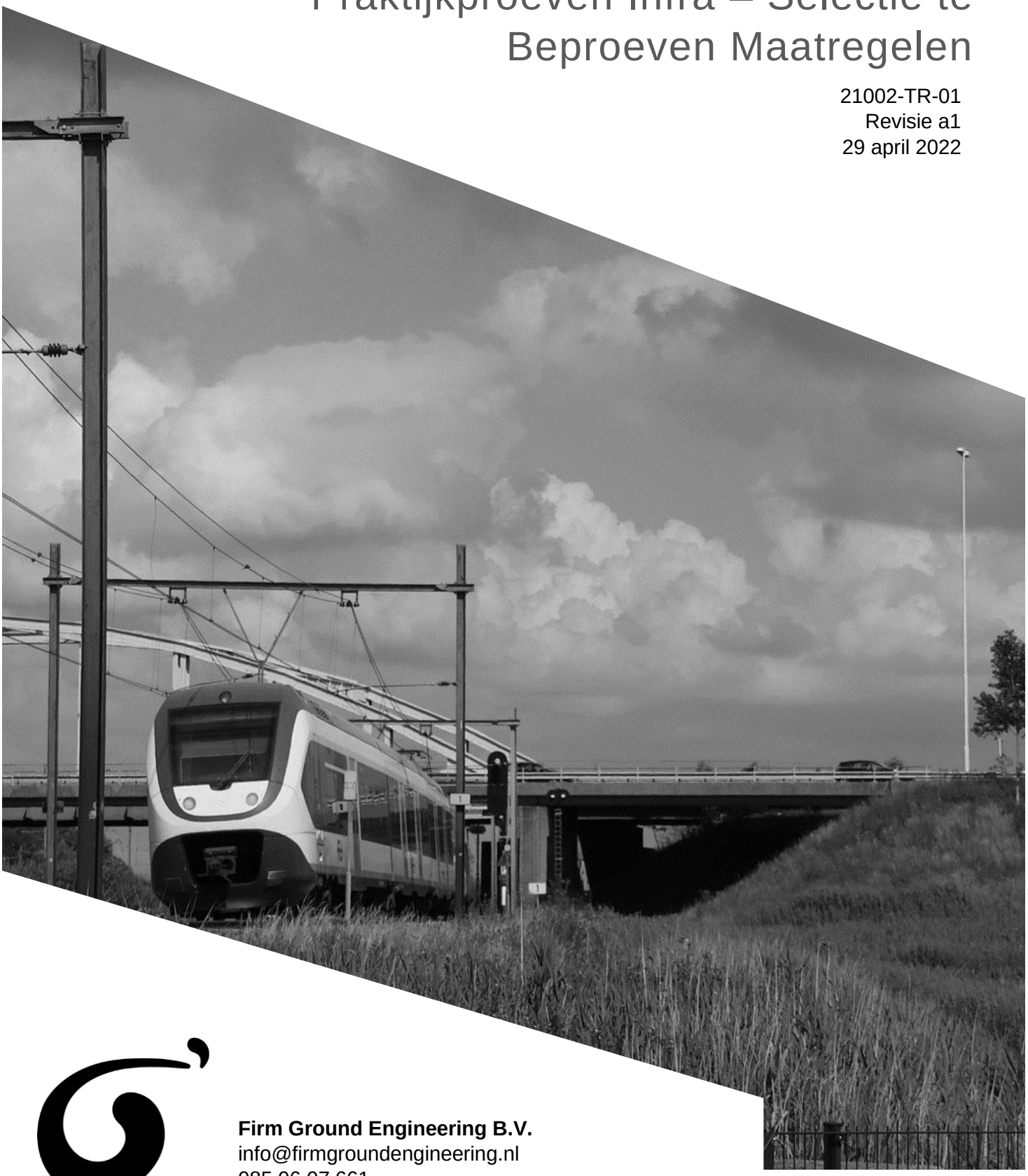
Innovatieagenda Bronaanpak Spoortrillingen

Praktijkproeven Infra – Selectie te Beproeven Maatregelen

21002-TR-01
Revisie a1
29 april 2022



Firm Ground Engineering B.V.
info@firmgroundengineering.nl
085 06 07 661

Innovatiagenda Bronaanpak Spoortrillingen
Praktijkproeven Infra – Selectie te beproeven maatregelen

21002-TR-01
Revisie A, 29 april 2022

Opdrachtgever: ProRail
Contactpersoon: Rinka van Dommelen

Auteur: Ronald Damen

Firm Ground Engineering B.V.
Markiezenhof 20
6715 LK Ede
085 0607 661
info@firmgroundengineering.nl

Kvk 80510841
BTW NL861697376B01
IBAN NL43RABO0359935338

Inleiding

Achtergrond

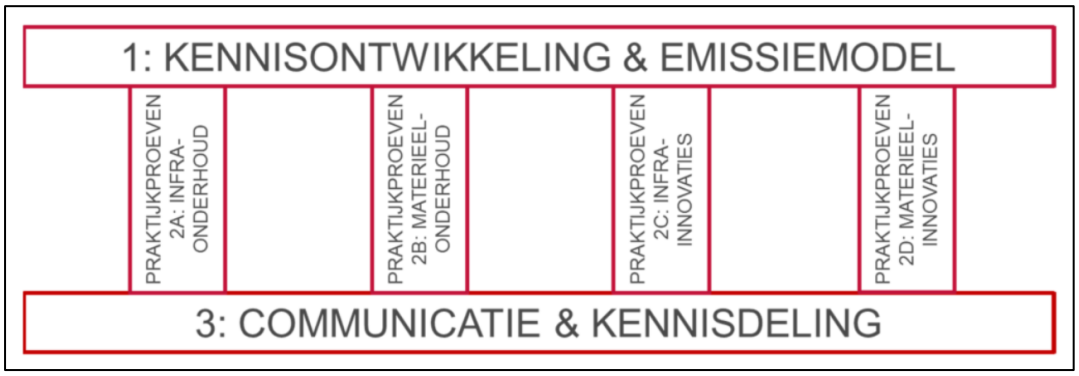
ProRail werkt in opdracht van het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (MinIenW) aan de Innovatieagenda Bronaanpak Spoortrillingen (IBS).

Het IBS omvat drie hoofd onderdelen (zie figuur 1):

1. Kennisontwikkeling en ontwikkeling van een emissiemodel;
2. Praktijkproeven;
3. Communicatie en kennisdeling.

Deze praktijkproeven (onderdeel 2) zijn opgedeeld in de volgende categorieën:

2A. Praktijkproeven infra-onderhoud;
2B. Praktijkproeven materieel-onderhoud;
2C. Praktijkproeven infra-innovaties;
2D. Praktijkproeven materieel-innovaties.



Figuur 1, Onderdelen Innovatieagenda Bronaanpak Spoortrillingen [26]

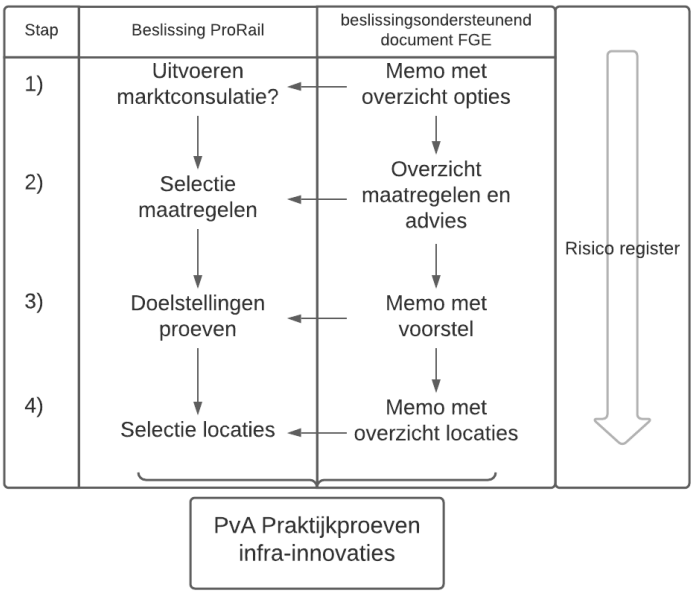
Firm Ground Engineering BV (FGE) heeft van ProRail opdracht gekregen een Plan van Aanpak (PvA) te ontwikkelen voor onderdeel 2C: Praktijkproeven infra-innovaties.

Doelstelling

De doelstelling van de praktijkproeven is door ProRail geformuleerd als:

Beschikbaar hebben van beslisinformatie (effecten, neveneffecten, kosten) voor bredere implementatie van potentiële bronmaatregelen

Om te komen tot dit PvA heeft FGE met ProRail een proces vastgesteld (figuur 2) [1].



Figuur 2, Processchema [1]

In stap 2 van dit proces wordt een selectie gemaakt van de maatregelen die beproefd gaan worden. Daartoe stelt FGE een overzicht met maatregelen op en geeft een advies, in overleg met het programmateam IBS. Dit is in dit rapport beschreven.

Het doel van dit rapport is:

1) Geven van een overzicht van huidig beschikbare trillingsreducerende maatregelen die beproefd kunnen worden als praktijkproeven infra-innovaties;
2) Vaststellen van selectiecriteria;
3) Geven van advies aan ProRail m.b.t. de geschikte maatregelen voor beproeving voor de eerste ronde praktijkproeven;
4) Geven van advies aan ProRail m.b.t. de maatregelen waarvan meer informatie vereist is.

Momenteel is nog geen marktconsultatie uitgevoerd. Deze wordt in het tweede kwartaal 2022 voorbereid. Dit rapport behandelt maatregelen die reeds bekend zijn. Resultaten van de marktconsultatie zullen separaat worden opgepakt.

Dit rapport is in nauw overleg met het programmateam IBS opgesteld en dient ter ondersteuning van de besluitvorming door ProRail.

Overzicht Maatregelen

Op basis van beschikbare literatuur, expert interviews en input van het programmateam IBS, heeft FGE een overzicht van maatregelen opgesteld. Het overzicht is een levend document. De huidige versie van dit document (Revisie A) is de eerste versie.

Omdat de scope van dit project beperkt is tot proeven met innovatieve trillingsreducerende maatregelen aan de infrastructuur (“infra-innovaties”) zal hierna slechts worden gesproken over de maatregelen aan de infrastructuur (baan, dwarsliggers en rails).

Desktop studie

De praktijkproeven infra-innovaties staan niet op zichzelf. In het (recente) verleden is reeds een aantal onderzoeken uitgevoerd. Een deel van deze onderzoeken is uitgevoerd als onderdeel (of ter voorbereiding op) de IBS. Anderen hebben in internationaal verband plaatsgevonden.

In 2008 is een Kennisdocument samengesteld met een samenvatting van de beschikbare kennis op het gebied van spoortrillingen en laagfrequent geluid (ProRail, 2008). Dit document wordt momenteel herzien (ProRail, 2020c). Ook heeft UIC een “state-of-the-art” rapport met betrekking tot spoortrillingen uitgebracht (UIC, 2017).

In het kader van het Railway Induced Vibration Abatement Solutions Collaborative (RIVAS) project is een overzicht van kansrijk geachte trillingsreducerende maatregelen in het spoor gepubliceerd (RIVAS, 2011). In opdracht van ProRail is een Maatregelencatalogus Spoortrillingen samengesteld (Grontmij, 2016), waarin diverse trillingsreducerende maatregelen zijn samengevat. Deze is aangevuld met een overzicht van dynamische en niet-dynamische nadelige effecten van trillingsreducerende maatregelen (Deltares, 2017a; 2017b). Eveneens zijn recent inventarisaties naar mogelijke trillingsreducerende maatregelen in Houten (Witteveen+Bos, 2018) en in Vught (Satis, 2018) uitgevoerd.

In het kader van de IBS heeft ProRail een aantal ingenieursbureaus en kennisinstellingen gevraagd om hun visie en advies ten aanzien van de IBS te geven, inclusief een top 3 van meest kansrijke innovaties voor het emissiemodel en de praktijkproeven (Arcadis, 2018; Cauberg Huygen, 2018; DGMR, 2018; Movares, 2018; M+P, 2018; Ricardo, 2018; Level, 2018; Cohere, 2019; TU Delft, 2019).

Deze onderzoeken zullen gebruikt worden om potentiële bronmaatregelen en hun beschikbare beslisinformatie in kaart te brengen en hun geschiktheid voor de praktijkproeven te beoordelen.

Er worden reeds trillingsreducerende maatregelen toegepast in het spoor. Daarin kunnen 3 groepen onderscheiden worden:

1. Proeven met (potentieel) trillingsreducerende maatregelen. Hierbij is het hoofddoel te komen tot betere beslisinformatie. Voorbeelden zijn de proef met Shimlifts op de Brabantroute (Movares, 2020) en de proef met een STRAIL overweg in Dorst (Witteveen+Bos, 2021) In Oisterwijk worden proeven met undersleeper pads uitgevoerd met als doel het verder vergroten van de kennis omtrent deze maatregel (WeBoostData, 2021);

2. Projecten met trillingsreducerende maatregelen. Hierbij is het hoofddoel dus het reduceren van trillingen, en niet in de eerste plaats om betere beslisinformatie te genereren. Een voorbeeld is de toepassing van undersleeper pads in Zevenaar (WeBoostData 2021);
3. Maatregelen en proeven waarbij trillingsreductie niet het hoofddoel is, maar wel mogelijk optreedt. Een voorbeeld is de proeftuin met duurzame (kunststof) dwarsliggers in Zwolle (Fugro, 2021).

Overdrachtsmaatregelen, zoals ondergrondse trilingsreducerende constructies en spoorsloten, alsmede maatregelen aan woningen en aan het spoorwegmaterieel vallen buiten het kader van de praktijkproeven infra-innovaties en zullen hier niet behandeld worden.

Expert interviews

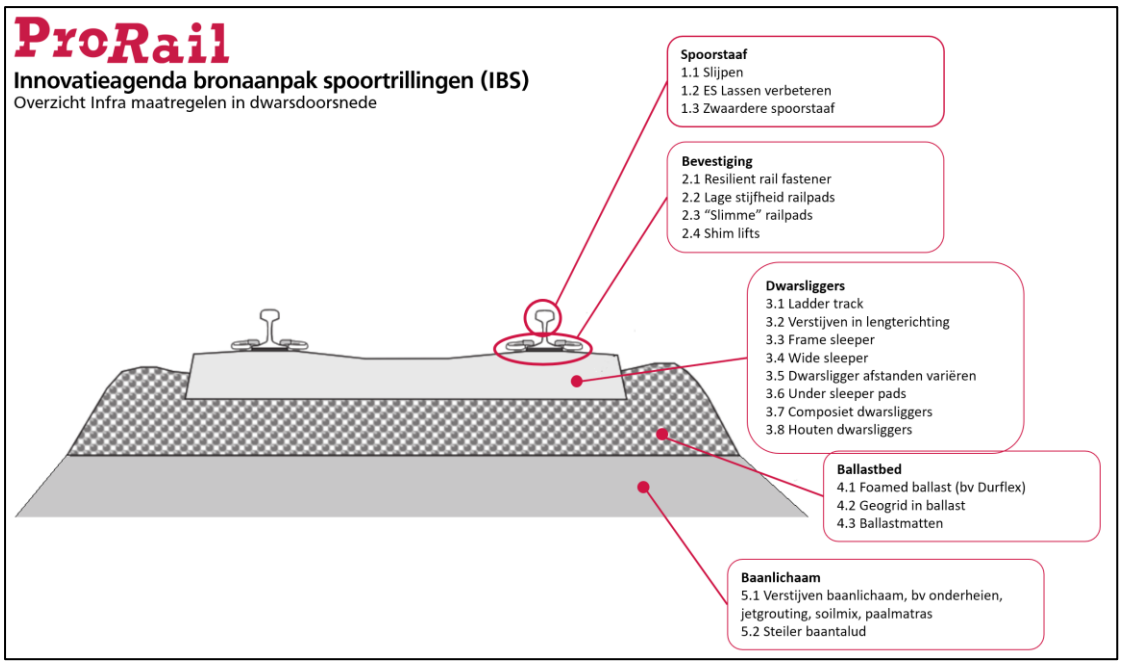
Naast literatuur onderzoek zijn de volgende interviews met externe experts en marktpartijen gehouden:

- STEM werkgroep:
  - Michaël Steenbergen (TU-Delft);
  - Paul Holscher (Deltares);
  - Bruno Zuada Coelho (Deltares);
  - Christ Geurts (TNO);
- Deutsche Bahn – Rüdiger Garburg en Bernd Asmussen;
- SBB – Roger Müller;
- Voestalpine RailPro – Erno Chevalier en Sander Brinkhuis;
- Hyperion – Jörg Frenzel.

Deze interviews zijn gebruikt om het overzicht aan te vullen met effecten en neveneffecten. Daarnaast is uitgebreid gesproken met interne deskundigen binnen ProRail.

Maatregelen

De geïdentificeerde maatregelen uit de literatuur en gesprekken met interne en externe experts heeft geleid tot het maatregelen overzicht in figuur 3. Deze maatregelen worden in meer detail besproken in Bijlage A.



Figuur 3, Overzicht maatregelen in dwarsdoorsnede spoor

Selectie Maatregelen

In dit hoofdstuk wordt de selectie van de te beproeven maatregelen besproken. Eerst worden de selectiecriteria vastgesteld. Daarna wordt de score van de maatregelen op de criteria kort toegelicht en tenslotte wordt een eerste keuze uit de te beproeven maatregelen voorgesteld.

Selectiecriteria

In overleg met ProRail zijn criteria vastgesteld voor de selectie van te beproeven maatregelen. Deze criteria worden onderscheiden in:

- Knock out criteria – hier moet aan voldaan worden om in aanmerking te komen;
- Overige criteria – hierop worden maatregelen onderling vergeleken;

De criteria zijn samengevat in tabel 1 en worden hieronder nader toegelicht.

Tabel 1, Selectiecriteria

Categorie	Criterium
Knock Out Criteria	Draagt een proef bij aan vergroten beslisinformatie?
	Betreft het een bronmaatregel?
	Is de maatregel toepasbaar in boven- of onderbouw?
	Is er voldoende capaciteit om voor een proef te leveren?
	Is er voldoende kennis en capaciteit bij aannemers om de proef uit te voeren?
	Is *Toestemming Voor Gebruik* (TVG) waarschijnlijk (of aanwezig)?
	Is het leverbaar binnen 1-2 jaar (*shelf-ready*)?
Overige Criteria	Wat is de verwachte doeltreffendheid van de maatregel?
	Wat is de haalbaarheid voor brede implementatie (kosten/baten)?
	Wat is de kwaliteit van het theoretisch model (*Proof of Concept*)?
	Wat is de verwachte bijdrage aan de beslisinformatie?
	Wat is het verwachte toepassingsbereik?
	Wat zijn effecten en/of neveneffecten (winst of nadelen op andere gebieden)

Knock Out Criteria

Draagt een proef bij aan vergroten beslisinformatie?

De doelstelling van de praktijkproeven is het vergroten van de beschikbare beslisinformatie. Een proef met een maatregel dient hier een bijdrage aan te leveren.

Betreft het een bronmaatregel?

De IBS beperkt zich tot bronmaatregelen. Overdrachtsmaatregelen en maatregelen aan de ontvangende kant (bv woningen) zijn geen onderdeel.

Is de maatregel toepasbaar in boven- of onderbouw?

Maatregelen in de ondergrond, en aan materieel vallen buiten de scope van de praktijkproeven infrastructuur.

Is er voldoende capaciteit om voor de proef te leveren?

Leveringszekerheid van materiaal voor de maatregel moet voldoende zijn om de proef uit te kunnen voeren.

Is er voldoende kennis en capaciteit bij aannemers om de proef uit te voeren?

Om de proef in het spoor in te bouwen is een zekere kennis en capaciteit bij spooraannemers vereist, eventueel met ondersteuning van leveranciers.

Is Toestemming Voor Gebruik (TVG) waarschijnlijk of aanwezig?

Niet alles mag zomaar in het spoor worden toegepast. ProRail toetst bijvoorbeeld of een ingreep veilig en duurzaam is. Een maatregel moet Toestemming voor Gebruik (TVG) krijgen van ProRail voor hij in het spoor toegepast mag worden. Dit de lichte variant van Vrijgave voor Gebruik.

Is het leverbaar binnen 1 – 2 jaar (shelf ready)?

Maatregelen moeten binnen 1 à 2 jaar uit te voeren zijn. Maatregelen die hiervoor in aanmerking komen (de eerste selectie) moeten daarom snel leverbaar zijn. Indien er nog een ontwikkeltraject aan vast hangt, kunnen ze mogelijk worden beproefd in het tweede deel van proeven met nieuwe innovaties.

Overige Criteria

Wat is de verwachte doeltreffendheid van de maatregel?

Een maatregel zal een zekere doeltreffendheid moeten hebben om trillingen succesvol te reduceren. Reductie moet verwacht worden binnen het frequentiebereik waar trillingen als hinderlijk worden ervaren.

Wat is de haalbaarheid voor brede implementatie?

Een maatregel moet na succesvolle proeven geïmplementeerd kunnen worden. Kosten / baten spelen hier mee.

Wat is de kwaliteit van het theoretisch model (Proof of Concept)?

Om een succesvolle proef uit te kunnen voeren is inzicht nodig in de fysische werking van de maatregel. Een goed theoretisch model maakt het makkelijker om een te toetsen

hypothese te formuleren voor de proef. Een goede hypothese is daarom noodzakelijk voor de proef.

Wat is de verwachte bijdrage aan de beslisinformatie?

Het doel van de proeven is het vergroten van de beschikbare beslisinformatie. Daarom wordt gekeken wat de verwachte bijdrage van een proef is aan de beslisinformatie.

Wat is het verwachte toepassingsbereik?

Toepassingsbereik wordt hier gehanteerd als zowel fysiek toepassingsbereik (b.v. ondergrond soort) als op frequentiebereik (op welke frequenties is een maatregel effectief).

Wat zijn effecten en/of neveneffecten (naast effecten op trillingen)

Naast effect op trillingen heeft een maatregel mogelijk positieve en/of negatieve effecten op andere zaken. Winst kan er te behalen zijn op het raakvlak met bijvoorbeeld baanlichaam of levensduur. Bij neveneffecten is te denken aan een toename in geluidsoverlast, andere milieu effecten of onderhoudskosten.

Score Maatregelen

De score van de maatregelen op de criteria is samengevat in tabel 2, en in detail toegelicht in Bijlage A.

Tabel 2, Score maatregelen op criteria

Knock Out Criteria	1. Spoorstaaf			2. Bevestiging				3. Dwarsliggers								4. Ballastbed			5. Baanlichaam	
	Slijpen	ES Lassen	Zwaardere spoorstaaf	Resilient rail fastener	Lage stijfheid railpad	Slimme railpad	Shimlifts	Ladder track	Verstijven in lengterichting	Frame sleeper	Wide sleeper	Dwarsliggerafstand varieren	Under sleeper pads	Composiet dwarsliggers	Houten dwarsliggers	Foamed ballast	Geogrid in ballast	Ballast matten	Verstijven baanlichaam	Steil baantalud
Draagt proef bij aan vergroten beslisinformatie?	×	✓	✓	×	×	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓/×	✓/×	✓	✓	✓	✓	×	✓
Bronmaatregel?	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓/×	✓/×
Toepasbaar in boven- of onderbouw?	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Voldoende capaciteit om voor proef te leveren?	✓	✓	✓	✓	✓	×	✓	?	✓	?	?	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Voldoende kennis/capaciteit bij aannemers om proef uit te voeren?	✓	✓	✓	✓	✓	×	✓	?	✓	?	?	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
TVG voor proef waarschijnlijk?	✓	nvt	?	✓	✓	×	✓	?	✓	?	✓	×	✓	✓	✓	?	✓	✓	✓	✓
Leverbaar binnen 1-2 jaar? (shelf ready)	✓	nvt	✓	✓	✓	×	✓	?	✓	?	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Overige Criteria																				
Verwachte doeltreffendheid van maatregel	--	+	-	--	-	+	+	+/-	+/-	+/-	+/-	+/-	+	+/-	+/-	+/-	+/-	+/-	+/-	+/-
Haalbaarheid voor brede implementatie	++	+/-	-	+	+	--	+	-	+	?	?	-	+	-	-	+/-	+	+/-	+	+
Kwaliteit van theoretisch model (Proof of concept)	+	+	+	+	+	+/-	+	+	+/-	+	+	+	+/-	-	-	+/-	+	+/-	+	+/-
Verwachte bijdrage aan beslisinformatie	--	+/-	+/-	-	-	nvt	+/-	+	+	+	+	+	+/-	-	+	+	+	+	+/-	+
Verwacht toepassingsbereik	--	+	+/-	--	--	?	+	+/-	+	+/-	+/-	+/-	+/-	-	-	+/-	+/-	+/-	-	-
(Neven)effecten (naast trillingsreductie)	+/-	+	+/-	-	-	?	+	-	+/-	-	-	-	+	+	-	+/-	+	-	+/-	+/-

Selectie Maatregelen

Op basis van de beschrijving van de maatregelen, de score op de criteria en interne overleggen met het programmateam IBS, bevelen we het volgende aan:

De volgende maatregelen worden geschikt geacht voor **snelle toepassing in een proef** (binnen nu en 2 jaar):

Shimlifts

Het betreft hier een aanvullende proef op eerdere metingen (Movares, 2020), waarbij de nieuwe proef gericht is op het in kaart brengen van het effect van shimlift op trillingen bij de bron en op maaiveld. Huidige spoorligging is een belangrijke factor om vooraf goed in kaart te brengen en bepalend voor de locatie keuze. Momenteel worden shimlifts al succesvol toegepast om te spoorligging te verbeteren, deze kennis en gedeeld belang zetten we in bij de proef.

Houten dwarsliggers

Er wordt ingezet om op verschillende locaties trillingsmetingen uit te voeren bij een al geplande bovenbouw vernieuwing (BBV). De eerste meting zal plaatsvinden door Cauberg Huyten, in opdracht van ProRail, in Nunspeet in juni 2022. Bij deze BBV vindt de vervanging deels plaats door betonnen dwarsliggings incl USP's. Doel is inzicht te krijgen in het effect op trillingen van houten dwarsliggers versus betonnen dwarsliggers.

Geogrid in ballast

Deze maatregel wordt al toegepast vanuit geotechnische belangen. Daarom is het in kaart brengen van (neven)effecten op trillingen gewenst. Deze proef kan worden uitgevoerd in combinatie met een bovenbouwvernieuwing, waarbij geogrid voorzien is. Voor een voorspelling van de (neven)effecten kan worden samengewerkt met één of meerdere leveranciers van geotextielen (bv. Tensar of Ten Cate). De hypothese is dat door het grid de spoorligging langer stabiel blijft, de ligging minder degradeert, wat een positief effect heeft op trillingen. Ook treedt betere belastingspreiding op.

Van de volgende maatregelen is **extra informatie vereist** alvorens een proef kan worden uitgevoerd:

Verstijven in lengterichting

Hierbij wordt in lengterichting een stuk spoor verstijfd, door twee spoorstaven aan te brengen in de lengterichting over het midden van de dwarsliggers. De hypothese is dat een stijfheidsverschil in de ondergrond overbrugd worden, waardoor lokaal blinde vering kan worden verminderd. Deze constructie wordt al bij overgangen naar kunstwerken toegepast.

Voordat een proef wordt ingericht is het voorstel om de hypothese nader te onderzoeken en formuleren.

Foamed Ballast

Deze maatregel is nog niet toegepast in Nederland. Het werkingsprincipe berust op een betere belastingspreiding enerzijds en het langdurig fixeren van de (correcte) spoorligging anderzijds. Uit literatuur lijkt de maatregel op sommige frequenties tot een toename in trillingen te kunnen leiden. Enkele studies die beschikbaar zijn geven tegenstrijdige informatie over effect op trillingen. Voordat een proef wordt ingericht is het voorstel om door te laten rekenen wat het theoretische toepassingsbereik en effect is.

Ook moet de kansrijkheid van toestemming voor gebruik (TVG) worden onderzocht in overleg met ProRail AM. Specifieke risico’s hiervoor zijn RAMSHE aspecten, zoals risico op bodemverontreiniging door leaching, afvalstromen bij einde levensduur en de gefixeerde ligging waardoor onderstoppen niet mogelijk is.

Ballast matten

Ballast matten worden doorgaans toegepast op verharde infrastructuur, zoals bruggen en tunnels. Om ze in de vrije baan toe te passen is een verharde onderconstructie en opsluiting benodigd. De kansrijkheid van toestemming voor gebruik (TVG) worden onderzocht in overleg met ProRail AM. Wegens de hoge potentiële kosten van de proef wordt aanbevolen eerst een ontwerp te maken, met een hypothese over verwacht effect.

Tot slot wordt aanbevolen om een **onderzoek te starten** naar dynamische eisen die aan ES lassen gesteld kunnen worden, om trillingen te reduceren en de duurzaamheid van ES lassen te vergroten.

De overige maatregelen worden momenteel **niet aanbevolen** voor praktijkproeven binnen de IBS.

Referenties

Arcadis (2018), Innovatieagenda Reductie Spoortrillingen, 22 november 2018;

Cauberg Huygen (2018), Bijdrage aan de innovatieagenda reductie spoortrillingen, 05021-47350-03, 25 november 2018;

Cohere Consultants (2019), Innovatie-agenda reductie spoortrillingen, MEM20190101, 9 januari 2019;

Deltares (2017a), Dynamische nadelige effecten van trillingsreducerende maatregelen – Aanvulling Maatregelencatalogus spoortrillingen, 11200206-000-GEO-0003, Versie 2, 29 mei 2017;

Deltares (2017b), Niet-dynamische nadelige effecten van trillingsreducerende maatregelen – Aanvulling Maatregelencatalogus spoortrillingen, 11200206-000-GEO-0004, Versie 2, 29 mei 2017;

DGMR (2018), Innovatieagenda ProRail – kansrijke maatregelen, M.2018.1400.00.N001, 29 november 2018;

Fugro (2021), Trillingenonderzoek proeftuin dwarsliggers te Zwolle, 1021-188974.R01V02, 29 november 2021;

Grontmij (2016), Maatregelencatalogus spoortrillingen – Samenvattend overzicht, 327725 GM-0175097, revisie D2, 8 januari 2016;

Level acoustics & vibration (2018), Opstellen innovatieagenda reductive spoortrillingen, LA.181102.M01, 3 december 2018;

M+P (2018), Bijdrage opstellen innovatie agenda reductie spoortrillingen, M+P.Rail.18.21.1, 30 november 2018;

M+P (2020), Plan van aanpak – Onderzoeksprogramma model spoortrillingen, M+P.Rail.20.05.1, 16 april 2020;

Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (2020), Brief aan College van B&W Boxtel: Praktijklocatie proeven innovatieagenda spoortrillingen, 10 december 2020;

Movares (2018), Efficiënt naar een trillingsarme omgeving – Onze visie op de innovatie-agenda trillingen, 29 november 2018;

Movares (2020), Brabantroute proef Shimlift, Eindrapportage, D79-CLO-KA-20000012, 5 juni 2020;

ProRail (2008), Trillingen en LF Geluid 2008, Kennisdocument van het Kenniscentrum Spoorgeluid, versie 1.7, 15 april 2008;

ProRail (2013), Tracébesluit Derde Spoor Zevenaar – Duitse Grens, 3295436, juni 2013;

ProRail (2018), Brief aan Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat: Bijdrage bij beleidsintensivering hinder vanwege spoortrillingen, VT20170018-1546735203-1290, 5 november 2018;

ProRail (2019a), Brief aan Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat: Bijdrage bij beleidsintensivering hinder vanwege spoortrillingen en aanbieding innovatieagenda, VT20170018-1546735203-1544, 16 april 2019;

ProRail (2019b), Plan van aanpak analyse ontstaan klachten trillingshinder bij bovenbouwvernieuwing, concept, 2 oktober 2019;

ProRail (2020a), Brief aan de Staatssecretaris van Infrastructuur en Waterstaat: Aanpak spoortrillingen – innovatieagenda en afronding, VT20170018-1546735203-2140, 13 juli 2020;

ProRail (2020b), Innovatieagenda Bronaanpak Spoortrillingen, Joint Fact Finding, 26 november 2020;

ProRail (2020c), Kennisdocument Trillingen, Versie 2020, versie 1.1, 23 juli 2021;

Railway Induced Vibration Abatement Solutions Collaborative Project (RIVAS) (2011), State of the art review of mitigation measures on track, Deliverable D3.1, SCP0-GA-2010-265754, 30 September 2011;

Ricardo (2018), Ideeen ter vermindering van bodemtrillingen, 03-723464, 30 november 2018;

Satis (penvoerder) (2018), Verslag van de expertmeeting spoortrillingen Vught, 20 november 2018;

TU Delft (2019), Notitie tbv interne planvorming ProRail, Onderzoek beheersing trillingen en spoorgeometrie, PVA TUD totaal T&V v0.2 MS, 25 januari 2019;

UIC International Union of Railways (2017), Railway induced vibration, State of the art report, 978-2-7461-2663-3, November 2017;

We Boost Data (2020a), Proef Brabantroute, Monitoringsplan Trillingen USP’s Oisterwijk, WBD1916, 30 maart 2020;

We Boost Data (2020b), Proef Brabantroute, Monitoringsplan Trillingen overweg Dorst, WBD1916, 3 november 2020;

We Boost Data (2021), Effect Under Sleeper Pads – Samenvattende rapportage praktijkproeven, WBD1916, 22 juli 2021;

Witteveen+Bos (2018), Keuzematrix trillingsreducerende maatregelen spoor Houten, 102004/18-006.280, 23 april 2018;

Witteveen+Bos (2021), Trillingsmetingen STRAIL-overweg te Dorst – tussenrapportage korte metingen, 15 oktober 2021.

Bijlage A - Maatregelen

1.1 Spoor Slijpen

Door het spoor met regelmaat te slijpen worden onregelmatigheden op de spoorstaaf verwijderd. Hierdoor ontstaat minder aanstootkracht.

Echter, het golflengtespectrum voor spoorafwijkingen relevant voor trillingshinder loopt van ongeveer 1 tot 30 m. Het golflengtespectrum relevant voor geluid, dat bij slijpen van het spoor wordt verminderd, ligt tussen de ~1 en 630 mm. Spoorstaafruwheid staat daarom los van de trillingskwaliteit van spoorinfra.

Knock Out Criteria	Score	Toelichting score
Draagt proef bij aan vergroten beslisinformatie?	×	Effect reeds bekend, geen bijdrage aan trillingen
Bronmaatregel?	✓	
Toepasbaar in boven- of onderbouw?	✓	
Voldoende capaciteit om voor proef te leveren?	✓	Reguliere onderhoudsmaatregel
Voldoende kennis/capaciteit bij aannemers om proef uit te voeren?	✓	Reguliere onderhoudsmaatregel
TVG voor proef waarschijnlijk?	✓	Reguliere onderhoudsmaatregel
Leverbaar binnen 1-2 jaar? (shelf ready)	✓	Reguliere onderhoudsmaatregel

Overige Criteria	Score	Toelichting score
Verwachte doeltreffendheid van maatregel	--	Oneffenheid spoorstaaf draagt niet significant bij aan trillingen, maar meer aan geluid
Haalbaarheid voor brede implementatie	++	Regulier onderhoud
Kwaliteit van theoretisch model (Proof of concept)	+	Effect bekend
Verwachte bijdrage aan beslisinformatie	--	Effect reeds bekend, geen bijdrage aan trillingen
Verwacht toepassingsbereik	--	Geen bijdrage aan trillingen
(Neven)effecten (naast trillingsreductie)	+/-	Meer effect op geluid

1.2 ES Lassen verbeteren

Electrische Scheiding (ES) lassen vormen een isolatie tussen twee vakken van sporen en zijn benodigd voor de treinbeveiliging. Wanneer ES lassen bezwijken kan een harde overgang ontstaan van de ene naar de andere spoorstaaf. Dit vergroot de aanstootkracht en daarmee trillingen. Het effect wordt versterkt door het ‘klappen’ van de spoorstaven. Trillingshinder is op te lossen door de ES las te repareren.

Momenteel worden geen eisen gesteld aan de weerstand tegen dynamische belasting voor ES lassen, hetgeen als mogelijke oorzaak wordt gezien voor falen van de lassen.

Uit onderzoek naar hinderbeleving blijkt dat nabijheid van woningen bij ES lassen ouder dan 20 jaar een grote correlatie met aantal (unieke) klachten kent.

Voorgestelde proef omvat het vaststellen van dynamische eisen aan ES lassen.

Knock Out Criteria	Score	Toelichting score
Draagt proef bij aan vergroten beslisinformatie?	✓	In kaart brengen benodigde dynamische eisen aan ES lassen.
Bronmaatregel?	✓	
Toepasbaar in boven- of onderbouw?	✓	
Voldoende capaciteit om voor proef te leveren?	✓	Mogelijk in samenwerking met kennisinstellingen
Voldoende kennis/capaciteit bij aannemers om proef uit te voeren?	nvt	Zal eerst op labschaal worden beproefd
TVG voor proef waarschijnlijk?	nvt	Zal eerst op labschaal worden beproefd
Leverbaar binnen 1-2 jaar? (shelf ready)	nvt	Zal eerst op labschaal worden beproefd

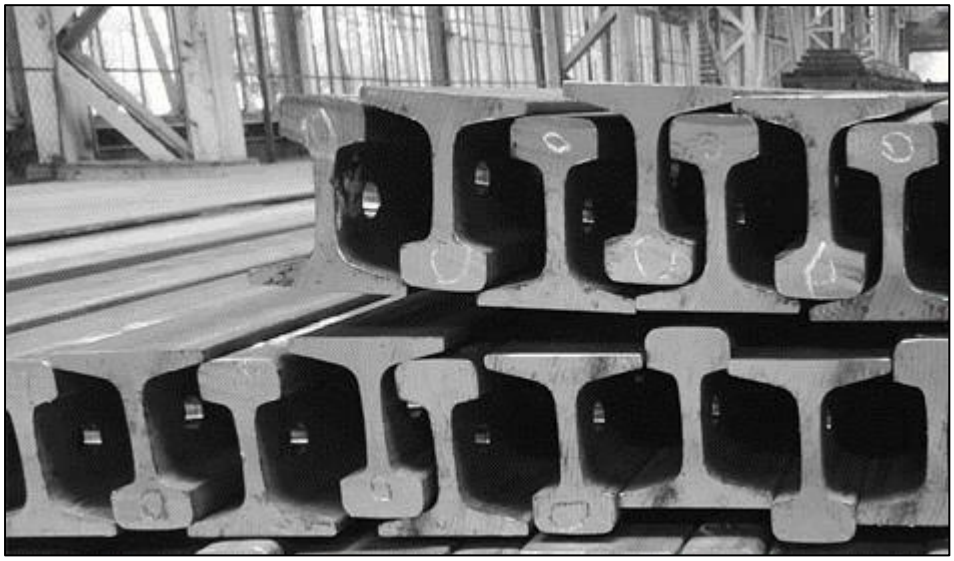
Overige Criteria	Score	Toelichting score
Verwachte doeltreffendheid van maatregel	+	ES Lassen veroorzaken puntbronnen van trillingen
Haalbaarheid voor brede implementatie	+/-	Afhankelijk van type las
Kwaliteit van theoretisch model (Proof of concept)	+	Werking bekend

Verwachte bijdrage aan beslisinformatie	+/-	Met name neveneffecten en levenscyclus (langere duur metingen)
Verwacht toepassingsbereik	+	ES lassen zijn bekende bron van trillingshinder
(Neven)effecten (naast trillingsreductie)	+	Minder onderhoud

1.3 Zwaardere spoorstaaf

Het huidige Nederlandse spoor (met uitzondering van Betuweroute en HSL) gebruikt UIC54 spoorstaven. UIC60 spoorstaven zijn stijver en zouden als alternatief gebruikt kunnen worden. De hoogte van de UIC60 spoorstaaf is echter groter (172 mm vs 159 mm). Bij lokale toepassing van de UIC60 zou een overgangsconstructie nodig zijn om het hoogteverschil op te lossen, of dienen dwarsliggers lager aangelegd te worden. Beiden zullen leiden tot een stijfheidsverschil. Vervanging van UIC54 voor UIC60 lijkt daarmee geen doelmatige maatregel wanneer enkel toegepast als trillingsreducerende maatregel.

Eventueel onderzoek kan zich richten op het in kaart brengen van positieve en negatieve effecten op trillingen.



Knock Out Criteria	Score	Toelichting score
Draagt proef bij aan vergroten beslisinformatie?	✓	
Bronmaatregel?	✓	
Toepasbaar in boven- of onderbouw?	✓	
Voldoende capaciteit om voor proef te leveren?	✓	
Voldoende kennis/capaciteit bij aannemers om proef uit te voeren?	✓	
TVG voor proef waarschijnlijk?	?	Onduidelijk
Leverbaar binnen 1-2 jaar? (shelf ready)	✓	

Overige Criteria	Score	Toelichting score
Verwachte doeltreffendheid van maatregel	-	Verstijft lokaal, maar vereist overgangsconstructie, waardoor stijfheidsverschil ontstaat

Haalbaarheid voor brede implementatie	-	Door hoogteverschil niet waarschijnlijk enkel als trillingsmaatregel
Kwaliteit van theoretisch model (Proof of concept)	+	Werking bekend
Verwachte bijdrage aan beslisinformatie	+/-	Toetsing van effect en neveneffecten
Verwacht toepassingsbereik	+/-	
(Neven)effecten (naast trillingsreductie)	+/-	

2.1 Resilient rail fastener

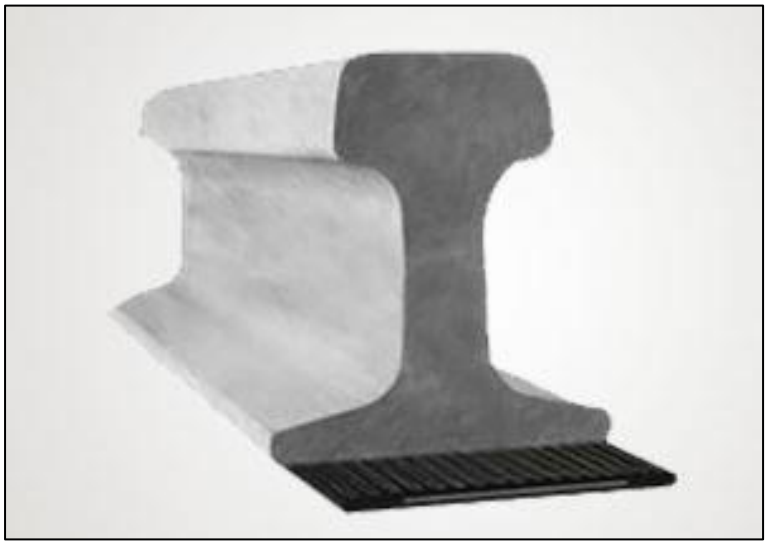
Resilitent Rail Fasteners, zoals Pandrol Vanguard, zorgen voor een zeer lage stijfheid met behoud van stabiliteit. Ze worden veel toegepast in light rail en tunnels. Het frequentiebereik bij heavy rail op ballast is meer dan 30Hz (UIC, 2017; RIVAS, 2011), waardoor weinig effect op trillingen optreedt. Toepassingen voor heavy rail zijn meer gericht op *ground borne noise*.

Knock Out Criteria	Score	Toelichting score
Draagt proef bij aan vergroten beslisinformatie?	×	Effect is bekend, maar te hoogfrequent
Bronmaatregel?	✓	
Toepasbaar in boven- of onderbouw?	✓	
Voldoende capaciteit om voor proef te leveren?	✓	
Voldoende kennis/capaciteit bij aannemers om proef uit te voeren?	✓	
TVG voor proef waarschijnlijk?	✓	
Leverbaar binnen 1-2 jaar? (shelf ready)	✓	

Overige Criteria	Score	Toelichting score
Verwachte doeltreffendheid van maatregel	--	Werkt heel specifiek voor een frequentie. Te hoogfrequent voor toepassing bij heavy rail in Nederland. Wordt vooral toegepast bij light rail.
Haalbaarheid voor brede implementatie	+	Bekende toepassing uit light rail
Kwaliteit van theoretisch model (Proof of concept)	+	Werking bekend, toegepast bij light rail
Verwachte bijdrage aan beslisinformatie	-	Effect is reeds bekend
Verwacht toepassingsbereik	--	Werkt heel specifiek voor een frequentie. Te hoogfrequent
(Neven)effecten (naast trillingsreductie)	-	Mogelijk toename van geluid [UIC, 2017]

2.2 Lage stijfheid railpads

Railpads worden tussen de spoorstaaf en de dwarsliggers geplaatst. De in Nederland gebruikelijke railpads hebben een (op Europese schaal) grote stijfheid. Door railpads met een lagere stijfheid toe te passen wordt de exitatie van de dwarsliggers minder, waardoor minder aanstootkracht naar de ondergrond wordt overgebracht. De toepassing is vooral bekend uit light rail. Het frequentiebereik bij heavy rail op ballast is echter meer dan 40Hz, waardoor weinig effect op trillingen optreedt.



Knock Out Criteria	Score	Toelichting score
Draagt proef bij aan vergroten beslisinformatie?	×	Effect is bekend, maar te hoogfrequent
Bronmaatregel?	✓	
Toepasbaar in boven- of onderbouw?	✓	
Voldoende capaciteit om voor proef te leveren?	✓	
Voldoende kennis/capaciteit bij aannemers om proef uit te voeren?	✓	
TVG voor proef waarschijnlijk?	✓	
Leverbaar binnen 1-2 jaar? (shelf ready)	✓	

Overige Criteria	Score	Toelichting score
Verwachte doeltreffendheid van maatregel	-	Werkt heel specifiek voor een frequentie. Te hoogfrequent voor toepassing bij heavy rail in Nederland. Wordt vooral toegepast bij light rail.
Haalbaarheid voor brede implementatie	+	Bekende toepassing uit light rail
Kwaliteit van theoretisch model (Proof of concept)	+	Werking bekend, toegepast bij light rail
Verwachte bijdrage aan beslisinformatie	-	Effect is reeds bekend

Verwacht toepassingsbereik	--	Werkt heel specifiek voor een frequentie. Te hoogfrequent voor toepassing bij heavy rail in Nederland. Wordt vooral toegepast bij light rail.
(Neven)effecten (naast trillingsreductie)	-	Lagere stijfheid leidt tot meer geluidproductie

2.3 “Slimme” railpad

Waar lage stijfheid railpads specificiek op één frequentie worden ingezet, is het idee achter de “slimme” railpad dat de stijfheid afhankelijk is van de belasting. Bij een hogere dynamische belasting zou de railpad een lagere stijfheid moeten krijgen en vice versa.

Opgemerkt moet worden dat dit geen product is dat reeds beschikbaar is, en slechts als concept gepresenteerd is.

Knock Out Criteria	Score	Toelichting score
Draagt proef bij aan vergroten beslisinformatie?	✓	Nieuwe toepassing, bestaat vooral in theorie
Bronmaatregel?	✓	
Toepasbaar in boven- of onderbouw?	✓	
Voldoende capaciteit om voor proef te leveren?	×	
Voldoende kennis/capaciteit bij aannemers om proef uit te voeren?	×	
TVG voor proef waarschijnlijk?	×	
Leverbaar binnen 1-2 jaar? (shelf ready)	×	Bestaat alleen als theoretisch concept

Overige Criteria	Score	Toelichting score
Verwachte doeltreffendheid van maatregel	+	Als theorie zou werken zou het een doeltreffende maatregel kunnen zijn
Haalbaarheid voor brede implementatie	--	Nieuwe toepassing, bestaat vooral in theorie
Kwaliteit van theoretisch model (Proof of concept)	+/-	Moet nog verder ontwikkeld worden
Verwachte bijdrage aan beslisinformatie	nvt	Nog niet shelf ready
Verwacht toepassingsbereik	?	Onbekend
(Neven)effecten (naast trillingsreductie)	?	Onbekend

2.4 Shimlifts

Shimlifts zijn een systeem van KamPa, dat bestaat uit een kunststof wig onder de spoorstaaf en een contra-wig op de dwarsligger. Het werkingsprincipe is dat de blinde vering die door verzakkingen in het ballastbed ontstaat verminderd wordt.

In 2020 is een proef met shimlifts uitgevoerd op de Brabantroute (Movares, 2020). Dit onderzoek heeft geen eenduidig effect met shimlifts vast kunnen stellen. Opgemerkt wordt dat trillingen hierbij op de gevels van woningen werden gemeten, niet bij de bron. Reeds ervaren trillingshinder was maatgevend voor de locatiekeuze in dit onderzoek. Over de spoorligging voorafgaand aan de proef en de exacte toepassing is niet gerapporteerd. Een aanvullende systematische toepassing met metingen op maaiveld kan inzicht geven in de effectiviteit van de shimlifts.

Knock Out Criteria	Score	Toelichting score
Draagt proef bij aan vergroten beslisinformatie?	✓	Reeds proef mee gedaan, maar resultaten niet eenduidig.
Bronmaatregel?	✓	
Toepasbaar in boven- of onderbouw?	✓	
Voldoende capaciteit om voor proef te leveren?	✓	
Voldoende kennis/capaciteit bij aannemers om proef uit te voeren?	✓	
TVG voor proef waarschijnlijk?	✓	Vrijgegeven toepassing
Leverbaar binnen 1-2 jaar? (shelf ready)	✓	

Overige Criteria	Score	Toelichting score
Verwachte doeltreffendheid van maatregel	+	Kan effectief zijn in verwijderen “blinde vering” en bij overgangen naar kunstwerken, overwegen etc.
Haalbaarheid voor brede implementatie	+	Toepassing is daar waar blinde vering optreedt

Kwaliteit van theoretisch model (Proof of concept)	+	Verbetert spoorligging, verwijdert blinde vering
Verwachte bijdrage aan beslisinformatie	+/-	Reeds proef mee gedaan, maar resultaten waren niet eenduidig
Verwacht toepassingsbereik	+	Kan effectief zijn in verwijderen “blinde vering” en bij overgangen naar kunstwerken etc.
(Neven)effecten (naast trillingsreductie)	+	Verminderd onderhoud, meer reizigerscomfort

3.1 Ladder track

Ladder tracks zijn een gebruikelijke toepassing in light rail. Hierbij worden spoorstaven in langsrichting ondersteund, in plaats van in dwarsrichting. De langsliggers worden vervolgens onderling in dwarsrichting om onderlinge afstanden te borgen. Dit kan door toepassing van een laddervormige dwarsliggerconstructie, maar ook door toepassing van betonnen langsliggers met stalen dwarsverbindingen op regelmatige afstanden.

Ladder tracks reduceren de piekdruk op het ballastbed. Ook is de spoorligging met dit systeem beter bestand tegen degradatie van de ballast, vanwege de brugwerking.

Nadeel is dat bij overgangen van regulier spoor naar ladder track een harde overgang kan ontstaan, die weer tot puntbronnen kan leiden. Ook is nog onbekend wat de implicaties voor regulier onderhoud zijn (bijvoorbeeld onderstoppen). Er is geen Europese leverancier van bekend. De beschikbaarheid en capaciteit om te leveren en installeren zal eerst nader onderzocht moeten worden.

Knock Out Criteria	Score	Toelichting score
Draagt proef bij aan vergroten beslisinformatie?	✓	Weinig ervaring in Nederland
Bronmaatregel?	✓	
Toepasbaar in boven- of onderbouw?	✓	
Voldoende capaciteit om voor proef te leveren?	?	Onbekend
Voldoende kennis/capaciteit bij aannemers om proef uit te voeren?	?	Onbekend
TVG voor proef waarschijnlijk?	?	Onbekend
Leverbaar binnen 1-2 jaar? (shelf ready)	?	Onbekend

Overige Criteria	Score	Toelichting score
Verwachte doeltreffendheid van maatregel	+/-	Verkleint verschil in stijfheid, waardoor minder trillingen worden gegenereerd, maar kan ook weer tot stijve overgang leiden.

Haalbaarheid voor brede implementatie	-	Kostbare maatregel, “verlegt” stijfheidsovergang, waardoor toepassing beperkt is
Kwaliteit van theoretisch model (Proof of concept)	+	Verkleint verschil in stijfheid, waardoor minder trillingen worden gegenereerd
Verwachte bijdrage aan beslisinformatie	+	Weinig ervaring mee in Nederland
Verwacht toepassingsbereik	+/-	Kan trillingen lokaal verminderen, maar kan ook weer tot stijve overgang leiden.
(Neven)effecten (naast trillingsreductie)	-	Mogelijk problemen bij regulier onderhoud

3.2 Verstijven in lengterichting

Bij deze maatregel worden spoorstaven in lengterichting in het midden van de dwarsliggers aangebracht (vergelijkbaar met een ontsporingsbeveiliging of dual gauge track). Hiermee wordt de constructie stijver in de lengterichting. De verwachting is dat daarmee meer belastingspreiding plaatsvindt en dat lokale zettingen overbrugd kunnen worden.

Ook kan toepassing bij overgangen naar kunstwerken als overgangsconstructie dienen, om een grote impedantiesprong te splitsen.

Deze maatregel moet nog nader onderzocht worden op werkingsprincipe en effect.

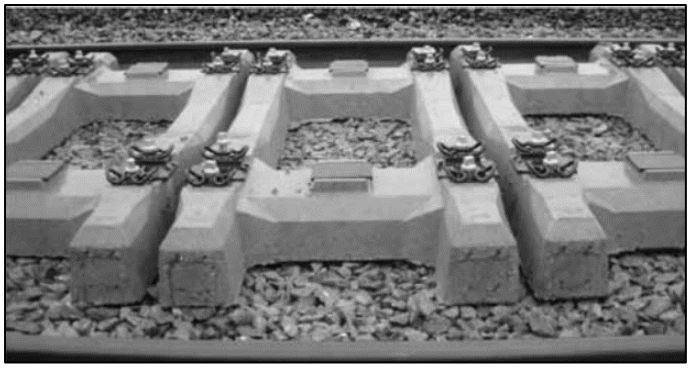
Knock Out Criteria	Score	Toelichting score
Draagt proef bij aan vergroten beslisinformatie?	✓	Weinig ervaring in Nederland
Bronmaatregel?	✓	
Toepasbaar in boven- of onderbouw?	✓	
Voldoende capaciteit om voor proef te leveren?	✓	Onbekend
Voldoende kennis/capaciteit bij aannemers om proef uit te voeren?	✓	Onbekend
TVG voor proef waarschijnlijk?	✓	Onbekend
Leverbaar binnen 1-2 jaar? (shelf ready)	✓	Onbekend

Overige Criteria	Score	Toelichting score
Verwachte doeltreffendheid van maatregel	+/-	Werkingsprincipe en verwacht effect moet nog nader onderzocht.
Haalbaarheid voor brede implementatie	+/-	Relatief lage kosten en eenvoudig toe te passen. Toepassingsgebied afhankelijk van werkingsprincipe en effect
Kwaliteit van theoretisch model (Proof of concept)	+/-	Werkingsprincipe en verwacht effect moet nog nader onderzocht. Berust op verstijving en overbrugging

Verwachte bijdrage aan beslisinformatie	+	Nog niet onderzocht
Verwacht toepassingsbereik	+/-	Toepassingsgebied afhankelijk van werkingsprincipe en effect
(Neven)effecten (naast trillingsreductie)	+/-	Geen bekend

3.3 Frame Sleeper

Frame sleepers hebben een “dubbele H” vorm. Daarmee vormen ze een stijvere dwarsligger dan reguliere betonnen dwarsliggers. Ze zijn ontwikkeld door ÖBB, met het doel de duurzaamheid van de ballast te verbeteren. De werking is overeenkomstig met ladder tracks: reductie van de piekdruk in de ballast en (in mindere mate) overbruggen van degradaties. De beschikbaarheid en capaciteit om te leveren en installeren zal eerst nader onderzocht moeten worden. Door de vorm van de frame sleepers ontstaat een dubbele breedte dwarsligger, hetgeen tot problemen met onderstoppen zou kunnen leiden.



Knock Out Criteria	Score	Toelichting score
Draagt proef bij aan vergroten beslisinformatie?	✓	Weinig ervaring in Nederland
Bronmaatregel?	✓	
Toepasbaar in boven- of onderbouw?	✓	
Voldoende capaciteit om voor proef te leveren?	?	Onbekend
Voldoende kennis/capaciteit bij aannemers om proef uit te voeren?	?	Onbekend
TVG voor proef waarschijnlijk?	?	Onbekend
Leverbaar binnen 1-2 jaar? (shelf ready)	?	Onbekend, toegepast in Oostenrijk

Overige Criteria	Score	Toelichting score
Verwachte doeltreffendheid van maatregel	+/-	Verkleint verschil in stijfheid, waardoor minder trillingen worden gegenereerd, maar kan ook weer tot stijve overgang leiden.
Haalbaarheid voor brede implementatie	?	Onbekend
Kwaliteit van theoretisch model (Proof of concept)	+	Verkleint verschil in stijfheid, waardoor minder trillingen worden gegenereerd
Verwachte bijdrage aan beslisinformatie	+	Weinig ervaring mee in Nederland
Verwacht toepassingsbereik	+/-	Kan trillingen lokaal verminderen, maar kan ook weer tot stijve overgang leiden.
(Neven)effecten (naast trillingsreductie)	-	Mogelijk problemen bij onderstoppen

3.4 Wide Sleeper

Wide sleepers hebben de breedte van twee dwarsliggers. De werking berust op een stijvere dwarsligger die tot minder piekbelasting in de ballast leidt. Proeven op een testspoor in Duitsland toonden een afname in trillingen <25 Hz, maar een toename in trillingen tussen 31.5 Hz en 63 Hz en >100 Hz. Onderstoppen wordt mogelijk beperkt door de breedte van de wide sleeper.

Knock Out Criteria	Score	Toelichting score
Draagt proef bij aan vergroten beslisinformatie?	✓	Weinig ervaring in Nederland
Bronmaatregel?	✓	
Toepasbaar in boven- of onderbouw?	✓	
Voldoende capaciteit om voor proef te leveren?	?	Onbekend
Voldoende kennis/capaciteit bij aannemers om proef uit te voeren?	?	Onbekend
TVG voor proef waarschijnlijk?	✓	
Leverbaar binnen 1-2 jaar? (shelf ready)	✓	Toegepast in Duitsland

Overige Criteria	Score	Toelichting score
Verwachte doeltreffendheid van maatregel	+/-	Verkleint verschil in stijfheid, waardoor minder trillingen worden gegenereerd, maar kan ook weer tot stijve overgang leiden.
Haalbaarheid voor brede implementatie	?	Onbekend
Kwaliteit van theoretisch model (Proof of concept)	+	Verkleint verschil in stijfheid, waardoor minder trillingen worden gegenereerd
Verwachte bijdrage aan beslisinformatie	+	Weinig ervaring mee in Nederland
Verwacht toepassingsbereik	+/-	Kan trillingen lokaal verminderen, maar kan ook weer tot stijve overgang leiden.
(Neven)effecten (naast trillingsreductie)	-	Mogelijk problemen bij onderstoppen

3.5 Dwarsliggerafstand variëren

Spoorstaven zijn opgelegd op dwarsliggers. Deze hebben in Nederland een vaste hart op hart afstand van 600 mm. Afhankelijk van de rijsnelheid worden trillingen in een zeker frequentiebereik veroorzaakt (variërend van 30-60 Hz). De gedachte achter het variëren van dwarsliggerafstanden is de herhalende excitatie en potentiële resonantie te doorbreken of de trillingen naar een “gunstiger” frequentiebereik te brengen, zonder de rijsnelheid te beïnvloeden. Een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd door bij de IBS betrokken vakspecialisten van ProRail toont dat dwarsliggerafstanden zeer sterk moeten worden aangepast (+/- 200 mm) om een significante verschuiving in het frequentiebereik te realiseren. Dit komt overeen met de inschatting die de STEM leden maakten bij het bespreken van praktijkproef varianten (2 november 2021). Dit maakt een praktijkproef onder de huidige omstandigheden onrealistisch vanwege problemen bij onderstoppen (in het geval van een kortere dwarsliggerafstand) en tot grote spanningen in de spoorstaaf (bij grotere afstanden).

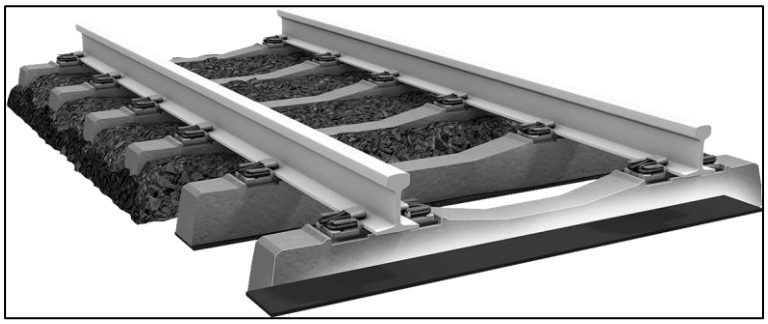
Knock Out Criteria	Score	Toelichting score
Draagt proef bij aan vergroten beslisinformatie?	✓	Weinig ervaring in Nederland, toetsing theoretisch model
Bronmaatregel?	✓	
Toepasbaar in boven- of onderbouw?	✓	
Voldoende capaciteit om voor proef te leveren?	✓	
Voldoende kennis/capaciteit bij aannemers om proef uit te voeren?	✓	
TVG voor proef waarschijnlijk?	×	Afwijking van standaard afstand kan leiden tot onaanvaardbare spanningen in spoorstaaf en problemen bij onderhoud
Leverbaar binnen 1-2 jaar? (shelf ready)	✓	

Overige Criteria	Score	Toelichting score
Verwachte doeltreffendheid van maatregel	+/-	Reduceert specifieke frequentie voor bepaalde snelheid
Haalbaarheid voor brede implementatie	-	Grote verschuiving vereist, waardoor spanningen in

		spoorstaven oplopen, of onderhoud beperkt wordt.
Kwaliteit van theoretisch model (Proof of concept)	+	Eenvoudig model beschikbaar, verwacht effect kan beter worden voorspeld met STEM.
Verwachte bijdrage aan beslisinformatie	+	Weinig ervaring mee in Nederland, kan bijdragen aan toetsing model
Verwacht toepassingsbereik	+/-	Werkt specifiek voor een bepaalde rijsnelheid.
(Neven)effecten (naast trillingsreductie)	-	Problemen bij onderstoppen met huidige machines.

3.6 Under Sleeper Pads

Under sleeper pads (USP) zijn een elastische laag die onder de dwarsliggers worden aangebracht. De werking berust op het verhogen van het contactoppervlak met de ballast. Daardoor ontstaat een betere spreiding van belasting naar de ballast. Hierdoor wordt mogelijk ook degradatie van ballast verminderd. USPs worden in Europe op verschillende plaatsen toegepast. In Nederland zijn proeven met USPs uitgevoerd in Oisterwijk en Zevenaar (WeBoostData, 2021). Hieruit blijkt met name een effect >30 Hz voor goederentreinen en >40 Hz voor reizigerstreinen voor hinder dicht bij het spoor. . De effectiviteit lijkt groter op stijvere (zand) bodems dan op slappere (klei) bodems. Als onderdeel van deze proef worden ook lange termijn effecten gemeten. Deze zijn nog niet beschikbaar.



Knock Out Criteria	Score	Toelichting score
Draagt proef bij aan vergroten beslisinformatie?	✓/✗	Enigszins. Er zijn al recent proeven mee uitgevoerd
Bronmaatregel?	✓	
Toepasbaar in boven- of onderbouw?	✓	
Voldoende capaciteit om voor proef te leveren?	✓	
Voldoende kennis/capaciteit bij aannemers om proef uit te voeren?	✓	
TVG voor proef waarschijnlijk?	✓	
Leverbaar binnen 1-2 jaar? (shelf ready)	✓	

Overige Criteria	Score	Toelichting score
Verwachte doeltreffendheid van maatregel	+	Effectief vanaf 10Hz (zand bodem) en <6 Hz in combinatie met onderstoppen, maar onbekend of effectief blijft voor lagere frequenties op lange termijn
Haalbaarheid voor brede implementatie	+	Relatief eenvoudig aan te brengen op nieuwe dwarsliggers, als onderdeel van bovenbouwvernieuwing.
Kwaliteit van theoretisch model (Proof of concept)	+/-	Werking is met name bijdrage aan betere spoorligging/aansluiting op

		ballast. Mogelijk ook vermindering van degradatie ballast
Verwachte bijdrage aan beslisinformatie	+/-	Recent reeds serie proeven mee uitgevoerd
Verwacht toepassingsbereik	+/-	Effectiever op stijvere bodem dan op slappe bodem.
(Neven)effecten (naast trillingsreductie)	+	Mogelijk vermindering benodigd onderhoud

3.7 Composiet Dwarsliggers

ProRail onderzoekt het gebruik van composiet dwarsliggers als alternatief voor houten en/of betonnen dwarsliggers in een proeftuin bij Zwolle. In de proeftuin zijn 3 types kunststof dwarsliggers beproefd en 1 type dwarsliggers van zwavelbeton. Op 2 dagen zijn trillingsmetingen uitgevoerd (Fugro, 2021). Uit deze metingen zijn voor geen van de dwarsliggers significante postieve of negatieve effecten op trillingen waargenomen, ten aanzien van de referentie (betonnen dwarsliggers).

Op basis hiervan is er geen aanleiding composiet dwarsliggers als trillingsreducerende maatregel in te zetten. Er is echter ook geen aanleiding om ongewenste effecten op trillingen te verwachten wanneer de dwarsliggers voor andere redenen worden ingezet.

Knock Out Criteria	Score	Toelichting score
Draagt proef bij aan vergroten beslisinformatie?	✓/×	Beperkt. Er zijn al recent proeven mee uitgevoerd
Bronmaatregel?	✓	
Toepasbaar in boven- of onderbouw?	✓	
Voldoende capaciteit om voor proef te leveren?	✓	
Voldoende kennis/capaciteit bij aannemers om proef uit te voeren?	✓	
TVG voor proef waarschijnlijk?	✓	
Leverbaar binnen 1-2 jaar? (shelf ready)	✓	

Overige Criteria	Score	Toelichting score
Verwachte doeltreffendheid van maatregel	+/-	Geen merkbaar effect op trillingen.
Haalbaarheid voor brede implementatie	-	Niet als trillingmaatregel
Kwaliteit van theoretisch model (Proof of concept)	-	
Verwachte bijdrage aan beslisinformatie	-	Reeds proef mee uitgevoerd
Verwacht toepassingsbereik	-	Niet als trillingmaatregel
(Neven)effecten (naast trillingsreductie)	+	Mogelijk duurzamer en beperkter onderhoud

3.8 Houten Dwarsliggers

Bij bovenbouw vernieuwingen past ProRail standaard langsgelast spoor op betonnen dwarsliggers toe. Ten opzichte van houten dwarsliggers geeft dit een geluidreductie van ongeveer 2 dB(A). Er zijn echter meermalen klachten over trillingen ontstaan volgend op een bovenbouwvernieuwing. ProRail is reeds voornemens om bij een bovenbouwvernieuwing trillingsmetingen uit te voeren aan zowel de situatie met houten dwarsliggers (voor vervanging) en met betonnen dwarsliggers (na de vervanging).

Knock Out Criteria	Score	Toelichting score
Draagt proef bij aan vergroten beslisinformatie?	✓	Effect houten dwarsliggers nog niet onderzocht
Bronmaatregel?	✓	
Toepasbaar in boven- of onderbouw?	✓	
Voldoende capaciteit om voor proef te leveren?	✓	
Voldoende kennis/capaciteit bij aannemers om proef uit te voeren?	✓	
TVG voor proef waarschijnlijk?	✓	
Leverbaar binnen 1-2 jaar? (shelf ready)	✓	

Overige Criteria	Score	Toelichting score
Verwachte doeltreffendheid van maatregel	+/-	Onbekend. Is doel van de proef.
Haalbaarheid voor brede implementatie	-	Huidige beleid is juist gericht op hout te vervangen door beton
Kwaliteit van theoretisch model (Proof of concept)	-	Geen model beschikbaar
Verwachte bijdrage aan beslisinformatie	+	Vergroot inzicht, zowel als maatregel, als effect bij BBV beter inzichtelijk
Verwacht toepassingsbereik	-	
(Neven)effecten (naast trillingsreductie)	-	Minder duurzaam en meer geluidproductie dan beton

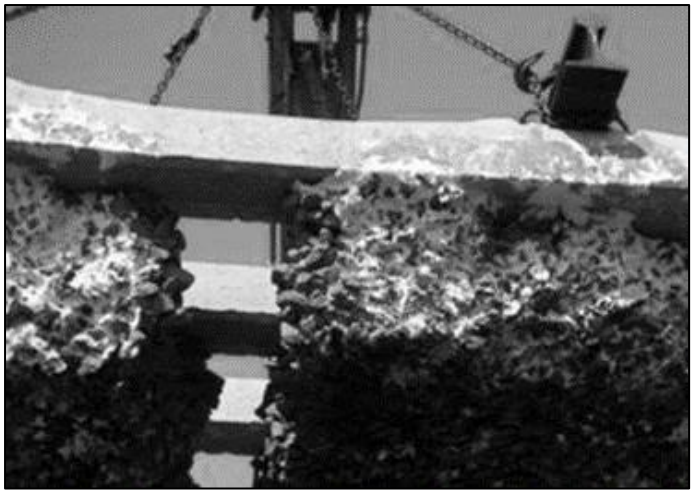
4.1 Foamed ballast

Foamed ballast is een maatregel waarbij een schuim tussen de ballast wordt ingespoten. Durflex is een merk dat actief wordt aangeboden als trillingsreducerende maatregel. De maatregel is ontwikkeld om spooronderhoud te verminderen door de spoorligging te fixeren. Trillingsreductie ontstaat enerzijds door betere belastingspreiding en anderzijds door het langdurig fixeren van de (correcte) spoorligging.

Uit literatuur lijkt de maatregel op sommige frequenties tot een toename in trillingen te kunnen leiden. Enkele studies die beschikbaar zijn geven tegenstrijdige informatie over effect op trillingen. Voordat een proef wordt ingericht is het voorstel om door te laten rekenen wat het theoretische toepassingsbereik en effect is.

Specifieke risico's voor Toestemming Voor Gebruik (TVG) zijn RAMSHE aspecten, zoals risico op bodemverontreiniging door leaching, afvalstromen bij einde levensduur en de gefixeerde ligging waardoor onderstoppen niet mogelijk is. Deze dienen onderzocht te worden alvorens een proef wordt gestart.

Bij toepassing is een juiste spoorligging essentieel, aangezien niet meer onderstopt kan worden.



Knock Out Criteria	Score	Toelichting score
Draagt proef bij aan vergroten beslisinformatie?	✓	Geen ervaring in Nederland.
Bronmaatregel?	✓	
Toepasbaar in boven- of onderbouw?	✓	
Voldoende capaciteit om voor proef te leveren?	✓	Leverancier geeft aan dat machines in Europe beschikbaar zijn
Voldoende kennis/capaciteit bij aannemers om proef uit te voeren?	✓	
TVG voor proef waarschijnlijk?	?	Mogelijk negatieve RAMSHE effecten die eerst onderzocht moeten worden
Leverbaar binnen 1-2 jaar? (shelf ready)	✓	

Overige Criteria	Score	Toelichting score
Verwachte doeltreffendheid van maatregel	+/-	Tegenstrijdige informatie in literatuur over effect op trillingen.
Haalbaarheid voor brede implementatie	+/-	Hangt deels van vrijgave af. Licentie model kan beperkend werken
Kwaliteit van theoretisch model (Proof of concept)	+/-	Werking gebaseerd op betere spreiding en fixeren spoorligging. Voorspelbaarheid op effect trillingen onderzoeken
Verwachte bijdrage aan beslisinformatie	+	Nog niet toegepast in Nederland, tegenstrijdige informatie in literatuur
Verwacht toepassingsbereik	+/-	Onbekend, hangt ook van vrijgave af
(Neven)effecten (naast trillingsreductie)	+/-	Mogelijk leaching en afval. Onderstoppen niet meer mogelijk Mogelijk trillingstoename op sommige frequenties die hinder veroorzaken Reductie van benodigd onderhoud

4.2 Geogrid in ballast

Geogrid (eventueel in combinatie met een scheidend geotextiel) zorgt voor betere fixering van de ballast en extra treksterkte, waardoor een stabieler lichaam wordt gevormd. Bij huidige bovenbouwvernieuwingen wordt dit al regelmatig toegepast ten behoeve van baanstabilitiet en lijkt effectief in het beperken van degradatie van het spoor. De werking met betrekking tot trillingsreductie berust op een betere belastingspreiding enerzijds en een betere spoorligging op lange termijn (minder degradatie). Er zijn nog geen proeven uitgevoerd waarbij naar het effect en de neveneffecten op trillingen is gekeken.

Voor aanbrengen van de maatregel is verwijderen van ballast noodzakelijk. De geogrids moeten voldoende diep gelegd worden om onderstoppen mogelijk te maken. Geogrids in de ballast worden reeds binnen het netwerk toegepast als geotechnische maatregel en een ontwerpvoorschrift is beschikbaar.

Een proef met geogrids zal gericht zijn op het meten van de (neven)effecten van de maatregel op trillingen.

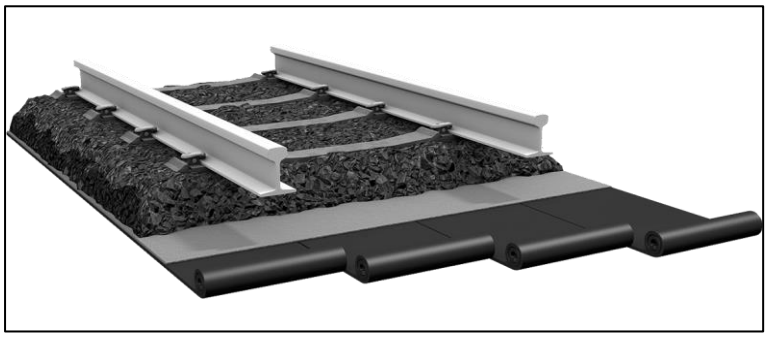
Knock Out Criteria	Score	Toelichting score
Draagt proef bij aan vergroten beslisinformatie?	✓	Effect op trillingen niet onderzocht
Bronmaatregel?	✓	
Toepasbaar in boven- of onderbouw?	✓	
Voldoende capaciteit om voor proef te leveren?	✓	Worden als geotechnische maatregel al toegepast
Voldoende kennis/capaciteit bij aannemers om proef uit te voeren?	✓	Worden als geotechnische maatregel al toegepast
TVG voor proef waarschijnlijk?	✓	Worden als geotechnische maatregel al toegepast
Leverbaar binnen 1-2 jaar? (shelf ready)	✓	Worden als geotechnische maatregel al toegepast

Overige Criteria	Score	Toelichting score
Verwachte doeltreffendheid van maatregel	+/-	Onbekend wat positieve en negatieve effecten op trillingen zijn
Haalbaarheid voor brede implementatie	+	Bekende toepassing in GWW bouw en reeds toegepast binnen netwerk
Kwaliteit van theoretisch model (Proof of concept)	+	Berust op betere belastingspreiding enerzijds en langdurig betere spoorligging anderzijds
Verwachte bijdrage aan beslisinformatie	+	In kaart brengen effecten op trillingen van reeds toegepaste maatregel
Verwacht toepassingsbereik	+/-	Onbekend, hangt mogelijk van spoorligging af. Onbekend op welk frequentiebereik effectief
(Neven)effecten (naast trillingsreductie)	+	Mogelijk levensduurverlenging/minder onderhoud

4.3 Ballast matten

Ballast matten worden reeds toegepast op kunstwerken en in tunnels. De werking berust op het toevoegen van een elastische laag. Met toepassing in regulier ballast spoor is weinig ervaring. Toepassing vereist een verharde onderlaag (bijvoorbeeld beton) en opsluiting aan de zijkanten.

Vanwege de verwachte hoge kosten van een proef wordt voorgesteld om eerst een ontwerp te laten maken inclusief een voorspelling van de verwachte effecten op trillingen.



Knock Out Criteria	Score	Toelichting score
Draagt proef bij aan vergroten beslisinformatie?	✓	Toepassing in regulier ballast spoor weinig onderzocht
Bronmaatregel?	✓	
Toepasbaar in boven- of onderbouw?	✓	
Voldoende capaciteit om voor proef te leveren?	✓	
Voldoende kennis/capaciteit bij aannemers om proef uit te voeren?	✓	
TVG voor proef waarschijnlijk?	✓	
Leverbaar binnen 1-2 jaar? (shelf ready)	✓	

Overige Criteria	Score	Toelichting score
Verwachte doeltreffendheid van maatregel	+/-	Vooral toegepast in tunnels en kunstwerken. Uit Duitse proeven lijkt de maatregel vooral effectief >40Hz. Wordt als maatregel al toegepast bij nieuwbouw.
Haalbaarheid voor brede implementatie	+/-	Vrijgegeven voor gebruik
Kwaliteit van theoretisch model (Proof of concept)	+/-	Lijkt te berusten op demping, maar in ballast spoor mogelijk ook verbeteren spoorligging door toevoegen treksterkte
Verwachte bijdrage aan beslisinformatie	+	Toepassing in regulier spoor weinig onderzocht

Verwacht toepassingsbereik	+/-	Vereist opsluiting van zijkant ballast bed. Uit Duitse proeven lijkt vooral effectief >40Hz
(Neven)effecten (naast trillingsreductie)	-	Vereist opsluiting van zijkant ballast bed, vergroot ruimtebeslag

5.1 Verstijven baanlichaam

Het verstijven van het baanlichaam door toepassing van bijvoorbeeld jetgrout kolommen, in de grond gevormde palen of soilmixing, verkleint de samendrukking van de grond. Daarnaast kan belasting naar een eventueel meer draagkrachtig laag worden afgedragen. De maatregel wordt veel toegepast bij spoor dat kleine liggingstoleranties heeft, zoals HSL.

Een alternatieve wijze van verstijven is het toevoegen van een PSS laag, waarbij een relatief dunne laag wordt verstijfd.

Verstijving wordt reeds toegepast om een stabieler baanlichaam te verkrijgen, zowel met PSS lagen als met diepere elementen (kolommen, palen).

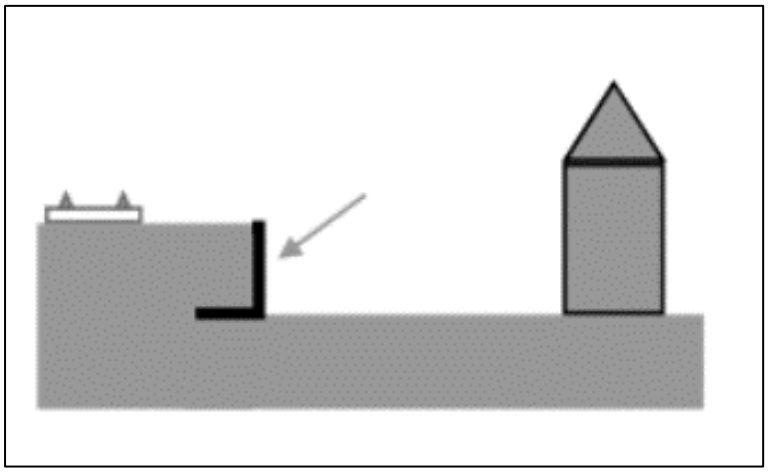
Knock Out Criteria	Score	Toelichting score
Draagt proef bij aan vergroten beslisinformatie?	×	Effect bekend
Bronmaatregel?	✓/×	Deels overdrachtsmaatregel
Toepasbaar in boven- of onderbouw?	✓	Onderbouw
Voldoende capaciteit om voor proef te leveren?	✓	Bekende toepassing in GWW bouw
Voldoende kennis/capaciteit bij aannemers om proef uit te voeren?	✓	Bekende toepassing in GWW bouw
TVG voor proef waarschijnlijk?	✓	Reeds toegepast
Leverbaar binnen 1-2 jaar? (shelf ready)	✓	Bekende toepassing in GWW bouw

Overige Criteria	Score	Toelichting score
Verwachte doeltreffendheid van maatregel	+/-	
Haalbaarheid voor brede implementatie	+	
Kwaliteit van theoretisch model (Proof of concept)	+	Verstijving baanlichaam en evt overdracht naar diepere grondlagen

Verwachte bijdrage aan beslisinformatie	+/-	Effect en neveneffecten op trillingen van PSS laag nog niet onderzocht
Verwacht toepassingsbereik	-	Hoge kosten en ingrijpende maatregel door werk in baanlichaam.
(Neven)effecten (naast trillingsreductie)	+/-	Grote carbon footprint Risico op trillingen en wateroverspanning bij installatie. Mogelijk effect op drainage en grondwaterstroming Risico op extra zetting door gewichtstoename Mogelijk minder onderhoud, stabieler baanlichaam

5.2 Steiler baantalud

Het steiler maken van het baantalud kan trillingen reflecteren. Er is weinig onderzoek naar het effect op trillingen gedaan. Een steiler baantalud vereist een kerende constructie, zoals een L-wand. Dit vereist ofwel een groter ruimte beslag, of tijdelijke verwijdering van het spoor en ontgraving van het baanlichaam. In dat laatste geval kan mogelijk het ruimtebeslag verkleind worden.



Knock Out Criteria	Score	Toelichting score
Draagt proef bij aan vergroten beslisinformatie?	✓	
Bronmaatregel?	✓/×	Deels overdrachtmaatregel
Toepasbaar in boven- of onderbouw?	✓	
Voldoende capaciteit om voor proef te leveren?	✓	
Voldoende kennis/capaciteit bij aannemers om proef uit te voeren?	✓	
TVG voor proef waarschijnlijk?	✓	
Leverbaar binnen 1-2 jaar? (shelf ready)	✓	

Overige Criteria	Score	Toelichting score
Verwachte doeltreffendheid van maatregel	+/-	Afhankelijk van afstand tussen spoor en objecten
Haalbaarheid voor brede implementatie	+	
Kwaliteit van theoretisch model (Proof of concept)	+/-	Principe is bekend, maar modellering hangt af van specifieke doorsnede
Verwachte bijdrage aan beslisinformatie	+	
Verwacht toepassingsbereik	-	Kostbare maatregel
(Neven)effecten (naast trillingsreductie)	+/-	Afhankelijk van toepassing kan het ruimtebeslag vergroten of verkleinen.