

# TRILLINGEN IN DE OMGEVING TEN GEVOLGE VAN WEGVERKEER

G. LOMBAERT, M.A. LAK, S. FRANÇOIS EN G. DEGRANDE

K.U.Leuven, Departement Burgerlijke Bouwkunde, Afdeling Bouwmechanica

## **Samenvatting**

*In deze bijdrage worden de trillingen in de omgeving ten gevolge van de passage van zwaar verkeer over een weg uit betonplaten besproken. Deze trillingen worden gegenereerd door dynamische excitatie van voertuigen ter plaatse van voegen of scheuren in het betonnen wegdek. In het kader van het VIS-CO project IWT 060884 'Trillingsgecontroleerd stabiliseren van betonplaten voor duurzame asfaltoverlagingen met scheurremmende lagen' wordt een model ontwikkeld voor de prognose en de beoordeling van de trillingen in de omgeving. Het model wordt gevalideerd aan de hand van in situ trillingsmetingen die onlangs werden uitgevoerd langs de N9 in Lovendegem voor en na de overlaging van de betonplaten.*

## **Résumé**

*Cette contribution traite des vibrations environnementales due au passage des poids lourds sur des routes en dalles de béton. Les vibrations sont générées par une excitation dynamique des véhicules due à la présence des joints et fissures dans le revêtement de la route. Dans le cadre du projet VIS-CO IWT 060884 'Vibration controlled stabilization of concrete slabs for durable asphalt overlaying with a crack prevention membrane' un modèle est développé pour la prédiction et l'évaluation de ces vibrations environnementales. Le modèle est validé à l'aide d'enregistrements des vibrations sur site le long de la N9 à Lovendegem avant et après rénovation de la route par la mise en œuvre d'un revêtement bitumineux sur les dalles en béton.*

## 1. Inleiding

Trillingen ten gevolge van wegverkeer zijn een belangrijke vorm van milieuhinder in de bebouwde omgeving. Trillingshinder komt vooral voor in gebouwen dichtbij een weg met een oneffen wegdek waarop zware vrachtwagens aan relatief hoge snelheid rijden. De oorzaak van de trillingen is de aanwezigheid van wegoneffenheden die ervoor zorgen dat het voertuig dynamisch geëxciteerd wordt. De wegoneffenheden kunnen enkel lokaal op de weg aanwezig zijn, zoals in het geval van verkeersplateaus of -drempels, of over de hele weg onder de vorm van een onregelmatige langsvlakheid wanneer het wegdek in slechte staat is. In het specifieke geval van een weg opgebouwd uit betonplaten zijn het vooral de hoogteverschillen tussen de platen ter plaatse van voegen en scheuren die hiervoor verantwoordelijk zijn.

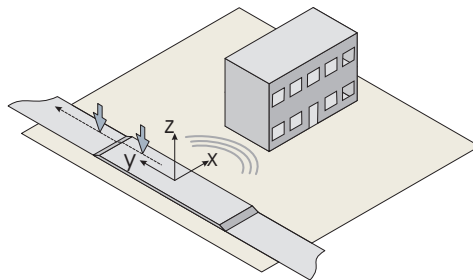
De dynamische aslasten die door het voertuig op het wegdek worden uitgeoefend zorgen ervoor dat golven in de ondergrond worden gegenereerd. Deze golven interageren vervolgens met de funderingen van nabijgelegen gebouwen. Na attenuatie op funderingsniveau kunnen verticale trillingen versterkt worden op de eigenfrequenties van flexibele vloeren, terwijl de horizontale componenten over de hoogte van het gebouw toenemen.

In normen en richtlijnen voor de beoordeling van trillingen in gebouwen in Duitsland [1, 2, 3] of Nederland [6, 7, 8], wordt een onderscheid gemaakt tussen drie vormen van trillingshinder. Bij zeer lage niveaus kan reeds een gestoorde werking optreden van gevoelige apparatuur. Zo worden bij voorbeeld zeer strenge eisen gesteld aan de maximale trillingsniveaus van procesvloeren in laboratoria voor micro-electronica. Bij hogere niveaus kunnen de trillingen als hinderlijk worden bevonden door personen. In het frequentiegebied tussen 1 Hz en 80 Hz worden trillingen ervaren als mechanische trillingen van het lichaam. Bij hogere frequenties tussen 16 Hz en 250 Hz, worden de trillingen van bouwonderdelen waargenomen onder de vorm van herafgestraald geluid of structuurgeluid. Tenslotte kan bij zeer hoge niveaus schade optreden aan structurele of niet-structurele onderdelen. Het herhaaldelijk optreden van trillingen kan immers aanleiding geven tot vermoeiing van bouwdelen of differentiële zettingen in de ondergrond na een groot aantal belastingscycli.

In het kader van verschillende onderzoeksprojecten werd door de Afdeling Bouwmechanica van de K.U.Leuven een methodologie ontwikkeld voor de voorspelling van trillingen en herafgestraald geluid in gebouwen ten gevolge van weg- en railverkeer. In het volgende wordt deze methodologie kort besproken. Een lijst van publicaties met een gedetailleerde beschrijving van de modellen kan gevonden worden op de website van de Afdeling Bouwmechanica: [www.kuleuven.be/bwm](http://www.kuleuven.be/bwm).

## 2. Numerieke prognose van trillingen ten gevolge van verkeer

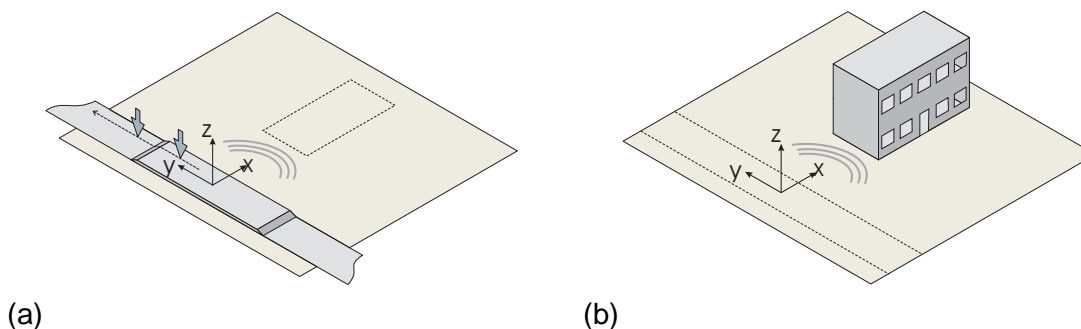
De prognosemodellen die aan de Afdeling Bouwmechanica van de K.U.Leuven worden ontwikkeld zijn gebaseerd op mechanische modellen voor de trillingsbron, de ondergrond en het nabij gelegen gebouw. Deze modellen kunnen toegepast worden om de impact van trillingen in de omgeving te begroten bij de planning van nieuwe weg- en spoorinfrastructuur of bij belangrijke wijzigingen in de bestaande situatie. Een evaluatie van de verwachte trillingsniveaus is ook noodzakelijk bij de inplanting van nieuwe gebouwen dicht bij bestaande weg- of spoorinfrastructuur, in het bijzonder in het geval van gebouwen zoals laboratoria voor micro-electronica of concert- en theatergebouwen waarvoor een controle van de optredende niveaus cruciaal is. In deze nieuwe situaties waar geen metingen voorhanden zijn van de trillingen in de bestaande toestand is het essentieel te beschikken over numerieke prognosemodellen. Verder kunnen deze modellen ook nuttig ingezet worden voor parameterstudies, die toelaten een beter inzicht te verwerven in de relevante fysische fenomenen en de determinerende factoren.



Figuur 1: De voorspelling van trillingen in gebouwen ten gevolge van de passage van een voertuig over een verkeersdrempel.

Bij de voorspelling van trillingen in gebouwen (figuur 1) kunnen drie deelproblemen worden onderscheiden: de karakterisatie van de (bewegende) bron, golfvoortplanting in de grond en de interactie tussen het invallend golfveld en de structuur. Golfvoortplanting in de grond is cruciaal als koppelende factor tussen de bron en de ontvanger. De ondergrond wordt gemodelleerd als een horizontaal gelaagde, lineair elastische halfruimte. Deze veronderstelling is courant in de literatuur over dynamische grond-structuurinteractie. De reden hiertoe is pragmatisch: de resulterende vergelijkingen zijn lineair en het superpositiebeginsel is van toepassing. Dit laat het gebruik toe van efficiënte berekeningsmethodes gebaseerd op integraaltransformaties.

Verder wordt aangenomen dat het invallende golfveld niet wordt beïnvloed door de aanwezigheid van de structuur. Deze aanname, die klassiek is bij de seismische analyse van structuren, is enkel geldig indien de structuur voldoende ver van de bron is gelegen in vergelijking tot de golflengte van de golven in de grond. Dit laat toe het oorspronkelijk probleem (figuur 1) op te splitsen in twee deelproblemen (figuur 2): (1) de berekening van het invallend golfveld en (2) de berekening van de respons van de structuur.



Figuur 2: De voorspelling van trillingen in gebouwen ten gevolge van de passage van een voertuig over een verkeersdrempel in twee stappen: (a) de berekening van het invallend golfveld en (b) de berekening van de respons van de structuur..

In het kader van het onderzoeksproject DWTC project MD/01/040 'Studie van determinerende factoren voor trillingshinder in gebouwen' werd een prototype bronmodel ontwikkeld voor de voorspelling van de trillingen in het vrije veld ten gevolge van wegverkeer. Dit bronmodel werd in het STWW project 2000/000152 'Traffic induced vibrations in buildings' uitgebreid voor het geval van treinverkeer en gekoppeld aan een ontvangermodel voor het gebouw. Recent werd in het kader van het SBO project IWT 030175 'Structural damage due to dynamic excitations: a multi-disciplinary approach' het ontvangermodel uitgebreid voor de evaluatie van schade ten gevolge van zeer hoge trillingsniveaus bij de passage van één voertuig of door de accumulatie van zettingen na een groot aantal passages.

In het kader van het VIS-CO project IWT 060884 'Trillingsgecontroleerd stabiliseren van betonplaten voor duurzame asfaltoverlagingen met scheurremmende lagen', in samenwerking met het Opzoekingscentrum voor de Wegenbouw (OCW), wordt de methodologie geïmplementeerd in een gebruiksvriendelijk programma voor de prognose van de trillingen ten gevolge van de passage van zwaar verkeer op een weg uit betonplaten. De prognose gebeurt in twee stappen. In een eerste stap wordt, aan de hand van de voornoemde numerieke modellen, een schatting gemaakt van de trillingssnelheid in het vrije veld. Vervolgens wordt in een tweede stap de voorspelde trillingssnelheid getoetst aan grenswaarden uit normen en richtlijnen voor de evaluatie van hinder voor personen en schade aan gebouwen. Er wordt hierbij verondersteld dat de trillingen in het vrije veld reeds een goede inschatting toelaten van de trillingsniveaus in een gebouw op dezelfde locatie.

De prognose van de trillingssnelheid in het vrije veld wordt gevalideerd aan de hand van in situ trillingmetingen. Deze metingen werden recent uitgevoerd bij de renovatie van de N9 in Lovendegem. In het volgende worden deze metingen kort besproken. Meer details zijn te vinden in het meetrapport [4].

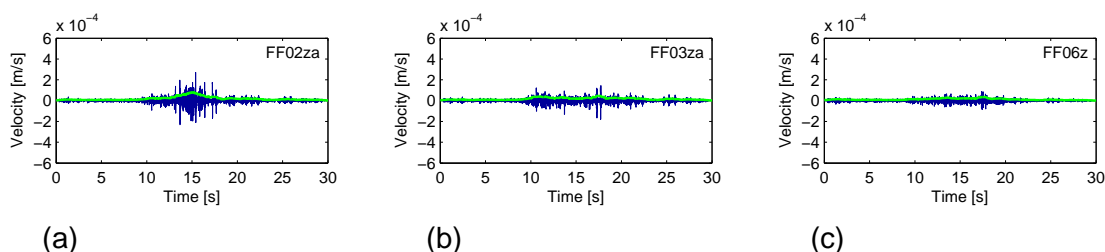
Tijdens de renovatie van de N9 werd de weg voorafgaandelijk aan de overlaging gestabiliseerd door de weg te beuken. Deze techniek wordt vaak niet toegepast uit vrees voor schade aan nabijgelegen gebouwen ten gevolge van hoge trillingsniveaus. Daarom

wordt in het kader van het voornoemde onderzoeksproject eveneens het beuken als bron van trillingen in de omgeving bestudeerd. Dit wordt als belastingsgeval opgenomen in het prognosemodel, zodat in concrete gevallen vooraf een inschatting gemaakt kan worden van de impact van het beuken op de omgeving. Het prognosemodel voor beuken zal gevalideerd worden aan de hand van in situ metingen die tijdens de renovatiewerken aan de N9 zijn uitgevoerd. Voor een uitgebreide bespreking van de meetresultaten wordt verwezen naar het overeenstemmende meetrapport [5].

### 3. In situ trillingsmetingen langs de N9

In april 2008 werd een gedeelte van de gewestweg N9 van Gent naar Eeklo gerenoveerd. Hierbij werd het oorspronkelijke wegdek uit betonplaten gebeukt, en vervolgens gestabiliseerd en bedekt met een asfaltoverlaging. De renovatie van de N9 bood daarom een uitstekende gelegenheid voor het uitvoeren van in situ trillingsmetingen voor en na de asfaltoverlaging van het betonnen wegdek. Aan de hand van deze metingen kan dus nagegaan worden of (1) de gemeten trillingsniveaus bij de passage van verkeer over het oorspronkelijke wegdek overeenstemmen met de voorspellingen en (2) de reductie van de trillingsniveaus door de renovatie van het wegdek correct wordt voorspeld.

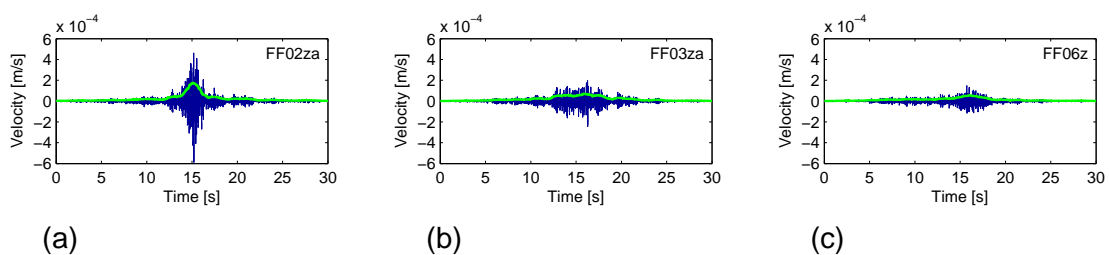
Tijdens deze metingen werd de trillingssnelheid in het vrije veld opgemeten op verschillende afstanden van de weg tijdens de passage van een Volvo FL180 vrachtwagen. De vrachtwagen was geïnstrumenteerd, waardoor naast de trillingen in het vrije veld, ook de versnellingen van de assen en het chassis van de vrachtwagen werden gemeten. De simultane meting van de respons van de vrachtwagen en in het vrije veld laat toe een beter inzicht te verwerven in de excitatie van het voertuig door onregelmatigheden in de langsvlakheid van de weg en de resulterende trillingen in het vrije veld. Voor de renovatie van de weg werden de trillingen opgemeten voor 34 passages van de vrachtwagen, bij snelheden tussen 30 km/u en 70 km/u. Na de renovatie van de weg werden 21 passages opgemeten met gelijkaardige voertuigsnelheden.



Figuur 3: Tijdsverloop (blauw) en voortschrijdende effectieve waarde (groen) van de verticale trillingssnelheid in het vrije veld op (a) 8 m, (b) 16 m, en (c) 48 m van de as van de weg bij een passage van de vrachtwagen aan een snelheid van 30 km/u op de weg met betonplaten.

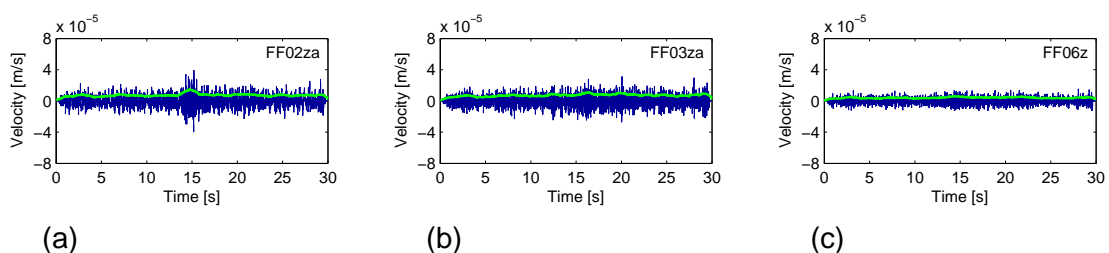
Figuur 3 toont de verticale trillingssnelheid in 3 punten in het vrije veld gelegen op een meetlijn loodrecht op de weg bij een passage van de vrachtwagen aan een snelheid van 30 km/u op de weg met betonplaten. In het signaal op 8 m van de weg (figuur 3a) zijn een

aantal duidelijke pieken te onderscheiden die overeenstemmen met de passage van de voor- of achteras van de vrachtwagen over een voeg of scheur in het wegdek. Verder is te zien hoe het trillingsniveau toeneemt en maximaal wordt op het tijdstip  $t=15$  s wanneer de vrachtwagen zich ter hoogte van de meetlijn bevindt. Na de passage neemt de afstand tussen de vrachtwagen (bron) en het meetpunt in het vrije veld (ontvanger) weer toe en neemt het trillingsniveau af. De maximale waarde van de trillingsnelheid is ongeveer 0.25 mm/s, en boven de waarde van 0.10 mm/s die als drempel geldt voor waarneming door personen. Op grotere afstanden van de weg (figuren 3b en 3c), nemen de trillingen af in grootte en neemt de tijdsduur toe. Dit is het gevolg van het feit dat de relatieve verandering van de afstand tussen het voertuig (bron) en het meetpunt (ontvanger) in het beschouwde tijdsinterval kleiner wordt.



Figuur 4: Tijdsverloop (blauw) en voortschrijdende effectieve waarde (groen) van de verticale trillingsnelheid in het vrije veld op (a) 8 m, (b) 16 m, en (c) 48 m van de as van de weg bij een passage van de vrachtwagen aan een snelheid van 70 km/u op de weg met betonplaten.

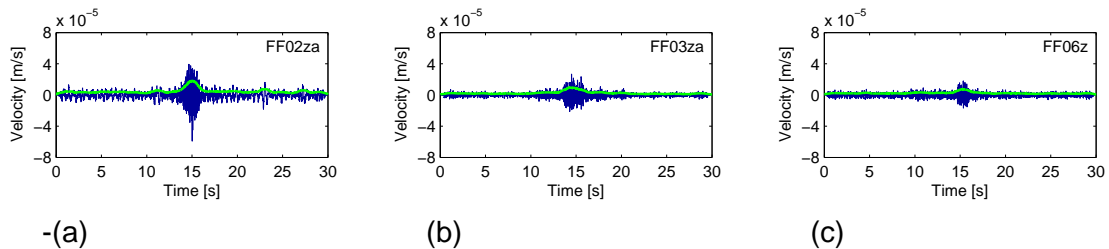
Figuur 4 geeft de trillingsnelheid in het vrije veld bij een passage van de vrachtwagen aan een snelheid van 70 km/u op de weg met betonplaten. Op 8 m van de weg (figuur 4a) zorgt de toename van de voertuigsnelheid voor een toename van de maximale trillingsnelheid en een vermindering van de duur van de trilling. Op grotere afstanden van de weg (figuren 4b en 4c), is de invloed van de voertuigsnelheid op de amplitude van de trillingen minder groot.



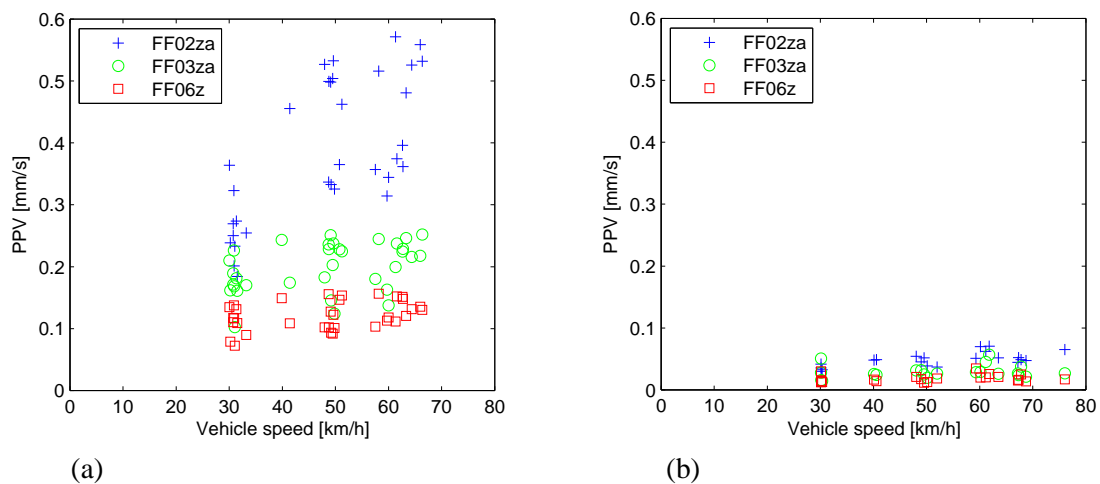
Figuur 5: Tijdsverloop (blauw) en voortschrijdende effectieve waarde (groen) van de verticale trillingsnelheid in het vrije veld op (a) 8 m, (b) 16 m, en (c) 48 m van de as van de weg bij een passage van de vrachtwagen aan een snelheid van 30 km/u op de weg na asfaltoverlaging.

Figuur 5 geeft de trillingsnelheid in het vrije veld bij een passage van de vrachtwagen aan een snelheid van 30 km/u op de weg na asfaltoverlaging. Deze metingen gebeurden tijdens werken aan de fietsstroken op de N9, waardoor de opgemeten trillingen tijdens enkele van de passages ook een bijdrage bevatten van deze wegwerkzaamheden. Omwille van de sterke reductie van de trillingsniveaus in het veld zijn de schalen in figuur 5 anders dan deze

in figuren 3 en 4. De sterke reductie van de trillingen bij passage door de asfaltoverlaging en de aanwezigheid van andere trillingsbronnen verklaren waarom op deze figuren de passage van de vrachtwagen moeilijk te onderscheiden is. De passage is beter zichtbaar in het tijdsverloop van de trillingsnelheid bij een snelheid van 70 km/u (figuur 6), waar het achtergrondniveau ten gevolge van andere trillingsbronnen kleiner is.



Figuur 6: Tijdsverloop (blauw) en voortschrijdende effectieve waarde (groen) van de verticale trillingsnelheid in het vrije veld op (a) 8 m, (b) 16 m, en (c) 48 m van de as van de weg bij een passage van de vrachtwagen aan een snelheid van 70 km/u op de weg na asfaltoverlaging.



Figuur 7: Piekwaarde van de trillingsnelheid in het vrij veld in functie van de voertuigsnelheid op een afstand van 8 m (+), 16 m (o) en 48 m (□) van de weg (a) voor en (b) na de asfaltoverlaging.

De resultaten van de metingen in deze drie meetpunten in het vrije veld worden samengevat in figuur 7, waar de piekwaarde van de trillingsnelheid (E: Peak Particle Velocity, PPV) in het vrije veld wordt gegeven in functie van de voertuigsnelheid voor (figuur 7a) en na (figuur 7b) de overlaging. Uit de resultaten in figuur 7a kan besloten worden dat de invloed van de voertuigsnelheid op de piekwaarde van de trillingsnelheid bij passage op de weg uit betonplaten vooral groot is op korte afstand van de weg. Op grotere afstanden van de weg is de toename van de piekwaarde met de voertuigsnelheid eerder beperkt. Omwille van het feit dat voor de resultaten na overlaging (figuur 7b) dezelfde schaal is gekozen, is het moeilijk op te maken wat de invloed is van de voertuigsnelheid na overlaging. Uit de numerieke resultaten blijkt echter dat ook in dit geval de invloed van de voertuigsnelheid beperkt is op

grotere afstanden van de weg. Een vergelijking van de resultaten in figuren 7a en 7b geeft duidelijk weer dat de overlaging van de weg leidt tot een sterke reductie van de trillingsniveaus. Dit is het gevolg van het feit dat de langsvlakheid van de weg na overlaging veel minder onregelmatigheden vertoont dan deze van het oorspronkelijke betonnen wegdek.

#### **4. Besluit**

In deze bijdrage worden de trillingen in de omgeving bij de passage van zwaar verkeer op een weg uit betonplaten besproken. In het kader van het VIS-CO project IWT 060884 'Trillingsgecontroleerd stabiliseren van betonplaten voor duurzame asfaltoverlagingen met scheurremmende lagen' wordt een numeriek model voor de prognose van de trillingen in de omgeving geïmplementeerd in een computerprogramma.

Om de voorspelde trillingsniveaus te valideren werden recent in situ trillingsmetingen langs de N9 in Lovendegem uitgevoerd. Hierbij werd simultaan de dynamische respons van een vrachtwagen en in het vrije veld gemeten. De metingen werden uitgevoerd voor en na de renovatie van het betonnen wegdek aan de hand van een asfaltoverlaging. Aan de hand van deze metingen kan dus nagegaan worden of de gemeten trillingsniveaus bij de passage van verkeer over het oorspronkelijke wegdek overeenstemmen met de voorspellingen en of de reductie van de trillingsniveaus door de renovatie van het wegdek correct wordt voorspeld. Tijdens de renovatie van de N9 werd het betonnen wegdek voorafgaandelijk aan de overlaging gebeukt. Hierdoor konden, naast de eerder vermelde metingen tijdens de passage van verkeer, ook de trillingen tijdens het beuken van de weg worden gemeten. Deze metingen worden gebruikt ter validatie van het belastingsgeval beuken in het prognosemodel.

#### **Dankbetuiging**

De in situ trillingsmetingen langs de N9 werden uitgevoerd in het kader van het VIS-CO project IWT 060884 'Trillingsgecontroleerd stabiliseren van betonplaten voor duurzame asfaltoverlagingen met scheurremmende lagen', in samenwerking met het opzoekingscentrum voor de wegenbouw (OCW). De auteurs wensen het IWT te danken voor de financiële steun.

De auteurs wensen ook ir. Pieter De Winne van het Agentschap Wegen en Verkeer, afdeling Oost-Vlaanderen, te danken voor zijn medewerking bij de organisatie van de metingen.



## Referenties

- [1] Deutsches Institut für Normung. DIN 4150 Teil 1 (Norm-Entwurf): Erschütterungen im Bauwesen, Grundsätze, Vorermittlung und Messung von Schwingungsgrößen, 1999.
- [2] Deutsches Institut für Normung. DIN 4150 Teil 2: Erschütterungen im Bauwesen, Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden, 1999
- [3] Deutsches Institut für Normung. DIN 4150 Teil 3: Erschütterungen im Bauwesen, Einwirkungen auf bauliche Anlagen, 1999.
- [4] M.A. Lak, G. Lombaert, S.A. Badsar, E. Reynders, and G. Degrande. Simultaneous vehicle and free field response measurement, during the passage of a truck before and after road renovation. Report BWM-2008-15, Department of Civil Engineering, K.U.Leuven, October 2008. IWT-Project VIS-CO 060884.
- [5] M.A. Lak, E. Reynders, G. Lombaert, and G. Degrande. Vibration measurement during the cracking of concrete slabs by means of a multi-head breaker. Report BWM-2008-16, Department of Civil Engineering, K.U.Leuven, October 2008. IWT-Project VIS-CO 060884.
- [6] Stichting Bouwresearch. SBR deel A: Schade aan gebouwen door trillingen: meet- en beoordelingsrichtlijn, 2002.
- [7] Stichting Bouwresearch. SBR deel B: Hinder voor personen in gebouwen door trillingen: meet- en beoordelingsrichtlijn, 2002.
- [8] Stichting Bouwresearch. SBR deel C: Storing aan apparatuur door trillingen: meet- en beoordelingsrichtlijn, 2002.