WEBOOST

ProRail

KLACHTEN OVER TRILLINGEN

ONDERZOEK NAAR BEPALENDE FACTOREN 2025

COLOFON

Auteur(s)	Pieter Boon
	Marjolein Hordijk
	Thomas Vos
Projectcode	WBD2024-036
Versienummer	2.0
Datum	8 april 2025
Status	Definitief
Opdrachtgever	ProRail B.V.

WEBOOST

© We-Boost 2025

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand of openbaar gemaakt in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van We-Boost.

MANAGEMENTSAMENVATTING

Aanleiding

Binnen de Innovatie-agenda Bronaanpak Spoortrillingen (IBS) werkt ProRail aan een innovatie-agenda spoortrillingen. Binnen deze agenda worden onderzoeksprojecten uitgevoerd om de overlast van treintrillingen op de omgeving te verminderen. Veel problemen zijn bekend, denk aan problemen met harde punten (overwegen, kunstwerken) en rond wissels, maar zijn die ook vooral bepalend voor de klachten die ProRail in de loop der jaren heeft ontvangen? M.a.w., is het mogelijk om de innovatie-agenda te prioriteren o.b.v. de klachten uit het verleden, zodat de meest urgente problemen het eerst worden aangepakt?

In 2022 is onderzocht wat de belangrijkste zogenaamde 'drivers' zijn voor klachten over trillingen over de periode 2017 tot medio 2021. Doel hiervan we om vast te stellen of er specifieke situaties of omstandigheden aan te wijzen zijn waarbij er meer overlast is van trillingen? Het antwoord op die vraag is gebruikt om de aanpak om trillingen te verminderen te prioriteren.

Het voorliggende rapport bevat een actualisatie van dit eerdere onderzoek, met de klachten over de periode medio 2021 tot medio 2024, en extra inzicht in specifieke treintypes. Net als in het eerdere onderzoek is door middel van een data-analyse met behulp van een zogenaamd Random Forest-model onderzocht welke parameters wel en welke geen invloed hebben op het aantal klachten.

Conclusies

Conclusie van het onderzoek is dat er inderdaad situaties zijn aan te wijzen die vaker dan verwacht tot klachten leiden. Vooral veranderingen (denk aan bovenbouwvernieuwing, een nieuwe overweg, andere treinen of een hogere rijsnelheid) leiden vaak tot klachten. Dit kan komen doordat de trillingen toenemen, maar evengoed ook doordat de trillingen een andere frequentie-inhoud krijgen en dus anders worden ervaren. Niet onbelangrijk hierbij is ook de rol van de media en actiegroepen, deze dragen in belangrijke mate bij aan het melden van klachten, zo blijkt uit onze analyse.

[1] In eerdere onderzoeken (o.m. m.b.t. introductie TRAXX+ICRmh op Brabantroute, snelheidsverhoging Naarden-Bussum, snelheidsverhoging goederentreinen Utrecht) is te zien dat een verschuiving van de maatgevende trillingsfrequenties in sommige gebouwen tot fors hogere trillingen kan leiden (als die woningen gevoelig zijn voor de nieuwe maatgevende trillingsfrequenties). Terwijl de trillingen in andere woningen (die juist gevoelig waren voor de eerder maatgevende trillingsfrequenties) kunnen afnemen. Voor veel waargenomen effecten in dit onderzoek kan dit ook een verklaring zijn.

MANAGEMENTSAMENVATTING

Verder valt op dat ook sociologische aspecten een rol kunnen spelen in het melden van klachten: zo wordt er meer geklaagd uit wijken met veel eenpersoonshuishoudens, weinig gezinnen met kinderen en veel 65-plussers. Ook zijn er meer klachten uit dichtbevolkte gebieden.

De belangrijkste invloedsparameters zijn hieronder weergegeven. Per parameter is te zien hoe sterk de invloed is op het aantal klachten. Ten opzichte van de eerdere analyse (periode 2017 tot medio 2021) valt op dat treinparameters (pieklast, RMS_{low}) minder belangrijk zijn geworden.

Parameter	Invloed op klachten	Toelichting
Hoogteverschil spoor en maaiveld		Veel meer klachten bij kleiner hoogteverschil. Meeste klachten bij spoor op maaiveld zonder spoorsloot.
Afstand tot spoor		Veel meer klachten op kortere afstand van het spoor. Buiten 75 meter van spoor geen sterke invloed.
Percentage private huurwoningen		Veel meer klachten uit wijken met weinig private huurwoningen (meer koop- en corporatiewoningen).
Afstand tot ES-las		Veel meer klachten bij kortere afstand tot (vooral oudere) ES-las. Bij >75 meter van ES-las geen invloed.
Aantal goederentreinen		Meer klachten bij groter aantal goederentreinen, vooral bij meer goederentreinen in de nacht.
Stijfheid bodem		Meer klachten op stijve bodems (zand, oosten en zuiden van het land).
Snelheid treinen		Meer klachten bij hoge rijsnelheid, vooral van reizigerstreinen
Aantal treinen met hoge aslast		Meer klachten bij meer zware treinpassages (vooral zwaarbeladen goederentreinen).
Afstand tot tunnel		Meer klachten dichtbij tunnels
Huishoudens met kinderen		Minder klachten uit wijken met veel huishoudens met kinderen, en meer uit wijken met weinig kinderen
Aantal treinen type VIRM		Minder klachten als er weinig treinen van type VIRM passeren
Afstand tot overweg		Meer klachten bij kortere afstand tot (niet-STRAIL) overweg. Buiten 75 meter van overweg geen invloed.
Gebouwhoogte		Meer klachten uit hogere gebouwen, maar beeld is diffuser dan vanuit periode 2017-2021
Aantal treinen type DDZ		Meer klachten bij meer treinen van type DDZ, maar beeld is diffuus

MANAGEMENTSAMENVATTING

Wat kun je hiermee?

Op basis van de analyse van de klachten is een aantal adviezen geformuleerd m.b.t. het prioriteren van een aanpak om het aantal klachten te verminderen:

1. Focus bij maatregelen op gebieden met:
    a. Bebouwing dicht op het spoor, en vooral op stijvere bodemtypes (zand).
    b. Druk bereden, gemengde trajecten met veel goederentreinen op volle snelheid.
2. Doe nader onderzoek naar de gemelde klachten rond (vooral oudere) ES-lassen. Komen die door de ES-lassen, of door de combinatie met wissels en/of overwegen? En hoe kun je deze problematiek verminderen?
3. Doe onderzoek naar mogelijkheden om de dynamische pieklast en de RMS_{low} (indicator van wielonrondheid) te verminderen.
4. Koester spoorsloten als relatief goedkope maatregel tegen trillingen: er wordt significant minder geklaagd als er een spoorsloot tussen spoor en bebouwing ligt.

Op basis van de nieuwe analyse is ook te zien dat bepaalde treintypes veel sterker dan andere verantwoordelijk lijken te zijn voor klachten. Het gaat dan met name om goederentreinen en TRAXX+ICRmh-treinen (beide bekend), maar ook treinen van het type VIRM, Flirt, DDZ en SNG lijken voor opvallend meer klachten te zorgen dan verwacht. Treinen van het type GTW lijken juist voor minder klachten te zorgen. Overigens kan hierbij meespelen dat op veel trajecten waar de GTW is geintroduceerd, in het verleden treintypes reden die relatief vaak voor overlast zorgden, zoals de DM'90. Vanuit andere onderzoeken blijkt dat de historische trillingsbeleving (is er iets verbeterd of verslechterd?) een belangrijke rol speelt in het wel of niet melden van een klacht.

Tenslotte laat dit onderzoek (opnieuw[1]) zien dat trillingen eigenlijk altijd frequentie-afhankelijk moeten worden beschouwd: veel klachten lijken te zijn gerelateerd aan verschuivingen in het frequentiespectrum van de trillingen, bijvoorbeeld door een hogere rijsnelheid, andere treintypes of wijzigingen in de spoorconstructie. En niet eens perse door hogere trillingen zelf.

INHOUDSOPGAVE

Managementsamenvatting	3
1. Inleiding	7
2. Aanpak	8
3. Resultaten	10
4. Samenvatting	44
Bijlages met achtergrondinformatie	45

Rob Dammers, CC BY 2.0, via Wikimedia Commons

1. INLEIDING

1.1 Aanleiding

Binnen de Innovatie-agenda Bronaanpak Spoortrillingen (IBS) werkt ProRail aan een innovatie-agenda spoortrillingen. Binnen deze agenda worden onderzoeksprojecten uitgevoerd om de overlast van treintrillingen op de omgeving te verminderen. Veel probleemlocaties zijn bekend, denk aan harde punten (overwegen, kunstwerken) en wissels, maar zijn die ook vooral bepalend voor de klachten die ProRail in de loop der jaren heeft ontvangen? M.a.w., is het mogelijk om de innovatie-agenda te prioriteren o.b.v. de klachten uit het verleden, zodat de meest urgente problemen het eerst worden aangepakt? In 2022 is hier onderzoek naar gedaan, de uitkomsten van dat onderzoek zijn mede gebruikt om projecten binnen het IBS te prioriteren.

1.2 Doel

Doel van dit onderzoek is om het eerdere onderzoek naar de belangrijkste zogenaamde ‘drivers’ voor klachten over trillingen over de afgelopen jaren te updaten. We onderzoeken of het beeld zoals geschetst in het eerdere onderzoek is gewijzigd, en geven daarnaast nieuwe inzichten over verschillen tussen treintypes.

1.3 Leeswijzer

Dit rapport is als volgt opgebouwd:

- In hoofdstuk 2 lichten we de aanpak toe
- In hoofdstuk 3 geven we de resultaten van het onderzoek
- We sluiten af met een beknopte samenvatting in hoofdstuk 4

Het rapport is zo grafisch mogelijk opgezet. Elke figuur is voorzien van een toelichting om het rapport zelfstandig leesbaar te houden. Bij het opzetten van dit rapport is beperkte voorkennis op het gebied van trillingen verondersteld.

2. AANPAK

2.1 Inleiding

In dit hoofdstuk beschrijven we onze aanpak. Omdat we onderbouwd uitspraken willen doen over wat nu wel en geen invloed heeft op klachten over trillingen, hebben we een data-analyse uitgevoerd waarbij we informatie hebben gekoppeld aan klachten uit de database van Publieksvoorlichting (PuVo) van ProRail. Vervolgens hebben we deze data opgeschoond, verrijkt en geanalyseerd op parameters die wel en geen invloed hebben op het ontstaan van de klachten. Deze aanpak is hieronder schematisch weergegeven.

2.2 Dataverzameling

Voor ons onderzoek hebben we zowel interne (ProRail) als externe openbare databronnen gebruikt. Op basis van eerdere onderzoeken en expert judgment hebben we alle mogelijk relevante gegevens verzameld en gekoppeld aan de klachten.

Hierbij hebben we gebruik gemaakt van een zogenaamde geocoder om de opgegeven adressen aan panden uit de Basisregistratie Adressen en Gebouwen (BAG) te koppelen. Op basis van de gevonden locatie is vervolgens de data van de klachten verrijkt met informatie over de omgeving. Dit betreft onder andere de bodemopbouw, gegevens over het spoor en de treinen over de buurtsamenstelling (van het CBS), zie het overzicht hieronder. Hierdoor kan voor elke klacht een breed beeld gevormd van mogelijke oorzaken.

Vervolgens is die aanpak per jaar herhaald voor ongeveer 40.000 random geselecteerde panden, verspreid over heel Nederland. Deze referentiedataset is gebruikt om in de random forest analyse te bepalen welke factoren van belang zijn bij het wel of niet ontstaan van klachten.

Klachten
- Bron: ProRail
- Omschrijving
- Adres

Gebouwen
- Bron: BAG3D
- Locatie
- Bouwjaar
- Afmetingen

Bodem
- Bron: BRO, AHN3, Openstreetmap
- Water
- Type bodem
- Stijfheid bodem
- Hoogteverschil

Treinbeeld
- Bron: ProRail BBK, Geluidregister, RIVM, QuoVadis
- Sporen
- Rijsnelheid
- Spoorconstructie
- Treinaantallen
- Treintypes
- Treinparameters
- Geluidniveaus

Buurtcijfers
- Bron: CBS
- Leeftijden
- Huur en koop
- Huishoudens
- Bevolking

2. AANPAK

2.3 Exploratie

Na het opschonen en koppelen van de data, hebben we gebruik gemaakt van statistieken, correlaties en grafieken om grove trends in data te vangen, en bijvoorbeeld kaarten te maken die de geografische spreiding van de klachten weergeven. Deze fase helpt bij het achterhalen van globale trends.

2.4 Random Forest-analyse

Vervolgens hebben wij een data-analyse uitgevoerd op basis van een Random Forest (RF) model. Hiermee hebben wij bepaald welke parameters wel of niet relevant zijn bij het ontstaan van een klacht. Een RF-model is een machine learning techniek waarbij de invloed van parameters op elkaar wordt onderzocht met behulp van zogenaamde beslisbomen. Het mooie van een RF-model is dat de techniek in principe ongestuurd is (het RF-model gaat zelf op zoek naar relaties) en dat de resultaten goed interpreteerbaar zijn (geen black box uitkomsten). Zo zijn uitkomsten ook goed te valideren. Meer details zijn te vinden in Bijlage I.

2.5 Validatie

Tenslotte hebben we de uitkomsten van het RF-model gevalideerd door deze naast de uitkomsten uit de exploratiefase (zie paragraaf 2.3) te leggen en te beoordelen op expert judgment.

3. RESULTATEN

3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk presenteren we de resultaten van ons onderzoek. We geven daarbij eerst algemene informatie over de klachten (denk aan geografische verdeling over Nederland en ontwikkeling over de jaren heen), daarna zoomen we in op de bepalende factoren of 'drivers' voor de klachten.

3.2 Exploratiefase

De volgende slides bevatten resultaten van de exploratiefase, waarin we algemene trends en uitkomsten uit de klachtenanalyse geven.

3. RESULTATEN

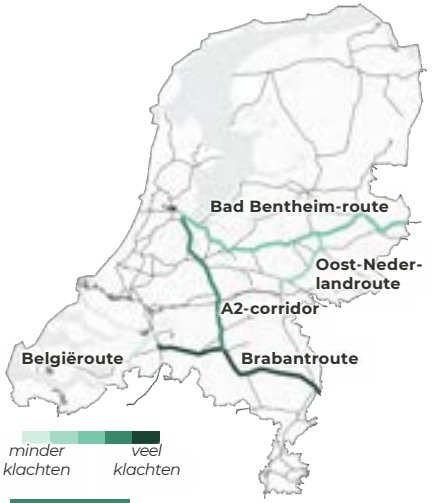
WAAR WORDT HET VAAKST OVER GEKLAAGD?

3. RESULTATEN

WANNEER WORDT HET MEEST GEKLAAGD?

3. RESULTATEN

VERDELING OVER HET LAND - MAATGEVENDE CORRIDORS



CORRIDORS

Vooral klachten op Brabantroute

Gemeente	Vorige positie	Route	Klachten	Unieke klachten
Oisterwijk	1 (0)	Brabantroute	135	87
Tilburg	5 (+4 ↑)	Brabantroute	129	73
Rheden	2 (-1 ↓)	Oost-Nederlandroute	892	70
Utrecht	6 (+2 ↑)	A2-corridor	93	55
Oosterhout	3 (-2 ↓)	Brabantroute	99	50
Gooise Meren	4 (-2 ↓)	Bad Bentheim-route	75	45
Roosendaal	10 (+3 ↑)	België route	48	36
Breda	17 (+9 ↑)	Brabantroute	58	34
Eindhoven	8 (-1 ↓)	Brabantroute	87	34
Gilze en Rijen	7 (-2 ↓)	Brabantroute	46	33
Vught	9 (-2 ↓)	A2-corridor	61	32
Helmond	18 (+6 ↑)	Brabantroute	41	31

GECONCENTREERDE KLACHTEN

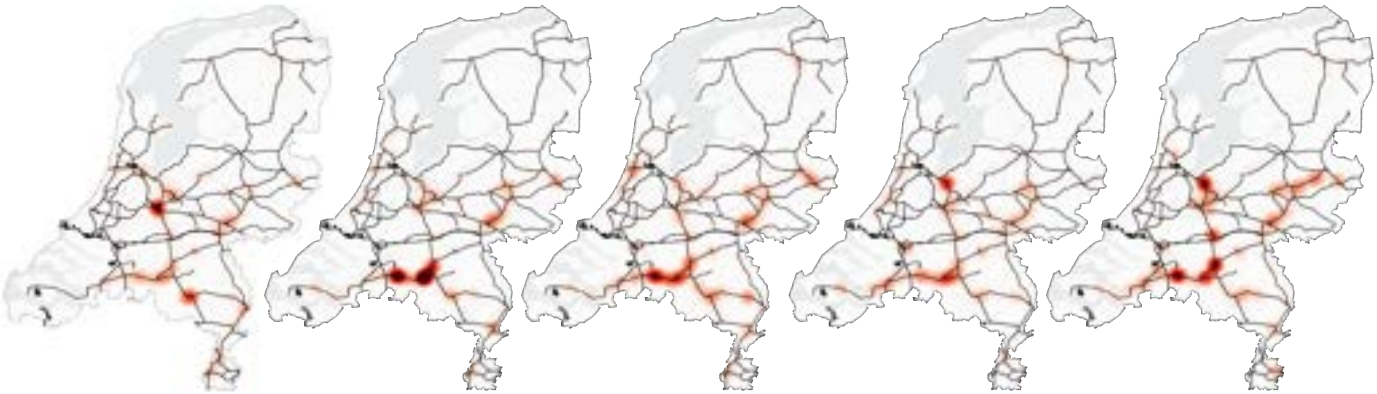
In 12 gemeenten:

- 33% van unieke klachten (was 36% over 2017-2021)
- 46% van alle klachten (was 60% over 2017-2021)

Meer spreiding, minder hotspots dan in periode 2017-2021

3. RESULTATEN

HOTSPOTS PER JAAR



2017
Hogere snelheid goederentreinen Utrecht Centraal

2018
Introductie TRAXX-locomotief op Brabantroute

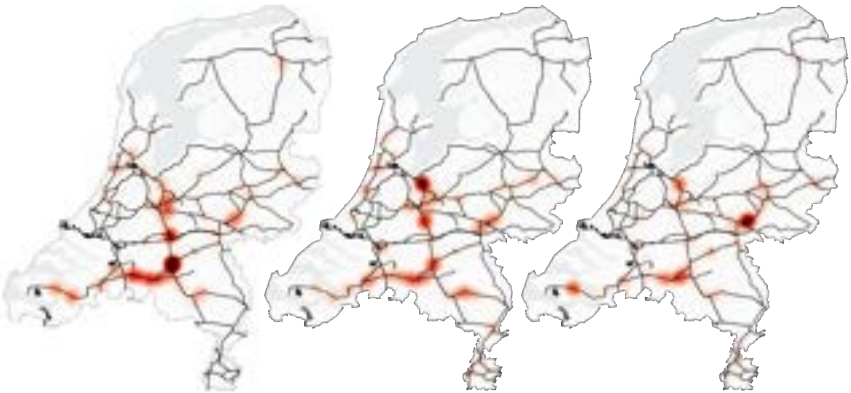
2019
Veel media-aandacht voor TRAXX-locomotief op Brabantroute

2020
Snelheidsverhoging Naarden-Bussum, minder klachten op Brabantroute

2021
Media-aandacht voor snelheidsverhoging Naarden-Bussum, weer meer klachten op Brabantroute en in Vught

3. RESULTATEN

HOTSPOTS PER JAAR



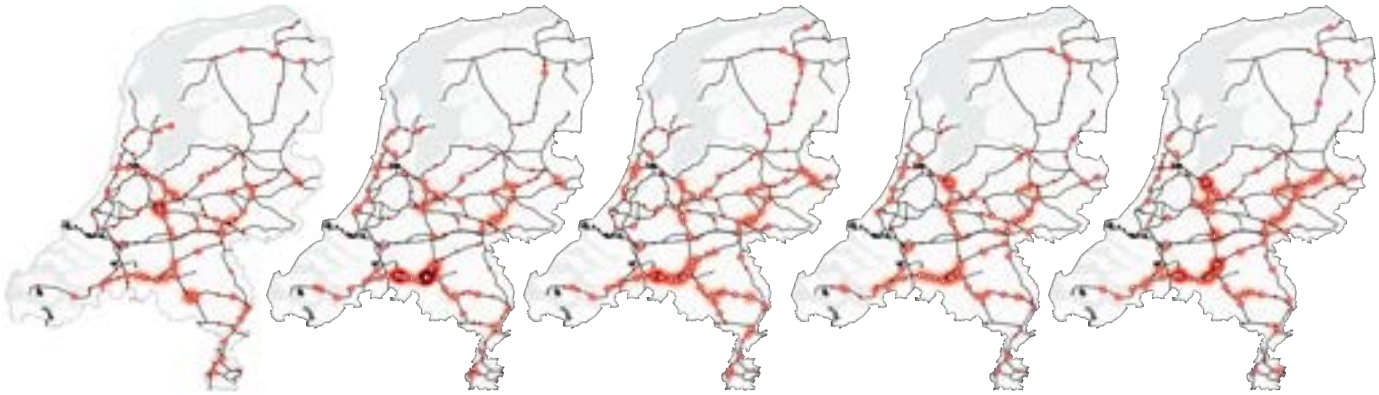
2022
Werkzaamheden in Geldermalsen en Vught

2023
Weer meer klachten in Naarden-Bussum, afname in Vught en Geldermalsen

2024
Meer klachten in Goes en Velp

3. RESULTATEN

HOTSPOTS PER JAAR – MET AANTAL KLACHTEN



2017
Hogere snelheid goederentreinen Utrecht Centraal

2018
Introductie TRAXX-locomotief op Brabantroute

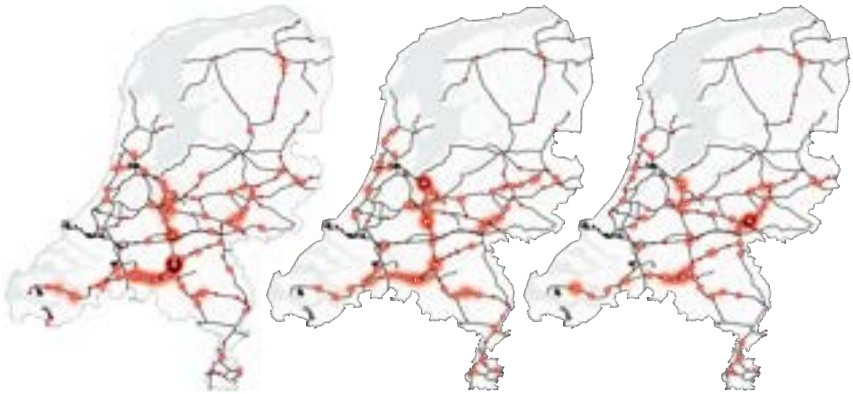
2019
Veel media-aandacht voor TRAXX-locomotief op Brabantroute

2020
Snelheidsverhoging Naarden-Bussum, minder klachten op Brabantroute

2021
Media-aandacht voor snelheidsverhoging Naarden-Bussum, weer meer klachten op Brabantroute en in Vught

3. RESULTATEN

HOTSPOTS PER JAAR – MET AANTAL KLACHTEN



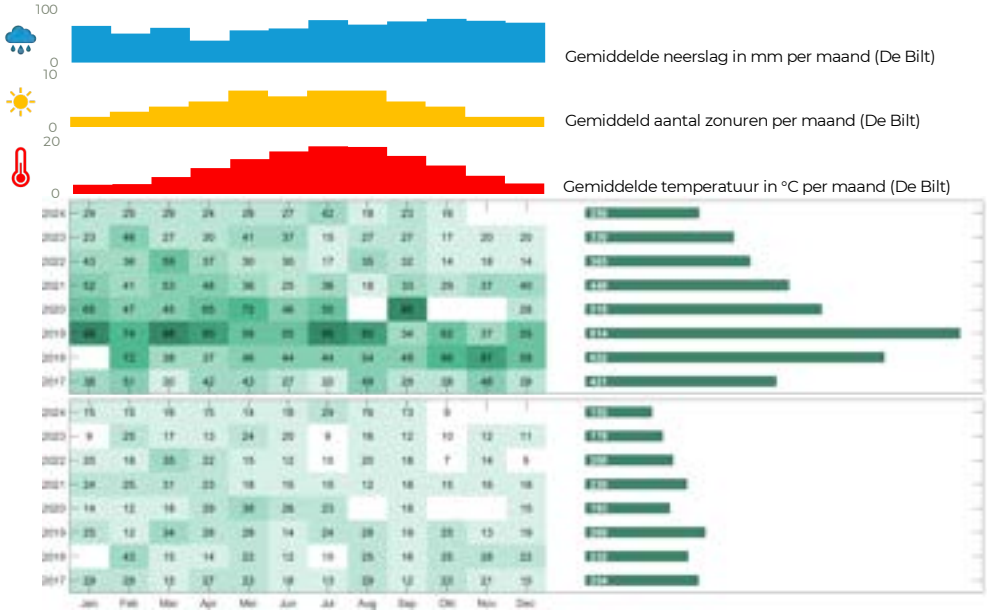
2022
Werkzaamheden in Geldermalsen en Vught

2023
Weer meer klachten in Naarden-Bussum, afname in Vught en Geldermalsen

2024
Meer klachten in Goes en Velp

3. RESULTATEN

VERDELING OVER JAREN EN MAANDEN



ALLE KLACHTEN

- Afname na eerdere toename.
- Duidelijk verschil tussen **winter en zomer** ontbreekt.

UNIEKE KLACHTEN

- In aantal unieke klachten is een lichte afname zichtbaar.
- Geen duidelijke invloed van **temperatuur**, **neerslag** of andere **seizoenspatronen** zichtbaar.

3. RESULTATEN

3.3 Random Forest-analyse

Hierna volgen de resultaten van het Random Forest-model. We starten met een totaaloverzicht, waarin de meest dominante parameters worden weergegeven.

Vervolgens geven we per parameter met behulp van grafieken meer inzicht in de invloed van die parameter op het ontstaan van klachten. Die grafieken hebben we ook gebruikt om de resultaten te valideren en te duiden.

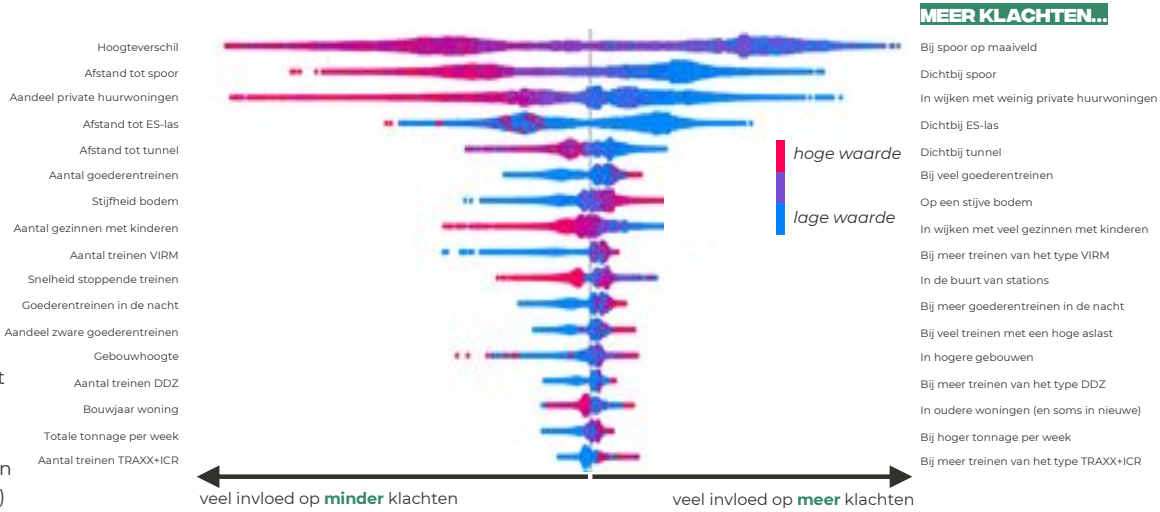
Steven Lek, CC BY-SA 4.0, via Wikimedia Commons

3. RESULTATEN

RANDOM FOREST PARAMETER DOMINANTIE

Deze SHAP-plot geeft aan hoeveel invloed een parameter heeft op het ontstaan van klachten, en of de klachten toe- of afnemen als de parameter toe- of afneemt.

Vooral **hoogte** van het spoor (t.o.v. maaiveld), **afstand tot spoor** en **ES-lassen** zijn parameters die veel invloed hebben op het wel of niet ontstaan van klachten. T.o.v. 2017-2021 komen treineigenschappen (pieklast, wielrondondheid) minder naar voren.

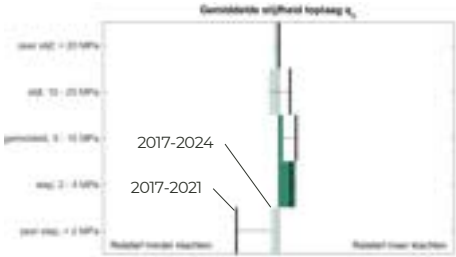


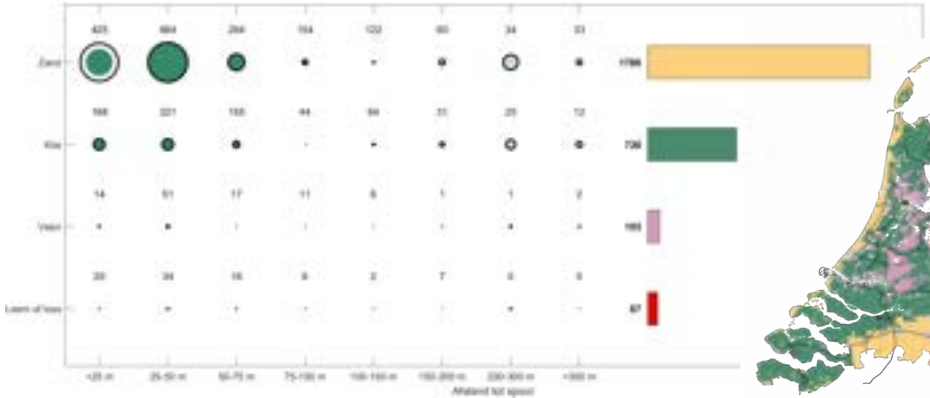
3. RESULTATEN

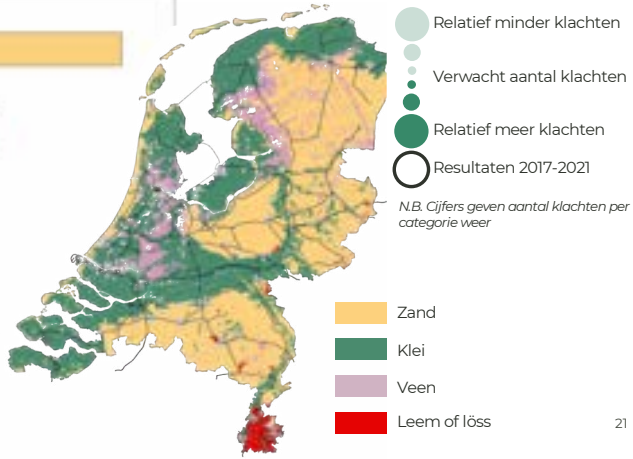
INVLOED VAN AFSTAND EN BODEMTYPE

Belangrijkste bevindingen

- Relatief meer klachten op **korte afstand** van het spoor, minder op grote afstand van het spoor.
- Relatief meer klachten op **zandbodems**, hier komen ook absoluut de meeste klachten vandaan.
- Laatste jaren relatief wat minder klachten op zandbodems, meer op slappere bodemsoorten.
- Ook klachten op meer dan 2 km gemeld.





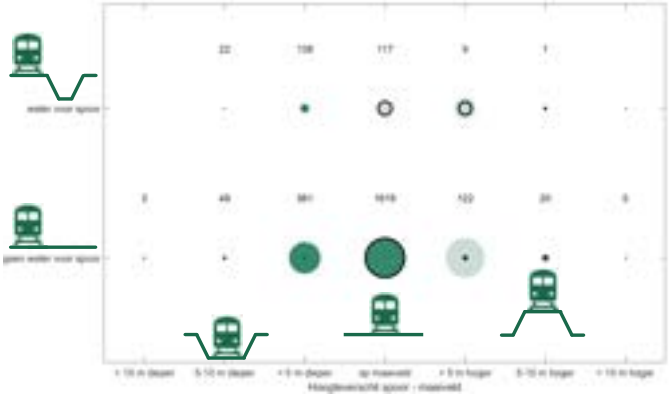


3. RESULTATEN

INVLOED VAN HOOGTELIGGING EN WATER

Belangrijkste bevindingen

- Relatief meer klachten bij **spoor op maaiveld**, als er **geen sloot** is tussen spoor en bebouwing.
- Relatief minder klachten bij spoor op maaiveld als er wel een sloot is tussen spoor en bebouwing.
- Relatief minder klachten bij spoor op verhoogd talud.
- Ten opzichte van 2017-2021 relatief meer klachten bij verdiepte ligging



Relatief minder klachten

Verwacht aantal klachten

Relatief meer klachten

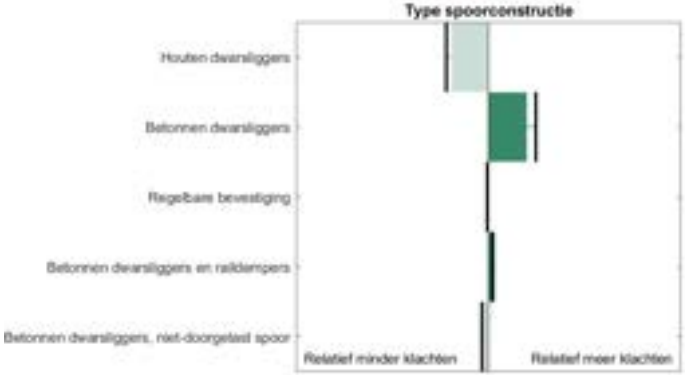
Resultaten 2017-2021

N.B. Cijfers geven aantal klachten per categorie weer
N.B.2 Verschillen t.o.v. eerdere analyse komen ook doordat andere methode is gebruikt om hoogteligging spoor vast te stellen (ProRail-data i.p.v. AHN)

3. RESULTATEN
INVLOED VAN SPOORCONSTRUCTIE

Belangrijkste bevindingen

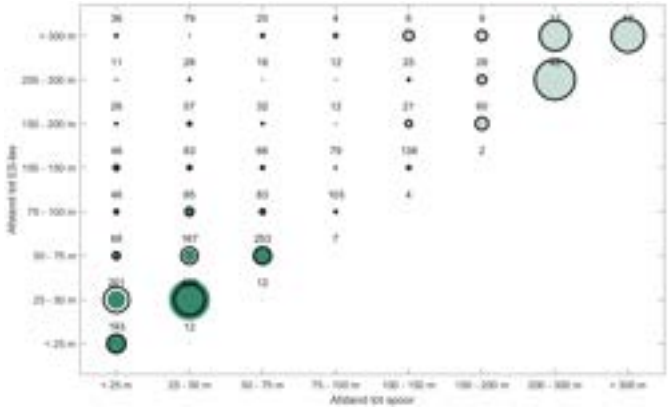
- Relatief meer klachten bij **betonnen dwarsliggers**.
- Relatief minder klachten bij houten dwarsliggers.

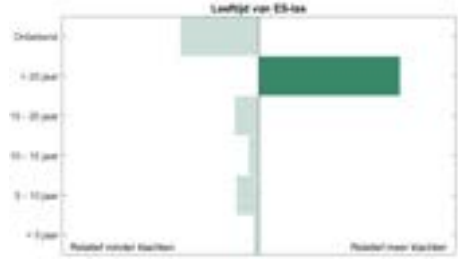


3. RESULTATEN
INVLOED VAN ES-LASSEN

Belangrijkste bevindingen

- Relatief meer klachten op **korte afstand van ES-lassen**.
- Invloed is beperkt tot ca. 75 meter.
- Relatief meer klachten in de buurt van **oudere ES-lassen**.



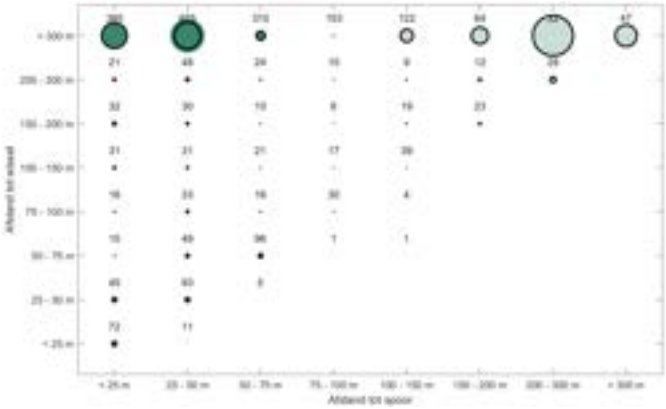


N.B. Cijfers geven aantal klachten per categorie weer

3. RESULTATEN
INVLOED VAN WISSELS

Belangrijkste bevindingen

- Relatief iets meer klachten op **korte afstand van wissels**.
- Invloed is beperkt tot ca. 75 meter, maar veel kleiner dan bij ES-lassen.

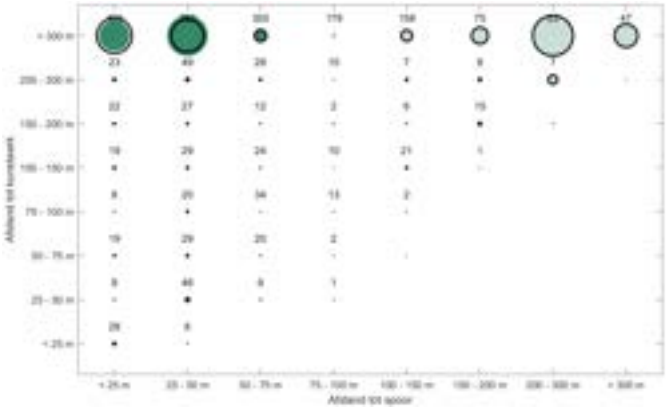


N.B. Cijfers geven aantal klachten per categorie weer

3. RESULTATEN
INVLOED VAN KUNSTWERKEN

Belangrijkste bevindingen

- Kunstwerken hebben geen significante invloed op het aantal klachten.

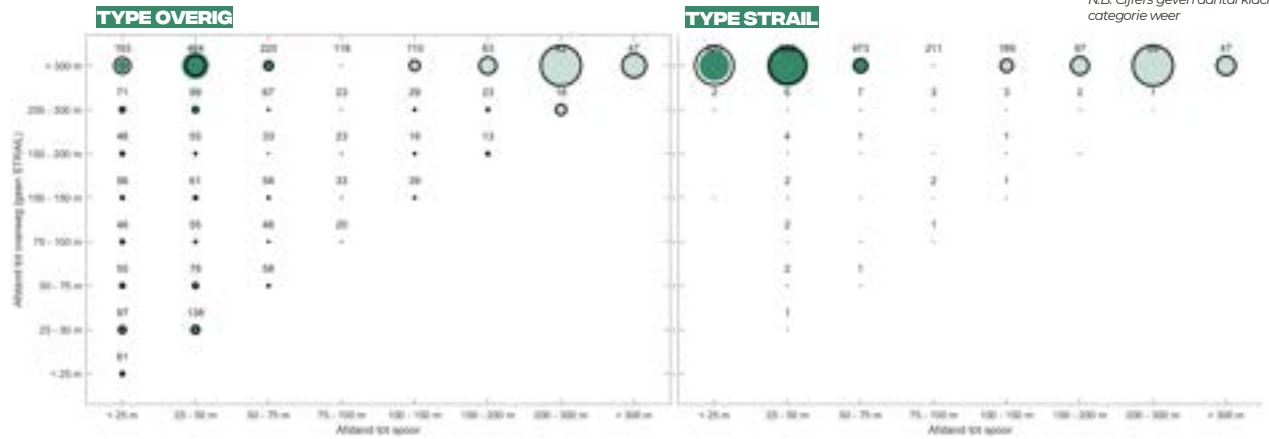


N.B. Cijfers geven aantal klachten per categorie weer

3. RESULTATEN
INVLOED VAN OVERWEGEN

Belangrijkste bevindingen

- Relatief meer klachten **dichtbij overwegen**, maar niet bij overwegen van type STRAIL.
- Invloed is beperkt tot ca. 75 meter.



Relatief minder klachten

Verwacht aantal klachten

Relatief meer klachten

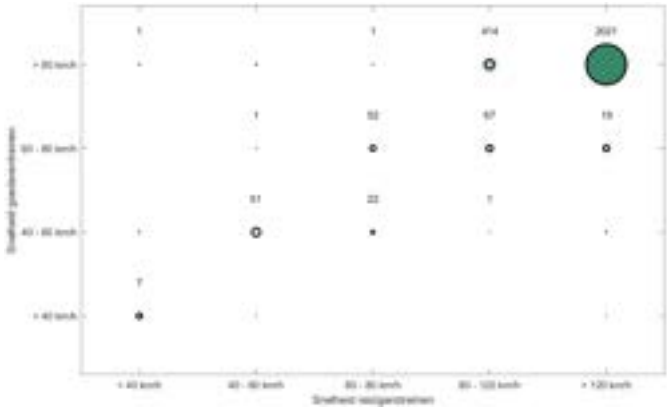
Resultaten 2017-2021

N.B. Cijfers geven aantal klachten per categorie weer

3. RESULTATEN
INVLOED VAN RIJSNELHEID

Belangrijkste bevindingen

- Relatief meer klachten bij treinen op **hoge rijsnelheid**



Relatief minder klachten

Verwacht aantal klachten

Relatief meer klachten

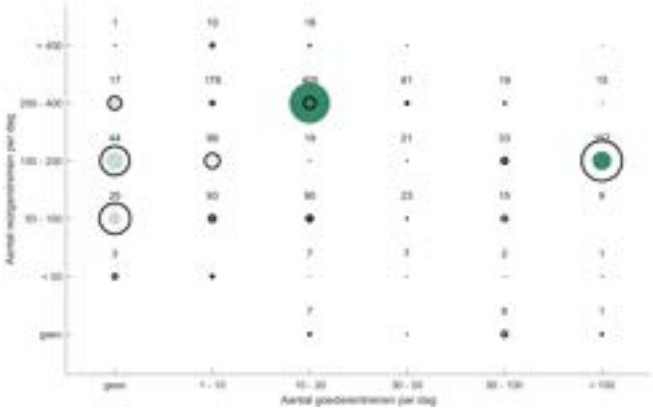
Resultaten 2017-2021

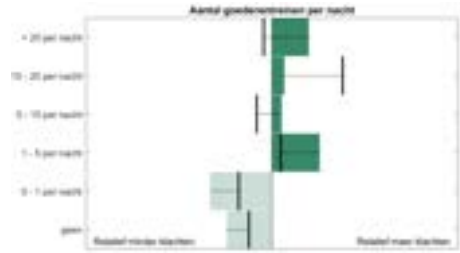
N.B. Cijfers geven aantal klachten per categorie weer

3. RESULTATEN
INVLOED VAN AANTAL TREINEN

Belangrijkste bevindingen

- Relatief meer klachten op **drukke, gemengde trajecten**
- Relatief minder klachten op trajecten zonder goederentreinen.
- Relatief meer klachten bij **goederentreinen in de nacht**. T.o.v. 2017-2021 is beeld stabieler: zodra er regelmatig goederentreinen in de nacht passeren, nemen de klachten toe.





Relatief minder klachten

Verwacht aantal klachten

Relatief meer klachten

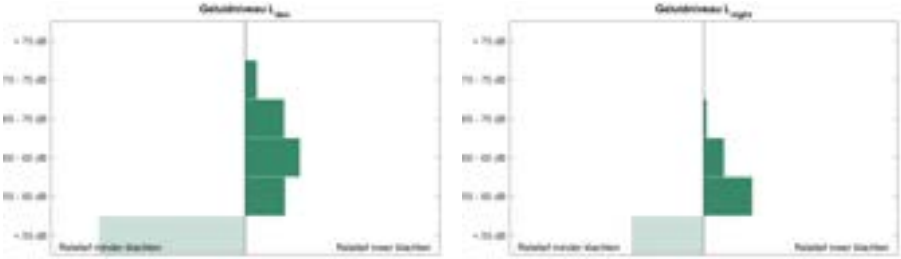
Resultaten 2017-2021

N.B. Cijfers geven aantal klachten per categorie weer
N.B.2 Intensiteiten zijn nu per jaar bepaald, in de vorige analyse was voor alle jaren uitgegaan van dezelfde intensiteit. Figuur wijkt daarom af van eerdere figuur

3. RESULTATEN
CORRELATIE MET GELUIDNIVEAU

Belangrijkste bevindingen

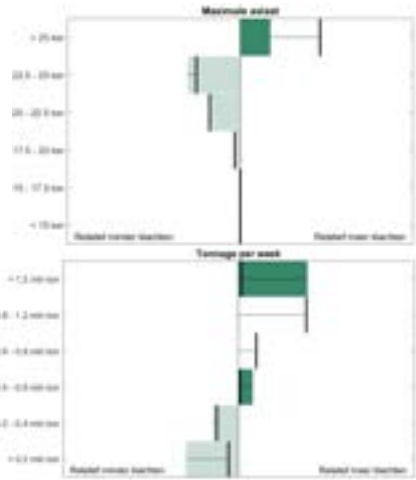
- Sterke correlatie tussen klachten en geluidniveau: meer klachten bij **hogere geluidniveaus.**
- Relatief minder klachten bij lage geluidniveaus, maar dit komt ook door de manier hoe de niet-klachten dataset is samengesteld (relatief wat meer woningen verder bij het spoor vandaan).

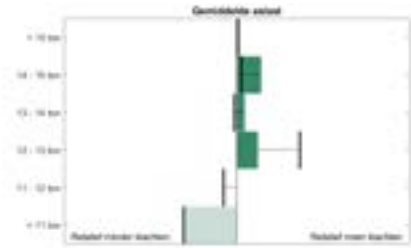


3. RESULTATEN
INVLOED VAN ASLAST

Belangrijkste bevindingen

- Relatief meer klachten van trajecten met **hoge maximale aslast** en lagere gemiddelde aslast: gemengde lijnen met afwijkende treinen[1)].
- Relatief minder klachten van trajecten met lichtere treintypes.
- Relatief meer klachten bij **zwaar bereden trajecten**, beeld is stabieler dan 2017-2021.



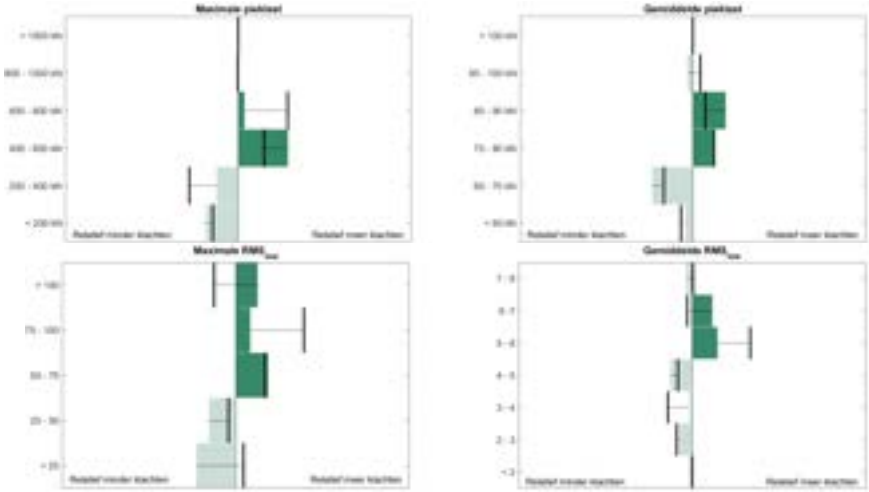


1) Treingegevens zijn nu per jaar bepaald, in de vorige analyse was voor alle jaren uitgegaan van dezelfde intensiteit

3. RESULTATEN
INVLOED VAN WIELKWALITEIT

Belangrijkste bevindingen

- Relatief meer klachten bij **hogere maximale (dynamische) pieklast**, indicator van dynamische aslast (trillingen van voertuig op baan), zeer hoge pieklast heeft daarentegen geen invloed op klachten[1)].
- Relatief meer klachten van trajecten met **hoge RMS_{low}**, indicator van wielonrondheid.



1) Treingegevens zijn nu per jaar bepaald, in de vorige analyse was voor alle jaren uitgegaan van dezelfde intensiteit

3. RESULTATEN
INVLOED VAN TREINTYPE

Belangrijkste bevindingen

- Relatief meer klachten bij elk uur **goederentreinen** en treinen van type **Flirt**, **VIRM** en **TRAXX+ICR**[1)].
- Treintypes GTW, WINK en Protos zorgen juist voor relatief minder klachten.

[1)] *Uit correlatiematrix (zie Bijlage II) zien we dat treinen van het type goederen, TRAXX+ICR en Flirt vaak op dezelfde trajecten rijden, waardoor klachten van het ene type ook door een ander van deze types kunnen komen op een deel van de trajecten. Dit kan het beeld vertekenen in dit overzicht. Op de volgende slide is dit terug te zien: uit de RF-analyse komt de Flirt namelijk niet als belangrijk naar voren, maar uit een vergelijking van klachten en niet-klachten wel. Blijkbaar is die laatste vergelijking vertekend doordat er vaak ook goederentreinen en TRAXX+ICR-treinen rijden als er ook Flirt-treinen rijden. De RF-analyse haalt dit eruit, de vergelijking alleen niet.*

Relatief minder klachten

Verwacht aantal klachten

Relatief meer klachten

N.B. Cijfers geven aantal klachten per categorie weer

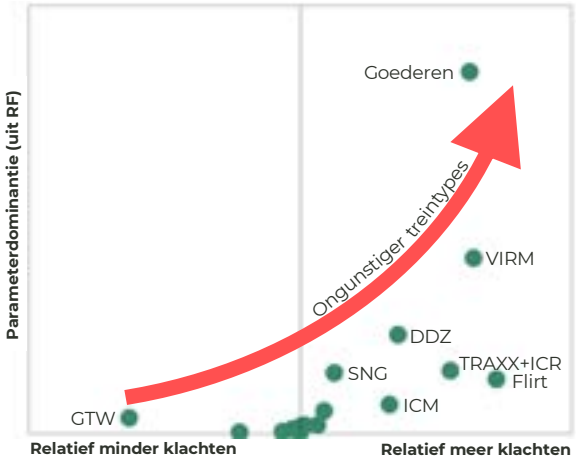
3. RESULTATEN
INVLOED VAN TREINTYPE

Belangrijkste bevindingen

- Treintypes die relatief meer klachten veroorzaken, hebben waarschijnlijk slechtere trillingseigenschappen: **Flirt**, **VIRM**, **TRAXX+ICR**, **DDZ**, **goederen**
- Treintypes die relatief minder klachten dan verwacht veroorzaken, hebben waarschijnlijk gunstiger trillingseigenschappen (**GTW**)

Treintype	Invloed op klachten	Toelichting
Goederentrein		Meer klachten bij meer goederentreinen
VIRM		Vooral minder klachten als deze niet rijdt
DDZ		Diffuus beeld
ICR		Vooral meer klachten als deze wel rijdt
SNG		Vooral meer klachten als deze wel rijdt
Flirt		Vooral minder klachten als deze niet rijdt
ICM		Geen duidelijke invloed
SLT		Geen duidelijke invloed
GTW		Vooral minder klachten als deze wel rijdt
ICE		Geen duidelijke invloed
ICNG		Geen duidelijke invloed
Thalys		Geen duidelijke invloed
Protos		Geen duidelijke invloed
Wink		Geen duidelijke invloed

Uit RF-analyse (parameterdominantie)

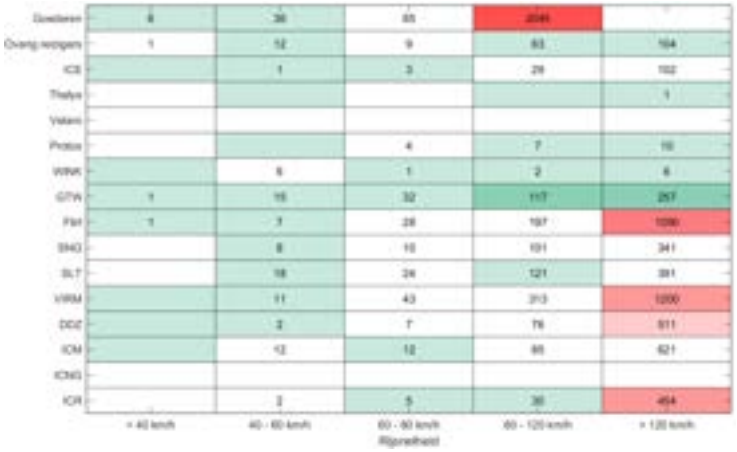


3. RESULTATEN

INVLOED VAN SNELHEID EN TREINTYPE

Belangrijkste bevindingen

- Relatief meer klachten bij **hoge snelheid**, bij lagere snelheden is aantal klachten zoals verwacht.



Relatief minder klachten

Verwacht aantal klachten

Relatief meer klachten

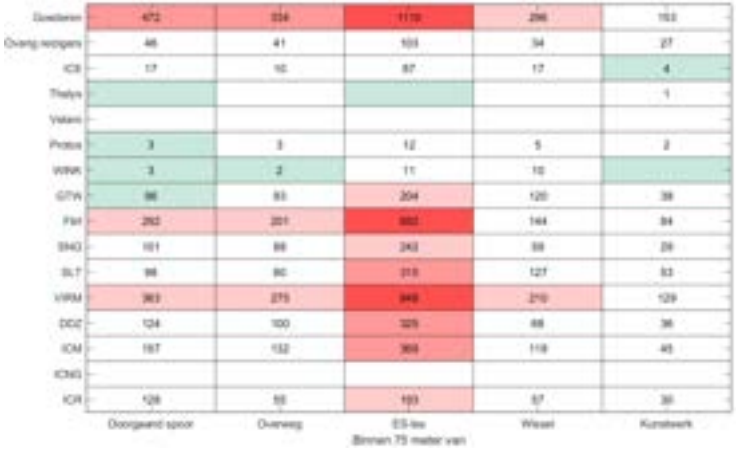
N.B. Cijfers geven aantal klachten per categorie weer voor treinen die elk uur passeren (bij goederen en internationaal minimaal 5 per dag, beide richtingen samen)

3. RESULTATEN

INVLOED VAN SPOORCONSTRUCTIE EN TREINTYPE

Belangrijkste bevindingen

- Invloed van treintype op klachten is grootst **ES-lassen**, in mindere mate ook bij **overwegen** en **doorgaand spoor**
- Bij wissels en kunstwerken geen duidelijke invloed van treintype op klachten



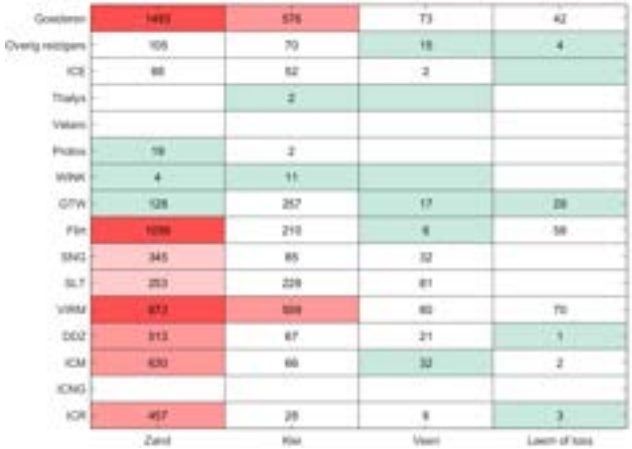
N.B. Cijfers geven aantal klachten per categorie weer voor treinen die elk uur passeren (bij goederen en internationaal minimaal 5 per dag, beide richtingen samen)

3. RESULTATEN

INVLOED VAN BODEM EN TREINTYPE

Belangrijkste bevindingen

- Relatief meer klachten op **zandbodem**, in mindere mate op kleibodems
- Bij overige bodemtypes (veen, leem of loss) is aantal klachten zoals verwacht



Relatief minder klachten

Verwacht aantal klachten

Relatief meer klachten

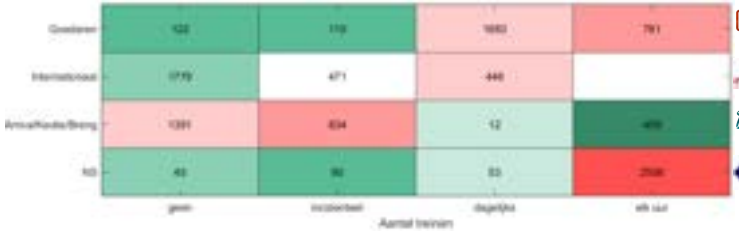
N.B. Cijfers geven aantal klachten per categorie weer voor treinen die elk uur passeren (bij goederen en internationaal minimaal 5 per dag, beide richtingen samen)

3. RESULTATEN

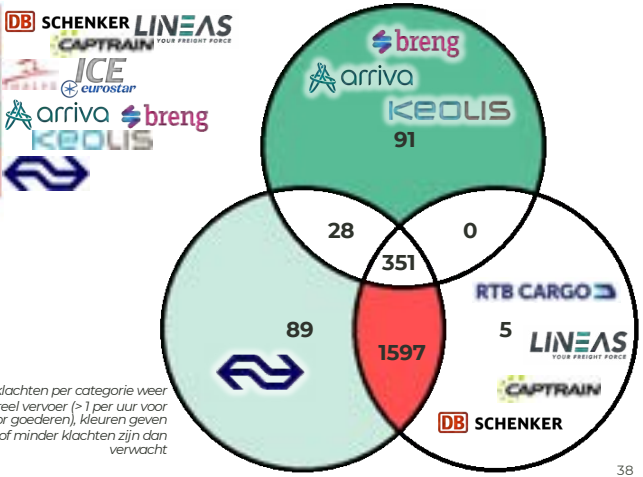
INVLOED VAN VERVOERDER EN TREINTYPE

Belangrijkste bevindingen

- Relatief meer klachten als treinen van **NS** elk uur passeren en **goederentreinen** minimaal 1 keer per dag passeren.
- Echter: relatief minder klachten als alleen reizigerstreinen passeren. Effect is bij treinen van NS kleiner dan bij treinen van andere vervoerders.



N.B. Cijfers geven aantal klachten per categorie weer



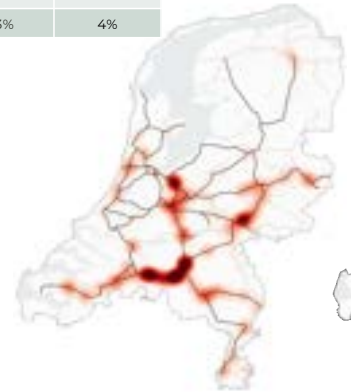
N.B. Cijfers geven aantal klachten per categorie weer als sprake is van structureel vervoer (> 1 per uur voor reizigers, > 3 per dag voor goederen), kleuren geven aan of er relatief meer of minder klachten zijn dan verwacht

3. RESULTATEN

INVLOED VAN VERVOERDER EN TREINTYPE

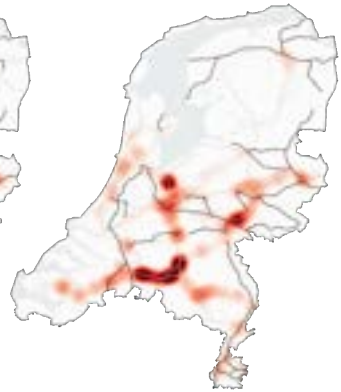
Dit beeld (meer klachten als NS en andere vervoerder rijdt, minder klachten als NS niet rijdt) is ook terug te zien in onderstaande tabel en kaarten

Type traject	Verwacht percentage klachten	Werkelijk percentage klachten
Trajecten met alleen NS	14%	4%
Trajecten met NS en andere vervoerder	63%	91%
Trajecten zonder NS	23%	4%



TRAJECTEN NS
Vooral klachten waar NS rijdt ...

TRAJECTEN GOEDEREN
... en waar goederentreinen rijden

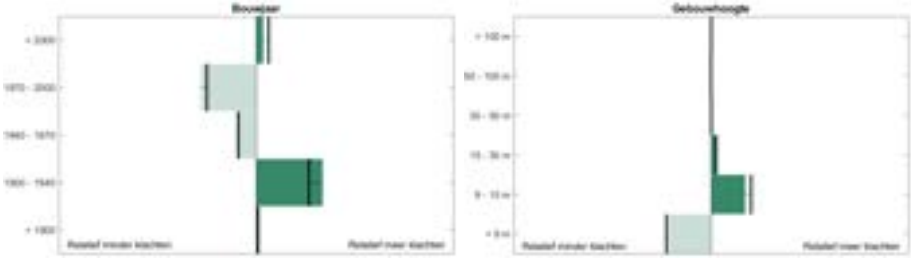


TRAJECTEN ANDERE VERVOERDERS
Weinig klachten bij andere reizigersvervoerders

3. RESULTATEN
INVLOED VAN GEBOUWEIGENSCHAPPEN

Belangrijkste bevindingen

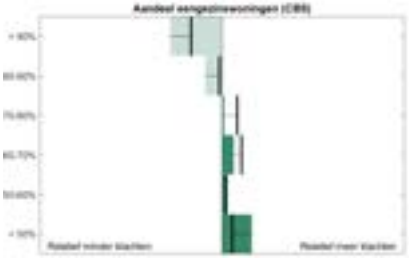
- Relatief meer klachten bij **vooroorlogse woningen** (houten vloeren), minder bij nieuwere woningen (betonnen vloeren).
- Relatief meer klachten bij **appartementengebouwen**, minder bij grondgebonden woningen. Maar: ook meer potentiële klagers per gebouw in hoogbouw (meer adressen).

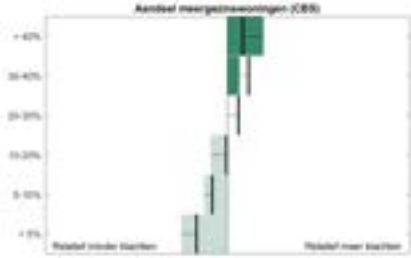


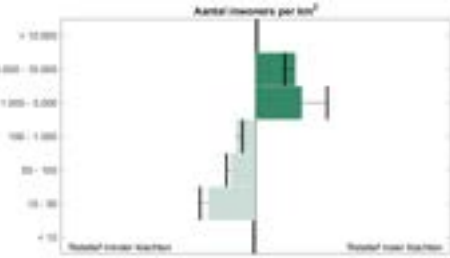
3. RESULTATEN
INVLOED VAN BUURTGEGEVENS

Belangrijkste bevindingen

- Relatief meer klachten uit wijken met **hoge bevolkingsdichtheid** (stedelijke milieus).
- Relatief meer klachten uit wijken met **meer appartementengebouwen**, en minder grondgebonden woningen (eengezinswoningen).
- Verschillen zijn kleiner dan in periode 2017-2021.



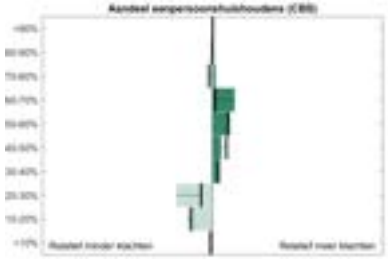


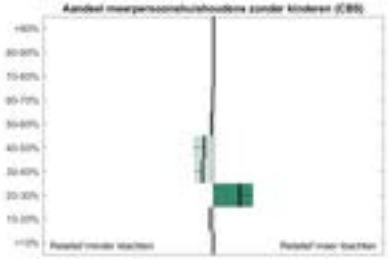


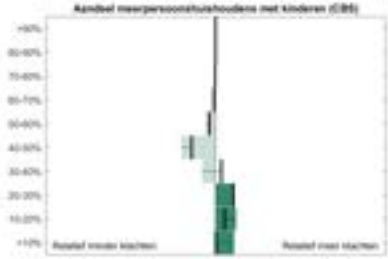
3. RESULTATEN
INVLOED VAN BUURTGEGEVENS

Belangrijkste bevindingen

- Relatief meer klachten uit buurten met **weinig kinderen** en **veel eenpersoonshuishoudens**
- Verschillen zijn kleiner dan in periode 2017-2021.



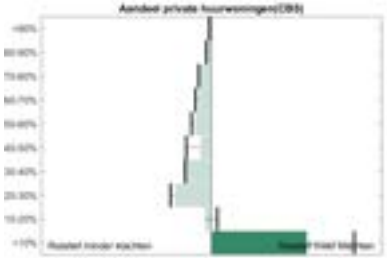


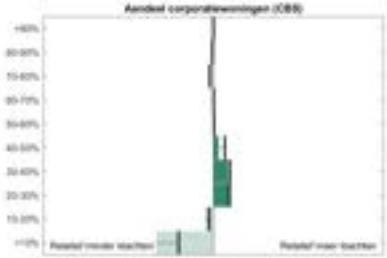


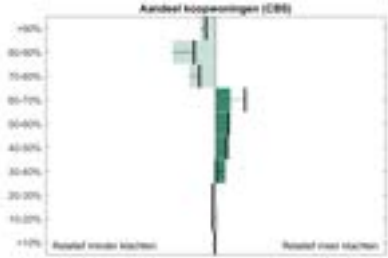
3. RESULTATEN
INVLOED VAN BUURTGEGEVENS

Belangrijkste bevindingen

- Relatief meer klachten uit buurten met **weinig private huur woningen**, verder vrij diffuus beeld.







4. SAMENVATTING

4.1 Afsluitende opmerkingen

In dit rapport hebben we beschreven wat de bepalende parameters zijn voor het ontstaan van klachten over trillingen door treinen. Bij de resultaten zijn een aantal nuances te plaatsen:

1. Veel klachten ontstaan als gevolg van bewonersacties (handtekeningenacties) of media-aandacht, en kunnen daarmee het beeld vertekenen (bias). Waar bekend hebben we dit ook aangegeven in dit rapport.
2. Veel parameters hangen met elkaar samen: zo zijn bijvoorbeeld waterpartijen langs het spoor vaak aanwezig op slappe bodems, en komen appartementengebouwen vaker voor in dichtbevolkte gebieden. Het Random Forest-model houdt rekening met dit soort kruiscorrelaties, maar de uitwisseling van kruisgecorreleerde parameters is niet helemaal te voorkomen in de overige resultaten.

Op basis van dit onderzoek is rechts aangegeven wat condities zijn voor het vaker voorkomen van klachten.

4.2 Belangrijkste condities voor grotere kans op klachten

1. Spoor ligt **op maaiveld**, **zonder spoorsloot**, of in **verdiepte ligging**
2. Woning staat **binnen 75 meter van spoor**
3. Woning staat in wijk met **weinig private huurwoningen**
4. Woning staat **binnen 75 meter van (oudere) ES-las**
5. Veel (zware) **goederentreinen** (vooral in de nacht en hoge aslast)
6. Woning staat op een **stijvere bodem**, zoals zand
7. Treinen passeren op **hoge snelheid**
8. Woning staat in wijk met veel **huishoudens met kinderen**
9. Veel treinen van type **VIRM**, **Flirt**, **SNG**, **TRAXX+ICR** of **DDZ**
10. Woning staat **binnen 75 meter van overweg**

BIJLAGE I. OPZET RANDOM FOREST-MODEL

I.1 Model uitgangspunten

Voor het ontwikkelen van het model zijn de volgende uitgangspunten gebruikt:

- Er is gebruik gemaakt van repeated stratified k-fold met 10 splits.
- Er is een test dataset aangemaakt van 25% van de totale dataset. Deze zogeheten “hold-out sample” is gebruikt om de kwaliteit van het model te testen.
- Er is gebruik gemaakt van Synthetic Minority Oversampling Technique (SMOTE), gezien het aantal klachten ten opzicht van geen-klachten relatief laag lag en de dataset dus niet de benodigde balans had om een RF analyse uit te kunnen voeren.
- Om overfitting te voorkomen is de maximale diepte van de ‘trees’ en het maximaal aantal variabelen per ‘tree’ beperkt tot 5. Het model is robuust voor deze settings.
- De afstand tot het spoor is begrensd op 250 meter. Dit komt overeen met de afstand waarbinnen de meeste klachten voorkomen. Hierdoor wordt het effect van afstand tot het spoor niet overschat.
- De kwaliteit van de modellen hebben wij gemeten op basis van de F1 score, recall, precision en een confusion matrix.

I.2 Gebruikte methode voor parameterdominantie

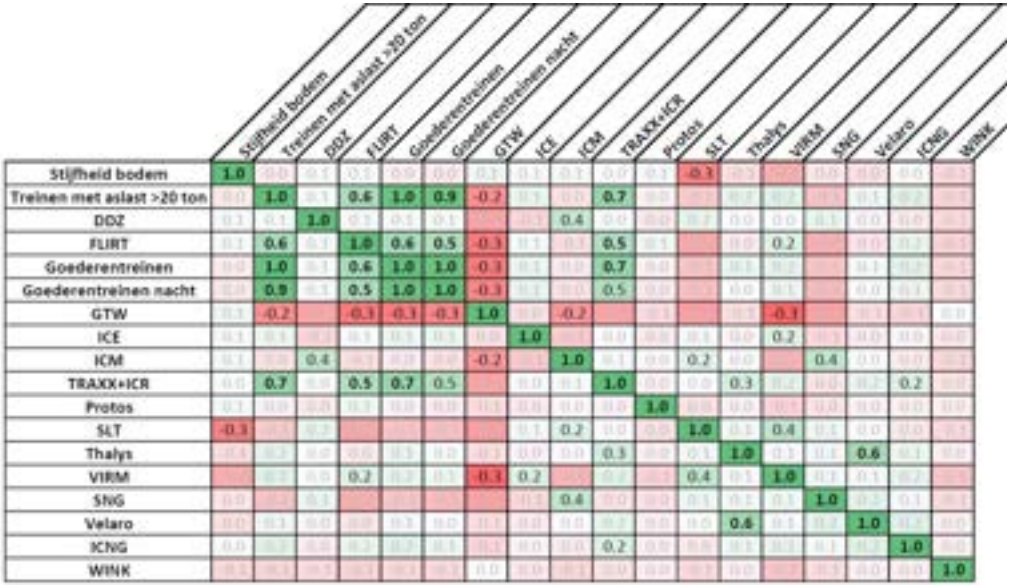
Voor het bepalen van de parameter dominantie is gekozen voor de SHAP methode. Bij deze methode wordt de waarde van elke variabele vervangen door een baseline waarde. Vervolgens wordt de performance van het model vergeleken met het model met de originele waardes. Op basis hiervan wordt het effect van een variabele vastgesteld. Deze methode is daardoor niet gevoelig voor de ranges van de variabelen of sterke onderlinge correlaties.

BIJLAGE I. OPZET RANDOM FOREST-MODEL

Er zijn ook alternatieve methodes mogelijk om de parameterdominantie vast te stellen:

- Standaard methode, gebaseerd op Gini. Deze methode is niet gebruikt, omdat in dit onderzoek sprake is van combinaties van numerieke variabelen met grote en kleine ranges, en dummy variabelen (range 0 tot 1). De Gini methode is gevoelig voor deze verschillen.
- Permutation methode. Deze methode is gevoelig voor sterke correlaties tussen variabelen. Bij een sterke correlatie kunnen individuele effecten worden onderschat, deze methode is vanwege deze gevoeligheid niet gebruikt.

BIJLAGE II. CORRELATIEMATRIX TREINTYPES



	Stijfheid bodem	Treinen met aslast >20 ton	DDZ	FLIRT	Goederentreinen	Goederentreinen nacht	GTW	ICE	ICM	TRAXX+ICR	Protos	SLT	Thalys	VIRM	SNG	Velaro	ICNG	WINK
Stijfheid bodem	1.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	-0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Treinen met aslast >20 ton	0.0	1.0	0.1	0.6	1.0	0.9	-0.2	0.1	0.0	0.7	0.0	0.0	0.1	0.2	0.0	0.1	0.2	0.0
DDZ	0.1	0.1	1.0	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0
FLIRT	0.1	0.6	0.1	1.0	0.6	0.5	-0.3	0.1	0.0	0.5	0.1	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Goederentreinen	0.0	1.0	0.1	0.6	1.0	1.0	-0.3	0.1	0.0	0.7	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0
Goederentreinen nacht	0.0	0.9	0.1	0.5	1.0	1.0	-0.3	0.1	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0
GTW	0.1	-0.2	0.0	-0.3	-0.3	-0.3	1.0	0.0	-0.2	0.0	0.0	0.0	-0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
ICE	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
ICM	0.1	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	-0.2	0.0	1.0	0.1	0.0	0.2	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0
TRAXX+ICR	0.0	0.7	0.0	0.5	0.7	0.5	0.0	0.0	0.1	1.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0
Protos	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
SLT	-0.3	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.0	0.0	1.0	0.1	0.4	0.1	0.0	0.0	0.1
Thalys	0.1	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.3	0.0	0.1	1.0	0.1	0.1	0.6	0.1	0.0
VIRM	0.0	0.0	0.1	0.2	0.2	0.1	-0.3	0.2	0.0	0.2	0.0	0.4	0.1	1.0	0.1	0.1	0.2	0.0
SNG	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	1.0	0.0	0.1	0.0
Velaro	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.6	0.1	0.0	1.0	0.0	0.0
ICNG	0.0	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.0	1.0	0.0
WINK	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0

De correlatiematrix laat zien dat sommige combinaties van treintypes vaker op trajecten rijden dan andere combinaties.

Opvallende zaken:

- Treinen van het type SLT rijden relatief meer op slappe bodems
- De TRAXX+ICR rijdt relatief vaak samen met de Flirt en goederentreinen, waardoor het lastig is om klachten van deze types uit elkaar te halen. Treinen van het type VIRM en SLT rijden ook relatief vaak op dezelfde trajecten. De RF-analyse corrigeert hier wel voor, maar de analyses naar oververtegenwoordiging van klachten niet.

WEBOOST