KAMPA
Innovative railparts

WEBOOST

Fase 2 van de SBIR Infra innovaties spoortrillingen

NASTELBARE ES-LAS

EINDRAPPORTAGE PRAKTIJKPROEF

Status | Definitief
Datum | 7 juli 2025

INHOUDSOPGAVE

Management samenvatting **1**

Management Summary **4**

1 De Nastelbare ES-las en SBIR **7**

1.1 Het concept van de nastelbare ES-las *7*

1.2 Aanleiding SBIR *8*

2 Onderzoek **10**

2.1 Doelen en onderzoeksvragen Praktijkproef *10*

2.2 Aanpak praktijkproef op hoofdlijn *10*

2.3 Overzicht van betrokken partijen *10*

3 Ontwikkeling sensor **12**

3.1 Aanpak *12*

3.2 Uitkomsten *14*

4 Communicatieprotocol **15**

4.1 LWM2M *15*

4.2 Sensorfirmware *15*

4.3 Portal en database *16*

4.4 Dashboard functionaliteit *18*

5 Ontwikkeling algoritmes **20**

5.1 Blinde vering algoritme *20*

5.2 Effect op blinde vering en slagwerking *23*

5.3 Effect op trillingen in omgeving *32*

6 Praktijkproef **33**

6.1 Aanpak *33*

6.2 Uitkomsten *34*

7 Evaluatie resultaten **35**

7.1 Beantwoording van de drie onderzoeksvragen *35*

7.2 Lopende begroting fase 2 ..... *37*

7.3 Herijking Risicodossier *37*

8 Herijking Business case **41**

8.1 Impact resultaten op financiële haalbaarheid *41*

8.2 Herijkte business case 2025 (TCO) *42*

8.3 Herijkte doorkijk potentiële markten en toepassingsgebied 42

9 Conclusies, aanbevelingen en vervolg 44

9.1 Conclusies 44

9.2 Aanbevelingen en vervolg 45

Bibliografie 46

BIJLAGEN 46

Bijlage A. Eindrapportage IBS-trillingsmetingen Nastelbare ES-las, van Cohere Consultants d.d. 21 juni 2025 (toegevoegd als separaat PDF-document) .....

Bijlage B. Installatievoorschrift sensor (toegevoegd als separaat PDF-document) .....

Bijlage C. VERTROUWELIJK - Samenvatting hardware ontwerp sensor (toegevoegd als separaat PDF-document) .....

Bijlage D. VERTROUWELIJK - Eindrapport sensorontwikkeling Elitac Wearables (toegevoegd als separaat PDF-document) .....

Bijlage E. VERTROUWELIJK - Datasheet acceleratiesensor (toegevoegd als separaat PDF-document) .....

Bijlage F. VERTROUWELIJK - Toelichting op de ontwikkelde algoritmes (toegevoegd als separaat PDF-document) .....

Bijlage G. VERTROUWELIJK - Evaluatie begroting fase 2 (toegevoegd als separaat PDF-document) .....

DISCLAIMER 'DALING MEETWAARDES IN MEI 2025'

Tijdens het actualiseren van de meetresultaten eind juni 2025 is bij drie sensoren een daling van de blinde vering en/of slagwerking gedetecteerd in mei 2025. De oorzaak is tot op heden niet achterhaald, waarbij de volgende acties zijn ondernomen:

- Navraag bij PGO-aannemer Strukton. Zij geven aan de betreffende nachten geen werkzaamheden te hebben verricht op de betreffende locaties.
- Visuele inspectie eind juli 2025 door Kampa. Er zijn geen overduidelijke aanpassingen waar te nemen (zoals een nieuwe ES-las).
- Navraag bij ProRail over projectmatige activiteiten aan de bovenbouw. Hier is geen inzicht uit naar voren gekomen dat de daling kan verklaren.

In hoofdstuk 6 is bij de betreffende sensoren de analyse van het opgetreden effect toegevoegd.

MANAGEMENT SAMENVATTING

Als onderdeel van het IBS-programma van ProRail, is in de afgelopen 1,5 jaar een innovatieve oplossing in de praktijk beproefd om spoortrillingen te verminderen: de gemonitorde nastelbare ES-las, die uit 3 componenten bestaat:

- Het beproefde en vrijgegeven product ShimLift
- Een nieuw ontwikkelde trillingssensor
- Algoritmes om onderhoud te voorspellen

Hieronder leest u de samenvatting van de resultaten in 4 blokken: de sensor, het communicatieprotocol, de algoritmes en de praktijkproef.

1. Resultaten sensor

De ontwikkeling van de sensor heeft meer tijd en geld gekost dan vooraf ingeschat. De functionaliteit van de sensor is tijdens de praktijkproef aangetoond: de blinde vering en slagwerking is voor meer dan 25.000 treinpassages bepaald.
Tijdens de praktijkproef zijn 2 van de 5 sensoren gestopt met het versturen van data:

- In één geval is de oorzaak achterhaald: er was geen budget meer om data te versturen. De sensor werkte weer conform specificaties na het aanvullen van het budget.
- In één geval is de oorzaak niet achterhaald: de sensor is achteraf uitgelezen op kantoor, echter is niet te herleiden welke combinatie aan gebeurtenissen heeft geleid tot de error. Positief is dat de sensor na een harde reset weer werkte conform specificaties. Door middel van een te ontwikkelen 'fail-safe' in de firmware wordt het vastlopen van de sensoren in de toekomst voorkomen.

2. Resultaten communicatieprotocol

Het opzetten, implementeren en testen van een protocol met twee-richtingen 'over-the-air' (OTA) functionaliteit was een grotere uitdaging dan vooraf gedacht. Met name zorgen dat het proces zo energiezuinig mogelijk verloopt op de sensor was lastig; uiteindelijk is besloten gebruik te maken van het LWM2M-protocol (Light-Weight Machine to Machine). Een protocol om kleine datapakketjes te versturen tussen sensor en dataportal en vice versa (benodigd om instellingen aan te passen en firmware updates te versturen naar de sensoren).
Het communicatieprotocol is parallel aan de sensorontwikkeling ontwikkeld. Vanuit deze continue ontwikkeling zijn meerdere firmware-updates verstuurd tijdens de praktijkproef. De huidige versie biedt alle gewenste functionaliteit.

3. Resultaten algoritmes

Er zijn 2 algoritmes ontwikkeld: één om de blinde vering en één om de slagwerking te bepalen. De algoritmes zijn zowel op de sensor als in het dataportal te gebruiken. Het voordeel hiervan is dat met een druk op de knop in de dataportal kan worden geschakeld tussen 2 meetstanden:

1. De beoogde stand waarin dagelijks de gemiddelde en maximale slagwerking en blinde vering wordt verstuurd naar de dataportal. Hierbij wordt de berekening op de sensor uitgevoerd.
2. De stand waarbij de data van een volledige passage wordt verstuurd naar de dataportal. Dit vergt meer data- en energieverbruik van de sensor, maar geeft tegelijkertijd meer detailinzicht in de ontwikkeling en het verloop van de blinde vering en slagwerking tijdens een treinpassage.

Een resterende ontwikkelstap is het voorspellend algoritme. Er is nog onvoldoende data op verschillende locaties verzameld om een algoritme te trainen. Op het moment dat er meer data is, wordt afgewogen op basis van welke factoren het algoritme gaat worden getraind.

4. Resultaten praktijkproef

De praktijkproef is waardevol geweest vanwege de vele metingen die zijn gedaan (meer dan 45.000) en de lessen die hieruit zijn geleerd. In januari 2025 zijn bij vijf ES-lassen sensoren geïnstalleerd en registreren de treinpassages; sinds maart 2025 zijn dit er vier nadat 1 sensor is uitgevallen.
Vanaf april 2025 worden passages geregistreerd met de beoogde firmware, waarmee dagelijks de gemiddelde en topwaarde worden verstuurd naar de portal. In meerdere firmware updates is toegewerkt naar de juiste instelling van de algoritmes. Dit op basis van:

- Analyse van volledige passages door ervaringsdeskundigen met blinde vering en slagwerking (Pieter Boon, Paul Kampfraath).
- Validatie van de gemeten waarden aan de hand van video-opnames waarmee de waar te nemen blinde vering is bepaald.

Bij Prinsenbeek (één van de vijf ES-lassen) is de impact van ShimLift op de blinde vering niet gekwantificeerd. Tijdens de installatie ervan werd een breuk in de ES-las aangetroffen. Dit gaf een dusdanig hoog veiligheidsrisico, dat ProRail de las de nacht erna heeft vervangen. Hierdoor was de conditie van de ES-las zonder ShimLift en met ShimLift veranderd. Overigens is het verschil in blinde vering voor en na het vervangen van de ES-las wel terug te zien in de sensormetingen.

Conclusies

De combinatie van sensor met ShimLift werkt in de praktijk goed: als Shimlift wordt geïnstalleerd bij verouderde ES-lassen, nemen de invering, slagwerking en trillingen af (zie **Tabel 1**).

***Tabel 1**. Overzicht impact van installatie en nastellen van ShimLift op blinde vering, slagwerking en trillingen (groene tekst is positief, oranje negatief voordat is nagesteld, rode tekst negatief na 1x nastellen)*

Locatie + spoor	Moment	Datum	Blinde vering (mm)	Slagwerking (m/s^2)	Afname trillingen reizigerstreinen	Afname trillingen goederentreinen
1 - MK	Installeren sensor	10 jan. 2025	4,9	570		
Sensor 7	Installeren ShimLift	13-14 mrt. 2025	- *(geen data)*	- *(geen data)*	2 - 5 dB tussen 15 en 50 Hz	2 - 5 dB tussen 15 en 50 Hz
Geocode 121	Vervangen ES-las	14-15 mrt. 2025	1,4 (-3,5)	310 (-260)	3 - 7 dB tussen 15 en 40 Hz	2 - 4 dB tussen 12 en 30 Hz
2 - DI	Installeren sensor	10 jan. 2025	0,8	300		
Sensor 3	Installeren ShimLift	30-31 jan. 2025	1,1 (+0,3)	500 (+200)	-1 tot -3 dB tussen 12 en 60 Hz	-1 tot -5 dB tussen 12 en 60 Hz
Geocode 123	Nastellen ShimLift	13-14 mrt. 2025	0,8 (-)	370 (-130)	-1 tot +1 dB tussen 5 en 60 Hz	-1 tot +1 dB tussen 5 en 60 Hz
2 - AI	Installeren sensor	10 jan. 2025	1,9	480		
Sensor 5	Installeren ShimLift	30-31 jan. 2025	1,4 (-0,5)	420 (-60)	-1 tot -3 dB tussen 10 en 80 Hz	1 - 3 dB tussen 10 en 80 Hz
Geocode 123	Nastellen ShimLift	13-14 mrt. 2025	0,4 (-1,5)	90 (-330)	-1 tot +1 dB tussen 5 en 60 Hz	-1 tot +1 dB tussen 5 en 60 Hz
3 - DH	Installeren sensor	10 jan. 2025	2,0	500		
Sensor 8	Installeren ShimLift deel 1	13-14 mrt. 2025	1,6 (-0,4)	540 (+40)	-1 tot -5 dB tussen 8 en 40 Hz	-1 tot -2 dB tussen 5 en 50 Hz
Geocode 123	Installeren ShimLift deel 2	18-19 mrt. 2025	2,2 (+0,6)	550 (+10)	-1 tot +1 dB tussen 5 en 80 Hz	-1 tot +1 dB tussen 5 en 80 Hz
	Nastellen ShimLift	24-25 mrt. 2025	1,1 (-0.9)	300 (-250)	0 tot 2 dB tussen 10 en 50 Hz	-1 tot +1 dB tussen 10 en 50 Hz

In dit overzicht valt het volgende op:

1. Het effect van het installeren en nastellen van ShimLift treedt vooral op bij hogere trillingsfrequenties (vaak tussen de 15 en 50 Hz, soms iets hoger of lager).

2. Alleen bij locatie 1 is sprake van een goed voelbaar effect. Hier is de invering ook het sterkst afgenomen, voor alle andere locaties was maar zeer beperkt sprake van invering voorafgaand aan het plaatsen van ShimLift.
3. Bij de andere locaties waar de invering al laag was(minder dan 2mm), is geen sterke toe- of afname van de trillingen waargenomen na installatie van ShimLift. Soms nemen de trillingen iets toe, soms iets af.
4. Globaal geldt: als de invering afneemt, nemen de trillingen bij 10 tot 30 Hz af, als de slagwerking afneemt, nemen de trillingen bij hogere frequenties (30 tot 60 Hz) af. Hoe sterker de afname van de invering of slagwerking, hoe groter de afname van de trillingen.

Daarnaast biedt het gebruik van de sensor en ShimLift de volgende voordelen:

- Inzicht en controle over de staat van de asset (ES-las), en in het voorkomen en/of verergeren van trillingshinder.
- Het installeren en nastellen van zowel de sensor als ShimLift is veilig, praktisch en efficiënt uit te voeren. Na installatie hoeft de PGO-aannemer of assetmanager niet meer de baan in om blinde vering waar te nemen, terwijl er wel dagelijks inzicht in is i.p.v. slechts 1x per half jaar nadat de meettrein het spoor heeft ingemeten.
- De sensor geeft een signaal als een ingestelde grenswaarde wordt overschreden, waardoor een PGO-aannemer tijdig maatregelen kan treffen. Onderhoud krijgt hierdoor het beoogde preventieve in plaats van het actuele correctieve karakter.

Aanbevelingen

Het belangrijkste doel is meer zicht krijgen op het lange termijn effect van ShimLift op de conditie (en degradatie) van de ES-las en bijbehorende ontwikkeling in blinde vering en slagwerking. De praktijk moet uitwijzen hoe lang deze stabiel blijven.

1. Data blijven verzamelen met de geïnstalleerde sensoren, om het voorspellende algoritme verder te ontwikkelen. Hoe meer data, hoe betrouwbaarder het voorspellende effect van het algoritme.
2. De sensor laten kalibreren door een externe partij zoals Eurolab of TUV.
3. Sensoren installeren bij andere ES-lassen die zijn uitgerust met ShimLift, om te achterhalen wat het effect van ShimLift op de lange termijn is.
4. Op basis van meer data bepalen bij welk niveau van blinde vering en slagwerking de trillingen in de omgeving onaanvaardbaar worden.
5. Een functioneel dashboard ontwikkelen om een beter en aantrekkelijker beeld van de commerciële toepassing te presenteren aan potentiële gebruikers.
6. Sensor op laten nemen in de Rail Infra Catalogus van ProRail, waarvoor onder andere CE-certificering nodig is.
7. De sensor en ShimLift doorontwikkelen om toepassingsmogelijkheden te verbreden, waaronder bij andere railassets, zoals bij puntstukken in wissels en baanovergangen.
8. Met ProRail eventuele aanpassingen in PGO-contracten bespreken en bepalen, afhankelijk van op welke termijn de sensor een vrijgegeven product is (Aanbeveling 6).

MANAGEMENT SUMMARY

As part of ProRail's IBS programme, an innovative solution to reduce rail vibrations has been field-tested over the past 1.5 years: **the monitored adjustable ES weld**, which consists of three components:

- The proven and released product ShimLift
- A newly developed vibration sensor
- Algorithms to predict maintenance

Please find below a summary of the results, divided into the following four categories: the sensor, the communication protocol, the algorithms and the field trial.

1. Sensor results

The development of the sensor took more time and costed more than initially estimated. The functionality of the sensor was demonstrated during the practical test: the blind suspension and stroke effect was determined for more than 45.000 train passages.
During the field trial, 2 of the 5 sensors stopped sending data:

- In one case, the cause was found out: there was no more budget 4os end data. The sensor worked again according to specifications after budget replenishment.
- In one case, the cause has not been identified: the sensor was read out in the office afterwards; however, it was not possible to trace which combination of events led to the error. Positively, after a hard reset, the sensor worked as per specifications again. A fail-safe to be developed in the firmware will prevent sensor crashes in the future.

2. Protocol for communicating results

The process of establishing, implementing and testing a protocol with two-way over-the-air (OTA) functionality has proven to be more challenging than initially anticipated. Ensuring the energy efficiency of the process on the sensor posed a particular challenge; the decision was ultimately taken to utilise the Light-Weight Machine to Machine (LWM2M) protocol. The protocol is intended to facilitate the transmission of small data packets between the sensor and the data portal, and vice versa. This is necessary for adjusting settings and sending firmware updates to the sensors. The communication protocol was developed in parallel with sensor development. As a result of this ongoing development, a number of firmware updates were issued during the field trial. The current version provides all the functionality required.

3. Algorithms for results

Two algorithms were developed: one to determine the blind suspension and one to determine the stroke operation. The algorithms can be used both on the sensor and in the data portal. The key benefit of this system is that it allows users to seamlessly switch between two measurement modes within the data portal using a simple one-button interface.

1. The target mode is the mode in which daily average and maximum stroke operation and blind suspension is sent to the data portal. In this instance, the calculation is performed on the sensor.
2. This is the method by which the data from a complete passage is transmitted to the data portal. This approach necessitates increased data and energy consumption from the sensor. However, it simultaneously delivers more comprehensive insight into the development and progression of blind suspension and stroke action during a train passage.

The next step in the development process is the creation of a predictive algorithm. At this time, insufficient data has been collected at various locations to train an algorithm. The moment there is more data, it will be weighed up based on which factors the algorithm will be trained.

4. Results of the field trial

The field trial has proved valuable due to the numerous measurements taken (more than 45,000) and lessons learned. In January 2025, sensors were installed at five ES splices and record train passages; since March 2025 four remain installed, after one sensor failed.
From April 2025, passages will be recorded with the targeted firmware, which will send the average and top value to the portal daily. Several firmware updates have worked towards setting the algorithms correctly. This is based on:

- Comprehensive analysis of complete passages by experienced professionals specialising in blind suspension and stroke operation (Pieter Boon, Paul Kampfraath).
- The measured values were validated using video recordings to determine the observable blind suspension.

At Prinsenbeek (one of the five ES welds), the impact of ShimLift on blind suspension was not measured. During the installation process, a fracture was identified in the ES weld. This posed such a high safety risk that ProRail was decided to replace the weld the following night. This had a significant impact on the condition of the ES weld, both in the absence and presence of ShimLift. Incidentally, the difference in blind suspension before and after replacing the ES weld was evident in the sensor measurements.

Conclusions

In practice, the combination of sensor with ShimLift has proven to be an effective solution. When ShimLift is installed on ageing ES welds, there is a notable decrease in inversion, impact and vibration (see Table 3).

Table 3. *Summary of impact of installation and readjustment of ShimLift on blind suspension, stroke action and vibration (green text is positive, orange negative before readjustment, red text negative after 1x readjustment)*

Location + track	Moment	Date	Inversion (mm)	Impact/striking (m/s^2)	Decrease in vibrations Passenger trains	Decrease in vibrations Freight trains
1 - MK	Installation of sensor	10 jan. 2025	4,9	570		
Sensor 7	Installation ShimLift	13-14 mrt. 2025	- *(geen data)*	- *(geen data)*	2 - 5 dB between 15 and 50 Hz	2 - 5 dB between 15 and 50 Hz
Geocode 121	Replacement of ES-las	14-15 mrt. 2025	1,4 (-3,5)	310 (-260)	3 - 7 dB between 15 and 40 Hz	2 - 4 dB between 12 and 30 Hz
2 - DI	Installation of sensor	10 jan. 2025	0,8	300		
Sensor 3	Installation ShimLift	30-31 jan. 2025	1,1 (+0,3)	500 (+200)	-1 to -3 dB between 12 and 60 Hz	-1 to -5 dB between 12 and 60 Hz
Geocode 123	Adjust ShimLift	13-14 mrt. 2025	0,8 (-)	370 (-130)	-1 tot +1 dB between 5 and 60 Hz	-1 to +1 dB between 5 and 60 Hz
2 - AI	Installation of sensor	10 jan. 2025	1,9	480		
Sensor 5	Installation ShimLift	30-31 jan. 2025	1,4 (-0,5)	420 (-60)	-1 to -3 dB between 10 and 80 Hz	1 - 3 dB between 10 and 80 Hz
Geocode 123	Adjust ShimLift	13-14 mrt. 2025	0,4 (-1,5)	90 (-330)	-1 tot +1 dB between 5 and 60 Hz	-1 to +1 dB between 5 and 60 Hz
3 - DH	Installation of sensor	10 jan. 2025	2,0	500		
Sensor 8	Installation ShimLift - part 1	13-14 mrt. 2025	1,6 (-0,4)	540 (+40)	-1 to -5 dB between 8 and 40 Hz	-1 to -2 dB between 5 and 50 Hz
Geocode 123	Installation ShimLift - part 2	18-19 mrt. 2025	2,2 (+0,6)	550 (+10)	-1 to +1 dB between 5 and 80 Hz	-1 to +1 dB between 5 and 80 Hz
	Adjust ShimLift	24-25 mrt. 2025	1,1 (-0.9)	300 (-250)	0 to 2 dB between 10 and 50 Hz	-1 to +1 dB between 10 and 50 Hz

The following aspects are of particular significance within this overview:

1. The effect of installing and adjusting ShimLift occurs mainly at higher vibration frequencies (often between 15 and 50 Hz, sometimes slightly higher or lower).
2. Only at location 1 is there a well felt effect. Here the inverting also decreased the most, for all other locations there was only very limited inverting prior to the installation of ShimLift.
3. At the other locations where the inversion was already low (less than 2mm), no strong increase or decrease in vibration was observed after installation of ShimLift. Sometimes the vibrations increase slightly, sometimes decrease slightly.
4. Globally, if the inversion decreases, the vibrations decrease at 10 to 30 Hz, if the stroke action decreases, the vibrations decrease at higher frequencies (30 to 60 Hz). The stronger the decrease in inversion or percussion, the greater the decrease in vibration.

In addition, using the sensor and ShimLift offers the following benefits:

- Insight and control over the state of the asset (ES weld), and in preventing and/or exacerbating vibration problems.
- The installation and readjustment of both the sensor and ShimLift can be carried out safely, practically and efficiently. After installation, the PBM contractor or asset manager no longer needs to go into the track to observe blind suspension, while having daily insight into it instead of only once every six months after the measurement train has measured the track.
- The sensor signals when a set limit is exceeded, allowing a PBM contractor to take timely action. This gives maintenance its intended preventive rather than current corrective character.

Recommendations

The main objective is to gain more insight into the long-term effect of ShimLift on the condition (and degradation) of the ES weld and associated development in blind suspension and stroke action. Practice should show how long these remain stable.

1. Continue to collect data with the installed sensors, to further develop the predictive algorithm. The more data, the more reliable the predictive effect of the algorithm.
2. Have the sensor calibrated by an external party such as Eurolab or TUV.
3. Install sensors at other ES welds equipped with ShimLift to find out the long-term effect of ShimLift.
4. Based on more data, determine at what level of blind suspension and stroke action vibration in the environment becomes unacceptable.
5. Develop a functional dashboard to present a better and more attractive picture of the commercial application to potential users.
6. Have sensor included in ProRail's Rail Infra Catalogue, which, among other things, requires CE certification.
7. Further develop the sensor and ShimLift to broaden application possibilities, including at other rail assets, such as at points in points and track crossings.
8. Discuss and determine with ProRail possible adjustments in PBM contracts, depending on when the sensor will be a released product (Recommendation 6).

1 DE NASTELBARE ES-LAS EN SBIR

1.1 Het concept van de nastelbare ES-las

Oorsprong

Door slagwerking van de wielen van treinen treedt plaatselijk verzakking en verkruimeling van de ballast onder de dwarsliggers van het spoor op. Hierdoor ontstaat ruimte tussen de dwarsliggers en de ballast, waardoor de dwarsliggers gaan zweven. Dit fenomeen staat bekend als *blinde vering*.

Blinde vering leidt tot beweging en slagwerking van de dwarsliggers als er een trein overheen rijdt. Dit is met name het geval op locaties waarbij sprake is van stijfheidsverschillen in het ballastbed of discontinuïteiten in het spoor, zoals bij elektrische scheidingslassen (ES-lassen). Bij ES-lassen ontstaat een zichzelf versterkend effect: de trillingen leiden tot degradatie van de ES-lassen, wat weer tot degeneratie van het ballastbed en extra toename van trillingen leidt (**Figuur *1***). Trillingen bij ES-lassen staan bekend als één van de grootste bronnen van klachten (zie Bijlage 11 van de aanbestedingsdocumentatie).

Figuur 1. Vicieuze cirkel van toenemende blinde vering en daarmee degeneratie van ES-lassen

Beoogde effect

Wij - Kampa en We-Boost - hebben een oplossing waarmee we blinde vering ter plaatse van ES-lassen blijvend voorkomen en zo trillingen bij de bron aanpakken. Dit doen we door 3 oplossingen te combineren in een nieuw product: (1) een draadloze IoT sensor die de versnelling van de spoorstaaf bij een treinpassage meet, (2) slimme algoritmes die de blinde vering bepalen op basis van de versnellingsmeting en onderhoudsbehoefte voorspellen, en (3) toepassen van ShimLifts.

- *Shimlift* is ontwikkeld door Kampa en bestaat uit twee over elkaar schuivende kunststof wiggen die onder elke ES-las geplaatst worden. De hoogte is instelbaar door de wiggen over elkaar te schuiven (**Figuur *2***).
- *De draadloze sensor* meet met een nauwkeurigheid van minimaal 1 mm de verticale verplaatsingen tijdens een treinpassage[1].
- *De tot nu toe ontwikkelde algoritmes* stellen op basis van de sensordata de blinde vering en slagwerking vast. Met behulp van Machine Learning gaat worden voorspeld in hoeverre en wanneer onderhoud nodig is. Op basis hiervan wordt de PGO-aannemer gealarmeerd, waarna de PGO-aannemer ShimLift bijstelt voordat schade aan de ES-las optreedt en dus hinder in de omgeving optreedt.

[1] De resolutie (stapgrootte) van de sensor is heel groot, in de orde van 0.01 micrometer. De nauwkeurigheid is binnen deze SBIR beperkt getoetst, uitsluitend met een high speed camera die een nauwkeurigheid van 1 mm heeft. Daarom kan hier geen hogere nauwkeurigheid worden benoemd. Aanbeveling is om de blinde vering in de toekomst vaker te meten, en eventueel het algoritme hierop bij te stellen.

Figuur 2. Visuele uitleg van de werking van ShimLift: (links) De rails worden met een krik op de juiste hoogte gezet. (rechts) De wiggen worden zo ingesteld dat ze de ruimte tussen de rail en de dwarsligger opvullen. Nadat de krik is verwijderd blijven de rails in de beoogde positie liggen.

Praktijkervaring ShimLift
Tot op heden zijn er in Nederland en Duitsland op ongeveer 100 locaties in het spoor ShimLifts geïnstalleerd. De ervaringen zijn positief: na installatie is in vrijwel alle situaties na 1 á 2 keer nastellen geen blinde vering meer waar te nemen. De ShimLift is in Nederland een door ProRail vrijgegeven product.

1.2 Aanleiding SBIR

Trillingshinder door spoorvervoer is een actueel probleem. Maar het ontstaan van trillingen én het effect van maatregelen zijn moeilijk te voorspellen. In opdracht van het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat werkt ProRail daarom aan de Innovatieagenda Bronaanpak Spoortrillingen *(vanaf hier: IBS)*. Deze innovatieagenda moet een divers palet aan maatregelen opleveren om spoortrillingen te verminderen. Dit is nodig, want het vervoer per spoor neemt toe en tegelijkertijd wordt vaker bij het spoor gebouwd. Dit leidt tot een toename van hinder door spoortrillingen.

Als onderdeel van de IBS is ProRail in 2022 gestart met een innovatie-competitie (Small Business Innovation Research of SBIR). Daarin wordt gezocht naar slimme maatregelen aan de infrastructuur die spoortrillingen kunnen verminderen. In fase 1 hebben ondernemers de kans gehad om hun ideeën uit te werken in een business case en proefplan. De 5 meest kansrijke innovaties zijn in fase 2 getest in de praktijk. De resultaten van deze praktijkproef (fase 2) van de Nastelbare ES-Las presenteren we in onderliggende eindrapportage.

Doel van de praktijkproef
Eind 2023 is fase 2 gestart. De 5 innovaties hebben onder andere voorbereidende tests uitgevoerd, zoals laboratoriumproeven en het uitproberen van de bouwmethode. Daarna is in de praktijk gekeken of - en in welke mate - deze ideeën bijdragen aan vermindering van spoortrillingen. ProRail heeft de trillingen voor en na het aanbrengen van de mogelijke oplossingen laten meten door een onafhankelijke derde partij, om zo het effect goed in beeld te brengen.

In fase 2 zijn de eerste versies van de sensor en de algoritmes ontwikkeld. Tevens is het trillingsreducerende effect van de gemonitorde ES-las - die met Shimlift wordt nagesteld – gevalideerd.

Inhoud van dit rapport
In onderliggend rapport worden de resultaten van de praktijkproef gepresenteerd. Hierbij gaan we in op:

- De in fase 1 opgestelde onderzoeksvragen en aanpak (hoofdstuk 2).
- De ontwikkeling van de eerste versie van een nieuwe trillingssensor (hoofdstuk 3).
- De ontwikkeling van het communicatieprotocol (hoofdstuk 4).
- De ontwikkeling van de eerste versie van de algoritmes om uiteindelijk het onderhoud te gaan voorspellen (hoofdstuk 5).
- De aanpak en resultaten van de praktijkproef, waarbij 5 ES-lassen in operationeel spoor zijn uitgerust met de sensor en uiteindelijk 4 met ShimLift (hoofdstuk 6).
- De resultaten van de voorproef en praktijkproef zijn samengebracht in de beantwoording van de onderzoeksvragen (hoofdstuk 7).

Op basis van de resultaten zijn de business case, het risicodossier en de marktpotentie bijgewerkt (hoofdstuk 8). Tenslotte zijn de conclusies, aanbevelingen en vervolgstappen samengevat (hoofdstuk 9).

2 ONDERZOEK

In dit hoofdstuk is het onderzoeksvoorstel samengevat zoals oorspronkelijk uitgewerkt in [1]. Hiervoor hebben wij vier onderzoeksvragen gedefinieerd (§2.1). In §2.2 is de testaanpak uiteengezet, waarna in §2.3 de betrokken partijen in het onderzoek zijn opgesomd.

2.1 Doelen en onderzoeksvragen Praktijkproef

Het hoofddoel van de praktijkproef was aantonen dat een nieuw ontwikkelde sensor en bijbehorende algoritmes trillingen dusdanig registreren, dat liggingsonderhoud aan een ES-Las kan plaatsvinden voordat de onderhoudswaarde (OW) of interventiewaarde (IW)[2] wordt overschreden. Het onderhoud aan de ES-las is binnen circa 2 maanden in te plannen en efficiënt uit te voeren doordat deze is uitgerust met de ShimLift.

Hiervoor zijn vier onderzoeksvragen gedefinieerd:

1. *Trillingsreducerend effect: Wat is het effect op de trillingen van een monitorbare (en daardoor nauwkeurig instelbare en nastelbare) Shimlift bij ES-lassen?*
2. *Onderhoudsregime: Hoe vaak moeten ES-lassen met Shimlift worden nagesteld en wat is de waarschuwingswaarde wanneer nastellen nodig is?*
3. *Toepassingsgebied: In welke situaties is de gemonitorde Shimlift een goede oplossing om de trillingshinder in de omgeving te verminderen?*
4. *Een zo laag en dus gunstig mogelijke LCC: Wat is het effect van de gemonitorde Shimlift op de levensduur en onderhoudskosten van de ES-las en dwarsliggers?*

2.2 Aanpak praktijkproef op hoofdlijn

Onze test- en meetaanpak bestond uit 2 parallelle trajecten bestaan:

1) Ontwikkeling:
    a. Het ontwikkelen van de nieuwe sensor (hoofdstuk 3).
    b. Het ontwikkelen van het communicatieprotocol (hoofdstuk 4).
    c. Het ontwikkelen van de nieuwe algoritmes (hoofdstuk 5).
2) Het testen van de gemonitorde Shimlift op 5 proeflocaties en daarmee beantwoorden van de onderzoeksvragen (hoofdstuk 6).

2.3 Overzicht van betrokken partijen

- We-Boost: penvoerder, projectcoördinatie, methodologische aanpak, ontwikkeling van de algoritmes, het communicatieprotocol, het dashboard en de IT-dataomgeving. Tevens de coördinatie van de ontwikkeling van de nieuwe sensor met *Elitac Wearables*, opstellen meetaanpak en afstemming en begeleiding ervan met de meetpartij.
- Kampa: Levering, installatie en nastellen van ShimLift + interactie met de producent van Shimlift.
- Elitac Wearables: ontwikkelen van de nieuwe trillingsensor, zowel de hardware als de firmware om data te versturen.
- ASSET Rail: uitvoerende partij voor de uitvoering van de proef.
    - Coördinatie buitendienststellingen en veiligheidsorganisatie.
    - Veiligheidspersoneel en monteurs.
    - Monitoring spoorligging en eventueel benodigd correctief herstel.

[2] ProRail. (21 juli 2021). *Instandhoudingsspecificatie Spoor, IHS00001-1 versie 002, tabel 4.4.2*

- ProRail IBS-team: Coördinatie afstemming TVG en praktijkproef met stakeholders in de ProRail-organisatie.
- ProRail afdeling Digital Assets Lab: inbrengen voorwaarden aan de sensor en de dataverzameling, in eerste instantie om de Toestemming Voor Gebruik (TVG) voor de praktijkproef te verkrijgen, anderzijds met het oog van vrijgave van de sensor na de praktijkproef.

3 ONTWIKKELING SENSOR

3.1 Aanpak

Vanaf de start van fase 2 heeft Elitac Wearables in nauwe samenwerking met We-Boost en Kampa de sensor ontwikkeld. De aanpak bestaat uit 2 componenten:

1. Een Plan van Eisen (PvE).
2. Het ontwikkelproces.

In het opleverrapport van Elitac Wearables zijn meer details te vinden over alle onderwerpen in dit hoofdstuk (**Bijlage D**); deze informatie is vertrouwelijk vanwege de commerciële gevoeligheid ervan. De informatie is eigendom van We-Boost en Kampa. Bij interesse voor meer inhoudelijke toelichting staan zij u graag te woord.

1. Plan van Eisen

De basis voor de ontwikkeling is het Plan van Eisen, dat door We-Boost en Kampa is opgesteld en regelmatig met Elitac is doorgenomen. Het PvE is tot stand gekomen vanuit:

- Eisen vanuit gebruikswensen, waaronder betrouwbaarheid en gebruiksinstellingen
- Eisen vanuit ProRail in het kader van de TVG, opgehaald bij het Digital Assets Lab
- Eisen vanuit tijdelijke functionaliteiten om de benodigde tests uit te voeren

In het PvE is onderscheid gemaakt tussen:

- Systeem eisen, zoals kosten en energetische levensduur.
- Technische eisen, zoals hardware functionaliteiten, instellingen en de vereisten aan de firmware vanuit het communicatieprotocol.

In het eindrapport van Elitac Wearables is het gehele Plan van Eisen in hoofdstuk 1 opgenomen (**Bijlage D,** vertrouwelijke status).

2. Ontwikkelproces

De sensor is in drie stappen ontwikkeld:

1. Ontwikkeling Proof of concept (PoC), getest op 4 april 2024.
2. Ontwikkeling Prototype (hardware) n.a.v. de PoC-test (getest in de praktijkproef vanaf januari 2025).
3. Evaluatie en optimalisatie prototype gedurende praktijkproef.

<u>1. Proof-of-Concept</u>

Doel van deze stap is het bepalen van de meest geschikte acceleratiesensor. Dit is de belangrijkste hardwarecomponent, aangezien deze sensor de versnelling meet, op basis waarvan de blinde vering en slagwerking worden berekend. De gemeten versnelling moet dus betrouwbaar en voldoende nauwkeurig zijn.

Tijdens de test op 4 april 2024 zijn 4 sensoren getest (zie **Figuur 3** en **Figuur 4**) bij de ES-las in het zuidelijke spoor van de Kapelweg en de Huisvennen te Boxtel (kilometrage 33.672, geocode 125). Het doel was ondervinden welke sensor de beste prijs-kwaliteit verhouding biedt:

- Kwaliteit: voldoende precisie om bij hoge G-krachten voldoende gedetailleerd versnellingspatroon te registreren en doorsturen.
- Prijs: passend binnen de beoogde 'bill-of-materials' waar in de business case rekening mee is gehouden.

De meest geschikte bleek Kionix KX134-1211. Meer details over de sensor zijn opgenomen in §3.2.

Figuur 3. Testopstelling tijdens PoC-test op 4 april 2024. Op de dichtstbijzijnde dwarsligger is de hardware opstelling in **Figuur 4** bevestigd, om 4 acceleratiesensoren te testen. Met een bedrade verbinding worden de resultaten verstuurd naar een laptop van het team dat onder de tent zit (i.v.m. slecht weer).

Figuur 4. Hardware opstelling zoals getest tijdens de PoC-test (4 april 2024). Links en in het midden zijn de 4 sensoren zichtbaar, met rechtsboven de PCB om data te verzamelen en versturen naar de laptop. Rechtsonder in het paars de batterij om de PCB van energie te voorzien.

2. Prototype

Doel van deze stap is het ontwikkelen van een prototype dat tijdens de praktijkproef in operationeel spoor wordt getest. Hiertoe is - op basis van de PoC - het hardware-ontwerp verder ontwikkeld:

- Het elektronica ontwerp, met als basis de systeemarchitectuur, selectie van de overige componenten (waaronder de batterij, antenne en geheugencomponenten) en de aansturing ervan door de PCBA.
- De fysieke vormgeving, waaronder de behuizing, de interne opbouw en de bevestiging op de dwarsligger.

Details over het hardware ontwerp dat is beproefd in de praktijk, zijn opgenomen in §3.2.
De aanpak en resultaten van de praktijkproef – gestart in januari 2025 – staan in hoofdstuk 6.

3. Evaluatie en optimalisatie prototype

Tijdens de installatie en het nastellen van ShimLift de staat van de sensoren fysiek geïnspecteerd. Daarnaast zijn tijdens de praktijkproef 2 sensoren tussentijds uit het spoor gehaald en fysiek geïnspecteerd:

- De sensor die in het zuidelijke spoor bij locatie Tilburg was geplaatst.
- De sensor die in het noordelijke spoor bij Dorst was geplaatst (vervangen door een back-up sensor).

De uitkomsten van de inspecties (zie hoofdstuk 6 'Praktijkproef') waren positief; er was geen significante schade waarneembaar. Vanuit dat oogpunt zijn aanpassingen van de hardware niet noodzakelijk. Naast de fysieke inspectie is ook het functioneren van de elektronica meermaals geëvalueerd. Hiervoor is gekeken naar opvallende waardes in de dataportal en naar storingen die zijn opgetreden.

3.2 Uitkomsten

Het resultaat van de proeven is een 1e versie van de sensor. Vanwege de commerciële gevoeligheid van de informatie over het hardware ontwerp van de sensor, is deze informatie als vertrouwelijk bestempeld. De informatie is in 2 vertrouwelijke bijlages opgenomen: in **bijlage D** staat de detailinformatie, in **bijlage C** een toelichting op de belangrijkste onderdelen van het ontwerp:

- De componenten die het gehele hardware ontwerp vormen.
- De kenmerken van de acceleratiesensor.
- De batterij inclusief theoretisch levensduurberekening.
- De behuizing en hoe het hardware ontwerp hierin wordt geassembleerd.
- De bevestiging van de behuizing op de dwarsligger.

Aanbevelingen doorontwikkeling sensor na de praktijkproef

- Behuizing: afwegen moment om over te stappen van de standaard commerciële behuizing naar een custom behuizing. Het 2e wordt goedkoper bij productie van meer dan 500 tot 1.000 sensoren. Ook biedt dit de ruimte voor optimalisatie van de batterijkeuze (zie volgende aanbeveling).
- Batterij: monitoren van verbruik om de benodigde capaciteit en hieruit voortvloeiende vormfactor (in relatie tot besluitvorming over custom behuizing) te heroverwegen.
- Antenne: de huidige antenne heeft een beperkt bereik van een paar honderd meter tot een zendmast. Dit is toereikend in Nederland vanwege de hoge dekkingsgraad van zendmasten. Bij gebruik van de sensoren in het buitenland moet – op basis van de dekkingsgraad van zendmasten in het betreffende land - overwogen worden een betere antenne te gebruiken (met als nadeel het herzien van het hardware ontwerp en mogelijke nieuw certificeringstraject).
- Nadere kalibratie: sommige sensoren geven afwijkende, onverwachte resultaten, hoewel er in principe geen productieverschillen zijn te verwachten. Advies is daarom een uitgebreide kalibratie te doen met (1) vergelijking van alle sensoren bij verschillende meetfrequenties en (2) vergelijking van deze sensoren met andere, gekalibreerde sensoren in een geconditioneerde omgeving.
- CE-certificering: Voorwaarde voor verkoop van de sensor in Europa is CE-certificering. Elitac Wearables heeft een overzicht gemaakt van mogelijke vervolgstappen om die te verkrijgen. Na de praktijkproef wordt de te volgen strategie en bijbehorend tijdspad bepaald.

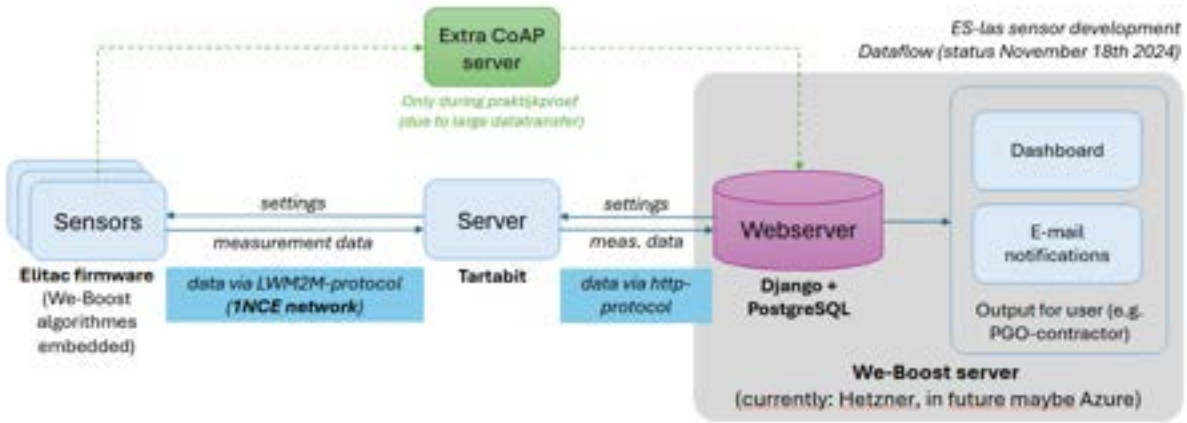
4 COMMUNICATIEPROTOCOL

Parallel aan het hardware ontwerp zijn het communicatieprotocol (gebaseerd op LWM2M, §4.1), de firmware (§4.2) en de dataportal en bijbehorend dashboard (§4.3) ontwikkeld.

4.1 LWM2M

Communicatie met de sensor verloopt via het Lightweight Machine-to-Machine (LWM2M) protocol. Dit protocol is gebaseerd op het Constrained Application Protocol (CoAP). Hier is voor gekozen vanwege de lage overhead van berichten, terwijl er wel nuttige standaarden zijn gedefinieerd voor het uitwisselen van informatie, configuratie en firmware. Hierdoor is het een uitermate geschikt protocol voor communicatie met de sensor, waarbij batterijlevensduur van groot belang is. Tartabit is gekozen als IoT broker. De servers van Tartabit implementeren het LWM2M protocol, en bieden een API en gebruikersportaal aan om via LWM2M met de sensoren te communiceren. De sensor kan ook communiceren naar de servers van Tartabit, die vervolgens via triggers weer de webapplicatie kunnen aanroepen.

LWM2M is ontworpen om kleine, lichtgewicht ('lightweight') berichten te versturen. De volledige ruwe data van een meting is echter een vrij groot bericht. Daarom is een 'omweg' gebouwd om het mogelijk te maken de volledige ruwe meetdata te versturen, in de vorm van een aparte CoAP server. Wanneer een ruwe meting verstuurd moet worden, stuurt de sensor eerst de ruwe meting naar de CoAP server onder een unieke naam. Vervolgens stuurt de sensor - via LWM2M – een melding dat er data klaar staat naar Tartabit, die de melding doorstuurt naar de webserver. Op basis van de melding vraagt de webserver de ruwe data op bij de CoAP server. Op deze manier kan alsnog de ruwe data naar de webserver verstuurd worden, zonder dit over het hiervoor ongeschikte LWM2M protocol te hoeven sturen.



Figuur 5. Architectuur van het communicatieprotocol

4.2 Sensorfirmware

Startpunt van het communicatieprotocol is de firmware die op de sensor draait. De firmware zorgt er onder andere voor dat (1) de sensor metingen kan doen, (2) algoritmes kan draaien om de meetwaardes te analyseren en (3) gegevens kan vesturen naar de server.

De firmware moet kunnen 'praten' met de dataportal, zodat bidirectionele communicatie mogelijk is:

- Van sensor naar dataportal om data te versturen, waaronder de meetresultaten en andere statusinformatie van de sensor.
- Van dataportal naar sensor om instellingen aan te passen en firmware updates te versturen.

Gebruik van prompts
Er zijn meerdere 'prompts' ontwikkeld voor de communicatie tussen sensor en dataportal. Het communicatieprotocol is zo opgesteld dat voor een nieuwe toepassing relatief eenvoudig een nieuw prompt kan worden geschreven, getest en geïmplementeerd. Een aantal van de huidige prompts:

- Verzenden van instelling 'blinde vering per passage' vs. 'ruwe data volledige treinpassage'
- Verzenden van een firmware update

Toekomstige prompts zijn onder andere het opvragen van de batterijstatus en de temperatuur.

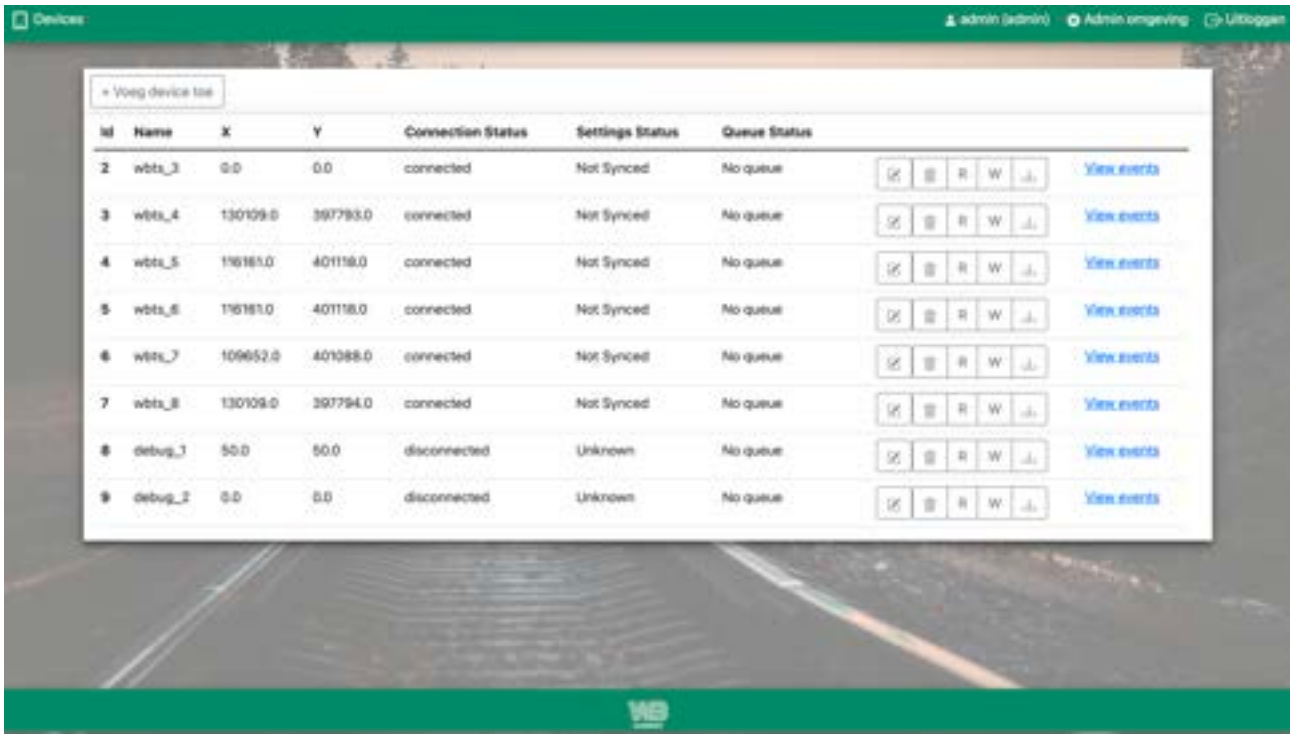
Een aandachtspunt in het kader van de prompts is de benodigde kennis van de gebruikte architectuur en programmeertalen. Als die kennis niet beschikbaar is bij de doorontwikkeling, dan kan het ervoor zorgen dat prompts niet meer bruikbaar zijn bij aanpassingen in hardware of connectiviteit (bijv. als de telecomprovider geen 4G en 5G meer aanbiedt).

Algoritmes
De algoritmes om de blinde vering en slagwerking te bepalen aan de hand van de meetdata is eerst ontwikkeld voor gebruik op de dataportal. Nadat daar de juiste werking ervan was aangetoond, zijn ze omgezet naar de firmware ('embedded algoritme in de firmware'). Op deze manier is het niet nodig de ruwe data naar de server te sturen, maar kan in plaats daarvan enkel de blinde vering en slagwerking worden verstuurd. Dit verlengt de batterijlevensduur, omdat het berekenen van de waardes veel minder energie kost dan het verzenden van data.
Meer informatie over de algoritmes is te vinden in hoofdstuk 5.

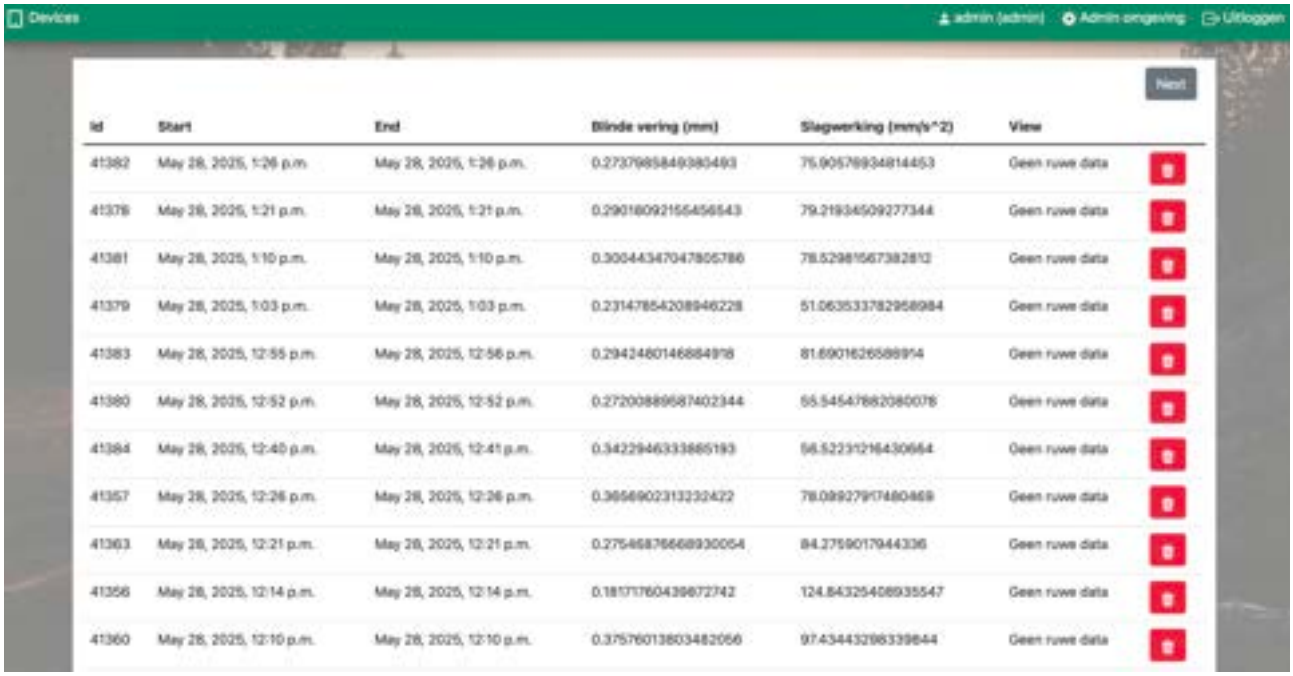
4.3 Portal en database

Naast het Tartabit portal is een interne webapp gebouwd, in Django. Het doel van deze webapp is voor onder andere:

- Beheer van de sensor instellingen.
- Opslaan van events.
- Inzichtelijk maken van de gemeten data (visueel en cijfermatig).



Figuur 6. Overzicht van de sensoren in het dataportal. WBTS 3 t/m 8 zijn de 6 actieve sensoren, Debug 1 en 2 zijn de testconfiguraties op kantoor



Figuur 7. Database in het dataportal van alleen de numerieke waarde van de blinde vering en slagwerking van iedere treinpassage, in dit geval van sensor 5. De waardes worden 1x per dag verstuurd naar de dataportal.

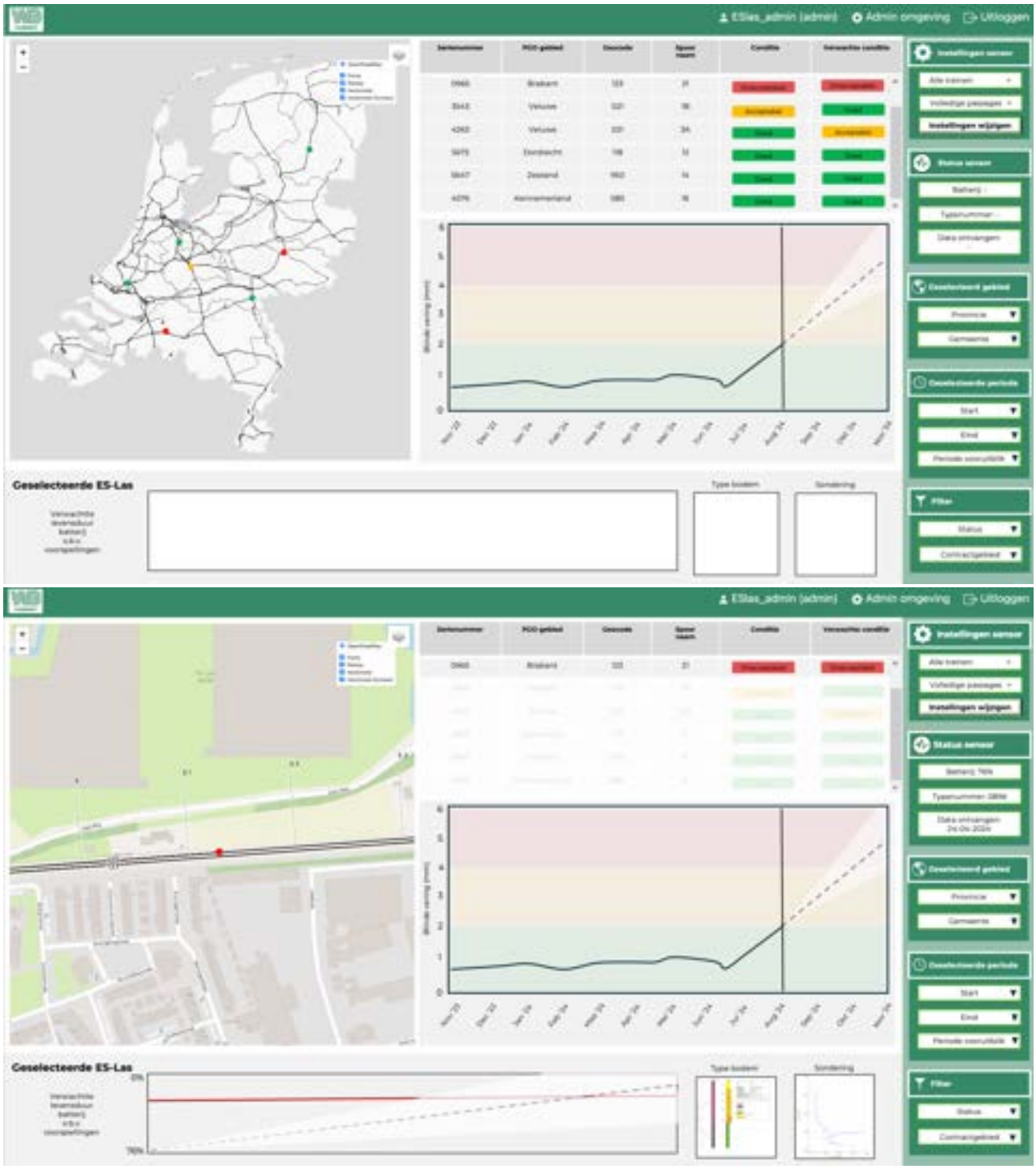
Figuur 8. Visualisatie in het dataportal van een volledige treinpassage

De webapp is gelinkt aan een database waarin de blinde vering en slagwerking per passage en event wordt opgeslagen. Indien zo ingesteld wordt ook de ruwe event data hierin opgeslagen. Er is ook een systeem ingericht inclusief gebruikersbeheer, zodat de data enkel aan de bevoegde personen beschikbaar wordt gesteld.

In de database worden ook de gewenste instellingen van sensoren bijgehouden, met opties op de webapp om deze te synchroniseren met de sensoren via de Tartabit API.

4.4 Dashboard functionaliteit

Gedurende fase 2 is ook een mock-up ontwikkeld voor het dashboard (**Figuur 9**). Met de actuele hardwareconfiguratie van de sensor is de weergegeven informatie beschikbaar te maken in de dataportal, en daarmee ook voor visualisatie in het dashboard. De belangrijkste ontwikkelstappen naar een functioneel dashboard zijn (1) het visuele ontwerp van het dashboard in een webomgeving en (2) het voorspellend algoritme, zodat de 'pluim' in de grafiek kleiner en kleiner wordt.



Figuur 9. Mock-ups van het beoogde dashboard

5 ONTWIKKELING ALGORITMES

Voor het verwerken van de ruwe data gemeten door de sensor werd beoogd twee algoritmes te ontwikkelen. Het eerste algoritme heeft als doel om uit de ruwe data van de accelerometer te bepalen wat de daadwerkelijke blinde vering in het spoor is geweest. Het tweede algoritme heeft als doel om te leren van de gemeten blinde vering en slagwerking, en daaruit te voorspellen welke waardes in de toekomst verwacht kunnen worden, zodat op voorhand duidelijk is wanneer moet worden ingegrepen.

De slagwerking wordt bepaald door de maximale absolute waarde in het versnellingssignaal te rapporteren in m/s^2.

Definities blinde vering en slagwerking
Blinde vering: de vrije ruimte onder een dwarsligger, oftewel de afstand tussen onderkant dwarsligger en ballast. Stel dat je de dwarsligger losschroeft, hoeveel mm valt die dan naar beneden. Dit gaat dus om een verplaatsing. In de IHS00001 wordt de invering getoetst, deze bestaat uit de som van de elastische invering (indrukking) van het ballastbed en de ondergrond en de blinde vering.
Slagwerking: de kracht (slag) die op de dwarsligger komt op het moment van een treinpassage, dus feitelijk de versnelling maal de massa. De piek in de versnelling is een indicatie van de slagwerking. Een hoge slagwerking zorgt voor degradatie van het spoor, maar de blinde vering kan (aanvankelijk) 0 zijn, zelfs bij forse slagwerking. Bijvoorbeeld bij een verslagen kop ES-las.

5.1 Blinde vering algoritme

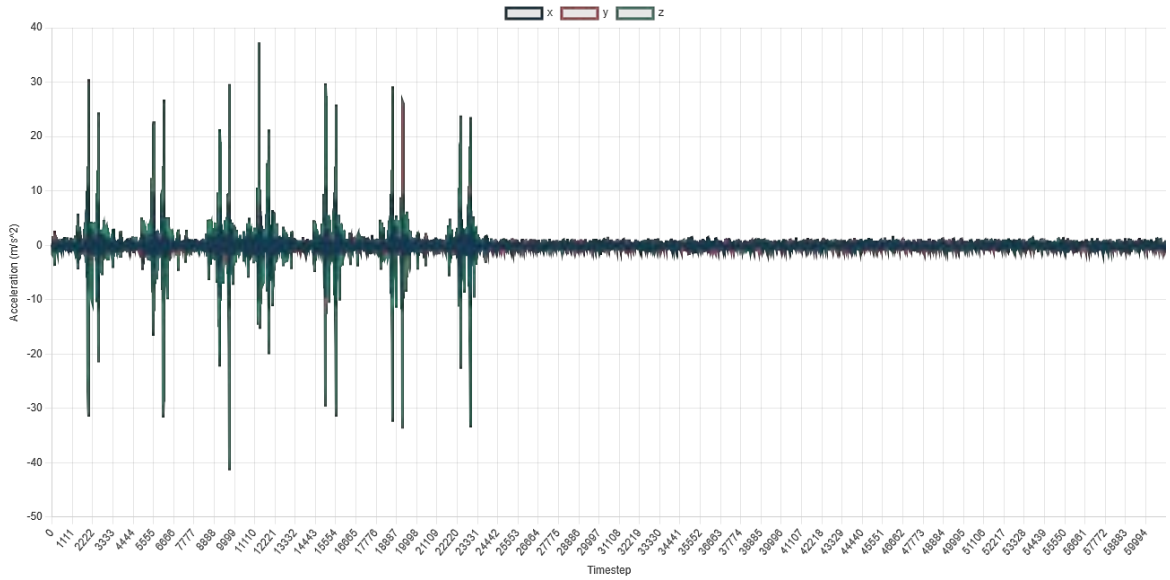
De sensor meet door middel van een accelerometer de versnelling van de dwarsligger. Uit deze versnelling moet een blinde vering worden bepaald. Tijdens de eerste fase van de praktijkproef werden de ruwe gemeten waardes (volledige tijdssignaal van de gemeten versnelling, met 8 kHz) direct doorgestuurd naar de server. Op basis van deze waardes is een algoritme ontworpen om door middel van drie hoofdstappen de blinde vering te bepalen. De hoofdstappen zijn:

1. Filtering van versnellingswaardes
2. Vertalen van versnelling naar verplaatsing
3. Bepaling van blinde vering vanuit verplaatsing

Het algoritme is eerst ontworpen en geprogrammeerd in Python op de gebruikte webserver, waarna een vertaling naar C++ is geschreven, zodat het algoritme op de sensor uitgevoerd kan worden (*embedded algoritme*). Op deze manier is het niet nodig de ruwe data naar de server te sturen, maar kan in plaats daarvan enkel de blinde vering en slagwerking worden verstuurd.
De werking van het algoritme wordt hieronder beschreven.

1. Filtering van versnellingswaardes
Initieel levert de accelerometer gehele getalwaarden aan, die worden omgezet naar m/s^2. Middels filters wordt de blinde vering geïsoleerd van achtergrondruis en trillingen in de dwarsligger.

Meer inhoudelijke details is gecategoriseerd als vertrouwelijk informatie (**Bijlage F**). Een voorbeeld van een versnellingssignaal na filtering staat in **Figuur *10***.



Figuur 10. Voorbeeld van gefilterd versnellingssignaal

2. Vertalen van versnelling naar verplaatsing

De tweede hoofdstap is om het gefilterde versnellingssignaal om te zetten naar een verplaatsingssignaal. Meer inhoudelijke details is gecategoriseerd als vertrouwelijk informatie (**Bijlage F**).

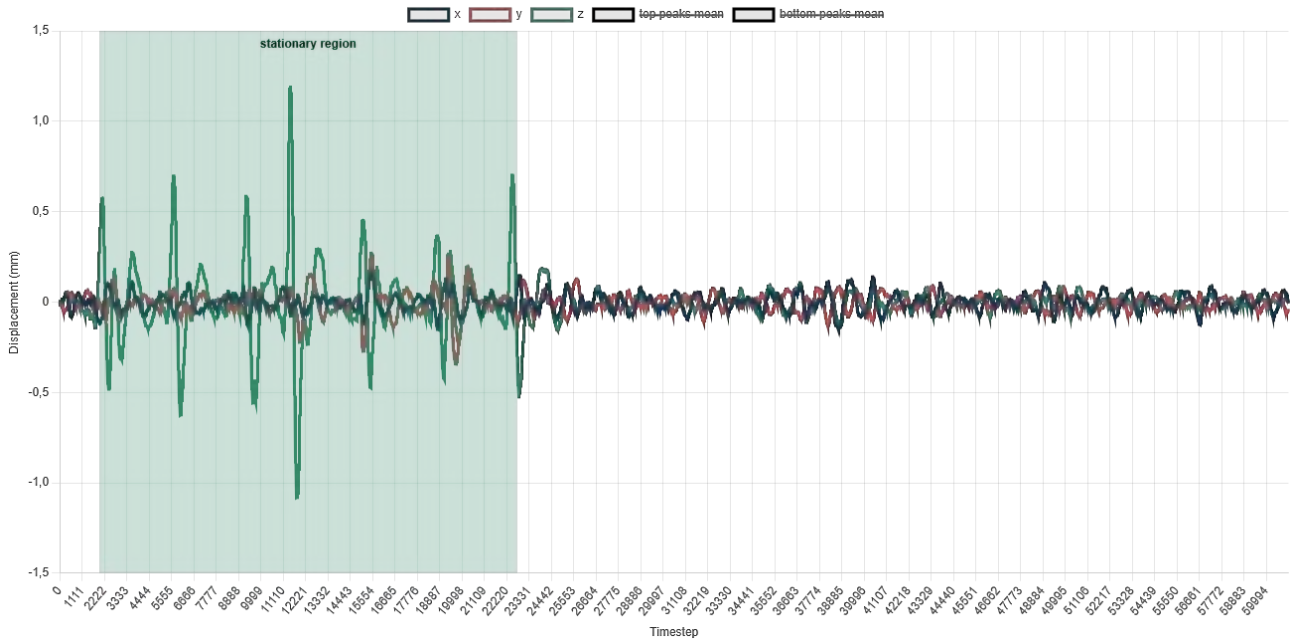
3. Bepaling van blinde vering vanuit verplaatsing

Tenslotte kan de resulterende snelheid en verplaatsing worden gebruikt om de totale invering (die bestaat uit elastische invering van het ballastbed en blinde vering) te bepalen. Dit is de meest complexe stap in het algoritme.

Het signaal dat wordt gemeten bevat bij een treinpassage verplaatsingen in de z-as die worden veroorzaakt door de wielen die de spoorstaaf raken. Dit levert pieken op in beide richtingen. Een positieve versnelling wordt veroorzaakt door een wiel dat een klap op het spoor geeft, en het spoor doet zakken (de z-as is in die zin omgedraaid). Een negatieve versnelling wordt veroorzaakt door het terugveren van het spoor (omhoog) na de initiële klap van een wiel. De blinde vering is het verschil tussen deze twee verplaatsingen.

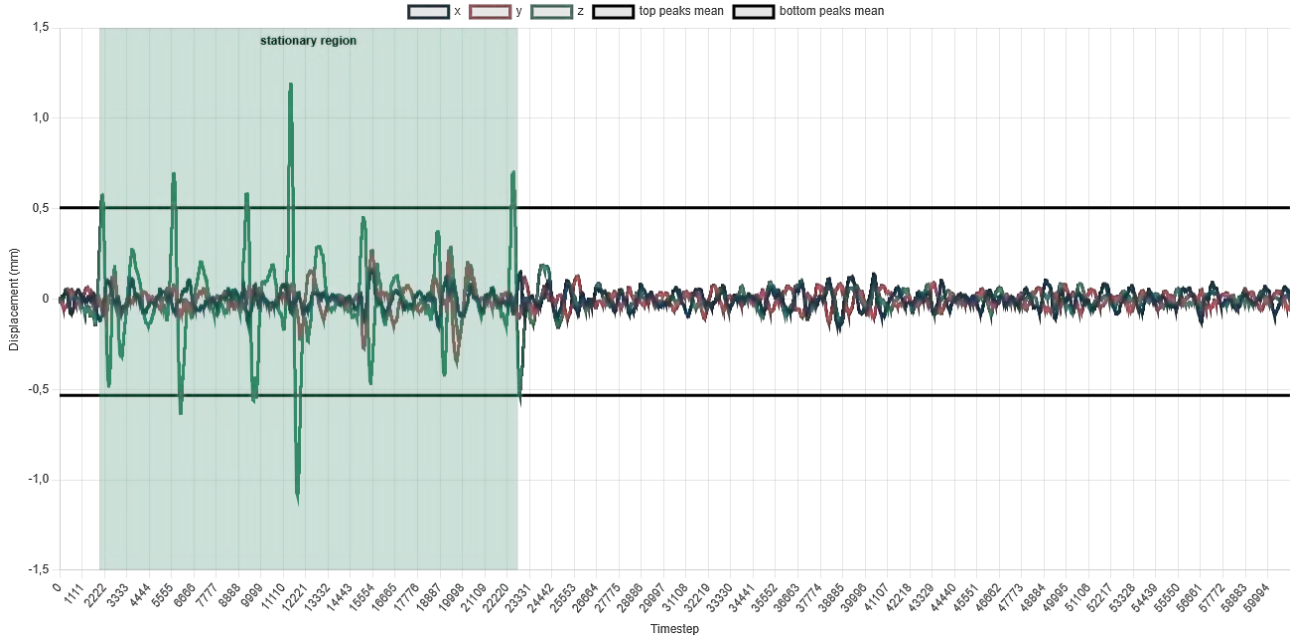
Het verplaatsingssignaal bevat nog 3 vormen van ruis waarvoor gecompenseerd moet worden. Ten eerste bevat de meting vaak een deel waar de trein nog niet over de sensor rijdt, of deze al is gepasseerd. Ten tweede is er een achtergrondruis met kleine pieken en dalen die niet direct worden veroorzaakt door een wiel. Tenslotte geeft niet elk wiel even grote pieken en dalen, wat veroorzaakt wordt door kleine afwijkingen in de meetnauwkeurigheid, de eigenschappen van elk wiel of de belasting per as of zelfs wiel.
Om de eerste vorm van ruis uit het signaal te filteren, wordt uit het signaal een zogeheten 'stationair gebied' bepaald[3]. Meer inhoudelijke details is gecategoriseerd als vertrouwelijk informatie (**Bijlage F**). Zie hieronder een voorbeeld van het stationaire gebied uitgelicht in het verplaatsingssignaal.

[3] Milne et. al. (2018). *Automated processing of railway track deflection signals obtained from velocity and acceleration measurements*



Figuur 11. Voorbeeld van verplaatsingssignaal, behorend bij Figuur 10, met stationair gebied

De daadwerkelijke invering is het verschil tussen het gemiddelde van de minima en het gemiddelde van de maxima in het verplaatsingssignaal[4]. De minima worden veroorzaakt door de indrukking van de wielen, waarna het spoor weer terugveert (maxima). Omdat er sterke verschillen kunnen zijn tussen wielen onderling, wordt een methode gebruikt waarbij het gemiddelde minimum en het gemiddelde maximum van de treinpassage wordt bepaald. Het verschil tussen de twee is dan de blinde vering. Onderstaand een weergave van de berekende gemiddeldes als zwarte lijnen in de plot (**Figuur *12***). De berekende invering is het verschil tussen deze lijnen. Meer inhoudelijke details is gecategoriseerd als vertrouwelijk informatie (**Bijlage F**).



Figuur 12. Gemeten invering (som van blinde vering en elastische indrukking ballastbed)

[4] Milne et. al. (2018). *Automated processing of railway track deflection signals obtained from velocity and acceleration measurements*

Voorspellend algoritme

Op het moment van schrijven is er nog onvoldoende data verzameld om het voorspellend algoritme op te trainen, waardoor deze nog niet beschikbaar is. Hiervoor moet data over een lange tijd beschikbaar zijn (bij voorkeur minimaal een jaar), zodat de het verloop van de blinde vering over de tijd beter inzichtelijk is. Het feit dat de 4 geïnstalleerde sensoren tot 1 november 2025 mogen blijven liggen (looptijd van afgegeven tijdelijke TVG) draagt hieraan bij. Het is aanbevolen ook de andere 2 sensoren in het spoor te installeren.

5.2 Effect op blinde vering en slagwerking

In deze sectie zijn de berekende invering en slagwerking per gemeten passage geplot, per spoorsegment. In sommige gevallen is de ruwe data van de sensor naar de server gestuurd, en zijn de waardes berekend op de server. In de andere gevallen is de invering en slagwerking op de sensor zelf bepaald (zoals in de legenda van de afbeeldingen weergegeven).
In de plots met de gemeten invering zijn ook de Interventiewaarde (IW) en Onderhoudswaarde (OW) normen voor invering op desbetreffend spoorsegment weergegeven.

Leeswijzer: Voor de juiste duiding van de uitkomsten, wordt aangeraden eerst paragraaf 6.1 te lezen. Hierin wordt de aanpak en uitvoering van praktijkproef toegelicht.

Hieronder zijn de kenmerken van tijdens de praktijkproef gebruikte sensoren samengevat (**Tabel 2**). Daaronder is de gemeten blinde vering vergeleken met metingen van de meettrein in het najaar van 2024 en voorjaar van 2025 (**Tabel 3**). De metingen zijn ook opgenomen in de figuren op de volgende pagina's waarin per sensor de waarnemingen zijn uiteengezet.

***Tabel 2**. Kenmerken van de geïnstalleerde sensoren*

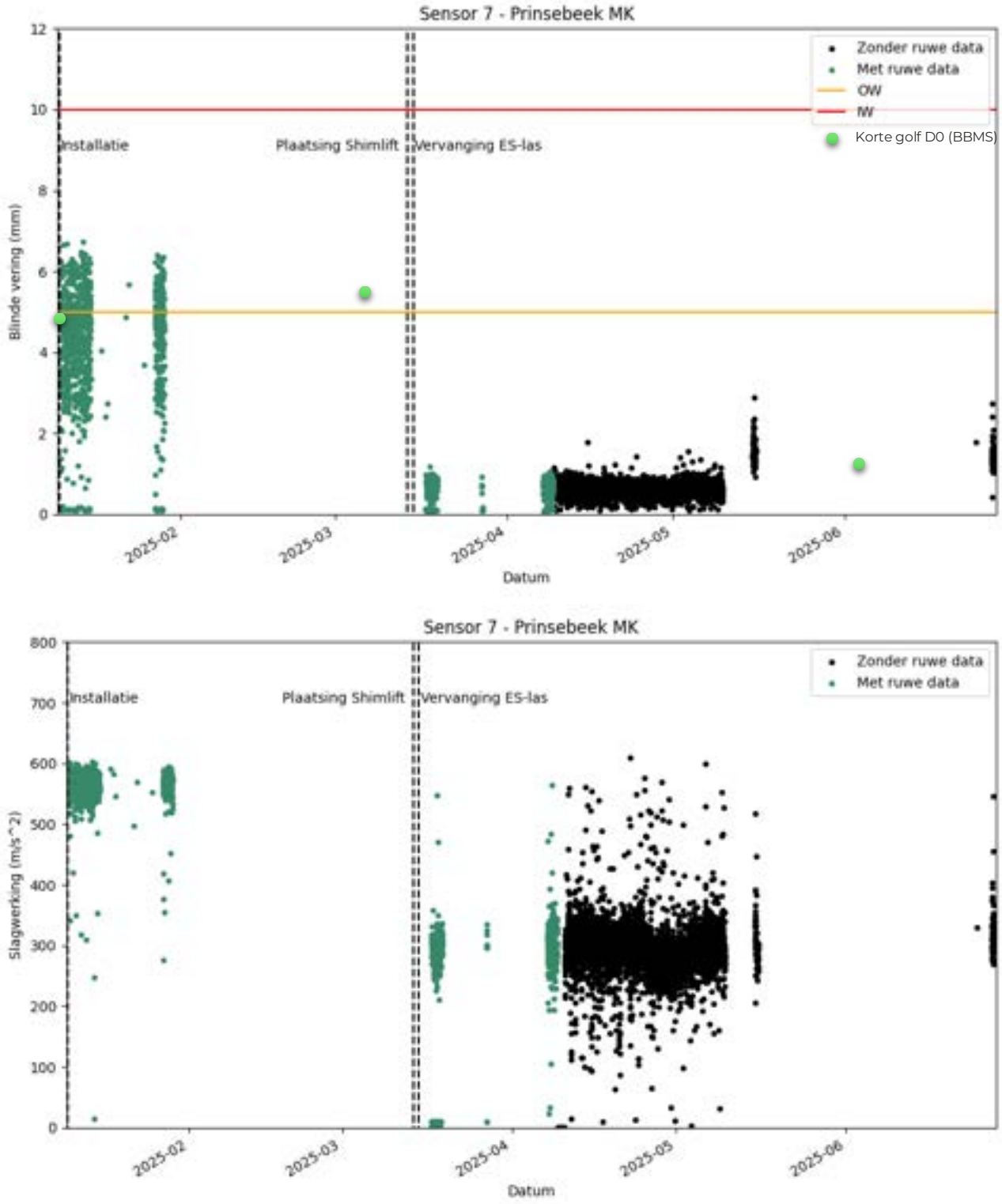
Sensor	Installatieperiode	Aantal metingen	Korte beschrijving waargenomen effect
3	Mrt. '25 - heden	>15.500	Stabiele invering rondom 1,0 mm Slagwerking rond de 370 m/s²
4	Jan. '25	737	Geen, omdat sensor is vastgelopen
5	Jan. '25 - heden	>12.500	Stabiele invering rondom 0,4 mm Slagwerking rond de 90 m/s²
6	Jan. '25 – mrt '25	1.261	Geen, omdat sensor is omgewisseld voor sensor 3
7	Jan. '25 – eind juni	6.028	Stabiele invering rondom 1,5 mm Slagwerking rond de 310 m/s²
8	Jan. '25 – begin juni	11.706	Stabiele invering rondom 1,2 mm Slagwerking rond de 300 m/s²

***Tabel 3**. Vergelijking van de gemeten invering met de korte golf meting met de meettrein*

Locatie + spoor	Datum	Korte golf D0 (BBMS) (mm)	Blinde vering sensor (mm)	Delta mm
1 - MK	10 okt. 2024	4,9	4,9	0,0
Sensor 7	6 mrt. 2025	5,6	-	-
Geocode 121 (km 3.42)	5 jun. 2025	1,1	1,4	*0,3*
2 - DI (noord)	10 okt. 2024	1,3	1,1	-0,2
Sensor 3	6 mrt. 2025	0,8	0,9	0,1
Geocode 123 (km 3.90)	5 jun. 2025	0,7	0,8	0,1
2 - AI (zuid)	10 okt. 2024	1,9	1,9	0,0
Sensor 5	10 jan. 2025	1,4	1,0	-0,4
Geocode 123 (km 3.90)	5 jun. 2025	1,5	0,4	-1,1
3 - DH	10 okt. 2024	1,2	2,0	0,8
Sensor 8	10 jan. 2025	1,5	1,3	-0,2
Geocode 123 (km 18.27)	5 jun. 2025	1,1	1,1	0,0

Locatie Prinsenbeek – Spoor MK (sensor 7)

Na installatie van sensor 7 op spoor MK in Prinsenbeek was duidelijk dat er te veel blinde vering in het spoor zat. Bij het installeren van de Shimlift viel het op dat de ES-las beschadigd was, waardoor deze kort na de installatie van de Shimlift is vervangen. Het effect van de gezamenlijke ingreep (ShimLift en vervanging ES-las) is uit de data te halen, maar niet wat elk van deze acties afzonderlijk heeft gedaan.

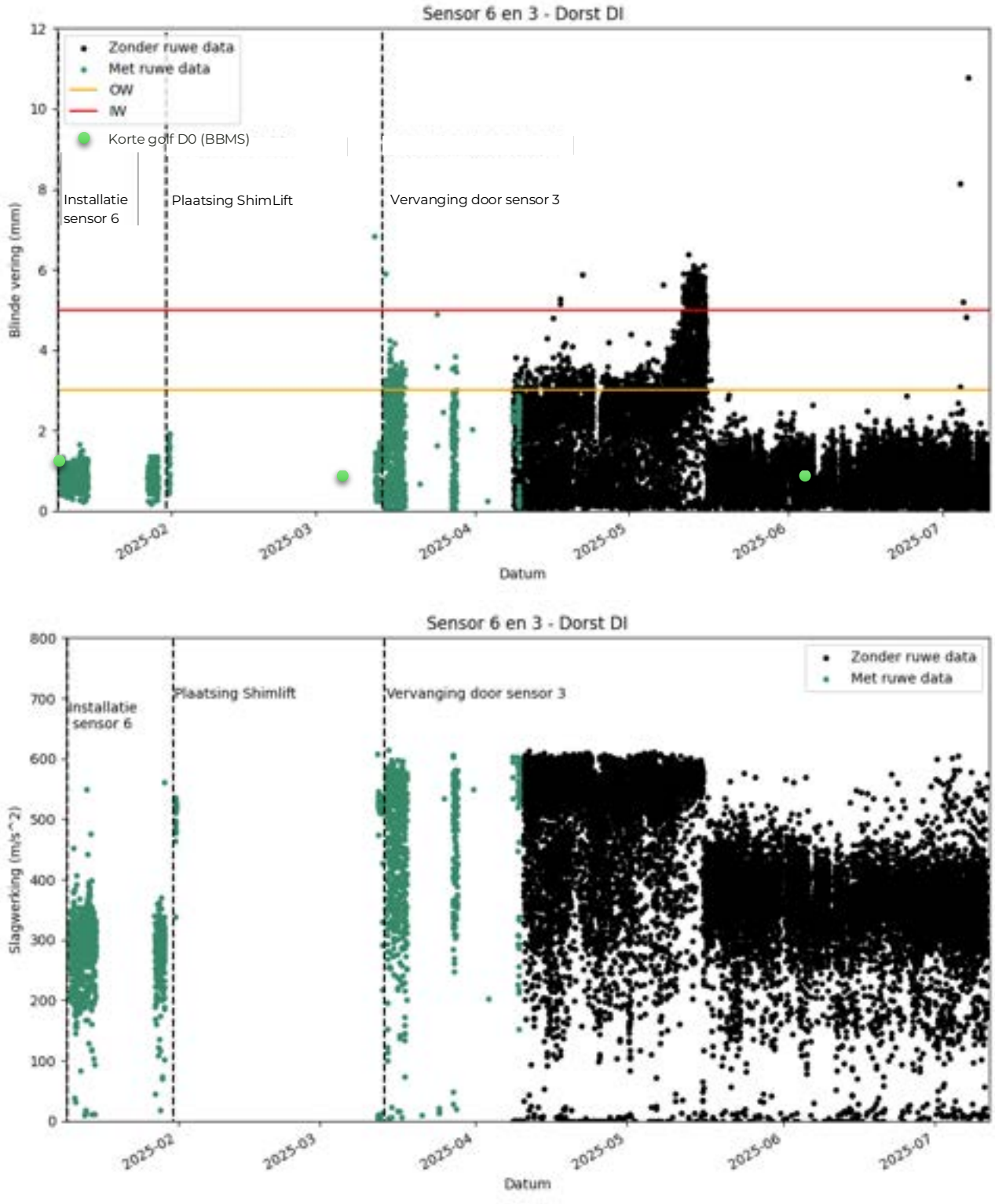


Figuur 13. Invering (boven) en slagwerking (onder) op spoor MK in Prinsenbeek

Disclaimer: Opvallend is de toename van de invering – met gelijk blijvende slagwerking -medio mei 2025. Het exacte moment van de toename in de tijd is niet vast te stellen.
Ten tijde van het opleveren van het definitieve rapport loopt het onderzoek bij de PGO-aannemer nog over eventueel uitgevoerd onderhoud in die periode.

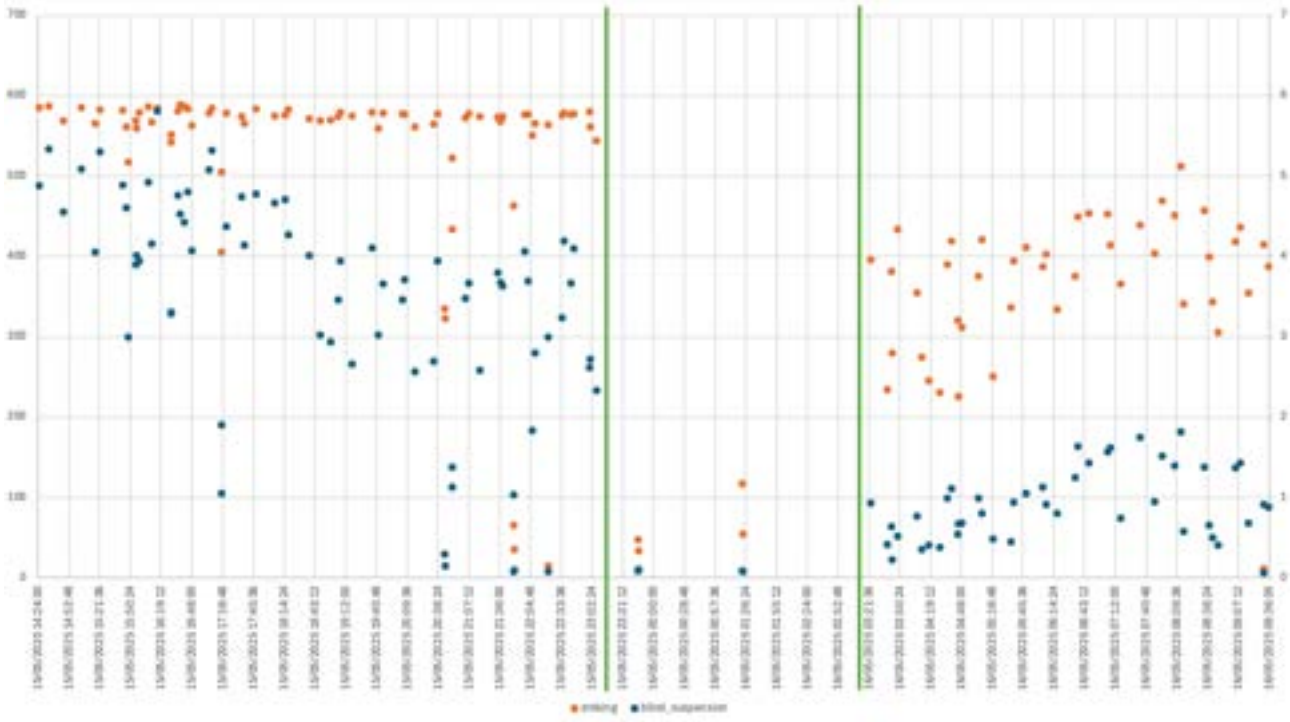
Locatie Dorst – Spoor DI (sensor 6 en 3)

Op de locatie in Dorst op spoor DI werd initieel gemeten door sensor 6, na het plaatsen van de Shimlift is niet veel gemeten, omdat de sensor is uitgezet om batterijcapaciteit te besparen. Vervolgens is de sensor vervangen vanwege een vermoedelijk probleem binnen sensor 6. In plaats daarvan is sensor 3 geplaatst. Na het plaatsen van de nieuwe sensor lijkt het dat de blinde vering is toegenomen. Onduidelijk is of dit veroorzaakt wordt door een afwijking in de accelerometer tussen de twee sensoren of een verhoging van de blinde vering door de Shimlift. Dit wordt gevalideerd de sensor 3 en 6 te kalibreren na het uitbouwen van sensor 3.



Figuur 14. Invering (boven) en slagwerking (onder) voor spoor DI in Dorst (noordelijke spoor)

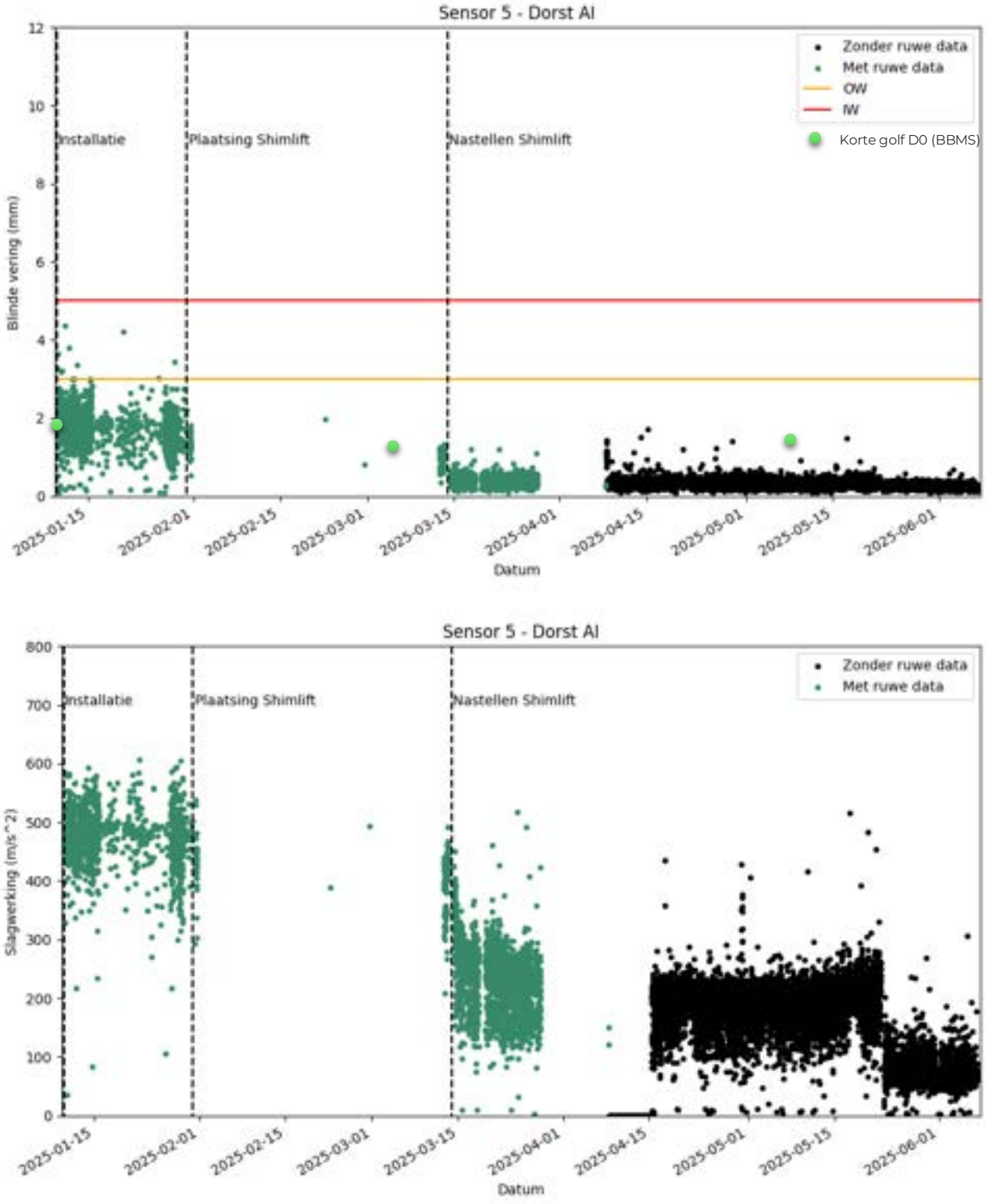
Disclaimer: Opvallend is de toename van de blinde vering in de eerste helft van mei 2025 en de daling vanaf medio mei. Bij analyse van de meetdata op uurniveau blijkt de daling te zijn ontstaan in de nacht van donderdag 15 mei op vrijdag 16 mei (zie **Figuur *15***), *in naar wat het lijkt een nachtgat.*
Ten tijde van het opleveren van het definitieve rapport loopt het onderzoek bij de PGO-aannemer nog over eventueel uitgevoerd onderhoud in die periode. Hieruit volgt mogelijk ook een oorzaak van de oplopende blinde vering; bijvoorbeeld een defecte ES-las.



Figuur 15. Analyse van de metingen op 15 en 16 mei 2025 bij de sensor in spoor DI in Dorst. De weergegeven tijden zijn in Nederlandse zomertijd 2 uur later. Tussen 1:00 en 5:20 zijn vrijwel geen passages geregistreerd, behalve een aantal met lage blinde vering en slagwerking, mogelijk omdat de passage op lage snelheid was.

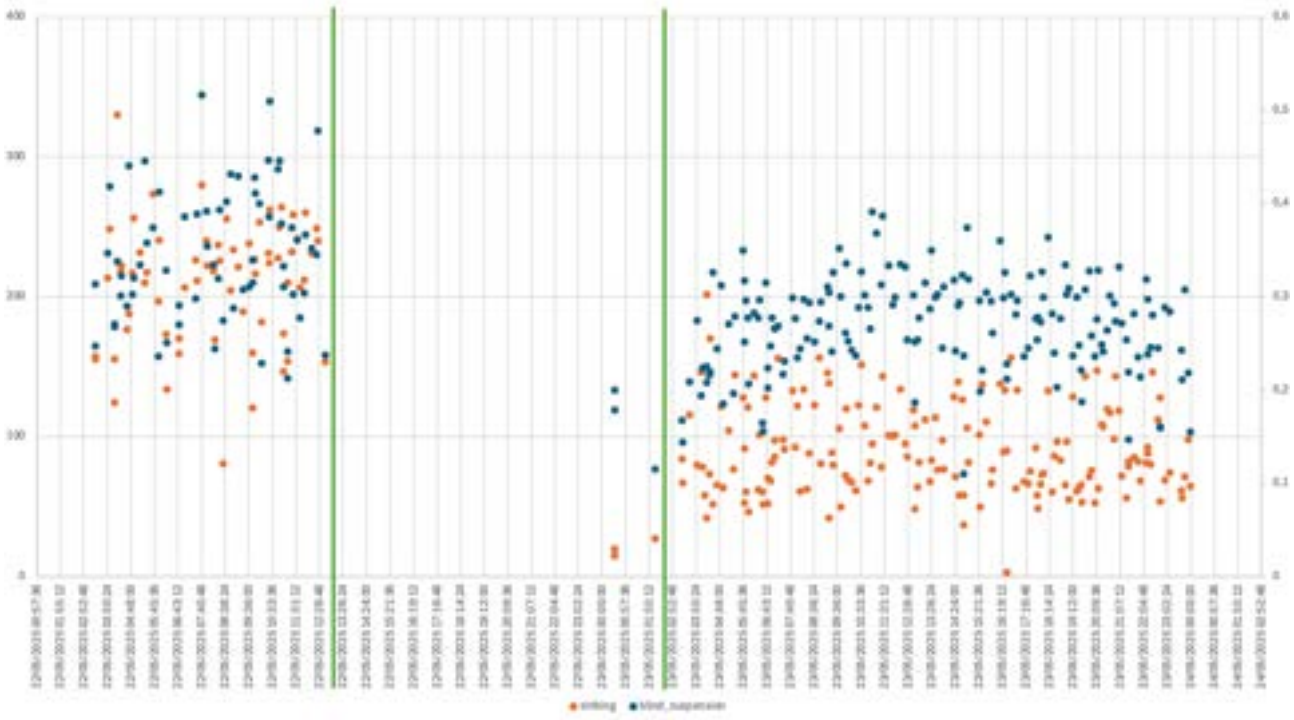
Locatie Dorst – Spoor AI (sensor 5)

Sensor 5 werd geïnstalleerd op locatie Dorst op spoor AI. Na installatie van de Shimlift is een lichte vermindering in blinde vering en slagwerking te zien. Het nastellen van de Shimlift zorgt voor een afname van circa 75% van de blinde vering: van 2 mm naar minder dan 0,5 mm. Sinds het bijstellen is de blinde vering constant en laag.



Figuur 16. Invering (boven) en slagwerking (onder) voor spoor AI in Dorst (zuidelijke spoor)

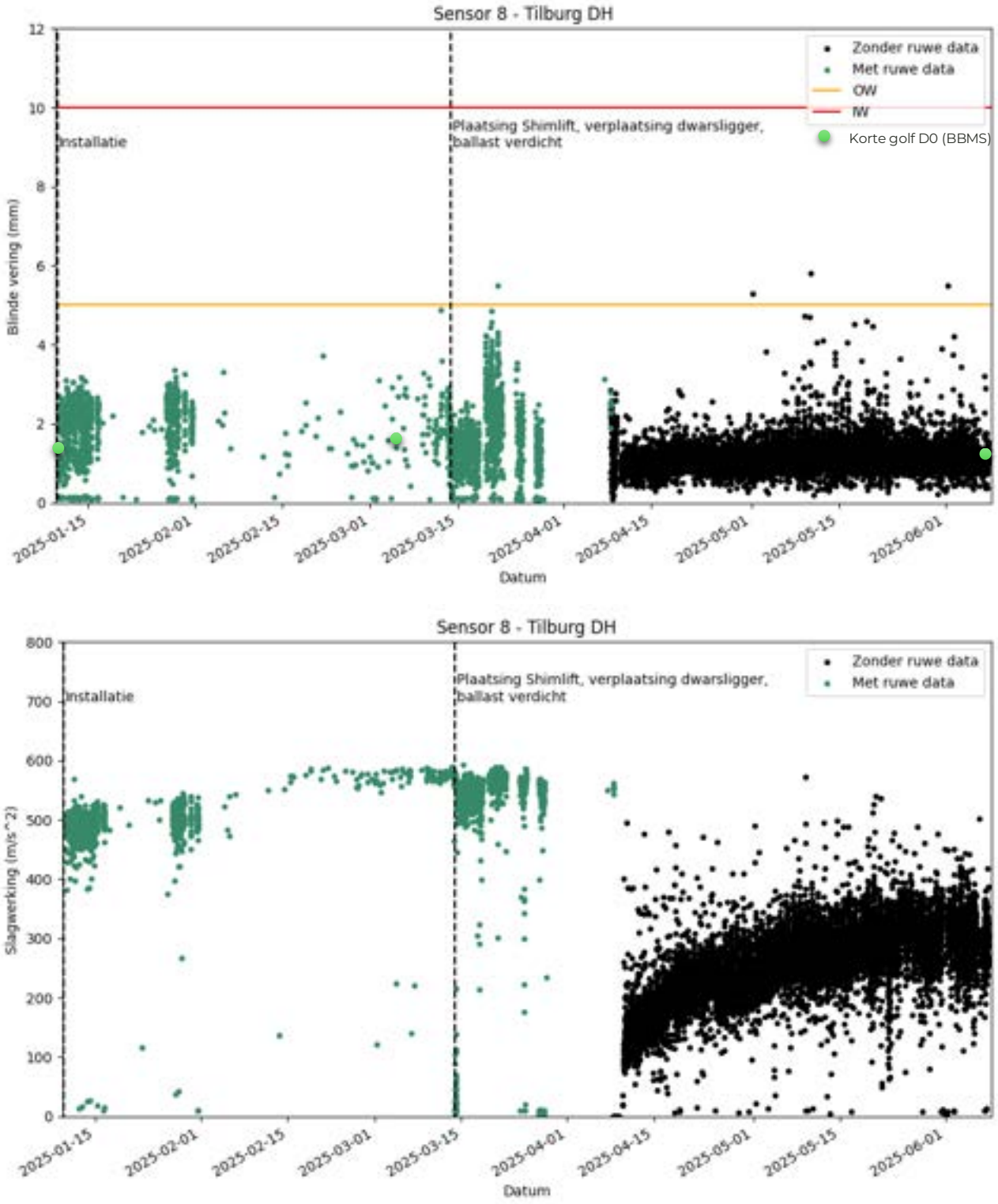
Disclaimer: Opvallend is de afname van de slagwerking in de tweede helft van mei 2025. Bij analyse van de meetdata op uurniveau blijkt de daling te zijn ontstaan in de nacht van donderdag 22 mei op vrijdag 23 mei (zie), in naar wat het lijkt een verlengd nachtgat. Ten tijde van het opleveren van het definitieve rapport loopt het onderzoek bij de PGO-aannemer nog over eventueel uitgevoerd onderhoud in die periode.



Figuur 17. Analyse van de metingen op 22 en 23 mei 2025 bij de sensor in spoor AI in Dorst.De weergegeven tijden zijn in Nederlandse zomertijd 2 uur later. Tussen 14:30 en 5:00 zijn vrijwel geen passages geregistreerd, behalve een aantal met lage slagwerking, mogelijk omdat de passage op lage snelheid was.

Locatie Tilburg – Spoor DH (sensor 8)

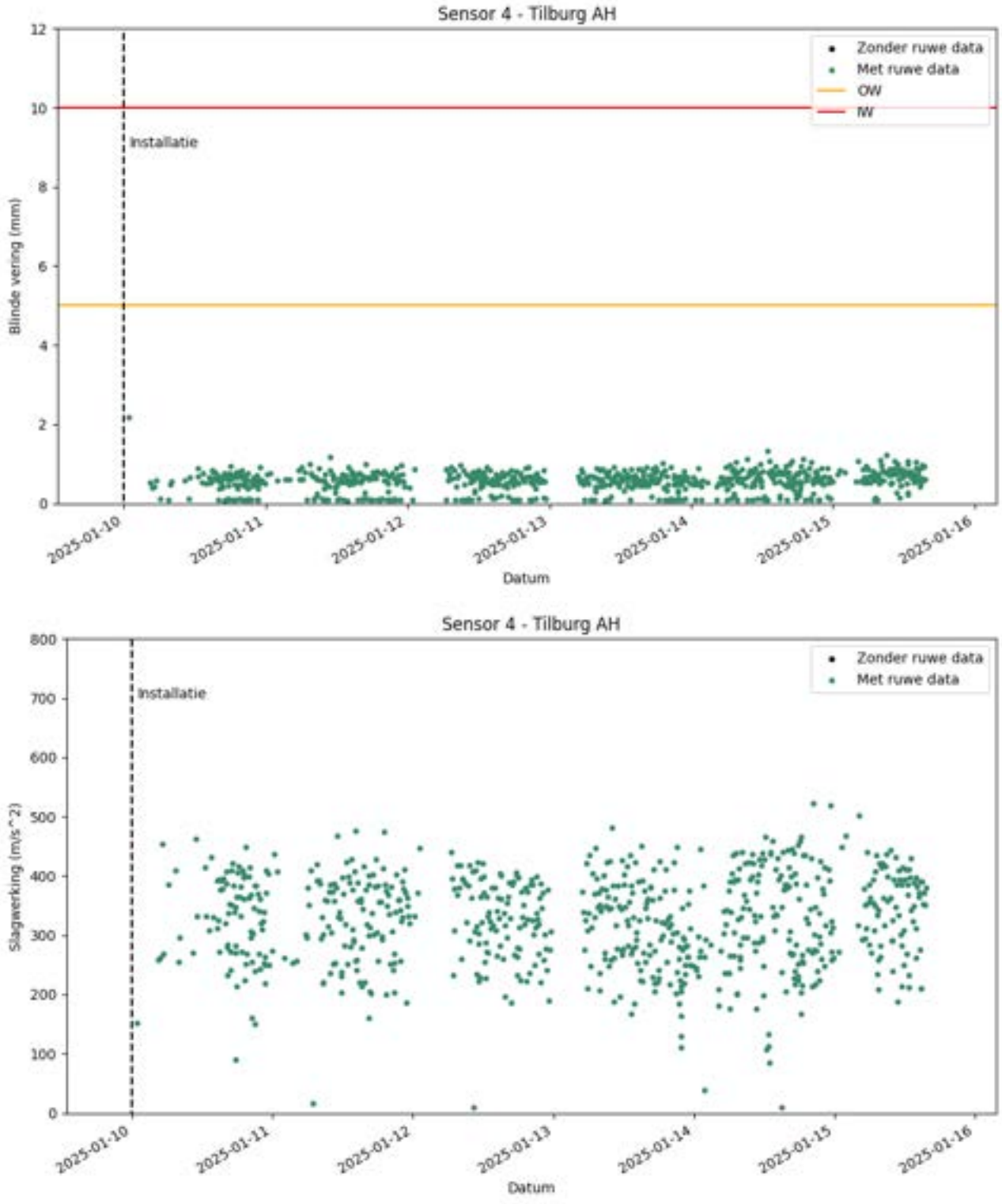
Sensor 8 is geplaatst op spoor DH in Tilburg. Omdat de ES-las daar verschoven lag ten opzichte van de dwarsliggers, is de ES-las ook aangepast. Opvallend is dat er weinig effect lijkt te zijn van het verplaatsen van de dwarsliggers en het aanbrengen van Shimlift. Wel zien we een sterke verandering (afname) in zowel slagwerking als blinde vering begin april. De oorzaak hiervan is onbekend.



Figuur 18. Blinde vering (boven) en slagwerking (onder) voor spoor DH in Tilburg

Locatie Tilburg – Spoor AH (sensor 4)

Sensor 4 heeft in Tilburg op spoor AH gemeten, maar is na een paar dagen offline gegaan door een onbekende fout. Er is weinig blinde vering gemeten. Na resetten van de sensor op kantoor werkt deze weer naar behoren.



Figuur 19. Blinde vering (boven) en slagwerking (onder) voor spoor AH in Tilburg

5.3 Effect op trillingen in omgeving

Het effect van het plaatsen en bijstellen van Shimlift op de omgevingstrillingen is gemeten door Iv Infra, en gerapporteerd in een rapport door Cohere Consultants. De afname in de trillingen voor goederen- en reizigerstreinen en de bijbehorende gemeten afname in slagwerking en blinde vering is hieronder weergegeven (**Tabel 4**).

- **Donkergroen** is een met zekerheid goed voelbare afname (meer dan 30% afname van de trillingen).
- **Lichtgroen** betekent dat er een kans is op een voelbare afname.
- **Geel** betekent dat de trillingen niet merkbaar veranderen.
- **Oranje** dat er een kans is op een voelbare toename van de trillingen, dus een ongewenst effect.

In dit overzicht valt het volgende op:

1. Het effect van het installeren en nastellen van ShimLift treedt vooral op bij hogere trillingsfrequenties (vaak tussen de 15 en 50 Hz, soms iets hoger of lager).
2. Alleen bij locatie 1 is sprake van een goed voelbaar effect. Hier is de invering ook het sterkst afgenomen, voor alle andere locaties was maar zeer beperkt sprake van invering voorafgaand aan het plaatsen van ShimLift.
3. Bij andere locaties is er geen sterke toe- of afname van de trillingen waargenomen. Soms nemen de trillingen iets toe, soms iets af.
4. Globaal geldt: als de invering afneemt, nemen de trillingen bij 10 tot 30 Hz af, als de slagwerking afneemt, nemen de trillingen bij hogere frequenties (30 tot 60 Hz) af. Hoe sterker de afname van de invering of slagwerking, hoe groter de afname van de trillingen.

***Tabel 4**. Overzicht impact van installatie en nastellen van ShimLift op blinde vering, slagwerking en trillingen (groene tekst is positief, oranje negatief voordat is nagesteld, rode tekst negatief na 1x nastellen)*

Locatie + spoor	Moment	Datum	Blinde vering (mm)	Slagwerking (m/s^2)	Afname trillingen reizigerstreinen	Afname trillingen goederentreinen
1 - MK	Installeren sensor	10 jan. 2025	4,9	570		
Sensor 7	Installeren ShimLift	13-14 mrt. 2025	- *(geen data)*	- *(geen data)*	2 - 5 dB tussen 15 en 50 Hz	2 - 5 dB tussen 15 en 50 Hz
Geocode 121	Vervangen ES-las	14-15 mrt. 2025	1,4 (-3,5)	310 (-260)	3 - 7 dB tussen 15 en 40 Hz	2 - 4 dB tussen 12 en 30 Hz
2 - DI	Installeren sensor	10 jan. 2025	0,8	300		
Sensor 3	Installeren ShimLift	30-31 jan. 2025	1,1 (+0,3)	500 (+200)	-1 tot -3 dB tussen 12 en 60 Hz	-1 tot -5 dB tussen 12 en 60 Hz
Geocode 123	Nastellen ShimLift	13-14 mrt. 2025	0,8 (-)	370 (-130)	-1 tot +1 dB tussen 5 en 60 Hz	-1 tot +1 dB tussen 5 en 60 Hz
2 - AI	Installeren sensor	10 jan. 2025	1,9	480		
Sensor 5	Installeren ShimLift	30-31 jan. 2025	1,4 (-0,5)	420 (-60)	-1 tot -3 dB tussen 10 en 80 Hz	1 - 3 dB tussen 10 en 80 Hz
Geocode 123	Nastellen ShimLift	13-14 mrt. 2025	0,4 (-1,5)	90 (-330)	-1 tot +1 dB tussen 5 en 60 Hz	-1 tot +1 dB tussen 5 en 60 Hz
3 - DH	Installeren sensor	10 jan. 2025	2,0	500		
Sensor 8	Installeren ShimLift deel 1	13-14 mrt. 2025	1,6 (-0,4)	540 (+40)	-1 tot -5 dB tussen 8 en 40 Hz	-1 tot -2 dB tussen 5 en 50 Hz
Geocode 123	Installeren ShimLift deel 2	18-19 mrt. 2025	2,2 (+0,6)	550 (+10)	-1 tot +1 dB tussen 5 en 80 Hz	-1 tot +1 dB tussen 5 en 80 Hz
	Nastellen ShimLift	24-25 mrt. 2025	1,1 (-0.9)	300 (-250)	0 tot 2 dB tussen 10 en 50 Hz	-1 tot +1 dB tussen 10 en 50 Hz

6 PRAKTIJKPROEF

6.1 Aanpak

Tijdens de praktijkproef hebben we het effect op trillingen gemeten bij 5 ES-lassen op 3 locaties (**Tabel 20**). Hierbij zijn de volgende stappen doorlopen (**Tabel *21***):

1. Installatie sensoren.
2. Uitvoeren metingen van de nulsituatie (om te vergelijken met de metingen in het veld).
3. Installatie ShimLift.
4. Nastellen ShimLift.

Tabel 20. Locaties van de 5 ES-lassen binnen de praktijkproef

Locatie	Adres	Luchtfoto	ProRail codering	Sensor nummer
1	Steenakkerstraat 4815 PC Prinsenbeek		Geo 121 km 3.4	7
2	Posthoorn 4847 TJ Teteringen		Geo 123 km 3.9 Spoor AI (noord)	3 (eerst 6)
			Geo 123 Spoor DI km 3.9 (zuid)	5
3	Zwartvenseweg Tilburg		Geo 123 18.2 zijde Breda spoor DH overweg (noord)	8
			Geo 123 18.2 zijde Breda spoor AH overweg (zuid)	- (was 4)

Tabel 21. Installatie- en nastelmomenten

Locatie	Spoor	Sensor	Activiteit	Datum	Aandachtspunten
Prinsenbeek	MK	7	Sensor installeren	10-01-2025	
			ShimLift installeren	14-03-2025	
			ES-las vervangen	15-03-2025	Vervangen vanwege gevaarlijkse situatie door deels gebroken ES-las
Dorst	DI	6	Sensor installeren	10-01-2025	
			ShimLift installeren	31-01-2025	
			ShimLift nastellen	14-03-2025	
		6	Sensor verwijderen	14-03-2025	Verwijderd omdat ie geen data meer stuurt (bleek achteraf onnodig)
		3	Sensor installeren	14-03-2025	Niet gelijmd, maar kurkrubber onderlegplaat van 2mm dik
Dorst	AI	5	Sensor installeren	10-01-2025	
			ShimLift installeren	31-01-2025	
			ShimLift nastellen	14-03-2025	
Tilburg	DH (noord)	8	Sensor installeren	10-01-2025	
			ShimLift installeren (deel 1)	14-03-2025	Dwarsligger verplaatst + ballast verdicht. ShimLift geinstalleerd bij 2 dwarsliggers
			ShimLift installeren (deel 2)	19-03-2025	Installatie ShimLift bij overige dwarsliggers
			ShimLift nastellen	25-03-2025	
Tilburg	AH (zuid)	4	Sensor installeren	10-01-2025	
			Sensor verwijderen	14-03-2025	Verwijderd omdat ie geen data meer stuurt

6.2 Uitkomsten

De drie grote uitdagingen om de praktijkproef te starten waren:

1. Het ontwikkelen van de sensor
   Dit heeft langer geduurd dan vooraf ingeschat, onder andere vanwege de keuze om niet met meerdere prototypes te werken, maar meteen het veld in te gaan met een sensor met alle gewenste functionaliteiten.
2. Het goedgekeurd krijgen van de TVG
3. Het mee kunnen liften op een ingeplande TVP

Hierdoor is de praktijkproef pas in januari 2025 gestart in plaats van april 2024. Desondanks is er veel data verzameld (zie paragraaf 5.2) en zijn meerdere waardevolle lessen geleerd (zie paragraaf 6.2).

Evaluatie installatie sensor

- Gebruik van een boormal draagt bij aan een snelle installatie.
- Het gebruik van lijm tussen de rvs-plaat en de dwarsligger kost een paar minuten i.v.m. reinigen van de dwarsligger en aanbrengen van de lijm.
- De benodigde tijd is korter dan vooraf ingeschat. Als een sensor bij iedere ES-las in naastgelegen sporen wordt geïnstalleerd, is de installatietijd gemiddeld 10 minuten. Indien bij 1 van de 2 ES-lassen: gemiddeld 15 minuten.

Evaluatie data versturen

Er zijn twee sensoren tijdens de proef verwijderd.

- De sensor bij Tilburg was vastgelopen en niet meer ‘over-the-air’ aan te roepen. De sensor was niet ‘dood’, aangezien hij zichzelf nog wel regelmatig aanmeldde.
- De sensor bij Dorst verstuurde geen data meer. Achteraf bleek dit te zijn veroorzaakt door *Geleerde les: als een sensor geen data verstuurd, eerst controleren of voldoende data beschikbaar is (bij dataprovider 1nce).*

Evaluatie de-installatie sensor

- Gaat eenvoudiger en daardoor sneller dan verwacht; de lijm is sterk maar ook bros genoeg om snel los te laten bij een ferme klap.
- Opvullen van de boorgaten duurt het langst.
- Totaal benodigde tijd: 5-10 minuten per sensor.

Evaluatie installatie en nastellen van de ShimLift

De installatie is op alle drie de locaties relatief eenvoudig verlopen.

- Waar wij geen rekening mee hebben gehouden, is dat de dwarsliggerafstand kan afwijken van het OVS. Dit leidt ertoe dat - vanwege de beperkte ruimte - de veer die wij toepassen niet past in de daarvoor bestemde ruimte(kamer) van de ES-las.
- *Geleerde les: Bij het nastellen van ShimLift is een spoorkrik nodig om te zorgen dat de ES-las niet in een zeeg blijft liggen; een zeeg resulteert namelijk dat slagwerking, en daarmee trillingen, snel op kunnen treden.*
- *Geleerde les: Tijdens vooropname standaard aandacht of de ligging van de dwarsliggers voldoet voor correcte installatie van ShimLift.*

7 EVALUATIE RESULTATEN

7.1 Beantwoording van de drie onderzoeksvragen

Onderzoeksvraag 1. Trillingsreducerend effect: Wat is het effect op de trillingen van een monitorbare (en daardoor nauwkeurig instelbare en nastelbare) Shimlift bij ES-lassen?

Hypothese: De trillingen zullen afnemen, tot op het niveau bij een nieuw aangebrachte ES-las. In de eerste maand(en) na installatie zal er naar verwachting nog in beperkte mate slagwerking en blinde vering optreden, omdat wij de waarschuwingswaarden voor de ShimLift nog moeten bepalen (onderzoeksvraag 2). De omvang van slagwerking en blinde vering neemt af al naar gelang er meer data beschikbaar komt en het algoritme beter is getraind.

Resultaten

De metingen met de sensor bevestigen dat op locaties waar sprake is van forse invering en/of slagwerking, deze afnemen door de installatie en het nastellen van ShimLift. Bij sensoren 3, 5, 7 en 8 blijven de waardes voor lange tijd (meerdere maanden) onder de 2mm na 1x nastellen. Kanttekening hierbij is dat bij sensor 7 de ES-las is vervangen, hetgeen de blinde vering sterk heeft gereduceerd. Dit sluit aan bij het uitgangspunt dat de business case het meest gunstig is als ShimLift wordt geïnstalleerd in combinatie met het vervangen van de ES-las. Vanaf dat moment kan de blinde vering gemonitord worden en ShimLift bijgesteld bij waargenomen toename in blinde vering.
Op basis van de huidige meting is de conclusie dat het effect op de spoorligging met sensor en ShimLift langer behouden blijft dan met het bestaande onderhoudsregime van de PGO-aannemer.

Voor het effect op de trillingen geldt dat er vooral effect is op de trillingen als er sprake is van een forse afname van de invering (minimaal 1 mm afname) en slagwerking:

- Als de invering afneemt, nemen de trillingen bij 10 tot 30 Hz vooral af. Een afname van de invering met 50%, leidt tot ca. 25% lagere trillingen (2,5 dB afname).
- Als de slagwerking afneemt, nemen de trillingen bij 30 tot 60 Hz vooral af. Er is geen kwantitatieve relatie vastgesteld.

Tenslotte, hoe langer de sensoren kunnen meten, hoe beter is te beoordelen hoe blijvend dit effect is. De TVG van de sensoren loopt tot november 2025. Aanbeveling is de sensoren in ieder geval tot dat moment te laten meten.

Onderzoeksvraag 2. Onderhoudsregime: Hoe vaak moeten ES-lassen met Shimlift worden nagesteld en wat is de waarschuwingswaarde wanneer nastellen nodig is?

Hypothese: Vanuit bestaande proeflocaties met alleen de Shimlift volgt dat 1 á 2 keer nastellen in het 1e jaar na installatie voldoende lijkt voor een stabiele situatie voor de 5 jaar erna. Van belang is dat de blinde vering iedere keer volledig wordt gecompenseerd. Het hoogteverschil tijdens het nastellen was bij die praktijkproeven gemiddeld 5 mm. De waarschuwingswaarde om trillingen en schade te voorkomen moet lager liggen; eigenlijk is 3 mm al te veel. Of 3 mm realistisch is en niet tot een te hoge nastelfrequentie leidt onderzoeken we tijdens fase 2.

Resultaten

Op 1 locatie na is na 1x nastellen geen significante slagwerking en blinde vering meer aanwezig. De door ons veronderstelde nastelfrequentie van 1 tot 2 blijkt in de praktijk voldoende – hetgeen ook voorafgaand aan de praktijkproef reeds was ervaren in België en Duitsland:

- In België zijn op 1.020 dwarsliggers ShimLift geïnstalleerd.
- In Duitsland is op 16 locaties – bij elkaar op circa 700 dwarsliggers - ShimLift geïnstalleerd.

Onderzoeksvraag 3. Toepassingsgebied: In welke situaties is de gemonitorde ShimLift een goede oplossing om de trillingshinder in de omgeving te verminderen?

Hypothese: De meeste trillingsklachten ontstaan bij bebouwing en spoor op zandgronden; trillingen verspreiden zich het makkelijkst - en dus verst - in zandgronden. Daarnaast wordt de degeneratie van ES-lassen sneller verergerd bij grotere en meer belasting, dus op drukkere trajecten met treinen met hogere aslasten en snelheden. Wij verwachten daarom dat de toepassing op drukke trajecten op zandgronden het meeste effect heeft op een lagere LCC. Als er zich bebouwing in nabijheid van de ES-lassen bevindt (< 75 meter) heeft de innovatie ook de meeste impact op reductie van het aantal trillingsklachten.

Resultaten

De combinatie van inzicht (met de sensor) en opheffen van de blinde vering (door installatie en nastellen van ShimLift) resulteert in minder blinde vering en minder slagwerking op de 3 locaties waar is gemeten. Dit betekent dat de ES-las minder wordt belast en draagt daarmee bij aan een langere levensduur en lagere LCC van de ES-las. In paragraaf 5.3 is het effect gekwantificeerd.

Onderzoeksvraag 4. Een zo laag en dus gunstig mogelijke LCC: Wat is het effect van de gemonitorde ShimLift op de levensduur en onderhoudskosten van de ES-las en dwarsliggers?

Hypothese: Het is onze aanname dat er - behalve het nastellen - geen onderhoud aan de ES-las nodig is. Dit zorgt voor een lagere LCC, omdat het nastellen korter duurt en minder vaak nodig is dan het huidige reguliere onderhoud.
Daarnaast verwachten we een langere levensduur van de ES-lassen, doordat we met de innovatie slagwerking en blinde vering voorkomen en daarmee onnodige slijtage:

- *Voor ES-lassen op rustig bereden trajecten: van 8 naar 15 jaar.*
- *Voor ES-lassen op druk bereden trajecten: van 3 naar 9 jaar.*

Door minder onderhoud en de langere levensduur nemen de LCC af, ondanks de hogere investeringskosten en maandelijkse monitoringskosten (zie meer detail in PvA Business Case).

Resultaten

Het is bevestigd dat na 1 à 2x tijdig nastellen de blinde vering en slagwerking onder de waarschuwingswaarde blijven. Hoelang dit effect blijft en de nastelfrequentie op langere termijn is nog niet inzichtelijk. Op basis van de metingen kan aangenomen worden dat die gelijk blijft, echter is dat niet met zekerheid te bevestigen totdat ES-lassen meerdere jaren met sensoren en ShimLift zijn uitgerust.
Aanbeveling is daarom zo snel mogelijk meerdere ES-lassen uit te rusten met sensoren en ShimLift, om zoveel mogelijk data te verzamelen gedurende een zo lang mogelijke periode.

7.2 Lopende begroting fase 2

In **Bijlage G** is de vergelijking opgenomen van de lopende begroting ten opzichte van de oorspronkelijke begroting voor fase, zoals opgenomen in [1].
Vanwege de vertrouwelijke aard van deze informatie, zijn de status, conclusies en de onderbouwing opgenomen in dezelfde bijlage.

7.3 Herijking Risicodossier

Hieronder staan de risico's 1 op 1 overgenomen uit [1] en [2].
Deze risico's hebben we bijgesteld op basis van de opgedane ervaringen en resultaten:

- Beheersmaatregelen zijn afgevallen of toegevoegd;
- Effect van beheersmaatregelen is bijgesteld;
- Risicokwantificering is bijgesteld.

Risico kwantificering	K. Kans	G1. Geld	G2. Tijd	G3. Kwaliteit	G4. Omgeving	G5. Veiligheid	**Score (KxΣG)**
Risico 1	**De nieuwe sensor werkt niet zoals verwacht**						
Beheers maatregelen (BM)	**BM1 (preventief):** We doorlopen in fase 2 een doordacht ontwikkel- en testtraject met Elitac Wearables BV. Zij hebben sinds 2012 meerdere producten ontwikkeld tot aan TRL9. **BM2 (preventief):** Wij richten een testopstelling in om te testen of iedere sensor die het spoor ingaat functioneert conform de verwachtingen; zo zorgen we dat de gevoeligheid en nauwkeurigheid van de sensor aansluit bij de daadwerkelijke behoeftes, en dat maximaal 1% van de sensoren uitvalt door productiefouten. ~~**BM3 (correctief):** We vallen terug op een al op de markt beschikbare sensor, zoals die van Rail1435. De kosten van deze sensor zijn significant hoger, waardoor de LCC een stuk minder gunstig is. De hogere kosten passen in onze begroting van fase 2 vanwege het beperkt aantal sensoren. Voor grootschalige toepassing kan bijvoorbeeld overwogen worden de sensoren na een stabiele periode van minimaal 1 jaar te verplaatsen naar een andere ES-las, om zodoende minder sensoren nodig te hebben en de kosten lager te houden.~~						
Initieel:	4	3	2	4	3	1	**52**
Rest (na BM's)	2	2	1	2	1	1	**14**
Ervaringen tijdens de praktijkproef:	BM1 heeft geleid tot de gewenste beheersing van dit risico: het traject heeft langer geduurd, maar de sensoren werken aan het eind van fase 2 zoals beoogd. BM2 is niet ingezet tijdens de praktijkproef, maar wel een wens om uit te voeren bij grootschalige toepassing van de sensor, als de kwaliteit van batches van meer dan 100 sensoren moet worden geborgd. BM3 is niet nodig geweest en daarom niet ingezet.						
Conclusie	Het risico is niet opgetreden, voornamelijk door BM1. Een testopstelling draagt positief bij aan kwaliteitsborging – en daarmee risicobeheersing – bij grootschalige toepassing van de sensoren.						

Risico 2	**Losraken van de sensor**						
Beheers maatregelen (BM)	**BM1 (preventief):** Tijdens fase 2 testen we de bevestiging in een labopstelling waarin we de sensor aan een echte dwarsligger bevestigen en op verschillende manieren belasten (fysiek, harde wind (met behulp van een ventilator) en onder invloed van zowel kou als warmte). **BM2 (preventief):** In het veld wordt de sensor stevig bevestigd aan de dwarsligger, door de sensor vast te schroeven of deze te lijmen. **BM3 (preventief):** In het algoritme bouwen we een onderdeel in dat detecteert wanneer de sensor losraakt, waarna direct een alarm wordt verstuurd zodat tijdig kan worden ingegrepen.						
Initieel:	3	2	3	3	3	4	**45**
Rest (na BM's):	1	2	3	3	3	4	**15**

Ervaringen tijdens de praktijkproef:	Voortuitlopend op het toepassen van maatregelen, zijn de mogelijke verbindingen uitgebreid theoretisch onderzocht, ook aan de hand van gesprekken met deskundigen (waaronder Paul Kampfraath en PGO-aannemers). Vervolgens is BM1 uitgevoerd in de opslagloods van Kampa BV te Oosterhout en in het wearable lab van Elitac Wearables te Utrecht. Op basis van de positieve ervaringen is gekozen voor een combinatie van bouten (in de daarvoor toegestane boorzones) in combinatie met lijmen (om zo goed mogelijk een 1-op-1 verbinding te hebben tussen sensor en dwarsligger). BM3 wordt meegenomen in de doorontwikkeling van de algoritmes, alhoewel de noodzaak ervoor niet aanwezig is.
Conclusie	Het risico is niet opgetreden; het beoogde effect van BM1 en BM2 is in de praktijk bewezen.

Risico 3	**PGO-aannemer voert ondanks signalen vanuit de sensor geen onderhoud uit**						
Beheers maatregelen (BM)	**BM1 (preventief):** ProRail krijgt toegang tot de dataomgeving met de sensorresultaten en trends/waarschuwingen worden met ProRail gedeeld (het medium hiervoor is nader af te stemmen). **BM2 (preventief):** Als onderdeel van fase 2 bepalen we – samen met ProRail – de benodigde aanpassingen in PGO-contracten. ProRail maakt op basis hiervan op voorhand nieuwe afspraken met PGO-aannemer (o.a.) over vergoeding van de extra werkzaamheden. **BM3 (preventief):** We sluiten met onze TVP's en aanpak zoveel mogelijk aan bij het reguliere onderhoudsproces. Sterker nog: visuele inspectie en nastellen kost minder tijd dan het reguliere onderhoud aan een ES-las (15 vs. 20 minuten per las).						
Initieel:	3	4	1	3	4	1	**39**
Rest (na BM's)	1	1	1	1	2	1	**6**
Ervaringen tijdens de praktijkproef:	BM1 wordt pas van toepassing bij commerciele toepassing van de sensor, dus na de praktijkproef. Het nastellen tijdens de praktijkproef is uitgevoerd door Kampa BV. BM2 heeft nog niet plaatsgevonden (zie Aanbevelingen). Er is gehandeld conform BM3 rondom de installatie van de sensoren en ShimLift.						
Conclusie	Het risico is niet opgetreden tijdens de praktijkproef. Om ditzelfde te garanderen tijdens commerciële toepassingen, is toepassen van BM2 noodzakelijk.						

Risico 4	**Kortere levensduursverlenging van ES-las dan verwacht op basis van huidige toepassingen van de ShimLift**						
Beheers maatregelen (BM)	**BM1 (preventief):** We verbeteren het algoritme ieder jaar, hier is gemiddeld 1 dag per week een programmeur voor beschikbaar vanuit de backoffice. De kosten hiervoor zijn verwerkt in de abonnementskosten. **BM2 (preventief):** We stellen een installatievoorschrift en handleiding op voor het installeren en bijstellen van de Shimlift. **BM3 (preventief):** We beschikken over een testomgeving (een werkplaats met daarin een spoorsectie waarop de inbouw gedaan kan worden) waar monteurs de handelingen kunnen oefenen voordat ze het in de praktijk moeten doen.						
Initieel:	3	4	2	1	3	1	**33**
Rest (na BM's):	1	4	2	1	3	1	**11**
Ervaringen tijdens de praktijkproef:	Het installatievoorschrift is beschikbaar bij Kampa BV (BM2). In de loods van Kampa BV – waar ook het installeren van de sensor kan worden getest – zijn dwarsliggers beschikbaar om het installeren van de ShimLift te oefenen. Op dit moment hebben deze 2 maatregelen nog geen direct effect op het beheersen van het risico, vooral omdat ShimLift in fase 2 door medewerkers van Kampa is geïnstalleerd en nagesteld, en dus nog niet door medewerkers van toekomstige opdrachtgevers, zoals PGO-aannemers. De combinatie van BM1, BM2 en BM3 wordt stapsgewijs doorgevoerd in aanloop naar de commerciële toepassing van de sensoren en ShimLift.						
Conclusie	Het risico is nog niet opgetreden, voornamelijk omdat de handelingen zijn verricht door Kampa-medewerkers die ervaring hebben het installeren en nastellen van ShimLift.						

Risico 5	Sensorbatterij sneller leeg dan theoretisch zou mogen worden verwacht						
Beheers maatregelen (BM)	**BM1 (preventief):** Gebruik van een accelerometer (low-power) om een aankomende trein te detecteren. Pas dan wordt de processor 'wakker' om metingen op te slaan. **BM2 (preventief):** Duurtesten tijdens de praktijkproef met verschillende meet- en uploadfrequenties. **BM3 (correctief):** Verlagen van de frequentie van meten, door de processor maximaal 1x per aantal uur wakker te maken, in plaats van bij iedere trein. Uiteindelijk is alleen de maximale verticale verplaatsing van het spoor van belang. **BM4 (correctief):** Verlagen van de frequentie van doorsturen van de data. Bij voorkeur ontvangen we dagelijks – en minimaal wekelijks - een batch met data. Zo hebben we tijdig zicht op onderhoudsbehoefte. Mocht dit te veel energie kosten, dan is het een optie de frequentie te verlagen naar bijv. 1x in de 2 of 4 weken. ~~**BM5 (correctief):** Overstappen op batterij met grotere capaciteit. Dit geniet niet de voorkeur i.v.m. mogelijk benodigde herontwerp van de behuizing omdat een grotere capaciteit gepaard gaat met een grotere fysieke batterij, die mogelijk niet past in de bestaande behuizing.~~						
Initieel:	3	3	2	3	2	1	**33**
Rest (na BM's):	1	2	2	2	2	1	**9**
Ervaringen tijdens de praktijkproef:	Op basis van BM1 en BM2 heeft Elitac Wearables een uitgebreid theoretisch energieverbruiksmodel opgesteld. De aannames voor het verbruik van de componenten is getoetst in de praktijk en in de aannames zijn in het model bijgesteld. Elitac heeft het verbruik tot op heden voor 80% geoptimaliseerd. BM3 en BM4 zijn beschikbaar als instelling in het actuele communicatieprotocol. BM5 is nog niet nodig geweest, de focus in de doorontwikkeling ligt op het selecteren van de juiste batterijproducent (met grotere betrouwbaarheid van beschikbare capaciteit), en niet op grotere batterijen.						
Conclusie	Het risico is reëel en kan nog niet beheerst zijn vanwege de korte looptijd van de daadwerkelijke praktijkproef. De in fase 2 geproduceerde sensoren werken nog steeds, na intensiever gebruik dan beoogd. Het optimaliseren van het low-energy verbruik is een blijvend aandachtspunt in de doorontwikkeling.						

Risico 6	Sensoren in de nabije toekomst niet meer leverbaar						
Beheers maatregelen (BM)	**BM1 (preventief):** We kopen ieder jaar het aantal componenten in om een jaarvoorraad aan sensoren op voorraad te hebben. We baseren ons hierbij op de in het voorgaande jaar aantal geïnstalleerde sensoren en extrapoleren dit aantal aan de hand van het ingeplande ES-las vervangingsonderhoud. **BM2 (preventief):** We hebben in onze business case rekening gehouden met iedere 5 jaar een herontwerp van componenten waarvan we weten dat die (op korte termijn) niet meer leverbaar zijn. ~~**BM3 (correctief):** Twee terugvalscenario's mocht de sensor - ondanks BM1 en BM2 - niet meer leverbaar zijn: 1) Overstap op andere sensoren die op de markt beschikbaar zijn. Dit heeft negatieve impact op de LCC, omdat die sensoren hogere levensduurkosten hebben. Daarnaast moet de dataomgeving heringericht worden om te werken met de nieuwe sensor. 2) Overstap op hogere frequentie van visuele inspectie en indien nodig direct nastellen. Dit brengt kosten met zich mee omdat de PGO-aannemer meer werk moet uitvoeren.~~						
Initieel:	3	3	3	1	3	1	**33**
Rest (na BM's):	1	2	1	1	1	1	**6**
Ervaringen tijdens de praktijkproef:	BM1 is nog niet van toepassing. Wel is in de selectie van de accelerometer rekening gehouden met een sensor die naar verwachting nog minimaal 10 jaar beschikbaar is. BM2 geldt nog steeds, alhoewel we nog geen definitieve keuze hebben gemaakt hoe herontwerp wordt bekostigd (bijv. vanuit de (eenmalige) inkomsten uit de marge van vanuit de verkoop van sensoren, dan wel vanuit de jaarlijks terugkerende inkomsten, dan wel vanuit aanvullende opdrachten van potentiële opdrachtgevers). BM3 is niet ingezet en verwachten we – op basis van de resultaten in fase 2 - ook niet meer in te hoeven zetten in de toekomst.						

Conclusie	Het risico is nog niet actueel, en daarmee op dit moment beheerst voor zover dit mogelijk is binnen de invloedssfeer van We-Boost, Elitac Wearables en Kampa..

Risico 7	**Shimlift wordt niet juist nagesteld**						
Beheers maatregelen (BM)	**BM1 (preventief):** Er is een handleiding beschikbaar voor het installeren en nastellen van de Shimlift. Tijdens fase 2 breiden we deze uit op basis van feedback van de betrokken PGO-aannemer(s). **BM2 (correctief):** Met de sensor is inzichtelijk of nastelling correct is uitgevoerd en wanneer aanvullend onderhoud nodig is. Hiermee wordt het effect voorspelbaar.						
Initieel:	2	2	2	1	2	1	**16**
Rest (na BM's)	1	2	1	1	2	1	**7**
Ervaringen tijdens de praktijkproef:	Het installatievoorschrift is beschikbaar bij Kampa BV (BM1). In fase 2 is ShimLift door medewerkers van Kampa geïnstalleerd en nagesteld. Er is dus nog geen feedback ontvangen van medewerkers van PGO-aannemers. BM2 is beschikbaar via de geïnstalleerde sensoren.						
Conclusie	Het risico is niet opgetreden.						

Risico 8	**Nieuwe sensor functioneert niet (op tijd) in spooromgeving**						
Beheers maatregelen (BM)	**BM1 (preventief)**: We beginnen de sensorontwikkeling niet van 0; we maken gebruik van een sensor die trillingen registreert in industriële omgeving (machines). De beschikbare tijd in fase 2 gebruiken we zodoende om deze sensor geschikt te maken voor langdurige toepassing (betere batterij) en spooromgeving (betere bevestiging). ~~**BM2 (correctief)**: We vallen voor de eerste toepassingen na fase 2 terug op een commerciële sensor. Dit levert tijdelijk hogere investeringskosten op en een langere terugverdientijd.~~						
Risico kwantificering	K. Kans	G1. Geld	G2. Tijd	G3. Kwaliteit	G4. Omgeving	G5. Veiligheid	**Score (KxΣG)**
Initieel:	3	5	1	1	5	1	**39**
Rest (na BM's):	1	4	1	1	1	1	**8**
Ervaringen tijdens de praktijkproef:	BM1 was het uitgangspunt, uiteindelijk bleek voor de beoogde toepassing een vrijwel gehele nieuwe ontwikkeling noodzakelijk. Voornaamste oorzaak was de gewenste batterijcapaciteit, dus veel hoger lag dan dat er ruimte was voor batterijen in de bestaande trillingssensor. Omdat de sensor aan het eind van fase 2 functioneert zoals beoogd, is BM2 niet meer van toepassing.						
Conclusie	Het risico is gedeeltelijk opgetreden: de praktijkproef is later gestart dan vooraf beoogd. Desalniettemin functioneert de sensor nu wel zoals beoogd. Het belangrijkste risico is daarom niet opgetreden.						

8 HERIJKING BUSINESS CASE

De oorspronkelijke business case is beschreven in [2]. In dit hoofdstuk volgt de herijking van de financiële haalbaarheid en het marktpotentieel van de gemonitorde nastelbare ES-las op basis van resultaten van de praktijkproef.

8.1 Impact resultaten op financiële haalbaarheid

Er zijn drie financiële componenten binnen de innovatie:

- Kosten ShimLift
- Kosten Sensor
- Gebruikskosten

Evaluatie tarief ShimLift

De oorspronkelijke inschatting voor het commerciële tarief voor Shimlift was €1.950 excl. BTW, uitgaande van een ShimLift op 3 dwarsliggers aan beide zijden van een ES-las en kosten per dwarsligger €325.

Omdat ShimLift een reeds vrijgegeven product is, zijn de kosten onveranderd - uitgezonderd de invloed van inflatie en marktwerking. De kosten voor de inbouw en het nastellen van ShimLift zijn beperkt:

- Het installeren wordt gecombineerd met het installeren van een nieuwe ES-las. Er wordt meegelift op een geplande TVP/BDS, waardoor enkel de inzet van medewerkers tot kosten leidt. Uitgaande van installatie van 0,5 uur met 2 man zijn de eenmalige kosten 1 uur €80 = €80 per ES-las
- Het nastellen van ShimLifts duurt gemiddeld 30 minuten per ES-las (ShimLifts op 4 dwarsliggers) en wordt gecombineerd met een ingepland onderhoudsnacht of BDS. Door het voorspellende algoritme is er voldoende tijd om dit te doen in een ingeplande onderhoudsnacht of BDS. De kosten zijn hiermee beperkt tot inzet van medewerkers: 1 man x 0,5 uur = 0,5 uur x €80 = €40 per ES-las.

Evaluatie tarief Sensor

De oorspronkelijke inschatting voor het commerciële tarief voor een sensor was €1.000 excl. BTW. Met het huidige ontwerp is de verwachting dat dit tarief haalbaar is:

- De productiekosten van de sensor: materiaal + assemblage
- Het terugverdienen van gedane en toekomstige investeringen, voor onder andere: doorontwikkeling, certificering en een testopstelling om de kwaliteit van grotere batches aan sensoren te controleren.

Evaluatie gebruikskosten

Naast eerdergenoemde kosten (in rekening gebracht middels aankoop of huur), zijn er terugkerende kosten (per week, maand of jaar). Hiervoor wordt een abonnement of licentiemodel gehanteerd. De kosten hiermee worden gedekt zijn onder andere:

- Data-abonnement
- Servicedesk
- Doorontwikkeling van de sensor, dataportal en dashboard

Oorspronkelijke inschatting was €30 per sensor per maand. Dit is voldoende voor het data-abonnement, naar verwachting is het aan de lage kant om ook de servicedesk en doorontwikkeling te bekostigen. Dit hangt af van het aantal sensoren dat is geïnstalleerd. Hoe

meer sensoren, hoe meer vraag naar service. Aan de andere kant geldt hoe meer sensoren, hoe lager de benodigde kosten voor doorontwikkeling per sensor.

8.2 Herijkte business case 2025 (TCO)

De TCO lijkt op basis van de resultaten van de praktijkproef gunstiger dan aangenomen in de business-case uit september 2023. Het jaarlijkse onderhoud aan de ES-las is – bij toepassen van de innovatie – mogelijk lager dan aangenomen in de oorspronkelijke TCO: waar rekening werd gehouden met 2x nastellen in het 1e jaar lijkt een gemiddelde van 1 tot 1,5x voldoende.

Daarnaast zijn er in de praktijk meer business cases dan alleen de geschetste toepassing om jarenlang de blinde vering en slagwerking te monitoren. Bijvoorbeeld:

- Korte nulmeting om de staat van assets bij overname van een PGO-contract te bepalen.
- Korte meting van een paar maanden om te bepalen of een puntbron (zoals een ES-las) de bron kan zijn van ontvangen klachten van trillingshinder.
- Indien blijkt dat het effect van ShimLift jarenlang werkt, kan ook worden besloten de sensor na bijvoorbeeld een half jaar of jaar na installatie van ShimLift te verwijderen en op een andere locatie te installeren. Belangrijk hierbij is dat de locatie van de sensor correct wordt geregistreerd. Daarom is de sensor uitgerust met GPS. Deze functie wordt nog niet gebruikt, maar kan worden aangeroepen als de benodigde firmware en software wordt ontwikkeld.

8.3 Herijkte doorkijk potentiële markten en toepassingsgebied

De meerwaarde van de innovatie als deze wordt toegepast bij een ES-las is in de praktijkproef aangetoond en blijft daarom onveranderd hoog. Er zijn in potentie ruim 3.800 locaties in Nederland waar ES-lassen trillingshinder veroorzaken bij bebouwing binnen 75 meter van het spoor. Kijkend naar de levensduur van de Shimlifts (30 jaar) en sensoren (8 jaar) is er tot aan de volledige invoering van ERTMS (gepland in 2040) markt voor ± 24.000 Shimlifts (6 dwarsliggers per locatie) en 3.800 sensoren (1 per locatie).

Daarnaast wordt ShimLift ook in België en Duitsland veelvuldig toegepast bij **ES-lassen**, daar is het product opgenomen in OVS. Hier wordt nog geen gebruik gemaakt van actieve monitoring met sensoren en algoritme. Ook in deze landen zijn daarom potentiële markten voor toepassing van de geïntegreerde oplossing met sensor en algoritme.

ShimLift wordt gebruikt voor het detecteren van blinde vering bij **transitiezones**, bijvoorbeeld bij de overgang van aardebaan naar betonnen constructie. Ook hier wordt nog niet gemonitord; dit is dus ook potentiële markt voor toepassing van de geïntegreerde oplossing met sensor en algoritme.

Daarnaast horen wij vanuit de markt (PGO-aannemers) dat de toepassing bij **puntstukken** een potentiële nieuwe markt is voor de geïntegreerde oplossing. Volgens de website van ProRail zijn er in Nederland ±7.000 puntstukken. Uitdaging zijn de vele variaties in de benodigde wiggen, vanwege verschillende voetbreedtes van de puntstukken. De snelle ontwikkelingen op het gebied van 3D printen biedt naar alle verwachting kansen om in de nabije toekomst deze variaties voor acceptabele kosten te produceren.

Nieuwe toepassing 1: Bij trillingsoverlast de sensor kort inzetten

- 1 maand voormeting
- Bepalen blinde vering en slagwerking
- Installatie ShimLift

- Nameten totdat blinde vering en slagwerking onder waarschuwingswaarde blijven gedurende minimaal 1 maand. Verwachte duur nameting: 2-3 maanden.

Nieuwe toepassing 2: Nulmeting bij overdracht PGO-contract

- Bepalen actuele blinde vering en slagwerking, om afspraken over te maken tussen PGO-aannemers en ProRail
- Bij overschrijding van de maximale waardes, overwegen installatie van ShimLift. Waarbij de voorkeur blijft ShimLift te installeren in combinatie met volledige vervanging van de ES-las.

9 CONCLUSIES, AANBEVELINGEN EN VERVOLG

9.1 Conclusies

De combinatie van sensor met ShimLift werkt in de praktijk goed: als Shimlift wordt geïnstalleerd bij verouderde ES-lassen, nemen de invering, slagwerking en trillingen af.

Locatie + spoor	Moment	Datum	Blinde vering (mm)	Slagwerking (m/s^2)	Afname trillingen reizigerstreinen	Afname trillingen goederentreinen
1 - MK	Installeren sensor	10 jan. 2025	4,9	570		
Sensor 7	Installeren ShimLift	13-14 mrt. 2025	- *(geen data)*	- *(geen data)*	2 - 5 dB tussen 15 en 50 Hz	2 - 5 dB tussen 15 en 50 Hz
Geocode 121	Vervangen ES-las	14-15 mrt. 2025	1,4 (-3,5)	310 (-260)	3 - 7 dB tussen 15 en 40 Hz	2 - 4 dB tussen 12 en 30 Hz
2 - DI	Installeren sensor	10 jan. 2025	0,8	300		
Sensor 3	Installeren ShimLift	30-31 jan. 2025	1,1 (+0,3)	500 (+200)	-1 tot -3 dB tussen 12 en 60 Hz	-1 tot -5 dB tussen 12 en 60 Hz
Geocode 123	Nastellen ShimLift	13-14 mrt. 2025	0,8 (-)	370 (-130)	-1 tot +1 dB tussen 5 en 60 Hz	-1 tot +1 dB tussen 5 en 60 Hz
2 - AI	Installeren sensor	10 jan. 2025	1,9	480		
Sensor 5	Installeren ShimLift	30-31 jan. 2025	1,4 (-0,5)	420 (-60)	-1 tot -3 dB tussen 10 en 80 Hz	1 - 3 dB tussen 10 en 80 Hz
Geocode 123	Nastellen ShimLift	13-14 mrt. 2025	0,4 (-1,5)	90 (-330)	-1 tot +1 dB tussen 5 en 60 Hz	-1 tot +1 dB tussen 5 en 60 Hz
3 - DH	Installeren sensor	10 jan. 2025	2,0	500		
Sensor 8	Installeren ShimLift deel 1	13-14 mrt. 2025	1,6 (-0,4)	540 (+40)	-1 tot -5 dB tussen 8 en 40 Hz	-1 tot -2 dB tussen 5 en 50 Hz
Geocode 123	Installeren ShimLift deel 2	18-19 mrt. 2025	2,2 (+0,6)	550 (+10)	-1 tot +1 dB tussen 5 en 80 Hz	-1 tot +1 dB tussen 5 en 80 Hz
	Nastellen ShimLift	24-25 mrt. 2025	1,1 (-0.9)	300 (-250)	0 tot 2 dB tussen 10 en 50 Hz	-1 tot +1 dB tussen 10 en 50 Hz

In dit overzicht valt het volgende op:

1. Het effect van het installeren en nastellen van ShimLift treedt vooral op bij hogere trillingsfrequenties (vaak tussen de 15 en 50 Hz, soms iets hoger of lager).
2. Alleen bij locatie 1 is sprake van een goed voelbaar effect. Hier is de invering ook het sterkst afgenomen, voor alle andere locaties was maar zeer beperkt sprake van invering voorafgaand aan het plaatsen van ShimLift.
3. Bij de andere locaties waar de invering al laag was(minder dan 2mm), is geen sterke toe- of afname van de trillingen waargenomen na installatie van ShimLift. Soms nemen de trillingen iets toe, soms iets af.
4. Globaal geldt: als de invering afneemt, nemen de trillingen bij 10 tot 30 Hz af, als de slagwerking afneemt, nemen de trillingen bij hogere frequenties (30 tot 60 Hz) af. Hoe sterker de afname van de invering of slagwerking, hoe groter de afname van de trillingen.

Het geeft inzicht en controle over de staat van de asset (ES-las), en ook in het voorkomen en/of verergeren van trillingshinder. De sensor geeft een signaal als een ingestelde grenswaarde wordt overschreden, waardoor een PGO-aannemer tijdig maatregelen kan treffen. Onderhoud krijgt hierdoor het beoogde preventieve in plaats van het actuele correctieve karakter.

Het installeren en nastellen van zowel de sensor als ShimLift is veilig, praktisch en efficiënt uit te voeren. Na installatie hoeft de PGO-aannemer of assetmanager niet meer de baan in om blinde vering waar te nemen, terwijl er wel dagelijks inzicht in is i.p.v. slechts 1x per half jaar nadat de meettrein het spoor heeft ingemeten.

Concreet zijn 3 van de 4 onderzoeksvragen positief beantwoord en is er met name meer data nodig om onderbouwd antwoord te geven op openstaande vragen.

9.2 Aanbevelingen en vervolg

Naar aanleiding van het doorlopen ontwikkelproces, de praktijkproef en de evaluatie van de resultaten zien wij meerdere aanbevelingen. Het belangrijkste doel is meer zicht krijgen op het lange termijn effect van ShimLift op de conditie (en degradatie) van de ES-las en bijbehorende ontwikkeling in blinde vering en slagwerking. De praktijk moet uitwijzen hoe lang deze stabiel blijven.

1. Data blijven verzamelen met de geïnstalleerde sensoren, om het voorspellende algoritme verder te ontwikkelen. Hoe meer data, hoe betrouwbaarder het voorspellende effect van het algoritme.
2. De sensor laten kalibreren door een externe partij zoals Eurolab of TUV.
3. Meer sensoren installeren bij andere ES-lassen die zijn of worden uitgerust met ShimLift, om zodoende te achterhalen wat het effect van ShimLift op de lange termijn is. Met ProRail verkennen welke mogelijkheden er zijn, bijvoorbeeld bij op de planning staande vervanging van ES-lassen in lopende PGO-contracten.
4. Op basis van meer data bepalen bij welk niveau van blinde vering en slagwerking de trillingen in de omgeving onaanvaardbaar worden.
5. Een functioneel dashboard ontwikkelen om een beter en aantrekkelijker beeld van de commerciële toepassing te presenteren aan potentiële gebruikers.
6. Sensor op laten nemen in de Rail Infra Catalogus van ProRail, waarvoor onder andere CE-certificering nodig is.
7. De sensor en ShimLift doorontwikkelen om toepassingsmogelijkheden te verbreden, waaronder bij andere railassets, zoals bij puntstukken in wissels en baanovergangen.
8. Met ProRail eventuele aanpassingen in PGO-contracten bespreken en bepalen, afhankelijk van op welke termijn de sensor een vrijgegeven product is (Aanbeveling 6).

Hiervoor zijn een aantal concrete vervolgstappen gedefinieerd, die we ook graag in nader overleg met ProRail verder bespreken:

a. De geïnstalleerde sensoren zo lang mogelijk laten liggen.
b. Op meer plekken waar ShimLift wordt gebruikt een sensor installeren.
c. Budget ophalen voor de doorontwikkeling, bijvoorbeeld via potentiële opdrachtgevers en subsidietrajecten.
d. De huidige sensor klaar maken voor commerciële verkoop, waarvoor onder andere CE-certificering een voorwaarde is.
e. Gesprekken voeren met potentiële opdrachtgevers, zoals ProRail, PGO-aannemers en hun buitenlandse collega's (specifiek België en Duitsland), om te achterhalen en concretiseren waar bij hen toegevoegde waarde zit voor inzicht in de staat van railassets.

BIBLIOGRAFIE

[1] We-Boost en Kampa, „SBIR Nastelbare ES-las fase 1 - PvA Praktijkproef," Utrecht, 2023.

[2] We-Boost en Kampa, „SBIR Nastelbare ES-las fase 1 - PvA Business Case," Utrecht, 2023.

BIJLAGEN

Bijlage A. Eindrapportage IBS-trillingsmetingen Nastelbare ES-las, van Cohere Consultants d.d. ~~21 juni~~7 augustus 2025 *(toegevoegd als separaat PDF-document)*

Bijlage B. Installatievoorschrift sensor *(toegevoegd als separaat PDF-document)*

Bijlage C. *VERTROUWELIJK* - Samenvatting hardware ontwerp sensor *(toegevoegd als separaat PDF-document)*

Eigendom van We-Boost en Kampa.

Bijlage D. *VERTROUWELIJK* - Eindrapport sensorontwikkeling Elitac Wearables *(toegevoegd als separaat PDF-document)*

Eigendom van We-Boost en Kampa.

Bijlage E. *VERTROUWELIJK* - Datasheet acceleratiesensor *(toegevoegd als separaat PDF-document)*

Eigendom van We-Boost en Kampa.

Bijlage F. *VERTROUWELIJK* - Toelichting op de ontwikkelde algoritmes *(toegevoegd als separaat PDF-document)*

Eigendom van We-Boost en Kampa.

Bijlage G. *VERTROUWELIJK* - Evaluatie begroting fase 2 *(toegevoegd als separaat PDF-document)*

Eigendom van We-Boost en Kampa.