

Trillingshinder - Gedifferentieerd rijden

<i>datum</i>	19 december 2017	<i>project</i>	ProRail - Trillingsonderzoek gedifferentieerd rijden
<i>vestiging</i>	Den Haag		
<i>uw kenmerk</i>	-	<i>betreft</i>	Samenvatting onderzoeken plus analyse
<i>ons kenmerk</i>	T.2016.0727.05.N010	<i>versie</i>	001
<i>verwerkt door</i>	LN BRA JLI	<i>contactpersoon</i>	ing. J.J.A. (Hans) van Leeuwen
		<i>e-mail/telefoon</i>	ln@dgm.nl/088 346 75 69

Samenvatting onderzoek naar het effect van rijsnelheid van goederentreinen op trillingsopwekking in de bodem uitgevoerd op zes locaties in Nederland plus een analyse van andere oorzaken van trillingen

Omgevingshinder door trillingen als gevolg van goederentreinen is erkend. Langzamer rijden lijkt lokaal een oplossing, maar is uiteraard tegenstrijdig met snel vervoer. Er is onderzoek uitgevoerd naar de relatie tussen de opwekking van hinderlijke trillingen en de rijsnelheid van treinen, en iets specifieker van goederentreinen. Hiervoor hebben drie onderzoeksinstituten in totaal op zes locaties in Nederland uitgebreid metingen uitgevoerd. Deze notitie geeft een samenvatting en een algehele analyse van de resultaten, alsmede de te beïnvloeden oorzaken van trillingen.

De aanleiding van het vraagstuk is de suggestie in voorbereidende onderzoeken en procedures ten behoeve van tracébesluiten, om trillinghinder tegen te gaan door een verlaging van de rijsnelheid op bepaalde tijden en/of van meer trilling veroorzakende treinen (exploitanten). Ofwel, dit is het invoeren van 'gedifferentieerd rijden'.

Tot nu toe was er rond het vraagstuk over de relatie tussen rijsnelheid en trillingssterkte maar beperkt onderzoek beschikbaar. Het hieruit ontstane beeld was niet consistent. Het was dus onduidelijk op welke manier 'gedifferentieerd rijden' hulp kan bieden in het beperken van trillingshinder. Het doel van de nieuwe metingen en de analyse is dan ook om meer inzicht te krijgen in de relatie tussen de rijsnelheid van goederentreinen en de trillingsopwekking in de bodem naast de spoorbaan. Trillingsniveaus in de bodem zijn vervolgens gerelateerd aan trillingen in dichtbijgelegen woningen en gebouwen.

Onderzoek

TNO, DPA-CH en DGMR hebben de metingen uitgevoerd en gerapporteerd in [1], [2] en [3]. Dit nieuwe onderzoek geeft een antwoord op de kwantitatieve relatie tussen de rijsnelheid van goederentreinen en de daaruit volgende trillingsmissie in de bodem naast het spoor. Dit onderzoek zou ook een beeld moeten geven van de invloed van de bodemsamenstelling (variatie in locaties) en spoorligging in deze relatie. In [3] wordt ook de invloed van de aslast en de wielkwaliteit op de trillingsmissie geanalyseerd en gerapporteerd.

Voor de opzet van het onderzoek zijn er op zes geheel verschillende locaties trillingsmetingen gedaan. Dit zijn de locaties: Goes, Rosmalen, Esch, Dordrecht, Tilburg en Oldenzaal. De trillingsensor(en) in Goes zijn geplaatst in een referentiewoning, in Rosmalen in de bodem op tweemaal twee posities, en in Esch, Dordrecht, Tilburg en Oldenzaal was de sensor ingegraven in de bodem op 25 m van het spoor. De metingen hebben gedurende een periode van drie weken in Goes, vijf weken in Rosmalen en vijftien weken in Esch, Dordrecht, Tilburg en Oldenzaal plaatsgevonden. Alle passerende treinen zijn geregistreerd, evenals het type trein en de rijrichting en snelheid.

In totaal zijn er in Goes 200 goederentreinen, in Rosmalen 2.045 en in Esch, Dordrecht, Tilburg en Oldenzaal respectievelijk 18.387, 30.795, 19.756 en 2.463 treinpassages gemeten, die niet verstoord zijn door allerlei andere oorzaken (zoals bijvoorbeeld vrachtverkeer over een nabijgelegen weg). De metingen in Esch, Dordrecht, Tilburg en Oldenzaal zijn verder ook gekoppeld aan zogenaamde Quo Vadis data, waardoor een analyse met as- en wiellasten mogelijk was.

Resultaten van de metingen

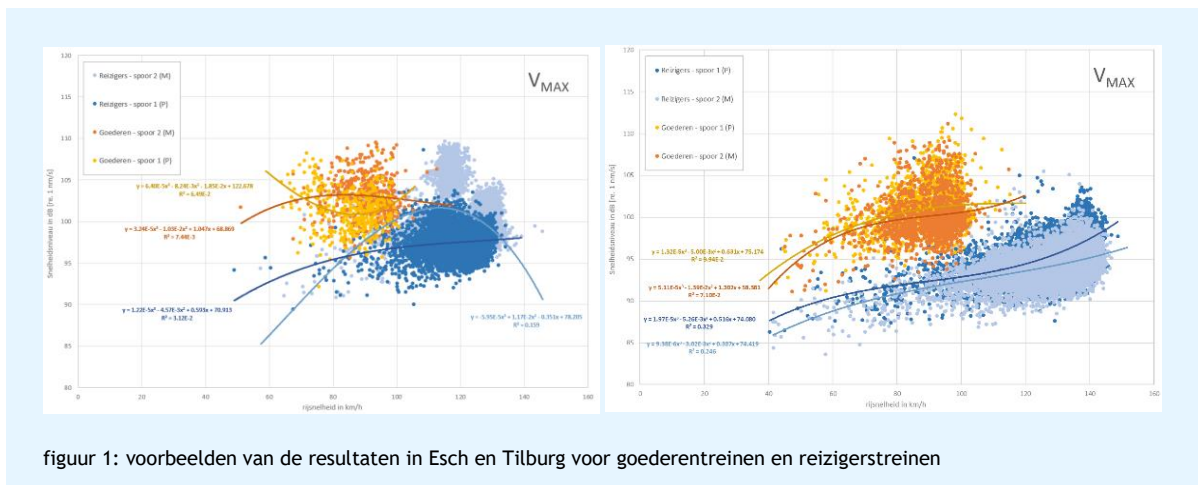
Het onderzoek op de zes meetlocaties laat zien dat er weliswaar een tendens is dat de trillingssterkte door goederentreinen afneemt als er langzamer wordt gereden, maar dat er geen algemeen (landelijk) geldende trend vastgesteld kan worden. De gevonden tendens is gemiddeld 1 tot 4 dB, ofwel een afname van de trillingssnelheid van 10% tot 40% bij een verlaging van 90 naar 60 km/u. Hierbij moet opgemerkt worden dat verandering tussen 40 en 50% voor de mens een merkbare verandering is van trillingssterkte¹.

De metingen laten voor goederentreinen sterk uiteenlopende regressiewaarden (R^2) zien voor de gevonden relaties tussen de trillingssterkte (V_{\max} of V_{RMS}) en de snelheid. Dit is te wijten aan het beperkte gemeten snelheidsbereik en de grote diversiteit van het goederenmaterieel. De hoogste regressiewaarden voor goederentreinen zijn gevonden voor de trillingssterkte V_{RMS} te Dordrecht en Tilburg; deze liggen tussen de 15% en 20%. In Oldenzaal is de regressiewaarde op het tweede spoor hiervoor 30%, maar op het eerste spoor slechts 15%. Ter illustratie heeft DGMR ook de regressiewaarde voor reizigersmaterieel bepaald. Bij een goede onderverdeling naar materieel typen werden de hoogste waarden gevonden in Dordrecht, met regressiewaarden (voor V_{RMS}) tussen 60 en 90%. Voor goederentreinen is de trend dus niet generiek, en is het verband tussen trillingen en snelheid zwak.

Zo is in Goes geconcludeerd dat de snelheidsverlaging van 80 km/u naar 60 km/u niet tot (merkbaar) lagere trillingsniveaus leidt. In Rosmalen worden ook opvallende zaken gevonden. Ter illustratie merken wij hierbij op dat op één meetpunt bij een snelheidsverlaging van 100 km/u naar 70 km/u van dubbeldeks agglomeraatmaterieel (DDAR) met Eloc 1700 locomotief, een afname van maar liefst 10 dB ofwel een afname van de trillingssnelheid van 68% is gevonden. Dit in scherpe tegenstelling tot het andere meetpunt, 500 m verderop, waar juist weer een verhoging van de trillingssnelheid wordt gevonden bij deze rijnsnelheidsverlaging. Dit versturende effect op een eenduidige snelheidsrelatie kan ook bij goederentreinen optreden. Ook op de locatie Esch werd er met goederentreinen een trillingstoename gevonden bij snelheidsverlaging.

Natuurlijk is het een logische verwachting dat er bij lagere rijnsnelheden minder trillingsenergie in de bodem wordt geproduceerd. Er moet echter terdege gerealiseerd worden dat we praten over een dynamisch systeem, waarbij er vele discrete trilfrequenties worden opgewerkt. Deze frequenties passen of helemaal niet bij de frequentieafhankelijke overdacht in de bodem, of sluiten hierop juist heel goed aan. Bij de 'toevalligheid' dat zogenaamde eigenfrequenties van systeemonderdelen (de resonanties van onderdelen in de trillingsoverdracht) met elkaar overeenkomen en dan ook nog samenvallen met de aanstootfrequenties van de passerende trein, kan in de omgeving een hoge trillingssterkte optreden. Juist deze aanstootfrequenties hangen direct samen met de rijnsnelheid van de trein.

¹ Zie BTS toelichting Artikel 6 Voelbaarheidsdrempel, zie literatuur [4].



figuur 1: voorbeelden van de resultaten in Esch en Tilburg voor goederentreinen en reizigerstreinen

Oorzaken van verschillen in trillingssterkte

We hebben waargenomen dat er tussen locaties grote verschillen kunnen optreden. Hieronder volgen een paar voorbeelden. Opgemerkt moet worden dat ter illustratie eveneens reizigerstreinen zijn beschouwd om een overeenkomstig effect op de snelheidsafhankelijke tendens te illustreren.

- In Oldenzaal vertoont de bodem een sterke gevoeligheid voor treinpassages met rijnsnelheden van circa 95 km/u. De reden hiervan moet worden gezocht in de frequentieafhankelijke bodemoverdracht, en het verschuiven van de dominante frequenties (resonanties) in het aanstootspectrum van treinen met deze rijnsnelheid. In Oldenzaal is de trillingsafname bij een snelheidsverlaging van 90 naar 60 km/u dan ook veel groter dan bij de andere locaties.
- In Dordrecht speelt mogelijk hetzelfde effect, maar wel bij lage rijnsnelheden. Rond 40 km/u zijn weer resonanties waarneembaar.
- In Esch is er een groot verschil in trillingsopwekking tussen de beide sporen van de beide rijrichtingen. De hoogste trillingssterkten blijken afkomstig te zijn van het achterliggende, meest ver weg gelegen, spoor. De kwaliteit of de conditie van het spoor kan hierin een rol spelen. Ook is vastgesteld dat het nabijgelegen spoor een betere conditie heeft dan het verder weg gelegen spoor. Overigens voldoen beide sporen ruim aan de onderhoudscriteria. Ook moet opgemerkt worden dat de trillingsopwekking op deze locatie relatief laag is ten opzichte van andere meetlocaties. In elk geval wijkt Esch sterk af van de overige locaties.
- Uit de metingen in Rosmalen blijkt ook dat er op korte afstanden tussen de posities van de trillingsensoren significante verschillen in trillingssterkte optreden. Dit zal veelal het gevolg zijn van de bodemsamenstelling, maar ook spoorconditie kan een rol spelen.

Nadere analyse

In rapport [3] wordt naast de effecten van de rijnsnelheid ook gekeken naar andere factoren die van invloed zijn op de trillingssterkte. De invloed van de aslast en ook die van de wieltoestand of wielkwaliteit is hierbij in het onderzoek betrokken. Daarnaast is gekeken naar de invloed van de bodemsamenstelling.

Het onderzoek toont aan dat trillingssterkte behalve van de rijnsnelheid, van meerdere factoren afhankelijk is, met name van bodemsamenstelling, type materieel en onderhoudstoestand. De gevoeligheid van de bodem en de geometrie van het materieel bepalen welke onderliggende mechanismen in de trillingsopwekking dominant zijn.

Binnen een bereik van de rijsnelheid van ongeveer 60 tot 110 km/u zijn dit de volgende vier mechanismen en bijbehorende geproduceerde trilfrequenties:

- 1 De belasting van de wielstellen op de bodem (het eigenveld), frequenties: 3.15 - 5 Hz.
- 2 Vlakke plaatsen, onbalans of onrondheid van wielen, frequenties: 6.3 - 20 Hz.
- 3 Hogere orde slijtagepatronen op de wielband, frequenties: vanaf 20 Hz.
- 4 Stijfheidsverschil spoorstaaf op de dwarsliggers en daartussen, ofwel het 'aantikken' van de dwarsliggers door de wielen, frequenties: 31.5 - 50 Hz.

In het eerste (de belasting van de wielstellen op de bodem) en laatste mechanisme (het 'aantikken' van de dwarsliggers door de wielen) is de aslast bepalend. In de twee overige mechanismen (vlakke plaatsen, onbalans of onrondheid van wielen en hogere orde slijtagepatronen op de wielband) de toestand van het wiel en het loopvlak van de wielband.

Het onderzoek toont aan dat de trillingsopwekking op de vier locaties qua samenstelling uit bovengenoemde mechanismen verschilt. In Dordrecht is de bodem gevoelig voor frequenties vanaf 4 Hz terwijl de bodem in Tilburg en Esch zich stijver gedraagt en pas gevoelig lijkt voor frequenties vanaf 6 Hz. Dit maakt een groot verschil in de invloed van de voorbijtrekkende wielstellen (aslast) op de trillingsopwekking. Deze aslast speelt een dominante rol in Dordrecht en dan vooral bij de zware ertstreinen. Ertswagons zijn kort en de afstand tussen de wielstellen van een wagon en die tussen opvolgende wagons is nagenoeg hetzelfde. Dit regelmatige patroon resulteert in een relatief sterke drukpuls in de frequentieband van 3 tot 5 Hz waarvoor de slappe bodem in Dordrecht gevoelig is.

In Tilburg is de belasting van de wielstellen (aslast) eveneens zichtbaar in de registraties, maar de trillingssterkten liggen over de hele lijn ongeveer een factor 2 ofwel 6 dB lager dan in Dordrecht.

In Oldenzaal wordt een sterk afwijkend patroon waargenomen qua trillingsopwekking. Hier zijn frequenties hoger dan 30 Hz dominant, hetgeen is toe te schrijven aan het 'aantikken' van de dwarsliggers door de wielen óf hogere orde slijtagepatronen op de wielband. De bodem is hier zeer gevoelig voor frequenties rond 40 Hz waardoor een snelheidsverlaging hier ook een bovengemiddeld sterk effect heeft.

Uit het onderzoek blijken per locatie de volgende bepalende mechanismen en bijbehorende snelheidsbereik waarover de dominantie geldt:

- Esch: Wielkwaliteit (60 - 100 km/u) en aantikken dwarsliggers en/of hogere orde slijtage wielband (90 - 100 km/u).
- Dordrecht: Belasting wielstel (80 - 100 km/u) en wielkwaliteit (60 - 100 km/u).
- Tilburg: Belasting wielstel (90 - 100 km/u) en wielkwaliteit (60 - 100 km/u).
- Oldenzaal: Aantikken dwarsliggers en/of hogere orde slijtage wielband (80 - 90 km/u).

Door de verschillen in opbouw van de trillingssterkte heeft snelheidsverlaging een verschillende uitwerking op de onderzochte locaties. Gemiddeld zullen de trillingssterkten met ongeveer 3 dB afnemen bij een snelheidsverlaging van 90 naar 60 km/u, maar de afname kan ook veel hoger of juist lager uitvallen. In Oldenzaal was de afname ongeveer 6 tot 7 dB terwijl er in Esch een uiteenlopend beeld was tussen beide sporen, met zelfs een toename van 0 tot 3 dB op spoor 1 en maar een bescheiden afname van 1 à 2 dB op spoor 2.

Globaal zijn voor de snelheidsverlaging van 90 naar 60 km/u de volgende effecten vastgesteld:

Locatie	Effect op trillingssterkte	Range
Esch	0 dB	-2 dB tot +4 dB
Dordrecht	-3 dB	-5 dB tot -2 dB
Tilburg	-3 dB	-3 dB tot -1 dB
Oldenzaal	-6 dB	-7 dB tot -4 dB

Dit globale beeld laat zien dat er tussen 60 en 90 km/u verschillende relaties qua trillingsopwekking mogelijk zijn, variërend van nagenoeg verwaarloosbaar (Esch) tot een meer dan kwadratische effect (Oldenzaal). Gemiddeld neemt de trillingssterkte evenredig af met de rijsnelheid (Dordrecht en Tilburg).

Hoewel snelheidsverlaging veelal tot lagere trillingssterkten zal leiden is hiervoor dus geen landelijk geldende trend te bepalen. Per situatie moet bepaald worden welke opwekkingsmechanismen dominant zijn én welk treinmaterieel tot hinderklachten leidt, alvorens een goede maatregelafweging mogelijk is. Verder is het een beleidsmatige afweging of de behaalde trillingsreducties opwegen tegen de nadelen in de doorstroming op het spoor en in welke mate deze maatregel inzetbaar is. Daarover wordt in dit onderzoek geen oordeel gegeven. Het onderzoek is bedoeld om deze discussie op inhoud te kunnen voeren.

Het onderzoek toont aan dat de trillingssterkte V_{\max} een sterke relatie heeft met de maximum aslast in een treincombinatie. De trillingssterkte V_{rms} lijkt een sterke relatie te hebben met de wieltoestand, maar de parameter waaraan de wieltoestand nu wordt afgemeten is op haar beurt ook afhankelijk van de rijsnelheid, waarmee dit geen onafhankelijke parameter is. Een deel van het snelheidseffect wordt daardoor onterecht toegeschreven aan de onderhoudstoestand van het wiel. Om de zuivere wieltoestand in relatie met de aslast in de analyses te betrekken is nader onderzoek naar de totstandkoming van de meetwaarde in de Quo Vadis-stations nodig en hoe daaruit de invloed van de rijsnelheid en de beladingstoestand zijn te elimineren. Pas dan ontstaat een zuivere beschrijving van de wieltoestand waarop vervoerders eventueel en zo mogelijk aanspreekbaar kunnen zijn.

Uit het onderzoek blijken nu de volgende afhankelijkheden:

- Toename V_{\max} circa 1 tot 2 dB per ton aslast.
- Toename V_{rms} circa 0.5 tot 1.2 dB per kN toename van de onderhoudstoestand van het wiel.

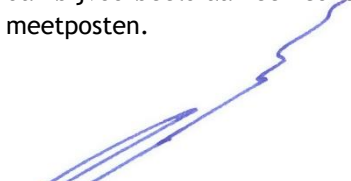
Het monitoren en beheren van zowel de aslast als ook de onderhoudstoestand van het wiel biedt mogelijkheden om overmatige trillingsproductie te beheersen.

Conclusies

Wij concluderen dat er in veel gevallen (locaties/plaatsen/woningen) sprake kan zijn van een verlaging van de trillingssterkte bij lagere rijsnelheden: circa 2 à 4 dB, ofwel een afname met 10% à 40% van de trillingssnelheid bij een verlaging van de rijsnelheid van 90 km/u naar 60 km/u, maar dat deze relatie niet algemeen geldend is. Overigens is een verlaging van de trillingssterkte vanaf circa 40% tot 50% pas voor de mens net voelbaar. Het beeld wordt ook beïnvloed door verschijnselen die heel specifiek te maken hebben met spoorstaafrouwheid of met een specifieke gevoeligheid van de bodem. Ook kenmerkende eigenschappen van woningen en gebouwen zijn hierop in de praktijk nog van invloed. Er is dus wel een snelheidseffect, maar het versturende effect kan van minstens dezelfde orde van grootte zijn of zelfs groter. Situaties in Oldenzaal, Esch en Rosmalen en ook illustraties met reizigerstreinen zijn hier voorbeelden van. Men kan het effect zeker niet landelijk generiek toepassen.

Dit betekent dat specifieke factoren altijd betrokken moeten worden in een beschouwing van de mogelijkheden en eventuele maatregelen tot een verlaging van de trillingssterkte.

Gezien de geconstateerde grote spreiding in de gemeten trillingsniveaus tussen de verschillende typen treinen, tussen treinen van hetzelfde type, en ook tussen dezelfde soort goederentreinen concluderen wij dat er meerdere parameters zijn die invloed hebben op de sterkte van de trillingen. Naast de rijsnelheid kunnen ook de aslast en de wielconditie (onrondheid) invloed hebben op de trillingsopwekking. Hiernaast zijn er mogelijk ook nog enige, zo af en toe voorkomende, extreme treinen in de trillingsopwekking. Bij de aslasten vinden we een relatie met de trillingen, en bij andere omstandigheden een relatie met de wieltoestand. Mogelijk praten we ook over de wiellasten die soms wat hoger zijn dan wat, zoals het nu laat aanzien, maximaal is toegestaan voor goederentreinen op het Nederlandse spoorwegnet. Voor wat betreft de onrondheid van wielen is het de vraag of onderhoudsaspecten verbeterd kunnen worden om onnodige trillingsopwekking te beperken. Denkt u dan bijvoorbeeld aan een continue kwaliteitscontrole van deze wielen in de praktijk met vaste meetposten.



ing. J.J.A. (Hans) van Leeuwen
DGMR Bouw B.V.

Referenties

- [1] Spoor door Goes: nulmeting van omgevingstrillingen, prognose en snelheidsmaatregel, Arnold Koopman, Sven Lentzen, Flavio Galanti, TNO-rapport TNO-060-DTM-2011-00268, 16 december 2011
- [2] Samenvatting onderzoek relatie trillingssterkte en rijsnelheid treinen Locatie Rosmalen, DPA-CH notitie 00131-13058-10, C. Ostendorf, 20 september 2017
- [3] Onderzoek effect rijsnelheid goederentreinen op trillingsopwekking in de bodem, DGMR Rapport T.2016.0727.00.R003, v2, ing. R.G. (Reinoud) Fennema, ing. J.J.A. (Hans) van Leeuwen, 15 december 2017
- [4] Besluit tot vaststelling van beleidsregels ten aanzien van trillinghinder ten behoeve van de vaststelling van tracébesluiten voor de aanleg, wijziging of het opnieuw in gebruik nemen van een landelijke spoorweg (Beleidsregel trillinghinder spoor), Nr. IENM/BSK-2012/5478, 10 april 2012 Staatscourant Nr. 7532, 18 april 2012