

FACULTEIT TOEGEPASTE WETENSCHAPPEN  
DEPARTEMENT BURGERLIJKE BOUWKUNDE  
AFDELING BOUWMECHANICA  
KASTEELPARK ARENBERG 40 B-3001 HEVERLEE



---

KATHOLIEKE  
UNIVERSITEIT  
LEUVEN

# STUDIE VAN DETERMINERENDE FACTOREN VOOR TRILLINGSHINDER IN GEBOUWEN DOOR WEGVERKEER

DWTC Onderzoeksprogramma Duurzame Mobiliteit  
Onderzoeksproject MD/01/040

## SAMENVATTING

Geert LOMBAERT en Geert DEGRANDE

Augustus 2001.

# 1 Inleiding

Trillingen ten gevolge van rail- en wegverkeer zijn een belangrijke vorm van hinder in de bebouwde omgeving. Het groter volume aan wegverkeer, de hogere snelheden en de grotere aslasten worden beschouwd als de oorzaken voor de toenemende trillingshinder veroorzaakt door wegverkeer. Wat de trillingshinder ten gevolge van railverkeer betreft, zijn belangrijke parameters de toenemende snelheid en de toename van het goederenvervoer. In het netwerk van de hogesnelheidslijn vormt België een belangrijke verbindingsschakel.



Figuur 1: De passage van een bus op de overgang van een wegdek uit kasseien en een bitumineus wegdek.

Trillingshinder door wegverkeer komt vooral voor in gebouwen dichtbij een weg met oneffen wegdek waarop zware vrachtwagens aan relatief hoge snelheid rijden. Na dynamische excitatie tussen de wielen en het oneffen wegdek planten golven zich voort in de grond en interageren met de fundering van structuren (figuur 1). Na attenuatie op funderingsniveau kunnen verticale trillingen versterkt worden op de eigenfrequenties van flexibele vloeren, terwijl de horizontale componenten over de hoogte van het gebouw toenemen. Dominante frequenties bevinden zich typisch in een laagfrequente band tussen 8 en 20 Hz.

In buitenlandse normen en richtlijnen worden hinder aan personen, een gestoorde werking van gevoelige apparatuur en schade aan gebouwen als mogelijke vormen van trillingshinder erkend. Een uitgebreide hinderenquête, uitgevoerd door het Morton-Williams et al. van 'Social and Community Planning Research' in Groot-Brittannië, heeft aangetoond dat 37 % van de bevolking trillingshinder door wegverkeer ervaart; 8 % ondervindt ernstige hinder. Hoewel veel meer personen (> 90 %) geluidshinder ervaren, is het opvallend dat ongeveer evenveel respondenten ernstige trillingshinder (8 %) als geluidshinder (9 %) rapporteerden. In het MIRA-2 rapport wordt het percentage van de bevolking dat in 1995 potentieel matig en ernstig gehinderd is door trillingen op respectievelijk 14.6 % en 6.8 % geraamd. In de periode tussen 1995 en 2000, heeft het Departement Leefmilieu en Infrastructuur van het Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap 51 trillingsmetingen uitgevoerd om de hinder en de mogelijkheid tot schade door verkeerstrillingen te evalueren.

De bestaande lacunes in kennis op het vlak van de fysische interpretatie van in situ meetresultaten, normgeving en de beoordeling van de effectiviteit van trillingsisolerende maatregelen rechtvaardigen aanvullend wetenschappelijk onderzoek.

## 2 Het doel van het voorgestelde onderzoeksproject

De bedoeling van het DWTC onderzoeksproject MD/01/040 'Studie van determinerende factoren voor trillingshinder in gebouwen door wegverkeer' is meer inzicht te bekomen in de relevante fysische fenomenen en het relatieve belang van de determinerende factoren voor trillingshinder ten gevolge van wegverkeer. In het kader van het programma 'Duurzame Mobiliteit van de DWTC is het huidige onderzoek het enige dat zich richt op de studie van trillingen door verkeer.

Voor de studie van de trillingen door wegverkeer wordt een prognosemodel ontwikkeld. Het model maakt gebruik van modere concepten voor de modellering van de dynamische interactie tussen de grond en de structuur en houdt rekening met een brede waaier van parameters die het voertuig, het wegdek, de wegfundering, de ondergrond en het gebouw karakteriseren. De ontwikkeling, de validatie en het gebruik van het theoretisch model steunt in belangrijke mate op de resultaten van in situ metingen. Het theoretisch model wordt gebruikt voor een uitgebreide parameterstudie waarmee meer inzicht wordt bekomen in de oorzaken (E: pressures) en de mogelijke maatregelen (E: responses) ter bestrijding van trillingshinder door wegverkeer. De ontwikkeling van dit model ondersteunt de ontwikkeling van andere modellen voor de studie van trillingshinder door onder- en bovengronds railverkeer.

In vergelijking met het projectvoorstel werden aanzienlijk grotere inspanningen geleverd voor de ontwikkeling en de experimentele validatie van de bronmodule, waarmee de trillingen in het vrije veld voorspeld worden. Daardoor kon minder aandacht besteed worden aan de studie van de interactie van het invallende golfveld en het gebouw. Dit deelprobleem werd bestudeerd tijdens een post-doctoraal verblijf van Dr. Anita Uscilowska in het kader van het DWTC programma 'Wetenschappelijke en Technologische Samenwerking met Centraal- en Oost-Europa'. De resultaten hiervan werden gepubliceerd in een onderzoeksrapport [25].

Op middellange termijn ondersteunen de resultaten van het onderzoeksproject een politiek van duurzame ontwikkeling. Het verworven technische inzicht kan zowel aangewend worden voor het formuleren van normen en richtlijnen als voor het uitwerken van meer globale beleidsmaatregelen die een reductie van trillingshinder als doel hebben. De resultaten van de uitgebreide parameterstudie geven aan in welke mate maatregelen zoals een beperking van het maximale gewicht van vrachtwagens, een snelheidsreductie, een alternatief ontwerp voor een verkeersplateau en een aanpassing van de wegsectie effectief zijn voor het bestrijden van trillingshinder.

Dit inzicht is bovendien niet alleen van belang voor de betrokken onderzoekers en de overheid, maar ook voor studiebureaus, materiaalleveranciers, aannemers en industriëlen die met de problematiek van trillingen in de bebouwde omgeving worden geconfronteerd.

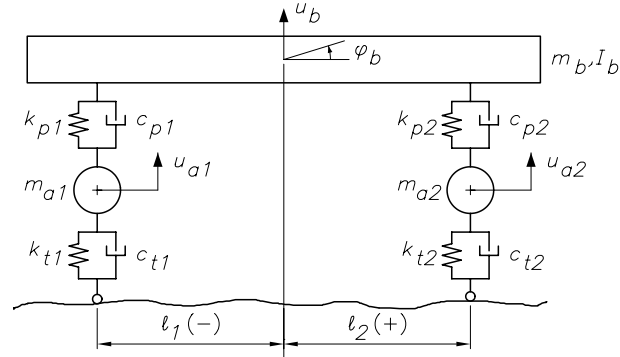
## 3 Het numerieke prognosemodel

De interactie tussen het voertuig en de weg is een gekoppeld probleem en de studie ervan vereist een gelijktijdige oplossing van de bewegingsvergelijkingen van het voertuig en de weg. Door de grote stijfheid van de weg ten opzichte van de banden, kan het probleem echter benaderend ontkoppeld worden. Hierdoor is een prognose van de vrije veldtrillingen in twee stappen mogelijk. In een eerste stap worden de bewegingsvergelijkingen van het voertuig opgelost en worden de dynamische aslasten berekend. Vervolgens worden de aslasten aangebracht op de weg en wordt de respons in het vrije veld berekend.

De dynamische component van de aslasten wordt gegenereerd door de wegoneffenheden en wordt bepaald door het oneffenheidsprofiel, de voertuigkarakteristieken en de voertuigsnelheid. Een transformatie van de horizontale coördinaat  $y$  naar een horizontaal golfgetal  $k_y$  laat toe de golfgetalinhoud

$\tilde{u}_{w/r}(k_y)$  te evalueren of de inhoud in functie van de golflengte  $\lambda_y = 2\pi/k_y$ . De golflengtes  $\lambda_y$  tussen 0.5 m en 50 m bepalen het dynamisch gedrag van het voertuig in het verticale vlak.

De voertuigmodellen die gebruikt worden voor de studie van het passagierscomfort en het rijgedrag van voertuigen zijn ook geschikt voor het berekenen van de aslasten. Deze modellen zijn samengesteld uit discrete massa's, veren en dempers (figuur 2). In het huidige onderzoek wordt gebruik gemaakt van lineaire voertuigmodellen met een beperkt aantal vrijheidsgraden.



Figuur 2: 2D 4 DOF model for a passenger car or a truck with two axles.

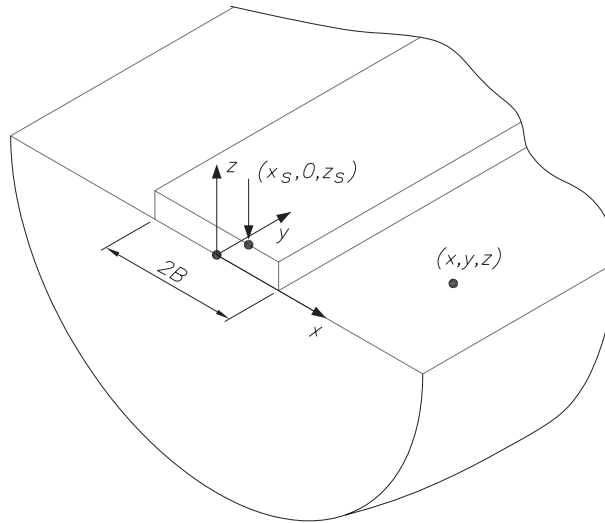
Voor lineaire voertuigmodellen, kan de frequentie-inhoud  $\hat{g}_k(\omega)$  van de aslasten berekend worden met frequentieresponsfuncties (FRF). De FRF  $\hat{h}_{f_{ku}}(\omega)$  is de aslast  $k$  bij een harmonische excitatie van as  $l$ . Twee groepen van bewegingsmodes bepalen de voertuigdynamica in het verticale vlak. Een eerste groep omvat een verticale beweging in fase van het voertuiglichaam en een as van het voertuig (E: pitch and bounce modes). Deze modes hebben een relatief lage eigenfrequentie tussen 0.8 Hz en 3 Hz. De tweede groep eigenmodes omvat een verticale asbeweging met een relatief kleine beweging van het voertuiglichaam in tegenfase (E: axle hop modes). Deze eigenmodes hebben een eigenfrequentie tussen 8 Hz en 15 Hz.

De asbewegingsmodes spelen een belangrijke rol in de generatie van verkeerstrillingen. Voor voertuigsnelheden tussen 8 m/s en 20 m/s of 30 km/u en 70 km/u, zijn de golflengtes  $\lambda_y$  die leiden tot een excitatie van de voertuigassen in het frequentiegebied van de asbewegingsmodes, gelegen tussen 0.5 m en 2.5 m.

Het weg-grond interactie probleem wordt eerst opgelost voor een last die in een vast punt van het wegdek aangrijpt. De weg wordt gemodelleerd als een oneindig lange, elastische ligger met een stijve dwarsdoorsnede aan het vrije oppervlak van een gelaagde, elastische halfruimte. Zowel buig- als torsie vervormingen van de weg worden beschouwd. De oplossing van het weg-grond interactie probleem leidt tot de berekening van de spanningen in het contactvlak tussen de weg en de grond. De respons in een punt in het vrije veld stelt dan de gezochte transferfunctie voor.

Het dynamische reciprociteitstheorema wordt toegepast voor de berekening van de respons in het vrije veld ten gevolge van de bewegende aslasten op de weg. Gebruik makend van de translatie-invariantie van de probleemgeometrie, kan de beweging van het aangrijpingspunt van de last vervangen worden door een equivalente verandering van de positie van de ontvanger.

Daar waar de respons voor een deterministisch gekende, bewegende bron goed gekend is, wordt in de literatuur geen oplossing gegeven voor het equivalente stochastische geval. Dit is te wijten aan het feit dat, door de beweging van het aangrijpingspunt van de last, de statistische eigenschappen van de respons in een vast punt in het veld tijdsafhankelijk zijn. In het huidige onderzoek, wordt de formulering voor de respons ten gevolge van een deterministische, bewegende bron uitgebreid voor het



Figuur 3: The road-soil interaction problem.

stochastisch geval door de toepassing van de Wigner-Ville methode.

## 4 De experimentele validatie

Het opgestelde numerieke model is gevalideerd aan de hand van in situ metingen. Tijdens deze metingen werden de respons in het vrije veld en van een vrachtwagen opgemeten bij de passage over een artificiële oneffenheid. De vorm van de artificiële oneffenheid werd zo bepaald dat een relatief grote variatie van de vrije veldtrillingen met de voertuigsnelheid verwacht wordt [13]. De meting van de voertuigrespons vergemakkelijkt de interpretatie van de vrije veldmetingen, wordt gebruikt voor het bepalen van de dynamische voertuigkarakteristieken en laat toe de voorspelling van de voertuigrespons te evalueren.



Figuur 4: De passage van een DAF FT85 vrachtwagen met oplegger over de artificiële oneffenheid op het proefcircuit van DAF te Sint-Oedenrode (Nederland).

Een eerste meetcampagne werd uitgevoerd in december 1999 op het proefcircuit van DAF te Sint-Oedenrode (Nederland) [7, 24] (figuur 4). Door de samenwerking met DAF was het mogelijk om, tijdens de passage van een DAF FT85 vrachtwagen met opligger, gelijktijdig de respons van de vrachtwagen en in het vrije veld op te meten. De experimentele validatie [16] toont het belang aan van een nauwkeurige bepaling van de karakteristieken van het voertuig, de weg, de grond en de voertuigsnellheid.



Figuur 5: De Volvo FL6 vrachtwagen en de artificiële oneffenheid op de site 'de Hemptinne' van het Belgische leger te Heverlee.

In juni 2000 werd een tweede meetcampagne uitgevoerd op de 'de Hemptinne' site van het Belgische leger te Heverlee in het kader van de 'OROS European University Millennium Award' project : "Vehicle response measurements as a validation tool for a prediction model for free field traffic induced vibrations" [15, 19]. De respons van een Volvo FL6 vrachtwagen en in het vrije veld is gemeten tijdens 26 passages van de vrachtwagen over de oneffenheid met een snelheid tussen 25 km/u en 60 km/u. De snelheid werd gemeten met een GATSO 24 radar. De parameters van het voertuigmodel worden bepaald met behulp van dynamische systeemidentificatie, wegingen, informatie van de vrachtwagen-constructeur en een vergelijking van de opgemeten en voorspelde respons. Een spectrale analyse van oppervlaktegolven (E: spectral analysis of surface waves, SASW) wordt toegepast voor het bepalen van de dynamische karakteristieken van de wegverharding. Dezelfde methode wordt eveneens gebruikt voor de bepaling van de dynamische grondkarakteristieken. De resultaten van een seismische sonderingsproef (E: seismic cone penetration test, SCPT) op dezelfde site leveren complementaire informatie op over de grondkarakteristieken op een grotere diepte.

Deze metingen laten toe om zowel de voorspelling van de voertuigrespons als de voorspelling van de respons in het vrije veld na te gaan. De piekwaarden van de respons van het voertuig en in het vrije veld worden goed voorspeld. Het grootste verschil tussen de berekeningen en de metingen is de duur van het transiënte signaal dat overeen komt met de passage van de achteras over de oneffenheid. Het experimenteel waargenomen contactverlies tussen de achteras en de weg wordt niet voorspeld met het gebruikte lineaire voertuigmodel. De resultaten illustreren hoe een toename van de voertuigsnellheid leidt tot een verschuiving van de frequentie-inhoud van de voertuigrespons en de vrije veldrespons naar hogere frequenties.

De resultaten van de validatie zijn erg bevredigend en tonen aan dat het opgestelde model de elementaire fysische fenomenen weergeeft en in staat is de respons met een aanvaardbare nauwkeurigheid te

voorspellen. Het model is daarom uitermate geschikt voor een parameterstudie en het voorspellen van de trillingen in het vrije veld gegenereerd door wegverkeer.

## 5 De parameterstudie

De resultaten van de uitgebreide parameterstudie [18] laten toe de determinerende factoren voor de vrije veldtrillingen ten gevolge van wegverkeer te bepalen. Twee groepen parameters zijn bestudeerd. Een eerste groep heeft te maken met het bronmechanisme en omvat de parameters die de wegoneffenheid en de voertuigdynamica bepalen. De parameters die de weg en de grond karakteriseren behoren tot een tweede groep van parameters die de transmissie van de golven in de grond bepaalt. De invloed van de voertuigsnelheid wordt uitgebreid besproken in de experimentele validatie van het numerieke model [16, 19].

Uit de parameterstudie kan het volgende besloten worden:

- Uit de studie van de longitudinale oneffenheid in het domein van het golfgetal  $k_y$  blijkt dat de golfgetalinhoud tussen 2.5 rad/m en 12 rad/m of de golflengte-inhoud tussen 0.5 m en 2.5 m van primordiaal belang is. Een verkeersplateau met een relatief grote hoogte  $H$  en een voeg met een kleinere hoogte hebben in dit interval een vergelijkbare golfgetalinhoud. Hierdoor zijn de trillingen in het vrije veld bij de passage van een vrachtwagen over een verkeersplateau en een voeg in een wegdek eveneens van dezelfde grootteorde.
- Voor verkeersplateaus is de helling van de op-en afritten een bepalende factor. De golfgetalinhoud neemt evenredig met de hoogte  $H$  toe en steile hellingen zorgen voor een ongunstige verschuiving van de golfgetalinhoud naar grote golfgetallen. De vorm van de op-en afritten is slechts van secundair belang.
- Uit simulaties blijkt dat, voor de passage van een voertuig over een verkeersplateau, het niveau van de trillingen in het vrije veld met een factor drie toeneemt voor een toename van de voertuigsnelheid van 8 m/s tot 20 m/s [8]. De voertuigsnelheid heeft daarentegen weinig of geen invloed op de trillingen bij de passage van een voertuig over een voeg in een wegdek.
- De excitatie van de asbewegingsmodes met een eigenfrequentie tussen 8 en 15 Hz zorgt voor de generatie van verkeerstrillingen. Uit een studie van de FRF van het voertuig blijkt dat, meer dan het totale voertuiggewicht, het gewicht van de assen zelf belangrijk is. Zwaardere voertuigtypes leiden dus tot hogere trillingsniveaus, zowel in geladen als in ongeladen toestand. De stijfheid van de banden en de demping van de ophanging zijn twee andere belangrijke parameters.
- De parameters die de structuur van de wegsectie bepalen hebben weinig invloed op de trillingen in het vrije veld.
- Voor de trillingen op een grote dimensieloze afstand van de bron, speelt de materiaaldemping in de grond een belangrijke rol. Voor een homogene halfruimte zijn de trillingsniveaus omgekeerd evenredig met de stijfheid van de grond. Voor een gelaagde halfruimte zullen bepaalde frequenties in het spectrum van de bron versterkt worden, daar waar andere afgezwakt worden [23]. Voor een nauwkeurige prognose is het belangrijk dat de dynamische grondkarakteristieken tot op een voldoende diepte bepaald worden.
- Het gebruik van uitgebreide numerieke modellen ten opzichte van empirische modellen die op metingen gebaseerd zijn, biedt als voordeel dat inzicht verkregen wordt in de relevante fenomenen. Bovendien kunnen voorspellingen gemaakt worden in gevallen waarin de gelaagdheid of de materiaaldemping in de grond verschillend zijn.

## 6 Conclusie

In het kader van het DWTC onderzoeksproject MD/01/040: 'Studie van determinerende factoren voor trillingshinder in gebouwen door wegverkeer' (1 juli 1998 - 30 juni 2001) werd de meeste aandacht besteed aan de ontwikkeling van een bronmodel voor de voorspelling van de vrije veldtrillingen door wegverkeer.

Het model is gebaseerd op een wiskundige beschrijving van de fysische fenomenen die optreden bij de passage van een voertuig over een oneffen wegdek. De dynamische aslasten worden berekend op basis van de longitudinale wegoneffenheid en de voertuigdynamica. Het weg-grond interactie probleem wordt opgelost met een substructuurmethode, waarbij het model van een elastische ligger gebruikt wordt voor de weg en de grond gemodelleerd wordt als een horizontaal gelaagde halfruimte. De vrije veldtrillingen worden bepaald met het Betti-Rayleigh reciprociteitstheorema. De resultaten van een uitgebreide parameterstudie zijn vertaald in een aantal praktische conclusies en richtlijnen [18].

Twee meetcampagnes zijn uitgevoerd voor de experimentele validatie van het model. De resultaten geven aan dat een meer nauwkeurige bepaling van de grondkarakteristieken de voorkeur verdient op een verdere verfijning van het ontwikkelde model.

De verworven resultaten werden voorgesteld op een nationaal congres [12] en zeven internationale congressen [3, 5, 9, 10, 11, 14, 17, 20, 22]. Een gedetailleerde beschrijving van het prognosemodel [21] en een validatie van het model [16] werden reeds gepubliceerd in het tijdschrift 'Soil Dynamics and Earthquake Engineering'. Verder werden nog drie onderzoekspapers [4, 6, 23] aanvaard voor publicatie. Bovendien heeft het huidige onderzoek geleid tot het verwerven van een mobiel data-acquisitiesysteem ter waarde van 25000 Euro in het kader van de 'Oros European University Millennium Award' [15, 19]. De uitgebreide lijst van publicaties toont aan dat het huidige onderzoeksproject het Belgisch onderzoek op het vlak van verkeerstrillingen op een internationaal wetenschappelijk niveau gebracht heeft.

## Referenties

- [1] D. Aubry, D. Clouteau, and G. Bonnet. Modelling of wave propagation due to fixed or mobile dynamic sources. In N. Chouw and G. Schmid, editors, *Workshop Wave '94, Wave propagation and Reduction of Vibrations*, pages 109–121, Ruhr University, Bochum, Germany, December 1994.
- [2] R.W. Clough and J. Penzien. *Dynamics of structures*. McGraw-Hill, New York, second edition, 1993.
- [3] D. Clouteau, G. Degrande, and G. Lombaert. Some theoretical and numerical tools to model traffic induced vibrations. In N. Chouw and G. Schmid, editors, *Proceedings of the International Workshop Wave 2000, Wave propagation, Moving load, Vibration reduction*, pages 13–27, Ruhr University, Germany, December 2000. A.A. Balkema, Rotterdam.
- [4] D. Clouteau, G. Degrande, and G. Lombaert. Numerical modelling of traffic induced vibrations. *Meccanica*, 2001. Accepted for publication.
- [5] G. Degrande and G. Lombaert. High-speed train induced free field vibrations: in situ measurements and numerical modelling. In N. Chouw and G. Schmid, editors, *Proceedings of the International Workshop Wave 2000, Wave propagation, Moving load, Vibration reduction*, pages 29–41, Ruhr University Bochum, Germany, December 2000. A.A. Balkema, Rotterdam.
- [6] G. Degrande and G. Lombaert. An efficient formulation of Krylov's prediction model for train induced vibrations based on the dynamic reciprocity theorem. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2001. Accepted for publication.



- [7] W. Dewulf, G. Lombaert, and G. Degrande. Bepaling van de dynamische grondkarakteristieken met behulp van de SASW methode op de DAF proefbaan te Sint-Oedenrode. Internal report BWM-2000-02, Department of Civil Engineering, Katholieke Universiteit Leuven, February 2000. DWTC Programma Duurzame Mobiliteit, Project MD/01/040.
- [8] G. Lombaert and G. Degrande. Study of determining factors for traffic induced vibrations in buildings. Second biannual report BWM-1999-04, Department of Civil Engineering, Katholieke Universiteit Leuven, July 1999. DWTC Research Programme Sustainable Mobility, Research Project MD/01/040.
- [9] G. Lombaert and G. Degrande. A dynamic soil-structure interaction approach for the modelling of free field traffic induced vibrations. In G. Guidati, H. Hunt, H. Heller, and A. Heiss, editors, *7th International Congress on Sound and Vibration*, pages 2773–2780, Garmisch-Partenkirchen, Germany, July 2000.
- [10] G. Lombaert and G. Degrande. An efficient formulation of Krylov’s prediction model for train induced vibrations based on the dynamic reciprocity theorem. In G. Guidati, H. Hunt, H. Heller, and A. Heiss, editors, *7th International Congress on Sound and Vibration*, pages 2671–2678, Garmisch-Partenkirchen, Germany, July 2000.
- [11] G. Lombaert and G. Degrande. Numerical modelling and in situ measurements of free field traffic induced vibrations. In *4th International Symposium SURF 2000, Pavement Surface Characteristics*, pages 451–461, Nantes, France, May 2000. PIARC, World Road Association.
- [12] G. Lombaert and G. Degrande. Studie van determinerende factoren voor trillingshinder in gebouwen. In *Het Transport: het Milieu en de Veiligheid*, Brussels, Belgium, March 2000. Federale Diensten voor Wetenschappelijke, Technische en Culturele Aangelegenheden.
- [13] G. Lombaert and G. Degrande. Studie van determinerende factoren voor trillingshinder ten gevolge van wegverkeer. Derde halfjaarlijkse rapport BWM-2000-03, Department of Civil Engineering, Katholieke Universiteit Leuven, February 2000. DWTC Programma Duurzame Mobiliteit, Project MD/01/040.
- [14] G. Lombaert and G. Degrande. The validation of a numerical prediction model for free field traffic induced vibrations by in situ measurements. In P. Sas and D. Moens, editors, *Proceedings ISMA 25, Noise and vibration Engineering*, pages 357–364, Leuven, Belgium, September 2000.
- [15] G. Lombaert and G. Degrande. Vehicle response measurements as a validation tool for a prediction model for free field traffic induced vibrations. Report BWM-2000-08, Department of Civil Engineering, Katholieke Universiteit Leuven, September 2000. DWTC Programme Sustainable Mobility, Project MD/01/040, OROS European University Millennium Award.
- [16] G. Lombaert and G. Degrande. Experimental validation of a numerical prediction model for free field traffic induced vibrations by in situ experiments. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 21(6):485–497, 2001.
- [17] G. Lombaert and G. Degrande. The modelling of free field traffic induced vibrations by means of a dynamic soil-structure interaction approach. In *4th International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, San Diego, CA, USA, March 2001.
- [18] G. Lombaert and G. Degrande. Study of determining factors for traffic induced vibrations in buildings. Final report. Report BWM-2001-06, Department of Civil Engineering, Katholieke Universiteit Leuven, July 2001. DWTC Programme Sustainable Mobility, Project MD/01/040.

- [19] G. Lombaert and G. Degrande. Vehicle response measurements as a validation tool for a prediction model for free field traffic induced vibrations. Final report. Report BWM-2001-05, Department of Civil Engineering, Katholieke Universiteit Leuven, March 2001. DWTC Programme Sustainable Mobility, Project MD/01/040, OROS European University Millennium Award.
- [20] G. Lombaert, G. Degrande, and D. Clouteau. Deterministic and stochastic modelling of free field traffic induced vibrations. In P. Pereira and V. Miranda, editors, *International Symposium on the Environmental Impact of Road Pavement Unevenness*, pages 163–176, Porto, Portugal, March 1999.
- [21] G. Lombaert, G. Degrande, and D. Clouteau. Numerical modelling of free field traffic induced vibrations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 19(7):473–488, 2000.
- [22] G. Lombaert, G. Degrande, and D. Clouteau. Road traffic induced free field vibrations: numerical modelling and in situ measurements. In N. Chouw and G. Schmid, editors, *Proceedings of the International Workshop Wave 2000, Wave propagation, Moving load, Vibration reduction*, pages 195–207, Ruhr University Bochum, Germany, December 2000. A.A. Balkema, Rotterdam.
- [23] G. Lombaert, G. Degrande, and D. Clouteau. The influence of the soil stratification on free field traffic induced vibrations. *Archive of Applied Mechanics*, 2001. Accepted for publication.
- [24] G. Lombaert, A. Teughels, and G. Degrande. Trillingsmetingen in het vrije veld op de Daf proefbaan te Sint-Oedenrode. Internal report BWM-2000-01, Department of Civil Engineering, Katholieke Universiteit Leuven, January 2000. DWTC Programma Duurzame Mobiliteit, Project MD/01/040.
- [25] A. Uscilowska, L. Pyl, and G. Degrande. Numerical modelling of traffic induced vibrations in buildings using a dynamic soil-structure interaction analysis. Technical Report BWM-2001-02, Department of Civil Engineering, Katholieke Universiteit Leuven, March 2001. DWTC Research Programme Sustainable Mobility, Research Project MD/01/040, Science and Technology Cooperation with Central and Eastern Europe. STWW Programme Technology and Economy Research Project IWT 000152.