



Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu
*Ministerie van Volksgezondheid,
Welzijn en Sport*

Gezondheidseffecten van trillingen door treinen

Een review

RIVM rapport 630650004/2013

E. van Kempen, et al.



Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu
*Ministerie van Volksgezondheid,
Welzijn en Sport*

Gezondheidseffecten van trillingen door treinen

Een review

RIVM rapport 630650004/2013

Colofon

© RIVM 2013

Delen uit deze publicatie mogen worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM), de titel van de publicatie en het jaar van uitgave.

E.E.M.M. van Kempen (RIVM)
R.A. Baumann (RIVM)
H.J. van Wijnen (RIVM)
I. van Kamp (RIVM)

Contact:
Ir. Martin van den Berg
Afdeling KLG
Martin.vanden.Berg@minienm.nl

Dit onderzoek werd verricht in opdracht van het ministerie van Infrastructuur en Milieu, Directoraat Generaal, Afdeling KLG, in het kader van het project Kennisfunctie Geluid (M/630650/11)

Rapport in het kort

Gezondheidseffecten van trillingen door treinen. Een review

Er is nog weinig onderzoek gedaan naar de effecten van trillingen door treinen op de gezondheid. Om meer inzicht te verwerven in de aard en omvang van klachten en wanneer deze zich voordoen, heeft het RIVM een onderzoeksprogramma opgezet. De eerste resultaten hiervan komen eind 2013 beschikbaar. Deze bevindingen zullen gebruikt worden als bouwstenen voor regelgeving. Het ministerie voor Infrastructuur en Milieu (IenM) bereid namelijk een besluit voor om eventueel de bestaande richtlijnen voor trillingen door treinverkeer uit te breiden en een handhavingsinstrumentarium in te stellen. Hiervoor is een norm voor trillingen nodig. Om de hoogte van deze norm te kunnen vaststellen, is een gedegen schatting van gezondheidseffecten noodzakelijk.

Schatting aantallen ernstig gehinderden

Op basis van de beschikbare gegevens wordt het aantal mensen dat ernstige hinder ondervindt van trillingen door treinen voorlopig geschat op 9.400 tot 27.000. In Nederland wonen circa 660.000 mensen op 150 meter afstand van het spoor. Bij hinder is onder andere sprake van irritatie, boosheid en onbehagen. Andere effecten die met trillingen door treinen in verband worden gebracht zijn slaapverstoring, vermoeidheid, verminderde prestaties en lichamelijke klachten als hoofdpijn, duizeligheid en een hoge bloeddruk. Een direct verband tussen deze effecten en trillingen door treinen is echter niet wetenschappelijk onderbouwd.

Kennishiaten

De beschikbare gegevens zijn onvoldoende om een gedegen schatting te maken van de mate waarin deze gezondheidseffecten zich voordoen. Daarom kan er nog geen norm worden afgeleid. Om hier meer inzicht in te krijgen is het vervolgonderzoek van het RIVM erop gericht een rekenmodel te ontwikkelen, en een vragenlijst af te nemen onder mensen die langs het spoor wonen. Daarnaast wordt een zogeheten dosis-respons relatie opgesteld, onder andere op basis van gegevens over de afstand tot het spoor, aantallen treinen, het maximale trillingsniveau, de verhouding tussen reizigers- en goederentreinen en het type bebouwing rond het spoor.

Trefwoorden:

trillingen, railverkeer, geluid, regelgeving, gezondheid, welzijn

Abstract

Health effects of vibrations due to rail traffic. A review

Research into the health effects of vibrations due to trains is scarce. In order to gain more insight in the character and magnitude of related health complaints and under what conditions these manifest themselves, RIVM has developed a research program. The first results will be available by the end of 2013. These outcomes will be used as building blocks for the decision making process around further extension of existing guidelines for rail related vibrations and the development of an instrument of endorsement by the Ministry for Infrastructure and Environment. In order to do so, a standard for vibration is necessary and for the determination of such a standard a thorough estimation of the magnitude of health effects is a first prerequisite.

Estimates of percentage severely disturbed people

Based on existing data the preliminary estimated number of people severely annoyed by rail related vibrations varies between 9.400 and 27.000 in the Netherlands, where some 660,000 people live at 150 meter distance from a rail track. Annoyance refers to anger, irritation and unwell-being. Other effects which are associated with vibration from trains pertain to sleepdisturbance, fatigue, taskperformance, and somatic complaints as headaches, vertigo and high bloodpressure. However a direct relationship of these effects with vibration from trains has not been scientifically established.

Knowledge gaps

The available data is insufficient to make a thorough estimate of the degree in which these health effects occur. Therefore, a standard can not be deduced as yet. In order to gain more insight future research of RIVM is aimed at the development of a calculation model and a survey among people living along the railway track. Moreover, so called dose response relations will be derived, among others based on data regarding distance to the track, the number of trains and maximum levels of vibration, the ratio between passenger and cargo trains and the type of houses along the track.

Keywords:

vibrations, railway, noise, regulations, health, well-being

Inhoudsopgave

1	Inleiding–13
1.1	Achtergrond–13
1.1.1	Omvang van het railverkeer in Nederland–13
1.1.2	Wet en Regelgeving–14
1.2	Kennishiaten en plan van aanpak–15
1.3	Vraagstelling–16
1.4	Leeswijzer–17
2	Methode–19
3	Blootstelling–21
3.1	De perceptie en waarneming van trillingen–21
3.2	Gangbare blootstellingsmaten–23
4	Effecten van trillingen door railverkeer op gezondheid en welbevinden–25
4.1	Resultaten van Nederlandse studies–25
4.2	Resultaten van Europese studies–26
4.2.1	Blootstellingkarakterisering–26
4.2.2	Trillingen door treinverkeer en hinder–28
4.2.3	Trillingen door treinverkeer en effecten op de slaap–31
4.2.4	Effecten van gecombineerde blootstelling aan geluid en trillingen–33
4.2.5	Hinder en laagfrequent geluid door treinverkeer–36
4.2.6	De invloed van andere factoren dan het trillingsniveau–37
5	Blootstellingsresponsrelatie trillingen–41
5.1	Definitie–41
5.2	Beschikbare blootstellingrespons relaties–41
5.3	Toepasbaarheid van de gevonden relaties–43
6	Discussie–47
6.1	De belangrijkste resultaten samengevat–47
6.2	Blootstelling–47
6.3	De meting van effecten door trillingen–48
6.4	De rol van geluid en andere versturende variabelen–49
6.5	De invloed van andere studiekenmerken–49
6.6	Omvang van de problematiek in Nederland–50
7	Conclusie en vervolgstappen–53
7.1	Conclusies–53
7.2	Vervolg–53
	Literatuur–55
	Bijlage I Verklarende woordenlijst en afkortingen–59
	Bijlage II Plan van aanpak normering trillingen–61

Samenvatting

Naar aanleiding van Kamervragen bereidt het ministerie voor Infrastructuur en Milieu (IenM) op dit moment een besluit voor om een uitspraak te doen over eventuele verdere richtlijnen voor trillingen door treinverkeer en een handhavinginstrumentarium voor geluid en trillingen langs het spoor. Voor het vaststellen van de hoogte van een norm voor trillingen is een gedegen gezondheidseffectschatting noodzakelijk.

Een van de belangrijkste stappen hierin is de evaluatie van de beschikbare gegevens in termen van biologische effecten, gezondheid en welzijn. In dit rapport wordt de laatste stand van zaken weergegeven met betrekking tot de effecten van trillingen en (laagfrequent) geluid door treinen op gezondheid en welzijn. Daarbij is onderzocht wat bekend is uit Nederlandse en Europese literatuur over de effecten van trillingen door treinen, de niveaus waarboven deze effecten optreden en andere contextuele en persoonlijke factoren die mede van invloed zijn op deze effecten. Ook is onderzocht welke blootstellings-responsrelaties er beschikbaar zijn die de relatie tussen trillingen door treinen en gezondheids- of welzijnseffecten beschrijven. Daarbij is nagegaan of en hoe de beschikbare blootstellings-responsrelaties gebruikt kunnen worden voor een schatting van de omvang van de effecten van trillingen door treinverkeer in Nederland.

Perceptie en waarnemingen van trillingen

Treinverkeer en andere bronnen kunnen aanleiding geven tot trillingen in gebouwen: trillingsbronnen oefenen een kracht uit op bijvoorbeeld de rails of de standplaats, resulterend in de opwekking van trillingen. Deze trillingen kunnen zich voortplanten door vaste (bodem, beton) en vloeibare (water) media. De voortplanting van trillingen in media is complex en afhankelijk van het type golf, de snelheid, richting, demping, reflectie en transmissie, en vereist vaak een ingewikkelde mathematische beschrijving als je de blootstelling wilt bepalen. Net als geluid, kunnen trillingen door mensen als onplezierig en/of storend worden ervaren. Geluid is een zogenaamde non-proximale stimulus: een stimulus die is gelokaliseerd buiten het lichaam, en waaraan je kunt ontsnappen door bijvoorbeeld naar een rustige kamer te gaan, door de ramen te sluiten et cetera. Dit is anders voor trillingen. Omdat trillingen in het hele lichaam gevoeld worden hebben mensen vaak het gevoel dat ze er niet aan kunnen ontsnappen en dat zij er aan overgeleverd te zijn. Als de oorsprong van de trillingen moeilijk te lokaliseren is, kan dit een gevoel van dreiging creëren.

Trillingen worden gevoeld wanneer het menselijke lichaam in contact komt met een trillend oppervlak. Het gaat dan om trillingen met een frequentierange van 1 tot 80 Hz. Een trillende structuur of trillend oppervlak gaat vaak samen met (laagfrequent) geluid. Trillingen worden over het algemeen in het hele lichaam gevoeld.

Blootstelling aan trillingen

Een trilling is een oscillerende beweging. De sterkte van een trilling kan worden uitgedrukt als een versnelling, als een snelheid of als een verplaatsing. Trillingen veroorzaakt door omgevingsbronnen kunnen verschillen in frequentiespectrum. Het menselijke lichaam kan op trillingen met eenzelfde sterkte anders reageren bij verschil in frequentie.

Voor het al dan niet waarnemen van trillingen maakt het verder ook uit waar op het lichaam, bij welke lichaamshouding en in welke richting de trillingen worden

'aangebracht'. Trillingen kunnen verschillen in karakter. Zo onderscheiden we bijvoorbeeld kortdurende en continue of langdurige trillingen. Kortdurende trillingen zijn het gevolg van kortdurende excitatie, soms met een repeterend karakter (herhaaldelijk voorkomende trillingen). Trillingen veroorzaakt door weg- of railverkeer hebben vaak dit karakter. Continue trillingen zijn gedurende langere tijd aanwezig. Bij constante sterkte spreken we van stationaire trillingen – is de sterkte als functie van de tijd niet constant, over niet-stationaire trillingen.

De blootstelling aan trillingen kan in verschillende maten worden uitgedrukt. Maten die vaak worden beschreven in de literatuur zijn: de gemiddelde trillingssnelheid (RMS) en de *Vibration Dose Value* (VDV). Alle maten kunnen worden gebruikt als maat voor trillingen over langere periodes of om de omvang van trillingsgebeurtenissen (*events*) uit te drukken. Alleen de VDV is cumulatief en daarmee in principe geschikt voor het schatten van langetermijneffecten op populatieniveau. In de Nederlandse regelgeving op het gebied van trillingen (de SBR-B en de Beleidsregel Trillingen) wordt de blootstelling aan trillingen uitgedrukt aan de hand van de maximale trillingsterkte gebaseerd op trillingssnelheid ($V_{\max}$) en een gemiddelde trillingsterkte (V_{per}) die weer hun basis vinden in de Duitse DIN-normen. Deze maten zijn alleen geschikt voor toepassing op individueel niveau, maar de relatie tussen V_{per} en $V_{\max}$ met hinder kan niet gelegd worden.

Effecten van trillingen door railverkeer op gezondheid en welbevinden

De effecten van trillingen door treinverkeer zijn nog maar beperkt onderzocht. Het onderzoek dat bekend is, heeft zich vooral gericht op hinder, slaapverstoring en verstoring van andere activiteiten. Andere effecten die met trillingen in verband worden gebracht, zijn vermoeidheid, verminderde taakprestatie, bewegingsziekte en lichamelijke klachten. Europees onderzoek naar effecten van trillingen (soms in combinatie met laagfrequent geluid) door treinverkeer vond plaats in Duitsland, Noorwegen, Zweden, Groot-Brittannië en Spanje. Het onderzoek richtte zich afwisselend op gelijktijdige blootstelling aan geluid, op de communicatie over en weer tussen beide of onderzocht juist exclusief de invloed van trillingen.

Op basis van de resultaten van de studies kunnen geen eenduidige conclusies worden getrokken over de effecten van trillingen en (laagfrequent) geluid door treinverkeer in termen van hinder door trillingen, slaapverstoring en verstoring van activiteiten. Wel zijn er aanwijzingen gevonden voor een complex samenspel tussen trillingen en geluid door treinverkeer, waarbij er sprake lijkt te zijn van een cumulatieve invloed op de effecten oftewel de hinder. Tegelijkertijd zijn er ook aanwijzingen dat er bij hoge geluidsniveaus relatief weinig trillingshinder is, waardoor het beeld geheel door de geluidhinder wordt bepaald. Met andere woorden, de bevindingen zijn niet eenduidig op dit gebied. Tot slot indiceren bevindingen dat ook de laagfrequente component van geluid een rol zou kunnen spelen bij de gerapporteerde hinder en slaapverstoring.

Een onderlinge vergelijking van de studies is lastig omdat de blootstelling aan trillingen in verschillende maten wordt uitgedrukt. Omrekening naar een uniforme maat is nog niet mogelijk. Bovendien is ook niet duidelijk welke maat de beste is.

In Nederland loopt op dit moment geen onderzoek naar het effect van trillingen door treinverkeer. Wel heeft een aantal studies in de jaren 70 van de vorige eeuw gekeken naar het effect van spoorweglawaaai (inclusief trams) op de mate van hinder. Aan de hand van de hinderinventarisatie is daarnaast op nationaal niveau het effect van trillingen door, onder andere, treinverkeer in kaart

gebracht, die iedere vijf jaar plaatsvindt. Beide studies leveren echter niet de informatie op die nodig is om een goed beeld te krijgen van het probleem van trillingen en effecten. Gegeneraliseerde doses effectrelaties voor geluid van treinen zijn wel beschikbaar.

Blootstellingrespons relaties en de omvang van effecten

In een aantal studies zijn blootstellings-responsrelaties afgeleid die de blootstelling aan trillingen door treinen en hinder of slaapverstoring beschrijven. De studies zijn uitgevoerd onder een beperkte blootstellingsrange. Hinder is in deze studies niet altijd gemeten volgens de in Nederland gehanteerde variant op de gestandaardiseerde hindervraag voor geluid (International Organization for Standardization: ISO). Daarnaast was de steekproefomvang van de studies beperkt en werd er niet altijd rekening gehouden met de invloed van mogelijk versturende factoren. De blootstelling-responsrelaties hebben daardoor een beperkte waarde.

Momenteel is er geen rekenmodel beschikbaar waarmee de blootstelling aan trillingen door treinverkeer voor de gehele bevolking kan worden geschat. Dit maakt de toepasbaarheid van de gerapporteerde blootstellings-responsrelaties zeer beperkt. Om toch een idee te krijgen van de mogelijke omvang van het aantal ernstig gehinderde personen door trillingen van railverkeer in Nederland, is met behulp van een relatie die de associatie tussen de afstand tot het spoor (m) en ernstige hinder door trillingen van treinen beschrijft, een schatting gemaakt. Het blijkt dat in Nederland ruim 660.000 personen binnen 150 meter van een spoorlijn wonen. Daarvan is naar schatting ongeveer 1-4 procent ernstig gehinderd door trillingen van treinverkeer. Deze schatting moet worden beschouwd als een eerste orde schatting.

Op EU-niveau lopen twee onderzoeken op het gebied van trillingen door treinen: Cargovibes en RIVAS. Beide onderzoeken richten zich op goederenvervoer, maar resultaten zijn mogelijk ook toepasbaar op HSL-operaties. Binnen Cargovibes zijn aan de effectkant onder andere een vragenlijstonderzoek in Nederland en Polen uitgevoerd met als doel specifiek informatie te verkrijgen over de hinder en slaapverstoring door goederentreinen, en wordt op basis van alle beschikbare data een blootstellings-responsrelatie opgesteld voor trillingshinder door treinen, met als subdoel een geschikte blootstellingsmaat voor hinder te kunnen vaststellen. Daarnaast wordt in Zweden een aantal laboratorium experimenten verricht naar zelfgerapporteerde slaapverstoring en polysomnografie, inclusief ECG, in relatie tot trillingen. De gegevens komen in de loop van 2013 beschikbaar.

Op dit moment loopt ook een onderzoek van Prorail. Het onderzoeksprogramma bestaat onder andere uit een inventarisatie van mogelijke maatregelen en metingen langs spoorlijnen en een literatuuronderzoek (zie plan van aanpak in Bijlage II).

In dit onderzoek zijn enkele belangrijke kennishiaten aangegeven. Op grond hiervan is het vervolgprogramma van het RIVM verder vormgegeven. Dit omvat: **1)** de verdere **uitwerking van een rekenmodel** op basis van verzamelde gegevens over het aantal woningen rond het spoor, bouwjaar, bodemconditie waarmee de blootstelling aan trillingen door treinverkeer op populatieniveau kan worden ingeschat; **2)** een **survey langs het spoor** met als primair doel reacties op een veranderend aantal (goederen)treinen te monitoren; **3)** een verfijning van de binnen het EU-project Cargovibes verrichtte **meta-analyse** op het kennis bestand verstoring (KBV) in samenwerking met TNO, met als doel doses responsrelaties af te leiden op basis van afstand, aantal treinen en het

percentage goederentreinen. Deze kunnen vervolgens gebruikt worden om de omvang van hinder (en slaapverstoring) ten gevolge van trillingen door treinverkeer in Nederland beter in te schatten en te bepalen bij welke niveaus van trillingen effecten te verwachten zijn.

De uitkomsten van deze deelonderzoeken, die samen de bouwstenen voor verdere regelgeving vormen, komen in de loop van 2013 beschikbaar.

Inleiding

Dit rapport is onderdeel van een programmeringstudie naar de effecten van aan treinverkeer gerelateerd geluid en trillingen op welzijn en gezondheid. Directe aanleiding hiertoe was een tweetal moties¹ [1] met betrekking tot trillingen door treinverkeer en de groeiende behoefte aan aangepaste regelgeving voor trillingen en geluid langs het spoor. De Kamer heeft op 29 juni 2010 en in november 2010 een tweetal moties aanvaard, waarin de regering werd verzocht om wettelijke normen voor trillingen door treinverkeer op te stellen en om op korte termijn voorstellen te doen voor een handhavinginstrumentarium voor geluid en trillingen langs het spoor. Om hier een gefundeerd antwoord op te kunnen geven, is meer onderbouwing nodig. Dat kan geleverd worden door de omvang en effecten van trillingen te onderzoeken en de samenloop van trillingen en geluid van verschillende bronnen beter in kaart te brengen. Het bij het RIVM lopende deelproject van het project Effecten Geluid (M/630650/11) richt zich op het onderzoeken van een verband tussen trillingsniveaus en (laagfrequent) geluid enerzijds en gezondheid en welzijn anderzijds. Opties voor normstelling vormen eveneens onderwerp van studie. Hierbij wordt uitgegaan van richtlijn B van de Stichting Bouw Research (voortaan aangeduid als de SBR-richtlijn B) [2, 3], en de Beleidsregel Trillingshinder Spoor (BTS) [1]. Eerstgenoemde is specifiek geschreven voor de beoordeling van (bestaande) trillingshinder; het is een hulpmiddel bij het meten en beoordelen van trillingshinder. In de praktijk echter, werd de SBR-richtlijn B ook vaak gebruikt als beoordelingskader bij spoorplannen. In de praktijk bleek echter dat de SBR-richtlijn B veel zaken niet benoemde die wel van belang zijn voor de beoordeling van trillingen bij spoorplannen. Vooruitlopend op toekomstige wetgeving, heeft het ministerie van Infrastructuur en Milieu (IenM) daarom de BTS opgesteld. De BTS heeft nadrukkelijk tot doel toekomstige spoor tracébesluiten te kunnen toetsen op rechtmatigheid ten aanzien van het al dan niet treffen van maatregelen en de aanvaardbaarheid van trillingen.

Naar aanleiding van de toezeggingen die de staatssecretaris van IenM op 18 januari 2011 aan de Kamer deed (kamerstuk 32 404, nr. 31), is het RIVM gevraagd een programmeringstudie op te stellen. Dit heeft als basis gediend voor een notitie waarin de staatssecretaris aangaf wat er bekend is, maar vooral ook wat er nog nodig is aan kennis om betekenisvolle stappen op het gebied van wet- en regelgeving voor trillingen van railverkeer te kunnen maken. Onderdeel hiervan is de uitvoering van een literatuurstudie waarin de effecten van blootstelling aan trillingen door railverkeer op welzijn en gezondheid worden onderzocht. Als onderdeel van deze literatuurstudie wordt ook gekeken naar de beschikbaarheid van blootstellings-responsrelaties.

1.1 Achtergrond

1.1.1 *Omvang van het railverkeer in Nederland*

Het aantal kilometers spoor in Nederland is tussen 2005 en 2012 toegenomen van 2.810 naar 3.013 kilometer. Het grootste gedeelte van dit spoor ligt in het westen van Nederland; het noorden van Nederland heeft het minste aantal kilometers spoor [4]. Over dit spoor worden steeds meer personen vervoerd. In

¹ Het ging om de motie van de kamerleden Neppérus en Jansen (Kamerstukken II 2009/10, 32 123A, nr. 124) en de motie van de kamerleden Aptroot en Dijkzma (Kamerstukken II 2009/10, 32 404, nr. 17).

1995 maakten we nog 13,5 miljard reizigerskilometers, in 2010 waren dit 17,2 miljard reizigerskilometers [5, 6]. Uit het Mobiliteitsonderzoek Nederland (MON) blijkt dat van de 183,6 miljard gereisde kilometers in Nederland in 2010, er 14,1 miljard (7,7 procent) per trein hebben plaatsgevonden [7]. Ook in het binnenlandse goederenvervoer is er een toename te zien: in 1995 vervoerden we in totaal 4.348.000 ton goederen over het spoor, in 2007 was dit gestegen naar 5.553.1000 ton [8].

Nederland blijkt het drukste spoor van Europa te hebben en is het enige land waar per kilometer spoor een verkeersprestatie van meer dan 20 duizend treinkilometers is gerealiseerd (het gaat dan zowel om goederentreinkilometers als passagierstreinkilometers). Dit aandeel is twee keer zo hoog als het Europese gemiddelde. Het Nederlandse aandeel van passagierskilometers in het totale aantal treinkilometers is met 92 procent beduidend hoger dan het Europese gemiddelde (79 procent) [9].

De verwachting is dat het er niet minder druk op zal worden. Tot 2012 wil het kabinet 5 procent meer treinreizen per jaar realiseren. Op dit moment werken het ministerie van IenM en ProRail in het kader van het Programma Hoogfrequent Spoor (PHS) aan de realisatie van hoogfrequent spoorvervoer. Op de drukste trajecten moeten reizigers uiterlijk in 2020 elke tien minuten kunnen opstappen op een intercitytrein of een sprinter. Op deze trajecten moeten elk uur zes intercity's en twee tot zes sprinters gaan rijden. Op deze manier hoeven reizigers nooit lang te wachten. Om het PHS mogelijk te maken, moet het goederenvervoer op bepaalde plaatsen wijken en worden herverdeeld over enkele corridors, zoals de Betuweroute, de A2-corridor en Goederen Oost Nederland. Daarnaast werkt de overheid aan een aantal grote spoorprojecten. De belangrijkste hiervan zijn: meer treinen tussen Schiphol en Lelystad (OV SAAL), de Hanzelijn tussen Lelystad en Zwolle, en de Hogesnelheidslijn-Zuid [10].

1.1.2

Wet en Regelgeving

Hinder door trillingen wordt over het algemeen door aanzienlijk minder mensen ervaren dan hinder door geluid [11], maar als het aan de orde is, kunnen geluid en trillingen elkaars effect mogelijk versterken. Met het oog op hiermee samenhangende hinder en gezondheidseffecten zou vibratie, daar waar dat voorkomt, naast geluidaspecten onderdeel moeten vormen van planning. In Nederland is er nog geen wettelijke regeling voor trillingen en op Europees niveau beperkt. Er worden in Nederland in de praktijk twee richtlijnen toegepast, namelijk de SBR-richtlijn B 'Hinder voor personen in gebouwen' [2] en de Handreiking Industrielawaai (2004) [12]. De SBR-richtlijn B is vooral bedoeld als hulpmiddel bij het meten en beoordelen van trillingshinder. Ze hanteert streefwaarden voor trillingen in gebouwen en beschrijft meet- en beoordelingsmethodieken om te kunnen aangeven of er van mogelijke hinder in een bepaalde situatie sprake zou kunnen zijn. De Handreiking Industrielawaai geldt alleen voor geluid en trillingen veroorzaakt door bedrijven, en hanteert andere toetsings(richt- en grens-)waarden dan de SBR-richtlijn B. In de Handreiking Industrielawaai wordt voor de meet- en de beoordelingsmethode wel naar de SBR-richtlijn B verwezen. Een belangrijk verschil tussen de SBR-richtlijn B en de Handreiking is verder, dat bij de SBR-richtlijn B de *functie* van een gebouw (bijvoorbeeld woon- of kantoorfunctie) bepalend is voor de vastgestelde streefwaarde, terwijl dit bij de Handreiking de *locatie* van het gebouw is (bijvoorbeeld landelijk- of industriegebied)[13].

De SBR-richtlijn B is opgesteld om individuele gevallen te beoordelen – voor elk individueel geval moeten er metingen worden uitgevoerd. De richtlijn is in de eerste plaats een klachtenrichtlijn en minder geschikt voor de beoordeling van

een gebied en het maken van prognoses [14]. De SBR-richtlijn B leidt tot een uitspraak of een klacht over hinder terecht is, maar zegt weinig over het percentage gehinderden, in tegenstelling tot de geluidwetgeving, die zich daar wel op richt. SBR-richtlijn B is niet speciaal met het oog op trillingen ten gevolge van railverkeer opgesteld, maar kent wel een paragraaf die daarover bepalingen bevat. Een specifieke beleidsregel voor het meten en beoordelen van trillinghinder voor personen in gebouwen als gevolg van railverkeer ontbreekt. De BTS [1] die het ministerie van IenM recent heeft opgesteld, zou dit hiaat aan moeten vullen. De BTS heeft tot doel vast te stellen op welke wijze omgegaan wordt met enkele aspecten van trillinghinder bij de vaststelling van een tracébesluit tot aanleg, wijziging of hernieuwde ingebruikneming van een landelijke spoorweg, als bedoeld in de Tracéwet. De BTS vult de SBR-richtlijn B aan op de beoordeling van trillingen door treinen voor een tracébesluit. Voor het meten, de meetposities en de meetapparatuur, wordt verwezen naar SBR-richtlijn B. Er zijn echter ook een aantal verschillen tussen de SBR-richtlijn B en de BTS. Een van de belangrijkste veranderingen is dat er voor een nieuwe situatie (nieuwe spoorlijn) alleen nog een beoordeling plaatsvindt op basis van de maximale trillingssterkte $V_{\max}$. De beoordeling op de gemiddelde trillingssterkte V_{per} is komen te vervallen. In bestaande situaties wordt V_{per} wel meegenomen in de beoordeling.

Op Europees niveau is alleen in Zwitserland wetgeving ingevoerd die primair bedoeld is om mensen die in gebouwen verblijven, te beschermen tegen trillingshinder [15]. De wet stelt limieten aan de emissie van trillingen door bronnen en maakt onderscheid tussen bestaande en nieuwe bronnen. In Noorwegen, Duitsland en het Verenigd Koninkrijk worden verschillende richtlijnen als standaard gebruikt [16-18]. Deze beschrijven, onder andere, meet- en rekenmethodieken en classificeren woonhuizen op aanbevolen grenswaarden voor trillingen veroorzaakt door weg- en railtransport. De diverse nationale richtlijnen maken gebruik van verschillende trillingsmaten. In de Britse richtlijn wordt bijvoorbeeld de Vibration Dose Value (VDV) (een cumulatieve maat voor de blootstelling aan trillingen) gebruikt om de blootstelling aan trillingen te kwantificeren in relatie tot de respons van mensen [16]. In de Noorse standaard vindt er een beoordeling plaats op basis van het maximale trillingsniveau (*The Statistical Maximum of a_{w95} en V_{w95}*) [18]. Deze waarde moet worden bepaald over de meest versturende treinen, en is analoog aan het statistisch maximum van $V_{\max}$ in Nederland. Deze komt in praktijk overeen met de gemeten $V_{\max}$. V_{w95} is niet vergelijkbaar met de $V_{\max98}$ uit de BTS. In Duitsland wordt de zogenaamde *Kenwerte für die Beurteilung von Erschütterungen* (de KB-waarde) gebruikt, gelijkwaardig aan de $V_{\max}$ en V_{per} in Nederland [17].

1.2 Kennishiaten en plan van aanpak

Uit een eerste verkenning van de bestaande kennis op het gebied van trillingshinder volgt dat kennishiaten zijn aan te wijzen zowel voor wat betreft de blootstelling aan trillingen door treinen en de effecten daarvan, als de relatie tussen beide. Deze hiaten vormen de belangrijkste bouwstenen voor de programmeringstudie die naar aanleiding van Kamervragen en ter voorbereiding van regelgeving werd opgezet door het ministerie voor IenM in samenwerking met RIVM en ProRail.

Voor het vaststellen van de hoogte van een norm voor trillingen is een gedegen gezondheidseffectschatting noodzakelijk, zoals onder andere beschreven wordt

door de Wereldgezondheidsorganisatie (WHO) [19]. De belangrijkste stappen hierbij zijn:

1. verzameling van relevante gegevens;
2. evaluatie van de gegevens in termen van de sterkte van het bewijs;
3. evaluatie van de gegevens in termen van biologische effecten, gezondheid en welzijn;
4. keuze van richt- en grenswaarden op basis van kosten-batenanalyse en/of politieke wenselijkheid (rechtvaardigheidsoverweging).

Aan deze stappen ligt een oorzaak-effectketen ten grondslag, zoals onder andere beschreven wordt door de WHO [19] en wordt geïllustreerd in Figuur 1.1.



Figuur 1.1 De oorzaak-gevolgketen (Bron: [19]).

In het geval van trillingen zijn de volgende gegevens nodig:

1. blootstelling:

- keuze trillingsmaat;
- gegevens spoorvervoer;
- gegevens ten behoeve van overdracht (rekenmodel, bodemgesteldheid);
- woningdichtheid langs spoor;

2. effecten:

- welke effecten zijn te verwachten op basis van beschikbare kennis;
- relatie trillingsmaat/effecten;

3. maatregelen:

- welke maatregelen zijn mogelijk;
- wat zijn de kosten daarvan;
- baten van vermeden effecten;
- inzet maatregelen bij verschillende normniveaus.

Deze rapportage beperkt zich tot gezondheidseffecten van trillingen.

1.3 Vraagstelling

In dit rapport wordt de laatste stand van zaken weergegeven met betrekking tot de effecten van trillingen en (laag)frequent geluid door treinen op gezondheid en welzijn. Daarbij is het volgende onderzocht:

1. Wat is bekend uit de Nederlandse en Europese literatuur over de effecten van trillingen door treinen en de niveaus waarboven deze optreden? Hierbij wordt ook ingegaan op de onderliggende mechanismen.
2. Welke contextuele en persoonlijke factoren zijn mede van invloed op deze effecten?
3. Welke blootstellings-responsrelaties zijn momenteel beschikbaar die de relatie tussen trillingen door treinen en gezondheids- of welzijnseffecten beschrijven? Daarbij is nagegaan of en hoe de beschikbare blootstellings-responsrelaties gebruikt kunnen worden voor een schatting van de omvang van de effecten van trillingen door treinverkeer in Nederland.

Het in dit rapport beschreven literatuuroverzicht is onderdeel van de programmeringstudie trillingen zoals hierboven geschetst. Het volledige plan van aanpak is opgenomen in Bijlage II.

1.4 Leeswijzer

Op basis van een eerste verkenning van de beschikbare Europese literatuur (vanaf 1970) wordt in deze rapportage een overzicht gegeven van de stand van kennis op het gebied van (gezondheids)effecten van trillingen en de kwaliteit en toepasbaarheid van beschikbare doses responsrelaties. De beschrijving beperkt zich tot trillingen door treinverkeer. Het rapport is opgebouwd uit zes hoofdstukken. Na een korte omschrijving van de gevolgde methode (hoofdstuk 2) wordt in hoofdstuk 3 kort ingegaan op gangbare blootstellingsmaten van trillingen, de perceptie van trillingen en de wijze waarop dit kan leiden tot (gezondheids)effecten. Hoofdstuk 4 vat de resultaten uit Nederlands en Europees onderzoek samen. In Hoofdstuk 5 wordt vervolgens ingegaan op beschikbare blootstellings-effectrelaties voor wat betreft gezondheidseffecten en de toepasbaarheid hiervan op de Nederlandse situatie. Hoofdstuk 6 vat tot slot de belangrijkste resultaten samen en geeft enkele richtingen voor toekomstig onderzoek.

2 Methode

Om een antwoord te geven op de vraagstellingen is een systematische review van de literatuur uitgevoerd. Daarbij is gezocht naar observationele studies die vanaf 1970 zijn gepubliceerd in het Duits, Engels of Nederlands en waarin de relatie tussen trillingen veroorzaakt door railverkeer, en gezondheid en welzijn is onderzocht.

In de eerste plaats is het databestand Scopus doorzocht. Hiervoor werd de volgende zoekstrategie gebruikt: `((TITLE-ABS-KEY(vibrat\*)) OR (TITLE(noise))) AND (TITLE-ABS-KEY(annoy\* OR disturb\* OR health OR well-being OR exposure OR sleep OR stress OR illness OR sickness OR nuisance)) AND (TITLE-ABS-KEY(dwell\* OR residen\* OR urban OR suburban OR house OR building)) AND (TITLE-ABS-KEY(rail\* OR train))`.

Daarnaast zijn vaktijdschriften (Journal of the Acoustical Society of America, Noise and Health, Acta Acustica et cetera), rapporten en congresproceedings op het gebied van trillingen, geluid en gezondheid handmatig doorzocht. Ten slotte hebben we in de relevante literatuur op het gebied van trillingen en gezondheid de referenties nader bekeken en werd gezocht naar additionele studies. Dit leverde meer dan 230 records op.

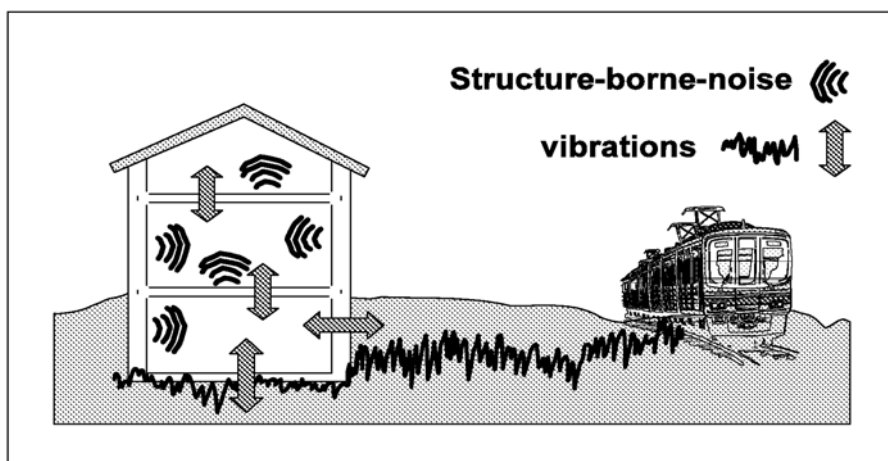
Alleen studies die in hun titel, abstract of samenvatting vermeldde dat ze de relatie tussen trillingen veroorzaakt door railverkeer en gezondheid en/of welzijn hebben onderzocht, werden uiteindelijk geselecteerd voor de review. Dit betekende concreet dat in deze studies de relatie tussen blootstelling aan trillingen van railverkeer en gezondheid en/of hinder, slaapverstoring of verstoring van activiteiten in een gezonde volwassen populatie moest zijn bestudeerd, en dat in de studie de relatie tussen trillingen door railverkeer (uitgedrukt aan de hand van een maat voor trillingen) en genoemde eindpunten moest worden beschreven en/of gekwantificeerd. Experimentele studies, studies uitgevoerd buiten Europa en onderzoek bij kinderen, zijn in deze review buiten beschouwing gelaten. Selectie op basis van deze criteria leverde uiteindelijk twaalf relevante studies op.

3

Blootstelling

3.1 De perceptie en waarneming van trillingen

Trillingen kunnen onder andere ontstaan doordat een bepaalde bron, bijvoorbeeld treinverkeer, vaak via een gebouw kracht uitoefent op de bodem. Doordat de trilling zich voortplant in de bodem, kunnen gebouwen gaan trillen. De overdracht van de trillingen in een gebouw is afhankelijk van de dynamische kenmerken van het gebouw en van het type trillingen (zie figuur 3.1). Mensen die zich in het gebouw bevinden, kunnen de trillingen waarnemen door fysiek contact met het gebouw en/of doordat ze de trillingen horen: als de constructie van het gebouw trillingen naar een medium in de directe nabijheid (bijvoorbeeld de lucht) overbrengt, wordt er zogenaamd *structure-borne*-geluid geproduceerd [15]. Er is vaak sprake van secundair geluid (gerammel) bijvoorbeeld van kopjes, schilderijen, ramen en deuren. Dit heeft een sterk visuele component.



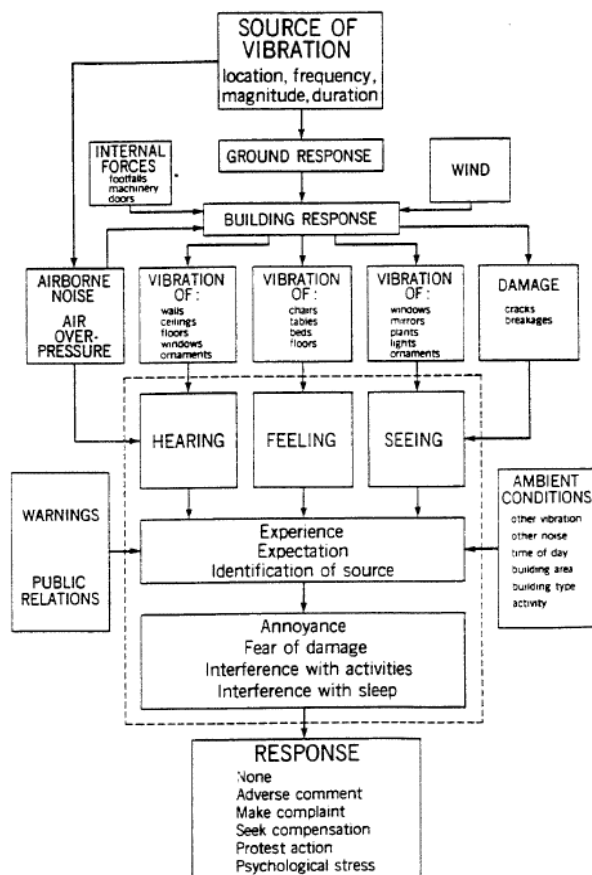
Figuur 3.1 Overdracht van trillingen (Bron: [15]).

Anders dan bij geluid, vindt de overdracht van trillingen dus niet plaats via de lucht (gasvormig medium), maar via vaste materie (bodem, vloeren, wanden en dergelijke).

Trillingen worden gevoeld als het menselijk lichaam in contact komt met een trillend oppervlak. In deze rapportage hebben we het, net als in de diverse standaarden [2, 16-18], over trillingen met een frequentierange van 1 tot 80 Hz (of iets hoger). Naarmate de frequentie van de trillingen hoger komt te liggen, wordt het lichaam er steeds minder gevoelig voor. Trillingen met frequenties lager dan 1 Hz worden door het lichaam waargenomen als een beweging [20]. Excitatie door bewegingen met dergelijke lage frequenties kunnen bewegingsziektes (*motion sickness*) veroorzaken [21]. Een trillende structuur of trillend oppervlak emitteert vaak ook (laagfrequent) geluid.

Trillingen worden over het algemeen in het hele lichaam gevoeld: 'Vibration "shakes" people in the truest sense of the word; it gets under one's skin and causes the entire body to vibrate.' [15] Bij de perceptie van trillingen door mensen zijn diverse systemen van het menselijke lichaam betrokken: het gezichtsorgaan, het vestibulaire systeem (waaronder het evenwichtsorgaan valt), het gehoor, het cutane systeem (receptoren in de huid), spieren en ingewanden. Afhankelijk van de frequentie van trillingen, zijn een of meerdere van deze systemen betrokken bij de perceptie van trillingen. Bij lage frequenties

(bewegingen) zijn vooral het gezichtsorgaan en het vestibulaire systeem – het systeem waarmee oogbewegingen worden gecontroleerd – van belang [20]. In woningen treedt visuele waarneming van trillingen op doordat mensen objecten zien trillen of door de beweging van schaduwen in spiegels en/of ramen. Bij middelmatige frequenties kunnen bewegingen en krachten in het lichaam een kinesthetisch gevoel of een gevoel van beweging geven. Dit is van invloed op onder meer de perceptie van de zwaartekracht, en de perceptie van beweging van lichaamsdelen ten opzichte van andere lichaamsdelen. In 1990 heeft Griffin (figuur 3.2) geschetst hoe complex de fysiologische sensatie van trillingen in het lichaam is en wat de mogelijke subjectieve respons daarop is [22]. In de loop der tijd zijn er verschillende effecten van trillingen, afkomstig van diverse bronnen, bij mensen gemeten: bijvoorbeeld verstoring van activiteiten (inclusief slaap), hinder, vermindering van kwaliteit van leven, vermoeidheid, verminderde taakprestatie (*degraded work efficiency*), bewegingsziekte en verminderde gezondheid [20].



Figuur 3.2 Factoren die van invloed zijn op de subjectieve respons ten gevolge van blootstelling aan trillingen waargenomen in de woningen (bron: [22]).

Net als geluid, kunnen trillingen door mensen als onplezierig en/of storend worden ervaren. Geluid is een zogenaamde non-proximale stimulus: een stimulus die ergens is gelokaliseerd buiten het lichaam, waaraan je kunt ontsnappen door bijvoorbeeld naar een rustige kamer te gaan, door de ramen te sluiten et cetera. Dit is anders voor trillingen. Omdat het letterlijk onder je huid kruipt, kun je er niet aan ontsnappen, maar ben je er in feite aan overgeleverd.

En doordat het veel moeilijker is om het probleem te lokaliseren, creëert het vaak ook een gevoel van bedreiging [15].

In Figuur 3.2 wordt een overzicht gegeven van alle factoren die van invloed kunnen zijn op de subjectieve respons ten gevolge van waargenomen blootstelling aan trillingen in de woning [22].

3.2 Gangbare blootstellingsmaten

Een trilling is een oscillerende beweging. De sterkte van een dergelijke beweging kan worden uitgedrukt als een versnelling (m/s^2), als een snelheid (m/s) of als een verplaatsing (in mm); ook is de amplitude van belang. Trillingen veroorzaakt door omgevingsbronnen, bestaan meestal uit trillingen met een verschillend frequentiebereik. In aanvulling op de sterkte is dit een aspect waarmee ook rekening moet worden gehouden. Aangezien het menselijk lichaam niet even gevoelig is voor trillingen met dezelfde trillingsterkte maar met verschillende frequenties, worden de bijdragen van trillingen met een verschillend frequentiebereik anders gewogen. De omvang van een trillingsgebeurtenis wordt meestal uitgedrukt in: (i) een frequentiegewogen root-mean-square(rms)-versnelling of -snelheid, (ii) wortel van het gemiddelde quad(rmq)-versnelling, (iii) piek of piek-pieksnelheid of -versnelling, of (iv) als tijdgewogen maximumsnelheid of versnelling [20].

De omvang van trillingen over langere perioden (bijvoorbeeld uren of 24 uren per dag) wordt gewoonlijk gekenmerkt door de frequentiegewogen root-mean-square(rms)- of root-mean-quad(rmq)-waarde over die periode. Cumulatieve maten zoals de Vibration Dose Value (VDV) worden soms ook gebruikt als maat voor trillingen over langere perioden. De VDV is de frequentiegewogen root-mean-quad(rmq)-waarde van de versnelling met een tijdeenheid van 1 seconde. De eenheid van de VDV is $\text{m/s}^{1,75}$.

Het optreden van trillingen kan in de loop van de tijd veranderen. Trillingen kunnen dan ook een verschillend karakter hebben. Zo onderscheiden we bijvoorbeeld kortdurende trillingen en continue of langdurige trillingen. Kortdurende trillingen zijn trillingen met een kortdurend (doorgaans korter dan enkele minuten) karakter. De trilling wordt veroorzaakt door een kortdurende excitatie, soms met een repeterend karakter. In dat geval spreken we van herhaald voorkomende trillingen. Trillingen veroorzaakt door weg- of railverkeer hebben vaak dit karakter. Continue trillingen zijn trillingen die ten opzichte van de grootste trillingstijd gedurende langere tijd aanwezig zijn. Hebben deze trillingen een constante sterkte, dan spreken we van stationaire trillingen. Is de sterkte als functie van de tijd niet constant, dan spreken we over niet-stationaire trillingen [2, 20].

Of mensen trillingen waarnemen is niet alleen afhankelijk van de sterkte en het frequentiebereik van trillingen, maar hangt ook af van waar op het lichaam, bij welke lichaamshouding (zittend, liggend, staand) en in welke richting de trillingen (horizontaal en/of verticaal) worden aangebracht. Dit blijkt onder andere uit diverse laboratoriumstudies die geprobeerd hebben om een antwoord te vinden op vragen als 'wanneer wordt men trillingen gewaar?' en 'Bij welke waarde van trillingen worden trillingen gevoeld?'. De uitkomsten van deze studies bleken echter verder nogal te variëren [14, 22, 23]. De normen waaraan in Europese richtlijnen getoetst wordt, zijn gebaseerd op zogenaamde *vibration perception threshold curves* (waarnemingscurven); deze zijn gebaseerd op bovengenoemde laboratoriumstudies. Op basis van de waarnemingscurven wordt het niveau bepaald waarbij 50 procent van de bevolking trillingen zou moeten kunnen waarnemen (waarnemingsdrempel). Het is echter de vraag in

hoeverre de waarnemingscurven en waarnemingsdrempels van toepassing zijn op de perceptie van trillingen in de woonomgeving [23]. De meeste laboratoriumstudies waarop deze waarnemingscurven zijn gebaseerd, hebben de effecten van zgn. *steady state*-trillingen en *random*-trillingen onderzocht. Zoals in paragraaf 1.1.2 al werd aangegeven, wordt de blootstelling aan trillingen in de SBR-richtlijn B uitgedrukt aan de hand van de maximale trillingsterkte ($V_{\max}$) en de gemiddelde trillingsterkte (V_{per}). Zowel $V_{\max}$ als V_{per} moet worden bepaald door metingen [2]. In de BTS vindt voor nieuwe situaties alleen nog een beoordeling plaats op basis van de $V_{\max}$. De beoordeling op de gemiddelde trillingsterkte V_{per} is komen te vervallen. In een bestaande situatie wordt V_{per} wel meegenomen in de beoordeling.

De blootstelling aan trillingen wordt in bestudeerde observationele studies die de effecten van treinverkeer bestuderen, aan de hand van diverse snelheidsmaten uitgedrukt (zie ook paragraaf 4.2). Daarbij wordt soms onderscheid gemaakt tussen woon- en slaapkamer, dagdeel (overdag/'s nachts) en trillingsrichting. Ook is de blootstelling aan trillingen benaderd aan de hand van het aantal treinpassages per etmaal en de afstand tot het spoor (in meters).

Voor een overzicht van de verschillende trillingsmaten wordt verwezen naar Bijlage I.

4 Effecten van trillingen door railverkeer op gezondheid en welbevinden

4.1 Resultaten van Nederlandse studies

In Nederland is het effect van trillingen door treinverkeer op gezondheid en welbevinden slechts zelden onderzocht. In Tabel 4.1 wordt een overzicht gegeven van de beschikbare studies en de kenmerken ervan. Het betreft twee vragenlijstonderzoeken [24, 25] en twee heranalyses waarbij gebruik werd gemaakt van bestaande internationale gegevens op individueel niveau [26, 27]. Aan de hand van de heranalyses werd nagegaan hoe de hinder veroorzaakt door het diverse type treinen in Nederland zich tot elkaar verhoudt. Hierbij werd naast effecten van railgeluid ook gekeken naar hinder door trillingen.

Tabel 4.1 Overzicht van Nederlandse studies.

Studie-ref.	Studie-opzet ^{*)}	Periode	Locatie(s)	N	Bron ^{#)}	Gebruikte blootstel- lingsmaat ^{‡)}	Effect ^{**)}
[24]	1	1977	Rijen, Best, Oisterwijk, Bilthoven, Wormerveer, Rijswijk, Nijkerk, Olst, Twello	671	GT	1, 2	I, G, J
[26]	2	1975-81	Nederland, Duitsland, en Groot-Brittannië ^{†)}	2.777	GT	1, 3, 4	E, A
[27]	2	1993	Nederland en Frankrijk ^{‡)}	259	G	3	E
[25]	1	1998	Alkmaar, Amersfoort, Den Haag, Nijmegen, Rotterdam, Rozendaal, Sittard, Venlo, Zutphen	659	GT	4	E, D

*) 1 = dwarsdoorsnede onderzoek, 2 = heranalyse van data; †) referenties behorende bij deze studies [24, 28, 29]; ‡) referentie behorende bij de Franse studie [30]; #) G = geluid; T = trillingen; ‡) 1 = frequentie of aantal treinen per etmaal, 2 = rijsnelheid van de trein, 3 = geluidblootstelling, 4 = afstand tot spoor/rangeerterrein in meter; **) A = voelen van trillingen, B = horen rammelen van objecten, C = objecten zien bewegen, D = verstoring van slaap/slaapklachten, E = hinder door trillingen van de treinen/treintunnel, F = angst voor schade aan woning, G = verstoring van activiteiten anders dan slaap (bv. communicatie, rust), H = verstoring door trillingen overdag en/of in de nacht, I = waarneming geluid, J = attitudes

Zoals uit Tabel 4.1 blijkt, was in de beoordeelde studies geen sprake van trillingsmetingen of schattingen. In plaats daarvan werd de blootstelling uitgedrukt aan de hand van proxies zoals afstand tot de bron, het aantal treinen per etmaal en de rijsnelheid. Wel werd in een aantal studies [24, 25] gevraagd naar het al dan niet waarnemen van trillingen veroorzaakt door treinverkeer. Een punt is dat de betreffende onderzoeken primair als doel hadden om de mogelijke effecten van *geluid* veroorzaakt door treinverkeer te onderzoeken. In het onderzoek van Peeters et al. (1984) gaf 60 procent van de deelnemers aan dat het huis wel eens trilde door treinen [24]. Uit het onderzoek van De Jong en Vos (2000) bleek dat trillingen juist door relatief weinig mensen werden waargenomen. Van de respondenten die binnen een afstand van 400 meter van een rangeerterrein woonden, gaf slechts 8 procent aan dagelijks de trillingen van het rangeerterrein te ervaren [25].

4.2 Resultaten van Europese studies

In de loop der jaren is in Europa een aantal observationele studies uitgevoerd waarin de effecten van trillingen bij mensen, al dan niet in combinatie met geluid, veroorzaakt door treinen zijn bestudeerd [23, 31-38]. In alle gevallen gaat het om dwarsdoorsnede studies waarin de effecten bij volwassenen zijn onderzocht. De omvang van de onderzochte populaties varieerde van 24 tot ruim 2.800 personen. In Tabel 4.2 worden een aantal kenmerken van deze studies gepresenteerd. Voordat de resultaten van deze studies worden besproken, wordt eerst nader ingegaan op de gehanteerde blootstellingskarakterisering van trillingen in de betreffende onderzoeken.

4.2.1

Blootstellingskarakterisering

Met uitzondering van de 'Norwegian Vibration Study' (voortaan aangeduid als de NVS-studie) [37], werd de blootstelling aan trillingen in de studies steeds vastgesteld aan de hand van metingen binnenshuis. Alleen in het project 'Train Vibration and Noise Exposure' (voortaan aangeduid als TVANE) [35], en in het project 'Human Response to Vibration in Residential Environments' van de Universiteit van Salford (voortaan aangeduid als het HRVRE-project) [23] werden ook metingen buitenshuis verricht. In de NVS-studie werd de blootstelling aan trillingen vastgesteld met een model dat aan de hand van gegevens over bodemcondities, spoorkwaliteit, demping van de trilling, afstand tot de trillingsbron, snelheid van de treinen, versterking van de trilling van de grond in de woning, afkomstig van trillingsmetingen en expert *judgements*, een voorspelling maakte van de blootstelling aan trillingen [38].

De blootstelling aan trillingen werd in de studies aan de hand van diverse snelheidsmaten uitgedrukt: De Vibration Dose Value (VDV), de KB, en de V_{w95} (steeds in mm/s). Daarbij werd soms onderscheid gemaakt tussen woon- en slaapkamer, dagdeel (overdag/'s nachts) en trillingsrichting. Ook werd de blootstelling aan trillingen bij benadering uitgedrukt met behulp van het aantal treinpassages per etmaal en de afstand tot het spoor (in m). Alleen in de NVS-studie en het HRVRE-project werden populaties onderzocht die aan een reeks van verschillende trillingsniveaus waren blootgesteld [23, 37]. In de andere studies die de effecten van trillingen onderzochten, werden alleen groepen met een hogere en een lagere trillingsbelasting onderling vergeleken. Bij de ISVR-studie is onduidelijk hoe is omgegaan met de blootstellingniveaus [31].

Tabel 4.2 Overzicht van Europese studies.

Studie-ref.	Locatie(s)	N	Blootstelling			Onderzochte effecten ^{†)}
			Aspect ^{*)}	Karakterisering	Gebruikte blootstellingsmaten trillingen (range)	
[31]	Schotland (24)	720	T	Meting, binnenshuis	# passages/etmaal, blootstelling x-as trillingen	A, B, C, E, F
[32]	Duitsland (20)	1.026	T, G	Meting, binnenshuis	KB, KBR, KBEQ en VDV apart voor dag en nacht en apart voor woon- en slaapkamer	A, C, D, E, G, H
[33, 34]	Zweden (15)	2.833	T, G	Meting, binnenshuis	Mean maximum level (tot max 15,8 mm/s), afstand tot spoor (tot 350 m), # passages/etmaal (tot 160 passages)	D, E, G
[36]	Spanje	24	T, LFG	Meting, binnenshuis	KB-weighted vibration levels (60-66 dB) L_{pASmax}	E, H
[37]	Noorwegen (14)	1.503	T	Model & meting	V_{w95} (0 – 3 mm/s)	A, B, C, D, E, G
[38]	Noorwegen	313	LFG	Model	L_{pAFmax} (23 – 45 dB), # passages per week (40-106)	D, E
[35]	Zweden	980	T, G	Meting, binnens- en buitenshuis	Ground vibration levels (0,10 – 1,43 mm/s)	D, E, G
[23]	Groot-Brittannië	931	T, G	Meting, binnens- en buitenshuis	VDV en rms W_k voor verschillende dagdelen en apart voor horizontale en verticale trillingsrichting	D, E

*) T = trillingen, G = geluid, LFG = laagfrequent geluid; †) A = voelen van trillingen, B = horen rammelen van objecten, C = objecten zien bewegen, D = verstoring van slaap/slaapklachten, E = hinder door trillingen van treinen/treintunnel, F = angst voor schade aan woning, G = verstoring van activiteiten anders dan slaap (bv. communicatie, rust), H = verstoring door trillingen overdag en/of in de nacht; Afkortingen: n = aantal locaties, N = aantal deelnemers aan de studie.

4.2.2

Trillingen door treinverkeer en hinder

Tot nog toe zijn er vijf studies waarin de relatie tussen de blootstelling aan trillingen veroorzaakt door treinverkeer en de mate van hinder is onderzocht [23, 31, 32, 37, 39]. Daarnaast hebben andere studies de relatie met hinder onderzocht al dan niet in combinatie met de blootstelling aan geluid of (laagfrequent) geluid [33-36, 38]. In deze studies werd hinder gemeten met behulp van één of meer vragen als onderdeel van een schriftelijke vragenlijst en/of schriftelijk interview. Er werd steeds een andere vraagstelling gebruikt om de mate van hinder te meten (zie ook Tabel 4.3). Dit maakt vergelijking van de resultaten tussen de studies lastig.

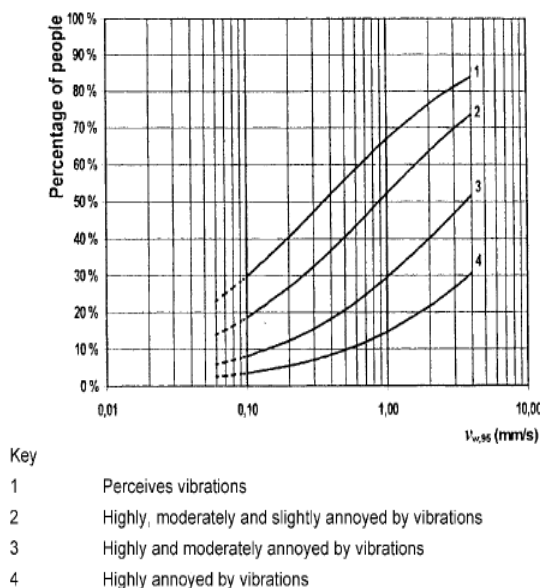
Tabel 4.3 Overzicht van vragen gebruikt om de mate van hinder door blootstelling aan trillingen veroorzaakt door treinen te meten.

Studie-ref.	Gebruikte hindervraag/vragen	Antwoordschaal
[31]	How annoyed are you by the vibration here from passenger, good and other trains? Does the vibration from the trains annoy you?	0 (Not annoyed) – 6 (Extremely annoyed) Not at all, a little, moderately, very much
[32]	Belästigung durch Erschütterungen Störung durch Bahnerschütterungen	Nicht, wenig, mittelmäßig, ziemlich, sehr 0 (Überhaupt nicht) – 10 (Äußert stark)
[33, 34]	General annoyance	Do not observe; observe, but is not annoyed; not very annoyed; rather annoyed; very annoyed
[36]	Niet gerapporteerd	0 – 10
[37]	Can you in your dwelling notice shaking or vibration by <source>? If yes, is the shaking or are these vibrations ... for you?	Highly annoying, somewhat annoying, a little annoying, not annoying
[35]	Thinking about the last 12 months or so, when you are at home, how much do railway vibrations bother, disturb or annoy you?	Not at all, slightly, moderately, very, extremely
[23]	Thinking about the last 12 months or so, when indoors at home, how bothered, annoyed or disturbed have you been by feeling vibration or hearing or seeing things rattle, vibrate or shacked caused by the railway between <day (7:00 – 19:00), evening (19:00 – 23:00), night (23:00 – 7:00)>?	Not at all, slightly, moderately, very, extremely

In de ISVR-studie werd geen relatie gevonden tussen de gerapporteerde mate van hinder en de gemeten sterkte van de trillingen. In het onderzoek rapporteerde slechts 35 procent van de deelnemers de trillingen te kunnen waarnemen. Ook is, zoals eerder gemeld, niet helemaal duidelijk hoe men bij de analyse met de verschillende blootstellingsmaten is omgegaan. Het aantal treinen dat gedurende 24 uur het huis van een deelnemer passeerde, vertoonde van de diverse blootstellingsmaten de sterkste correlatie met de door de respondenten gerapporteerde hinder. De door de respondenten gerapporteerde hinder werd niet beïnvloed door andere kenmerken van de trillingen [31].

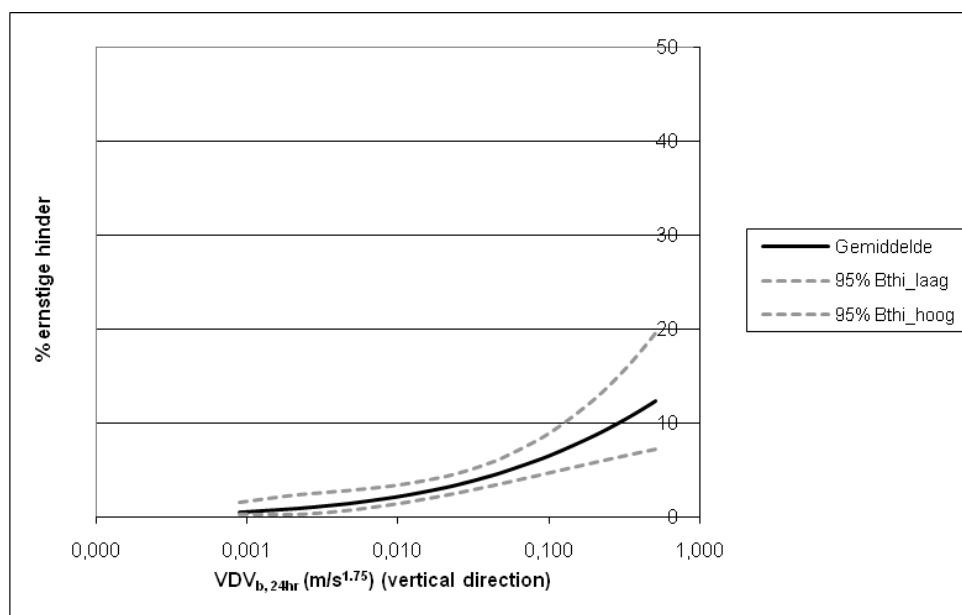
Op basis van gegevens uit het Duitse onderzoek van Zeichart (1993) hebben Passchier-Vermeer en Zeichart (1998) een relatie afgeleid voor de associatie tussen de blootstelling aan trillingen en het percentage ernstige hinder [40]. In het onderzoek waren verschillende blootstellingsmaten voorhanden. Uit een correlatieanalyse bleek dat de VCKB25L het best correleerde met hinder (correlatie ~ 0.30). De relatie tussen de blootstelling aan trillingen en ernstige hinder door trillingen werd afgeleid met behulp van logistieke regressie-analyse, analoog aan de manier waarop dat voor de relatie tussen geluid en ernstige hinder is gebeurd (zie ook [41]). Er werd hierbij niet gecorrigeerd voor mogelijk versturende variabelen.

In de NVS-studie werd eveneens een relatie gevonden tussen de blootstelling aan trillingen (V_{w95}) en hinder. Deze relatie werd afgeleid met behulp van logistieke regressie-analyse [37]. Het resultaat wordt weergegeven in Figuur 4.1. Uit de figuur blijkt dat bij een trillingssnelheid (V_{w95}) van 0,5 mm/s ongeveer 10 procent van de deelnemers rapporteerden dat ze ernstig zijn gehinderd; 40 procent was bij dit trillingsniveau gehinderd (Figuur 4.1). De gevonden relaties veranderden na controle niet voor leeftijd, geslacht en sociaal economische status [37, 42].



Figuur 4.1 Het percentage gehinderden door trillingen in huizen uitgezet tegen de berekende, statistisch maximale waarde van de gewogen trillingssnelheid V_{w95} in mm/s (bron: [37]).

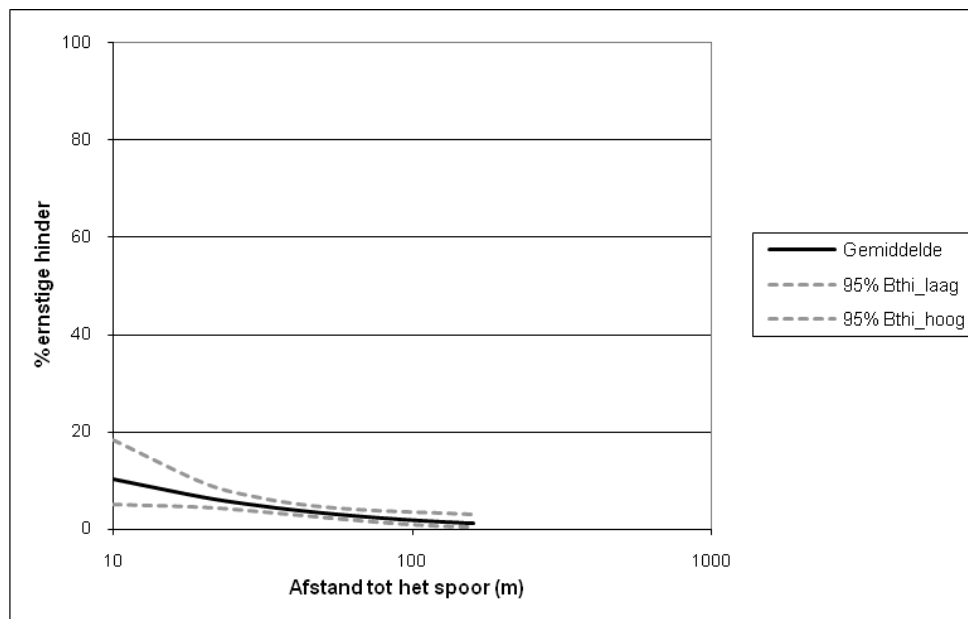
Ook in het HRVRE-project werd een relatie tussen de blootstelling aan trillingen (uitgedrukt in VDV en $RMSW_b$) en hinder gevonden [23, 43]. (Zie ook Figuur 4.2). Daarbij bleek dat de relatie tussen blootstelling aan trillingen en hinder sterker was voor horizontale trillingen dan verticale trillingen [43, 44]. Tenslotte werd ook in de TVANE-studie [39] een relatie gevonden tussen trillingen door treinverkeer (uitgedrukt in mm/s) en het percentage hinder. Bij een trillingssterkte van 0,10 mm/s was 5 procent van de deelnemers gehinderd door de trillingen van de treinen; bij 0,50 mm/s was 80 procent gehinderd.



Figuur 4.2 De relatie tussen blootstelling aan trillingen door treinen en ernstige hinder (Bron: [43]).

Vaak is het echter moeilijk om de blootstelling aan trillingen vast te stellen. In het HRVRE-project is daarom ook gekeken naar het effect van afstand tot het spoor in relatie tot hinder (zie ook Figuur 4.3). Er bleek een zwakke relatie te zijn: in de groep mensen die op 150 m van het spoor woonden, was 0,5 tot 3,2 procent ernstig gehinderd; op een afstand van 100 m van het spoor was 1,0 tot 3,6 procent ernstig gehinderd; op een afstand van 50 m was 2,5 tot 4,7 procent ernstig gehinderd. Hoewel de afstand tot het spoor de hinder door trillingen van railverkeer minder goed voorspelde dan bijvoorbeeld de VDV, concludeerden de onderzoekers dat afstand tot het spoor kan worden beschouwd als een aardige proxy voor de blootstelling aan trillingen [23]. In het HRVRE-project gaf ruim 71 procent van de respondenten aan dat ze de trillingen van de treinen konden voelen; bijna 37 procent gaf aan dat ze dingen zagen of hoorden trillen of schudden ten gevolge van de trillingen van de treinen. Van de respondenten die de trillingen van het treinverkeer hebben waargenomen, was bijna 10 procent er ook daadwerkelijk ernstig door gehinderd (Figuur 4.3).

In de 'Swedish Railway Survey' (voortaan aangeduid als SRS-studie) [33, 34] en de 'Spanish Underground Railway Noise Survey' (voortaan aangeduid als de SURNS-studie) [36] is de relatie met hinder door trillingen onderzocht in combinatie met de blootstelling aan geluid. De resultaten van deze studie zal worden besproken in paragraaf 5.4.



Figuur 4.3 De relatie tussen de afstand tot het spoor (in meters) en ernstige hinder door trillingen van treinverkeer (Bron: [23]).

4.2.3 Trillingen door treinverkeer en effecten op de slaap

Zowel in de NVS-studie [37] als in het HRVRE-project [23] zijn de effecten van de blootstelling aan trillingen veroorzaakt door treinen op de slaap onderzocht.

Tabel 4.4 Gebruikte vraagstellingen in studies die de effecten op de slaap van trillingen door treinverkeer onderzoeken.

Studie-ref.	Gehanteerde vraag/vragen	Antwoordschaal
[32]	Disturbance by vibrations during nighttime or daytime Sleep disturbance due to vibrations	Not at all, a little moderately, very much Not at all, a little, moderately, very much
[33, 34]	Disturbance of activities due to vibrations: (i) awakenings, (ii) fall asleep	Do not observe; observe, but is not annoyed; not very annoyed; rather annoyed; very annoyed
[37]	Does shaking/vibrations lead you to (i) having problems falling asleep? (ii) awaking at night? (iii) waking too early in the morning?	Yes, no
[35]	How often railway <i>noise</i> affected rest/relaxation? How much railway <i>noise</i> affected sleep? (i) difficulties falling asleep, (ii) awakenings, (iii) disturbed sleep quality?	Never, sometimes, often Not, slightly, moderately, much
[23]	Is your sleep ever disturbed by vibration caused by railway activity?	Yes, no

In de studie van Zeichart (1993) werd mensen gevraagd in hoeverre hun slaap werd verstoord door trillingen. Daarnaast is nagevraagd in hoeverre mensen werden gestoord door trillingen van treinen tijdens de nacht dan wel overdag. Uit de analyse bleek dat voor alle uitkomstmaten de correlaties met de blootstelling aan trillingen laag waren (correlatie $\sim 0,01 - 0,30$). Opvallend was dat de mate van verstoring door trillingen overdag iets sterker was gecorreleerd met de blootstelling aan trillingen dan de mate van verstoring door trillingen tijdens de nacht (zie ook Tabel 4.5) [20, 45].

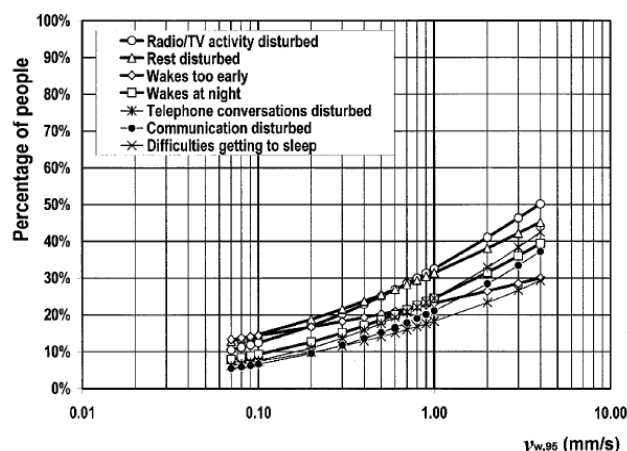
Tabel 4.5 De correlatie tussen de blootstelling aan trillingen door treinen en slaapverstoring en verstoring door trillingen (bron: [40]).

Blootstellingsmaat → Uitkomstmaat ?	KBR_WZ	KBR_SN	KBR24	KB_WZ	KB_SZ
Slaapverstoring	0,14	0,16	0,14	0,10	0,12
Verstoring overdag	0.20	0.22	0.20	0.16	0.16
Verstoring 's nachts	0.14	0.16	0.14	0.11	0.13

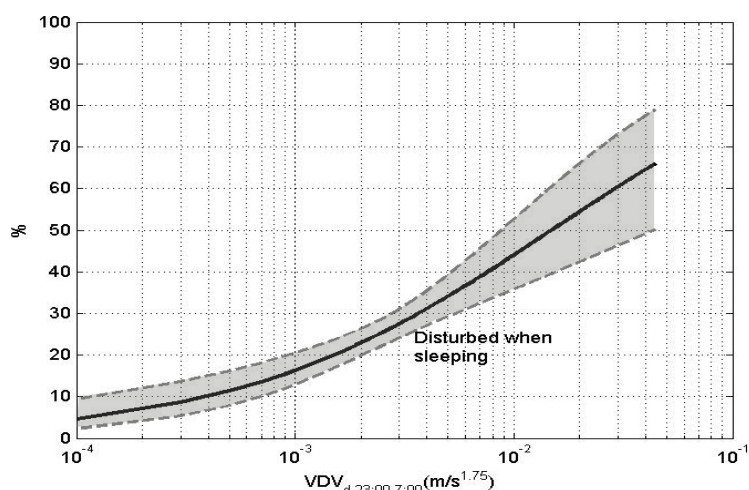
Afkortingen: KB_WZ of KB_SZ: energetisch over alle gemeten gebeurtenissen gemiddelde $KBF_{\max}$ -waarde voor de woonkamer (WZ) en slaapkamer (SZ); KBR: de effectief gemiddelde maximale $KBF_{\max}$ -waarde voor de woonkamer gedurende de dag/avondperiode (WZ) en voor de slaapkamer gedurende de nachtperiode (SZ). Daartoe wordt elke 30 seconde de $KBF_{\max}$ -waarde bepaald. Deze waardes worden vervolgens gemiddeld voor de dag/avond dan wel nachtperiode.

In de NVS-studie zijn verschillende effecten op de slaap onderzocht: problemen bij het in slaap vallen, wakker worden tijdens de nacht, en te vroeg ontwaken in de ochtend. Ook is gevraagd of trillingen de rust verstoorden [37]. Voor deze en andere activiteiten hebben Klæboe et al. (2003) de relatie onderzocht tussen de blootstelling aan trillingen en de kans dat de betreffende activiteit werd verstoord. Bij niveaus tot 0,10 mm/s (Vw95) rapporteerde 10-15 procent van de deelnemers dat ze te vroeg ontwaakten en/of dat de rust werd verstoord door trillingen van treinen. Dit veranderde naarmate de trillingsniveaus sterker werden: bij niveaus van ongeveer 4 mm/s rapporteerde 50 procent van de deelnemers dat ze werden gestoord bij het kijken en/of luisteren naar radio en/of tv; bijna 45 procent rapporteerde dat ze moeite hadden met in slaap te komen en/of dat de rust werd verstoord door trillingen veroorzaakt door treinen. Helaas werd in de NVS-studie het effect van de blootstelling overdag onderzocht [37].

Uit de literatuur is gebleken dat *geluid*blootstelling tijdens de nacht en avond hinderlijker zijn dan geluidniveaus overdag [46]. Zeichart (1998) vond geen aanwijzingen dat dit ook geldt voor trillingen [45]; in het HRVRE-project werd dit verschil tussen dag en nacht wel gevonden [43]. Zoals Figuur 4.4 laat zien, blijkt dat bij een trillingsniveau (VDV_b) van $0,05 \text{ m/s}^{1,75}$, 4 procent ernstig is gehinderd tijdens de dagperiode, 7 procent ernstig is gehinderd tijdens de avondperiode en 15 procent tijdens de nacht [43]. Ook in het HRVRE-project werd een relatie afgeleid voor de associatie tussen de blootstelling aan trillingen tijdens de nacht ($VDV_{d, 23:00 - 7:00}$) in $\text{m/s}^{1,75}$ en slaapverstoring (zie Figuur 4.5): naarmate de blootstelling aan trillingen tijdens de nacht toenam, nam de kans op slaapverstoring toe [43].



Figuur 4.4 De relatie tussen de blootstelling aan trillingen veroorzaakt door treinverkeer en de verstoring van activiteiten (Bron:[37]).



Figuur 4.5 De relatie tussen de blootstelling aan trillingen tijdens de nacht en slaapverstoring (Bron:[43]).

Daarnaast werden aparte relaties afgeleid voor de blootstelling aan trillingen door treinen tijdens de dag, avond en nachtperiode en ernstige hinder. De relatie tussen de blootstelling aan trillingen 's nachts en ernstige hinder was sterker dan de relatie tussen de blootstelling aan trillingen overdag of in de avond en ernstige hinder door trillingen.

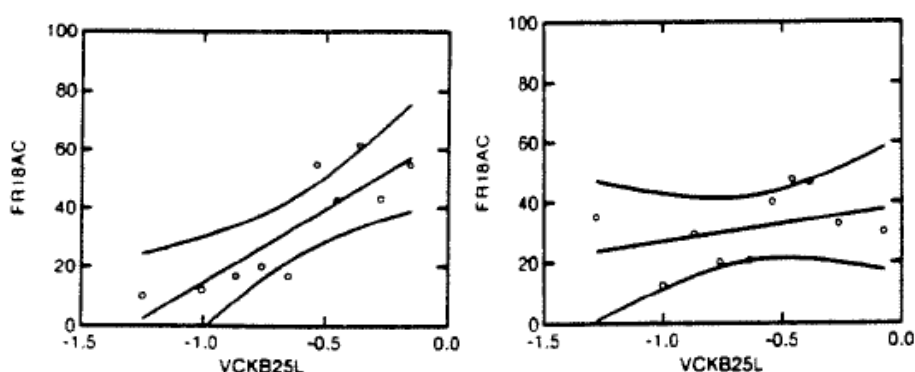
In de SRS-studie en in het TVANE-project zijn de effecten op slaap door trillingen onderzocht in combinatie met de blootstelling aan geluid [33-35]. De resultaten van deze studies worden in de volgende paragraaf besproken.

4.2.4

Effecten van gecombineerde blootstelling aan geluid en trillingen

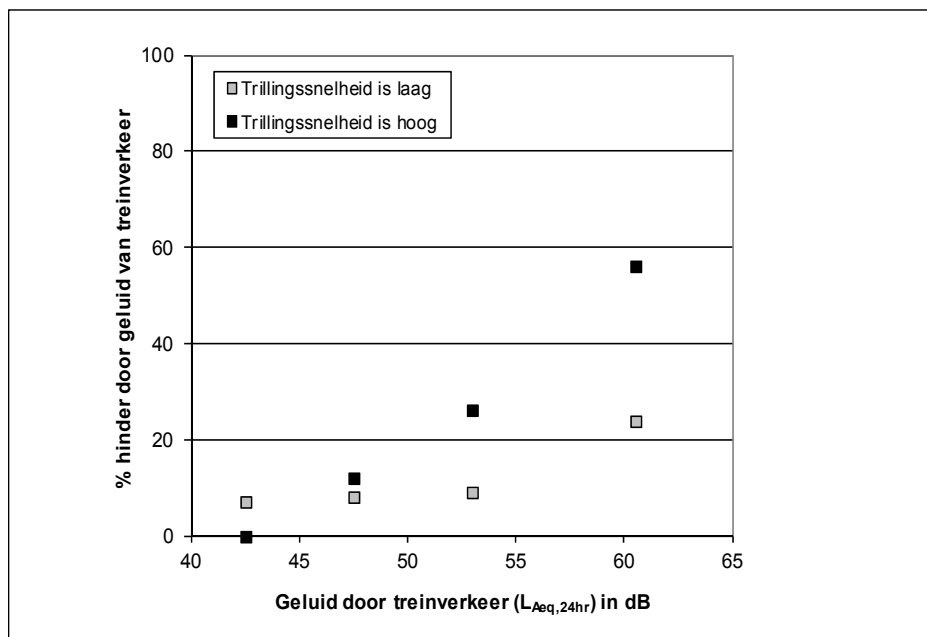
In vier studies zijn de effecten van een gecombineerde blootstelling aan geluid en trillingen door treinen onderzocht [23, 32-35]. Daarbij werd zowel naar het effect op hinder als op de slaap gekeken. Aanvankelijk werd in het onderzoek van Zeichart (1998) het effect van de blootstelling aan trillingen door treinverkeer onderzocht, zonder in de analyse rekening te houden met de blootstelling aan geluid. Er werden slechts kleine effecten gevonden. Na uitsplitsing van de onderzoeksgroep in personen die blootgesteld waren aan lage

geluidniveaus ($L_{Aeq24hr} = 39 \text{ dB(A)}$) en hoge geluidsniveaus ($L_{Aeq24hr} > 39 \text{ dB(A)}$), bleek dat in de groep deelnemers blootgesteld aan de lagere geluidniveaus de blootstelling aan trillingen door treinen (uitgedrukt als VCKB25L) sterker was gecorreleerd met de mate van hinder dan in de groep deelnemers blootgesteld aan de hogere geluidniveaus: de correlatie tussen de blootstelling aan trillingen door treinen en hinder was 0,42 in de groep deelnemers blootgesteld aan lage geluidniveaus [40, 45]. In de groep deelnemers blootgesteld aan hogere geluidniveaus was deze correlatie 0,09 [40]. Later heeft Passchier-Vermeer (1998) voor beide geluidblootstellingsgroepen relaties afgeleid voor de blootstelling aan trillingen en het percentage (ernstige) hinder. De afgeleide relaties voor de blootstelling aan trillingen en *ernstige* hinder bleken nauwelijks van elkaar te verschillen. Voor de relatie tussen de blootstelling aan trillingen en het *percentage hinder* lag dit anders. In de groep deelnemers blootgesteld aan lage geluidniveaus werd een veel sterkere relatie gevonden tussen de blootstelling aan trillingen en hinder dan in de groep deelnemers blootgesteld aan hogere geluidniveaus (zie ook Figuur 4.6) [40].



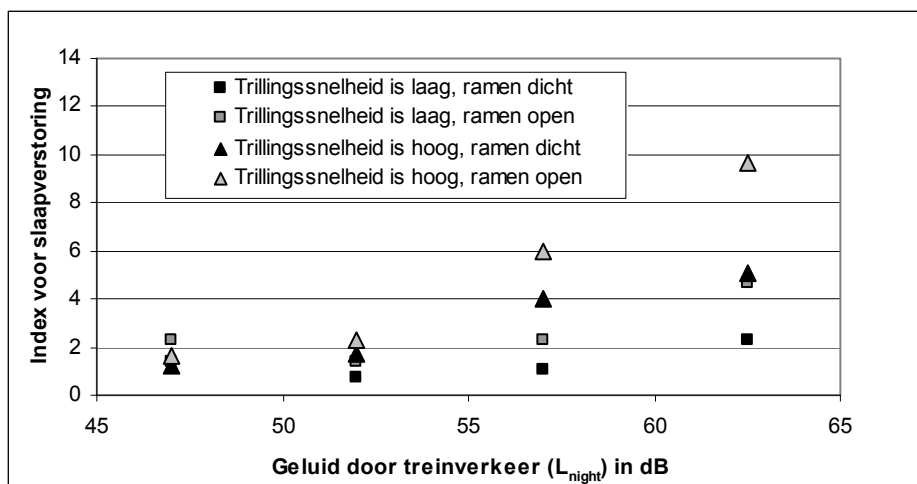
Figuur 4.6 De relatie tussen de blootstelling aan trillingen door treinverkeer (uitgedrukt in de VCKB25L) en het percentage hinder (FR18AC) voor de groep personen die is blootgesteld aan geluidniveaus ($L_{Aeq24hr}$) van maximaal 39 dB(A) (links) en voor de groep personen die is blootgesteld aan geluidniveaus ($L_{Aeq24hr}$) van meer dan 39 dB(A) (rechts). (Bron: [40]).

In twee Zweedse studies [33-35] is de interactie tussen geluid en trillingen op een andere manier onderzocht. Het doel van de SRS-studie was om de effecten van combinaties van blootstelling aan geluid en trillingen door railverkeer te onderzoeken. De onderzoekslocaties werden geselecteerd op basis van het trillingsniveau in een gebied (geen/weinig trillingen, sterke trillingen) en het aantal treinen per etmaal (<25, 25-75, 76-100, en > 100 treinen/24uur). Uit de resultaten bleek dat in gebieden waar het trillingsniveau ten gevolge van treinverkeer hoog was (uitgedrukt in $> 2 \text{ mm/s}$), de relatie tussen geluid door treinverkeer (uitgedrukt in $L_{Aeq24hr}$) en (ernstige) hinder door geluid *sterker* was dan in gebieden met een laag trillingsniveau ($< 1 \text{ mm/s}$). Volgens de onderzoekers zou dit wel eens kunnen komen door het feit dat mensen het lastig vinden om onderscheid te maken tussen geluid en trillingen. Ten slotte is de relatie tussen afstand tot het spoor en hinder door geluid en trillingen door treinverkeer onderzocht. Daarbij bleek dat in de groep respondenten die binnen 200 meter van de spoorlijn woonden, de gemiddelde hinder door trillingen minstens zo hoog was als de hinder door geluid [33, 34].



Figuur 4.7 De relatie tussen geluid van treinverkeer en % hinder per categorie trillingssnelheid (Bron: [35]).

Ook in het TVANE-project bleek dat in de gebieden met een hoge trillingssnelheid de relatie tussen geluid van railverkeer en hinder door geluid van railverkeer sterker was dan in gebieden met een lage trillingssnelheid (zie ook Figuur 4.7) [35].

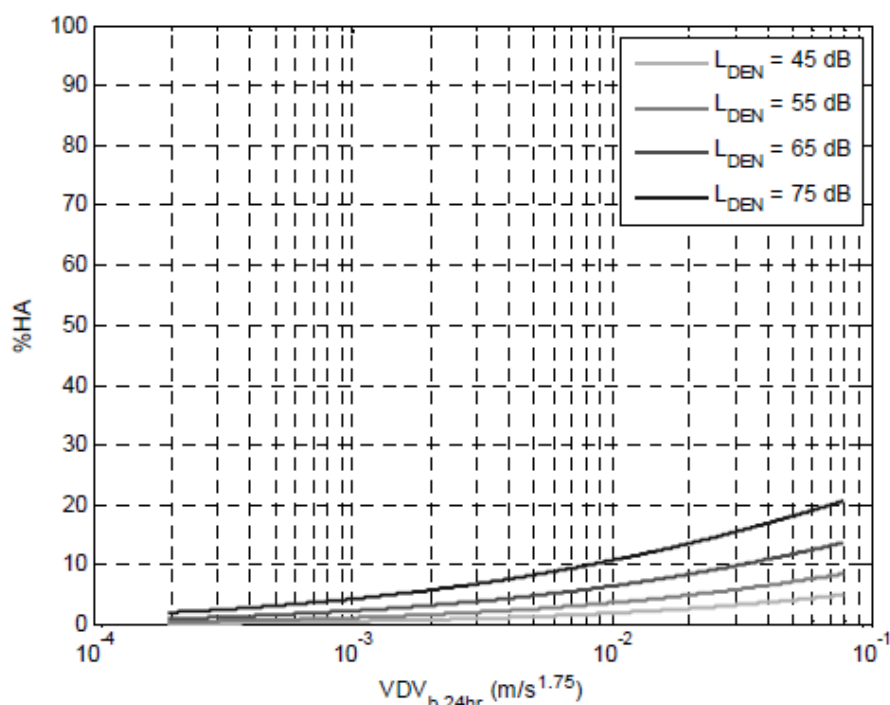


Figuur 4.8 De relatie tussen geluid door treinverkeer en slaapverstoring per trillingssnelheid (Bron: [35]).

Deze bevinding zou volgens de onderzoekers verklaard kunnen worden door het feit dat trillingen de perceptie van geluid versterken en het zo voor mensen moeilijker is om aan het geluid te wennen. In gebieden met een hoge trillingssnelheid was de gerapporteerde hinder door trillingen voor mensen die binnen 200 meter van het spoor woonden, hoger dan in gebieden met een lage trillingssnelheid. In gebieden met een hoge trillingssnelheid bleek de relatie tussen nachtelijk geluid van treinverkeer en slaapverstoring sterker dan in

gebieden met een lage trillingssnelheid (figuur 4.8). Ook maakte het uit of het raam 's nachts open of dicht was [35].

De resultaten van Passchier-Vermeer en Zeichart (zie ook Figuur 4.6) waren niet in overeenstemming met de resultaten van het HRVRE-project: uit de resultaten van het HRVRE-project bleek dat naarmate de geluidblootstelling door treinverkeer (uitgedrukt in L_{den}) hoger was, de relatie tussen de blootstelling aan trillingen door treinen en ernstige hinder door trillingen van treinverkeer sterker was (zie ook Figuur 4.9) [23]. Daarnaast bleek dat de relatie tussen geluid van treinverkeer en ernstige hinder door trillingen van treinverkeer sterker werd naarmate de blootstelling aan trillingen door treinverkeer hoger was. Volgens de onderzoekers van het HRVRE-project suggereert dit dat er een additioneel effect van trillingen en geluid was op de hinderscores [23].



Figuur 4.9 De relatie tussen trillingen (VDV) door treinverkeer en ernstige hinder uitgesplitst naar de blootstelling aan geluid (L_{den}) door treinverkeer (bron: [23]).

4.2.5 Hinder en laagfrequent geluid door treinverkeer

Trillingen van treinverkeer kunnen ook laagfrequent geluid veroorzaken. In twee onderzoeken werden de effecten daarvan (*structure-radiated noise*) onderzocht: in de 'Spanish Underground Railway Noise Survey' (SURNS) [36] en in de 'Norway Railway Vibration Annoyance Survey' (NRVAS) [38]. In de Spaanse studie bleek dat de respondenten nooit werden gestoord door geluid en trillingen als het A-gewogen laag frequent geluidsniveau lager was dan 32 dB. Bij niveaus tussen 32 en 42 dB werden de respondenten soms gestoord door het geluid en dan vooral aan het einde en aan het begin van de dag. Bij niveaus > 42 dB hadden de respondenten altijd last van het geluid. Het beperkt aantal deelnemers blootgesteld aan deze niveaus (totale N=24) bleek vaak hinder te rapporteren over de geluid- en trillingsniveaus. Zij gaven aan de trillingen hinderlijker te vinden dan het geluid. Deelnemers die in een huis woonden met dubbele beglazing, werden meer gehinderd door het laagfrequente geluid van de

treinen dan deelnemers die geen dubbele beglazing hadden. Ook bleek dat de deelnemers die waren blootgesteld aan hogere geluidsniveaus door wegverkeer, meer werden gehinderd door het laagfrequente geluid van de treinen [36]. In de Noorse studie [38] werd de blootstelling aan laagfrequent geluid berekend met behulp van gegevens over de afstand van het huis tot de spoortunnel, het type tunnel, de bodemgesteldheid en het type gebouw. De relatie tussen laagfrequent geluid en hinder werd onderzocht door middel van logistieke regressie-analyse. In de analyse werd ook gekeken naar de invloed van het aantal treinpassages van goederentreinen per week, naar leeftijd en geslacht van de deelnemer, inkomen, geluidgevoeligheid, aanwezigheid van geluidgeïsoleerde ramen en mate van stedelijkheid. Na correctie voor potentiële verstoringende variabelen, werd een significante relatie gevonden tussen de blootstelling aan laagfrequent geluid en hinder.

Jongeren en mensen die een woning hadden met ramen die geïsoleerd waren tegen geluid, rapporteerden vaker hinder door laagfrequent geluid. Ook bleek het aantal passages door goederentreinen per week van invloed op hinder. Tot slot bleek dat nachtelijke blootstelling aan laagfrequent geluid als minder hinderlijk werd ervaren dan overdag. Omdat het aantal mensen met slaapverstoring door laagfrequent geluid erg laag was, konden er geen betrouwbare conclusies worden getrokken [38].

4.2.6

De invloed van andere factoren dan het trillingsniveau

Net als bij geluidhinder, wordt verondersteld dat hinder door trillingen van treinverkeer niet alleen samenhangt met het trillingsniveau, maar ook met andere factoren. In relatie tot geluid worden deze factoren vaak aangeduid als persoonlijke en contextuele factoren (of niet-akoestische factoren). Omdat de invloed op hinder én de beïnvloedbaarheid door het beleid verschilt, maakt men tegenwoordig liever onderscheid in de volgende categorieën [47]:

1. demografische en (sociaal-)economische factoren (bijvoorbeeld leeftijd, geslacht of inkomen);
2. persoonlijke factoren (bijvoorbeeld angst voor de bron, geluidgevoeligheid);
3. sociale factoren (bijvoorbeeld verwachting over toekomstig geluid, media-aandacht);
4. situationele factoren (bijvoorbeeld frequentie van geluidgebeurtenissen, aantrekkelijkheid van de buurt, hoeveelheid groen).

We weten dat de invloed van deze factoren op het optreden van geluidhinder complex is en moeilijk is te voorspellen. Over de invloed van deze factoren op het optreden van hinder door trillingen is nog minder bekend.

Demografische en (sociaal-)economische factoren

Een van de weinige demografische en (sociaal-)economische factoren die is onderzocht, is het al dan niet in bezit zijn van een huis. In het HRVRE-project werd er geen verschil gevonden in de relatie tussen de blootstelling aan trillingen (uitgedrukt in VDV_b) en hinder door trillingen van treinverkeer tussen woningbezitters en huurders [44, 48]. Eerder al vond Passchier-Vermeer (1998) in haar secundaire analyse ook geen verschil tussen beide groepen [49]. Een belangrijke demografische factor in relatie tot hinder door geluid is geluidgevoeligheid: sommige mensen kunnen nu eenmaal beter tegen geluid dan anderen. Geluidgevoeligheid kan het beste worden omschreven als een toestand van het individu, die een verhoogde reactie op geluid veroorzaakt. Dit kan een biologische, psychologische of leefstijlgerelateerde achtergrond hebben [50]. In het HRVE-project is onderzocht hoe het zit met de invloed van gevoeligheid voor trillingen. In tegenstelling tot wat bij geluid het geval is, werd

er geen effect gevonden van gevoeligheid voor trillingen op de relatie tussen de blootstelling aan trillingen door treinverkeer en hinder. Gevoeligheid voor trillingen werd gemeten met een enkele vraag naar de mate waarin men zichzelf beschouwt als gevoelig voor trillingen. Volgens de onderzoekers zouden de bevindingen in het HRVRE-project erop kunnen wijzen dat persoonlijkheidskenmerken als *nervousness* en *introversion* er bij de blootstelling aan trillingen minder toe doen dan bij de blootstelling aan geluid [48]. Overigens bleek de vraag naar gevoeligheid of tolerantie voor trillingen heel moeilijk in te vullen door respondenten.

Sociale factoren

De verwachting dat de geluidssituatie in de toekomst zal verslechteren, had in onderzoek rondom Schiphol een grote invloed op de ernstige hinder [50]. Ook met betrekking tot hinder door trillingen van treinverkeer lijken verwachtingen over de toekomstige trillingssituatie er toe te doen. Uit het HRVRE-project bleek dat bij gelijke blootstelling aan trillingen door treinverkeer, mensen meer hinder rapporteren wanneer ze denken dat de toekomstige trillingsniveaus zullen toenemen dan wanneer ze denken dat de trillingsniveaus in de toekomst gelijk blijven of zullen afnemen [48].

Situationele factoren

Onder de situationele factoren vallen in de eerste plaats aspecten als duur van de blootstelling (lengte van treinen), het aantal trillingsgebeurtenissen (*events*), het tijdstip van de blootstelling en bouwtechnische aspecten. Uit de geluidliteratuur is bekend dat geluid gedurende de nacht als hinderlijker wordt ervaren dan 's avonds of overdag. Het ligt voor de hand aan te nemen dat dit ook voor trillingen geldt. De resultaten van de beoordeelde studies spreken elkaar op dat punt echter tegen. Een factor die samenhangt met de waargenomen trillingsterkte, is niet alleen het aantal treinpassages maar ook de soort treinen (zijn het goederentreinen, passagierstreinen of hogesnelheidstreinen). In hun analyse hebben Miedema en De Jong (1993) gekeken naar het effect van het aantal treinen per etmaal op het rapporteren van trillingen door treinen. In dezelfde analyse is ook gekeken naar de invloed van het aandeel goederentreinen. De perceptie van trillingen door treinverkeer neemt in eerste instantie sterk toe met een toename van het aantal treinpassages of met het percentage goederentreinen. Echter, deze toename vlakkt steeds verder af bij een groter wordend aantal treinpassages of percentage goederenvervoer. Ook de constructie van het huis is van belang. Uit de studie van Öhrström en Skanberg (1996) bleek bijvoorbeeld dat mensen die in huizen met een houten constructie woonden, meer hinder door trillingen werd ondervonden dan mensen die in huizen met een betonnen constructie woonden. Ook ondervonden mensen in een villa of rijtjeshuis meer hinder door trillingen van de treinen dan mensen die in een flatgebouw woonden [33]. Over het effect van de duur van blootstelling is geen onderzoek bekend.

Daarnaast blijkt uit onderzoek dat sommige mensen bezorgd zijn over effecten die direct of indirect met de trillingen samenhangen, zoals 'bezorgdheid over schade aan de woning'. Uit de resultaten van het HRVRE-project bleek, zoals verwacht, dat naarmate de blootstelling aan trillingen door treinverkeer groter werd, de fractie deelnemers die bezorgd was over schade aan de woning door trillingen, groter werd. Het bleek dat men zich dan vooral zorgen maakte over effecten op de structuur van hun woning; over de aanblik van hun woning en de waarde van de woning maakte men zich aanzienlijk minder zorgen. Zoals verwacht, bleek 'vrees voor schade aan de woning' sterk samen te hangen met de gerapporteerde hinder door trillingen door treinen [48]. Volgens de onderzoekers van het HRVRE-project sluit dit aan op bevindingen met

betrekking tot de effecten van geluid: zo vonden Miedema en Vos (1999) namelijk dat personen die aangeven 'vrees te hebben voor de activiteiten die het geluid veroorzaken' meer hinder rapporteren bij gelijke geluidniveaus dan personen die aangeven geen vrees hiervoor te hebben [51]. Een punt van zorg bij de interpretatie van de bevindingen in het HRVRE-project is dat de gevonden correlatie tussen 'vrees voor schade aan de woning' en hinder door trillingen van treinverkeer mogelijk is overschat, aangezien beide aspecten binnen dezelfde vragenlijst zijn gemeten. Ten slotte bleek uit het HRVRE-project dat huizenbezitters bezorgder zijn voor schade aan de woning dan huurders [48].

5 Blootstellings-responsrelatie trillingen

5.1 Definitie

Blootstellings-responsrelaties geven aan hoeveel effect men bij een bepaalde blootstelling kan verwachten. Ze kunnen op verschillende manieren worden uitgedrukt: het kan bijvoorbeeld gaan om een Odds Ratio (OR) of Relatief Risico (RR) maar het kan ook gaan om een formule zoals gehanteerd is bij de relatie tussen geluid van wegverkeer en ernstige hinder [41]. Blootstellings-responsrelaties kunnen onder meer gebruikt worden om de omvang van de effecten die optreden ten gevolge van de blootstelling aan bijvoorbeeld trillingen door railverkeer, bij de bevolking in te schatten. Het gebruik van blootstellings-responsrelaties om bijvoorbeeld het percentage gehinderde personen te voorspellen is een geaccepteerde methode die door beleidsmakers ter ondersteuning kan worden gebruikt voor normeringdoeleinden [52].

Blootstellings-responsrelaties kunnen op een aantal manieren worden afgeleid: (i) op basis van de resultaten van enkelvoudige studies, (ii) met behulp van een kwantitatieve samenvatting van de resultaten van een aantal enkelvoudige studies (een meta-analyse), of (iii) met behulp van een heranalyse van individuele data afkomstig van een aantal enkelvoudige studies (een gepoolde analyse)[53]. Meestal zijn we alleen geïnteresseerd in blootstellings-responsrelaties die zijn afgeleid met behulp van een meta-analyse of een gepoolde analyse.

5.2 Beschikbare blootstellings-responsrelaties

Hinder

Helaas zijn er momenteel nog geen blootstellings-responsrelaties voor trillingen door treinverkeer en hinder beschikbaar die zijn afgeleid met behulp van een meta-analyse of een gepoolde data-analyse, maar ze zijn wel op korte termijn beschikbaar uit het Cargovibes-project [54] en uit aanvullende analyses op het kennisbestand verstoring. Wel is er een aantal individuele studies beschikbaar waarin een poging is gedaan om een blootstellings-responsrelatie af te leiden. Het gaat om de resultaten van een heranalyse uit 1998, op basis van data afkomstig van de studie van Zeichart (1993), de resultaten van de NVS-studie en het HRVRE-project [23, 37, 40].

Verstoring van de slaap

Ook voor effecten op de slaap is er een aantal individuele studies beschikbaar, waarin een poging is gedaan om een blootstellings-responsrelatie af te leiden voor slaapverstoring veroorzaakt door de blootstelling aan trillingen van treinen: het gaat om de NVS-studie en het HRVRE-project [23, 37]. Beide studies en hun afgeleide blootstellings-responsrelaties zijn al besproken in hoofdstuk 4. In Tabel 5.1 worden een aantal kenmerken van de afgeleide blootstellings-responsrelaties voor hinder, activiteiten- en slaapverstoring gepresenteerd. Hoewel het niet uit de tabel blijkt, zijn de relaties die zijn afgeleid uit het HRVRE-project, alle voorzien van een 95 procent betrouwbaarheidsinterval.

Tabel 5.1 Overzicht van beschikbare blootstellings-responsrelaties afgeleid uit Europese studies die de effecten van trillingen door treinverkeer hebben onderzocht.

Studie	Methode ^{*)}	# data-punten	Blootstelling		Eindpunt	Formule
			Maat	Range		
[40]	A	417	VCKB25L	-1,0 – -0,3	Ernstige hinder Hinder Enigszins hinder	%HA = 20,93 + 13,61*VCKBL25 %H = 49,5 + 30,39*VCKBL25 %EH = 82,84 + 38.95*VCKLB25
[37]	B	1.053	V _{w95} (mm/s)	0,01 – 4	Ernstige hinder Verstoring van activiteiten	NR
[23]	B	752	VDV _b ,24hr	$8,96 \times 10^{-4}$ – 0,51	Ernstige hinder Hinder Enigszins hinder	%HA = $0,176 \cdot X^3 + 1,085 \cdot X^2 + 2,895 \cdot X + 3,205$ %H = $0,116 \cdot X^3 + 1,693 \cdot X^2 + 6,651 \cdot X + 9,246$ %EH = $-0,114 \cdot X^3 + 1,725 \cdot X^2 + 11,600 \cdot X + 21,136$
			rmsk,24hr	$1,33 \times 10^{-4}$ – 0,037	Ernstige hinder Hinder Enigszins hinder	%HA = $0,099 \cdot Y^3 + 0,759 \cdot Y^2 + 2,553 \cdot X + 3,532$ %H = $0,060 \cdot Y^3 + 1,165 \cdot Y^2 + 5,697 \cdot Y + 9,880$
			Afstand (m)	10 – 160	Ernstige hinder Hinder Enigszins hinder	%EH = $-0,071 \cdot Y^3 + 1,160 \cdot Y^2 + 9,711 \cdot X + 22,071$ %HA = $-0,049 \cdot Z^3 + 0,485 \cdot Z^2 - 2,126 \cdot Z + 3,803$
			VDV _b , 23:00-7:00		Slaapverstoring	%A = $-0,027 \cdot Z^3 + 0,736 \cdot Z^2 - 4,653 \cdot Z + 10,443$ %EH = $0,039 \cdot Z^3 + 0,716 \cdot Z^2 - 7,795 \cdot Z + 22,978$
						NR

*) A = heranalyse van individuele data, B = data van een enkele studie; Afkortingen: VCKB25L= de logaritme van de som van de frequentiegewogen trillingssnelheid in de woonkamer tijdens de dagperiode en de frequentiegewogen trillingssnelheid in de slaapkamer tijdens de nachtperiode; V_{w95} = 95 percentiel van de trillingsniveaus, VDV_{b,24hr} = VDV-waarde over de beoordelingstijd van 24 uur, %HA = % ernstige hinder, %H = % hinder, %EH = % enigszins gehinderd; X = $[10 \log_{10}(\text{VDV}_{b,24hr}) + 16,7]/8,0$, Y = $[10 \log_{10}(\text{rmsk}_{,24hr}) + 27,2]/7,0$, Z = $[10 \log_{10}(\text{afstand}) - 16,4]/3,2$; NR = niet gerapporteerd.

5.3 Toepasbaarheid van de gevonden relaties

Tot nog is gebleken dat het lastig is om de studies onderling met elkaar te vergelijken omdat de blootstelling aan trillingen in verschillende maten wordt uitgedrukt; onduidelijk is welke maat de beste is. Dit maakt dat het tevens moeilijk is om aan te geven welke van de relaties uit Tabel 5.1 het beste gebruikt zou kunnen worden om een inschatting te maken van de omvang van de effecten veroorzaakt door de blootstelling aan trillingen in Nederland. Een extra aandachtspunt is dat er momenteel geen model beschikbaar is waarmee de blootstelling aan trillingen door treinverkeer voor de gehele bevolking kan worden ingeschat. De enige blootstellings-responsrelatie die in dit verband toegepast zou kunnen worden, is de relatie tussen afstand tot het spoor (in meters) en het percentage (ernstige) hinder die is afgeleid met behulp van data verzameld in het HRVRE-project [23]. Daarbij wordt ervan uitgegaan dat de blootstelling aan trillingen in sterke mate afhangt van de afstand tot het spoor (zie ook Figuur 4.3). Tabel 5.2 illustreert hoe de relatie die is afgeleid in het HRVRE-project [23], zou kunnen worden gebruikt om het aantal mensen in te schatten dat ernstige hinder ondervindt door trillingen van treinen in Nederland. Volgens Woodcock et al. (2011) is de relatie geldig voor mensen die op 10 tot 160 meter van het spoor wonen [23]. We nemen aan dat mensen die verder dan 160 meter van het spoor af wonen, geen hinder meer ondervinden van trillingen veroorzaakt door treinen.

Met behulp van een Geografisch Informatie Systeem (GIS) zijn alle woningen geteld die binnen een afstand van 150 meter van het spoor liggen. De woninginformatie is afkomstig van de Basisregistraties Adressen en Gebouwen (BAG). Het gemiddeld aantal personen per woning is berekend aan de hand van informatie van Geomarktprofiel, dat informatie over het aantal personen op 6-posities postcodekaart aanlevert. De ligging van de sporen is afkomstig van de basisgegevens uit het Geluidregister, waarin alle relevante Nederlandse spoortrajecten liggen. Bij de berekening is uitgegaan van de afstand tot het dichtstbijzijnde spoor. In situaties waar meerdere sporen naast elkaar liggen is er dus maar één meegenomen. Geschat wordt dat ruim 660.000 personen binnen een afstand van 150 meter van het spoor wonen.² Deze gegevens zijn gecombineerd met de blootstellings-responsrelatie zoals is te zien in Tabel 5.2. Op deze manier kan worden ingeschat dat bijna 16.000 (95 procent Bthi 9.400-27.000) personen in Nederland die op een afstand tot 150 m van het spoor wonen, ernstig zijn gehinderd door trillingen van treinverkeer; ofwel naar schatting is ruim 2 procent (95 procent Bthi 1–4 procent) van de mensen die binnen 150 m van het spoor wonen, ernstig gehinderd door trillingen van treinverkeer.

Ter vergelijking: op basis van een vragenlijstonderzoek met een representatieve steekproef onder de Nederlandse bevolking van 16 jaar en ouder, is geschat dat ongeveer 1 procent van de bevolking ernstig gehinderd wordt door trillingen veroorzaakt door treinverkeer [11]. Deze vergelijking gaat echter mank: niet duidelijk is bijvoorbeeld welke fractie van het aantal ernstig gehinderden in de buurt van een spoorlijn woont. Ook kan er sprake zijn van een additief effect van geluid en hinder door trillingen van andere bronnen. Daarnaast is het belangrijk de kanttekening te plaatsen dat het aantal en type treinen langs de sporen die in de HRVRE-studie zijn betrokken, (sterk) kunnen afwijken van de situatie in Nederland. Uit een overzicht blijkt dat van de 12 geselecteerde tracés 10 worden aangeduid als *high speed lines* (zowel reizigers als goederenvervoer), maar dit

² We verwachten op korte termijn relaties te kunnen opleveren voor afstand spoor, aantallen en %goederen op basis van kennisbestand verstoring (KBV) en trillingen dataset, inclusief HRVRE.. Dit kan consequenties hebben voor de in dit rapport gepresenteerde schattingen.

betreft vooral treinen tot 200 km per uur en niet de HSL. Op grond van de rapportage kan niet worden afgeleid of de geselecteerde tracés vergelijkbaar zijn met Nederland in termen van andere aspecten zoals aantallen treinen.

Tabel 5.2 Het aantal mensen dat op 10–150 meter afstand van het spoor woont en het aantal mensen dat ernstig is gehinderd door trillingen veroorzaakt door treinverkeer.

Afstand tot spoor (m)	Gemiddelde afstand tot spoor (m)	Aantal mensen dat binnen deze afstand woont	% ernstige ^{*)} hinder	Aantal mensen dat ernstig is gehinderd door trillingen van treinverkeer
< 10	8,2	106	11,7	12
11 – 20	15,5	2.826	7,9	223
21 – 30	25,5	18.132	5,6	1.021
31 – 40	35,5	37.101	4,4	1.647
41 – 50	45,5	42.809	3,7	1.577
51 – 60	55,5	47.204	3,2	1.492
61 – 70	65,5	48.629	2,8	1.348
71 – 80	75,5	53.286	2,5	1.316
81 – 90	85,5	55.359	2,2	1.234
91 – 100	95,5	58.362	2,0	1.186
101 – 110	105,5	56.699	1,9	1.059
111 – 120	115,5	58.900	1,7	1.018
121 – 130	125,5	60.340	1,6	970
131 – 140	135,5	61.691	1,5	927
141 – 150	145,5	60.401	1,4	852
Totaal		661.845		15.883

*) Het percentage ernstige hinder is geschat met behulp van de relatie afgeleid op basis van data verzameld in het HRVRE-project [23].

De hierboven toegepaste blootstellings-responsrelatie is gebaseerd op een vragenlijstonderzoek die het gedrag van (een deel van) de Britse bevolking in kaart probeerde te brengen: voor het HRVRE-project is een representatieve steekproef getrokken onder de Britse bevolking in de leeftijd van 18–75 jaar, die dicht in de buurt (binnen 100 m) van een spoor woonde. De onderzoekslocaties lagen langs spoorlijnen waarover zowel goederentreinen als passagierstreinen (*high speed lines*) rijden [55]. Onbekend is echter in hoeverre factoren als bijvoorbeeld de ondergrond waarop de treinen in het HRVRE-project rijden, de invloed van de ondergrond op de voortplanting van de trillingen en de invloed van de bouwwijze (met name vloeren) op snelheid en intensiteit vergelijkbaar zijn met de situatie in Nederland. Daarnaast zou de zeggingskracht van de resultaten van het HRVRE-project mogelijk beperkt kunnen zijn, omdat het percentage ernstig gehinderden in de studie relatief klein is (ruim 9 procent) [56].

Omdat niet duidelijk is in hoeverre de relatie tussen afstand tot het spoor en ernstige hinder door trillingen uit het HRVRE-project mag worden toegepast op de Nederlandse situatie, moet het resultaat van de schatting in Tabel 5.2 worden beschouwd als een eerste orde schatting, puur om een eerste indruk te krijgen van het aantal mensen dat gehinderd is door trillingen van treinverkeer. In het voorspelde aantal ernstig gehinderden kunnen afwijkingen optreden voor subgroepen op specifieke locaties, door *random* factoren, en individuele en lokale

omstandigheden, bijvoorbeeld situationele factoren als 'angst voor schade aan gebouwen' en de bodemgesteldheid [52].

6 Discussie

6.1 De belangrijkste resultaten samengevat

In de loop der jaren is in Europa een aantal observationele studies uitgevoerd waarin de effecten van trillingen door treinverkeer zijn bestudeerd. In deze studies zijn voornamelijk welzijnseffecten zoals de effecten op hinder, de slaap en verstoring van activiteiten onderzocht. Langetermijngezondheidseffecten zijn niet onderzocht.

Uit de studies komen de volgende beelden naar voren: de resultaten van Europese studies [23, 31, 32, 37] die de effecten van trillingen veroorzaakt door railverkeer op hinder hebben onderzocht, zijn niet geheel eenduidig. In drie studies werd een relatie gevonden tussen de blootstelling aan trillingen door treinverkeer en hinder; in een vierde studie werd geen relatie gevonden. In de studies [23, 37] zijn ook aanwijzingen gevonden dat trillingen veroorzaakt door treinverkeer van invloed zijn op de slaap: de kans op verstoring van de slaap nam toe bij een toenemende blootstelling aan trillingen door treinverkeer. Voor de hypothese dat blootstelling aan trillingen tijdens de nacht en avond hinderlijker zijn dan blootstelling aan trillingen overdag, zijn echter geen eenduidige aanwijzingen gevonden. Uit het HRVRE-project bleek dat de relatie tussen blootstelling aan trillingen tijdens de nacht en ernstige hinder sterker was dan de relatie tussen blootstelling aan trillingen overdag of in de avond en ernstige hinder [44]. In een Duitse studie werden geen verschillen in de relatie tussen blootstelling en hinder gevonden tussen de dag- en de nachtperiode [45]. Daarnaast zijn er aanwijzingen gevonden dat er sprake is van een ingewikkeld interactie-effect tussen trillingen en geluid door treinverkeer. De resultaten spreken elkaar op dit punt tegen. Volgens twee Zweedse studies en een Britse studie wordt het geluid van treinverkeer als hinderlijker ervaren wanneer dit samengaat met trillingen [23, 33-35]. Echter, in een Duitse studie werd wel een relatie gevonden tussen de blootstelling aan trillingen en het percentage hinder in de groep mensen blootgesteld aan lage geluidsniveaus, maar geen relatie in de groep mensen blootgesteld aan hoge geluidsniveaus [40]. Deze bevindingen laten zien dat het ook mogelijk is dat trillingen minder snel als hinderlijk worden ervaren als de geluidsniveaus hoger zijn.

Tot slot zijn er in beperkte mate aanwijzingen dat de laagfrequente geluidcomponent van invloed is op hinder en slaapverstoring door trillingen van railverkeer [36].

6.2 Blootstelling

In de besproken studies zijn diverse blootstellingsmaten gebruikt. Dit maakt dat het moeilijk was om de resultaten van de studies onderling te vergelijken. Omdat de blootstelling aan trillingen met verschillende maten wordt uitgedrukt, is het lastig om de studies onderling te vergelijken, en een vergelijking te maken met de waarden die zijn opgenomen in de Nederlandse richtlijn voor trillingen [1, 2]. Helaas was het ten tijde van dit onderzoek niet mogelijk om de verschillende maten om te rekenen naar een uniforme blootstellingsmaat. Bovendien is onduidelijk wat nu de beste maat is om de blootstelling aan trillingen mee uit te drukken. Helaas kan hier niet zomaar een antwoord op worden gegeven. Want, zijn de maten die momenteel worden gebruikt al goed genoeg, of moet er een nieuwe maat worden bedacht, zoals min of meer wordt voorgesteld in het HRVRE-project [23]? Volgens de onderzoekers houden de

huidige trillingsmaten bijvoorbeeld geen rekening met het moment van de dag waarop trillingen plaatsvinden.

Op basis van hun bevindingen in het HRVRE-project stellen de onderzoekers voor om de blootstelling aan trillingen tijdens de avond- en nachtperiode te wege. Zo ontstaat er een voor het tijdstip van de blootstelling gewogen blootstellingsmaat. Maar zijn we er dan? De aard van een te ontwikkelen maat voor de blootstelling aan trillingen wordt verder bepaald door het gebruiksdoel van de maat en de beoogde gebruikersgroep. Zo zouden lokale overheden op basis van een dergelijke maat bijvoorbeeld moeten kunnen beslissen over de situering van activiteiten die blootstelling aan trillingen met zich meebrengen. Een te ontwikkelen maat zou bijvoorbeeld ook kunnen worden ingezet om de effectiviteit en/of doelmatigheid van maatregelen ter beperking van bijvoorbeeld trillingshinder te beoordelen, of om informatie te verstrekken aan het publiek over de huidige en toekomstige blootstelling aan trillingen en de gevolgen daarvan voor de volksgezondheid. Daarnaast zou een nog te ontwikkelen blootstellingsmaat in elk geval bruikbaar zijn voor de beoordeling van gezondheidseffecten van blootstelling aan trillingen. Maar welke gezondheidseffecten moeten dan worden beoordeeld? Gaat het net als bij geluid om de meer welzijnseffecten als hinder en slaapverstoring of zijn klinische effecten ook van belang? Uit de Europese studies is gebleken dat de trillingsmaten die tot nog toe zijn toegepast, niet altijd even sterk correleren met effecten als hinder en slaapverstoring. Dit zou er op kunnen wijzen dat de effecten mede beïnvloed worden door andere (contextuele en persoonlijke) factoren. De afwezigheid van een zwakke of zelfs geen relatie tussen bijvoorbeeld hinder en de verschillende maten voor de sterkte van de trillingen, zou ook te wijten kunnen zijn aan het feit dat trillingsniveaus veroorzaakt door treinen in de onderzochte studies niet sterk genoeg waren om hinder te kunnen veroorzaken, maar dat is op basis van beschikbare informatie moeilijk te beoordelen.³

Ook is het van belang dat de voor te stellen trillingsmaat betrekkelijk eenvoudig te bepalen of te meten is. Uit de studies die de effecten van trillingen onderzoeken, blijkt dat dit echter niet het geval is; ook lijken er nauwelijks modellen voorhanden te zijn om de blootstelling aan trillingen in te schatten. Bij de keuze voor een trillingsmaat moet ook rekening worden gehouden met het eventuele belang om internationale wetgeving na te leven. Tenslotte moeten lokale overheden de maat kunnen toepassen en moet het geheel inzichtelijk zijn voor beleidsmakers en politici.

6.3 De meting van effecten door trillingen

Ook aan de effectkant wordt er een diversiteit aan meetmethoden gehanteerd: een effect als hinder wordt binnen de onderzoeken op verschillende manieren gemeten (zie ook Tabel 4.3). Daarnaast is het niet altijd duidelijk waardoor men nu gehinderd is. Zo is soms onduidelijk in hoeverre de gerapporteerde resultaten beïnvloed zijn door bijvoorbeeld het aantal passerende treinen. Het is niet onwaarschijnlijk dat het horen van de treinen, de respondenten bewust heeft gemaakt van het aantal passerende treinen. Er zou dan ook geconcludeerd kunnen worden dat men met de vraag/vragen waarmee men de mate van hinder veroorzaakt door trillingen probeerde te meten, wellicht ook het oordeel over het geluid van de treinen meet.

³ Wel is de verwachte hinderrespons bij gemiddelde (of eigenlijk mediane) blootstelling lager dan bij geluid; er zitten meer respondenten in de dataset met lage blootstelling (onder de waarnemingsdrempel) en lage hinder. Dit zal nog nader onderzocht worden (mondelinge mededeling TNO).

Ook de volgorde van de vragen en de daarbij gebruikte bewoording zou de gerapporteerde hinder in de studies mogelijk hebben beïnvloed. In sommige onderzoeken [31, 37] werd bijvoorbeeld eerst gevraagd in hoeverre de respondenten trillingen van treinen konden voelen in verschillende situaties in hun huis, objecten hoorden rammelen en objecten zagen bewegen. Vervolgens werd gevraagd in hoeverre men gehinderd was door de trillingen van de treinen. Deze volgorde kan van invloed zijn geweest op de gerapporteerde hinder. Uit onderzoek naar de relatie tussen geluid door vliegverkeer en hinder is bekend dat de vraagstelling en de volgorde van vragen van invloed kunnen zijn op de hoeveelheid gerapporteerde hinder [57].

Effecten als zelfgerapporteerde fysieke en mentale gezondheid (die vaak wel in relatie tot geluid worden onderzocht) werden buiten beschouwing gelaten.

6.4 De rol van geluid en andere verstorende variabelen

De studies die de effecten van trillingen onderzochten, blijken niet altijd de mogelijkheid te hebben gehad om voor potentieel verstorende variabelen, als bijvoorbeeld de blootstelling aan geluid, te corrigeren. Als een trein passeert gaat dat naast trillingen vaak gepaard met (laagfrequent) geluid. Helaas werd daar niet altijd rekening mee gehouden. In de NVS-studie probeerde men de invloed van geluid zo klein mogelijk te houden. Daartoe werden locaties waar publiekelijk was geageerd tegen de trillingsbron of waar veel media-aandacht was geweest, door de onderzoekers nadrukkelijk buiten de studie gehouden. Ook mochten alleen personen meedoen die woonden in een gebied waar de geluidniveaus in woningen niet hoger waren dan 30 dB(A) ($L_{Aeq24hr}$) [37]. In de ISVR-studie [31] is niet duidelijk in hoeverre de in deze studies gerapporteerde bevindingen worden vertekend door de blootstelling aan geluid. Dat geluid wel degelijk een rol kan spelen, blijkt uit de resultaten van een aantal studies die de gecombineerde effecten van blootstelling aan trillingen en geluid van treinverkeer hebben onderzocht [23, 33-35].

Doordat studies die de effecten van trillingen onderzoeken, niet altijd de mogelijkheid hadden om voor potentieel verstorende variabelen te corrigeren, is onduidelijk welke factoren de gevonden relaties tussen de blootstelling aan trillingen en hinder beïnvloeden of hoe het is voor bijvoorbeeld gevoelige groepen (ouderen, kinderen). Uit de resultaten van het HRVRE-project blijkt dat een aantal sociale en situationele factoren een vergelijkbare rol spelen in de relatie tussen blootstelling aan trillingen door treinen en hinder als bij de relatie tussen geluid en hinder [48].

6.5 De invloed van andere studiekenmerken

De effecten van trillingen door treinverkeer zijn steeds onderzocht met behulp van dwarsdoorsnede studies. Dit type onderzoek kent geen tijdsdimensie: gegevens over de mate van hinder worden tegelijk verzameld met gegevens over de blootstelling. De resultaten kunnen hierdoor vertekend zijn; er wordt alleen een momentopname gemaakt. Zo kunnen de meest gevoelige mensen al zijn verhuisd uit een gebied waar de blootstelling hoog is. Het effect van de blootstelling wordt dan onderschat.

Het blijkt dat gezondheidssuitkomsten van mensen die bij elkaar in de buurt wonen, gemiddeld meer met elkaar overeenkomen dan die van mensen die in een ander gebied wonen. Dit zou ook wel eens kunnen gelden voor de studies die de effecten van trillingen door treinverkeer onderzochten. In de besproken studies werden respondenten die verdeeld waren over een aantal locaties, onderzocht. De statistische modellen die de studies gebruikten, veronderstellen

dat hun waarnemingen onafhankelijk van elkaar zijn, maar in onderzoek met een hiërarchische structuur (personen binnen een studielocatie) hoeven de waarnemingen binnen verschillende clusters niet geheel onafhankelijk te zijn [58, 59]. Tot nog toe houden de studies die de effecten van trillingen door treinverkeer hebben onderzocht, hier geen rekening mee.

Ten slotte is onbekend in hoeverre de resultaten van de besproken studies worden beïnvloed door mogelijke selectieve non-respons. Dit betekent dat de onderzoekspopulatie niet representatief is voor de populatie in het betreffende onderzoeksgebied. Hierdoor kunnen de in de studies verkregen frequenties van antwoordcategorieën een onder- of overschatting zijn van de frequenties zoals die onder de gehele populatie in het onderzoeksgebied voorkomen [59]. Hoe de resultaten van een studie kunnen worden beïnvloed door selectieve non-respons blijkt onder andere uit de resultaten van de survey rond Schiphol die in 1996 werd uitgevoerd. In deze studie werd hinder door geluid van vliegverkeer gemeten als onderdeel van een postenquête. Na correctie voor selectieve non-respons daalde het percentage ernstige hinder van 31 naar 18 procent. Verder bleek uit een vergelijking met de responders dat de non-responders minder waren gehinderd door geluid van vliegverkeer en zich minder zorgen maakten om hun veiligheid ten gevolge van het wonen in de buurt van een grote luchthaven. Verder bevatte de groep non-responders minder hoogopgeleide mensen en minder allochtonen [60].

6.6 Omvang van de problematiek in Nederland

Op basis van een representatieve steekproef uit de Nederlandse bevolking [11, 61] wordt geschat dat trillingen door treinen worden waargenomen door ongeveer 5 procent van de Nederlandse bevolking. Dit is meer dan van bedrijven (3 procent) en minder dan afkomstig van bouwactiviteiten en wegverkeer (15-37 procent). Lokaal kan dit beeld sterk variëren. De trillingsopwekking van een trein is namelijk afhankelijk van de interactie met de baan en de ondergrond. Als de trilling vervolgens bij een gebouw aankomt, hangt de responsie van een trilling af van de interactie met de fundering van het gebouw [14]. In de ISVR-studie rapporteerde 35 procent van de deelnemers de trillingen te kunnen waarnemen [31]; in het HRVRE-project voelde meer dan 71 procent de trillingen veroorzaakt door de treinen [56].

Het aantal mensen dat wordt gehinderd door trillingen van treinverkeer, kan op twee manieren worden vastgesteld: (i) direct, op basis van bijvoorbeeld een vragenlijstonderzoek, of (ii) indirect, met behulp van blootstellings-responsrelaties. Op basis van een representatieve steekproef uit de Nederlandse bevolking is geschat dat ongeveer 1 procent van de bevolking ernstig gehinderd wordt door trillingen. Dit percentage blijkt redelijk constant te zijn over de jaren [11]. Lokaal kan dit beeld wel sterk variëren, afhankelijk van onder meer de blootstelling. Uit een recent vragenlijstonderzoek onder ruim 1.900 inwoners van Hengelo, bleek bijvoorbeeld dat 5 procent ernstig werd gehinderd door trillingen door treinen. Daarbij bleek dat het percentage hinder het hoogste was onder de deelnemers die in de wijken woonden waarlangs goederentreinen rijden [62].

In hoofdstuk 5 is met behulp van een relatie die de associatie beschrijft tussen de afstand tot het spoor (m) en ernstige hinder door trillingen [23], een schatting gemaakt van het aantal mensen in Nederland dat tot op 150 meter van een spoorlijn woont en ernstig is gehinderd door trillingen van treinverkeer. Geschat wordt dat ruim 660.000 personen binnen een afstand van 150 meter van het spoor wonen. Daarvan wordt geschat dat bijna 16.000 (95 procent) Bthi

9.400–27.000) personen ernstig zijn gehinderd door trillingen van treinverkeer. Dit is ruim 2 procent (95 procentBthi 1–4 procent) van de mensen die binnen 150 m van het spoor wonen. In het voorspelde percentage gehinderden kunnen afwijkingen optreden voor subgroepen op specifieke locaties, door *random* factoren, en individuele en lokale omstandigheden, bijvoorbeeld situationele factoren als 'angst voor schade aan gebouwen' of bodemgesteldheid [52]. De geschatte hinder wijkt behoorlijk af van de hinder gevonden in de hinderinventaristie [11]. Dit komt waarschijnlijk omdat door geluid overgebrachte trillingen moeilijk gescheiden kunnen worden van door de bodem overgebrachte trillingen. Dit wordt het best duidelijk bij vliegverkeer: daar is het percentage trillinggehinderden ongeveer even groot als het percentage geluidgehinderden. Het resultaat van deze schatting moet dan ook worden beschouwd als een eerste orde schatting, bedoeld om een eerste indruk te krijgen van het aantal mensen dat gehinderd is door trillingen van treinverkeer. Er kunnen dan ook nog geen definitieve conclusies aan worden verbonden. De hinderinventarisatie geeft een hogere schatting van het percentage ernstig gehinderden door trillingen. Mogelijk spelen hierbij de combinatie met geluid, hinder van andere bronnen en het aantal mensen dat dichtbij het spoor woont een belangrijke rol.

Er is op dit moment ook een aantal blootstellings-responsrelaties beschikbaar met betrekking tot trillingen door treinverkeer en hinder en/of slaapverstoring (zie ook Tabel 5.1). Omdat er op dit moment nog geen model beschikbaar is waarmee de blootstelling aan trillingen door treinverkeer op populatieniveau kan worden ingeschat, kunnen deze blootstellings-responsrelaties echter nog niet worden toegepast.

7 Conclusie en vervolg

7.1 Conclusies

In dit achtergrondrapport wordt de laatste stand van zaken weergegeven met betrekking tot de effecten van trillingen en (laag)frequent geluid door treinen op gezondheid en welzijn. Ook is onderzocht welke blootstellings-responsrelaties er beschikbaar zijn die de relatie tussen trillingen door treinen en gezondheidseffecten en welzijneffecten beschrijven en gebruikt kunnen worden voor de inschatting van de effecten van trillingen door treinverkeer in Nederland.

Bestudering van de relatief schaarse literatuur laat zien dat onderzoek zich vooral heeft gericht op hinder, slaapverstoring en verstoring van andere activiteiten. Andere gezondheidseffecten die met trillingen in verband worden gebracht, zijn vermoeidheid, verminderde taakprestatie, bewegingsziekte en lichamelijke klachten. Langetermijngezondheidseffecten zijn niet onderzocht.

Op basis van de resultaten van het relatief kleine aantal Nederlandse en Europese studies kunnen geen definitieve conclusies worden getrokken over de effecten van trillingen en (laag)frequent geluid door treinverkeer op hinder door trillingen, slaapverstoring door trillingen en verstoring van activiteiten door trillingen. Wel zijn er aanwijzingen voor een complex interactie-effect tussen trillingen en geluid door treinverkeer, maar de resultaten spreken elkaar ook op dit punt tegen. Tot slot indiceren bevindingen dat laagfrequent geluid inderdaad een rol speelt bij de gerapporteerde hinder en slaapverstoring. In een aantal studies zijn blootstellings-responsrelaties afgeleid die de relatie tussen de blootstelling aan trillingen door treinen en hinder en slaapverstoring beschrijven.

Een belangrijk punt van aandacht is dat het lastig is om de studies onderling met elkaar te vergelijken, omdat de blootstelling aan trillingen in verschillende maten wordt uitgedrukt. Ten tijde van dit onderzoek was het nog niet mogelijk om de verschillende blootstellingsmaten om te rekenen naar een uniforme maat.

Daarnaast is er nog geen model beschikbaar waarmee de blootstelling aan trillingen door treinverkeer voor de gehele bevolking kan worden geschat. Dit maakt de toepasbaarheid van de gerapporteerde blootstellings-responsrelaties beperkt. Daarom is voor een eerste schatting van de omvang van het percentage gehinderde personen in Nederland gebruikgemaakt van een blootstellings-responsrelatie die de associatie tussen de afstand tot het spoor (in meters) en ernstige hinder beschrijft. Uit een eerste schatting blijkt dat in Nederland ruim 660.000 personen binnen 150 meter van een spoorlijn wonen. Daarvan is naar schatting 1-4 procent ernstig gehinderd door trillingen van treinverkeer. In het voorspelde percentage gehinderden kunnen afwijkingen optreden voor subgroepen op specifieke locaties, door *random* factoren, en individuele en lokale omstandigheden. Er kunnen dan ook nog geen definitieve conclusies aan deze schatting worden verbonden.

7.2 Vervolg

Het in dit rapport gepresenteerde overzicht van de beschikbare literatuur is een eerste stap in de ontwikkeling van bouwstenen voor verdere regelgeving ten aanzien van trillingen langs het spoor. Onderscheid werd hierbij gemaakt tussen

blootstelling, (gezondheids)effecten, de kwaliteit van beschikbare blootstellings-responsrelaties en rekenmethodes. Op grond van dit overzicht blijkt dat het lastig is om studies onderling met elkaar te vergelijken, omdat de blootstelling aan trillingen in verschillende maten wordt uitgedrukt. Om de studies die in dit overzicht zijn geëvalueerd, en eventuele toekomstige studies, beter met elkaar te kunnen vergelijken, is het wenselijk om een uniforme blootstellingsmaat voor trillingen door treinverkeer te hanteren. In de nabije toekomst biedt het Europees project 'Attenuation of ground-borne vibrations affecting residents near freight railway lines' (Cargovibes) hiervoor belangrijke aanknopingspunten [54]. Het algemene doel van Cargovibes is om maatregelen te beoordelen en te ontwikkelen, die acceptabele niveaus van trillingen garanderen voor omwonenden van spoorlijnen met veel goederenverkeer en op deze wijze de uitbreiding van het goederenverkeer op het spoor te faciliteren. Hiertoe werd een meta-analyse op het Kennisbestand Verstoring (RIVM/TNO) uitgevoerd, werd in Nederland, Groot-Brittannië en Polen vragenlijstonderzoek uitgevoerd en werden laboratoriumstudies uitgevoerd die zich richtten op de relatie tussen trillingen en slaapverstoring. De data die aldus werden verkregen, zullen in een secundaire meta-analyse verder verfijnd worden met als doel doses responsrelaties af te leiden op basis van afstand, aantal treinen en percentage goederentreinen. Deze kunnen vervolgens gebruikt worden om de omvang van hinder (en slaapverstoring) ten gevolge van trillingen door treinverkeer in Nederland in te schatten.

Voor deze schatting is tevens een rekenmodel noodzakelijk, waarmee de blootstelling aan trillingen door treinverkeer op populatieniveau kan worden ingeschat. Op dit moment wordt gewerkt aan een dergelijk model op basis van relevante gegevens over het aantal woningen per afstandscategorie langs het spoor, bodemparameters, bouwjaar, bouwtechnische aspecten en geluid. Daarnaast wordt een vragenlijstonderzoek voorbereid, dat wordt uitgevoerd langs het spoor waar veranderingen gepland zijn en een aantal controlegebieden. Primaire doelstelling is om reacties op een veranderend aantal (goederen)treinen te monitoren met een *baseline*-meting en minstens één nameting. Innovatief is het leggen van een relatie tussen het aantal trillings- en geluidgebeurtenissen en reactie. De vragenlijst, die voor een belangrijk deel gebaseerd is op de lijst die gebruikt werd in Cargovibes, zal aandacht besteden aan onder andere hinder, slaapverstoring, en gezondheidsklachten. Ook zullen de niet-trillingsgerelateerde factoren worden geïnventariseerd, zoals demografische kenmerken, persoonlijke kenmerken (attitude, verwachtingen, gevoeligheid en bezorgdheid) en situationele kenmerken (woonomgeving, woonsatisfactie, procedurele rechtvaardigheid et cetera). Er blijkt nog veel onduidelijkheid te bestaan over de rol van deze factoren bij de reactie op trillingen. De resultaten van dit onderzoek zouden beleidsmakers inzicht kunnen geven waar ze bij de uitbreiding van het spoorwegennetwerk zoal rekening mee moeten houden, in het bijzonder bij de communicatie naar de bevolking. Deze initiatieven vormen, naast andere, de basis voor de totstandkoming van een normering voor trillingen van spoorverkeer en beogen de bouwstenen hiervoor te leveren. (zie Bijlage II)

Literatuur

1. Staatssecretaris van Infrastructuur en Milieu, Besluit tot vaststelling van beleidsregels ten aanzien van trillingshinder ten behoeve van de vaststelling van tracébesluiten voor de aanleg, wijziging of het opnieuw in gebruik nemen van een landelijke spoorweg (Beleidsregel Trillingshinder Spoor), ministerie van Infrastructuur en Milieu, Editor 2012: Staatscourant, 18 april 2012, nr 7532.
2. Stichting Bouwresearch (SBR), Trilling: meet- en beoordelingsrichtlijnen, deel B – Hinder voor personen in gebouwen, 2002, SBR.
3. Waarts, P.H. en Ostendorf, C.J., Hinder door personen. Deel B uit de meet- en beoordelingsrichtlijn: Trillingen, 2006, Stichting Bouwresearch (SBR): Rotterdam.
4. Centraal Bureau voor de Statistiek. Lengte van spoorwegen naar spoorwegkenmerk en provincie. 2012 [cited 2012 30 oktober].
5. Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid, Mobiliteitsbalans 2010, 2010, ministerie van Infrastructuur en Milieu: Den Haag.
6. Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid, Mobiliteitsbalans 2011, 2011, ministerie van Infrastructuur en Milieu: Den Haag.
7. Centraal Bureau voor de Statistiek. Gereisde kilometers door personen, vervoerswijzen, regio's. 2012 [cited 2012 30 oktober].
8. Centraal Bureau voor de Statistiek. Spoor, goederenvervoer in laadgewicht en ladingtonkilometer. 2012 [cited 2012 oktober].
9. Ramaekers, P., Wit, T. de en Pouwels, M., Hoe druk is het nu werkelijk op het Nederlandse spoor? Het nederlandse spoorgebruik in vergelijking met de rest van de EU-27., 2009, Centraal Bureau voor de Statistiek: Den Haag/Heerlen.
10. Projectteam Programma Hoogfrequent Spoorvervoer en ministerie van Verkeer en Waterstaat, Programma Hoogfrequent Spoorvervoer. Plan van aanpak tot projectbesluiten in juni 2010., 2009.
11. Poll, H.F.P.M. van, Breugelmans, O.R.P. en Devilee, J.L.A., Hinder, bezorgdheid en woontevredenheid in Nederland. Inventarisatie verstoringen 2008, 2011, RIVM: Bilthoven.
12. Ministerie van VROM, Handreiking industrielawaai en vergunningverlening, 2004, ministerie van VROM: Den Haag.
13. Koster, A., Koopman, A. en Ostendorf, C., Beleidsregel trillingshinder spoor van kracht. Dienen alle veranderingen nog wel het juiste doel? Geluidnieuws, mei 2012.
14. Steenbergen, M. en Bakker, K.J., Trillingshinder door exploitatie van railinfrastructuur. Verkennend onderzoek in opdracht van ProRail-COB, 2012, COB – Nederlands kenniscentrum voor ondergronds bouwen en ondergronds ruimtegebruik.
15. Meloni, T., New Swiss legislation to protect persons from vibrations and structure-borne noise. Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, 2010. 29(3): p. 189-196.
16. British Standards Institution, Guide to evaluation of human exposure to vibration in buildings. Vibration sources other than blasting, 2008: London.
17. Deutsches Institut für Normung, Vibrations in buildings. Part 2: effects on persons in buildings, 1999, Deutsches Institut für Normung: Berlin.
18. Norwegian Council for Building Standardization, Vibration and shock. Measurement of vibration in buildings from land based transport and

- guidance to evaluation of its effects on human beings., 2005, Norwegian Council for Building Standardization.
19. World Health Organization, Evaluation and use of epidemiological evidence for environmental health risk assessment. Guideline document., 2000, World Health Organization, Regional Office for Europe: Copenhagen.
 20. Passchier-Vermeer, W., Vibrations in dwellings: exposure and annoyance., 1995, TNO-PG: Leiden.
 21. Bellmann, M.A., Perception of whole-body vibrations: from basic experiments to effects of seat and steering-wheel vibrations on the passenger's comfort inside vehicles, 2002, University of Oldenburg: Oldenburg.
 22. Griffin, M.J., Handbook of human vibration.1990, London: Academic Press.
 23. Woodcock, J., et al., Human response to vibration in residential environments (NANR209). Technical report 6: determination of exposure-response relationships, 2011, Defra: London.
 24. Peeters, A.L., et al., Hinder door spoorweggeluid in de woonomgeving, 1984, IMG-TNO: Delft.
 25. Jong, R.G. de, en Vos, H., Hinder door milieuverontreiniging in Nederland 1998. Verslag van deelstudies naar rangeerterreinen, militaire en kleine burgerluchtvaart., 2000, TNO-PG: Leiden.
 26. Miedema, H.M.E. en Jong, R.G. de, Het aandeel van goederentransport in het treinverkeer en effecten van geluid en trillingen op omwonenden., 1993, NIPG/TNO: Leiden.
 27. Jong, R.G. de and Eisses, A.R., A prediction of annoyance due to high speed train noise in the Netherlands, 1996, TNO Prevention and Health, COP: Leiden.
 28. Fields, J.M. and Walker, J.G., Reactions to railway noise: a survey near railway lines in Great Britain., 1980, University of Southampton ISVR: Southampton.
 29. Schümer-Kohrs, A., et al., Interdisziplinäre feldstudie über die besonderheiten des schienenverkehrslärms gegenüber dm strassenverkehrslärm, 1983, Planningsburo Obermeyer: Munchen.
 30. Lambert, J., et al., Impact du bruit sur les riverains du TGV Atlantique, 1995, INRETS.
 31. Woodroof, H.J. and Griffin, M.J., A survey of the effect of railway-induced building vibration on the community., 1987, Institute of Sound and Vibration Research: Southampton.
 32. Zeichart, K., et al., Vibration effects due to rail traffic, 1993, Report on an interdisciplinary project on behalf of the Federal Environment Office (Berlin) and the Federal Railways Central Office (Munich): Munich.
 33. Öhström, E. and Skanberg, A.B., A field survey on effects of exposure to noise and vibration from railway traffic, Part 1: annoyance and activity disturbance effects. Journal of Sound and Vibration, 1996. 193(1): p. 38-47.
 34. Öhström, E., Effects of exposure to railway noise: a comparison between areas with and without vibration. Journal of Sound and Vibration, 1997. 205(4): p. 555-560.
 35. Öhrström, E., et al., Resultat och slutsatser från forskningsprogrammet TVANE. Effekter av buller och vibrationer från tåg- och vägtrafik – tågbonus, skillnader och samverkan mellan tåg- och vägtrafik. Slutrapport, 2011, Göteborgs Universitet: Göteborg.
 36. Vadillo, E.G., Herreros, J., and Walker, J.G., Subjective reaction to structurally radiated sound from underground railways: field results. Journal of Sound and Vibration, 1996. 193(1): p. 65-74.

37. Klaeboe, R., et al., Vibration in dwellings from road and rail traffic. Part II: exposure-effect relationships based on ordinal logit and logistic regression models. *Applied Acoustics*, 2003. 64: p. 89-109.
38. Aasvang, G.M., Engdahl, B., and Rothschild, K., Annoyance and self-reported sleep disturbances due to structurally radiated noise from railway tunnels. *Applied Acoustics*, 2007. 68(9): p. 970-981.
39. Gidlof-Gunnarsson, A., et al., Railway noise annoyance and the importance of number of trains, ground vibration, and building situational factors. *Noise and Health*, 2012. 14(59): p. 190-201.
40. Passchier-Vermeer, W. and Zeichart, K., Vibrations in the living environment. Relationships between vibration annoyance and vibration metrics, 1998, TNO-PG, Obermeyer Plannen und Beraten: Leiden, Munchen.
41. Miedema, H.M.E. and Oudshoorn, C.G.M., Annoyance from transportation noise: relationships with exposure metrics DNL and DENL and their confidence intervals. *Environmental Health Perspectives*, 2001. 109(4): p. 409-416.
42. Turunen-Rise, I.H., Assessment of vibrations from landbased transport. A new norwegian standard. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 2001. 20(3): p. 21-28.
43. Peris, E., et al., Community reaction to railway vibration at different times of the day., in 10th International Congress on Noise as a Public Health Problem (ICBEN)2011: London, UK.
44. Peris, E., et al., Annoyance due to railway vibration at different times of the day. *Journal of the Acoustical Society of America, Express Letters*, 2012. 131(2): p. 191-196.
45. Zeichart, K., Kombinatorische Wirkungen von Bahnlärm und Bahnerschütterungen. *Zeitschrift für Lärmbekämpfung*, 1998. 45(1): p. 7-16.
46. World Health Organization, Night noise guidelines for Europe., 2009, WHO Regional Office for Europe: Copenhagen.
47. Dusseldorp, A., et al., Handreiking geluidhinder wegverkeer. Berekenen en meten, 2011, RIVM: Bilthoven.
48. Peris, E., et al., Attitudinal factors as determinants of railway vibration annoyance, in 41th International Congress on Noise Control Engineering (Inter.noise 2012)2012: New York.
49. Passchier-Vermeer, W., Vibrations in the living environment: factors related to vibration perception and annoyance, 1998, TNO Prevention and Health: Leiden.
50. RIVM and RIGO, Evaluatie Schipholbeleid: Schiphol beleefd door omwonenden, 2005, Uitgave van het ministerie van Verkeer en Waterstaat.
51. Miedema, H.M.E. and Vos, H., Demographic and attitudinal factors that modify annoyance from transportation noise. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1999. 105(6): p. 3336-3344.
52. Breugelmans, O.R.P., Stellato, R.K. and Poll, R. van, Blootstelings-responsrelaties voor geluidhinder en slaapverstoring. Een analyse van nationale gegevens., 2007, RIVM: Bilthoven.
53. Blettner, M. et al., Traditional reviews, meta-analyses and pooled analyses in epidemiology. *International Journal of Epidemiology*, 1999. 28: p. 1-9.
54. Cargovibes: Attenuation of ground-borne vibration affecting residents near freight railway lines. [cited 2013 28 March 2013]; Available from: <http://www.cargovibes.eu/home>.
55. Waddington, D. et al., Human response to vibration in residential environments (NANR209). Final project report, 2011, DEFRA: London.

56. Condie, J .and Steele, A., Human response to vibration in residential environments (NANR209).Ttechnical report 5: analysis of social survey findings, 2011, DEFRA: London.
57. Janssen, S.A. et al., Trends in aircraft noise annoyance: the role of study and sample characteristics. Journal of the Acoustical Society of America, 2011. 129(4): p. 1953-1962.
58. Pattenden, S. et al., Methodological approaches to the analysis of hierarchical studies of air pollution and respiratory health. Examples from the CESAR study. Central European Study of Air pollution and Respiratory Health. Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology, 2000. 10(5): p. 420-426.
59. Pattenden, S., Air traffic noise and hypertension in Stockholm County. Occupational and Environmental Medicine, 2001. 58: p. 761.
60. RIVM and TNO, Hinder, slaapverstoring, gezondheids- en belevingsaspecten in de regio Schiphol. Resultaten van een vragenlijstonderzoek, 1998, RIVM: Bilthoven.
61. Franssen, E.A.M. et al., Hinder door milieufactoren en de beoordeling van de leefomgeving in Nederland. Inventarisatie verstoringen 2003., 2004, RIVM: Bilthoven.
62. Gemeente Hengelo, HengeloPanel. Resultaten 2012, peiling 3b, 2012, Gemeente Hengelo: Hengelo.
63. Gezondheidsraad, Over de invloed van geluid op de slaap en de gezondheid, 2004, Gezondheidsraad: Den Haag.

Bijlage I Verklarende woordenlijst en afkortingen

Bthi, 95%	Betrouwbaarheidsinterval. Geeft het gebied van waarden aan (interval) waarbinnen de werkelijke waarde in de onderzoeksbevolking ligt. 95% Betekent dat wanneer we het onderzoek zouden herhalen, 95 van de 100 herhalingen een resultaat geven dat binnen dat interval ligt. Betrouwbaarheid zegt iets over de nauwkeurigheid van de berekende waarden.
BTS	Beleidsregel Trillingshinder Spoor
dB(A)	Decibel, maat voor het geluidniveau. Het menselijk oor is niet even gevoelig voor geluiden bij verschillende frequenties. Om met deze frequentie-afhankelijkheid rekening te houden, gebruikt men bij het meten van geluid een filter met ongeveer dezelfde frequentie-afhankelijkheid als het menselijk gehoororgaan. Dit is een geluidfilter met de zogenaamde A-karakteristiek. Als de geluidsdrukkniveaus zijn gemeten met gebruikmaking van het A-filter, noemt men de uitkomst van het geluidniveau in dB(A).
HRVRE	<i>Human Response to Vibration in Residential Environments</i>
Hz	Hertz. Dit is een maat voor de frequentie van geluid en trillingen. Het aantal drukvariaties per seconde is de frequentie van een geluid. De frequentie bepaalt ook de toonhoogte.
IenM	Ministerie van Infrastructuur en Milieu
KB _f	Kennwerte für die Beurteilung von Erschütterungen. Blootstellingsmaat voor trillingen.
KB _f Max	De maximale KB _f -waarde die tijdens de beoordelingstijd wordt bereikt. Dit is een veelgebruikte Duitse blootstellingsmaat. Het is gelijk aan de maximale, frequentiegewogen, effectieve trillingssnelheid. Vergelijkbaar met de Nederlandse V _{max} .
KB _f Tr	KB _f -waarde, waarbij rekening is gehouden met de tijdsduur van het trillingssignaal. Vergelijkbaar met het Nederlandse V _{per} .
KB SZ	KB _f Max-waarde, gemeten in de slaapkamer.
KB WZ	KB _f Max-waarde, gemeten in de woonkamer.
Laagfrequent geluid	Geluid in het voor mensen laagst hoorbare frequentiegebied. Laagfrequent geluid is geluid met frequenties tussen 4 Hz en 100 Hz.
L _{Aeq24hr}	Het equivalente geluidniveau over een etmaal. Dit is het equivalente geluidniveau ten gevolge van blootstelling gedurende 24 aaneengesloten uren.
L _{den}	Een maat om de geluidsbelasting door omgevingsgeluid uit te drukken (Engels: <i>Level day-evening-night</i>), berekend op jaarbasis.
L _{night}	Het equivalente geluidniveau door omgevingsgeluid tussen 23 en 7 uur, berekend op jaarbasis.
MON	Mobiliteits Onderzoek Nederland
NVS	Norwegian Vibration Study
OV SAAL	Project ter verbetering van het treinvervoer tussen Schiphol, Amsterdam, Almere en Lelystad

OR	Odds Ratio. Associatiemaat die een benadering geeft hoeveel waarschijnlijker het is dat diegenen die blootstaan aan een bepaalde expositie (bv. trillingen door treinen), een ziekte of aandoening zullen krijgen dan diegenen die niet blootstaan aan de expositie.
PHS	Programma Hoogfrequent Spoorvervoer
RIVM	Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu
RR	Relatief Risico. Het relatieve risico is de verhouding tussen twee absolute risico's. Het absolute risico is de verhouding tussen het aantal keren dat iets voorvalt in een groep en het totale aantal van die groep. Het is een associatiemaat die aangeeft hoe sterk een determinant en een ziekte gebonden zijn.
RMS	Frequentiegewogen <i>root-mean-square</i> . Blootstellingsmaat (vaak een gemiddelde) voor trillingen over langere periodes of om de omvang van trillingsgebeurtenissen (<i>events</i>) uit te drukken. Deze blootstellingsmaat wordt vooral gebruikt bij continue trillingen.
RMS _{24hr}	RMS-blootstellingsmaat over een beoordelingstijd van 24 uur.
SBR-richtlijn B	Stichting Bouw Research richtlijn B. Deze richtlijn (geen wetgeving) geeft een eerste aanzet hoe om te gaan met trillingshinder, waarbij wordt aangestuurd op overleg met alle betrokken partijen om maatregelen te overwegen en te beoordelen of de hinder acceptabel is of niet.
SRS	<i>Swedish Railway Survey</i>
SURNS	<i>Spanish Underground Railway Noise Survey</i>
TVANE	<i>Train Vibration and Noise Exposure</i>
VCKB25L	Dit is de logaritme van de som van de frequentiegewogen trillingssnelheid in de woonkamer tijdens de dagperiode en de frequentiegewogen trillingssnelheid in de slaapkamer tijdens de nachtperiode.
VDV	<i>Vibration Dose Value</i> . Dit is een cumulatieve blootstellingsmaat voor trillingen over een specifieke beoordelingsperiode (in $m/s^{1,75}$). Deze blootstellingsmaat wordt vooral gebruikt als de trillingen onregelmatig voorkomen.
VDV _{b, 23:00-7:00}	VDV-waarde tijdens de nachtperiode.
VDV _{b,24hr}	VDV-waarde over een beoordelingstijd van 24 uur.
V _{max}	De hoogste, effectieve trillingssterkte gedurende de beoordelingsperiode, waarbij 2% van de treinen met de hoogste trillingsniveaus niet zijn meegeteld, aangezien ze als outliers worden gezien.
V _{per}	De gemiddelde trillingssterkte gedurende de beoordelingsperiode, gewogen naar de duur van de blootstelling.
V _{w95}	Blootstellingsmaat (in mm/s) die in Noorwegen wordt gebruikt. Het geeft het 95-percentiel van de trillingsniveaus.
WHO	Wereldgezondheidsorganisatie

Bijlage II Plan van aanpak normering trillingen

Inleiding

Op 29 juni 2010 heeft de Kamer de motie van de leden Neppérus en Jansen (32123A, nr. 124) aanvaard. In deze motie verzoekt de Kamer... *'de regering wettelijke normen te stellen voor trillingen'* door treinverkeer. De toezegging die de staatssecretaris van Infrastructuur en Milieu op 18 januari 2011 aan de Kamer (Briefkenmerk LOK 210031092) deed, luidde: *Op basis van de onderzoeksresultaten zal ik met een voorstel komen voor de toekomstige normstelling voor trillingen langs het spoor.*

Het RIVM heeft desgevraagd een onderzoeksprogramma opgesteld. Dit heeft als basis gediend voor een vervolgbrief aan de Kamer (TK 32404 nr. 54, 25-8-2011) waarin de staatssecretaris aangeeft wat er bekend is, maar vooral ook wat er nog nodig is aan kennis om betekenisvolle stappen op het gebied van wet- en regelgeving voor trillingen van railverkeer te doen. Voor de uitwerking hiervan werd de bestaande literatuur gescand sinds 1990, en is een aantal Nederlandse deskundigen geconsulteerd. Op basis hiervan wordt beschreven hoe het proces voor de totstandkoming van een normering voor trillingen van spoorverkeer verloopt en hoe de bouwstenen daarvoor verkregen worden.

Proces voor totstandkoming normen

Het vaststellen van de hoogte van een eventuele norm voor trillingen gebeurt volgens het stramien van de WHO [19]:

1. verzameling van relevante gegevens;
2. evaluatie van de gegevens in termen van de sterkte van het bewijs;
3. evaluatie van de gegevens in termen van biologische effecten, gezondheid en welzijn;
4. keuze van richt- en grenswaarden op basis van kosten-batenanalyse en/of politieke wenselijkheid (rechtvaardigheidsoverweging).

Hieraan ligt de oorzaak-effectketen ten grondslag [63]:

oorzaak-gevolgketen



De benodigde gegevens zijn in het geval van trillingen:

- blootstelling:
 - keuze trillingsmaat;
 - gegevens spoorvervoer;
 - gegevens t.b.v. overdracht (rekenmodel, bodemgesteldheid);
 - woningdichtheid langs spoor;
- welke effecten zijn te verwachten:
 - relatie trillingsmaat/effecten;
- welke maatregelen zijn mogelijk en wat zijn de kosten daarvan:
 - baten van vermeden effecten;
 - inzet maatregelen bij verschillende normniveaus.

Als deze bouwstenen verkregen zijn, zal eerst de vraag aan de orde moeten komen welke vorm van normering geschikt is voor dit specifieke probleem.

Criteria die voor deze keuze in eerste instantie van belang zijn:

- omvang en ernst van het probleem;
- mate van maatschappelijke onrust;
- politieke overwegingen.

Naast de al bestaande richtlijn van de Stichting Bouwresearch (SBR) [2] en de daarop berustende Beleidsregel Trillingen Spoorvervoer [1], formele normering op basis van de Wet geluidhinder/Wet milieubeheer, worden ook andere mogelijke normeringstelsels beschouwd. Van EU-regelgeving is op dit moment nog geen sprake. De Wet geluidhinder is recentelijk aangepast om die stap mogelijk te maken. Afhankelijk van de keuzes kan de normering worden afgerond.

Kennishiaten

Uit de verkenning van de bestaande kennis volgt dat feitelijk op alle hierboven geschetste elementen kennishiaten zijn aan te wijzen. De belangrijkste zijn in onderstaande tabel (Tabel II.1) opgesomd, waarbij is aangegeven wat nu beschikbaar is en wanneer de ontbrekende kennis beschikbaar komt/moet komen.

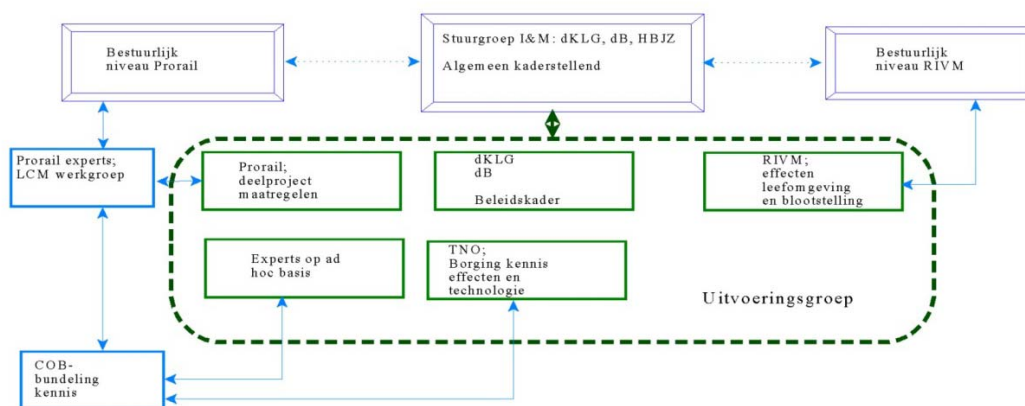
Tabel II.1 Kennishiaten

Kennis-onderwerp	Wat nu beschikbaar	Nader onderzoek	Door	Uiterlijk gereed
Voorstel Trillingsmaat(en)	Analyse Passchier-Vermeer 1995	Uitgebreidere analyse trillingsmaten	RIVM	1-11- 2012
Parameters vervoer	Register 2011			Beschikbaar
Rekenmodel (globaal)	TNO-model			Beschikbaar
Rekenmodel (eenvoudig)			Prorail	Medio 2013
Rekenmodel (complex)			Prorail	Noodzaak afhankelijk keuzenormering
Bodem	Bodemkaart		RIVM	1-11-2012
Woningdichtheid	6 ppc		RIVM	1-11-2012
Relatie trillingen-effecten	Literatuurstudie RIVM		RIVM	April 2013
Relatie trillingen-effecten		Secundaire analyse op KBV Treinbestanden (NL, UK, Duitsland)	TNO/RIVM	Medio 2013
Relatie trillingen-effecten		Survey langs nieuw tracé (geluid/trillingen) Vragenlijst Cargovibes	RIVM/TNO	Eind 2013
Inventarisatie Maatregelen	Rapport Trillingshinder door exploitatie railinfrastructuur, COB nr T130		ProRail	beschikbaar
Standaardset Maatregelen		Inventarisatie	ProRail	Medio 2013
Maatschappelijke baten		Impact Assessment	RIVM	Medio 2013
Maatschappelijke kosten		Kosten maatregelen	ProRail	Medio 2013

Organisatie, tijd en geld

Bij de voorbereiding voor de wettelijke regeling zijn drie partijen rechtstreeks betrokken: IenM, ProRail en RIVM. Binnen het IenM zijn dit de directies Spoorvervoer (DGB), KLG (DGMI) en HBJZ.

De 'dagelijkse' gang van zaken wordt bewaakt door de Kerngroep waarin, naast de direct betrokkenen, experts uit de onderzoekswereld (TNO, DHV, Movares) zitting hebben. Het geheel wordt aangestuurd door een stuurgroep onder leiding van hL&G.



Globaal organisatiemodel project regulering trillingen spoorvervoer
dd 26-11-2012

De Uitvoeringsgroep heeft tot taak de bouwstenen aan te leveren voor het besluit over het normeringstelsel. Deze zijn aangegeven onder 'Proces totstandkoming normen'. De meeste bouwstenen kunnen pas worden aangeleverd wanneer het relevante onderzoek is uitgevoerd. Dit leidt tot het volgende voorlopige tijdsschema:

Tabel II.2 Overzicht van bouwstenen

Bouwsteen	Verantwoordelijke	Gereed	Opmerkingen
Dosismaten	RIVM	1-3-2013	Afhankelijk TNO/IenM
Omvangschatting	Van Kamp (RIVM)	1-3-2013	Op basis van beschikbare gegevens wordt beschrijving gegeven van omvang blootstelling, hotspots en effecten.
Doses effectrelaties	Van Kamp(RIVM)	1-06-2013	Afhankelijk Kennisbestand Verstorings (TNO) en Cargovibes (EU)
Notitie normerings kaders	Van Vliet(BJZ)	1-6-2013	Mogelijke typen van regulering
Maatregelencatalogus	Jak (ProRail)	1-7-2013	Afhankelijk IenM
Schatting kosten en baten	Van Kamp (RIVM)	1-9-2013	Afhankelijk oplevering voorgaande producten
Beslisnotitie normering	Van den Berg(IenM)	1-11-2013	Afhankelijk bouwstenen
Beleidsbrief	Van den Berg(IenM)	1-3-2014	Op basis besluitvorming ambtelijke/politieke leiding

De onderzoeken worden voor wat betreft de uitvoering door ProRail gefinancierd door DGB, en voor wat betreft het RIVM door DKLG.

Onderzoeksprogramma in detail

Huidige kennis

A. Wet- en regelgeving

Hinder door trillingen wordt over het algemeen door aanzienlijk minder mensen ervaren dan hinder door geluid, maar als het aan de orde is, kunnen geluid en trillingen mogelijk elkaars effect versterken. Met het oog op hiermee samenhangende hinder en gezondheidseffecten zou vibratie, daar waar dat voorkomt, naast geluidaspecten onderdeel moeten vormen van planning. Op dit moment is er in Nederland geen wetgeving op het gebied van hinder veroorzaakt door trillingen. Er worden in de praktijk twee richtlijnen toegepast, de SBR-richtlijn B 'Hinder voor personen in gebouwen' en de Handreiking industrielawaai en vergunningverlening. Een belangrijk verschil tussen de SBR-richtlijn en de Handreiking is dat bij de SBR-richtlijn de functie van een gebouw bepalend is voor de vastgestelde streefwaarde, terwijl dit bij de Handreiking de locatie van het gebouw is. Op Europees niveau is, met uitzondering van Zwitserland, geen sprake van wetgeving op het gebied van trillingen. De wet in Zwitserland is primair bedoeld om mensen in gebouwen te beschermen tegen trillingshinder [Meloni, 2010], stelt limieten aan de emissie van trillingen door bronnen en maakt onderscheid tussen bestaande en nieuwe bronnen. In Noorwegen en de UK worden verschillende richtlijnen als standaard gebruikt. Deze beschrijven o.a meet- en rekenmethodieken en classificeren woonhuizen op aanbevolen grenswaarden voor trillingen veroorzaakt door weg- en railtransport. (zie ook ref. A. 1-6)

B. Blootstelling

Kwaliteit van de blootstellingsmaten

Treinverkeer, zware machines en bouwactiviteiten kunnen aanleiding geven tot trillingen in gebouwen. Trillingsbronnen oefenen een kracht uit op bijvoorbeeld de rails of de standplaats, resulterend in de opwekking van trillingen. Deze trillingen kunnen zich voortplanten door vaste (bodem, beton) en vloeibare (water) media. De voortplanting van trillingen in media is complex en afhankelijk van het type golf, de snelheid, richting, damping, reflectie en transmissie, en vereist vaak een ingewikkelde mathematische beschrijving. Hierdoor is aan de uitkomst van deze berekeningen ook een behoorlijke onzekerheidsmarge gepaard. In Nederland is het Standaard RekenModel Trillingen (SRM-T) opgezet. Dit model dient echter nog verder ontwikkeld te worden om, in combinatie met meetgegevens, betrouwbare voorspellingen te kunnen gaan doen. In de SBR-richtlijn B worden voor het bepalen van de blootstellingsmaat twee parameters gedefinieerd, de maximale trillingssterkte $V_{\max}$ en de gemiddelde trillingssterkte over een beoordelingsperiode V_{per} . De richtlijn stelt verder drie streefwaarden vast om de hinder veroorzaakt door trillingen te voorkomen of zoveel mogelijk te beperken. Bij het vaststellen van een geschikte blootstellingsmaat zal moeten worden vastgesteld tegen welk effect of welke effecten beschermd gaat worden, bijvoorbeeld hinder en/of slaapverstoring.

C. Effecten

Onderzoek naar de effecten van trillingen door treinverkeer is beperkt. Het onderzoek heeft zich vooral gericht op hinder, slaapverstoring en verstoring van andere activiteiten. Andere effecten die met trillingen in verband worden gebracht, zijn vermoeidheid, verminderde taakprestatie (*degraded work efficiency*), bewegingsziekte en gezondheidsklachten. Europees onderzoek naar effecten van trillingen (soms in combinatie met een laagfrequent geluid) door treinverkeer vond plaats in Duitsland, Noorwegen, Zweden en Spanje. Het onderzoek richtte zich afwisselend op gelijktijdige blootstelling aan geluid en op

de interactie tussen beiden of onderzocht juist exclusief de invloed van trillingen. De bevindingen spreken elkaar op een aantal punten tegen en variëren van meer effect dan, of minder effect dan geluid of een versterkend effect of juist het tegenovergestelde: hoe minder geluid, des te meer last van trillingen. In Nederland loopt op dit moment geen onderzoek naar het effect van trillingen door treinverkeer. Wel heeft een aantal studies gekeken naar het effect van spoorweglawaai (inclusief trams) op de mate van hinder en is op nationaal niveau het effect van trillingen door o.a. treinverkeer in kaart gebracht.

D. Blootstellings-responsrelaties

Er zijn geen blootstellings-responsrelaties voor trillingen beschikbaar die zijn afgeleid met behulp van een meta-analyse of gepoolde data-analyse. Wel is er een aantal individuele studies beschikbaar waarin een poging is gedaan om een blootstellings-responsrelatie af te leiden voor hinder veroorzaakt door de blootstelling aan trillingen van treinen. Voorbeelden zijn de studies van Zeichart et al. (1993) [32] en Klaeboe et al. (2003) [37]. De met behulp van deze studies afgeleide blootstellings-responsrelaties zijn niet zonder meer van toepassing op de heersende niveaus van trillingen veroorzaakt door railverkeer in Nederland. De studies zijn uitgevoerd onder een beperkte blootstellingsrange, hinder is in deze studies anders gemeten dan in Nederland wordt gehanteerd (variatie op de ISO-hindervraag voor geluid); de steekproefomvang van de studies was beperkt en er werd geen rekening gehouden met de invloed van mogelijk versturende factoren. Voor andere effecten dan hinder ontbreken blootstellings-responsrelaties.

E. Maatregelen

Over effectiviteit van maatregelen is nog weinig bekend. De volgende maatregelen zijn in verband met trillingen van belang:

- maatregelen aan het materieel, zoals wielen en remsystemen;
- maatregelen aan het spoor, de rails, verankering rails aan de dwarsliggers, het spoorbed;
- railverkeersmaatregelen, zoals snelheidsbeperkingen, beperking lengte/gewicht van treinen, timing, frequentie;
- maatregelen aan gebouwen, bouwkundige aanpassingen aan de fundering en de opbouw;
- maatregelen in het overdrachtsgebied tussen bron en ontvanger.

Het onderzoeksprogramma richt zich op effecten van trillingen door HSL- en goederentreinen. Geluidaspecten, inclusief laagfrequent geluid, moeten hierbij zoveel mogelijk worden betrokken. Hierbij wordt rekening gehouden met SWUNG I (Trillingsproductieplafonds analoog aan Geluidproductieplafonds PP's) De opzet van het onderzoek volgt de causale keten van blootstelling naar effect. Op basis hiervan kan tot slot een schatting gemaakt worden van de ziektelast en de maatschappelijke kosten en baten. Specifieke aspecten betreffen maatregelen en rekenmethodieken. Deze vormen niet de kern van deze studie, maar zijn van belang voor de inschatting van effecten en effecten van mogelijke interventies. In het onderzoek moet zoveel mogelijk aansluiting gezocht worden bij lopend onderzoek van o.a. ProRail, onderzoek op EU-niveau (Cargovibes en RIVAS), lopend onderzoek bij TNO en het reguliere project op het gebied van trillingen en laag frequent geluid. Voor wat betreft blootstellingsschattingen, maten en rekenmethodieken zal zoveel mogelijk kennis worden ontleend aan de twee EU-projecten die zich beide richten op goederenvervoer, maar waarvan de resultaten mogelijk ook toepasbaar zijn op HSL-operaties. Een probleem hierbij is wel het tijdsaspect: beide projecten zijn net van start gegaan en zullen pas

eind 2013, 2014 met definitieve resultaten komen. Resultaten van ProRail worden al in een eerder stadium verwacht.

Voor de effect kant sluit het onderzoek aan bij het RIVM lopende deelproject in het kader van het project Expertise Centrum Geluid, kennisvraag (Effecten) Trillingen [M/630650/11]. Deze kennisvraag richt zich op het onderzoeken van een verband tussen trillingsniveaus en laagfrequent geluid (LFG) enerzijds en hinderbeleving anderzijds. Opties voor en normstelling vormen eveneens onderwerp van studie. Binnen dit meerjaren project zal op basis van bestaande gegevens (bijvoorbeeld uit de GGD-monitor) voor de regio Rotterdam en Amsterdam de hinder van bromgeluiden en trillingen van meerdere bronnen in kaart worden gebracht en een belevingsonderzoek op meerdere plaatsen verder worden uitgewerkt, mogelijk aangevuld met een panelonderzoek (metingen over langere tijd). Hoewel het bereik van het project veel breder is, is met oog op de urgentie begonnen met trillingen en LFG (HSL-klachten) ten gevolge van railverkeer. Hierbij wordt voortgebouwd op de al beschikbare kennis bij VenW (IenM), TNO, etc. Ter voorbereiding zal aan de hand van het lopende literatuuronderzoek geïnventariseerd worden wat de te verwachten omvang van de blootstellingen en effecten zal zijn (zowel op korte als lange termijn), de waarde van beschikbare doses responsrelaties, belangrijkste effecten, locatiekeuze etc.

Dit is een uitgave van:

**Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu**

Postbus 1 | 3720 BA Bilthoven
www.rivm.nl