

Methoden van analyse en beoordeling

Lichaamstrillingen in lesvrachtwagens (1)

Drs. A.A. van 't Veld
Natuurkundewinkel RU Utrecht

Summary

Exposure of lorry instructors to whole-body vibration was measured according to the guidelines of ISO 2631/1. Various methods for analysis and evaluation are compared. The concept of defining the relative contribution to the vector sum of acceleration in all three directions is introduced.

Inleiding

De momenteel meest gangbare vorm voor het meten en beoordelen van lichaamstrillingen in voertuigen is ISO 2631/1 (1985). In de 25 jaar sinds de eerste versie hiervan (ISO, 1964) heeft deze norm een aanzienlijke ontwikkeling doorgemaakt; recente wijzigingen dateren van 1974, 1978, 1982 en 1985. Ondanks deze voortgaande aanpassingen is er nog geen eenduidigheid over analyse- en beoordelingsmethode van trillingssignalen. Dit bemoeilijkt een eenduidige waardering van trillingsblootstellingen. In dit eerste van twee artikelen komen daarom de volgende vragen aan de orde:

Volgens welke procedure dienen de analyse en de beoordeling van trillingssignalen te worden uitgevoerd? Integrale of specifieke analyse? Mono- of tri-axiale beoordeling? De beantwoording van deze vragen is toegespitst op onderzoek waarvan in het tweede artikel (Van 't Veld, 1989) verslag wordt gedaan, namelijk onderzoek naar de blootstelling van instructeurs in lesvrachtwagens aan schokken en trillingen en de invloed van wegdek en stoel op het trillingsniveau.

Methode

Meetomstandigheden

Metingen zijn uitgevoerd in vier lesvrachtwagens in vier verschillende

plaatsen. In elke vrachtwagen is tijdens twee lesritten het trillingsniveau gemeten op de rechterstoel, de rijdersstoel van de instructeur. De gedetailleerde gegevens van vrachtwagens, ritten en dergelijke zijn vermeld in het tweede artikel. Bij aanschaf van alle wagens zijn de standaardstoelen voor de rijder vervangen door luchtgeveerde exemplaren van hetzelfde type als de standaard bestuurdersstoel.

Meetapparatuur

De lichaamstrillingen zijn gemeten met een Brüel & Kjær 4322 tri-axiale zitting-versnellingsopnemer die op de zitting van de instructeursstoel is aangebracht. Bij de wagens 2, 3 en 4, die zijn voorzien van stoelen van een gelijk type, zijn tevens de ingaande trillingen van het stoelframe in de z-richting gemeten. Hiertoe is met bijeen een Brüel & Kjær 4366 versnellingsopnemer op het frame van de stoel aangebracht. De signalen van de versnellingsopnemers zijn na versterking door 4 Brüel & Kjær ladingsversterkers met een TEAC R-71 7-kanaals FM-recorder op band opgenomen. Tijdens de ritten is op de band commentaar ingesproken over snelheid, wegdek etc. Gedurende de ritten zijn met behulp van een zelfbouw 7-kanaals piekindicator de ingangssignalen van de FM-recorder gecontroleerd. Bij oversturingen van de recorder kon dan de versterkingsfactor van de ladingsversterker(s) worden bijgesteld.

Mono- en tri-axiale beoordeling

In het laboratorium zijn naderhand met een trillingsanalyse-programma voor PC (VibStar, Ecofys Utrecht) de frequentiespectra van de opnamen bepaald en na middeling per tertsband de tertsbandspectra. Voor iedere opname is conform ISO 2631/1 (1985) voor de x-, y- en z-richting de gewogen rms (root mean square) waarde over het frequentiege-

bied 1-80 Hz berekend: a_x , a_y en a_z . Tevens is de vectorsom a_{xyz} bepaald. Bij alle analyses is de tri-axiale bijdrage, TAB, berekend:

$$TAB = (a_{xyz} - r_d * a_d) / a_{xyz}$$

Hierin is a_d de versnelling in de dominante richting, dat is de richting waarvoor volgens ISO 2631/1 de kortste maximale blootstellingstijd geldt. Verder is de richtingsfactor $r_d = 1$ als de z-richting dominant is, anders is $r_d = 1,4$.

De tri-axiale bijdrage is een maat voor de bijdrage aan de vectorsom van trillingen in de twee niet-dominante richtingen. Bij trilling uitsluitend in één richting is $TAB = 0$, bij drie gelijkmatig bijdragende trillingsintensiteiten, dus $1,4 * a_x = 1,4 * a_y = a_z$, is $TAB = (\sqrt{3} - 1) / \sqrt{3} \approx 0,423$. Van Drimmelen e.a. (1986) gebruiken een hieraan verwante grootte, de vectorsomverhoging, gedefinieerd als a_{xyz}/a_z . Dit begrip is echter minder duidelijk voor trillingen met een dominantie in de x- of y-richting. De maximale blootstellingstijd in de dominante richting is genoteerd als T_d . Deze is bepaald door lineaire interpolatie van de 'fatigue-decreased proficiency' (FDP) grenswaarden van ISO 2631/1. Evenzo is de maximale blootstellingsduur gebaseerd op de vectorsom, T_{xyz} , bepaald.

Integrale en specifieke analyse

Omdat alle trillingssignalen op de band vastliggen, biedt dit de mogelijkheid om naderhand zowel de totale trillingsbelasting van een rit te bepalen, hier integrale analyse genoemd, als ook bandfragmenten van de verschillende wegdektypen afzonderlijk te bekijken, d.i. (wegdek) specifieke analyse.

Integrale analyse is uitgevoerd voor alle ritten met uitzondering van rit 7. Tijdens rit 7 is de invloed van een aanhangwagen op het trillingsniveau onderzocht (zie het tweede artikel). Daarom zijn tijdens deze rit alleen metingen binnen de bebouwde kom uitgevoerd. De achterliggende veronderstelling is namelijk dat de invloed van een aanhanger op het trillingsniveau op de snelweg te verwaarlozen is. Om toch voor wagen 4 een zo goed mogelijk beeld van de significantie van eventuele verschillen met de andere wagens te krijgen zijn voor rit 7 de integrale resultaten achteraf benaderd op grond van specifieke analyse van rit 7, bebouwde kom en rit 8, snelweg. Weglaten van rit 7 uit de integrale resultaten geeft overigens dezelfde punten van verschil tussen de diverse wagens te zien, bij dezelfde of grotere significantie.

Specifieke analyse is uitgevoerd voor één rit per vrachtwagen: rit 2, 3, 5 en 8. Met behulp van het ingesproken commentaar is de opname achteraf verdeeld in fragmenten behorend bij een van de volgende vijf trajecttypen: (1) bebouwde kom 0-10 km/u, (2) bebouwde kom, asfalt, (3) bebouwde kom, klinkers, (4) asfalt, buiten de bebouwde kom en (5) betonplaten, buiten de bebouwde kom. Tot type (1) zijn die fragmenten gerekend waarin ten minste 30 sec. lang niet sneller dan 10 km/u werd gereden. Ook de tijdsduren doorgebracht op de verschillende trajecttypen zijn gemeten.

Per trajecttype zijn daaruit de gemiddelde trillingsniveaus a_x , a_y , a_z en a_{xyz} bepaald met behulp van kwadratische middeling (het betreft hier immers rms-waarden). Als maat voor de onnauwkeurigheid, de 'fout', in de gemiddelde trillingsniveaus is genomen de middelbare fout in het rekenkundig gemiddelde van de trillingsniveaus per trajecttype. Gemiddeld zijn per rit 15 fragmenten van 30 seconden geanalyseerd.

Na selectie van a_d zijn $T_{d,t}$, $T_{xyz,t}$ en TAB berekend. De index t geeft aan dat het hier gaat om maximale blootstellingsduren per traject.

Door de tijdsduren doorgebracht op de verschillende trajecttypen in rekening te brengen zijn de maximale blootstellingsduren aan het trillingsniveau van de totale rit, T_d en T_{xyz} , bepaald.

Resultaten

De resultaten van de integrale analyse zijn weergegeven in tabel 1.

In tabel 2 en 3 zijn de significantieniveaus weergegeven van verschillen in a_d resp. TAB tussen de vrachtwagens onderling. Deze significantieniveaus zijn bepaald door berekening met behulp van de Student t-test ($p < 0,10$, $p < 0,05$ en $p < 0,01$) van eenzijdige betrouwbaarheidsintervallen voor verschillen in gemiddelden.

De verschillen in versnellingsniveau tussen de wagens, beperkt tot de dominante richting, zijn vrijwel alle significant ($p < 0,10$) (a_x voor wagen 3 hierbij vermenigvuldigd met 1,4: $0,34 \text{ m/s}^2$); de enige uitzondering vormt het verschil tussen wagen 3 en 4. Daarentegen levert een vergelijking van de waarden van de vectorsom slechts één significant verschil ($p < 0,10$), nl. tussen wagen 3 en 4 ($p < 0,01$) (niet weergegeven). Dit wordt veroorzaakt door de spreiding in bijdrage aan de vectorsom van de beide niet-dominante richtingen. Voor wagen 2 en 3 is de TAB het ►

Tabel 1. Versnellingsniveaus en tri-axiale bijdragen, gemeten op de bijrijdersstoel tijdens rit 1 t/m 8 en berekend met integrale analyse

Rit	Wagen	a_x (m/s ²)	a_y (m/s ²)	a_z (m/s ²)	a_{xyz} (m/s ²)	TAB
1	1	0,18	0,15	0,41	0,53	0,22
2	1	0,24	0,25	0,43	0,63	0,32
3	2	0,17	0,19	0,57	0,67	0,16
4	2	0,17	0,17	0,48	0,59	0,19
5	3	0,24	0,23	0,33	0,57	0,41
6	3	0,24	0,24	0,32	0,58	0,40
7	4a	0,18	0,17	0,38	0,55	0,30
8	4	0,19	0,21	0,34	0,51	0,33

Wagen 4a: wagen 4 met aanhanger.

a_x , a_y , a_z : gewogen versnelling in x-, y- resp. z-richting.

a_{xyz} : gewogen versnelling, vectorsom.

TAB: tri-axiale bijdrage.

Bij rit 5 en 6 is de x-richting dominant, bij de overige de z-richting.

De resultaten van rit 7 zijn gebaseerd op een specifieke analyse.

Tabel 2. Significantie van de verschillen in trillingsniveau in de dominante richting (a_d) van de afzonderlijke wagens uit tabel 1

wagen nr.	2	3	4
1	0,10	0,01	0,10
2		0,05	0,05
3			x

Significantieniveaus $p < 0,01$, $p < 0,05$ en $p < 0,10$ zijn bepaald met de Student t-verdeling uit eenzijdige betrouwbaarheidsintervallen.
x: geen significant verschil aanwezig ($p < 0,10$).

Tabel 3. Significantie van de verschillen in tri-axiale bijdrage TAB van de afzonderlijke wagens uit tabel 1.

wagen nr.	2	3	4
1	x	0,10	x
2		0,01	0,05
3			0,05

Significantieniveaus $p < 0,01$, $p < 0,05$ en $p < 0,10$ zijn bepaald met de Student t-verdeling uit eenzijdige betrouwbaarheidsintervallen.
x: geen significant verschil aanwezig ($p < 0,10$).

Tabel 4. Maximale blootstellingsduren (FDP) aan de trillingsniveaus zoals gemeten op de bijrijdersstoel volgens ISO 2631, berekend volgens twee analyse- en twee beoordelingsmethoden.

Wagen	Rit	d.r.	T_d	T_{xyz}
1	1 + 2 (i)	z	6 uur 3 min ± 11 min	3 uur 35 min ± 25 min
2	3 + 4 (i)	z	4 uur 0 min ± 25 min	3 uur 10 min ± 20 min
3	5 + 6 (i)	x	7 uur 31 min ± 9 min	3 uur 38 min ± 3 min
4	7 + 8 (i)	z	7 uur 10 min ± 23 min	4 uur 0 min ± 10 min
1	2 (s)	z	5 uur 21 min ± 22 min	3 uur 6 min ± 13 min
2	3 (s)	z	4 uur 17 min ± 30 min	3 uur 1 min ± 19 min
3	5 (s)	x	6 uur 48 min ± 27 min	3 uur 37 min ± 13 min
4	8 (s)	z	7 uur 56 min ± 45 min	4 uur 56 min ± 28 min

i/s : volgens integrale/specifieke analyse.

d.r. : dominante richting.

T_d : maximale blootstellingsduur, dominante richting.

T_{xyz} : maximale blootstellingsduur, vectorsom.

De resultaten van de specifieke analyse zijn berekend op basis van een ritduur van 58 min. De opgegeven fouten zijn de middelbare fouten in het gemiddelde van twee ritten (integrale analyse) resp. de middelbare fouten in het naar trajectduur gewogen gemiddelde (specifieke analyse), beide na omrekening in increment-blootstellingsduren.

kleinst resp. het grootst. De laatste is zelfs bijna maximaal.

Uit de resultaten van de integrale analyse, tabel 1, en de specifieke analyse (zie daarvoor het tweede artikel, tabel 3) zijn de maximale blootstellingstijden T_d en T_{xyz} berekend. Deze zijn vermeld in tabel 4. Als fouten bij de integrale resp. partiële analyse zijn opgegeven de middelbare fout in het gemiddelde per wagen resp. de fout in het gewogen gemiddelde per wagen, beide omgerekend naar incrementen in blootstellingsduren.

Discussie

Vergelijking analysemethoden

De toegepaste specifieke methode is veel bewerkelijker en geeft een minder nauwkeurig totaalbeeld dan de integrale methode. Uit tabel 4 blijkt dat de berekende onnauwkeurigheden in T_{xyz} bij de integrale methode gemiddeld iets kleiner zijn dan bij de specifieke methode. De waarden van T_{xyz} komen binnen de meetonnauwkeurigheden in 3 van de 4 gevallen overeen. Hieruit kan worden geconcludeerd dat de afwijkingen van de specifieke ten opzichte van de integrale analysemethode niet groter zijn dan de inherente spreiding in uitkomsten en tevens dat eventuele systematische fouten in de specifieke analyse geen rol van betekenis spelen in de resultaten.

Beide methoden zijn dus bruikbaar. De nauwkeuriger integrale analyse verdient, als alleen een beoordeling van de totale trillingsbelasting wordt verlangd, de voorkeur.

Vergelijking beoordelingsmethoden

Beoordeling van de vrachtwagens op het versnellingsniveau in de dominante richting, tabel 1 en 2 (met a_x vermenigvuldigd met 1,4), toont wagens 2 en 3 als uitschieters naar boven resp. beneden. Deze beoordeling vertekent echter het verschil in trillingsgedrag van de wagens, omdat trillingen in de beide niet-dominante richtingen buiten beschouwing worden gelaten. Deze zijn juist voor wagen 3 het sterkst, zoals ook blijkt uit het significante verschil ($p < 0,10$) in de TAB van deze en de overige wagens, tabel 3.

Een bezwaar van vergelijking van de vectorsom met de FDP-grenswaarde is dat er zo geen rekening mee wordt gehouden dat oorspronkelijk het niveau van de FDP-limiet is bepaald met het oog op mono-axiale beoordeling, ook van situaties waarin trillingen in meer dan één richting voorkomen (Dupuis en Zerlett, 1986). Vergelijking van de vectorsom met de

FDP-grenswaarde levert dus een kortere maximale blootstellingsduur op dan oorspronkelijk was bedoeld door ISO 2631, zie bijvoorbeeld ISO 2631 (1978). Vanaf 1982 wordt tri-axiale beoordeling door ISO 2631 echter wel toegelaten. Genoemd bezwaar weegt daarom minder. Daarentegen is het vermijden van bovengenoemde vertekening (ten gevolge van verschillen in de TAB) een belangrijk argument om tri-axiale beoordeling te prefereren boven mono-axiale.

In het algemeen dient bij weergave van versnellingsniveaus van lichaamstrillingen bij voorkeur de dominante richting en de TAB te worden vermeld. Deze grootheden geven namelijk een indruk van het trillingsgedrag en tevens een goede indicatie van de bruikbaarheid van de beoordelingsmethode: hoe hoger de tri-axiale bijdrage is, des te minder bruikbaar is de mono-axiale beoordeling.

Literatuur

- Drimmelen, D. van, Burdorf, L., Musson, Y., Trillend tuig, trillen en schokken tijdens het werk, Deel I: Handleiding voor trillingsarm ontwerpen, Delft, 1986.
- Dupuis, H., Zerlett, G., The effects of whole-body vibration, Berlijn, 1986.
- International Organization for Standardization, Classification of the influence of mechanical vibration on man, Aix-les-Bains, 1964.
- International Organization for Standardization, ISO 2631-1978, Guide for the evaluation of human exposure to whole-body vibration, Genève, 1978.
- International Organization for Standardization, ISO 21631-1978/A1-1982, Guide for the evaluation of human exposure to whole-body vibration, Amendment 1, Genève, 1982.
- International Organization for Standardization, ISO 2631/1-1985, Guide for the evaluation of human exposure to whole-body vibration, Genève, 1985.
- Veld, A.A. van 't, Lichaamstrillingen in lesvrachtwagens (2). Invloed van wegdek en stoel, Tijdschrift voor toegepaste Arbowedenschap, 1989.

Addendum

In het tijdschrift voor toegepaste Arbowedenschap 2 (1989) nr. 4, zijn in het artikel 'Een eenvoudige methode voor de analyse en presentatie van audiometrische groepsgegevens', op blz. 57 in de linkerkolom, bovenaan de laatste twee formules foutief afgedrukt.

Deze dienen te luiden:

$$\sigma = \sqrt{\pi(1 - \pi)/n}$$

$$z = (\pi - P)/\sigma$$