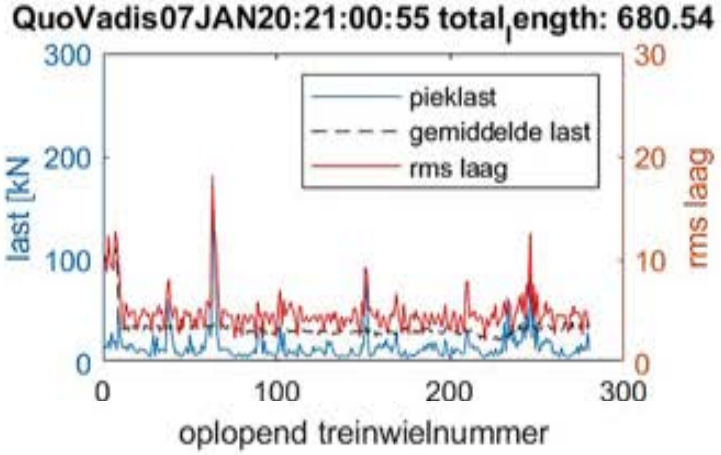


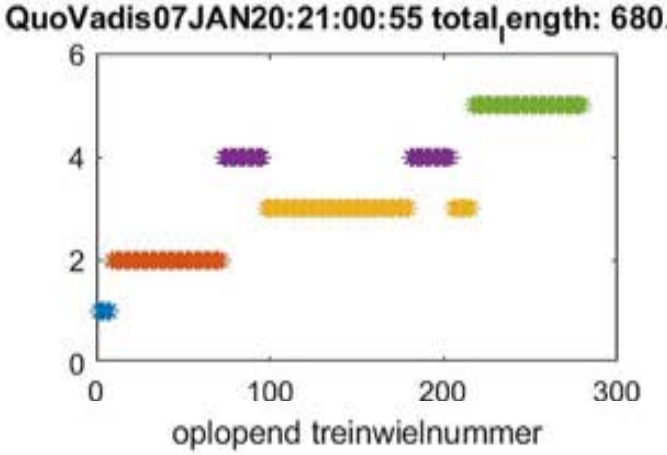


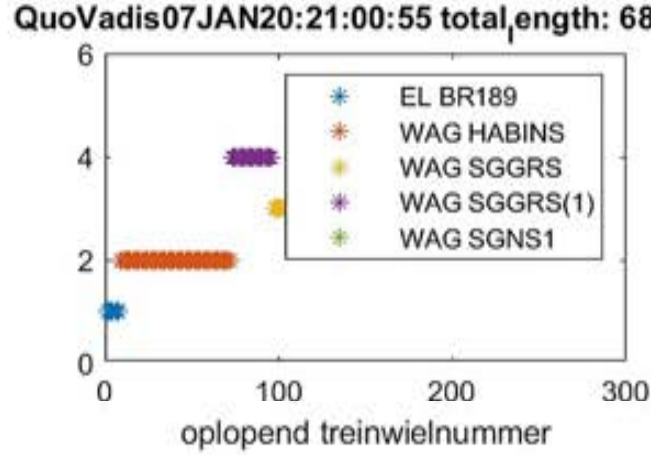




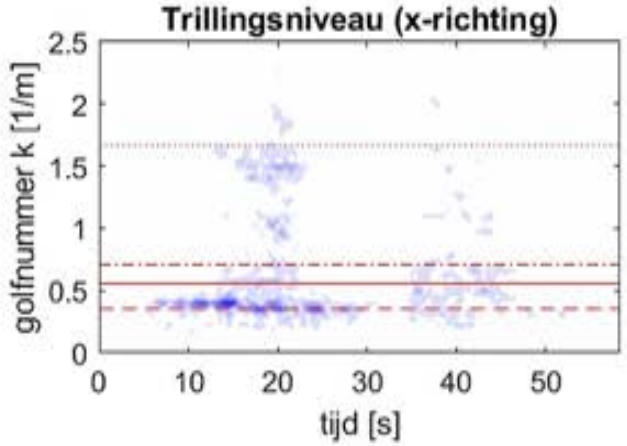


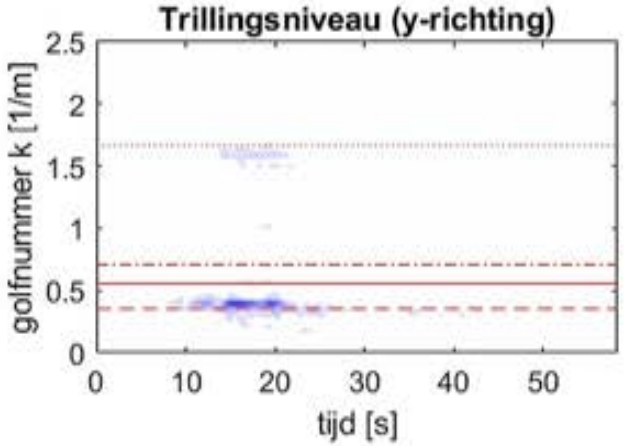


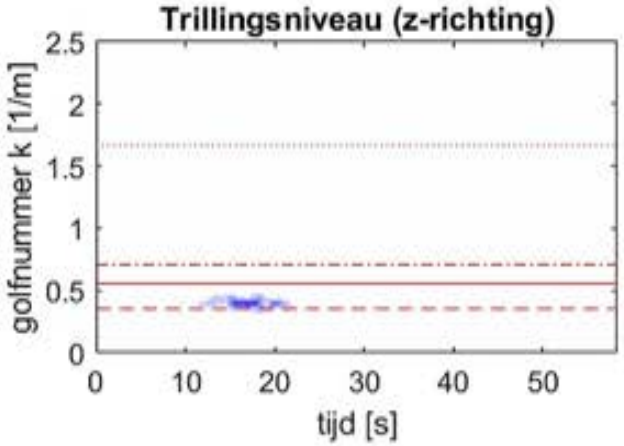


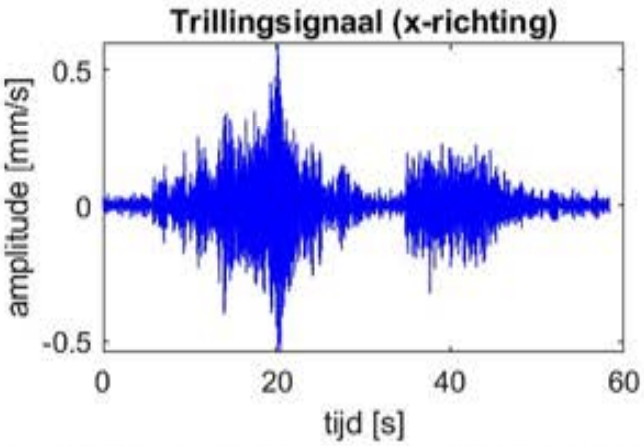


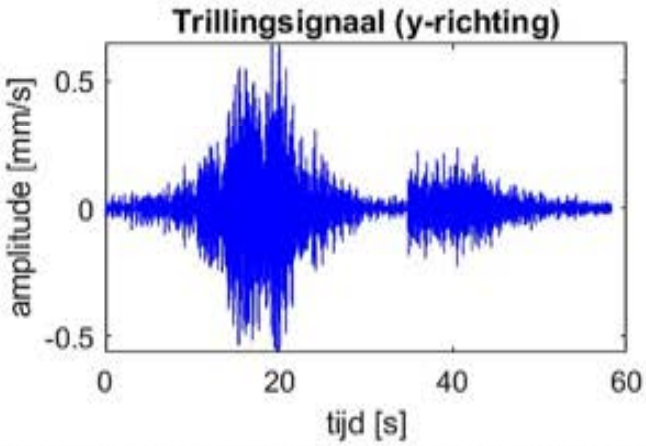
#3.# TriggerDate=2020-01-10# TriggerTime=00:47:28 rijsnelheid:22.7222 m/s rijrichting:Z-N

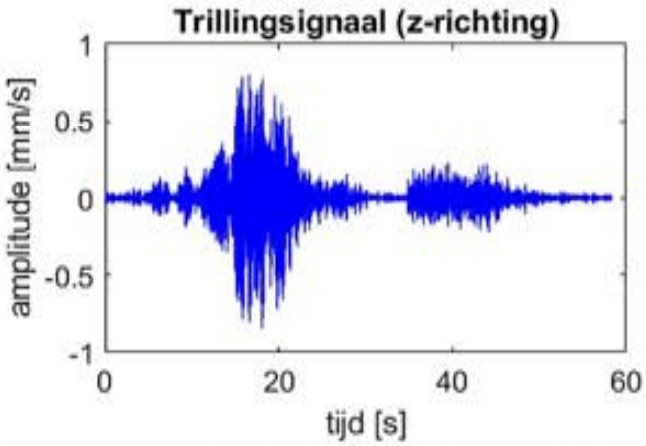


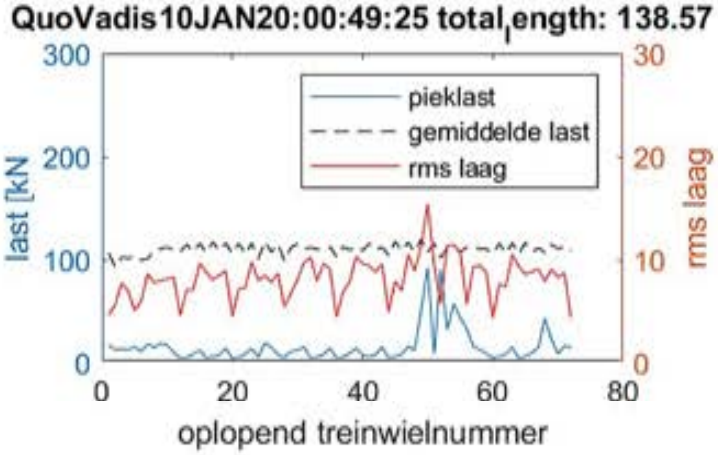


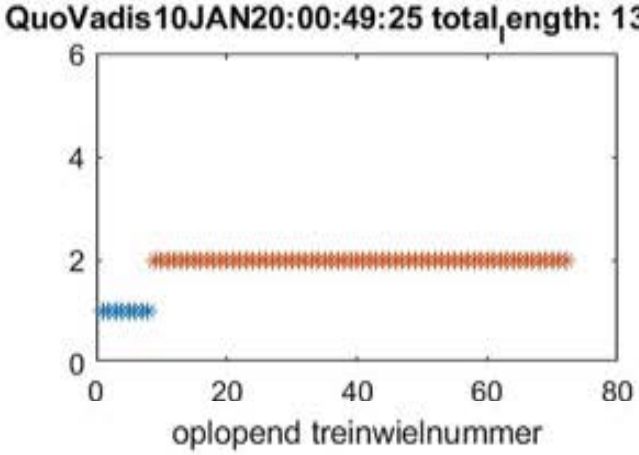


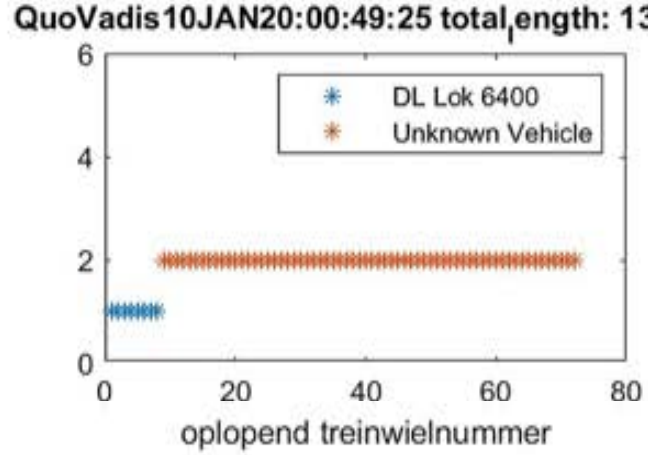




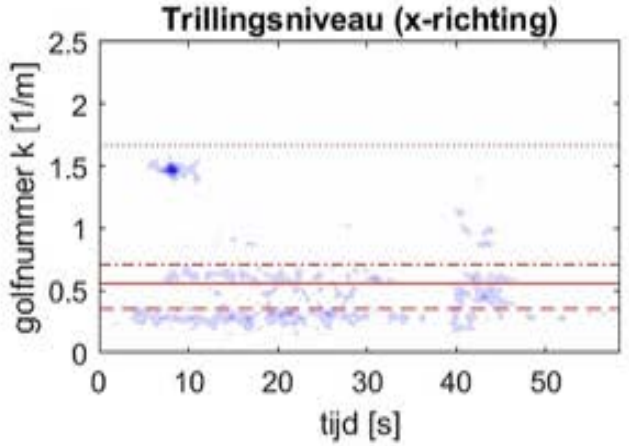


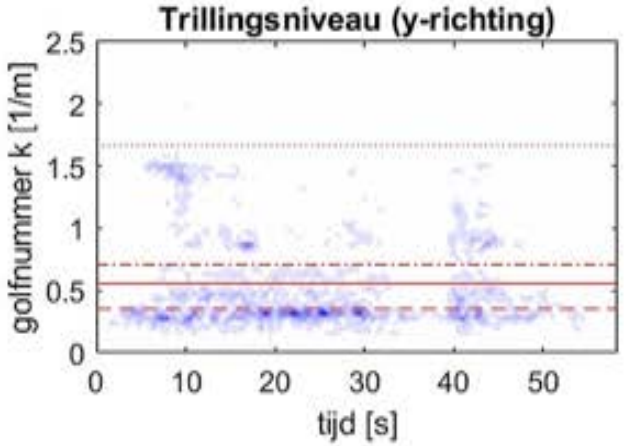


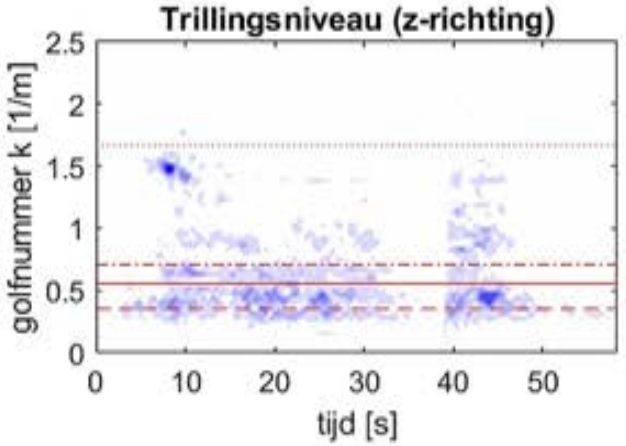


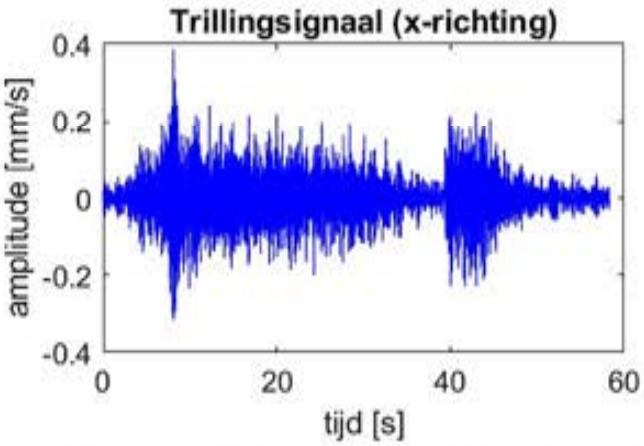


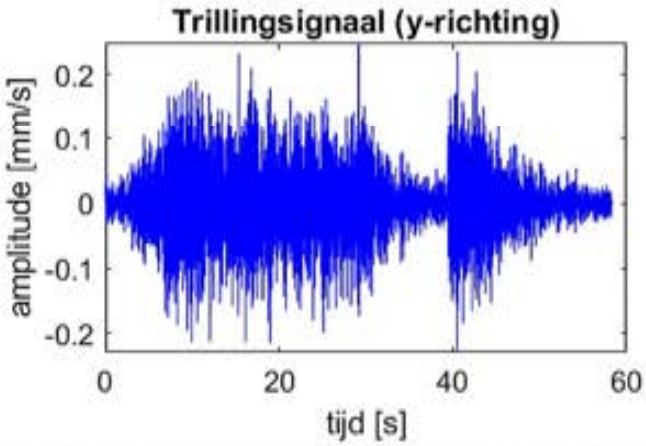
#4.# TriggerDate=2020-01-11# TriggerTime=20:58:20 rijsnelheid:25.2778 m/s rijrichting:N-Z

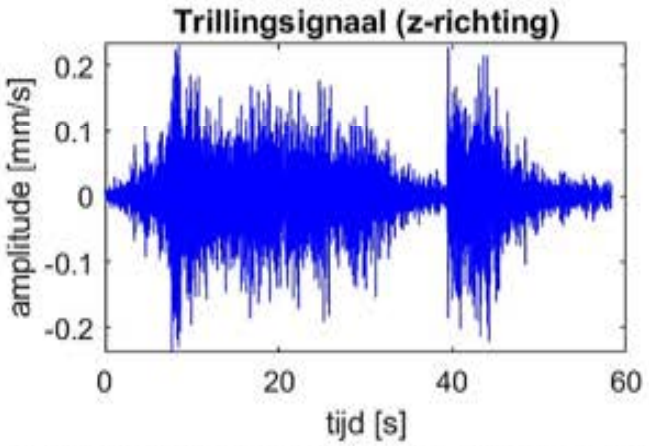


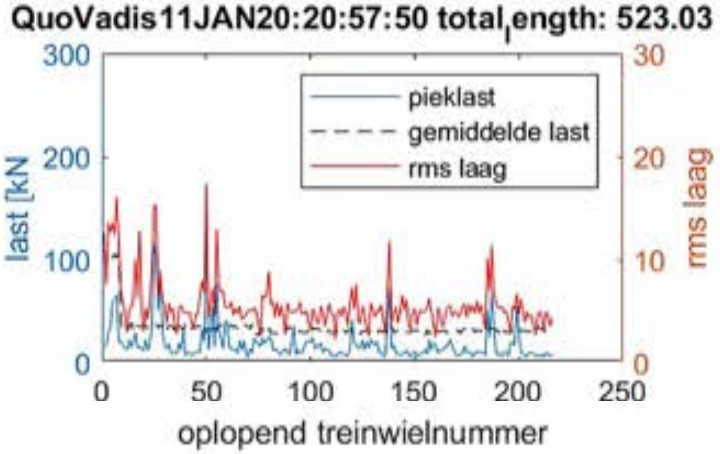


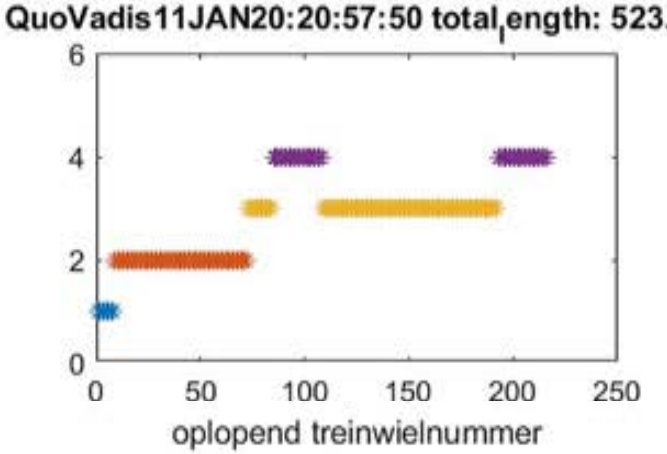


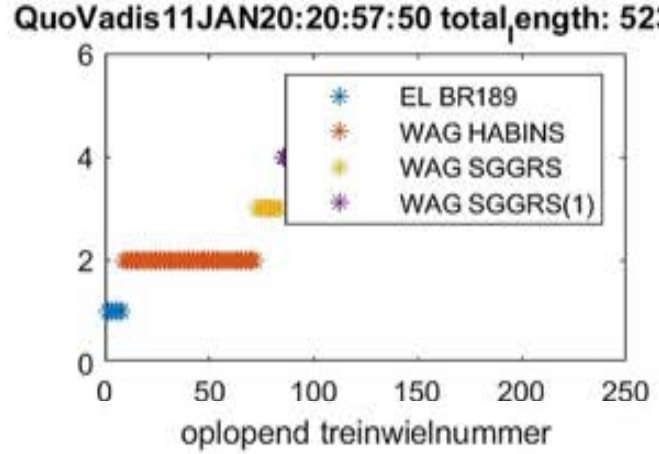




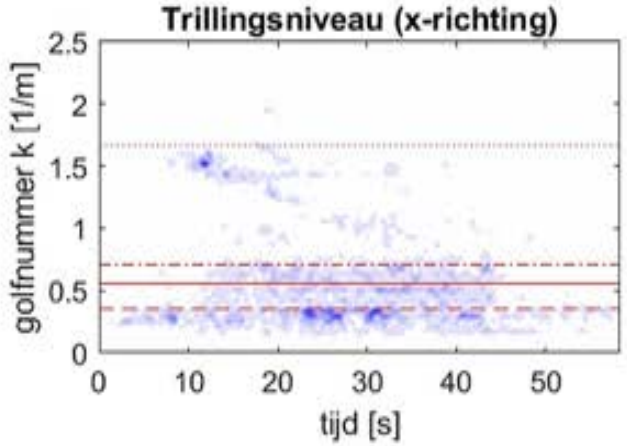


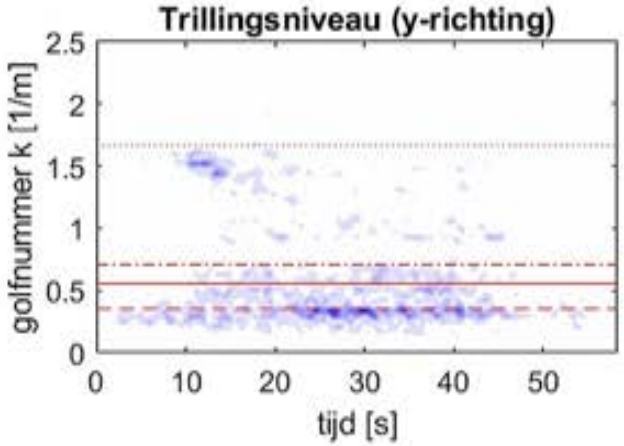


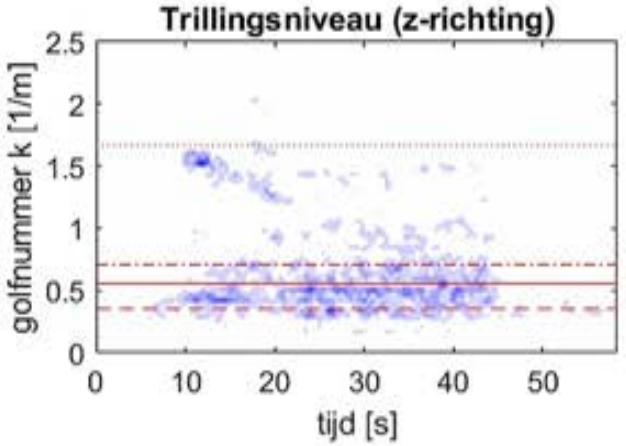


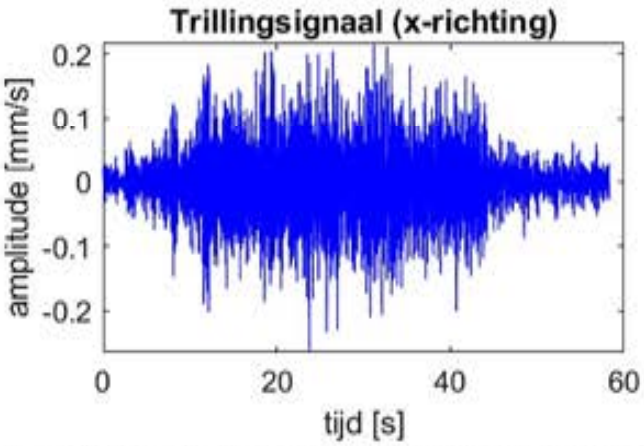


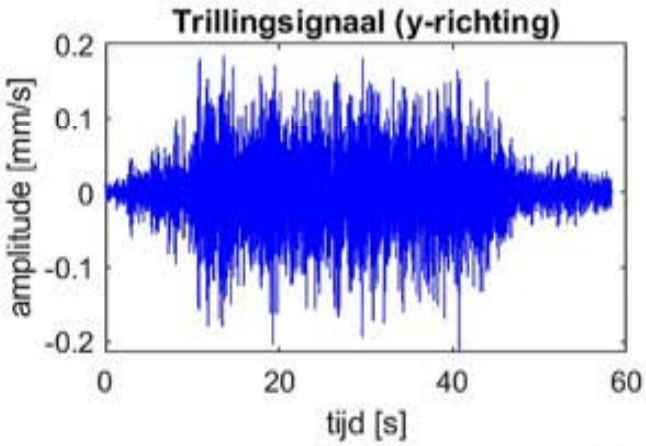
#5.# TriggerDate=2020-01-14# TriggerTime=20:01:40 rijsnelheid:23.6667 m/s rijrichting:N-Z

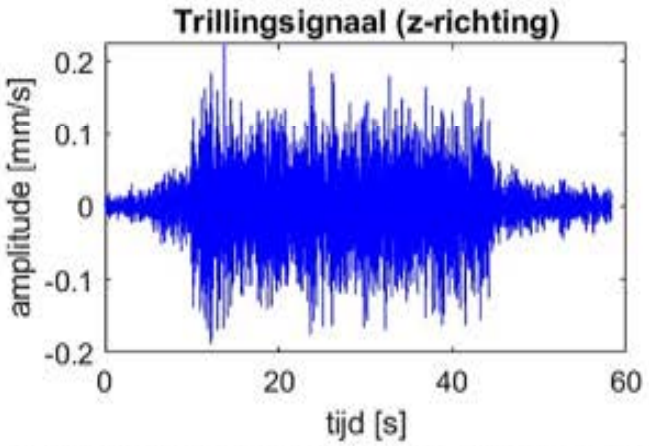


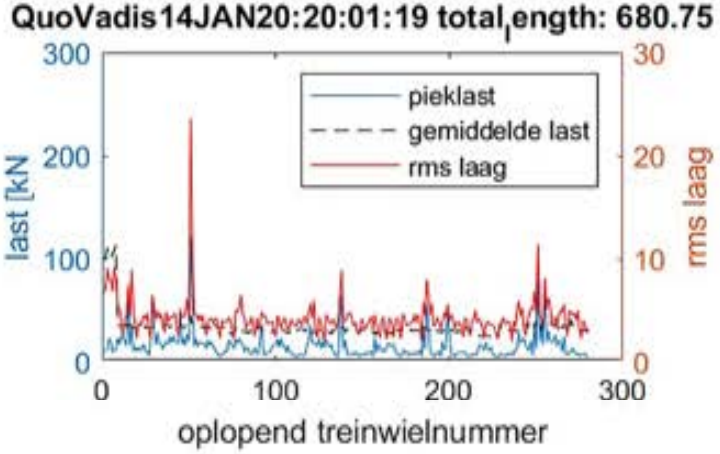


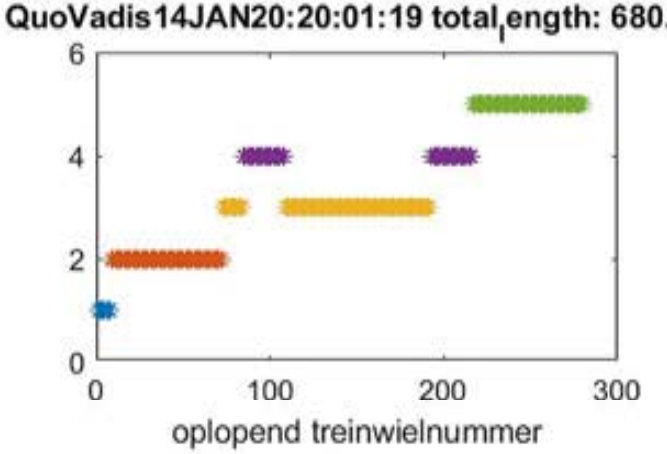


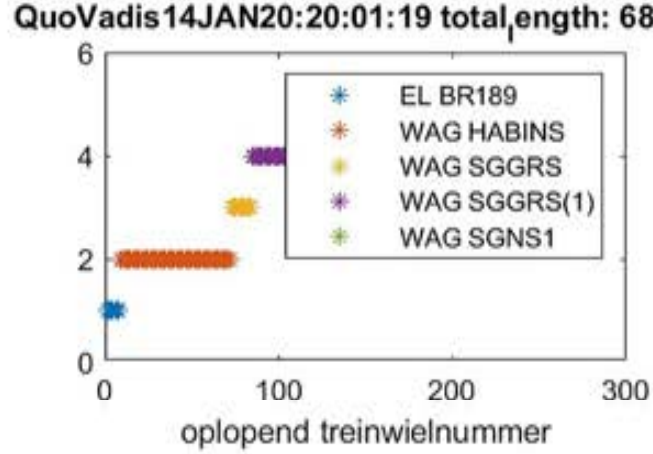




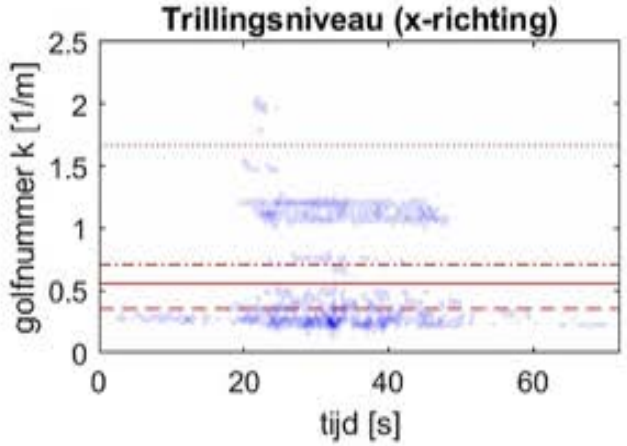


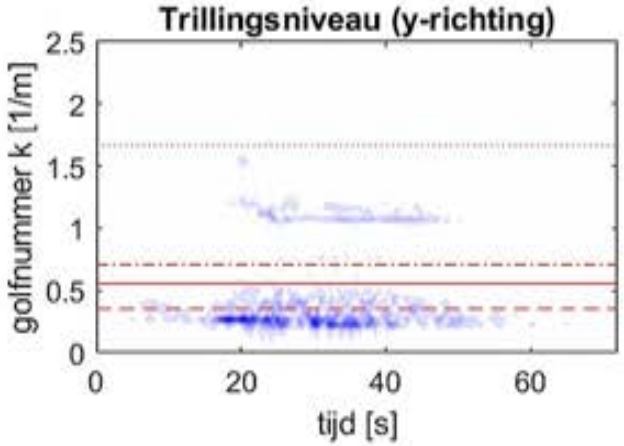


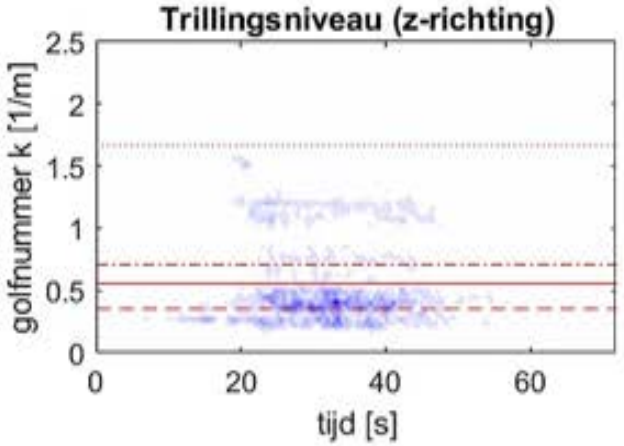


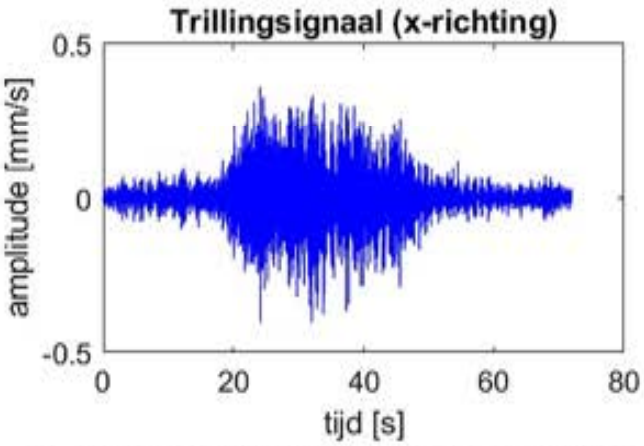


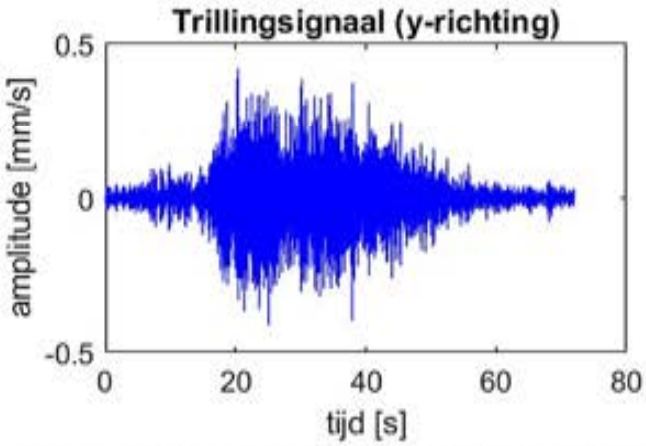
#6.# TriggerDate=2020-01-16# TriggerTime=19:59:09 rijsnelheid:22.3889 m/s rijrichting:N-Z

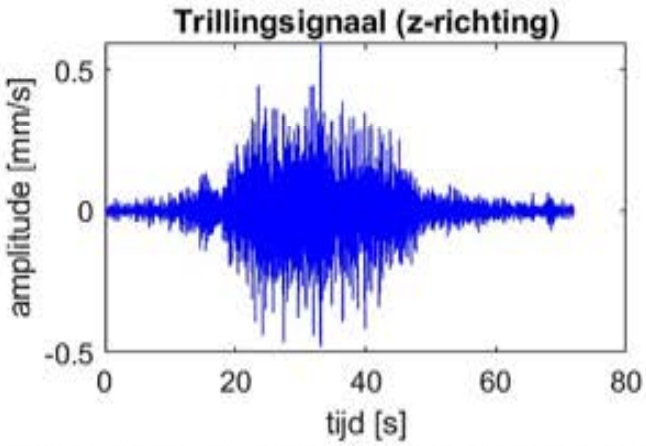


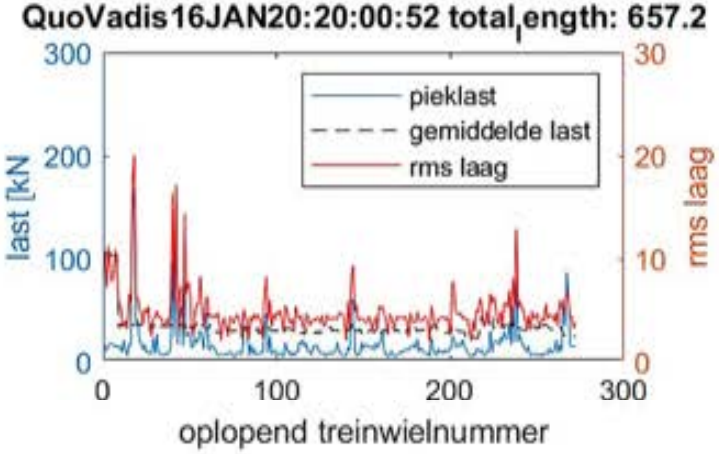


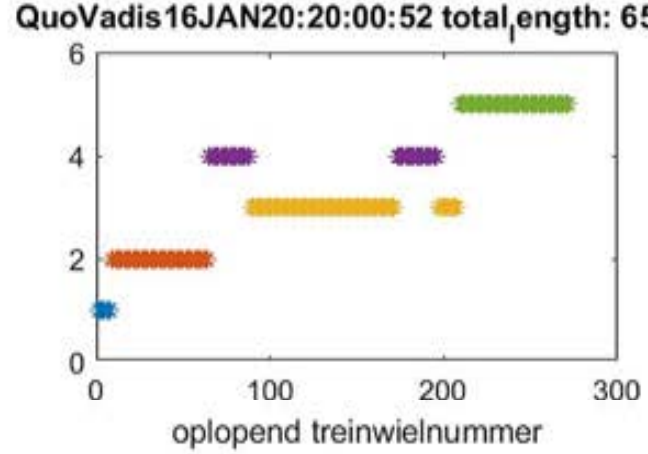


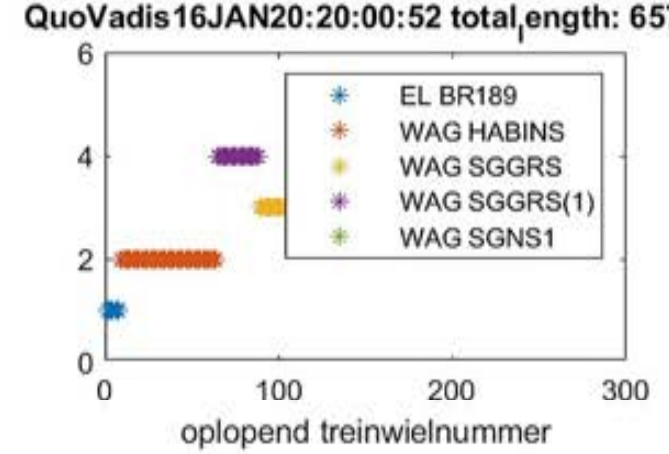




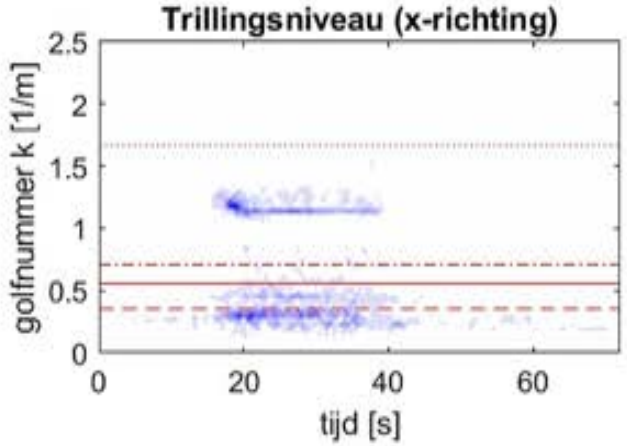


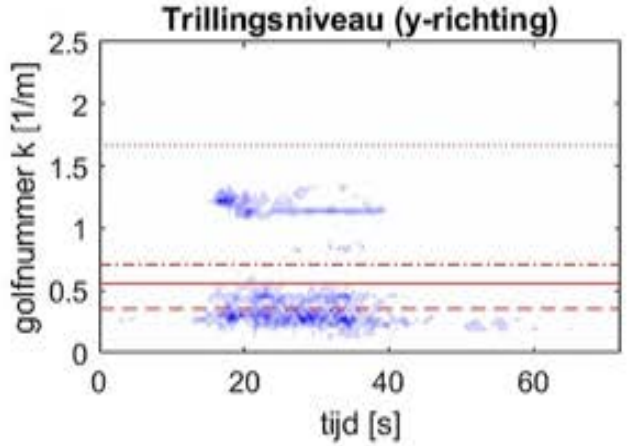


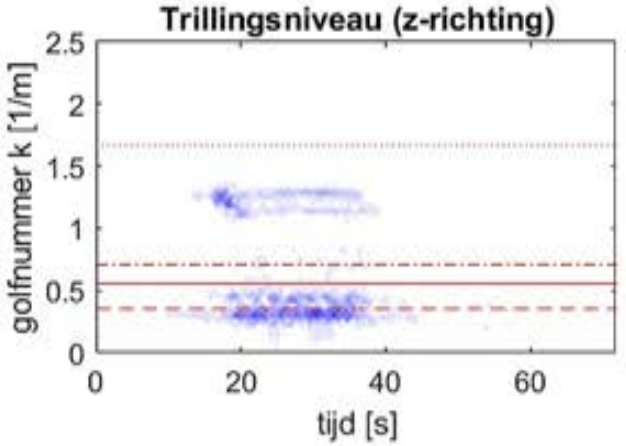


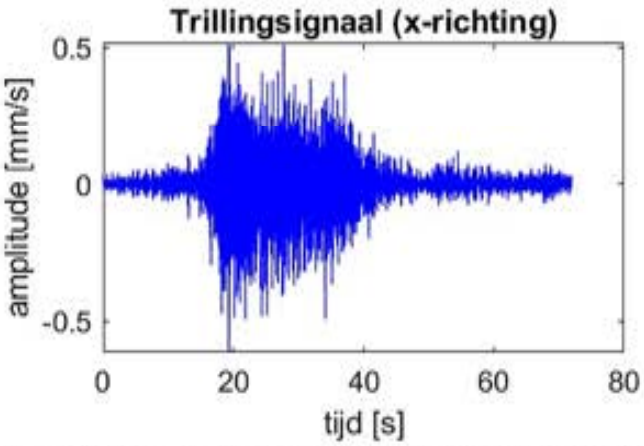


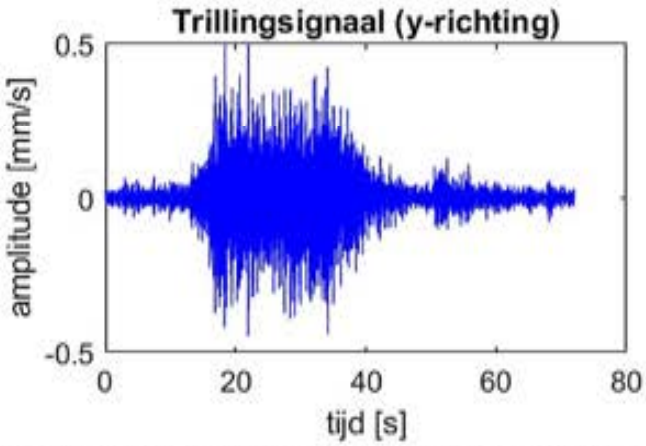
#7.# TriggerDate=2020-01-18# TriggerTime=12:49:01 rijsnelheid:26.3056 m/s rijrichting:Z-N

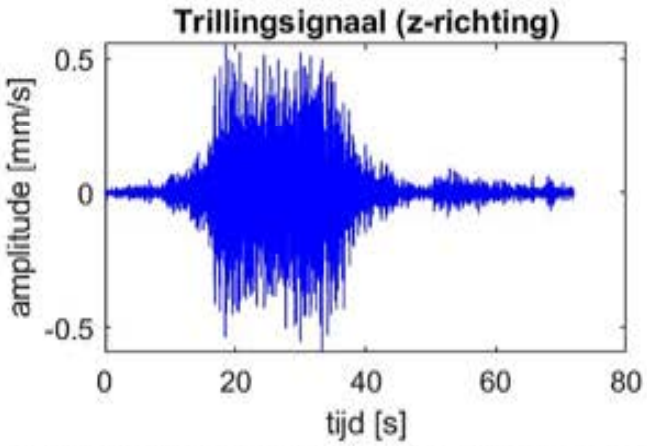


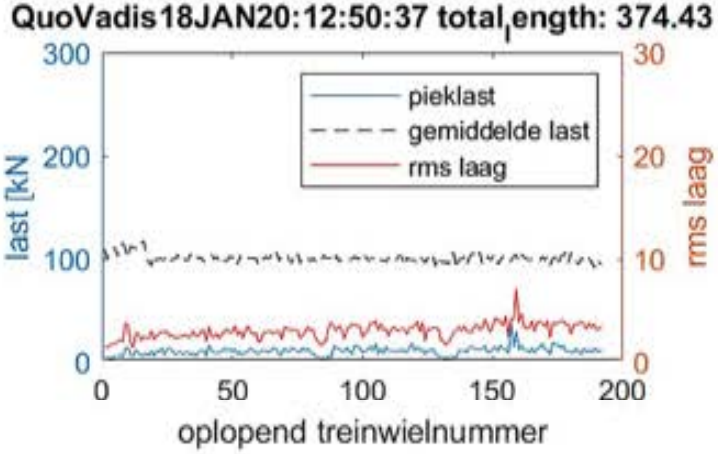


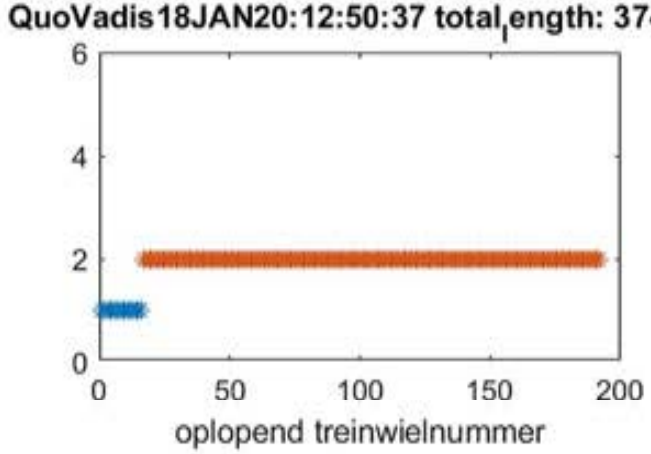


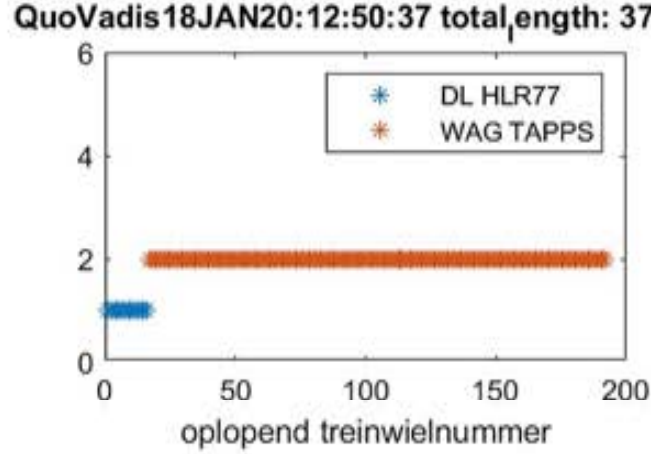




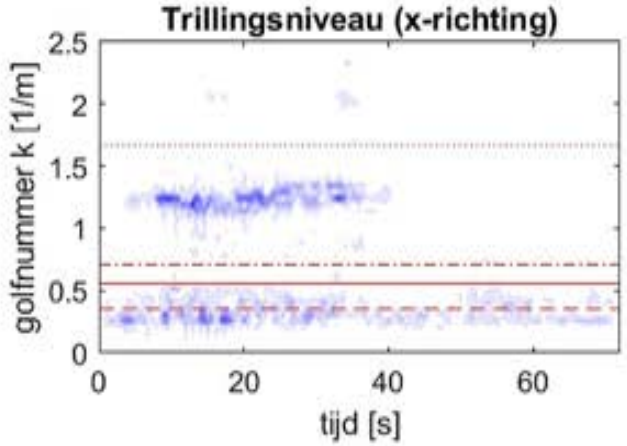


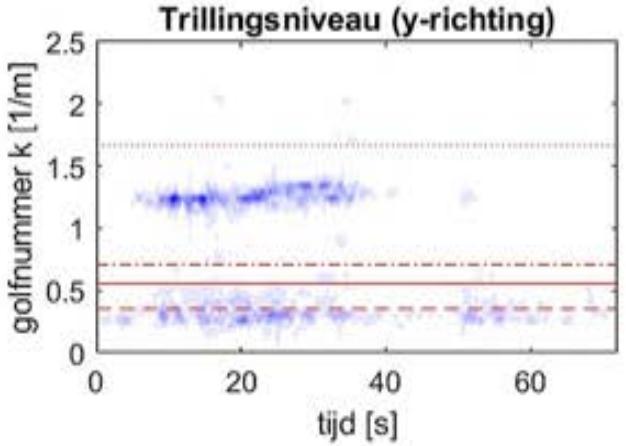


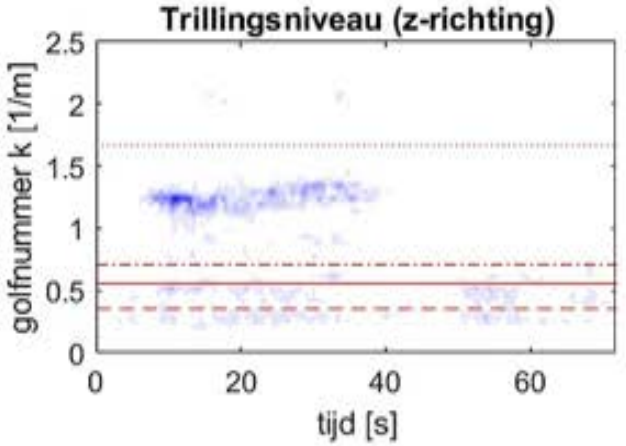


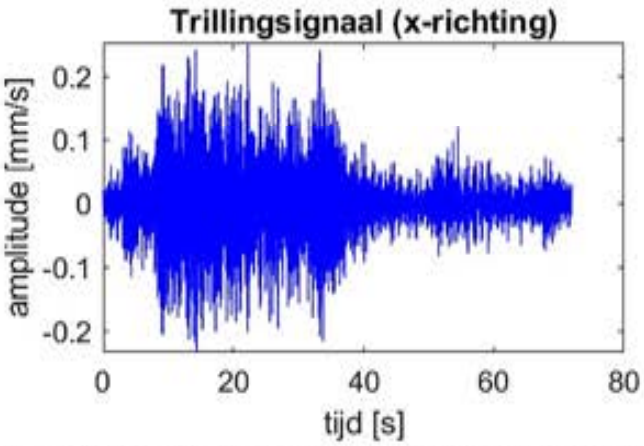


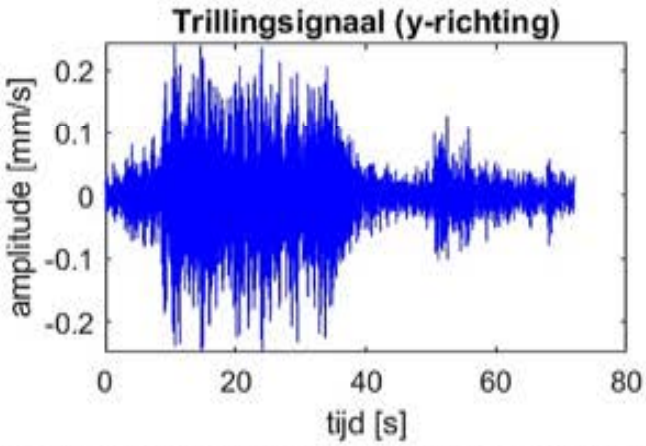
#8.# TriggerDate=2020-01-19# TriggerTime=08:09:16 rijsnelheid:19.3333 m/s rijrichting:N-Z

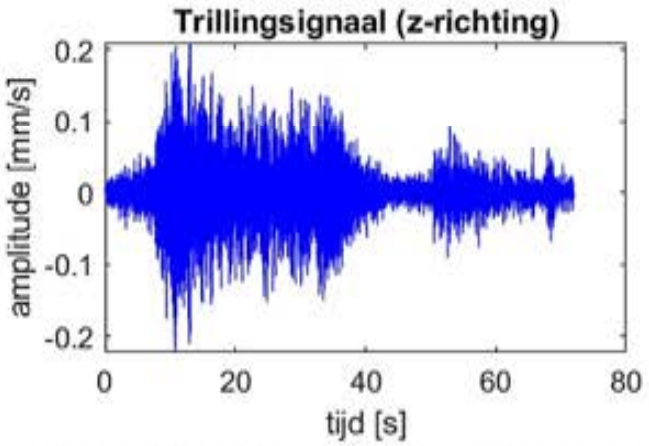


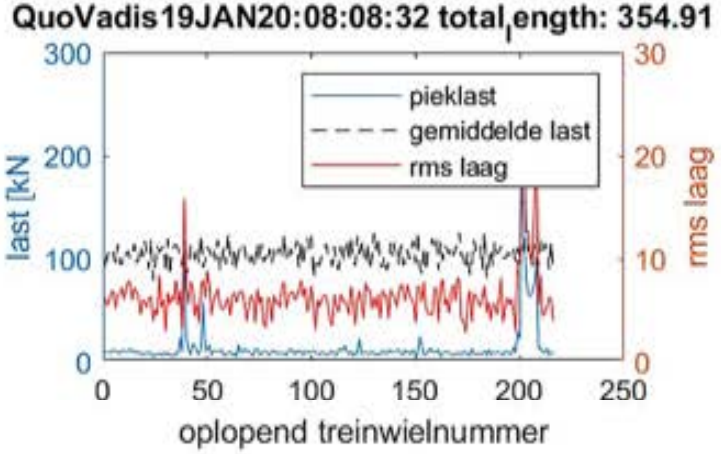


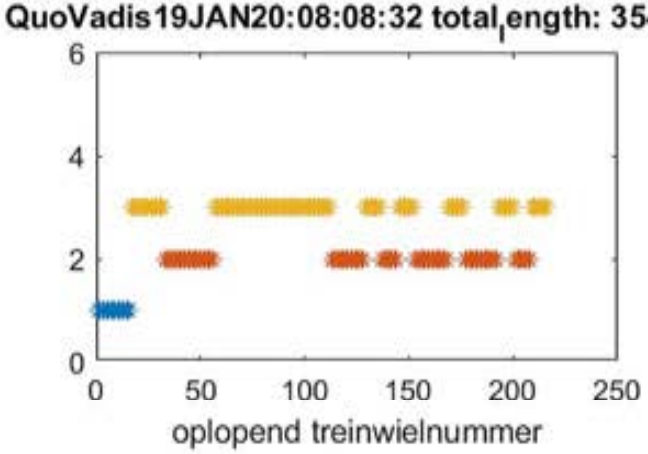


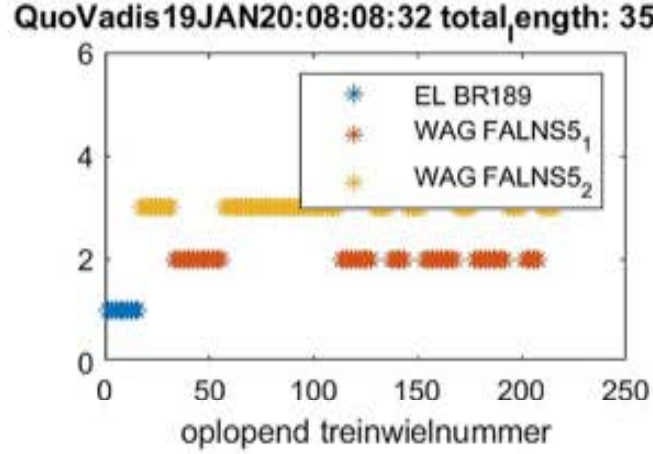




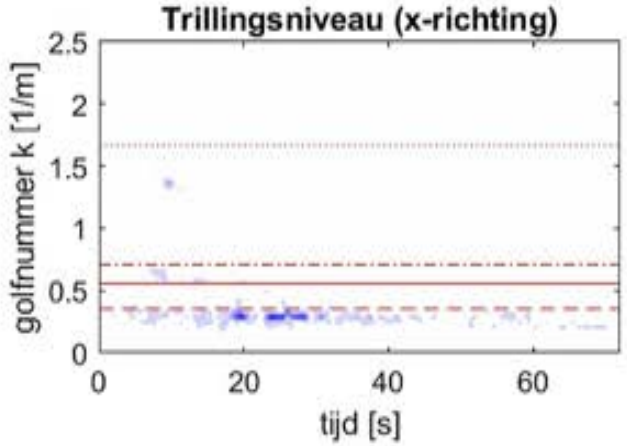


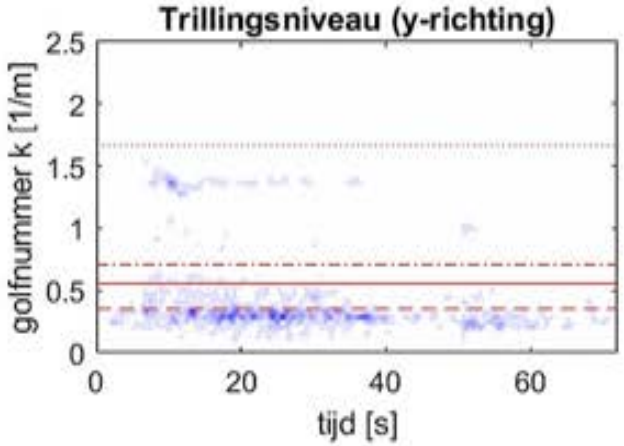


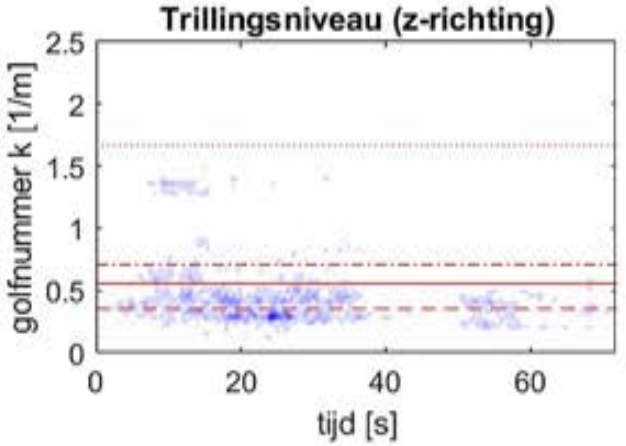


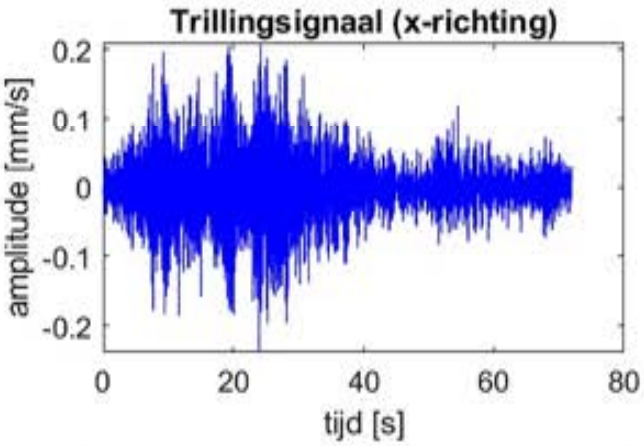


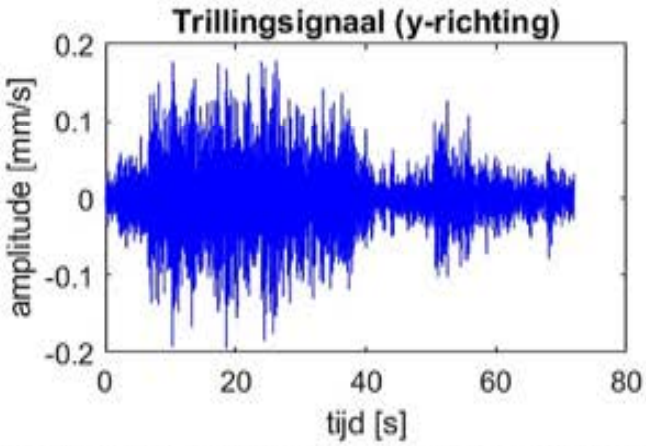
#9.# TriggerDate=2020-01-28# TriggerTime=13:15:29 rijsnelheid:24.2222 m/s rijrichting:N-Z

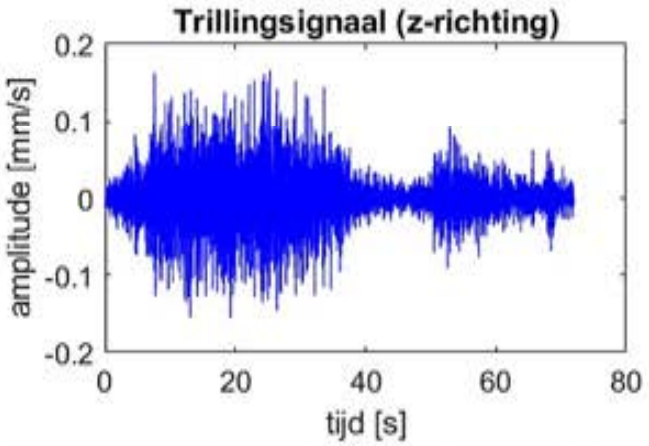


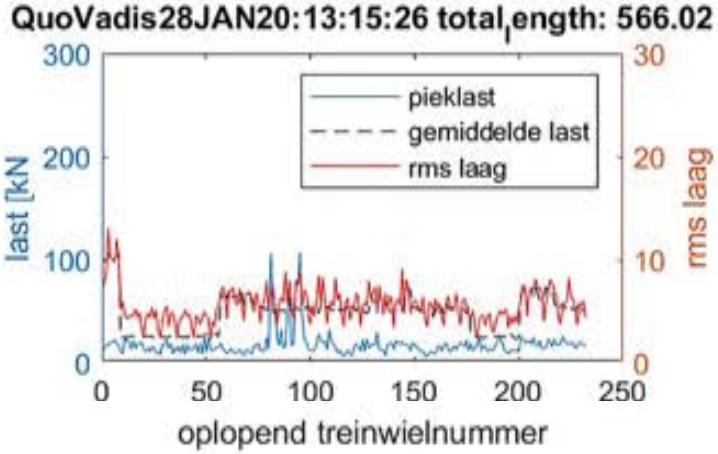


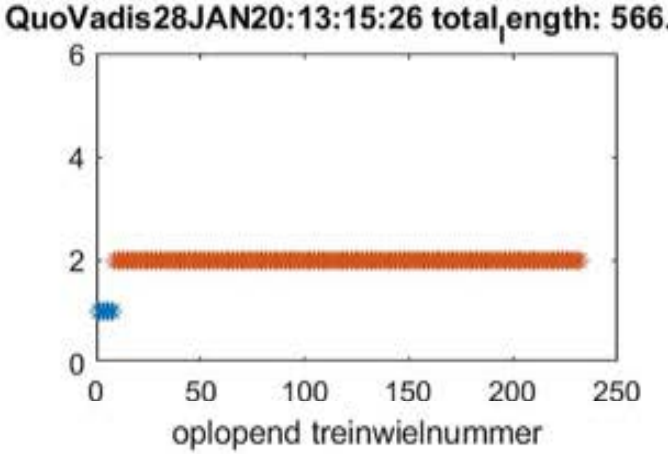


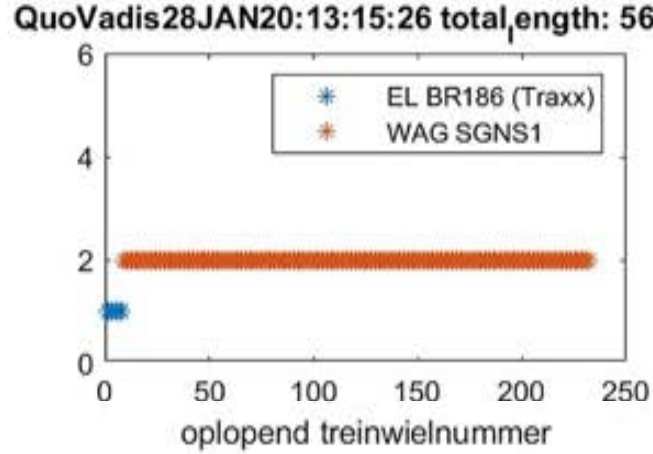




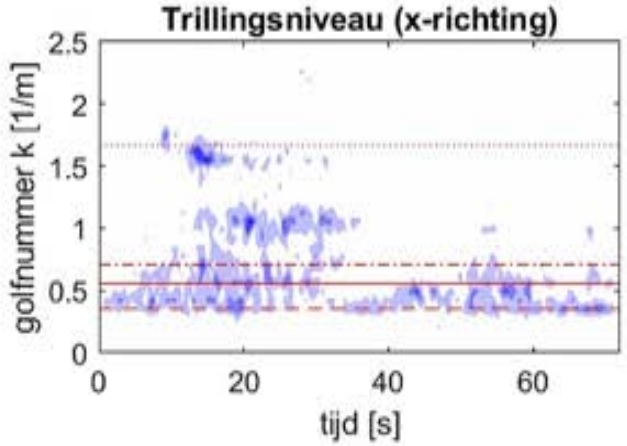


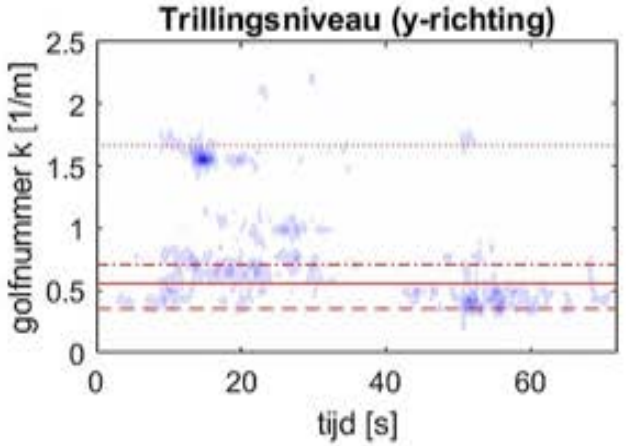


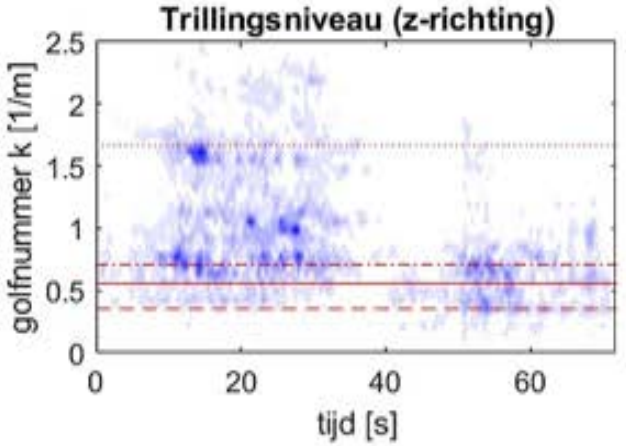


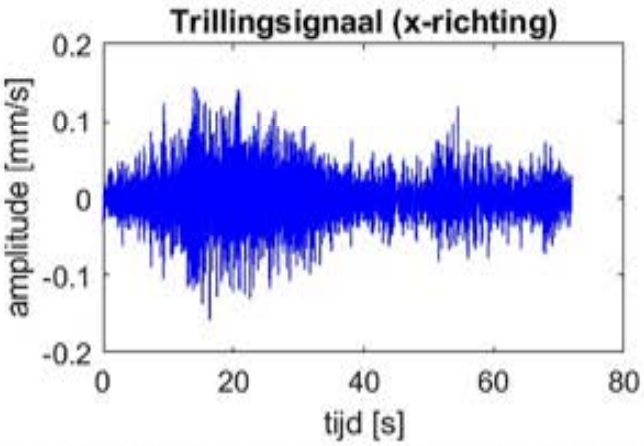


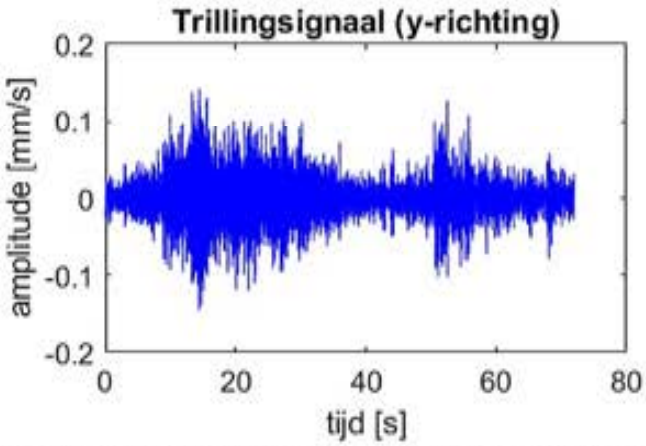
#10.# TriggerDate=2020-01-29# TriggerTime=12:18:11 rijsnelheid:14.1944 m/s rijrichting:N-Z

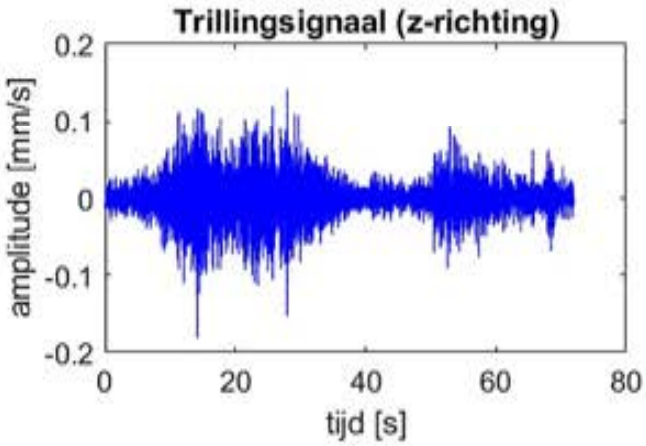


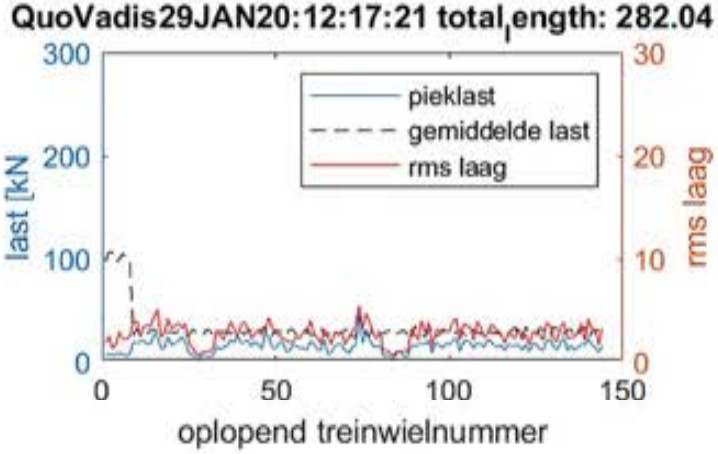


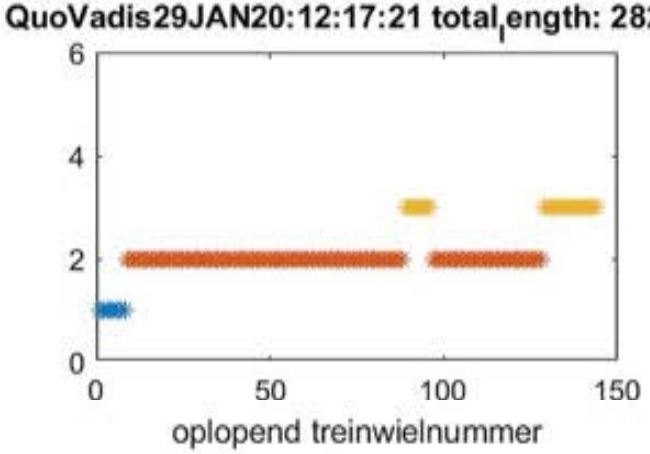


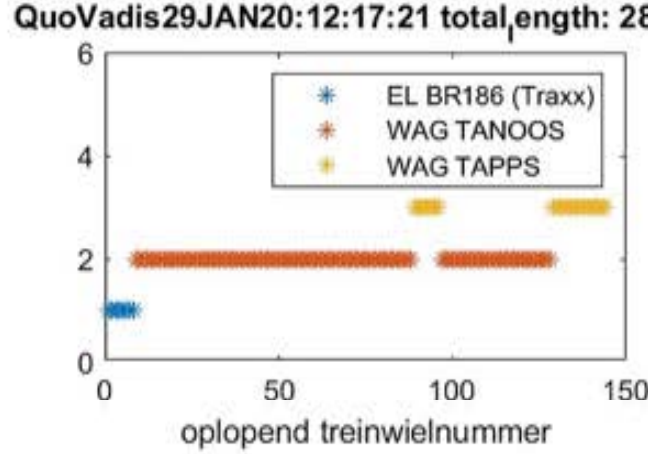




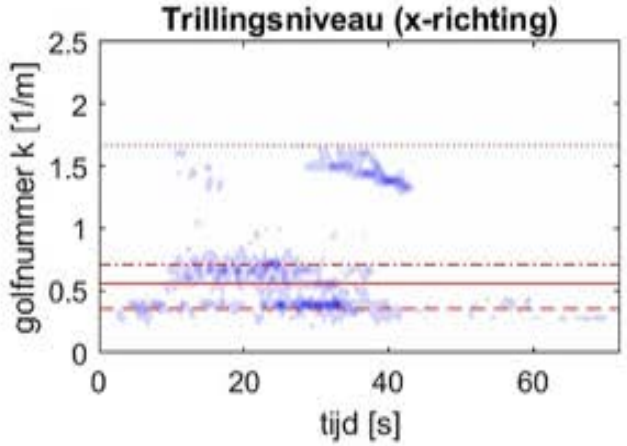


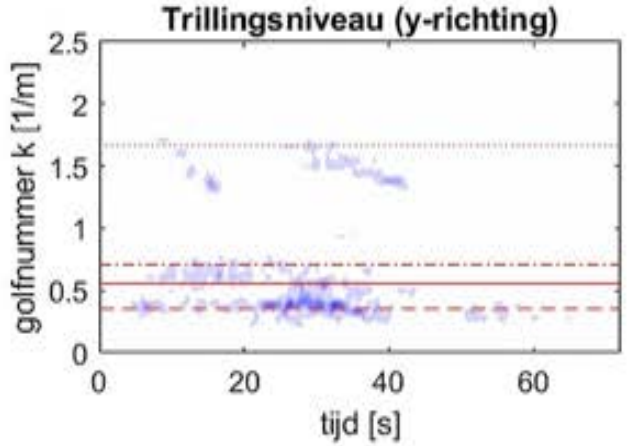


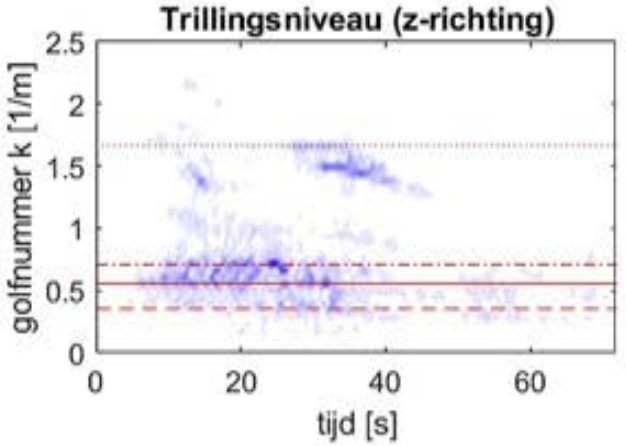


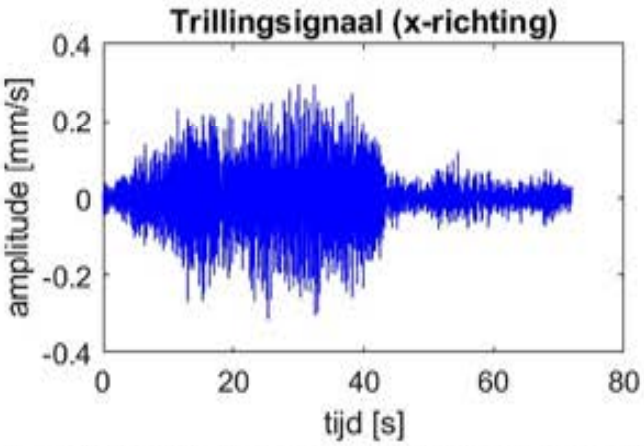


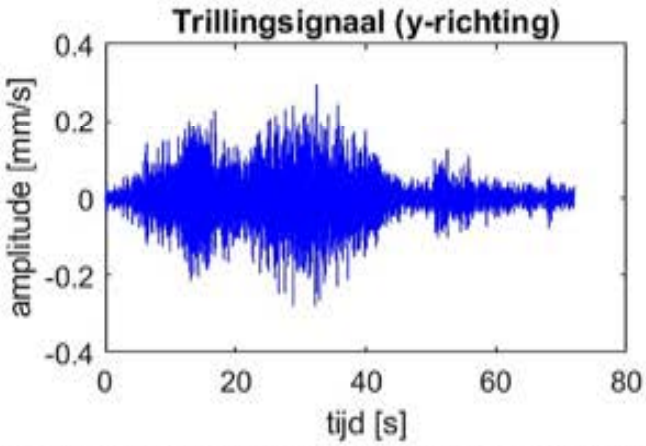
#11.# TriggerDate=2020-01-29# TriggerTime=21:51:43 rijsnelheid:18.0833 m/s rijrichting:N-Z

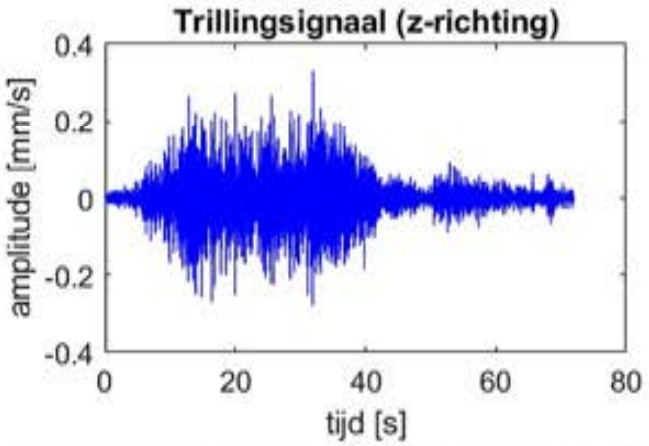


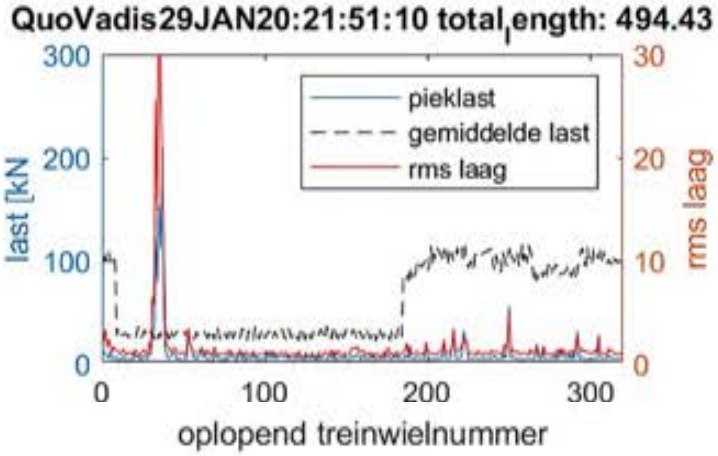


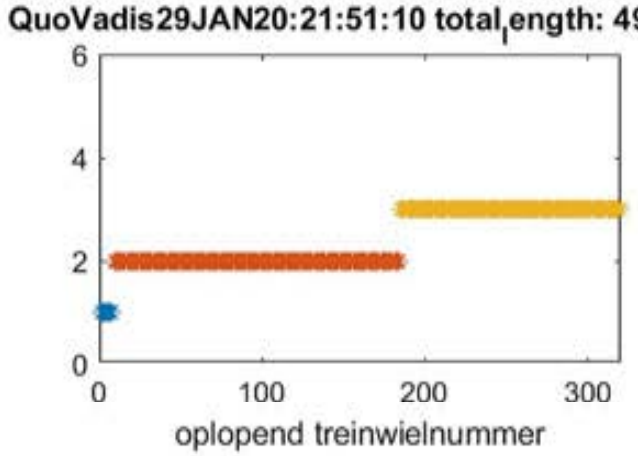


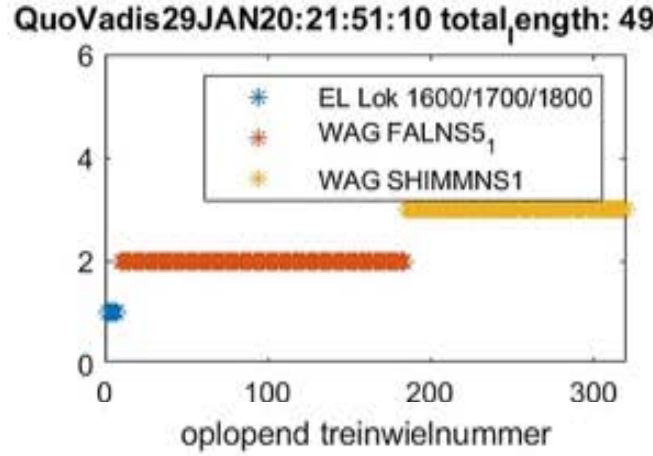




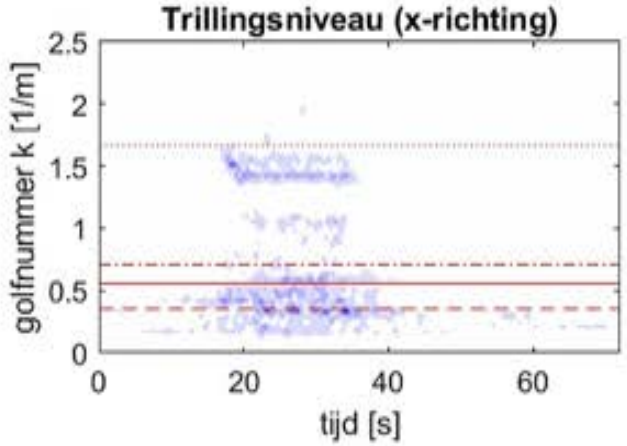


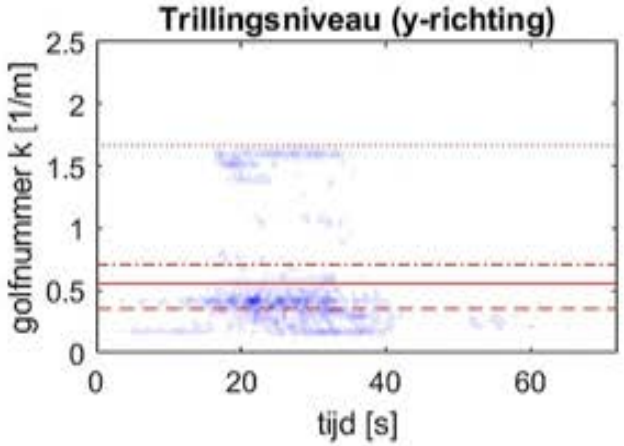


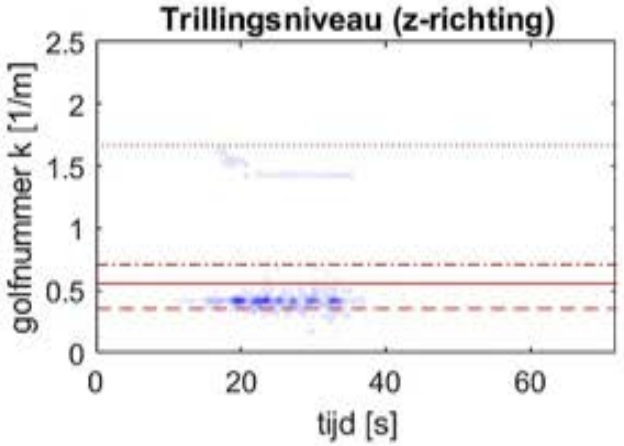


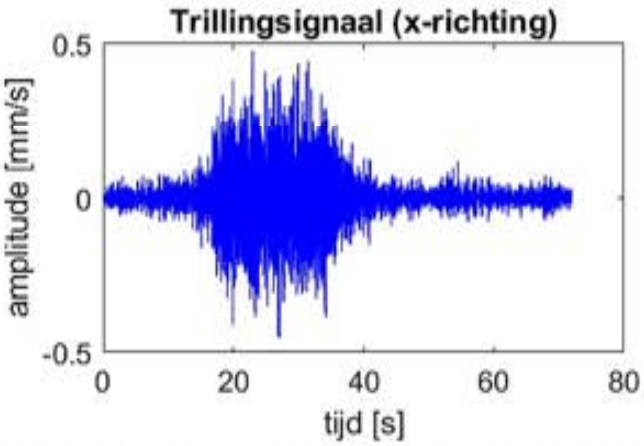


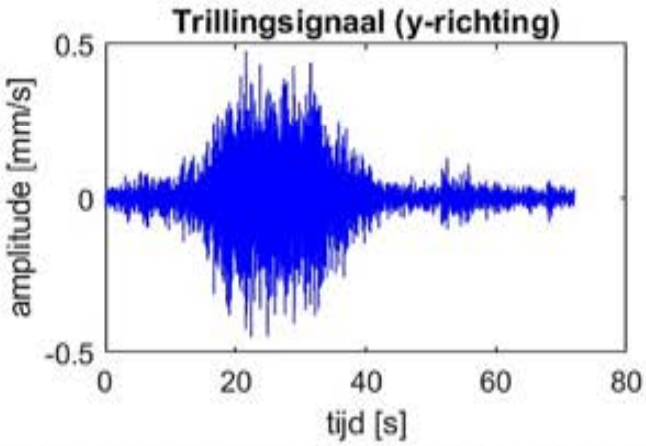
#12.# TriggerDate=2020-01-30# TriggerTime=14:45:14 rijsnelheid:23.8056 m/s rijrichting:Z-N

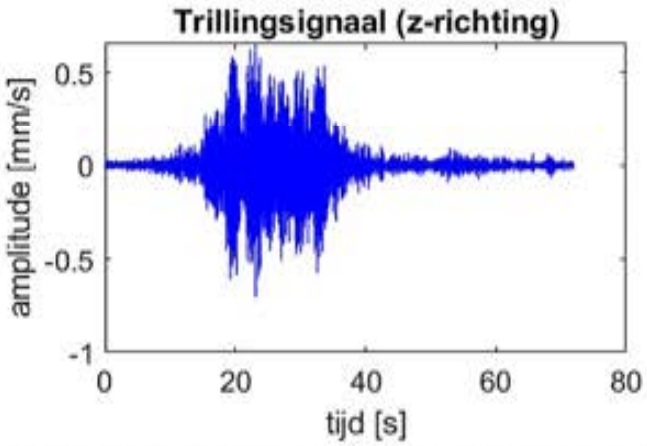


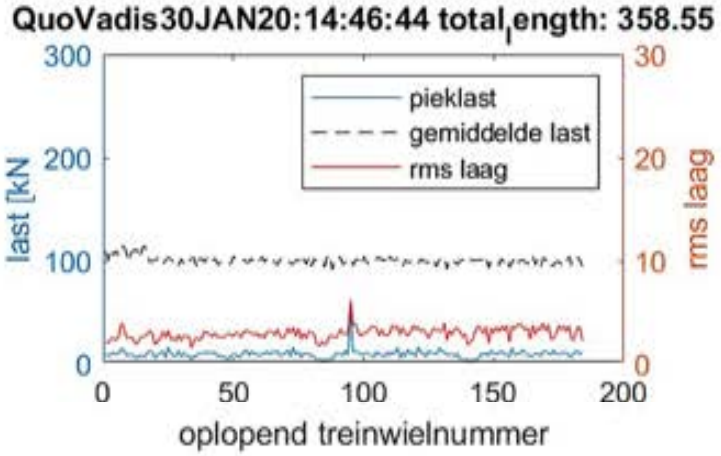


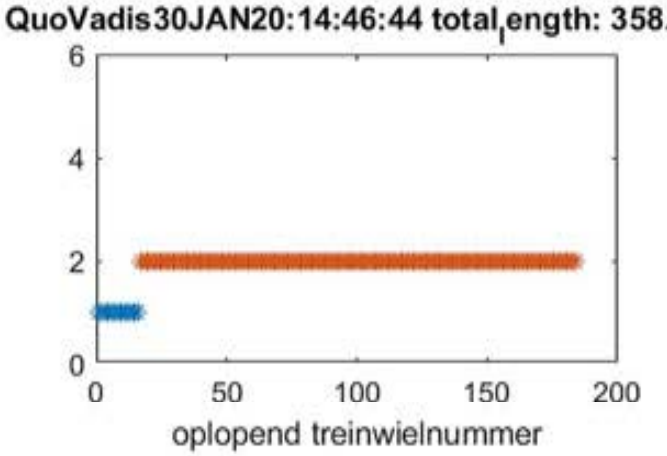


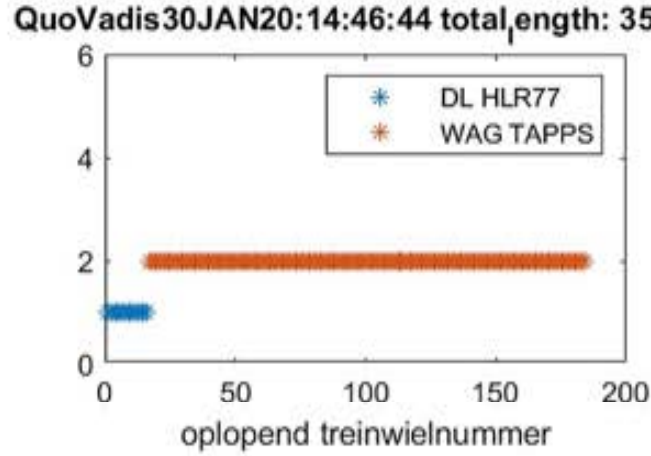




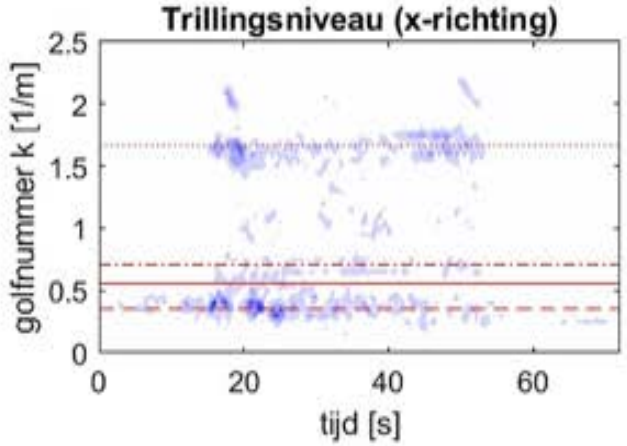


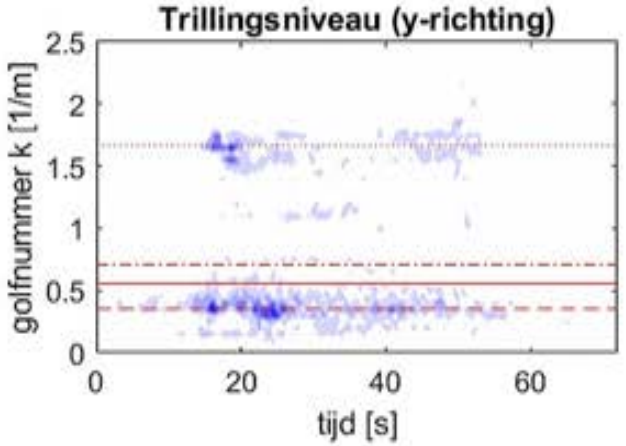


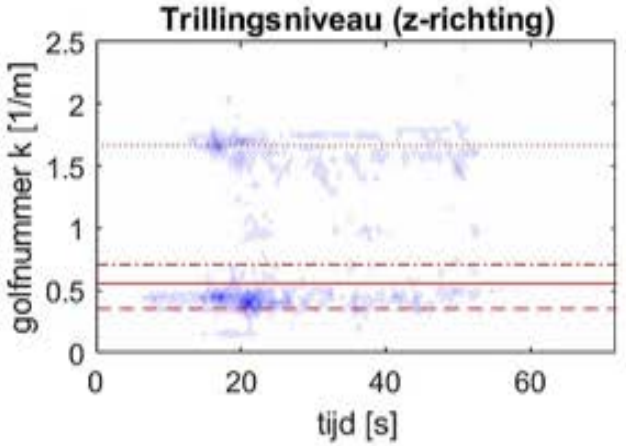


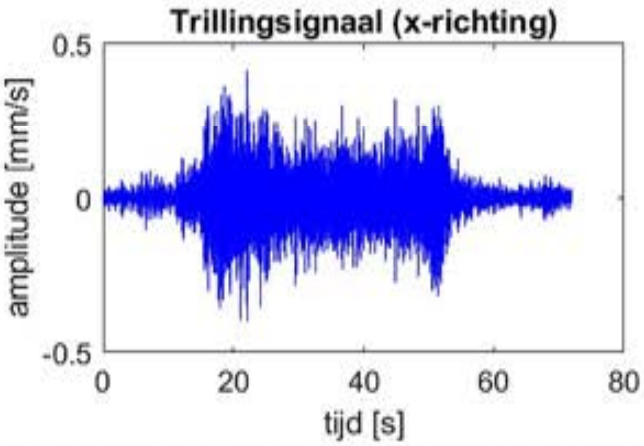


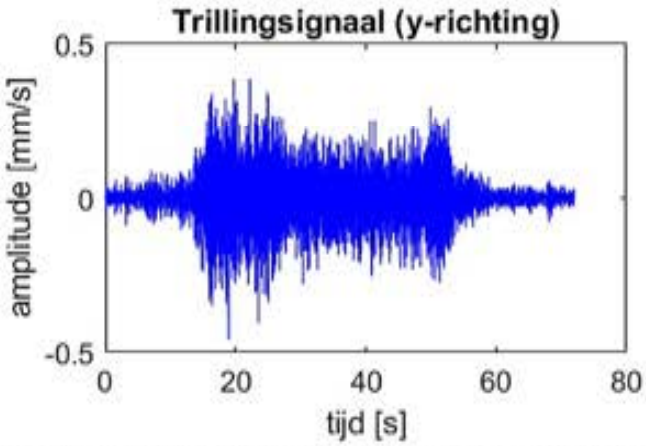
#13.# TriggerDate=2020-02-06# TriggerTime=00:05:32 rijsnelheid:20 m/s rijrichting:Z-N

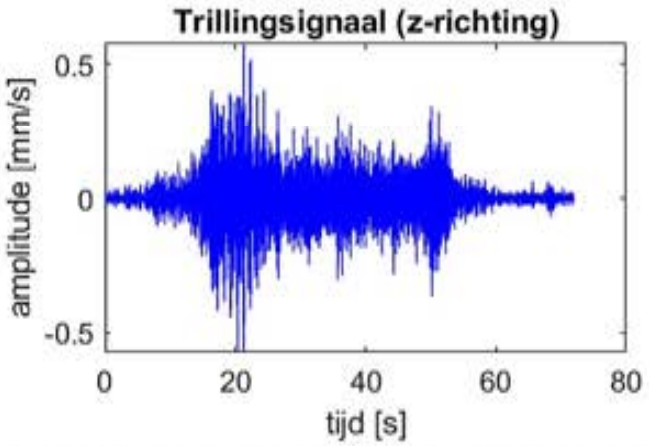


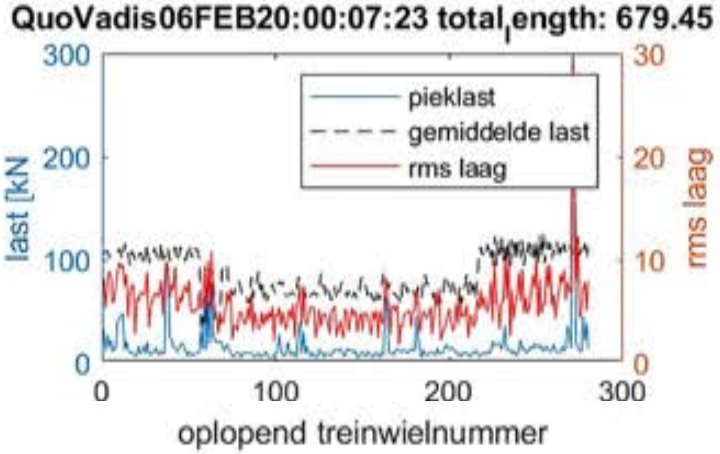


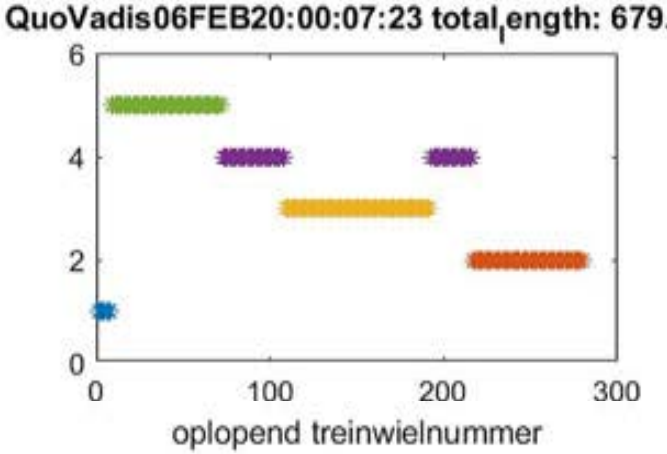


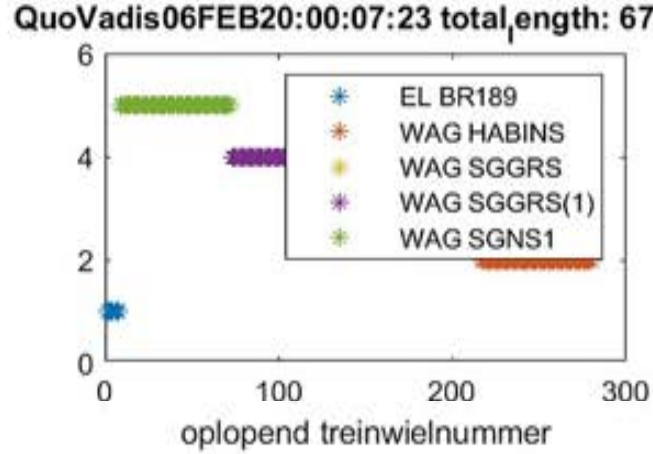




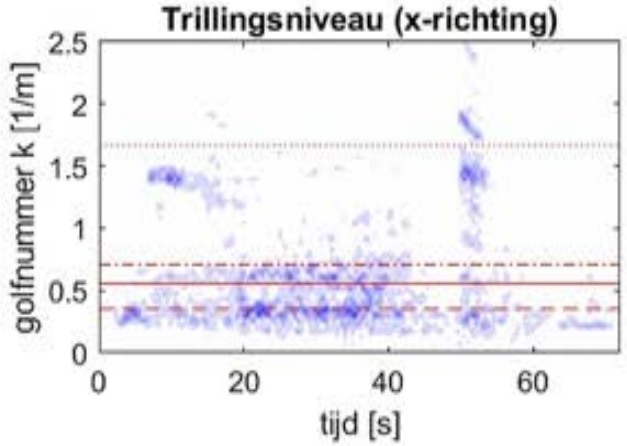


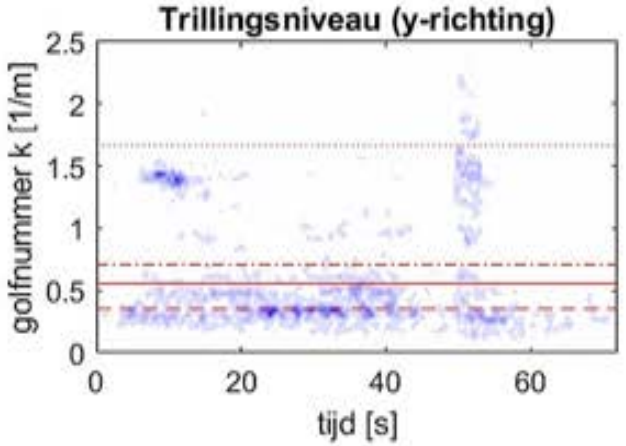


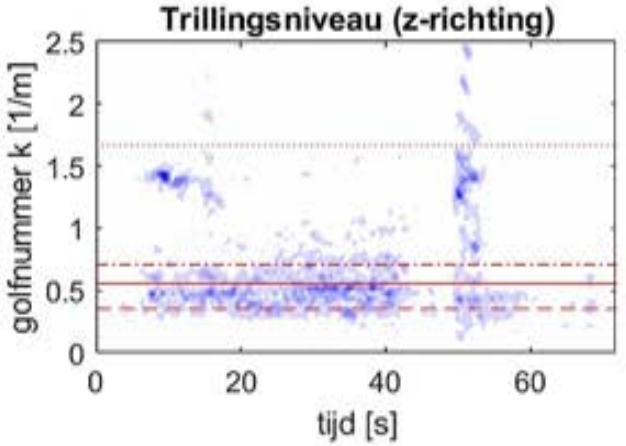


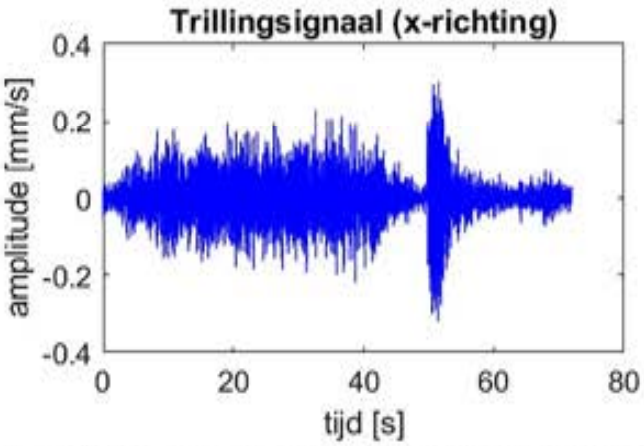


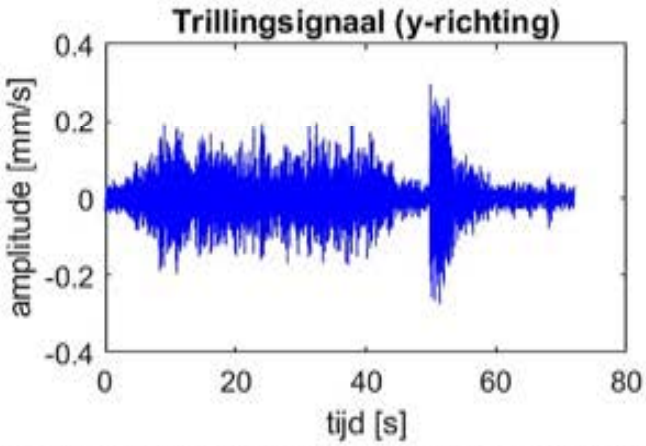
#14.# TriggerDate=2020-02-06# TriggerTime=20:00:53 rijsnelheid:22.9722 m/s rijrichting:N-Z

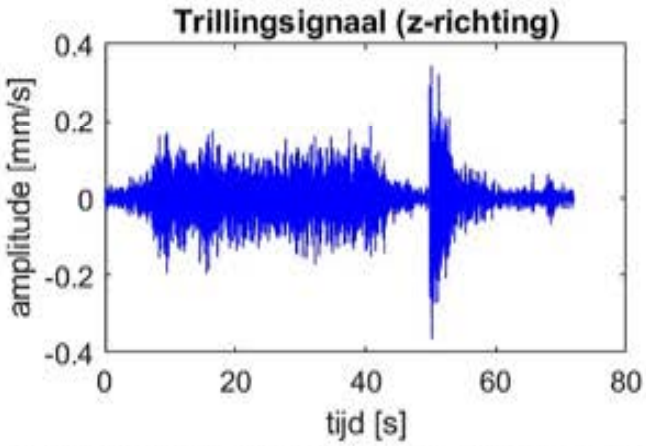


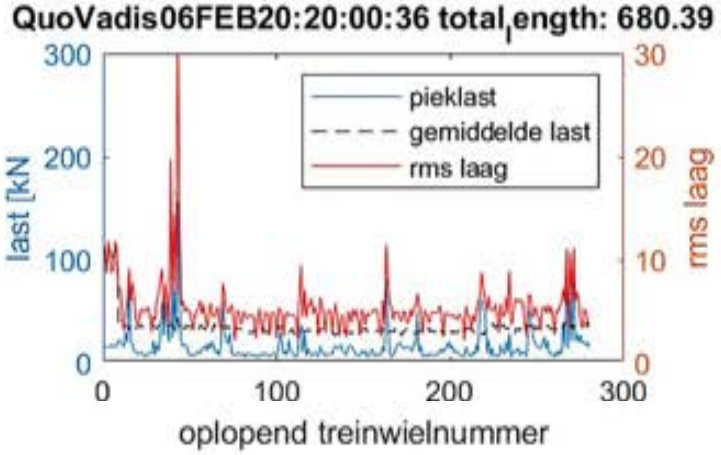


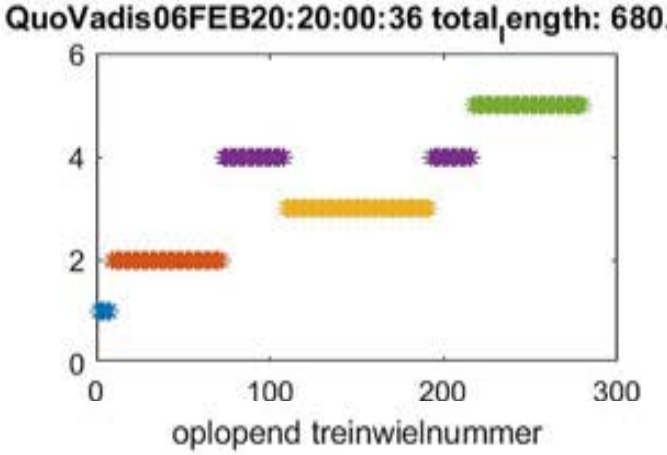


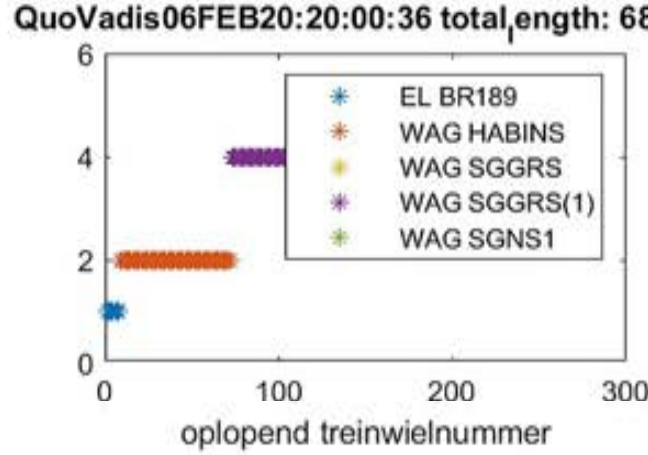




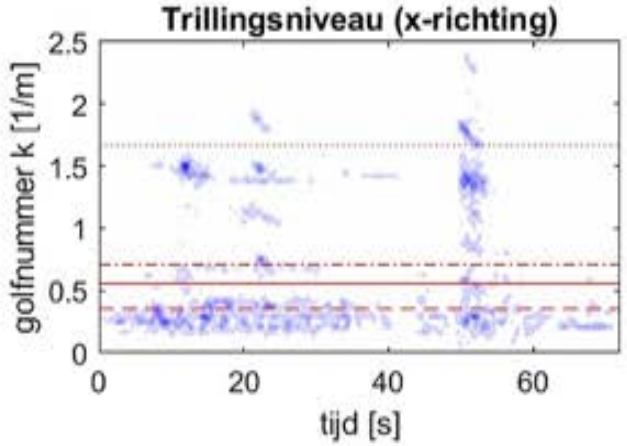


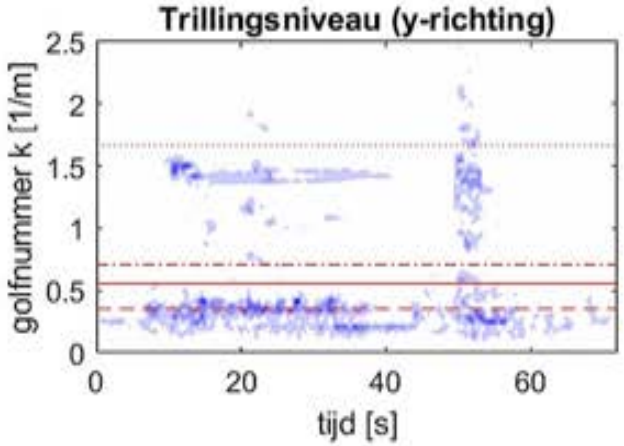


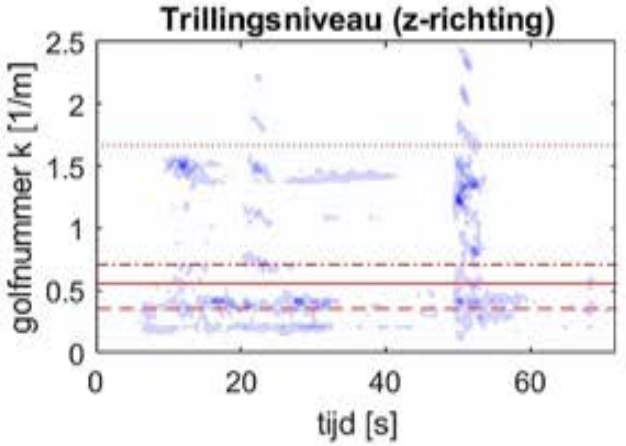


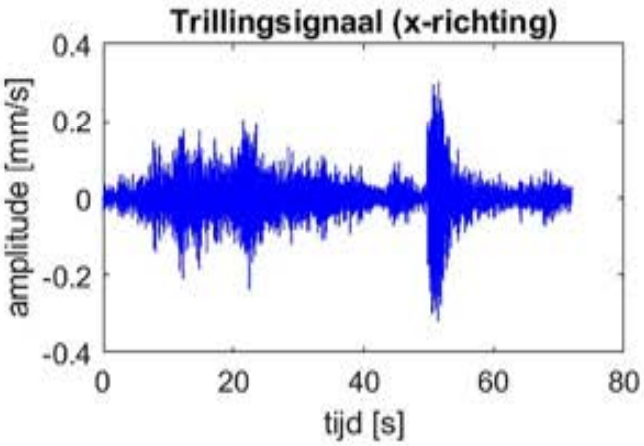


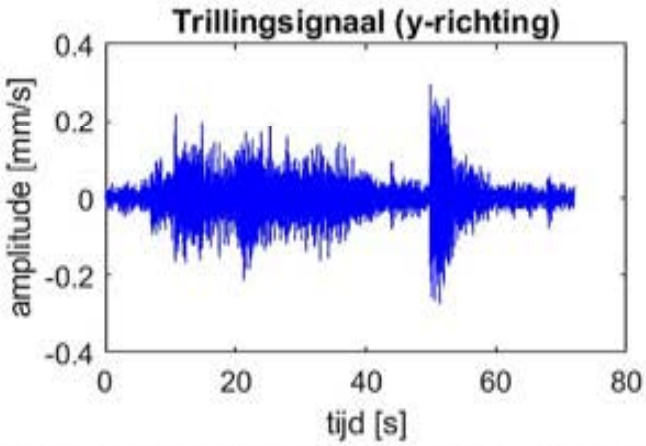
#15.# TriggerDate=2020-02-06# TriggerTime=22:16:06 rijsnelheid:23.9167 m/s rijrichting:N-Z

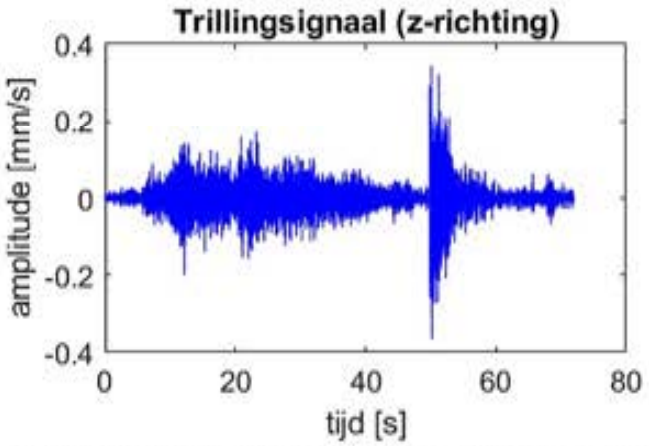


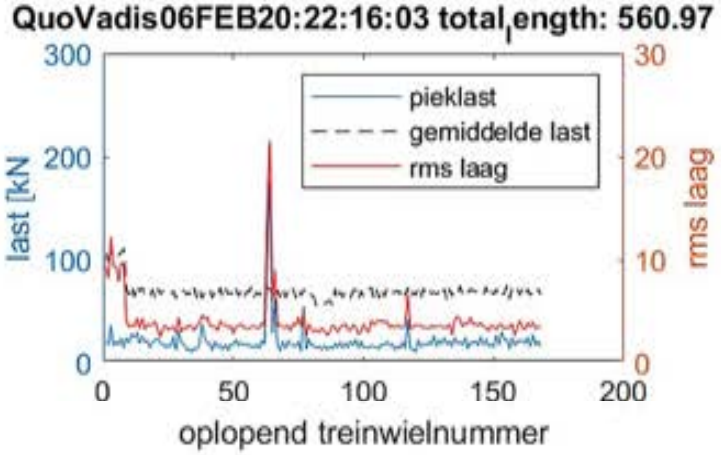


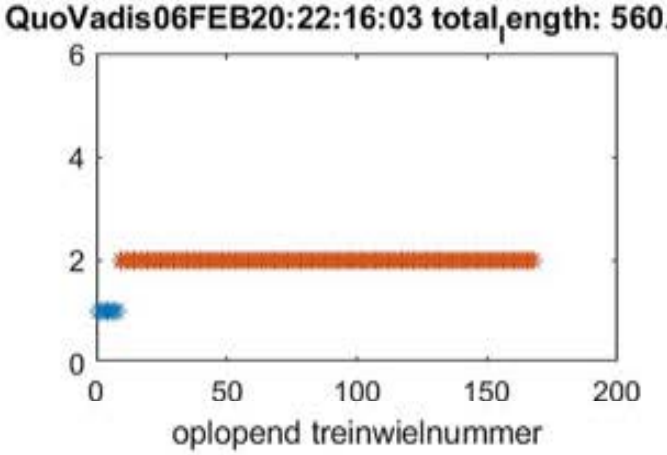


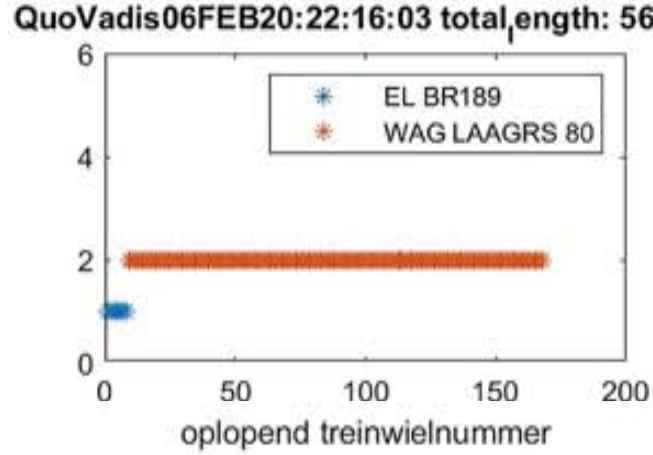
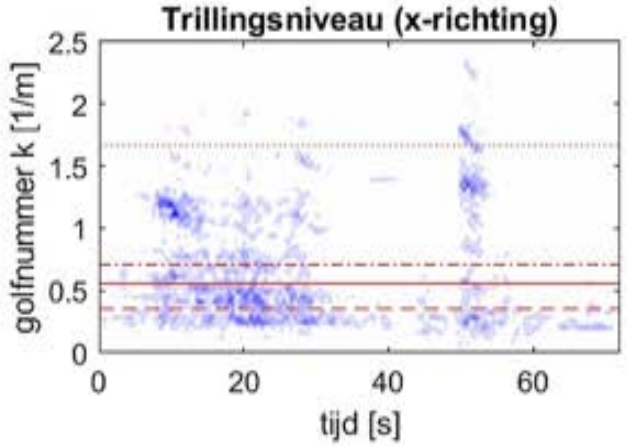
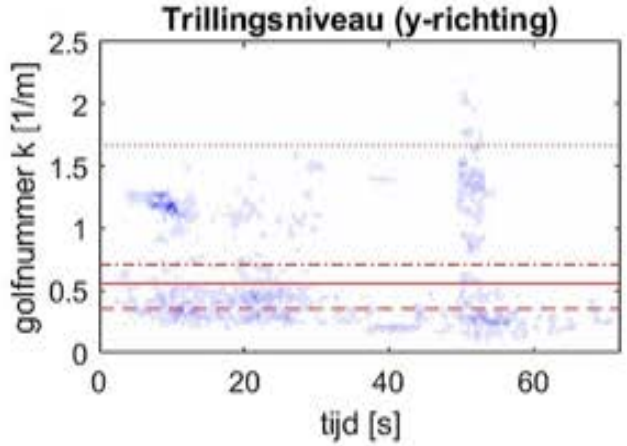
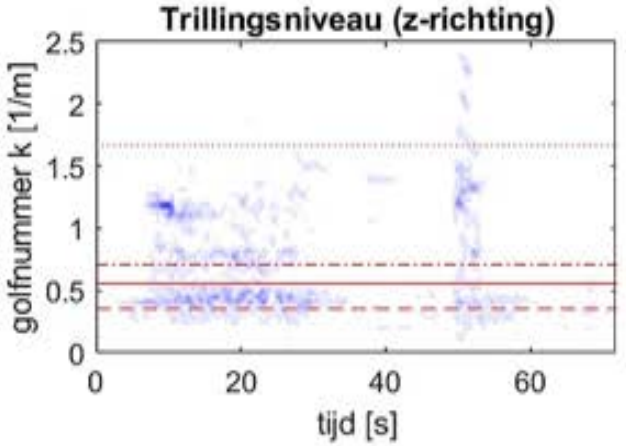
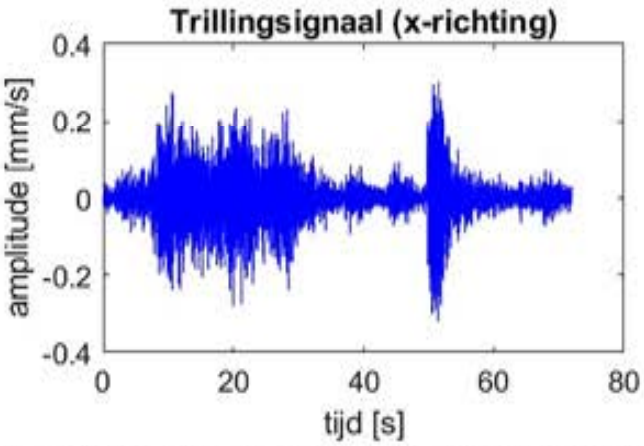
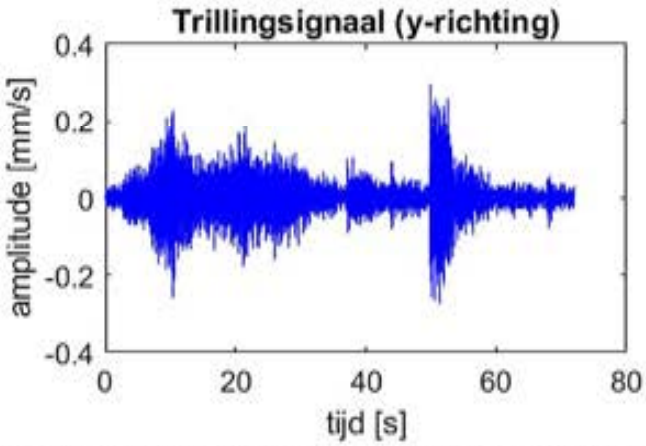
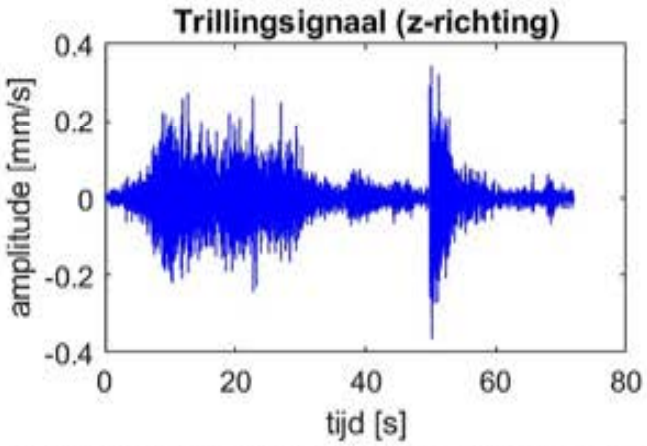
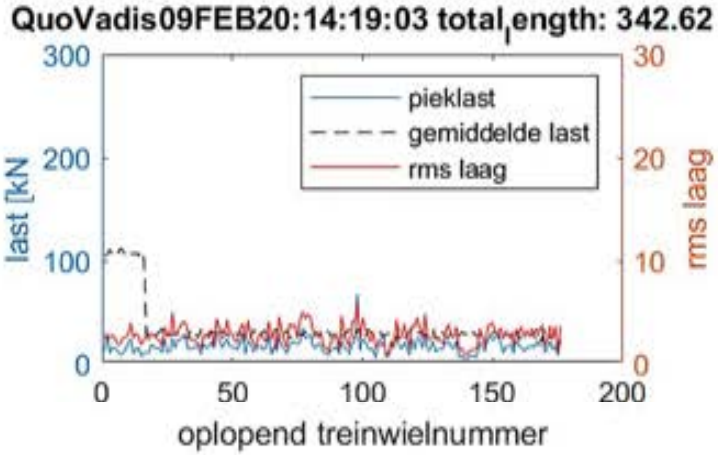
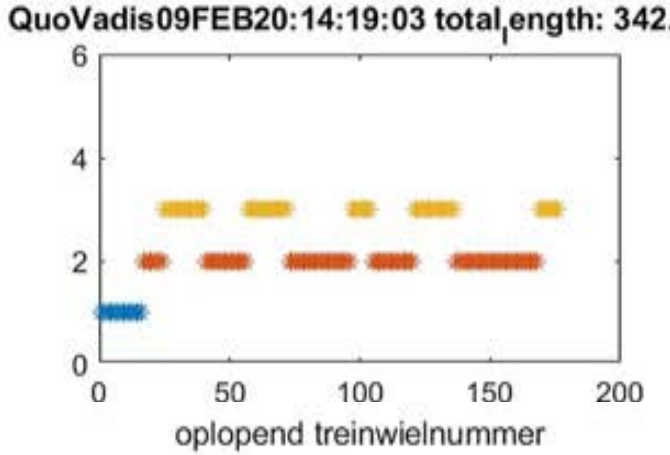
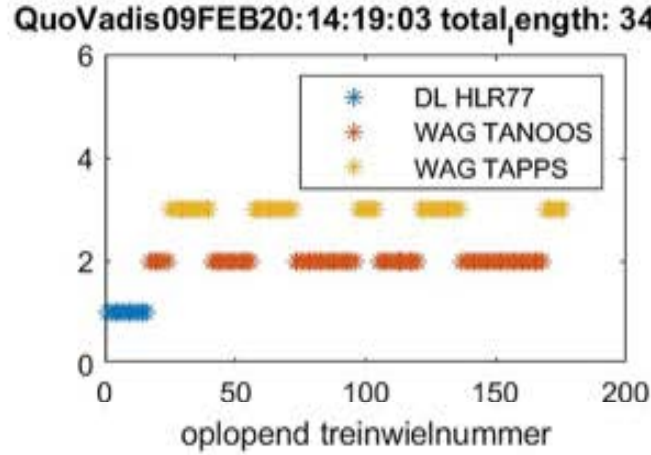












#16.# TriggerDate=2020-02-09# TriggerTime=14:19:12 rijsnelheid:24.4167 m/s rijrichting:N-Z