

VTN: een nieuwe meet- en analysemethode voor bron scheiding bij railverkeersgeluid

dr. E. Verheijen, dott. ing. M. Paviotti, ir. E. van Haaren MTD
AEA Technology Rail BV, Postbus 8125, 3503 RC Utrecht
e-mail: edwin.verheijen@nl.aeat.com, marco.paviotti@nl.aeat.com, rik.vanhaaren@nl.aeat.com

VTN: a new measurement and analysis method for separation of railway noise sources

Abstract

VTN is a measurement and analysis method that separates the noise radiated by the train from the noise radiated by the track. The Vibro-acoustic Track Noise method uses a small number of vibration signals from the rails and sleepers to calculate the vibration energy of the track. The sound radiated by the track is then calculated by the aid of track features like rail type, sleeper type and track type. Hereafter the sound propagation is calculated to a point at a short distance from the track (typically 7.5 m), taking account of the absorptive properties of the ground. If at that distance also the total noise is measured, it is possible to subtract the track noise from it to retrieve the vehicle noise.

Thus, VTN is a hybrid method as it combines vibration signals obtained by measurement and noise creation and propagation by calculation. Unlike separation methods based on array or antenna measurements, VTN requires specific a priori knowledge of the source distribution, and before and after a measurement session the track must be accessed. The measurement equipment, however, is considerably less expensive and more compact, whilst the analysis method is rather simple and does not suffer from resolution problems near the wheel/rail contact.

VTN is developed and validated during the STAIRRS European project. This project has prepared measurement techniques to characterise track and vehicle noise. This enables the attribution of the responsibility of noise creation to the track maintainer on the one hand and the train operator on the other hand. VTN has demonstrated its capabilities in the assessment of noise control measures. Other applications are acceptance testing and the collection of emission data (monitoring).

1. Inleiding

Het verminderen van de geluidemissie van railverkeer richt zich steeds meer op bronmaatregelen. Zo stimuleert het thans lopende Innovatieprogramma Geluid [1] de implementatie van kansrijke bronmaatregelen die de plaatsing van traditionele geluidschermen overbodig maken. De geluidbronnen in het railverkeer bestaan enerzijds uit geluidafstralende delen aan de treinen (wielen, motor, hulpapparatuur, etc.) en aan het spoor (spoorstaven, dwarsliggers). Omdat het beheer van de componenten die het geluid afstralen bij verschillende partijen ligt, en omdat bronmaatregelen het meest effectief zijn bij de dominantste bronnen, dient zich de vraag aan hoeveel lawaai er geproduceerd wordt door de trein enerzijds en door het spoor anderzijds.

Om een nauwkeurig antwoord te geven op deze vraag was het tot voor kort noodzakelijk een modelstudie uit te voeren, bijvoorbeeld met het engineering software TWINS [2]. Het gebruik van deze software vereist gedetailleerde kennis van spoordynamica van de gebruiker. Het bepalen van de waarden van sommige invloedrijke modelparameters, zoals de effectieve

stijfheid van het beddingplaatje tussen spoorstaaf en dwarsligger, is bijvoorbeeld niet eenvoudig. TWINS geeft bovendien alleen antwoord op de zojuist gestelde vraag voor zover de deelbijdragen van het *rolgeluid* gescheiden moeten worden. Tractiegeluid, remgeluid en aerodynamisch geluid worden niet beschouwd.

Door middel van metingen met microfoonarrays, zie bijvoorbeeld [3] en [4], is het wel mogelijk de belangrijkste bronnen van een passerende trein te localiseren. Niet alleen de bronhoogte, ook de posities van de bronnen langs trein kunnen worden vastgesteld. Echter, juist het nauwkeurig splitsen van het *rolgeluid* tussen wiel en spoorstaaf is vanwege de beperkte resolutie van deze meetmethode niet mogelijk. Bovendien is de inzet van deze apparatuur (microfoons en analysemiddelen) kostbaar.

In het Europese project STAIRRS (2000-2002, zie [5]) is een meet- en analysemethode ontwikkeld en gevalideerd die het mogelijk maakt een betrekkelijk nauwkeurige scheiding van spoor- en voertuiggeluid te verkrijgen. Deze methode, *Vibro-acoustic Track Noise* (kortweg VTN), gebruikt een klein aantal versnellingsopnemers in het spoor, waarmee de trillingsenergie van het spoor kan worden berekend gedurende een treinpassage. Het door het spoor afgestraalde geluid wordt vervolgens berekend met behulp van zichtbare spoorkenmerken als dwarsliggertype en bovenbouwtype. Deze berekening maakt gebruik van formuleringen die ook in de TWINS software zijn ingebed [2]. Hierna wordt de geluidsoverdracht berekend naar een punt op korte afstand van het spoor (typisch 7,5 m) rekeninghoudend met de absorptie-eigenschappen van de bodem. Indien op die afstand ook het (totale) geluid wordt gemeten, kan door het spoorgeluid hiervan af te trekken tevens het treingeluid worden vastgesteld.

2. Meetmethode

De meetmethode die voor VTN-methode wordt gebruikt, is gebaseerd op het meetprotocol dat in het STAIRRS-consortium is vastgesteld om een gedetailleerde spoor- en voertuigkarakterisatie te faciliteren [6]. Figuur 1 geeft een overzicht van de posities voor de versnellingsopnemers en microfoon. De microfoon M1 wordt op 7,5 meter afstand geplaatst van het hart van het spoor, op een hoogte van 1,2 m boven de kop van de spoorstaaf; deze meetpositie is in overeenstemming met het nieuwe Reken- en Meetvoorschrift Railverkeerslawaaï [7].

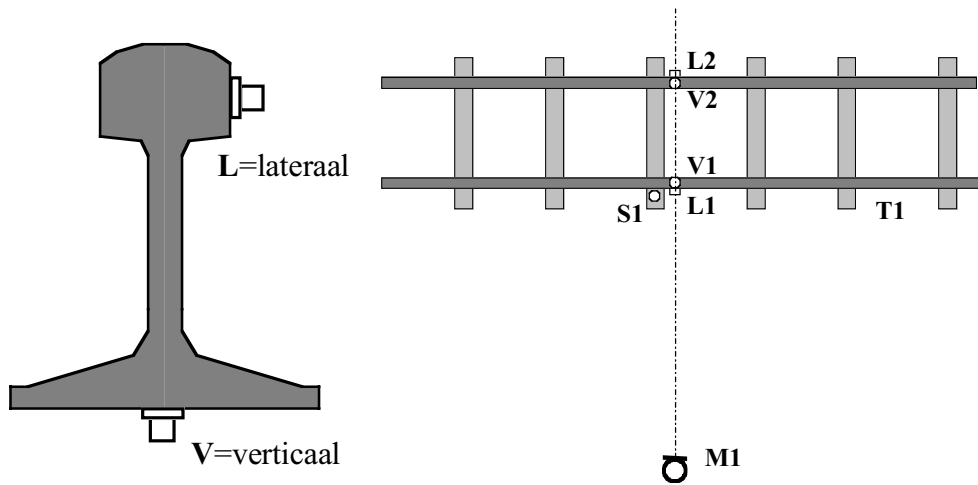
Vier versnellingsopnemers worden op beide spoorstaven in verticale (V1 en V2) en horizontale richting (L1 en L2) aangebracht, en wel midden tussen de dwarsliggers. Als er, bijvoorbeeld bij een (ballastloos) betonspoor, geen of te weinig ruimte onder de voet van de spoorstaaf is om de verticale opnemers te monteren, mogen deze op de voet zo dicht mogelijk bij het lijf worden bevestigd. Tevens wordt een versnellingsopnemer S1 op een van de dwarsliggers aangebracht, dichtbij de spoorstaafbevestiging. In geval van betonspoor wordt S1 op 1/3 van de breedte van de betonplaat geplaatst.

Als hulpmiddel bij de analyse is een triggersignaal T1 aan te bevelen dat pulsen geeft bij elke wielpassage. Verder voorziet het STAIRRS meetprotocol in een tweede microfoon M2 op 1,75 m van het hart van het spoor (ter hoogte van de kop van de spoorstaaf). Deze microfoon is niet essentieel voor VTN, maar kan wel worden gebruikt om een overdrachtscorrectie-spectrum te bepalen (zie §4).

Behalve deze signalen worden de volgende zichtbare spoorkenmerken gebruikt in de analyse:

- spoorstaaftype (in Nederland doorgaans UIC54)
- bovenbouwtype (ballast- of betonplatenspoor)
- dwarsliggertype (hout, beton monoblok of beton biblok)

- dwarsliggerafstand (in Nederland doorgaans 60 cm)



Figuur 1: Plaatsing van de versnellingsopnemers en microfoon bij een VTN-meting.

3. Analysemethode

De meetsignalen worden verwerkt tot equivalente tertsbandspectra, waarbij wordt gemiddeld over de passagetijd. De versnellingspectra a_{rms} worden geïntegreerd tot snelheid v_{rms} :

$$v_{\text{rms}} = a_{\text{rms}} / 2\pi f \quad (1)$$

waarin f de frequentie voorstelt.

Per spoorstaaf worden twee lijnbronnen gedefinieerd, één voor de verticale trillingen en één voor de laterale trillingen. Het geluidveld dat door de laterale trillingen in de spoorstaaf wordt afgestraald, heeft grofweg een dipoolkarakter. Het rechtopstaande smalle lijf is hiervoor verantwoordelijk. De voet van de spoorstaaf dat het leeuwendeel van de verticale trillingen afstraalt, veroorzaakt in eerste instantie ook een dipoolveld. Dit veld wordt echter verstoord door reflecties van de ballast en het voertuig, zodat van enige afstand bezien een monopool lijnbron resteert. Ook de dwarsliggers worden opgevat als een lijnbron met een bepaald effectief oppervlak A per strekkende meter spoor.

Aan elk van deze lijnbronnen wordt een specifieke akoestische energie toegekend per meter spoor. Het geluidvermogen is gelijk aan de akoestische energie die per seconde geproduceerd wordt door een uniform trillend vlak volgens

$$W_{\text{source}} = \sigma \cdot A \cdot v_{\text{rms}}^2 \cdot \rho \cdot c \quad (2)$$

met daarin de volgende grootheden

σ = afstraalrendement

ρ = luchtdichtheid

A = effectief oppervlak per meter

c = geluidsnelheid in de lucht

Voor het afstraalrendement wordt voor de dwarsliggers die van een plaat in een *baffle* genomen:

$$\sigma = \frac{1}{1 + \left(\frac{f_{cs}}{f}\right)^2} \quad (3)$$

met kritieke frequentie $f_{cs} = \frac{c}{\sqrt{2\pi wl}}$, waarin wl breedte maal lengte van de bron voorstellen.

Voor het afstraalrendement van de spoorstaven wordt een op numerieke wijze verkregen spectrum gehanteerd van een oneindig lange trillende balk [8]. Het afstraalrendement hangt af van de hoogte en breedte van de spoorstaaf.

Nu het bronvermogen bekend is, kan ook de geluiddruk op enige afstand van het spoor worden berekend. Voor de lijnbronnen geldt in het vrije veld

$$p_{\text{rms}}^2 = (W \cdot \rho \cdot c / 2\pi d) \cdot Q_{\vartheta} \quad (4)$$

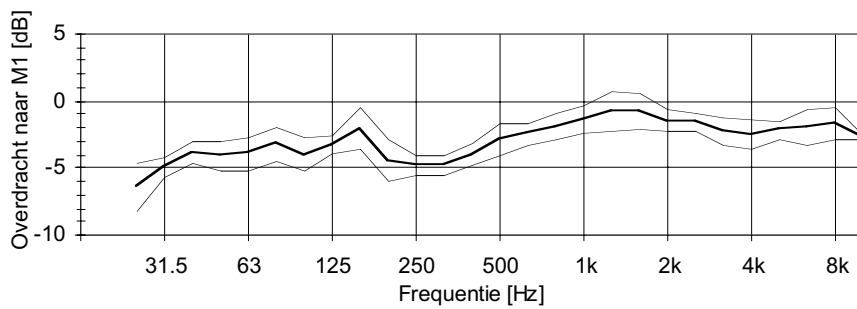
waarin d de afstand is van bron tot ontvanger, en Q_{ϑ} een richtfactor. $Q_{\vartheta} = 1$ voor monopolen en $Q_{\vartheta} = 2 \cos^2(\vartheta)$ voor dipolen; ϑ is de hoek waaronder de ontvanger staat.

4. Bodemreflecties

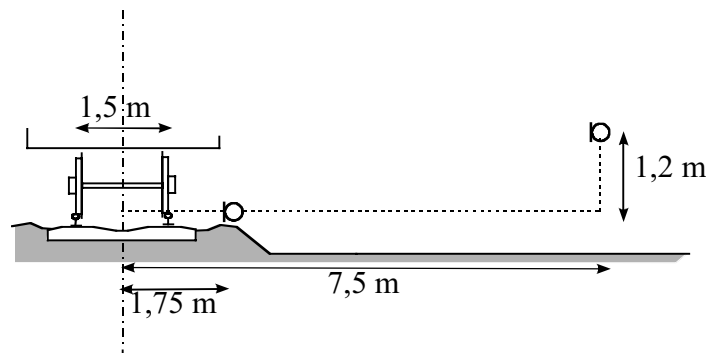
In de praktijk geldt de vrije-veldsituatie niet voor het spoor. Ballastbed, wagen en eventueel het schouwpad (het pad langs het spoor) kunnen zorgen voor reflecties. Op iets grotere afstanden van het spoor kunnen tevens variaties optreden in de overdracht vanwege verschillen in bodemgesteldheid (gras, zand, talud, sloot). In het algemeen wordt, bij de standaardmeetpositie van 7,5 meter, de variatie in geluidniveaus tussen verschillende meetlocaties ten gevolge verschillen in bodemgesteldheid klein verondersteld, zie bijvoorbeeld de typekeuringsnorm voor spoorvoertuigen prEN ISO 3095:2001. Er moet dan wel een aantal omgevingsvoorwaarden zijn voldaan: recht spoor, minder dan 1 m bodemreliëf, meetpositie niet tussen de sporen, geen reflecterende objecten in het bron-ontvanger gebied.

Op dit moment neemt VTN voor de dichtsbijzijnde spoorstaaf een vrije-veldoverdracht aan. Voor de verder weg gelegen spoorstaaf wordt behalve het directe geluid ook een reflectie aan ballast en voertuigbodem (en andersom) meegenomen. In de overdrachtsfunctie van deze reflecties wordt het absorptiespectrum van de ballast (of betonplaat) meegenomen.

Momenteel wordt een alternatieve methode onderzocht. Hierbij wordt de geluidoverdracht naar de ontvangerpositie gemeten in plaats van berekend. De overdracht wordt dan bepaald als het verschil tussen het geluiddruk spectrum van een extra microfoon dichtbij het spoor (op 1,75 m) en dat van de microfoon op 7,5 m. Figuur 2 geeft de overdracht van dit extra meetpunt tot het bestaande meetpunt M1. De meetopstelling is geschetst in Figuur 3. Het spectrum is het gemiddelde van 6 meetlocaties; ook de spreiding tussen deze locaties is weergegeven. Per meetlocatie is daartoe van enkele tientallen treinpassages het verschilspectrum tussen de beide microfoons berekend. Het overdrachtsspectrum is genormeerd ten opzicht van de afstandsverzwakking in het vrije veld, bij een overdracht van een ontvanger op 1,75 m naar een ontvanger op 7,5 m, vanuit twee lijnbronnen ter hoogte van de spoorstaven. Deze vrije-veld-afstandsverzwakking bedraagt ca. 7,2 dB. Voor het implementeren van deze alternatieve overdrachtsbepaling in VTN wordt nog onderzocht wat de invloed van de nabijheidseffecten op de overdracht is, en hoe hiervoor gecorrigeerd kan worden.



Figuur 2: Correctie voor overdracht van brongebied naar meetpunt M1 (7,5 m).



Figuur 3: Meetsituatie bij de bepaling van de overdrachtscorrectie van Figuur 2.

5. Emissiebijdrage van de voertuigen

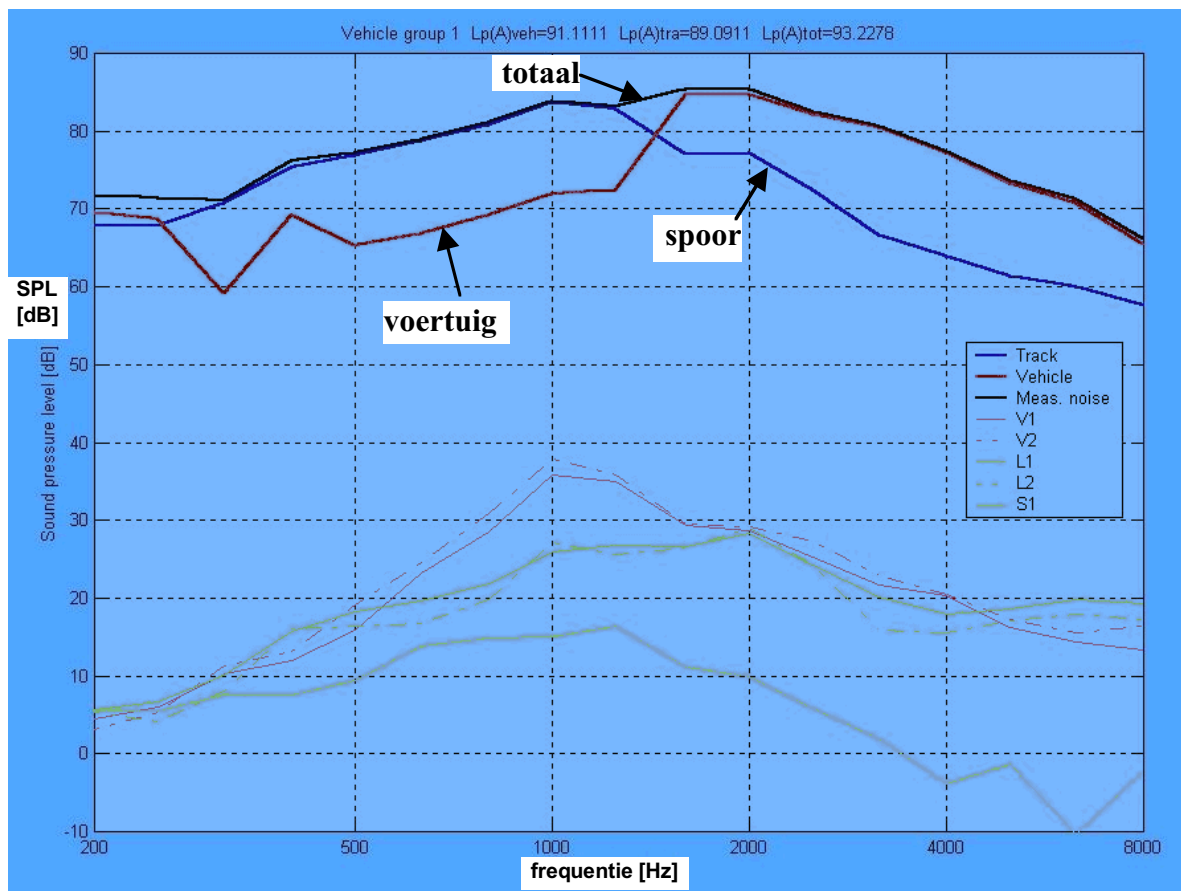
Nu de spoorbijdrage op 7,5 m is berekend, kan de voertuigbijdrage worden geschat door de spoorbijdrage af te trekken van een gemeten totale geluid.

Deze werkwijze is overigens gevoelig voor kleine rekenfouten: in het frequentiebereik waar het spoor dominant is, wordt de voertuigbijdrage vrij onnauwkeurig. In die tertsbanden waar het totale (gemeten) geluidsniveau lager is dan de berekende spoorbijdrage, wordt de spoorbijdrage gesteld op het totale (gemeten) geluidsniveau $-0,3$ dB, en de voertuigbijdrage op -12 dB.

In toepassingen waar de *overall* spoor- en voertuigbijdragen (dus de $L_{A,eq}$'s) als belangrijkste resultaten gelden, is de invloed van rekenfouten echter klein. De relatief grote fout die gemaakt kan worden in tertsbanden met een laag berekend niveau werkt immers nauwelijks door in het gesommeerde niveau.

6. Resultaten

Van de VTN-methode is een programma vervaardigd voor gebruik op een PC. Het programma berekend uit de in §2 genoemde meetsignalen en spoorkenmerken de spoor- en voertuigbijdragen. Figuur 4 laat een voorbeeld zien van de uitvoerspectra. Duidelijk is te zien dat het voertuig vanaf circa 1,6 kHz de geluidemissie domineert, terwijl het spoor juist beneden die frequentie de grootste bijdrage levert. De figuur laat onderin ook de versnellingsspectra van spoorstaven en dwarsligger zien.



Figuur 4: Gescheiden geluidspectra van het VTN-programma.

7. Validatie

De methode en de software is getest in een speciale validatiecampagne in STAIRRS in 2001. In deze campagne werd op verschillende meetlocaties aan dezelfde proeftrein gemeten. Bij de analyse golden de volgende aspecten van aandacht:

- consistentie tussen de passagemetingen per voertuig en per locatie
- de spoorbijdrage mag niet systematisch hoger zijn het gemeten (totale) geluidniveau
- de spectrale vorm en de onderlinge verhouding van de spoor- en voertuigbijdragen in relatie tot typische met TWINS berekende spectra van de deelbronnen.

Omdat de VTN-methode zwaar leunt op de kennis die bij de ontwikkeling van TWINS in de loop der jaren is opgedaan, verbaast het niet dat de resultaten zeer consistent zijn, zowel onderling als in vergelijking met TWINS. Alleen in het frequentiegebied waar het voertuig niet dominant is (doorgaans tot 2 kHz), worden afwijkingen van meer dan 2 dB per tertsbands geconstateerd voor de voertuigbijdrage. Op de $L_{A,eq}$'s van de deelbronnen zijn de afwijkingen tussen TWINS en VTN echter weer klein, tot maximaal 1,5 dB(A).

Vanzelfsprekend is een consistent resultaat niet hetzelfde als een gevalideerde methode. Bij het valideren speelt echter de volgende moeilijkheid: wat is de waarheid? De waarheid over de deelbijdragen van spoor en voertuig is hier (nog) ongekend, maar we kunnen wel meer zekerheid over de juistheid van VTN verkrijgen door de resultaten ervan te vergelijken met nog 2 andere in STAIRRS ontwikkelde methoden: PBA [9] en MISO [10]. Beide methoden gebruiken hetzelfde STAIRRS-meetprotocol als VTN. De PBA-methode karakteriseert spoor

en voertuigen op basis van ruwheidsexcitatie en overdrachtsfuncties (van excitatie naar geluid). In bijzondere gevallen is ook scheiding van geluidbijdragen van spoor en voertuig mogelijk met deze methode. De MISO-methode is evenals VTN een scheidingsmethode, maar maakt enerzijds gebruik van coherentie tussen spoorstaaftrillingen en geluid, en anderzijds van het feit dat gedurende de treinpassage niet alle deelbronnen steeds even actief geluid afstralen.

In de genoemde validatiecampagne is op een drietal spoorlocaties gemeten aan een proeftrein met drie wezenlijk verschillende voertuigen, o.a. een reizigersrijtuig en een typische goederenwagon, zie [5]. De spoorlocaties verschilden in bovenbouwconstructie. Twee locaties hadden UIC60 rails en monoblok betonnen dwarsliggers, de derde locatie had houten dwarsliggers en een kleiner type spoorstaaf. Op een van de eerste twee locaties waren bovendien raildempers aangebracht (deze dempen de railtrillingen en dus ook het geluid). De andere locatie met betonnen dwarsliggers, maar zonder raildempers, gold als referentielocatie omdat deze spoorconstructie in Europa het meest wordt toegepast. Diverse passagemetingen bij 2 treinsnelheden (60 en 120 km/h) zijn geanalyseerd.

Uit een vergelijking van de $L_{A,eq}$'s van de deelbijdragen is gebleken dat de spoorbijdragen minder dan 2 dB(A) verschillen tussen deze drie methoden. De methoden waren bovendien in vrijwel alle gevallen unaniem in het aanwijzen van ofwel het spoor, ofwel het voertuig, als grootste geluidbron. Zo was het reizigersrijtuig op de referentielocatie steeds stiller dan het spoor, terwijl een typische goederenwagon steeds luider dan het spoor was.

Op basis van deze vergelijking zijn de volgende uitspraken over de nauwkeurigheid van VTN (in relatie tot de andere 2 methoden) gerechtvaardigd:

- VTN bepaalt de spoorbijdrage binnen $\pm 1,5$ dB(A) nauwkeurig;
- de voertuigbijdrage heeft een lagere nauwkeurigheid naarmate het voertuig stiller is dan het spoor;
- als het voertuig meer lawaai maakt dan het spoor (volgens VTN), is de nauwkeurigheid voor het voertuig het hoogst, doch niet beter dan ± 2 dB(A).

Voor de meeste situaties hoeft een beperkte nauwkeurigheid van de voertuigbijdrage niet problematisch te zijn, omdat het niet belangrijk zal zijn hoeveel het voertuig *precies* stiller is dan het spoor. Daar waar het voertuig luider is dan het spoor, is een nauwkeurige voertuigbijdrage wel van belang, en geeft VTN ook een redelijk nauwkeurige voorspelling.

8. Toepassingen

Vanuit de Europese Unie is het ontwikkelen van scheidingsmethoden gestimuleerd om alvast klaar te zijn met de techniek die separate toetsing van de emissie van spoor en voertuig mogelijk maakt. Voor de (nabije) toekomst zien we daarom als toepassingen van de VTN-methode

- typekeuringsmetingen;
- toetsing aan emissie-eisen.

Overigens dient voor een volledige karakterisatie van het spoor en het voertuig, bijvoorbeeld omwille van het toewijzen van de verantwoordelijkheid voor te luide sporen of voertuigen aan respectievelijk de spoorbeheerder en de vervoerder, aanvullend aan het gebruik van VTN ook de railruwheid en wielruwheid bepaald te worden.

Toepassingsgebieden die nu al de interesse van beleidsmakers, spoorbeheerders en vervoerders hebben zijn

- verzamelen van emissiewaarden en monitoring;
- onderzoek naar bronmaatregelen.

Met name in deze laatste toepassing heeft VTN al zijn diensten bewezen bij het selecteren van en het verkrijgen van inzicht in bronmaatregelen, o.a. in het Innovatieprogramma Geluid [1]. Het vertalen van gemeten geluidniveaus en -reducties naar andere spoor situaties en andere voertuigtypes blijkt eenvoudiger en nauwkeuriger met behulp van VTN en de aanvullende inzichten uit het STAIRRS-project.

De situaties waarin VTN zonder meer kan worden ingezet zijn

- ballastspoor, al dan niet uitgerust met raildempers:
- spoor- en tramvoertuigen, al dan niet uitgerust met wioldempers of schorten. Overigens worden tractiegeluid, remgeluid en aerodynamische geluid van bijvoorbeeld de pantograaf door VTN automatisch aan het voertuig toegekend.

Voor metingen aan sporen met geluidschermen is een ter plaatse gemeten geluidoverdrachtsfunctie noodzakelijk. VTN-metingen aan lage geluidschermplaten die op zeer korte afstand van het spoor staan (*low barriers*) zijn niet mogelijk omdat de geluidoverdrachtsfunctie dan niet adequaat bepaald kan worden.

Verder dient te worden vermeld dat het gebruik van het VTN/STAIRRS-meetprotocol geen noodzakelijke voorwaarde is voor VTN. Elke andere meetmethode die spectrale informatie oplevert van de versnellingsniveaus van de spoorstaven (en eventueel de dwarsliggers) en geluidniveaus op 7,5 m afstand kan in principe worden gebruikt voor de VTN-analysemethode. Ook een flinke hoeveelheid historische data kan dus alsnog met VTN worden geanalyseerd.

Conclusies

De VTN-methode maakt het mogelijk op eenvoudige manier de spoor- en voertuigbijdragen aan het passagegeluid van elkaar te scheiden. De methode gebruikt hiervoor enkele versnellingsignalen van rails en dwarsliggers en geluidsignalen gemeten op 7,5 afstand van het spoor.

De VTN-methode is in eenvoudig te bedienen software geïmplementeerd. De methode heeft zijn nut reeds bewezen bij het selecteren van bronmaatregelen en het verkrijgen van inzicht in de werking van de maatregelen. Daarnaast kan VTN worden ingezet bij het toewijzen van de verantwoordelijkheid voor het spoorgeluid en het voertuiggeluid aan respectievelijk de spoorbeheerder en de vervoerder.

Dankbetuiging

De Vibro-acoustic Track Noise methode is door AEAT ontwikkeld in het Europese project STAIRRS (Work Package 2). De projectpartners waren ERRI, ISVR, TNO-TPD, Politecnico Torino, Psi-A, en SNCF. De auteurs zijn hun voormalige collega Peter van Tol, tegenwoordig werkzaam bij HITT (Apeldoorn), erkentelijk voor het ruwe idee dat uiteindelijk leidde tot VTN.

Literatuur

1. Innovatieprogramma geluid voor weg- en spoorverkeer, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, juni 2002.
2. D.J. Thompson, B. Hemsworth, N. Vincent, Experimental validation of the TWINS prediction program for rolling noise, part1: description of the model and method, *Journal of Sound and Vibration*, 1996 (193), pp.123-135.
3. T.C. van den Dool, en M.M. Boone, Microphone T-array technology for moving noise source measurements, *Proc. Internoise*, Nice, 2000.
4. B. Barsikow, Bestimmung und Analyse des Geräuschs von Güterwagen auf dem Streckennetz der Niederländischen Staatsbahn, rapport 95/7, *Akustik-Data*, 1996, Berlijn.
5. E. Verheijen e.a., STAIRRS Deliverable 11, Part 4 Direct roughness measurements and Vibro-acoustic Track Noise method, AEA Technology Rail BV, STR23TR130902AEA1, september 2002.
6. E. Verheijen e.a., STAIRRS deliverable D11, Part 7 Measurement Protocol, Excel Form and Vehicle Label, AEA Technology Rail BV, STR23TR130902AEA3, september 2002.
7. Reken- en Meetvoorschrift Railverkeerslawaaï, versie 2002, Ministerie van Verkeer en Waterstaat.
8. D.J. Thompson, Comparison of 2D and 3D rail radiation models, *Silent Track Technical Document*, 80213/2/ISVR/T/rl_radn.doc, aug. 1999.
9. M.G. Dittrich, e.a., Methodiek en software voor akoestische karakterisering van railvoertuigen en spoorconstructies, NAG wetenschappelijke bijeenkomst, Jaarbeurs Utrecht, 4 juni 2003.
10. F. Létourneaux e.a., Environmental railway noise: a source separation measurement method for noise emissions of vehicle and track, *Proceedings of Forum Acousticum Sevilla*, nov. 2002